

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220329001

文章编号: 1672-9331(2025)01-0122-09

引用格式: 陈伏彬, 康文, 芦佳敏, 等. 输电导线对塔线体系风致响应影响研究 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 122-130.

Citation: CHEN Fubin, KANG Wen, LU Jiamin, et al. Influence of transmission line on wind-induced response of tower-line system [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 122-130.

输电导线对塔线体系风致响应影响研究

陈伏彬¹, 康文¹, 芦佳敏¹, 蔡虬瑞¹, 翁兰溪²

(1. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:【目的】研究输电导线与塔体耦合作用对塔线体系风致动力响应的影响。【方法】结合某输电线路三塔两线实例, 开展数值分析计算及气弹模型风洞试验。基于 ABAQUS 软件建立了三塔两线体系的有限元模型, 将采用谐波合成法生成的风荷载沿顺风向输入, 采用 Newmark- β 法求解体系的顺风向动力响应, 计算体系的风振系数, 并将之与各规范的风振系数进行对比。【结果】数值分析结果与试验结果吻合良好, 且风振系数均高于规范建议值。【结论】输电导线的存在提高了结构气动阻尼, 导致塔线体系的加速度响应低于单塔的加速度响应; 风振系数随高度增加呈增大趋势, 受横担局部质量增加影响, 风振系数存在局部突变; 在实际工程中计算输电塔风振系数时, 输电导线对横担部位的影响不可忽略, 研究者应综合考虑多种规范的建议值。

关键词: 输电塔线体系; 有限元分析; 风洞试验; 风振系数; 谐波合成法

中图分类号: TM75; TU352

文献标志码: A

Influence of transmission line on wind-induced response of tower-line system

CHEN Fubin¹, KANG Wen¹, LU Jiamin¹, CAI Qiurui¹, WENG Lanxi²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Power China Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the influence of the coupling between transmission line and tower on the wind-induced dynamic response of the tower-line system. [Methods] Combined with the example of a tower-line system (three towers and two lines), numerical calculation and wind tunnel tests of an aeroelastic model were conducted. A finite element model of the above tower-line system was established with ABAQUS software, and the wind load generated by the harmonic synthesis method was used as input along the downwind direction. The Newmark- β method was used to solve the dynamic response of the system in the downwind direction. The wind-induced vibration coefficient of the system was calculated and compared with various codes. [Findings] The numerical analysis results are in good agreement with the experimental results, and the wind-induced vibration coefficients are all higher than the

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-13; 接受日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278479、51778072); 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJXC202021)

通信作者: 陈伏彬(1981—)(ORCID: 0000-0002-2690-1945), 男, 教授, 主要从事工程结构抗风方面的研究。

E-mail: fbchen88@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

recommended values in the code. [Conclusions] The existence of transmission lines improves the aerodynamic damping of the structure, resulting in the acceleration response of the tower-line system being lower than that of a single tower. The wind-induced vibration coefficient increases with height, with a local mutation on account of the local mass increase of the cross arm. In practice, when calculating the wind-induced vibration coefficient of the transmission tower structure, the influence of transmission lines on the cross arm should not be ignored, and the suggested values of various codes should be considered comprehensively.

Key words: transmission tower-line system; finite element analysis; wind tunnel test; wind-induced vibration coefficient; harmonic synthesis method

Foundation items: Projects (52278479, 51778072) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (SJCX202021) supported by Changsha University of Science & Technology Professional Degree Postgraduate "Practice Innovation and Entrepreneurship Enhancement Ability Plan" Project

Corresponding author: CHEN Fubin (1981—) (ORCID: 0000-0002-2690-1945), male, professor, research interest: wind resistance of engineering structures. E-mail: fbchen88@126.com.

0 引言

随着高压输电网络建设的规模化发展,我国能源需求和资源分布不均的矛盾使特高压塔的建设逐渐成为新基建^[1-2]。作为电力系统重要的基础设施,输电塔线体系是具有复杂非线性的耦联体系,且兼具高柔、轻质、跨度大的特性,对风荷载非常敏感,这容易导致在强风作用下倒塔、断线事故频发^[3-4]。在脉动风作用下,输电线产生的动张力会反作用于塔体,从而导致复杂的塔线耦合作用,因此,输电塔线体系的耦合振动效应一直是研究热点^[5]。国内外学者一般采用现场实测、数值模拟和风洞试验的方法开展塔线耦联体系的风振响应研究^[6]。在现场实测方面,TAKEUCHI等^[7]为研究某两基输电塔线体系在强风下的阻尼特性,进行了现场实测,得出体系的气动阻尼与风速及体系的振动模态成线性关系的结论;MOMOMURA等^[8]通过现场实测,发现铁塔的振动受导线和风向的影响很大。由于现场实测费用高、周期长且研究对象多为输电杆塔结构,数值模拟和风洞试验的方法受到多数研究者的青睐。在数值模拟方面,YASUI等^[9]通过分析实例研究了不同支撑方式对塔线体系动力响应的影响,并发现相比于功率谱密度,由时间序列算得的峰值因子更大;汪佳等^[10]通过数值模拟对不同高度的输电塔进行静力pushover分析,发现塔线耦合效应对体系抗风承载

