

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.142



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高海拔地区长横担输电塔-线体系覆冰 风致动力响应

付建明¹, 张丽娟¹, 马一丹¹, 齐永杰², 刘士远², 孟祥瑞², 刘玉萍², 田利²
(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

摘要:输电线路易受大风、覆冰等多种灾害的影响而发生破坏,严重威胁能源安全。目前对于输电线路风灾、冰灾的研究多集中于低海拔地区,而众多西电东送输电线路跨越广袤的高原地区,其中长横担输电塔占有较大比重。为了保障高海拔地区输电线路安全运行,依托某±800 kV 特高压直流输电工程,建立长横担输电塔-线体系精细化模型,基于高海拔地区覆冰条件,分别建立输电塔和输电线的覆冰工况;考虑高海拔地区空气密度、地形地貌等环境因素的影响,对比分析了高、低海拔地区的风荷载特征;基于高海拔地区覆冰工况和风荷载特点,开展长横担输电塔-线体系的风振响应分析。结果表明,高海拔地区风剖面较为平缓,长横担输电塔-线体系横担处位移响应大于塔顶,冰-风荷载作用下结构最大位移响应均出现在横担端部中点处。

关键词:高海拔地区;长横担;输电塔-线体系;覆冰;风致动力响应

中图分类号:TM753;TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)02-0226-10

Wind-driven dynamic response of ice-covered long cross-bar transmission tower-line system in high altitude areas

FU Jianming¹, ZHANG Lijuan¹, MA Yidan¹, QI Yongjie², LIU Shiyuan²,
MENG Xiangru², LIU Yuping², TIAN Li²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd., Jinan 250013, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China)

Abstract: Transmission lines are vulnerable to impairment by a variety of disasters including high winds and ice cover, which pose a significant threat to energy security. At present, studies on wind and ice disasters on transmission lines are mostly focused on low-altitude areas. However, many west-east transmission lines cross vast plateau areas, in which long cross-bar transmission towers account for a larger proportion. In order to ensure the safe operation of transmission lines in high-altitude areas, this paper establishes a long cross-bar transmission tower-line system refined model relying on a ±800 kV UHV DC transmission project, based on

收稿日期:2023-09-06

基金项目:国家自然科学基金(52178489);山东省杰出青年科学基金(ZR2022JQ27)

作者简介:付建明(1982-),男,高级工程师,主要从事输电线路设计研究,E-mail:fujm0312@163.com。

田利(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:tianli@sdu.edu.cn。

Received: 2023-09-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52178489); Shandong Provincial Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No. ZR2022JQ27)

Author brief: FU Jianming (1982-), senior engineer, main research interest: transmission line design, E-mail: fujm0312@163.com.

TIAN Li (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: tianli@sdu.edu.cn.

the ice-covering conditions in high-altitude areas, ice-covered working conditions of transmission towers and transmission lines are established respectively. Concurrently, the wind load characteristics of high-altitude and low-altitude areas are compared and analyzed, taking into account the influence of environmental factors such as air density, topography and geomorphology in high-altitude areas. Finally, based on the ice-covering conditions and wind load characteristics in high-altitude areas, wind-induced vibration response analysis of the long cross-bar transmission tower-line system is carried out. The findings indicate that the wind profile at elevated altitudes is comparatively gentle, the displacement response at the cross-bar of the long cross-bar transmission tower-line system is more pronounced than that at the tower's summit, and the maximum displacement response of the structure under ice-wind loads occurs at the midpoint of the cross-bar end.

Keywords: high-altitude areas; long cross-bar; transmission tower-line system; ice cover; wind-driven dynamic response

近年来,输电线路的覆盖范围不断扩大,远距离跨区送电能力显著增强,越来越多的输电线路途经高海拔地区(海拔3 000 m以上)^[1]。高海拔地区的气温、湿度和空气密度与其他地区存在较大差异,输电线路负荷大,运行条件恶劣,大风、大雪、低温天气出现频繁,极易发生由于覆冰过载和不均匀脱冰等引发的事故,而目前对高海拔地区特高压输电线路冰-风荷载作用下的动力响应研究尚存在空白,增加了高海拔地区输电线路运行的不确定性^[2-3]。

学者们对冰-风荷载作用下输电塔线体系的响应规律和安全性开展了系列研究,理论推导^[4]、现场实测^[5-6]、等尺或缩尺物理模型试验模拟^[7-8]、基于有限元理论的数值模拟^[9-12]是研究覆冰输电塔-线体系的主要方法。基于有限元理论的数值模拟研究方法以其模拟结果准确、成本低、参数设置便捷等优势成为了首要研究方法^[13]。基于建立的有限元模型,通过分析实测数据和覆冰机理,研究了不同覆冰形状^[14-15]、不均匀覆冰^[16]、脱冰^[17-18]等对输电塔-线体系的影响,认为覆冰是导致输电塔-线体系出现过载破坏的主要原因之一,覆冰荷载过大,不均匀覆冰,脱冰冲击等都有可能对输电塔-线体系发生破坏^[19]。同时,覆冰增加了导地线迎风面积,冰荷载和风荷载共同作用大大增加了输电塔线体系破坏风险。学者们研究了冰-风荷载作用下输电塔-线体系的整体刚度、承载能力、应力分布等,认为输电塔-线体系失效缘故多为冰-风荷载作用导致过载及不均匀覆冰使得塔承受不平衡张力过大^[13,20]。高海拔地区输电线路建设已初具规模,如何保障冰-风荷载作用下高海拔地区输电线路运行安全至关重要。基于平原和高海拔地区不同地貌下的1.5 a实测脉动风速,杨风利等^[21]研究了高海拔风场特性对杆塔和导地线风压高度变化系数以及风振系数的影响规

律。王新军等^[22]结合现场观测资料、历史气象资料等,对青海省高海拔地区导线覆冰机理、覆冰受灾情况以及覆冰特点进行了详细地分析论述。杨风利等^[23]研究了海拔高度4 300 m以上的输电线路走廊附近的气压、气温、湿度数据,明确了气压、气温和湿度对高海拔空气密度的影响差异。曹立志^[24]通过对高海拔地区冰-风荷载的长期观测发现,高海拔地区风场特征、覆冰特点等与低海拔地区有较大不同。

