

# 基于气弹模型风洞试验的输电塔气动阻尼研究<sup>\*</sup>

邹良浩, 梁枢果, 王述良

(武汉大学土木建筑工程学院 武汉, 430072)

**摘要** 输电塔挂线和不挂线情况下的气动阻尼比是精确进行其风振响应评估的重要参数。基于完全气弹模型风洞试验测试得到的位移与加速度响应时程, 结合使用经验模态分解法(empirical mode decomposition, 简称 EMD)、小波分析和随机减量方法(random decrement technology, 简称 RDT)以及 Hilbert 变换识别了输电塔在挂线和不挂线情况下各阶振型结构阻尼比和气动阻尼比, 分析输电塔在挂线和不挂线情况下结构阻尼比和气动阻尼比的变化规律。结果显示, 输电塔挂线时的结构阻尼比比不挂线情况要大; 输电塔的气动阻尼比随各阶振型频率的增加而减小, 随着风速的增加而增加。最后, 采用最小二乘法拟合得到了在试验风速条件下气动阻尼比的经验公式。

**关键词** 风洞试验; 气弹模型; 气动阻尼; 输电塔线体系

**中图分类号** TU317.1; V215.3

## 引言

输电塔线体系是一种复杂的空间耦合体系, 由于导地线的强非线性, 导线的振动将大大影响着输电塔。在风荷载作用下, 其动力响应十分复杂。在进行强风作用下输电塔线体系风振响应分析时, 其气弹效应特别是气动阻尼力的影响不可忽视, 对于输电塔而言, 不仅要考虑输电塔本身的气动阻尼力, 导地线上的气动阻尼力也对输电塔的风振响应起到十分很重要的作用<sup>[1-2]</sup>。如何准确考虑输电塔挂线和不挂线情况下结构的气动阻尼对其风振响应的影响, 是进行输电塔风致响应分析与抗风设计的重要因素。近年来, Maeda 等<sup>[3]</sup>通过实测数据证实了作用于输电塔上的导地线的强气动阻尼力, 另外, Maeda 等<sup>[3-4]</sup>分析了在强风作用下, 导线的几何非线性和附加的气动阻尼力对输电塔的影响, 且在文中指出, 导线在风荷载作用下, 存在很强的非线性振动, 其附加的气动阻尼力对输电塔的作用十分明显, 因此在考虑导线的气动阻尼力的影响后, 输电塔的气动阻尼力会大大增加。但是, 要想从响应数据准确评估气动阻尼比十分困难, 其识别的结果亦十分离散<sup>[5]</sup>。目前, 应用于结构阻尼比识别的方法很多, 包括时域法和频域法。前者主要有自相关半率减法和随机减量技术<sup>[6]</sup>, 后者主要有半功率频带法和 Hilbert 变换<sup>[7]</sup>。每一种方法都有其各自的局限性。近年来, 各国学者通过采用一些现有的方法或者组

合使用各种方法来实现对多自由度体系气动阻尼比的识别<sup>[8-11]</sup>。其中, Takeuchi 等<sup>[11]</sup>运用两个实际输电塔的实测数据, 进行了输电塔的气动阻尼比识别, 分析了输电塔气动阻尼比随风速及频率的变化规律。根据其提供的数据, 当输电塔挂线时, 在高风速情况下, 其一阶振型气动阻尼比接近 5%。另外, 任坤等<sup>[12]</sup>通过风洞试验数据进行了输电塔线体系气动阻尼比识别。尽管上述学者对输电塔线体系的气动阻尼比进行识别并得到了一些有用的规律, 却没有能提出指导实际的经验公式。

通过输电塔线体系完全气弹模型风洞试验, 测试得到输电塔在挂线和不挂线时各轴向的加速度和位移响应, 在此基础上, 联合使用 EMD 分解、小波分析和 RDT 以及 Hilbert 变换进行了结构各阶振型气动阻尼比的识别, 分析了气动阻尼比的分布规律, 并拟合得到了在试验风速条件下输电塔在挂线和不挂线情况下气动阻尼比经验公式。

## 1 输电塔线体系气动阻尼比识别方法

EMD 分解<sup>[13]</sup>是基于信号局部特征的时间尺度, 从原信号中提取一组本征模函数分量(IMF), 其各个 IMF 分量对应结构的各阶振型频率, 对各个 IMF 分量的气动阻尼比进行识别即可得到结构各阶振型气动阻尼比。在较短样本情况下应更加注意其识别的精度<sup>[14]</sup>。小波分析<sup>[15-16]</sup>是在 Fourier 分析

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51078296)

