

基于倒塌延性的输电塔地震抗倒塌设计方法*

田利, 罗贤超, 付朝阳, 刘俊才, 刘文棚

(山东大学土建与水利学院 济南, 250061)

摘要 调整结构抗侧刚度是提高地震下结构抗倒塌能力的常用方法,目前该方法多应用于建筑结构,而没有关于输电塔的抗倒塌研究。针对此问题,首先,依托实际输电线路工程,基于ABAQUS软件建立了输电塔有限元模型,采用静力推覆分析(Pushover)和增量动力分析(incremental dynamic analysis,简称IDA)方法,获得了输电塔倒塌延性;其次,针对输电塔薄弱节间,提出了一种以杆件内外径之比为影响参数的输电塔地震抗倒塌优化设计方法;最后,通过有限元分析对优化效果进行了验证。结果表明,该优化方法能有效提高输电塔抗倒塌性能,优化后的输电塔薄弱节间抗震性能最高可达70%,非薄弱节间优化效果在10%左右,可为输电塔抗震设计提供指导。

关键词 输电塔;有限元分析;抗震性能;结构延性;结构优化

中图分类号 TU355.2

引言

输电塔是电力系统中的重要基础设施,其安全性是国家经济建设和人民稳定生活的重要保障。地震是极具破坏力的常见自然灾害之一,地震下输电线路极易发生倒塌破坏^[1-2],因此亟需对输电塔开展抗震优化工作。目前,国内外学者开展了一系列地震作用下输电塔响应和倒塌研究^[3-5],虽然地震作用下输电塔抗震性能评估极其复杂,但必须对其性能进行准确的评估。

近年来,结构抗震性能评估、结构优化设计和加固方法成为结构抗震领域的研究热点。文献[6-7]提出了一种基于位移和滞回耗能的抗震性能评估方法,并通过实际工程验证了方法的可靠性。张卓群^[8]在有限分析方法和蚁群优化算法的基础上,对输电塔结构优化进行了研究。冯侃等^[9]通过高频动态响应研究了结构的损伤识别。在结构抗震性能评估方面,建筑延性不可忽略。董志骞等^[10]提出“能力储备法”来评估钢结构的抗倒塌性能、延性和变形。谢开仲等^[11]提出了一种基于延性和强度的桥梁抗震能力评估方法,并将其用于广西平南三桥的抗震能力评估,得到十分吻合的数据。史庆轩等^[12]得到了基于屈服承载力系数的延性需求谱,在此基础上提出等 ζ_y 延性谱法,并根据实际结构验证了其精度。

笔者基于倒塌延性提出了一种地震作用下输电

塔抗倒塌优化设计方法,并通过数值模拟对比验证其优化效果;根据实际工程建立了输电塔有限元模型,结合静力推覆分析和增量动力分析得到结构倒塌延性;对输电塔薄弱节间进行刚度优化,并对优化前后地震作用下不同节间的响应进行了对比分析。

1 输电塔计算模型的建立与地震动选取

1.1 输电塔有限元模型的建立

笔者参照设计图纸,在ABAQUS软件中建立输电塔三维有限元模型,如图1所示。为充分平衡材料利用率、耗材成本与结构承载性能的关系,对该输电塔设计了不同类型截面和材料性能的杆件。图中杆件多为圆管截面,横担处部分辅材为角钢截面;塔身杆件材料多为Q345钢材,主材等关键杆件材料为Q420钢材,少量受力较小的辅材材料为Q235钢材。模型中杆件采用梁单元(B31)进行模拟,其弹性模量为 2.06×10^5 MPa,质量密度为 7850 kg/m³,泊松比为0.3,输电塔的总高为102.3 m,根开为17.99 m,阻尼比取值2%。实际工程中输电塔固定于地面,故在模型塔腿处设置刚接约束,限制平移和旋转6个自由度。为满足模型动力特性要求,需要在输电塔模型上施加质量点,以模拟除杆件外其他细部构件的质量。在有限元模型计算时,使用新型非线性滞回模型子程序^[13-14]对输电塔进行倒塌破坏

* 国家自然科学基金资助项目(51778347,52178489);国家重点研发计划资助项目(2018YFE0206100)

