

文章编号:1674-2974(2013)04-0020-06

特高压格构式输电塔线体系振动台试验设计*

白杰[†], 谢强, 薛松涛, 申道明
(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:特高压输电塔线体系具有跨越档距大、塔体高的特点,进行地震模拟振动台试验测试时,现有结构试验方法难以完成.本文以特高压交流单回路输电线路工程为背景,设计制作了三塔两线体系缩尺模型,文中详细阐述了振动台试验的模型设计工作,其中包括试验材料的选取、动力相似关系的确定、模型的制作以及试验方案设计等方面.针对由强几何非线性的导、地线与弹性输电铁塔这两种不同形式的结构所组成的耦联体系提出了动力参数分离式模型设计方法,解决了塔线体系按统一比例无法满足振动台台面尺寸要求的问题.理论分析和实测对比验证了该模型较好地满足了振动台试验要求,该方法使得通过振动台试验研究特高压输电塔线体系的地震反应得以实现.

关键词:特高压;地震反应;塔线耦联体系;振动台试验;相似关系;模型设计方法
中图分类号:TU279.744,TU317.1;TU312.1 **文献标识码:**A

Shaking Table Test Model Design for UHV Latticed Transmission Tower-line Coupling System

BAI Jie[†], XIE Qiang, XUE Song-tao, SHEN Dao-ming
(College of Civil Engineering, Tongji Univ, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ultra high voltage(UHV) latticed transmission tower-line coupling system is characterized by long-span and high-rise, and the existing experimental methods can not complete the shaking table tests. This paper designed a coupled system model consisting of three towers and two-span conductors, which took a single-circuit AC transmission project as the prototype. The material selection, the dynamic similarity relations and the design of the test plan for shaking table model of UHV transmission tower-line coupled system were introduced. To simulate the different dynamic characteristics between elastic latticed transmission tower and flexible transmission conductors and ground wires which show strong geometrical nonlinearity, separated dynamic parameter scale ratios for the two parts were used independently in the design of the system, which can solve the trouble that the span of transmission line is too long to fit within the shake table in the same proportions as the tower. Shaking table test requirements can be satisfied by comparing theoretical analysis with the actual measurements of the system model.

Key words: ultra high voltage(UHV); seismic response; transmission tower-line coupling system; shaking table test; similitude relationship; model design method

国内外地震灾害表明^[1-5],输电塔线体系一旦遭到破坏,不仅会造成巨额的直接或间接经济损失,

还会引发火灾等次生灾害,对地震救灾和应急恢复也会产生极大的困难^[6].

* 收稿日期:2012-07-11

基金项目:教育部霍英东教育基金会优选资助课题(114021)

作者简介:白杰(1980-),男,河北邢台人,同济大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: baishankui@126.com

受试验条件限制,振动台台面通常无法完成塔线耦联体系的布置工作,高压输电塔线体系振动台试验极少涉及.李宏男、王前信等将导线侧向简化为垂链,纵向简化为悬链分别建立了输电塔导线体系侧向和纵向地震反应分析模型,并进行了三塔两线耦联体系模型的振动台试验验证.试验分别采用钢链模拟导线,钢棒(直径 10mm)模拟输电塔,铁块模拟配重.三根钢棒之间通过两层钢链连接,构成了输电塔-线耦联体系模型.试验结果验证了其所建立的塔线耦联体系理论计算模型的合理性^[7-8].

鉴于特高压输电线路在国民经济建设中的重要地位,本文以原型特高压输电线路为背景,针对由强几何非线性的导、地线与弹性格构式铁塔这两种不同形式的结构所组成的耦联体系,提出了动力参数分离式相似的模型设计方法,解决了塔线体系按统一比例无法满足振动台台面尺寸要求的难题,使得通过振动台试验研究特高压输电塔线体系的地震反应得以较好的实现.文中重点阐述了三塔两线耦联体系模型设计理念、方法、输入地震波的模拟以及响应测量等问题.

1 特高压塔线耦联体系模型设计与制作

特高压输电塔线耦联体系主要由输电塔和具有几何非线性的导、地线所组成,这与单体结构振动台试验设计存在较大的差别,即体系中的输电塔与导、地线若按统一几何相似常数进行设计,受限于振动台台面尺寸,试验将无法开展.本文在对耦联体系整体把握的基础上将各部分分开设计,主要包括:输电塔模型、导、地线模型,绝缘子,间隔棒,配重,底座等.

