

特高压双回路输电线路塔线耦联体系振动台试验模型设计理论与方法

白杰¹, 谢强^{1,2}, 薛松涛¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为进行特高压输电线路塔线耦联体系模型振动台试验, 研究特高压输电塔架及输电塔—线耦联体系地震反应特点, 提出具有几何非线性的特高压同塔双回路输电线路塔线耦联体系振动台模型设计理论与方法。针对钢管塔工程要求, 按振动台模型线弹性相似理论缩尺模拟输电塔。限于振动台面尺寸, 对带有强几何非线性大跨度、大截面八分裂导线, 提出参数分离式模型设计理论: 分别采用惯性质量相似与动力特性相似原则, 确定八分裂导线模型的配重与弧垂设计方法, 并从选材、相似比确定、边界条件及方案设计等对试验模型进行详细阐述。该模型设计方法可为具有强几何非线性体系结构缩尺模型振动台试验提供借鉴及参考。

关键词: 特高压输电塔; 耦联体系; 振动台试验; 缩尺模型; 相似关系; 几何非线性

中图分类号: TM75 **文献标识码:** A

Design theory and method of shaking table test model for a UHV double circuit transmission tower-line coupled system

BAI Jie¹, XIE Qiang^{1,2}, XUE Song-tao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the seismic responses of a UHV transmission tower structure and tower-conductor coupled system, a shaking table test for the model of this system is needed. Scaled model design method for a UHV transmission tower-8-bundled-conductor with strong geometric nonlinearity was presented here. Based on the requirements for design of a steel tubular tower, a scaled tower model was designed according to the elastic similitude relationship. Due to the size limitation of a shaking table, in order to simulate, a 8-bundled-conductor with long spans, large cross-sections, and strong geometric nonlinearity, the model design theory with parameters separating was proposed. The inertia mass similarity criterion and the dynamic property similarity criterion were simultaneously adopted to determine the mass balance and the sag of the model of a 8-bundled-conductor, respectively. The material selection, dynamic similarity relations. Boundary condition, and detailed design of the shaking table model for the UHV transmission tower-conductor coupled system were introduced. The proposed method provided a reference for the scaled shaking table model test of structures with strong geometric nonlinear characteristics.

Key words: UHV transmission tower; coupling system; shaking table test; scaled model; similitude-scaling relationship; geometric nonlinearity

输电塔作为电力输送支柱, 约占线路总投资的40%, 其安全可靠直接影响整个电力系统安全、经济运行^[1]。通常认为输电塔属高耸轻柔结构, 地震破坏作用较小, 但随地震强度的增大, 导致输电塔破坏后果极其严重^[2]。近年来, 世界各地震灾频发^[3-7]。而输电线路一旦遭破坏, 不仅给社会生活造成极大影响, 也造成严重经济损失, 甚至造成社会动荡, 影响整个社会

与国民经济发展。

李宏男等^[8-9]分析输电塔抗震理论时, 将输电塔简化为多质点串联体系模型, 将导线简化为悬链模型, 用直径10 mm钢棒模拟输电塔, 用铰链模拟导线, 进行三塔两线简化耦联体系模型振动台试验。该模型太简化, 铰链模拟导线存在松弛, 无法正确反映塔体结构导地线的具体受力情况。沈国辉等^[10]基于精细化有限元模型, 分析某大跨越输电塔地震响应, 反应谱法与时程分析法具有较好可比性得以验证。Maeno等^[11]对日本1000 kV特高压输电试验线路进行详细测试与分析认为, 导线对输电塔平面外自振特性影响较小, 对平面内

基金项目: 教育部霍英东教育基金会优选资助课题(114021); 国家电网公司科技项目(2008-508)

