

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.05.008

# 考虑 SSI 效应的特高压输电塔风致响应试验

蔡青青<sup>1</sup>, 吴海洋<sup>2</sup>, 刘 堃<sup>2</sup>, 李正良<sup>1</sup>, 曾 静<sup>1</sup>

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

**摘要:** 为了研究风荷载作用下输电塔-基础-地基耦合效应 (SSI 效应) 对输电塔风致响应的影响, 以一座特高压输电塔-基础-地基体系为例, 按照离散刚度法设计其气弹模型, 采用一个刚性质量块来模拟基础, U 型弹簧和阻尼器来模拟地基, 对气弹模型进行风洞试验, 并研究地基阻尼和刚度对输电塔结构风致响应的影响规律。研究表明: 1) 考虑 SSI 效应后, 模型的振动衰减要慢于刚性地基模型; 同时, 随着地基刚度的减小, 模型的综合刚度减少且自振周期增大; 2) 地基刚度的减小会使上部结构位移和加速度响应逐渐增大, 对塔脚反力基本没有影响; 随着地基阻尼的增大, 塔身加速度逐渐减小, 但位移和塔脚反力几乎保持不变。因此, 在进行输电塔结构设计时应考虑 SSI 效应的影响。

**关键词:** 输电塔; 土-结相互作用; 气弹模型; 风洞试验; 风致响应

**中图分类号:** TU392.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2020)05-067-09

## Wind tunnel test of UHV transmission tower considering SSI interaction

CAI Qingqing<sup>1</sup>, WU Haiyang<sup>2</sup>, LIU Kun<sup>2</sup>, LI Zhengliang<sup>1</sup>, ZENG Jing<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2.Zhongnan Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the influence of transmission tower-foundation-bed coupling effect (SSI interaction) on wind-induced response of transmission tower under wind load, an UHV transmission tower-foundation-bed system is taken as an example to design its aeroelastic model according to discrete stiffness method with a rigid mass block used to simulate the foundation, and U-spring and damper used to simulate the bed to test the aeroelastic model in wind tunnel. The influence of foundation damping and stiffness on wind-induced response of transmission tower structure is also studied. The experimental results show that: 1) with SSI interaction taken into account, the vibration attenuation of the model is slower than that of the rigid foundation model; with the decrease of the foundation stiffness, the comprehensive stiffness of the model decreases and the natural vibration period increases; 2) the reduction of the foundation stiffness will gradually lead to greater displacement and acceleration response of the superstructure, but have little effect on the reaction force of the tower foot; with the increase of the foundation damping, the acceleration of the tower body decreases gradually, but the displacement and the reaction force of the tower foot almost

**收稿日期:** 2019-11-22

**基金项目:** 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目 (DG1-T07-2016)。

Supported by Science and technology project of China Power Engineering Consulting (Group) Corporation (DG1-T07-2016).

**作者简介:** 蔡青青 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事输电塔抗风及防灾研究, (E-mail) 1083412847@qq.com。

**通讯作者:** 李正良, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) lizhengl@hotmail.com。

remain unchanged. In conclusion, the influence of SSI interaction should be considered in the design of transmission tower structure.

