

1 000 kV 角钢塔地震模拟振动台试验研究

谢强¹, 白杰¹, 薛松涛¹, 秦庆芝²

- (1. 同济大学 土木工程学院, 上海市 杨浦区 200092;
2. 华北电力设计院工程有限公司, 北京市 西城区 100120)

Shaking Table Test on 1 000 kV Angle Steel Transmission Tower

XIE Qiang¹, BAI Jie¹, XUE Songtao¹, QIN Qingzhi²

- (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Yangpu District, Shanghai 200092, China;
2. North China Power Engineering Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100120, China)

ABSTRACT: To analyze seismic response characteristics of 1 000 kV angle steel transmission tower and the impact of the qualities of conductors and ground wire on dynamic response of tower structure, shaking table tests were carried out. Under four types of input ground motions the seismic response testing for single-tower with and without lumped mass that equals to the sum of all mass of conductors and ground wires under seismic intensity 8 were performed and compared. Experimental results show that the first natural vibration frequencies of the tower with lumped mass was reduced by 2% in the direction along the transmission line and by 17% in the direction transverse the transmission line than those of the tower without lumped mass in the two directions. For the tower structure using V-shaped suspension mode of insulators the impact of both connection mode of insulators and conductor mass should be considered in the calculation of the dynamic property of the tower in the direction transverse transmission line. Due to the longer cross arm of 1 000 kV transmission tower and the smaller height-width ratio of the cross arm, there is evident space coupling in the seismic response, so under the action of earthquake the torsion vibration mode would contribute a lot to the dynamic responses. In general, the mass of conductors is favorable to anti-earthquake of transmission tower, and during dynamic analysis on the tower-conductor system it is more reasonable to consider the impact of the mass of conductors in the evaluation of internal force of structural members.

KEY WORDS: 1 000 kV transmission line; angle steel tower; shaking table test; dynamic property; seismic response

摘要: 为分析地震作用下 1 000 kV 特高压角钢输电塔动力

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)。

Project Supported by Fok Ying Tung Education Foundation for Young Scientists (114021); and Science & Technology Program of SGCC (2008-508).

反应特点以及导、地线质量对该塔架结构动力反应的影响,开展地震模拟振动台试验。选取 4 种不同类型的地震动输入,针对单塔及单塔悬挂集中质量进行 8 度烈度水准下的动力反应测试。试验结果表明:该型输电塔悬挂集中质量块后顺线路方向自振频率降低了 2%,横线路方向自振频率降低了 17%。对于绝缘子采用 V 型悬挂方式的杆塔结构,在计算塔动力特性时,垂直线路方向需考虑绝缘子连接方式及导线质量的影响。因该型输电塔结构横担较长,高宽比较小,地震反应有显著空间耦合性,地震作用下结构的扭转反应较易激起。总体而言,导线质量对输电塔抗震是有利的,塔线体系动力分析时考虑导线质量的影响将会更加真实地估计结构杆件内力。

关键词: 1 000 kV 输电线路;角钢塔;振动台试验;动力特性;地震反应

0 引言

随着我国经济的发展,特高压输电工程在我国进入大量建设时期^[1]。面对近年来频发的自然灾害,大量的输电线路防灾研究已经开展并取得丰富的成果^[2-3]。关于特高压输电塔抗风研究方面,文献[4]以 1 000 kV 特高压输电线路为对象,进行单塔和塔-线体系在均匀流场、紊流场中包括覆冰工况在内的多种工况的风洞试验研究。在输电塔抗震研究方面,Maeno 等针对日本特高压输电试验线路进行详细研究,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 400 gal 的地震作用^[5]。Suzuki 将塔-线耦联体系中的导线简化为弹簧并与相邻塔架互相结合(导线质量集中于塔顶横担相应位置),将输电塔简化为串连多质点等效梁模型。并提出了高压输电塔架基于这种简化模型的抗震设计方法^[6]。Ghobarah 等基于输电塔线体系空间计算模型,考虑导线初始轴力和大变形的影