收稿日期: 2012-07-17 修改稿收到日期: 2012-11-15

第一作者 白杰男, 博士生, 1980年5月生

自振特性影响较大。Suzuki 等^[12]的输电塔-导线耦联分析模型,将导线简化为弹簧与相邻塔架相连接,质量集中在塔顶横担相应位置,塔简化为串连多质点等效梁模型。考虑相邻塔同相振动、反相振动及相邻塔为刚体三种给出频域分析方法与高压输电塔架基于简化梁模型的抗震设计方法。Taskov 等^[13]设计的阻尼器可降低导线在 earthquake 作用及风荷载下反应,并进行振动台试验研究。

随着我国经济发展,特高压输电工程进入大建设时期^[14]。对输电塔抗震性能研究主要集中于理论分析、数值仿真,振动台试验研究较少。地震模拟振动台试验可真实再现各种地震波及结构在 earthquake 作用下的破坏机理,为最直接、较准确的试验方法。然而,目前输电塔线地震模拟振动台试验较少,其主要困难有:①输电塔属高耸格构式钢结构,杆件类型较多,小比例缩尺后模型制作材料较难寻找;②模型杆件多为薄壁钢管或角钢,尺寸规格较小,难按原型结构方式连接,模型结构节点制作难度大;③输电塔线结构体系跨距大,现有地震模拟振动台尺寸有限,难在振动台上实现;④振动台试验所用相似理论主要针对线弹性单体结构,而对具有强几何非线性塔线体系则需新模型相似理论及设计方法。针对塔线体系中具有强几何非线性导线模拟,本文提出参数分离式模型设计方法在整体把握由弹性输电铁塔与强几何非线性导、地线两种不同形式结构所组成的塔线体系基础上,将塔与线分开设计。采用惯性质量相似与动力特性相似的模型相似理论,确定八分裂导线模型设计方法,完成特高压输电线路塔线耦联体系振动台试验模型设计,并从选材、相似比确定、边界条件及方案设计等对试验模型进行详细阐述。

1 三塔两线耦联体系模型设计

皖电东送淮南-上海输变电工程起点为安徽淮南变电站,终点为上海沪西变电站,线路总长 2×650 km,全线采用同塔双回钢管塔。本次地震模拟振动台试验输电塔模型原型即为此条送电线路中的直线自立塔,塔高 100.6 m,呼高 57 m。试验原型线路水平档距 510 m,导线为双回共六相,通过绝缘子分别挂在两侧上中下横担悬臂上。每相导线为八分裂架设方式,采用 $8 \times \text{ACSR} - 630/40$ 钢芯铝绞线,分裂导线间距 400 mm,在整个档距中通过米字形阻尼间隔棒不均匀档距隔开,导线弧垂 24 m。地线--根用 LBGJ-240-20AC 铝包钢绞线,一根用 OPGW,弧垂 18 m。原型输电塔设计及线路分别见图 1、图 2。

1.1 钢管塔模型选材、设计与制作

1.1.1 几何相似比与材料选取

缩尺模型设计时须先考虑模型缩尺比例及制作材料。据试验室限高条件,将输电塔模型几何相似比定

为 1:15,再据几何相似比确定缩尺杆件截面尺寸、种类及长度。所选材料应具有量低的弹性模量及尽量大的比重,且应力-应变关系也应与原型材料相似^[15]。因此,本文选毛细薄壁不锈钢管作为输电塔模型的制作材料。

试验原型输电塔由钢管与角钢组合而成。其中原型钢管截面类型 18 种,缩减后 6 种,分别为: $\phi 10 \times 0.3$, $\phi 13.5 \times 0.35$, $\phi 27 \times 0.7$, $\phi 32 \times 0.8$, $\phi 7 \times 0.3$, $\phi 20 \times 0.45$ 。其中第 3、4、6 为主材圆管截面,第 1、2、5 为斜材及辅助材圆管截面。见表 1。