力的影响与塔高成正比;DUA等^[11]将非线性动力分析算出的脉动风场下塔线体系的风致响应与规范的进行对比,发现规范中的相关参数取值过于保守;RAO等^[12]通过足尺静力试验和数值模拟,对输电塔线体系在风荷载和自重作用下的破坏进行了研究;MARA等^[13]基于数值模拟分析了格构式输电塔在不同风向风荷载作用下的响应。当涉及塔线系统的耦合振动时,常使用塔线系统的气弹模型进行风洞试验。LIANG等^[14]设计了500 kV塔线体系的试验,讨论了输电塔挂线和无线的风致响应特性;刘石等^[15]通过风洞试验研究了输电塔线体系在极限风载下的破坏机理。

本文以某沿海地区拟建的110~500 kV通用高压输电线路为研究背景,利用谐波合成法模拟了脉动风速时程,在时域内分析了单塔和塔线体系在多种风速下的动力响应,并将该结果与风洞试验结果及相关规范值进行对比,提出了塔线体系下的风振系数取值。本研究可为输电线路的设计提供技术支撑。

1 输电塔线体系风振时域分析

1.1 有限元模型建立

本文研究对象为某沿海地区拟建的110~500 kV通用高压输电线路中由某直线塔及其相邻两侧转角塔构成的三塔两线结构体系。直线塔高60.6 m,转角塔高60.6 m,水平档距均为500 m,直线塔和

转角塔均为采用Q345型钢为材料的角钢塔。单塔试验及有限元模拟选取的研究对象均为直线塔,其外形和尺寸见图1。

根据设计图纸建立高压输电线路“三塔两线”有限元模型。采用ABAQUS软件的BEAM单元对塔体进行建模,选用TRUSS单元对导线进行建模,并将各绝缘子简化成TRUSS单元进行建模以提高求解速度。考虑到输电线与桁架单元仅能传递轴向力的力学性能,建模时对输电线进行每5 m一个单元的离散划分,每单元均视为只在节点承受荷载的直杆,视塔基为固定端。因本研究的塔线体系垂跨比大于0.125,在建模时以悬链线控制方程来确定输电线初始位形,悬链线初始构形方程如式(1)所示:

$$y = \frac{h}{L_0} \left\{ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma x}{2\sigma_0} \right) \operatorname{ch} \left[\frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \right\} - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_0} \right)^2} \cdot \left\{ \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma x}{2\sigma_0} \right) \operatorname{sh} \left[\frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: h 为相邻输电塔挂点的垂直高差; L_0 为等高悬点输电线悬链线长度; l 为相邻输电塔挂点的水平距离; γ 为导线单位长度比载; σ_0 为弧垂最低点处的轴向应力; x 为输电塔挂点到弧垂最低点水平距离。

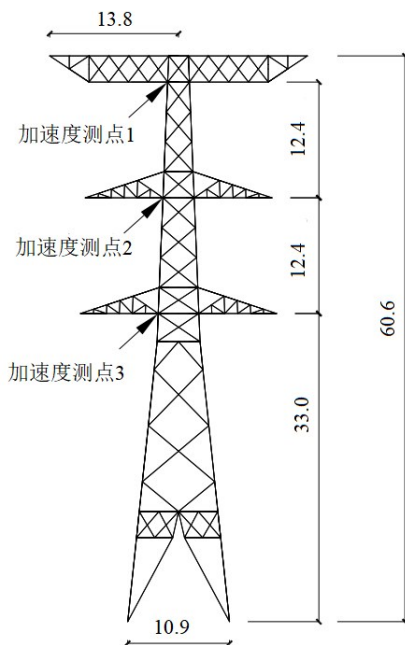


图1 塔体尺寸及加速度测点(单位:m)

Fig. 1 Tower size and measuring points for acceleration (unit:m)

