ICS 27.180

中華民國國家標準

C N S

風力發電系統－第1部：設計要求

Wind energy generation systems －Part 1: Design requirements

CNS 草-制 1150209:2026

中華民國　年　月　日制定公布
Date of Promulgation:　-　-

中華民國　年　月　日修訂公布
Date of Amendment:　-　-

本標準非經經濟部標準檢驗局同意不得翻印

※

目錄

節次 頁次
前言 5
1. 適用範圍 6
2. 引用標準 6
3. 用語及定義 7
4. 符號及縮寫 15
4.1 符號及單位 15
4.2 縮寫 19
5. 基本要素 20
5.1 一般 20
5.2 設計方法 20
5.3 安全等級 20
5.4 品質保證 20
5.5 風力機標示 21
6. 外部條件 21
6.1 一般 21
6.2 風力機等級 21
6.3 風況 23
6.4 其他環境條件 32
6.5 電網條件 33
7. 結構設計 34
7.1 一般 34
7.2 設計方法學 34
7.3 負載 34
7.4 設計工況與負載狀況 35
7.5 負載計算 44
7.6 最終極限狀態分析 45
8. 控制系統 53
8.1 一般 53
8.2 控制功能 53
8.3 防護功能 54
8.4 控制系統失效分析 54
8.5 手動操作 55
8.6 緊急停止按鈕功能 55
8.7 手動、自動與遠端重啟 56

8.8 煞車系統 56
9. 機械系統 56
9.1 一般 56
9.2 裝配錯誤 57
9.3 液壓或氣壓系統 57
9.4 主齒輪箱 57
9.5 轉向系統 57
9.6 俯仰系統 59
9.7 機械煞車防護功能 59
9.8 滾動軸承 59
10. 電氣系統 59
10.1 一般要求 59
10.2 電氣系統之一般要求 60
10.3 內部環境條件 60
10.4 防護裝置 61
10.5 從電源斷連 61
10.6 接地系統 62
10.7 雷擊防護 62
10.8 電氣電纜 62
10.9 自激 62
10.10 雷擊電磁脈衝之防護 63
10.11 電力品質 63
10.12 電磁相容 63
10.13 電力電子轉換器系統與設備 63
10.14 扭轉/滴水環 63
10.15 集電環 64
10.16 垂直電力傳輸導體與組件 64
10.17 馬達驅動器與轉換器 65
10.18 電機 65
10.19 電力變壓器 65
10.20 低壓開關設備與控制設備 65
10.21 高壓開關設備 65
10.22 輪轂 66
11. 風力機在場地特定條件之評估 66
11.1 一般 66
11.2 場地地形複雜度及其對擾流影響之評估 66
(共 159 頁)

11.3 進行評估所需之風況 70
11.4 鄰近風力機之尾流效應評估 73
11.5 其他環境條件評估 73
11.6 地震條件評估 73
11.7 電網條件之評估 74
11.8 土壤條件之評估 74
11.9 依據風況資料評估結構完整性 75
11.10 依據場地特定條件藉由負載計算評估結構完整性 77
12. 組裝、安裝與架設 77
12.1 一般 77
12.2 規劃 78
12.3 安裝條件 78
12.4 場地進出 78
12.5 環境條件 78
12.6 文件 78
12.7 接收、搬運與儲存 79
12.8 基座/錨固系統 79
12.9 風力機組裝 79
12.10 風力機架設 79
12.11 扣件與附件 79
12.12 起重機、吊鉤及舉升設備 79
13. 試運轉、操作與維護 79
13.1 一般 79
13.2 安全操作、檢驗與維護之設計要求 80
13.3 試運轉相關之說明書 80
13.4 操作者說明手冊 81
13.5 維護手冊 82
14. 寒冷氣候 83
14.1 一般 83
14.2 低溫與結冰氣候 83
14.3 寒冷氣候之外部條件 84
14.4 結構設計 84
14.5 設計工況與負載狀況 84
14.6 控制系統 85
14.7 機械系統 85
14.8 電氣系統 85

附錄 A (規定)外部條件之設計參數 87
附錄 B (參考)特定 S 級風力機設計或場地適宜性評估之設計負載狀況 90
附錄 C (參考)擾流模型 94
附錄 D (參考)地震加載評估 99
附錄 E (參考)尾流與風電場擾流 103
附錄 F (參考)利用 MCP 法預測風力機場地風速分布 110
附錄 G (參考)極限強度分析之負載統計外插 112
附錄 H (參考)使用 Miner 法與負載外插之疲勞分析 121
附錄 I (規定)設計反應譜分析流程與要求 125
附錄 J (參考)使用 Monte Carlo 模擬方法預測熱帶氣旋極端風速 132
附錄 K (參考)結構材料安全因數之校正與測試輔助結構設計 136
附錄 L (參考)寒冷氣候：結冰氣候之評估與影響 149
附錄 M (參考)中型風力機 155
附錄 N (規定)場地地工調查與動力分析要求 158
參考資料 163

前言

本標準係依據 20251~~9~~年發行之第 4.1 版 IEC 61400-1，但同時亦審酌並加入我國特殊環境條件所適用之相關技術內容，制定成為中華民國國家標準者。

本標準係依標準法之規定，經國家標準審查委員會審定，由主管機關公布之中華民國國家標準。CNS 15176-1:2018 已經修訂並由本標準取代。

依標準法第四條之規定，國家標準採自願性方式實施。但經各該目的事業主管機關引用全部或部分內容為法規者，從其規定。

本標準並未建議所有安全事項，使用本標準前應適當建立相關維護安全與健康作業，並且遵守相關法規之規定。

本標準之部分內容，可能涉及專利權、商標權與著作權，主管機關及標準專責機關不負責任何或所有此類專利權、商標權與著作權之鑑別。

1. 適用範圍

本標準規定風力機之基本設計要求，以確保其結構完整性。其目的係在規劃使用壽命期間，提供適當程度之防護免於源自所有危害的損傷。

本標準涵蓋風力機所有次系統，如控制與防護功能、內部電氣系統、機械系統及支撐結構。

本標準適用於各種尺寸之風力機。對於小型風力機可參照 CNS 15176-2。CNS 61400-3-1 及 IEC 61400-3 系列標準，則針對離岸風力機設施提供額外要求。

本標準應與第 2 節所述之適當標準一同使用。

2. 引用標準

下列標準因本標準所引用，成為本標準之一部分。有加註年分者，適用該年分之版次，不適用於其後之修訂版(包括補充增修)。無加註年分者，適用該最新版(包括補充增修)。

CNS 11445 (系列標準)	旋轉電機
CNS 14165	電器外殼保護分類等級(IP 碼)
CNS 14674-2	電磁相容(EMC)－一般標準－第 2 部：工業環境之抗擾度規範
CNS 14804	機械安全－緊急停止功能－設計原則
CNS 14984 (系列標準)	電力變壓器
CNS 15156 (系列標準)	高電壓開關裝置及控制裝置
~~CNS 15176-3~~	~~風力機－第 3 部：離岸風力機設計要求~~
CNS 15176-4	風力機－第 4 部：風力機齒輪箱之設計及規範
CNS 15620-1	低電壓系統下設備之絕緣協調－第 1 部：原理、要求及試驗
CNS 15620-3	低電壓系統下設備之絕緣協調－第 3 部:用於污染防護之塗裝、封裝或壓塑
CNS 61400-3-1	風力發電系統－第 3-1 部－固定式離岸風力機設計要求
CNS 61400-24	風力發電系統－第 24 部：雷擊防護
CNS 61439 (系列標準)	低電壓開關裝置及控制裝置組裝品
CNS 62477-1	電力電子轉換器系統及設備之安全要求－第 1 部：通則
ISO 76	Rolling bearings − Static load ratings
ISO 281	Rolling bearings − Dynamic load ratings and rating life
ISO 2394	General principles on reliability for structures
ISO 2533	Standard Atmosphere
ISO 4354	Wind actions on structures
ISO 6336-2	Calculation of load capacity of spur and helical gears − Part 2: Calculation of surface durability (pitting)
ISO 6336-3:2006	Calculation of load capacity of spur and helical gears − Part

	3: Calculation of tooth bending strength
ISO 12494:2001	Atmospheric icing on structures
ISO/TS 16281	Rolling bearings − Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings
IEC 60034(系列標準)	Rotating electrical machines
IEC 60038	IEC standard voltages
IEC 60071-1	Insulation co-ordination − Part 1: Definitions, principles and rules
IEC 60071-2	Insulation co-ordination − Part 2: Application guidelines
IEC 60076(系列標準)	Power transformers
IEC 60204-1	Safety of machinery − Electrical equipment of machines − Part 1: General requirements
IEC 60204-11:2000	Safety of machinery − Electrical equipment of machines − Part 11: Requirements for HV equipment for voltages above 1,000 V AC or 1,500 V DC and not exceeding 36 kV
IEC 60364 (系列標準)	Low voltage electrical installations
IEC 60721 (系列標準)	Classification of environmental conditions
IEC 61400-6	Wind energy generation systems − Part 6: Tower and foundation design requirements
IEC 61439 (系列標準)	Low-voltage switchgear and controlgear assemblies
IEC 61800-4	Adjustable speed electrical power drive systems − Part 4: General requirements − Rating specifications for AC power drive systems above 1,000 V AC and not exceeding 35 kV
IEC 61800-5-1	Adjustable speed electrical power drive systems − Part 5-1: Safety requirements − Electrical, thermal and energy
IEC 62271 (系列標準)	High-voltage switchgear and controlgear
IEC 62305-3	Protection against lightning − Part 3: Physical damage to structures and life hazard
IEC 62305-4	Protection against lightning − Part 4: Electrical and electronic systems within structures

用戶用電設備裝置規則

3. 用語及定義

下列用語及定義適用於本標準。

3.1 年平均(annual average)

由 1 組足夠數量及持續時間的實測數據之平均值，作為該量的期望值之估算值。

備考：平均時間間隔宜為整數年(例:10)，以便平均去除如季節變化等不穩定效應。

3.2 年平均風速(annual average wind speed, V_{ave})

依據年平均定義之平均風速。

3.3 自動復閉週期(auto-reclosing cycle)

電網故障後斷路器跳脫至自動閉合且電路重新連接至電網之一段時間，一般從0.01 s 到數秒。

3.4 固鎖(blocking)

風力機利用不發生意外鬆脫之機械銷或其他裝置(非普通之機械煞車)，以防止諸如轉子轉軸或轉向機構之移動。

3.5 煞車(brake)

風力機可降低轉子轉速或停止旋轉之裝置。

備考：煞車可利用諸如空氣動力、機械或電子等原理運作。

3.6 特徵值(characteristic value)

具有無法取得之規定機率的數值(即 1 個不大於依規定數量之超越機率)。

3.7 複雜地形(complex terrain)

風場周圍之地形，其特點為地形之顯著變化及可能導致氣流畸變的地形障礙物。

3.8 控制功能(control functions)

風力機控制系統之功能，基於風力機及/或其環境之條件資訊，調整風力機，使維持在其運轉限制值範圍內。

3.9 控制系統(control system)

風力機實現風力機控制功能之系統，包括感測器、邏輯元件、致動器、通訊網路及電源。

備考： 控制系統之目的係藉由主動與被動方式控制風力機之運轉，並保持運轉參數在結構設計所假定之限制值範圍內。控制系統通常包含正常運轉之控制迴路、警報及停機機制，以確保不超過運轉限制值。

3.10 切入風速(cut-in wind speed, V_{in})

於無擾流之穩定風力中，風力機開始發電時，輪轂高度處之最低 10 min 平均風速。

3.11 切出風速(cut-out wind speed, V_{out})

於無擾流之穩定風力中，風力機在設計用於發電時，輪轂高度處之 10 min 平均最高風速。

3.12 設計極限值(design limits)

設計中所採用之最大值或最小值。

3.13 潛在失效(dormant failure)

於正常運轉期間，組件或系統所存在之未偵測到的失效。

3.14 下風向(downwind)

主風向量之方向。

3.15 電網(electrical power network)

電力傳輸與分配用之特定設施、變電站、線路或電纜。

備考： 本電網各部分之邊界係由適當準則所定義，如地理位置、所有權、電壓

等。

3.16 緊急停止(emergency stop)

藉由人工介入觸發使風力機迅速停機。

3.17 環境條件(environmental conditions)

可能影響風力機行為之環境特徵(風力、海拔高度、溫度、濕度等)。

3.18 外部條件(external conditions)

影響風力機運轉之因素，包括環境條件(溫度、雪、冰等)及電網條件。

3.19 極端風速(extreme wind speed)

在 1/N 之年超越機率(〝回歸期〞：N 年)下，t 秒內平均最高風速值。

備考：本標準使用回歸期 $N = 50$ 年及 $N = 1$ 年，及平均時間 $t = 3$ s 及 $t = 10$ min。較不精確之俗稱為〝存活風速〞經常被使用。然而，本標準中風力機係利用極端風速下之設計負載狀況進行設計。

3.20 失效安全(fail-safe)

產品防止其因失效而造成嚴重故障之設計特性。

3.21 陣風(gust)

風速之暫時性變化。

備考：陣風可用上升時間、幅度及持續時間表示。

3.22 水平軸風力機(horizontal axis wind turbine)

轉子之軸線本質上為水平的風力機。

3.23 輪轂(hub)

風力機葉片或葉片總成連接於轉子轉軸上之固定裝置。

3.24 輪轂高度(hub height, z_{hub})

風力機轉子掃掠面積(3.57)中心位於地形表面上之高度。

3.25 惰轉(idling)

風力機緩慢旋轉但不發電之狀態。

3.26 慣性副區(inertial sub-range)

風速擾流頻譜中，渦流逐步破碎後達到均向(isotropy)，且能量散失可忽略不計之頻率區間。

備考：在典型之 10 m/s 風速，慣性副區之頻率範圍大致在 0.2 Hz 至 1 kHz 間。

3.27 極限狀態(limit state)

結構及施加於此結構之負載的一種狀態，若負載超出此一狀態，則結構不再滿足設計要求。

備考：設計計算之目的(即極限狀態的設計要求)，係使結構達到極限狀態之機率小於該結構類型的規定值(參照 ISO 2394)。

3.28 平均風速(mean wind speed)

瞬時風速在數秒至數年之週期內平均，所得出之統計平均值。

3.29 中型風力機(medium wind turbine)

轉子掃掠面積大於 200 m^2 且不大於 1,000 m^2 之風力機，若為管道式或罩殼式風力機，以管道或罩殼入口及出口面積中較大者為準。

3.30 機艙(nacelle)

設在水平軸風力機塔架頂端，內含驅動鏈及其他元件的機殼。

3.31 電網連接點(network connection point)

對單一風力機係指輸出電纜終端，或對風力發電站則指場地匯電系統之電力匯流排連接點。

3.32 電網喪失(network loss)

斷網持續時間超過風力機控制系統中任何穿越規定之情況。

3.33 正常停機(normal shutdown)

風力機所有階段均在控制系統操控下進行之停機。

3.34 運轉限制值(operating limits)

由風力機設計者定義之一組條件，用以管制風力機控制功能之啟動。

3.35 風力機待機(parked wind turbine)

風力機處於靜止或惰轉狀態，取決於風力機之設計。

3.36 性能等級(performance level, PL)

用於規定控制系統中與安全相關部分，在可預見條件下執行安全功能能力之離散化等級。

3.37 匯電系統(power collection system)

從 1 台或多台風力機收集電力之系統。

備考：其包括連接風力機終端與電網連接點間之所有電氣設備。

3.38 輸出功率(power output)

裝置以特殊形式及為特定目的所輸出之功率。

備考：對風力機而言為其輸出之電功率。

3.39 主要層防護功能(primary layer protection function)

在具有 2 個或更多獨立層之防護系統中，可能作為風力機控制系統之一部分實施，且與具有相似目的之次要層防護功能(3.52)獨立的防護功能(3.40)。

3.40 防護功能(protection functions)

確保風力機在設計極限值內運轉之控制系統功能。

3.41 額定功率(rated power)

在特定之運轉條件下，組件、裝置或設備所能達到之功率值，通常係由製造商規定。

備考：對風力機而言，在正常運轉及外部條件下，風力機設計可達到之最大連續輸出電功率。

3.42 額定風速(rated wind speed, V_r)

在輪轂高度處及無擾流之穩定風力情況下，風力機達到額定功率時之最小風速。

3.43 瑞利分布(Rayleigh distribution, P_R)

機率分布函數。

備考：參照 3.68。

3.44 基準風速(reference wind speed, V_{ref})

用於定義風力機等級之風速基本參數。

備考 1. 其他氣候相關設計參數均可由基準風速及其他基本風力機等級參數(參照第 6 節)推導而得。

備考 2. 設計用於基準風速 V_{ref} 之風力機等級的風力機，其設計承受氣候為在輪轂高度處，50 年回歸期之極端 10 min 平均最大風速不大於 V_{ref}。

3.45 阻抗部分安全因數(resistance partial safety factor, γ_M)

此因數考量材料強度參數及阻抗模型可能存在之不利偏差/不確定度，包括阻抗模型之偏差。

3.46 旋轉取樣風速度(rotationally sampled wind velocity)

旋轉之風力機轉子上固定點的風速度。

備考：旋轉採樣風速度之擾流頻譜與正常擾流頻譜顯著不同。轉動時，葉片切穿在空間中變動的氣流。因此，所得之擾流頻譜在旋轉頻率及其諧頻處，將含有可觀的變異量。

3.47 轉子轉速(rotor speed)

風力機轉子繞其軸之轉速。

3.48 粗糙度長度(roughness length, z_0)

假設垂直風剖面隨離地面高度依對數關係變化之情況下，平均風速變為 0 時之推斷高度。

3.49 安全壽命(safe-life)

對於關鍵系統之 1 種設計特性，此系統非常難以修理或可能對生命及財產造成嚴重損害。

備考：此類系統之設計使整個系統壽命期間正常運作，而無需任何修理或檢驗。

3.50 安全完整性等級(safety integrity level, SIL)

離散等級(4 個可能等級之一)，對應於控制功能之安全完整性範圍，其中 4 為最高等級，1 為最低等級。

備考：4 個安全完整性等級的目標失效指標定義於 IEC 61508-1:2010 之表 2 及表 3。此等等級可用於指定分配至系統之安全功能的安全完整性要求。SIL 並非系統、次系統、元件或組件之固有屬性。依 IEC 61508-1 定義，〝SIL *n* 安全相關系統〞(其中 *n* 為 1、2、3 或 4)表示該系統潛在可支援具安全完整性等級高達 *n* 之安全功能。

3.51 排程維護(scheduled maintenance)

依據已制定之時程表所進行的預防性維護作業。

3.52 次要層防護功能(secondary layer protection function)

專用之防護功能，其使用 1 個獨立於主要層防護功能(3.39)，但在監測與邏輯運作方面有類似目的之層。

3.53 場地資料(site data)

有關風力機場地之環境、地震、土壤及電網等各項資料。

備考：除另有說明外，風力資料應為 10 min 樣本之統計資料。

3.54 靜止(standstill)

風力機之停止狀態。

3.55 支撐結構(support structure)

風力機之一部分，包含塔架及基座。

3.56 存活風速(survival wind speed)

構造設計所能耐受之最大風速。

備考：本標準不採用此用語，設計時可參考極端風速替代之(參照 3.19)。

3.57 掃掠面積(swept area)

轉子在做 1 次完整旋轉過程中，垂直於風向之投影面積。

3.58 擾流強度(turbulence intensity, I)

風速之標準差與平均風速的比值，係在某一特定時間內，由所測得之同一組風速資料樣本計算而得。

3.59 擾流尺度參數(turbulence scale parameter, Λ_1)

無因次縱向功率頻譜密度等於 0.05 時之波長。

備考：當$f_0 S_1(f_0)/\sigma_1^2 = 0.05$，波長定義為$\Lambda_1 = V_{hub}/f_0$。

3.60 擾流標準差(turbulence standard deviation, σ_1)

輪轂高度處擾流風速度之縱向分量的標準差。

3.61 終極極限狀態(ultimate limit state)

通常對應於最大負載承載能力之極限狀態。

3.62 非排程維護(unscheduled maintenance)

非依照已制定之時程表，而是收到有關某項目狀態之指示後所進行的維護作業。

3.63 上風向(upwind)

與主風向量相反之方向。

3.64 垂直軸風力機(vertical axis wind turbine)

轉子的軸線為垂直之風力機。

3.65 韋伯分布(Weibull distribution, P_W)

機率分布函數。

備考：參照 3.68。

3.66 風力發電站(wind power station)

風場(wind farm)

1 群或數群風力機。

3.67 風剖面(wind profile)

風切律(wind shear law)

假定風速隨離地面高度變化之數學表示式。

備考：常使用之剖面為對數剖面[公式(1)]或冪次律剖面[公式(2)]。

$$V(z) = V(z_r) \times \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (1)$$

$$V(z) = V(z_r) \times \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha} \quad (2)$$

式中， $V(z)$ ：高度 z 處之風速

z ：離地面之高度

z_r ：用於擬合風剖面之離地面基準高度

z_0 ：粗糙度長度

α ：風切(或冪次律)指數

3.68 風速分布(wind speed distribution)

用於描述一延伸時段內風速分布之機率分布函數。

備考：常使用之分布函數為瑞利函數 $P_R(V_0)$及韋伯函數 $P_W(V_0)$。

$$\begin{aligned} P_R(V_0) &= 1 - \exp[-\pi(V_0/2V_{ave})^2] \\ P_W(V_0) &= 1 - \exp[-(V_0/C)^k] \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_{ave} = \begin{Bmatrix} C\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right) \\ C\frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{ ，若 } k=2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中，$P(V_0)$ ：累積機率函數，亦即 $V < V_0$ 之機率

V_0 ：風速(極限)

V_{ave}：V 之年平均值

C ：韋伯函數之尺度參數

k ：韋伯函數之形狀參數

Γ ：伽瑪函數

C 及 k 二者均可由實際資料評估。若選擇 $k = 2$，且 C 及 V_{ave} 在 $k = 2$ 時滿足公式(4)所述之條件，則瑞利函數與韋伯函數相同。

分布函數表示風速小於 V_0 時之累積機率。因此，若評估指定限制值 V_1 與 V_2 間之分布，則$[P(V_1) - P(V_2)]$表示風速在此等限制值內時之時間比例。對分布函數微分即可得出相對應之機率密度函數。

3.69 風切(wind shear)

垂直於風向平面之風速變異。

3.70 風速(wind speed, *V*)

圍繞空間中特定點之微量空氣的運動速率。

備考：風速亦為局部風速度(向量)(參照 3.73)之大小。

3.71 風力發電機組(wind turbine generator system)

將風的動能轉換為電能之風力機系統。

3.72 風力機場地(wind turbine site)

單獨或位於風場內之個別風力機的位置。

3.73 風速度(wind velocity)

指向所考量點周圍微小空氣量運動方向之向量，其向量大小等於該空氣〝團〞之運動速度(即局部風速)。

備考：此任意點之向量，為移動通過該點的空氣〝團〞之位置向量的時間導數。

3.74 風力機電氣系統(wind turbine electrical system)

指所有風力機內部並包含風力機終端之電氣設備，包括接地、搭接及通訊設備。

備考：包括預定對風力機提供特定接地終端網路之風力機局部導體。

3.75 風力機終端(wind turbine terminals)

由風力機供應商識別過的 1 或多點，風力機可在此等點連接至匯電系統。

備考：其包括為輸送電能及通訊目的之連接。

3.76 轉向(yawing)

轉子軸繞垂直軸線之旋轉。

備考：僅適用於水平軸風力機。

3.77 轉向錯位(yaw misalignment)

風力機轉子軸與風向間之水平偏離。

3.78 損傷等效負載(damage equivalent load)

由負載譜及給定之 S-N 曲線指數推導的固定大小循環負載 S_{eq}，在損傷可基於由具給定負斜率倒數 m 之線性 S-N 曲線的負載循環決定之假設下，其對給定參考負載循環次數 N_{ref} 得到如真實負載譜的等效疲勞損傷。

備考：設離散負載譜由負載 S_i, i=1、2、…、n_s 的循環次數 n_i 指定，則等效負載可由方程式計算。

$$S_{eq}=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n_s} n_i S_i^m}{N_{ref}}\right]^{1/m} \qquad (5)$$

3.79 基準負載(reference loads, pl.)

用於風力機組件詳細結構查證之負載。

3.80 使用性(serviceability)

結構或結構元件在所有預期作用下，能正常使用的能力。

3.81 使用性極限狀態(serviceability limit state)

對應於條件之狀態，若負載超出此一條件，則結構或結構元件不再滿足特定使用要求。

3.82 S1

與風力機持續正確運轉相關之設計壽命期間作用的使用性極限狀態負載位準。

3.83 S2

頻繁作用之使用性極限狀態負載位準，其於壽命期間的 10^{-4} 時被超過。

3.84 S3

等效頻繁作用之使用性極限狀態負載位準，其於壽命期間的 10^{-2} 時被超過。

4. 符號及縮寫

4.1 符號及單位

符號	說明	單位
C	韋伯分布函數之尺度參數	m/s
C_{CT}	擾流結構修正參數	
C_T	推力係數	
Coh	相干函數	
D	轉子直徑	m
$D_{TV,i}$	地形變化Δz 在第 i 個 30°扇形區域中之標準差	m
$D_{TV,360}$	360°圓形區域之地形變化Δz 之標準差	m
f	頻率	s^{-1}
f_d	材料強度之設計值	
f_k	材料強度之特徵值	
F_d	負載之設計值	
F_k	負載之特徵值	
I_{ref}	風速 15 m/s 時對應於 70 %百分位值之擾流強度基準值	
I_{eff}	有效擾流強度	
k	韋伯分布函數之形狀參數	
k_1	TSI360 之經驗調整因數，$k_1 = 5/3$	
k_2	TVI360 之經驗調整因數，$k_2 = 3$	
K	修正之貝索(Bessel)函數	
L	均向擾流整體尺度參數	m
L_e	相干尺度參數	m
L_k	速度分量之整體尺度參數	m

符號	說明	單位
m	渥勒曲線(Wöhler curve)指數	
n_i	負載區間 i 中疲勞循環次數	
N(.)	至失效之循環次數 N，為應力(或應變)的函數(即特性 S-N 曲線)	
N	極端狀況之回歸期	年
p	空氣壓力	N/m^2
$P(V_0)$	機率分布函數，即 $V < V_0$ 之機率	
$P_R(V_0)$	瑞利機率分布函數，即 $V < V_0$ 之機率	
P_s	存活機率	
$P_W(V_0)$	韋伯機率分布函數	
r	分離向量投影之大小	m
R	圓弧段半徑	m
R_0	氣體常數	J/(kg×K)
S	負載函數	
s_i	區間 i 內與循環次數相關之應力(或應變)位準	
$S_1(f)$	縱向風速度分量之功率頻譜密度函數	m^2/s
$S_{F,min}$	輪齒斷裂安全因數之最小值	
$S_{H,min}$	點蝕安全因數之最小值	
$S_k(f)$	風速度分量k之單邊功率譜密度函數： k=1縱向分量 k=2橫向分量 k=3垂直分量	m^2/s
T	陣風特徵時間	s
t	時間	s
V	風速	m/s
$V(z)$	高度 z 處之風速	m/s
V_{ave}	輪轂高度處之年平均風速	m/s
V_{cg}	整個轉子掃掠面積上之極端相干陣風值	m/s
V_{eN}	N 年回歸期之預期極端風速(以 3 s 平均)。V_{e1} 及 V_{e50} 分別表示 1 年及 50 年之預期極端風	m/s

符號	說明	單位
	速	
V_{gust}	預期 50 年回歸期之最大陣風值	m/s
V_{hub}	在輪轂高度處之風速	m/s
V_{in}	切入風速	m/s
V_0	風速分布模型中之極限風速	m/s
V_{50}	50 年回歸期之極端風速(以 10 min 平均)	m/s
V_{100}	100 年回歸期之極端風速(以 10 min 平均)	m/s
V_{out}	切出風速	m/s
V_r	額定風速	m/s
V_{ref}	基準風速	m/s
$V_{ref,T}$	熱帶氣候類似條件下之基準風速	m/s
$V(y,z,t)$	用於描述暫態水平風切之縱向風速度分量	m/s
$V(z,t)$	用於描述極端陣風及風切狀況之暫態變化的縱向風速分量	m/s
x, y, z	用於說明風場之坐標系，分別為縱向風、橫向風及垂向風	m
Z_{NT}	參考試驗條件下接觸應力之壽命因數	
z_{hub}	風力機輪轂高度	m
z_r	離地面之基準高度	m
z_0	對數風剖面之粗糙度長度	m
α	風切冪次律指數	
β	極端風向變化模型參數	
δ	變異係數	
Γ	伽瑪函數	
γ_f	負載部分安全因數	
γ_M	阻抗部分安全因數	
γ_n	失效後果部分安全因數	
$\theta(t)$	暫態風向變化	(°)
θ_{cg}	陣風情況下與平均風速方向之最大偏離角	(°)
θ_{eN}	N 年回歸期之極端風向變化	(°)
θ_i	第 i 個 30°扇形區間擬合平面之斜率	(°)
θ_{360}	擬合 360°平面之斜率	(°)

符號	說明	單位
$\theta_{1year,min}$	每小時平均之預期最低周圍溫度(回歸期 1年)	K
$\theta_{min,operation}$	風力機運轉之最低容許周圍溫度	K
Λ_1	擾流尺度參數，定義為無因次縱向功率頻譜密度$fS_1(f)/\sigma_1^2 = 0.05$時之波長	m
ρ	空氣密度	kg/m^3
$\hat{\sigma}$	風速標準差估算值	m/s
$\hat{\sigma}_c$	代表性周圍擾流標準差	m/s
$\hat{\sigma}_{eff}$	風速標準差有效估算值	m/s
σ_{wake}	尾流風速標準差	m/s
$\hat{\sigma}_T$	最大中心尾流風速標準差	m/s
$\hat{\sigma}_\sigma$	風速標準差估算值$\hat{\sigma}$之標準差	m/s
$\hat{\sigma}_{1,ETM}$	極端周圍擾流標準差	m/s
σ_1	輪轂高度縱向風速度標準差	m/s
σ_2	輪轂高度橫向風速度標準差	m/s
σ_3	輪轂高度向上風速度標準差	m/s
Φ	標準化常態機率函數	
$E[]$	括號內參數之期望值	
$Var[]$	括號內參數之變異數	
φ	在輪轂高度的水平面與風速度向量間之角度，若風速度向量指向上方則氣流傾角為正	(°)

4.2 縮寫

A	abnormal (for partial safety factors)	異常(部分安全因數)
AC	alternating current	交流
DC	direct current	直流
CC	cold climate	寒冷氣候
CFD	computational fluid dynamics	計算流體動力學
COV	coefficient of variation	變異係數
DLC	design load case	設計負載狀況
DWM	dynamic wake meandering	動態尾流擺動
ECD	extreme coherent gust with direction change	風向變化之極端相干陣風
EDC	extreme wind direction change	極端風向變化
EM	electromagnetic	電磁
EMC	electromagnetic compatibility	電磁相容性
EOG	extreme operating gust	極端運轉陣風
ETM	extreme turbulence model	極端擾流模型
EWM	extreme wind speed model	極端風速模型
EWS	extreme wind shear	極端風切
F	fatigue	疲勞
FMEA	failure mode and effect analysis	失效模式及效應分析
HV	high voltage	高電壓
IAC	internal arc classification	內部電弧分類
IC	icing climate	結冰氣候
LDD	load duration distribution	負載持續時間分布
LRD	load revolution distribution	負載解析度分布
LTC	low temperature climate	低溫氣候
LVRT	low voltage ride through	低電壓穿越
MCP	measure-correlate-predict	量測－關聯－預測
MCS	Monte Carlo simulation	蒙地卡羅模擬
MOD	modified orthogonal decomposition	修改之正交分解
N	normal and extreme (for partial safety factors)	正常與極端(部分安全因數)
NTM90	normal turbulence model, 90 % percentile value of distribution	90 %百分位值分布之正常擾流模型
NWP	normal wind profile model	正常風剖面模型

NTM	normal turbulence model	正常擾流模型
S	special IEC wind turbine class	特殊之風力機等級
SCADA	supervisory control and data acquisition	監控及資料擷取
SRSS	square root sum of squares	平方和之平方根
T	transport and erection (for partial safety factors)	運輸與豎立(部分安全因數)
TSI	terrain slope index	地形坡度指數
TVI	terrain variation index	地形變異指數
U	ultimate	終極
ULS	ultimate limit state	終極極限狀態

5. 基本要素

5.1 一般

以下節次將敘述確保風力機結構、機械、電氣及控制系統安全性之工程與技術要求。此要求規範適用於風力機之設計、製造、安裝及運轉與維護手冊，以及相關品質管制過程。此外，亦考量用於風力機之安裝、運轉及維護的各種實務中已建立之安全程序。

5.2 設計方法

本標準要求採用氣彈性動力模型，以預測設計負載。此模型應用於決定在擾流條件、第 6 節所述之其他風況及第 7 節定義的設計工況中各種風速範圍內之負載。外部條件與設計工況之所有相關組合應加以分析。本標準已定義此等組合之最小集合作為負載狀況。

應使用風力機之全尺度測試所得的資料以提升預測設計值之信賴度，並查證結構動力模型及設計工況，如 7.2 規定。

設計之適當性的查證應以計算及/或測試為之。若試驗結果用於此查證時，應展示試驗期間之外部條件，以反映本標準定義之特徵值及設計工況。包括試驗負載在內之試驗條件的選擇，應考量相關安全因數。

5.3 安全等級

風力機應依照以下 2 種安全等級之一進行設計：

- 一般安全等級，適用於當失效導致人員受傷或其他社會或經濟後果的風險時。
- 特殊安全等級，適用於當安全要求係由當地法規決定及/或由製造商與客戶間達成安全要求協議時。

一般安全等級風力機所適用之部分安全因數，規定於 7.6 中。

特殊安全等級風力機所適用之部分安全因數，應由製造商與客戶共同協議。依特殊安全等級所設計之風力機應被歸類為 S 級風力機，如 6.2 所定義。

5.4 品質保證

品質保證應為風力機與其所有組件之設計、採購、製造、安裝、運轉及維護整體的一部分。

建議品質系統應符合 CNS 12681 之要求。

5.5 風力機標示

風力機銘牌上應以永久、清晰且無法磨滅之方式至少標示下列資訊：

- 風力機製造商與生產國。
- 型號與序號。
- 生產年分。
- 額定功率。
- 基準風速 V_{ref}。
- 輪轂高度運轉風速範圍 V_{in}–V_{out}。
- 運轉周圍溫度範圍。
- 風力機等級(參照表 1)。
- 風力機終端處之額定電壓。
- 風力機終端處之頻率，或標稱變異大於 2 %時之頻率範圍。

6. 外部條件

6.1 一般

進行風力機設計時應考量本節所述之外部條件。

風力機會遭受可能影響其負載、耐久性及運轉之環境與電氣條件。為確保適當之安全與可靠度等級，設計中應考慮環境、電氣及土壤參數，且應在設計文件中明確說明。

環境條件可再細分為風況與其他環境條件。有關電氣條件可參考電網條件。土壤性質與風力機基座之設計有關。

外部條件可細分為正常與極端類別。正常之外部條件通常與重複發生的結構負載狀況有關，而極端外部條件則代表罕見之外部設計狀況。設計負載狀況應包含此等外部條件、風力機運轉模式及其他設計工況之可能關鍵組合。

風況為影響結構完整性之主要外部條件。其他環境條件亦影響設計特徵，如控制系統功能、耐久性及腐蝕。

依據風力機等級設計而考量之正常與極端條件將在 6.2 至 6.4 中說明。

6.2 風力機等級

設計中需考慮之外部條件取決於風力機設置的預定場地或場地類型。風力機等級係以風速(I、II 與 III)、擾流參數及擾流類別(A+、A、B 及 C)定義。分級之用意在於涵蓋大多數應用。風速與擾流參數之值旨在表現不同的場地，而非提供任何特定場地之精確描述，參照 11.3。風力機等級可提供以風速與擾流參數明確定義之強健性範圍。為容許風力機等級能適用於通常為溫和風力氣候，但偶而可能出現非常高極端風速的地區，因此加入 T 級基準風速。此等情況常見於受熱帶氣旋

影響之地區。此基準風速可與 I 至 III 級之平均風速及 A+至 C 類別(1)之擾流強度並用。表 1 規範定義風力機等級之基本參數。

註(1) 對於風力機等級之表示法，例：II 級之年平均風速、B 類擾流與 T 級基準風速，則以 IIB,T 表示。

表 1　風力機等級之基本參數

風力機等級		I	II	III	S
V_{ave}	(m/s)	10	8.5	7.5	由設計者指定之值
V_{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5	
	熱帶(m/s) $V_{ref,T}$	57	57	57	
A+	I_{ref} (−)	0.18			
A	I_{ref} (−)	0.16			
B	I_{ref} (−)	0.14			
C	I_{ref} (−)	0.12			

上述參數值適用於輪轂高度處且：

V_{ave}：年平均風速。

V_{ref}：10 min 平均所得之基準風速。

$V_{ref,T}$：適用於受熱帶氣旋影響地區之 10 min 平均基準風速。

A+：非常高擾流特徵類別。

A：較高擾流特徵類別。

B：中等擾流特徵類別。

C：較低擾流特徵類別。及

I_{ref}：擾流強度(參照 6.3.2.3)之基準值。

T 級假設所有風力模型參數相同，並容許 $V_{ref,T}$ 與所有擾流類別之組合。其並未涵蓋所有易受熱帶氣旋影響之區域。1 年回歸期之極限風速評估宜與 50 年回歸期的極限風速評估分別進行。需基於第 11 節進行場地評鑑，至少需評鑑 V_{50} 低於 T 級之 V_{ref}($V_{ref,T}$)，及 V_1 低於選定之 I、II 或 III 級的值。

第 14 節定義 1 個可選擇之風力機等級 CC，可用於寒冷氣候地區。此可選擇之風力機等級指定本節未列出的額外要求與參數。

另一個風力機等級 S 級為針對設計者及/或顧客要求特殊風況或其他外部條件或特殊安全等級(參照 5.3)時所定義。S 級風力機之設計值應由設計者選擇，並將其載明於設計文件中。有關此等特殊設計，設計條件中所選擇之數值應至少可反映預期風力機使用環境中之嚴苛狀況。

針對場地特定或非常極端條件所設計之風力機可能需 S 級風力機設計。

除表 1 所示之基本參數外，尚需數個其他重要參數，以完整指定風力機設計所使用之外部條件。對於風力機等級 IA^+至 IIIC (以下稱為標準風力機等級)，此等額外參數之數值規定於 6.3、6.4 及 6.5。

風力機等級 I 至 III 之設計壽命期應至少為 20 年。

對於 S 級風力機，製造商應於設計文件中說明所使用之模型與設計參數數值。若採用本節之模型，則聲明其參數數值即可。S 級風力機之設計文件應包含附錄 A 所列資訊。附錄 B 提供 S 級風力機設計負載狀況之指引。

6.3.2.2 至 6.3.3.7 標題內括弧中之縮寫，用於說明 7.4 所定義之設計負載狀況所對應的風況。

6.3 風況

6.3.1 一般

風力機之設計應能安全地耐受依選定的風力機等級所定義之風況。

風況設計值應在設計文件中清楚指定。

用於負載與安全考量之風況分為一般風況(風力機正常運轉期間常發生者)與極端風況(定義為回歸期 1 年或 50 年者)[2]。

註[2] 極端事件的回歸期獨立於風力機設計壽命期，此因正常失效機率的最大值係以 1 年計(參照 K.2)。

在許多情況下，風況包含 1 個恆定之平均氣流與變化的確定性陣風剖面或與擾流之組合。在所有情況下均應考量平均氣流與水平面向上傾斜 8°。此氣流傾角應假設為與高度無關。

〝擾流〞一詞代表 10 min 平均風速度之隨機變化。當使用擾流模型時，擾流模型應包含風速、風切及風向變化之效應，並應容許變化風切中之旋轉取樣。擾流風速度之 3 個向量分量定義為：

- 縱向：沿平均風速度之方向。
- 橫向：水平並與縱向垂直。及
- 向上：與縱向及橫向 2 個方向垂直，亦即以平均氣流傾角之角度偏離垂直軸。

對於標準風力機等級，擾流模型之隨機風速度場應符合 Kaimal 模型及附錄 C 所述的相干性模型。此模型應符合以下要求：

(a) 具有下列小節所提供數值之擾流標準差σ_1應假設為與高度無關。垂直於平均風向之分量，應具有下列之最小標準差[3]：

- 橫向分量：$\sigma_2 \geq 0.7\,\sigma_1$。
- 向上分量：$\sigma_3 \geq 0.5\,\sigma_1$。

註[3] 實際數值可取決於擾流模型之選擇與(b)的要求。

(b) 輪轂高度 z 處之縱向擾流尺度參數 Λ_1 應由下列公式決定：

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z & z \le 60\,m \\ 42\,m & z \ge 60\,m \end{cases} \quad (6)$$

3 個正交分量之功率頻譜密度 $S_1(f)$、$S_2(f)$及 $S_3(f)$，當在慣性次範圍中之頻率增加時，應漸近趨近於以下形式：

$$S_1(f) = 0.05\sigma_1^2(\Lambda_1/V_{hub})^{-\frac{2}{3}} f^{-\frac{5}{3}} \quad (7)$$

$$S_2(f) = S_3(f) = \frac{4}{3}S_1(f) \quad (8)$$

(c) 應使用 1 個認可之相干性模型，此模型定義為在垂直於縱向方向的平面上，對於空間分離點之縱向風速度分量的共譜(co-spectrum)除以自譜(auto-spectrum)所得之大小。

可使用附錄 C 所述之對應 Mann 模型，作為替代方案。

其他擾流模型亦得採用，然而，對於標準風力機等級(I 至 III)，擾流模型應符合上述(a)至(c)要求，且其得到之疲勞負載不應低於使用附錄 C 模型所產生的疲勞負載。對於 S 級可採用已確證之擾流模型。

6.3.2 正常風況

6.3.2.1 風速分布

風速分布對於風力機設計極為重要，因其決定正常設計工況中個別負載狀況發生之頻率。應假設於輪轂高度處 10 min 期間內之風速平均值，符合下列公式之瑞利分布：

$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp\left[-\pi(V_{hub}/2V_{ave})^2\right] \quad (9)$$

於標準風力機等級中，V_{ave} 應自表 1 選取。

6.3.2.2 正常風剖面模型(NWP)

風剖面 $V(z)$表示平均風速為地面以上高度 z 之函數。在標準風力機等級中，正常風剖面模型應由下列冪次律求得：

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^{\alpha} \quad (10)$$

冪次律指數α應假設為 0.2。

此假設風剖面係用於定義跨轉子掃掠面積之平均垂直風切。

6.3.2.3 正常擾流模型(NTM)

正常擾流模型中，擾流標準差σ_1應由給定輪轂高度風速，基於公式(11)之韋伯分布的標準風力機等級定義。

σ_1之韋伯分布應使用公式(13)中的尺度及形狀參數之分布，或公式(14)[4]之 90 %百分位的值：

註[4] NTM 模型之選擇會影響抗疲勞失效的可靠度位準。使用韋伯分布可更強健的納入非線性效應，但產生之疲勞負載無偏差，因此在大多數

情況下與使用 90 %百分位值相比，所得可靠度位準較低。

$$P_W(\sigma_1 < \sigma_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{C}\right)^k\right] \quad (11)$$

式中，

$$k = 0.27V_{hub}(\text{m/s}) + 1.4 \quad (12)$$

$$C = I_{ref}(0.75V_{hub} + 3.3\ \text{m/s}) \quad (13)$$

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \qquad b = 5.6\ \text{m/s} \quad (14)$$

擾流強度標準差σ_1與擾流強度σ_1/V_{hub}之數值對 V_{hub} 的作圖，如圖 1 所示。

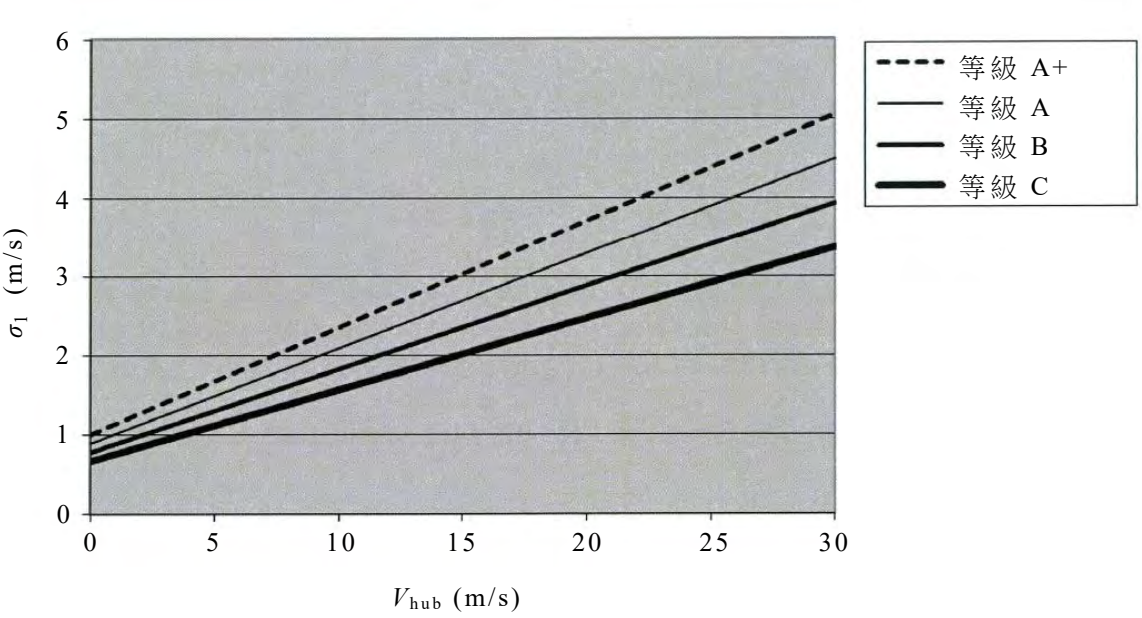


圖 1(a)　擾流強度標準差

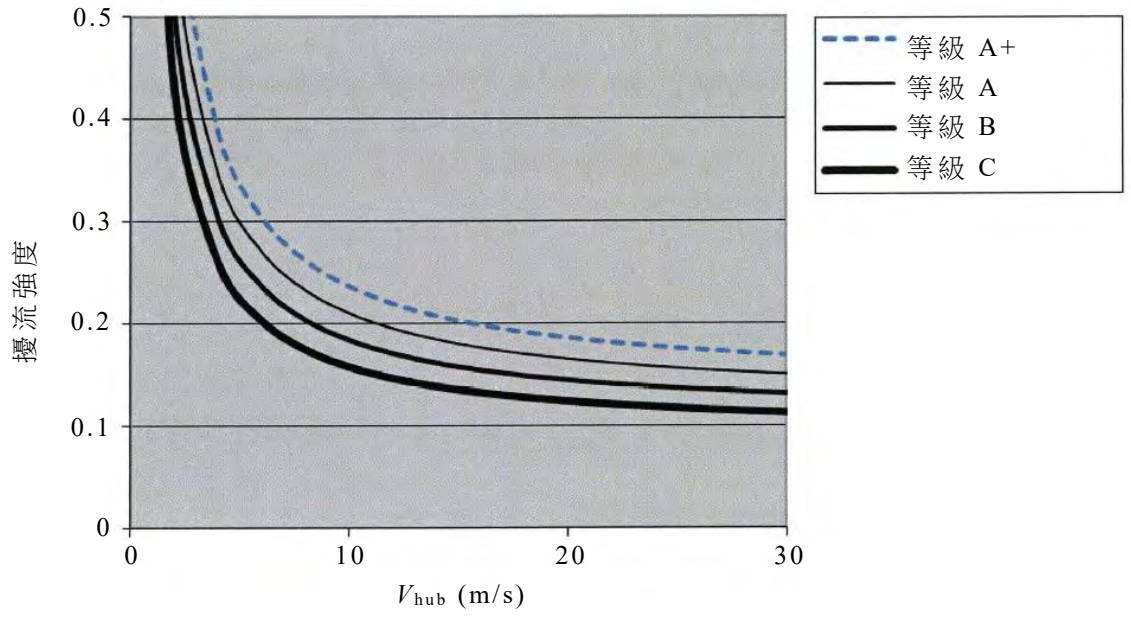


圖 1(b)　擾流強度

圖 1　正常擾流模型(NTM)之擾流強度標準差及擾流強度

I_{ref}之值列於表 1 中。

作為公式(14)之替代，σ_1應假設為具韋伯尺度及形狀參數之韋伯分布：

$$P_W(\sigma_1 < \sigma_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{C}\right)^k\right] \quad (15)$$