收稿日期:2022-05-31;修回日期:2022-10-02

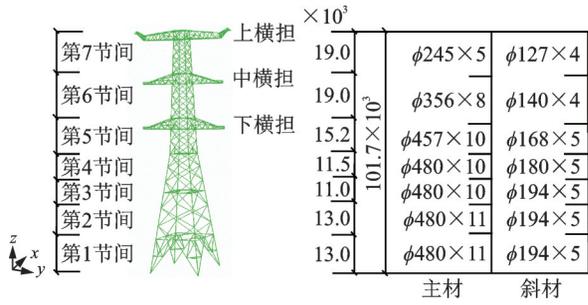


图 1 输电塔三维有限元模型(单位:mm)

Fig.1 Three-dimensional finite element model of the transmission tower (unit: mm)

模拟研究,并定义顺塔线方向为 x 向,垂直塔线方向为 y 向,竖直方向为 z 向。

1.2 地震动选取与调整

本研究在远场地震动记录集^[15]中选取了 20 条地震动进行动力时程分析,地震记录如表 1 所示。表中给出了所选用地震动名称、时间、震级、台站和峰值地面加速度 (peak ground acceleration, 简称

表 1 地震记录

Tab.1 Seismic records

编号	地震名称	记录年份	震级	台站	PGA/g
1	San Fernando	1971	6.6	LA-Hollywood Stor	0.21
2	Friuli	1989	6.5	Tolmezzo	0.35
3	Imperial Valley	1979	6.5	Delta	0.35
4	Imperial Valley	1979	6.5	EI Centro Array #11	0.38
5	Superstition Hills	1987	6.5	EI Centro Imp, Co.	0.36
6	Loma Prieta	1989	6.9	Capitola	0.53
7	Loma Prieta	1989	6.9	Gillroy Array #3	0.56
8	Landers	1992	7.3	Coolwater	0.42
9	Landers	1992	7.3	Yermo Fire Station	0.24
10	Northridge	1994	6.7	Beverly Hills-Mulhol	0.52
11	Northridge	1994	6.7	Canyon Country-WLC	0.48
12	Kobe	1995	6.9	Nishi-Akashi	0.51
13	Kobe	1995	6.9	Shin-Osaka	0.24
14	Kocaeli	1999	7.5	Arcelik	0.22
15	Kocaeli	1999	7.5	Duzce	0.36
16	Chi-Chi	1999	7.6	CHY101	0.44
17	Chi-Chi	1999	7.6	TCU045	0.51
18	Duzce	1999	7.1	Bolu	0.82
19	Manjil	1990	7.4	Abbar	0.51
20	Hector Mine	1999	7.1	Hector	0.34

PGA)。当对应 2% 阻尼比时,地震动加速度反应谱和平均谱如图 2 所示。

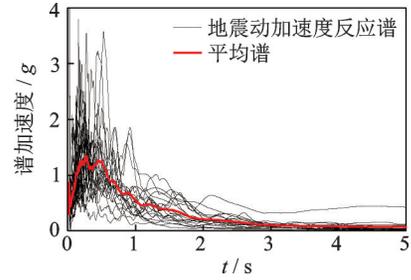


图 2 地震动加速度反应谱和平均谱

Fig.2 Response spectrum of seismic acceleration and average spectrum

为方便进行有限元模拟分析,需要对输入的地震动进行调幅处理,将地震动水平方向相对较大的加速度分量作为输入主方向,调幅为 $1g$ 后沿顺塔线方向 (x 向) 输入,其他加速度分量进行同比例调幅后分别输入。以 San Fernando 地震动为例,LA-Hollywood Stor 加速度时程曲线如图 3 所示,给出了调幅前后 3 个分量的地震动加速度时程。