收稿日期: 2013-10-05; 修回日期: 2014-01-20

的基础上发展起来的,它提供了一种自适应的时域和频域同时局部化的分析方法,小波分析方法可以方便地解决信号中与结构固有频率不相干的其他频率成分对信号的影响,进一步优化信号。随机减量技术<sup>[17-19]</sup>是指从线性振动系统的一个或多个平稳随机响应样本函数获得该系统自由振动响应的数据处理方法,通过对此自由振动信号进行 Hilbert 变换来识别结构各阶振型的总阻尼比,总阻尼比减去结构阻尼比即可得到其气动阻尼比。如果在进行 RDT 之前不对信号进行一些处理,得到的自由振动信号往往包含其他频率成分,这样会影响阻尼识别的精度。综合使用以上方法可以避免各种方法的缺点,提高识别精度<sup>[11]</sup>。对于输电塔线体系,由于导线的频率特别密集以及其与输电塔的耦合振动,其响应数据包含很多频率十分接近的成分,如图 1,2 所示。对其响应时程进行 EMD 分解时,其临近频率成分亦会反映在各阶振型频率对应的 IMF 分量上,这样通过小波分析对各个 IMF 进行处理,就会提取出更为理想的数据,根据参考文献<sup>[15]</sup>的方法,考虑复 Morlet 小波变换具有与 Fourier 变换类似的形式,在时频信号分析中有其优越性。选用此方法作小波变化进行数据处理。进而通过 RDT 和 Hilbert 变换进行结构气动阻尼比的识别,可以得到更为准确可信的结果。

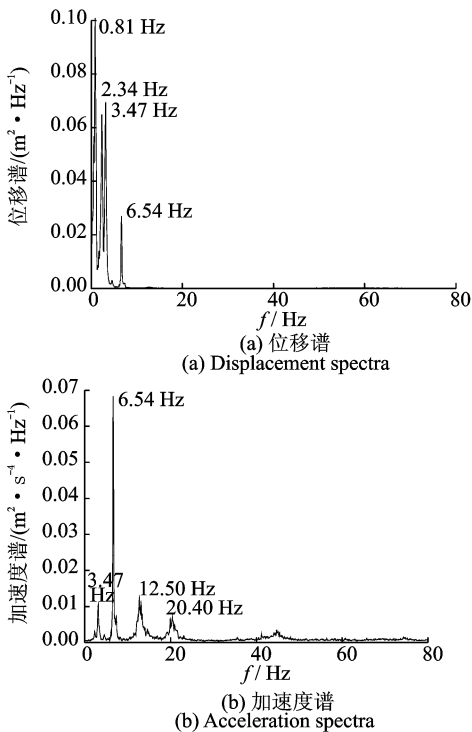


图 1 输电塔挂线时弱轴向响应功率谱

Fig. 1 Response spectra of transmission tower with lines in weak axial direction

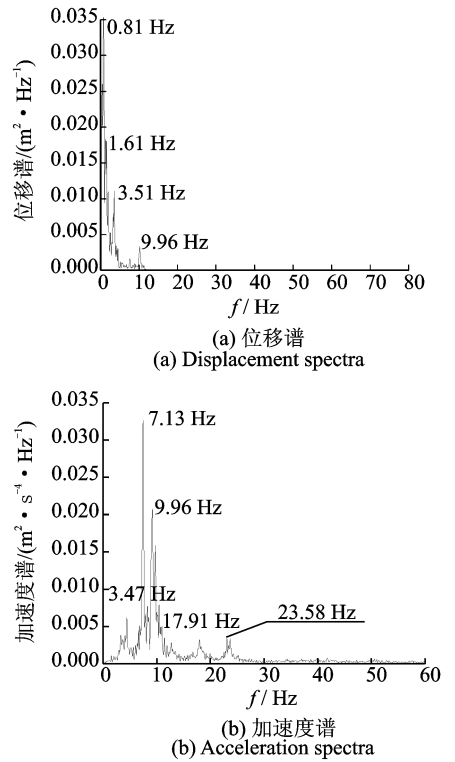


图 2 输电塔挂线时强轴向响应功率谱

Fig. 2 Response spectra of transmission tower with lines in strong axial direction

## 2 风洞试验简介

试验模型采用昌西到南昌的 500 kV 送电线路中的输电塔-线体系为原型。输电塔高 48.5 m, 主材为 39 m 角钢的格构式猫头塔, 代表档距 400 m, 呼高为 39 m, 导线分三相。输电塔设计除了结构及其各构件严格满足几何相似以外, 还同时满足了完全气动弹性模型最重要的相似参数: Strouhal 数相似、弗劳德数相似、弹性参数(Cauchy 数)、惯性参数(质量)和阻尼比等相似。雷诺数相似显然未能满足, 但由于输电塔各构件皆为角钢, 其绕流场分离点不受雷诺数差异的影响, 因而放松雷诺数相似性要求的试验结果不会引起较大误差。考虑到 TJ-3 边界层风洞尺寸限制, 若按照几何相似比来模拟导(地)线, 则在风洞中连一塔两线模型也放不下。所以, 导(地)线模型设计采用 Davenport 等<sup>[19]</sup>提出的输电电气弹模型等代设计法, 跨度相似比取  $\lambda_L = \gamma\lambda_L = 1:60$ , 引入修正系数  $\gamma = 0.5$ 。模型在风洞中的照片如图 3 所示。具体试验方法参考文献<sup>[20]</sup>, 其中 0° 风向角为风速沿导线方向情况; 90° 风向角为风速垂直于导线方向情况。

