

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.021

1 000 kV 特高压变电构架风力系数及风荷载竖向分布

唐浩^{1,2}, 赵杰³, 李方慧⁴, 支旭东⁵

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 安徽建工检测科技集团有限公司, 安徽 合肥 230000; 4. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 5. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:1 000 kV 特高压变电构架是我国新型变电站设备, 风荷载及其效应影响其结构设计。文章通过高频天平测力风洞试验数据计算整体与节段结构体轴和风轴上的风力系数, 获得结构风荷载的竖向分布, 探究地貌和风向角对风力系数和风荷载竖向分布的影响规律, 并提出风荷载最不利分布的计算方法。研究表明: 均匀流和 A 类地貌对结构体轴和风轴风力系数影响最大; 在频域分析中, 紊流场风力系数功率谱密度大于均匀流场对应值, 3 类风场的第 1 阶频率均在 0.3~0.4 Hz; 同时 B 类地貌下结构风荷载竖向分布大于 A 类地貌分布且结构最不利位置在 31、70 m 高度, 0°和 90°风向对结构风力系数、阻力系数、升力系数和风荷载竖向分布较为不利。

关键词:特高压变电构架; 风洞试验; 整体与节段; 风力系数; 风荷载竖向分布

中图分类号:TU392.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0417-09

Wind force coefficient and vertical distribution of wind loads on 1 000 kV UHV substation frame

TANG Hao^{1,2}, ZHAO Jie³, LI Fanghui⁴, ZHI Xudong⁵

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Anhui Construction Engineering Inspection Technology Group Co., Ltd., Hefei 230000, China; 4. College of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150086, China; 5. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract:The 1 000 kV ultra-high voltage(UHV) substation frame is a new type of substation equipment in China, and its structural design is influenced by wind load and its effects. This paper calculates the wind coefficients at the body axis and wind axis of the integral and segmented structure by using the high-frequency force balance wind tunnel test data, and then obtains the vertical distribution of wind loads on the structure, and examines the effects of the terrains and the wind incidence angles on the wind force coefficients and the vertical distribution of wind loads. The calculation method of the most unfavorable distribution of wind loads is proposed. The research shows that the uniform flow and terrain A have the greatest influence on the wind coefficients at the structural body axis and wind axis. In the frequency domain analysis, the power spectral densities of the wind force coefficients of the turbulent field are greater than the corresponding values of the uniform flow field, and the first-order frequencies of the three types of wind fields are in the range of 0.3 Hz to 0.4 Hz. At the same time, the vertical distribution of wind loads on the structure under terrain B is greater than that under

收稿日期:2024-11-04;修回日期:2025-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378154);山东电力工程咨询院有限公司资助项目(37-2018-24-K0005)

作者简介:唐浩(1995—),男,湖南邵阳人,湖南大学博士生;

赵杰(1994—),男,安徽合肥人,安徽建工检测科技集团有限公司工程师,通信作者,E-mail:1042588867@qq.com;

李方慧(1978—),男,黑龙江肇源人,博士,黑龙江大学教授,硕士生导师;

支旭东(1977—),男,黑龙江黑河人,博士,哈尔滨工业大学教授,博士生导师。

terrain A, and the most unfavorable positions of the structure are at heights of 31 m and 70 m. The 0° and 90° wind direction are unfavorable to the structural wind force coefficients, drag coefficients, lift coefficients and vertical distribution of wind loads.

Key words: ultra-high voltage(UHV) substation frame; wind tunnel test; integrality and segments; wind force coefficient; vertical distribution of wind load

1 000 kV 特高压变电构架在高度、跨度及承受荷载能力等方面均超出了 500 kV 等一系列较低电压等级输电塔和变电构架的技术要求,但此类结构具有高柔、轻质和阻尼小的特点,风荷载是结构设计中的主要甚至是决定性的控制荷载,其风力系数及风荷载竖向分布研究为结构抗风设计及风致响应研究提供参考依据。近年来,学者们对 1 000 kV 特高压变电构架等特高压输电塔线结构风力系数和风荷载竖向分布展开一系列研究。在风力系数方面,文献[1]利用同步测压风洞试验归纳不同风向下 110 kV 输电塔塔身和横担各杆件的体型系数,并与国内外相关规范值进行比较;文献[2]通过风洞试验获得 220 kV 输电塔总体或局部结构的阻力系数和偏风荷载系数并与仿真模拟计算结果相互验证,同时与规范值进行对比;文献[3-5]应用高频天平测力技术,得到 500 kV 单回路和多回路输电塔塔头和横担结构不同风场条件下的风力系数;文献[6]在不同平均风速下对 500 kV 输电塔横担模型进行风洞试验,获得结构在风向轴上的阻力系数、偏斜风荷载系数、横向和纵向风荷载分布系数;文献[7-8]通过多平衡同步测力风洞试验,测量 800 kV 输电塔及横臂在不同风向角和结构倾斜角下的阻力系数;文献[9-10]通过高频测力天平风洞试验获得不同风向下 1 000 kV 输电塔及变电构架整体和节段结构的气动力系数;文献[11-14]通过测力及测压风洞试验分析风向角、遮挡效应、雷诺数、湍流度、铅垂面倾角和风洞阻塞度对多种输电塔结构杆件阻力系数的影响规律并提出修正系数及拟合公式,同时与国内外规范进行对比;文献[15]通过底座天平测力风洞试验得到格构式输电塔、通讯塔和电视塔顺、横、扭三维广义荷载谱和均方根广义力系数。

上述文献对不同风场条件下输电塔结构的阻力系数展开了研究,但对结构在实际风场 A 类和 B 类地貌下的平均和脉动阻力系数、升力系数的研究较为有限。在风荷载竖向分布方面,文献[16]通过复杂格构式群塔结构节段刚性测压试验,获得结构典型部位和整体结构风压分布的基