将找形后的输电线通过绝缘子和输电塔横担耦合连接起来,地线在输电塔的顶部,导线在下层,有限元模型如图2所示。

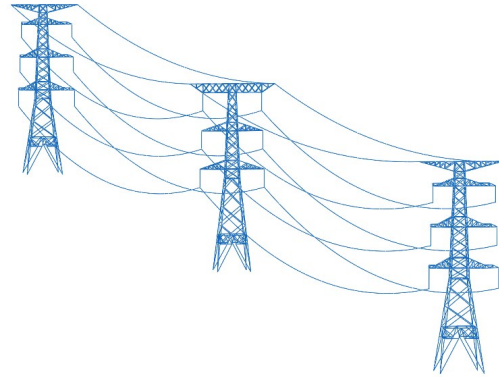


图2 塔线耦合体系有限元模型

Fig. 2 Finite element model of tower-line coupling system

1.2 风荷载模拟

由于输电塔属于外形沿高度变化较大的高耸结构,在用有限元模拟时,将输电塔沿高度划分为18个风速区段,取各区段顶部高度处作为风速生成点。风荷载加载点见图3。

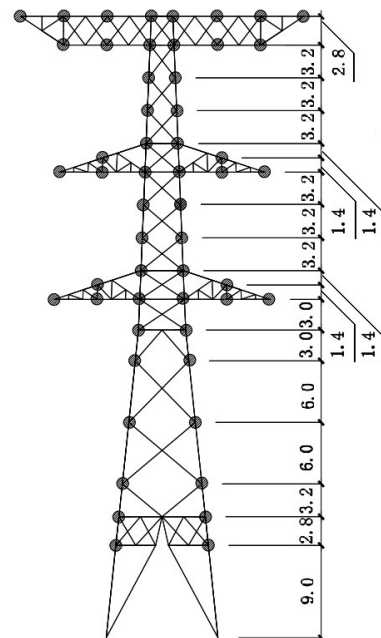


图3 风荷载加载点(单位:m)

Fig. 3 Wind load loading points (unit:m)

作用于结构任一点的风荷载都是平均风和脉动风的叠加,脉动风的高复杂性和强变异特性使得脉动风场相当于一个复杂的平稳高斯随机过程^[16-17]。对风场进行模拟时,采用场地粗糙度 $\alpha = 0.15$ 的B类地貌,利用SHINOZUKA等^[18]提出的谐

波合成法,选择紊流尺度沿高度变化的 Kaimal 谱并在 Matlab 中进行脉动风速模拟。Kaimal 谱经验计算式为

$$S_v(\omega) = 200u_*^2 \frac{\xi}{\omega [1 + 50\xi]^{5/3}} \quad (2)$$

式中: $S_v(\omega)$ 为脉动风速的功率谱; ω 为圆频率; u_* 为剪切风速, $u_* = \frac{k\bar{v}_{10}}{\ln(10/z_0)}$,其中 z_0 为地面粗糙长度, k 为卡曼常数,取值为0.40, $\bar{v}_{10}$ 为离地高度10 m处的平均风速; ξ 为无量纲频率, $\xi = \frac{z\omega}{\bar{v}_*}$,其中 z 为离地高度, $\bar{v}_*$ 为 z 高度处的平均风速。

为了验证模拟结果的可靠性,将模拟的风速时程进行自功率谱校对,如图4所示。由图4可以看出,模拟谱与目标谱整体吻合较好,这说明所取参数满足要求。

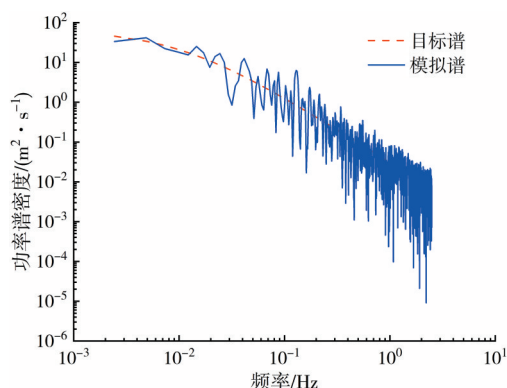


图4 模拟脉动风速功率谱

Fig. 4 Power spectrum of simulated fluctuating wind speed

在 ABAQUS 软件中进行加载时,塔身结构风荷载 $P(t)$ 的计算如式(3)所示:

$$P(t) = A\mu_s U(t) \quad (3)$$

式中: t 为时间; A 为输电塔构件迎风面积的投影值,由于脉动风荷载施加在节点上,故取节点所连接的所有构件投影面积的一半之和; μ_s 为输电塔体型系数,依据《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2012)及结构特点取为1.6; $U(t)$ 为节点处的风压时程,由各点的风速时程根据伯努利方程转化而来^[18],如式(4)所示:

$$U(t) = \frac{1}{2} \rho V^2(t) = \frac{1}{1.6} V^2(t) \quad (4)$$

式中: $V(t)$ 为节点处所模拟的风速时程; ρ 为空气质量密度,此处取1.25 kg/m³。

由于试验风向与输电线垂直,作用在导地线

上的风载荷 $F(t)$ 按式(5)进行计算^[16]:

$$F(t) = \alpha\beta_c\mu_{sc}\mu_z LdU(t) \quad (5)$$

式中: α 为风压不均匀系数,因前文脉动风的模拟考虑了空间相关性,此处取1.0; β_c 与 μ_z 分别为风载荷调整系数和风压高度变化系数,据规范均取1.0; d 为输电线外径,导线、地线的外径分别为26.82 mm、15.75 mm; μ_{sc} 为导(地)线体型系数,导线、地线的体型系数按外径查规范分别取为1.2和1.1; L 为水平档距,由于本文将输电线离散成15段进行加载,式中的 L 取体系实际档距的1/15。