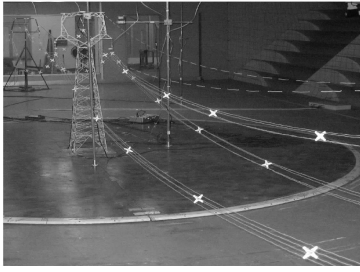


图 3 风洞中的输电塔-线体系气弹模型

Fig. 3 The Aero-elastic model of transmission tower-line system in wind tunnel

### 3 阻尼比识别与分析

#### 3.1 阻尼比识别方法

根据笔者介绍的方法,在进行输电塔挂线和不挂线结构阻尼比和气动阻尼比识别时,首先采用 EMD 分解得到各个 IMF 分量;进而找到结构各阶振型频率对应的 IMF 分量进行小波变换<sup>[14]</sup>,可以消除各 IMF 分量之间存在的一定程度的频率混叠,得到更为纯净的信号;最后采用 RDT 方法和 Hilbert 变换进行气动阻尼比识别。图 4 给出了输电塔在不挂线情况下弱轴向的前 5 个 IMF 分量的谱曲线。由图 4 可以看出,第 1 和 2 个 IMF 分量为结构的高频分量,第 3,4 个 IMF 分量的频率与自由敲击试验得到的结构第 1,2 阶频率十分接近,分别对应结构第 2 阶和第 1 阶振型频率,第 5 个 IMF 分量应为结构低阶背景频率。从各个 IMF 分量来看,由于在

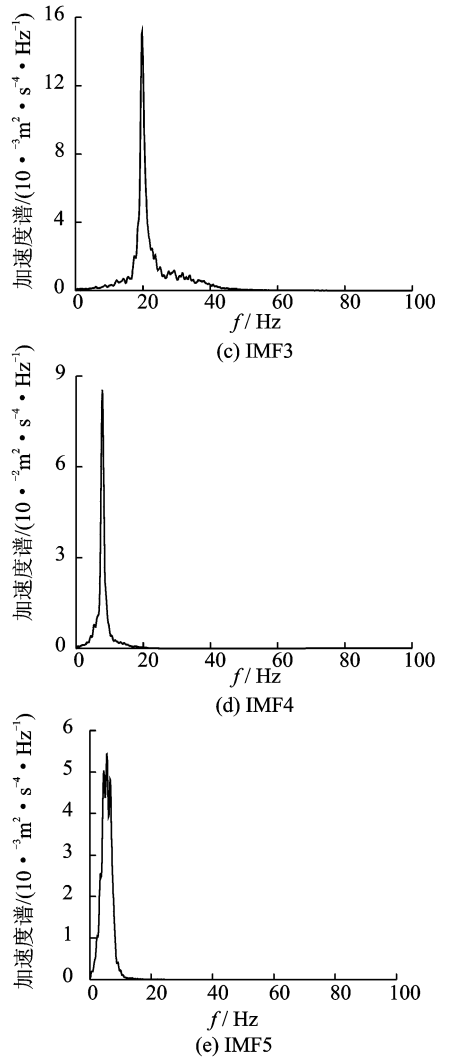
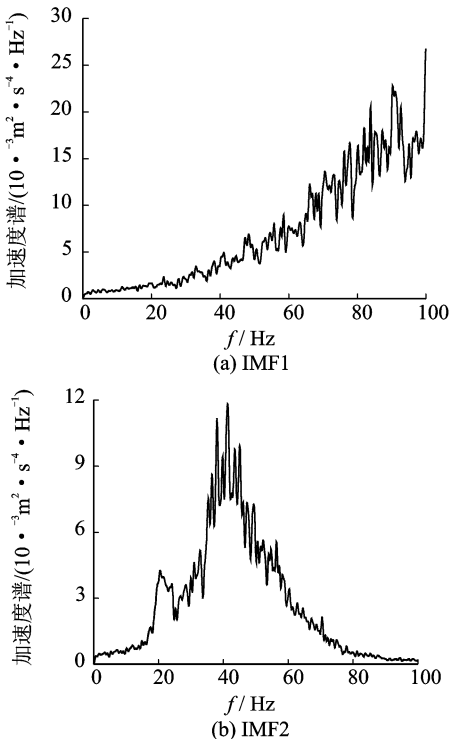