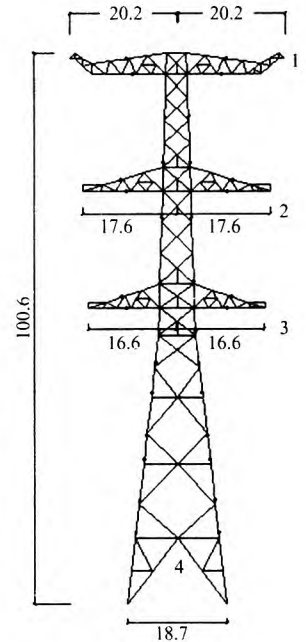


图 1 输电塔原型立面图(m)
Fig. 1 The facade of prototype tower

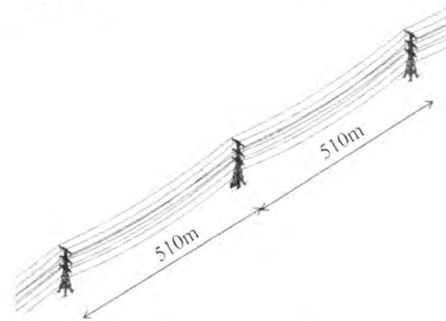


图 2 原型线路示意图(m)

Fig. 2 The sketch of prototype transmission tower-line system

表 1 圆钢管截面缩减表(单位:mm)

Tab. 1 The table of reduction for circular tube

材料	原型截面类型	缩减后的尺寸	模型截面类型
钢管	$\phi 60 \times 4$	$\phi 4 \times 0.27$	$\phi 7 \times 0.3$
	$\phi 89 \times 4$	$\phi 5.93 \times 0.27$	$\phi 7 \times 0.3$
	$\phi 114 \times 4$	$\phi 7.6 \times 0.27$	$\phi 7 \times 0.3$
	$\phi 140 \times 4$	$\phi 9.33 \times 0.27$	$\phi 10 \times 0.3$
	$\phi 159 \times 4$	$\phi 10.6 \times 0.27$	$\phi 10 \times 0.3$
	$\phi 159 \times 5$	$\phi 10.6 \times 0.33$	$\phi 10 \times 0.3$
	$\phi 168 \times 4$	$\phi 11.2 \times 0.27$	$\phi 10 \times 0.3$
	$\phi 194 \times 5$	$\phi 12.93 \times 0.33$	$\phi 13.5 \times 0.35$
	$\phi 219 \times 5$	$\phi 14.6 \times 0.33$	$\phi 13.5 \times 0.35$
	$\phi 219 \times 6$	$\phi 14.6 \times 0.4$	$\phi 13.5 \times 0.35$
	$\phi 273 \times 6$	$\phi 18.2 \times 0.4$	$\phi 20 \times 0.45$
	$\phi 325 \times 7$	$\phi 21.67 \times 0.47$	$\phi 20 \times 0.45$
	$\phi 377 \times 8$	$\phi 25.13 \times 0.53$	$\phi 27 \times 0.7$
	$\phi 406 \times 10$	$\phi 27.07 \times 0.67$	$\phi 27 \times 0.7$
	$\phi 426 \times 12$	$\phi 28.4 \times 0.8$	$\phi 27 \times 0.7$
	$\phi 457 \times 12$	$\phi 30.47 \times 0.8$	$\phi 32 \times 0.8$
	$\phi 480 \times 12$	$\phi 32 \times 0.8$	$\phi 32 \times 0.8$
	$\phi 508 \times 12$	$\phi 33.87 \times 0.8$	$\phi 32 \times 0.8$

原型输电塔角钢截面 20 种, 缩减后 3 种, 见表 2。

表 2 角钢缩减表

Tab. 2 The table of reduction for angle steel

编号	原截面类型	模型截面类型
1	L2.67 × 0.27	
2	L3 × 0.27	
3	L3 × 0.33	
4	L3.33 × 0.27	
5	L3.73 × 0.27	
6	L3.73 × 0.33	L5 × 0.5
7	L4.2 × 0.33	
8	L4.67 × 0.33	
9	L4.67 × 0.4	
10	L5 × 0.33	
11	L5 × 0.4	
12	L5.33 × 0.4	
13	L5.33 × 0.47	
14	L6 × 0.47	
15	L6 × 0.53	L8 × 0.5
16	L6.67 × 0.53	
17	L7.33 × 0.53	
18	L8.33 × 0.53	
19	L9.33 × 0.67	L10 × 0.8
20	L10.67 × 0.8	