然而,目前关于高海拔地区输电塔-线体系的研究大多还停留在分析高海拔对覆冰特性、覆冰类型以及风场特征等因素的影响,缺乏对高海拔地区冰-风荷载共同作用下输电塔-线体系力学特性、动力响应等的研究。且高海拔地区部分输电塔采用长横担设计,针对高海拔地区长横担输电塔-线体系在冰-风荷载作用下的响应规律研究仍留有空白。

1 模型建立

1.1 工程概况

某±800 kV特高压直流输电工程线路全长约1 940 km,途经设计覆冰厚度超过40 mm(换算为雨雾凇混合冻结约为70 mm)的高海拔地区,属于超重冰区。图1为特高压输电塔-线体系示意图,该输电线路水平档距均为550 m。定义顺塔线方向为输电塔-线体系纵向(图中 x 轴方向),垂直塔线方向为侧向(图中 y 轴方向), z 轴方向为竖向。

该体系中的输电塔均为T形长横担直线塔,此类输电塔横担较长,塔头质量分散,上部迎风面积较大;其中,塔高79.7 m,呼高72 m,横担长60.3 m,基底根开16.9 m。该直线塔钢材等级包括Q235、Q355及Q420,主要构件(塔身主材及斜材)的尺寸如图2所示,图2中角钢均为等边角钢,其截面尺寸用 $\angle b \times b \times t$ 表示,简记为 $\angle b \times t$,其中“ b ”和“ t ”分别

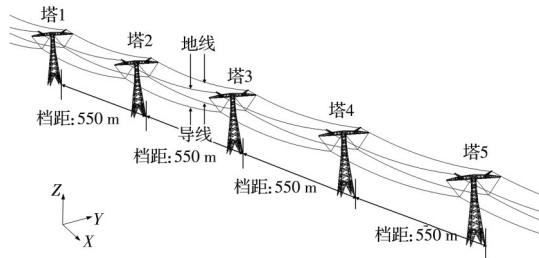


图 1 输电塔-线体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission tower-line system

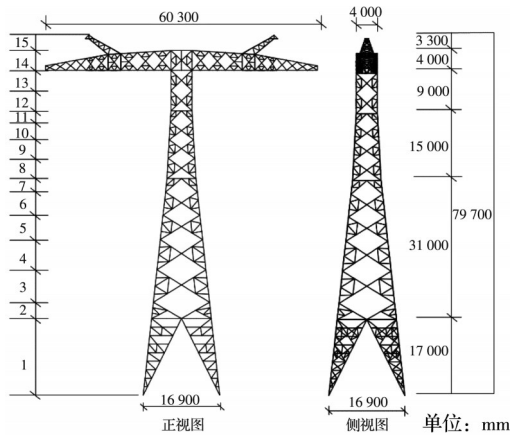


图 2 长横担直线塔及尺寸

Fig. 2 Schematic diagram of long cross-bar linear tower and its dimensions

表示等边角钢的边长和厚度, mm。导地线的主要设计参数见表 1。

1.2 有限元模型建立

基于 ABAQUS 有限元分析软件建立无覆冰输电塔-线体系有限元模型, 其中输电塔杆件采用 B31 空间梁单元进行模拟, 导地线及绝缘子串采用 T3D2 杆单元进行模拟^[25]。为有效模拟输电塔构件的非线性材料性能, 本构模型采用非线性滞回模型^[26]。塔底设置为固定支座, 绝缘子串两端和输电线路锚固端均设置为铰支座, 其有限元模型如图 3 所示。

2 高海拔地区覆冰以及风荷载模拟

2.1 覆冰精细化模拟

2.1.1 覆冰类型与覆冰层参数

项目位于四川西部高海拔地区, 主要覆冰类型为雨雾凇混合冻结, 其密度一般为 500~600 kg/m³, 该地区雨雾凇混合冻结覆冰有明显分层现象^[24], 表现为外层的覆冰结构近似雾凇, 约占总覆冰的 60%; 内层覆冰结构近似雨凇, 约占总覆冰的 40%。

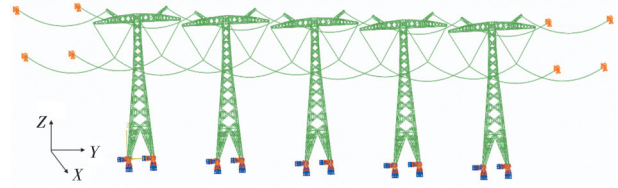


图 3 输电塔-线体系有限元模型

Fig. 3 Finite element model of transmission tower-line system

部分学者指出, 覆冰的弹性模量通常随密度改变, 其范围大致为 2.0×10⁸~7.0×10⁸ Pa^[27], 考虑覆冰的弹性模量只与密度有关, 忽视其他因素的影响, 该雨雾凇混合冻结覆冰层的相关参数取值如表 2 所示。

2.1.2 覆冰对构件弹性模量的影响

输电塔角钢构件覆冰后不仅增加了荷载和迎风面积, 冰荷载的附着性也对构件力学性能产生影响。覆冰输电塔角钢杆件属于复合单元材料, 采用自定义截面的梁单元进行模拟, 选择 BEAM 189 单元, 创建自定义截面梁单元模型^[28], 结果如图 4 所示。其中, 图 4(b)为由 3 种材料组合的复合材料截面, 最内层为角钢 Q420∠250×24, 中间层为类雨凇覆冰层, 最外层为类雾凇覆冰层。

为真实准确地模拟高海拔地区覆冰对不同角钢弹性模量的影响, 采用雨雾凇混合覆冰进行模拟, 覆冰输电塔杆件的等效弹性模量可以采用并联的方法进行计算^[27], 如式(1)所示。

$$E_{eq} I_{eq} = E_s I_s + E_r I_r + E_g I_g \quad (1)$$

式中: E_{eq} 为覆冰杆件等效弹性模量; I_{eq} 为覆冰杆件截面总惯性矩; E_s 为杆件弹性模量; I_s 为杆件截面惯性矩; E_r 为类雾凇覆冰层弹性模量; I_r 为类雾凇层覆冰截面惯性矩; E_g 为类雨凇层覆冰弹性模量; I_g 为类雨凇层覆冰截面惯性矩。弹性模量的单位均为 Pa, 惯性矩的单位均为 m⁴。