响,采用基于行波效应的多点输入,分析输电塔-线体系的顺线向反应^[7]。岳茂光等利用非线性时程分析法研究了塔-线体系在行波输入下纵向地震反应特性,并与一致地震动输入下的反应情况进行比较^[8]。曹枚根等利用有限元分析软件 ANSYS,对比分析了在三向 El-Centro 地震波作用下、无减震控制措施的输电塔位移和加速度地震响应^[9]。田利等研究了塔-线体系在多点激励下的侧向反应特性,并与一致激励、仅考虑行波效应激励、仅考虑相干效应激励下的反应情况进行比较^[10]。沈国辉等对大跨越输电塔-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^[11]。李泽对江阴大跨越输电塔体系计算分析时考虑了行波效应对体系地震反应的影响^[12]。由以上研究可知,对输电塔的抗震研究主要集中在简化模型的建立与数值仿真计算方面。其试验研究较为匮乏,缺少试验数据的支撑与论证。我国学者李宏男、王前信等建立了输电塔导线体系侧向和纵向地震反应分析模型,并进行了振动台试验论证。试验分别采用钢链模拟导线,钢棒(直径 10 mm)模拟输电塔,铁块模拟配重。3 根钢棒之间通过 2 层钢链连接,构成了输电塔-线耦联体系模型^[13-14]。该模型可以较好地反映结构的整体受力性能,但未能体现结构各杆件的具体受力情况。

本次试验制作了几何相似比为 1:8 输电塔缩尺模型,选取规格为 L25×3、L25×2、L20×1.5、L15×1.2 及 L10×1 共 5 种角钢模拟原型塔体结构相应的主材、斜材及辅助材。针对单塔及单塔悬挂集中质量块(以集中质量块等效导、地线质量分别悬挂于输电塔模型绝缘子及地线支架上)2 种形式实施了相同加载制度下的地震动输入。研究了地震作用下导、地线质量对输电塔动力反应的影响。

1 输电塔模型设计和试验工况及测点布置

1.1 输电塔模型设计

晋东南—南阳—荆门 1000 kV 输电线路工程是我国第 1 条交流特高压试验示范线路工程。本文的振动台试验输电塔原型即此输电线路工程中所采用的直线自立式酒杯型角钢塔。该型塔塔高为 64.64 m,呼高 57 m,横担长度 12.85 m,高宽比 1.27,线路的水平档距为 460 m。导线为单回路共三相,边相导线采用悬垂串,中相导线采用 V 型串悬挂方式。

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^[15]:首先在满足实验室限高的条件

下,将几何相似比 S_L 确定为 1/8;其次,由于模型制作材料与原型材料相同,将弹性模量相似比 S_E 确定为 1;最后将加速度相似比 S_a 确定为 2.5。确定这 3 个可控相似比以后,即可在其基础上将其他相似关系求得。角钢塔模型主要相似比见表 1^[16]。

表 1 模型相似系数^[16]

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

原型输电线路中,导线为单回路三相,按 1:8 几何相似比缩尺后的单相导线总质量为 38 kg,单根地线质量为 4.6 kg。试验前选取实验室现有的砝码组合为与导、地线质量相同的集中质量块(其中 3 个用于模拟导线质量,2 个用于模拟地线质量),分别悬挂于相应的绝缘子及地线支架上。如图 1 所示。

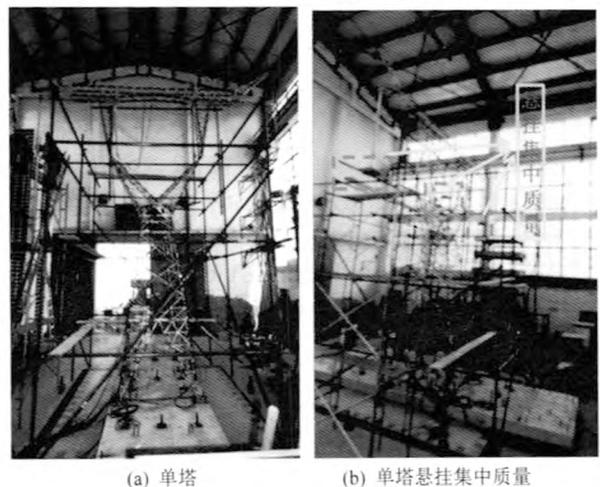


图 1 测试模型

Fig. 1 The test model

1.2 试验工况及测点布置

本文将顺线路方向定义为 X 向,垂直线路方向定义为 Y 向。如图 2 所示。



图 2 输电线路方向

Fig. 2 Direction of transmission line

考虑到输电线路跨越不同的场地,试验时选取 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,加速度时程及功率谱如图 3 所示。

