

特高压交流同塔双回输电塔地震模拟振动台试验

谢强^{1,2}, 白杰¹, 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: 为了分析地震作用下导、地线质量对特高压输电塔动力特性及其地震反应的影响, 进行了特高压输电塔模型的地震模拟振动台试验。以某特高压输变电工程为背景, 依据振动台试验相似理论, 严格模拟了 1 000 kV 特高压交流同塔双回输电塔, 进行了不锈钢塔架模型的设计与制作。同时, 针对地线及 8 分裂导线进行了相应的简化, 制作了 8 个等效集中质量块悬挂在绝缘子下端用以模拟导地线质量。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了 8 度罕遇烈度下的动力响应测试。试验发现, 输电塔地震反应受所选地震激励类型影响较大; 悬挂集中质量块后该型输电塔顺线路方向自振频率降低了 5.7%, 横线路方向自振频率降低了 3.9%; 单塔悬挂集中质量块后地震反应有所降低。导、地线质量的存在降低了输电塔的地震响应。

关键词: 特高压交流输电塔; 振动台试验; 地震反应; 集中质量; 自振频率; 相似理论; 相似比

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.06.019

文章编号: 1003-6520(2012)06-1410-10

Shake Table Test on UHV AC Double Circuit Transmission Tower

XIE Qiang^{1,2}, BAI Jie¹, XUE Songtao¹

(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 analyze the dynamic influence of the mass of conductor and ground wire on the transmission tower structure under earthquake, we experimentally investigated 1 000 kV UHV AC double circuit transmission tower in the presence and absence of conductor mass by shake table test. Taking an ultra high voltage transmission project as the prototype, we designed and fabricated a stainless steel tower model by the similarity theory for the scaled model of shake table test. The bundled conductors and ground wires was considered and simplified as eight lumped mass. Seismic responses of the tower model under seismic intensity of 8 were tested under four types of input ground motions. Experimental results show that the input ground motion has a remarkable influence on the seismic responses of transmission towers. The first natural frequency of the tower with lumped mass reduces by 5.7% and 3.9% over those of pure tower in the along-line direction and cross-line direction, respectively. The existence of the lumped mass effectively reduces the seismic response of transmission tower.

Key words: UHV AC transmission tower; shake table test; seismic responses; lumped mass; natural frequency; similarity theory; scale ratio

0 引言

地震工程界在研究电力系统的抗震问题时, 普遍假定电力系统在遭遇地震时, 输电线路将保持正常工作状态, 不会发生无法供电的情况, 电力系统的破坏主要集中于变电站, 尤其是高压变电站^[1]。现行有关输电线路的规程、规范^[2-4]也都认为, 仅当位于基本地震烈度为 7 度及以上地区的混凝土高塔和位于基本地震烈度为 9 度及以上地区的各类杆塔才应进行抗震验算。近年来, 世界各地的震害资料表

明, 随着输电线路电压等级、输送容量、跨度、杆塔高度的增加, 其地震作用下的易损性有提高的趋势。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^[5]。1995-01-17, 日本兵库县南部阪神大地震造成 38 条高压线路、446 条配电线路损坏^[6]。1999 年台湾发生的集集地震, 中辽开关站完全损坏, 输电塔、线路破坏 (特别是 345 kV 超高压输电线路受损 28 条, 输电塔受损 355 基) 致使南电无法北送, 造成台湾漳化以北地区完全断电, 直接和间接经济损失难以估计^[7]。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 110 kV 及以上变电站停运 90 座, 线路停运 181 条^[8]。

基金资助项目: 教育部霍英东教育基金会优选课题(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), Science and Technology Project of SGCC (2008-508).

目前,国内外学者在输电塔线体系的抗风、抗冰领域进行过大量的研究工作^[9-16]。在输电塔抗震研究方面, Maeno 等针对日本特高压(1 000 kV)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 400 Gal 的地震作用^[17]。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连接(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^[18]。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^[19]。我国学者李宏男、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研究。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。试验结果认为,导线对输电塔地震反应的影响较大,实际计算中不可忽略^[20-21]。

本文以皖电东送输变电工程中的直线自立钢管塔为原型,进行了输电塔缩尺模型振动台试验,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下地震动输入,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 缩尺模型设计、试验工况及测点布置

1.1 输电塔模型设计

皖电东送淮南—上海输变电工程起点为安徽淮南变电站,止于上海沪西变电站。线路总长度为 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的原型即为此条送电线路中采用的直线自立塔,塔高 100.6 m,呼高 57 m。线路的水平档距为 510 m,垂直档距为 720 m。线路为双回路设计,每相导线为 8 分裂的架设方式,采用 $8 \times$ ACSR-630/40 的型号,分裂导线的间距为 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,导线的弧垂为 24 m。地线 1 根采用 LBGJ-240-20AC 铝包钢绞线,另 1 根采用光纤复合铝包钢绞线(OPGW),弧垂为 18 m。

此次试验在同济大学土木工程防灾国家重点实

验室完成。进行振动台缩尺模型设计时,首先要解决的是模型的选材问题。选材时要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,同时,在应力-应变关系方面应尽可能与原型材料相似^[22]。由于不锈钢的力学性能与原型钢材具有较好的相似性,模型试验时可以较好的模拟应力-应变关系,因此,选用毛细薄壁不锈钢管作为输电塔模型的制作材料。其次,鉴于振动台台面大小的限制,输电塔几何相似系数设定为 1:15,此次振动台试验模型的几何相似比如表 1 所示。