覆冰输电塔杆件位移可以用挠度公式进行计算, 联合式(1)得

$$E_{eq} I_{eq} = \frac{24Ml^2 + 8Fl^3 + 5ql}{384w_{max}} \quad (2)$$

式中: M 为杆端弯矩, N·m; F 为集中力, N; q 为均布荷载, N/m。 w_{max} 为杆中最大挠度, m。

根据覆冰杆件的等效弹性模量和惯性矩对覆冰杆单元进行弹性模量修正, 修正弹性模量计算

表 1 导线及地线的设计参数

Table 1 Design parameters of conductor and earth wire

输电线	电线型号	截面积/mm ²	外径/mm	破坏张力/kN	单位荷重/(kg/m)	弹性模量/(N/mm ²)	膨胀系数/(10 ⁻⁶ /°C)
导线	JL1/G2A-1250/100	1 350.03	47.85	329.85	4.252 3	65 200	20.5
地线	JLB20A-150	148.07	15.75	178.57	0.989 4	147 200	13.0

表 2 覆冰层参数

Table 2 Ice cover parameters

类型	密度 ρ /(kg/m)	弹性模量/(10^8 Pa)	泊松比 ν
类雾凇层	300	3.0	0.3
类雨凇层	900	7.0	

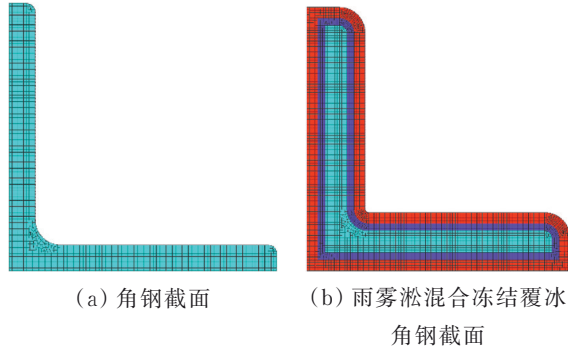


图 4 覆冰角钢截面模拟

Fig. 4 Simulation of ice-covered angle steel section

式为

$$E_c = \frac{E_{eq} I_{eq}}{I_s} \quad (3)$$

式中: E_c 为杆单元修正弹性模量。

分别建立覆冰厚度为 10~100 mm 不同规格的覆冰杆件有限元模型,部分杆件覆冰后的修正弹性模量计算结果见表 3,绘制覆冰杆件修正弹性模量与杆件截面面积关系图,如图 5 所示。

计算结果表明,覆冰厚度越大,覆冰杆件弹性模量越大;杆件截面面积越小,覆冰对其影响越大,杆件截面面积越大,覆冰对其影响越小。从覆冰厚度为 60 mm 开始,覆冰对截面最小杆件弹性模量的

表 3 部分杆件覆冰后修正弹性模量 E_c 计算结果

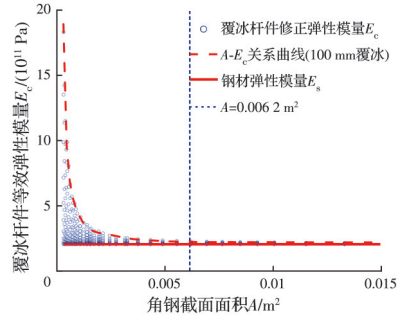
Table 3 Calculated modified elastic modulus E_c for some rods after ice-covering

角钢截面类型	修正弹性模量 E_c /(10^{11} Pa)										
	无覆冰	覆冰 10 mm	覆冰 20 mm	覆冰 30 mm	覆冰 40 mm	覆冰 50 mm	覆冰 60 mm	覆冰 70 mm	覆冰 80 mm	覆冰 90 mm	覆冰 100 mm
Q235 \angle 40 \times 4	2.06	2.11	2.24	2.53	3.05	3.91	5.23	7.17	9.87	13.52	18.32
Q235 \angle 56 \times 4	2.06	2.10	2.19	2.37	2.68	3.17	3.91	4.97	6.39	8.32	9.31
Q355 \angle 80 \times 6	2.06	2.08	2.12	2.19	2.29	2.44	2.65	2.94	3.31	3.80	4.42
Q355 \angle 100 \times 7	2.06	2.07	2.10	2.14	2.20	2.29	2.40	2.56	2.75	3.00	3.39
Q355 \angle 140 \times 10	2.06	2.06	2.08	2.10	2.13	2.16	2.21	2.27	2.33	2.42	2.61
Q355 \angle 160 \times 10	2.06	2.06	2.08	2.10	2.12	2.15	2.19	2.24	2.29	2.36	2.51
Q420 \angle 200 \times 16	2.06	2.06	2.07	2.08	2.09	2.11	2.13	2.16	2.19	2.23	2.27
Q420 \angle 250 \times 24	2.06	2.06	2.06	2.07	2.08	2.09	2.10	2.11	2.13	2.15	2.17
Q420 \angle 250 \times 28	2.06	2.06	2.06	2.06	2.07	2.08	2.09	2.11	2.12	2.14	2.16

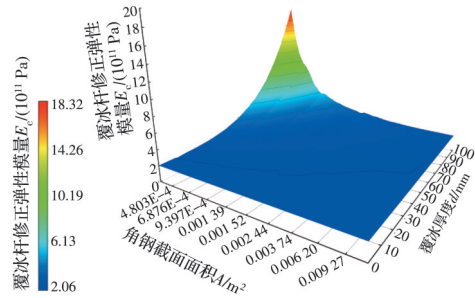
2.2 风荷载精细化模拟

2.2.1 平均风模拟

受高海拔地区植被稀少、地貌开阔等因素的影响,实测获得的风剖面指数往往低于规范^[29-30]规定的 A 类地貌风剖面指数 0.12,导致其高空风荷载显



(a) 关系曲线拟合



(b) 各杆件修正弹性模量关系曲线

图 5 覆冰杆件修正弹性模量与杆件截面面积的关系

Fig. 5 Relationship between modified elastic modulus of ice-covered rods and their cross-sectional area

