

1000kV 特高压同塔双回输电线路塔线耦联体系 地震模拟振动台试验研究

白杰, 谢强, 薛松涛

(同济大学土木工程学院, 上海市 杨浦区 200092)

Shaking Table Tests on 1 000 kV UHV AC Double Circuit Transmission Tower-conductor Coupling Systems

BAI Jie, XIE Qiang, XUE Songtao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Yangpu District, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: Taking 1 000 kV double circuit transmission lines of an ultra high voltage (UHV) transmission project as the prototype, a large shaking table test on scaled model was carried out to find out the dynamic interaction for transmission tower-line coupling system, in which, a change rule of dynamic characteristics for transmission tower with different forms as well as the effects on ultra high voltage transmission tower of nonlinear vibration in conductors and ground wires under earthquake were investigated. The features of energy distribution of transmission tower and ground wire were shown by means of power spectrum analysis. Some test results shows: the conductors have a great impact on the natural vibration properties of transmission tower; the nonlinear vibration in the conductors and ground wires play a roles as seismic reduction by dissipating some energy under earthquake; the variation of stress in ground wires is a kind of forced vibration which is excited by the vibration of tower head, its frequency is close to that of tower vibration and its peak is far away from that of the fundamental frequency, which is closely related with the excitation source.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); 1000 kV double circuit transmission tower; coupling system; shaking table test; scaled model; seismic response

摘要: 为研究地震荷载下输电塔-线体系动力相互作用, 以某特高压输变电工程的 1 000 kV 同塔双回输电线路为原型, 进行了三塔两线缩尺模型振动台试验。探究了不同形式下的输电塔动力特性的变化规律以及地震荷载作用下导、地线非线性振动对特高压输电塔的影响, 一定程度上获得了塔线体

系振动过程中输电塔与地线的能量分布规律。研究结果表明: 输电线对输电塔自振特性影响较大; 地震作用下导、地线的非线性振动能够耗散掉部分能量, 起到减震作用; 地线动应力变化属于一种以塔头振动为激励源的受迫振动, 其频谱峰值远离自身基频, 与激励密切相关, 较为接近塔体振动频率。

关键词: 特高压; 1000 kV 双回路输电塔; 耦联体系; 振动台试验; 缩尺模型; 地震反应

0 引言

作为生命线工程中的电力设施, 输电线路在自然灾害如地震、强风暴、冰灾等作用下的安全性非常重要^[1-2]。1971 年, 美国圣费尔南多地震造成旧金山地震区的 11 条输电线路严重破坏。1994 年, 美国 Northridge 地震, 造成一批高压输电塔因砂土液化而倾倒或损坏, 110 万用户失去供电^[3]。1995 年 1 月 17 日, 日本兵库县南部地震造成 38 条高压线路、446 条配电线路损坏^[4]。1999 年台湾发生的集集地震, 输电线路破坏严重^[5]。2008 年的汶川地震, 大量的输电塔遭到严重破坏, 导致相关线路失效。根据统计数据, 地震及余震先后造成电网系统 110kV 及以上变电站停运 90 座, 线路停运 181 条^[1]。

近年来, 国内外学者在输电塔线体系抗震研究方面做了许多工作, 文献[6]针对日本特高压输电试验线路进行了详细研究, 通过对未考虑抗震设计的输电塔线体系的地震时程分析, 认为其可以抵御峰值为 400Gal 的地震作用。文献[7]将输电塔简化为串连多质点等效梁模型, 并给出了高压输电塔架基于简化梁模型的抗震设计方法。文献[8]设计了一种阻尼器, 可降低导线在地震作用及风荷载下的反

基金项目: 教育部霍英东教育基金会优选资助课题(114021)。

Project Supported by Fok Ying Tung Education Foundation for Young Scientists (114021).

应, 并进行了试验研究。文献[9]将导线简化成多刚性连杆, 采用势能和动能原理建立塔线耦联体系的多自由度方程。文献[10-12]利用数值分析分析法研究了塔线体系在行波输入下纵向地震反应特性。文献[13]分析了 El-Centro 波作用下有、无减震控制措施的输电塔位移和加速度地震响应。文献[14]对大跨越输电塔线体系采用振型分解反应谱法和时程分析法进行三维地震响应研究。文献[15-16]在进行输电塔抗震问题研究时, 将输电塔简化多质点的串联模型, 将导线简化为悬链及垂链模型, 并进行了振动台试验验证。该简化方法可以较好的反应出结构的整体受力性能, 但无法得到各具体杆件的受力情况。

振动台试验是地震模拟和理论成果检验的有效手段, 其主要困难是输电塔-线结构体系的跨距较大, 而现有的地震模拟振动台的尺寸有限, 难以在振动台上实现^[17]。为了进一步研究输电塔在地震荷载作用下耦合导、地线后的动力反应, 本文以皖电东送淮南-上海输变电工程 1000kV 送电线路的中的直线钢管塔为原型, 设计制作了单塔与塔线体系的缩尺模型, 进行了八度地震作用下的单塔及塔线耦联体系振动台试验。通过对输电塔有、无导地线的地震反应分析, 研究了导、地线的耦合效应。