本规律以及风力沿各塔高度的分布规律;文献[17-18]将广州新电视塔分成 19 个节段进行节段模型测力风洞试验,以此获得结构风力沿塔高度的分布并计算其风致效应;文献[19]通过高频天平测力试验获得河南省电视塔气动力系数时程,并将其转化为结构各个高度处的风荷载时程,采用时程分析法进行风振响应分析。上述风荷载竖向分布研究主要以电视塔结构为主,对 1 000 kV 特高压变电构架结构涉及较少。

基于此,本文利用 1 000 kV 特高压变电构架节段及整体模型的高频天平测力风洞试验数据,对均匀流、A 类和 B 类地貌下整体结构体轴的平均、脉动风力系数和风轴的平均、脉动阻力系数及平均、脉动升力系数进行分析,并基于节段模型风力系数时程获得整体结构风力沿结构高度的分布情况,考察风场条件和风向角对风力系数、风荷载竖向分布的影响规律,同时提出 A 类和 B 类地貌下结构最不利风荷载沿结构高度变化的函数表达式。

1 风洞试验

1 000 kV 特高压变电构架高 70 m、宽 49 m,主要由 2 个塔架和中间横梁结构组成,试验模型分为塔架节段模型和整体结构模型,缩尺比分别为 1:50 和 1:100,塔架节段模型分段示意图如图 1 所示。

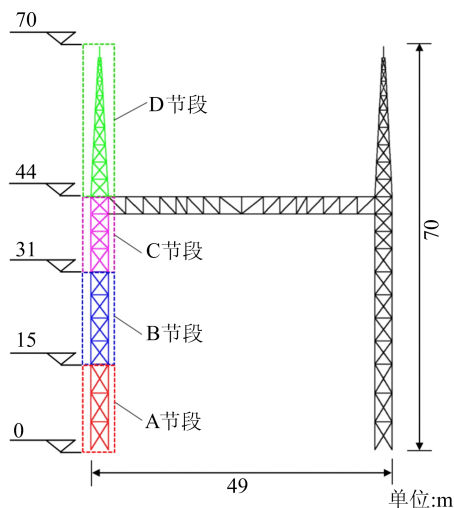


图 1 节段划分示意图

A、B、C、D 节段及整体结构的风洞试验模型如图 2 所示。节段和整体结构试验模型均为 SLA 光敏树脂材料 3D 打印的刚性模型。

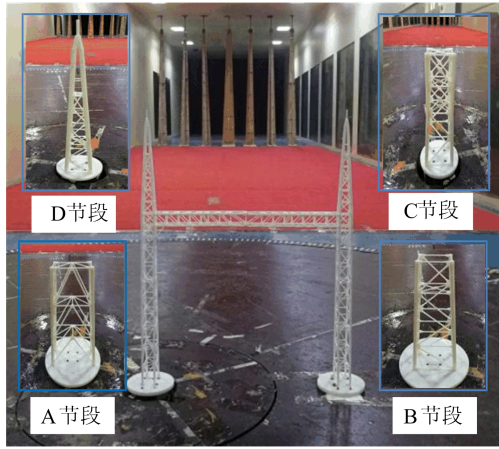


图 2 节段及整体结构风洞试验模型

风洞试验在哈尔滨工业大学风洞与浪槽联合实验室的小试验段进行,小试验段长 25.0 m、宽 4.0 m、高 3.0 m,且最大风速可达 44 m/s。试验使用 Cobra Probe 眼镜蛇三维脉动风速仪测量风

速,利用 ATI delta ip68 si-660-60 六分力传感器天平采集基底力数据,采样频率和时间分别为 1 000 Hz 和 60 s。由于构架结构具有对称性,本文进行 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°(7 个风向角)的天平测力试验,风向角及坐标系 X、Y 的方向规定如图 3 所示,弯矩方向由右手法则确定。

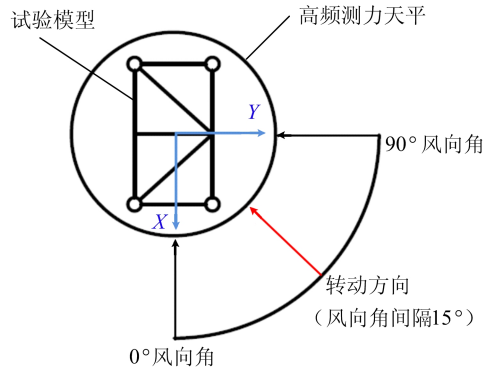
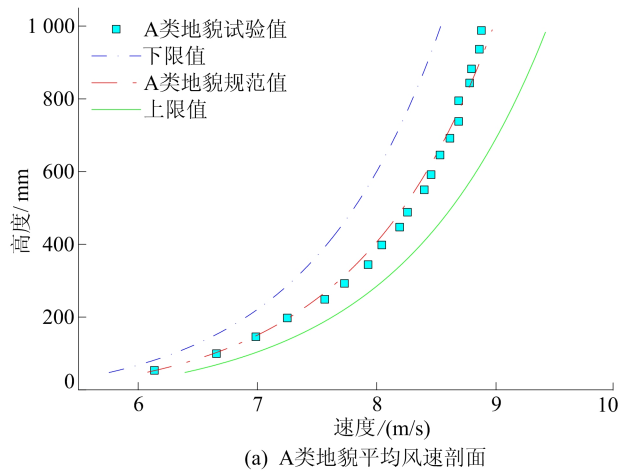
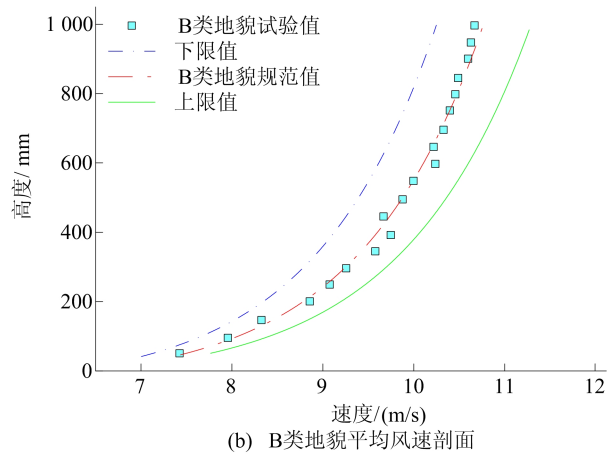