影响超过了 100%,覆冰厚度为 100 mm 时,对截面最小杆件的修正弹性模量几乎达到了钢材弹性模量的 9 倍。同一覆冰厚度下,角钢截面面积未达到 0.006 2 m²(角钢肢长 $b=200$ mm)时,覆冰杆件修正弹性模量与原本角钢弹性模量相差较大;角钢截面面积达到 0.006 2 m²后,角钢弹性模量受覆冰影响很小。

著增加。因此,在进行高海拔地区高处平均风速换算时,参考了杨风利等^[23]的实测分析结果进行风剖面指数取值。

由于高海拔地区的空气密度与平原地区差异较大,在采用标准^[29-30]中的计算公式进行风荷载计

算前,需先按式(4)换算空气密度,再带入规范公式进行计算。

$$\rho = 1.25e^{-0.0001h} \quad (4)$$

式中: h 为所处地点的海拔高度,m。

由式(4)可知,海拔高度越高,所在地的空气密度就越低,结合标准^[29-30]中的风压计算公式可知,在风速不变的情况下,高海拔地区的风荷载也会降低。

2.2.2 脉动风模拟

当前常用的模拟风速时程方法有两种^[31]:第1种是基于线性滤波技术的回归方法,例如自回归(AR)、滑动平均(MA)等;第2种是基于三角级数叠加的谱解法,即谐波合成法(WAWS法)。

使用谐波合成法在MATLAB中编写程序,生成塔身、导线和地线上各个荷载施加点的脉动风速时程。模拟中风剖面幂指数 α 的值设为0.109,使用经典的Davenport目标风速谱^[32],风速的模拟时间步长设定为0.1s,总模拟时长为120s。某一节段的模拟结果如图6所示。输电塔第15节段模拟谱与目标谱的能量谱密度对比如图7所示。由图7可知,模拟出的脉动风与目标风谱数据吻合度较好,表明使用的风速时程模拟方法较为可靠与有效,可用于后续风速时程的模拟。

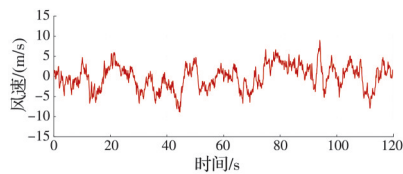


图6 输电塔第15节段脉动风速时程

Fig. 6 Time history of pulsating wind speed in section 15 of the transmission tower

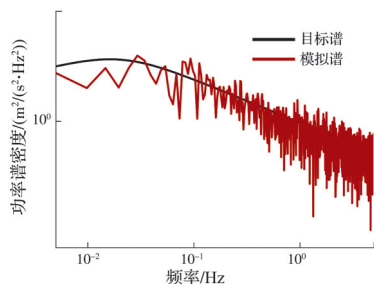


图7 输电塔第15节段模拟谱与目标谱对比

Fig. 7 Comparison of simulated and target spectra for section 15 of the transmission tower

2.2.3 高海拔地区风荷载特征

根据中国气象网历史观测数据,获取了四川省理塘县(海拔高度3950m)、西藏申扎县(海拔高度4670m)和山东省济南市(海拔高度58m)的气象站资料,确定当地气温0℃时空气密度、50a一遇10m高度处最大风速;同时结合规范公式计算出输电塔

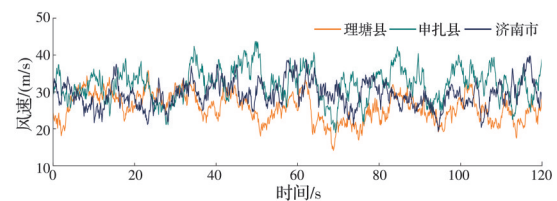
塔顶处的风速,结果见表4。其中理塘县属于高海拔地区B类地貌,取 $\alpha=0.109$ ^[23];申扎县属于高海拔地区A类地貌,取 $\alpha=0.036$ ^[23];济南市属于B类地貌,取 $\alpha=0.15$ ^[30]。

通过风荷载模拟程序,分别模拟3个地点10m及塔顶处(重心高度为77.7m)的平均风速时程,并计算每个地区环境下塔顶处的风荷载研究高、低海拔地区风的作用特点。图8为3地10m处及塔顶处风速时程图,图9为3地塔顶高度处风荷载时程图。

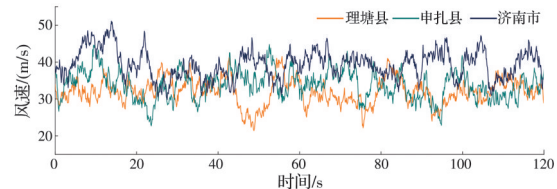
表4 不同地区平均风信息统计

Table 4 Statistics on average wind information in different regions

地点	海拔高度/m	空气密度/(kg/m ³)	10 m处最大风速/(m/s)	α	塔顶处平均风速/(m/s)
理塘县	3 950	0.786 9	25.979 4	0.109	32.485 2
申扎县	4 670	0.732 2	31.995 9	0.036	34.446 8
济南市	58	1.218 6	28.963 2	0.150	39.392 2



(a) 10 m处风速时程



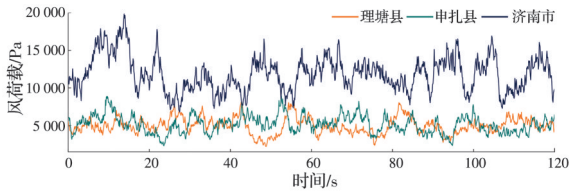
(b) 塔顶处风速时程

图8 三地风速时程图

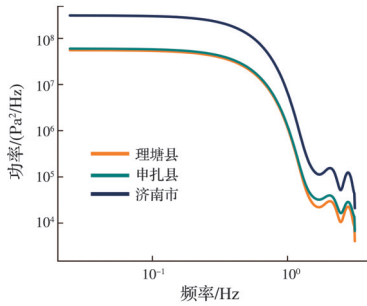
Fig. 8 Time history of wind speed at three locations

