

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111070

横隔数目对猫头型输电塔抗震性能的影响*

赵仰康^{1,2}, 王晨^{1,2}, 宋鹏彦^{1,2}

(1. 河北大学建筑工程学院, 河北保定 071002; 2. 河北省土木工程监测与评估技术创新中心, 河北保定 071002)

摘要: 输电塔是输电线路中的重要支撑结构。为了探究横隔数目对输电塔结构非线性地震响应的影响,以某一实际单回路直线塔中的猫头型输电塔为研究对象。基于OpenSees平台建立4个横隔数目不同的输电塔三维有限元模型,考虑材料和几何非线性,分析猫头型输电塔的动力特性。选取20条远场地震动记录,利用非线性有限元动力分析技术,研究不同横隔数目对输电塔结构远场地震作用下的响应问题。结果表明:随着横隔数目的增加,输电塔的自振周期减小,在一定程度上增加了其抗侧刚度。在大震、巨震作用下,横隔数目的增加,输电塔结构的顶点位移减小,基底剪力增大,层间位移的影响非常小且结构的变形始终在我国现行规范范围内,未超过其限值。

关键词: 猫头型输电塔结构; 横隔数目; 抗震性能; 时程分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1287-07

Effect of the Number of Cross-sections on Seismic Response of Catenary-type Transmission Tower Structures

ZHAO Yangkang^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, SONG Pengyan^{1,2}

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Technology Innovation Center for Testing and Evaluation in Civil Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)

Abstract: Transmission towers are important elements in transmission lines. In order to investigate the effect of the number of cross-sections on the nonlinear seismic response of transmission tower structures, an actual catenary-type transmission tower is considered. With the help of the OpenSees software, four three-dimensional finite element models of transmission tower structures with different numbers of cross-sections are established, considering the nonlinearity of material and geometry. To consider the influence of input ground motions, 20 far-field ground motions are selected to investigate the response characteristics of different numbers of cross-sections on the transmission tower structure. The results show that as the number of cross-sections increases, the predominant period of the transmission tower decreases and lateral-stiffness of the transmission tower increases in a way. Under the effect of large and giant earthquakes, the maximum displacement of the transmission tower structure decreases whereas the base shear force increases with increasing number of cross-sections. However,

* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2021-11-22

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2019EEEVL0202)、河北省自然科学基金项目(E2017201221)、河北大学研究生创新项目(HBU2021SS030)资助

作者简介: 赵仰康(1996—),男,硕士研究生。主要从事输电塔结构抗震研究。E-mail:zykhit@163.com

通讯作者: 宋鹏彦(1982—),女,讲师,硕导,博士。主要从事结构工程、结构可靠度研究。E-mail:songpengyan@sina.com

the effect on the inter-story displacement is not evident and the deformation of the structure does not exceed the limit value recommended in the current seismic code.

Keywords: cathead-type transmission tower structure; number of cross-sections; seismic resistance; time history analysis

引言

输电塔作为电力系统生命线中的基石,其在电力输送过程中易遭到多灾害的影响。地震是造成输电塔结构倾斜、倒塌的自然灾害之一,而我国是世界上地震频发国家之一,在历次地震中输电塔遭到破坏的例子屡见不鲜^[1-3]。因此,确保输电塔结构在地震作用下的安全平稳运行,提高输电塔的抗震性能,对防灾减灾具有重大意义。

近年来,相关学者围绕输电塔结构抗震领域进行了一系列研究。魏文晖等^[4-5]考虑地震动一摇摆分量,对输电塔单塔和输电塔线体系进行响应分析,结果表明:摇摆分量对输电塔线体系的影响大于输电单塔。刘俊才等^[6]开展输电塔结构地震动输入的最不利方向研究,验证了近似法的准确性及不同地震动最不利输入方向是不同的。盖霞等^[7]基于能量持时方法,分别选取了20条长持时、短持时地震动,对输电塔结构进行地震响应分析,结果表明:地震动持时对输电塔的影响不可忽视。邓洪洲等^[8]基于有限元软件 ANAYS 建立输电塔数值模型,采用反应谱法和动力时程法分析其数值模型的地震响应。武钢等^[9-10]研究了输电塔线体系近场脉冲地震动和等效脉冲的动力响应,揭示了输电塔线系统近场响应与地震动参数之间的定量关系。L.Tian 等^[11]基于结构动力学和经典反应谱分析法建立了近断层多维地震动最不利的判断方法,并验证了该方法的准确性,揭示了输电塔结构在近场地震动下的响应规律。潘海洋^[12]、L.Tian 等^[13]提出了一种概率地震需求模型,在此基础上,研究了单塔和输电塔线体系在近场地震作用下的易损性。