式中，

$k = 0.27\ V_{hub}(\text{m/s}) + 1.4$

$C = I_{ref}\,(0.75\ V_{hub} + 3.3\ \text{m/s})$ (16)

6.3.3 極端風況

6.3.3.1 一般

極端風況包括風切事件及因暴風及風速與風向急速變化所產生之尖峰風速。

6.3.3.2 極端風速模型(EWM)

EWM 應為穩定或擾流之風力模型。風力模型應基於基準風速 V_{ref}及固定擾流標準差σ_1建立。若風力機採用 T 級基準風速設計，則在極端風速模型中使用 $V_{ref,T}$取代 V_{ref}，而其他參數則保持不變。

對穩定極端風力模型而言，應使用下列公式以高度 z 為函數，計算 50 年回歸期之極端風速 V_{e50}及 1 年回歸期之極端風速 V_{e1}：

$$V_{e50}(z) = 1.4\ V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (17)$$

且 $V_{e1}(z) = 0.8\ V_{e50}(z)$ (18)

在穩定極端風力模型中，應假設一恆定之轉向錯位在±15°範圍內，以容許平均風向之短期偏離。對於場地指引應使用 11.9.3 取代公式(17)。

對擾流極端風力模型而言，以高度 z 為函數的 50 年回歸期與 1 年回歸期之 10 min 平均風速，應分別由下列公式求得：

$$V_{50}(z) = V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (19)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (20)$$

縱向擾流標準差[5]應為：

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (21)$$

註[5] 擾流極端風力模型之擾流標準差與正常擾流模型(NTM)或極端擾流模型(ETM)無關。~~穩定極端風力模型與擾流極端風力模型間之關係約為 3.5 的尖峰因數。~~

6.3.3.3 極端運轉陣風(EOG)

標準風力機等級之輪轂高度陣風大小 V_{gust}[6]應以下列公式求得：

$$V_{gust} = \text{Min}\left\{1.35(V_{e1} - V_{hub})\,;\;\; 3.3\left[\frac{\sigma_1}{1+0.1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)}\right]\right\} \qquad (22)$$

式中，σ_1 ：由公式(14)所求得

Λ_1 ：依公式(6)之擾流尺度參數

D ：轉子直徑

註[6] 陣風大小與如起動及停機之類的運轉事件之機率一起校正，以求得 50 年回歸期。

風速應以下列公式(23)定義：

$$V(z,t) = \begin{cases} V(z) - 0.37V_{gust}\sin(3\pi t/T)\left[1-\cos(2\pi t/T)\right] & 0 \le t \le T \\ V(z) & \text{其他} \end{cases} \qquad (23)$$

式中，$V(z)$：係由公式(10)定義

T = 10.5 s

極端運轉陣風(V_{hub}=25 m/s、IA 等級、D = 42 m)之示例如圖 2 所示。

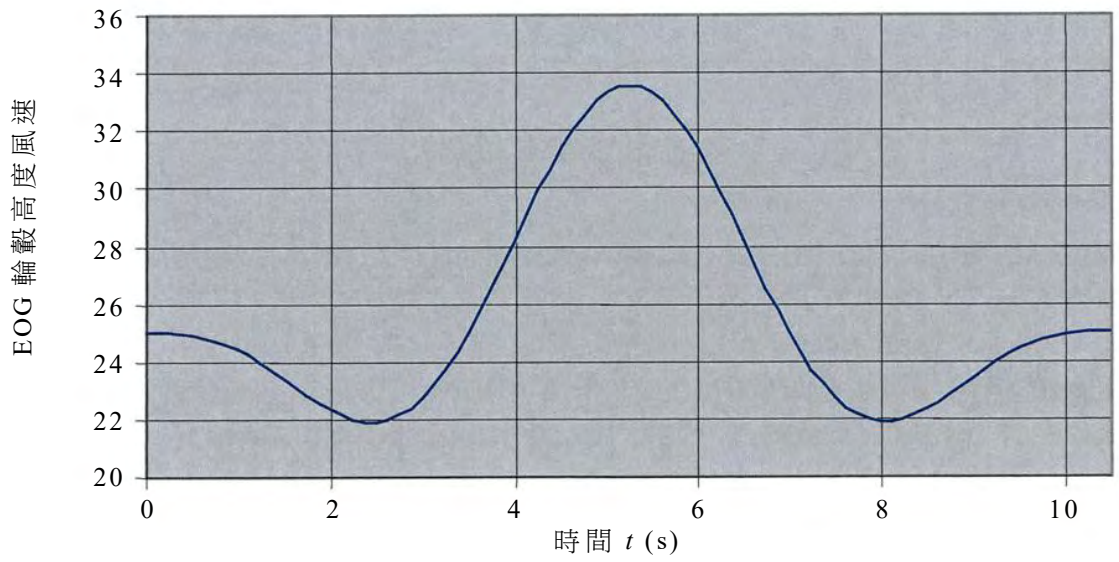


圖 2　極端運轉陣風示例

6.3.3.4 極端擾流模型(ETM)

極端擾流模型應使用 6.3.2.2 之正常風剖面模型，並使用具縱向分量標準差之擾流，如下式給出：

$$\sigma_1 = c \times I_{\text{ref}} \left\{ 0.072 \left(\frac{V_{\text{ave}}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{\text{hub}}}{c} - 4 \right) + 10 \right\} \quad c = 2 \text{ m/s} \tag{24}$$

6.3.3.5 極端風向變化(EDC)

極端風向變化大小θ_e應以下列公式計算：

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left\{ \frac{\sigma_1}{V_{\text{hub}} \left[1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right]} \right\} \tag{25}$$

式中，σ_1：由公式(14)求得(針對 NTM)

θ_e：限制於±180°之區間內

Λ_1：擾流尺度參數，依據公式(6)

D：轉子直徑

極端風向暫態變化$\theta(t)$應以下列公式計算：

$$\theta(t) = \begin{cases} 0° & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_e \left[1 - \cos(\pi t / T) \right] & 0 \le t \le T \\ \theta_e & t > T \end{cases} \tag{26}$$

式中，T = 6 s 為極端風向變化之持續時間。正負號應適當選擇，使其產生最不利之暫態負載。在極端風向暫態變化結束時，風向假設不變。風速應依 6.3.2.2 所述之正常風剖面模型。

舉例說明，擾流類別 A、D = 42 m 及 z_{hub} = 30 m，對變化之 V_{hub} 的極端風向變化大小，如圖 3 所示。對應於 V_{hub}=25 m/s 之暫態變化，如圖 4 所示。

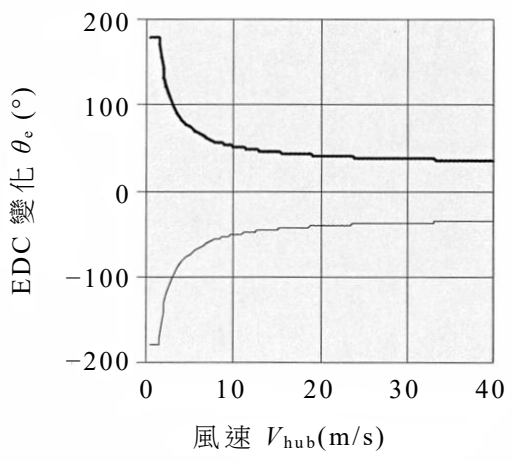


圖 3　極端風向變化大小示例

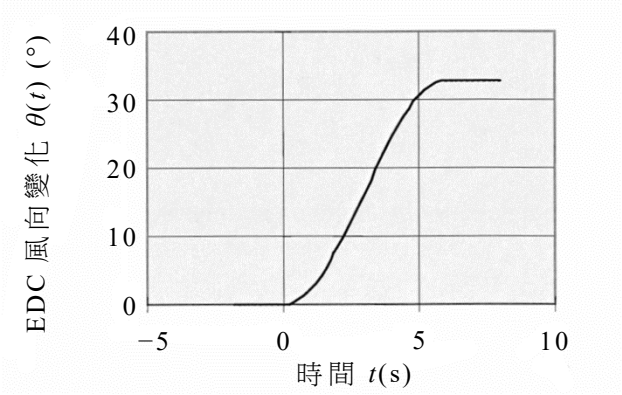


圖 4　極端風向暫態變化示例

6.3.3.6　風向變化之極端相干陣風(ECD)

風向變化之極端相干陣風大小應為：

$$V_{cg} = 15 \text{ m/s} \tag{27}$$

風速應由下列公式定義：

$$V(z,t)=\begin{cases} V(z) & t \le 0 \\ V(z)+0.5V_{cg}\left[1-\cos(\pi t/T)\right] & ;0 \le t \le T \\ V(z)+V_{cg} & t \ge T \end{cases} \tag{28}$$

式中，T = 10 s 為上升時間，而風速 $V(z)$係由 6.3.2.2 之正常風剖面模型所求得。圖 5 所示為 V_{hub}=25 m/s 時在極端相干陣風期間之風速上升

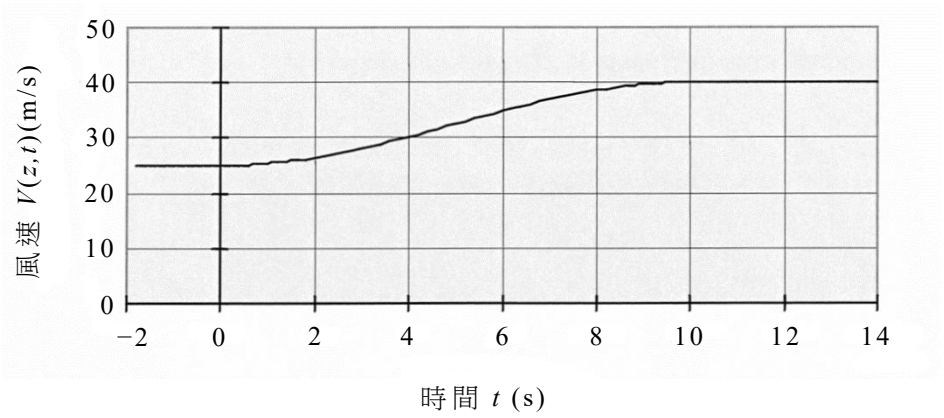


圖 5　ECD 極端相干陣風大小之示例

風速上升應假設為與風向變化θ同時發生，θ由 0°至θ_{cg}，而θ_{cg}之大小係由下列公式所定義：

$$\theta_{cg}(V_{hub})=\begin{cases}180^{\circ} & V_{hub}<4\ \text{m/s}\\ \dfrac{720^{\circ}}{V_{hub}(\text{m/s})} & 4\ \text{m/s}<V_{hub}<V_{ref}\end{cases} \tag{29}$$

同時發生之風向變化則為：

$$\theta(t)=\begin{cases}0^{\circ} & t<0\\ \pm 0.5\theta_{cg}\left[1-\cos(\pi t/T)\right] & 0\le t\le T\\ \pm\theta_{cg} & t>T\end{cases} \tag{30}$$

式中，T = 10 s 為上升時間

風向變化大小θ_{cg}為 V_{hub} 之函數，如圖 6 所示。風向變化$\theta(t)$為時間之函數，對 V_{hub}=25 m/s，$\theta(t)$如圖 7 所示。

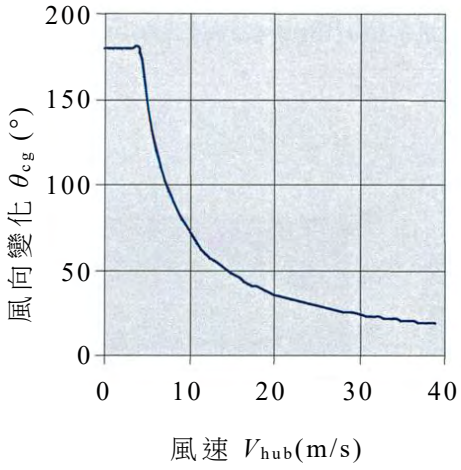


圖 6　ECD 風向變化

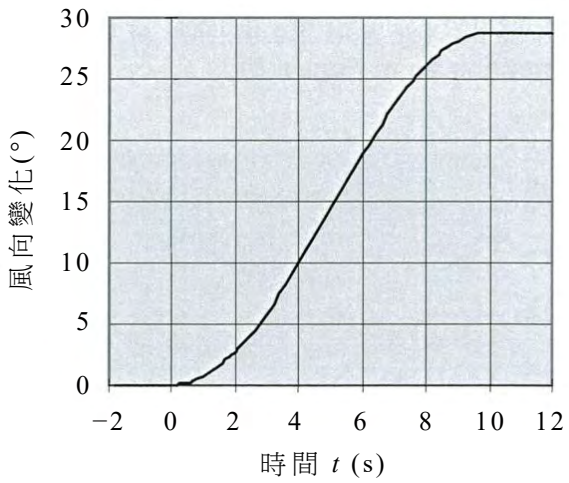


圖 7　暫態風向變化示例

6.3.3.7 極端風切(EWS)

極端風切應使用下列暫態風速變化加以考量。

暫態(正向與負向)垂直風切：

$$V(z,t)=\begin{cases} V_{\text{hub}}\left(\frac{z}{z_{\text{hub}}}\right)^{\alpha} \pm \left(\frac{z-z_{\text{hub}}}{D}\right)\left[2.5+0.2\,\beta\sigma_1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1/4}\right]\left[1-\cos\left(2\pi t/T\right)\right] & 0\le t\le T \\ V_{\text{hub}}\left(\frac{z}{z_{\text{hub}}}\right)^{\alpha} & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

暫態水平風切：

$$V(y,z,t)=\begin{cases} V_{\text{hub}}\left(\frac{z}{z_{\text{hub}}}\right)^{\alpha} \pm \left(\frac{y}{D}\right)\left[2.5+0.2\,\beta\sigma_1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1/4}\right]\left[1-\cos\left(2\pi t/T\right)\right] & 0\le t\le T \\ V_{\text{hub}}\left(\frac{z}{z_{\text{hub}}}\right)^{\alpha} & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式中，對垂直與水平風切二者而言：

$\alpha = 0.2$、$\beta = 6.4$、$T = 12$ s

σ_1 ：由公式(14)求得(針對 NTM)

Λ_1 ：擾流尺度參數，依據公式(6)

D ：轉子直徑

暫態水平風切之正負號應適當選擇，使其產生最不利之暫態負載。此 2 種極端風切不同時採用。

舉例說明，極端垂直風切(擾流類別 A、$z_{\text{hub}} = 30$ m、$V_{\text{hub}} = 25$ m/s、$D = 42$ m)，其顯示極端事件開始時($t = 0$ s)及最大風切時($t = 6$ s)之風剖面，如圖 8 所示。圖 9 顯示轉子頂部與底部之風速，以展示風切隨時間之發展(假設條件同圖 8)。

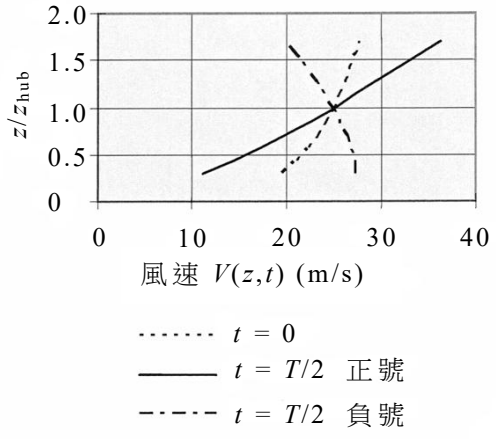


圖8　極端正及負垂直風切，開始時($t = 0$ s，虛線)及最大風切時($t = 6$ s，實線)之風剖面示例

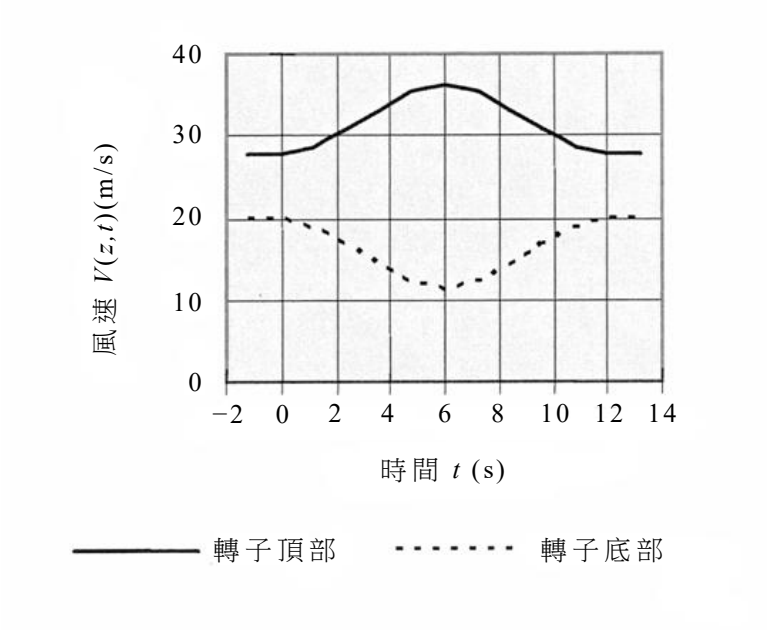


圖 9　轉子頂部與底部之風速示例，其顯示暫態正風切

6.4 其他環境條件

6.4.1 一般

除風力外，其他環境(氣候)條件，藉由熱、光化學、腐蝕、機械、電氣或其他物理作用，亦會影響風力機之完整性與安全性。此外，氣候條件之組合亦增強其效應。

應至少考量下列其他環境條件，並將其所產生之作用於設計文件中加以聲明。

- 溫度。
- 濕度。
- 空氣密度。
- 太陽輻射。
- 雨水、冰雹、雪及冰。
- 化學活性物質。
- 機械活性粒子。
- 鹽分。
- 雷擊。
- 地震。

離岸環境需考慮額外之狀況，如參照 CNS 61400-3 系列標準。

第 14 節定義可選擇之寒冷氣候風力機等級。

所考量之氣候條件應以可變條件的代表值或極限值定義。當選取設計值時，應考量氣候條件同時發生之機率。

在對應於 1 年回歸期之正常限制值內的氣候條件變化，不應與風力機所設計之正常運轉有所干擾。

除非有相關性，6.4.3 所述之其他極端環境條件應與 6.3.2 所述之正常風況結合。如何將設計工況與外部條件組合之一般說明參照 7.4。

6.4.2 正常之其他環境條件

下列為應考量之正常的其他環境條件值：

- 周圍溫度範圍−10 ℃至+40 ℃。
- 相對濕度最高 95 %。
- 大氣成分相當於未受污染之內陸大氣(參照 IEC 60721-2-1)。
- 太陽輻射強度 1,000 W/m^2。
- 空氣密度 1.225 kg/m^3。

當設計者指定額外其他外部條件時，各參數及其值應在設計文件中聲明，且應符合 IEC 60721-2-1 之要求。

6.4.3 極端之其他環境條件

6.4.3.1 一般

風力機設計中應考量之極端的其他環境條件為溫度、雷擊、冰及地震(有關地震條件之評鑑參照 11.6)。

6.4.3.2 溫度

標準風力機等級之極端溫度範圍，至少應在−20 ℃至+50 ℃。

6.4.3.3 雷擊

10.7 規定之雷擊防護要求，對於標準風力機等級之風力機設計可視為足夠。

6.4.3.4 冰

標準風力機等級無結冰最低要求。對於寒冷氣候，第 14 節及附錄 L 規定結冰要求。

6.4.3.5 地震

標準風力機等級無地震最低要求。有關地震條件及效應之考量，參照 11.6 及附錄 D。

6.5 電網條件

下列為應考量之風力機終端的正常條件。

當下列參數在下列範圍內時，則適用正常電網條件。

- 電壓：標稱值(依據 IEC 60038)±10 %。
- 頻率：標稱值±2 %。
- 電壓不平衡：負序電壓成分百分比不超過 2 %。
- 自動復閉循環：應考量第 1 次復閉之自動復閉循環週期為 0.1 s 至 5 s，而第 2 次復閉為 10 s 至 90 s。
- 斷電：電網斷電應假設每年發生 20 次。長達 6 h[(7)]之斷電應視為正常狀況。長達 1 星期之斷電應視為極端狀況。

註[(7)] 此處假設運轉 6 h 係對應於風暴最嚴重部分之期間。

7. 結構設計

7.1 一般

風力機結構中承受負載組件之完整性應加以查證，並應確認達到可接受之安全位準。結構構件之極限與疲勞強度應以計算、試驗或兩者共同加以查證，以證明風力機在適當安全位準下之結構完整性。

結構分析應基於 ISO 2394。

計算應採用適當方法進行。設計文件中應詳述計算方法。敘述中應包含計算方法有效性之證明或適當查證研究的參考文件。任何強度查證試驗中之負載位準，應依 7.6 與特徵負載之適當安全因數對應。

塔架、轉子與傳動鏈應於葉片通過頻率 2 倍以下之激振頻率範圍內進行共振識別判定。對 DLC 1.2，應於 NTM 類別 C 設計擾流 30 %擾流位準下調查可能之共振，參照 7.4.2。若於低擾流條件下發現高共振負載，則應採取避免共振之措施或應將該負載納為設計負載。

7.2 設計方法

應查證風力機所受之極限狀態並未超過其設計的條件。如 ISO 2394 之規定，模型測試與原型試驗亦可取代計算，用以查證結構設計。

設計計算應基於確證之方法與認可的規範。

設計方法假設用於特定設計計算之氣彈力模擬模型，隨後會藉由量測進行確證。此類量測應在 1 台在動態與結構上與設計風力機相似，但細節上可能不同(如替代之塔架設計)之風力機上進行。關於負載量測之要求參照 IEC 61400-13。

7.3 負載

7.3.1 一般

設計計算中應考量 7.3.2 至 7.3.5 所述之負載。

7.3.2 重力與慣性負載

重力與慣性負載係因重力、振動、旋轉及地震活動所產生之靜態及動態負載。

塔架垂直度之容許許可差應於設計文件中加以聲明，並應包含因永久土壤沉陷所造成之初始與長期效應。應分別在塔架與基座結構分析期間，考量塔架垂直度對重力負載之效應。

7.3.3 空氣動力負載

空氣動力負載係由氣流及其與風力機靜止及活動件間之交互作用所產生的靜態及動態負載。

氣流與下述相關：跨轉子平面之平均風速及擾流、轉子之轉速、空氣密度、風力機組件之空氣動力外形及其交互作用效應，包括氣彈力效應。

在空氣動力負載計算中，未要求考量不大於 3°之塔架垂直度幾何許可差。

7.3.4 致動負載

致動負載係因風力機之運轉及控制而產生。此負載可分成數類，包括發電機或

逆變器或 2 者之扭矩控制、轉向與旋角致動器負載及機械煞車負載。在每一情況中，計算響應與負載時考量涵蓋摩擦力之可用的致動器施力範圍非常重要。尤其對於機械煞車，檢查任何煞車事件期間之響應與負載時，應考量受溫度與老化所影響之各種摩擦力、彈簧力或壓力的範圍。

7.3.5 其他負載

若適當，應考量可能會發生如尾流負載、衝擊負載、冰負載、渦流誘發振動產生之塔架負載等其他負載。有關寒冷氣候之其他負載，參照第 14 節與附錄 L。

7.4 設計工況與負載狀況

7.4.1 一般

本節將敘述風力機之設計負載狀況，並規定需考量之最少項目。

為設計之目的，風力機之壽命可以用 1 組涵蓋風力機可能遭受最重大情況的設計工況來表現。

負載狀況應由運轉模式或如特定組裝、豎立或維護情況等其他設計工況，與外部條件之組合來決定。具合理發生機率之所有相關負載狀況，應與控制系統之行為一併考量。用於查證風力機結構完整性之設計負載狀況，應結合以下項目加以計算：

- 正常設計工況及適當之正常或極端外部條件。
- 故障設計工況及適當之外部條件。
- 運輸、安裝與維護設計工況及適當之外部條件。

若一極端外部條件與故障情況間有關聯時，則兩者之實際組合應視為 1 個設計負載狀況。

每種設計工況下均應考量數個設計負載狀況。至少應考量表 2 之設計負載狀況。在該表中，各設計工況所包含之設計負載狀況係藉由風、電氣及其他外部條件等的描述來加以指定。

使用性極限狀態(SLS)考量結構或其組件，在正常使用條件下之功能或結構外觀。宜依相關 CNS 15176/CNS 61400/IEC 61400 標準或技術規範之要求，以使用性負載位準 S1、S2 或 S3 查證使用性極限狀態。

對於使用性極限狀態分析，S1 由歸類為 N(正常)之終極極限狀態的負載模擬得出，而 S2 及 S3 則使用與作為疲勞極限狀態基礎之相同負載模擬。負載之局部安全因數應為：

$$\gamma_f = 1.0 \qquad (33)$$

若風力機控制器在具有確定性風力模型之設計負載狀況期間，能使風力機在達到最大轉向角度及/或最大風速之前停機，則其應能顯示該風力機能在具有相同確定性風況變化之擾流條件下可靠地停機。

應考量與特定風力機設計之結構完整性有關的其他設計負載狀況。

表 2 中每種設計負載狀況皆以〝F〞及〝U〞說明適合之分析型式。〝F〞代表疲勞負載分析，用於評估疲勞強度。〝U〞代表極限負載分析，其中包含材料強度、葉片尖端變形量及結構穩定性。

標示〝U〞之設計負載狀況分為正常(normal, N)或異常(abnormal, A)等 2 類。正常設計負載狀況預期會時常發生。風力機通常處於正常狀態，偶爾碰到一些輕微故障及異常現象。異常設計工況較不常發生，且通常發生在嚴重故障造成系統保護功能啟動的設計工況中。應用在極限負載上之局部安全因數γ_f係由 N 及 A 等 2 類設計工況的形式來決定。此等因數參照表 3。

表 2　設計負載狀況(DLC)

設計工況	DLC	風況	其他條件	分析型式	局部安全因數
(1) 發電	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	極端事件外插	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD $V_{hub}=V_r-2$ m/s、V_r、V_r+2 m/s		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
(2) 發電加故障發生	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	正常控制系統故障或電網喪失或主要層控制功能故障(參照 7.4.3)	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	異常控制系統故障或次要層保護功能相關故障(參照 7.4.3)	U	A
	2.3	EOG $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}	外部或內部電氣故障，包括電網喪失	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	控制系統故障、電氣故障或電網喪失	F	*
	2.5	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	低及高電壓穿越	U	N
(3) 起動	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG $V_{hub}=V_{in}$、$V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
	3.3	EDC $V_{hub}=V_{in}$、$V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
(4) 正常停機	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
(5) 緊急停止	5.1	NTM $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
(6) 待機(靜止狀態或惰轉)	6.1	EWM 50 年回歸期		U	N
	6.2	EWM 50 年回歸期	電網連接喪失	U	A
	6.3	EWM 1 年回歸期	極端轉向錯位	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$		F	*
(7) 待機加故障條件	7.1	EWM 1 年回歸期		U	A

表 2　設計負載狀況(DLC)(續)

設計工況	DLC	風況	其他條件	分析型式	局部安全因數
(8) 運輸、組裝、維護及修理	8.1	NTM，V_{maint} 由製造商聲明		U	N
	8.2	EWM 1 年回歸期		U	A

說明

DLC　設計負載狀況

ECD　風向變化之極端相干陣風(參照 6.3.3.6)

EDC　極端風向變化(參照 6.3.3.5)

EOG　極端運轉陣風(參照 6.3.3.3)

EWM　極端風速模型(參照 6.3.3.2)

EWS　極端風切(參照 6.3.3.7)

NTM　正常擾流模型(參照 6.3.2.3)

ETM　極端擾流模型(參照 6.3.3.4)

NWP　正常風剖面模型(參照 6.3.2.2)

$V_r \pm 2$ m/s　應分析在範圍內所有風速的靈敏度

F　疲勞(參照 7.6.3)

U　極限強度(參照 7.6.2)

N　正常

A　異常

*　對疲勞之局部安全因數(參照 7.6.3)

"F/U"疲勞及極限負載包含相關安全因數*/N 或*/A

當表 2 中說明風速範圍時，應考量會造成風力機設計最不利狀況之風速。當風速範圍可用 1 組離散數值表示時，其解析度應足以確保計算之準確度[8]。有關設計負載狀況之定義，可參照第 6 節所述之風況。

註[8] 通常，2 m/s 之解析度即已足夠。然而，在功率曲線快速上升之風速範圍內，2 m/s 之步階可能過大而無法確保準確度。

在 7.4.2 至 7.4.9 的設計負載狀況(DLCs)之進一步規範中指出，部分 DLC 容許其他替代公式。當文件提及可替代公式時，則該文件之設計方應決定整個 DLC 分析應使用何種替代公式。

7.4.2 發電(DLC 1.1 至 DLC 1.5)

在此設計工況中，風力機在運轉中且連接至電力負載上。假設之風力機配置應考量轉子不平衡。設計計算中應採用轉子製造商所指定之最大質量與空氣動力

不平衡(例：葉片旋角與扭曲偏差)。

此外，運轉負載分析中應考量與理論最佳運轉狀態之偏差，如轉向錯位與控制系統追蹤錯誤。

設計負載狀況 DLC 1.1 與 DLC 1.2 具體表達風力機在其壽命期間中，於正常運轉期間因大氣擾流所產生負載之要求(NTM)。DLC 1.3 具體表達極端擾流條件所產生極限負載之要求。DLC 1.4 與 DLC 1.5 規定經過挑選來作為風力機壽命期間可能發生之重大事件的暫態狀況。

DLC 1.1 模擬資料(參照 7.6.2.2 及附錄 G)的統計分析應至少包含葉片根部面內力矩(in-plane moment)、面外力矩(out-of-plane moment)及葉尖變形量極端值之計算。若由 DLC 1.3 推導而得之葉片根部力矩極端設計值超過由 DLC 1.1 推導的極端設計值，則可不需進行 DLC 1.1 之進一步分析。

若 DLC 1.3 推導而得之葉片根部力矩極端設計值未超過由 DLC 1.1 推導的極端設計值，則可增加用於 DLC 1.3 之極端擾流模型中公式(24)的因數 c，直到 DLC 1.3 所計算之葉片根部力矩極端設計值不小於相關的極端設計值。與其他風力機組件有關之負載特徵值，可由基於增加 c 值的 DLC 1.3 分析決定之。以此作為分析之替代選項，有關每一特定風力機組件所有負載分量之適當特徵值，可由模擬結果直接決定或外插。

7.4.3 發電加故障或電網併聯喪失(DLC 2.1 至 DLC 2.5)

7.4.3.1 一般

本設計工況涉及風力機在發電時，由故障或電網併聯喪失而觸發的暫態事件。設計中應考量對風力機負載有相當影響之控制系統的任何故障或電氣系統之內部故障(如發電機短路)。此設計工況視為與疲勞分析有關，參照 DLC 2.4。

應執行失效模式及效應分析(FMEA)或具等效之故障分析，以決定風力機負載相關之故障事件。

風力機轉子於故障發生時之方位角位置，可能對負載位準具有顯著影響。故障發生時之方位角位置宜為隨機。

DLC 2.1 與 DLC 2.2 應考量如 7.4.3.2 描述之控制系統故障。可使用 7.4.3.3 所述方法，以 2 套獨立功能(分別藉由主要層控制功能與次要層保護功能)之架構，確保風力機安全。失效模式識別、失效模式回歸期評估、故障排除及避免共因失效措施等之指引，參照第 8 節。

7.4.3.2 控制系統失效(DLC 2.1 及 DLC 2.2)－定量方法

在 DLC 2.1，下列情形應以正常事件考量之：

(a) 預期失效模式回歸期為 50 年以下之控制系統失效相關事件。

(b) 預期失效模式回歸期無法獲得之控制系統失效相關事件。

(c) 電網併聯喪失。

對預期失效模式回歸期在 10 年至 50 年之事件，其採用的局部負載因數為表

3 所說明的失效模式回歸期之函數。

在 DLC 2.2，對於預期失效模式回歸期大於 50 年之控制系統失效事件或內部電氣與機械系統故障應考量為異常事件。

回歸期超過 2,000 年之故障事件及無關於風力機負載之故障事件可忽略。故障事件回歸期係基於對控制或內部電氣系統零件處於失效狀態或進入失效狀態，以致可能發生結構失效之機率統計計算。

7.4.3.3 控制系統失效(DLC 2.1 與 DLC 2.2)－雙層方法

此方法可應用於由 2 個以上獨立層構成之控制系統架構。在此方法中：

(a)主要層控制及保護功能之目標，分別為在於保持風力機運轉參數在其正常運轉限制值及其設計限制值範圍內。及

(b)次要層保護功能之目標，在於保持風力機運轉參數在其設計限制值範圍內。由於主要層控制功能之失效、內部或外部失效或者危險事件之效應，次要層保護功能應被啟動。

對於 DLC 2.1，主要層控制功能故障、主要層保護功能啟動或電網併聯之喪失應視為正常事件。DLC 2.2 應包含導致超出限制值之控制功能故障並導致次要層保護功能的啟動。

DLC 2.1 中考量的主要層控制功能故障，通常包含與轉子轉速、機艙轉向角及葉片旋角有關之故障。

對於 DLC 2.2，與風力機負載相關之罕見事件，包含啟動次要層保護功能之相關故障，應考量為異常事件。此類故障可能包含致動器錯誤啟動、煞車系統未啟動及旋角系統之受阻。此負載狀況至少應涵蓋下列事項：獨立過速保護、發電機過載/故障保護、未受控之葉片旋角保護(葉片旋角失控)、未受控之轉向保護及過度振動或衝擊保護。

7.4.3.4 其他發電加故障或電網併聯喪失(DLC 2.3 至 DLC 2.5)

對於 DLC 2.3，潛在重要風況事件，即極端運轉陣風(EOG)，需與多相電網併聯中 1 個或更多相位喪失之情境相結合，並應視為異常事件。在此工況中，應選擇此 2 種事件之時間點以達到最不利負載。

作為前述說明與表 2 中 DLC 2.3 之替代方案，DLC 2.3 可視為正常事件(即負載之局部安全因數為 1.35)，並使用隨機風況模擬(NTM－$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$)連同內部或外部電氣系統故障(包含電網併聯喪失)進行分析。在此工況中，每個考量之平均風速應執行 12 次響應模擬，而對每一響應模擬，針對電氣故障發生後之極端響應應進行取樣。故障事件應於起始條件之效應變為可忽略後引入。對每一平均風速之標稱極端響應，以 12 個樣本極端響應之平均值，加上 12 個樣本之 3 倍標準差評估。DLC 2.3 之特徵響應值係由標稱極端響應間之極端值決定。

若故障或電網併聯喪失未造成立即停機且後續負載會導致顯著疲勞損傷，則

應於 DLC 2.4 中，評估此情況的可能持續期間及其於正常擾流條件(NTM)下造成之疲勞損傷。製造商應對事件估算預期頻率/持續時間(9)。

註(9) 若無相關資料/資訊可用，可應用下列事件之頻率/持續時間：

- 每年 10 次因過速運轉事件而停機。
- 每年 24 h 運轉於轉向錯誤事件。
- 每年 24 h 運轉於旋角錯誤事件。
- 每年 20 次電網併聯喪失。

於 DLC 2.5 中，低電壓穿越及高電壓穿越(10)事件視為正常事件，要能符合國內綜合電業電力公司之運轉要求。低及高電壓穿越事件之設計應明確說明下降電壓及上升電壓容許幅度以及持續時間。

註(10)低電壓及高電壓穿越狀況一般由電力公司定義，為在不關機情況下處理電網干擾或故障之情形。要求在低電壓及高電壓穿越情況下保持運轉之緣由，係因為處理電網干擾或故障之期間，若風力機(特別在風場)停機，可能會造成電網崩潰。

7.4.4 起動(DLC 3.1 至 DLC 3.3)

本設計工況包含從任何靜止狀態或惰轉情況進入發電之暫態時，造成負載作用在風力機之所有事件。發生之次數應根據控制系統行為進行估算(11)。

註(11)若無法取得相似風力機起動之歷史資料，DLC 3.1 之發生年頻率可假設如下：

- 於切入風速 V_{in} 之 1,000 次起動程序。
- 於額定風速 V_r 之 50 次起動程序。及
- 於最大起動風速之 50 次起動程序。

對於 DLC 3.2，對每一風速，至少應於 EOG 與起動事件之間考量 4 個不同時間點的事件。應選擇第 1 個時間點以便當發電功率達最大功率 50 %時，作為 EOG 發生的起始點。應選擇最後一個時間點以便當發電功率達最大功率 95 %時，作為 EOG 發生的起始點。另外至少應選擇額外 2 個時間點，平均分布於最大發電功率 50 %至 95 %之區間中。

對於每一風速，負載特徵值可以 4 個定義之不同時間點的極端計算暫態值之平均值進行計算。

作為 EOG 陣風的替代方案，DLC 3.2 可替代為使用 ETM 對每個平均風速，進行至少 12 次隨機風況模擬分析。對每個平均風速，可採模擬極端值之平均值評估標稱極端響應值。

7.4.5 正常停機(DLC 4.1 至 DLC 4.2)

本設計工況包含從任何發電情況進入靜止狀態或惰轉狀態，於正常暫態期間造成負載作用在風力機之所有事件。發生之次數應根據控制系統行為進行估算(12)。

註(12) 若無法取得相似風力機停機之歷史資料，DLC 4.1 之發生年頻率可假設如

下：

- 於切入風速 V_{in} 之 1,000 次停機程序。
- 於額定風速 V_r 之 50 次停機程序。及
- 於切出風速 V_{out} 之 50 次停機程序。

對於 DLC 4.2，陣風與停機事件的時間點選擇應使得 EOG 陣風在相對於停機的不同時間開始，且至少有 6 次事件平均分布於停機開始前 10 s 至功率達到 50 % 初始發電功率位準之間。

各不同時間點至少應採用平均分布之 4 個轉子方位角位置。對於各風速，負載特徵值可計算為所有考量之方位角位置及時間點的極端計算負載之平均值。

若因安全及控制系統於 EOG 陣風期間自動觸發停機事件，該事件亦應於分析中考量。

作為 EOG 陣風的替代方案，DLC 4.2 可替代為使用 ETM 對每個平均風速，進行至少 12 次隨機風況模擬分析。對於每個平均風速，可採模擬極端值之平均值評估標稱極端響應值。

7.4.6 緊急停止(DLC 5.1)

應考量啟動緊急停止按鈕時所產生之負載。

故障發生當下之轉子方位角位置可能對負載位準有顯著影響。發生故障時之方位角位置宜為隨機。

7.4.7 待機(靜止狀態或惰轉)(DLC 6.1 至 DLC 6.4)

在此設計工況下，待機中風力機之轉子將處於靜止狀態或惰轉狀態。DLC 6.1、DLC 6.2 及 DLC 6.3 中，此工況應與極端風速模型(EWM)一併考量，對於 DLC 6.4 則應考量正常擾流模型(NTM)。

對於設計負載狀況，當風況由 EWM 定義時，可使用穩定極端風力模型或擾流極端風力模型。若使用擾流極端風力模型，其響應應使用全動態模擬或依據 ISO 4354 公式對陣風及動態響應做適當修正之準穩態分析(quasi-steady analysis)進行估算。若使用穩定極端風力模型，共振響應之效應應以上述的準穩態分析進行估算。若共振與背景響應之比(R/B)小於 5 %，則可使用穩定極端風力模型之靜態分析。若在特徵負載下風力機轉向系統可能發生滑動，則平均轉向錯位應加入最大可能不利滑動。若風力機具有轉向系統，且極端風力狀況下預期出現轉向移動(例：自由轉向、被動轉向或半自由轉向)，則應採用擾流風力模型，且轉向錯位將受擾流風向變化及風力機轉向動態響應主導。另外，若由正常運轉至極端狀況風速增加期間，風力機遭遇大幅轉向移動或平衡變化，分析中應包含此行為。

在 DLC 6.1 中，對於具有主動轉向系統之風力機，若無法確保轉向系統對滑動之拘束，則採用穩定極端風力模型時，應施加最高可達 ±15°之轉向錯位，或採用擾流極端風力模型時，施加 ±8°之平均轉向錯位。

在 DLC 6.2 中，應假設在包含極端風力狀況之暴風的早期階段出現電網喪失。除非對控制與機艙轉向系統提供備用電力，且可讓轉向維持對準至少 6 h 之運作能力，否則應分析風向變化達到±180°之效應。

在 DLC 6.3 中，1 年回歸期之極端風力應與一極端轉向錯位結合。採用穩定極端風力模型時應假設極端轉向錯位最高達±30°，或採用擾流風力模型時應假設平均轉向錯位為±20°。

若對於具穩定極端風力模型之 DLC 6.1，使用離散數值評估 DLC 6.2 及 DLC 6.3 工況之轉向錯位時，於最大升力作用在葉片的扇形區域內，轉向錯位增量應不超過 10°。

在 DLC 6.4 中，因適用於各風速之波動負載可能造成任何組件的顯著疲勞損傷(例：來自於惰轉葉片之重量)，應考量非發電期間之預期時數。

7.4.8 待機加故障條件(DLC 7.1)

因電網或風力機故障而產生偏離風力機待機正常行為之情況需要分析。至少應評估下述系統失效：煞車系統、旋角系統及轉向系統。故障條件應與 1 年回歸期之 EWM 相結合。此等條件應為擾流或具對陣風與動態響應修正之準穩態。

當轉向系統出現故障時，應考量±180°之轉向錯位。若對具有轉向系統故障的 DLC 7.1 情況，使用離散數值評估轉向錯位時，錯位增量在葉片最大升力扇形區域內不應超過 10°。對任何其他故障，轉向錯位應與 DLC 6.1 一致。

若在 DLC 7.1 之特徵負載下可能發生轉向系統滑動時，則應考量可能之最大不利滑動。

7.4.9 運輸、組裝、維護及修理(DLC 8.1 及 DLC 8.2)

在 DLC 8.1 中，製造商應聲明風力機之運輸、現場組裝、維護及修理作業中，假設之所有風況與設計工況。若最大宣告風況可造成風力機顯著負載時，則應在設計中加以考量。製造商應在宣告條件與設計中所考量的風況間保留充分之裕度，以提供可接受之安全位準。可在宣告風況中加上 5 m/s 以得到足夠之裕度。

此外，DLC 8.2 應包含所有可能持續超過 1 星期之運輸、組裝、維護及修理的風力機狀態。當相關時，此應包括部分完成之塔架、尚未安裝機艙之豎立塔架及缺少 1 片或多片葉片之風力機。若豎立塔架處於無機艙之狀態，應採取適當手段以避免渦流導致橫向振動之臨界風速，或應加入適當之疲勞設計負載狀況[13]。應假設在任何此等狀態下，電網均未連接。在任何此等狀態下，只要此等措施不需要電網連接，即可採取此等措施以降低負載。

註[13] 關於由渦流誘發振動所產生之塔架負載指引，參照 IEC 61400-6。

固鎖裝置(blocking devices)應能承受在 DLC 8.1 相關工況所產生之負載。非冗餘之固鎖裝置應設計為組件等級 3。特別地，應考量施加最大設計致動器力。建議在相關時，額外應用舉升設備之標準包含安全因數/影響因數。除非為永久安

裝，本標準未涵蓋舉升設備，其宜依據舉升設備之相關標準進行設計與試驗。

7.5 負載計算

每一設計負載狀況中，7.3.2 至 7.3.5 所述之所有負載均應列入考量。當相關時，以下項目亦應列入考量：

- 風力機本身造成之風場擾動(尾流引起之速度、塔架陰影等)。
- 三維氣流對葉片空氣動力特徵之影響(例：三維失速與空氣動力尖端損失)。
- 不穩定空氣動力效應。
- 結構動力學與振動模態之耦合。
- 氣彈力效應。
- 風力機控制系統之行為。

利用結構動力模型之動態模擬通常用於計算風力機負載。某些負載狀況具有擾流風輸入。對於此等狀況，負載資料之總期間應足夠長，以確保特徵負載估算之統計可靠度。模擬中所使用之每一平均、輪轂高度風速應要求至少 6 組 10 min 隨機實現(或連續 60 min 期間)。然而，在 DLC 2.1、DLC 2.2 及 DLC 5.1，在給定風速下，每一事件至少應進行 12 次模擬。由於動態模擬中所使用之初始條件，通常會對模擬期間開始階段之負載統計產生影響，故任何涉及擾流風輸入之分析區段中，前 5 s 之資料(或若有必要更長)應予以剔除，不予考量。

應確保在對負載時間序列進行循環計數之期間，來自每一時間序列之剩餘殘差應以半循環方式納入疲勞失效模式評估。此外，負載範圍之離散化應確保足夠的解析度。

當擾流風用於動態模擬時，宜注意關於空間[14]與時間解析度之網格解析度。

註[14] 關於空間解析度，相鄰點之最大距離宜小於Λ_1[公式(6)]的 25 %，且不大於轉子直徑之 15 %。此距離係指每個由 4 個點定義之網格單元內的對角線距離。對於非均勻網格，可將轉子表面網格點間之距離的平均值視為代表性空間解析度，但此距離通常會向葉尖減小。