1 试验概况

1.1 塔线体系模型设计

进行缩尺模型设计时, 首先要考虑的是模型缩尺比例及制作材料的选取问题。同时考虑所选用的材料应具有尽可能低的弹性模量和尽可能大的比重, 在应力-应变关系方面也尽可能与原型材料相似。

试验原型塔全高 100.6 m, 呼高为 57 m。线路水平档距为 510m, 垂直档距为 720m。导线为双回单相八分裂的架设方式。本次试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行, 鉴于试验条件的限制, 此次振动台试验模型的几何相似比如下: 输电塔模型几何相似比为 1:15, 导、地线几何相似比为 1:170。试验加速度相似比为 3: 1。八分裂导线采用 LGJ—630/45 的型号, 选取公称直径 4 mm 的钢绞线模拟导线, 公称直径 1.2 mm 的钢绞线模拟地线。同时在钢绞线上外加直径为 5 mm 及 3 mm 的镀锌铁链分别作为导、地线配重。实际工程中绝缘子原型为 300 kN 合成绝缘子, 本次试验采用直径 30mm、长为 650mm 的镀锌钢管模拟绝缘子。结构

体系中, 绝缘子串的主要作用是连接导线与输电塔, 将导线的作用力传递到输电塔上, 因此, 试验中绝缘子串的模拟不考虑其刚度, 将绝缘子串看作刚性杆, 两端铰接。为了模拟边界条件, 试验中采用三塔两线模型。位于两端边界的塔根据原线路中的塔设计出其等代模型塔来模拟, 等代塔用角钢制作, 在设计时保证等代塔的前三阶频率和振型与原型塔基本一致。

具体塔线体系模型设计相似参数见表 1、2。

表 1 输电塔模型相似比

Tab. 1 Primary similarity parameters of the tower

相似系数名称	相似系数
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

表 2 导、地线相似比

Tab. 2 Primary similarity parameters of 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 3 钢管塔频率计算值与实测值比较

Tab. 3 Comparison of calculated and measured values for the frequency of transmission tower

振型	原型计算值/Hz	理论值/Hz	实测值/Hz
一阶 Y 向	1.18	7.94	7.62
一阶 X 向	1.20	8.09	7.77

表 4 导线原型、理论模型与实际模型参数

Tab. 4 Parameters of the prototype, theoretical model and practical model for the conductors

导线	档距/m	弧垂/m	一阶	二阶	三阶
			频率/Hz	频率/Hz	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

通过数值计算与白噪声扫频试验, 得出了塔体结构自振频率的计算值与实测值, 如表3所示。可以看出, 理论值与实测值误差较小, 且频率相似比与设计要(见表1)一致, 因此塔架结构设计符合试验要求。表4列出了钢管塔导线原型、理论模型及实际模型的理论参数比较, 实际模型的前三阶频率与理论模型期望值吻合较好, 验证了按该方法进行的输电线设计基本满足了振动台试验的动力特性要求。

输电塔试验模型及振动台测试现场如图1所示。

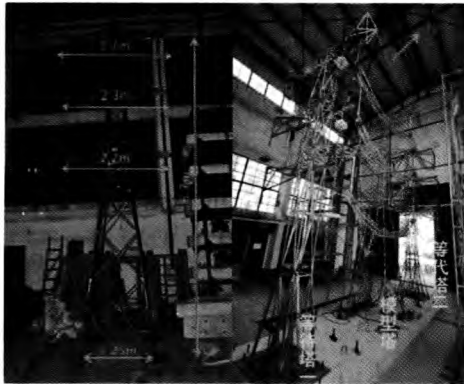
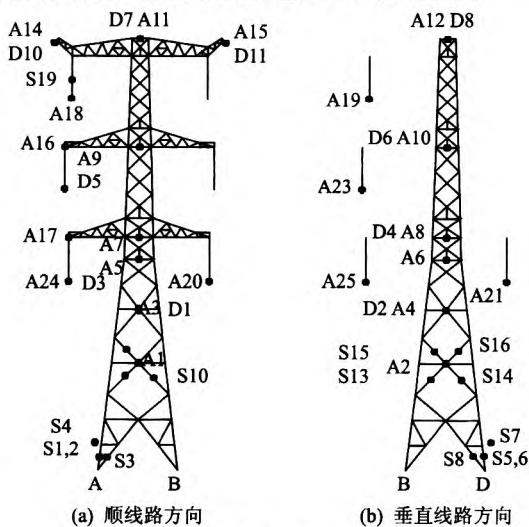