关于输电塔抗震性能主要集中在地震动输入、远近场地震动、最不利输入方向、地震动持时、摇摆分量等因素的影响,并未考虑横隔对输电塔的影响,故本文以我国输电线路中常见猫头型输电塔为研究对象,研究了横隔数目不同对输电塔结构动力特性的影响,采用动力时程方法计算输电塔结构地

震响应,得到大震、巨震作用下的不同横隔数目猫头型输电塔结构的顶点位移、层间位移角、基底剪力,讨论横隔数目对输电塔结构抗震性能的影响。

1 输电塔结构三维有限元建模

以我国某市郊区 220 kV 输电塔线路为工程背景,选取其中的一直线塔为研究对象。该输电塔高度为 29.1 m,塔头高度 5.1 m,塔体形状为“猫头”型,基底根开为 4.14 m,输电塔主材、斜材和附材采用 Q235 和 Q345 的角钢,具体规格,见表 1。其抗震设防标准为 8 度,设计基本地震加速度为 $0.2g$, II 类场地土,第二组设计抗震分组,场地特征周期 T_g 为 0.40 s。

表 1 输电塔材料规格

Table 1 Transmission tower material specification sheet

材料 材质	Q235	Q345
角钢规格	L40×3、L40×4	L63×5、L70×5
	L45×4、L50×4	L70×6、L75×5
	L50×5、L56×4	L75×6、L80×6
	L56×5	

根据设计资料,利用 OpenSees 有限元软件建立输电塔三维有限元分析模型。按照横隔数目不同,建立 4 个不同横隔数目的输电塔,输电塔 1(横隔 1)、输电塔 2(横隔 1+横隔 2)、输电塔 3(横隔 1+横隔 2+横隔 3)、输电塔 4(横隔 1+横隔 2 横隔 3+横隔 4),如图 1 所示。输电塔是空间桁架结构,采用梁单元建模来模拟输电塔杆件,可以满足输电塔节点约束自由度的数量要求,并且保证输电塔整个结构的一致性。因此,本文采用输电塔的杆件均采用 Timoshenko 空间梁单元来模拟。L 型角钢的材料为 Q235 和 Q345。由于建模过程忽视了附属构件(螺栓、螺丝等),因此,引入质量放大系数来模拟辅助部件的质量,输电塔的底部采用固定约束。

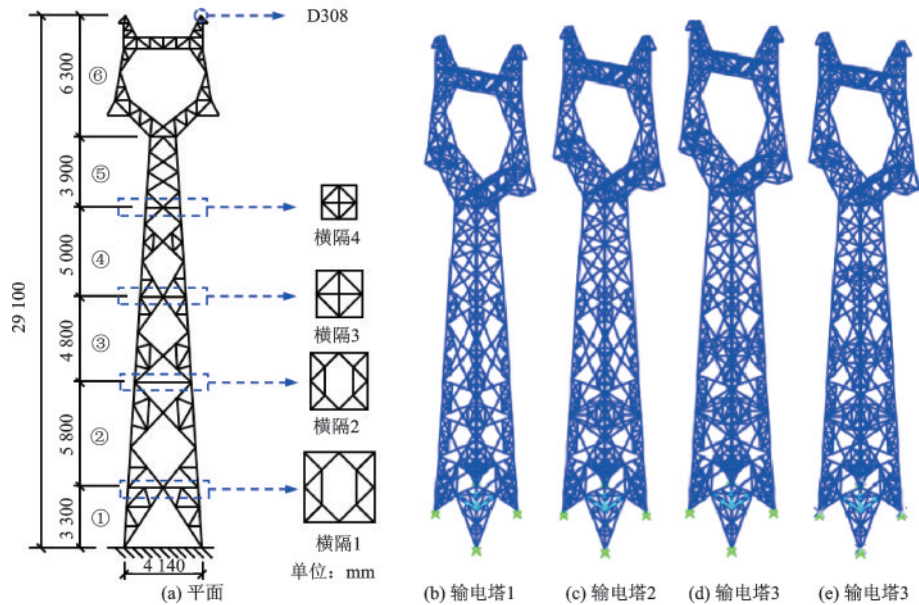


图1 输电塔平面图及不同横隔数目输电塔有限元模型

Fig.1 Transmission tower size drawing and finite element model of transmission tower with different number of cross-sections