图 3 风向角及坐标系示意图

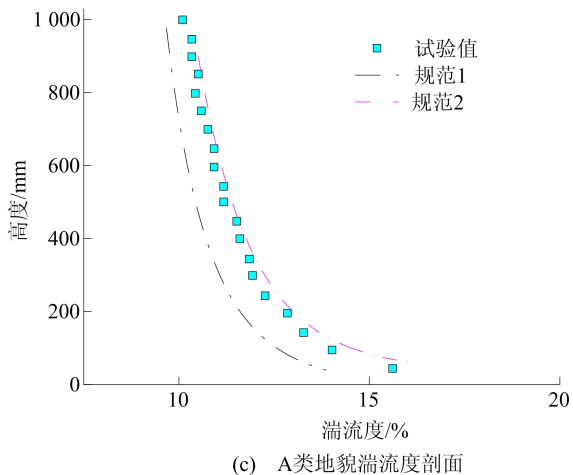
风洞模拟的 A 类和 B 类地貌平均风速和湍流度剖面如图 4 所示。



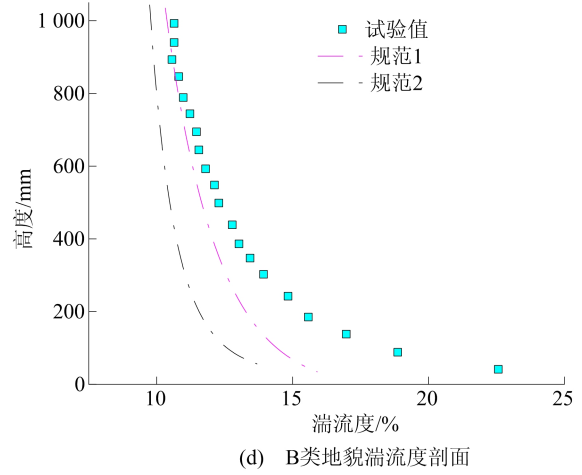
(a) A 类地貌平均风速剖面



(b) B 类地貌平均风速剖面



(c) A 类地貌湍流度剖面



(d) B 类地貌湍流度剖面

图 4 A 类、B 类地貌风场平均风速和湍流度剖面

根据不同高度处的风速时程计算对应的风速平均值,并将平均风速剖面拟合曲线与规范对比,由图 4 可知,试验拟合平均风速剖面基本满足试验要求,同时试验风场模拟的湍流度剖面同规范接近,基本符合不同类别风场模拟条件。

2 风力系数

利用刚性模型同步测力试验获得基底反力数据,计算体轴上平均风力系数和脉动风力系数,进而按照三角投影的方法计算风轴上的平均阻力、升力系数及脉动阻力、升力系数,相关计算公式为:

$$C_x^m = \frac{F_x^m}{0.5\rho U^2 S}, C_y^m = \frac{F_y^m}{0.5\rho U^2 S} \quad (1)$$

$$C_x^\sigma = \frac{F_x^\sigma}{0.5\rho U^2 S}, C_y^\sigma = \frac{F_y^\sigma}{0.5\rho U^2 S} \quad (2)$$

$$C_D^m = -C_x^m \cos \beta + C_y^m \sin \beta, \\ C_L^m = C_x^m \sin \beta - C_y^m \cos \beta \quad (3)$$

$$C_D^\sigma = -C_x^\sigma \cos \beta + C_y^\sigma \sin \beta, \\ C_L^\sigma = C_x^\sigma \sin \beta - C_y^\sigma \cos \beta \quad (4)$$

其中: C_x^m 、 C_y^m 、 C_x^σ 、 C_y^σ 分别为体轴 X、Y 方向的平均

风力系数和脉动风力系数; C_D^m 、 C_L^m 、 C_D^σ 、 C_L^σ 分别为风轴上顺风向或横风向的平均阻力和升力系数及脉动阻力和升力系数; F_x^m 、 F_y^m 、 F_x^σ 、 F_y^σ 分别为模型 X、Y 方向的基底剪力时程均值和均方根; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ;S 为迎风面积; U 为参考风速,均匀流场 $U=14.1 \text{ m/s}$; β 为风向角。

2.1 体轴风力系数

整体结构在均匀流、A 类和 B 类地貌下 X、Y 方向体轴平均风力系数和脉动风力系数如图 5 所示。由图 5 可知,平均风力系数随着风向角的增大而增加,而脉动风力系数随风向角先减后增,主要原因是结构挡风面积随风向角先增后减。在 90° 风向角时,3 类风场平均风力系数和脉动风力系数均最大,均匀流、A 类、B 类 3 类地貌的平均风力系数 C_x^m 和脉动风力系数 C_x^σ 比值分别为 $1.00 : 0.73 : 0.27$ 和 $1.00 : 1.95 : 0.75$,3 类地貌的 C_y^m 和 C_y^σ 比值分别为 $1.00 : 0.71 : 0.28$ 和 $1.00 : 2.61 : 1.06$ 。说明均匀流场对平均风力系数影响最大,而 A 类风场对脉动风力系数影响最大。