1.1 输电塔模型的设计与制作

本文在进行模型相似关系设计时,初步选取 3 个可控相似比,然后根据似量纲分析法求出其余相似比.首先在满足试验室限高的条件下,将几何相似比 S_L 确定为 1/8,从而得到模型塔高度为 8.08 m(原型塔高 64.64 m);其次,由于模型制作材料与原型材料相同,因此将弹性模量相似比 S_E 确定为 1;最后是加速度相似比 S_a 的确定.地震模拟振动台试验中,加速度相似比是施加动力荷载的主要控制参数.考虑到振动台噪声、台面承载力等因素,通常取值在 2~3 之间.本次试验将 S_a 确定为 2.5.确定完这三个可控相似比后,即可在其基础上求得其它相似关系.本试验格构式角钢塔模型主要相似比见表 1.

该原型塔由 36 种不同截面形式的角钢杆件组成(如图 1 所示),其中某些截面尺寸差别较小,相对于模型制作误差而言,这些因素是可以忽略的.综合

表 1 输电塔模型相似比

Tab. 1 Primary similarity parameters of transmission tower

相似比名称	相似比
几何相似比 S_L	1 : 8
加速度相似比 S_a	2.5 : 1
质量相似比 S_m	1 : 160
频率相似比 S_f	4.48 : 1
弹性模量相似比 S_E	1 : 1
密度相似比 S_ρ	3.2 : 1

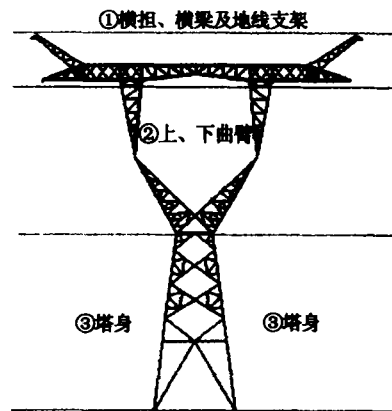


图 1 输电塔示意图

Fig. 1 The schematic drawing of transmission tower

考虑材料的力学性能、易选性以及模型加工难易程度等因素,对模型杆件进行归并,最终选取 5 种角钢作为输电塔模型的制作材料,用于模拟原型塔塔体结构相应的主材、斜材及辅助材,详见表 2.由于采用了缩尺模型,所有构件截面较小,连接部采用原设

表 2 模型杆件缩减表

Tab. 2 The reduction table for the members in the tower

实际杆件尺寸 肢长×肢厚	缩减后模型杆件尺寸 肢长×肢厚	实际杆件尺寸 肢长×肢厚	缩减后模型杆件尺寸 肢长×肢厚
L40×3		L110×7	
L40×4		L110×8	
L45×4		L125×8	L15×1.2
L45×5		L125×10	
L50×4		L140×10
L50×5		L140×12	
L56×4		L160×10	
L56×5		L160×12	L20×1.5
L63×5		L160×14	
L70×5	L10×1	L180×12	
L70×6		L180×14
L75×5		L180×16	
L75×6		L180×18	L25×2
L80×6		L200×14	
L80×7		L200×16	
L90×7		L200×20
L90×8		L200×24	
L100×7		—	L25×3
L100×8		—	

计的螺栓连接困难大,而且精度很难满足制作要求,因此,所有杆件采用焊接连接方式。

动力相似关系及几何外形确定后,为解决振动台水平激励加速度相似比($S_a = 2.5$)与重力加速度相似比($S_g = 1$)这一矛盾,需对缩尺模型进行配重。试验以单个质量为 0.735 kg 的铁质四棱柱为配重块。为了使配重块不影响结构的强度和刚度,将其均匀绑扎到相应的杆件处。配重后模型总质量为 378 kg,输电塔模型分段示意图及配重方案详见图 1 和表 3。

表 3 输电塔模型配重方案
Tab. 3 The scheme for weight-adding on test model

配重节段编号	期望配重质量/kg	配重间距/mm	配重块个数	实际配重质量/kg
1	60	100	80	58.8
2	92	70	126	92.6
3	108	50(350)	148	108.8
总计	260	101 056	354	260.2

加工完成后的铁塔模型如图 2 所示,为对其模态进行实际测量,在铁塔顶部安装加速度传感器,通过双向白噪声扫频得到了模型的自振频率,表 4 列出了模型塔的计算值与实测值,可以看出,其前两阶频率误差均小于 5%,符合模型设计要求。