2 动力特性分析

基于建立的4个不同横隔数目猫头型有限元分析模型,对其进行模态分析,探究横隔数目的不同对输电塔结构动力特性的影响。表2给出了4个不同横隔数目的猫头鹰输电塔前3阶固有频率、自振周期及振动形式。输电塔结构前3阶振型,如图2所示。

由表2可知,随着横隔数目的增加,第1阶、第2阶、第3阶的自振周期不断减小。第1阶频率、第2阶频率相差很小,表明输电塔在横向和纵向的刚度相近。第3阶频率高于第1阶频率、第2阶频率,表明输电塔的Z向刚度显著高于顺导线方向、垂直导线方向的刚度。

从图2可以看出,第1阶振型、第2阶振型分别为垂直于导线方向平动弯曲、顺导线方向平动弯曲;第3阶振型为整体扭转振型和局部扭转振型,造成局部扭转是由于输电塔的质量分布不均匀造成的。图3给出了随着横隔数目增加,输电塔周期变化趋势图。从图3可以看出相较于第1阶、第2阶振型,第3阶振型对应周期变化趋势更显著。

根据中国电力部门对输电塔结构的实测分析,得出输电塔结构中第一自振周期的近似计算公式如下^[14]:

$$T_1 = 0.034 \frac{H}{\sqrt{B+b}} \quad (1)$$

式中, T_1 是第一自振周期; H 是输电塔铁塔的高度; B 是根部开口的宽度; b 是塔头的宽度。

根据公式(1),计算出第一阶周期为0.420 2 s,相比于OpenSees计算第一阶周期相差5%之内,表明基于OpenSees建立的输电塔有限元分析模型能够很好地反应其结构特性,这验证了模型的准确性。

3 输电塔结构地震反应分析

地震动的选取对于结构进行抗震研究分析至关重要。本文的地震动选用文献[15]中的20条地震动。所选取20条地震动加速度反应谱,如图4所示。将所选取20条地震动调幅至大震、巨震对应的峰值加速度分别为0.4g、0.62g,同时考虑几何非线性和材料非线性,对不同横隔的输电塔结构进行大震、巨震作用下的地震响应分析,研究横隔数目不同对输电塔顶点位移、层间位移角和基底剪力的影响。

以GM10地震动为代表地震动,给出GM10在巨震(0.62g)作用下,不同横隔数目的输电塔顶点位移时程曲线,如图5所示。

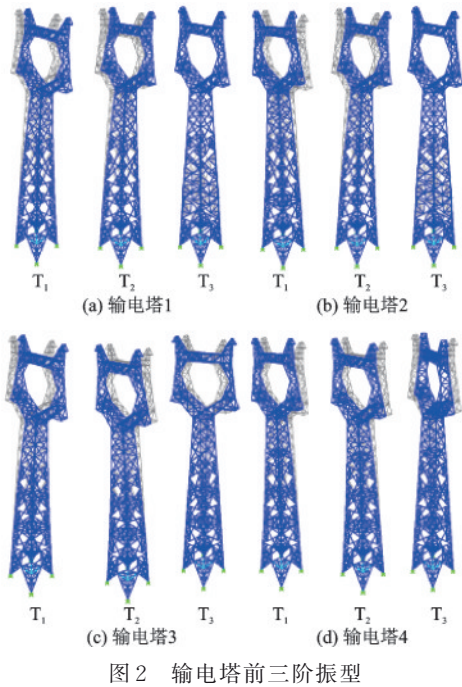


图2 输电塔前三阶振型

Table 2 The first three orders of modalities of transmission tower

横隔数目	振型	自振周期/s	自振频率/Hz	振动形式
1	1	0.421 6	2.371 9	整体弯曲
	2	0.418 6	2.388 9	整体弯曲
	3	0.161 3	6.201 0	局部扭转
2	1	0.418 9	2.387 2	整体弯曲
	2	0.417 9	2.392 9	整体弯曲
	3	0.140 7	7.105 5	局部扭转
3	1	0.416 3	2.402 1	整体弯曲
	2	0.415 4	2.407 3	整体弯曲
	3	0.127 5	7.843 1	整体扭转
4	1	0.414 2	2.414 3	整体弯曲
	2	0.412 3	2.425 4	整体弯曲
	3	0.131 4	7.610 3	整体扭转