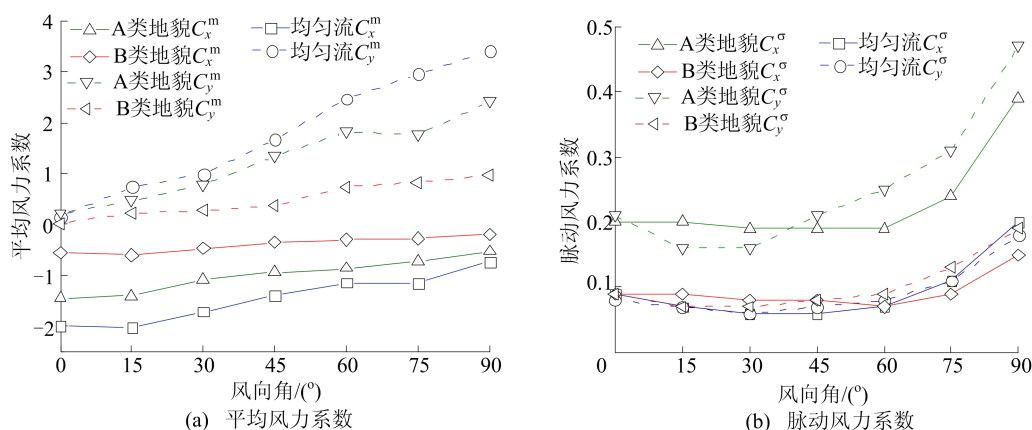


图 5 整体结构体轴平均风力系数和脉动风力系数

2.2 风轴风力系数

均匀流、A 类和 B 类地貌下整体结构平均阻力系数 C_D^m 和脉动阻力系数 C_D^σ 随风向角变化趋势如图 6 所示。从图 6 可以看出,3 类地貌下 C_D^m 均随风向角先减小后增大且在 90° 达到最大,均匀流场各风向角 C_D^m 大于 A 类和 B 类风场对应值。均匀流和 B 类风场下的脉动阻力系数较为接近,A 类地貌对脉动阻力系数影响最大。 90° 风向角时,均匀流、A 类、B 类这 3 类地貌的 C_D^m 和 C_D^σ 比值分别为 $1.00 : 0.71 : 0.28$ 和 $1.00 : 2.61 : 1.06$,对平均阻力系数和脉动阻力系数影响最大的地貌分别为均匀流和 A 类风场地貌。

整体结构在均匀流、A 类和 B 类地貌下平均

升力系数 C_L^m 和脉动升力系数 C_L^σ 随风向角变化如图 7 所示。由图 7 可知,3 类地貌下 C_L^m 随风向角先减后增在 0° 时最大, C_L^σ 随风向角增大而增加在 90° 达到最大。

比较图 6 可知,升力系数和阻力系数的变化趋势与结构升力和阻力的相对关系比较契合,从数值上(不考虑方向)发现,结构平均阻力系数在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 达到最小,而平均升力系数在此区间达到最大, 60° 风向角时均匀流、A 类、B 类 3 类地貌 C_L^m 的比值为 $1.00 : 0.74 : 0.25$,均匀流场对 C_L^m 影响较大。均匀流和 B 类地貌各风向角下的 C_L^σ 较接近,A 类地貌对 C_L^σ 的影响较大。