在許多情況下，一給定風力機組件在關鍵位置的局部應變或應力，由同時多軸向負載主導。在此情況下，有時使用模擬所輸出之正交負載的時間序列指定設計負載。當採用此種正交分量時間序列計算疲勞與極限負載時，此時間序列亦應以保留其相位與大小方式加以組合。因此，此種直接方法係基於以顯著應力作為歷時資料之推導。接著便可把極端與疲勞預測法用在此單一訊號上，以避免負載組合議題。

極限負載分量亦可用保守之方式加以組合，亦即假設極端分量值同時發生。當採用此選項時，應在所有可能組合中，採用最大與最小之極端分量值，以避免引入非保守設計。

有關如何從多組同時負載(contemporaneous load)實現中，導出極端設計負載之指引，參照 IEC 61400-1:2019 之附錄 I。

7.6 終極極限狀態分析

7.6.1 方法

7.6.1.1 一般

局部安全因數考量負載與阻抗之不確定度與變異性、分析法的不確定度及結構組件相對於故障後果之重要性。

對風力機之終極極限狀態分析，在相關情況下應進行下列 4 種型式之分析：

- 極限強度分析(參照 7.6.2)。
- 疲勞失效分析(參照 7.6.3)。
- 穩定性分析(例：挫曲)(參照 7.6.4)。
- 關鍵撓曲分析(例：葉片與塔架間之機械干涉等)(參照 7.6.5)。

每種型式之分析需要不同極限狀態函數公式，並藉由使用安全因數處理不同不確定度來源。

7.6.1.2 負載與阻抗之局部安全因數

負載與阻抗(包含材料變異性)之不確定度與變異性，係依公式(33)及公式(34)所定義之局部安全因數予以考量，以確保安全設計值。

$$F_d = \gamma_f F_k \tag{33}$$

式中，F_d ：給定設計負載狀況中，由各種來源之多個同時負載分量的聚合內部負載或負載響應之設計值

γ_f ：負載局部安全因數

F_k ：負載之特徵值

$$R_d = \frac{1}{\gamma_M} R_k \tag{34}$$

式中，R_d ：阻抗之設計值，參照附錄 K

γ_M ：考量材料參數及阻抗模型之不確定度的局部安全因數[15]，參照附錄 K

R_k ：阻抗之特徵值，包括負載持續時間效應、尺度效應等，皆經由轉換因數考量，參照附錄 K

註[15]或者，阻抗局部安全因數 γ_M 可包括作為 1 個與材料參數不確定度相關之局部安全因數，及 1 個與阻抗模型不確定度相關之局部安全因數，參照附錄 K。

本標準所使用之負載局部安全因數，考量下列事項：

(a) 負載與特徵值間可能之不利偏差/不確定度。及

(b) 負載模型中之不確定度。

本標準所使用之阻抗局部安全因數 γ_M(同 ISO 2394)，考量下列事項：

- 材料強度與特徵值間可能之不利偏差/不確定度。

- 結構之斷面阻抗或零件承載能力可能的不準確評鑑。
- 幾何參數之不確定度。
- 結構中材料性質與管制試件試驗測得之材料性質間關係的不確定度。
- 轉換因數之不確定度。

此等不同之不確定度有時會以個別的局部安全因數處理。然而，在本標準中，如同大多數標準，負載相關因數合併成 1 個因數 γ_f，而材料與阻抗相關因數合併成 1 個因數 γ_M。γ_f 與 γ_M 之數值參照 7.6.2 至 7.6.5。然而，若能證明導致此等數值之假設具保守性，則可替代此等數值，在此情況下，可對負載與阻抗安全因數執行校正，以符合本標準預定之安全位準(16)。

註(16) 附錄 K 提供材料局部安全因數校正之指引。

7.6.1.3 失效後果局部安全因數與組件等級

導入失效後果安全因數 γ_n，以區分：

(a) 組件等級 1：用於〝失效安全〞之組件，其失效不會導致風力機主要零件失效，例：次要組件及具監測功能之可更換軸承。

(b) 組件等級 2：用於〝安全壽命〞之組件，其失效可能導致風力機主要零件失效。

(c) 組件等級 3：用於〝安全壽命〞之組件，其失效可能導致人員受傷，例：連結致動器與煞車至主要結構組件，用以執行非冗餘之風力機防護功能的機械組件。有關固鎖裝置內容參照 7.4.9。

失效後果之局部安全因數：

- 組件等級 1：$\gamma_n = 0.9$。
- 組件等級 2：$\gamma_n = 1.0$。
- 組件等級 3：$\gamma_n = 1.2$。

當執行試驗(例：全尺寸葉片測試)時，失效後果因數應包含於試驗負載中。

對於組件等級 3，若能對所涉設計工況計算由重力造成之負載響應的特徵值 $F_{gravity}$，且重力為一不利負載，則重力與其他來源之組合負載的失效後果因數可具下列值。

$$\gamma_n = 1.1 + 0.1\zeta^2 \tag{35}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 - \left|\frac{F_{gravity}}{F_k}\right| & |F_{gravity}| \le |F_k| \\ 0 & |F_{gravity}| > |F_k| \end{cases} \tag{36}$$

式中，F_k為特徵負載

關鍵撓曲分析適用其他 γ_n 數值，參照 7.6.5。

7.6.1.4 認可材料規範之應用

當決定風力機元件之結構完整性時，可使用相關材料之國家或國際設計規範。當使用國家或國際設計規範之局部安全因數，並同時使用本標準之局部安全

因數時，應特別注意，確保所導致安全位準不低於本標準所要求之預定安全位準。

不同規範會將阻抗局部安全因數 γ_M 分解為多個材料因數，以處理不同類型之不確定度，例：材料強度之內在變異性、生產管制或生產方法之程度等。若規範提供局部安全因數或特徵值使用降低因數方式以處理其他不確定度時，此等亦應一併納入考量。

個別規範可能會在設計查證之負載與材料部份，選擇不同之局部安全因數分解方式。此所預定之因數分割即為 ISO 2394 中所定義。若所選用之規範中的因數分割偏離 ISO 2394 之因數分割，則在依據本標準進行查證時，應將所選用規範中之必要調整納入考量。

7.6.2 極限強度分析

7.6.2.1 一般

極限狀態函數可分離成負載與阻抗函數 S 與 R，以使該條件變為：

$$\gamma_n \times S(F_d) \le R_d \tag{37}$$

對於極限強度分析，函數 S 通常定義為結構響應之最高值，因此 $S(F_d) = F_d$。此公式變為：

$$\gamma_n \gamma_f F_k \le \frac{1}{\gamma_M} R_k \tag{38}$$

應注意 γ_n 為失效後果因數，不應視為材料之安全因數。

對於每個評估之風力機組件，及對於表 2 中每個適合進行極限強度分析之負載狀況，公式(38)中之極限狀態條件，應針對最關鍵之極限狀態進行查證，該極限狀態依據具最小裕度加以識別。

7.6.2.2 負載局部安全因數

對於 DLC 1.1，應藉由對正常設計工況下發生之極端負載進行統計分析，以決定負載之特徵值，並應符合下述替代方式之一：

(a) 特徵值取得方式為在給定範圍內，對每一風速所決定之 10 min 極值之平均值當中取最大值(或最小值)，再乘上 1.35。此方法僅可用於計算葉片根部面內力矩、面外力矩及葉尖撓曲。

(b) 特徵值取得方式為在給定範圍內，對每一風速所決定之 10 min 極值之第 99 百分位數(或在最小值的情況下之第 1 百分位數)中取最大值(或最小值)，再乘上 1.2。

(c) 特徵值取得方式為依據負載外插方法，並考量 6.3.2.1 所給之風速分布及 6.3.2.3 正常擾流模型，獲得對應 50 年回歸期之值。負載外插之指引參照附錄 G。

設計負載將藉由將上述任一替代方式所得之特徵負載，乘以表 3 定義 DLC 1.1

之局部安全因數而取得。

對於上述 3 種替代方式，統計分析中所使用之資料，應從風力機模擬之時間序列中擷取，該時間序列至少 10 min，且涵蓋 DLC 1.1 風力機之運轉範圍。對於從(V_r − 2 m/s)至切出風速之每個風速，至少需要 15 次模擬，對於低於(V_r − 2 m/s)之每個風速，至少需要 6 次模擬。在擷取資料時，設計者應考量峰值間之獨立性對統計分析的影響，可能時將相依性最小化。關於相依性檢查之指引參照附錄 G。

對於具特定確定性風場事件之負載狀況，其負載特徵值應為計算所得之最不利情況之暫態值。若在給定之風速進行多次模擬以表示轉子方位角，則該負載狀況之特徵值取各方位角最不利暫態值的平均值。關於同時負載的推導指引參照 IEC 61400-1:2019 之附錄 I。當使用擾流入流時，應取不同 10 min 隨機實現之最不利計算負載的平均值。但 DLC 2.1、DLC 2.2 及 DLC 5.1 除外，其負載特徵值應取最大負載的最大一半之平均值。

當 NTM 由統計分布[公式(11)、(12)及(13)]表示時，除 DLC 1.1 外，負載之特徵值應與使用 90 %百分位數 NTM90[公式(14)]所得的負載回歸期相同。

負載局部安全因數至少應為表 3 規定之值。

7.6.1.2 之方法，將負載局部安全因數應用在負載響應上，假設動態響應之適當呈現為主要考量。當非線性材料行為或幾何非線性(如基礎)或二者之適當呈現為主要考量時，設計負載響應 S_d 應藉由對設計負載 F_d 之組合進行結構分析取得，而設計負載係由將特徵負載 F_k 乘上有利及不利負載之指定局部負載因數 γ_f 而得到：

$$F_d = \gamma_f F_k \tag{39}$$

塔架於介面處之負載響應(剪力與彎曲力矩)乘以表 3 的 γ_f，應採用為邊界條件。

表 3　負載局部安全因數 γ_f

不利負載		有利負載[17]
設計工況型式(參照表 2)		所有設計工況
正常(N)	異常(A)	
1.35[a]	1.1	0.9
註[a] 對於設計負載狀況 DLC 1.1，局部安全因數應為 γ_f = 1.25。 若對於正常設計工況，能對所涉設計工況計算由重力造成之負載響應的特徵值 $F_{gravity}$，且重力為一不利負載，則重力與其他來源之組合負載的局部負載因數可具下列值。		

$$\gamma_n = 1.1 + \varphi\zeta^2 \text{及 } \varphi = \begin{cases} 0.15 & \text{對於 DLC 1.1} \\ 0.25 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 - \left|\frac{F_{gravity}}{F_k}\right| & |F_{gravity}| \le |F_k| \\ 0 & |F_{gravity}| > |F_k| \end{cases}$$

對於設計負載狀況 DLC 2.1，若已對所考量之失效模式評估失效間平均時間(mean time between failures, MTBF)(以年為單位)(參照 7.4.3.2)，則局部負載因數可從下式計算得到：

$$\gamma_f = \begin{cases} 1.35 & \text{MTBF} \le 10 \\ 1.71 - 0.155\ln(\text{MTBF}) & 10 < \text{MTBF} \le 50 \\ 1.10 & \text{MTBF} > 50 \end{cases}$$

對於設計負載狀況 DLC 2.5，局部負載因數應為 1.2。

註(17) 可顯著減輕總負載響應之預張力與重力負載視為有利負載。當同時出現有利與不利負載時，公式(38)變成：

$$\gamma_n S(\gamma_{f,unfav} F_{k,unfav}, \gamma_{f,fav} F_{k,fav}) \le R(f_d)$$

使用表 3 中規定之正常與異常設計工況的負載局部安全因數，需要負載計算模型必須藉由負載量測加以確證。此等量測應於 1 台在空氣動力、控制及動態響應與所考量之風力機設計相似的風力機上進行。

7.6.2.3 重力基礎之局部安全因數

對於重力基礎，應依據認可標準考慮並計算涉及整體穩定性(剛體運動且土壤中無失效)及土壤與基礎阻抗之極限狀態。一般而言，對於不利重力負載應施以 $\gamma_f = 1.1$ 之局部安全因數，而對於用於基礎負載、回填及浮力等有利之重力負載應施加 $\gamma_f = 0.9$。若可藉由相關品質管理與監督證明設計文件中所規定之基礎材料密度在現場得到滿足，則對於土壤與基礎阻抗之極限狀態，可使用 $\gamma_f = 1.0$ 之重力基礎負載局部安全因數。若浮力係以地形水位計算，則浮力局部安全因數可為 $\gamma_f = 1.0$。

或者，對於土壤與基礎負載能力之檢查，有利與不利負載二者皆可基於 $\gamma_f = 1.0$ 之重力負載局部安全因數，而對於整體穩定性檢查，可基於不利負載 $\gamma_f = 1.1$、有利負載 $\gamma_f = 0.9$，在所有情況下，均使用保守估算之重量或密度，定義為 5 % / 95 %分位數。有利負載使用較低分位數(5 %)，不然則使用較高分位數(95 %)。

7.6.2.4 缺乏認可設計規範可利用之阻抗局部安全因數

阻抗局部安全因數應依可利用之材料性質試驗資料的適當性來選擇。本標準中之安全位準，當應用於 95 %存活機率(18)之特徵材料性質時，阻抗局部安全因數 $\gamma_M = 1.2$。假設此值無偏差(阻抗模型中典型之系統性保守性)，且阻抗模型不確定度很小(變異係數小於 5 %)，參照附錄 K，並應用至具延性行為且其失效可能導致風力機主要部分失效之組件。

註[18] 或者，可使用 Bayesian 方法選擇 95 %分位數作為特徵強度參數，參照附錄 K 及 ISO 2394。對於已建立代表性樣本測試程序之材料，特徵強度參數宜選擇 95 %分位數(以 75 %信賴度決定)或驗證值。

為推導阻抗設計值，需考量尺度效應、許可差及因外部作用(如紫外線輻射或濕度)而造成之劣化。考量此等效應可藉由阻抗局部安全因數之額外因數，或藉由使用轉換因數取得阻抗特徵值，參照附錄 K。

對於具有延性失效模式之下述情況，阻抗局部安全因數 γ_M 不應小於：

- 1.1：用於具有明確定義彈性限界(降伏強度為極限強度之 90 %以下)之材料。及
- 1.1：用於在連接中具有足夠螺栓數量、足以確保延性失效模式之螺栓斷裂。

對於具有非延性行為，且其失效會迅速導致風力機主要零件失效之〝安全壽命〞機械/結構組件，其阻抗局部安全因數 γ_M 不應小於：

- 1.3：用於無明確定義之彈性限界(降伏強度大於抗拉或抗壓強度之 90 %)材料。
- 1.2：對於曲線殼體(如管狀塔架及葉片)之全域挫曲。

7.6.2.5 具認可設計規範可利用之材料局部安全因數

應如認可設計規範之規定採用阻抗局部安全因數 γ_M，參照 7.6.1.4。或者，可使用 7.6.2.4。應如 7.6.1.3 之規定額外採用失效後果局部安全因數 γ_n。

7.6.3 疲勞失效

7.6.3.1 一般

應使用適當之疲勞損傷計算方法估算疲勞損傷。例：在 Miner's 法則之情況下，當累積損傷超過 1 時即達到極限狀態。故在此情況下，於風力機之設計壽命期內之累積損傷應不大於 1。疲勞損傷計算應考量其公式，包括循環(應變/應力)範圍與平均應變(或應力)位準之效應。所有局部安全因數(負載、材料及失效後果)均應使用至循環應變(或應力)範圍，以評鑑每一疲勞循環對損傷增量之影響。附錄 H 提供 Miner's 法則之示例公式。

7.6.3.2 負載局部安全因數

負載局部安全因數 γ_f 應為 1.0。

7.6.3.3 缺乏認可規範可利用之阻抗局部安全因數

當 S-N 曲線基於 50 %存活機率且變異係數<15 %時，阻抗局部安全因數 γ_M 應至少為 1.7。對於疲勞強度[19]變異係數較大(即 15 %至 20 %)之組件(諸如許多複合材料組件，例：鋼筋混凝土、纖維複合材料等)，γ_M 應相應提高，且至少達到 2.0。

註[19] 此處疲勞強度定義為與給定循環次數相關之應力範圍。

疲勞強度應來自具統計顯著性之試驗次數，且特徵值推導應考量尺度效應、

許可差、外部作用(如紫外線輻射)及通常無法偵測到之缺陷。

對於銲接與結構用鋼，傳統上 S-N 曲線係以 97.7 %存活機率為基礎。在此情況下，γ_M 可取為 1.25，對應於安全壽命評鑑方法(參照附錄 K)。若可藉定期檢驗計畫偵測關鍵裂縫之發展，γ_M 可採更低值，對應於損傷容許評鑑方法(參照附錄 K)。在所有情況下，γ_M 均應大於 1.0。

對於纖維複合材料，其強度分布應依據實際材料之試驗資料建立。應以 95 %存活機率作為 S-N 曲線之基礎。在此情況下，γ_M 可使用 1.35。其他材料亦可使用相同方法。

7.6.3.4 具認可設計規範可利用之局部安全因數

應如認可設計規範之規定採用阻抗局部安全因數 γ_M，參照 7.6.1.4。應如 7.6.1.3 之規定額外採用失效後果局部安全因數 γ_n。或者，可使用 7.6.3.3 之規定。

7.6.4 穩定性

〝非失效安全〞組件之負載承載部分在設計負載下不得發生挫曲。對所有其他組件，在設計負載下可接受彈性挫曲。在任何組件中，在特徵負載下不應發生挫曲。

應依 7.6.2.2 選擇負載局部安全因數 γ_f 之最小值，以取得設計值。材料局部安全因數不應小於 7.6.2.4 所規定的安全因數。

7.6.5 關鍵撓曲分析

7.6.5.1 一般

應查證在表 2 所述之設計條件下不會發生影響結構完整性的撓曲。應決定表 2 所述負載狀況中，在不利方向之最大彈性撓曲。所得之撓曲特徵值，應以與其他負載分量一致之方式決定。其所得之特徵撓曲為再乘上負載、材料與失效後果之組合局部安全因數。

7.6.5.2 負載之局部安全因數

γ_f 值應選自表 3。

7.6.5.3 材料彈性性質之局部安全因數

除非所質疑之組件的彈性性質已藉由測試與監測加以決定，此時可降低 γ_M 值，否則 γ_M 值應為 1.1。應特別留意幾何不確定度與撓曲計算方法之準確性。

7.6.5.4 失效後果之局部安全因數

失效後果局部安全因數 γ_n 應為 1.0。

然後，應將彈性撓曲加至最不利方向之未撓曲位置，並將所得位置與無干涉的要求比較。

7.6.5.5 葉片(尖端)撓曲

最重要的考量之一是查證葉片與塔架間不會發生機械干涉。葉片–塔架間隙之組合安全因數 $\gamma_f\gamma_n\gamma_m$ 至少應為 1.15。

一般而言，葉片撓曲需針對極限負載狀況進行計算。由極限負載狀況造成之

撓曲可基於樑模型、有限元素模型或類似模型進行計算。表 2 中所有相關之負載狀況均需考量相關的局部負載安全因數。

此外，對於 DLC 1.1，應強制依 7.4.2 進行最大尖端撓曲或最小塔架間隙之統計分析。在此可使用直接動態撓曲或塔架間隙分析。此特徵值在最不利方向之機率，應與特徵葉片負載之機率相同。對撓曲分析而言，其特徵撓曲應乘以負載、材料與失效後果之組合局部因數，再加到最不利方向之未撓曲位置，並將所得位置與無干涉之要求比較。在直接動態塔架間隙分析之情況下，最小容許間隙係以標稱未撓曲塔架間隙乘上，組合局部因數($\gamma_f\gamma_n\gamma_m$)減 1 與組合局部因數之比(即$\frac{\gamma_f\gamma_n\gamma_m - 1}{\gamma_f\gamma_n\gamma_m}$)得出。

7.6.6 特殊局部安全因數

當負載大小係藉由量測或藉由量測確認分析方法，以高於一般信賴度建立時，可使用較低之負載局部安全因數。所使用之所有局部安全因數值，應於設計文件中加以聲明。

7.6.7 經由負載比較評估極限狀態

7.6.7.1 一般

作為 1 種簡化方法，終極極限狀態分析可藉由與先前分析過之設計狀況進行負載比較來評估，基準負載應始終作為負載比較之基準。

此負載比較可用於評鑑現存結構設計，對環境條件變化(參照 11.10)或風力機設計之微小改變[例：控制器更新或某些其他風力機組件(例：塔架)之修改]的適合性。在主要組件改變的情況下，其餘結構可基於負載比較進行評鑑。

若 CNS 15176/CNS 61400/IEC 61400 系列標準未對特定組件標準另有規定，應考量下述情況。

對於極端負載，無需與同時負載進行比較。應考量所有強制負載狀況。當相關時應考量極端負載之正負號。

對於疲勞負載，負載比較可基於 DEL。SN 曲線斜率應與每個組件的設計分析一致。

若相關應包括平均負載效應[20]。

註[20]若平均負載對疲勞損傷有顯著影響，且其受風速驅動，以及若平均風力分布與設計條件有顯著差異，則應考量其效應，特別是螺栓凸緣連接可能至關重要。

與基準負載相比，可接受極端負載超過最多 5 %而疲勞負載超過最多 3 %[21]。在超過給定許可差的情況下，應進行結構查證，包括特定組件的所有相關負載通道。

註[21]可忽略此等許可差對負載之 COV 及失效機率的影響。在依據附錄 K 校正安全因數的情況下，需將此等許可差作為負載側的額外隨機變數，其 COV 等於許可差。

7.6.7.2 轉子葉片

負載比較應包括具設計代表性之葉片截面及負載方向的子集合。

若無相關資料/資訊可用，至少宜考量葉片根部、最大弦長處或距葉片根部的葉片長度 1/4 處、葉片中央處、距葉片尖端的葉片長度 1/3 處，以及葉片凸緣處之葉片截面。

7.6.7.3 機械結構及傳動鏈組件

對於疲勞負載，應額外考量依 LDD 或 LRD 計算而得的旋轉組件(如齒輪箱、軸承、旋角及轉向系統)之等效負載。

7.6.7.4 塔架及基礎

負載比較應包括在塔架的代表性位置提取的負載，至少包括塔頂、塔底，以及若適用，結構特性發生顯著改變的塔架段(例：混合塔架中的過渡段)。

亦應比較混凝土部分之 S3 彎曲力矩(S3 極限狀態參照 IEC 61400-6)。

7.6.7.5 葉片撓曲與塔架間隙

負載比較應包括最小塔架間隙的檢查。

8. 控制系統

8.1 一般

風力機運轉應由符合本節要求之控制系統管理。

本節之適用範圍僅限於確保提供適當防護位準的控制系統，以避免風力機主要組件結構失效[22]。

註[22]風險評鑑可能會因確保人員安全而導致需要額外控制系統功能。此等功能宜依據認可之方法及設計原則進行設計與評估，如 ISO 13849 或 IEC 62061 規定之方法與原則。

關於特殊寒冷氣候要求，參照 14.6。

8.2 控制功能

風力機控制功能應以主動或被動方式控制運轉，並使運轉參數保持在結構設計所假設範圍內。

控制功能可控制或限制某些功能或參數，如：

- 功率。
- 轉子轉速。
- 電氣負載之連接。
- 起動與停機程序。
- 電纜扭曲。
- 過度振動。
- 風向之對準。及
- 葉片旋角。

在控制功能無失效運轉期間，其控制風力機之控制能力應在設計負載狀況中加以

證明(但不包括 DLC 2.1 與 DLC 2.2 負載狀況)。

當發生控制功能失效時，風力機必須維持安全之運轉模式，該模式可包含維持運轉或使風力機進入停機。

應明確定義控制功能發生故障後之風力機行為，包括任何自動或手動再起動程序，參照 8.7。

8.3 防護功能

控制系統應使用防護功能，以防止因失效模式造成風力機結構過載。此等防護功能可作為本質安全設計措施之控制功能[23]，或作為獨立之次要層防護功能。

註[23]ISO 12100:2010 之 6.2.11 及 6.2.12 提供將本質安全設計措施應用於控制系統之指引。

當次要層防護功能用以使風力機進入安全運轉模式時，其應覆蓋主要層控制功能。

用以防止結構過載之功能，應以多通道架構[24]並具診斷涵蓋之方式，以達成足夠高之平均故障間隔時間。

註[24]多通道架構包括但不限於使用冗餘。若單一功能通道加上由獨立試驗通道提供之高診斷涵蓋率，可產生足夠長之平均危險失效時間，則即可符合要求。ISO 13849-1 規定之 2 類系統架構即屬於此類架構。

防止結構過載之防護功能能力，應在設計負載狀況 DLC 2.1 與 DLC 2.2 中加以證明，參照 7.4.3。

8.4 控制系統失效分析

8.4.1 一般

實施控制與防護功能的系統之故障或錯誤可能導致許多失效模式，此失效模式定義為在故障或錯誤情況下之控制系統行為。此類失效模式可能導致影響風力機結構之事件。

例： 感測器故障可能導致錯誤之旋角動作(失效模式)，此可能導致轉子轉速(事件)過快。

控制系統之失效模式應依本節要求加以識別，並依 7.4.3 要求進行評估。

應進行 FMEA 或等效之故障分析，以決定與風力機負載相關之故障事件。此分析可包含故障樹分析或類似方法，以識別任何共因失效。

故障分析所涵蓋之事件組合至少應包括下列事項：

(a) 轉子轉速過快。

(b) 過度振動。

(c) 過度發電。

(d) 致動器故障，例：旋角與轉向致動故障。

8.4.2 獨立失效與共因失效

可假設獨立故障不會同時發生。若作此假設，則應對共因失效採取措施，並應具備足夠之診斷涵蓋以防護潛在失效[25]。

註[25] ISO 13849-1 可用於判斷對共因失效採取之措施是否足夠。

8.4.3 故障除外項

依認可標準所述並屬於故障除外項[26]範圍之控制系統失效，可予以省略。

註[26]標準中如 CNS 16068-2 說明故障除外項。對機械組件而言，故障除外項與〝安全壽命〞組件相關。

所有控制系統中適用故障除外項之機械組件，應視為具適當失效後果局部安全因數(依 7.6 定義)之組件等級 3 組件。所有此類關鍵組件均應進行極限強度、疲勞、挫曲及關鍵撓曲分析。

8.4.4 失效模式回歸期

若在負載計算(參照 7.4.3.2)中主張失效模式之回歸期，則應以認可方法加以證明[27]。

註[27]參照 IEC 61508-6 或 IEC 62061 瞭解適合之方法(例：故障樹、Markov 模型等)以證明失效率。此外，ISO 13849-1 提供評鑑失效率之簡化方法，包括組件之通用值。

對機械組件而言，僅在未適用故障除外項時才需建立失效模式回歸期。

8.4.5 系統性失效

對於防護功能及對於主張失效模式回歸期超過 10 年之控制功能，應依認可標準採取避免系統性失效[28](包含軟體失效)之措施。

註[28]於 IEC 62061:2005 及其修訂版之 6.4、6.10、6.11 或 ISO 13849-1:2015 之 4.6、附錄 G 及附錄 J 涵蓋避免系統性失效及軟體失效之措施。

8.5 手動操作

手動或自動介入不應削弱控制系統保持風力機在限制範圍內之能力。任何容許手動介入之裝置應清楚可見且可辨識，必要時適當標示。

當可選擇控制模式時，例：維護用途，模式選擇應由 1 個選擇器控制，其可鎖定於單一模式之每一位置上。

控制系統設定應防止未授權之干擾。

8.6 緊急停止按鈕功能

應使用認可方法及設計原則實現緊急停止按鈕功能，如 ISO 13850 規定之方法，該標準提供緊急停止按鈕之可用性、位置、停止功能選擇及重置行為之指引。

應明確規定所選擇之停止類別。此外，當緊急停止按鈕被啟動時，控制系統需提供之任何功能應清楚指定[29]。

註[29] 當選擇停止類別 1 (受控停止)時，此要求尤其重要。

所有在啟動緊急停止按鈕時會影響結構負載之系統行為應明確指定。

例：切斷電氣系統可能會影響傳動鏈之負載。

當緊急停止功能行為依操作條件而定時，此等依賴關係應明確定義。

例：在緊急按鈕啟動時施加機械盤煞車，可能會依轉速及/或風速等條件而定。

啟動緊急停止按鈕之效應應於 DLC 5.1 下對所有相關操作情境進行評估(參照 7.4)。

8.7 手動、自動及遠端再起動

於停止後再起動風力機之機制應明確定義，並符合以下要求：

風力機控制功能失效後之再起動行為及再起動程序[30]，應基於失效模式分析(例：藉由故障樹分析)定義之。

註[30]再起動程序需考量風力機停機原因，以佐證可安全再起動風力機。例：若風力機因過度機械衝擊而停機，則在未進行檢驗下再起動可能視為不安全。

若定義是否可以再起動的功能失效，可能會影響風力機負載時，則此等故障宜視為 8.4.1 所定義之控制系統故障事件。

控制功能失效後之行為可藉由自動或手動程序定義，並可在本地或遠端執行。對於遠端再起動，應包括任何所需的遠端檢驗(例：使用遠端攝影機及/或 SCADA 資料)，及在認定安全前需符合之適當準則。

為確保再起動後風力機將保持安全(即風力機損傷風險在可接受範圍內)，除非已定義自動診斷及所需準則，否則不應容許自動再起動。

例：此類診斷可能包括自動確認轉子轉速及塔頂加速度未超過結構設計限制值。

應考量非預定遠端再起動之風險與後果(例：由通訊系統錯誤導致)。

具自動或遠端再起動功能之風力機，應提供 1 種能夠本地停用及鎖定自動再起動功能及遠端再起動功能之裝置。

風力機不應因電網電力之喪失(及恢復)、外部負載或維護措施等外部因素而不正確再起動。

遠端或自動再起動允許之次數與頻率應明確定義，且基於設計負載評鑑中停機假設。再起動功能應確保不超過此等限制值。

設計負載評鑑應考量在上述限制值內反覆再起動之後果。

控制允許遠端或自動再起動次數與頻率之功能，不應因電網電力之喪失(及恢復)、外部負載或維護措施等外部因素而不正確影響。

8.8 煞車系統

應能將轉子從任何運轉狀態(包括斷電)帶至惰轉模式或完全靜止狀態。

除非基於風險評鑑結果明確排除，否則應提供在任何低於維護與修理定義風速限制之風速下，使轉子帶至完全靜止狀態之手段，參照 7.4.9。

建議至少有 1 個煞車系統採用空氣動力原理運作，直接作用於轉子。若未滿足此建議，至少應有 1 個煞車系統作用於直接連接轉子之軸或風力機轉子。

若煞車系統設計為在緊急停止啟動時將轉子帶到靜止，則應能在施加後至少 1 h 內保持轉子在定義風況下靜止狀態。

9. 機械系統

9.1 一般

本標準所稱之機械系統，係指任何不僅由靜態結構組件或電氣組件組成，而是藉

由軸、連桿、軸承、滑動件、齒輪及其他裝置，使用或傳遞相對運動之系統。在風力機中，此等系統可包含傳動鏈之元件，如齒輪箱、軸、聯軸器及輔助設備，如煞車、葉片旋角控制器、轉向驅動器。輔助設備可由電動、液壓或氣壓方式驅動。

傳動鏈與控制系統中所有機械系統，應依 IEC 或 ISO 標準設計，如無可用標準，則使用認可標準。局部安全因數應符合 7.6.1.3 中組件等級 2 之組件，除非系統屬於組件等級 3 之組件。

應特別注意，冷卻與過濾系統能在遵循指定的維護程序下，保持操作溫度範圍內之相關運轉條件。

煞車系統中受磨耗影響之任何組件剩餘壽命應自動監測並定期檢驗。若材料不足以進行後續緊急停止，風力機應待機。所有煞車裝置應設計與維護，使反應時間維持在可接受範圍內。

負載計算應基於模擬，包括平均煞車位準，與設計預測容許的最小摩擦及施壓之最小煞車位準。當煞車時，若煞車器在最小煞車位準下會滑動，則應設計成避免過熱及煞車性能降低，並避免火災風險。

寒冷氣候要求參照 14.7。

9.2 裝配錯誤

在裝配或重新裝配某些可能造成風險之零件時，設計應使可能之錯誤操作不可能發生。若設計無法完全防止，則應在零件本身及/或其外殼上提供相關資訊。對於移動件及/或其外殼，亦應提供移動方向資訊以避免風險。任何其他必要資訊，應在操作手冊及維護手冊中說明。

若錯誤連接可能導致風險時，應藉由設計防止錯誤連接。若無法完全防止，則應於硬管、軟管及/或連接器插頭塊上提供資訊以採取預防措施，避免連接錯誤。

9.3 液壓或氣壓系統

若輔助設備以液壓或氣壓供能，系統應設計、製造並裝備以避免與此類動力相關之所有潛在危害。此類系統中應包括隔離或釋放累積能量之裝置。所有輸送液壓油或壓縮空氣之硬管及/或軟管及其附件，應設計能承受或防護免受預見之內部與外部應力。應採取預防措施，最大限度地降低因破裂造成之受傷風險。

9.4 主齒輪箱

主齒輪箱應依 CNS 15176-4 設計。

9.5 轉向系統

轉向系統可由維持固定轉向方位之裝置(例：液壓煞車)、改變方位之裝置(例：馬達、齒輪箱及小齒輪)及導引旋轉之裝置(例：軸承)組成。

所有馬達應符合第 10 節相關要求。

齒輪系統之非冗餘零件(如最終轉向齒輪)應視為組件等級 2 的組件。若多個轉向驅動確保齒輪系統有足夠冗餘且可輕易更換，則減速齒輪箱及最終驅動小齒輪可

視為組件等級 1 之組件。

耐點蝕能力應依 ISO 6336-2 決定。允許採用上限曲線(1)之壽命因數 Z_{NT}，其容許有限之點蝕。足夠的輪齒彎曲強度應依 ISO 6336-3 證明，輪齒之反向彎曲負載應依 ISO 6336-3:2006 附錄 B 考量。S_F 與 S_H 之最小值依表 4 規定。此等值應使用特徵負載 F_k 達成，因此 S_F 與 S_H 已包含後果 γ_n、材料 γ_M 與負載 γ_f 之局部安全因數。

表 4　轉向齒輪系統最小安全因數 $S_{F,min}$ 與 $S_{H,min}$

	組件等級 1	組件等級 2
表面耐久性(點蝕)	$S_{H,min}$= 1.0	$S_{H,min}$= 1.1
輪齒彎曲疲勞強度	$S_{F,min} \geq 1.1$	$S_{F,min} \geq 1.25$
靜態彎曲強度	$S_{F,min} \geq 1.1$	$S_{F,min} \geq 1.2$

然而，當實施有效監控時，轉向齒輪系統之安全因數 S_F 與 S_H 可適度降低。若使用小於 1.0 之安全因數，維護手冊中應反映預期之更換週期。

9.6 旋角系統

旋角系統可由調整葉片旋角之裝置(例：液壓致動器、馬達、齒輪箱、煞車及小齒輪)及導引旋轉之裝置(例：軸承)組成。

所有馬達應符合第 10 節相關要求。對於具有單獨旋角驅動/致動器且確保足夠冗餘之旋角系統，可視為組件等級 2 之組件。

對於組件等級 2 之組件，齒輪箱及齒輪應符合 9.5 相關要求。

9.7 機械煞車防護功能

若機械煞車用於防護功能(參照 7.4.3.3)，通常為液壓或機械彈簧壓力作用之摩擦裝置。任何易磨損組件(例：摩擦片)之剩餘壽命應由控制系統監測，當材料不足以支持進一步緊急停止或煞車時，控制系統應將風力機置於待機模式。

負載計算應基於模擬，包括適當範圍之煞車位準。若煞車在最小煞車位準下能滑動，且需保持風力機靜止，則在擾流風中滑動之時間應足夠短，以避免過熱、煞車性能下降及火災風險。

9.8 滾動軸承

9.8.1 一般

滾動軸承之定額分析應依 ISO 76、ISO 281 及 ISO/TS 16281 進行。計算時應考量實際運轉、潤滑狀況及軸承環境。ISO 281 與 ISO/TS 16281 之壽命調整因數應謹慎使用。

設計負載應反映 7.4 不同負載狀況下所決定之負載，及 7.6 適當之安全因數。軸承設計應考量預期使用壽命內之旋轉次數及旋轉是否連續。

9.8.2 主軸軸承

主軸軸承之修正基準定額壽命 L_{10mr}(90 %存活機率)應符合或超過風力機的指定設計壽命。

9.8.3 發電機軸承

發電機軸承之修正基準定額壽命 L_{10mr}(90 %存活機率)應符合或超過風力機的指定設計壽命。

可在風力機內無需特殊工具即可更換之發電機軸承，可指定較短設計壽命。

9.8.4 旋角及轉向軸承

旋角及轉向軸承之靜定額負載對設計負載的比值依據 ISO 76 應至少為 1.0。應小心考量連接零件之撓性造成的負載分布。

旋角及轉向系統中之軸承受非連續的振盪運動影響，因此，應考量因微小移動而導致潤滑不足之潛在效應。

10. 電氣系統

10.1 一般要求

風力機電氣系統包括每台風力機內安裝之所有電氣設備及風力機終端。以下稱之為〝風力機電氣系統〞。

本節涵蓋特定於風力機設計之電氣組件，其具其他系統或組件標準通常未涉及之特性及功能。本節亦涉及常見之風力機組件，但不預期全部涵蓋在內。特定組件由風力機設計決定，此等組件及總成應依據 10.2 規定，針對電氣、機械及環境方面之安裝位置及應用進行評估。

本標準未涵蓋匯電系統。

10.2 電氣系統之一般要求

電氣系統之設計應確保，在設備運作特定區域之所有正常與極端電氣與環境條件(如 6.4.2 與 6.4.3 所定義)下，於操作與維護期間對人員與牲畜的危害最小，及對風力機與外部電氣系統之潛在損害最小，包含與整體風力機及其環境定額相關之額外效應。電氣組件及次總成應定額其電氣條件及運轉環境。

電氣設備之設計宜使用認可國家或國際標準與風險評估方法，提供潛在閃絡之防護。

寒冷氣候要求參照 14.8。

在本標準中除另有規定外，風力機電氣系統設計應符合 IEC 60204-1 要求。對於輸入或輸出電路在標稱電壓大於 1,000 V AC 或 1,500 V DC 之設備，應適用 IEC 60204-11 要求。製造商應聲明所使用之設計標準。電氣系統之設計應考量風力機發電的波動性。

10.3 內部環境條件

風力機內部之環境條件可能與外部環境條件不同。

應依據 IEC 60721 (系列標準)為風力機內所有主要組件及次總成所在之位置決定環境條件。考量之位置通常包括但不限於輪轂、塔架段、機艙、塔架基礎、塔架地下室。

內部環境條件取決於特定風力機設計中，包含之特定環境控制系統及可預見的環境污染。應考量加熱、冷卻及主動通風。

製造商應為風力機各次總成及主要組件之操作、儲存及運輸指定下列使用條件。當適用時，應使用 IEC 60721 (系列標準)之分類：

- 冷卻液溫度(最低/最高)。
- 周圍溫度(最低/最高)。
- 濕度(最低/最高)。
- 污染等級。
- 振動。
- 過電壓類別(overvoltage category, OVC)。
- 若額定運轉於超過 1,000 m，則需考量與溫度相關之海拔。
- 若額定運轉於超過 2,000 m，則需考量與絕緣協調相關之海拔。

此等環境條件之決定為本節定義的絕緣協調之基礎。

除本標準中特定組件要求另有規定外，應使用 CNS 15620-1 及 CNS 15620-3(適用於額定電壓 1,000 V AC 以下之設備)，IEC 60071-1 及 IEC 60071-2(適用於額定電壓大於 1,000 V AC 之設備)評估特定風力機設備的絕緣協調要求。此絕緣協調評估應處理風力機內電氣設備之過電壓類別、污染等級及環境條件。

風力機內之最低環境條件應視為污染等級 3。在導電性污染(如滑環刷粉塵及煞車粉塵等)之特定區域應視為污染等級 4。

設備特定區域可藉由使用封裝、共形塗層等方式減少污染等級。亦可藉由提供依 CNS 14165 防護之外殼，降低整體設備之污染等級。可採取步驟，藉由設計特徵或考量該組件或設備之操作特性，以控制並降低在沿面距離(creepage)位置之污染等級。

污染等級 2 可藉由減少碎屑堆積(過濾通風)及減少在沿面距離位置產生凝結或高濕度之可能性來達成。可藉由使用加熱器持續加熱或在設備使用時持續使設備通電，以控制凝結。當設備每天 24 h 不間斷運作，或其運作中斷時間不足以冷卻到會產生凝結之程度時，即視為存在持續通電。

污染等級 1 可藉由灌封、模造設備或電路，或將其封裝於 IP 67 外殼中達成。

在風力機之一般位置中，應使用過電壓類別 IV 決定電氣間隙。用於防護控制與電路及其他依賴風力機安全運轉之電路的突波防護器，應包含監測電路或其他自動方式以指示突波防護裝置已失效。使用突波抑制防護可用於特定設備或電路上局部地將過電壓類別降低至低於 IV。

直接或附近之雷擊，可在外部電氣系統及風力機電氣系統(包含輪轂、機艙及塔架內的設備電路)中造成高過電壓條件。若使用突波防護裝置，則應將其安裝於靠近受防護設備位置。

10.4 防護裝置

無論是風力機、設備、次總成與組件內部之功能異常，或因外部電氣系統功能異常所引起之後果，除 IEC 60364 (系列標準)要求外，風力機電氣系統應包含適當之裝置，以確保對於可能導致不安全條件或狀況之功能異常提供防護。此等防護裝置功能包括：短路、過電流、接地故障、溫度過高及電弧故障。

10.5 從電源斷連

應提供可鎖之斷連裝置，以將設備與每個具危害帶電電壓或超過危害能量值、或可衍生危害帶電電壓或能量之電源供應來源斷連。危害電壓與能量之位準定義於 IEC 60204-1 及 IEC 60204-11。

緊急停止並非預定提供此目的之例行斷連功能。

無額外空氣間隙斷連接點之半導體開關裝置，不符合 10.4 要求。

當照明或其他電氣系統在維護期間為安全所必需時，輔助電路應提供其自身之斷連裝置，使此等電路可在所有其他電路已斷電之情況下保持通電。

額定超過 1,000 V AC 或 1,500 V DC 之電路與設備，應符合 IEC 60204-11:2000 之第 5 節。

10.6 接地系統

風力機應提供本地接地電極系統，以符合 IEC 60364 (系列標準)(用於電氣安裝正確運作)及 IEC 62305-3 (用於雷擊防護)(31)之要求。設計文件中應聲明此接地電極系統適用之土壤條件範圍，及當遇到其他土壤條件時之建議。

註(31) 額外考量參照 IEC 61400-24:2010 第 9 節。

接地配置(接地電極、接地導體、主接地終端及匯流排)設備之選擇及安裝，應參照我國用戶用電設備裝置規則或 IEC 60364-5-54。

任何超過 1,000 V AC 或 1,500 V DC 電氣系統之操作，應提供依 IEC 60204-11 用於維護時之接地措施。

10.7 雷擊防護

風力機之雷擊防護系統應依據 CNS 61400-24 設計。雷擊防護系統設計時應採用基於風險之方法，以考量損傷風險與人員安全。

設計時應考量下列區域之防護：

- 轉子葉片。
- 輪轂/鼻錐。
- 機艙。
- 塔架。

其他系統組件，如外部變壓器與不在本標準範圍內之開關裝置，亦可能需要連接或包含於雷擊防護系統中。

風力機內部電氣系統之防護應遵循 IEC 62305-4 規定的雷擊防護方法，設計中結合等電位搭接、遮蔽與突波防護裝置。

雷擊防護系統之設計要求參照 CNS 61400-24。

10.8 電氣電纜

電氣電纜應依其使用地點之電氣、易燃性、機械與環境應用條件進行定額，並應以符合其定額方式安裝。當存在鼠類或其他動物可能損傷電纜之可能性時，應使用鋼甲電纜或導管。

- 電纜應防護或定額，以減輕故障事件中可能之火災風險。
- 除非在故障分析中已特別處理絕緣失效，控制電纜應與電力電纜分離及/或防護電力電纜之影響。
- 電纜夾、支撐與張力緩和裝置(strain relief)應適用於電纜類型，以避免電纜絕緣受損。
- 電纜應防護或適當配置，以防止磨擦與磨耗造成之損傷。

10.9 自激

任何能單獨使風力機自激之電氣系統，在失去電網電力時應斷連並保持安全斷

連。

若電容器組與感應發電機並聯連接(例:用於功率因數修正)，在電網電力喪失時需要適當之開關將電容器組斷連，以避免發電機自激。或者，若已裝設電容器，其應充分展現電容器無法造成自激。

10.10 對雷擊電磁脈衝之防護

過電壓防護應依據 IEC 62305-4 之要求設計。

防護限界應設計為，使轉移至電氣設備之任何雷擊電磁脈衝，不會超過設備絕緣等級所規定之限制值。

10.11 電力品質

CNS 15176-21 程序可用於證明符合公用配電或輸電網路營運者要求。

10.12 電磁相容(EMC)

10.12.1 一般

風力機之設計與製造需確保其電磁抗擾度與發射的相容，其包括為風力機一部分之所有包含電子元件的個別設備/組件，以及整個風力機。需採用整體方法以確保電磁相容。全世界均對電磁輻射限制進行管制，以確保保護唯一現有的電磁頻譜(例：用於無線通訊)。

10.12.2 EMC 設計要求

風力機的組成組件及設備之參考要求，抗擾度要求參照 IEC 61000-6-2，發射要求參照 IEC 61000-6-4。

風力機之輻射發射限制值參照 CISPR 11:2024 的表 20。

使用安全關鍵設備或功能安全設備等設備時，其各自的 EMC 標準中還需滿足額外的電磁抗擾度要求，此不在本節範圍內。

所用設備與電子組件之詳細 EMC 技術文件，應作為整體 EMC 設計評估的一部分[(32)]。

註[(32)] EMC 之進一步要求與量測法參照 IEC 61400-40。

10.13 電力電子轉換器系統與設備

轉換器應依 IEC 62477-1:2012 之表 18 所定義的安裝環境進行評估。風力機內部不視為空調空間。若轉換器安裝於空調空間內，則應依該環境進行評估。污染等級應依據因長時間斷電，由濕度與凝結所造成之水分侵入來選定。IEC 62477-1 定義之環境使用條件可修改，以適應風力機內特定終端應用。