从表4所列计算结果及图8所示风速时程可以看出,3地10m高度处风速大小关系为:申扎>理塘>济南。而塔顶处风速大小关系为:济南>申扎>理塘。理塘地区及申扎地区塔顶高度处风速较10m高度处变化幅度不大,而济南地区塔顶高度处风速则与10m高度处差异显著。此结果主要受地形地貌的影响:地貌开阔、人烟稀少地区的风剖面指数较小,梯度风高度低;而地形复杂、人口稠密地区的风剖面指数较大,梯度风高度较高。

由图9可知,济南市塔顶风荷载明显高于理塘县、申扎县塔顶风荷载;同时,济南市塔顶风荷载功率谱高于其他两地,说明同一频率下济南市风的波动所对应的能量更高。主要受两方面因素影响,一是高海拔地区塔顶风速小于低海拔地区,二是高海



(a) 塔顶风荷载时程



(b) 塔顶风荷载功率谱

图 9 三地塔顶风荷载

Fig 9 Wind loads on the top of towers at three locations

拔地区空气密度显著低于中、低海拔地区,其中理塘县和申扎县空气密度分别是济南市的 64.57% 和 60.09%,差异明显。

3 高海拔覆冰长横担输电塔-线体系风振响应分析

3.1 不同覆冰厚度

对输电塔-线体系而言,一般情况下,风荷载垂直作用于输电线路时受力最大,定义此时风攻角为 0°。对覆冰输电塔-线体系施加设计风速为 15 m/s、风攻角为 0° 的风荷载,并探究输电塔节点的位移响应规律。

基于有限元分析结果,提取不同覆冰厚度工况下输电塔各节间段以及横担端部节点位移响应,结果如图 10 所示。图 10 表明,覆冰厚度越大,输电塔各节间段的位移响应也越大。输电塔作为高耸结构,其位移响应一般沿塔高单调增大,由于特殊的

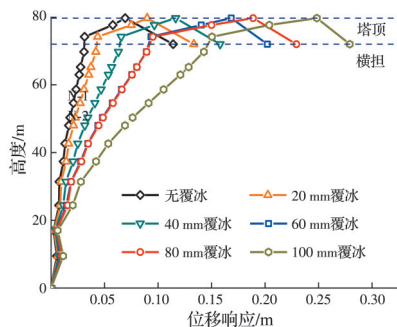


图 10 覆冰工况下位移响应沿塔高变化曲线

Fig. 10 Variation curves of displacement response along tower height under ice-covered conditions

结构构造,长横担输电塔最大位移响应并非塔顶,而是横担端部。

风攻角定义图以及节点的具体位置和编号如图 11 所示,其中节点 D-1、D-2 为地线支架顶点,节点 N-1、N-2 为横担端部中点。

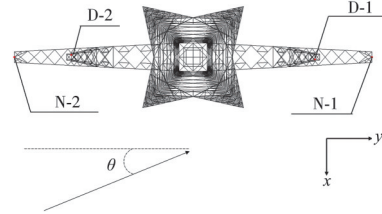


图 11 节点位置及风攻角 θ 示意图

Fig. 11 Schematic diagram of node positions and wind attack angle θ

提取 0° 风攻角下输电塔各节点在不同覆冰厚度下各方向的最大位移响应,并绘制出如图 12 所示的覆冰厚度-节点最大位移曲线图。

由图 12 可知,随着覆冰厚度的增加,输电塔地线顶部节点和横担端部中点的位移也相应增加。 x 方向左右两侧节点位移相反,说明结构发生了扭转; y 方向基本都是正向位移,说明结构发生了弯曲。同时, x 、 z 方向的最大位移值出现在横担节点, y 方向的最大位移值出现在地线节点;合位移下横担处的位移响应要高于地线处。此外,输电塔节点 y 、 z 方向的位移值远大于 x 方向,主要原因是 x 方向没有外部荷载作用。

3.2 不同风速

对覆冰厚度为 100 mm、风攻角为 0°、标准风速 5~25 m/s 工况下的各节点动力响应进行分析。由于 0° 风攻角下 x 方向无外荷载,其位移响应较小,因此,提取 15 m/s 风速工况下导线端部节点 y 、 z 方向的位移响应时程曲线,如图 13 所示。

图 13 表明,在覆冰荷载的影响下,节点在 y 方向最大位移出现在地线处(D-1), z 方向最大位移出现在导线处(N-1)。为了明确风速对覆冰输电塔-线体系各方向位移的影响情况,提取各节点在不同风速下各方向的最大位移响应,并绘制出如图 14 所示的风速-最大位移曲线图。

由图 14 可知,输电塔-线体系节点各向位移随风速的增加单调递增,风速越大,位移响应越大。并且随着风速的增加,其位移响应的增长趋势越来越快。 x 、 z 方向的最大位移值出现在横担节点处, y 方向的最大位移值出现在地线节点处;合位移下最大位移值出现在横担节点处。整体来看,位移响应最明显的为 y 、 z 方向,与外荷载作用方向相符,横担处节点的位移为最大位移响应位置。