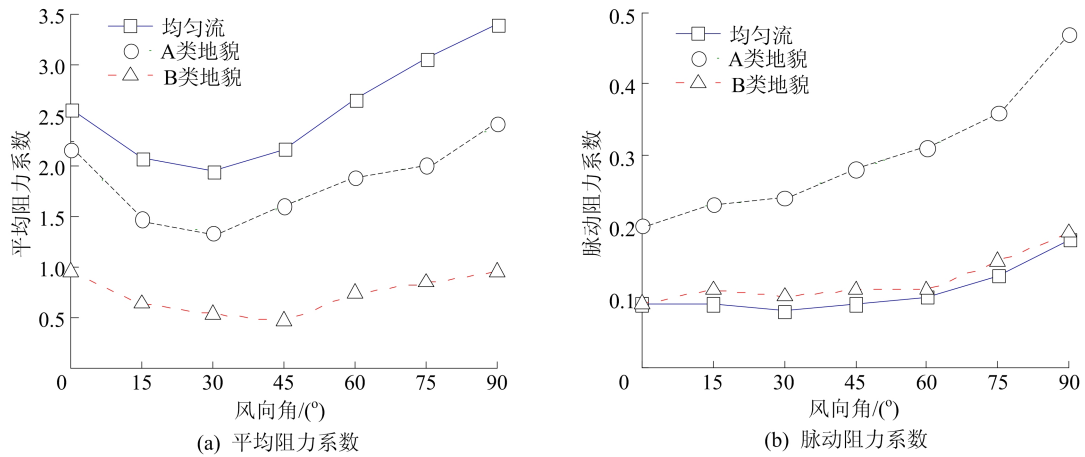


图 6 整体结构风轴平均阻力系数和脉动阻力系数

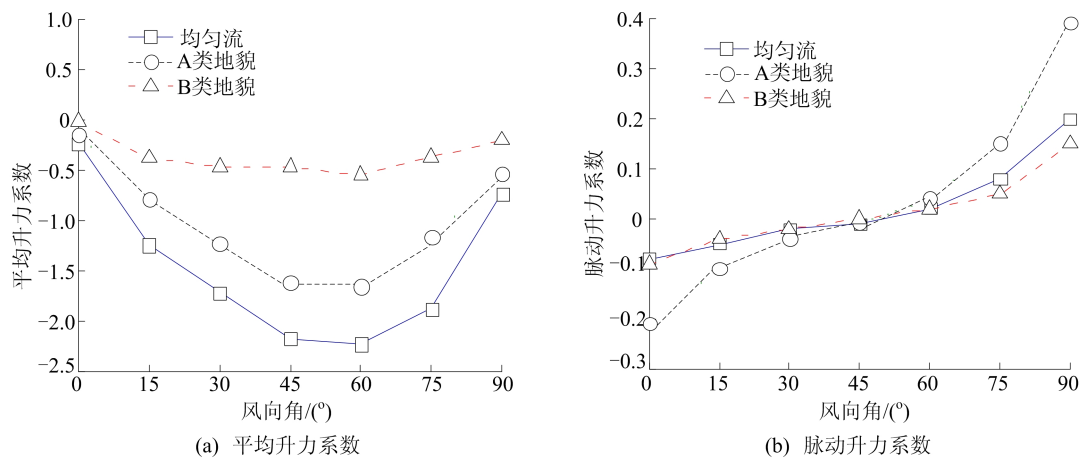


图 7 整体结构风轴平均升力系数和脉动升力系数

2.3 功率谱分析

3 类地貌在 90°风向角下整体结构 X、Y 方向体轴风力系数 C_x 和 C_y 的功率谱密度如图 8 所示。

从图 8 可以看出,A 类和 B 类地貌的风力系

数功率谱密度较接近,且基本高于均匀流场风力系数功率谱,这是由于随着湍流度的增加,相同频率下的能量也增加。 C_x 和 C_y 功率谱密度 3 类地貌下的第 1 阶频率均比较接近,均分布在 0.3~0.4 Hz 范围。

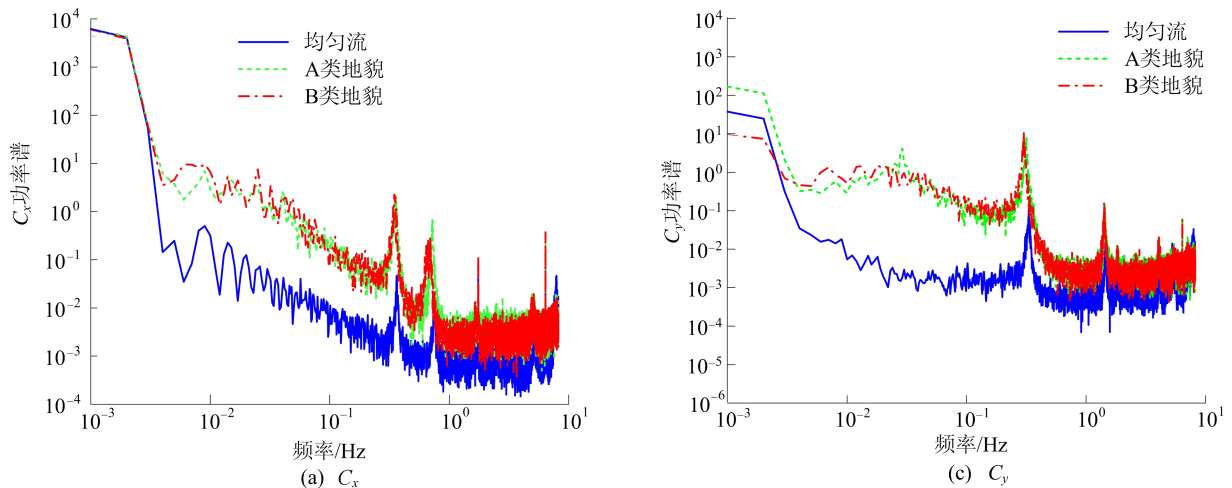


图 8 不同地貌下整体结构体轴风力系数功率谱

3 风荷载竖向分布

1 000 kV 特高压变电构架实际风荷载变化复杂,影响因素较多。但此类结构具有轻柔、高耸的特点,风荷载的竖向分布十分重要且能用于后续的风致响应计算。本文利用各节段的气动力系数时程计算每个塔架结构不同高度处的风荷载时程,进而可以确定沿坐标轴 X 和 Y 方向原型结构各段上的风力时程 $F_x(t)$ 和 $F_y(t)$,计算公式为:

$$F_x(t) = \frac{1}{2}\rho U_z^2 HDC_x(t) \quad (5)$$

$$F_y(t) = \frac{1}{2}\rho U_z^2 HDC_y(t) \quad (6)$$

$$U_z = U_G(Z/H_G)^\alpha \quad (7)$$

其中: D 为原型结构的底部宽度; H 为 Z 处的高度; $C_x(t)$ 和 $C_y(t)$ 分别为 X 和 Y 方向节段结构的体轴风力系数时程; U_z 为实际风场中 Z 处的风速; H_G 和 U_G 分别为梯度风高度和梯度风速; α 为平均风速剖面的幂函数指数,A 类和 B 类地貌分别取 0.12 和 0.16。

以下通过对比两类地貌 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角下风荷载 $F_x(t)$ 和 $F_y(t)$ 极值(最不利值)沿结构高度的分布来考察风向角对风荷载竖向分布的影响,并进一步比较最不利风向角下 $F_x(t)$ 和 $F_y(t)$ 的均值、极小值和极大值沿塔架高度分布规律以研究地貌类型对风荷载分布的影响,最后基于 2 类地貌最不利风向角下风荷载各高度处的最不利值提出 F_x 和 F_y 沿高度分布的拟合函数。

3.1 风向角的影响

A 类、B 类地貌 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角下 X 和 Y 方向风荷载极值沿塔架高度的分布情况分别如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可知,在 A 类和 B 类地貌下,各个节段风荷载 F_x 均在 0° 风向角达到最大,而 F_y 均在 90° 风向角达到最大。结构在 15~31 m(B 节段)高度风荷载分布有突变,风荷载稍有增大,在 31~44 m(C 节段)高度风荷载有所减小。其主要原因是 B 节段处杆件截面变小,结构刚度降低,而 C 节段由于横梁作用使其刚度增加。