表 1 模型相似系数表

Table 1 Primary similarity parameters of the test model

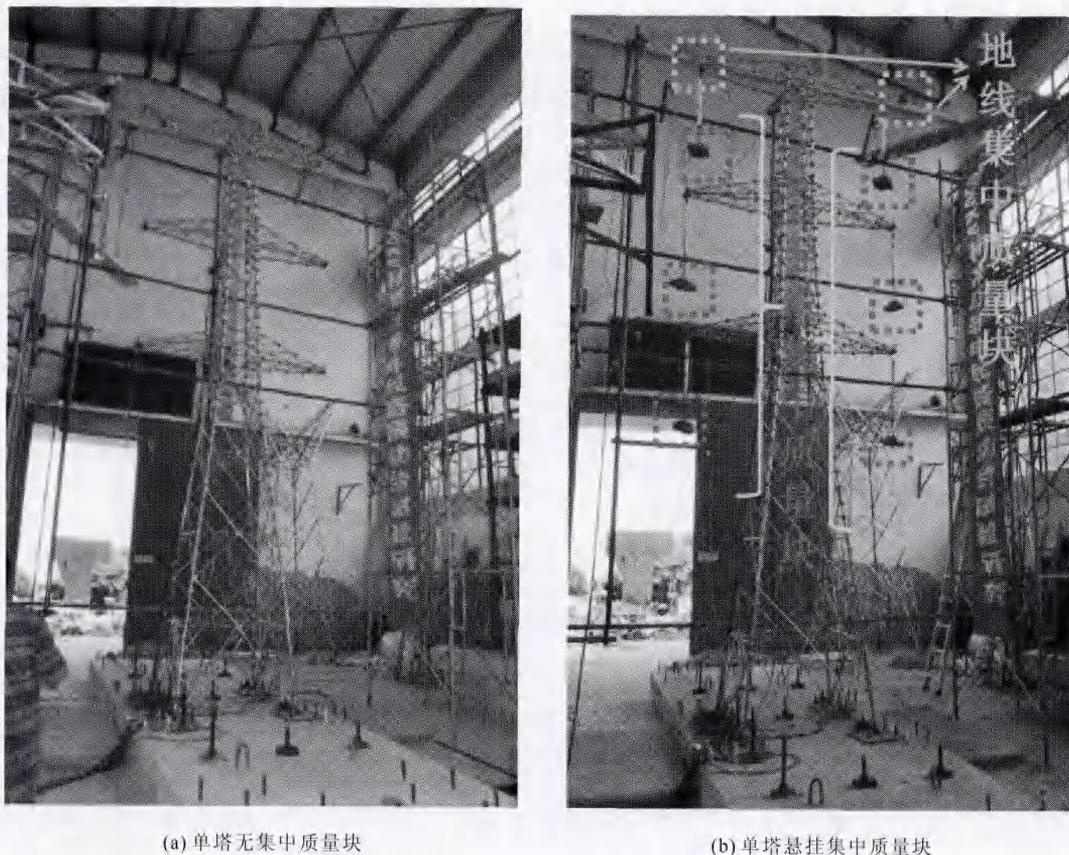
相似系数名称	数值
几何相似系数 S_L	1:15
加速度相似系数 S_a	3:1
质量相似系数 S_m	1:675
频率相似系数 S_f	6.7:1
弹性模量相似系数 S_E	1:1
密度相似系数 S_p	5:1

原型输电线路中,导线为双回路 6 相,按 1:15 的几何相似比缩尺后的单相导线总质量为 12.4 kg,单根地线质量为 1.2 kg。试验前选取试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 6 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。

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。试验时选取 El-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波和上海人工地震波(SHW)作为振动台台面激励。各水准地震下台面输入加速度峰值按上海市的《建筑抗震设计规程》^[23]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调整到 $1.2g$ (g 表示重力加速度)用以模拟 8 度罕遇烈度地震。对于每种地震动,先进行 X 向输入再进行 Y 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。试验前后均对模型进行白噪声扫频,以测量结构的动力特性。

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,如图 2 所示。图中,S 表示应变测量点;A 表示加速度测量点;D 表示位移测量点;基底加速度计布置为 A26、A27、A28。应变片布置分为 3 处:塔身中部斜



(a) 单塔无集中质量块

(b) 单塔悬挂集中质量块

图 1 测试模型

Fig. 1 Test model with and without lumped mass

材、塔腿主材及塔腿斜材处。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 2 个方向即顺线路方向和垂直线路方向大致均匀布置。

本文将图 2(a)中塔顶 D7 测点及图 2(b)中 D8 测点,定义为塔顶位移;将图 2(a)中 S1 测点及图 2(b)中 S5 测点,定义为塔腿主材应力;将图 2(a)中 S3 测点及图 2(b)中 S8 测点,定义为塔腿斜材应力;将图 2(a)中 S9 测点及图 2(b)中 S13 测点,定义为塔身斜材应力;将图 2(a)中塔顶 A11 测点及图 2(b)中 A12 测点,定义为塔顶加速度。

2 试验结果

2.1 动力特性

试验前后,均用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 1 阶频率为 7.62 Hz, X 向 1 阶频率为 7.77 Hz。悬挂集中质量块后模型单塔 Y 方向 1 阶频率为 7.32 Hz, X 方向 1 阶频率为 7.32 Hz。可见,附加了导线、地线质量的模型塔自振频率稍有降低。

在完成 8 度罕遇烈度试验后,模型结构顺线路方向(X 向)频率为 7.32 Hz,垂直线路方向(Y 向)频率为 7.32 Hz。与试验前所测频率相等,可见结构仍处于线弹性范围内,并没有损伤。

2.2 结构反应分析

为了便于分析,本文将地震反应与地震动输入同向时定义为面内响应,地震反应与地震动输入呈垂直向时定义为面外响应。

2.2.1 单塔动力反应分析

为了解单塔模型的地震反应特点以及便于悬挂集中质量后的对比分析,本文首先分析了单塔的位移、应力及加速度反应。

1) 位移反应分析

通过对 MTS 振动台数据采集系统获得的位移信号进行分析处理,得到了输电塔单塔结构的位移反应,如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,当地震输入为 8 度罕遇烈度时,塔顶位移反应均 < 60 mm。由图 3(a)及 3(b)可知,当地震波沿 X 向输入时,对应于 El-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波, X 向塔顶位移峰值