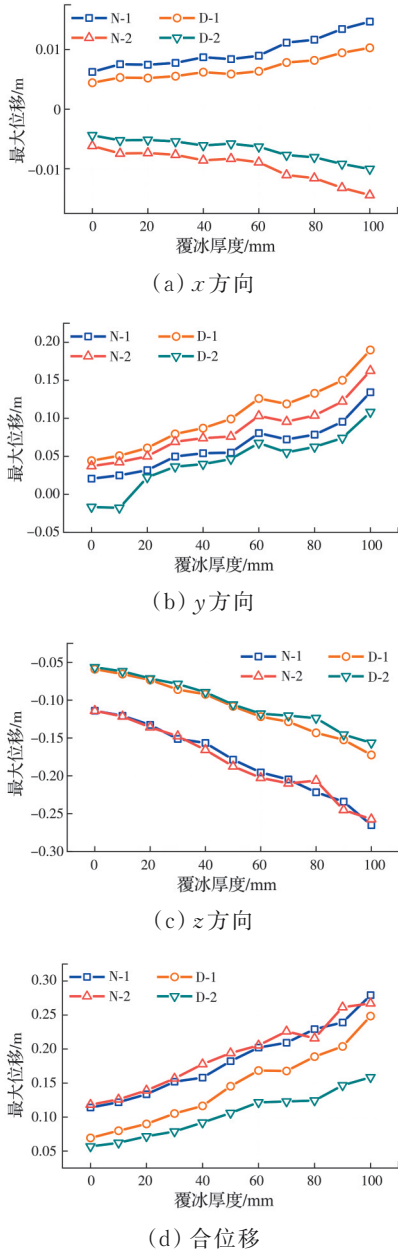


图 12 覆冰厚度-节点最大位移曲线
Fig. 12 Ice cover thickness-maximum displacement curves of nodes

3.3 不同风攻角

风攻角是分析风-冰耦合作用下输电塔-线体系响应的重要参数,根据 IEC 标准^[29],通常情况下,最不利风攻角为 0°或 60°。选取 15 m/s 风速、100 mm 覆冰工况,提取输电塔各个节点在 0°、30°、45°、60°、90°风攻角下的位移时程响应数据,以研究长横担输电塔-线体系的最不利风攻角。图 15 为节点 N-1 处不同风攻角下的位移时程曲线图,结果表明,0°风攻角下节点处的位移响应最大。

进一步分析风攻角对输电塔-线体系各方向位移响应的影响,提取输电塔地线支架及横担端部节点的最大位移,如图 16 所示。

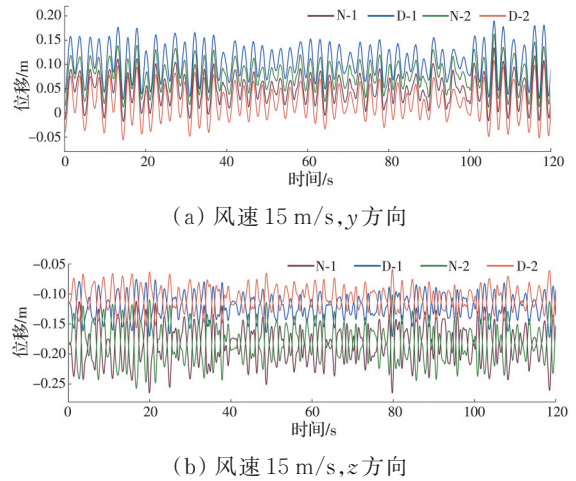


图 13 节点位移时程曲线
Fig. 13 Node displacement time-history curves

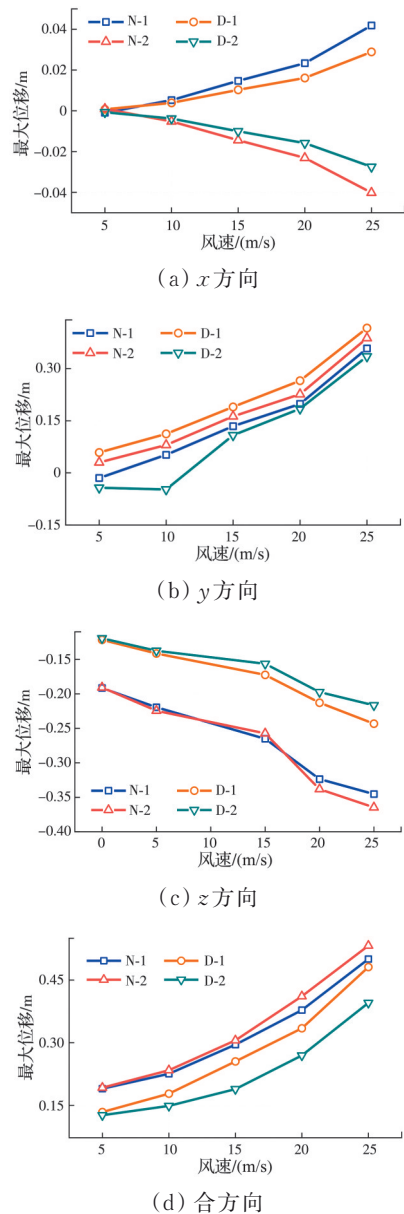


图 14 风速-最大位移曲线
Fig. 14 Wind speed-maximum displacement curves

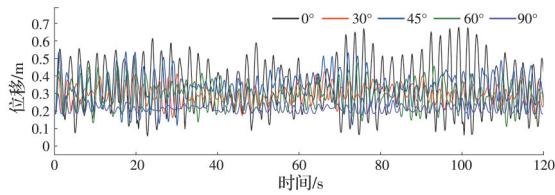
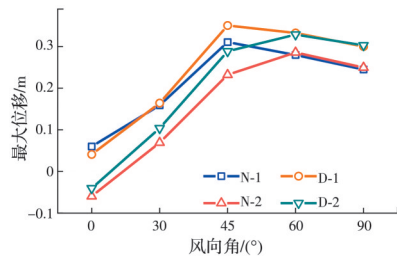
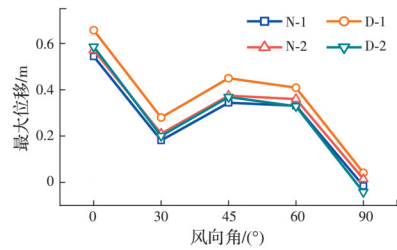
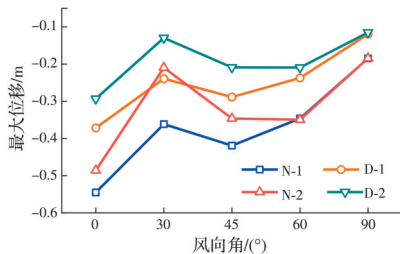
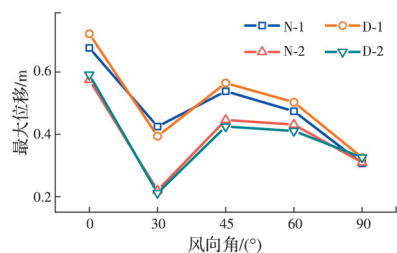