图 4 弱轴向加速度响应各 IMF 分量谱曲线(5.5 m/s)  
Fig. 4 Acceleration spectra of the IMFs in weak axial direction(5.5 m/s)

进行模型设计时,只考虑前 2 阶振型频率的模拟<sup>[20]</sup>,也对应分析了结构前 2 阶振型的气动阻尼比识别,而对于其更高阶振型频率未予考虑。

#### 3.2 输电塔在挂线和不挂线时结构阻尼比识别

输电塔在挂线和不挂线情况下的结构阻尼比由自由敲击试验数据采用笔者所述方法组合识别得到。在各阶振型自由衰减曲线如图 5~8 所示。其结构阻尼比如表 1 所示。

表 1 输电塔在挂线和不挂线时结构阻尼比

Tab. 1 The structural damping ratios of transmission tower with and without lines

模型	弱轴向		强轴向	
	第 1 阶	第 2 阶	第 1 阶	第 2 阶
输电塔不挂线	1.85	2.10	2.12	3.31
输电塔挂线	2.49	2.76	2.51	

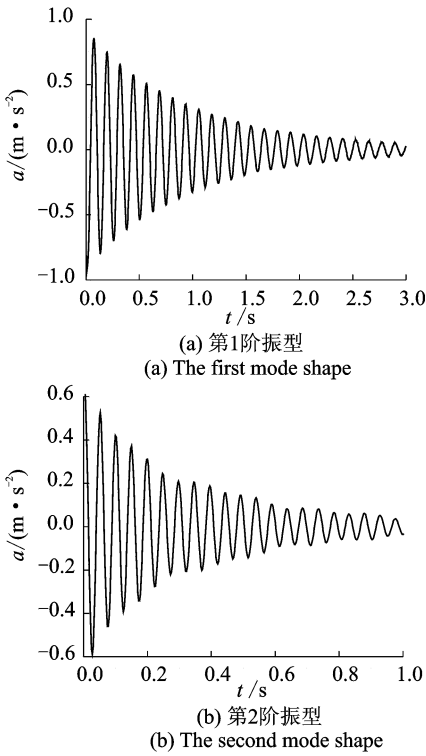


图 5 输电塔不挂线弱轴向自由振动曲线  
Fig. 5 Free vibration curve of transmission tower without lines in weak axial direction

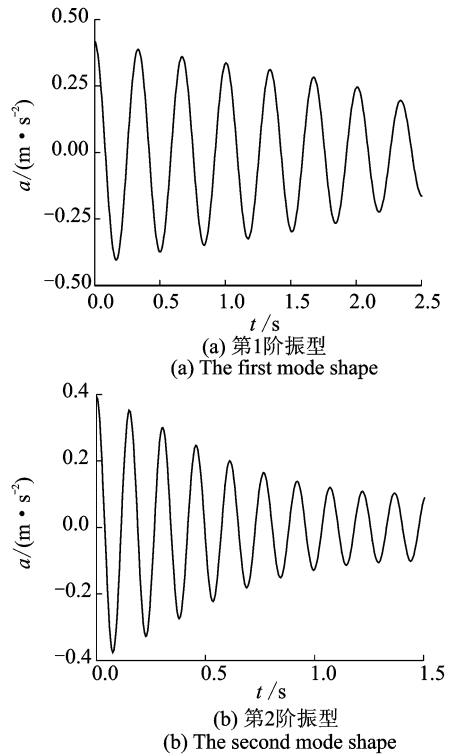


图 7 输电塔挂线弱轴向自由振动曲线  
Fig. 7 Free vibration curve of transmission tower with lines in weak axial direction

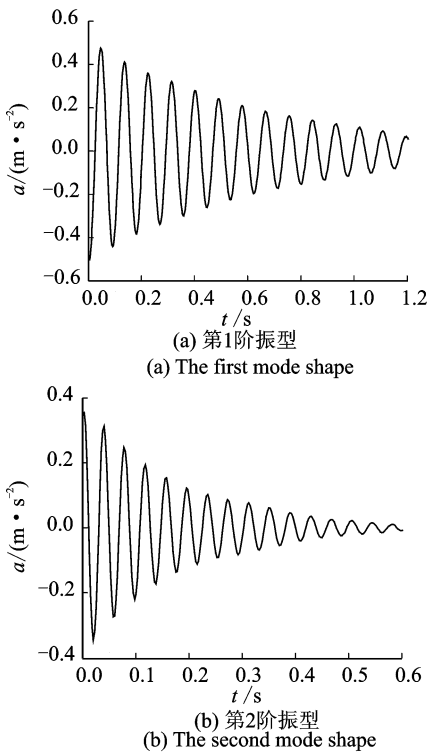


图 6 输电塔不挂线强轴向自由振动曲线  
Fig. 6 Free vibration curve of transmission tower without lines in strong axial direction