IEC 61800-4 應適用於超過 1, 000 V AC 或 1,500 V DC 之轉換器的操作。

轉換器控制與防護應額外符合第 8 節中適用之要求。

10.14 扭轉/滴水環

在風力機運轉過程中受到移動、彎曲或扭轉之配線，應針對使用條件與額定壽命進行適用性研究。

若風力機之運轉可能導致撓性電纜發生扭轉時，如位於旋轉部件(機艙)與固定

結構(塔架或基礎)部件間之連接電纜，則使用的運轉條件不應對導體或其絕緣造成損傷。評估應處理次總成之使用壽命、電氣與環境運轉條件。

防止導體或其絕緣受到損傷之控制，包括旋轉限制，應視為控制系統之一部分。當多條電纜成組或綁在一起時，應分配總成負載，以使個別電纜不會受到超過其個別額定值之負載。

電纜支撐總成應依運轉時之機械負載與扭力進行設計。

電纜尺寸與溫度額定值應基於該總成之運轉溫度進行評估，包括在完全扭轉狀態下、承載最大正常電流並包含終端應用中距離類似之電氣端接的代表性電氣電纜尺寸與電纜數量。

10.15 集電環

集電環應符合 10.2 與 IEC 60204-1 中之適用部分，並應依其在風力機內受到之電氣與環境條件進行定額。集電環應依其可能受到之正常運作與異常(過載)條件進行定額。集電環之正常定額係基於電路的電氣負載。過載定額應基於電源電路故障電流容量，並可在提供過電流防護之情況下將其納入考量。

用於安全關鍵電力與控制電路之集電環，應提供方法以處理失效與磨耗。

10.16 垂直電力傳輸導體與組件

沿塔架向上配置之垂直電力傳輸系統，如匯流排型系統與電纜型系統，應符合各自之組件標準。匯流排型系統適用 CNS 61439-1 與 CNS 61439-6，電纜型系統適用 IEC 60364-5-52。

對風力機內之電氣與環境條件要求的運作溫度範圍、環境條件、電氣隔離、電氣脈衝耐受與短路耐受能力等，導體與組件應符合其相關的適用標準。

垂直電力傳輸設備應具備足夠之機械強度，使其使用時能承受由特定風力機內之特定組件設計負載狀況結果，所決定的可預見之機械力(撓曲、移動及負載)。

垂直電力傳輸導體與組件之區段，應適當地固定於塔架或塔架中預定支撐該總成之組件上。

對此等垂直電力傳輸系統之評估應考量下述條件：

(a) 系統組件上之靜態負載。

(b) 由塔架在預期極端條件下彎曲所導致之傳輸總成與支撐結構的預期撓曲與力。

(c) 總成之預期力方向與位移大小。

(d) 組件疲勞、緊固件鬆動。

(e) 高分子電氣絕緣材料之劣化、磨耗、變形與潛變。

(f) 電氣導電性或電氣隔離之喪失。

(g) 依據預定風力機壽命或總成規定維護期間之運作。

總成可藉由測試、分析或兩者組合進行評估。

可採用縮尺測試以代表整個系統。

可依設計負載狀況評估進行分析，處理電力傳輸總成與支撐構件之機械與結構適用性。設計負載狀況應特別包含並處理總成、次總成與組件(包括絕緣與導電材料)上之力。

對垂直電力傳輸系統之短路條件考量，宜包含組件及已安裝在系統上之電氣、熱與機械效應。

若分析方法未納入磨擦/磨耗與材料潛變對高分子電氣絕緣材料之效應，則可能需要進行測試。

10.17 馬達驅動器與轉換器

馬達驅動器與轉換器應符合 IEC 61800-5-1 中適用部分。

旋角與轉向馬達驅動器與轉換器控制，應額外符合第 8 節中之適用要求。

10.18 電機

電機應符合 CNS 11445 相關部分，並應具有適用於預定用途之工作定額(33)。

註(33) 宜考量互連電纜長度、驅動電壓波形、絕緣軸承之使用與軸接地配置。

風力發電機應定額為連續運轉(依 CNS 11445-1 之工作 S1)。

由頻率轉換器驅動供電之電機組合應具有協調的電氣與絕緣定額。

10.19 電力變壓器

包含於風力機系統內或作為其一部分之電力變壓器，應符合 CNS 14984/IEC 60076 (系列標準)。

風力機內之低電壓變壓器(包括所有端子)應為完全封閉，或應依據認可之國家或國際標準與法規之要求，位於隔板或面板後方的專用區域內。風力機內之高電壓(high voltage, HV)變壓器應符合 10.21 所定義之限制可及性與上鎖要求。

10.20 低電壓開關裝置與控制裝置

在 1, 000 V AC 或 1,500 V DC 以下運作之低電壓開關裝置與控制裝置，應符合 IEC 61439-1 及 CNS 61439 系列標準之其他部，並應依其在風力機內所承受之電氣與環境條件進行定額。

所有開關裝置與控制裝置之外殼，應提供 IEC 61439-1 與 CNS 61439 系列標準的其他適用部分所要求之警告標記。

10.21 高電壓開關裝置

在 1,000 V AC 或 1,500 V DC 以上運作之高電壓(HV)開關裝置應符合 CNS 15156/ IEC 62271(系列標準)，並應依其在風力機內所承受之電氣與環境條件進行定額。

HV 開關裝置應位於僅授權人員可接近之風力機區域內。應於風力機之入口、艙口或門上張貼警告標記，提醒人員進入入口、艙口或門內區域時，需穿戴適當之個人防護具，以應對區域內之危害。

安裝於一般維護人員可接近區域內之 HV 開關裝置，應為金屬封閉並規定內部電弧分類(internal arc containment classification, IAC)。所有人員可能合理接近

之設備側面，其 IAC 應為 CNS 15156-200 定義之類別 A。

HV 開關裝置應以不低於 1 s 之 IAC 故障電流持續時間進行測試、定額與標示。

HV 開關裝置應依製造商之定額與說明進行安裝。洩壓通風口應無阻礙地排放，且對人員或設備無風險。

對自動運作配置之開關裝置應為可切換，以便鎖定及停用自動運作。

依據 10.4 要求，HV 開關裝置與其相關控制，應提供可鎖定於安全狀態之方法。

SF6 開關裝置應安裝於具有足夠通風之區域，以避免在洩漏事件中對人員造成危害。

10.22 輪轂

輪轂內之設備應依據 CNS 14165 提供適用於電氣與環境用途定額的外殼，以防護電氣組件受損。電氣櫃與外殼應提供可牢固固定之門或蓋。

與控制系統相關之配線應受機械防護，以避免因輪轂旋轉、維修人員作業接觸及輪轂內意外撞擊而損傷。

11. 風力機在場地特定條件之評鑑

11.1 一般

風力機會受到環境與電氣條件之影響，包括鄰近風力機之影響，而此等可能影響其負載、耐久性及運轉。除此等條件外，亦需考量風力機場地之地震、地形與土壤條件。應展現場地特定條件不會損害結構完整性。此證明需評鑑場地複雜度(參照 11.2)及評鑑場地之風況(參照 11.3)。為評鑑結構完整性，可使用 2 種方法：

(a) 證明所有此等條件均不比風力機設計所假設的條件更嚴苛，參照 11.9。

(b) 證明結構完整性的條件，每項都等於或比場地的條件更嚴苛，參照 11.10。

若任何條件比設計中假設的條件更嚴苛，則應使用第 2 種方法(b)證明結構與電氣相容。

7.6.2.2 之負載局部安全因數，係假設正常與極端風況之場地評鑑已依第 11 節最低要求進行。

11.2 場地地形複雜度及其對擾流效應之評鑑

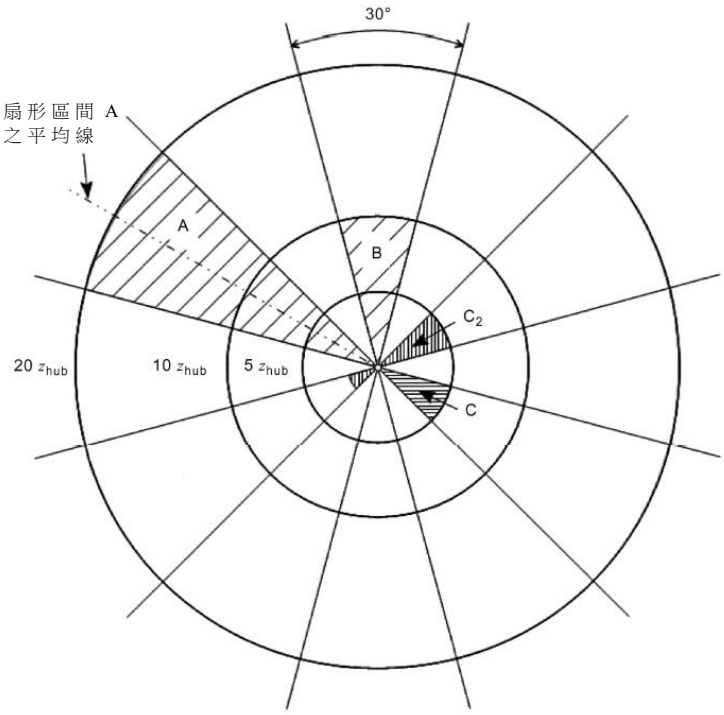
11.2.1 地形複雜度之評鑑

應對場地之地形複雜度進行評鑑，因地形可能造成擾流結構扭曲，進而偏離設計條件。

場地複雜度由地形坡度與地形自平面之變化特徵化，可依下述程序進行評鑑。為獲得地形之坡度，對風力機四周所有風向扇形區間，定義在特定距離與扇形區間幅度內可擬合地形之平面，參照圖 10 與圖 11。所擬合平面無需通過塔架基礎。坡度表示水平線與垂直投影於擬合平面之各扇形區間不同平均線間的角度。相應地，地形自擬合平面之變化表示沿垂直線，在地表點擬合平面與地形間之距離。

用於地形複雜度評鑑之地表網格及其原始來源地圖的解析度不宜超過 50 m。

圓形扇形區間應為 30°。對半徑 $5z_{hub}$ 之圓形扇形區間，用於擬合平面的區域可向風力機位置往下風向延伸 $2z_{hub}$，參照圖 10。



說明

A　半徑 20 z_{hub}

B　半徑 10 z_{hub}

C　半徑 5 z_{hub}

C_2　半徑 5 z_{hub} 並往風力機位置後方延伸 2 z_{hub}

圖 10　用於擬合地形資料之 30°扇形區間示例

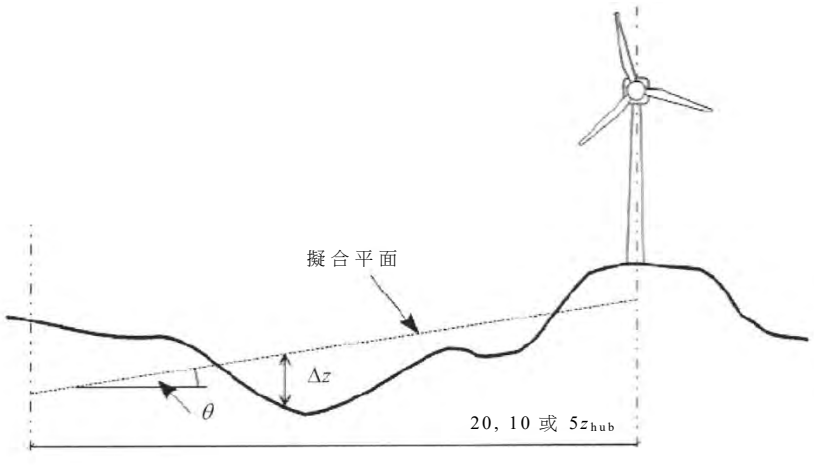


圖 11　地形變化(Δz)與地形坡度(θ)

使用如此定義之坡度與地形變化，每個圓形區域之地形坡度指數(terrain slope indices, *TSI*)與地形變化指數(terrain variation indices, *TVI*)由下式給出：

$$
\begin{aligned}
TSI_{30} &= \sum_{i=1}^{12} f_{\text{Energy}}(i) \times |\theta(i)| \\
TVI_{30} &= \sum_{i=1}^{12} f_{\text{Energy}}(i) \times \frac{D_{\text{TV}}(i)}{R} \\
TSI_{360} &= k_1 \times \theta_{360} \\
TVI_{360} &= \frac{D_{\text{TV360}}}{k_2 \times R}
\end{aligned}
\tag{40}
$$

式中，TSI_{30}、TSI_{360}：分別係由 30°扇形區間與 360°圓形區域計算之地形坡度指數

TVI_{30}、TVI_{360}：分別係由 30°扇形區間與 360°圓形區域計算之地形變化指數

i：風向扇形區間索引(1、2、……、12)

$f_{\text{Energy}}(i)$：通過第 i 個 30°扇形區間之風能百分比，$\sum f_{\text{Energy}}(i) = 1$

$\theta(i)$：第 i 個 30°扇形區間之擬合平面坡度

θ_{360}：擬合之 360°圓形平面坡度

$D_{\text{TV}}(i)$：第 i 個 30°扇形區間地形變化之標準差

D_{TV360}：360°圓形區域地形變化之標準差

R：圓形區域之半徑

k_1：TSI_{360} 之經驗調整因數，k_1 = 5/3

k_2：TVI_{360} 之經驗調整因數，k_2 = 3

TSI_{30} :12 個扇形區間化擬合平面坡度經能量入流加權後之平均絕對值。同樣地，TVI_{30} 係 12 個扇形區間化地形變化標準差經圓半徑正規化及能量入流加權後之平均值

TSI_{360} ：擬合之 360°圓形平面坡度經由經驗因數 k_1 調整後的值

TVI_{360} ：360°圓形區域地形變化之標準差，以圓形半徑正規化並經由經驗因數 k_2 調整後之值

地形藉由 2 個指數 *TSI* 與 *TVI*，對 3 個圓形區域($5z_{\text{hub}}$、$10z_{\text{hub}}$ 及 $20z_{\text{hub}}$)之各個區域進行地形複雜度評鑑。對於此 2 個指數，定義 3 個複雜度類別：低(L)、中(M)與高(H)，參照表 5。若 3 個圓形區域之 TSI_{30} 與 TVI_{30} 及 TSI_{360} 與 TVI_{360} 值全部低於類別 L 之閾值，則該場地評為不複雜。若不是，則該場地評為複雜，並依據任一圓形區域之 *TSI* 或 *TVI* 最高類別，指定為 3 個複雜度類別之一：L、M 或 H。

表 5　地形複雜度類別 L、M 與 H 之閾值

圓形區域之半徑	擬合平面之扇形區間幅度	閾值(下限)					
		地形坡度指數(*TSI*)			地形變化指數(*TVI*)		
		L	M	H	L	M	H
$5z_{hub}$	360°	10°	15°	20°	2 %	4 %	6 %
$5z_{hub}$	30°						
$10z_{hub}$							
$20z_{hub}$							

11.2.2 場地之擾流結構評鑑

場地擾流結構(即擾流 3 個分量比)應主要由場地之量測決定。當無場地資料時，可由適當之氣流模型進行估算。

或亦可依據場地複雜度估算。可依據 11.2.1 所述程序定義之複雜度類別，選用表 6 中對應之值。

表 6　相對於縱向分量之橫向與垂向擾流標準差的數值，取決於地形複雜度類別 L、M 及 H

	類別		
	L	M	H
σ_2/σ_1	0.85	0.93	1.00
σ_3/σ_1	0.60	0.65	0.70

擾流結構修正參數 C_{CT}，其可依據 11.9 之風況資料用於對結構完整性進行評鑑，由以下公式定義(34)：

註(34) 若 C_{CT} 小於 1，則應使用 C_{CT} = 1.0。

$$C_{CT}=\frac{\sqrt{1+(\hat{\sigma}_2/\hat{\sigma}_1)^2+(\hat{\sigma}_3/\hat{\sigma}_1)^2}}{\sqrt{1+(\sigma_2/\sigma_1)^2+(\sigma_3/\sigma_1)^2}}$$

式中，σ_1、σ_2及 σ_3係在輪轂高度及風力機位置之 3 個擾流分量值，並在風速範圍 0.6 V_r 至 1.6 V_r 之間取平均。Kaimal 與 Mann 模型之設計值可由附錄 C 得到。

當無實測之場地資料時，則可依據場地地形複雜度類別，使用表 7 中之 C_{CT} 值。

表 7 依據地形複雜度類別 L、M 及 H 之擾流結構修正參數值

	類別		
	L	M	H
C_{CT}	1.05	1.10	1.15

可在表 6 與表 7 之數值間進行內插。

11.3 進行評鑑所需之風況

11.3.1 一般

場地風力參數應藉由量測並外插，或使用適當方法(例：場地監測量測、當地氣象站之長期記錄、模擬模型或當地法規與標準)計算。模擬模型應以代表性資料進行確證。

11.3.2 風況參數

以下參數應針對風力機在輪轂高度處之位置推導：

- 回歸期 50 年之輪轂高度處極端 10 min 平均風速(35) V_{50}。

  註(35) DLC 6.1 及 DLC 6.2 之負載局部安全因數，係基於年最大風速變異係數(COV)小於 15 %之假設推導而來。若 COV 大於 15 %，則可由因數η從 COV = 15 %時之 1.0 到 COV = 30 %時的 1.15 線性增加。若η > 1.0，

則在結構完整性評鑑中，可使用調整後之極端 10 min 平均風速值$\tilde{V}_{50}=\sqrt{\eta}\ V_{50}$，參照 11.9 及 11.10。藉由假設風速為 Gumbel 分布，並假設有如 50 年及 100 年回歸期之風速值 V_{50} 及 V_{100} 可利用，則可近似地獲得年最大風速之 COV。參數α及β由下式得出：

$$\alpha=\frac{V_{100}-V_{50}}{p_{100}-p_{50}}\qquad \beta=V_{50}-\alpha p_{50}\quad \text{其中}p_{100}=-[-\ln(1-\frac{1}{100})]\text{及}p_{50}=-[-\ln(1-\frac{1}{50})]$$

COV 可由下式決定

$$\mathrm{COV}=\frac{\sigma}{\mu}=\frac{\pi}{\sqrt{6}}\frac{1}{\frac{\beta}{\alpha}+0.5772}$$

負載局部安全因數或極端 10 min 平均風速 V_{50} 之調整為選擇性，且本標準並無要求。

- 風速機率密度函數 $p(V_{\mathrm{hub}})$。
- 來自周圍擾流之風速標準差$\hat{\sigma}$(估算為縱向分量標準差之平均值)，及在 11.9 或 11.10 要求之所有風速標準差$\hat{\sigma}$的標準差$\hat{\sigma}_{\sigma}$。
- 回歸期 50 年之極端周圍風速標準差[36]$\hat{\sigma}_{1,\mathrm{ETM}}$。

  註[36] 極端周圍風速標準差$\hat{\sigma}_{1,\mathrm{ETM}}$可使用適當之外插方法導出，例：逆一階可靠度法(inverse first-order reliability method, IFORM)或藉由下式估算：

$$\hat{\sigma}_{1,\mathrm{ETM}}=\hat{\sigma}+k_{\mathrm{p}}\hat{\sigma}_{\sigma}\qquad k_{\mathrm{p}}=0.01[\frac{V_{\mathrm{ave}}}{(\mathrm{m/s})}-21][\frac{V_{\mathrm{hub}}}{(\mathrm{m/s})}-5]+5$$

- 氣流傾角。
- 風切[37]。

  註[37] 已報告在高度分層氣流、複雜地形或粗糙度急劇變化有關之某些區域，具有高可變性之風切值。在此情況下，僅使用平均風切可能不足。

- 空氣密度。

若無空氣密度之場地資料，應假設空氣密度符合 ISO 2533，並對年平均溫度適當修正。

上述任何風速所使用之區間寬應為 2 m/s 以下，風向扇形區域應為 30°以下。除空氣密度外，所有量測應為風向之函數，以 10 min 平均表示。

宜注意距離風力機 20 倍結構或地形障礙物之特徵長度範圍內，顯著結構或地形障礙物所造成之尾流。若轉子下緣高度高於結構或地形障礙物高度至少 4 倍，則可忽略其影響。

在颶風、氣旋及颱風易發區域，極端風速應以適當方法評估，示例參照附錄 J。

在寒冷氣候下，宜針對風力機位置推導額外參數。結冰條件可依附錄 L 進行評

鑑。

宜注意其他已知氣流條件(例：地形海拔高度變化、異常強烈或持續的噴射流現象、雷暴/強風暴事件、下擊暴流等效應)，此等條件可能與設計中未考量之場地特定風力機負載相關。

11.3.3 量測設置

風力機場地適宜性評鑑及風資源評鑑，對量測之要求與使用在多方面有所不同，因此需在量測數量與品質之間取得平衡(38)。此外，針對風力機場地適宜性量測活動，宜考量額外準則：

註(38) CNS 61400-12-1 與 IEA 建議 11 說明量測設備安裝與設置之最佳實務指引。

- 量測系統宜安裝於廣泛代表場地大部分區域之位置(例：森林、山脊線、平原、谷地、坡地及障礙物)。
- 建議之量測系統確切數量與位置非常依賴場地，取決於擬建風場之地形、風場範圍與地表覆蓋，及氣流分布的預期複雜性與用於分析之流場模型的現場確證。
- 宜選擇具代表性的風況量測高度及感測器數量。量測宜在擬建風力機轉子掃掠區域內之多個高度執行。宜考量周邊地形及植被。
- 感測器間之垂直間距宜能對垂直風切進行強健分析，例：間距至少為轉子直徑之 1/3。
- 宜安裝溫度與壓力感測器。
- 宜使用基於至少 1 Hz(平均風速、風速標準差與最大風速、平均風向及平均溫度)之 10 min 平均時間。
- 若在寒冷氣候區進行量測，宜使用額外加熱感測器，並考量其相對於非加熱感測器之性能。
- 在複雜地形中，宜量測所有風分量，例：使用 3D 超音波風速計。

11.3.4 資料評估

關於資料涵蓋量及期間之建議如下：

- 量測期間可因資料品質及與參考長期資料來源之關聯性可靠度而有所偏差。若季節性變化對風況有顯著影響，監測期間宜足夠長以涵蓋此等效應(最短之捕捉季節性效應為 12 個月)。
- 每個月之資料涵蓋量宜夠高，以充分代表該月風況變化。

在資料評估期間，宜執行並記錄品質檢查與篩選。可進行量測－關聯－預測(measure-correlate-predict, MCP)程序以擴增資料。

風速標準差之平均值$\hat{\sigma}$，即縱向擾流分量之標準差及其標準差$\hat{\sigma}_\sigma$，應使用應用於量測資料的適當統計技術決定。

可應用擾流的線性去趨勢(linear de-trending)，若去除趨勢，低頻率循環及/或

大尺度(中尺度)波動貢獻應包含在負載模擬內[39]。

註[39] 否則，基於去趨勢資料的風統計可能導致低估負載。

通常需長期評鑑以估算極端風速、長期平均風速及空氣密度，但前提是可用之長期資料來源為適當且足夠可靠。

可使用替代方法，此等方法宜用於改善對場地之量測代表性。

上述方法與程序應予以文件化。

11.4 鄰近風力機之尾流效應評鑑

在發電期間，應考量鄰近風力機之尾流效應。在評鑑風場中各風力機之場地適宜性時，對所有與發電相關之周圍風速與風向，應考量來自上風向機組產生之與單一或多重尾流相關的確定性及擾流特性，包括機組間之間距效應。

通常假設尾流效應導致負載增加，此可藉由附加擾流方法或使用更精細之尾流模型加以考量。在任一情況下，尾流模型應充分呈現周圍擾流及離散與擾流尾流對負載之效應。

對於疲勞計算，有效擾流強度 I_{eff} 可依附錄 E 推導。

對疲勞及極限負載之附加擾流可假設為相同。

附錄 E 所述之 DWM 模型通常適用於疲勞與極端負載狀況。

11.5 其他環境條件評鑑

以下環境條件應進行評鑑，以與風力機設計中之假設進行比較：

- 正常及極端溫度範圍。
- 結冰、冰雹及降雪。
- 濕度。
- 雷擊。
- 太陽輻射。
- 化學活性物質。
- 鹽分。

11.6 地震條件評鑑

標準等級之風力機無耐震要求，因地震僅在世界少數區域構成設計驅動因素。對於因地震作用較弱而已由適用之當地地震規範排除在外的場地，無需進行地震評鑑分析。對於下述地震負載狀況至關重要之地點，應證明風力機場地條件之工程完整性。評鑑可基於附錄 D 進行。負載評估應考量地震負載與其他重要、經常出現之運轉負載的組合。

地震負載應取決於附錄 I 所定義之設計反應譜的規定。

設計地震反應譜應依 475 年回歸期進行評估。

地震負載應與下述 3 者中最大者之運轉負載疊加：

(a) 在 V_{r} 時，正常發電期間之平均負載。

(b) 在 V_{r} 時，緊急停止期間之負載。及

(c) 無風及 V_{out} 時，惰轉或待機期間之負載。

所有負載組件之負載局部安全因數為 1.0。鋼材的材料安全因數可設為 1.0。

地震負載評估可使用反應譜法，運轉負載藉由 SRSS 或地震負載所產生之等效負載組合加入。

地震負載評估亦可使用時域法，需進行足夠模擬以確保運轉負載具上述時間平均值之代表性。

上述評估中所採用之塔架自然振動模態的數量應根據當地地震規範，採用總質量 90 %之總模態質量的連續振動模態。

結構阻抗之評估可僅假設其為彈性反應，亦可假設其具韌性消能。然而，對於具體使用之結構類型，特別是格狀結構及螺栓接頭，正確評鑑後者至關重要。

工程基岩之加速度反應譜及地盤反應評估方法參照附錄 D。若地震作用可能導致塔架以外結構出現顯著負載時，則不應使用反應譜法。

11.7 電網條件之評估

應評估擬建場地風力機端子之外部電氣條件，以確保與電氣設計條件相容。外部電氣條件應包括以下項目[35]：

註[35] 風力機設計者可能需要考慮電網相容性條件。清單列出一系列最低要求。在設計階段即需預先考慮當地與國家電網相容性要求。

- 正常電壓及範圍，包括在規定電壓範圍及時間內保持連接或斷連之要求。
- 正常頻率、範圍及變化率，包括在規定頻率範圍及時間內保持連接或斷連之要求。
- 電壓不平衡，以對稱及非對稱故障之負相序電壓百分比表示。
- 中性點接地方法。
- 接地故障檢測/防護方法。
- 年電網停電次數。
- 自動復閉週期。
- 所需無功補償排程。
- 故障電流及持續時間。
- 風力機端子處之相–相及相–地短路阻抗。
- 電網背景諧波電壓失真。
- 若存在電力線載波訊號及其頻率。
- 穿越故障要求之故障特性。
- 功率因數控制要求。
- 爬升率(ramp rate)要求。
- 其他電網相容性要求。

11.8 土壤條件之評估

~~應由專業合格之地質工程師評估擬建場地的土壤性質，並參照可得之當地建築~~

~~法規。~~

場地之土壤狀況對各種負載作用下風力機基礎承載性能影響甚鉅，其影響程度之正確評估有賴足夠數量與高品質的地工調查與分析工作。此項調查與分析評估工作，應由大地工程專業之相關技師為之；地工調查及動力分析要求應參照附錄 N。

11.9 依據風況資料評估結構完整性

11.9.1 一般

可藉由將場地風參數值與設計使用的風參數比較來完成結構完整性評估。評估可分別針對疲勞負載適用性及極限負載適用性進行。

11.9.2 參考風況資料評估疲勞負載適用性

當滿足以下所有條件時，風力機對於場地之疲勞負載為適用：

(a) 在輪轂高度之風速機率密度函數 p (V_{hub})的場地值，在風速 V_{ave} 至 $2V_{ave}$ 間之所有 V_{hub} 值，應小於或等於設計機率密度函數。若風力機已依 6.3.2.1 之風速分布設計，且場地特定韋伯風速分布之形狀參數 $k \geq 1.4$，則 k 應符合公式(35)，其依據輪轂高度場地特定平均風速與設計平均風速之比值，參照圖 12。

$$6.5 \times \frac{V_{ave,site}}{V_{ave,design}} - 4.5 \leq k \leq -6.0 \times \frac{V_{ave,site}}{V_{ave,design}} + 8.0 \qquad (35)$$

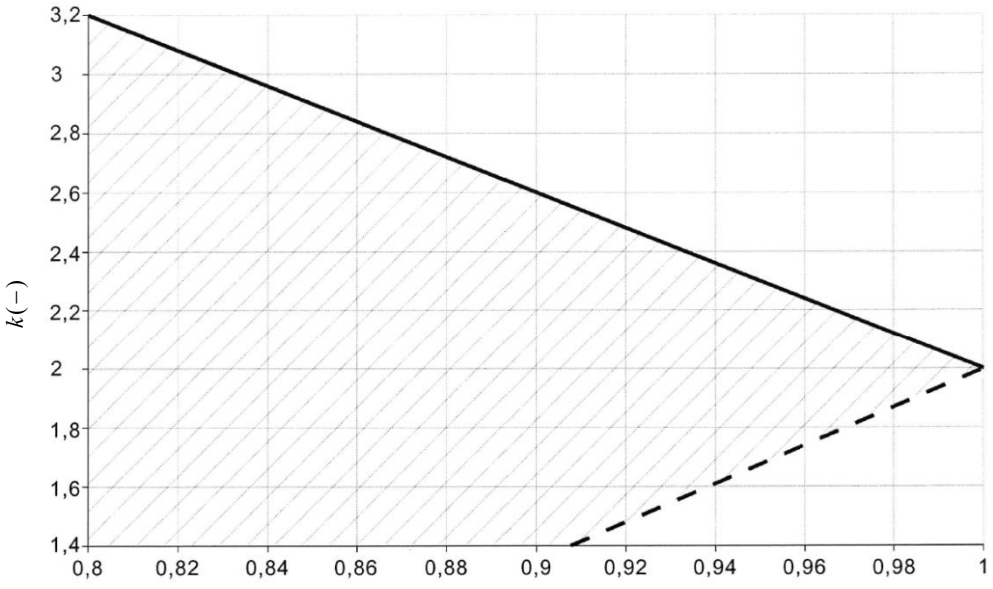


圖 12　正規化平均風速與韋伯形狀參數 k 之可能組合(陰影區域)

(b) 藉由查證設計中使用之正常擾流模型(NTM)的風速標準差 σ_1，是否大於或等於風速 V_{ave} 與 $2V_{ave}$ 間之有效風速標準差 $\widehat{\sigma_{eff}}$ (參照附錄 E)，對環境擾流

強度及尾流效應進行充分評估。

即

$$\sigma_1 > \sigma_{eff} \ (=I_{\mathrm{eff}} V_{\mathrm{hub}}) \qquad (36)$$

計算 I_{eff} 之指引參照附錄 E。對於複雜地帶，應增加風速標準差之估算 90 %分位數(即$\widehat{\sigma_c}$)，以考慮擾流畸變。此可藉由乘以擾流結構修正參數 C_{CT} 實現，C_{CT} 定義參照 11.2。

(c) 場地氣流傾角(各方向風能加權平均值)應介於-8°至+8°。若無風場資料或計算，則假設氣流傾角等於 30°扇形區間內之坡度 θ，距風力機 $5z_{\mathrm{hub}}$ 或往下風向處延伸 $2z_{\mathrm{hub}}$ 之 $5z_{\mathrm{hub}}$ 區域，參照 11.2。

(d) 在發電過程，垂直場地風切指數α之能量加權平均值(考慮所有風向及風速)應在 0.05 至 0.25 範圍內。若缺乏風切場地資料，則應考慮周圍地形之地形與粗糙度進行計算。

(e) 對於 V_{r} 或更高風速，平均場地空氣密度應低於 6.4.2 中規定之密度。若空氣密度高於 6.4 中規定值，需證明下列條件成立：

$$\rho_{\mathrm{design}} \times V_{\mathrm{ave,design}}^2 \geq \rho_{\mathrm{site}} \times V_{\mathrm{ave,site}}^2 \qquad (37)$$

11.9.3 依據風力資料評估極限負載適用性

風力機對於場地極限加載適用，需滿足以下條件：

(a) 設計風速標準差σ_1(參照公式 10)，在 V_{hub} 於 $0.6V_{\mathrm{r}}$ 至 $1.6V_{\mathrm{r}}$ 範圍內，應大於或等於場地估算 90 %分位數[36]風速標準差。

註[36] 公式(38)右邊代表 90 %分位數之近似值。

即

$$\sigma_1 \geq \hat{\sigma} + 1.28\widehat{\sigma_\sigma} \qquad (38)$$

對於複雜地帶，應增加風速標準差之估算 90 %分位數，以考慮擾流畸變。此可藉由乘以擾流結構修正參數 C_{CT} 實現，C_{CT} 定義參照 11.2。

(b) 於場地，在輪轂高度，50 年回歸期之 10 分鐘平均極端風速 V_{50} 估算應小於或等於 V_{ref}，或於風力機場地中心，50 年回歸期 3 s 平均極端風速應小於 V_{e50}。對於等級 S 之風力機，需同時評估 3 s 及 10 分鐘平均極端風速。若年最大風速變異係數 > 15 %，V_{50} 應依註[24]調整。若場地平均空氣密度不同於 6.4.2，需證明：

$$\rho_{\mathrm{design}} \times V_{\mathrm{ref}}^2 \geq \rho_{\mathrm{site}} \times V_{\mathrm{50,hub}}^2 \qquad (39)$$

(c) 應證明場地特定極端環境風速標準差不得超過 6.3.3.4 中之 ETM 模型。

(d) 對於尾流情況，需證明最嚴苛方向之中心尾流風速標準差不超過 6.3.3.4

中之 ETM 模型，或證明環境場地特定極端擾流不超過附錄 B 中 DLC 1.6 使用之 ETM 模型。最小場地特定風力機間距不低於 DLC 1.6 中之 S_{min}。為決定場地特定擾流，應考慮場地特定條件、尾流情況之頻率及風電場布局。

11.10 依據場地特定條件藉由負載計算評估結構完整性

證明應包括將特定風力機場地條件計算之負載及撓度與設計階段計算之負載及撓度進行比較，並考慮備用容量與環境對結構承載力之影響。計算應考慮平均風向、風速及尾流效應、垂直風切、平均氣流角等風況變化因素。

對於查證組件疲勞加載，僅需比較驅動扭矩負載持續時間分布之損壞等效力矩及損壞等效負載。對於極限負載，則無需比較同時負載。

擾流結構應基於場地特定值。若無組件場地擾流資料且地形複雜，可使用 11.2 各複雜度類別之擾流分量比值，或縱向擾流強度增加 C_{CT} 係數。

對於尾流效應，需查證結構完整性不受影響，可使用尾流模型(示例參照附錄 E)，並將擾流模型調整為場地特定參數。

由於疲勞負載計算中，附錄 E 中定義之 I_{eff} 取決於所考慮零件材料之 Wöhler 曲線指數 m，因此具有其他材料特性之結構組件的負載需要重新計算或使用適當 m 值進行評估。

若不符 11.9.2 中之任一準則，則需執行疲勞負載計算。

若不符 11.9.3 中之任一準則，則需執行最終極限狀況分析。至少需評估 DLC 1.1、DLC 1.3、DLC 6.1 及 DLC 6.2 之極限設計負載狀況。若標準等級之設計負載足夠，則無需執行額外之評估。

附錄 B 提供上述極限負載及疲勞負載狀況在特定場地條件下之定義。若相關，宜考慮表 B.1 設計工況(1)、(6)及(7)中之其他負載狀況。表 B.1 中之設計工況(2)、(3)、(4)、(5)及(8)僅當控制系統行為及運輸、組裝、維護及維修程序與場地相關時才需考慮。

12. 組裝、安裝與架設

12.1 一般

風力機製造商應提供安裝手冊，清楚說明風力機結構與設備安裝要求。安裝應由受訓或經指導之人員執行。

風力機場地應準備、維護、操作及管理，使工作可安全且高效地執行。適當時，宜包括防止未授權人員進入之程序。操作者宜適別及消除現有與潛在之危害。

應準備規劃活動之查檢清單，並保存已完成工作及其結果之紀錄。

適當時，安裝人員應在適當情況下使用經核准之眼部、足部、聽力及頭部防護裝備。所有攀爬塔架或在地面或水面以上作業之人員均宜接受過相關訓練，並應使用經核准之安全帶、安全攀爬輔助設備或其他安全裝置。適當時，在水域宜使用浮力輔助設備。

所有設備應保持良好狀態，並適用於其預期之任務。起重機、升降機及起重設備(包括所有吊索、吊鉤及其他裝置)應足以確保安全起吊。

宜特別考慮在冰雹、雷擊、強風、地震、結冰等特殊條件下安裝風力機。

對於未安裝機艙之豎立塔架，除非已對適當之疲勞設計負情況進行分析，否則應採取適當措施，避免達到渦旋引起之橫向振動的臨界風速，或應將由此產生之負載納入疲勞分析。臨界風速及預防措施應列入安裝手冊。

12.2 規劃

風力機及相關設備之組裝、架設與安裝應妥善規劃，以確保工作安全並符合當地及國家法規。除品質保證程序外，適當時，規劃應考慮以下事項：

- 安全挖掘作業規則。
- 詳細施工圖、施工規範及檢驗計畫。
- 嵌入式構件(如基座、螺栓、錨固與鋼筋)妥善處理規則。
- 混凝土配比、運送、取樣、澆注、表面處理及管道放置規則。
- 爆破作業安全規則。
- 塔架及其他錨固件安裝程序。

12.3 安裝條件

風力機安裝期間，場地應保持安全，不出現安全風險。

12.4 場地進出

場地進出應安全，並考量以下事項：

- 障礙物與通行路線。
- 交通。
- 路面。
- 路寬。
- 淨空。
- 承載能力。
- 設備在場內之移動。

12.5 環境條件

安裝期間應遵守製造商規定之環境限制，宜考量遵守事項包括：

- 風速。
- 雪與冰。
- 環境溫度。
- 吹砂。
- 雷擊。
- 能見度。
- 降雨。

12.6 文件

風力機製造商應提供風力機組裝程序、安裝與架設之圖面、規範及說明書。製造商應提供所有風力機搬運與安裝安全所需之負載、重量、吊點及特殊工具與程序的細節。

12.7 接收、搬運與儲存

安裝期間，風力機設備搬運與運輸應使用適合任務之設備，並依據製造商建議實務。

由於風力機常設於丘陵地形，因此重型設備應以穩固之方式放置，以防止移動。所有搬運與組裝作業最好在大小適當之平坦區域進行。若無法提供此類場地，所有重型設備應牢固地固定在穩定之位置。

風力可能造成移動風險並可能造成損壞之情況下，葉片、機艙、其他空氣動力學零件及輕型箱體應使用繩索、樁或地錨固定。

12.8 基座/錨固系統

為安全安裝或組裝，應使用製造商規定之特殊工具、夾具與治具及其他裝置。

12.9 風力機組裝

風力機應依製造商說明書組裝，並檢驗所有零件之潤滑及使用前準備狀況。

12.10 風力機架設

風力機架設應由經訓練且熟悉安全架設程序之人員執行。

除非架設過程需要，否則風力機電氣系統不得在架設期間通電。若需通電，應依風力供應商書面程序執行。

所有可能造成潛在危害之活動(旋轉或平移)元件，在架設整個過程中應緊固，防止意外運動。

12.11 扣件與附件

螺紋扣件及其他附屬裝置應依風力機製造商建議之扭矩及/或其他說明書進行安裝。已識別之關鍵扣件應檢查，並取得安裝扭矩與其他要求之確認程序。

特別應執行檢驗以確認下列事項：

- 牽索、電纜、轉扣、起重拔桿與其他裝置及設備之適當組裝及連接。
- 安全架設所需起重裝置之適當附件。

12.12 起重機、吊鉤及舉升設備

為安全舉升及負載最終定位，應具適當之起重機、吊鉤及舉升設備，包括所有吊索、吊鉤及安全架設所需之足夠設備。製造商提供之安裝及搬運說明書及相關文件，應包含組件及/或總成之預期負載及安全吊掛點資訊。所有起重設備、吊索及吊鉤均應經過試驗並獲得安全負載認證。

13. 試運轉、操作與維護

13.1 一般

試運轉、操作、檢驗及維護程序應在風力機手冊中規定，以確保人員安全。

設計應提供所有組件安全檢查與維護之通道。

第 10 節要求亦適用於臨時安裝於風力機進行測量之電氣測量設備。

適當時，操作與維護人員應在適當情況下使用經核准之眼部、足部、聽力及頭部防護裝備。所有攀爬塔架或在地面或水面以上作業之人員均宜接受過相關訓練，並應使用經核准之安全帶、安全攀爬輔助設備或其他安全裝置。適當時，在水域宜使用浮力輔助設備。

13.2 安全操作、檢驗與維護之設計要求

風力機操作人員應能在地面進行正常操作。自動/遠程控制系統應提供標示之本地手動覆蓋功能。

外部事件(如電力負載之流失及恢復)被偵測為故障，但對風力機之未來安全並非至關重要，此類事件可允許在停機週期完成後自動恢復正常運作。

為防護人員避免意外接觸活動組件，防護裝置應固定，除非需經常進入之場合可為可活動之設計。

防護裝置應：

(a) 結構堅固。

(b) 不易被繞過。

(c) 當可能時，允許進行必要維護工作而無需拆卸。

設計應考量使用診斷故障檢測設備。

為確保檢驗與維護人員安全，設計應包括：

- 安全通道及檢驗與例行維護工作位置。
- 適當方法防止人員意外接觸旋轉或活動組件。
- 攀爬或於高空作業時，應配備安全繩、安全帶或其他核准之防護裝置。
- 依據 DLC 8.1 中規定之風況與設計工況，在維修期間，應配備轉子阻動旋轉、轉向機構或其他機械活動(如葉片俯仰)之裝置，及安全解除鎖定之裝置。
- 帶電導體警告標示。
- 適當之累積電荷釋放裝置。
- 適當之人員防火。
- 機艙逃生替代通道。

維護程序應要求人員進入封閉工作空間(如輪轂或葉片內)時之安全措施，若需要，確保在任何危險情況，待命人員能立即啟動救援程序。

13.3 試運轉相關之說明書

13.3.1 一般

製造商應提供試運轉說明書。

13.3.2 通電

製造商說明書應包含風力機電氣系統初次通電程序。

13.3.3 試運轉試驗

製造商說明書應包含安裝後風力機測試程序，以確認所有裝置、控制與設備安

全、正確且功能正常，包括但不限於：

- 安全起動。
- 安全停機。
- 安全緊急停止。
- 從超速或模擬超速安全停機。
- 防護功能試驗(參照第 8 節)。

13.3.4 紀錄

製造商之說明書應包括保存適當紀錄，說明測試、試運轉、控制參數與結果。

13.3.5 後試運轉活動

安裝完成後，後續進行製造商建議之磨合期操作，製造商可要求應完成特定活動。

此等活動包括但不限於扣件預加載、更換潤滑油、檢查其他組件之適當設定與操作及適當調整控制參數。

風力機場地宜整修以消除危害並預防沖蝕。

13.4 操作者說明手冊

13.4.1 一般

風力機製造商應提供操作者說明手冊，適當時，於試運轉時補充有關當地特殊條件之資訊，手冊應包含但不限於：

- 任何關於應由經過適當訓練或指導之人員執行操作的要求。
- 安全操作限制及系統說明。
- 起動與停機程序。
- 警報行動清單。
- 緊急程序計畫。
- 聲明下述要求
  - 適當時，應使用經核准之眼部、足部、聽力及頭部防護裝備。
  - 適當時，所有攀爬塔架或在地面或水面以上作業之人員均應接受相關訓練，並使用經核准之安全帶、安全攀爬輔助設備或其他安全裝置。
  - 適當時，在水域附近作業時應使用浮力輔助裝置。
  - 操作與維護人員應能以操作人員可讀懂之語言取得操作手冊。

13.4.2 操作與維護紀錄說明書

手冊應聲明保存操作及維護紀錄，內容宜包括下述：

- 風力機識別。
- 發電量。
- 運轉時數。
- 停機時數。
- 故障發生日期與時間。

- 保養或修理日期與時間。
- 故障或使用性質。
- 採取行動。
- 更換零件。

13.4.3 非排程自動停機之說明書

除操作手冊或說明書另有規定外，手冊應要求任何因故障或異常發生非排程之自動停機，操作者在重啟前應研究原因。宜記錄所有非排程自動停機事件。

13.4.4 可靠度下降說明書

手冊應要求任何異常或可靠度下降之警告或指示，應採取消除根本原因之措施。

13.4.5 工作程序計畫

手冊應要求風力機操作應依安全工作程序進行，考量事項包括：

- 電氣系統操作。
- 操作與維護協調。
- 公用設施清理程序。
- 塔柱攀爬程序。
- 設備搬運程序。
- 不良天氣下之活動。
- 試運轉及緊急計畫。

13.4.6 緊急程序計畫

操作手冊中應識別可能之緊急情況，並規定操作者所需採取之行動。

手冊應規定若發生火災或風力機或其組件存在結構損壞明顯風險時，除風險已被明確評估外，任何人不得接近風力機。

制定緊急程序計畫時，應考慮以下情況可能增加結構損壞風險：

- 超速運轉。
- 結冰條件。
- 雷擊暴風。
- 地震。
- 拉索斷裂或鬆動。
- 煞車失效。
- 轉子不平衡。
- 扣件鬆動。
- 潤滑缺陷。
- 沙塵暴。
- 火災、洪水。
- 其他組件失效。

13.5 維護手冊

每個風力機型號應有維護手冊，至少包括風力機製造商規定之維護要求與緊急程序，並涵蓋不定期維護。

維護手冊應識別磨耗零件並指示更換準則。

手冊宜涵蓋以下內容：

- 檢驗與維護需由受過訓練或指導之操作者依風力機維護手冊規定之間隔與說明進行。
- 說明風力機次系統及其操作。
- 潤滑計畫，包括頻率及潤滑劑型式或任何其他特殊流體。
- 重新試運轉程序。
- 維護檢驗週期與程序。
- 防護次系統功能檢查程序。
- 完整配線與互連圖。
- 拉索檢驗與重新拉緊計畫、螺栓檢驗與預加載計畫，包括張力與扭矩加載。
- 診斷程序與故障排除指引。
- 建議備用零件清單。
- 現場組裝與安裝圖面。
- 工具清單。

14. 寒冷氣候

14.1 一般

寒冷氣候(CC)定義為結冰氣候(IC)及/或低溫氣候(LTC)。LTC 指低於一般環境條件(6.4.2)之氣溫。IC 定義為氣象結冰，導致風力機表面形成霧淞及/或釉冰。冰類型定義參照 ISO 12494。為方便起見，除另有說明外，本文將寒冷氣候條件視為 IC 及 LTC 條件。。