图15 各风攻角下节点N-1位移响应时程曲线

Fig. 15 Displacement response time-history curves of node N-1 under each wind attack angle

(a) x 方向(b) y 方向(c) z 方向

(d) 合方向

图16 各风攻角节点最大位移

Fig. 16 Maximum displacement of nodes at each wind attack angle

由图16可见,输电塔-线体系节点 x 方向位移在 45° 时风攻角最大,最大位移节点为地线支架顶点D-1; y 方向位移在 0° 风攻角时最大,位移最大节点为地线支架顶点D-1; z 方向位移在 0° 风攻角时最大,位移最大节点为横担端部中点N-1;合位移在 0°

风攻角时最大,合位移响应规律背风侧为 $0^\circ > 45^\circ > 60^\circ > 30^\circ > 90^\circ$,迎风侧为 $0^\circ > 45^\circ > 60^\circ > 90^\circ > 30^\circ$, 0° 风攻角为最不利风攻角。

4 结论

依托实际工程,建立覆冰输电塔-线体系精细化模型,考虑高海拔地区覆冰特征及覆冰对杆件弹性模量的影响,设计符合高海拔地区特点的覆冰工况。同时,对比分析不同海拔高度地区的风荷载特性,基于高海拔地区覆冰特征和风荷载特点,开展动力响应分析,研究冰-风荷载作用下覆冰厚度、风速以及风攻角等参数对输电塔-线体系受力特性的影响规律,得到以下主要结论:

1)覆冰厚度越大,覆冰杆件修正弹性模量越大;杆件截面面积越大,覆冰对其弹性模量的影响越小;覆冰对角钢截面未达到 0.0062 m^2 的覆冰杆件修正弹性模量影响较明显,对截面达到 0.0062 m^2 的覆冰杆件修正弹性模量影响较小。

2)高海拔地区 10 m 处风速和塔顶风速相差不大;高海拔地区空气密度低,导致风荷载通常低于中、低海拔地区。

3)覆冰长横担输电塔-线体系横担处位移响应大于塔顶;在风速不变的情况下,风振响应随覆冰厚度的增加而增大;在覆冰厚度不变的情况下,风振响应随风速的增加而增大;各节点的最大位移响应均出现在横担端部中点处。

4)在风速和覆冰厚度不变的情况下,垂直于输电线路方向(0°)为该输电塔-线体系的最不利风攻角。 x 方向位移在 45° 时风攻角最大, y 、 z 方向位移在 0° 风攻角时最大;合位移在 0° 风攻角时最大。

参考文献

- [1] 张立锋,何志强,张金枝.西藏“十四五”电力发展重点探讨[J].中国电力,2020,53(11):111-115,138.
ZHANG L F, HE Z Q, ZHANG J Z. Discussion on focus of power development in Tibet during the 14th five-year plan [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 111-115, 138. (in Chinese)
- [2] 姚陈果,张蕾方,张磊,等.架空输电塔-线体系导线风振对脱冰的影响[J].高电压技术,2014,40(2):381-387.
YAO C G, ZHANG R F, ZHANG L, et al. Influence of wind vibration of overhead transmission tower-line system on ice shedding [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 381-387. (in Chinese)
- [3] 史天如,胡丹晖,周学明,等.冰-风组合下输电线路塔线结构可靠度分析[J].南方电网技术,2019,13(10):81-86.

- SHI T R, HU D H, ZHOU X M, et al. Reliability analysis of tower-line structure of transmission line under combined ice-wind condition [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(10): 81-86. (in Chinese)
- [4] 赵滇生. 输电塔架结构的理论分析与受力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- ZHAO D S. Theoretical analysis and mechanical performance study of transmission tower structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [5] 卞荣, 徐卿, 俞恩科, 等. 台风作用下输电塔线体系多元状态监测及风偏可靠度分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(3): 52-59.
- BIAN R, XU Q, YU E K, et al. Multi-variate state monitoring and wind bias reliability analysis of a transmission tower-line system under action of typhoon [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(3): 52-59. (in Chinese)
- [6] MCCOMBER P, DRUEZ J, FÉLIN B. Cable rime accretion measurements on a Laurentian Mountain [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1990, 17(6): 1022-1032.
- [7] 楼文娟, 孙炳楠, 唐锦春. 高耸格构式结构风振数值分析及风洞试验[J]. *振动工程学报*, 1996, 9(3): 318-322.
- LOU W J, SUN B N, TANG J C. Numerical analysis and wind tunnel test of wind-induced vibration of high-rise lattice structure [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1996, 9(3): 318-322. (in Chinese)
- [8] 张跃龙, 楼文娟, 陈卓夫, 等. 粘合式裹冰输电导线气动力特性及风偏响应分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(7): 125-133.
- ZHANG Y L, LOU W J, CHEN Z F, et al. Aerodynamic force characteristics and wind-induced swing response analysis of ellipse iced conductor with ice bridge [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(7): 125-133. (in Chinese)
- [9] 沈国辉, 徐晓斌, 楼文娟, 等. 导线覆冰脱冰有限元模拟方法的适用性分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(10): 9-15, 40.
- SHEN G H, XU X B, LOU W J, et al. Applicability analysis of finite element methodologies to simulate the ice-accreting and ice-shedding on transmission lines [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(10): 9-15, 40. (in Chinese)
- [10] 姚陈果, 毛峰, 许道林, 等. 不均匀覆冰输电塔线体系力学特性[J]. *高电压技术*, 2011, 37(12): 3084-3092.
- YAO C G, MAO F, XU D L, et al. Mechanical properties of transmission tower-line system in non-uniformly iced condition [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(12): 3084-3092. (in Chinese)
- [11] YANG F L, YANG J B, ZHANG Z F. Unbalanced tension analysis for UHV transmission towers in heavy icing areas [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 70: 132-140.
- [12] 李雪, 李宏男, 黄连壮. 高压输电线路覆冰倒塔非线性屈曲分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(5): 111-114, 208.
- LI X, LI H N, HUANG L Z. Nonlinear buckling analysis of collapsed steel tower for 220 kV Guajing Iced transmission line [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(5): 111-114, 208. (in Chinese)
- [13] 严波, 盛金马, 姜克儒, 等. 猫头型输电塔在覆冰与风荷载下的动力稳定[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(26): 11166-11175.
- YAN B, SHENG J M, JIANG K R, et al. Dynamic stability of cathead transmission tower under ice and wind load [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(26): 11166-11175. (in Chinese)
- [14] 楼文娟, 王礼祺, 陈卓夫. 雾凇覆冰和雨凇覆冰导线气动力特性试验研究[J]. *振动测试与诊断*, 2022, 42(4): 684-689, 823.
- LOU W J, WANG L Q, CHEN Z F. Experimental study on aerodynamic characteristics of rime icing and glaze icing conductors [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(4): 684-689, 823. (in Chinese)
- [15] 张喆, 杨秀萍, 郝淑英. 覆冰导线动态气动力特性模拟与分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(7): 209-214.
- ZHANG Z, YANG X P, HAO S Y. Numerical simulation and analysis of dynamic aerodynamic characteristics of iced conductor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(7): 209-214. (in Chinese)
- [16] 朱永灿, 舒新, 田毅, 等. 微地形区 OPGW 地线不均匀覆冰计算模型改进方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(3): 55-63.
- ZHU Y C, SHU X, TIAN Y, et al. Research on the improvement method of OPGW ground uneven icing calculation model under micro-terrain [J]. *Electric Power*, 2023, 56(3): 55-63. (in Chinese)
- [17] 沈国辉, 袁光辉, 邢月龙, 等. 导线覆冰脱落的数值模拟和参数分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(5): 55-59.
- SHEN G H, YUAN G H, XING Y L, et al. Numerical simulation and parametric analysis of ice-shedding on conductors [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(5): 55-59. (in Chinese)
- [18] 沈国辉, 袁光辉, 孙炳楠, 等. 覆冰脱落对输电塔线体系的动力冲击作用研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 210-217.
- SHEN G H, YUAN G H, SUN B N, et al. Dynamic impact effects on tower-line system due to ice-shedding [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 210-217. (in Chinese)
- [19] 念路鹏. 架空输电线路覆冰增长模型关键参数的研究