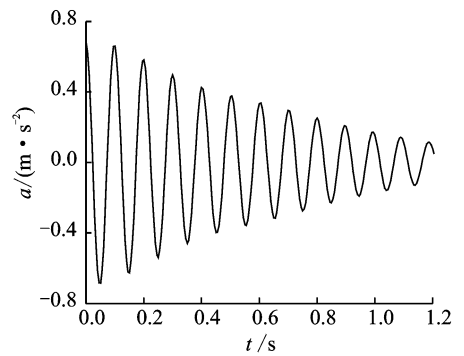


图 8 输电塔挂线强轴向自由振动曲线(第 1 阶振型)  
Fig. 8 Free vibration curve of transmission tower with lines in strong axial direction (the first mode shape)

比比其不挂线情况要大,说明导线对输电塔阻尼的贡献十分显著,在进行输电塔线体系风振响应研究时,应考虑此因素的影响。

### 3.3 输电塔不挂线时气动阻尼比识别

采用上述方法得到输电塔在不挂线情况下典型工况各阶振型自由衰减曲线如图 9~10 所示,识别得到的输电塔各阶振型气动阻尼比如图 11~12 所示,图 13 给出了输电塔在不挂线情况下顺风向和横风向气动阻尼比随频率的变化曲线。由图 9~13 可

由表 1 可以看出,输电塔挂线以后的结构阻尼

以看出其自由衰减曲线十分平滑,由此识别得到的气动阻尼比则比较稳定。输电塔在不挂线情况下其各阶振型气动阻尼比随着风速的增加呈线性增加的趋势,而随着频率的增加而减小,且气动阻尼比和频率有呈反比例变化的趋势。再者,其 1 阶振型气动阻尼比比相应的 2 阶振型气动阻尼比要大。基于此,利用最小二乘法拟合得到了在试验风速情况下,此类输电塔不挂线时顺风向和横风向各阶振型气动阻尼比表达式为

$$\xi_{ai} = a(V_H/n_i B) + b(n_1/n_i) \quad (1)$$

其中: $\xi_{ai}$ 为第  $i$  阶振型气动阻尼比; $V_H$  为结构顶部风速; $n_i$  为各阶振型频率; $B$  为输电塔底部迎风面宽度; $a, b$  为拟合参数,如表 2 所示。

表 2 输电塔不挂线时气动阻尼比拟合参数

Tab. 2 Fitting parameter of aero-dynamic damping ratios of transmission tower without lines

拟合参数	0°风向角		90°风向角	
	弱轴向	强轴向	弱轴向	强轴向
$a$	0.010	0.002 1	0.002 1	0.010
$b$	0.002 1	0.000 05	0.003 3	0.007

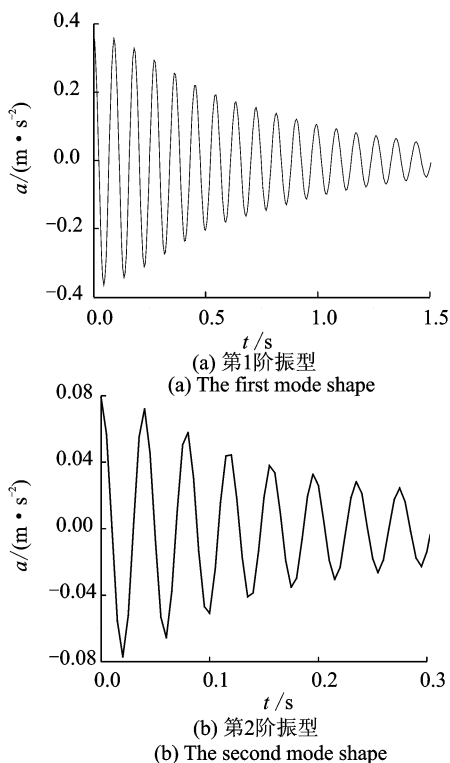


图 9 输电塔不挂线情况强轴向随机减量曲线(0°风向角,5.5 m/s)

Fig. 9 RDT curve of transmission tower without lines in strong axial direction(0 degree, 5.5 m/s)