1.1.2 其它相似参数确定

模拟地震振动台试验中相似关系设计非常重要。在相似关系诸多参数中需先确定 3 个基本参数, 其它相似系数可由此推导而得, 所确定的相似关系作为模型设计初步相似关系^[16]。

表 3 输电塔模型相似系数表

Tab. 3 Primary similarity parameters of the test model

相似系数名称	相似比
几何相似系数 S_L	1:15
加速度相似系数 S_a	3:1
质量相似系数 S_m	1:675
频率相似系数 S_f	6.7:1
弹性模量相似系数 S_E	1:1
密度相似系数 S_ρ	5:1

试验所用特高压钢管塔原型结构高 100.6 m, 在满足试验室限高条件下, 将几何相似比 S_L 确定为 1:15; 据所选材料特性确定弹性模量相似比 S_E , 设计时忽略不锈钢与原型钢材弹性模量间差异, 将弹性模量相似

万方数据

比 S_E 定为 1; 在动力试验中加速度相似比作为施加动力荷载的主要控制参数, 考虑振动台噪声、台面承载力等因素, 确定 S_E 为 3。基于 S_L 、 S_E 、 S_a 相似比, 可确定其它相似关系, 试验中输电塔所用主要相似系数见表 3。

本文通过数值计算与白噪声扫频试验, 获得塔体结构自振频率计算值与实测值, 见表 4。由表 4 看出, 理论值与实测值误差较小, 且频率相似比与设计要求(表 3)一致, 因此塔架结构设计符合试验要求。

表 4 钢管塔频率计算值与实测值比较

Tab. 4 The comparison of calculated and measured values for the frequency of transmission tower

振型	原型计算值/Hz	理论期望值/Hz	实测值/Hz	相对误差/%
一阶 Y 向	1.18	7.94	7.62	-4.0
一阶 X 向	1.20	8.09	7.77	-3.9

1.1.3 模型配重确定

确定相似常数时, 同一参数相似常数值应相同。而已确定水平加速度相似比为 3、重力加速度相似为 1, 二者不相同。此可由配重解决。先算出塔体结构各部所需附加质量, 再据计算结果设计环形短钢柱作为配重块, 并将其按配重方案分散布置于主要杆件。即只增加结构重量, 不增加结构强度及刚度。

配重计算时, 将塔体结构分上、中、下横担及塔身结构四部分, 分别以 1、2、3、4 表示(图 3)。其中, 上、中、下横担处配重均为 8 kg, 塔身处配重 91 kg, 塔体结构总配重 115 kg。配重后模型塔见图 4。