寒冷氣候對風力機結構完整性或安全系統之衝擊影反應予以評估。

14.2 低溫與結冰氣候

LTC 對風力機之影反應至少考慮：

(a) 組件材料。

(b) 空氣密度。

(c) 啟動程序。

(d) 油與潤滑液黏滯度。

IC 對風力機之影反應至少考慮：

- 葉片結冰導致風力機性能下降。
- 風力機葉片上之結冰分布不均。
- 葉片掉冰。
- 結冰對風速測量影響。
- 增加聲音位準。

- 延長停機狀態。

14.3 寒冷氣候之外部條件

14.3.1 一般

寒冷氣候外部條件在環境溫度、空氣密度與結冰情況上不同於正常氣候條件(6.4.2)。

14.3.2 寒冷氣候之風力機等級

設計時需要考慮之外部條件取決於風力機安裝之場地或場地類型。由於寒冷氣候條件下存在低溫熱傳導效應，因此應假設最低環境溫度條件，該條件預期代表多種不同場地，但並不精準代表任何特定場地。

寒冷氣候下風力發等級依環境溫度定義如下：

$\theta_{\mathrm{min,operation}} = -30$ ℃　風力機允許之最低運轉溫度(瞬間值)

$\theta_{\mathrm{1year,min}} = -40$ ℃　每小時平均預期之最低環境溫度(回歸期 1 年)=最小尺度設計溫度

$\theta_{\mathrm{mean}} = -5$ ℃　年平均環境溫度

其他環境條件依正常環境條件(6.4.2)。

14.4 結構設計

對於 LTC，結構設計應採用空氣密度 1.225 kg/m³，以允許使用依據標準風力機等級設計之風力機。

在場地適宜性分析過程中，應考慮場地實際空氣密度[37](受溫度與海拔影響)之影響。

註[37] 對於海平面區域，空氣密度為 1.3 kg/m³ 可能更具代表性。

14.5 設計工況與負載狀況

14.5.1 一般

寒冷氣候造成風力機特定設計工況。IC 下應考慮葉片結冰對空氣動力係數與葉片質量分布之影響。LTC 下，因低環境溫度(14.3.2)，空氣密度高於正常氣候條件(6.4.2)，因此在風力機設計中應考慮適用材料之選擇(14.5.3)及其對設計造成之後果。

當環境溫度高於最低環境溫度(14.3.2)時，轉子葉片上通常會積冰。

應評估寒冷氣候條件改變風力機性能，造成風力機運轉點偏移。至少應考慮以下因素：

- 不利風力機控制器行為(如因葉片空氣動力性能不同導致不正確之發電機扭矩或葉片俯仰設定點)。
- 啟停循環增加。
- 風力機葉片失速行為改變。
- 因附加冰質量導致固有頻率改變。

上述影響可能導致較高之加載。結冰期間加載亦可能來自轉子空氣動力改變與

附加冰質量引起之不平衡。更多指引參照附錄 L。

14.5.2 負載計算

寒冷氣候條件下，風力機控制器行為及負載主要受 IC 效應(由轉子葉片上結冰造成)與 LTC 效應(由空氣密度增加造成)。更多指引參照附錄 L。

14.5.3 適用材料之選擇

對於寒冷氣候中之 LTC 效應，所有負載計算應與修改後溫度範圍相符，以將材料性質納入考慮，可依據 14.4 使用一空氣密度適用於所有寒冷氣候之溫度範圍。

對於暴露於環境溫度之組件的極限強度查證(38)應考慮 $\theta_{min,operation}$，但由 DLC 7.1、DLC 8.1、DLC 8.2 推導所得之負載則應考慮 $\theta_{1year,min}$，或對於 DLC 8.1 之最低溫度，亦可由製造商定義之。疲勞強度查證應考慮 θ_{mean}。

註(38) 未暴露於環境條件下之組件的最低溫度與相應之負載狀況應由製造商規定。

14.6 控制系統

除第 8 節對控制系統之正常氣候要求外，控制系統組件之設計，應考慮因風力機結冰及 14.3.2 規定運轉與停機狀態之環境溫度對風力機運轉點的偏移影響。寒冷氣候條件應特別考慮下列情況：

- 當確保寒冷氣候條件下風力機控制器行為之安全。
- 當經歷使風力機冷卻至最低操作環境溫度 $\theta_{min,operation}$ 或更低之事件(如電網失效、維護或其他原因)停機後，實施安全啟動程序將風力機恢復運轉。
- 當考慮不同空氣密度值對風力機動力學之影響。
- 對於安全關鍵電源儲存(如在輪轂內)。
- 考慮冰/低溫對感測器與資料處理之影響。

若在負載假設中未考慮結冰風力機運轉，必須採取措施防止結冰風力機運轉。此等措施需具備冗餘性。單一失效不得導致結冰風力機非預期運轉。

14.7 機械系統

除第 9 節對機械系統之正常氣候要求外，風力機機械系統之設計，應考慮 14.3.2 規定之運轉與停機狀態的環境溫度。

必須確保齒輪箱油溫已達到避免損壞之溫度後才能傳遞電力。參照 14.6 之寒冷啟動程序。

14.8 電氣系統

除第 10 節對電氣系統之正常氣候要求外，風力機電氣設施之設計應考慮 14.3.2 規定之運轉與停機狀態之環境溫度。

寒冷氣候條件應特別考慮以下方面：

- 電氣組件材料。
- 於最低停機狀態環境溫度 $\theta_{1year,min}$ 之電網回饋，定義參照 14.3.2。

- 啟動程序，定義參照 14.6。

附錄 A
(規定)
外部條件之設計參數

A.1 風力機等級 S 之設計參數

A.1.1 一般

對於依據場地特定或特殊條件設計之風力機，即等級 S 風力機，設計文件中應提供下述資訊，說明與 6.2 中定義之風力機等級條件不同之所有條件。其餘條件可參考適當之風力機等級。

A.1.2 機械參數

額定功率(kW)

輪轂高度運轉風速範圍$V_{\text{in}} - V_{\text{out}}$(m/s)

設計壽命(年)

A.1.3 風況

一般：

空氣密度(kg/m³)。

輪轂高度極端風速V_{e1}及V_{e50} (m/s)。

擾流模型及參數。

擾流強度平均值及標準差，為平均風速函數。

1 年回歸期與 50 年回歸期之極端陣風模型及參數。

1 年回歸期與 50 年回歸期之極端風向變化模型及參數。

極端相干連續陣風模型及參數。

具風向改變之極端相干陣風模型及參數。

極端風切模型及參數

聚合或扇形區間(≤30°)：

年平均風速(m/s)。

氣流傾角(°)。

風速分布(韋伯、瑞利、測得或其他)。

風速剖面模型及參數。

扇形區間擾流強度平均值與標準差，為平均風速函數。

尾流效應模型及參數(有效擾流強度或動態尾流擾動)。

A.1.4 電網條件

正常供電電壓及範圍(V)。

正常供電頻率及範圍(Hz)。

電壓不平衡(V)。

中性點接地方法。

接地故障偵測/防護方法。

年平均停電次數及最長持續時間。

自動重合閘週期。

所需無功補償計畫。

故障電流及持續時間。

在風力機端子之相-相及相-地短路阻抗。

電網背景諧波電壓畸變。

電力線載波訊號(若有)與頻率。

故障剖面穿越要求。

功率係數控制要求。

爬升率要求。

其他電網相容性要求。

A.1.5 其他環境條件(若考慮)

正常及極端溫度範圍(°C)。

空氣相對濕度(%)。

太陽輻射(W/m^2)。

雨、雹及雪。

結冰模型及參數。

化學活性物質。

機械活性顆粒。

雷擊，包括避雷系統之說明。

鹽分(g/m^3)

基座：

基座剛度及阻尼

地震模型及參數：

A.2 寒冷氣候風力機等級 S(CC-S)額外設計參數說明

參照表 A.1

表 A.1　寒冷氣候風力機等級 S (CC-S)設計參數說明

外部條件		
符號	單位	說明
$\theta_{min,operation}$	K	風力機允許之最低運轉環境溫度。
$\theta_{1year,min}$	K	每小時平均預期之最低環境溫度。
$\rho(\theta_{min,operation})$	kg/m^3	與風力機運轉之最低允許環境溫度($\theta_{min,operation}$)相關的寒冷氣候設計負載狀況之空氣密度。
$\rho(\theta_{1year,min})$	kg/m^3	與每小時平均預期之最低環境溫度($\theta_{1year,min}$)相關的寒冷氣候設計負載狀況之空氣密度。

用於負載計算及在功率曲線決定中之空氣密度，宜藉由應用理想氣體定律[39]計算。

註[39] 溫度值 $\theta_{1year,min}$ 可設定為 $\theta_{1year,min}$ + 35 K，及 $\theta_{min,operation}$ 可設定為 $\theta_{min,operation}$ + 25 K 以相應地決定空氣密度。此分別增加+ 35 K 與+ 25 K，等同於 6.4.2 與 6.4.3.2 中正常氣候條件之定義。正常氣候條件之標準空氣密度為 1,225 kg/m³，參考+15 °C 時。正常氣候之環境溫度範圍為-10 °C 至+40 °C，為+15 °C±25 K。正常氣候之極端溫度範圍為-20 °C 至+50 °C，為+15 °C±35 K。

適用以下公式：

$$\rho(\theta) = \frac{p}{R_0 \times \theta} \qquad \text{(A.1)}$$

式中，p = 101,325 N/m²(於海平面)

R_0 = 287 J/(kg-K)

$\theta = \theta_{1year,min}$ + 35 K 計算$\rho(\theta_{1year,min})$

$\theta = \theta_{min,operation}$ + 25 K 計算$\rho(\theta_{min,operation})$

可對不同高度修正。

1.225 kg/m³之空氣密度可用於結構設計，以允許使用依據標準風力機等級所設計之風力機。

在場地適用性分析期間，應考慮場地之實際空氣密度，其受溫度與高度影響。

附錄 B
(參考)
特定 S 級風力機設計或場地適宜性評估之設計負載狀況

B.1 一般

特定 S 級風力機設計或場地適宜性評估之設計負載狀況，係由運轉模式或設計工況與適用之 S 級外部，並使用附錄 A 規定之設計參數組合而決定。

在設計工況發電中，NTM 與 ETM 分析可對每個扇形區間執行，其中風況是對每個扇形區間決定，或對所有扇形區間使用聚合風況。對於其他設計工況，分析是對所有扇形區間使用聚合之風況來執行。風況之聚合應使得適當的疲勞與極端負載得以維持，或設計參數應保守地選擇。宜考慮風切、密度與其他可能影響風力機疲勞加載之參數的潛在變化。

適當時，應在負載狀況中如對其他規定條件般考慮尾流效應、地震加載及結冰。當在表 B.1 指示一風速範圍時，應考慮導致風力機設計最不利之風速。風速範圍可用一組離散值表示，解析度[40]應足以確保計算準確度。設計負載狀況之定義參照第 6 節所述風況。

註[40] 一般 2 m/s 之解析度可視為足夠。

如 11.10 所述，對場地適宜性評估，最少應評估之極限設計負載狀況：DLC 1.1、DLC 1.3、DLC 6.1、DLC 6.2。若標準等級設計負載狀況已足夠，則無需進一步評估。若相關，宜考慮表 B.1 中之設計工況(1)、(6)、(7)。設計工況(2)、(3)、(4)、(5)、(8)僅在控制系統行為、運輸、裝配、維護與修理程序與場地相關時才需考慮。

B.2 發電(DLC 1.1 至 DLC 1.9)

在此設計情境中，風力機運轉並連接至電力負載。假設之風力機配置應考慮轉子不平衡。在設計計算應使用轉子製造商規定之最大質量與空氣動力不平衡(例：葉片俯仰與扭轉偏差)。

此外，在運轉負載分析中，應將偏離理論最佳運轉情況之偏差(如轉向錯位與控制系統追蹤誤差)納入考量。

設計負載狀況(DLC)1.1 與 DLC 1.2 具體體現風力機在其整個壽命期間正常運轉時，因場地特定大氣擾流(NTM)所產生之負載之要求。對於 DLC 1.2，額外考慮尾流效應–指引參照附錄 E。DLC 1.3 具體體現由極端場地特定擾流條件所造成之最終負載之要求。DLC 1.4 與 DLC 1.5 規定在風力機壽命中被選為潛在關鍵事件之暫時情況。

對 DLC 1.1 模擬資料之統計分析至少應包含葉片根部平面內力矩與平面外力矩及葉尖撓度之極端值計算。若由 DLC 1.3 推導之極端設計值超過 DLC 1.1 推導之葉片根部力矩之極端設計值，則可省略對 DLC 1.1 之進一步分析。

若由 DLC 1.3 推導之極端設計值未超過 DLC 1.1 推導之葉片根部力矩之極端設計

值，則可增加 DLC 1.3 所使用之極端擾流模型在公式(20)中之係數 c，直到在 DLC 1.3 中計算之葉片根部力矩的極端設計值等於或超過相關極端值。與其他風力機組件相關之負載特徵值，可基於具增加極端擾流之 DLC 1.3 進行分析決定。作為此分析之替代方式，為可直接從模擬中外插決定與各特定風機組件相關之所有負載組件的適當特徵值。

表 B.1　設計負載狀況

設計工況	DLC	風況[41]	其他條件	分析型式	局部安全因數
(1) 發電	1.1	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	極端事件外插	U	N
	1.2	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	尾流效應	F	*
	1.3	ETM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD$_s$ $V_{hub}=V_r-2$ m/s，V_r，V_r+2 m/s		U	N
	1.5	EWS$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.6	ETM$_s$ $V_{hub}=V_r\pm2$ m/s 及 V_{out}	尾流效應	U	N
	1.7	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	冰資訊 尾流效應	U	N
	1.8	NTM$_s$ $V_{hub}=V_r$	地震加上電網喪失	U	N
(2) 發電+故障發生	2.1	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	正常控制系統故障或電網喪失或主要層控制功能故障(參照 7.4.3)	U	N
	2.2	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	異常控制系統故障或與次要層防護功能相關之故障(參照 7.4.3)	U	A
	2.3	EOG$_s$ $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}	外部或內部電力故障，包含電網喪失	U	A
	2.4	NTM$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	控制系統故障、電力故障或電網喪失	F	*
	2.5	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	低電壓穿越	U	N
(3) 起動	3.1	NWP$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG$_s$ $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}	左邊跟表 2 之 3.2 定義不同	U	N
	3.3	EDC$_s$ $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}	左邊跟表 2 之 3.3 定義不同	U	N

表 B.1　設計負載狀況(續)

設計工況	DLC	風況[41]	其他條件	分析型式	局部安全因數
(4) 正常停機	4.1	NWP$_s$ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG$_s$ $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
(5) 緊急停止	5.1	NTM$_s$ $V_{hub}=V_r \pm 2$ m/s 及 V_{out}		U	N
(6) 待機(停機或惰轉)	6.1	EWM$_s$ 50 年回歸期		U	N
	6.2	EWM$_s$ 50 年回歸期	電網連接喪失	U	A
	6.3	EWM$_s$ 1 年回歸期	極端轉向錯位	U	N
	6.4	NTM$_s$ $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$		F	*
	6.5(原文錯)	NTM$_s$ $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$	冰資訊	U	N
	6.6	NTM$_s$ $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$	極端溫度範圍	U	N
	6.7	NTM$_s$ $V_{hub} < 0.7\ V_{ref}$	地震加電網喪失	U	N
(7) 待機與故障狀態	7.1	EWM$_s$ 1 年回歸期		U	A
(8) 運輸、組裝、維護及修理	8.1	NTM$_s$ V_{maint} 由製造商聲明		U	N
	8.2	EWM$_s$ 1 年回歸期		U	A

表 B.1　設計負載狀況(續)

說明	
DLC	設計負載狀況
ECD_s	場地特定極端相干陣風伴隨方向改變。當場地特定值不可用時，可假設其與 6.3.3.6 中定義之 ECD 相同。
EDC_s	場地特定極端方向改變。當場地特定值不可用時，可使用 6.3.3.5 中之公式(21)與公式(22)，使用場地特定代表環境擾流標準差$\hat{\sigma}_c$取代σ_1。
EOG_s	場地特定極端運轉陣風。當場地特定值不可用時，可使用 6.3.3.3 中之公式(18)與公式(19)，使用場地特定代表環境擾流標準差$\hat{\sigma}_c$取代σ_1。
EWM_s	場地特定極端風速。當場地特定值不可用時，可使用 6.3.3.2 中之公式(13)至公式(17)，以場地特定 50 年回歸期極端風速取代 V_{ref}。
EWS_s	場地特定極端風切。當場地特定值不可用時，可使用 6.3.3.7 中之公式(27)與公式(28)，使用場地特定代表環境擾流標準差$\hat{\sigma}_c$取代σ_1，及場地特定風切指數取代$\alpha = 0.2$。
NTM_s	場地特定代表環境擾流強度，為輪轂高度風速之函數$\hat{\sigma}_c/V_{hub}$ (參照 6.3.2.3)。
ETM_s	場地特定極端環境擾流強度，為輪轂高度風速之函數$\hat{\sigma}_{1,ETM}/V_{hub}$ [參照 6.3.2.3 及註(25)]。
NWP_s	場地特定風剖面模型。當場地特定風速剖面不可用時，可使用 6.3.2.2 中之公式(9)，以輪轂高度場地特定風切指數取代$\alpha = 0.2$ (參照 6.3.2.2)。
$V_r \pm 2$ m/s	應分析該範圍內所有風速之敏感性。
F	疲勞(參照 7.6.3)
U	極限強度(參照 7.6.2)
N	正常
A	異常
*	疲勞局部安全因數(參照 7.6.3)
註(41) 對於 S 級設計，風況(陣風幅度、擾流強度等)由設計者定義，如附錄 A 所述。	

在 DLC 1.6 中，應評估由環境場地特定 ETM 模型與風力機間尾流條件組合所產生之負載。風力機間距 S 應涵蓋最不利加載條件，範圍為最小間距 S_{min}(由製造商定義)至 $S = 20D$，D 為風力機轉子直徑。

附錄 E 提供 DLC 1.6 適用尾流模型之使用指引。若使用增加尾流擾流模型，應套用最大中心線尾流擾流強度。使用擺動尾流模型(例:DWM)應至少考慮 5 個平均尾流偏移角：$\theta_{wake} = 0°$，$\pm\theta_{hub\text{-}tip}$ 及 $\pm\theta_{hub\text{-}tip} \times 1.5$，其中 $\theta_{hub\text{-}tip} = \sin^{-1}(D/2S)$。

DLC 2.4、DLC 3.1 與 DLC 4.2 之暫時事件數可能依場地而異，應在場地特定負載分析中考慮。若無可用資訊，可使用 7.4.3、7.4.4 與 7.4.5[註(7)、註(9)與註(10)]中建議之事件數。

附錄 C
(參考)
擾流模型

C.1 一般

此處提供二種用於設計負載計算之擾流模型。假設擾流速度波動為一個平穩之隨機向量場，其分量具有零平均高斯統計。建議使用第一種模型。

(a) Mann 均勻風切模型。

(b) Kaimal 頻譜與指數相干模型。

選定之模型參數以滿足 6.3 所給之一般擾流要求。

C.2 Mann[3]均勻剪切擾流模型

此模型之說明與先前模型略有不同，因為定義一個 3D 速度頻譜張量。該模型假設等向 von Karman[2]能量頻譜被均勻平均速度剪切快速扭曲。所得到之頻譜張量分量由下式給出

$$\Phi_{11}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left[k_0^2-k_1^2-2k_1(k_3+\beta(k)k_1)\varsigma_1+(k_1^2+k_2^2)\varsigma_1^2\right] \tag{C.1}$$

$$\Phi_{22}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left[k_0^2-k_2^2-2k_2(k_3+\beta(k)k_1)\varsigma_2+(k_1^2+k_2^2)\varsigma_2^2\right] \tag{C.2}$$

$$\Phi_{33}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k^4}(k_1^2+k_2^2) \tag{C.3}$$

$$\Phi_{12}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4}\left[-k_1k_2-k_1(k_3+\beta(k)k_1)\varsigma_2-k_2(k_3+\beta(k)k_1)\varsigma_1+(k_1^2+k_2^2)\varsigma_1\varsigma_2\right] \tag{C.4}$$

$$\Phi_{13}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^2k^2}\left[-k_1(k_3+\beta(k)k_1)+(k_1^2+k_2^2)\varsigma_1\right] \tag{C.5}$$

$$\Phi_{23}(k_1,k_2,k_3)=\frac{E(k_0)}{4\pi k_0^2k^2}\left[-k_2(k_3+\beta(k)k_1)+(k_1^2+k_2^2)\varsigma_2\right] \tag{C.6}$$

式中，$\Phi_{ij}(k_1,k_2,k_3)=\Phi_{ji}^*(k_1,k_2,k_3)=\frac{1}{8\pi^3}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}R_{ij}(\delta_1,\delta_2,\delta_3)e^{-tk_1\delta_1}e^{-tk_2\delta_2}e^{-tk_3\delta_3}d\delta_1d\delta_2d\delta_3$

$R_{ij}(\delta_1,\delta_2,\delta_3)=\frac{1}{\sigma_{iso}^2}E\langle u_i(x_1,x_2,x_3)u_j(x_1+\ell)(\delta_1,x_2+\ell)(\delta_2,x_3+\ell\delta_3)\rangle$

= 無因次之相關張量

u_1, u_2, u_3=分別為縱向、橫向及向上之速度分量

δ_1, δ_2, δ_3=無因次空間分割速度分量

k_1, k_2, k_3=3 個分量方向之無因次空間波數

$k=\sqrt{k_1^2+k_2^2+k_3^2}$ =無因次波數向量之大小

$k_0=\sqrt{k^2+2\beta(k)k_1k_3+(\beta(k)k_1)^2}$ =剪切扭曲前之大小

$\varsigma_1=C_1-\frac{k_2}{k_1}C_2$ ， $\varsigma_2=\frac{k_2}{k_1}C_1+C_2$

$$C_1=\frac{\beta(k)k_1^2\left[k_1^2+k_2^2-k_3\left(k_3+\beta(k)k_1\right)\right]}{k^2\left(k_1^2+k_2^2\right)}$$

$$C_2=\frac{k_2^2k_0^2}{\left(k_1^2+k_2^2\right)^{3/2}}\arctan\left(\frac{\beta(k)k_1\sqrt{k_1^2+k_2^2}}{k_0^2-\left(k_3+\beta(k)k_1\right)k_1\beta(k)}\right)$$

$E(k)=\frac{1.453\,k^4}{\left(1+k^2\right)^{17/6}}=$ 無因次 von Karman 等向能量頻譜

$\beta(k)=\frac{\gamma}{k^{2/3}\sqrt{{}_2F_1\left(\frac{1}{3},\frac{17}{6},\frac{4}{3},-k^{-2}\right)}}$ =與 $\sqrt{k^2\int_k^\infty E(p)dp}$ 成反比之無因次扭曲時間

${}_2F_1$=超幾何函數

σ_{iso}^2, ℓ=分別為無剪切等向變異與尺度係數

γ=無因次剪力扭曲參數

雖然此模型比 von Karman 等向模型更複雜，但僅多 1 個額外之參數，亦即剪力扭曲參數 γ。當此參數為零時，即得到等向模型。隨著此參數增加，縱向與橫向之速度分量變異亦將增加，而向上之速度分量變異則減少。其所得之紊亂渦流結構便往縱向拉長且往 1-2 平面傾斜。

假設模型所產生之隨機速度場在輪轂高度風速時對流超過風力機時，可用整合頻譜張量分量來計算在某一點所觀察到之速度分量頻譜。尤其無因次單邊頻譜可由下列公式求得：

$$\frac{fS_{\text{i}}(f)}{\sigma_{\text{i}}^2}=\frac{\sigma_{\text{iso}}^2}{\sigma_{\text{i}}^2}\left(\frac{4\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right)\Psi_{\text{ii}}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{\text{hub}}}\right) \qquad \text{(C.7)}$$

式中， $\Psi_{\text{ij}}(k_1)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{\text{ij}}(k_1,k_2,k_3)dk_2dk_3$ 為 $i=j$ 之無因次波數自我頻譜或 $i\neq j$ 之交互關聯頻譜

$\sigma_{\text{i}}^2=\sigma_{\text{iso}}^2\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{\text{ii}}(k_1,k_2,k_3)dk_1dk_2dk_3$ =分量變異

同樣地，在垂直於縱向方向之空間分割中，其相干性為：

$$\mathrm{Coh}_{ij}\left(f,\ell\delta_2,\ell\delta_3\right)=\frac{\left|\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\Phi_{ij}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{hub}},k_2,k_3\right)e^{-ik_2\delta_2}e^{-ik_3\delta_3}dk_2dk_3\right|}{\sqrt{\Psi_{ii}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{hub}}\right)\Psi_{jj}\left(\frac{2\pi\ell f}{V_{hub}}\right)}} \tag{C.8}$$

不幸地，所得之積分並無已知之解析型式，而且必須要針對參數 γ 之特定值以數值方式進行。Mann[4]進行過此積分，且與 Kaimal 頻譜模型作比較。由 Kaimal 模型之最小平方可以得出：

$$\gamma=3.9 \tag{C.9}$$

而所得之變異關係為：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1^2&=3.25\,\sigma_{iso}^2\\ \sigma_2^2&=1.65\,\sigma_{iso}^2\\ \sigma_3^2&=0.85\,\sigma_{iso}^2\end{aligned}\right\}\Rightarrow\begin{cases}\dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}\approx 0.7\\ \dfrac{\sigma_3}{\sigma_1}\approx 0.5\end{cases} \tag{C.10}$$

注意，所得之橫向變異略小於表 C.1 所述者。將漸近慣性副區縱向頻譜列成公式可找出比例參數，故

$$S_1(f)\to 0.475\,\sigma_{iso}^2\left(\frac{2\pi\ell}{V_{hub}}\right)^{-2/3}f^{-5/3}=0.05\,\sigma_1^2\left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}}\right)^{-2/3}f^{-5/3}\Rightarrow\ell\approx 0.8\Lambda_1 \tag{C.11}$$

總結來說，以下為 Mann 模型中所需之 3 個參數：

$$\begin{aligned}\gamma&=3.9\\ \sigma_{iso}&=0.55\,\sigma_1\\ \ell&=0.8\,\Lambda_1\end{aligned} \tag{C.12}$$

式中，σ_1 與 Λ_1 在 6.3 中說明

對三維擾流速度模擬而言，速度分量係以頻譜張量之分解與不連續之傅利葉轉換來求得。因此三維之空間域分成距離相等之不連續點，而下列為各點之速度向量：

$$\begin{bmatrix}u_1(x,y,z)\\ u_2(x,y,z)\\ u_3(x,y,z)\end{bmatrix}=\sum_{k_1,k_2,k_3}e^{i\frac{xk_1+yk_2+zk_3}{\ell}}\begin{bmatrix}C(k_1,k_2,k_3)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}n_1(k_1,k_2,k_3)\\ n_2(k_1,k_2,k_3)\\ n_3(k_1,k_2,k_3)\end{bmatrix} \tag{C.13}$$

式中，$\left[C(k_1,k_2,k_3)\right] \approx \sigma_{iso}\sqrt{\frac{2\pi^2\ell^3 E(k_0)}{N_1N_2N_3\Delta^3k_0^4}}\begin{bmatrix} k_2\varsigma_1 & k_3-k_1\varsigma_1+\beta k_1 & -k_2 \\ k_2\varsigma_2-k_3-\beta k_1 & -k_1\varsigma_2 & k_1 \\ \frac{k_0^2k_2}{k^2} & -\frac{k_0^2k_1}{k^2} & 0 \end{bmatrix}$

u_1, u_2, u_3=複數向量分量，其實數與虛數部分為擾流速度場之獨立實現

n_1, n_2, n_3=各波數獨立且具有單位變異之實數與虛數部分的複數高斯隨機值

x, y, z=空間坐標點之坐標

N_1, N_2, N_3=三個方向之空間坐標點之數量

Δ=空間坐標之解析度

在此算式中，符號 $\sum_{k_1,k_2,k_3}$ 表示坐標中無因次波數之總和，且可用 FFT 技巧求得。假使空間域在任何一個維度均小於 8ℓ時，建議調整頻譜張量因式分解[$C(k_1,k_2,k_3)$]。Mann[4]之論文中有更詳細之資料。

此處所推導用以表示 Mann 剪切擾流模型之 Mann 模型參數，係基於符合第 6 節中所定義之外部條件，並使所得的風譜等同於 Kaimal 頻譜。

對於場地特定分析，剪切扭曲(非等同)參數 γ、耗散因子 $\alpha\varepsilon^{2/3}$，及長度尺度 l，可基於在單一固定點對風譜 $F_u(kl)$、$F_v(kl)$、$F_w(kl)$與 $F_{uw}(kl)$之高頻場地特定量測來決定。然後必須基於由量測頻譜得出之 3 個模型參數來生成 Mann 模型擾流風場。

C.3 Kaimal[1][(42)]頻譜與指數相干性模型

註[(42)] 表 C.1 中擾流分量變異比與公式型式之向上速度分量與原始之 Kaimal 頻譜模型略有出入。縱向比例經適當挑選以接近 Kaimal 頻譜，且在橫向與向上之比例上滿足 6.3 所述漸近慣性副區縱向頻譜之要求與表 C.1 所示之變異比。

公式(C.14)提供無因次型式之分量功率譜密度：

$$\frac{fS_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4fL_k/V_{hub}}{(1+6fL_k/V_{hub})^{5/3}} \qquad (C.14)$$

式中，f ：頻率(Hz)

k ：表示速度分量方向指數(亦即 1=縱向，2=橫向，3=向上)

S_k ：單邊速度分量頻譜

σ_k ：速度分量標準差

L_k ：速度分量積分尺度參數

且

$$\sigma_k^2 = \int_0^\infty S_k(f)df \qquad (C.15)$$

表 C.1 所示為擾流頻譜參數。

表 C.1　Kaimal 模型擾流頻譜參數

	速度分量指數(k)		
	1	2	3
標準差 σ_k	σ_1	$0.8\sigma_1$	$0.5\sigma_1$
積分比例 L_k	$8.1\Lambda_1$	$2.7\Lambda_1$	$0.66\Lambda_1$
σ_1 與 Λ_1 分別為 6.3 所述之擾流標準差與尺度參數。			

下列指數相干性模型可與 Kaimal 自關聯頻譜一同使用，以計入縱向速度分量之空間關聯性結構：

$$\mathrm{Coh}(r,f)=\exp\left\{-12\left[\left(f\cdot r/V_{\mathrm{hub}}\right)^2+\left(0.12\,r/L_c\right)^2\right]^{0.5}\right\} \qquad \text{(C.16)}$$

式中，Coh(r, f)：在空間中由自關聯頻譜函數所分割之 2 個點上縱向風速分量之交互關聯頻譜密度之複數大小所定義之相干函數

R ：垂直於平均風向之平面上 2 點之間分割向量投影之大小

F ：頻率(Hz)

L_c=8.1 Λ_1 ：為相干尺度參數

C.4 參考資料

[1] J.C. Kaimal, J.C. Wyngaard, Y. Izumi, and O.R. Cote, Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Q.J.R. Meteorol. Soc.,* v . 98, 1972, p. 563-598

[2] T. van Karman, Progress in the statistical theory of turbulence, *Proc. Nat. Acad. Sci.,* V. 34, 1948, p. 530-539

[3] J. Mann, The spatial structure of neutral atmospheric surface-layer turbulence, *J. Fluid Mech.,* V. 273, 1994, p. 141-168

[4] J. Mann, Wind field simulation, *Prob. Engng. Mech.,* v. 13, no. 4, 1998, p. 269-282

附錄 D
(參考)
地震加載評估

D.1 一般說明

有兩種評估風力機地震加載方法，時域動態模擬法及反應譜法(response spectrum method, RSM)。在時域法中，地面加速度可由工程基岩知反應譜估算，或由地方建築法規指定的地面活動時程獲得。反應譜之場地特定參數可基於當地建築法規[1-7]。由於風力機支撐結構具有低阻尼比[8]，在使用反應譜法時需要特別注意。在附錄 D 中，設計反應譜首先於 D.2 中提出，接著在 D.3 說明結構模型，在 D.4 說明地震負載評估方法及在 D.5 說明額外負載。時域模擬之示例參照[9-10]。

推導設計地震反應譜之方法須仍與 11.6 及附錄 I 一致。當無詳細場地資料時，應採用保守之假設。

採用設計地震反應譜來建立塔架第 1 彎曲振動模態特徵頻率時之譜加速度，並假設阻尼為臨界阻尼之 1 %。

D.2 設計反應譜

加速度反應譜應選擇工程基岩，回歸期為 475 年。反應譜一般由當地法規提供。加速度反應譜可用公式(D.1)定義：

$$S_{a0}(T)=\begin{cases} a_0\left[1+(\beta_0-1)\dfrac{T}{T_B}\right] & (0\le T<T_B) \\ a_0\beta_0 & (T_B\le T<T_C) \\ a_0\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T}\right)^{K_1} & (T_C\le T<T_D) \\ a_0\beta_0\left(\dfrac{T_C}{T_D}\right)^{K_1}\left(\dfrac{T_D}{T}\right)^{K_2} & (T_D\le T) \end{cases} \qquad \text{(D.1)}$$

式中， a_0 ：工程基岩上，475 年回歸期之峰值地表加速度

β_0 ：當加速度反應變成常數時之區域之加速度反應放大比，可取 2 到 3

T ：結構之基礎自振週期

T_B、T_C、K_1 與 K_2 依構造、地質與土壤條件而定。T_B 可取為 T_C 之 1/5 至 1/2。對於堅硬與硬質土壤條件，T_C 可取 0.3 s 至 0.5 s，對於中等土壤條件可取 0.5 s 至 0.8 s，對於鬆散與軟質土壤條件可取 0.8 s 至 1.2 s。K_1 與 K_2 為指數，可在 1/3 至 2 之間變化。此等參數可由當地設計法規決定，參照參考資料[2]、[3]及[4]。

設計反應譜可寫成如公式(D.2)[2]。

$$S_a(T,\zeta)=\begin{cases} a_0 G_s\left[1+\left(F_\zeta\beta_0-1\right)\dfrac{T}{T_B}\right] & \left(0\le T<T_B\right)\\ a_0 G_s F_\zeta \beta_0 & \left(T_B\le T<T_C\right)\\ a_0 G_s F_\zeta \beta_0\left(\dfrac{T_C}{T}\right)^{K_1} & \left(T_C\le T<T_D\right)\\ a_0 G_s F_\zeta \beta_0\left(\dfrac{T_C}{T_D}\right)^{K_1}\left(\dfrac{T_D}{T}\right)^{K_2} & \left(T_D\le T\right)\end{cases} \qquad \text{(D.2)}$$

式中，G_s為土壤放大係數，F_ξ為結構阻尼修正係數，此等參數於本節說明。

土壤放大係數 G_s 用以說明地震波由基岩往地表傳遞時，因土壤條件不同而造成之地震動放大效果。各地之設計法規通常會依據不同土壤類型提供對應之放大係數，可直接用於風力機之地震負載計算。

阻尼修正係數 F_ξ用以修正風力機反應譜[8]：

$$\begin{cases} F_\zeta(\zeta,T,\gamma)=\left(\dfrac{7}{2+100\zeta}\right)^{(-0{,}07T+0{,}7r+0{,}5)} & (\zeta\le 5\%)\\ F_\zeta(\zeta,T,\gamma)=\left(\dfrac{2}{-3+100\zeta}\right)^{\left(0{,}15\log_{10}\frac{T}{1{,}5\gamma}+0{,}3\right)} & (\zeta>5\%)\end{cases} \qquad \text{(D.3)}$$

式中，γ用來考慮地震負載之不確定度。考慮當地設計要求，γ 可取 0.5 至 0.85。

D.3 結構模型

為估算風力機之地震負載，可使用簡化 N 自由度模型(參照圖 D.1)。在此模型中，轉子、齒輪箱及發電機之質量與慣性矩集中於塔頂(節點 N)，塔架質量沿塔身分布。為估算塔架之負載可假設塔底固定於地面。若需評估基礎之負載，可能需要更複雜之模型，此已超出本附錄之範圍。

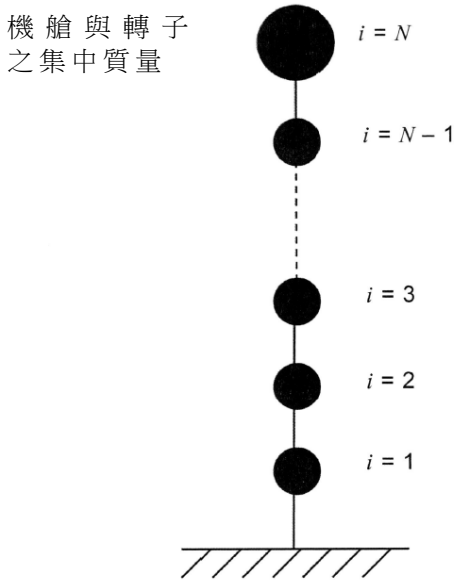


圖 D.1　反應譜法之結構模型

D.4 地震負載評估

使用反應譜，可計算對應於第 i 節點之第 j 模態之最大加速度(A_{ij})、力(F_{ij})及位移(D_{ij})：

$$A_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_a\left(T_j, \zeta_j\right) \tag{D.4}$$

$$F_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_a\left(T_j, \zeta_j\right) m_i \tag{D.5}$$

$$D_{ij} = \gamma_j X_{ij} S_a\left(T_j, \zeta_j\right)\left(\frac{T_j}{2\pi}\right)^2 \tag{D.6}$$

式中，　X_{ij} ：特徵值分析所得之第 j 模態形狀

$S_a(T_j, \zeta_j)$ ：第 j 模態自然週期(T_j)與阻尼比(ζ_j)之反應譜幅值

γ_j ：為第 j 模態參與因子

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} X_{ij}^2} \tag{D.7}$$

式中，N：模型中之節點數

考慮第 i 節點處所有相關模態之總加速度(A_i^{total})、位移(D_i^{total})、剪力(Q_i^{total})及力矩(M_i^{total})，可採用完全二次組合(complete quadratic combination, CQC)方法計算[公式(D.8)至公式(D.11)]。

$$A_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \rho_{jl} A_{ij} A_{il}} \tag{D.8}$$

$$D_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \rho_{jl} D_{ij} D_{il}} \tag{D.9}$$

$$Q_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \rho_{jl} \left(\sum_{k=i}^{N} F_{kj}\right)\left(\sum_{k=i}^{N} F_{kl}\right)} \tag{D.10}$$

$$M_i^{\text{total}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1}^{M} \rho_{jl} \left[\sum_{k=i}^{N} F_{kj}\left(z_N - z_k\right)\right]\left[\sum_{k=i}^{N} F_{kl}\left(z_N - z_k\right)\right]} \tag{D.11}$$

式中，

$$\rho_{jl} = \frac{8\sqrt{\zeta_j \zeta_l}\left(\zeta_j + X_{jl}\zeta_l\right)X_{jl}^{3/2}}{\left(1-X_{jl}^2\right)^2 + 4\zeta_j\zeta_l X_{jl}\left(1+X_{jl}^2\right) + 4\left(\zeta_j^2+\zeta_l^2\right)X_{jl}^2} \quad \text{(D.12)}$$

式中，ξ_i，ξ_j 分別是第 i 及第 j 模態之阻尼比

X 為第 i 模態固有頻率與第 j 模態固有頻率之比

D.5 額外負載

塔架之扭矩(M^t)可由公式(D.13)[8]計算得到：

幾何非線性造成之額外彎曲力矩(如 $p-\Delta$ 效應)可利用最大位移計算，參照參考資料[8]。

$$M^t = 1{,}1 M_n A_n L_e \quad \text{(D.13)}$$

式中，M_n ：機艙及轉子質量

A_n ：機艙最大加速度

L_e ：轉子中心至機艙重心之中心間距離

D.6 參考資料

[1] ISO 3010 , Basis for design of structures - Seismic actions on structures

[2] Eurocode 8 , Design of Structure for Earthquake Resistance ; Part 1: General Rules, Seism ic Actions and Rules for Build ings , EN-1998-1 :2004

[3] ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston , Virginia, USA, 2006

[4] BSL, The Building Standard Law of Japan, The building centre of Japan , 2004

[5] AIJ, Architectural Institute of Japan, Seismic Loads Commentary, 2004

[6] IBC, International Building Code , International Code Counc il, Falls Church, Virginia, 2009

[7] UBC-97 Uniform Building Code, International Conference of Building Officials (ICBO), 1997

[8] Y. Takei and T. Ishihara, Seismic Load Evaluation of Wind Turbine Support Structures Considering High Structural Damping and Additional Mode, Proc. Of Grand Renewable Energy Conference, 2014

[9] D. Witcher , Seismic analysis of wind turbines in the time domain, Wind Energy, No. 8 , p. 81-91, 2005

[10] I. Prowell, A. Elgamal, C.-M. Uang, J. E. Luco, H. Romanowitz, and E. Duggan , Shaketable testing and numerical simulation of a utility-scale wind turbine including operational effects, Wind Energy, DOI: 10.1002/we.1615

附錄 E
(參考)
尾流與風電場擾流

E.1 尾流效應

在正常運轉期間，鄰近風力機之尾流效應可考慮有效擾流強度 I_{eff} [1]，以進行疲勞計算。有效擾流強度－在輪轂高度平均風速(V_{hub})上－可定義為：

$$I_{\text{eff}}(V_{\text{hub}}) = \left\{ \int_0^{2\pi} p(\theta \mid V_{\text{hub}}) I^m(\theta \mid V_{\text{hub}}) d\theta \right\}^{1/m} \tag{E.1}$$

式中， p ：風向之機率密度函數

I ：周邊與從風向 θ 而來之尾流組合而成之擾流強度

m ：結構組件所用材料之 Wöhler 曲線指數

此方法適用於規則及不規則之風電場布局。

以下假設風場布局為規則矩形，且風電場之風速分布 $p(\theta \mid V_{\text{hub}})$為均勻分布。對於其他布局及非均勻分布(43)，可對公式進行調整。不得假設風電場內部之平均風速會降低。

註(43) 對於非均勻分布或非網格狀風電場布局，應相應地修改公式，同時保持更一般公式(E.1)所蘊含之概念。對於每個影響風力機之鄰近風力機，應考慮其所擾動之扇形區間及其在輪轂高度平均風速條件下之發生機率。

若 $\min\{d_1\} \geq 10\ D$：

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{c}}}{V_{\text{hub}}} \tag{E.2}$$

若 $\min\{d_1\} < 10D$：

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{eff}}}{V_{\text{hub}}} = \frac{1}{V_{\text{hub}}} \left[(1 - N\ p_{\text{w}}) \hat{\sigma}_{\text{c}}^m + p_{\text{w}} \sum_{i=1}^{N} \hat{\sigma}_{\text{T}}^m(d_i) \right]^{\frac{1}{m}};\ p_{\text{w}} = 0{,}06 \tag{E.3}$$

式中， D ：風力機直徑

$\hat{\sigma}_{\text{c}} = \hat{\sigma} + 1{,}28\hat{\sigma}_{\sigma}$ ：周邊擾流代表標準差

$\hat{\sigma}$ ：周邊擾流估算標準差

$\hat{\sigma}_{\sigma}$ ：環境擾流標準差之估算標準差

$\hat{\sigma}_{\text{T}} = \sqrt{\dfrac{V_{\text{hub}}^2}{\left(1{,}5 + \dfrac{0{,}8 d_i}{\sqrt{C_{\text{T}}}}\right)^2} + \hat{\sigma}_{\text{c}}^2}$ ：最大中心尾流、輪轂高度擾流標準差之代表值($\hat{\sigma}_{\text{c}}$不得考

慮風場產生之環境擾流)。

C_T ：對應輪轂高度風速下風力機推力係數之特徵值。若相鄰風力機之推力係數未知，則可使用通用值 $C_T = 7c/V_{hub}$。

d_i ：為以轉子直徑正規化之到鄰近第 i 號風力機之距離。

c ：為等於 1 m/s 之常數。

I_{eff} ：為有效擾流強度。

N ：為鄰近風力機數量，參照表 E.1。

無需考慮來自風力機並〝隱藏〞在其他機器後之尾流效應，例：在一排風力機中，僅需考慮最接近設計中機組之兩機組即可。依據風電場組態，計算 I_{eff} 時需包含最近風力機之數量如表 E.1 所示。

表 E.1 鄰近風力機數量(N)

風電場組態	N
2 部風力機	1
1 排	2
2 排	5
風電場內超過 2 排	8

圖 E.1 所示為〝風電場內超過 2 排以上〞情況之風電場組態及常規布局。

在大型風電場內，風力機往往會產生自己之〝風電場周邊擾流〞。因此，當：

(a) 從設計中機組到風電場〝邊緣〞之風力機數量大於 5，或

(b) 垂直於主要風向該排之間距小於 $3D$ 時，

除在 $\hat{\sigma}_T$表達式之外，應假設以下代表性之風電場環境擾流作為取代 $\hat{\sigma}_c$：

$$\hat{\sigma}'_c = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\hat{\sigma}_w^2 + \hat{\sigma}^2} + \hat{\sigma}\right) + 1{,}28\,\hat{\sigma}_\sigma \qquad \text{(E.4)}$$

式中，

$$\hat{\sigma}_w = \frac{0.36\,V_{hub}}{1 + 0.2\sqrt{d_r d_f / C_T}} \qquad \text{(E.5)}$$

式中，d_r 與 d_f 分別為轉子直徑在各排中之分離距離及排之間的分離距離。

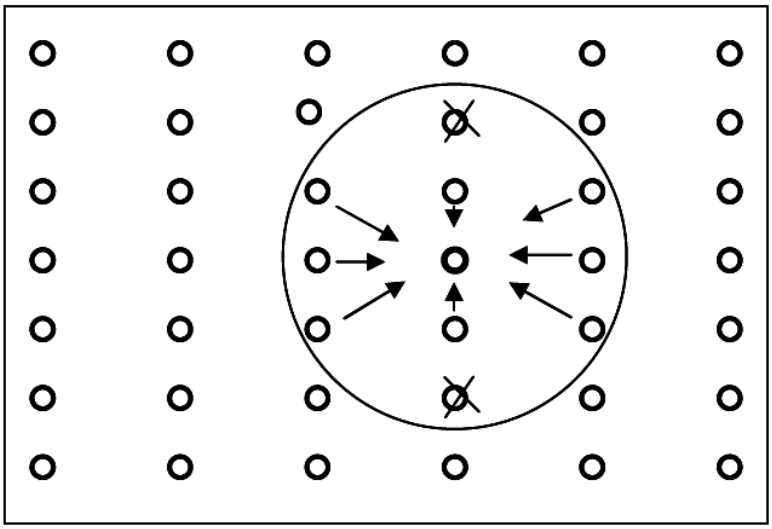


圖 E.1　風電場內超過 2 排之組態

E.2 動態尾流擺動模型

E.2.1 概述

相鄰風力機產生之尾流效應，可藉由動態尾流擺動(DWM)模型[2][3][4]納入疲勞與極限狀態(ULS)計算中。此模型說明風電場中平均氣流場之變化，及相較於環境條件下之擾流強度與擾流結構的改變。