2 气弹模型风洞试验概况

2.1 气弹模型设计

为与有限元计算结果对比,本文针对三塔两线体系设计了气弹模型风洞试验。根据相似理论,设计气弹模型时要求结构物满足5个无量纲参数相似的要求,分别为 Froude 数、Strouhal 数、Reynolds 数、Cauchy 数、密度比。由于输电塔主材角钢从气动角度可视为钝体,风在塔身附近会产生优势流分离,故放松了 Reynolds 数相似性的模拟。输电塔在重力作用下变形很小且体系在风载作用下的动力响应是水平向的,故 Froude 数可忽略。本文重点控制了 Cauchy 数、Strouhal 数、密度比及几何相似性。计算结果表明,对输电塔动力特性参数采用杆系模式计算即可满足精度要求,故采用等代离散刚度法进行模型设计。初拟风速比为1: $\sqrt{40}$,由动力标定试验确定模型的频率比,最终风速比由此逆推得到,该方法可修正模型超重的影响^[19]。气弹模型相似比系数见表1,塔身主材骨架采用角钢制作,横担处部分小截面杆件根据 EA 等效的原则选择圆钢管替代角钢来提供刚度,配合外贴薄丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物条来模拟外观的一致性。考虑到质量相似比的一致性,采用铅材进行配重。输电线模型按1:40缩尺比来制作较为困难,因此在制作时引入缩聚系数 λ ^[20],取 $\lambda=0.328$ 。输电线采用直径为0.2 mm的钢丝作为受力“芯线”,并外套塑料管以满足几何相似性,管内附加铅丝使线密度满足相似比要求。制作完成之后根据跨度、垂度相似比进行挂线安装,组合完成的气弹模型如图5所示。

表1 气弹模型相似比

Table 1 Similarity ratios of aeroelastic model

位置	参数	相似比	位置	参数	相似比
输电塔	几何	1:40	输电塔	质量	1:40 ³
	风速	1:6.38		面积	1:40 ²
	频率	6.32:1		加速度	1:1.01
	轴向刚度	1:40 ³		密度	1:1
输电线	跨度	1:121.95	输电线	垂度	1:39.31
	外径	1:13.12		线密度	1:524.80



图5 塔线耦联体系气弹模型

Fig. 5 Aeroelastic model of tower-line coupling system

2.1 风洞试验

本试验在西南交通大学 XNJD-3 号风洞内进行,试验段宽 22.5 m、高 3.6 m、长 36 m。采集设备为 LC0408T 型压电式加速度计与 TFI 公司的三维眼镜蛇探针。本次风洞试验采样频率为 500 Hz,采样时长为 120 s。定义平行输电线方向为 0° 风向角,垂直输电线方向为 90° 风向角;X 向、Y 向分别为顺线向与垂线向。测点布于输电塔塔身与横担下缘交界处,如图 1 所示,各测点在 X、Y 两方向均布置加速度传感器。

采用 B 类风场,平均风速剖面 and 湍流剖面如图 6 所示。从图 6 可以看出,模拟的平均风速和湍流强度分布与目标分布基本一致。采用自由振动法对体系进行动力参数测试,利用随机减量法结合 Hilbert 变换进行模态参数识别,结果如表 2 所示。与单塔相比,塔线体系的频率降低,且结构以第一第二阶弯曲振动为主。塔线体系前两阶模态实测阻尼比为 2.164%,比单塔的 2.050% 略有提升。采用 90° 风向角分别对单塔和塔线体系进行气动阻尼识别,结果如图 7 所示。与输电塔单塔相比,塔线体系的气动阻尼明显增加且与风速成正相关,结构设计时应予以考虑。