3.1 横隔数目对顶点位移的影响

顶点最大位移可直观反应结构的变形,取顶点D308为代表点(图1)。表3、表4给出了不同横隔数目输电塔结构分别在大震($PGA=0.4g$)、巨震($PGA=0.62g$)作用下20条地震动对于的峰值顶点位移。相对于输电塔1的峰值顶点位移,大震作用下输电塔2、输电塔3、输电塔4的峰值顶点位移小

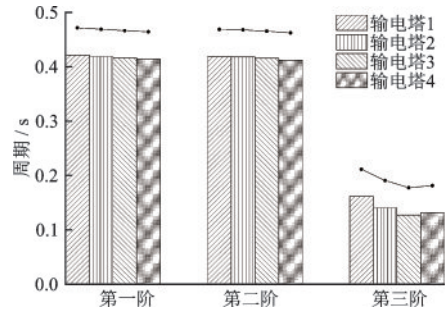


图3 输电塔周期变化趋势

Fig.3 Trend diagram of transmission tower period

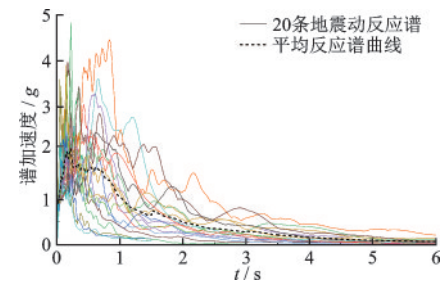


图4 所选地震动记录加速度反应谱

Fig.4 Acceleration spectrum of selected ground motion

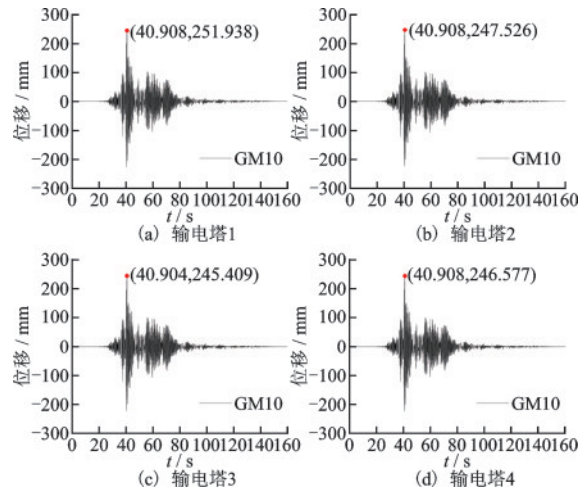


图5 4座输电塔巨震(0.62g)作用下时程响应

Fig.5 Time travel curve of four transmission towers under huge earthquake (0.62g)

于输电塔1的地震动数量占比分别为70%、80%、95%;巨震作用下,输电塔2、输电塔3、输电塔4的峰值顶点位移小于输电塔1的地震动数量占比分别为70%、80%、100%。对于同一条地震动,随着峰值加速度的增大,相同横隔数目对应的输电塔结构的峰值顶点位移增大,结构的反应与地震动对应的峰值加速度成正比。

对于20条地震动的峰值顶点位移的均值,在大震作用下,输电塔2、输电塔3、输电塔4比输电塔1

分别减少 0.67%、1.25%、1.46%。在巨震作用下, 输电塔 2、输电塔 3、输电塔 4 相比于输电塔 1 峰值顶点位移与大震作用下相同, 说明在大震、巨震作用下, 输电塔结构均未达到屈服, 处于弹性阶段。随着横隔数目的增加, 输电塔结构的峰值顶点位移随之减小。即输电塔横隔数目的增加, 可以使得输电塔结构的峰值顶点位移减小, 提高其抗侧刚度。