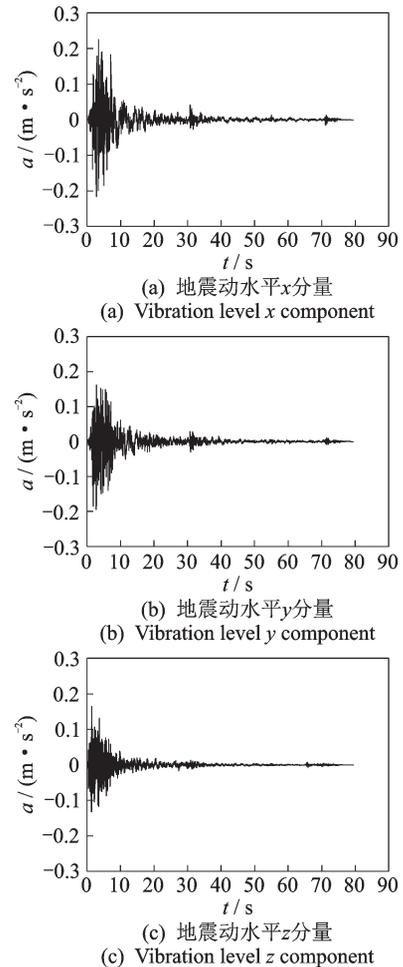


图 3 LA-Hollywood Stor 加速度时程曲线

Fig.3 Acceleration time history curve of LA-Hollywood Stor

2 输电塔抗震优化设计方法

本节对建立的输电塔模型开展静力推覆分析和增量动力分析,得到薄弱节间延性系数和20条地震动下的倒塌延性系数,将倒塌延性系数均值作为目标延性系数,以延性系数为参数,通过改变输电塔构件的截面尺寸来改变节间刚度,对输电塔进行优化。

2.1 输电塔倒塌延性系数

2.1.1 输电塔结构能力曲线

对已建立的输电塔有限元模型开展静力推覆分析^[16],在模型中施加倒三角分布模式的侧向力至结构失效,得到输电塔结构各节间的剪力和位移,绘制如图4所示的输电塔薄弱节间能力曲线。

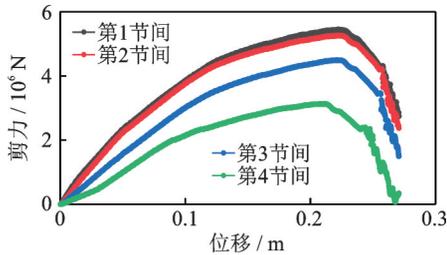


图4 输电塔薄弱节间能力曲线

Fig.4 Weak intersectional capacity curve of transmission towers

基于等能量法^[17],假设输电塔节间中的构件在受力变形过程中所消耗的能量相等。等能量法示意图如图5所示。节间能力曲线在原点O处的斜率即为节间的刚度K,四边形OCAB的面积为 S_1 ,曲线OA和直线AB,OB围成的图形面积为 S_2 ,则

$$S_1 = \frac{1}{2} V_y D_y + \frac{1}{2} (V_y + V_m)(D_m - D_y) \quad (1)$$

$$S_2 = \int_0^{D_m} \varphi(D) dD \quad (2)$$

$$K = V_y / D_y \quad (3)$$

其中: (D_m, V_m) 为峰值点A坐标; $\varphi(D)$ 为能力曲线函数表达式; (D_y, V_y) 为C点坐标。

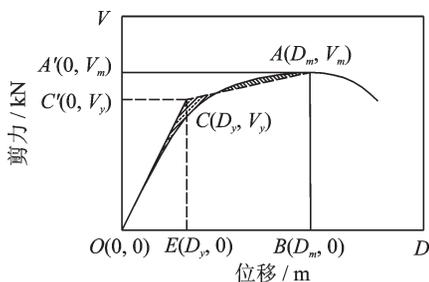


图5 等能量法示意图

Fig.5 Schematic diagram of the isoenergetic method

由能量法假设可知 S_1 与 S_2 相等,即图5中2块阴影面积相等,由方程解出C点坐标 D_y 和 V_y , D_y 和 V_y 即为所求的屈服位移和屈服荷载。

$$D_y = (2S_2 - D_m V_m) / (K D_m - V_m) \quad (4)$$

$$V_y = K D_y \quad (5)$$

基于Pushover分析得到能力曲线,定义结构各层峰值强度对应的节间位移,即每条曲线极值点对应的横坐标为 D_m ,代入屈服位移 D_y ,取 D_m 与 D_y 之比的最大值作为本研究输电塔薄弱节间的结构延性系数,如图6所示。