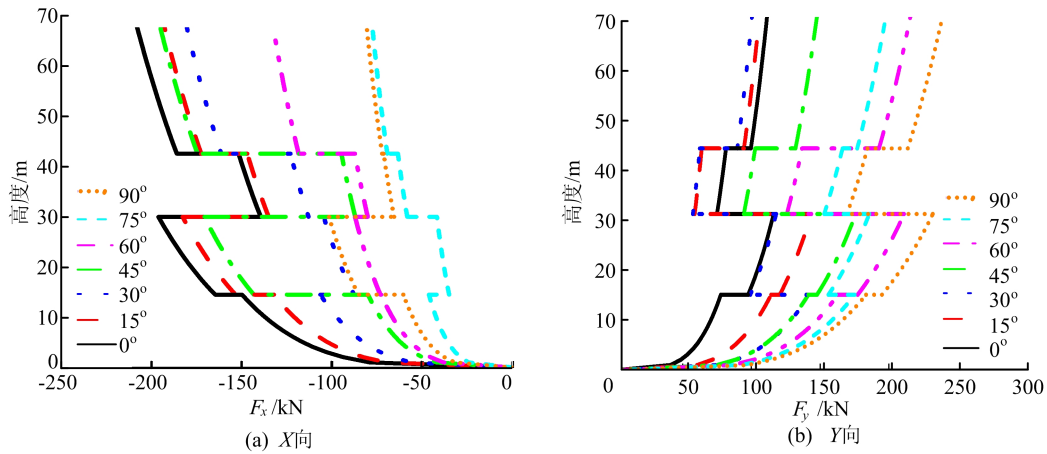


图 9 A 类地貌 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角下结构 X 方向和 Y 方向风荷载分布

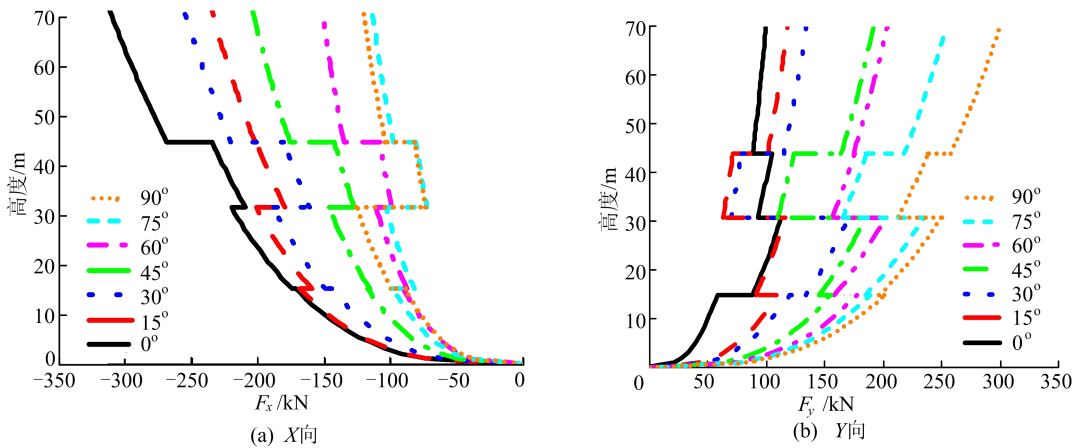


图 10 B 类地貌 $0^\circ\sim 90^\circ$ 风向角下结构 X 方向和 Y 方向风荷载分布

在 A 类和 B 类地貌各风向角下风荷载最不利值及其发生位置见表 1、表 2 所列。由表 1、表 2

可知,结构风荷载最不利值主要发生在 70、31 m 处,结构设计时应该引起注意。

表 1 A 类地貌各风向角下风荷载最不利值及其位置

参数	风向角						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
F_x 最不利值/kN	-208.26	-193.20	-180.77	-195.45	-132.90	-78.03	-102.03
F_x 最不利值对应位置/m	70	70	70	70	70	70	31
F_y 最不利值/kN	116.16	143.56	142.13	175.88	215.66	197.89	239.08
F_y 最不利值对应位置/m	31	31	31	31	70	70	70

表 2 B 类地貌各风向角下风荷载最不利值及其位置

参数	风向角						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
F_x 最不利值/kN	-310.94	-234.33	-255.02	-203.69	-151.04	-113.63	-125.14
F_x 最不利值对应位置/m	70	70	70	70	70	70	31
F_y 最不利值/kN	118.77	124.14	175.90	196.94	208.91	259.14	304.94
F_y 最不利值对应位置/m	31	70	31	70	70	70	70