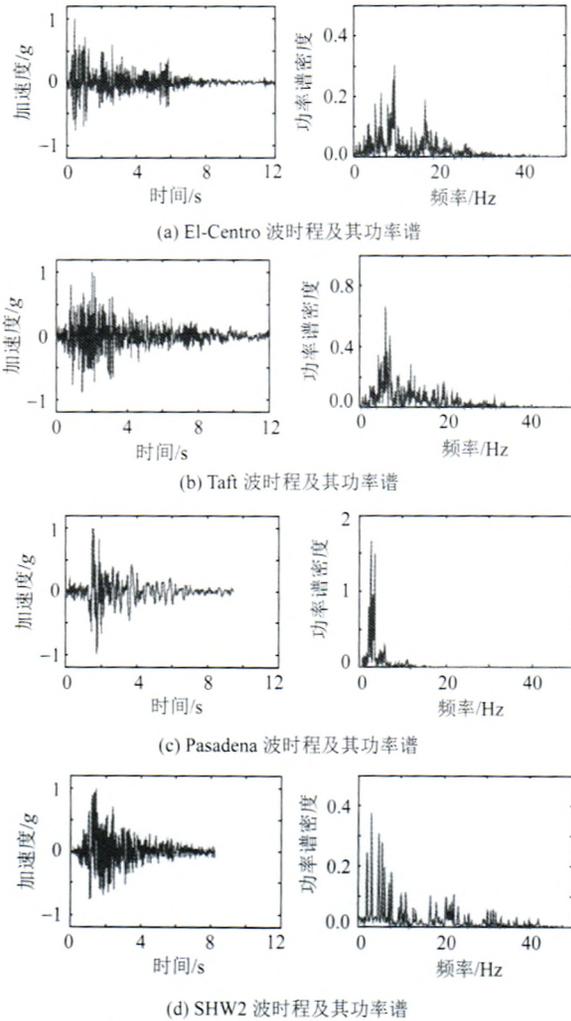
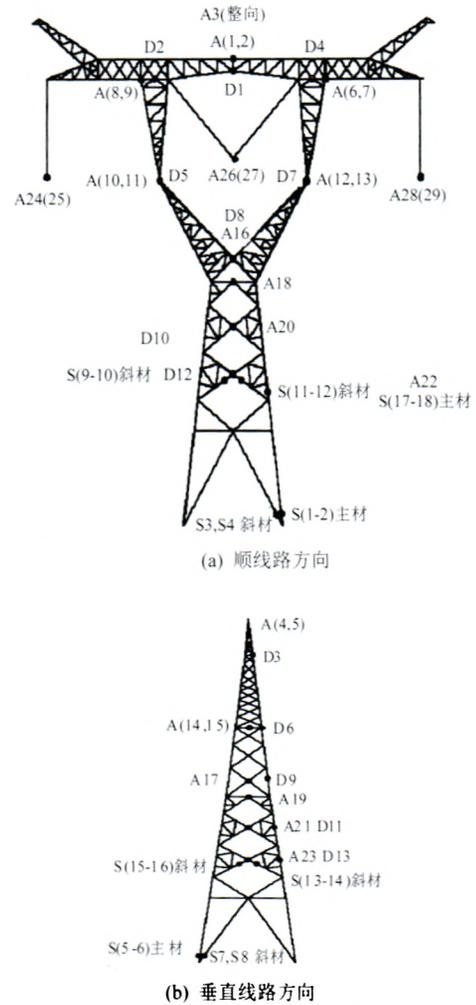


图3 地震激励加速度时程及功率谱
Fig. 3 Acceleration time histories and power spectrum of selected waves