DWM 模型由 3 個部分構成(參照圖 E.2)：

(a) 在尾流擺動參考架構中制訂之尾流速度虧損模型。

(b) 下游尾流擺動過程之隨機模型。

(c) 在尾流擺動參考架構中說明自激尾流擾流模型。

以下內容提供建議使用之次模型、其合成方式，及延伸至多重尾流情況之摘要說明。

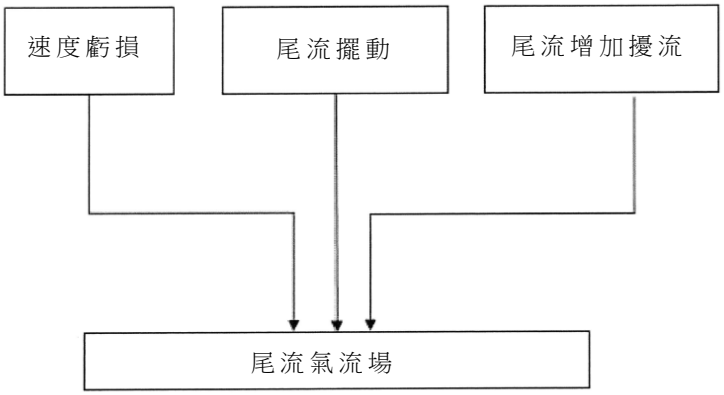


圖 E.2　DWM 模型之 3 個基本部分

E.2.2 尾流虧損

平均尾流虧損會隨著與產生尾流之轉子的下游距離增加而擴張並減弱。建議之尾流虧損建模方法，是基於 Navier–Stokes 方程式在其旋轉對稱形式下之薄剪切層近似，並忽略壓力項。對於 Reynolds 應力，採用渦流黏性(eddy viscosity)方法時，需要求解之方程式組如下：

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rV\left(r,x\right)\right)+\frac{\partial U\left(r,x\right)}{\partial x}=0 \tag{E.6}$$

$$U\frac{\partial U\left(r,x\right)}{\partial x}+V\left(r,x\right)\frac{\partial U\left(r,x\right)}{\partial r}=\frac{\nu_{\mathrm{T}}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U\left(r,x\right)}{\partial r}\right) \tag{E.7}$$

式中，U 與 V 分別表示軸向與徑向方向之平均尾流速度。渦流黏性 ν_{T} 包含來自環境擾流及尾流自生擾流之貢獻：

$$\frac{2\nu_{\mathrm{T}}}{DV_{\mathrm{hub}}}=0{,}023\,F_1\left(\tilde{x}\right)\left(\frac{\sigma}{V_{\mathrm{hub}}}\right)^{0{,}3}+0{,}016\,F_2\left(\tilde{x}\right)\frac{R_{\mathrm{w}}\left(\tilde{x}\right)}{D}\left(1-\frac{U_{\min}\left(\tilde{x}\right)}{V_{\mathrm{hub}}}\right) \tag{E.8}$$

其中，導入正規化後之空間變數。

$$\tilde{r}=\frac{2r}{D}\;;\;\tilde{x}=\frac{2x}{D} \tag{E.9}$$

式中，F_1 及 F_2 是與軸向坐標相依之濾波函數，R_{w} 為尾流半徑，$U_{\min}$ 為最小尾流速度。經驗濾波函數用於考量近場壓力影響(即 F_2)及在近尾流與中間尾流區域中，平均剪切氣流場與擾流場間缺乏平衡之情況(即 F_1)，由下式給定：

$$F_1\left(\tilde{x}\right)=\begin{cases}\left(\dfrac{\tilde{x}}{8}\right)^{3/2}-\dfrac{\mathrm{Sin}\left(2\pi\tilde{x}^{3/2}/8^{3/2}\right)}{2\pi} & ;0\le\tilde{x}<8\\ 1 & ;\tilde{x}\ge 8\end{cases} \tag{E.10}$$

$$F_2\left(\tilde{x}\right)=\begin{cases}0{,}0625 & ;0\le\tilde{x}<4\\ 0{,}025\,\tilde{x}-0{,}0375 & ;4\le\tilde{x}<12\\ 0{,}00105\left(\tilde{x}-12\right)^3+0{,}025\,\tilde{x}-0{,}0375 & ;12\le\tilde{x}<20\\ 1 & ;20\le\tilde{x}\end{cases} \tag{E.11}$$

壓力影響係藉由導入 F_2 而被隱含地考量，並進一步在與微分方程組(E.6)與(E.7)相關之邊界條件中，納入由壓力回復所決定之尾流擴張部分。因此，初始尾流半徑可近似為：

$$R_{\mathrm{w}}\left(0\right)=D\left(1-0{,}45a_{\mathrm{m}}^2\right)\sqrt{\frac{1+m}{8}} \tag{E.12}$$

式中，a_{m} 表示轉子上之平均導入(mean induction)，及

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-C_T}} \tag{E.13}$$

式中，C_T 為轉子推力係數。因此，使用公式(E.6)與公式(E.7)在下游所發展之初始尾流虧損，是由葉片元素動量法(blade element momentum)之遠場導入預測，再結合公式(E.12)所給出之徑向尺度化而取得。

E.2.3 擺動

尾流擺動部分是基於一項基本假設：大氣邊界層內之尾流傳輸可藉由將尾流視為由大尺度擾流結構所驅動之被動示蹤物(passive tracers)進行建模。擺動過程之建模需要同時考量〝載體〞隨機傳輸媒介(即大尺度擾流場)之適當描述，及用以定義此處大尺度擾流結構之截止頻率(cut-off frequency)的恰當定義。

尾流擺動之隨機建模，是藉由考慮尾流虧損以〝被動示蹤物〞類比方式，在連續時間點〝釋放〞之一系列尾流虧損級聯(cascade)建立。對每一次〝釋放〞出之尾流虧損，其傳遞路徑會被建模，而此等個別傳遞之集合描述便構成空間與時間上之尾流擺動模型。

採用 Taylor 假設後，每一次尾流虧損〝釋放〞之下游平流運動，由合適之平流速度決定，而此速度通常取為環境平均風速。至於橫向與垂直方向之動態，每個被考慮之尾流級聯元素會依據其當前位置處的大尺度橫向與垂直擾流速度而被持續位移。以數學方式表達，尾流虧損在側向方向 y 與垂直方向 z 之動態可由下列微分方程組描述：

$$\frac{dy}{dt} = v_c(y,z,t) \tag{E.14}$$

$$\frac{dz}{dt} = w_c(y,z,t) \tag{E.15}$$

式中，v_c 與 w_c 為時間 t 時，空間相關之大尺度擾流速度。

建議之空間平均方法，用以定義擾流之大尺度部分，可使用 Taylor 凍結假設以截止頻率表示:

$$f_c = \frac{U_u}{4R} \tag{E.16}$$

備考：藉由此公式化方法，假設大尺度擾流部分不受風電場存在之影響。

E.2.4 尾流誘導擾流

尾流誘導擾流包含由傳統機械性產生之擾流貢獻(由尾流剪切所致)，及由葉片脫落與尾隨渦旋所產生之擾流，主要是葉尖渦旋與葉根渦旋，此等渦旋會在產生尾流之轉子下游逐漸分解。故此部分擾流視為與環境擾流無關。

由於其長度尺度與尾流虧損之特徵尺寸相當，基於尺度之基本 DWM 分解顯示

尾流誘導擾流會隨尾流虧損擺動。因此，誘導之小尺度擾流在尾流擺動參考架構下被公式化。雖然違反二階統計(即互相關性)，誘導擾流之不均勻性可藉由對長度尺度等於一個轉子直徑及擾流標準差等於 1 m/s 之均勻等向之擾流場進行簡單縮放來近似。假設誘導尾流擾流強度具有旋轉對稱性，對於給定下游距離之縮放係數，僅依徑向坐標而定。經驗縮放係數 k_{wt} 取決於所考慮之下游距離處的虧損深度($\boldsymbol{V}_{hub} - \boldsymbol{U}_{min}$)及尾流虧損徑向梯度$\boldsymbol{\partial U/\partial r}$：

$$k_{wt}(\tilde{x},\tilde{r}) = 0{,}6\left|1-\frac{U(\tilde{x},\tilde{r})}{V_{hub}}\right| + \frac{0{,}35}{V_{hub}}\left|\frac{\partial U(\tilde{x},\tilde{r})}{\partial \tilde{r}}\right| \quad \text{(E.17)}$$

E.2.5 尾流重疊

在處理風電場氣流場時，尾流重疊是非常重要的。此為一個複雜之過程，故需要進行簡化。所涉及之風力機尾流(包括相關之小尺度尾流誘導亂流)會單獨處理，之後再對其相關之擺動進行建模。參考環境風速條件，對於低於額定功率與高於額定功率之風況，分別採用兩種不同之方法：

- 低於額定風速：對於風電場中轉子中心位於空間位置 x 之風力機，轉子極坐標(r, θ)處之瞬間變化氣流場，由所有上游風力機在任何時間之貢獻中佔主導之尾流決定：

$$U_t(r,\theta,t|x) = \underset{i}{\mathrm{MIN}}\left(U_{t,i}(r,\theta,t|x)\right) \quad \text{(E.18)}$$

式中，$(\boldsymbol{r},\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{t}\,|\,\boldsymbol{x})$表示以空間位置 x 為中心之極坐標系中的時間坐標與空間坐標。每個單獨之尾流場由 $U_{t,i} = (U_i + u_i)e_1 + v_i e_2 + w_i e_3$ 給出，其中 e_{ij}=1,2,3 為為縱向、橫向及垂直方向之單位法向量。參數 i 包含給定平均風向下相對於空間位置 x 之所有上游風力機。注意依據公式(E.18)中給出之方法，與對 U_t 有貢獻之尾流相關的誘導小尺度湍流以不一致的方式聚合。然而，由於誘導擾流之貢獻是小尺度的，因此此並不影響目前之應用。
- 高於額定風速：採用上述命名法，公式(E.18)被所有上游風力機虧損貢獻之總和所取代：

$$U_t(r,\theta,t|x) = \sum_i U_{t,i}(r,\theta,t|x) \quad \text{(E.19)}$$

E.2.6 模型整合

對於風電場中之每個轉子，其入流風場由環境未受擾動之風場，及相關之[參照公式(E.18)]尾流虧損與尾流誘發小尺度擾流線性疊加而成。未受擾動之風場為場地特定的平均風速，由確定性部分(即平均風剪)及具有環境擾流特性之傳統擾流部分組成。需要疊加之尾流效應包括隨機運動的尾流虧損($\boldsymbol{V}_{hub} - \boldsymbol{U}$)及相關之尾流誘導擾流貢獻，並依照公式(E.18)所制定之方法進行加總。

備考：尾流虧損之擺動是尾流效應中最主要之影響。

E.3 參考資料

[1] S. Frandsen (2007) Turbulence and turbu lence generated structural loading in wind turbine clusters, Risϕ report R-1188

[2] Larsen, G.C., Madsen, H.Aa ., Thomsen, K., and Larsen, T.J. Wake meandering – a pragmatic approach. Wind Energy, 11 , 2008, p.377-395

[3] Madsen, H.Aa. , Larsen , G.C. , Larsen, T.J. , and Troldborg, N. Calibration and Validation of the Dynamic Wake Meandering Model for Implementation in an Aeroelastic Code. J. Sol. Energy Eng., 132(4), 2010

[4] Larsen, T.J., Madsen, H. A., Larsen , G.C. and Hansen, K.S. Validation of the Dynamic Wake Meander Model for Loads and Power Production in the Egmond aan Zee Wind Farm. Wind Energy. 16, 2013, p.605-624

附錄 F
(參考)
利用 MCP 法預測風力機場地風速分布

F.1 一般

評估風力機是否適合特定場地，需要評估該場地之關鍵設計風速參數。通常情況下，即使在風電場內，單點數據亦不足以進行評估。然而，可藉由基於其他地點長期紀錄之推斷，合成延伸資料紀錄。MCP 方法正是用來創建此類延伸紀錄之方法。以下解釋摘自參考資料[2]。更多資訊參照參考資料[3]、[4]及[5]。

F.2 量測-關聯-預測(measure – correlate - predict, MCP)

MCP 方法有多種形式，其平均週期及資料方向性所有不同。此處說明其中一種形式，該方法基於風力機場地及附近基準氣象站之同步逐時資料。將此等資料進行交叉繪製，並用於推導扇形區間之線性迴歸方程式。扇形區間與氣象站使用之扇形區間一致，通常為 30°。用於推導迴歸方程式之資料集應盡可能長，至少保守地涵蓋任何季節性變化中之保守部分。

F.3 年平均風速與分布之應用

將上述回歸方程式會逐個扇形區間套用至氣象站長期紀錄上，其期間須足夠長以消除短期變化，可能至少 7 年。其結果為該場地之逐時平均紀錄，可進一步處理成用於場地評估之機率分布。

F.4 極端風速之應用

經典之極端風速預測方法是經修正以改善準確度之 Gumbel 分析(例: Best Leiblein Unbiased Estimators, BLUE 方法[1])。資料集之最小建議長度為 10 年。

亦可使用獨立風暴法(method of independent storms, MIS)，此為 Gumbel 方法之衍生，用於資料集中每年取用多於一個資料點，亦由 Cook[1]說明。此方法可用於最短 4 年之資料集。MIS 會藉由閾值與時間濾波之應用，以選擇個別風暴之峰值風速，以確保所有數值皆來自獨立事件。

扇形區間特定回歸係數套用至氣象站最大每小時風速(基於 Gumbel 依年統計)表格上，MIS 依風暴事件及扇形區間統計。因此，對風力機場地亦建立一張類似之表格。從候選場地中擷取每一年之最大值用於 Gumbel 分析。

此處使用此等係數是適當的，因其由每小時平均資料形成，並將套用至每小時平均資料。在此方法中，並不假設候選場地之最大值發生在與參考場地最大值相同之扇形區間。藉由使用扇形區間特定回歸係數，可更準確地決定候選場地之最大值，考量場地間之關聯性。

選擇極限值分析之相關回歸期時宜考量每年發生的事件數。

陣風係數應依據場地實測資料，或依理論方法估算。

使用此等方法推算極端風速時，使用者宜注意結果之準確度高度仰賴資料品質，

及場地相對於參考氣象站之實際當地條件。其結果是，迴歸分析所得到之相關性可能會很差。在主管機關認可當地現行法規可適用之情況下，由該等法規所得之極端風速，應優先於 MCP 方法，並視為設計所宜採用之最小極端風速值。

F.5 參考資料

[1] N.J. Cook, The designers guide to wind loading of building structures, Butterworths, 1995

[2] National Wind Power and Climatic Research Unit of the University of East Anglia, Prediction of extreme wind speed at wind energy sites, a set of guidelines prepared under ETSU contract W/11/00427/00

[3] R.I. Harris, Gumbel re-visited - a new look at extreme value statistics applied to wind speeds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 59 (1996) p.1-22

[4] D.C. Quarton, Wind Farms in Hostile Terrain, Final Report, A report prepared under ETSU contract W/43/00501/00/00, July 1999

[5] R.I. Harris, The accuracy of design values predicted from extreme value analysis, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(2001) p.153-164

附錄 G
(參考)
極限強度分析之負載統計外插

G.1 一般

當結構關鍵位置之應力超過組件材料之承載能力時，結構就會失效。假設局部應力與加載相關，即應力隨著加載增加而逐漸增加，因此組件強度可用導致失效之極限負載定義。在給定使用加載之情況下，可藉由比較加載極限值與極限負載承載，並應用適當之安全因數以評估結構之適當性。

對風力機而言，負載取決於各種風況下之擾流入流。因此，有必要對負載之極端值進行統計分析，以決定合適之特徵負載。

對於給定之風況，將短期負載反應建模為平穩隨機過程是合理的。給定負載可代表此類過程，下文將介紹用於資料擷取外插及負載外插之方法。此外，亦提出收斂準則，並給出使用逆一階可靠度法(inverse first-order reliability method, IFORM)估算長期負載之替代方法。

此等方法已針對三葉片水平軸上風向風力機進行試驗。對於其他風力機概念及/或控制方案(包括負載回饋)可能需要特別注意。更多資訊與指引參照參考資料[1]。

G.2 資料擷取外插

用於外插法之資料擷取自風力機在特定風況下運轉範圍內之模擬時間序列。可以藉由從每次模擬中選擇整體個別反應極值，或將模擬分成等時間區塊或確保極值之間最小時間間隔而創建之子集以提取資料。

對於某些外插方法而言，建立各個負載反應極值間之獨立性至關重要。擷取時，設計者宜考慮峰值間獨立性對外插之影響，並盡可能降低相關性。若所選之外插方法對獨立性假設較為敏感(例:該方法涉及在不同時間基準之間轉換機率函數)，則設計者應嘗試藉由統計方法檢驗其獨立性。

確保獨立性一個簡單方法是假設每次 10 分鐘模擬中之整體極值或間隔不短於 3 個反應週期之局部極值是相互獨立的，因此要求各個反應極值間之最小時間間隔為 3 個響應週期(由 3 個均值穿越區塊大小定義)。若需要使用系統性之統計方法，設計者可使用標準估算技術(例:參考資料[5]及[6])檢驗獨立性，然後以可控之方式最小化相關性。

亦可採用峰值超閾值方法，但設計者宜注意閾值引入之截斷誤差與相關性，不會對經驗分布之形狀產生顯著影響。

G.3 負載外插方法

G.3.1 一般

風力機之 50 年回歸期負載可定義為每年超過機率為 1/50 年=0.02 之極端負載。用以決定 50 年一遇負載之建議極端事件外插方法，可分為下述步驟：

(a) 參數擬合及後續聚合

- 將風力機之運轉範圍劃分為離散之風速區間，並在正常擾流(NTM)位準下進行時域模擬。
- 針對每個風速實現值，估算一個極值(參數)分布[2]。
- 依據長期平均風速分布聚合所有分布。
- 預測聚合分布函數之 50 年一遇值。

對 10 分鐘模擬整體極值，50 年一遇負載機率約為 3.8×10^{-7}。

(b) 先進行資料聚合，然後進行擬合

- 將風力機之運轉範圍劃分為離散風速，並在正常擾流(NTM)位準下進行時域模擬。
- 依據風力機運轉範圍內平均風速之長期分布函數，聚合所有時間序列中之所有相關極端值。
- 估算所有極值之單一(聚合)分布函數。
- 依據所得分布函數預測 50 年值。

對於將特定觀測期 T 之模擬短期極值分布聚合為同一時期長期極值之經驗分布，考慮兩種不同之情況：從整體極值外插及從局部極值外插。

G.3.2 整體極值

觀測期 T 內整體極端事件之短期分布表示為

$$F_{\text{short-term}}\left(s\middle|V;T\right) \tag{G.1}$$

式中，s 代表負載反應，V 代表觀測期內之平均風速。利用平均風速之長期分布，可得到極端值之長期分布：

$$F_{\text{long-term}}\left(s;T\right)=e^{\int_{V_{\text{in}}}^{V_{\text{out}}}\ln\left(F_{\text{short-term}}\left(s|V;T\right)\right)f(V)dV} \tag{G.2}$$

此公式之推導基於假設：值 s 之超限構成具獨立增量之複合 Poisson 點過程。所需回歸期 T_{r} 之極端負載反應 s_{r} 由公式(G.3)得出：

$$F_{\text{long-term}}\left(s;T\right)=\left(1-\frac{1\text{yr}}{T_{\text{r}}}\right)^{\frac{T}{1\text{yr}}}\approx 1-\frac{T}{T_{\text{r}}} \tag{G.3}$$

對於足夠小之 T/T_{r} 值，

此等公式之實際應用通常是使用離散之風速值。然後就有

$$F_{\text{long-term}}(s;T) \approx \prod_{k=1}^{M}\left(F_{\text{short-term}}(s|V_k;T)\right)^{p_k},$$

$$p_k = f(V_k)\Delta V_k,\ V_{\text{in}} \le V_1 < \ldots < V_M \le V_{\text{out}} \tag{G.4}$$

對於較小之短期超越機率，可保守地近似為：

$$F_{\text{long-term}}(s;T) \approx 1-\sum_{k=1}^{M}\left(1-F_{\text{short-term}}(s|V_k;T)\right)p_k$$

$$=\sum_{k=1}^{M}F_{\text{short-term}}(s|V_k;T)\,p_k \tag{G.5}$$

後一種等效結果成立是因假設超過運轉範圍外之機率為 0。

$F_{\text{short-term}}$ 分布可藉由擬合經驗分布獲得。

$$\hat{F}_{\text{short-term}}(s_{ki}|V_k) = \frac{r_i}{n_k+1}, i = 1,\ldots,n_k \tag{G.6}$$

式中，s_{ki} 表示風速 k 之第 i 個極值樣本，r_i 表示 s_{ki} 在風速 k 產生之 n_k 個極值中之排名。值得注意的是，對於下列推導，使用求和法可得到經驗分布之等同表達。

$$\hat{F}_{\text{short-term}}(s_{ki}|V_k) = \sum_{j=1}^{n_k}\frac{1}{n_k+1}I(s_{kj}-s_{ki}), i = 1,\ldots,n_k \tag{G.7}$$

式中，指示函數 $I(x)$表示

$$I(\ ,\ ) = \begin{cases}1 \text{ for } x \le 0\\ 0 \text{ for } x > 0\end{cases} \tag{G.8}$$

指示函數之任務是找出所有小於或等於 s_{ki} 之值，以便其能對小於或等於 s_{ki} 值之經驗機率做出貢獻。注意指示函數之具體定義確保考慮相同極值出現之情況。

G.3.3 局部極值

現在，觀測期 T 內整體極值之短期分布，由該期間內 $n(V)$個獨立之局部極值獲得(假設極值均為正，否則可能需要改變符號)：

$$F_{\text{short-term}}(s|V;T) = F_{\text{local}}(s|V;T)^{n(V)} \tag{G.9}$$

長期分布[定義參照公式(G.9)]及所需回歸期 T_r 之極端負載反應 s_r 的建立方法如 G.3.2 所述。嚴格而言，n 宜為隨機數，並假設其服從某種分布(取決於風速 V)。然而，對於風力機應用而言，n 之變化範圍與其平均值相比有限。因此，如上所述，用 n 之平均值(以風速 V 為條件)代替 n 即足夠精確。若應用下文提出之公式時，使用一個能代表對特定負載反應貢獻最大風速之 s 值，則可接受此類近似。基於此近似，可得到下列表達式：

$$F_{\text{long-term}}(s;T) = e^{\int_{V_{\text{in}}}^{V_{\text{out}}} n(V)\ln\left(F_{\text{local}}(s|V;T)\right)f(V)dV} \tag{G.10}$$

G.3.4 長期經驗分布

將所有風速資料匯總，然後對合併後之資料擬合分布，此方法具有許多優點。實現此目的之一種方法是進行多次模擬，其中每個區間內之模擬次數由風速的韋伯分布(或其他合適分布)決定。

$$N_{\text{sims}}(V_k) \approx N_{\text{total}} p_k, \quad p_k = f(V_k)\Delta V_k, V_{\text{in}} \le V_1 < \ldots < V_{\text{M}} \le V_{\text{out}} \tag{G.11}$$

模擬完成後，擷取出最大值，將所有風速下肢最大值合併成單一分布，並依以下方式排序：

$$\hat{F}_{\text{long-term}}(s_i) = \frac{r_i}{n_k + 1}, i = 1, \ldots, n_{\text{total}} \tag{G.12}$$

式中，s_i 表示所有風速下之第 i 個極值樣本，r_i 表示組合分布產生之 n_{total} 個極值中的 s_i 排名。

此方法一個潛在缺點是，對於以高風速為主之負載，可能只有極少之模擬資料，無法從中提取經驗分布尾部之大的極值。為解決此問題，可使用低機率風速區間之額外模擬資料計算額外之長期分布。每個區間之總模擬時間應與原始風速分布一致。但可使用所有區間(其中有大量模擬資料可用)之隨機自舉資料來建立多個新的長期經驗分布。一旦建構多個長期分布，即可對其進行平均，從而形成一個單一之聚合長期分布，該分布可用於外插至更低之機率位準。

G.4 收斂準則

G.4.1 一般

在風力機極端負載之背景下，不同風速之重要性取決於所外插之負載。某些負載主要受額定風速附近之風速影響，而有些負載則主要受切出風速或其他風速之影響。設計者必須仔細檢查主要風速，以確保進行足夠數量之模擬，從而確保方法之穩定性。對於從(V_r − 2 m/s)到切出風速之每個風速，至少需要 15 次模擬。對於低於(V_r − 2 m/s) 之每個風速，至少需要 6 次模擬。

除對從(V_r − 2 m/s)到切出風速之風速進行最少模擬次數外，亦應依據 7.6.2 應用額外之收斂準則。建議模擬次數是藉由計算所得經驗分布之信賴區間來決定。認為模擬次數足夠多之條件是：整體最大值經驗負載分布之 84 %分位數的 90 %信賴區間寬度小於 84 %分位數估算值之 15 %。此區間可使用自舉法[3]、二項式估算法[4]來估算，或亦可作為所採用之外插法之一部分估算。

若使用其他方法(例：區塊最大值法)獲得極值，且平均每次 10 分鐘模擬產生 m 個極值，則上述 84 %分位數需要替換為 p^*。

$$p^* = (0{,}84)^{1/m} \tag{G.13}$$

無論長期分布是先藉由風速資料聚合建立，或是先對每個風速資料進行參數分布擬合再進行聚合，均宜將收斂準則(44)分別應用於每個短期負載分布。

註(44) 只有當 84 %分位數遠大於 0 時，才宜評估該準則。例:在某些風速下，外側葉片遠離塔架之揮舞力矩可能會出現問題，亦即該準則宜依據一定之工程判斷處理。

在先聚合再擬合之程序中，聚合所有風速區間後，可利用與上述短期分布類似之收斂準則建立負載之經驗長期分布。施加收斂準則之適當分位數宜高於經驗長期分布中任何明顯之〝拐點〞(通常可觀察到)對應之分位數，以確保在更接近該經驗分布尾部之位置檢查收斂情況。

G.4.2 負載分位數估算

對應於非超越機率 P 之所需負載分位數 $\widehat{L_p}$ 依下述估算。

對所有負載資料進行排序，使得 $S_1 \le S_2 \le \ldots\ldots \le S_m$(若從模擬中獲得 m 個此類值)。注意，若使用整體最大值，則 m 將等於模擬次數。

對於任何指定之 p，確保可找到某個整數 i(當 $2 \le i \le m$)，使得

$$\frac{i-1}{m+1} \le p \le \frac{i}{m+1} \tag{G.14}$$

需要有足夠數量之極值 m(為此需要執行足夠之模擬)，才能使上述不等式成立並找到 i 值。

然後，藉由(線性)插值計算負載分位數估算值，如下式所示：

$$\hat{S}_p = S_{i-1} + [p(m+1) - (i-1)](S_i - S_{i-1}); \text{ where } 2 \le i \le m \tag{G.15}$$

G.4.3 信賴界(confidence bounds)

信賴界之估算使得 84 %分位數 $\widehat{S_{0.84}}$ 之 90 %信賴區間如下：

$$\frac{\hat{S}_{0,84;0,05} - \hat{S}_{0,84;0,95}}{\hat{S}_{0,84}} < 0{,}15 \tag{G.16}$$

區間〈$\hat{S}_{0.84;0.05}$, $\hat{S}_{0.84,0.95}$〉表示所需之 90 %信賴區間。

G.4.4 基於自舉法之信賴區間

使用自舉程序建立信賴區間[3],[7]。首先，取得 p 個整體最大值(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 … m_p)之初始資料集，然後對此等資料進行放回方式隨機重新取樣，形成一組新的資料集(m^*_1, m^*_2, m^*_3, m^*_4, m^*_5 … m^*_p)，或進行一次與原始樣本同樣大小之自舉重新取樣。需要注意的是，由於每次重新取樣均是放回地隨機抽樣，因此自舉重新取樣結果將包含來自原始樣本之重複值。重複此過程，直至形成

大量 N_b 之自舉重新取樣結果。從每組 p 資料中，可獲得 84 %分位數之個別估算值。從此等 N_b 估算值構成集合(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, ..., /N_b)中，可藉由對資料進行排序，以通常方式找到信賴區間。此等信賴區間隨後可用於公式(G.16)之分子。從原始資料中獲得之 84 %分位數估算值則代表公式(G.16)之分母。

至少 25 次自舉重新取樣可能足以確定信賴區間之合理估算值。然而，接近 5,000 次更大重新取樣次數將獲得更可靠之估算值。

G.4.5 基於二項分布之信賴區間

基於二項分布之信賴區間[7]的計算量比使用自舉程序計算之信賴區間要小。為簡化計算，此列出計算大多數常見情況下二項信賴區間所需之參數。對於負載分位數為 0.84 且信賴區間為 90 %之情況，表 G.1 提供 k^*及 l^*值，及用於在下述公式(G.17)中插值估算信賴區間所需之另外二個值 A 與 B。每個風速區間之模擬次數約為 15 至 35 次。

表 G.1　建立基於二項分布之信賴區間所需參數

90 %信賴區間或84 %分位數負載	模擬次數	k^*	l^*	A	B
	15	9	14	0.50	0.32
	16	10	15	0.27	0.19
	17	11	16	0.10	0.03
	18	11	16	0.87	0.96
	19	12	17	0.58	0.90
	20	13	18	0.35	0.83
	21	14	19	0.16	0.76
	22	14	20	1.0	0.69
	23	15	21	0.69	0.60
	24	16	22	0.45	0.50
	25	17	23	0.25	0.39
	26	18	24	0.08	0.26
	27	18	25	0.85	0.12
	28	19	25	0.58	0.98
	29	20	26	0.36	0.91
	30	21	27	0.18	0.83
	31	22	28	0.02	0.75
	32	22	29	0.75	0.66
	33	23	30	0.51	0.56
	34	24	31	0.31	0.44
	35	25	32	0.13	0.32

表 G.1 中之參數與一個設計公式一起使用，該設計公式裁視給出 10 分鐘最大值第 84 百分位數之 90 %信賴區間。此設計公式可寫成如下形式：

$$(x_l - x_k) = \left(x_{l^*} - x_{k^*}\right) + B\left(x_{(l+1)^*} - x_{l^*}\right) - A\left(x_{(k+1)^*} - x_{k^*}\right) \quad \text{(G.17)}$$

式中，l^*、k^*、A 與 B 如表 G.1 所示，是運行模擬次數之函數，而 x_{l^*}、$x_{(l+1)^*}$、x_{k^*}及 $x_{(k+1)^*}$則由依排序之模擬極值獲得。然後，可將此估算值代入公式(G.16)以確定是否滿足收斂準則。

$$\hat{S}_{0,84;0,05} - \hat{S}_{0,84;0,95} \approx x_l - x_k \quad \text{(G.18)}$$

G.5 逆一階可靠度法(IFORM)

IFORM 是估算長期負載之一種替代典型負載外插方法。此方法在 NTM 條件下進行擾流及風力機反應模擬。至少需要進行 15 次模擬，模擬風速範圍為 V_r - 2 m/s 至切出風速。然後識別產生最大負載之風速。

將短期負載分布外插至與 50 年回歸期定義一致之機率位準，即可得到用於 DLC 1.1 之 50 年負載。

IFORM 之收斂準則應與其他外插方法相同，不同之處在於設計者僅需依據已識別之重要風速(通常只有 1 個)估算負載分布之信賴區間。

IFORM 技術(該技術依賴於將實際隨機變量轉換為標準正態隨機變量[8])之理論已得到充分闡述，示例參照[9]，且可用於估算 NTM 條件下之長期風力機負載。

為在風力機極端負載下實施 IFORM，使用下述步驟：

(a) 對風速區間(V_r − 2 m/s)至切出風速進行 15 次模擬。

(b) 識別哪些區間產生最大之負載最大值。

(c) 對步驟(b)中識別出之區間再進行 15 次模擬進行最佳化搜尋。再次識別產生最大負載之設計主導風速 v^*。確保在重要風速下進行之模擬次數足夠多，使得整體最大值經驗負載分布之 84 %分位數的 90 %信賴區間，寬度小於 84 %分位數估算值的 15 %。

(d) 僅對步驟(c)中識別出之區間進行短期分析。此區間之負載分布所需分位數取決於目標機率位準。

- 利用瑞利累積分布函數(cumulative dstribution fnction, CDF)計算 $U_1 = \Phi^{-1}[P_R(v^*)]$。
- 對於 50 年一遇之 10 分鐘超越機率，$p_T = 3.8 \times 10^{-7}$。此對應於 $\beta = 4.95$。
- 解 $U_2 = (\beta^2 - U_2^2)^{1/2}$。
- 推導負載分位數 $P_s = \Phi(U_2)$，參照表 G.2。
- 長期負載是風速區間 v^*之短期分布的 P_s 分位數。為獲得合適之分位數，可能需要進行外插。

表 G.2　不同風力機組類型在 IFORM 程序中使用之短期負載超越機率與輪轂高度風速的關係

v*(m/s)	$1-P_s$ 等級 I	$1-P_s$ 等級 II	$1-P_s$ 等級 III
5	5.91×10^{-7}	4.95×10^{-7}	4.42×10^{-7}
6	4.86×10^{-7}	4.24×10^{-7}	3.94×10^{-7}
7	4.26×10^{-7}	3.90×10^{-7}	3.80×10^{-7}
8	3.94×10^{-7}	3.80×10^{-7}	3.91×10^{-7}
9	3.81×10^{-7}	3.90×10^{-7}	4.24×10^{-7}
10	3.83×10^{-7}	4.17×10^{-7}	4.84×10^{-7}
11	3.97×10^{-7}	4.64×10^{-7}	5.78×10^{-7}
12	4.24×10^{-7}	5.35×10^{-7}	7.20×10^{-7}
13	4.66×10^{-7}	6.38×10^{-7}	9.33×10^{-7}
14	5.26×10^{-7}	7.85×10^{-7}	1.26×10^{-6}
15	6.08×10^{-7}	9.97×10^{-7}	1.75×10^{-6}
16	7.20×10^{-7}	1.30×10^{-6}	2.54×10^{-6}
17	8.71×10^{-7}	1.75×10^{-6}	3.82×10^{-6}
18	1.08×10^{-7}	2.43×10^{-6}	5.93×10^{-6}
19	1.36×10^{-6}	3.46×10^{-6}	9.54×10^{-6}
20	1.75×10^{-6}	5.06×10^{-6}	1.59×10^{-5}
21	2.31×10^{-6}	7.60×10^{-6}	2.74×10^{-5}
22	3.10×10^{-6}	1.17×10^{-6}	4.89×10^{-5}
23	4.25×10^{-6}	1.86×10^{-5}	9.02×10^{-5}
24	5.93×10^{-7}	3.03×10^{-5}	1.73×10^{-4}
25	8.45×10^{-7}	5.06×10^{-5}	3.42×10^{-4}

G.6 參考資料

[1] Wind Energy, Vol. 11, Number 6, November-December 2008, Special Issue on Design Load Definition

[2] Moriarty, P. J., Holley, W. E., Butterfield, S. P. (2004) "Extrapolation of Extreme and Fatigue Loads Using Probabilistic Methods", NREL-NWTC, Golden, CO .

[3] Efron, B. and Tibshirani, R. J. ,(1993) "An Introduction to the Bootstrap", Chapman and Hall , New York

[4] Hogg, R. V. and Craig, A. T., (1995) " Introduction to Mathematical Statistics" , 5th Ed. , Prentice Hall , Englewood Cliffs , New Jersey

[5] Hoeffding, W., (1948) "A Non-Parametric Test of Independence ," The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 19, No. 4 , p.546-557

[6] Blum, J. R. , Kiefer, J. and Rosenblatt , M., (1961) "Distribution Free Tests of Independence based on the Sample Distribution Function," The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 32, No. 2 , p.485- 498

[7] Fogle, J., Agarwal, P. and Manuel, L. (2008) "Towards an Improved Understanding of Statistical Extrapolation for Wind Turbine Extreme Loads,': Wind Energy, Vol. 11 , No. 6 , NovemberlDecember2008 , pp. 613-635

[8] Rosenblatt, M. (1952) . "Remarks on a Multivariate Transformation", Ann. Math. Stat., Vol. 23, p. 470-472

[9] Saranyasoontorn, K. and Manuel, L., "Design Loads for Wind Turbines using the Environmental Contour Method," Journal of Solar Energy Engineering including Wind Energy and Building Energy Conservation, Transactions of the ASME , Vol. 128, No. 4, p. 554-561 , November 2006

附錄 H
(參考)
使用 Miner 法與負載外插之疲勞分析

H.1 疲勞分析

疲勞失效是由變動負載引起之損壞累積造成的。對於此巨觀之疲勞分析，普遍認為局部應力-應變圖中顯示之每個滯後循環導致損壞之增加。因此，負載時間歷程中之每個局部最大值，均會與完成一個完整循環之局部最小值配對(雨流循環計數法，參照[1]或[2])。此等循環中每一個循環均以成對之極值加以特徵化(或由範圍與中點值等效，即二成對循環極值之差與平均值的差值)。若每個循環之損害線性且獨立累積[5],[3]，則總損壞 D(45)由下式給出：

註(45) 為便於表述，此忽略每個循環中點負載位準變化之影響。稍後在使用等效循環範圍處理中點負載位準變化問題時，將消除此限制。

$$D=\sum_{\mathrm{i}}\frac{1}{N(S_{\mathrm{i}})} \tag{H.1}$$

式中，S_i 為第 i 個循環之負載範圍，N( )為在由參數給出之範圍內施加定幅加載直至失效之循環次數(即 S-N 曲線)。此表達式進一步假設失效位置之局部應力與加載呈線性關係。通常，在疲勞分析中，用於設計之 S-N 曲線與給定的生存機率(通常為 95 %)及基於材料數據決定該曲線之信賴水準(通常為 95 %)相關聯。因此，當損壞總和為 1 時，即可預期達到所需之最低可靠度位準。

風力機在其使用壽命期間會經歷許多大小不一之循環，此等循環是由各種風況造成的。因此，基於設計目的，宜估算負載譜。此負載譜之最大循環次數將藉由對模擬或測試數據進行平滑擬合來估算，該模擬或測試之持續時間遠短於風力機使用壽命。對於每種風況，可假設負載由平穩隨機過程建模。因此，在給定風速 V 及特定時間段 T 之情況下，預期損壞將由下式給出：

$$E\langle D\,|\,V,T\rangle=\int_0^{\infty}\frac{n_{\mathrm{ST}}(S\,|\,V,T)}{N(S)}dS \tag{H.2}$$

式中，$n_{\mathrm{ST}}(S\,|\,V,T)$是短期負載譜，定義為循環次數之密度函數。在此情況下，在時間段 T 內，任意負載範圍區間$(S_{\mathrm{A}}, S_{\mathrm{B}})$內之預期循環次數由 $\int_{S_{\mathrm{A}}}^{S_{\mathrm{B}}} n_{\mathrm{ST}}(S|V,T)dS$ 給出。正常運轉負載在整個風力機壽命期間之預期損壞，可藉由將時間間隔延伸至整個壽命並對運轉風速範圍進行積分給定，因此：

$$E\langle D\rangle=\frac{\mathrm{Lifetime}}{T}\int_{V_{\mathrm{in}}}^{V_{\mathrm{out}}}E\langle D\,|\,V,T\rangle p(V)dV=\frac{\mathrm{Lifetime}}{T}\int_{V_{\mathrm{in}}}^{V_{\mathrm{out}}}\int_0^{\infty}\frac{n_{ST}(S\,|\,V,T)}{N(S)}p(V)dSdV \tag{H.3}$$

式中，$p(V)$是 6.3.2.1 中規定之標準風力機等級之輪轂高度風速的機率密度函數。現在，定義長期負載頻譜

$$n_{\mathrm{LT}}(S)=\frac{\mathrm{Lifetime}}{T}\int_{V_{\mathrm{in}}}^{V_{\mathrm{out}}} n_{\mathrm{ST}}\langle S\,|\,V,T\rangle p(V)dV \tag{H.4}$$

然後給予

$$E\langle D\rangle=\int_{0}^{\infty}\frac{n_{\mathrm{LT}}(S)}{N(S)}dS \tag{H.5}$$

在許多情況下，出於實際考慮，將負載及風速值之範圍劃分為離散區間會很方便。在此情況下，預期損失可近似表示為：

$$E\langle D\rangle\approx\sum_{j,k}\frac{n_{jk}}{N(S_k)} \tag{H.6}$$

式中，n_{jk}為第 j 個風速及第 k 個負載區間內之預期壽命負載循環次數，S_k為第 k 個負載區間之中心值。因此，依據上述定義，

$$n_{\mathrm{jk}}=\frac{\mathrm{Lifetime}}{T}\int_{V_{\mathrm{j}}-\Delta V_{\mathrm{j}}/2}^{V_{\mathrm{j}}+\Delta V_{\mathrm{j}}/2}\int_{S_{\mathrm{k}}-\Delta S_{\mathrm{k}}/2}^{S_{\mathrm{k}}-\Delta S_{\mathrm{k}}/2} n_{\mathrm{ST}}\langle S\,|\,V,T\rangle p(V)dSdV \tag{H.7}$$

式中，ΔV_j為第 j 個風速區間之寬度，ΔS_k為第 k 個負載區間之寬度。

利用此等結果，並考慮 7.6.3 中關於安全因數應用至負載要求，則疲勞分析之極限狀態關係變為：

$$\int_{0}^{\infty}\frac{n_{\mathrm{LT}}(S)}{N(\gamma,S)}dS\le 1 \tag{H.8}$$

式中，$\gamma=\gamma_{\mathrm{f}}\,\gamma_{\mathrm{m}}\,\gamma_{\mathrm{n}}$為一般負載安全因數($\gamma_{\mathrm{f}}$)、一般材料安全因數($\gamma_{\mathrm{m}}$)及一般失效後果安全因數($\gamma_{\mathrm{n}}$)之乘積。以離散形式表示，此公式可得到下列結果：

$$\int_{0}^{\infty}\frac{n_{\mathrm{LT}}(S)}{N(\gamma,S)}dS\le 1 \tag{H.9}$$

若表 2 中一個以上負載情況均出現顯著損壞，則使用公式(H.9)左邊計算之所有負載情況之損壞段總和宜小於或等於 1。

到目前為止，公式推導忽略每個負載循環中點位準變化之影響。處理此變化之簡單方法是定義具固定中點值之損壞等效負載循環。在此情況下，等效循環造成之損壞與具有不同中點值之循環造成的損壞完全相同。因此，對於等效循環範圍 S_{eq} 失效發生所需之定幅循環次數(平均而言)與任何給定循環範圍及中點值之循環次

數相同。因此，定義一系列具有不同中點值 $N(S,M)$之 S-N 曲線，可得到等效損壞公式。

$$N\left(S_{\text{eq}},M_0\right)=N(S,M) \tag{H.10}$$

對於給定之 S、M 值及選定之常數中點位準 M_0，求解序列 S_{eq}。用數學術語而言，此可表述為：

$$S_{\text{eq}}=N^{-1}\left[N(S,M),M_{\text{o}}\right] \tag{H.11}$$

式中，逆函數指的是在給定第 2 個參數情況下，求解函數中第 1 個參數 N 之解。通常，選擇 M_0 是為使等效負載循環之 R 值(最大負載與最小負載之比)位於負載資料中直接觀測到之值範圍的中間位置。通常，一個可接受之值是考慮所有運轉風速之平均負載。幸運的是，在大多數 S-N 曲線以解析方式定義之情況下(例：冪律或指數形式)，等效循環負載範圍很容易計算。但是，當範圍變大時，宜格外小心。依據中點值，給定循環之最大或最小負載值可能接近靜態強度，在此情況下，簡單、高循環次數之 S-N 曲線可能不再適用。此外，對於更大範圍值，局部應力或應變可能從以壓縮-壓縮或拉伸-拉伸為主之情況過渡到以拉伸-壓縮為主的情況，此可能需要不同之解析 S-N 曲線表示。在決定等效循環範圍時，使用正確之 S-N 關係至關重要。對於給定之負載時程，首先識別雨流循環。然後，考慮每個循環之正確 S-N 關係，計算一組等效之恆定中點循環。接著估算此等等效循環之分布，得到一個新的短期等效負載譜。此新負載譜用於定義每個負載與風速區間內用於計算損壞段之循環次數。使用該方法之主要優勢在於，與將中點位準作為獨立變量進行追蹤相比，等效譜之估算在統計上更具穩健性。此項優點源於，對於每個負載與風速區間，從典型時序負載資料中，計算之負載循環次數遠多於單獨追蹤中點區間的情況。

在決定短期負載譜時，另一個實際問題是雨流法決定之大量小循環。此等小循環通常出現在相近之時間點，因此可能存在相關性。小循環亦會扭曲分布尾部解析近似之形狀。因此，建議在近似短期分布尾部時僅考慮高於閾值之循環。在實務中，至少第 95 百分位數之閾值通常效果良好。若已消除小循環，或預期用於擬合過程之資料點數量增加會顯著提高統計可靠度，則可使用較低之閾值。

對於實際之風力機設計應用，需依據動態模擬資料估算短期等效負載譜，然後計算壽命損壞。以下程序提供完成此任務之方法：

(a) 選擇參考中點位準作為考慮所有風速之平均負載位準。從給定風速之模擬資料中擷取局部極大值與極小值序列。可將相同風況下多個時間序列之局部極大值及極小值序列連接成一個序列。

(b) 使用雨流法識別每個模擬負載循環之中點位準與範圍。

(c) 決定每個負載循環相對於選定參考中點位準之等效範圍。

(d) 決定高於選取閾值之資料的等效負載循環短期機率分布 FST(S|V,T)之解析擬合。參考資料[4]中提供一種擬合分布方法之指引。宜檢查所選分布類型，以確定其與資料之擬合是否可接受，及與可用資料相比，是否具有足夠之資料能可靠地估算尾端行為。

(e) 使用負載區間低於閾值時之資料及負載區間高於閾值時之擬合負載分布，決定每個區間內之預期壽命循環次數。

$$n_{jk} \approx \left(\frac{\text{Lifetime}}{T}\right) P_j \left\{ M_j \left(F\left(S_k + \frac{\Delta S_k}{2} | V_j, T\right) - F\left(S_k - \frac{\Delta S_k}{2} | V_j, T\right)\right)^{m_{jk}} \quad ; \quad \begin{matrix} \text{當 } S_k \text{低於第 } j \text{個閾值時} \\ \text{當 } S_k \text{高於第 } j \text{個閾值時} \end{matrix} \right\} \qquad \text{(H.12)}$$

式中，m_{jk} 低於閾值之第 j 個風速區間及第 k 個負載區間的資料，計算之模擬疲勞循環次數，M_j 是高於閾值之模擬中計算之疲勞循環次數，而

$$P_j = e^{-\pi\left(\frac{V_j - \Delta V_j/2}{2V_{\text{ave}}}\right)} - e^{-\pi\left(\frac{V_j + \Delta V_j/2}{2V_{\text{ave}}}\right)}$$