3.2 地貌的影响

基于上述风向角对风荷载影响分析可知,0°和 90°风向角对结构风荷载分布有较大影响,以下将 2 类地貌 0°和 90°风向角下沿塔架高度分布

的风荷载均值、极小值和极大值进行对比分析。

A 类和 B 类地貌下 0°风向角时风荷载的均值、极小值和极大值沿塔架高度的分布情况如图 11 所示。

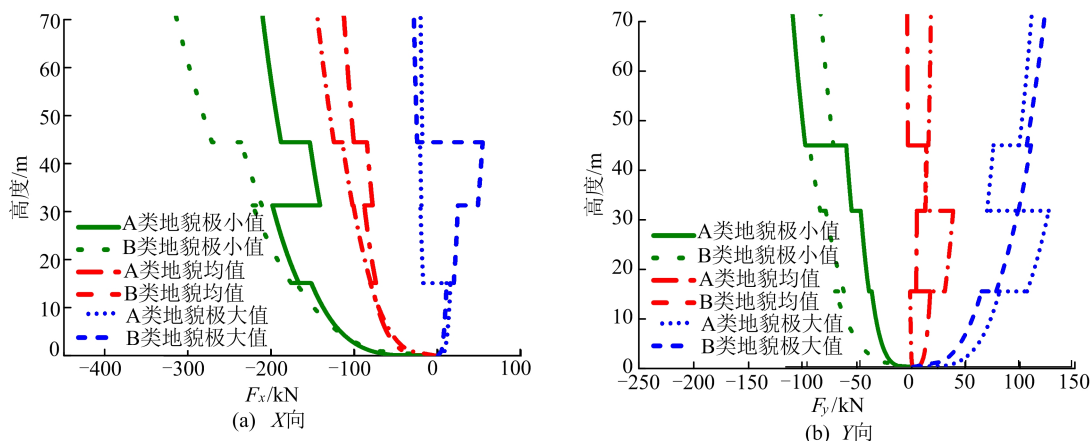


图 11 A 类和 B 类地貌 0°风向角下塔架风荷载沿高度分布

从图 11 可以看出: F_x 在 A 类和 B 类地貌下沿高度分布的最大值之比为 1.00 : 1.49,且在 B 类地貌 70 m 高度处 2 类地貌最大值均为 310.94 kN; F_y 在 2 类地貌下沿高度分布最大值之比为 1.00 : 0.88,且在 B 类地貌 31 m 高度处 2 类地貌最大值均为 118.77 kN。

2 类紊流场下 90°风向角时风荷载均值、极小值和极大值沿塔架高度分布情况如图 12 所示。

从图 12 可以看出: F_x 和 F_y 风荷载的最大值分别为 125.14、304.94 kN,均出现在 B 类地貌下 70 m 高度处; F_x 在 A 类地貌和 B 类地貌下最大值之比为 1.00 : 1.23, F_y 在 2 类地貌下最大值之比为 1.00 : 1.28。

分析可得,B 类地貌对于结构风荷载竖向分布的影响大于 A 类地貌,且结构最不利位置为 31、70 m 高度处。

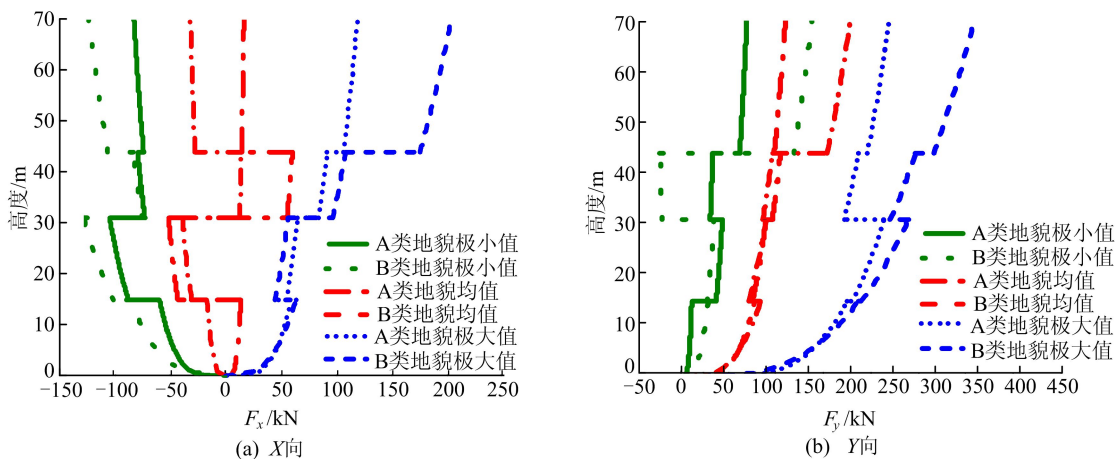


图 12 A类和B类地貌 90°风向角下塔架风荷载沿高度分布

3.3 竖向分布计算方法

为方便分析 1 000 kV 特高压变电构架风荷载竖向分布情况和结构风致响应,根据上述分析结果将 2 类地貌下结构最不利风向下结构各高度

处的最不利风荷载值进行非线性拟合,得出 2 类地貌下结构最不利风荷载沿结构高度变化的函数表达式。拟合曲线如图 13 所示,具体表达式见表 3所列。

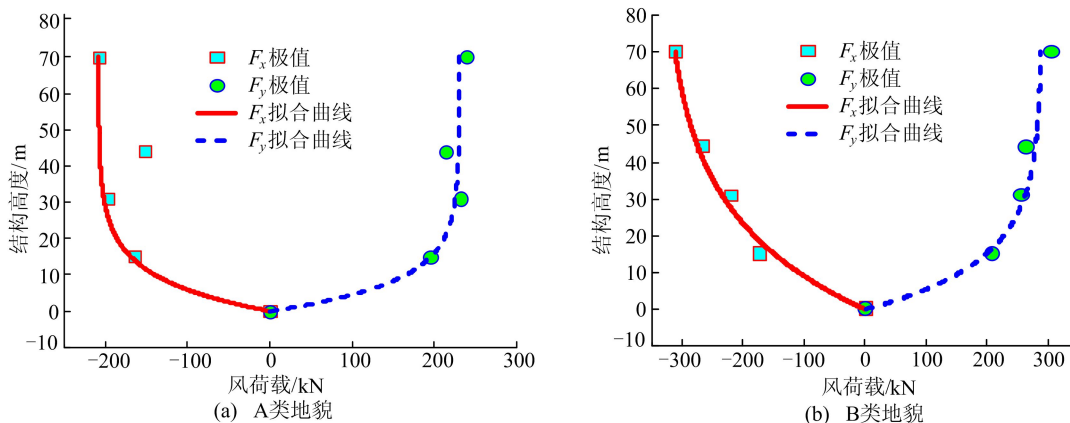


图 13 A类和B类地貌下结构最不利风荷载竖向分布拟合曲线

表 3 A类和B类地貌下结构风荷载最不利竖向分布拟合曲线表达式

风荷载	A类地貌	B类地貌	高度/m
F_x	$F_x(H)=208.34\exp(-H/8.99)-208.34$	$F_x(H)=332.00\exp(-H/25.38)-332.00$	0~70
F_y	$F_y(H)=-229.90\exp(-H/7.87)+229.30$	$F_y(H)=-289.26\exp(-H/13.04)+310.71$	