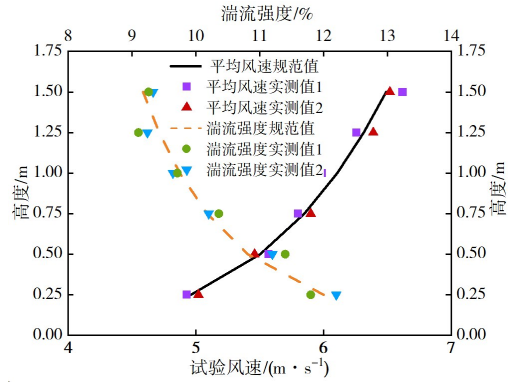


图6 风场特性实测值与理论值对比

Fig. 6 Comparison of measured wind field characteristics with theoretical values

表2 气弹模型自振频率与阻尼比

Table 2 Natural frequency and damping ratio of aeroelastic model

模型	标定自振频率/Hz		理论自振频率/Hz		相对误差/%		实测阻尼比/%
	X向	Y向	X向	Y向	X向	Y向	
单塔	15.40	13.79	15.78	13.79	2.47	0.0	2.050
塔线体系	13.82	13.12	14.14	13.31	2.32	1.4	2.164

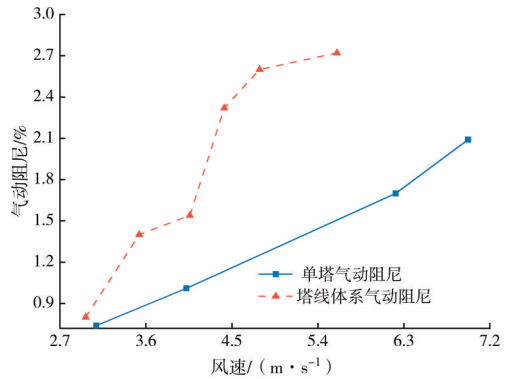


图7 气动阻尼对比

Fig. 7 Comparison of aerodynamic damping

3 塔线体系风致响应分析

3.1 有限元分析

阻尼在物体运动时起能量耗散的作用,通常会使动力响应产生衰减。输电塔线体系结构在脉动风下的振动方程为

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + KD = F_b(t) + R(t) \quad (6)$$

式中: D 为系统的位移向量; $\dot{D}$ 为系统的速度向量; $\ddot{D}$ 为系统的加速度向量; M 为结构的质量矩阵; C 为结构的阻尼矩阵; K 为结构几何刚度矩阵; $R(t)$

为节点不平衡力向量; $\mathbf{F}_b(t)$ 为脉动风荷载节点力向量。

非线性时域计算中应用最广的方法是隐式逐步积分法,该方法基于时域分析利用时间逐步积分来求解动力平衡方程,常见有Newmark- β 法、Wilson- θ 法和Gurtin法等。本文采用Newmark- β 法求解体系的动力响应。常用的Rayleigh阻尼矩阵理论通常假设阻尼矩阵与质量矩阵和刚度矩阵均成正比,如式(7)~(9)所示:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}, \beta = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega_1} + \frac{\beta\omega_1}{2} = \frac{\alpha}{2\omega_2} + \frac{\beta\omega_1}{2\omega_2} + \frac{\beta\omega_2}{2} \quad (9)$$

式(7)~(9)中: α 和 β 为比例常量; ζ 为结构的阻尼比,输电塔按钢结构取1%,输电线按照索结构取2%; ω_1 、 ω_2 分别为结构的第1、2阶圆频率。

图8为在 90° 风向角下风速为32 m/s时输电塔顶层横担处加速度响应时程图。从图8可以看出,加速度响应沿顺风向的时间变化以零均值随机过程为特征。图9给出了32 m/s风速下各风向角的单塔与塔线体系顺风向加速度响应均方根。从图9可以看出:两种角度的风载作用下的加速度响应均随着高度上升而增大,体现出输电塔结构高耸柔的特性;加速度响应自底层横担处起增幅显著提高,表明脉动风的水平相关性使横担对输电塔的风致响应具有不可忽略影响;由于输电线增加了塔线体系的阻尼,各风向角下塔线体系的加速度响应均不同程度地低于单塔的。在 90° 风载作用下,塔线体系顶部加速度响应的瞬时峰值约为单塔的80%,这是由于较之 0° 风向角, 90° 风向角下输电线对体系的迎风面积的增大作用更为显著。

图10为直线塔分段示意图。计算输电塔风振系数时按图10将模型分为12段,各区段最高点作为计算点,各区段计算点高度见表3。根据风洞试验和有限元得到加速度时程,采用公式(10)计算风振系数^[21]:

$$\beta_z = 1 + \frac{mG\sigma_s(z)}{\mu_s\mu_z\omega_0 A(z)} \quad (10)$$

式中: ω_0 为基本风压; m 为是区段质量; G 为保证系数; $\sigma_s(z)$ 为塔体 z 高度处顺风向加速度响应均方根; $A(z)$ 为结构在高度 z 处的有效迎风面积。