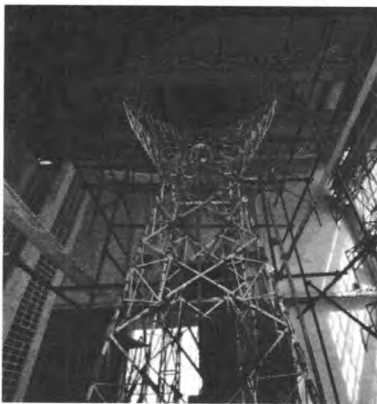


图 2 输电塔模型
Fig. 2 The test model

表 4 输电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 向弯曲	1.23	5.35	5.12	-4.3
一阶 X 向弯曲	1.28	5.46	5.45	-0.1

1.2 导、地线模型设计与制作

原型导线为单回路三相,边相采用悬垂型绝缘子串,中相采用 V 型绝缘子串。每相导线为 8 分裂的架设

方式。导线型号采用 LGJ-500/35 型,分裂导线间距为 400 mm,在整个档距中通过米字形阻尼间隔棒不均匀档距地隔开。输电塔水平档距为 460 m,导线弧垂为 15.6 m。地线一根采用 LBGJ-240-20AC 铝包钢绞线,另一根采用 OPGW,弧垂为 7.7 m。

1.2.1 导、地线模型相似关系

导、地线本身所具有的强几何非线性特性使传统的线弹性结构缩尺模型设计方法受到限制,同时,由于振动台台面大小的限制,不可能严格按照几何相似比来模拟长跨悬索结构。基于悬索结构的特点,本文提出了动力参数分离式缩尺动力模型设计方法,即将导、地线的动力特性和惯性作用分开考虑来满足相似关系。

1) 导、地线动力特性相似

在动力特性方面,为保证缩尺后的塔线耦联体系仍为一整体,导、地线应具有与输电塔缩尺模型相同的频率相似比。因此,须满足下式的相似条件:

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

式中: 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。

以导线模型设计为例。设计时将导线视为悬链线,其面外一阶频率计算公式为:

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

式中: f^c 为导线频率; s 为导线弧垂; g 为重力加速度常数。

根据公式(2)可推导出相应的导线弧垂与频率相似比关系为:

$$S_L = 1/S_f^c. \quad (3)$$

式中: S_L 为导线弧垂相似比; S_f^c 为导线频率相似比。

已知 $S_f^c = S_f = 4.48$, 将其代入公式(3)后可得 $S_L = 1/20$, 进而得到导线弧垂为 0.78 m。同理,经计算后得到地线弧垂为 0.385 m。

2) 导、地线惯性力相似

原型线路水平档距为 460 m,振动台台面尺寸为 4 m×4 m。若按理论水平档距相似比 $S_L^T = S_L = 1/8$ 进行导、地线档距设计(S_L^T 为理论水平档距相似比, S_L 为输电塔模型几何相似比),则无法在台面上布置三塔两线体系。因此,试验以振动台台面尺寸为参考,在充分考虑基础底板刚度及试验条件的基础上,将缩尺模型的水平档距确定为 3 m。进而得到实际水平档距相似比 $S_L^R = 3/460 = 1/153$ 。

为保证实际设计的导、地线模型惯性力与理论设计值一致,需满足条件 $m_{1/153} = m_{1/8}$ 。其中, $m_{1/153}$ 是按实际水平档距相似比 $S_L^R = 1/153$ 设计时所需导、地线质量; $m_{1/8}$ 是按理论水平档距几何相似比

$S_L^T = 1/8$ 设计时所得的导、地线质量。

设计时忽略导、地线弹性模量的影响,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), 计算后得到单根模型导线的线密度为 1.36 kg/m, 模型地线的线密度为 1.47 kg/m. 导、地线设计主要相似比如表 5 和表 6 所示。

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^A	1 : 153
理论水平档距相似比 S_L^T	1 : 8
加速度相似比 S_a	2.5 : 1
导线质量相似比 S_m^C	1 : 160
地线质量相似比 S_m^G	1 : 160
导线频率相似比 S_f^C	4.48 : 1
地线频率相似比 S_f^G	4.48 : 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_p^C	1 : 1.18
地线密度相似比 S_p^G	1 : 1.17

表 6 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	460	15.6	0.13	0.26	0.27
理论模型	57.5	0.78	0.61	1.21	1.21
实际模型	3	0.78	0.63	1.05	1.23

