

大跨越高压输电塔线体系风致振动的研究与进展

郭惠勇, 李正良

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要 通过对大跨越高压输电塔线体系风致振动近 20 年来国内外研究成果的总结, 阐述了高压输电塔线体系在风荷载下结构振动特性研究的发展历程. 首先简要介绍了高压输电塔线体系风致振动的研究内容和现状, 然后从风致振动的研究对象、风致振动的机理和风致振动的分析方法 3 个方面, 分别探讨了高压输电塔线体系风致振动研究发展的现状和所面临的问题, 最后对塔线体系风致振动研究的未来趋势进行了展望.

关键词 输电塔线体系; 风致振动; 振动特性; 风洞试验

中图分类号 :TU761.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2008)01-0106-06

近年来, 我国一大批 500 kV 甚至 1 000 kV 的高压和超高压的交直流输电线路相继在西部进行建设和运行. 高压输电塔线体系作为高压和超高压输电的重要结构体系, 是一种应用逐渐广泛且极其重要的生命线结构体系. 高压输电塔线体系在建设、运行等过程中常会受到多方面因素的影响, 特别是跨越大的江河或海峡的大跨越输电塔线体系, 其跨距往往超过 1 000 m, 塔高超过 100 m. 这种输电塔线体系承受的荷载特别是风荷载往往相当大, 常常会因风荷载而造成结构体系严重破坏, 从而导致供电系统瘫痪, 给社会经济带来重大损失. 因此, 大跨越高压输电塔线体系在风荷载下的结构动力特性及其相应的安全性已成为研究热点.

本文结合近 20 年来国内外的研究成果, 首先简要介绍了高压输电塔线体系风致振动的研究内容和现状, 然后从风致振动的研究对象、风致振动的机理和风致振动的分析方法 3 个方面, 分别探讨了高压输电塔线体系风致振动研究发展的现状和所面临的问题, 最后对塔线体系风致振动研究的未来趋势进行了展望.

1 高压输电塔线体系风致振动的研究现状

对高压输电塔线体系风致振动进行研究, 实际上就是对输电塔架和导线在各种风荷载下的抗风性能进行研究. 研究对象包括受风荷载影响的输电塔架、导线以及相应的连接件, 内容包括塔线体系的涡激振动、抖振、驰振以及瞬时局部高强度风荷载下结构体系振动的尺度效应和位置效应等, 分析方法有频域法、人工模拟时域法、气弹力学模型法以及数值风洞和风洞试验等方法. 近 10 多年来, 许多研究者进行了输电塔线体系在风荷载下动力特性的分析与试验, 取得了一定的成果^[1-2], 但这些研究仍有一些不足: (a) 这些研究要么忽略导线的影响, 对输电塔单独进行计算, 要么仅对两输电塔中段的导线气动力、气弹性特性进行研究, 而对于大跨越高压输电塔线体系在风荷载下的流固耦合动力特性及其相应的破坏机理的系统研究则较少; (b) 对于大跨越体系, 导线的质量相对于塔架的质量已经非常可观, 在风荷载下, 导线对于塔架的作用将居于首位, 而对于小跨度或中等跨度和高度的输电塔线体系, 导线对输电塔的影响较小甚至可以忽略, 因此, 需要考虑导线和塔体间的耦合振动效应; (c) 不同类型的风荷载, 如微风、强平稳气流以及旋风(tornado)、微风暴(microburst or downburst)等瞬时高强度风荷载, 对体系结构的振动与破坏机理也显著不同, 而在冬季覆冰情况下, 风荷载往往更具有破坏性; (d) 尽管建立了平稳风荷载作用的塔线体系模型或进行了一些风洞试验, 却没有将模型与试验相结合, 所以无法了解模型是否适用于真实结构. 总之, 大跨越高压输电塔线体系风致振动的研究尚不成熟.