### 3.4 输电塔挂线时气动阻尼比识别

得到输电塔在挂线情况下典型工况各阶振型自由衰减曲线如图 14~15 所示,采用此方法得到的输

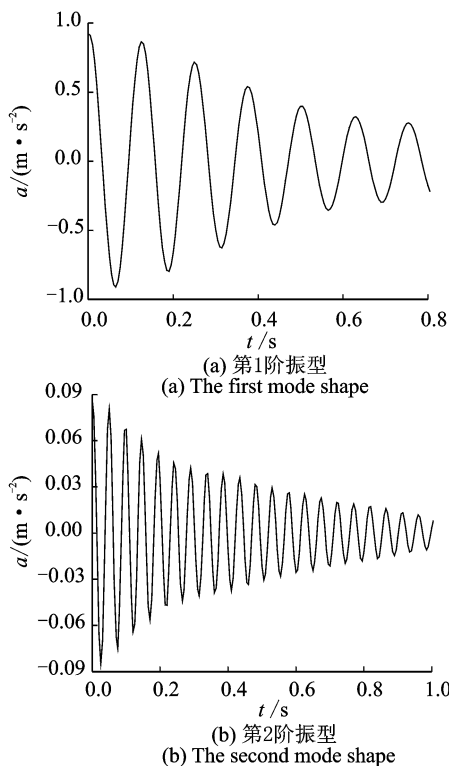


图 10 输电塔不挂线情况弱轴向随机减量曲线(0°风向角,5.5 m/s)

Fig. 10 RDT curve of transmission tower without lines in weak axial direction(0 degree, 5.5 m/s)

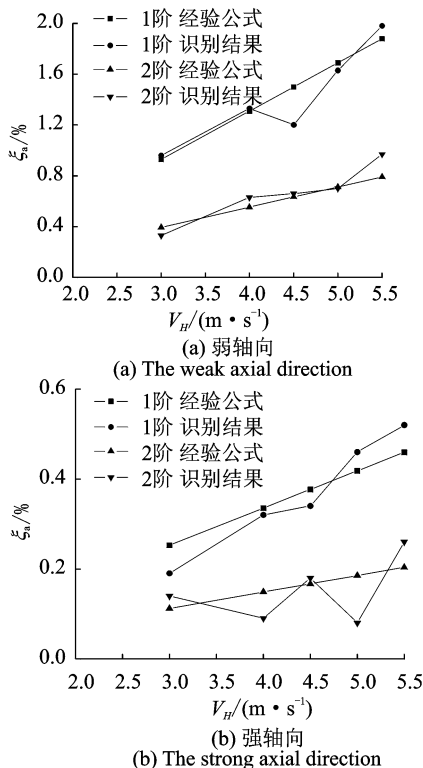


图 11 0°风向角输电塔不挂线时气动阻尼比

Fig. 11 Aero-dynamic damping ratios of transmission tower without lines under 0 degree wind direction

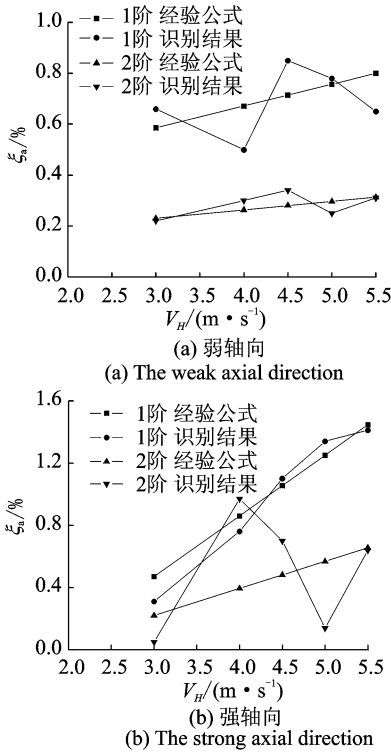


图 12 90°风向角输电塔不挂线时气动阻尼比  
Fig. 12 Aero-dynamic damping ratios of transmission tower without lines under 90 degree wind direction

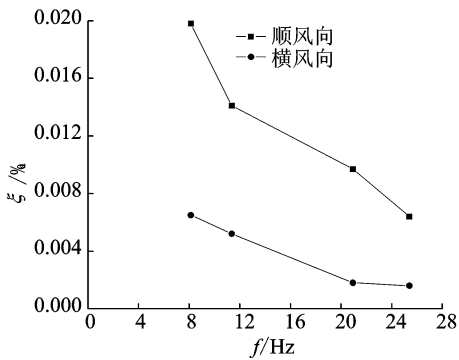


图 13 输电塔气动阻尼比随频率的变化曲线(5.5 m/s)  
Fig. 13 The change curve of the aero-dynamic damping ratios with frequency of transmission tower

电塔挂线时的气动阻尼比如图 16 所示。输电塔挂线时的气动阻尼比和不挂线情况有着相同的变化规律,但在挂线情况下,输电塔各轴向、各阶振型的气动阻尼比都远远大于不挂线情况,这说明导线对输电塔的气动阻尼的贡献十分突出。利用最小二乘法拟合得到在试验风速情况下,此类输电塔挂线时的顺风向和横风向各阶振型气动阻尼比

$$\xi_{ai} = c(V_H/n_i B) + d(n_1/n_i) \quad (2)$$

其中:  $\xi_{ai}$  为第  $i$  阶振型气动阻尼比;  $V_H$  为结构顶部

风速;  $n_i$  为各阶振型频率;  $B$  为输电塔底部迎风面宽度;  $c, d$  为拟合参数,如表 3 所示。

表 3 输电塔挂线后气动阻尼比拟合参数  
Tab. 3 Fitting parameter of aero-dynamic damping ratios of transmission tower with lines