**Keywords:** transmission tower; soil structure interaction; aeroelastic model; wind tunnel test; wind-induced response

近年来,随着输电塔电压等级的提高,输电线路的档距和塔高也在逐步增加,风荷载逐渐成为其主要的动力荷载。在进行输电塔抗风设计时,不考虑基础、地基等部分的变形影响,而是将输电塔塔脚与基础假定为刚接。抗震方面的研究表明,在进行结构设计时需要考虑 SSI 效应的影响。郑明燕<sup>[1]</sup>通过对柔性地基中简支桥梁(或渡槽)减隔震的研究表明,柔性基础上的建筑物,在计算地震响应时需要考虑土-结构的相互作用。冀晨歌<sup>[2]</sup>研究了考虑 SSI 效应后,设备-结构动力相互作用对结构和设备动力反应的影响,发现结构与设备动力反应的变化趋势与刚性基础假定下明显不同。张尚荣等<sup>[3]</sup>和苏毅等<sup>[4]</sup>分析了土结相互作用对层间隔震结构的影响。王琼芬等<sup>[5]</sup>研究了软弱场地对高层建筑地震响应值的影响,指出高层建筑考虑软弱场地后的地震响应值小于无地基时的地震响应值。Johns<sup>[6]</sup>和 Ogendo<sup>[7]</sup>通过阻尼垫模拟研究柔性地基对钢烟囱性能的影响。毛龙<sup>[8]</sup>研究了考虑 SSI 效应后,不同横隔数目和桩长对输电塔动力响应的影响。但是在抗风方面对于土-结相互作用的研究还较少。Yang 等<sup>[9]</sup>在对结构的顺风向响应进行研究时考虑了柔性地基的影响。Jendoubi 等<sup>[10]</sup>选取两种类型的土,并采用阻尼和弹簧代替地基土,研究冲击荷载和风荷载下 SSI 效应对输电塔的影响。Venantzi 等<sup>[11]</sup>研究了土-基础-结构相互作用对高层建筑的风振响应。范存新等<sup>[12]</sup>、柯世堂等<sup>[13]</sup>研究表明,不应忽略地基和基础的变形对结构自振特性以及风振响应的影响。输电塔这种轻、高、柔结构对于风荷载敏感,所以 SSI 效应对结构的风致响应影响显著,刚性地基假设不再合理。文中考虑土-结相互作用,制作输电塔的气弹模型,研究模型在风洞试验下的风致响应,了解土-结相互作用对上部结构具体会产生怎样的影响,具有重要的意义和价值。

## 1 气弹模型风洞试验

### 1.1 输电塔模型设计

试验工程背景为滇西北±800 kV 直流线路,典型直线塔选用 ZC27103-75 塔,塔高为 82.2 m,塔身平面为正方形,结构形式为格构式角钢塔。输电塔如图 1 所示。

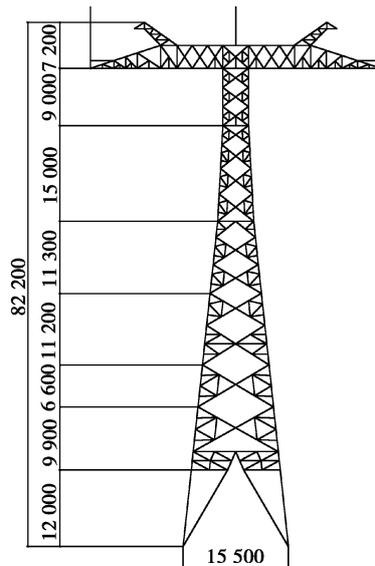


图 1 输电塔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission tower

为了使风洞试验结果能够正确推算到结构原型,需要满足以下条件:1)气弹模型所在的风场环境的模拟;2)设计模型的准确性,需要正确模拟输电塔的几何外形、质量以及刚度等结构特性。试验的输电塔模型采用气弹性模型,通过相似理论来进行模型设计,模型设计时需要满足柯西数、斯托罗哈数等相似判据相等。

由弹性参数柯西数的定义可知,弹性模量  $E$  是该参数模拟的关键,但是弹性模型是材料本身的一个特定参数,只取决于材料种类,所以在一般情况下,不易找到既便于加工又满足  $E$  相似的材料。由于  $E$  总是出现在结构刚度(如  $EA$ )的表达式中,所以将弹性参数的模拟通过结构刚度  $EA$  模拟来实现。由于选择弹模较大的材料会导致模型杆件面积太小,制作难度增大,所以选择弹模较小的铝和铝合金来制作模型,采用线切割的方式来保证构件尺寸的制作精度。

考虑到风洞断面尺寸和边界流场的高度,同时考虑输电塔原型高度以及杆件加工的可能性。气弹模型的几何缩尺比确定为  $1/40$ ,气弹模型各相似比如表 1 所示,表 1 中的  $n=40, m=1.28$ 。

表 1 模型设计各参数相似比  
Table 1 Similarity Ratio of Parameters in Model Design

相似参数	缩尺比	数值
长度	$1/n$	$1/40$
风速	$1/m$	$1/1.28$
时间	$m/n$	$1.28/40$
频率	$n/m$	$40/1.28$
拉伸刚度	$1/m^2 n^2$	$1/1.28^2 \times 40^2$
弯曲刚度	$1/m^2 n^4$	$1/1.28^2 \times 40^4$
单位长度质量	$1/n^2$	$1/40^2$
结构阻尼	1	1