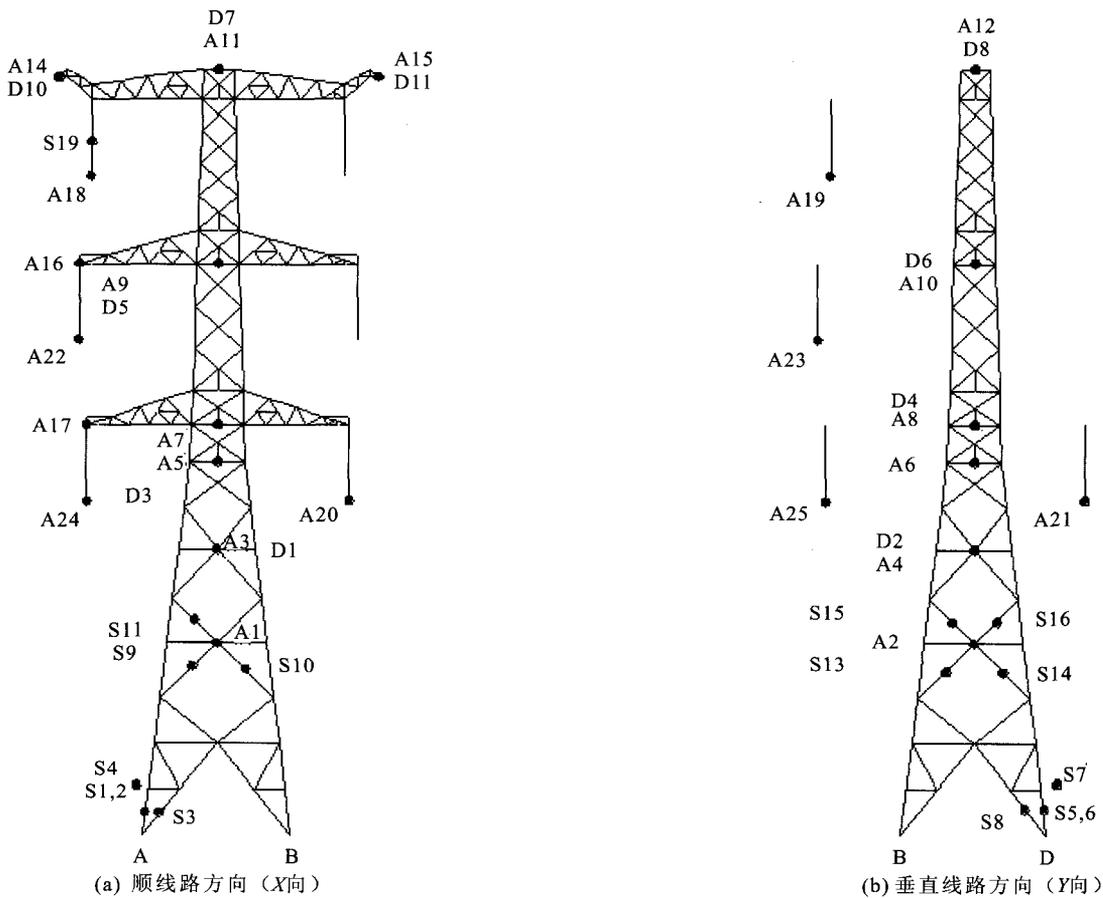


图 2 输电塔模型测点布置示意图
Fig. 2 Sensor locations in the test model

分别为 38.3、43.2、28.2、57.5 mm, Y 向塔顶位移峰值(面外反应)分别为 3.1、4.5、4.9、13.6 mm。同样由图 3(c)、3(d)可知,当地震波沿 Y 向输入时,相对于 4 条不同的地震动激励, Y 向塔顶位移峰值分别为 20.8、35.8、17.8、36 mm, X 向塔顶位移峰值(面外反应)分别为 0.9、1.3、0.9、2.6 mm。分析以上数据可得出结论:

(1)当激励方向与反应方向一致时,塔顶位移反应较大,尤其当 SHW 波沿 X 向输入时,塔顶位移幅值可达到 57.5 mm。当激励方向与反应方向相反时, X(Y)向地震动输入几乎激励不起 Y(X)向的反应(扭转反应),即面内的地震动输入产生面外反应非常小。除图 3(b)在上海人工波 SHW 作用下 Y 向位移反应较大外,其余均 < 5 mm。在地震波沿 Y 向输入时, X 向位移仅为 0.9 mm。这是因为输电塔为关于中心平面成平面对称的空间结构体系。同时可以看出, X 向的面外响应明显大于 Y 向的面外响应,即顺线路向响应大于垂直线路向响应。这是因为结构体系相对于 X 轴的质量分布而言,关于 Y 轴的质量分布更加集中于对称面附近,因而所受制作和拼

装等因素引起的偏心影响较小,进而产生了较弱的扭转效应。

(2)对比图 3 中不同地震动产生的位移反应可知,输电塔的位移反应受所选地震动输入的影响很大。如沿 X 向输入时,相同幅值的 SHW 波与 Pasadena 波所产生的 X 向位移差值为 29.3 mm。

2)应力反应分析

图 4~6 列出了单塔在不同地震动输入时的各个杆件轴向应力时程曲线,其中图 4 表示了塔腿主材应力时程。从图中可知,由于输入地震动的不同,导致地震反应有较大差别,由图 4(a)可以看出,在 El-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波激励下,塔腿主材应力反应峰值分别为 74.5、44.9、42.2、99.0 MPa。相同幅值的 Pasadena 波与 SHW 输入情况下的应力峰值相差 1.34 倍。同时可以看出,在 SHW 波和 El-Centro 波作用下,应力在整个地震过程中仅出现 1 次峰值后便逐渐衰减,而对于 Taft 波,却有多次峰值出现。从图 4(b)可知,在 El-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波双向输入下,峰值应力分别为 90.0、65.1、54.8 MPa。与单向地震动输入相