图1 单塔与塔线体系

Fig. 1 Single tower and coupling system

1.2 试验测点布置

试验共布置了27个加速度传感器、18个应变片和10个位移计, 总共使用了55个通道采集数据。加速度和位移传感器主要布置在输电塔的塔身及横担位置, 应变片主要分布在塔腿主材、斜材及塔身的斜材处。测点布置示意图如图2所示。



S表示应变; A表示加速度; D表示位移基底加速度计布置(A26、A27、A28)。

图2 输电塔模型测点布置示意图

Fig. 2 Sensor location in the test model

1.3 输入地震动

鉴于长距离输电线路所经区域较多, 各基塔所

处场地条件不同, 选用2类场地波 Taft波; 3类场地波 El-Centro波、Pasadena波; 4类场地波上海人工地震波 SHW 作为振动台台面输入, 以考察不同场地类型的地震波对塔线体系动力响应的影响。

地震动持续时间按相似关系压缩为原地震波的1/6.7, 并将加速度峰值分别调整到0.21, 0.6及1.2g分别用于模拟8度多遇、8度基本及8度罕遇地震。对于每种地震动, 先进行X向(顺线路方向)输入再进行Y向(垂直线路方向)输入。待到单向测试完成后, 再考虑双向地震动作用并同时输入X向及Y向地震波, 试验前后对模型进行白噪声扫频, 以测量结构的动力特征参数。

2 试验结果

2.1 动力特性

进行输电塔的动力特性研究, 以确定振型、频率等参数, 是进行地震作用下结构动力响应分析的基础。为了解该型输电塔的动力特性, 试验前后, 用双向白噪声对模型进行扫频试验。通过对各加速度测点传递函数进行分析, 得到单塔及单塔挂线后塔体结构的自振频率。如表5所示。

表5 输电塔模型主要振型及频率

Tab. 5 Main vibration modes and frequencies of the tower model

振型	单塔	单塔挂线	相对差值/%
垂直线路方向一阶	7.62	6.67	7.32
顺线路方向一阶	7.77	6.48	7.32

比较单塔与单塔挂线可知, 杆塔结构垂直线路方向一阶频率降低了约12.5%; 顺线路方向一阶频率降低了约16.6%。

输电线对杆塔结构的动力特性具有一定的影响。

2.2 塔线耦联体系地震反应

塔线耦联体系能够真正反映实际结构在地震作用下的受力特性。表6给出了8度罕遇下塔顶位移响应的最大值。表7给出了输电塔塔腿主材和塔身斜材应力响应的最大值。表8所示为地线应力响

表6 输电塔顶位移

Tab. 6 Displacement response on tower top mm

地震波	X向位移(X向输入)	Y向位移(Y向输入)
El-Centro波	33.5	25.6
Taft波	42.5	32.4
Pasadena波	28.9	19.5
SHW波	55.2	30.0

表 7 输电塔应力

Tab. 7 Stress response in tower model MPa			
地震波	X 向输入	Y 向输入	位置
El-Centro 波	67.1	34.8	塔腿主材
Taft 波	34.6	40.9	
Pasadena 波	47.2	41.2	
SHW 波	76.8	30.9	
El-Centro 波	25.9	17.6	塔身斜材
Taft 波	21.8	18.7	
Pasadena 波	19.3	14.3	
SHW 波	25.1	17.8	

表 8 地线应力

Tab. 8 Stress response in ground wire MPa			
地震波	X 向输入	Y 向输入	位置
El-Centro 波	48.1		地线
Taft 波	32.0	18.3	
Pasadena 波	35.7	19.0	
SHW 波	39.3	17.3	

应最大值。

由表 6 可知,当地震波沿 X 向输入时,EL-Centro 波、SHW 波作用下的塔顶位移相差约 39.3%。对应于 Y 向地震动输入,Taft 波与 Pasadena 波作用下的塔顶位移相差约 39.8%。表 7 表示了塔腿主材及塔身斜材的应力反应幅值,当地震波沿 X 向输入时,SHW 波与 Taft 波作用下塔腿主材应力相差约 55%,Y 向输入时,相差约 25%。相比于主材应力,不同地震波输入下塔身斜材应力值离散性较小。从表 8 可以看出,地线应力在 EL-Centro 波与 Pasadena 波沿 X 向输入时相差约 25.7%,在 Pasadena 波与 SHW 波沿 Y 向输入时相差约 9%。输入不同场地类型的地震动,结构的响应差异较大。

2.3 导、地线对输电塔动力反应影响

为了对比输电塔线体系以及输电塔单塔两种不同形式下塔体结构的动力响应,定义输电塔结构的反应比如式(1)所示:

$$S = \frac{\max |R(c)|}{\max |R(t)|} \quad (1)$$

式中 $R(c)$, $R(t)$ 分别为相同输入条件下塔线耦联体系的地震响应和单塔地震响应,这里的响应量可以是加速度、位移或杆件应力。

若比值小于 1,表示塔线体系的反应量小于单塔的反应,表明导、地线的存在降低了输电塔的反应;如果比值大于 1,则表明单塔悬挂导、地线后的反应大于单塔的反应,导、地线的存在增加了输电塔的反应。