1.2 基础与地基的设计

基础与地基的设计采用“质—弹—阻”模型,用刚性质量块来模拟基础、地基土的刚度采用 U 形弹簧刚度来模拟、地基土的阻尼采用阻尼器模拟<sup>[14]</sup>。确定实际土体的垂直刚度系数以及垂直阻尼系数,按照量纲分析得出的相似比来设计地基。根据实际土体的剪切模量等参数确定 U 形弹簧的 4 个设计参数:直线段长度  $L$ 、弹簧宽度  $B$ 、弹簧厚度  $A$  以及弹簧弯曲段的弯曲半径  $R$ ,可通过改变弹簧的这 4 个参数来调节弹簧的刚度,U 形弹簧设计如图 2 所示。由于地基土的水平刚度和水平阻尼都很大,对结构影响甚小,所以主要模拟地基的竖向阻尼,竖向阻尼系数通过地基土的实际阻尼换算后得到。选取 3 种阻尼器进行试验,基础加工完成实物如图 3 所示。同时,除了设计 3 种地基刚度的风洞试验外,还设计了刚性支座的试验工况作为对照试验。

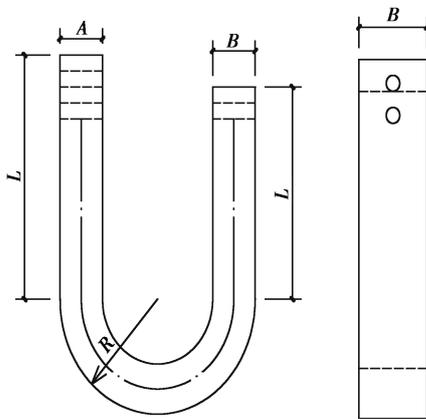


图 2 弹簧设计图

Fig. 2 Design drawing of spring

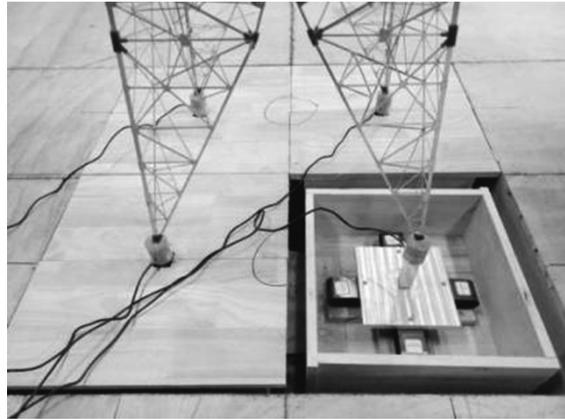


图 3 基础实际图

Fig. 3 Basic Practical Map

### 1.3 模型制作与安装

主材及斜材采用节点套筒连接,节点套筒采用 SketchUp 软件绘制(节点效果如图 4 所示),通过 3D 打印技术进行制作。节点连接示意如图 5 所示,完整节段如图 6 所示。