拟合参数	90°风向角	
	顺风向	横风向
$c$	0.017 9	0.041 6
$d$	0.002	0.024

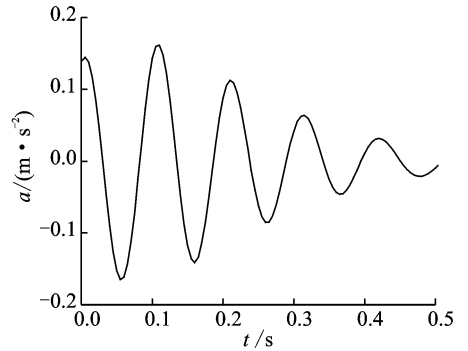
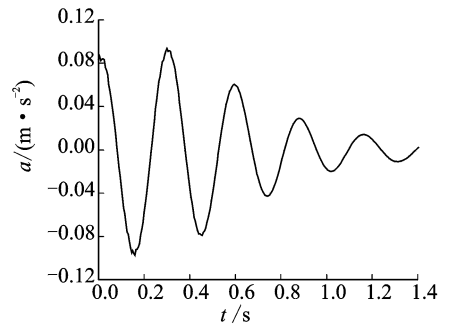
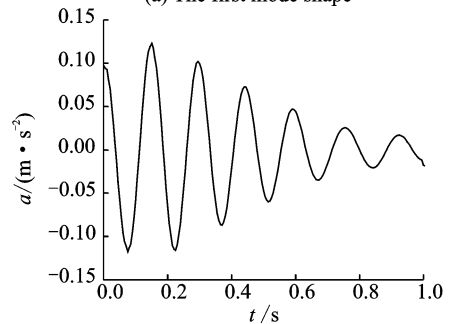


图 14 输电塔挂线情况强轴向随机减量曲线(第 1 阶振型, 0°风向角, 5.5 m/s)  
Fig. 14 RDT curve of transmission tower with lines in strong axial direction(The first mode shape, 0 degree, 5.5 m/s)



(a) 第 1 阶振型  
(a) The first mode shape



(b) 第 2 阶振型  
(b) The second mode shape

图 15 输电塔挂线情况弱轴向随机减量曲线(0°风向角, 5.5 m/s)  
Fig. 15 RDT curve of transmission tower with lines in weak axial direction(0 degree, 5.5 m/s)

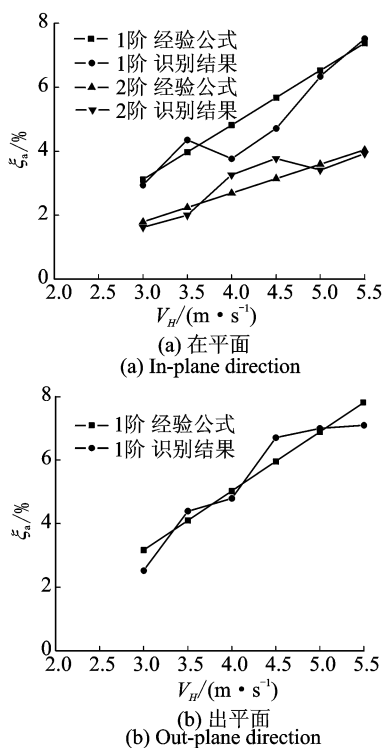


图 16 90°风向角输电塔挂线后气动阻尼比比较

Fig. 16 Aero-dynamic damping ratios of transmission tower with lines under 90 degree wind direction

## 4 结论

1) 导线对输电塔的各阶振型的结构阻尼比的影响不可忽视,输电塔挂线后的各阶振型阻尼比比不挂线情况的各阶振型阻尼比大 20%~30%。

2) 在试验风速条件下,此类输电塔挂线和不挂线时的各轴向各阶振型气动阻尼比均随着风速的增大而增大,其一阶振型气动阻尼比比相应的二阶振型气动阻尼比要大。

3) 在试验风速条件下,此类输电塔挂线时在平面和出平面各阶振型气动阻尼比比不挂线时的气动阻尼比要大得多,这说明导线对输电塔的气动阻尼比的影响非常大。

4) 采用最小二乘法,拟合得到了在试验风速条件下的输电塔挂线和不挂线时各阶振型气动阻尼比的经验公式,通过比较发现,由经验公式计算的结果和试验结果非常接近。

## 参 考 文 献

[1] Davenport A G. The response of tension structures to turbulent wind: the role of aerodynamic damping[C] // Proceedings of First International Oleg Kerensky

Memorial Conference on Tension Structures. London: American Society of Civil Engineers, 1988: 20-22.