图 3 所示为八度罕遇地震输入下,塔线体系与单塔塔顶的位移及加速度反应比。可以看出,地震波沿 X 向输入时,EL-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波对应的 X 向位移反应比依次为 0.87、0.98、1.0 及 0.96。当地震波沿 Y 向输入时,相应的 Y 向位移反应比依次为 0.91、0.90、1.09 及 0.83。通过以上数据可以看出,悬挂导、地线后,塔顶 X 向位移平均降低约了 2.3%,Y 向位移平均降低约了 9%。同样考虑导、地线影响后塔顶 X 向加速度平均降低约了 22.3%,Y 向加速度平均降低约了 44%。

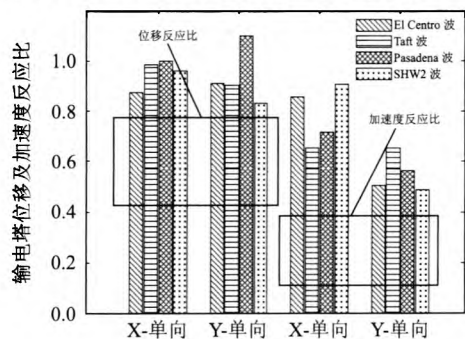


图 3 塔顶位移及加速度反应比

Fig. 3 Response ratio of displacement and acceleration on tower top on tower top

八度罕遇地震输入下塔腿主材应力反应比如图 4 所示。可知,应力反应比均明显小于 1.0。地震动沿 X 向单向输入时,塔线耦联形式与单塔形式相比,塔腿主材应力平均降低了 20%;Y 向单向输入时,平均降低了 24.5%。地震波双向输入时,与 EL-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波对应的测点 S1 处的应力反应比分别为 0.68、0.69、0.85。测点 S5 处的应力反应比分别为 0.64、0.65 及 0.78。相对于单塔,塔线耦联体系的塔腿主材应力降低了约 28.5%。由此可见,考虑了导、地线与塔体结构的耦联作用后的塔腿主材的应力峰值得到了显著地降低。

图 5 列出了所选 4 条地震动输入下的输电塔斜

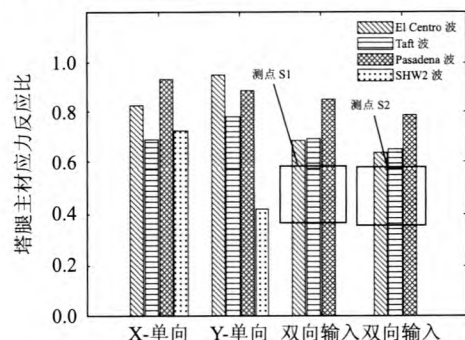


图 4 塔腿主材应力反应比

Fig. 4 Response ratio of stress in chord member at tower leg

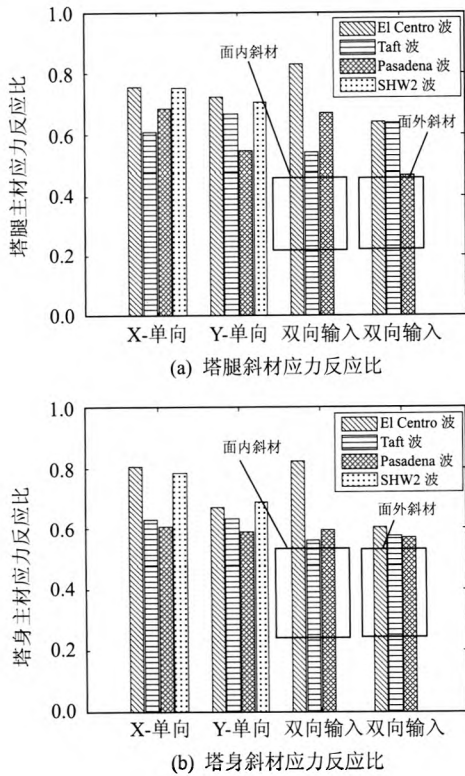


图5 输电塔斜材应力反应比

Fig. 5 Response ratio of stress in cross member

材应力反应比,在单向地震动输入条件下,挂线后的斜材应力平均降低约20%,双向输入下的斜材应力平均约降低了38%。

以上可以看出,塔线体系下的输电塔动力反应较单塔结果有较大幅度的降低,地震作用下导、地线的存在降低了输电塔的动力反应。

2.4 导、地线非线性振动效应

本文采用集中质量块等效导、地线质量,分别悬挂于相应的绝缘子及地线支架处,从而构成了单塔悬挂集中质量模型。通过对比单塔悬挂质量与塔线体系两种模型的地震反应,研究了导、地线非线性振动对杆塔结构的影响。