2 输电塔线体系风致振动的研究对象

输电塔线体系风致振动的研究对象包括输电塔架、输电导线和输电塔线系统。

2.1 输电塔架

输电塔架一般是由型钢和组合型钢组成的桁架结构,主要由塔体和金具组成。作用在塔架上的风荷载主要是顺风向力和横风向力,竖向风力则可以忽略。Hiroshi^[3]给出了一种 500 kV 架空输电线路铁塔模型的风洞试验结果,认为风向角 60° 时,塔体上的组合风荷载达到最大值,即此风向角为最不利风向角,而对于金具来说,风向角 0° 时,横风向力的系数达到最大值。Loredo-Souza 等^[4]则对一典型的输电塔由横风导致的响应进行了计算,分析对比了 GRF(gust response factor)方法和基于影响线的统计方法。苏继龙^[5]对输电塔的外伸臂的动力学模型和振型进行了研究,分析了塔外伸臂覆冰质量不等时发生的振型局部化现象。郭绍宗^[6]则介绍了国内外高压、超高压、特高压输电线路常用的铁塔形式、铁塔所用的钢种以及铁塔内力的计算方法。黄斌等^[7]根据实际工程风载作用下导线传给输电塔的荷载特征,利用随机参数结构受随机激励响应的模型,计算了输电塔脉动位移的统计值。龚靖等^[8]结合吉林省某地架设的薄壁型钢输电塔,对塔架的风扰力响应进行了研究,确定了基本风压,并且对风的特性进行了讨论。王世村等^[9]针对高耸单杆输电塔结构风致响应较大的特点,进行了气动弹性模型的风洞试验,研究了不同风速下结构的气动响应。

2.2 导线

输电导线是细长的柔性体,可以看做是索梁结构。一般输电导线的振动形态有横向振动、跨间弧垂绕两端固定点的摆动和导线绕自身轴线的扭转振动 3 种,主要振动形态为横向振动和扭转振动。Wardlaw 等^[10]利用准稳态理论对不同架构的导线进行了分析和试验研究,并研究了导线之间的干扰问题,确定了各种风的攻角下的空气动力学系数。Oliveira^[11]通过试验得到了 2 根和 4 根导线组成的电缆的托举系数是风的入射角的函数的结果。Alam 等^[12]则分析了 2 根平行导线前后排列且线距不同情况下的托举系数。Braun 等^[13]对两支撑塔中段导线受微风作用的动力特性进行了研究,提出了导线的气动力和气弹性分析模型,并从二维角度对流体和导线进行了分析。Braun 等^[13]在评估空气动力与气弹性信息时以数值仿真方法代替风洞测试,但在利用数值仿真方法研究导线的动力特性时未通过试验对模型进行验证。该类方法对输电导线的研究不考虑塔架对导线的约束作用,而仅考虑纯理想情况下导线的风致振动问题。

2.3 输电塔线系统

输电塔线系统是一种高耸、大跨度的柔性结构,在风力作用下系统的结构响应十分显著。在风荷载下,不仅导线对塔架的结构响应有影响,而且塔架的支撑方式也会改变导线的风致振动特性。梁枢果等^[14]为了评估导线对铁塔结构响应的影响,利用风洞试验方式和气动弹性模型对罗江 500 kV 架空输电线路系统进行了研究,结果表明,输电塔线系统在挂导线时,低风速下导线对铁塔的加速度影响较小,高风速时导线对塔架振动起到了阻尼作用,使塔架结构响应降低。Momomura 等^[15]则记录分析了某一山区安装的输电塔的风致振动特性,研究了风速低于 25 m/s 时该单一输电塔的全尺度数据,数据显示:风向的不同对风致动力特性影响较大,导线的特性也影响输电塔的动力特性,带线输电塔的基频小于或接近于无线塔的基频。该研究^[15]主要侧重于山区的一个单点区域中的一个单塔。Diana 等^[16]则以跨越 Lago de Maracaibo 的架空输电导线为例分析了风致振动、绝缘子失效、单根导线失效以及地震荷载作用下的振动等情况。Yasui 等^[17]考虑了输电塔线体系的风致耦合振动,分析了塔对导线的 2 种支撑方式(悬挂式和张拉式)的响应特性,并分别利用时程方法和能量谱密度法计算了塔振动的峰值特性,认为不仅导线对输电塔有一定的影响,而且支撑方式也会对体系的响应特性和峰值特性产生影响。目前,对输电塔线系统的研究很少考虑输电塔与导线连接的几何非线性以及重荷载下发生的螺栓滑移和连接的实际偏心。