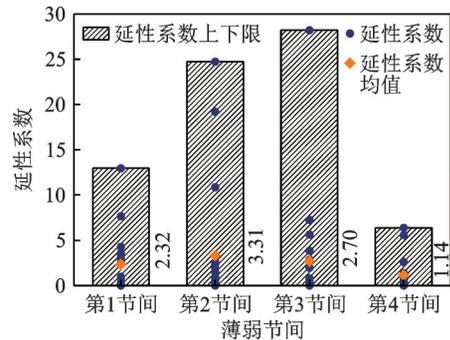


图6 输电塔薄弱节间延性系数

Fig.6 Weak internode of transmission tower ductility coefficient

2.1.2 输电塔各层倒塌延性系数的计算

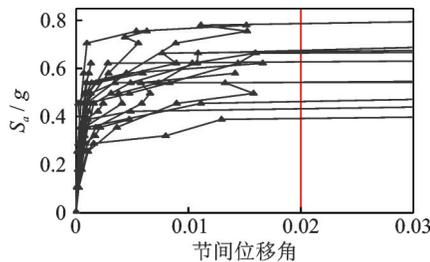
基于增量动力分析方法,对20条地震波逐一开展IDA分析。以San Fernando波为例,使用结构自振周期 T 根据图2得出对应的谱加速度 S_{a1} ,取调幅步长为0.1g,步长增量为0.05g,故第1次时程分析时的 $S_{a1}(T)$ 为0.05g。定义 $S_{a1}(T)$ 与 S_a 之比为调幅系数 η_k ,定义输入系数 $\lambda = 9.8\eta_k S_{a1}(T)$,将 λ 输入到有限元模型中进行动力时程分析,从而得到1次非线性时程分析的结果。本研究取节间位移角限值为0.02,即节间位移角最大值超过0.02时认为输电塔倒塌^[31]。重复以上步骤至输电塔结构倒塌,并在最大收敛的 $S_{a1}(T)$ 值和最小发散的 $S_{a1}(T)$ 值中选取新的 $S_{a1}(T)$ 值进行计算,直至区间长度小于0.05g,至此单条地震波的IDA分析结束。San Fernando波调幅过程如表2所示。

本研究将 S_a 作为地震动强度指标,将节间位移角作为结构地震响应指标,对20条地震动进行IDA分析。输电塔薄弱节间IDA曲线如图7所示。随着 S_a 的增加,4个薄弱节间的节间位移角均逐渐增大,当节间位移角达到0.005后曲线簇开始发散,第1节间发散情况最明显。当 $S_a < 0.4$ 时,输电塔杆件基本处于弹性阶段,随着 S_a 增大,杆件进入弹塑性阶段,

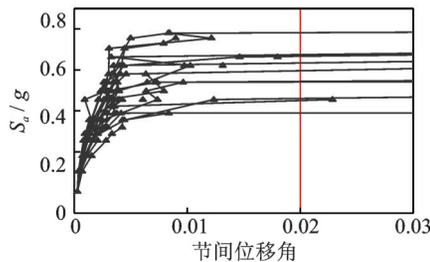
表2 San Fernando波调幅过程

Tab.2 Procession of San Fernando wave amplitude modulation

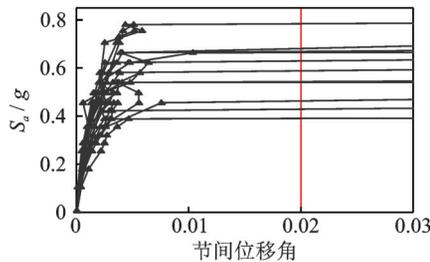
编号	$S_{a1}(T)$	η_k	λ	最大节间位移角
1	0.005	0.014 88	0.000 73	0.000 27
2	0.105	0.312 42	0.321 48	0.000 93
3	0.255	0.758 72	1.896 05	0.005 61
4	0.455	1.353 80	6.036 61	0.013 54
5	0.705	2.097 65	14.492 70	0.632 73
6	0.540	1.601 75	8.450 32	0.018 22
7	0.622	1.849 70	11.269 00	0.026 22
8	0.497	1.477 78	7.192 84	0.015 43
9	0.355	1.056 26	3.674 74	0.007 89
10	0.580	1.725 73	9.809 04	0.022 29



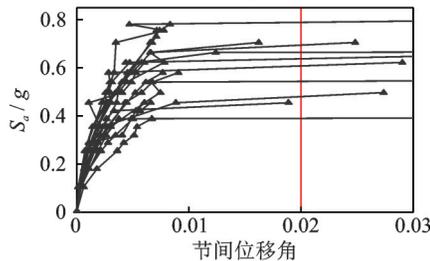
(a) 第1节间IDA曲线
(a) First inter-segment IDA curve