对比图6(a)(X向地震动输入下的折线图),可以发现,地震动输入从八度多遇(实际输入值0.18g)到八度基本(实际输入值0.7g)再到八度罕遇(实际输入值1.2g)的过程中,挂线时对应的加速度峰值分别为0.79g, 3.13g, 5.45g,挂集中质量所对应的峰值为0.90g, 3.19g, 6.33g。经计算发现,挂线时的峰值反应与挂集中质量相比约降低了9.1%。又如图6(b)所示,Y向输入时,两种形式下的塔顶加速度峰值差值分别为0.26g, 0.39g, 0.71g,随地震动输入幅值的增加,两组数据差值有逐渐增大的趋势。

图7为地震波双向输入下的折线图。X向为主振向输入时,挂线形式的反应峰值与挂集中质量相

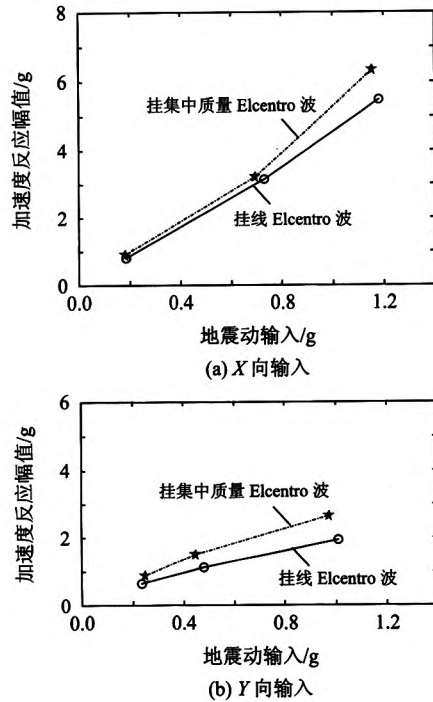


图6 El-Centro波单向输入挂线与挂集中质量加速度峰值

Fig. 6 Comparison of acceleration response between hanging conductor and hanging lumped mass under El-Centro wave(one-way input)

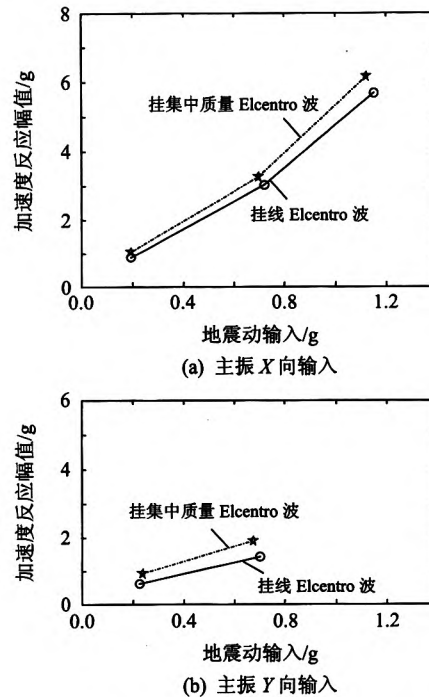


图7 El-Centro波双向输入下挂线与挂集中质量加速度峰值

Fig. 7 Comparison of acceleration response on tower top between hanging conductor and hanging lumped mass under El-Centro wave (two directions' input)

比约降低了10.2%。Y向主振向输入下,挂线形式的加速度峰值分别0.61g, 1.42g。其相应的挂集中质量时的峰值加速度为0.91g, 1.89g。两组数据的

差值分别为 0.3 g, 0.47 g。

由以分析可知, 挂线形式的折线位于挂集中质量之下, 其幅值差随着地震动输入幅值的增加而增大。由于挂线形式和挂集中质量的差别就在于是否考虑导线非线性振动效应。于是认为, 随着地震动输入幅值的增加, 导、地线非线性振动影响逐渐加强, 有效的以非线性振动形式吸收的体系中的能量。这说明, 与悬挂集中质量的刚体运动相比, 导、地线的非线性振动更多的分流地震荷载传入体系中的总能量, 将其转化为自身的动能, 从而更加有效的降低了输电塔的地震反应。

2.5 塔线体系地震响应频谱分析

塔线体系在不同地震动输入下的实测地震反应功率谱如图 8、9 所示。

由图 8 可知, 在不同的地震动输入下, 塔体能量主要分布于以塔体一阶频率为主峰值的低频区间 (3~10 Hz) 与以二阶频率为主峰值的高频区间 (15~25 Hz)。与单塔相比, 悬挂导、地线后, 塔体高频振动能量所占比例降低, 能量向低频区间转移。同时可以看出, 随着地震动输入峰值的增加, 高频能量所占比例有衰减趋势, 塔体反应主要表现为以一阶频率为主的振动。X 向高幅值地震输入时, 主体能量集中于塔体 X 向一阶频率处, 部分能量集中于塔体 X 向二阶频率处。地震动沿 Y 向输入时,