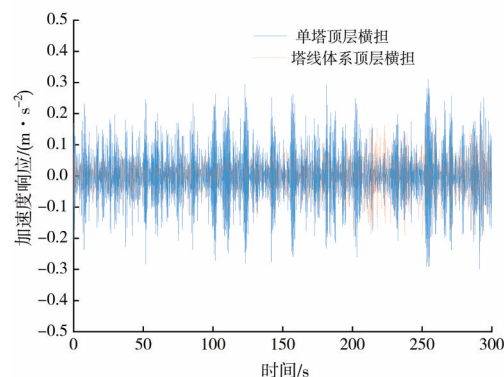


图8 顶层横担处加速度响应对比

Fig. 8 Comparison of acceleration responses at cross arm of top layer

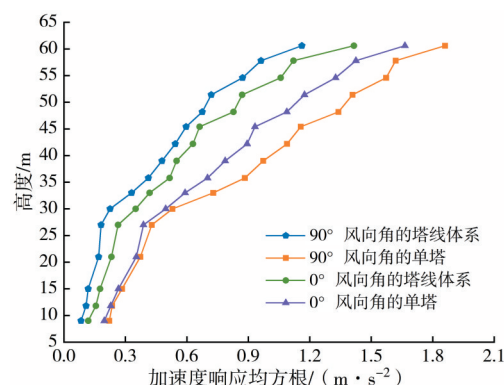


图9 单塔与塔线体系加速度响应对比

Fig. 9 Comparison of acceleration response of single tower and tower-line system

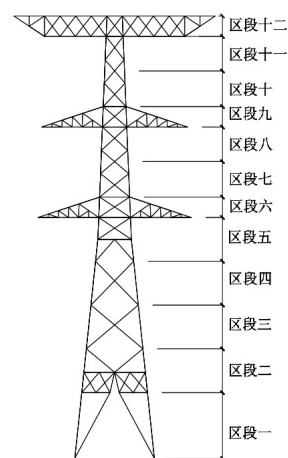


图10 直线塔分段示意图

Fig. 10 Section diagram of linear tower

图11给出了32 m/s风速下单塔和塔线体系采用有限元软件计算的风振系数。从图11可以看出:风振系数随着高度的增加呈上升趋势;绝缘子与输电线导致33 m处风振系数发生突变,三个横

担处的风振系数较其他区段的有骤然增大的现象;直线塔顶部风振系数最大达到了1.72,塔线体系顶部风振系数最大达到了1.97。经对比可知,输电塔底部风振系数与塔线体系的相差不大,而33 m以上高度处塔线体系的风振系数明显大于单塔的。这是由于输电线增大了结构的迎风面积,且计算体系横担位置处的集中质量时考虑了输电线与绝缘子的质量。实际输电塔都是挂线工作的,因此在设计时,应考虑线路中输电线带来的动力响应导致风振系数放大的影响。

表3 各区段计算点高度

Table 3 Height of calculation point of each section

区段编号	计算点高度/m	区段编号	计算点高度/m	区段编号	计算点高度/m
一	9.0	五	33.0	九	48.2
二	15.0	六	35.8	十	53.0
三	21.0	七	40.6	十一	57.8
四	27.0	八	45.4	十二	60.6

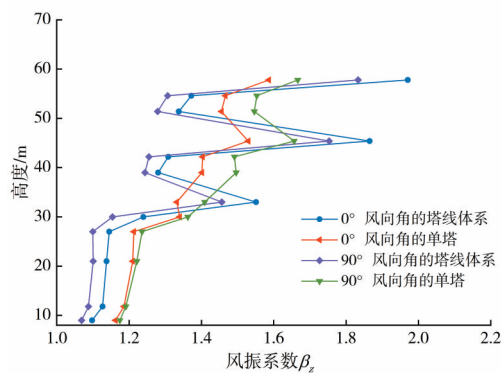


图11 不同高度处的风振系数

Fig. 11 Wind-induced vibration coefficients at different heights

3.2 风洞试验结果分析

图12给出了90°风向角下的单塔及塔线体系加速度响应均方根随风速的变化情况。从图12可以发现,加速度响应均方根随风速单调增加,且单塔响应比塔线体系更为突出。主要原因是:较之单塔,塔线体系的阻尼比更大,体系整体阻尼大于单塔的,从而加速度响应随着共振分量响应减小而降低。图13给出了气弹模型在不同风速下各横担处的风振系数。从图13可以看出,风振系数在很大程度上随高度增加而增加,并随风速增大呈非线性轻度增加,且风速越高风振系数的增幅越大。对比图11和图13可以发现,风洞试验结果与

有限元分析结果趋势较为吻合,但前者结果小于后者的。笔者认为,这可能是由阻尼取值差异引起的。在有限元软件计算中采用的是定阻尼比,与气弹模型试验过程中实际阻尼比存在较大差异。