- [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- NIAN L P. Study on key parameters of icing growth model for overhead transmission lines [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] LIU C C, HUANG D P, ZHANG Y L, et al. Study on mechanical properties of steel on transmission tower under icing load [J]. Key Engineering Materials, 2018, 773: 255-259.
- [21] 杨风利, 张宏杰, 范荣全, 等. 高海拔输电线路风荷载特性及铁塔杆件内力分析[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(9): 86-94.
- YANG F L, ZHANG H J, FAN R Q, et al. Wind load characteristics and internal force analysis on tower members of transmission lines in high-altitude regions [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(9): 86-94. (in Chinese)
- [22] 王新军, 刘常青. 青海高海拔地区高压输电线路覆冰特点分析及防范措施[J]. 青海电力, 2005, 24(4): 4-8, 53.
- WANG X J, LIU C Q. Characteristics analysis and prevention measures of high-voltage transmission line ice coverage phenomenon on high elevation areas [J]. Qinghai Electric Power, 2005, 24(4): 4-8, 53. (in Chinese)
- [23] 杨风利, 张宏杰, 邵帅, 等. 高海拔输电线路走廊空气密度实测[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 170-176.
- YANG F L, ZHANG H J, SHAO S, et al. Field observation of air density for transmission line corridors in high-altitude regions [J]. Electric Power, 2021, 54(12): 170-176. (in Chinese)
- [24] 曹立志. 川西北高海拔山地架空线覆冰特性研究[J]. 电力勘测设计, 2019(增刊1): 229-233.
- CAO L Z. Study on icing characteristics of overhead lines in high altitude mountainous areas of northwest Sichuan [J]. Electric Power Survey & Design, 2019(Sup 1): 229-233. (in Chinese)
- [25] 田利, 刘凯悦, 刘俊才, 等. 基于土弹簧的桩-土-输电塔抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6): 1268-1276.
- TIAN L, LIU K Y, LIU J C, et al. Seismic response of pile-soil-transmission tower based on soil springs [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1268-1276. (in Chinese)
- [26] LIU J C, TIAN L, MENG X R, et al. Seismic fragility assessment of a transmission tower considering main-shock-aftershock sequences [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 194: 107344.
- [27] 窦艺成, 张冰, 朱大林, 等. 覆冰对铁塔构件刚度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 156-158.
- DOU Y C, ZHANG B, ZHU D L, et al. Research on ice accretion to stiffness of tower component [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 156-158. (in Chinese)
- [28] 涂莹莹, 李杰, 陆久飞, 等. 基于有限元软件的简支工字钢-混组合梁计算分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 1894-1900.
- TU Y Y, LI J, LU J F, et al. Calculation and analysis of simply supported I-beam-concrete composite beam based on finite element software [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup 1): 1894-1900. (in Chinese)
- [29] Overhead transmission lines - Design criteria: IEC 60826: 2017 [S]. International Electrotechnical Commission, 2017.
- [30] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [31] 沈国辉, 黄俏俏, 郭勇, 等. 脉动风场的模拟方法及其在输电线路风振计算中的应用[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(1): 69-74.
- SHEN G H, HUANG Q Q, GUO Y, et al. Simulation methods of fluctuating wind field and its application in wind-induced response of transmission lines [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(1): 69-74. (in Chinese)
- [32] 杨荆秋, 朱全军, 冉启鹏, 等. 输电塔-线体系脉动风振耦合分析[J]. 力学季刊, 2023, 44(2): 435-443.
- YANG J Q, ZHU Q J, RAN Q P, et al. Coupling analysis of fluctuating wind pressure response for transmission tower-line system [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2023, 44(2): 435-443. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)