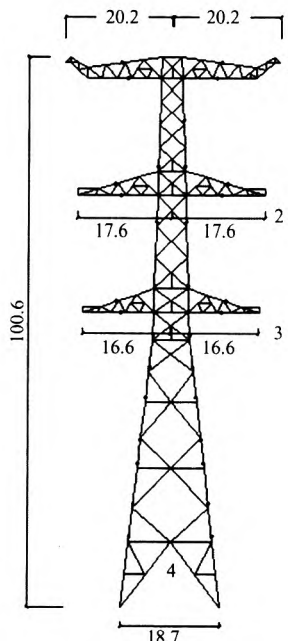


图 3 模型配重方案示意图
Fig. 3 Schematic drawing of clump weights on test model

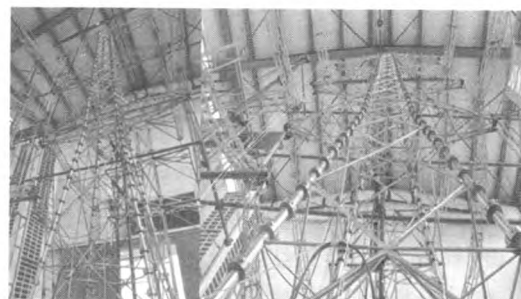


图 4 配重后模型塔
Fig. 4 Test model with clump weights

1.2 导、地线模型设计与制作

1.2.1 导、地线模型相似关系

在同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室进行。台面尺寸4 m×4 m。由于原型结构水平档距510 m,若按几何缩尺比试验,振动台尺寸远不能满足要求。为此,本文用惯性质量相似与动力特性相似分离方式进行导、地线模拟,即将导、地线惯性作用与动力特性分别考虑满足塔线体系动力相似关系。

(1) 导、地线动力特性相似关系

塔线体系作为整体进行缩尺模型设计时,需保证输电塔与导、地线频率相似比相同,满足动力特性相似。即:

$$S_f^c = S_f^g = S_f \quad (1)$$

其中: S_f^c 为导线模型频率相似比; S_f^g 为地线模型频率相似比; S_f 为输电塔模型频率相似比。

将导线视为悬链线,其基本自振频率为:

$$f^c = \sqrt{g/4\pi^2 s} \quad (2)$$

式中: f^c 为导线频率; s 为导线弧垂; g 为重力加速度常数。式(2)表明:导、地线基本自振频率与弧垂直接相关。

据式(2)可推导出相应的导线弧垂与频率相似比关系为:

$$S_L^s = 1/S_f^{c^2} \quad (3)$$

式中: S_L^s 为导线弧垂相似比; S_f^c 为导线频率相似比。

已知 $S_f^c = S_f = 6.7$,代入式(3)后得 $S_L^s = 1/44.9$,从而获得导线弧垂为0.54 m。同理得地线弧垂为0.4 m。

(2) 导、地线惯性质量相似关系

为保证在振动台试验中惯性力相似,导、地线惯性质量应满足试验条件。因此需确定配重以满足惯性力相似。原型线路若按理论水平档距相似比 $S_L^T = S_L = 1/15$ 进行导、地线档距设计(S_L^T 理论水平档距相似比, S_L 为输电塔模型几何相似比),导线跨度应为34 m,无法在台面上完成三塔两线体系布置。综合考虑各因素,以设计制作长7 m,宽2 m的刚性悬挑底座为基础,将缩尺模型水平档距定为3 m,确定实际水平档距相似比 $S_L^R = 1/170$ 。

为保证按实际水平档距相似比 $S_L^R = 1/170$ 进行设计时导、地线惯性力与按理论水平档距相似比 $S_L^T = 1/15$ 设计相同,需满足条件:

$$m_{1/170} = m_{1/15} \quad (4)$$

式中: $m_{1/170}$ 为按实际水平档距相似比 $S_L^R = 1/170$ 设计时所需导、地线质量; $m_{1/15}$ 为按理论水平档距相似比 $S_L^T = 1/15$ 设计时所得导、地线质量。模型设计主要考虑导、地线振动对输电塔影响,不计原型导、地线与模型导、地线弹性模量间差异,令 $S_E^c = S_E^g = 1$ (S_E^c 为导线弹性模量相似比, S_E^g 为地线弹性模量相似比),主要相似

比见表5。

已知原型导线总质量:

$$M_{cp}^r = \rho_{cp} L_{cp} = 2.06 \times 513 = 1056.8 \text{ (kg)} \quad (5)$$

其中: M_{cp}^r 为单根导线质量; ρ_{cp} 为单根导线密度; L_{cp} 为考虑导线弧垂后总长。

由表5导线质量相似比为1:675可求得单根模型导线质量及线密度:

$$M_{cm}^r = M_{cp}^r/675 = 1.56 \text{ (kg)} \quad (6)$$

$$\rho_{cm}^r = \frac{M_{cm}^r}{L_{cm}} = \frac{1.56}{3.23} = 0.48 \text{ (kg/m)} \quad (7)$$