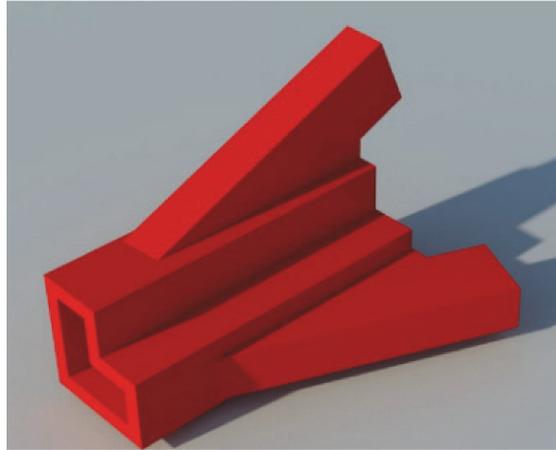


图 4 3D 节点效果图

Fig. 4 3D node rendering

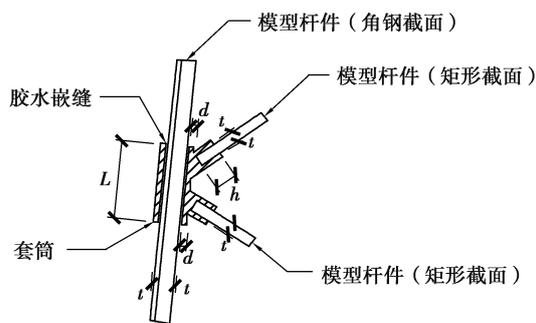


图 5 节点连接图

Fig. 5 Node connection graph

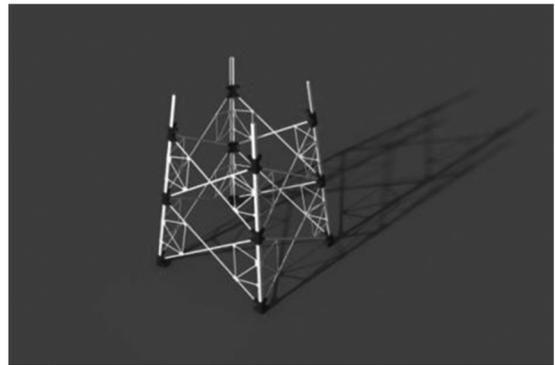


图 6 完整节段图

Fig. 6 Complete segmental graph

### 1.4 风洞试验概况

#### 1.4.1 试验风场

试验地点在湖南科技大学风洞试验室,该风洞是一座直流式单试验段风洞,试验段尺寸为宽 4.0 m×高 3.0 m×长 21.0 m。按照荷载规范规定的 B 类地貌( $\alpha=0.16$ )进行流场模拟<sup>[15]</sup>。图 7 是风洞试验室的大气边界层布置图,图 8 和图 9 是试验高度 0.25 m 处、风速 10 m/s 下的风剖面以及湍流度剖面。



图 7 大气边界层试验室布置图

Fig. 7 Layout of atmospheric boundary layer laboratory

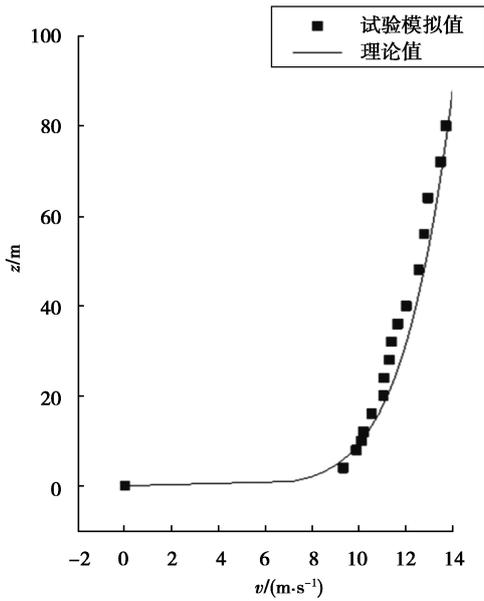


图 8 风速剖面

Fig. 8 Wind velocity profile

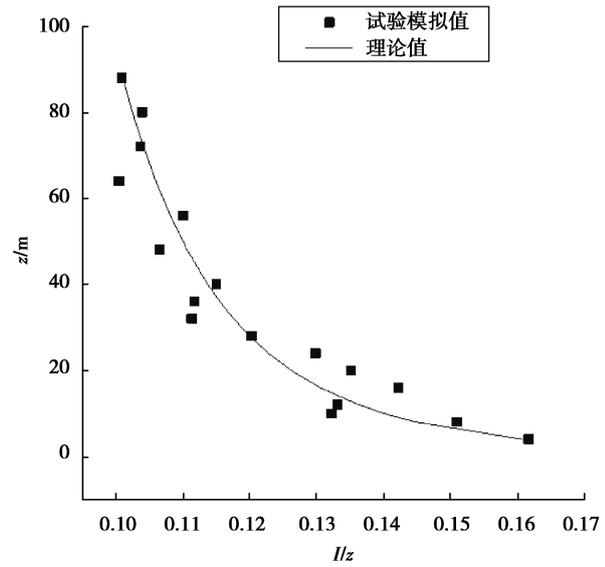


图 9 湍流度剖面

Fig. 9 Turbulence profile

1.4.2 塔模型动力特性

采用自由振动法测量塔模型的动力特性,得到模型的 X 向和 Y 向的自振频率,如表 2 所示,定义垂直于横担方向为 X 向,平行于横担方向为 Y 向。

表 2 输电塔频率对比表

Table 2 Frequency comparison table of transmission tower Hz

方向	X	Y
模型实测值	39.707	38.808
原型塔	1.282	1.236
模型目标值	40.063	38.625
误差/%	0.89	0.47

1.4.3 测点布置

整个模型的加速度测点、位移测点以及力测点布置如图 10 所示,沿着模型塔高布置 4 个加速度测点,每层测点的 X、Y 方向分别布置加速度传感器,用来测量模型塔身 X 向和 Y 向的加速度。在塔顶 X 和 Y 2 个方向布置激光位移传感器,用来测量塔顶 X 向和 Y 向的位移。在 4 个塔脚处布置 4 个力传感器。