3 塔线体系风致振动的机理

输电塔线体系的损伤和破坏一般是由风荷载引起的,由于具体风荷载的不同,塔线体系的受力机理也不相同。关于塔线体系受力机理的研究,主要体现在塔线体系的微风振动、抖振、驰振以及瞬时高强度风荷载(如旋风、微风暴等切变气流)下结构的振动与损伤研究几个方面。

3.1 微风振动

微风振动又称为涡激振动,输电塔线体系的微风振动最为频繁,频繁的振动常常会使导线疲劳断股,严重时将会导致输电线路中断。微风振动下导线断股常发生在线夹口附近,一般在线夹出口附近悬挂 Stoke 防振锤,可以抑制导线振动的振幅及出口转角。缪建成等^[18]对大跨越体系下的导线和防振锤系统微风振动进行了研究,认为微风振动是一个耦联的过程,并据此建立了微风振动的力学模型,采用模态分解法^[19]求解了导线的风振响应。

3.2 抖振

自然风中的脉动部分会引起塔线体系抖振,由于塔架和导线都要产生振动,两者的振动耦合后,往往会大大加剧导线及其悬挂金具、绝缘子甚至塔架的自身破坏。胡松等^[20-21]对大跨越超高压输电塔线体系进行了频域抖振分析,研究了顺风向抖振问题,采用 SRSS 法求得了响应的均方根值。Diana 等^[16]则采用时域法分析了 400 kV 架空塔线系统的抖振响应,分析中利用准稳态理论确定了空气对结构作用的动力公式,包括气动托举力和气动力矩公式。

3.3 驰振

塔线体系在较高风速以及导线有覆盖冰雪下常会发生驰振。在冬季,当水平方向的风作用在因覆冰而变为非圆截面的输电导线时,将产生空气动力,在一定条件下,会诱发导线产生一种低频、大振幅的自激振动,即驰振。导线的驰振常会引起铁塔的连锁振动,其结果可能会使导线、连接金具和绝缘子发生破坏,还可能使铁塔本身发生疲劳损伤。Desai 等^[22]分析了输电塔线体系中导线的驰振现象,即导线的大幅度振动。Desai 等^[22]采用一种简单的等参单元(cable element)来模拟导线,将输电塔考虑为刚性,将远端的绝缘子考虑为静态线性弹簧,在此基础上计算了驰振的幅值。该模型虽可以用来分析多跨输电塔线的驰振效应,但该模型较为粗糙,且未考虑塔线之间的耦合效应。Tokoro 等^[23]研究了由驰振产生的失稳特性,其研究主要是利用三维气弹性模型分析驰振下导线的间距、攻角以及结构阻尼对失稳的影响。Nagao 等^[24]对导线的驰振失稳进行了试验研究,并得到了不同攻角和 Scruton 系数下驰振失稳的开始风速。Braun 等^[13]提出了导线的气动力和气弹性模型,并利用该模型分析了两输电塔之间 2 根并列导线的驰振特性。

3.4 瞬时高强度风荷载

许多输电塔线体系的破坏都是由局部高强度风荷载引起的,其受力机理往往不同于宽尺度、大范围的风荷载。Savory 等^[25]考虑了旋风、微风暴等高强度风对单输电塔的影响,并建立了简化的瞬时旋风、微风暴的风速时域模型,考察了单输电塔的失效问题。该气动风载模型及相应的塔结构分析有较多的计算简化,并且未考虑导线的影响。Shehata 等^[26]研究了导线与输电塔在高强度风荷载下的动力特性,并以一个因强气流而损坏的输电塔为参考,提出了较为精细的数学模型,预测了强风荷载下输电塔和导线的性能。但是,该研究未详细考虑高强度风荷载的尺度效应与位置效应。

4 塔线体系的分析方法

塔线体系风致振动的理论分析方法有频域法、人工模拟时程分析法、气弹性模型法和数值风洞方法等,实验分析方法主要是模型的风洞试验方法。理论分析方法较为简便快捷,但其计算结果的真实可靠性需通过试验进行验证。而采用模型的风洞试验方法因需要建立结构的实物模型并要在风洞中进行试验,故成本较高、耗时较长,但模拟的结构真实度较高。