其中: L_{cm} 为模型导线考虑弧垂后总长。计算得实际设计模型导线单根线密度为0.48 kg/m,模型地线密度为0.38 kg/m。

表5 导、地线相似比

Tab. 5 Primary similarity parameters of the conductor and ground wire

相似比名称	相似比值
实际水平档距相似比 S_L^R	1:170
理论水平档距相似比 S_L^T	1:15
加速度相似比 S_a	3:1
导线质量相似比 S_m^c	1:675
地线质量相似比 S_m^g	1:675
导线频率相似比 S_f^c	6.7:1
地线频率相似比 S_f^g	6.7:1
导线弹性模量相似比 S_E^c	1:1
地线弹性模量相似比 S_E^g	1:1
导线密度相似比 S_ρ^c	1:4.3
地线密度相似比 S_ρ^g	1:4.3

表6 钢管塔导线原型、理论模型与实际模型参数

Tab. 6 The parameters of the prototype, theoretical model and practical model for the conductors

导线	档距/m	弧垂/m	一阶 频率/Hz	二阶 频率/Hz	三阶 频率/Hz
原型	520	15.6	0.11	0.22	0.22
理论模型	34	0.53	0.66	1.27	1.31
实际模型	3	0.53	0.71	1.34	1.42

比较表6参数看出,实际模型前三阶频率与理论模型期望值吻合较好,从而验证了按该方法设计的输电线基本满足振动台试验动力特性要求。

1.2.2 导、地线设计及制作

八分裂导线设计主要包括导、地线配重、间隔棒、联板及各种连接金具等。试验用直径4 mm钢绞线模拟单根导线,用直径1.2 mm钢绞线模拟地线。据导、地线模型惯性质量相似关系,导、地线模型线密度应为

0.48 kg/m, 0.38 kg/m。由于所选钢绞线密度远低于模型设计时导、地线密度, 因此需用附加质量满足所需惯性质量要求。考虑导、地的弧垂特性及配重分布等因素, 选直径 5 mm 环状镀锌铁链作为单根导线配重。选直径 3 mm 环状镀锌铁链作为地线配重。用宽 20 mm、厚 2 mm、直径 140 mm 的侧壁等间距开孔圆环模拟间隔棒, 并将联板设计为两种, 即模型塔联板与等代塔联板。制作完成后的八分裂导线及配重安装见图 5。

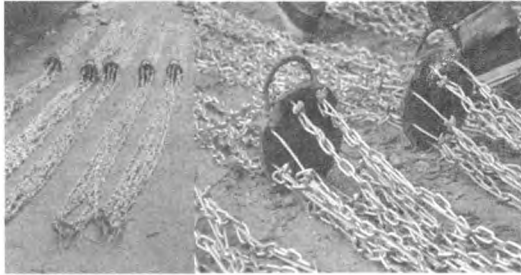


图 5 八分裂导线及配重
Fig. 5 8-Bundled conductor and its added mass

1.3 等代塔、刚性底座设

等代塔为三塔两线体系模型中紧邻模型塔的两基塔, 设计原则为其强轴向频率、弱轴向频率及扭转频率与模型塔一致, 见图 6。表 7 为等代塔与模型塔频率的对比关系。由表 7 看出, 本文设计的等代塔完全可满足试验动力特性要求。



图 6 等代塔
Fig. 6 Equivalent tower

绝缘子串主要作连接导线与输电塔横担, 将导线作用力传递至输电塔。试验中将绝缘子串视为两端铰接刚性杆, 按几何缩尺比计算模型绝缘子串直径及质量。试验用直径 30 mm、壁厚 2 mm、长 650 mm 镀锌钢管模拟绝缘子串。由于试验用三塔两线体系总跨度超过振动台面尺寸, 故制作锚固于振动台面的刚性悬挑底座, 见图 7。