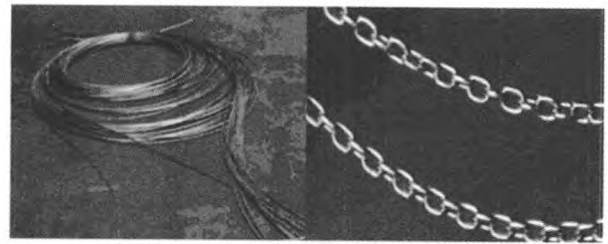
1.2.2 模型导、地线设计及制作

相似关系确定后,进行导、地线金具设计,其中包括导、地线配重,间隔棒,联板及各种连接金具等。

试验中用于模拟单根导线及地线的镀锌钢绞线公称直径为 4 mm. 由于所选取的钢绞线的线密度远远低于模型设计时导、地线的要求,因此需要通过附加质量来满足试验所需的惯性力相似. 考虑到施加附加质量后导、地线的弧垂特性及质量分布情况,将直径为 8 mm 的 O 字型镀锌铁链作为单根导线配重. 将直径分别为 8 mm 和 3 mm 的 O 字型镀锌铁链组合为一整体作为地线配重. 所选钢绞线及 O 字型配重铁链如图 3 所示。

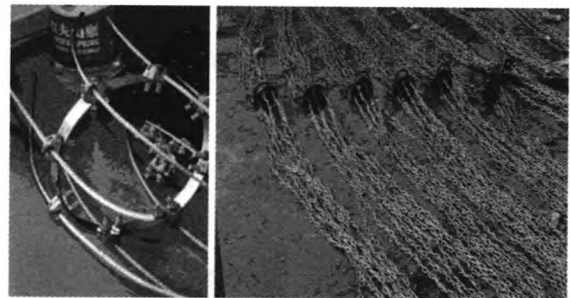
由于导线采用 8 分裂形式,间隔棒是输电线路分裂导线必不可少的关键防护金具,其主要作用就是使每相子导线之间保持一定的分裂间距. 根据工程设计,原型 8 分裂导线之间的间距为 400 mm,模型导线的分裂间距为 50 mm. 模型间隔棒设计时以宽 20 mm,厚 2mm 的条形不锈钢带为母材,将其卷制成直径 140 mm 的圆环,并在侧壁等间距开孔而

成. 间隔棒实验模型如图 4 所示。



(a) 镀锌钢绞线 (b) O 字型配重铁链
图 3 导线模型及其配重

Fig. 3 Clump weight and conductor model



(a) 间隔棒 (b) 8 分裂导线

图 4 8 分裂导线及间隔棒

Fig. 4 8-bundled conductor and spacer

联板是绝缘子串中的关键金具,其主要作用是连接和重新分布荷载,即把荷载平均分成同一平面内的呈正八边形分布的 8 个挂点上. 联板模型以直径 150 mm,厚 5 mm 的圆形钢板为母材. 沿半径为 70 mm 的圆环均匀钻孔,形成 8 个挂点,便于子导线从中穿过. 同时在钢板侧面焊接吊环,用于连接绝缘子. 穿线后,将圆孔两端用卡扣卡紧,以防止钢绞线在圆孔附近滑移。

考虑导、地线弧垂影响后,经计算得到导线配重铁链每段 3.47 m,地线配重铁链每段 3.13 m,将其分别穿到模型导、地线上. 为防止铁链与钢绞线发生相对滑移,用扣件将二者固定. 制作完成后的 8 分裂导线及地线见图 4。

1.3 等代塔、绝缘子及底座设计及制作

试验中为模拟三塔两线动力耦联体系,需要进行等代塔设计,如图 5 所示. 等代塔设计原则是其前三阶频率(包括:强轴向频率、弱轴向频率及扭转频率)与模型塔的前三阶频率一致. 本文采用 L25 × 3 的等肢角钢作为等代塔的制作材料。

绝缘子串主要作用是连接导线与输电塔横担,将导线的作用力传递到输电塔上. 绝缘子串的模拟不考虑其刚度,将其看作刚性杆,两端铰接,按照几何缩尺比计算模型绝缘子串的质量和直径. 试验中采用直径 30 mm,壁厚 3 mm,长 1 500 mm 的镀锌钢管模拟模型绝缘子串。

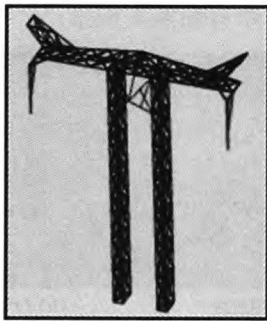


图5 等代塔
Fig. 5 Equivalent tower

由于试验所设计的两基等代塔间距为6 m,超出了同济大学土木工程防灾试验室振动台台面尺寸(4 m×4 m),因此需要制作一个锚固于振动台台面上的刚性悬挑底座.底座设计时要考虑底座结构的抗弯能力、抗冲切能力、锚固能力以及整体刚度.所设计的底座如图6所示.