如图 8(c)、(d)所示, 悬挂导、地线后, 塔体高频振动能量几乎为零。塔体振动能量主要集中于 Y 向一阶频率周围。这说明, 导、地线的非线性振动主要降低了塔体结构高频振动能量在塔体总能量中的比例, 导、地线非线性振动越剧烈, 塔体高频能量所占比例就越小, 同时低频成分所占比例就越大。此时输电塔振动能量主要分布在基频周围。塔体的振动是以一阶振型为主的振动。

图 9 表示了不同地震动输入下的地线应力功率谱, 从中可以看出, 地线端部动应力能量主要分布于区间 3~8 Hz 之中, 其频谱峰值较为接近塔体振动频谱的主峰值, 而低于 1 Hz 的与地线基频相关的低频振动能量所占比例极小。这说明地线端部动应力的变化是一种以塔头振动为激励源的受迫振动, 其频率与激励频率密切相关。同时可以看出, 随着地震动输入幅值的增加, 能量频谱带宽增加显著。当地震动输入幅值较高时, 频谱带宽接近 10 Hz。以上可知, 地震激励下的塔线体系中地线端部动应力属于一种以塔头振动为激励源的受迫振动, 其频谱峰值远离自身固有频率, 能量谱峰值与塔体振动频率较为接近。