在这 4 条地震波中, 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。

台面输入加速度峰值按上海市的《建筑抗震设计规程》^[17]和试验的动力相似关系确定, 将这 4 种地震波各自在时间轴上进行压缩并将加速度峰值进行调整得到实际地震动输入时程。对于每种地震动, 先进行 X 向输入再进行 Y 向输入。待单向测试完成后, 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, 如图 4 所示(A(n_1, n_2))表示加速度传感器在同一测点按双份布置; $An_1(n_2)$ 表示同一测点布置 2 个不同方向的加速度传感器^[16]。应变片布置主要分为 3 处, 即塔身中部斜材、塔腿主材及塔腿斜材处。加速度和位移传感器除在塔顶、混凝土刚性底座布置以外, 沿塔身高度 2 个方向即顺线路方向和垂直线



D—位移计; A—加速度计; S—应变片; 基底加速度计布置(A30,A31,A32)。

图4 输电塔模型测点布置示意图^[16]
Fig. 4 Sensor location in the test model^[16]

路方向大致均匀布置。

2 试验结果

2.1 动力特性

我国电力设施抗震设计规范^[18]认为在计算杆塔动力特性时可不计入导、地线重量, 只需将其作为外荷载施加于塔上进行计算。为了解该型塔动力特性, 试验前后用双向白噪声对模型塔进行扫频试验。通过对各加速度测点传递函数分析, 得到了单塔及单塔悬挂集中质量后的自振频率。模型单塔 Y 向一阶频率为 5.12 Hz, X 向一阶频率为 5.45 Hz。悬挂集中质量块后模型单塔 Y 向一阶频率为 4.25 Hz, X 向一阶频率为 5.34 Hz, 即 Y 向一阶频率降低了 17%, X 向一阶频率降低了 2%。可见, 悬挂集中质量对输电塔垂直线路方向的影响大于顺线路方向, 如图 5、6 所示。本文认为 Y 向频率改变较大的原因在于中相导线 V 型绝缘子串的悬挂方式所致。

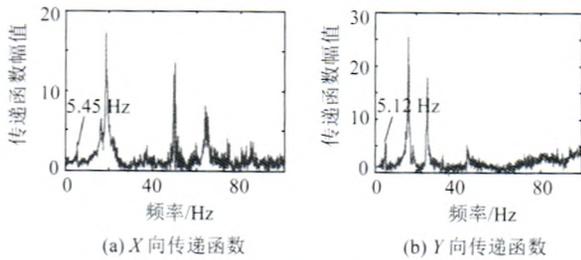


图 5 单塔传递函数

Fig. 5 Transfer function for single tower

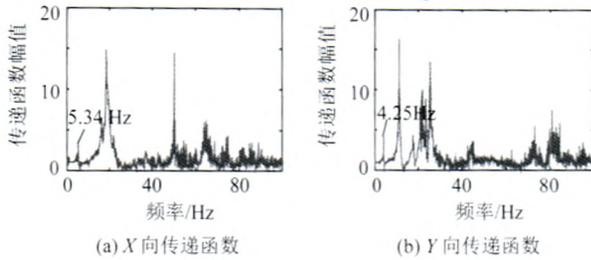


图 6 单塔悬挂集中质量传递函数

Fig. 6 Transfer function for single tower with lumped mass

与单塔相比,受悬挂方式及悬挂集中质量的影响,输电塔 Y 向弯曲频率有明显降低,但 X 向弯曲频率与单塔较为接近。初步设计阶段估计该型塔动力特性时,顺线路方向可不考虑导线质量影响,而垂直线路方向应予以关注。

2.2 结构反应分析

2.2.1 单塔动力反应分析

本文将地震反应与地震动输入同向时定义为面内反应,地震反应与地震动输入呈垂直向定义为面外反应。

为了解单塔模型的地震反应特点,本文首先分析单塔的动力反应。

1) 位移反应分析。

8 度罕遇地震作用下,单塔结构的位移峰值如表 2、3 所示。

表 2 地震波 X 向输电塔顶位移峰值反应
Tab. 2 Displacement response of single tower for waves input along X-direction

地震波	面内位移/mm	面外位移/mm	比值/%
El-Centro 波	49.2	10.5	20.0
Taft 波	33.8	4.8	14.0
Pasadena 波	40.8	4.5	11.0
SHW 波	61.6	7.7	12.5

表 3 地震波 Y 向输电塔顶位移峰值反应
Tab. 3 Displacement response of single tower for waves input along Y-direction

地震波	面内位移/mm	面外位移/mm	比值/%
El-Centro 波	29.4	2.00	6
Taft 波	35.1	5.23	14
Pasadena 波	23.7	1.81	7
SHW 波	48.2	2.35	5