4.1 频域法

频域分析是输电塔线体系常用的分析方法。Battista 等^[27]采用频域法分析了输电塔线体系的动力特性和稳定性,即首先建立了一个结构的三维有限元模型,计算了风速的模态能量谱,然后分别采用 SRSS 方法和 CQC 方法计算了结构的响应位移。结果表明,虽然 CQC 法考虑了相邻模态的耦合作用,但两者的计算结果很接近。陈亦等^[21,28]也采用频域法分析了输电塔线的风致响应。

4.2 人工模拟时程分析法

该方法可以根据风荷载的统计特性进行计算机模拟,以人工生成的具有特定频谱密度和空间相关性的风速时程作为激励,或以特定测量的风荷载时程作为激励样本,建立时域下的动力微分方程并进行数值求解,得到结构的响应数据。Diana 等^[16]采用时域法分析了输电塔线抖振的响应,并建立了动力学方程

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(V(\xi, t), \dot{x}, \ddot{x}, t) \tag{1}$$

式中： M, C, K ——质量、阻尼和刚度矩阵； $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ ——位移、速度和加速度列向量； F ——空气动力广义力向量； V ——风速； ξ ——导线长度。文献 [16] 根据准稳态理论给出了实时空气动力的微分表达式

$$\begin{aligned} dF_L(\xi, t) &= \frac{1}{2} \rho C_L(\alpha) 2dV^2(t) d\xi \\ dF_D(\xi, t) &= \frac{1}{2} \rho C_D(\alpha) 2dV^2(t) d\xi \\ dM(\xi, t) &= \frac{1}{2} \rho C_M(\alpha) 2dRV^2(t) d\xi \end{aligned} \tag{2}$$

式中： dF_L, dF_D ——竖向托举力和横向拉伸力； dM ——气动力矩； ρ ——空气密度； C_L, C_D, C_M ——与攻角 α 相关的托举、拉伸和力矩系数； $2d$ ——有效直径。该分析方法往往忽略了气体与塔线结构本身的流固耦合作用，即没有考虑结构振动引起的局部流场变化。

4.3 气弹力学模型法

结构上的风压不仅与来流的脉动特性有关，还与结构的振动特性有关。气弹力学模型法通过一些必要的假设对气弹力学模型进行简化，主要通过附加气动力的引进来考虑结构与气流的耦合作用，从而将流体对结构的作用以附加质量、气动阻尼等系数表达出来，这些系数可以通过试验测定。在附加气动力项中，与速度相关的力用气动阻尼项表示，与位移或加速度相关的力用气动刚度项或附加质量项表示，则考虑流固耦合作用时结构在脉动风荷载下的动力方程为

$$M\ddot{x}(t) + (C + C_f)\dot{x}(t) + (K + K_f)x(t) = p(t) \tag{3}$$

或

$$(M + M_f)\ddot{x}(t) + (C + C_f)\dot{x}(t) + Kx(t) = p(t) \tag{4}$$

式中： M_f, C_f, K_f ——附加质量、气动阻尼和气动刚度矩阵； $p(t)$ ——脉动风的激励向量。Braun 等^[13]采用气弹力学模型法对两输电塔间的导线进行了气动力和气弹性分析，并考虑了流体和结构之间的耦合作用。总之，气弹力学模型法是一种弱耦合方法，其中对输电塔线在风荷载下的附加质量和气动阻尼的取值仍需要进一步研究。

4.4 数值风洞

数值风洞方法是一种强耦合方法。这种方法的基本思路是：建立流体和结构的运动方程，用数值方法联立求解运动方程，即综合运用计算流体力学和计算结构力学 2 种方法模拟结构及其周围流场的变化情况；用 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法引入运动网格并将该网格作为参考坐标系，通过合适的网格运动形式来解决两相界面处的不相协调问题。同时，在每一时间步内依次求解流体场、结构场和网格场，并将前一个物理场的计算结果作为外荷载施加于后一个物理场，以实现 2 个场的耦合^[29-30]。数值风洞方法虽然可以很好地描述流体和结构之间的耦合作用，但涉及固体和流体 2 个物理域的复杂几何建模和网格生成技术，而且对于塔线体系，这类包含弹性体和柔性体的复杂结构还缺乏成熟的计算模型，故数值风洞方法在输电塔线体系中的应用还不完善。