注: H 为结构高度; $F_x(H)$ 和 $F_y(H)$ 分别为结构高度 H 处 X 方向和 Y 方向最不利风荷载值。

4 结 论

本文基于高频天平测力风洞试验对 1 000 kV 特高压变电构架结构体轴和风轴上的风力系数及结构风荷载竖向分布进行研究,探究地貌和风向角对二者的影响,得到如下结论:

1) 地貌对结构体轴和风轴风力系数影响最大的是均匀流和 A 类地貌,风向角影响最大的是

0°和 90°风向角。90°风向角下均匀流、A 类、B 类 3 类地貌平均阻力和脉动阻力系数比值分别为 1.00 : 0.71 : 0.28 和 1.00 : 2.61 : 1.06。

2) 均匀流、A 类和 B 类地貌风力系数功率谱密度的第 1 阶频率比较接近,均在 0.3~0.4 Hz 范围,紊流场下功率谱密度较为接近,且高于对应的均匀流场功率谱密度。

3) 在 A 类和 B 类地貌下,各节段风荷载 F_x

均在 0° 风向角达到最大,而 F_y 均在 90° 风向角达到最大,结构最不利位置为31.70 m高度处。

4) 风荷载 F_x 在A类地貌和B类地貌下竖向分布最大值之比为1.00:1.23, F_y 最大值之比为1.00:1.28,B类地貌对于结构风荷载竖向分布的影响大于A类地貌。

[参 考 文 献]

- [1] 牛华伟,刘淦彬,杨风利,等. 钢管-角钢组合输电塔杆件体型系数及背风面风荷载折减系数的风洞试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):44-53.
- [2] YANG F L, DANG H X, NIU H W, et al. Wind tunnel tests on wind loads acting on an angled steel triangular transmission tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2016,156:93-103.
- [3] 张庆华,顾明,黄鹏. 500kV 单回路输电塔塔头风荷载计算模型研究[J]. 振动与冲击,2009,28(12):151-154.
- [4] 张庆华,马文勇. 多回路高压输电塔典型横担结构风力系数风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2016,35(16):158-163.
- [5] 张宏杰,黄阳,周奇. 圆管输电塔风荷载多天平同步测力风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(22):137-143.
- [6] YANG F L, YANG J B, NIU H W, et al. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2015,140:10-18.
- [7] ZHOU Q, MA B, ZHU Q, et al. Investigation on wind loads on angle-steel cross-arms of lattice transmission towers via direct force measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2019,191:117-126.
- [8] ZHOU Q, ZHANG H J, MA B, et al. Wind loads on transmission tower bodies under skew winds with both yaw and tilt angles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2019,187:48-60.
- [9] 邓洪洲,张建明,帅群,等. 输电钢管塔体型系数风洞试验研究[J]. 电网技术,2010,34(9):190-194.
- [10] 李方慧,唐浩,支旭东. 1 000 kV 特高压变电构架风荷载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(4):129-135.
- [11] 杨风利,黄国,牛华伟,等. 输电塔角钢杆件阻力系数及背风面遮挡效应研究[J]. 土木工程学报,2019,52(11):25-36.
- [12] 杨风利,牛华伟. 输电塔钢管阻力系数及背风面遮挡效应试验研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(10):3632-3644.
- [13] 沈国辉,项国通,邢月龙,等. 2种风场下格构式圆钢塔的天平测力试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(4):704-710.
- [14] CWLIO F C, NICHOLAS I, REYOLANDO M B. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(8):1007-1022.
- [15] 梁枢果,邹良浩,赵林,等. 格构式塔架三维动力风荷载的风洞试验研究[J]. 空气动力学学报,2007,25(3):311-318.
- [16] 顾明,马文勇,黄鹏,等. 复杂群塔风荷载试验研究[J]. 空气动力学学报,2009,27(2):141-146.
- [17] 顾明,黄鹏,周恒毅,等. 广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 I: 风洞试验[J]. 土木工程学报,2009,42(7):8-13.
- [18] ZHOU X Y, HUANG P, GU M, et al. Wind loads and wind-induced responses of Guangzhou New TV Tower[J]. Advances in Structural Engineering,2010,13(4):707-726.
- [19] 禹慧. 复杂高耸结构风洞试验及风振响应研究[D]. 上海:同济大学,2007.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 416 页)

- [5] 周长东,田腾,吕西林,等. 预应力碳纤维条带加固混凝土圆形墩柱恢复力模型试验研究[J]. 工程力学,2013,30(2):125-134.
- [6] 张鹏,孙仁中,邓宇,等. 型钢混凝土受拉柱恢复力计算模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021(3):549-557.
- [7] 郭子雄,杨勇. 恢复力模型研究现状及存在问题[J]. 世界地震工程,2004,20(4):47-51.
- [8] 殷小波,吕西林,卢文胜. 配置十字型钢的型钢混凝土柱恢复力模型[J]. 工程力学,2014,31(1):97-103.
- [9] 张月,李冬生. 耗能螺栓连接装配式钢管混凝土柱-RC梁节点恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(4):309-318.
- [10] 王先铁,谢川东,罗遥,等. 带楔形装置的自复位方钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(9):52-61.
- [11] 郑书朔,王燕,王修军,等. 矩形钢管柱与H型钢梁单边螺栓连接节点的抗震性能与恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(5):168-179.

(责任编辑 吴亮)