1.4.4 试验工况

气弹性模型试验在紊流风场中进行,采样时间为 30 s,采样频率为 1 000 Hz。单塔试验工况为:3 种风速(10 m/s、12.5 m/s 和 13.5 m/s)、4 个风向角(0°、45°、60°和 90°)、3 种 U 形弹簧片刚度(52 N/mm、107 N/mm 和 186 N/mm)和 3 种阻尼(154 N·s/m、307 N·s/m 和 614 N·s/m)。风洞内转盘的转动方向及风向角的定义如图 11 所示。

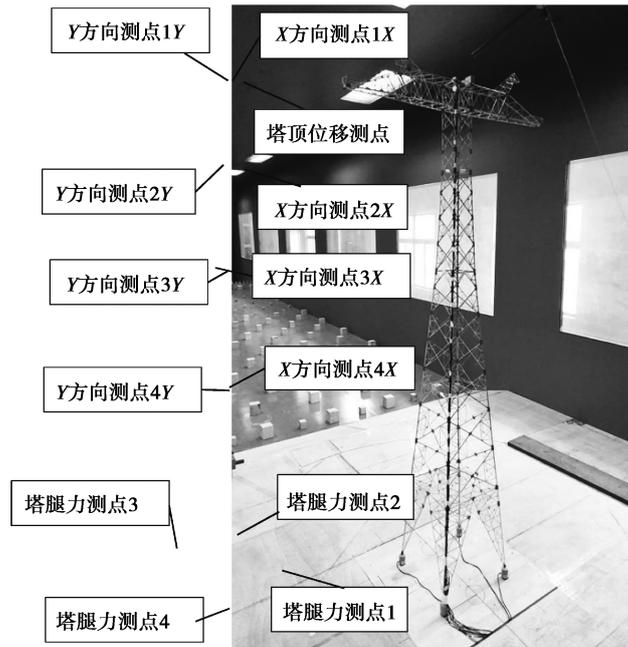


图 10 测点布置图

Fig. 10 Layout of measuring points

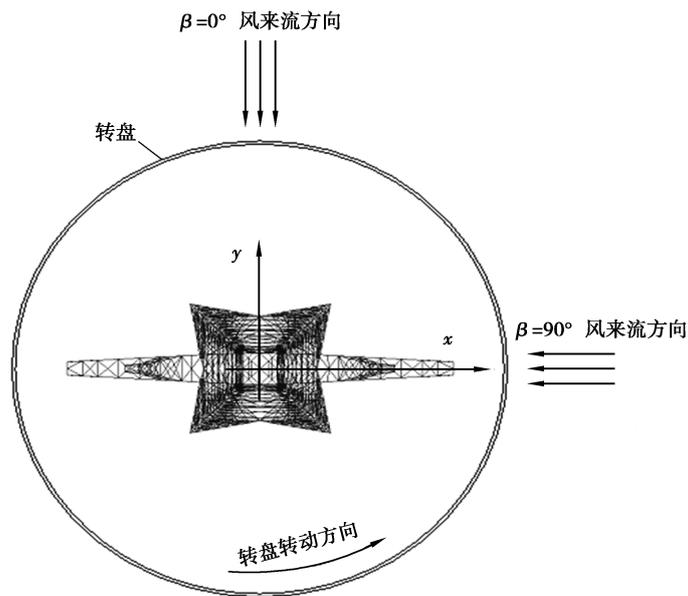


图 11 风向角定义

Fig. 11 Definition of wind direction

## 2 试验结果分析

试验采用控制单一变量,采集不同刚度和阻尼下输电塔气弹模型各测点的加速度、位移和塔脚反力,从而得到输电塔不同高度关键节点处加速度响应的均方根值、塔顶位移响应均值以及塔脚反力均值。