是假設瑞利風速分布中，風速處於區間 j 之時間段。

(a) 使用公式(G.9)左邊計算損壞總和。

(b) 計算所有疲勞負載情況下之總壽命損壞總和。

使用此程序時，宜注意：

- 風速與負載範圍區間之解析度應足以滿足所需之數值精確度。
- 使用足夠大之負載範圍值，以適當地代表長期負載分布之尾部。

第 1 個問題可將誤差近似為二種不同區間解析度計算結果之差的 1/2 來解決，每次計算時跳過每隔一個風速或負載範圍之資料。另一種方法是使用區間值之端點值而不是中心值來計算損壞總和，從而限制結果之範圍。第 2 個問題可藉由逐步增加最高負載範圍區間值來解決，直至觀察到壽命損壞之增加可忽略不計。注意由於 Lifetime/T 之比值較大，所需之最大負載區間可能遠大於模擬資料中觀察到之最大循環次數。此是因為總模擬負載時間歷程遠小於風力機壽命，因此需要進行統計外插才能準確地估算長期負載分布尾部之損壞。

H.2 參考文件

[1] Dowling, N.E., Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-strain Histories, J. of Materials, v.7, n.1, Mar., 1972, p.71-87

[2] Matsuishi, M. and Endo, T., Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Proc. Japan Soc. of Mech. Engrs., no. 68-2 , 1968, p.37-40

[3] Miner, M .A . Cumulative Damage in Fatigue, J. of Applied Mech., v.12, 1945, p. A159-A164

[4] Moriarty, P.J. and Holley, W.E., Using Probabilistic Models in Wind Turbine Design, Proc. ICASP9, San Francisco, CA, July 6-9, 2003

[5] Palmgren, A., Die Lebensdauer van Kugellagern, Zeitschrift der Vereines Deutscher lngenieure, v. 68, no. 14, 1924, p.339-341

附錄 I
(規定)
設計反應譜分析流程與要求

(依照舊版 CNS 內容，其與舊版 IEC 內容完全不同,自訂, 故此版完全照舊(CNS)而非依據 IEC:2019, IEC 新舊版內容相同)

本附錄係提供風力機支撐結構設計考慮地震所造成之環境負載時，應採用之分析程序與要求，以求得輸入基面(input datum)之設計基準地震(design basis earthquake)，即為一地震動反應譜(ground motion response spectrum)。本附錄適用於陸域及離岸風力機支撐結構之設計，並適用於風場專案驗證。

I.1 基本原則

本附錄之基本原則，係在規範我國區域性風力機支撐結構設計時，對於地震引致的環境負載之地震加速度，採用能同時考慮影響範圍內之所有震源與其能引致之地震動大小對場地之影響的機率式地震危害度分析(probabilistic seismic hazard analysis)程序。

為確保風力機支撐結構能抵抗地震環境負載的影響，採設計年限 50 年內具 10 % 年超越機率(annual exceedence of probability)之設計水準，即指風力機支撐結構應採 475 年回歸期之地震加速度進行設計，此一地震加速度為一平滑化之加速度反應譜(acceleration response spectrum)。

該地震環境負載對應之基礎地盤條件(site condition)可為一般工程堅硬岩盤或特定風場之參考岩盤(reference base)。參考岩盤定義為地層以下 30 m 之平均剪力波速值(V_{sd30})穩定大於或等於 360 m/s，對應之深度即為岩盤基礎位置。後續應用於支撐結構設計時則需經由地盤反應分析(site response analysis)得到輸入基面之反應譜。

I.2 特定場地之設計基準地震分析程序

特定場地之設計基準地震分析程序，如圖 I.1 之流程圖所示，其中主要項目包括：

(a) 場地附近地質條件、地震活動與工程特徵等詳細研究。

(b) 確認重要的危害震源。

(c) 地震危害度分析。

(d) 場地地震危害之控制震源。

(e) 地盤反應分析以決定場地放大函數。

機率式地震危害度分析需結合最新的地質、地震活動與地球物理等研究成果，如前兩項所要求，為反映場地周遭重要分布的地震源與地震動特徵。地震危害度分析將以此為參考，考慮各類震源模型、地震發生頻率與地震動評估公式(ground motion prediction equation)進行計算。

場地之設計基準地震定義在 2.1×10^{-3} 之年超越機率(475 年回歸期)下之均布危害度反應譜(uniform hazard response spectrum)，須藉由地震危害度曲線(seismic hazard curve)獲得，如圖 I.2 所示。除最大地表加速度外，加速度反應譜週期範圍應至少包括 0.01 s 至 5 s，其阻尼比為 5 %。

依據結構之主要週期，識別在 475 年回歸期下之地震危害的控制地震(controlling earthquake)(為規模、距離之組合)。該反應譜之建立係基於符合參考岩盤條件之地震動評估公式分析所得，為場地所在之基礎岩層的地面運動。基於設計所需，應進一步考慮場地所在之地質條件與地形特徵，進行地盤反應分析，求得場地放大函數，以得到實際輸入基面之地震動反應譜。

本附錄之精神在要求座落於我國離岸位置之風力機，結構設計時能完整考慮各地震源引致的環境負載與所在場地之放大效應，以確保結構設計所需之設計基準地震，能反映地震環境與結構主要週期放大效應之影響。上述各項目細節要求參考 I.3。

I.3 分析程序之要求

I.3.1 場地附近地質條件、地震活動與工程特徵等詳細研究

包括場地及區域性之地質、地物、地震與地工研究，範圍應包括場地半徑 320 km 內之各類地震源，如區域震源、活動斷層等。研究必須確實完整以提供執行地震危害度分析之可信來源，且應包括最新的研究資料，如應採用至少涵蓋 1,900 年至設計階段之地震目錄(earthquake catalog)，並考慮其完整性。範圍內可信度高之活動斷層參數(所在位置、其幾何構造與活動度)。場地所在處應執行精確之地質、地物及地工研究，以明確評估土層及岩盤特性與參數。

I.3.2 確認重要的危害震源

確認場地附近之地震源特徵(seismic source characteristic)後，需建置可描述震源特性與發生率的分析模型，並採對應之地震動評估公式，以求得震源可能引致之地震動大小。模型與參數包括：(1)震源空間分布模型、(2)地震規模發生次數模型、(3)最大規模地震之評估、(4)地震動評估公式及(5)不確定度考慮，以為地震危害度分析所用。

I.3.3 地震危害度分析

地震危害度分析結合地震動評估公式的近期發展、地震源活動模型來源與更新，以評估各類地震源引致之地震動大小，分析對場地最具可能之地震潛勢，並由一地震危害度曲線呈現。執行時，應系統性地考慮各種參數中可能存在的不確定度(如地震源特徵、最大規模與地震動評估公式)，並針對重要震源參數識別其不確定度範圍，以確認危害度分析成果之可靠性。

I.3.3.1 使用最新的資訊

地震危害度分析應採用最新的地震源特徵，包括地震、發生機率模型，與最新發展且可反映我國地震源特徵引致之地震動評估公式。其來源須為可靠、最新發表之相關報告或論文。

I.3.3.2 機率式地震危害度分析

進行地震危害度分析應充分說明並涵蓋各項參數或模型之適當性，如地震目錄、活動斷層幾何特徵之可能範圍、最大規模、地震發生率模型，用以模擬地震發生在時、空分布的特徵等。此外，對於地震引致之地震動大小應採用適當描述區域特性之模型，其標準偏差則能反映我國區域性之地震動特性。分析時以邏輯樹概念涵蓋資料與模型的不確定度。

I.3.3.3 ε 之選擇

ε 定義為地震動評估公式中標準偏差與平均預估值之比例，在地震危害度分析時以一常態分布模擬以考慮單一規模與距離組合下在地震動評估的不確定度。分析應選擇足夠的 ε 值，以能充分考慮地震動的變異性。建議地震危害度分析中對地震動評估之不確定度範圍應至少涵蓋±1.5 ε (現行建築物耐震設計規範所採用)。

I.3.3.4 地震危害度曲線

地震危害度曲線應包括不同週期之地震動公式評估結果，與地震動參數在 5 %、16 %、50 %、平均值、84 %、95 %分位數之危害度曲線。地震動參數之週期範圍應至少能涵蓋 0.01 s 至 5 s 或以上週期至少 20 點的反應譜值，其中須涵蓋風力機支撐結構之主要週期。

若地震動評估公式未能提供至 5 s 週期或以上週期，其 475 年回歸期之地震動反應譜應接續以對數週期線性外插至 5 s 週期或以上週期。

除 475 年回歸期之設計基準地震外，依據產出之地震危害度曲線，後續分析可視需求輸出所需特定回歸期之均布危害度反應譜(uniform hazard response spectrum)。

I.3.4 場地地震危害之控制震源

為能提供後續分析使用，影響該場地在 475 年回歸期下之地震危害的控制地震(為規模、距離之組合)應被識別。對應之地震動週期點，應至少包括結構主要週期與最大地表加速度值。相關要求應依循臺灣離岸風機支撐結構設計準則。

I.4 地盤反應分析

本節說明為反映參考岩層跟海床間之其他中間介面的土壤放大與震波衰減的效應，故執行地盤反應分析以獲得輸入基面之地震動反應譜。分析可採用大地地震工程上常用之單向度波傳地盤反應分析程式進行土層受震反應分析，迭代求得各土層於設計基準地震作用下與剪應變相符之等值動力參數(包含剪力模數與阻尼比)，進而求得輸入基面及海床地層之受震歷時反應及求得任一阻尼比之地震動反應譜。

I.4.1 參考岩盤與輸入基面之定義

I.3 中場地設計基準地震為定義在參考岩盤之地震動反應譜，其岩性要求為土層下 30 公尺之平均剪力波速值(V_{sd30})穩定大於或等於 360 m/s，對應之土層深

度即為基礎位置。若場地之岩性經研究仍未達 360 m/s，則場地設計基準地震依 I.3 程序時應採用可反映該區域場地特性之地震動評估公式進行分析，再接續本節之規定。

輸入基面之定義建議應考量風電場海床地層受長、短期之淘刷、地形變遷等作用下之一穩定海床高程，以進行後續分析。

I.4.2 建立特定場地剖面

應採用場地相依之土壤與岩石的靜態及動態工程性質，及其空間分布。下述的材料特性需確認在場地內的每一個地層中(1)厚度、(2)縱波波速、(3)剪力波速、(4)堆積密度、(5)土壤屬性與分類參數、(6)在應變階段的剪力模數與阻尼變化、(7)在整個場地中海水位高度變化。其中特定場地的土壤剖面應夠深並足以包含最低的風力機結構頻率，其深度須可延伸至與參考岩盤相同 V_{sd30} 值之處。剪力模數及阻尼曲線(degradation curves of shear modulus and damping ratio)的應變過程，應基於現場試驗的結果或以相似土壤來模擬。相關要求應依循附錄 I 所規範之鑽探要求。

I.4.3 地震輸入歷時

為能反映風力機支撐結構之主要周期的土壤放大效應，地盤反應分析採用之輸入歷時，應以 I.3.4 要求所產出之控制地震，篩選或建置與風力機支撐結構 475 年回歸期設計基準地震相符之地震輸入歷時。

I.4.4 地盤反應分析變異性要求

因土壤特性為非線性且具變異性，故須以隨機性考慮土層剖面(randomized soil profiles)，包括土壤之剪力波波速、剪力模數及阻尼比，其變異性為需能確認且可靠地估算場地反應之標準偏差。除採考慮變異性後之土層剖面與參數進行分析外，場地放大函數(amplification function)應採足夠數量之地震輸入歷時進行分析，至少七組取得平均結果或三組取最大之結果。

I.5 垂直地震力

為提供風力機支撐結構或變電站考慮抵抗垂直向地震之能力，垂直向設計基準地震應作適當之考量。對於我國離岸區域，其輸入基面之垂直向地震動反應譜，至少為水平向之地震動反應譜的 1/2。

I.6 單一風電場基本數量

基於我國地震源特徵分布不均，若風電場範圍廣泛，其危害度分析結果將有落差。故單一風電場應依據 475 年回歸期下參考岩盤(V_{sd30}=360 m/s)之一秒週期譜加速度值，研判各個風電場應進行地震危害度分析之位置數量及代表點位坐標，並確認該風電場所有相鄰分析點位之一秒週期譜加速度值差異小於 0.05 g。將各點位分析結果取其包絡反應譜作為該風電場參考岩盤之設計基準地震。

獲得整個風電場參考岩盤之設計反應譜後，各風力機位置後續應依據 I.4 之規定進行地盤反應分析求得場地放大函數，以得到各風力機於輸入基面之地震動反應譜。

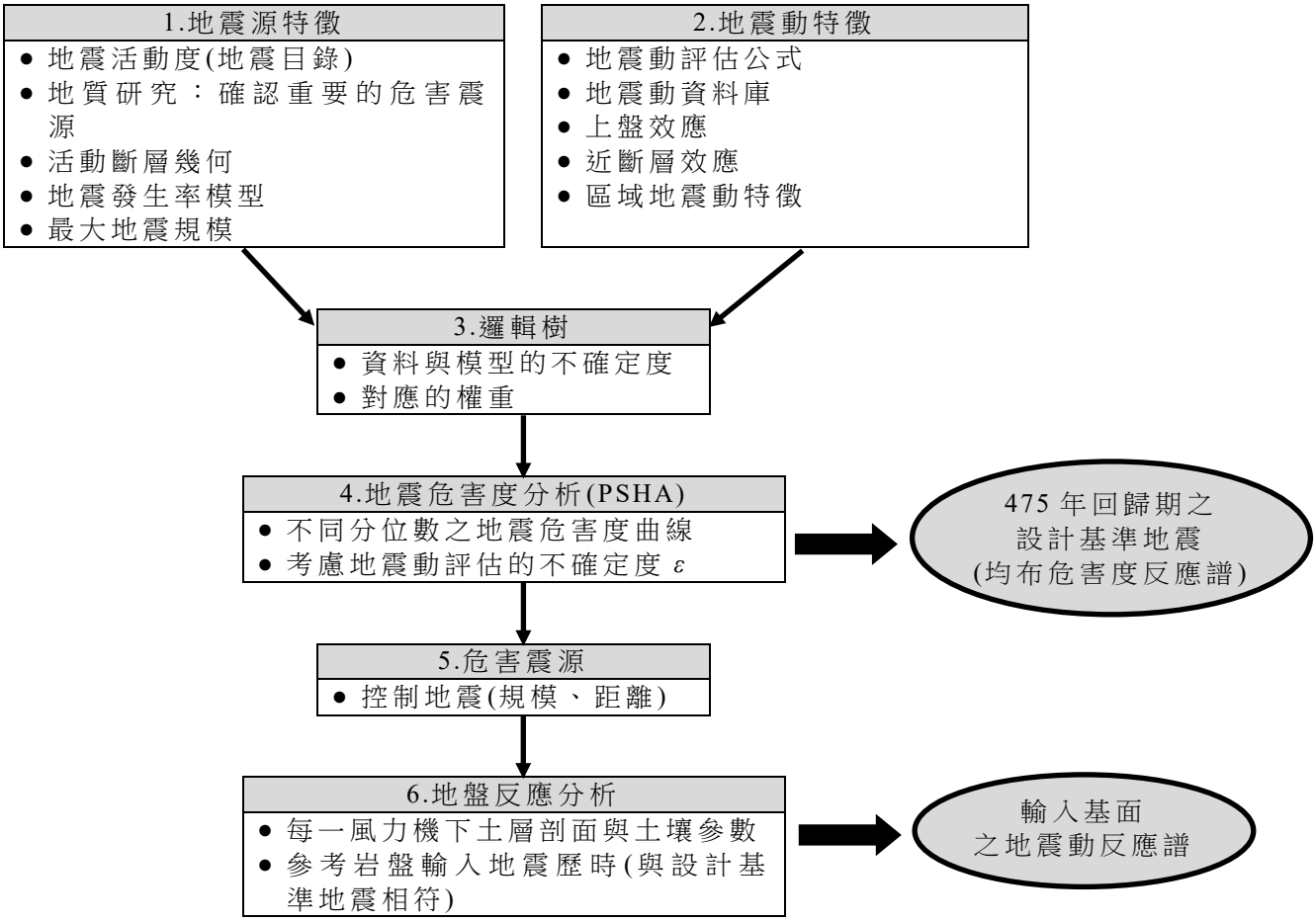


圖 I.1　風力機支撐結構之設計基準地震分析流程圖

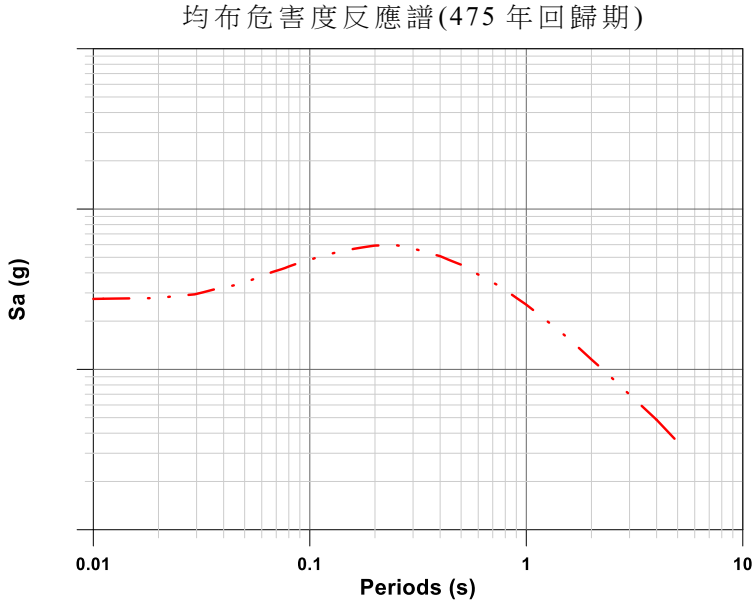


圖 I.2　風力機支撐結構之地震動反應譜(本圖僅為示意圖，不同場地情況不同)

I.7 負載疊加

關於地震發生時之負載疊加，可參考 DNVGL-ST-0437 或臺灣離岸風機支撐結構設計準則(7.6)。

I.8 接受準則

參考臺灣離岸風機支撐結構設計準則。

I.9 中英專有名詞對照

年超越機率(annual exceedance of probability)

輸入基面(input datum)

設計基準地震(design basis earthquake)

控制地震(controlling earthquake)

地震目錄(earthquake catalog)

地震動評估公式(ground motion prediction equation)

地震動反應譜(ground motion response spectrum)

機率式地震危害度分析(probabilistic seismic hazard analysis)

參考岩盤(reference base)

地震源特徵(seismic source characteristic)

地震危害度曲線(seismic hazard curve)

地盤條件(site condition)

地盤反應分析(site response analysis)

均布危害度反應譜(uniform hazard response spectrum)

I.8 參考資料

[1] 臺灣離岸風機支撐結構設計準則，財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，2018 年 10 月

[2] 郭玉樹、柴駿甫、盧恭君、許丁友(民國 107 年)。離岸風機基礎穩定性風險評估(2/2)。第二期能源國家型科技計畫期中暨期末成果效益報告(編號：MOST107-3113-E006-005-CC2)

[3] 郭玉樹、柴駿甫、盧恭君、許丁友(民國 106 年)。離岸風機基礎穩定性風險評估(1/2)。台灣第二期能源國家型科技計畫科技部補助產學合作研究計畫成果完整(進度)報告(編號：MOST 106-3113-E-006-008-CC2)

[4] 郭玉樹、柴駿甫(民國 106 年)。我國離岸風場海域地質土壤研究方法與設計應用建議研擬計畫。經濟部能源科技研究發展計畫一〇六年度分包研究期末報告

[5] 郭玉樹、柴駿甫、陳景文(民國 105 年)。高液化潛勢區離岸風機基礎穩定性評估(2/2)。台灣第二期能源國家型科技計畫科技部補助產學合作研究計畫成果完整(進度)報告(編號：MOST 105-3113-E-006-011-CC2)

[6] 郭玉樹、柴駿甫、陳景文(民國 104 年)。高液化潛勢區離岸風機基礎穩定性評

估(1/2)。台灣第二期能源國家型科技計畫科技部補助產學合作研究計畫成果完整(進度)報告(編號：MOST 104-3113-E-006-013-CC2)

[7] Wang, Y.-K., Chai, J.-F., Chang, Y.-W., Huang, T.-Y. and Kuo, Y.-S.* (2016). “ Development of seismic demand for Chang-Bin offshore wind farm in Taiwan strait,” Energies, 9(12), 1036

附錄 J
(參考)
使用 Monte Carlo 模擬方法預測熱帶氣旋極端風速

J.1 一般

在強風主要由溫帶氣旋主導之地區，可使用 Gumbel 方法，結合附錄 F 中所述之測量-關聯-預測(MCP)法，利用附近參考氣象站之延伸資料估算極端風速。另一方面，熱帶與亞熱帶地區，即熱帶氣旋及溫帶氣旋均占主導地位之地區，被稱為混合氣候區，需要對每一種重要之風力產生氣象現象進行檢查，如參考資料[2]所述。需注意在混合氣候區，若不考慮不同類型風暴，MCP 方法會低估極端風速。

附錄 J 說明一種用於預測熱帶氣旋引起之極端風速的 Monte Carlo 模擬(Monte Carlo simulation, MCS)方法。有關 MCS 方法之詳細資訊，參照參考資料[1]。

J.2 熱帶氣旋引發之極端風速預測

J.2.1 一般

為獲得可靠之熱帶氣旋引發的統計風速，人們提出熱帶氣旋之 MCS 方法(例：參考資料[31])。熱帶氣旋引發之強風預測宜依下述程序進行。

J.2.2 熱帶氣旋參數之評估

特定場地λ每年之熱帶氣旋數量可定義為每年經過模擬圈(通常半徑為 500 km)內之熱帶氣旋數量，該數量可從以往熱帶氣旋之路徑紀錄中獲得。對於每個熱帶氣旋，從歷史路徑記錄中獲得 4 個熱帶氣旋參數，即中心氣壓 p_c、移動速度 C、從正東方向逆時針量測之移動角 q 及氣旋最接近目標地點時之最小距離 d_{min}。另一個熱帶氣旋參數是最大風速半徑 R_m，可藉由參考資料[4]提出之壓力場模型識別。

$$\frac{p(r)-p_c}{p_\infty-p_c}=\exp\left(-\frac{R_m}{r}\right)^B \qquad (J.1)$$

式中，$p(r)$為距熱帶氣旋中心 r 處之海面氣壓。R_m 可藉由最小平方法，利用氣象站實測海面氣壓識別，外圍氣壓 p_∞可假設為 1,013 hPa 或同時識別之。中心氣壓差定義為Δ或 $i_\infty - p_c$。當 B = 1.0 時，此關係式變成參考資料[5]中提出之公式。

此 6 個參數可用解析函數近似：Δh、R_m 及 C 可用基於對數常態分布及韋伯分布之混合機率密度函數近似(例：參考資料[6])，q 可用常態分布或雙常態分布近似(例：參考資料[7])，d_{min} 可用多項式函數近似，λ可用 Poisson 分布近似。除λ外，此等參數間之相關性亦宜計算。

J.2.3 合成熱帶氣旋之生成

合成熱帶氣旋之生成週期較長，以滿足模型機率分布函數及相關性要求。由於

僅當熱帶氣旋位於半徑 500 km 之模擬圓內時才估算風速及風向，因此可忽略熱帶氣旋氣壓場之變化。

如參考資料[6]所述，宜使用修改之正交分解(modified orthogonal decomposition, MOD)方法，同時滿足熱帶氣旋參數之統計分布函數及其相關性要求。MOD 方法之詳細程序如下述。

說明熱帶氣旋之 5 個參數經過歸一化處理，並以向量形式表示如下。

$$\mathbf{x}^T = \left\{\ln(\Delta p),\ \ln(R_{\mathrm{m}}),\ \ln(C),\ \theta,\ d_{\min}\right\} \tag{J.2}$$

x 之協方差矩陣定義為 S。特徵值$\lambda(k)$與特徵向量$\Phi(k)$藉由求解下列方程式計算。

$$\left[\mathbf{S} - \lambda^{(\mathrm{k})}\mathbf{E}\right]\mathbf{\Phi}^{(\mathrm{k})} = 0 \tag{J.3}$$

然後，依據指定年份之近似分布產生具有 5 個分量之獨立參數 z_i，並依據估算之年發生率產生向量的數量。相關參數 x_i 可藉由以下公式獲得。

$$\mathbf{x}_{\mathrm{i}} = \left[\mathbf{\Phi}^{(1)}\ \ \mathbf{\Phi}^{(2)}\ \ \cdots\ \ \mathbf{\Phi}^{(5)}\right]^{-1}\mathbf{z}_{\mathrm{i}} \tag{J.4}$$

此等向量 x_i 宜視為熱帶氣旋之參數集。需要注意的是，儘管 x_i 各分量間之相關性符合預期，但其機率分布並不符合預期。

最後，宜將 x_i 依上升順序重新排列，並進行修改，使其機率分布符合預期。此操作幾乎不影響相關性，因其不會改變參數集。

J.2.4 熱帶氣旋邊界之風速預測

目標位置$\vec{\mathrm{X}}$處之熱帶氣旋所引起的風受局部地形之影響。輪轂高度處之風速$u_{\mathrm{T}}(\vec{x})$與風向$\theta_{\mathrm{T}}(\vec{x})$可表示為

$$u_{\mathrm{T}}(\vec{\mathbf{x}}) = S_{\mathrm{t}}E_{\mathrm{p}}u_{\mathrm{g}}(\vec{\mathbf{x}}) \tag{J.5}$$

$$\theta_{\mathrm{T}}(\vec{\mathbf{x}}) = \theta_{\mathrm{g}}(\vec{\mathbf{x}}) - \gamma_{\mathrm{p}} + D_{\mathrm{t}} \tag{J.6}$$

式中，$u_{\mathrm{g}}(\vec{x})$與$\theta_{\mathrm{g}}(\vec{x})$分別表示梯度風速與風向(從南順時針為正)，$E_{\mathrm{p}}$與$\gamma_{\mathrm{p}}$分別表示風剖面係數及入流角(從梯度風速向量逆時針方向為正量測)，S_{t}與 D_{t}分別是由於局部地形引起之加速比與風向差異，其為平坦地形上風向之函數[$\theta_{\mathrm{g}}(\vec{x})-\gamma_{\mathrm{p}}$]。

假設壓力梯度力、離心力與 Coriolis 力之間達到平衡，則可依據熱帶氣旋之壓力場計算位置$\vec{x}(r, \phi)$處之梯度風速與風向。

$$u_g(\vec{x}) = \frac{-C\sin(\phi-\theta)-fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{-C\sin(\phi-\theta)-fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho}\frac{\partial p(r)}{\partial r}} \quad \text{(J.7)}$$

$$\theta_g(\vec{x}) = \pi - \phi \quad \text{(J.8)}$$

式中，r 為距熱帶氣旋中心之距離，ϕ為從正東方向逆時針量測之角度，f 為 Coriolis 參數，u_g 與 θ_g 是由於熱帶氣旋運動而隨時間變化之函數。

風剖面係數及入流角 γ_p 用於計算輪轂高度處之地面以上風速，可藉由半理論公式(例：參考資料[6])或由計算流體動力學(computational fluid dynamics, CFD)進行估算。加速比 S_t 與風向差 D 顯示局部地形對風速與風向之影響。此等係數定義為平坦地形上之風向函數，可藉由 CFD 計算(例：參考資料[8])。

10 分鐘平均風速可藉由在風場模型估算之風速上加入隨機值預測。假設此等隨機值假設遵循對數常態分布，其平均值為 0、標準差為 σ_a，並可建模為：

$$\sigma_a = \gamma \times u_T(\vec{x}) \quad \text{(J.9)}$$

此處，r 值範圍為 0.1，如參考資料[9]所述。

J.3 混合氣候區之極端風速預測

J.3.1 一般

回歸期 R 與年最大風速機率分布 $F(u)$之關係可表示如下：

$$F(u)=1-1/R \quad \text{(J.10)}$$

在混合氣候區，宜分別評估溫帶氣旋與熱帶氣旋之機率分布，然後預測其組合機率分布。

J.3.2 利用 MCP 方法估算溫帶氣旋之極端風力分布

溫帶氣旋之極端風力分布(即年最大風速之機率分布)可利用 MCP 方法，依下述以附近參考氣象站 N 年之有限量測資料進行估算。

(a) 首先，利用 MCP 方法或 CFD 方法，從附近參考氣象站之風速紀錄中取得該站點 N 年之風速時間序列。

(b) 然後，擷取該站點每年由溫帶氣旋引起之最大風速 $u_{E,i}$，並依上升順序排列，從 $u_{E,1}$ 至 $u_{E,N}$，並依據公式(J.11)定義溫帶氣旋引起之年最大風速機率分布。

$$F_E(u_{E,i}) = \frac{i}{N+1} \quad \text{(J.11)}$$

(c) 然後，繪製 $u_{E,i}$ 與簡化變數 $y_{E,i}$ 之關係圖，其表達式為：

$$y_{E,i} = -\ln(-\ln(F_E(u_{E,i}))) \quad \text{(J.12)}$$

藉由最小平方法可獲得最佳擬合函數，並可利用此函數預測指定回歸期之極端風速。

J.3.3 利用 MCS 方法估算熱帶氣旋之極端風速分布

熱帶氣旋之極端風速分布可依據 J.2 中所述之 M 年 MCS 結果進行估算。程序如下述：

(a) 從 M 年之熱帶氣旋 MCS 結果中擷取年度最大風速，並依上升順序排列，從 $u_{T,1}$ 至 $u_{T,N}$。賦予機率分布為 $F_E(u_{E,i})$，類似地計算簡化變數 $y_{T,i}$。

(b) 然後，繪製 $u_{T,i}$ 與簡化變數 $y_{T,i}$ 之關係圖。對於 MCS 方法，由於已獲得足夠之資料，因此無需藉由最佳擬合外插推 $F_T(u_{T,i})$。

J.3.4 混合氣候區極端風速之決定

考慮溫帶氣旋與熱帶氣旋，可獲得年最大風速之綜合機率分布。假設溫帶氣旋與熱帶氣旋所造成之風速是獨立事件，則綜合機率分布可由下列公式估算：

$$F_C(u_C) = F_E(u_E)F_T(u_T)$$

式中，$F_C(u_C)$表示綜合機率分布。宜確保預測之極端風速與測量值具有可比性。

J.4 參考資料

[1] Ishihara, T. and Yamaguchi, A. (2015), Prediction of the extreme wind speed in mixed climate region by using Monte Carlo simulation and Measure-Correlate-Predict method , Wind Energy, Vol.18, p.171-186

[2] Gomes, L. and Vickery, B.J. (1978), Extreme wind speeds in mixed climates, J. Wind Eng. lndust. Aerodyn., Vol. 2, p.331-334

[3] Georgiou, P.N. , Davenport, A.G . and Vickery, B.J. (1983), Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, J. Wind Eng. lndust. Aerodyn., Vol. 13, p.139-152

[4] Holland, G.J. (1980), An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Monthly Weather Review, Vol. 108, p.1212-1218

[5] Schloemer, R.W. (1954), Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydrometeorogical Report, No. 31

[6] Ishihara, T., Siang, K.K., Leong, C.C. and Fujino, Y. (2005), Wind field model and mixed probabi lity distribution function for typhoon simulation, Proc. Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, p.412-426

[7] Vickery, P.J. and Twisdale, L.A. (1995), Prediction of hurricane wind speeds in the United States, Journal of Structural Engineering, ASCE, 121 (11), p.1691-1699

[8] Ishihara, T. and Hibi, K. (2002), Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill, Wind and Structures, Vol. 5, No. 2-4, p.317-328

[9] Yasui, H., Ohkuma, T., Marukawa, H. and Katagiri, J. (2002), Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method, J. Wind Eng. lndust. Aerodyn.,Vol. 90, p.1529-1540

附錄 K
(參考)
結構材料安全因數之校正與測試輔助結構設計

K.1 概述與應用領域

本附錄於 K.2 至 K.6 中提供材料局部安全因數之選擇指引，並於 K.7 至 K.12 中提供材料參數與承載力試驗之統計分析指引。

K.2 目標可靠度位準

為校正局部安全因數，宜使用生存機率 $P_s = (1 - P_F)$識別可靠度度量單位，其中 P_F 為在適當參考期內，所考慮失效模式之失效機率(46)。若計算所得之失效機率大於預設目標值 P_0，則宜視為該結構不安全。

註(46) 失效機率及其對應之可靠度指標是概念值，不一定代表實際失效率，而是作為規範校正及結構可靠度位準比較之操作值。

另一種可靠性度量單位通常由可靠度指數β定義，它與 P_F 之關係為：

$$P_F = \Phi(-\beta) \tag{K.1}$$

式中，$\Phi(\ )$是標準常態分布之累積分布函數。

針對極端失效模式與疲勞失效模式，結構設計中 1 年參考期間內之標稱失效機率目標值為：

$$P_F^t = 5\times10^{-4} \tag{K.2}$$

對應之可靠度指標目標值為$\beta^t = 3.3$。應用此目標值之前提是，結構元件失效時對人身安全之風險可忽略不計，參照參考資料[5]。目標可靠性位準假設對應於組件等級 2。

K.3 安全格式

假設承載力模型由下述通用模型獲得：

$$R = b\,\delta R(X,a) \tag{K.3}$$

式中，$R(X,a)$ ：相關結構與材料標準中定義之承載力模型

X ：強度(及剛度)材料參數。每個強度參數均建模為變異係數為 V_X 之對數常態隨機變數

A ：幾何參數

δ ：與承載力模型相關之模型不確定度(可使用 K.12 中之方法決定)。δ建模為平均值為 1、變異係數為 V_0 之對數常態隨機變數

B ：承載力模型中之偏差。b 可使用 K.12 中之方法決定

承載力 R_d 之設計值可藉由不同模型決定(47)。

註(47) 以下 3 個模型對應於歐洲法規[2]中之基本承載力模型。

(a) 模型 1，其中設計值由材料強度參數決定：

$$R_d = \frac{R(X_d, a_d)}{\gamma_\Delta} \qquad \text{(K.4)}$$

式中， a_d ：幾何資料的設計值

X_d ：強度參數的設計值

γ_Δ ：與承載力模型不確定度相關之局部安全因數，包括承載力模型中之偏差

若在承載力模型中使用多個強度參數，則在公式(K.4)中對每個強度參數套用設計值。

強度參數 X_d 之設計值由下列公式決定：

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \qquad \text{(K.5)}$$

式中， η ：慮負載持續時間效應、濕度、溫度與尺度效應之轉換係數

X_k ：強度參數之特徵值，通常由 5 %分位數定義

γ_m ：強度參數之局部安全因數，取決於變異係數 V_X

若承載力模型與強度參數呈線性關係，則 $R_d = R\ (X_d, a_d)$，且每個強度參數之 X_d 值均可使用局部安全因數 $\gamma_M = \gamma_m\ \gamma_\Delta$ 獲得。

局部安全因數 γ_Δ 取決於承載力模型之不確定度，包括偏差：

$$\gamma_\Delta = \gamma_\delta / b \qquad \text{(K.6)}$$

式中，γ_δ：局部安全因數，取決於模型之不確定度，變異係數為 V_δ，但不考慮承載力模型中之偏差

(b) 模型 2，其中特徵承載力是使用材料強度參數之特徵值獲得，承載力之設計值由以下公式得出：

$$R_d = \frac{R(\eta\ X_k, a_k)}{\gamma_M} \qquad \text{(K.7)}$$

式中，γM：與承載力不確定度相關之局部安全因數，包括材料參數之不確定度、承載力模型之不確定度及偏差

承載力之總不確定度取決於模型不確定度δ、承載力模型之偏差及強度參數 X 之不確定度，並藉由承載力函數 R(X,a)表示。相應之材料局部安全因數由以下公式得出：

$$\gamma M = (\gamma\delta\ \gamma Rm) / b \qquad \text{(K.8)}$$

式中， γRm ：局部安全因數，其取決於強度參數藉由承載力函數 R(X,a)所表現之承載力不確定度，其變異係數為 VRm

γ_δ ：取決於模型不確定度的局部安全因數，其變異係數為 V_δ

(c) 模型 3，其中特徵承載力基於試驗進行估算：

$$R_d = R_k/\gamma_M \qquad \text{(K.9)}$$

式中， R_k ：基於試驗估算之特徵承載力，參照 K.12。R_k 通常由 5 %分位數定義

γ_M ：承載力不確定度之局部安全因數，其不確定度基於試驗，其變異係數為 V_R

材料之局部安全因數應進行校正，以使得相關失效模式之失效機率接近公式(K.2)中之目標可靠度位準，參照 K.4。其中宜包含相關之統計不確定度及與從實驗室結構轉換至實際結構之相關不確定度。

K.4 基於可靠度之校正

負載及承載力局部安全因數決定方式，使得利用極限狀態函數所獲得之失效機率。

$$g = R - S \qquad \text{(K.10)}$$

所得之失效機率小於目標失效機率 P_F^t。在公式(K.10)中，承載力由公式(K.3)建模，S 為負載效應。對應之設計公式為：

$$R_d - \gamma_f S_k \geq 0 \qquad \text{(K.11)}$$

式中，R_d 為承載力設計值。S_k 為負載效應之特徵值，通常定義為對應於 50 年回歸期之年最大負載效應分布函數的 98 %分位數。在某些情況下，亦可使用其他參考期間。γ_f 為負載局部安全因數。

表 K.1　模型不確定度γ_δ(48)之局部安全因數

模型 1 中承載力模型不確定度之變異係數 V_δ	≤ 5 %	10 %	15 %	20 %
γ_δ	1.20	1.25	1.35	1.45

註(48) 表 K.1 中之局部安全因數是在未考慮偏差 b，且模型不確定度之特徵值等於 1 之情況下進行校正。

若使用 7.6 中規定之 ULS 負載局部安全因數，則需針對特定失效模式校正局部安全因數，使可靠度位準等於由公式(K.2)指定之目標可靠度位準 P_F^t(參照參考資料[5])。模型 1 及模型 2 之建議局部安全因數為 $\gamma_m = 1.0$、$\gamma_{Rm} = 1.0$ 與 $\gamma_\delta = 1.0$，參照表 K.1(49)(50)。對於模型 3 之建議局部安全因數為 $\gamma_M = 1.2$，對應於表 K.1 中 $V_\delta \leq 5$ %時之 γ_δ值。

註(49) $\gamma_m = 1.0$ 及 $\gamma_{Rm} = 1.0$ 之原因是，由於用於定義特徵值之 5 %分位數涵蓋此不確定度之影響，因此承載力局部安全因數與強度參數之不確定度無關。模型不確定度之特徵值定義為平均值，因此 γ_δ取決於 V_δ。V_δ宜以試驗決定，

參照 K.12 (測試輔助設計)或查閱文獻。

(50) 具有降伏失效準則之鋼構件的局部安全因數變為γ_M = 1.1，降伏強度變異係數及承載力模型變異係數均設為 5 %，且偏差設為 1.1 (降伏強度小於抗拉強度或抗壓強度之 90 %)。

適用於 D/t < 300 之管狀鋼塔的殼層屈曲參數化公式(基於參考資料[6]中膜理論)，包含一偏差(設計屈曲曲線為實驗值平均值之 85 %)，及一個變異係數為 13 %之模型不確定度，依此屈曲對應之γ_M變為 1.0。

K.5 使用設計值格式進行校正

除 K.4 中基於可靠度方法進行局部安全因數校正方法外，亦可應用設計值格式，參照 ISO 2394。

K.6 鋼結構銲接點疲勞之局部安全因數

假設使用 S-N 法並結合 Miner 線性疲勞累積規則(51)。

註(51) K.6 考慮銲接點之疲勞失效。同樣之準則亦適用於其他材料(如複合材料及鑄鋼)製成之其他疲勞關鍵銲接點之疲勞失效，在此等銲接點中，疲勞負載之平均值可能很重要。

對於線性 S-N 曲線，在恆定應力範圍$\Delta\sigma$下，達到失效所需之循環次數 N 可表示為：

$$N(\Delta\sigma)=\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_C}\right)^{-m} \quad 2\times10^{-6}=K\Delta\sigma^{-m} \tag{K.12}$$

式中，$\Delta\sigma_C$ ：特徵疲勞強度，定義為 5 %分位數

m ：S-N 曲線斜率(Wöhler 指數)

K ：S-N 曲線參數

對於變幅疲勞加載，Miner 總和之設計值應符合以下條件：

$$\sum_i \frac{n_i}{2\times10^6}\left(\frac{\gamma_n\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}\right)^m \le 1 \tag{K.13}$$

式中，γ_n ：失效後果係數，參照 7.6.1.3

γ_{Ff} ：疲勞負載部分係數，取決於與疲勞應力相關之不確定度

γ_{Mf} ：疲勞強度部分係數，取決於與 S-N 曲線及 Miner 法則相關之不確定度

n_i ：疲勞應力範圍為$\Delta\sigma_i$之循環次數

對於非線性 S-N 曲線，Miner 總和之設計值應符合以下條件：

$$\sum_i \frac{n_i}{N\left(\gamma_n\gamma_{Mf}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i\right)} \le 1 \tag{K.14}$$

表 K.2 及 K.3 中之局部安全因數γ_{Mf}及γ_{Ff}經過校正，使得相關失效模式之失效機率接近 K.2 中針對組件等級 2 之銲接結構點設定之目標可靠度位準。局部安全因

數γ_{Ff}取決於疲勞應力之變異係數 V_{Ff}。

疲勞強度參數 log$K$ 可假設為常態分布，其係數取決於實際 S-N 曲線，但對於銲接點，通常為 0.2。Miner 總和可假設為數常態分布，其變異係數等於 0.3。疲勞應力範圍之不確定度可假設為對數常態分布，其變異係數表示疲勞加載評估之不確定度及給定疲勞負載計算應力範圍之不確定度，參照參考資料[5]。通常，變異係數 V_{Ff}可取 0.15 至 0.20，參照參考資料[5]。

要求之可靠度可藉由下述方式實現。

(a) 損壞容限法：

- 選擇銲接點、材料及應力位準，使得在裂痕形成時，裂痕傳播速率低，臨界裂痕長度長。
- 提供多條負載路徑。
- 提供裂痕止裂點。
- 提供方便定期檢驗之銲接點。

(b) 安全壽命法：

- 選擇銲接點及應力位準，使得疲勞壽命足以在設計使用壽命結束時達到目標值β^t前無需進行檢驗。

表 K.2　疲勞強度局部安全因數之建議值γ_{Mf}

評估方法	γ_{Mf}
損壞容限	1.10
安全壽命	1.25

表 K.3　疲勞強度局部安全因數之建議值γ_{Ff}

疲勞應力範圍之變異係數γ_{Ff} (原文錯)	15 %至 20 %	20 %至 25 %	25 %至 30 %
γ_{Ff}	1.00	1.10	1.20

K.7 材料試驗類型(52)

註(52) K.8 至 K.11 是基於 ISO 2394:2015[3]及 EN 1990:2002[2]。

需要區分以下幾種試驗類型：

(a) 用以直接建立在給定加載條件下，結構或結構構件之極限強度或可使用性性質之試驗。

(b) 使用特定測試程序獲得特定材料性質之試驗。例：葉片材料性能質之試樣試驗。

(c) 降低強度模型參數不確定度之試驗。例：透過次總成與全尺度試驗。

K.8 試驗規劃

K.8.1 一般

在進行試驗之前，宜與試驗機構協議試驗計劃。

該計劃宜包含試驗目標及選擇或製備試驗樣品、執行試驗及試驗評估所需之所有規範。試驗計劃宜涵蓋下述內容：

- 目標與範圍。
- 試驗結果之預測。
- 試驗樣品及抽樣之規格。
- 加載規範。
- 測試安排。
- 量測。
- 試驗評估與報告。

K.8.2 目標及範圍

宜明確闡述試驗目標，例：所需性質、試驗其間中某些設計參數變化之影響及有效範圍。宜明確規定試驗之限制及所需之轉換(例：尺度效應)。

K.8.3 試驗結果之預測

宜考慮所有可能影響試驗結果預測之性質與因素，包括：

- 幾何參數及其變異性。
- 幾何缺陷。
- 材料性質。
- 受製造與執行程序影響之參數。
- 環境條件之尺度效應(若相關，亦應考慮任何順序)。

宜說明預期之失效模式及/或計算模型及對應之變數。若對哪些失效模式可能至關重要存在重大疑問，則宜依據相應之預試驗制定測試計劃[53]。

註[53] 需要注意的是，結構構件可能存在多種截然不同之失效模式。

K.8.4 試驗樣品及抽樣之規格

試驗樣品宜以能代表實際結構狀態之方式規定，或透過抽樣取得。

需要考慮之因素包括：

- 尺度及許可差。
- 原型之材料及製造工藝。
- 試驗樣品數量。
- 抽樣程序。
- 限制條件。

抽樣程序之目標宜是獲得具有統計代表性之樣本。宜注意試驗樣品與產品總體間之任何可能影響試驗結果之差異。

K.8.5 加載規範

試驗之加載與環境條件宜包括：

- 加載點。
- 加載歷史。
- 限制條件。
- 溫度。
- 相對濕度。
- 變形或力控制之加載等。

負載順序之選擇宜能代表結構構件在正常與嚴苛使用條件下之預期用途。在相關情況下，宜考慮結構反應與加載設備間之相互作用。

當結構行為取決於一個或多個作用力之影響，且此等作用力不會系統性地改變時，宜以代表值說明此等作用力之影響。

K.8.6 測試配置

試驗設備宜與試驗類型及預期量測範圍相符。特別注意宜提供獲得足夠加載及支撐裝置之強度與剛度，並預留足夠之撓曲間隙等。

K.8.7 量測

測試前，宜列出每一個別試驗樣品所有需要量測之相關性質。此外，亦宜列出下述內容：

(a) 量測位置。

(b) 結果記錄程序，包括(若相關)：

(1) 位移之時間歷程。

(2) 速度。

(3) 加速度。

(4) 應變。

(5) 力及壓力。

(6) 要求頻率。

(7) 量測準確度。

(8) 適合之量測設備。

K.8.8 試驗評估與報告

具體指引參照 K.9。宜報告試驗所依據之任何標準。

K.9 統計評估之一般原則

當評估試驗結果時，宜將試驗樣品行為及失效模式與理論預測進行比較。當實際結果與預測結果有顯著偏差時，宜尋求解釋：此可能涉及在不同條件下進行額外測試，或修改理論模型。

試驗結果之評估宜基於統計方法，並利用關於所用分布類型及其相關參數之現有(統計)資訊。附錄 K 中給出之方法僅在符合下列條件時方可使用：

(a) 統計資料(包括既有資訊)取自已識別且足夠同質之總體。

(b) 有足夠數量之觀測值。

在測驗結果之解釋層面，可區分 3 三個主要類別。

- 若僅進行一項(或極少數)試驗，則無法進行經典之統計解釋。只有利用廣泛之既有資訊，並結合關於該資訊與試驗結果相對重要程度之假設，始能進行統計解釋(Bayesian 程序，參照 ISO 12491[4])。
- 若進行一系列更大規模之試驗以評估某個參數時，則可能可以進行經典之統計解釋。此種解釋仍然需要使用一些關於該參數之既有資訊。但通常所需之既有資訊會比上述情況少。
- 當進行一系列試驗以校正模型(作為函數)及其一個或多個相關參數時，可進行經典之統計解釋。