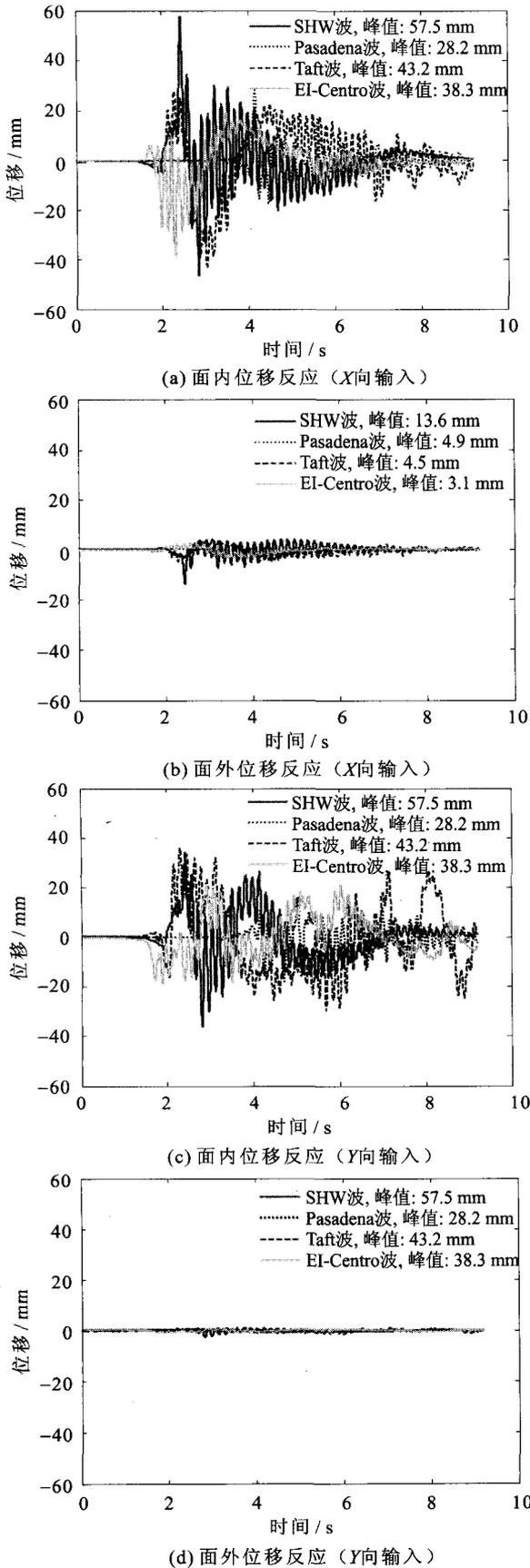


图3 8度罕遇地震动输入下单塔位移反应
Fig. 3 Displacement response of single tower under ground motions of 8 degrees seldom occurred earthquake

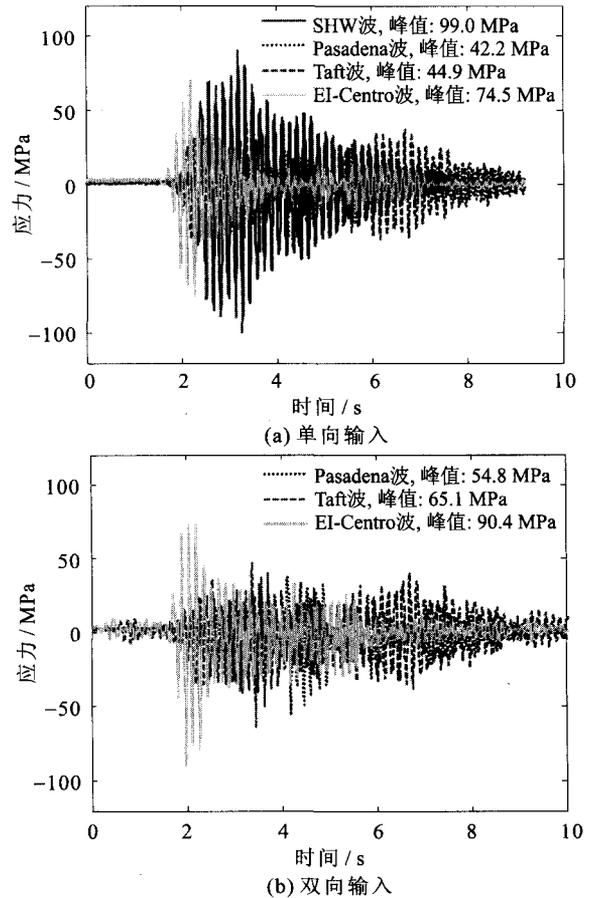
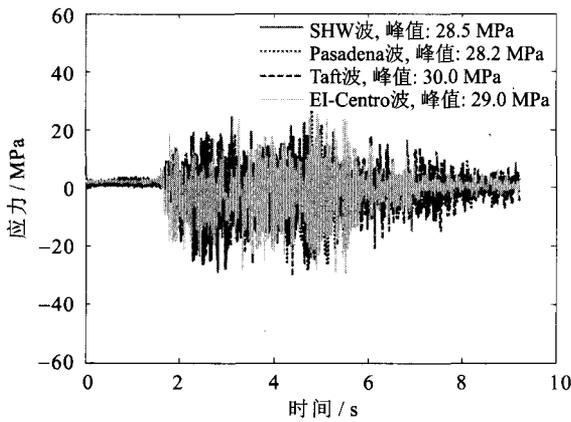


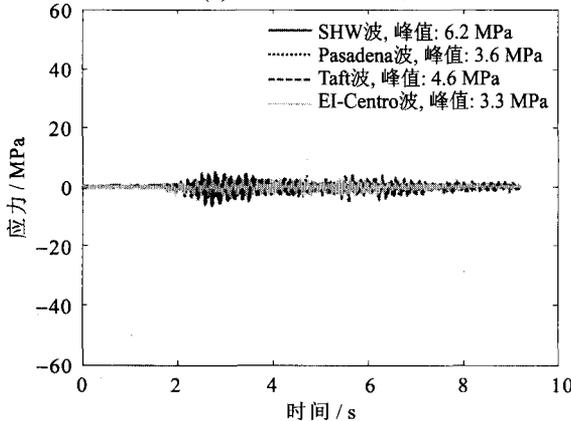
图4 8度罕遇地震动输入下塔腿主材应力
Fig. 4 Stress responses of main member at the tower leg under ground motions of 8 degrees seldom occurred earthquake

比,分别增加了 20.8%、45%、29.8%。由此可见,与单向地震动输入相比,双向输入更为不利。

图 5、6 分别表示了塔腿斜材及塔身斜材的应力时程曲线,从图 5(a)及图 6(a)中可以看出,单向地震动输入时,面内斜材的应力均 < 30 MPa。对应于 EI-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波,塔腿斜材应力分别为 29.0、30.0、28.2、28.5 MPa,塔身斜材应力分别为 26.3、29.6、24.3、25.9 MPa。相比于面内应力反应而言,面外应力反应较小。从图 5(b)及图 6(b)可知,面外塔腿斜材应力分别为 3.3、4.6、3.6、6.2 MPa,面外塔身斜材应力分别为 5.2、6.1、4.6、6.5 MPa。由此可以得出:该塔架一定程度上可以看做由 4 片平面桁架所组成的空间结构,输电塔在单向地震动激励下,塔体结构沿地震方向所受地震作用由平行于地震方向的 2 片塔身桁架承受,面内斜材起到了主要的传力作用,面外斜材应力所受地震影响较小。输电塔受面内地震荷载作用时,塔体结构一定程度上可简化为平面变刚度梁。