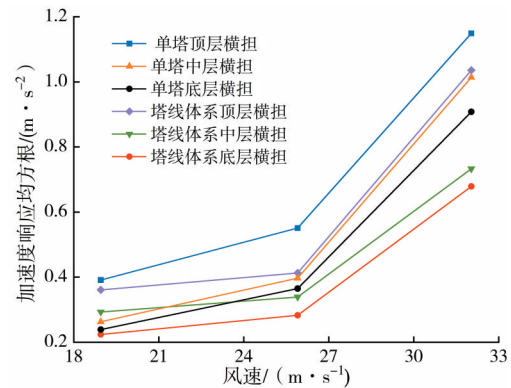


图12 不同风速下横担位置处加速度响应对比

Fig. 12 Comparison of acceleration responses at cross arm positions at various wind speeds

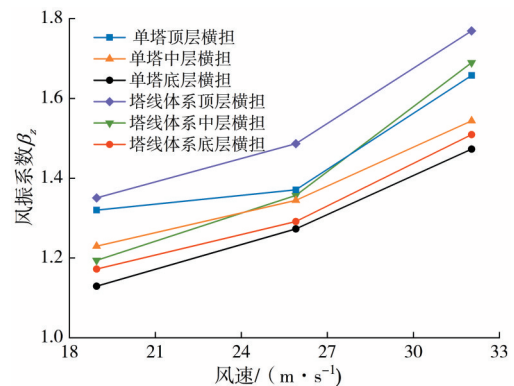


图13 不同风速下横担位置处风振系数对比

Fig. 13 Comparison of wind-induced vibration coefficients at cross arm positions at different wind speeds

3.3 有限元、试验与规范计算风振系数对比

风振系数被广泛用于等效静风荷载的估算。我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)(后文简称“荷载规范”)和《高耸结构设计标准》(GB 50135—2019)(后文简称“高耸规范”)均规定了 z 高度处的风振系数的计算方法,分别如式(11)和式(12)所示:

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z\sqrt{1+R^2} \quad (11)$$

式中: g 为峰值因子; I_{10} 为10 m高度处的名义湍流强度; R 为共振分量因子; B_z 为背景分量因子。

$$\beta_z = 1 + \eta\varepsilon_1\varepsilon_2 \quad (12)$$

式中: η 为脉动增大系数; ε_1 为风压脉动、高度变化

等的影响系数; ε_2 为振型、结构外形的影响系数,均按规范取值。

将试验和数值结果与规范中的风振系数相应规定值进行对比,对该模拟方式进行验证和推广具有重要意义。将风洞试验和数值分析得出的风振系数与常用于输电塔抗风设计的风振系数相关规范值进行比较,如表4所示。荷载规范和高耸规范推导出的风振系数随高度而变化,比《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2012)(后文简称“输电线路荷载规范”)中的常数1.60更安全。同时也表明,风振系数单一采用输电线路荷载规范建议值可能会带来安全隐患,故在实际工程应用中应综合考虑多种规范的建议值。

表4 风振系数比较表

Table 4 Comparisons of wind-induced vibration coefficients

高度/m	风振系数					
	试验值		数值分析值		荷载规范 建议值	高耸规范 建议值
	单塔	塔线	单塔	塔线		
57.8	1.68	1.76	1.72	1.97	1.63	1.880
45.4	1.62	1.68	1.66	1.84	1.37	1.685
33.0	1.42	1.44	1.47	1.55	1.18	1.489
平均值	1.57	1.63	1.62	1.79	1.39	1.685

4 结论

本文选取某拟建的110~500 kV大跨越输电塔线体系为研究对象,通过有限元数值模拟及气弹模型风洞试验分析了体系的风致响应,并将数值模拟与风洞试验所得到的风振系数分别与按照我国规范计算得到的风振系数进行比较,主要结论如下:

1) 导地线提高了结构的气动阻尼,降低了结构的加速度响应。塔线体系的加速度响应不同程度的小于单塔的,且在塔顶位置处表现得尤为明显。

2) 塔线体系的风振系数随高度的增大而增大,横担处的挡风面积和集中质量远大于其他部位的,风振系数在输电塔各横担处陡增,故在设计时应引起高度重视。

3) 通过数值模拟得到的风振系数较之风洞试

验的稍大,但二者均大于规范值,这说明单一采用输电线路荷载规范建议值存在一定的安全隐患。

[参考文献]