从对结构体系的分析中得到: 地震发生时, 塔基随地面运动诱发了塔体振动, 通过塔体的振动, 能量传递给绝缘子及导、地线, 从而引发了绝缘子

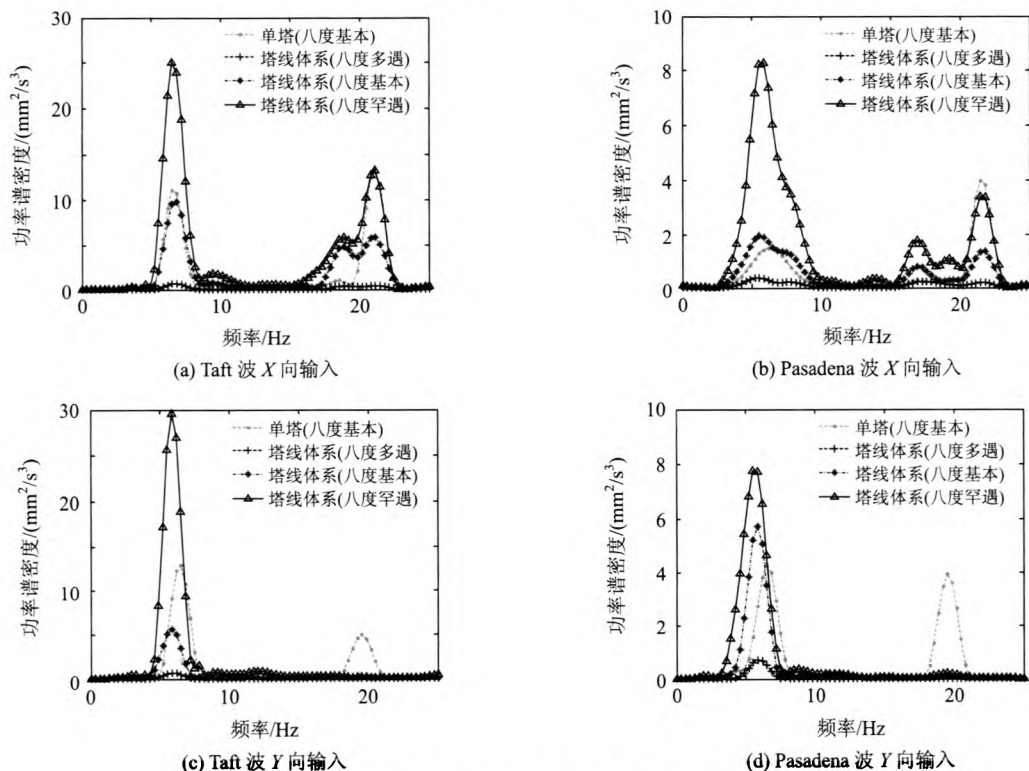


图 8 塔顶加速度功率谱

Fig. 8 Power spectrum of the acceleration on tower top

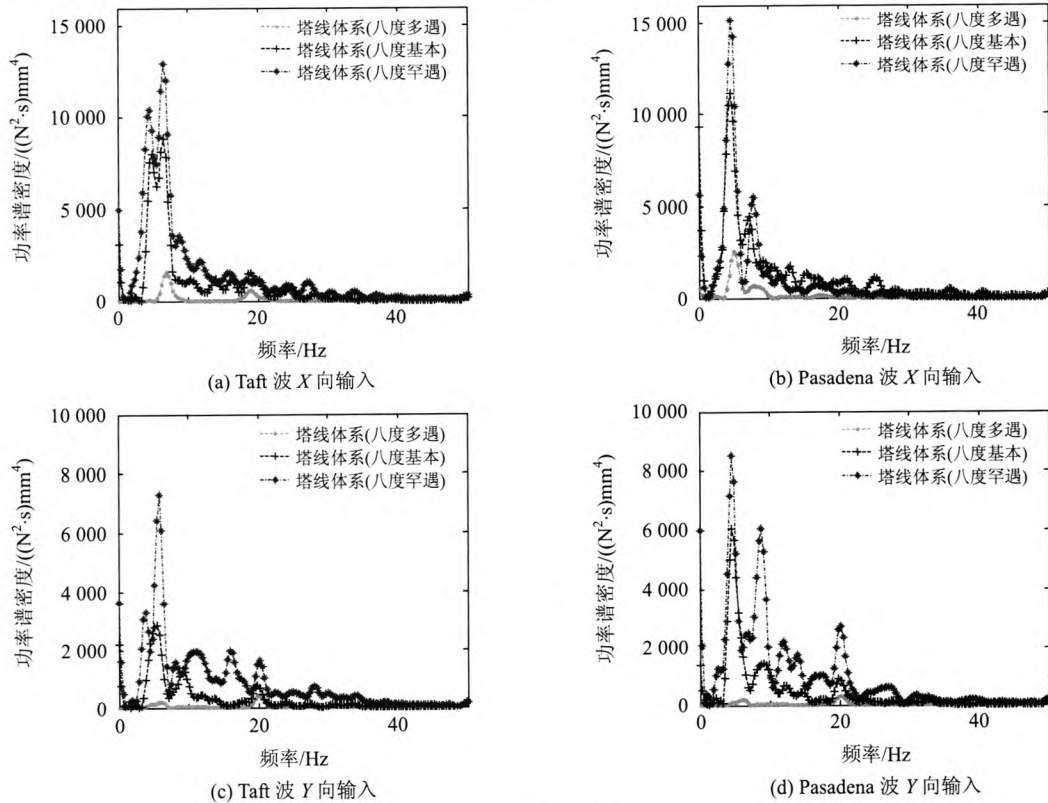


图9 地线应力功率谱

Fig. 9 Power spectrum of the stress in ground wire

及导、地线的振动。绝缘子一定的调频作用及导、地线的非线性振动致使塔体地震反应得到降低，塔体振动主要是以基频为主的振动，其振动与本身的动力特性密切相关。在振动过程中，邻近地线支架处的地线动应力的能量分布与本身动力特性相关不大，其大小及分布与塔体结构地线支架处的振动紧密联系，属于一种以塔头振动为激励源的受迫振动。因此，若塔体地震反应得到降低，相应的地线应力也就得到降低，进而地线支架的安全性也就得到了相应的提高。

3 结论

本文通过对塔线耦联体系及单塔的地震模拟振动台试验，研究了塔线耦联体系中输电塔的动力反应特点以及导、地线对输电塔地震反应的影响，主要得出以下结论：

1) 杆塔动力特性分析时，导、地线的存在对输电塔自振特性影响较大。受导、地线的影响，塔线体系中输电塔一阶弯曲频率降低了约14.5%。

2) 与单塔地震响应相比，塔线体系形式下的输电塔动力反应有较大幅度降低，且地震输入幅值越大，其降幅比例就越大，这主要源于导、地线非线性振动。说明了导、地线的非线性振动能够耗散掉部分输入体系的能量，起到耗能减震作用。

3) 通过对塔体结构及地线动应力的频谱分析可知：①导、地线非线性振动越剧烈，塔体高频能量所占比例就越小，低频成分所占比例就越大。输电塔振动能量主要分布在其基频周围，塔体振动是以一阶振型为主的振动。②地线动应力的能量主要分布于区间3~8 Hz之中，基频处振动能量所占比例极小。地线动应力是一种以塔头振动为激励源的受迫振动，其频谱峰值远离自身固有频率，与激励密切相关，频谱峰值与塔体振动频率较为接近。

参考文献

- [1] Xie Q, Zhu R. Earth, wind, and ice[J]. Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [2] 李宏男, 白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究的现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 39-46.
Li Hongnan, Bai Haifeng. State-of-the-art review on studies of disaster resistance of high-voltage transmission tower-line systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 39-46(in Chinese).
- [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.
Li Jie. Lifeline earthquake engineering-basic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [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 Qifeng. Damages to life-line systems caused by