表 3 大震(0.4g)对应的峰值顶点位移
Table 3 The peak of the vertex displacement corresponding to a large earthquake (0.4g)

单位:mm				
地震动	输电塔 1	输电塔 2	输电塔 3	输电塔 4
GM1	104.19	104.19	103.71	103.12
GM2	104.19	104.19	103.71	103.12
GM3	38.75	39.04	38.94	38.53
GM4	85.53	84.31	83.63	83.85
GM5	87.29	86.04	85.34	85.59
GM6	87.30	86.04	85.34	85.59
GM7	68.90	67.38	66.75	67.21
GM8	35.86	35.60	35.37	35.32
GM9	94.78	94.66	94.19	93.76
GM10	162.54	159.68	158.31	159.04
GM11	40.16	39.68	39.39	39.44
GM12	34.23	33.78	33.44	33.55
GM13	48.26	47.48	47.10	47.28
GM14	91.84	91.16	90.66	90.53
GM15	99.18	98.76	98.29	97.90
GM16	144.56	146.98	147.02	144.62
GM17	76.90	75.07	74.43	74.84
GM18	67.26	67.53	67.39	66.77
GM19	48.92	47.10	46.50	47.22
GM20	86.53	87.59	87.49	86.41

3.2 横隔数目对层间位移角的影响

按横隔层和猫头将输电塔分为 6 层, 如图 1 所示。根据现行《建筑抗震设计规范》^[16]和《建筑结构抗倒塌设计规范》^[17]的规定, 地震作用下多、高层钢结构弹塑性层间位移角极限值 θ_{max} 为 1/50。

以上述调幅后的 20 条地震动记录为输入, 图 6、图 7 分别给出了在 20 条地震动在大震、巨震作用下的输电塔 1、输电塔 2、输电塔 3、输电塔 4 的最大层间位移角。可以看出随着峰值加速度的增加, 对应的层间位移角也在增加且均未超出规范所规定的 1/50。随着输电塔高度的增高, 层间位移角变大,

表 4 巨震(0.62g)对应的峰值顶点位移

Table 4 The peak of the vertex displacement corresponding to a mega earthquake (0.62g)

单位:mm				
地震动	输电塔 1	输电塔 2	输电塔 3	输电塔 4
GM1	161.52	161.52	160.78	159.86
GM2	161.52	161.52	160.78	159.86
GM3	60.05	60.50	60.34	59.71
GM4	132.60	130.69	129.64	129.99
GM5	135.33	133.38	132.31	132.69
GM6	135.33	133.38	132.31	132.69
GM7	106.78	104.43	103.45	104.16
GM8	55.58	55.17	54.81	54.74
GM9	146.93	146.75	146.02	145.34
GM10	251.94	247.53	245.41	246.58
GM11	62.25	61.52	61.06	61.15
GM12	53.06	52.37	51.84	52.02
GM13	74.81	73.60	73.02	73.30
GM14	142.33	141.28	140.50	140.30
GM15	153.76	153.10	152.39	151.79
GM16	223.91	227.64	227.69	223.90
GM17	119.18	116.38	115.39	116.00
GM18	104.23	104.65	104.43	103.47
GM19	75.84	73.02	72.08	73.21
GM20	134.14	135.79	135.63	133.96

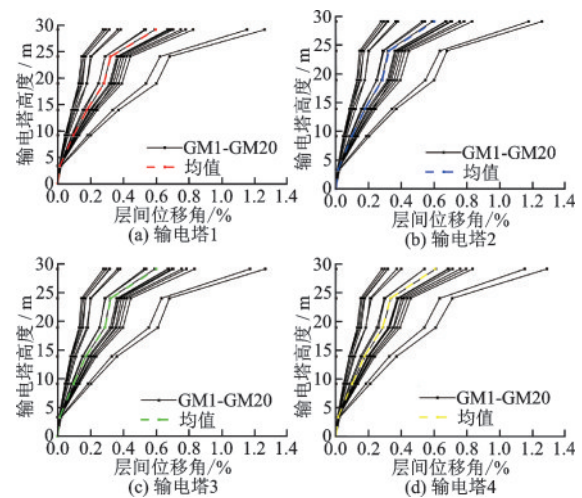


图 6 大震(0.4g)作用下最大层间位移角

Fig.6 The maximum inter-story drift of a large earthquake (0.4g)