試驗評估結果應僅對試驗中考慮之規格及負載特性有效。若要將結果外插以涵蓋其他設計參數與負載時，則宜使用來自先前試驗或理論基礎之附加資訊。

K.10 特徵值之推導

從試驗中推導特徵值時宜考慮：

(a) 試驗資料之離散性。

(b) 與試驗次數相關之統計不確定度。

(c) 既有統計知識。

若結構或結構構件之反應或材料之承載力取決於試驗未充分涵蓋的影響因素，如：

- 時間與持續時間效應。
- 尺度及尺寸效應。
- 不同之環境、加載及邊界條件。
- 承載力效應。

之後，計算模型時宜視情況考慮此等影響因素。

K.11 單一性質特徵值之統計決定

本節給出從以下二方面推導特徵值之表達式：(a)試驗類型及(b)單一性質(例：強度)(54)。

註(54)某些變數採取對數常態分布之優點在於不會出現負值，例:幾何變數與承載力變數。

備考： 此處所呈現之表達，使用具有〝模糊〞既有分布之 Bayesian 程序，其結果與經典統計中信賴水準等於 75 %時所得之結果幾乎相同。

下表及表達基於下述假設：

(a) 所有變數均遵循常態分布或對數常態分布。

(b) 對於均值無既有知識。

(c) 對於〝V_X 未知〞之情況，對於變異係數無既有知識。

(d) 對於〝V_X 已知〞之情況，變異係數具完全知識。

在實務中，通常最好使用〝V_X 已知〞之情況，並結合 V_X 之保守上限估算值，

而非應用〝V_X 未知〞之情況下的規則。此外，當 V_X 未知時，宜假設其不小於 0.10。

性質 X 之特徵值宜使用下列公式計算：

$$X_k=m_X(1-k_nV_X) \quad \text{(K.15)}$$

式中，m_X 為樣本平均值，k_n 值可從表 K.4 中查到。

使用表 K.4 時，宜考慮下述二種情況之一。

- 若從既有知識(55)，已知變異係數 V_X 或其合理上限值，則宜使用〝V_X 已知〞行。

  註(55) 既有知識可來自對可比較情況之先前試驗評估。何謂〝可比較〞需要透過工程判斷決定之。

- 若無法從既有知識得知變異係數 V_X，需要依據樣本進行估算，則應使用〝V_X 未知〞行，如。

$$V_X = \frac{1}{n}\sum x_i \quad \text{(K.16)}$$

$$s_X^2 = \frac{1}{n-1}\sum(x_i - m_X)^2 \quad \text{(K.17)}$$

$$V_X=s_X / m_X \quad \text{(K.18)}$$

表 K.4　5 %特徵值之 k_n 值

N	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∝
V_X 已知	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64
V_X 未知	–	–	3.37	2.63	2.33	2.18	2.00	1.92	1.76	1.73	1.64

表 K.4 基於常態分布。採用對數常態分布表達式，公式(K.15)變成：

$$X_k=\exp(m_y-k_n\ s_y)$$

式中，$m_y = \frac{1}{n}\sum ln(x_i)$

若從既有知識可知 V_X，則 $s_y = \sqrt{ln(V_X^2+1)} \cong V_X$

若無法從既有知識可知 V_X，則 $s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(lnx_i - m_y)^2}$

K.12　承載力模型特徵值之統計決定

K.12.1　一般

本節主要預期定義校正承載力模型及從(c)類試驗推導設計值之程序(方法)(參照 K.7)。將利用現有之既有資訊(知識或假設)。

基於試驗中觀察實際行為及理論考慮，應建立〝設計模型〞，從而推導出承載力函數。然後，宜藉由對所有可用試驗資料進行統計解釋以檢查該模型之有效性。若需要，應調整設計模型，直到理論值與試驗資料達到充分之相關性。亦宜依據試驗結果決定使用設計模型預測之偏差。此偏差需要與承載力函數中其他變數之偏差相結合，以獲得總體偏差指標。此等其他變數包括：

- 材料強度及剛度之偏差。
- 幾何性質之偏差。

宜考慮所有變數之偏差以決定特徵承載力。

此方法以若干離散步驟呈現，並對試驗總體做出一些假設並加以解釋。此等假設僅供參考，涵蓋一些最常見之情況。

對於標準評估程序，做出以下假設：

(a) 承載力函數是多個獨立變數 X 之函數。

(b) 有足夠數量之試驗結果。

(c) 所有相關之幾何及材料性質均已量測。

(d) 承載力函數中之變數間不存在相關性(統計相依性)。

(e) 所有變數均遵循常態分布或對數常態分布[56]。

註[56] 採用對數常態分布之優點在於不會出現負值。

標準程序包含 7 個步驟，參照 K.12.2 至 K.12.8。

K.12.2 步驟 1：建立設計模型

建立所考慮構件或結構細節之理論承載力 r_t 之設計模型，該承載力由承載力函數表示：

$$r_t = g_{r_t}\left(\underline{X}\right) \tag{K.19}$$

承載力函數應涵蓋所有影響相關極限狀態下承載力之相關基本變數 $\underline{X}$。

所有基本參數宜針對每個試驗樣品進行量測，並宜用於評估。

K.12.3 步驟 2：比較實驗值與理論值

將實際量測之性質代入承載力函數，以獲得理論值 r_{ti}，並將其作為與試驗實驗值 r_{ei} 進行比較之基礎。

宜將代表對應值對(r_{ti}, r_{ei})之點繪製在圖 K.1 所示之圖中。

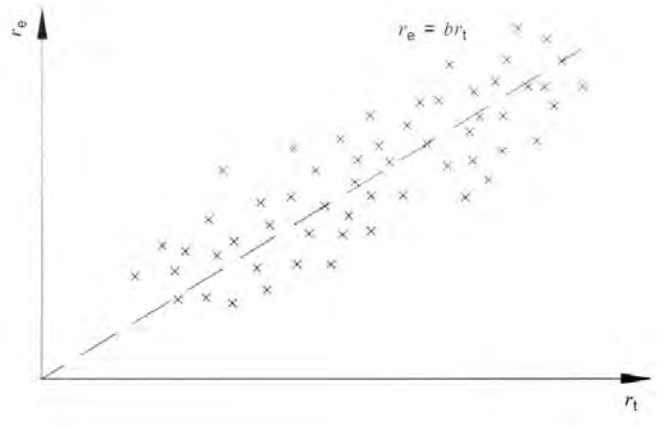


圖 K.1　r_e-r_t 圖

若承載力函數精確且完整，則所有點都將位於 $b = 1$ 之直線上。實際上，此等點會呈現一定之離散性，但宜研究任何系統性偏差之原因，以檢查此是否表明試驗程序或承載力函數存在誤差。

K.12.4 步驟 3：估算平均值修正因子(偏差)b

將承載力 r 之機率模型表示為以下形式：

$$r = b\ r_t\ \delta \tag{K.20}$$

式中，b：斜率之最小平方法最佳擬合，由下式給出：

$$b = \frac{\sum r_{ei} r_{ti}}{\sum r_{ti}^2} \tag{K.21}$$

利用基本變數之平均值 $\underline{X}_m$ 計算得到理論承載力函數之平均值，可從以下公式獲得：：

$$r_m = b\, r_t\left(\underline{X}_m\right)\delta = b\, g_{r_t}\left(\underline{X}_m\right)\delta \tag{K.22}$$

K.12.5 步驟 4：估算誤差之變異係數

每個實驗值 r_{ei} 之誤差項 δ_i 宜由下式決定：

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b\, r_{ti}} \tag{K.23}$$

依據 δ_i 值，宜藉由定義下列公式決定 V_δ之估算值：

$$\Delta_i = \ln\left(\delta_i\right) \tag{K.24}$$

$E(\Delta)$之估算值$\bar{\Delta}$宜由下列公式獲得：

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n}\sum \Delta_i \tag{K.25}$$

σ_Δ^2之估算值s_Δ^2宜由下列公式獲得：

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1}\sum\left(\Delta_i - \bar{\Delta}\right)^2 \tag{K.26}$$

表達式

$$V_{\delta} = \sqrt{\exp\left(s_{\Delta}^2\right) - 1} \tag{K.27}$$

可用作誤差項δ_i之變異係數 V_{δ}。

K.12.6 步驟 5：分析相容性

宜分析試驗總體與承載力函數中假設之相容性。

若(r_{ti} , r_{ei})值之離散程度過大，無法給出經濟之設計承載力函數，則可藉由以下方式之一降低此類離散程度：

(a) 藉由修正設計模型，使其考慮先前忽略之參數。

(b) 藉由將總試驗總體劃分為適當之子集，以修改 b 及 V_{δ}，在此等子集中，可認為此等附加參數之影響是固定的。

為決定哪些參數對離散程度之影響最大，可依據此等參數將試驗結果分成若干子集(57)。

註(57) 其目的是藉由使用標準程序分析每個子集，以改進每個子集之承載力函數。將試驗結果分成子集之缺點是每個子集中的試驗結果數量可能會變得非常少。

在決定分位數 k_n (參照步驟 7)時，子集之 k_n 值可依據原始系列中試驗總數決定。

K.12.7 步驟 6：決定基本變數之變異係數 V_{Xi}

若能展現試驗總體完全代表實際之變異情況，則可從試驗資料中決定承載力函數中基本變數之變異係數 VXi。然而，由於此情況通常並非如此，因此通常需要依據一些既有知識決定變異係數 V_{Xi}。

K.12.8 步驟 7：決定承載力之特徵值 r_k

若承載力函數之形式為

$$r = b\, r_t\, \delta = b\, g_{r_t}\left(\underline{X_1,\ldots,X_j}\right)\delta \tag{K.28}$$

平均值可由以下公式獲得：

$$r = b\, r_t\, \delta = b\, g_{r_t}\left(\underline{X_1,\ldots,X_j}\right)\delta \tag{K.29}$$

變異係數 V_r 可近似由下列公式求得：

$$V_r^2 \cong V_{\delta}^2 + V_{r_t}^2 \tag{K.30}$$

式中，V_{δ}由公式(K.30)(58)獲得，變異係數 V_{rt} 可由下列公式求得：

註(58) V_δ值由所考慮之試驗樣本估算得出。

$$V_{r_t}^2 = \frac{1}{g_{r_t}\left(\underline{X}_m\right)^2}\sum_{i=1}^{j}\left(\frac{\partial g_{r_t}\left(\underline{X}\right)}{\partial X_i}\sigma_i\right)^2 \qquad \text{(K.31)}$$

式中，σ_i為 X_i之標準差

若試驗次數有限($n < 100$)，則宜允許在Δ分布中考慮統計不確定度。此分布宜視為具$\bar{\Delta}$、V_Δ及 n 之中心 t 分布。

特徵(5 %分位數)承載力 r_k宜由下列公式獲得：

$$r_k = b\, g_{r_t}\left(\underline{X}_m\right)\exp\left(-k_\infty \alpha_{\ln r_t}\sigma_{\ln r_t} - k_n \alpha_{\ln\delta}\sigma_{\ln\delta} - 0{,}5\sigma_{\ln r}^2\right) \qquad \text{(K.32)}$$

與

$$\sigma_{\ln r} = \sqrt{\ln\left(V_r^2 + 1\right)}$$

$$\sigma_{\ln r_t} = \sqrt{\ln\left(V_{r_t}^2 + 1\right)}$$

$$\sigma_{\ln\delta} = \sqrt{\ln\left(V_\delta^2 + 1\right)}$$

$$\alpha_{\ln r_t} = \frac{\sigma_{\ln r_t}}{\sigma_{\ln r}}$$

式中， k_n ：表 5 中 V_X未知時之特徵分位數係數

k_∞ ：$_{n\to\infty}$時之 k_n (k_∞ = 1.64)

$\alpha_{\ln rt}$ ：$\sigma_{\ln rt}$之權重係數

$\alpha_{\ln\delta}$ ：$\sigma_{\ln\delta}$之權重係數

K.13 參考資料

[1] JCSS:2002, Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Probabilistic Model Code. http://www.jess.ethz.ch/

[2] EN 1990:2002, Eurocode - Basis of structural design

[3] ISO 2394:2015, General principles on reliability for structures

[4] I SO 12491:1997, Statistical methods for quality control of building materials and components

[5] Safety Factors - IEC 61400-1 ed. 4 - background document DTU Wind Energy - E - Report – 0066 (EN) (ISBN:978-87-93278-08-0) November 2014 John Dalsgaard S0rensen, Henrik Stensgaard Toft

[6] EN 1993-1-6:2007, Eurocode 3 - Design of steel structures − Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures

附錄 L
(參考)
寒冷氣候：結冰氣候之評估與影響

L.1 結冰氣候條件之評估

L.1.1 一般

在結冰氣候條件下，氣象結冰是指冰或雪在暴露於大氣中之建築物上積聚。通常，影響風力機之大氣結冰可分為二種：雲內結冰(霧凇或釉冰)及降水結冰(凍雨或毛毛雨、濕雪，參照參考資料[1])。雲內結冰通常更為常見，在許多情況下，雲內結冰之頻率會隨著海拔升高而增加。此是因為建築物位於雲端之機率更高，且溫度更低。

可使用各種方法及量測感測器評估結冰氣候條件。為評估結冰氣候對風力機之影響，需要評估預期長期轉子結冰之嚴重程度及持續時間。L.1 說明一些可用於評估預期轉子結冰影響之方法。

建議評估葉片尖端或輪轂高度附近之結冰情況[若需要，可依據公式(L.1)將評估之結冰情況外插至代表轉子結冰高度]，同時使用多種結冰偵測方法以提高可用性及可靠度，並儘可能使用長期特定地點之資料(最好是 10 年或更長時間)盡可能評估結冰情況，因為觀察到之結冰頻率可能存在較大的年際變化。

更多指引資訊參照參考資料[3]、[4]、[5]及[6]。

L.1.2 結冰氣候

通常，結冰事件可用以下適用於受氣象結冰影響之風力機的表達式來說明(參照圖 L.1)。

- 氣象結冰：指氣象條件有利於冰積聚之時期(活躍之冰形成期)。
- 轉子結冰[59]：風力機轉子受冰干擾之時期。

  註[59] 本標準中所使用之用語〝轉子結冰〞取代文獻中常用之用語〝儀器結冰〞，是因為當冰影響旋轉之風力機轉子時，〝轉子結冰〞能更準確地說明此現象。對於旋轉之風力機轉子，高氣流速及葉片振動通常會導致其潛伏期及恢復期比固定儀器更短。
- 潛伏期：氣象結冰開始到轉子結冰開始間之延遲時間(取決於表面、結構溫度及風力機運轉點)。
- 恢復期：氣象結冰結束到轉子結冰結束間之延遲時間(冰仍然存在但不再活躍形成之時期)。

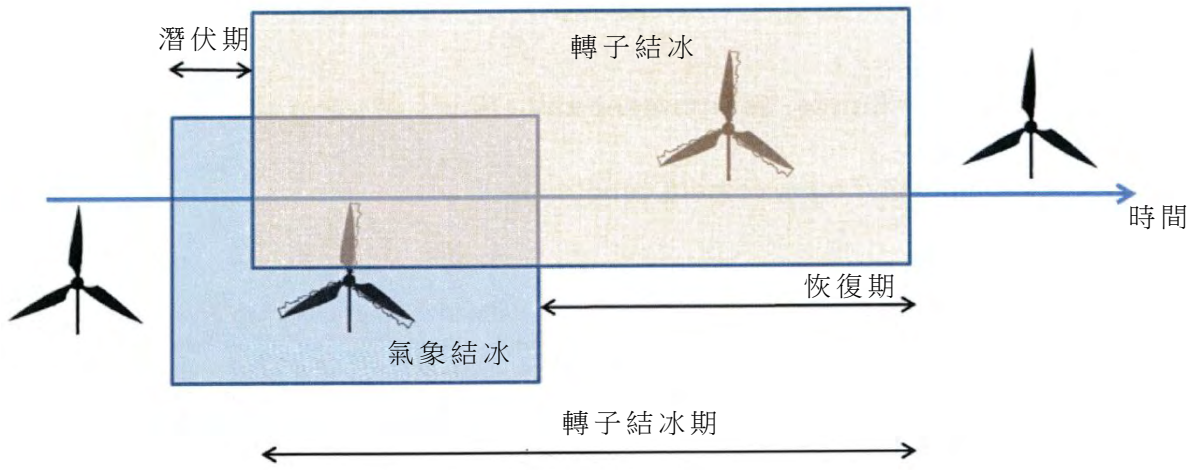


圖 L.1　氣象結冰及轉子結冰之定義

L.1.3 轉子結冰

轉子結冰是指風力機轉子受到冰層干擾之時期。冰層會持續積聚在風力機轉子上，直到不再存在導致結冰之氣象條件(氣象結冰結束)。冰層會在風力機上停留一段時間(恢復期)，直到冰層被侵蝕、昇華、融化或從轉子上脫落(轉子結冰結束)。

一般來說，雲內氣象結冰條件之發生頻率隨海拔顯著增加，因此需要一個具有代表性之風力機轉子離地高度來考慮此等影響。此代表性高度，即轉子結冰高度(h_{ri})，定義為：

$$h_{ri} = z_{hub} + D/3 \qquad \text{(L.1)}$$

式中，z_{hub} ：風力機輪轂高度(m)

D ：轉子直徑(m)

圖 L.2 說明轉子結冰高度之定義。對於低於轉子結冰高度之雲層高度，可以假設其上方之整個轉子均位於雲層中。

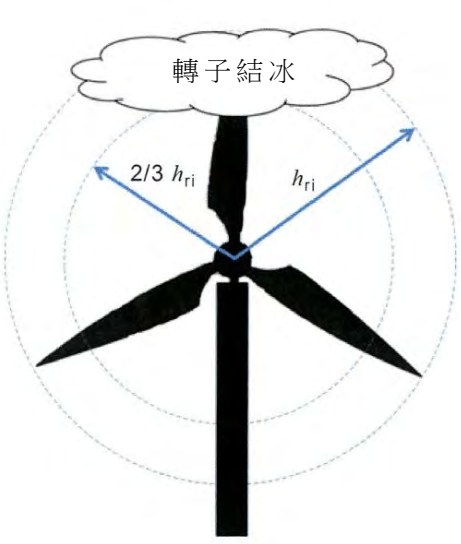


圖 L.2　依據轉子結冰高度定義之代表結冰轉子區域

L.1.4 量測方法

結冰氣候條件可藉由以下方法進行評估：

- 使用專用冰探測器量測氣象及/或儀器結冰條件之嚴重程度及/或持續時間。
- 使用一對加熱/非加熱杯式風速計，可用於估算儀器結冰之持續時間。
- 在固定件(如氣象塔)或旋轉組件(如葉片)上安裝天氣系統或攝影系統。
- 透過雲底高度及/或能見度與溫度進行量測或觀測。
- 其他經過確證之氣象結冰評估方法。

量測設備及/或風力機亦可能受到稱為二次結冰現象之影響。二次結冰是透過冰之積聚、融化與再凍結過程形成的。二次結冰可能會影響儀器之可用性及可靠度。

最後，需要評估結冰氣候(IC)對風力機長期轉子結冰預期之影響。若無法取得更多資料，則可使用 L.2 及 L.3 中給出之轉子葉片 IC 效應的典型嚴重程度及持續時間。

L.1.5 冰之剖面係數修改

轉子葉片上之積冰會降低翼切面空氣動力性能，使其低於無冰翼切面之性能。為考慮翼切面性能之變化，可使用以下修改靜態翼切面特徵之方法。宜注意以下提到之範圍是任意的，宜依據特定極坐標進行選擇與評估。尤其需要謹慎處理與背景極坐標之合併。

翼切面懲罰係數應與無冰翼切面之升力係數(C_L)及承載力係數(C_D)相乘，攻角範圍為−2°至$\alpha = \alpha_{Clmax}$。超出此範圍之係數可藉由例:Viterna[2]或類似方法進行外插。升力及承載力懲罰是翼切面攻角之函數，如下式：

$C_{L,pen}(\alpha) = -0.0014\alpha^2 - 0.0017\alpha + 0.9509$ (L.2)

$C_{D,pen}(\alpha) = 0.0191\alpha + 3.1151$

$C_{L,Iced} = C_{L,pen} \times C_{L,clean}$

$C_{D,Iced} = C_{D,pen} \times C_{D,clean}$

式中， $C_{L,pen}$ ：無冰翼切面升力係數懲罰係數(-)

$C_{D,pen}$ ：無冰翼切面承載力係數懲罰係數(-)

α ：攻角(°)

力矩係數(C_m)未進行任何修改。宜注意攻角範圍−2°為任意值，宜依攻角定義進行調整。該值可調整至α_{Clmax}與α_{Clmin}之中間值附近。

圖 L.3 展示結冰翼切面之懲罰係數。圖中，x 表示攻角α及 y 表示懲罰係數。

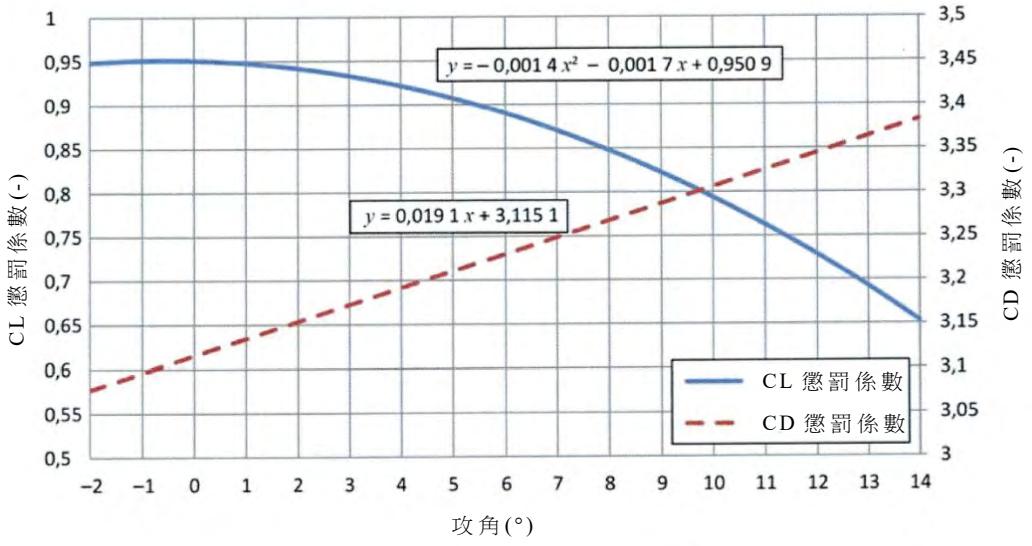


圖 L.3　結冰翼切面升力與承載力懲罰係數

L.2 冰質量對風力機葉片之影響

轉子上冰之持續時間因地理位置與年份而異。建議透過現場量測評估結冰對風力機之氣候影響，更多指引參照 L.1。若無其他資訊，可假設每年預計轉子長期結冰時間為 750 h。

風力機葉片之冰質量分布(單位長度質量)應假設在葉片前緣處。它從轉子軸線上之零值線性增加到轉子葉尖處之最大值。冰負載分布計算如下：

$M(r) = A \times C_{85\%} \times r$ (L.4)

式中， M ：轉子葉片前緣之質量分布(kg/m)

$C_{85\%}$ ：轉子半徑 85 %處之弦長(m)

R ：距轉子軸線之徑向位置(m)

L.3 寒冷氣候設計狀況與負載情況

L.3.1 一般

表 L.1 列出寒冷氣候條件下之額外負載情況。

表 L.1 寒冷氣候設計負載情況

設計工況	DLC	風況	其他條件	分析型式	局部安全因數
1.發電	1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	冰形成	F/U	N
6.待機(停機或惰轉)	6.5	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	冰形成	F/U	N
7.待機與故障狀態	7.1	EWM 1 年回歸期	冰形成	U	A

轉子上冰之持續時間因地理位置與年份而異。建議透過現場量測評估結冰對風力機之氣候影響，更多指引參照 L.1。若無其他資訊，可假設每年預計轉子長期結冰時間為 750 h。

L.3.2 發電(DLC 1.1 至 DLC 1.6)

若預計葉片會結冰且無法主動預防，則需要評估結冰葉片對風力機控制器行為及風力機性能(L.2)之安全性影響。

L.3.3 待機(停機或惰轉)(DLC 6.1 至 DLC 6.5)

對於 DLC 6.5 結冰風力機惰轉之情況，需要評估風力機控制器行為之安全性。

L.3.4 待機及故障狀態(DLC 7.1)

若風力機沒有獨立之能源供應，則在電網失效情況下，應假設風力機冷卻至 $\theta_{1year,min}$。應觀察低油底殼溫度會導致動力傳動系統喪失及阻尼顯著增加，阻礙轉子自由惰轉。需要評估結冰風力機在風力機控制器行為之惰轉安全性。

L.4 寒冷氣候負載計算

所有負載計算主要用於研究風力機控制器行為及安全。在缺乏其他資訊情況下，可依據 L.2 進行空氣動力懲罰模擬，及依據 L.3 進行結冰轉子質量模擬。對於極限負載分析，應研究除一個葉片外所有葉片上結冰情況及所有葉片上之空氣動力懲罰。對於疲勞分析，除了一個轉子葉片外，所有轉子葉片上冰質量(宜考慮 50 %之冰質量)及所有轉子葉片上之空氣動力懲罰均宜進行研究。

應使用依據 14.4 增加之空氣密度[60]。此方法總結於表 L.2。

註[60] 宜特別注意研究不同側向(垂直於主風向)之剛度及阻尼係數，尤其是對於基座而言。此等性質之變化可能會顯著影響轉子質量不平衡之影響。

對於疲勞負載分析，可使用依據公式(L.4)計算之冰質量分布。對於極限負載分析，

公式(L.4)之值應乘以 2。

表 L.2　不同分析類型中使用之葉片冰質量及翼切面懲罰係數

分析類型	葉片#1	葉片#2	葉片#*N*	應用於所有葉片之翼切面懲罰係數
極限	公式(L.4)	公式(L.4)	–	公式(L.2)及公式(L.3)
疲勞	公式(L.4)	公式(L.4)	公式(L.4)−50 %	公式(L.2)及公式(L.3)

L.5 參考資料

[1] IEA Task 19, "IEA Wind Recommended Practice 13: Wind energy projects in cold climate," 2011 Edition

[2] D.J. Larry Viterna, "Theoretical and Experimental Power From Large Horizontal Axis Wind Turbines," NASA, 1982

[3] Lehtomaki, V. et al., Fatigue loads of iced turbines: Two case studies. Elsevier Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2016, vol. 158, p.37-50

[4] Rissanen, S. et al., Modelling load and vibrations due to iced turbine operation. Wind Engineering, 2016, vol. 40, no.3, p.293-303

[5] Homola, M. et al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. 2009, Wiley Wind Energy, DOI: 10.1002/we.383

[6] Homola, M. Atmospheric icing on wind turbines. PhD thesis 2011, Narvik University

附錄 M
(參考)
中型風力機

M.1 一般

對於尺寸小於典型公用事業級風力機、大於 CNS 15176-2 標準所涵蓋風力機之風力機，市場需求龐大。此類風力機稱為〝中型風力機〞。依據應用可能需要使用與本標準正文不同之設計要求。

本附錄提供適用於 3.29 中定義之中型風力機的設計要求資訊。除符合本標準中所述之所有要求外，並可附加以下針對中型風力機系統之可選補充與說明。

M.2 外部條件

M.2.1 一般

第 6 節定義之外部條件適用於中型風力機系統，並如下說明。

中型風力機可能安裝在地形較為複雜及/或工業區附近。因此，在此等環境中，風力機可能更適合採用 A+或 A 級擾流強度等級。

M.2.2 風切

在某些中型風力機組安裝地點，較高之風切指數可能與較高之擾流位準同時出現。因此，對於中型風力機，可使用大於 0.2 之風切指數α可能更為合適。對於此類安裝地點，風切指數$\alpha = 0.3$ 可提供更保守之風剖面值。

通用級風力機亦可指定為〝M〞子類。若需要$\alpha > 0.2$ 值，則應在設計文件中聲明該值，並使用該值進行負載分析。

M.3 組裝、安裝與架設

中型風力機之組裝、安裝與架設應符合第 12 節所述要求，並可包含下述可選之附加段落。

12.6 文件

附加段落：

提供給安裝者之文件中，應詳細規定如何安裝、組裝及架設風力機。此可能包括但不限於：

- 風力機安裝之正確順序及組裝細節。
- 為使承包商能夠安全地依據當地法規進行安裝，而建議或強制執行之任何通用或特定訓練或能力標準。
- 若風力機製造商負責基座，則提供有關基座安裝之技術、健康及安全資訊；若不是，則提供有關風力機負載及風力機基座接口之詳細資訊，及為正確設計基座及施工而需要考慮之任何其他風力機要求。
- 有關塔架、葉片及機艙安裝之技術、健康及安全資訊。
- 任何其他正在安裝之結構或系統(例:齒輪箱)之技術、健康及安全資訊。
- 有關錨固件或任何等效系統安裝之技術、健康及安全資訊。

- 關於現場管理、現場進出及風力機及其相關設備之接收、搬運及儲存建議，以便在風力機安裝過程中，保護工人與其他人員及風力機及其組件之安全。
- 任何規定之負載或環境條件(例：風速)，包括必須遵守或不得超過之特定限值，尤其針對塔架與葉片之安裝。
- 為確保安全使用任何規定設備(例：起重機及起重設備)進行風力機安裝所需之技術、健康及安全資訊。
- 任何為使風力機安全退役之額外或替代要求。及
- 為記錄並傳達最終實際安裝狀態資訊給顧客或最終使用者所需之一切必要資訊。

除非製造商提供特定之安裝設備，否則最終選擇所使用之任何設備或應用之工作系統應由安裝者負責。

與風力機相關之任何特定監管要求或義務，及為履行所提供司法管轄區之國家法規而承擔的任何責任，均可在提供文件中予以說明。

提供文件中可說明任何與該風力機相關之特定法規要求或義務，及為符合供應地之國家法規所需履行之各項責任。

M.4 調試、運轉與維護

中型風力機系統之調試、運轉與維護應符合第 13 節所述要求，並可附加以下選用段落。

13.1 一般

附加段落：

提供給操作者之文件中，應詳細說明如何操作及維護風力機。此包括但不限於：

- 風力機操作、維護、修理及測試所需之圖面、示意圖、說明與解釋。
- 操作者與維修者之訓練說明，其中應指出需要涵蓋之重要面向－至少包括：風力機之進出說明、攀爬說明、升降機之使用、電氣裝置安全操作說明及緊急逃生程序、最大維護風速及允許進入機艙或在其上工作之最大人數。
- 風力機不同部位同時允許之最大人數。
- 操作者應採取之防護措施訊息，包括(如適用)應提供的個人防護裝備(PPE)。
- 安全關鍵組件及系統之維護、檢查與測試要求。
- 風力機控制系統之控制與運轉模式細節。
- 救援設備之規格。
- 潛在危險區域清單及與每個潛在危險區域相關之危險指示。
- 滅火器之規格及其位置。
- 維護及修理過程中，所使用之基本專用工具的說明。
- 風力機及其關鍵組件及系統之建議維護週期。
- 運作、維護、修理與故障期間之穩定性限制。此包括進入風力機進行維護工作之環境限制說明。

13.2 安全操作、檢驗與維護之設計要求

附加段落：

風力機中已採用之保護措施應予以文件化。

此可包括但不限於：

- 對可能存在之重大危險的說明。
- 風力機限制說明，包括：
  - 風力機預期用途，包括不同運轉模式及操作者介入程序。
  - 定義工作區域及其通道之空間限制、操作者-機器介面與機器-電源介面。
  - 規定對安全至關重要之零件組計壽命之任何時間限制。
- 風力機設計中考慮之安全要求與保護措施之詳細資訊，包括控制系統。
- 需要告知風力機買方或營運商之任何殘餘風險的詳細資訊。

M.5 文件

適當時，應提供所有必要之手冊、圖、規格、說明書、圖面或安全說明，以確保風力機結構及設備之安全、正確供應、組裝、安裝、運作及維護。

所有資訊之最終範圍及內容，應考慮：

(a) 製造商執行之風險評價。

(b) 風力機之尺寸與組態。

(c) 所供應風力機之適用等級及負載特性。

(d) 風力機適用之場地及環境條件。

提供給買方之文件應以正體中文書寫。文件應包含以下內容：

- 製造商及其當地代表(如為獨立機構)之名稱。
- 風力機之標識，包括名稱、型號及等級。
- 任何規定之符合性聲明。
- 關於買方/使用者可進行之操作限制及應委託給專業/授權公司/技術者之操作限制的明確說明，並列明此等公司/技術者應提供之授權證明。

所有文件應依邏輯順序排列，並在獲得新資訊時及時更新。文件內容亦應涵蓋可合理預見之誤用情況。

附錄 N
(規定)
場地地工調查與動力分析要求

N.1 場地地工調查與地工資料

N.1.1 通則

N.1.1.1 調查目的與時機

風電場之場地地工調查，應提供細部地工設計所需之地層資料，包含影響風力機結構物設計與施工之所有地層分布與性質，藉以評估風力機支撐結構之安全、性能與施工可行性。調查應於設計前進行，否則設計時須採用保守假設，相關假設至少應參考大區域初步地工與地質調查成果，並須於基礎製造前或基礎施工前完成調查以驗證設計之合理性。

N.1.1.2 調查與評估之執行者

風電場之地工調查資料詮釋與地層條件評估，應由具場地地工調查相關經驗之專業機構為之；若屬國外顧問提出之詮釋與評估成果，應經過國內大地或相關專業技師之覆核。

N.1.1.3 調查方法與程度

場地地工調查工作項目包括：場地地質條件與構造調查、海床地形測量、地球物理探測、地質鑽孔與取樣、現地試驗與室內試驗等；調查方法與程度之決定，應考量計畫執行之階段性、風力機之數量/位置/尺寸/基礎型式、土層種類及土壤與地形之複雜性。調查成果須足以建立個別風力機基礎土壤之工程性質，包含重要土層之側向範圍、土壤與岩石分類與描述之資料、執行分析所需之剪力強度、變形與滲透性參數、現地應力狀態，並涵蓋可能之土壤變異性，以供詳細與完整基礎設計之需。

此外，應評估風電場範圍內之海床地形變遷與結構基礎沖刷潛能。進一步細節，可參考 DNV Classification Notes No. 30.4、ISO 19901-8 或 EN 1997-1 與 EN 1997-2。

N.1.2 調查範圍與深度

調查面積與深度應涵蓋可能與風力機基礎結構相互影響之範圍，並應考慮風力機之位置與安裝容許誤差，以充分檢驗各個基礎之地層情況與土壤特性。其中，調查深度須能確保於該深度以下，即便有軟弱層存在，亦不至於影響風力機支撐結構之安全或性能。

N.1.3 鑽孔與現地試驗之數量

在每個獨立風力機之基礎位置，至少應進行一孔足夠深度之鑽孔。針對風力機基礎位置下之特徵地層，應取得室內試驗所需之土樣，並搭配相關現地試驗；當水深較淺而可採用自升式平台進行鑽探時，宜採用標準貫入試驗(standard

penetration test, SPT)；當水深較深而必須採用探勘船進行鑽探時，宜採用下孔式(downhole)圓錐貫入試驗(cone penetration test, CPT)。當土層具高度變異性、具液化潛能(soil liquefaction potential)、發現有局部之軟弱地盤或基礎涵蓋範圍超過 20 公尺時，便須額外進行深度較淺之鑽孔或貫入試驗。

若實務上可行，建議於離岸支撐結構的每一支撐腳，均進行海床圓錐貫入試驗；於沖積層土壤，圓錐貫入試驗可用以代替鑽孔，但應與前期調查所建立之分區地質模型(ground model)進行比對，且仍應搭配土層取樣。

N.1.4 取樣方法與取樣數量

為建立合理連續之土層分布，應取得足夠數量之土樣，供土壤基本物理性質試驗之用。在 30 公尺深度內所取之土樣應儘可能完整，原則上每 1.5 公尺取一土樣；於深度 30 公尺以上，則依工程專業判斷採取適當之取樣間隔。

為決定設計用之土壤性質，應取得足夠數量之不擾動土樣，供室內土壤力學試驗之用。為此，應優先採用靜壓式薄管取樣(thin-walled tube sampling)，然若於砂土層進行靜壓式薄管取樣確有困難，可改採敲擊式薄管取樣，且取樣過程中之打擊數需紀錄並呈現於鑽孔柱狀圖中(boring log)。

現地取得之土樣須精確標記，記錄目視檢查之結果及拍照，妥善封存後，送至具公信力之實驗室進行室內試驗。有關土壤與岩石取樣品質、樣品之處理與運送、土壤與岩石識別及地下水量測，可參照 ISO 22475-1。

N.1.5 室內土壤試驗之相關要求

決定土壤強度與變形參數之室內試驗計畫，應包括不同類型的試驗與足夠的試驗組數，並足供進行基礎細部設計之用。

若採用探勘船進行鑽探，針對每層黏性不擾動土樣，應於工作船上至少進行兩組不排水剪力強度試驗，一組為無圍壓縮試驗(unconfined compression test)或壓密不排水試驗(consolidated undrained test)，另一組可採口袋貫入儀(pocket penetrometer)、扭轉儀(torvane)或迷你十字片剪試驗(miniature vane shear test)等。

建議之室內土壤試驗項目包括(但不限於)：

(a) 土壤基本物理性質試驗：含水量、單位重、顆粒比重/孔隙比、相對密度、砂性土之篩分析、黏性土之阿太堡限度(Atterberg limits)等試驗。

(b) 土壤化學試驗：若有需要(例如考量環境腐蝕等)，應進行有機物含量、碳酸鹽含量、硫酸鹽含量、氯化物含量、pH 值等土壤化學試驗。

(c) 土壤剪力強度試驗(求取排水與不排水剪力強度)：黏性土之無圍壓縮試驗、砂性土之直接剪力試驗(direct shear test)、黏性土之不壓密不排水(unconsolidated undrained)或壓密不排水三軸試驗(triaxial tests)、砂性土之壓密排水(consolidated drained)三軸試驗。

N.1.6 反覆弱化、土壤液化與地震場地效應之特別考量

對於前期調查所建立之分區地質模型中，具有反覆弱化(cyclic degradation)或

土壤液化疑慮之軟弱沖積土層，應對現地不擾動或重模(remolded)代表性土樣進行室內反覆載重試驗(如動態三軸試驗或反覆單剪試驗)(dynamic triaxial test or cyclic single shear test)，以評估其反覆弱化特性或抗液化強度曲線(liquefaction resistance curves)，每個特徵地層應至少一組。

在地震活躍區，須獲得地盤反應分析所需之土壤動態性質，供場地地震力評估之用。此外，除卵礫石層與岩層之外，各分區地質模型應取得現地不擾動或重模代表性土樣進行共振柱試驗(resonant-column test)、動態三軸試驗或反覆單剪試驗等室內試驗，以求取土壤動態性質曲線，包含剪力模數(shear modulus)與阻尼比隨剪應變之變化；針對風電場地盤受震反應分析用之簡化土層剖面，每層應至少獲得一組土壤動態性質曲線。

N.2 特徵大地工程參數

N.2.1 須決定所有重要土層之大地工程參數特徵值，包含強度與變形參數特徵值(characteristic geotechnical parameters)。大地工程參數特徵值之選擇，須依據現場與室內試驗之試驗值與推估值，並輔以可靠之經驗法則。

N.2.2 基於風險與可靠度(risk and reliability)進行參數特徵值選擇之議題，詳見 EN 1997-1，另可參考 DNV-RP-C207。

N.3 場地動力分析要求

N.3.1 通則

在地震活躍區，結構－基礎系統可能承受地震力作用，應針對個別風力機場地狀況，在相關設計中考慮反覆載重造成地盤性質弱化之效應。

應評估地震作用下之風力機場地液化潛能(soil liquefaction potential)；若具液化潛能，應評估土壤液化對基礎之影響。

N.3.2 土壤－結構互制

N.3.2.1 結構載重效應之評估應依據土壤與結構系統之整體分析。此分析須對土壤與結構元件之勁度(stiffness)與阻尼作適當的假設。

N.3.2.2 於動態分析中，為避免共振，整體結構系統之自然頻率(natural frequency)與激振頻率(excitation frequency)之差距至為重要。評估預期自然頻率時，須對考慮反覆荷重作用之土壤性質進行參數研究，此研究須涵蓋可能土壤種類與性質之範圍。

N.3.2.3 若有需要，須適當考量鄰近結構物之影響。

N.3.2.4 為分析地震動作用下之結構反應，須依據自由場土壤運動特性與局部土壤條件，使用公認的方法進行土壤結構互制分析。每個風電場至少針對一座代表性風力機進行動態歷時分析(dynamic time-history analysis)，驗證耐震設計合理性；若場地地質條件複雜多變，可考慮增加分析數量。

N.3.2.5 為進行風力機與支撐結構之動力分析，須對基礎結構之承載土體設定適當之勁度值。例如，在基樁設計中，須使用描述樁-土互制作用之 p-y 曲線(p-y curve)，

其中包括適當的 p-y 曲線初始勁度。上述要求同樣適用於風力機與支撐結構之自然頻率評估。於各個設計過程目標中，須進行參數敏感度分析(sensitivity analysis)，藉此考量勁度評估中之不確定性。

N.4 中英專有名詞對照

阿太堡限度(Atterberg limits)

鑽孔柱狀圖(boring log)

圓錐貫入試驗(cone penetration test, CPT)

壓密排水(consolidated drained)

反覆弱化(cyclic degradation)

直接剪力試驗(direct shear test)

動態三軸試驗或反覆單剪試驗(dynamic triaxial test or cyclic single shear test)

下孔式(downhole)

激振頻率(excitation frequency)

地質模型(ground model)

抗液化強度曲線(liquefaction resistance curves)

迷你十字片剪試驗(miniature vane shear test)

自然頻率(natural frequency)

口袋貫入儀(pocket penetrometer)

共振柱試驗(resonant-column test)

敏感度分析(sensitivity analysis)

液化潛能(soil liquefaction potential)

標準貫入試驗(standard penetration test, SPT)

薄管取樣(thin-walled tube sampling)

扭轉儀(torvane)

三軸試驗(triaxial tests)

無圍壓縮試驗(unconfined compression test)

不壓密不排水(unconsolidated undrained)

N.5 參考資料

[1] DNV Classification Notes No. 30.4: 1992 Foundations

[2] DNV-RP-C207:2017 Statistical representation of soil data

[3] DNVGL-ST-0126: 2016 Support structures for wind turbines

[4] EN 1997-1:2004 Geotechnical design − Part 1: General rules

[5] EN 1997-2: 2007 Geotechnical design − Part 2: Ground investigation and testing

[6] ISO 19901-8:2014 Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures − Part 8: Marine soil investigations

[7] ISO 22475-1:2006 Geotechnical investigation and testing − Sampling methods and groundwater measurements − Part 1: Technical principles for execution

[8] 臺灣離岸風機支撐結構設計準則，財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，2018 年 10 月

參考資料

[1] IEC 60146 (all parts), Semiconductor converters

[2] IEC 60173:1964, Colours of the cores of flexible cables and cords

[3] CNS 60227-1 (系列標準) 額定電壓 450/750 V 以下聚氯乙烯絕緣電纜

[4] IEC 60245 (all parts), Rubber insulated cables − Rated voltages up to and including 450/750 V

[5] CNS 15187-1 (系列標準) 低壓熔線

[6] IEC 60287 (all parts), Electric cables − Calculation of the current rating

[7] IEC 60439 (all parts), Low-voltage switchgear and contra/gear assemblies

[8] IEC 60446:2007, Basic and safety principles for man-machine interface, marking and identification − Identification of conductors by colours or alphanumerics

[9] IEC 60617, Graphical symbols for diagrams (available at http://std.iec.ch/iec60617)

[10] IEC 60755, General requirements for residual current-operated protective devices

[11] IEC 60898 (all parts), Electrical accessories − Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations

[12] CNS 14674-1 電磁相容(EMC)－一般標準－第 1 部：住宅、商業與輕工業環境之抗擾度規範

[13] CNS 14674-4 電磁相容(EMC)－一般標準－第 4 部：工業環境之放射標準

[14] IEC 61310-1:2007, Safety of machinery − Indication, marking and actuation − Part 1: Requirements for visual, acoustic and tactile signals

[15] IEC 61310-2:2007, Safety of machinery − Indication, marking and actuation − Part 2: Requirements for marking

[16] CNS 15176-2 風力機－第 2 部：小型風力機設計要求

[17] CNS 61400-3-1 風力發電系統－第 3-1 部－固定式離岸風力機設計要求

[18] IEC 61400-6, Wind turbines − Part 6: Tower and foundation design requirements

[19] CNS 15176-12-1 風力機－第 12-1 部：發電用風力機之功率性能量測

[20] CNS 15176-13 風力機－第 13 部：機械負載量測

[21] CNS 15176-21 風力機－第 21 部：併網型風力機之電力品質特性量測與評鑑

[22] IEC 61508 (all parts), Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems

[23] IEC 61508-1: 2010, Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety related systems − Part 1: General requirements

[24] IEC 61508-6, Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems − Part 6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3

[25] IEC 62061 :2005, Safety of machinery − Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems

[26] IEC 62061/AMD1 :2012

[27] IEC 62061/AMD2:2015
[28] IEC 62305-1, Protection against lightning − Part 1: General principles
[29] CNS 15347:2010 機械安全－設計之一般原則－風險評鑑及風險降低
[30] ISO 3010, Basis for design of structures − Seismic actions on structures
[31] ISO 8930: 1987, General principles on reliability for structures − List of equivalent terms
[31] CNS 12681 品質管理系統－要求事項
[32] CNS 16068-1:2015 機械安全－控制系統安全相關部分－第 1 部：設計之一般原則
[33] CNS 16068-2 機械安全－控制系統安全相關部分－第 2 部：確證
[34] EN 1993-1-6:2007, Design of steel structure − Part 1-6: Strength and stability of shell structure
[35] IEA Recommendation 11, Wind speed measurement and use of cup anemometry, 1st Ed. 1999

相對應國際標準

IEC 61400-1:2019/Cor.1:2019 Wind turbines − Part 1: Design requirements

中華民國國家標準
發行機關：經濟部標準檢驗局
局　　址：臺北市中正區濟南路一段四號
電　　話：(02)2343-1700
網　　址：https://www.bsmi.gov.tw
編輯排版：文山彩藝有限公司
銷售網址：https://www.cnsonline.com.tw
定　　價：依上開銷售網站公告之售價為準
GPN　　：4911300047
本標準非經經濟部標準檢驗局同意不得翻印