表 7 等代塔和模型塔的前三阶频率
Tab. 7 The first three frequencies of equivalent and model towers

频率/Hz	等代塔	模型塔
强轴向	8.00	7.94
弱轴向	8.02	8.09
扭转向	10.11	11.7



图 7 底座
Fig. 7 The concrete base

1.4 试验边界条件设计

边界条件模拟对塔线耦联体系试验模型设计至关重要。输电塔挂上导线后, 张力应处于自平衡状态。为使试验导线张力平衡, 本文设计出悬垂摆系统, 通过悬挂质量块平衡导线内张力。导、地线张力平衡需满足: ① 悬挂质量块重力应能平衡导线张力; ② 悬垂质量摆基频与导线面外振动一阶频率一致。计算导线因自重产生的不平衡张力, 抵消其所需拉力通过悬挂质量块方式施加, 取直径 6 mm 绳索, 一端连接悬挂质量块, 另一端绕过滑轮连接到与等代塔相连的联板上, 从而形成悬挂质量摆系统(为便于设计方案实施, 试验前将设计好的空间钢架焊接至六个横担处, 以此作为单摆系统吊点)。在满足力平衡基础上, 考虑频率的一致性, 即以悬垂质量摆频率与导线一阶频率相等为条件确定摆长为 0.54 m。试验设计边界条件见图 8。

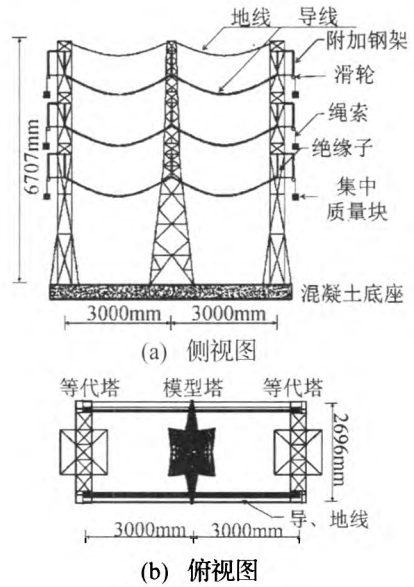


图 8 试验边界条件示意图
Fig. 8 Schematic drawing of border conditions

2 振动台试验方案

2.1 地震波选取

由于原型输电线路跨越距离较长, 所经地区场地条件不尽相同。因此, 选二类场地 Taft 波、三类场地 EL-Centro 波及 Pasadena 波、四类场地上海人工波 (SHW2) 作为振动台面输入。地震动持时按相似关系压缩为原地震波的 1/6.7, 各水准地震下台面输入加速

度峰值按上海市规程^[16]及试验动力相似关系确定。

2.2 传感器布置

试验用3种传感器分别为:压电式加速度传感器,拉线式位移传感器,电阻式应变片,见图9。加速度、位移传感器除在塔顶、模型底座布置外,沿塔身高度两方向即顺线路方向与垂直线路方向均匀布置。在模型塔联板处布置加速度计,塔顶两地线支架处分别布置加速度传感器,经比较二测点差值可获得结构扭转反应。应变片主要分布在塔腿主材、斜材及塔身斜材处。为获得绝缘子动应力变化及地线在地震反应过程中应变数据,分别在上横担绝缘子处、靠近地线支架的地线上布设应变片。



图9 试验用传感器
Fig.9 Sensors used in the test

2.3 三塔两线体系组装

试验时,三塔两线耦联体系模型安装分四步:①将浇筑好的混凝土刚性底座吊装至振动台面并通过螺栓与台面牢固连接;②将三基塔依次吊装至混凝土底座位置处与预埋螺栓牢固连接;③将导、地线吊装并连接至相应横担及地线支架处;④安装位移计脚手架并布置传感器。安装后的三塔两线耦联体系振动台试验现场见图10。