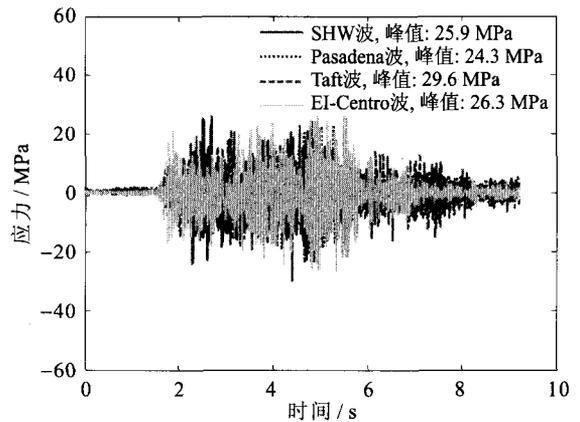


(a) 面内应力 (Y向输入)

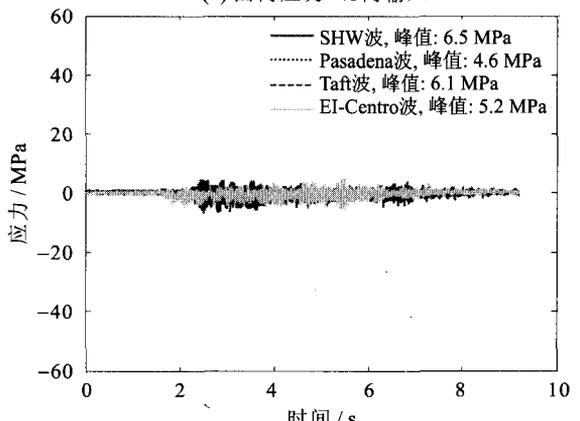


(b) 面外应力 (Y向输入)

图5 8度罕遇地震动输入下塔腿斜材应力
Fig.5 Stress of diagonal member at the tower leg under ground motions of 8 degrees seldom occurred earthquake



(a) 面内应力 (Y向输入)



(b) 面外应力 (Y向输入)

图6 8度罕遇地震动输入下塔身交叉斜材应力
Fig.6 Stress of diagonal member at the tower body under ground motions of 8 degrees seldom occurred earthquake

3) 加速度反应分析

图7为单向地震动输入时塔顶加速度反应时程曲线,从图中可以看出,地震作用水准为8度罕遇烈度时,单塔塔顶加速度峰值一般 $\leq 6.5g$,其中 g 表示重力加速度。如图7(a)所示,在El-Centro波、Taft波、Pasadena波及SHW波激励下,塔顶加速度峰值分别为6.3、5.7、5.3及6.3 g 。经计算发现,塔顶加速度放大系数通常介于3.3~5.3之间。由图7(b)及7(d)可知,X向单向地震动输入时,塔顶面外加速度最大值为1.1 g 。Y向单向输入时,最大值为0.56 g 。平均而言,单向地震动输入时塔顶面外加速度约为面内加速度峰值的13.7%。这主要是单向地震激励时输电塔由于结构偏心所引起的扭转加速度面外反应的体现。

2.2.2 悬挂集中质量对模型塔动力反应影响分析

文中分析了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、杆件轴向应力及塔顶加速度3个方面。

(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 <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,悬挂集中质量的存在降低了输电塔单塔的反应;若比值 >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,悬挂集中质量的存在增加了输电塔单塔的位移反应。八度罕遇单向地震动输入下的位移反应比如图8所示。

由图8(a)中可知,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0.88、1.0、0.99及0.96。Y向位移反应比除了El-Centro波作用时为1.5,其余3个比值均 ≤ 1.0 。由图8(b)可知,当地震波沿Y向输入时,4条地震波对应的Y向位移反应比为1.39、0.94、1.0及0.86。X向位移反应比除SHW波作用时为0.47,其余3个比值明显 >1.0 ,介于1.2~1.55

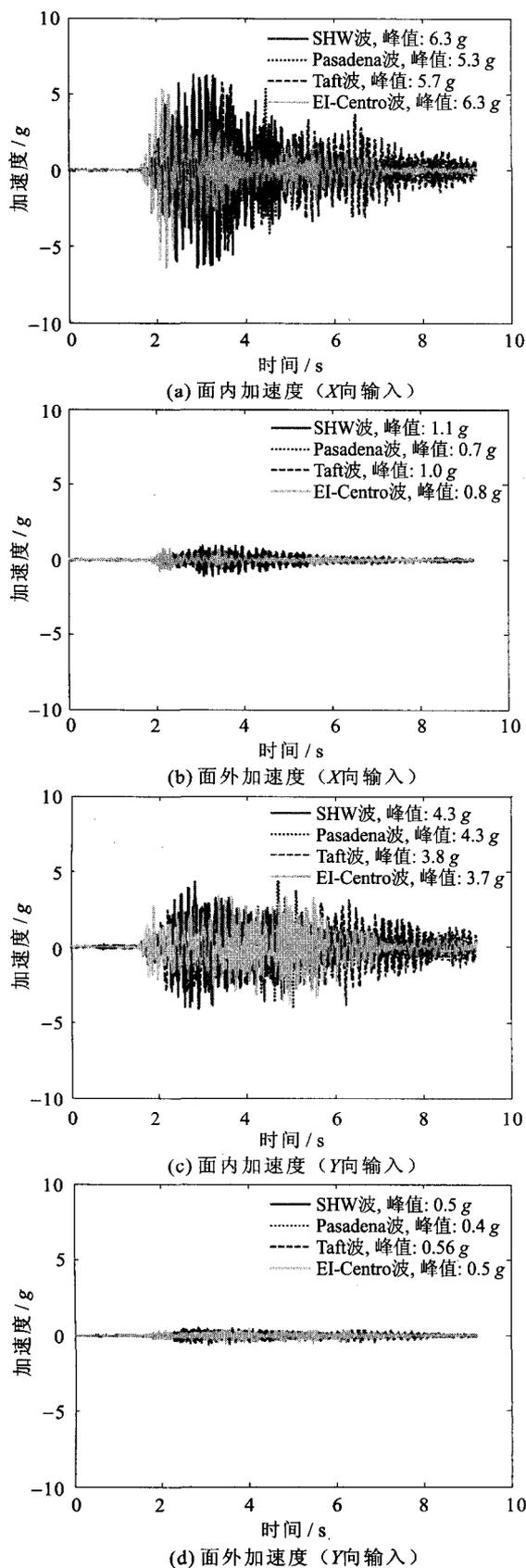


图7 8度罕遇地震输入下单塔加速度反应
Fig.7 Acceleration responses of single tower under ground motions of 8 degrees seldom occurred earthquake