[2] 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.

[3] Maeda J, Morimoto Y, Ishida N, et al. Aero-dynamic damping properties of a high-voltage transmission tower[C] // Proceedings of 5th International Symposium on Cable Dynamics. Santa Margherita Ligure, Italy: [s. n.], 2003: 255-262.

[4] Fujimura M, Maeda J, Morimoto Y, et al. Aero-dynamic damping properties of a transmission tower estimated using a new identification method[C] // Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering. Cairns, Australia; Cheung John C K, 2007: 1047-1054.

[5] Davenport A G. The relationship of reliability to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13(1-3): 3-27.

[6] Tamura Y, Suganuma S. Evaluation of amplitude-dependent damping and natural frequency of buildings during strong winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59(2-3): 115-130.

[7] Agnani A, Balis C L. Analytic signal in the damping coefficient estimation[C] // Proceedings of the International Conference on Spacecraft and Mechanical Testing. Noordwijk, The Netherlands; European Space Science Publications Division, 1988: 133-139.

[8] Brincker R, Zhang L, Andersen P. Modal identification from ambient response using frequency domain decomposition[C] // Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference. San Antonio, Texas, USA; The Society for Experimental Mechanics, 2000: 625-630.

[9] Brincker R, Ventura C E, Andersen P. Damping estimation by frequency domain decomposition[C] // Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference. San Antonio, Texas, USA; The Society for Experimental Mechanics, 2001: 698-703.

[10] Tamura Y, Zhang L, Yoshida A, et al. Ambient vibration tests and modal identification of structures by FDD and 2DOF-RD technique[C] // Proceedings of the Structural Engineers World Congress. Yokohama, Japan; Haluk Aktan, 2002: T1-1-a-1:1-8.

[11] 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.
- [12] 任坤,李正良,肖正直,等. 环境激励下特高压输电塔线体系气动阻尼的识别[J]. 重庆工学院学报:自然科学,2009,23(7): 64-68.  
Ren Kun, Li Zhengliang, Xiao Zhengzhi, et al. Aerodynamic damping identification of UHV transmission line system under ambient Excitation[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2009 23(7): 64-68. (in Chinese)
- [13] Chen Jun, Xu Youlin, Zhang Ruichong. Modal parameter identification of Tsing Ma suspension bridge under Typhoon Victor: EMD-HT method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(10):805-827.
- [14] 汤宝平,何启源,孟利波,等. 短样本条件下提高 HHT 识别模态参数精度的方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2011,31(1):6-10.  
Tang Baoping, He Qiyuan, Meng Libo, et al. Method of improving precision of Hilbert-Huang transform based modal parameter identification for short data sequences[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):6-10. (in Chinese)
- [15] 吴海洋,梁枢果,邹良浩. 基于小波分析的高层建筑气动阻尼的评估方法[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8):93-97.  
Wu Haiyang, Liang Shuguo, Zou Lianghao. Method of evaluating aerodynamic damping of tall buildings based on wavelet analysis [J]. Journal of Vibration and Shocks, 2008, 27(8):93-97. (in Chinese)
- [16] 翁浩,高金吉. 旋转机械振动信号压缩小波基优化选取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3):437-444.  
Wen Hao, Gao Jinji. Selection method of optimum wavelet base in vibration-signal compression of rotating machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3):437-444. (in Chinese)
- [17] Kareem A, Gurley K. Damping in structure: its evaluation and treatment of uncertainty [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59(2-3): 131-157.
- [18] 孙亮,侯宏. 阻尼识别的小波和 EMD 方法仿真对比研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2):164-167.  
Sun Liang, Hou Hong. Simulation contrast of wavelet transform and empirical mode decomposition in damping identification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 164-167. (in Chinese)
- [19] Loredo-Souza A M, Davenport A G. A novel approach for wind tunnel modelling of transmission lines [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2001, 89(11-12): 1017-1029.
- [20] 梁枢果,邹良浩,韩银全,等. 输电塔-线体系完全气弹模型风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 70-78.  
Liang Shuguo, Zou Lianghao, Han Yinquan, et al. Investigation on wind tunnel tests of a full aero-elastic model of electrical transmission tower-line system [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 70-78. (in Chinese)



**第一作者简介:**邹良浩,男,1979年7月生,博士、副教授。主要研究方向为结构风工程。曾发表《基于风洞试验的对称截面高层建筑三维等效静力风荷载研究》(《建筑结构学报》2012年第33卷第11期)等论文。

E-mail: Lhzou@whu.edu.cn