4.5 风洞试验

风洞模拟试验是输电塔线风荷载和风振响应研究中最有效的方法。付国宏等^[31]以杭州至瓶窑 500 kV 输电线路为原型，建立了单塔 1:30 的几何模型，并对架空线路进行了风振试验。由于该模型不能真实地模拟导线与地线，故采用气动能量输入来模拟导线对塔的振动影响。试验结果表明，导线对塔架的影响可以忽略。这主要是由于该试验塔线体系所研究的塔高和跨距均较低所致。王世村等^[9]针对高耸单杆输电塔结构风致响应较大的特点，进行了气动弹性模型的风洞试验，研究了不同风速下结构的气动响应。楼文娟等^[32]以 183 m 高的 200 kV 椒江大跨越输电塔为原型，设计制作了全塔气动弹性模型，并对塔线体系的风荷载及风振响应进行了风洞试验研究。邓洪洲等^[33]以江阴大跨越输电塔为工程背景，建立了考虑输电线、绝缘子和塔架耦合的两塔三段线分析模型，并进行了多个风速下的气动弹性模型风洞试验。这些研究表明，风洞模拟试验可以很好地揭示大跨越输电塔线体系的动力特性和风振响应特点，是风振分析中最为有效的方法。

5 结论与展望

本文对大跨越高压输电塔线体系风致振动研究的3个主要方面,即风致振动的研究对象、风致振动的机理和风致振动的分析方法进行了综述和讨论,认为大跨越高压输电塔线体系风致振动的主要研究和发展方向应包括以下几个方面:

a. 大跨距超高压输电塔线体系是常见的悬索结构之一,其力学性质非常复杂,几何非线性非常显著.目前,分析时大都取1跨或2跨,这与系统是连绵不断的实际情况有一定差别.因此,有必要建立合理的包含几何非线性的多跨计算模型.

b. 由于大跨越高压输电塔线体系风致振动中导线的影响不能忽略,不仅风和结构之间存在着流固耦合,而且导线和塔体之间也存在着耦合振动,因此有必要考虑塔体、导线以及流体之间的耦合动力特性.

c. 数值风洞方法作为一种强耦合方法,适用于塔线体系风致振动研究.相对于风洞试验,该方法具有经济和节省时间的优点.但是,该方法的计算结果与实测结果之间仍有较大差异.因此,需要对现有数值风洞方法进行改进,以使该方法更具实用性.

d. 针对大跨越超高压输电塔线,综合运用各种分析方法,开发相应的结构风致振动分析软件和硬件,利用实时采集的数据对输电塔线体系的安全性和可靠性进行评估.

参考文献:

- [1] 邓洪洲,朱松晔,王肇民.大跨越输电塔线体系动力特性及风振响应[J].建筑结构,2004,34(7):25-28.
- [2] 贺德馨.风工程与工业空气动力学[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] HIROSHI K. Wind tunnel test on 500 kV transmission tower with solid web brackets[J]. Journal of Wind Engineering, 1994, 58: 54-60.
- [4] LOREDO-SOUZA A M, DAVENPORT A G. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 995-1005.
- [5] 苏继龙.高压输电铁塔外伸臂振动力学模型及其振型局部化研究[J].振动与冲击,1998,17(3):62-65.
- [6] 郭绍宗.国内外输电线铁塔的发展及展望[J].特种结构,1998,15(3):43-46.
- [7] 黄斌,唐家祥.大跨越输电塔的风振响应[J].力学与实践,1998,20(5):12-13.
- [8] 龚靖,贾瑞庆.薄壁钢管输电塔架风载响应研究[J].东北电力学院学报,1998,18(4):76-84.
- [9] 王世村,孙炳楠,楼文娟,等.单杆输电塔气弹模型风洞试验研究和理论分析[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(1):87-91.
- [10] WARDLAW R L, COOPER K R, WATTS J A. Wind tunnel and analytical investigations into the aeroelastic behavior of bundled conductor[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2):642-654.
- [11] PRICE S J. Wake induced flutter of power transmission conductor[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 38: 125-147.
- [12] ALAM M M, MORIYA M, TAKAI K, et al. Fluctuating fluid forces on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 139-154.
- [13] BRAUN A L, AWRUCH A M. Aerodynamic and aeroelastic analysis of bundled cables by numerical simulation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284: 51-73.
- [14] 梁枢果,朱继华,顾明.输电塔线体系风振响应的风洞试验研究[C]//第六届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集.北京:出版者不详,2002:165-172.
- [15] 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: 241-252.
- [16] DIANA G, BRUNI S, CHELI F, et al. Dynamic analysis of the transmission line crossing "Lago de Maracaibo" [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 977-986.
- [17] 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: 431-441.
- [18] 缪建成,王海期.大跨越导线自由振动的积分变化分析[J].机械工程学报,2002,38(5):153-155.
- [19] SIMPSON A. Determination of the inplane natural frequencies of multispan transmission lines by a transfer matrix method[J]. Proceedings of the Institute and Electronics Engineering, 1966, 113: 870-878.
- [20] 胡松.大跨越输电线路的风振反应分析及振动控制研究[D].上海:同济大学,2003.
- [21] 陈亦.大跨越输电线路塔体系风振响应及控制[D].上海:同济大学,2003.

- [22] DESAI Y M ,YU P ,POPPLEWELL N ,et al. Finite element modeling of transmission line galloping[J]. Computers & Structures ,1995 ,57 (3) :407-420.
- [23] TOKORO S ,KOMTSU H ,NAKASU M ,et al. A study on wake-galloping employing full aeroelastic twin cable mode[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2000 ,88 :247-261.
- [24] NAGAO F ,UTSUNOMIYA H ,NODA M ,et al. Aerodynamic properties of closely spaced triple circular cylinders[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2003 ,91 :75-82.
- [25] SAVORY E ,PARKE G A R ,ZEINODDINI M ,et al. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower[J]. Engineering Structure ,2001 ,23 :365-375.
- [26] SHEHATA A Y ,EL DAMATTY A A ,SAVORY E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading[J]. Finite Elements in Analysis and Design ,2005 ,42 :71-89.
- [27] BATTISTA R C ,RODRIGUES R S ,PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,2003 ,91 :1051-1067.
- [28] 程志军. 架空输电线路静动力特性及风振研究[D]. 杭州 :浙江大学 ,2000.
- [29] 刘瑞霞 ,杨庆山. 薄膜结构的风致振动研究进展[J]. 中国安全科学学报 ,2003 ,13(9) :27-30.
- [30] 秦云 ,张耀春 ,王春刚. 数值风洞模拟结构静力风荷载的可行性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报 ,2004 ,36(12) :1593-1597.
- [31] 付国宏 ,程志军 ,孙炳楠 ,等. 架空输电线路风振试验研究[J]. 流体力学实验与测量 ,2001 ,15(1) :15-21.
- [32] 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实验[J]. 振动工程学报 ,1996 ,9(3) :318-322.
- [33] 邓洪洲 ,朱松畔 ,陈晓明 ,等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 同济大学学报 :自然科学版 ,2003 ,31(2) :132-137.

Advances in research of wind-induced vibration of long-span high-voltage transmission line system

GUO Hui-yong , LI Zheng-liang

(School of Civil Engineering , Chongqing University , Chongqing 400045 , China)

Abstract :The development process of the research on the characteristics of wind-induced structural vibration was described based on the summary of the research progresses at home and abroad for recent 20 years. The content and current situation of the research on wind-induced structural vibration of the high-voltage transmission line system was briefly introduced at first ; then some problems in the research were discussed from the objectives to be researched , the mechanism of the wind-induced vibration and the analysis methods ; finally , the further development of the research was prospected.

Key words :transmission line system ; wind-induced vibration ; vibration characteristics ; wind tunnel experiment