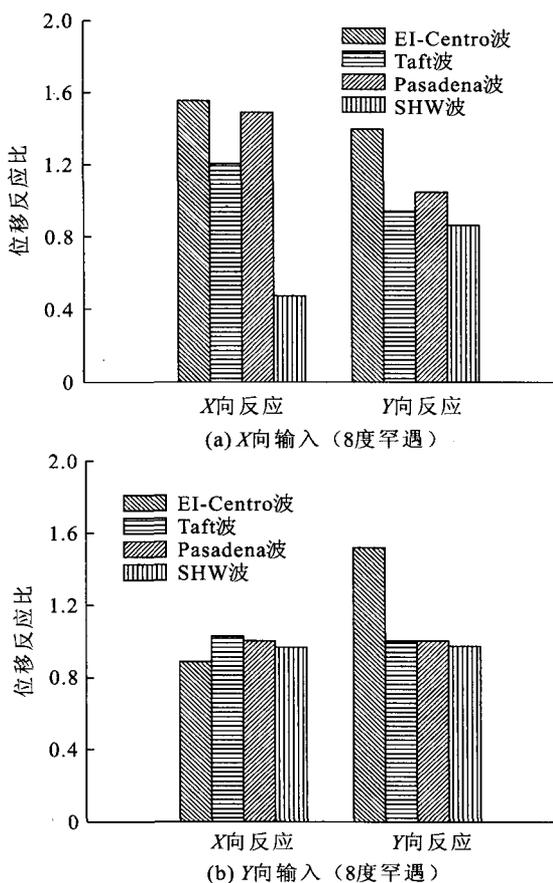


图8 塔顶位移反应比
Fig.8 Response ratio of displacement on the top of the tower model

之间(可能是由于加载过程中悬挂质量摆得面外振动原因,导致塔顶面外位移稍有增大)。可见,集中质量块通过悬垂绝缘子串与杆塔连接,相当于形成了一个悬挂质量摆系统,输电塔塔顶位移反应得到了一定控制。相比而言,悬挂集中质量对面内位移反应抑制效果较好。

(2)杆件轴向应力分析

应力分析主要集中于塔腿主材、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应力反应比如图9所示。

从图9(a)可以看出,当El-Centro波、Taft波、Pasadena波及SHW波沿X向输入时,与单塔塔腿主材应力相比,相应的应力反应比分别为0.85、1.0、0.94及0.72,塔腿主材应力峰值平均降低了13%。当地震波沿Y向输入时,应力反应比分别为1.0、0.75、0.86及0.44。塔腿主材应力峰值平均降低了24%。由图9(b)可知,地震波双向输入时,主材应力

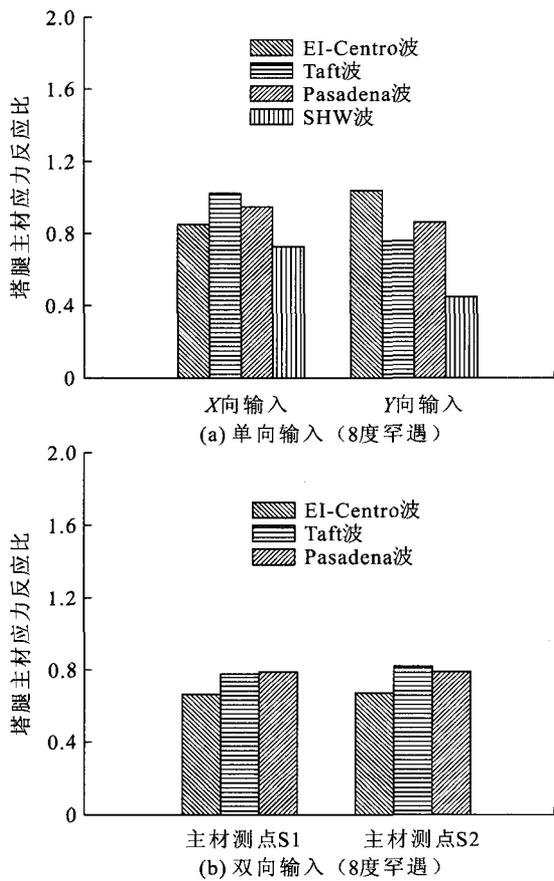


图9 塔腿主材应力反应比

Fig. 9 Response ratio of stress in main member at tower leg

比均 <1.0 。与 EI-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波对应的测点 S1 处的应力比分别为 0.66、0.77、0.79，测点 S2 处的应力比分别为 0.67、0.82 及 0.8。与单塔工况时的塔腿主材应力相比，悬挂集中质量块后的塔腿主材应力降低了约 25%。由此可见，悬挂集中质量的存在显著地降低了塔腿主材的应力峰值。

图 10 列出了所选 4 条地震动输入下塔腿斜材应力反应比。由图 10(a)可以看出，对应于 EI-Centro 波、Taft 波及 SHW 波沿 X 向输入，塔腿斜材应力反应比与 1.0 较为接近，分别为 1.06、1.0 及 1.03，Pasadena 波激励下的应力反应比为 0.8。当地震波沿 Y 向单向输入时，反应比相对较小，EI-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波对应值依次为 0.84、0.71、0.65 及 0.96。计算后发现，在单向地震动输入条件下，与相应的单塔试验工况相比，悬挂集中质量块后的塔腿斜材应力平均降低了 12%。图 10(b)表示了地震波双向输入下的塔腿斜材的应力比。从图中可以看出，对应于 EI-Centro 波、Taft 波及 Pasadena 波，面内斜材（与地震波输入方向平行的平面称为面内）应力反应比为 1.04、1.02 及 0.79，面外斜材应力反应