由上表可知,输电塔位移反应受所选地震动影响很大,激励方向与反应方向一致时,塔顶位移较为显著,尤其 X 向 SHW2 波输入时,塔顶位移幅值可达到 61.6 mm,为 Taft 波输入时的 1.8 倍。当激励方向与反应方向相垂直时面外反应相对较小,通常位于 10 mm 以内。由于塔体结构横担较长,地震单向输入时所激起的面外反应较大,位移反应有一定的空间耦合性。当地震波沿 X 向输入时,面外反应约为面内反应的 14%,当地震波沿 Y 向输入时,面外反应约为面内反应的 8%。这是因为塔体质量分布沿 X 向分布较为集中,扭转反应相对较难激起。

2) 应力反应分析。

表 4 表示了塔腿主材应力。可知看出,由于输入地震波的不同,导致了主材应力反应差别较大,El-Centro 波单向输入时塔腿主材应力为 Taft 波输入时的 1.3 倍。同样可以看出,与单向地震动输入相比,双向输入时应力平均增幅为 24%。可见,与单向地震动输入相比,双向输入更为不利。表 5 表示了输电塔斜材应力反应峰值,相比面内斜材应力,面外斜材应力反应非常显著。这主要是因为该型输电塔结构横担较长,高宽比较小,仅为 1.27。塔体结构质量分布较为不均。地震作用下结构的扭转反应较易激起,输电塔塔腿斜材、塔身斜材及横隔面水平斜材等主要承受抗扭及抗侧作用的杆件的地震反应较大。

表 4 输电塔主材应力

Tab. 4 Stress response in chord member of single tower

地震波	单向输入/MPa	双向输入/MPa	增量/%
El-Centro 波	78.2	73.8	-5
Taft 波	58.0	82.0	41
Pasadena 波	62.6	86.0	37
SHW 波	77.6	—	—

表 5 输电塔斜材应力

Tab. 5 Stress response in cross member of single tower

地震波	面内斜材/MPa	面外斜材/MPa	位置
El-Centro 波	36.4	30.5	塔腿处
Taft 波	36.4	25.9	
Pasadena 波	34.8	31.9	
SHW 波	40.9	31.8	塔身处
El-Centro 波	40.8	69.4	
Taft 波	32.6	44.6	
Pasadena 波	21.5	32.3	
SHW 波	33.1	47.1	

2.2.2 悬挂集中质量对模型塔动力反应影响分析

本文中地震作用下悬挂集中质量对输电塔动力反应的影响主要包括塔顶位移及杆件轴向应力。

1) 塔顶位移。

输电塔位移反应比定义为相同地震输入下单

塔悬挂集中质量的位移反应与相应的单塔位移反应的比值。若比值小于 1, 则表明单塔悬挂集中质量(即考虑导、地线质量影响)后的位移反应小于单塔的地震反应。悬挂集中质量降低了输电塔单塔的反应; 如果比值大于 1, 则表明单塔悬挂集中质量后的位移反应大于单塔的地震反应。悬挂集中质量增加了输电塔单塔的位移反应^[16]。

8 度罕遇烈度时单向及双向地震动输入下的位移反应比如图 7 所示。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 1.02、1.04、1.0 及 0.99, Y 向位移反应比依次为 1.02、0.85、0.99 及 0.85。当地震波双向输入时, X 向为主振向的位移反应比为 1.02、0.99、0.99。相应的 Y 向为主振向的位移反应比为 1.15、0.87 及 1.05, 通过以上数据可以看出, 悬挂集中质量块前后, 输电塔塔顶位移反应差别很小, 悬挂集中质量块对地震作用下的塔顶位移反应影响较小。