### 2.1 SSI 效应对输电塔加速度影响

图 12 给出了当风向角为  $0^\circ$ 、风速为  $13.5 \text{ m/s}$ 、阻尼为  $614 \text{ N} \cdot \text{s/m}$  时,塔身 4 个测点的 Y 向加速度随刚度变化的曲线。从图 12 可知,位于塔顶位置的测点 1 的顺风向加速度随着地基刚度的增大而增大;位于塔身中部的测点 2 的顺风向加速度随着刚度的变化基本上保持不变;而位于塔身下部的测点 3 和测点 4 的顺

风向加速度呈现出随着地基刚度增大而减小的规律。图 12 中数据还表明,随着刚度从 52 N/mm 变化到刚性支座,4 个测点加速度的变化范围均随着刚度增大而增大;在最软的地基刚度工况下(52 N/mm),4 个测点加速度的变化范围是 1.696 m/s<sup>2</sup>~3.172 m/s<sup>2</sup>;在刚接情况下,加速度的变化范围增大为 1.486 m/s<sup>2</sup>~3.405 m/s<sup>2</sup>。有限元模拟的结果表明,随着地基土刚度的减少,加速度响应将增大,两者出现不一致可能是因为风洞试验中只设计了 Z 向的 U 形弹簧片和阻尼器而忽略了水平土体对基础及结构的影响。

关于阻尼的影响,在风向角为 0°、风速为 13.5 m/s、刚度为 52 N/mm 的工况下,4 个测点的 Y 向加速度随着阻尼的变化曲线如图 13 所示,塔身 4 个测点的加速度均随着地基阻尼的增大而减小,并且测点位置越高,加速度变化幅度越大,说明测点位置越高,阻尼对加速度的影响越大。

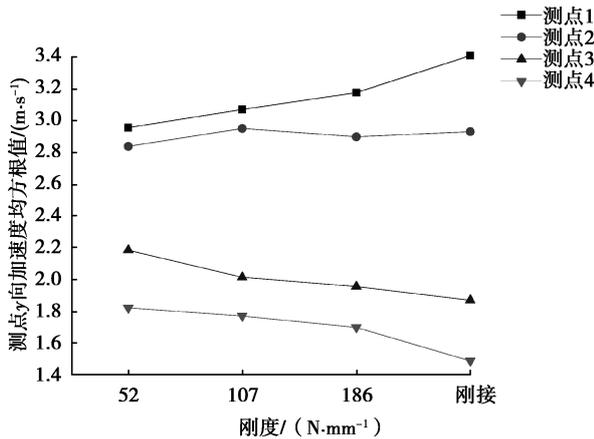


图 12 Y 向加速度随刚度的变化曲线  
Fig. 12 Curve of Y-direction acceleration versus stiffness

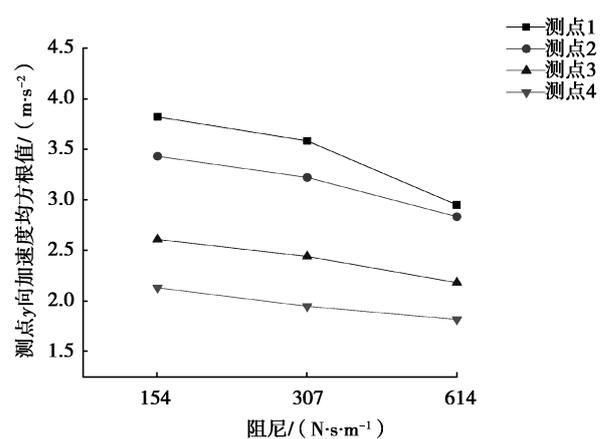


图 13 Y 向加速度随阻尼变化曲线  
Fig. 13 The Curve of Y-direction acceleration with damping

2.2 SSI 效应对输电塔位移影响

图 14 给出了当风向角为 0°、风速为 13.5 m/s、阻尼为 614 N·s/m 时,塔顶 Y 向位移随着地基刚度的变化曲线,从图 14 可知,塔顶测点的顺风向位移随着地基刚度的增大而减小,说明考虑 SSI 效应后,模型的振动衰减要慢于刚性地基模型。塔顶位移随着地基阻尼的变化曲线如图 15 所示,可以发现,塔顶位移随着阻尼的变化基本保持不变,说明地基阻尼的变化对风荷载引起的输电塔位移几乎没有影响。