图6 塔线体系刚性底座设计
Fig. 6 The concrete base for tower-line coupling system

1.4 边界条件模拟

实际工程中,输电线的张力由耐张塔承担,在直线塔的绝缘子处,张力是平衡的.由于试验测试对象选取的是输电线路中的一部分,而试验模型是直线自立塔的三塔两线耦联体系模型,因此,需保证每基塔所悬挂导线的张力平衡.对于位于中间的模型塔,两侧导线张力是自然平衡的,需要考虑的是位于两侧的等代塔导线张力的平衡条件.本文通过边界条件的设计使得该条件得到了较好的满足,从而模拟了原型输电线路中直线塔的受力方式.

试验时边界条件的模拟如图7所示.两基等代塔的横担外侧焊接具有悬挑形式的三角钢架,以此悬挑钢架底端作为定滑轮安装点.其次,取直径6 mm 绳索,一端连接集中质量块(17.2 kg),另一端绕过滑轮连到与等代塔相连的联板上,从而消除了导线中不平衡张力.

2 振动台试验方案

2.1 地震波选取

由于特高压输电线路跨越地区广阔,各塔所处场地条件不同,综合考虑各种因素,选用 El-Centro

波、Taft 波、Pasadena 波和上海人工地震波 SHW2 作为振动台台面激励.其中,EL-Centro 和 Pasadena 波适合于3类场地,Taft 波适合于2类场地,SHW2 波适合于4类场地.地震动持续时间按相似关系压缩为原地震波的1/4.48,输入方向分为水平单向及水平双向输入.各水准地震下台面输入加速度峰值按《建筑抗震设计规程》^[9]和试验的动力相似关系确定.

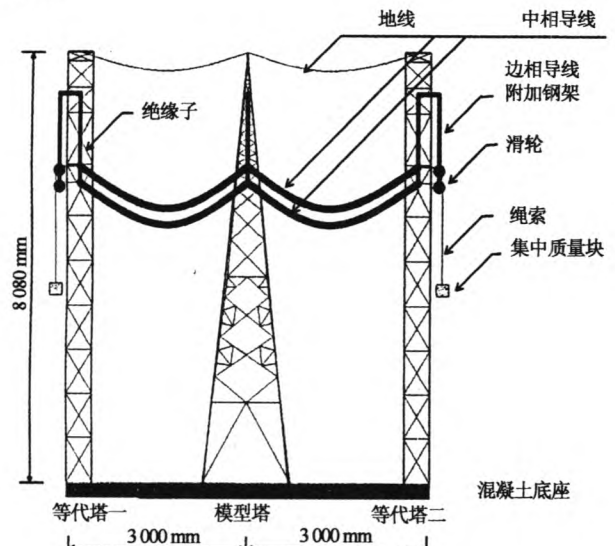


图7 试验边界条件示意图
Fig. 7 Schematic drawing of border conditions

2.2 测试系统布置

试验时需要得到输电塔线耦联体系的加速度响应、位移响应以及部分杆件的应变响应,采用了3种传感器:CA-YD 压电式加速度传感器,频响范围为0.3~200 Hz;ASM 拉线式位移传感器,量程为0~±375 mm;电阻式应变片,量程为0~20 000 $\mu\epsilon$.试验共布置了30个加速度传感器,18个应变片和13个位移计,总共使用了61个通道采集数据.传感器布置情况如图8所示.加速度和位移传感器除了在塔顶、模型底座布置外,沿塔身高度两个方向即顺线路方向和垂线路方向大致均匀布置.另外,在模型塔的联板处布置加速度计以测试联板处的加速度响应,两个横担边缘处分别设置一加速度传感器,通过比较二测点的差值可以得到结构的扭转反应.电阻式应变片主要分布在塔腿主材、斜材及塔身的斜材处,以考察不同位置杆件的应变响应.

2.3 塔线耦联体系的安装

三塔两线耦联体系的安装大体可按如下步骤进行.首先,将混凝土刚性底座吊装至振动台台面并与其可靠连接.其次,将三基塔依次吊装到与混凝土底座相对应的位置上,在塔脚底板处通过预埋螺栓与底座牢固连接.再次,对角钢塔缩尺模型按设计方

案进行配重. 最后将导、地线吊装并连接至相应横担及地线支架处. 安装完毕后的三塔两线体系地震模拟振动台试验现场如图 9 所示.