- [1] 李旭华,唐勇斌.某临近高压电塔路堑边坡加固设计方案研究[J].中外公路,2021,41(5):43-46. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.010.
LI Xuhua, TANG Yongbin. Study on the design scheme of cutting slope reinforcement near high-voltage electric tower [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021, 41(5): 43-46. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579. 2021.05.010.
- [2] 翁兰溪,赵金飞,林锐,等.福建沿海台风风速分布特性及对输电线路的影响研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):95-101. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.03.013.
WENG Lanxi, ZHAO Jinfei, LIN Rui, et al. Investigation of distribution characteristics of typhoon in Fujian coastal area and its influence on transmission lines [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 95-101. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.03.013.
- [3] 唐自强.输电塔气弹模型气动阻尼试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):71-77. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.012.
TANG Ziqiang. Experimental study on aerodynamic damping of aeroelastic model of transmission tower [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 71-77. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.012.
- [4] ZHANG J, XIE Q. Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 160: 271-279. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.05.041.
- [5] TIAN L, ZHANG X, FU X. Fragility analysis of a long-span transmission tower-line system under wind loads [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(10): 2110-2120. DOI: 10.1177/1369433220903983.
- [6] CHEN F B, YAN B W, WENG L X, et al. Wind tunnel investigations of aeroelastic electricity transmission tower under synoptic and typhoon winds [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2021, 34(1): 04020102. DOI: 10.1061/(ASCE) AS. 1943-5525. 0001219.
- [7] TAKEUCHI M, MAEDA J, ISHIDA N. Aerodynamic damping properties of two transmission towers estimated by combining several identification methods [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 872-880. DOI: 10.1016/j.jweia.2010.09.001.
- [8] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, et

- al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 72(1): 241-252. DOI: 10.1016/S0167-6105(97)00240-7.
- [9] YASUI H, MARUKAWA H, MOMOMURA Y, et al. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1-3): 431-441. DOI: 10.1016/s0167-6105(99)00091-4.
- [10] 汪佳, 付兴, 李宏男. 输电塔线体系多因素风致动力响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 1-10. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2020.01.01.
WANG Jia, FU Xing, LI Hongnan. Dynamic analysis of a transmission tower-line system under wind loading with multiple factors[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(1): 1-10. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2020.01.01.
- [11] DUA A, CLOBES M, HÖBBEL T, et al. Dynamic analysis of overhead transmission lines under turbulent wind loading[J]. Open Journal of Civil Engineering, 2015, 5(4): 359-371. DOI: 10.4236/ojce.2015.54036.
- [12] RAO N P, KNIGHT G, MOHAN S J, et al. Studies on failure of transmission line towers in testing[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 55-70. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.10.017.
- [13] MARA T G, HONG H P. Effect of wind direction on the response and capacity surface of a transmission tower[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 493-501. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.10.004.
- [14] LIANG S G, ZOU L H, WANG D H, et al. Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system[J]. Engineering Structures, 2015, 85: 63-72. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.042.
- [15] 刘石, 杨毅, 黄正, 等. 考虑结构极限状态的输电塔-线体系风洞试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(10): 145-151. DOI: 10.13204/j.gyjzGYJZ201907150004.
LIU Shi, YANG Yi, HUANG Zheng, et al. Study on collapse states of transmission towers by wind-tunnel tests of tower-line systems[J]. Industrial Construction, 2020, 50(10): 145-151. DOI: 10.13204/j.gyjzGYJZ201907150004.
- [16] 王骞. 风荷载下大跨越输电塔-线体系振动控制分析[D]. 济南: 山东大学, 2014. DOI: 10.7666/d.Y2596572.
- WANG Qian. Analysis on vibration control for long-span transmission tower-line system under wind load[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. DOI: 10.7666/d.Y2596572.
- [17] 窦汉岭, 程长征. 转角输电塔线体系的风振响应分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(9): 1218-1222. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2020.09.013.
DOU Hanling, CHENG Changzheng. Analysis on wind-induced response of corner transmission tower-line system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(9): 1218-1222. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2020.09.013.
- [18] SHINOZUKA M, YUN C B, SEYA H. Stochastic methods in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36(2): 829-843. DOI: 10.1016/0167-6105(90)90080-V.
- [19] 黄景辉, 李寿英, 刘敏, 等. Noor III 光热电站吸热塔气动阻尼研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 177-183. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.21.025.
HUANG Jinghui, LI Shouying, LIU Min, et al. Aerodynamic damping of heat absorption tower of Noor III solar thermal power station[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 177-183. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.21.025.
- [20] 邓洪洲, 司瑞娟, 胡晓依, 等. 特高压输电塔气弹模型风洞试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 673-678. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.05.008.
DENG Hongzhou, SI Ruijuan, HU Xiaoyi, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of UHV latticed transmission tower[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(5): 673-678. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.05.008.
- [21] 邓洪洲, 段成荫, 徐海江. 良态风场与台风风场下输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 257-262. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.08.038.
DENG Hongzhou, DUAN Chengyin, XU Haijiang. Wind tunnel tests on an aeroelastic model of a transmission tower-line system under normal wind field and typhoon wind field[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 257-262. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.08.038.

(责任编辑:毛娜;校对:彭三军)