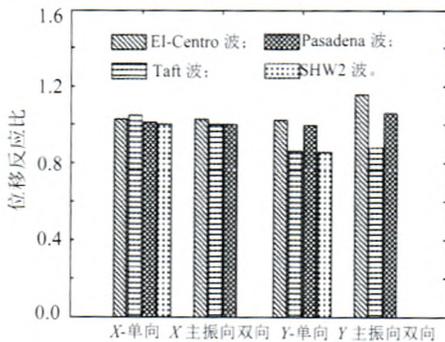


图 7 塔顶位移反应比

Fig. 7 Response ratio of displacement on tower top

2) 杆件轴向应力分析。

应力分析主要集中于塔腿主材、塔身主材、塔腿斜材及塔身斜材处, 定义应力反应比为相同地震输入下单塔悬挂集中质量的应力反应与相应的单塔应力反应的比值。8 度罕遇烈度时塔腿主材及塔身主材应力反应比如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 当 El-Centro 波、Taft 波、

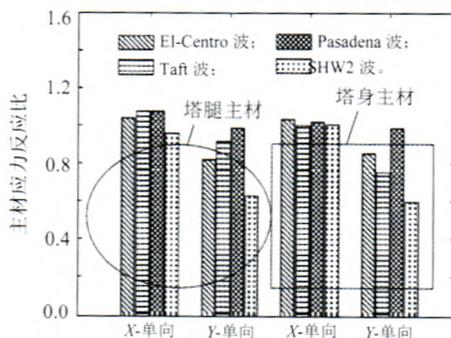
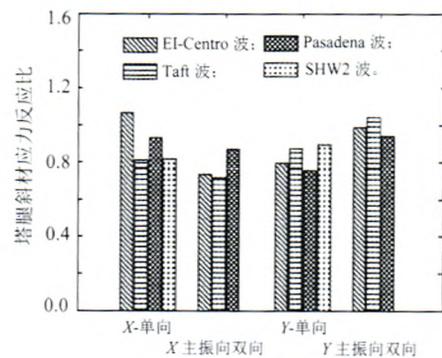


图 8 主材应力反应比

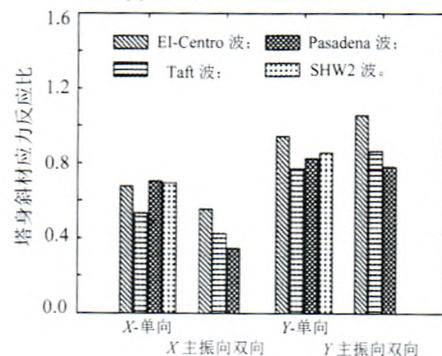
Fig. 8 Response ratio of stress in chord member

Pasadena 波及 SHW 波沿 X 向输入时, 塔腿主材应力反应比与 1.0 比较接近, 相应的应力反应比分别为 1.03、1.07、1.07 及 0.95。此时塔腿主材应力反应受悬挂集中质量影响较小。当地震波沿 Y 向输入时, 应力反应比分别为 0.81、0.91、0.98 及 0.62, 塔腿主材应力峰值平均降低了 17%。同样可知, X 向输入时塔身主材应力比同样集中于 1.0 附近, 最大值为 1.03。 Y 向输入时的应力比分别为 0.84、0.75 及 0.98 及 0.59。与单塔工况时的塔身主材应力相比, 悬挂集中质量块后的塔身主材应力约降低了 21%。由此可见, 在 X 向地震动激励下, 主材应力峰值差别很小, 几乎不受悬挂集中质量的影响。但在 Y 向地震动激励下悬挂集中质量显著降低了输电塔主材的应力峰值。本文认为, 输电塔在地震作用下主材承受了较大的轴向压力, 地震动顺线路方向输入时, 由于瓶口处的刚度突变导致塔头有明显的弯曲, 中相 V 型绝缘子的悬挂方式导致了塔体顺线路方向存在更为明显的 P- Δ 效应, 增加了主材的轴向应力。导致了塔体顺线路方向主材应力反应差别较小。

图 9(a) 列出所选 4 条地震动输入下的塔腿斜材的应力反应比, 当 4 条地震动沿 X 向单向输入时, 塔腿斜材应力反应分别为 1.06、0.8、0.9 及 0.81。当 X 主振向双向输入时, 反应比相对较小, 分别为



(a) 塔腿斜材应力反应比



(b) 塔身斜材应力反应比

图 9 斜材应力反应比
Fig. 9 Response ratio of stress in cross member

0.73、0.71、及 0.87。计算后发现，在 X 向单向输入时，与单塔试验相比，悬挂集中质量块后的塔腿斜材应力平均降低了 11%， X 向主振向输入时平均降低了约 23%。当地震波沿 Y 向单向输入时，塔腿斜材应力平均降低了 17.5%。而当 Y 向主振向双向输入时应力反应比较接近 1.0，受悬挂集中质量块的影响较小。