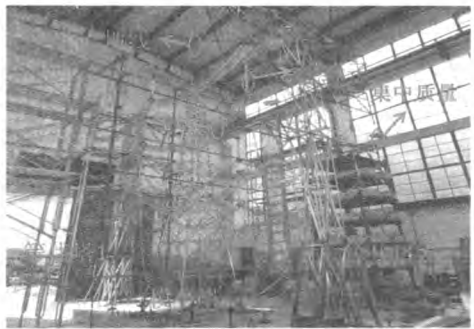


图10 塔线耦联体系振动台试验测试现场
Fig.10 Transmission tower-conductor coupling system on the shaking table

3 结论

(1) 特高压输电塔线耦联体系缩尺模型振动台试验研究中,针对钢管塔工程要求,按振动台模型线弹性相似理论缩尺模拟输电塔。

(2) 针对带有强几何非线性的大跨度、大截面八分裂导线,提出参数分离式模型设计理论,分别采用惯性质量相似及动力特性相似原则,确定八分裂导线模型的配重及弧垂设计方法,完成了特高压输电线路塔

线耦联体系的振动台试验模型设计。

(3) 该模型设计方法可为相关的具有强几何非线性体系结构缩尺模型地震模拟振动台试验提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 曾宪凡. 高压架空线路设计基础[M]. 北京:水利水电出版社, 1995.
- [2] 李宏男. 高压输电塔抗震分析与设计[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [3] 李杰. 生命线工程抗震:基础理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [4] 罗奇峰. 日本兵库县南部地震中生命线系统的震害及其震后恢复[J]. 灾害学, 1997, 12(1): 43-48.
LUO Qi-feng. Damages to lifeline systems caused by hyogoken nanbu earthquake, Japan, and Their Recovery [J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 43-48.
- [5] 台湾地震工程研究中心. 九二一集集大地震全面勘灾精简报告[R]. NCREE-99-033, 1999.
- [6] 非明伦,周光全,谢英情,等. 盐津5.1级地震现场调查与烈度分布[J]. 地震研究, 2006, 29(4): 411-417.
FEI Ming-lun, ZHOU Guang-quan, XIE Ying-qing, et al. Yanjin M_s 5.1 earthquake damage survey in field and intensity distribution[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 411-417.
- [7] Xie Q, Zhu R. Earth, wind, and ice [J]. Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [8] 李宏男,陆鸣,王前信. 大跨越自立式高压输电塔-电缆体系的简化抗震计算[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(2): 81-89.
LI Hong-nan, LU Ming, Wang Qian-xin. Simplified a seismic calculation of high voltaghe system consisting of long span transmission lines and their supporting towers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(2): 81-89.
- [9] Li H N, Shi W. Simpli? ed models and experimental veri? cation for coupled transmission tower - line system to seismic excitations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(3): 569-585.
- [10] 沈国辉,孙炳楠,何运祥,等. 大跨越输电塔线体系的地震响应研究[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 212-217.
SHEN Guo-hui, SUN Bing-nan, HE Yun-xiang, et al. Seismic responses of long-span transmission tower-line system [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 212-217.
- [11] Maeno Y, Hanada K, Sakamoto Y. Dynamic properties of UHV power transmission towers: full-scale tests and numerical investigation [A]. In: Proceedings of 8th WCEE [C]. San Francisco, America, 1984: 12-34.
- [12] Suzuki T. Seismic response characteristics of transmissions towers [A]. In: Proceedings of 10 th WCEE [C]. Balkema Rotterdam, 1992: 55-60.
- [13] Taskov L, Bojadziev M, Stefanovski M. Experiment studies for development and application of dampers for vibration damping at power transmission structures [C]. 8th European Conference on Earthquake Engineering, 1986: 25-32.
- [14] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社, 2005: 25-35.
- [15] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京:地震出版社, 1989.
- [16] DGJ08-9-2003, 建筑抗震设计规程[S].