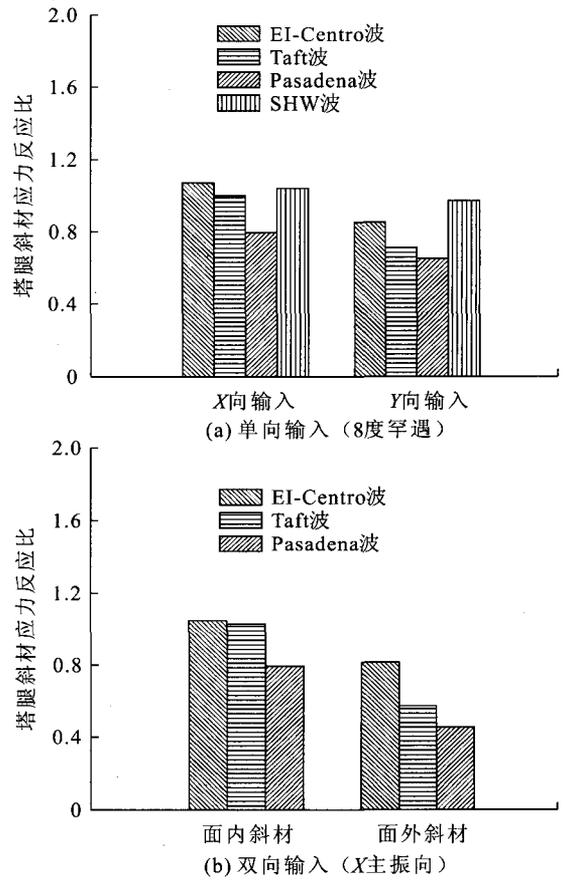


图10 塔腿斜材应力反应比

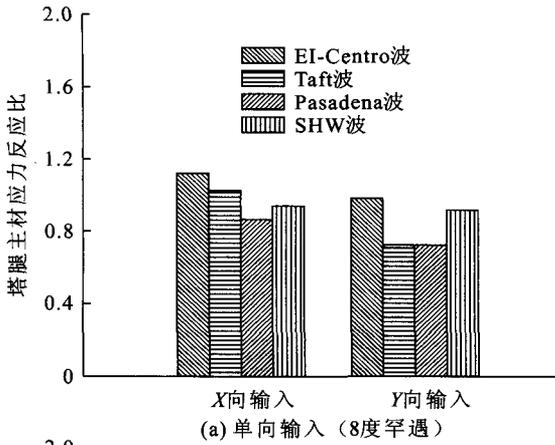
Fig. 10 Response ratio of stress in diagonal member at tower leg

比分别为 0.81、0.57、0.45。可知，单塔悬挂集中质量后，在双向地震动作用下，面外斜材应力有较为显著的降低，平均约降低了 40%。

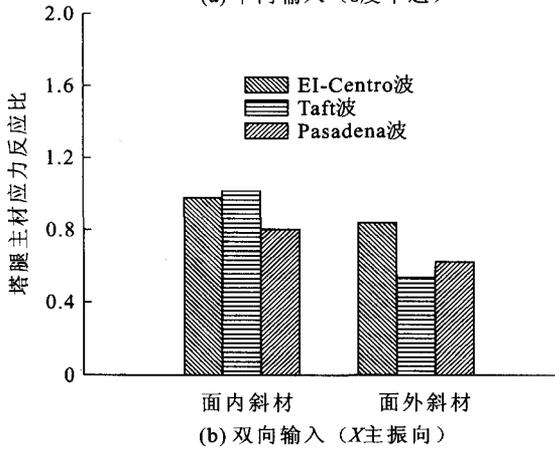
塔身斜材应力反应比如图 11 所示。当 EI-Centro 波、Taft 波沿 X 向输入时，对应的应力比相对较大，分别为 1.11 及 1.02。对应于 Pasadena 波及 SHW 波，反应比分别为 0.86 及 0.94。同样当地震波沿 Y 向输入时，EI-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波所对应的应力反应比依次为 0.97、0.72、0.72 及 0.91。计算后发现，单向地震动作用时，悬挂集中质量块后的塔身斜材应力平均约降低了 10%。图 11(b)显示了 X 向为主振向的双向地震动输入工况，从图中可以看出，除 Taft 波作用下的面内斜材应力比为 1.01 外，其余均 <1.0 。比较 2 组数值可知，面外斜材应力比均小于面内斜材应力比。平均而言，在 X 向为主振向双向地震动输入工况下，悬挂集中质量块后的面内塔身斜材应力平均降低了约 7.3%，面外塔身斜材应力平均降低了约 34%。

(3) 塔顶加速度

输电塔塔顶加速度反应比定义为相同地震输入



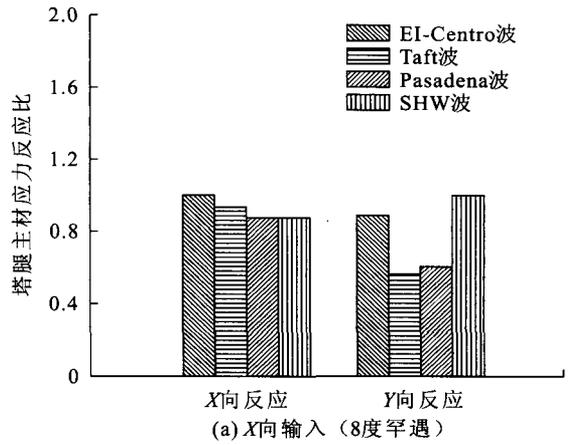
(a) 单向输入 (8度罕遇)



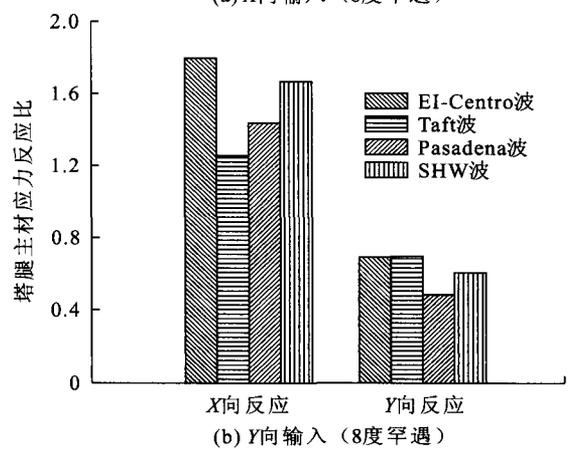
(b) 双向输入 (X主振向)

图 11 塔身交叉斜材应力反应比

Fig. 11 Response ratio of stress in diagonal member at tower body



(a) X向输入 (8度罕遇)



(b) Y向输入 (8度罕遇)