猫头型输电塔结构的薄弱层在猫头部, 猫头部的质量相对于其他部分较大。不同地震动调幅值同一峰值加速度, 其层间位移角的变化不同, 这是由于地震动不同造成的。通过计算 20 条地震动对应的

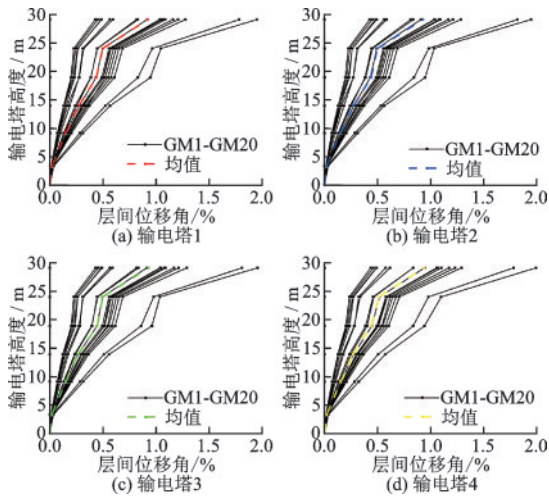


图7 巨震(0.62g)作用下最大层间位移角

Fig.7 The maximum inter-story drift of a mega earthquake (0.62g)

最大层间位移角均值发现:横隔数目增加,对应输电塔的最大层间位移角的变化浮值小于1%,影响很小,可忽略不计。

3.3 横隔数目对基底剪力的影响

基底剪力过大是造成结构底部杆件破坏的重要原因之一。图8(a)、(b)分别给出了在大震作用下、巨震作用下的20条地震动对应的最大基底剪力,从图8(a)、(b)可以发现在大震、巨震作用下随着输电塔横隔的增加,输电塔基底剪力在增大。相比于大震,在巨震作用下,输电塔1、输电塔2、输电塔3、输电塔4的基底剪力增加了36.24%、36.23%、36.24%、36.53%。对于大震作用,输电塔结构2、输电塔3、输电塔4比输电塔1增大0.74%、1.69%、7.82%。对于巨震作用,输电塔结构2、输电塔3、输电塔4比输电塔1增大0.74%、1.73%、8.33%。对于横隔数目相同的输电塔,其峰值加速度增加往往伴随着基底剪力的增加。

4 结论

从数值模拟角度出发,以某单回路猫头型输电塔为研究对象,基于OpenSees有限元软件平台建立了4个不同横隔数目的输电塔数值模型,选取20条远场地震动,采用动力时程方法研究了横隔数目对猫头型输电塔结构在大震、巨震作用下的抗震性能响应规律。主要结论如下:

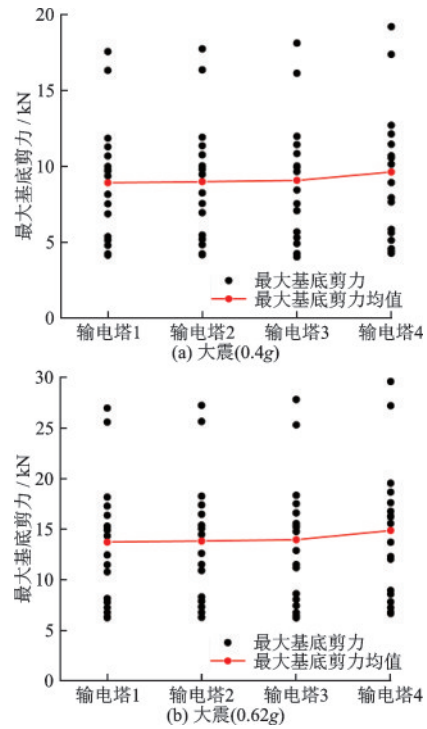


图8 基底剪力

Fig.8 Base shear

(1) 对猫头型输电塔进行动力特性分析,发现随着输电塔横隔的增加,其纵向刚度、横向刚度变化不大,提高了抗扭刚度。

(2) 随着横隔数目的增加,猫头型输电塔的最大层间位移角均值的浮值变化小于1%。

(3) 在大震、巨震作用下,基底剪力随着横隔数目的增加而变大,顶点位移随着横隔增加而减小。即横隔的增加可以有效阻止输电塔的变形,提高其抗侧刚度,但易造成输电塔底部杆件的破坏,故在设计时,要合理考虑横隔的数目。