塔身斜材应力反应比如图 9(b)所示，当地震波沿 X 向单向输入时，与单塔地震反应相比，应力平均约降低了 35%，双向输入时，应力平均下降了 55%。与 X 向输入相比， Y 向输入时塔身斜材应力反应比较大。除 El-Centro 波沿 Y 向双向输入时为 1.05 外，其余均介于 0.75~0.95 之间。平均而言，当地震波沿 Y 向单向输入时，应力约降低了 16%，双向输入时，应力约降低了 10%。可见，悬挂集中质量块后，塔身斜材应力得到了较好的控制。同时可以看到，斜材应力降低幅度与地震动输入方向有较大联系， X 向输入时，斜材应力降低较 Y 向输入时更加显著，这主要是因为斜材为主要的抗侧和抗扭构件，该型输电塔中相绝缘子采用 V 型悬挂方式，限制了集中质量摆的 Y 向位移，导致了塔体控制效果的差异。

2.2.3 结构反应频谱分析

不同地震动幅值输入下的输电塔悬挂集中质量的实测地震反应功率谱如图 10 所示。

可以看出，塔体振动主要集中在二阶基频左右，与单塔 8 度罕遇相比，挂线后 8 度罕遇工况下的塔体振动能量有较大幅度的衰减，这从能量角度证明了悬挂集中质量后塔体地震反应得到了良好的抑制，体现了绝缘子及导线质量的调谐减震作用。 X 向地震输入时，功率谱主峰较为突出，集中在 5.2 Hz 左右，单塔与单塔悬挂集中质量能量分布一致，悬挂集中质量并未明显改变输电塔顺线路方向一阶频率附近的谱分布。同时，由图 10(a)及图 10(c)可知，有峰值出现在 17~20 Hz 之间。这主要体现了塔体按 X 向二阶振型振动的能量，但其幅值较小。 Y 向地震动输入时，单塔功率谱在 5.09 Hz 处有一个突出的峰值，悬挂集中质量后，能量向低频转移，峰值降低到 4.13 Hz，这主要与 V 型绝缘子的悬挂方式有关，这说明输电塔 V 型绝缘子的悬挂方式及导线质量不仅影响了该型塔的 Y 向的自振频率，而且改变了振动的能量分布。