图 12 塔顶加速度反应比

Fig. 12 Response ratio of acceleration on the top of the tower

下单塔悬挂集中质量的加速度反应与相应的单塔加速度反应的比值。塔顶加速度反应比如图 12 所示。

由图 12 可以看出,当 EI-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波及 SHW 波沿 X 向单向输入时,其所对应的面内(X 向)塔顶加速度反应比分别为 0.99、0.93、0.88 及 0.88,相应的面外(Y 向)加速度反应比分别为 0.89、0.56、0.61 及 1.0。计算后发现,悬挂集中质量块下的面内(X 向)塔顶加速度峰值较单塔降低了约 8%,面外加速度峰值降低了约 23.5%。当地震波沿 Y 向输入时,其所对应的面内(Y 向)塔顶加速度反应比分别为 0.69、0.70、0.48 及 0.60,塔顶面内(Y 向)加速度峰值较单塔降低了约 38%。相应面外(X 向)加速度峰值较单塔提高 52%,这主要是因为,相对于 X 向而言,塔架结构质量分布更加集中于 Y 向对称平面。Y 向地震动输入时,悬挂质量摆的面外振动更易引起塔体结构的扭转反应,进而增加了塔顶面外加速度响应。

3 结论

本文通过对 1 000 kV 特高压直立式输电塔单

塔及单塔悬挂集中质量块的地震模拟振动台试验,研究了该型塔的动力反应特点以及悬挂集中质量对其动力反应的影响,主要得出以下结论:

- 1) 该型输电塔在单向地震动激励下,塔体结构沿地震方向所受地震作用由平行于地震方向的 2 片塔身桁架承受,面内斜材起到了主要的传力作用,面外斜材应力所受地震影响较小。仅考虑面内地震激励时,塔架结构在一定程度上可简化为平面变刚度梁模型。
- 2) 悬挂集中质量块后,该型输电塔的自振频率稍有降低,顺线路方向(X 向)自振频率降低了约 5.7%,垂直线路方向(Y 向)降低了约 3.9%。
- 3) 悬挂集中质量块的存在有效的降低了输电塔的地震反应。

参考文献 References

[1] 李亚琦,李小军,刘锡荟. 电力系统抗震研究概况[J]. 世界地震工程, 2002, 18(1): 79-84.
 LI Yaqi, LI Xiaojun, LIU Xihui. A summary on the seismic analysis in the electrical system[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(1): 79-84.

- [2] 中华人民共和国国家标准. GB 50260—96 电力设施抗震设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1996.
National Standard of the People's Republic of China. GB 50260—96 Code for design of seismic of electrical installations [S]. Beijing, China; China Planning Press, 1996.
- [3] DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2002.
DL/T 5154—2002 Technical regulation of design for tower and pole structures for overhead transmission line[S]. Beijing, China; China Electric Power Press, 2002.
- [4] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 北京:中国电力出版,1999.
DL/T 5092—1999 Technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line [S]. Beijing, China; China Electric Power Press, 1999.
- [5] 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, China: Science Press, 2005.
- [6] 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 Hyogoken Nanbu, Japan, earthquake and their recovery[J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(1): 43-48.
- [7] 台湾地震工程研究中心. 九二一集集大地震全面勘灾简报报告[R]. 台北,中国:台湾地震工程研究中心, 1999.
Tai Wan Center for Research on Earthquake Engineering. Chi-chi earthquake disaster streamline reporting comprehensive survey[R]. Taipei, China: Taiwan Center for Research on Earthquake Engineering, 1999.
- [8] Xie Q, Zhu R. Earth, wind, and ice[J]. Power and Energy Magazine, 2011, 9(2): 28-36.
- [9] Battista R C, Rodrigues R S, Pfeil M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1051-1067.
- [10] Savory E, Parke G, Zeinoddini M, et al. Modeling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower[J]. Engineering Structures, 2001, 23(4):365-375.
- [11] 谢强,孙力. 覆冰荷载作用下500kV输电塔结构破坏机理试验研究[J]. 高电压技术,2010,36(12):871-877.
XIE Qiang,SUN Li. Experimental study on failure mechanism of 500kV transmission tower under ice loading [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 871-877.
- [12] 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 1 000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling system[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(4):900-906.
- [13] Xie Q, Sun L. Experimental study on failure mechanism and retrofiting strategy of transmission tower structures under ice load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74(7): 26-36.
- [14] 赵桂峰,谢强,梁枢果,等. 高压输电塔线体系抗风设计风洞试验研究[J],高电压技术,2009,35(5):1206-1213.
ZHAO Guifeng,XIE Qiang,LIANG Shuguo,et al. Wind tunnel test on wind resistant design of high-voltage transmission tower-line system[J]. High Voltage Engineering,2009,35(5):1206-1213.
- [15] 张勇,严承涌,谢强. 覆冰特高压输电塔线耦联体系风致动力响应风洞试验[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):94-99.
ZHANG Yong, YAN Chengyong, XIE Qiang. Wind tunnel test on wind-induced dynamic responses of icing ultra high voltage transmission tower-line coupling system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 94-99.
- [16] 肖正直,李正良,汪之松,等. 1 000 kV 汉江大跨越塔线体系风洞实验与风振响应分析[J],中国电机工程学报,2009,29(34): 84-89.
XIAO Zhengzhi, LI Zhengliang, WANG Zhisong, et al. Wind tunnel tests and wind-induced responses analysis of 1 000 kV Hanjiang long span transmission line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 84-89.
- [17] Maeno Y, Hanada K, Sakamoto Y. Dynamic properties of UHV power transmission towers: full-scale tests and numerical investigation[C]// 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, USA:[s. n.], 1984: 12-34.
- [18] Suzuki T. Seismic response characteristics of transmissions towers [A]. 10 th World Conference on Earthquake Engineering. Balkema Rotterdam:[s. n.], 1992: 55-60.
- [19] Ghobarah A, Aziz T S, EI-Attar M, et al. Response of transmission lines to multiple support excitations [J]. Engineering Structures,1996,18(12): 936-946.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京:地震出版社,1989.
ZHU Bolong. Dynamic testing of structures[M]. Beijing, China: Seismological Press, 1989.
- [23] 上海市建设和管理委员会. DGJ 08-9-2003 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. DGJ 08-9-2003 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing, China: China Architecture and Building Press, 2003.



XIE Qiang
Ph. D.
Associate professor

谢强

1971—,男,博士,副教授,博导
E-mail:qxie@tongji.edu.cn



BAI Jie
Ph. D. candidate

白杰

1980—,男,博士生
主要从事输电线路杆塔结构防灾减灾研究
E-mail: baishankui@126.com