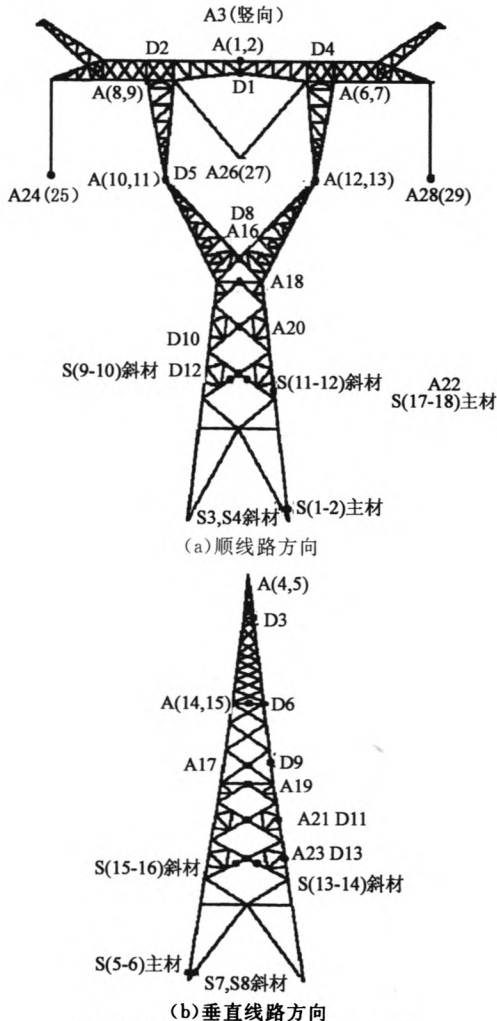


图 8 输电塔模型测点布置示意图
Fig. 8 Sensor location in the test model

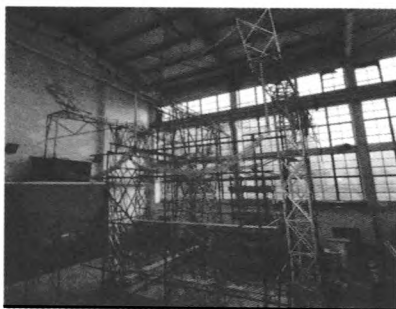


图 9 振动台试验测试现场
Fig. 9 Shaking table test site

3 结 语

针对由强几何非线性的导、地线与弹性格构式铁塔这两种不同形式的结构所组成的耦联体系,提

出了动力参数分离式缩尺模型设计方法. 通过对塔线体系理论模型与振动台缩尺模型的对比分析,验证了模型与原型的动力特性关系是符合振动台试验要求的,从而确保了振动台试验结果的有效性. 文中所提出的方法使得通过振动台试验研究特高压输电塔线体系的地震反应得以较好的实现. 本文详细阐述了试验材料的选取、动力相似关系的确定、模型的设计与制作过程,这对今后相关的试验工作可起到一定的借鉴作用.

参考文献

- [1] 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.
LI Jie. Lifeline earthquake engineering—basic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005. (In Chinese)
- [2] 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 life-line systems caused by Hyogoken Nanbu, Japan, earthquake and their recovery[J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 43—48. (In Chinese)
- [3] 台湾地震工程研究中心. 九二—集集大地震全面防灾简报报告[R]. 1999.
Tai Wan Center for Research on Earthquake Engineering. Chi-chi earthquake disaster streamline reporting comprehensive survey[R]. NCREE-99-033, 1999(In Chinese)
- [4] 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. Yanzhin, Yunnan, M_s 5.1 earthquake damage survey in field and intensity distribution [J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 411—417. (In Chinese)
- [5] XIE Q, ZHU R. Earth, wind, and ice [J]. Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28—36.
- [6] 尹荣华, 李东亮, 刘戈林, 等. 高压输电塔震害及抗震研究 [J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 51—54.
YIN Rong-hua, LI Dong-liang, LIU Ge-lin, et al. Seismic damage and analysis of power transmissions towers[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 51—54. (In Chinese)
- [7] 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 (In Chinese)
- [8] LI H N, SHI W. Simplified models and experimental verification for coupled transmission tower-line system to seismic excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(3): 569—585.
- [9] 上海市建设和管理委员会. DGJ08—9—2003 建筑抗震设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Shanghai Construction and Management Committee. DGJ08—9—2003 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (In Chinese)