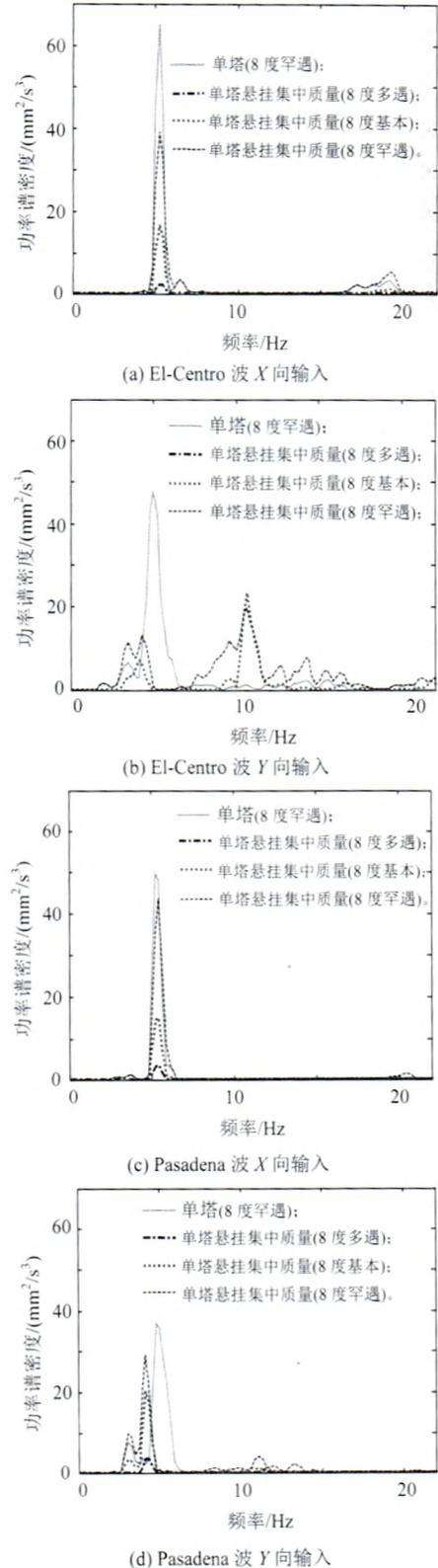


图 10 塔顶加速度功率谱

Fig. 10 Power spectrum of acceleration on tower top

3 结论

本文通过对单塔及单塔悬挂集中质量块的地震模拟振动台试验，研究了单塔的动力反应特点及悬挂集中质量对单塔动力反应的影响，主要得出以下结论：

1) 对于采用中相 V 型绝缘子悬挂方式的酒杯型角钢塔, 初步设计阶段对杆塔动力特性进行评估时, 顺线路方向可以不考虑导、地线质量影响, 垂直线路方向则需考虑绝缘子连接方式及导、地线质量的影响。

2) 单塔结构地震反应时, 因该型输电塔结构横担较长, 高宽比较小(仅为 1.27)。塔体结构质量分布较为不均, 有显著空间耦合性。地震作用下结构的扭转反应较易激起, 输电塔塔腿斜材、塔身斜材及横隔面水平斜材等主要承受抗侧、抗扭作用的杆件的地震反应较为显著。

3) 整体而言, 悬挂集中质量块降低了输电塔的地震反应, 这说明地震作用下, 悬挂集中质量的惯性作用及其摆动会消耗部分地震动能量, 起到了一定的减震作用, 导、地线质量对输电塔抗震是有利的, 在进行输电塔线体系动力反应分析时, 应计入导、地线质量的影响。若仅按单塔进行计算, 则有可能过高地估计杆件内力。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 25-35.
- [2] 谢强, 朱瑞元, 周勇, 等. 220 kV 隔离开关地震模拟振动台试验[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 262-267.
Xie Qiang, Zhu Ruiyuan, Zhou Yong, et al. Shake table test on 220kV disconnecting switch[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 262-267(in Chinese).
- [3] 谢强, 管政, 严承涌. 1 000 kV 输电塔横风向振动风洞试验研究[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 21-26.
Xie Qiang, Guan Zheng, Yan Chengyong. Wind tunnel test on across-wind vibration of 1 000 kV UHV transmission tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 21-26(in Chinese).
- [4] 谢强, 严承涌. 1 000 kV 特高压交流同塔双回输电塔线耦联体系风洞试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 900-906.
Xie Qiang, Yan Chengyong. Wind tunnel test on 1000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling system [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 900-906(in Chinese).
- [5] Maeno Y, Hanada K, Sakamoto Y. Dynamic properties of UHV power transmission towers: full-scale tests and numerical investigation[C]//8th WCEE. San Francisco, USA: [s.n.], 1984: 12-34.
- [6] Suzuki T. Seismic response characteristics of transmissions towers [C]//10th WCEE. Balkema Rotterdam: [s.n.], 1992: 55-60.
- [7] Ghobarah A, Aziz T S, El-Attar M. Response of transmission lines to multiple support excitations[J]. Engineering Structures, 1996, 18(12): 936-946.
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 田利, 李宏男, 黄连社. 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).
- [11] 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).
- [12] 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.
- [13] 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 voltage system consisting of long span transmission lines and their supporting towers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(2): 81-89(in Chinese).
- [14] 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.
- [15] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 6-16.
- [16] 谢强, 白杰, 薛松涛. 特高压交流同塔双回输电塔地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1410-1419.
Xie Qiang, Bai Jie, Xue Songtao. Shake table test on UHV AC double circuit transmission tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1410-1419(in Chinese).
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国国家标准. GB50260—1996 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1996.



谢强

收稿日期: 2012-07-05.

作者简介:

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

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

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, E-mail: xue@tongji.edu.cn;

秦庆芝(1954), 女, 教授级高级工程师, 主要从事输电线路杆塔结构设计咨询研究, E-mail: qinqz@ncpe.com.cn.

(责任编辑 马晓华)