- Hogoken Nanbu, Japan, earthquake and their recovery [J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 43-48(in Chinese).
- [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.
- Tai Wan Center for Research on Earthquake Engineering . Chichi earthquake disaster streamline reporting comprehensive survey[R]. NCREE-99-033, 1999(in Chinese) .
- [6] Maeno Y, Hanada K, Sakamoto Y, et al. Dynamic properties of UHV power transmission towers: full-scale tests and numerical investigation[C]//Proceedings of 8th World Conference Earthquake Engineering , San Francisco, America, 1984.
- [7] Suzuki T . Seismic response characteristics of transmissions towers[C]//In. 10 th WCEE, Balkema Rotterdam, 1992: 55-60.
- [8] 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, 8(5): 25-32.
- [9] 梁枢果, 朱继华, 王力争. 大跨越输电塔-线体系动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 63-69.
- Liang Shuguo, Zhu Jihua, Wang Lizheng. Analysis of dynamic characters of electrical transmission tower-line system with a big span[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 63-69(in Chinese).
- [10] 李泽. 大跨越输电塔线体系地震反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- Li Ze. Research on the seismic response analysis of long-span transmission system[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [11] 岳茂光, 李宏男, 王东升, 等. 行波激励下输电塔—导线体系纵向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 145-150.
- Yue Maoguang, Li Hongnan, Wang Dongsheng, et al. Longitudinal response of the power transmission tower-cable system under traveling seismic wave excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 145-150(in Chinese).
- [12] 田利, 李宏男, 黄连壮. 多点激励下输电塔—线体系的侧向地震反应分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 108-114.
- Tian Li, Li Hongnan, Huang Lianzhuang. Lateral response of transmission tower-line system under multiple support excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 108-114(in Chinese).
- [13] 曹枚根, 周福霖, 徐忠根, 等. 大跨越输电塔线体系减震控制分析研究[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 45-51.
- Cao Meigen, Zhou Fulin, Xu Zhonggen, et al. Research on seismic control of large crossing transmission towers for transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 45-51(in Chinese).
- [14] 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 Guohui, Sun Bingnan, He Yunxiang, et al. Seismic responses of long-span transmission tower-line system [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 212-217(in Chinese).
- [15] 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 Hongnan, Lu Ming, Wang Qianxin. 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).
- [16] 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.
- [17] 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: 38-40.
- Li Hongnan . Anti-seismic analysis and design of transmission tower[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 38-40(in Chinese).



白杰

收稿日期: 2012-08-19。

作者简介:

白杰(1980), 男, 博士研究生, 主要从事输电塔结构抗震研究, baishankui@126.com;

谢强(1971), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, IEEE693 标准委员会委员, IEEE1527 标准委员会委员, ASCE 学会 TCLEE 委员会委员, 主要从事电网基础设施防灾减灾研究, qxie@tongji.edu.cn;

薛松涛(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程防灾研究, xue@tongji.edu.cn。

(责任编辑 张媛媛)

Shaking Table Tests on 1 000 kV UHV AC Double Circuit Transmission Tower-conductor Coupling Systems

BAI Jie, XIE Qiang, XUE Songtao
(Tongji University)

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); 1000 kV double circuit transmission tower; coupling system; shaking table test; scaled model; seismic response

In order to study the seismic responses of UHV transmission tower structures and tower-conductor coupling systems, shaking table tests on the coupling system are needed. A scaled model design method for the UHV transmission tower-bundled conductors with strong geometrical nonlinearity is put forward in this paper. Based on the requirement for the design of steel tubular towers and 8-bundled conductors, a scaled tower model is designed following the elastic similitude relationship. Due to the dimensional limitation of the shaking table and in order to simulate the large cross-sectional 8-bundled conductors with long spans and strong geometrical nonlinearity, inertia mass similarity and dynamic property similarity are simultaneously used for the bundled conductors respectively. The material selection, the dynamic similarity relations, the boundary condition, and the detailed design of the UHV transmission tower-conductor coupling system for the shaking table model are well considered. The test models of the single tower and the tower-line coupling system are shown in Fig. 1.



Fig. 1 Single tower and coupling system

Through the shaking table test, the dynamic characteristics for the transmission tower with different

forms as well as the effects to ultra high voltage transmission towers resulted from nonlinear vibration of conductors and ground wires under different levels of input ground motions are investigated. The features of energy distribution of transmission towers and conductors are shown by means of power spectrum analysis. Mainly conclusions are drawn as follows:

1) In the analysis of dynamic characteristics for the tower structure, the stiffness and damping of conductors and ground wires have a greater impact on the tower vibration characteristics.

2) The dynamic response of the transmission tower in a coupling system has a more significant reduction compared with that of the single tower, particularly; the decrease is more significant with the increase of seismic input. This is mainly due to the nonlinear vibration in the transmission lines, which indicates that the nonlinear vibration of the conductor and the ground wire can dissipate part of the input energy in the coupling system during earthquake.

3) The change of dynamic stress in the ground wire is a kind of forced vibration which takes the vibration of the tower head as excitation source, especially, in the distribution of spectrum, which peaks away from their own natural frequency. This means that the ground wire's dynamic stress is closely related to the excitation, and the peak of energy spectrum is relatively close to that of the transmission tower.

4) The similarity method applied in the coupling system will help to provide a reference to the scaled shaking table test for the structures with strong geometric nonlinearity.