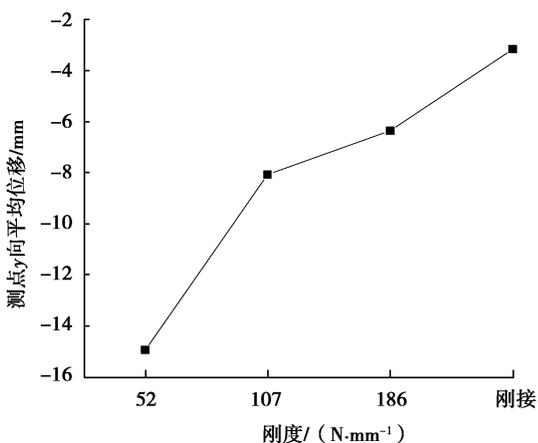


图 14 塔顶位移 Y 向随着刚度变化曲线  
Fig. 14 Curve of Y-direction displacement of tower top with rigidity

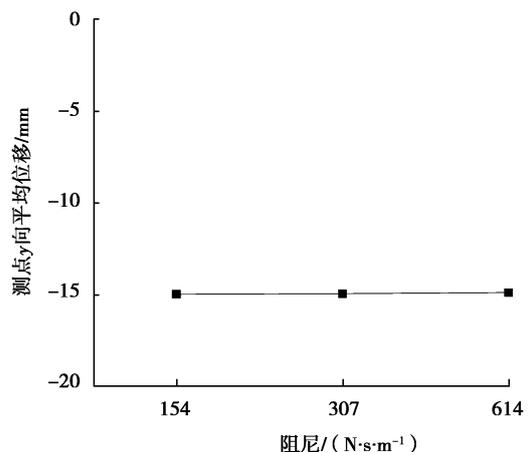


图 15 塔顶 Y 向位移随着阻尼变化曲线  
Fig. 15 Curve of Y-direction displacement of tower top with damping

### 2.3 SSI 效应对塔脚反力影响

图 16 给出了在风向角为  $0^\circ$ 、风速为  $13.5 \text{ m/s}$ 、阻尼为  $614 \text{ N} \cdot \text{s/m}$  工况下,4 个塔脚测点的 Z 向轴力随着刚度的变化曲线,图 17 给出了在风向角为  $0^\circ$ 、风速为  $13.5 \text{ m/s}$ 、刚度为  $52 \text{ N/mm}$  的工况下,4 个塔脚测点的 Z 向平均轴力随着阻尼的变化曲线,由图 16 和图 17 可知,4 个塔脚测点 Z 向轴力随着刚度和阻尼几乎不发生任何变化,说明地基刚度和阻尼的变化对塔脚反力基本没有任何影响。

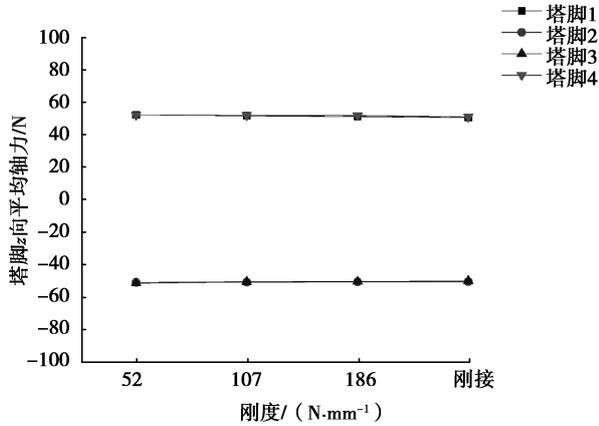


图 16 塔脚 Z 向轴力随刚度变化曲线

Fig. 16 Curve of Z-axis force of tower foot varying with stiffness

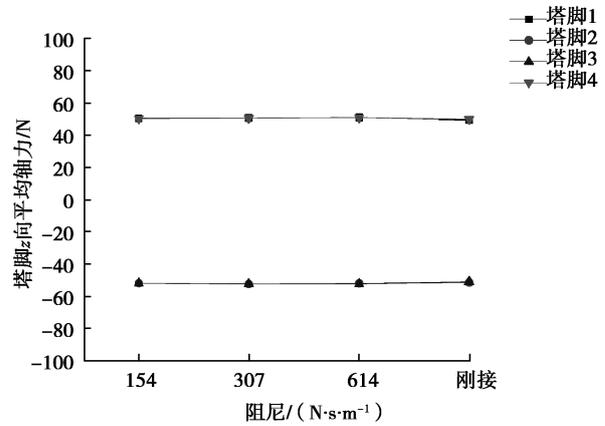


图 17 塔脚 Z 向轴力随阻尼变化曲线

Fig. 17 Curve of Z-axis force at tower foot varying with damp

## 3 结 论

为考虑特高压直流输电塔 SSI 效应对塔结构风振响应的影响,设计和制作了塔-基础-地基的气弹性风洞试验模型,通过风洞试验探讨了地基土刚度、阻尼等参数对塔身风振响应的影响规律,主要结论如下:

- 1) 考虑 SSI 效应后,输电塔模型的综合刚度减小。随着输电塔模型刚度的减小,输电塔模型的自振周期增大。
- 2) 考虑 SSI 效应后,输电塔模型的振动衰减要慢于刚性地基模型。
- 3) 考虑 SSI 效应后,地基刚度的减小会使上部结构的位移和加速度响应逐渐增大,塔脚反力基本保持不变;地基阻尼的增大,塔身加速度均方根逐渐减小,位移和塔脚反力基本保持不变。

### 参考文献:

- [1] 郑明燕. 考虑 SSI 的减隔震筒支桥梁(渡槽)建模及地震动力响应研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.  
ZHENG Mingyan. Study on dynamic response of simply supported isolated bridge subjected to earthquake load considering soil-structural interaction[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [2] 冀晨歌. 考虑 SSI 的设备-结构相互作用地震反应分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
JI Chengge. Seismic response analysis of equipment-structure dynamic interaction considering SSI[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [3] 张尚荣, 谭平, 杜永峰, 等. 土-结构相互作用对层间隔震结构的影响分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S1): 246-252.  
ZHANG Shangrong, TAN Ping, DU Yongfeng, et al. Effect analysis of soil-structure interaction on inter-story isolation structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 246-252. (in Chinese)
- [4] 苏毅, 李静珠, 何强, 等. 土与结构相互作用对层间隔震结构影响的参数分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 9-13, 34.  
SU Yi, LI Jingzhu, HE Qiang, et al. Related parameter analysis of story isolation structure considering soil-structure interaction[J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 9-13, 34. (in Chinese)
- [5] 王琼芬, 钱闪光, 姚激, 等. 考虑 SSI 效应的高层建筑地震研究[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(9): 64-67.  
WANG Qiongfen, QIAN Shanguang, YAO Ji, et al. Seismic study of high-rise buildings considering SSI effect [J]. Low-temperature building technology, 2016, 38(9): 64-67. (in Chinese)

- [6] Johns J D, Milsted M G, Bradshaw P M, et al. Vibration models of steel chimneys with added damping[C]. Proc. Conf. on Recent Advances in Struct. Dyn, 1980:305-314.
- [7] Ogendo J E W, Milsted M G, Johns D J. Response of steel chimneys with added damping[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 14(1/2/3): 141-152.
- [8] 毛龙. 考虑桩—土—结构相互作用的输电塔地震性能研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2017.  
MAO Long. Seismic performance of transmission towers considering pile-soil-structure interaction [D]. Changchun: Northeast Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [9] Yang J N, Lin Y K. Along-wind motion of multy-story building [J]. J. Eng. Mesh. Div, ASCE, 1981:295-307.
- [10] Jendoubi A, Legeron F. Effect of the dynamic soil-structure interaction on rigid transmission line towers subjected to wind and impulse loads [C] // Electrical Transmission and Substation Structures Conference 2012, November 4-8, 2012, Columbus, Ohio, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [11] Venanzi I, Salciarini D, Tamagnini C. The effect of soil-foundation-structure interaction on the wind-induced response of tall buildings[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 117-130.
- [12] 范存新, 陈榕. 桩-土-结构相互作用对高层建筑顺风向风振响应的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2078-2084.  
FAN Cunxin, CHEN Rong. Effects of pile-soil-structure interaction on wind-induced response of tall buildings[J]. Journal of Rock, Mechanics and Engineering, 2004, 23(12):2078-2084. (in Chinese)
- [13] 柯世堂, 王同光. 考虑土-结相互作用大型风力发电结构风致响应分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 18-25.  
KE Shitang, WANG Tongguang. Wind-induced response analysis of large wind power generation structures considering soil-structure interaction [J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 48 (2): 18-25. (in Chinese)
- [14] 田治见宏. 地基-结构动力相互作用分析方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.  
TIAN Zhijianhong. Analysis method of dynamic interaction between foundation and structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Building structural load code [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)