参考文献:

- [1] 王飞, 李正, 杨风利, 等. 特高压酒杯型铁塔地震反应谱分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 968-975.
Wang F, Li Z, Yang F L, et al. Seismic response spectrum analysis of UHV cup-type steel tower [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 968-975. (in Chinese)
- [2] 刘如山, 张美晶, 邹玉斌, 等. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(增1): 200-211.
Liu R S, Zhang M J, Wu Y B, et al. Damage and failure study of Sichuan electric power grid in Wenchuan

- Earthquake [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(Sup1): 200-211. (in Chinese)
- [3] 尤红兵, 赵凤新. 芦山7.0级地震及电力设施破坏原因分析[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 100-104.
You H B, Zhao F X. M7.0 earthquake in Lushan and damage cause analysis of power facilities [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(8): 100-104. (in Chinese)
- [4] 魏文晖, 袁超, 王浩, 等. 考虑地震动摇摆分量作用的输电塔线体系响应[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 79-88.
Wei W H, Yuan C, Wang H, et al. Seismic responses of transmission tower-line system under coupled horizontal and tilt ground motion [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 79-88. (in Chinese)
- [5] 魏文晖, 甘肃, 薛广文, 等. 考虑地震动摇摆分量作用的高柔结构响应[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 115-122.
Wei W H, Gan S, Xue G W, et al. Seismic responses of highly flexible structure under coupled horizontal and tilt ground motion [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 115-122. (in Chinese)
- [6] 刘俊才, 田利, 张睿, 等. 远场地震作用下输电塔-线体系最不利输入方向预测研究[J]. 工程力学, 2020, 37(增1): 97-103.
Liu J C, Tian L, Zhang R, et al. Study on the prediction of the most adverse input direction of transmission tower-line system under far-field seismic ground motions [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(Sup1): 97-103. (in Chinese)
- [7] 盖霞, 田利, 马瑞升, 等. 考虑地震动持时效应的输电塔-线体系响应研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(4): 229-237.
Gai X, Tian L, Ma R S, et al. Response analysis of transmission tower-line system considering seismic duration effects [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 229-237. (in Chinese)
- [8] 邓洪洲, 司瑞娟, 邓凌君. 大跨越输电塔线体系地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 173-177.
Deng H Z, Si R J, Deng L J. Seismic responses of a large crossing transmission tower-line system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 173-177. (in Chinese)
- [9] 武钢, 翟长海, 李爽, 等. 大跨越输电塔-线体系的近场脉冲型地震反应分析[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 77-82, 106.
Wu G, Zhai C H, Li S, et al. Seismic response of large crossing transmission tower-line system subjected to near-fault ground motions I [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 77-82, 106. (in Chinese)
- [10] Wu G, Zhai C H, Li S, et al. Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on large crossing transmission tower-line system [J]. Engineering Structures, 2014, 77: 161-169.
- [11] Tian L, Yi S Y, Qu B. Orienting ground motion inputs to achieve maximum seismic displacement demands on electricity transmission towers in near-fault regions [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 04018017-1-13.
- [12] 潘海洋. 近断层地震作用下输电塔-线体系易损性分析[D]. 济南: 山东大学, 2019.
Pan H Y. Fragility analysis of transmission tower-line system subjected to near-fault ground motion [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [13] Tian L, Pan H Y, Ma R S. Probabilistic seismic demand model and fragility analysis of transmission tower subjected to near-field ground motions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 266-275.
- [14] 王朋. 螺栓滑移对基础非均匀沉降输电塔的影响研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
Wang P. Research on the effect of bolt slippage on the transmission tower with non-uniform settlement [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [15] 于晓辉, 吕大刚. 考虑结构不确定性的地震倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 8-14.
Yu X H, Lyu D G. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 8-14. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] 建筑结构抗倒塌设计规范: CECS 392—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

(本文责编: 周小潭)