(b) 第2节间IDA曲线
(b) Second inter-segment IDA curve



(c) 第3节间IDA曲线
(c) Third inter-segment IDA curve



(d) 第4节间IDA曲线
(d) Fourth inter-segment IDA curve

图7 输电塔薄弱节间IDA曲线

Fig.7 IDA curve of transmission tower weak internode

且不同震动下输电塔响应存在较大差异,第1节间表现最为显著。

输电塔倒塌对应的地震动PGA和各个节间的倒塌节间位移为 D_c ,根据计算得到的节间屈服位移 D_y ,用倒塌节间位移和节间屈服位移之比作为输电塔倒塌时各薄弱节间的延性系数 μ ,即

$$\mu = D_c / D_y \quad (6)$$

同时,定义输电塔整体倒塌延性系数为输电塔某节间延性系数到达该节间结构延性系数时的值。

2.2 基于倒塌延性系数的输电塔结构优化

基于有限元分析方法,以输电塔圆管杆件的截面尺寸为优化参数,以节间刚度作为结构优化目标,取输电塔各节间倒塌延性系数的均值作为结构优化的目标延性系数,对输电塔结构抗倒塌能力进行改善。设钢管外径为 R ,内径为 r ,壁厚为 t ,则内外径之比 λ 为

$$\lambda = r / R \quad (7)$$

在控制钢管内外径之比不变的前提下,改变输电塔圆管杆件的截面壁厚和内径,以此调整输电塔节间刚度,进而改变结构延性系数,对输电塔结构的薄弱节间进行优化,直至各个节间的延性系数达到目标延性系数。刚度优化公式为

$$K_{target,i} = \left(\frac{\mu_{0,i}}{\mu_{target,i}} \right)^\alpha K_{0,i} \quad (8)$$

其中: $K_{target,i}$ 为第 i 节间的目标刚度; $K_{0,i}$ 为第 i 节间的初始刚度; $\mu_{0,i}$ 为第 i 节间的倒塌延性系数; $\mu_{target,i}$ 为第 i 节间的目标延性系数,本研究中为1.124 83; α 为收敛系数,本研究取0.05。

基于有限元分析结果及常见输电塔倒塌规律^[18],笔者将第1至第4节间定义为薄弱节间,对输电塔薄弱节间进行优化研究。薄弱节间倒塌延性系数均值为1.124 83,将其作为目标延性系数,调整输电塔构件截面半径和壁厚,对输电塔有限元模型进行优化。输电塔薄弱节间优化对比如表3所示。

表3 输电塔薄弱节间优化对比

Tab.3 Optimization comparison of weak inter-sectional transmission towers

编号	薄弱节间	刚度/ 10^{10} ($N \cdot m^{-1}$)			初始延性系数	优化效果/%
		初始	目标	优化后		
1	第1节间	5.921	6.139	6.138	2.316 9	99.984
2	第2节间	3.878	4.142	4.141	4.183 8	99.976
3	第3节间	4.291	4.504	4.506	2.965 7	99.956
4	第4节间	4.191	4.193	4.194	1.136 5	99.976

3 输电塔结构优化前后地震响应对比

基于优化后的输电塔模型,分别取PGA为0.2 g, 0.4 g和0.6 g,将20条地震动调幅后分别作用于优化前后的输电塔模型,开展非线性时程分析。以不同PGA下每条地震动的节间位移和节间位移角作为响应指标,选取San Fernando, Loma Prieta, Landers和Kobe这4条地震动进行分析,对比优化前后输电塔在地震作用下的结构响应变化情况,验证所提输电塔优化方法的实际效果。

输电塔优化前后地震动响应对比如图8所示。由图可知:同一地震动下输电塔响应在优化前后折线段的斜率相似,但响应的数值不同;不同地震动下的响应有较大差异。优化后的输电塔薄弱节间抗震

性能显著提高,在PGA=0.4 g时优化效果最为明显,薄弱节间的节间位移和节间位移角优化效果分别达到71.53%和45.04%,非薄弱节间的优化效果也在10%左右,整体优化效果较为理想。

同时还看出,输电塔响应在第1节间和第2节间较为突出,即第1、第2节相对薄弱,后续优化工作中应尤为注意。曲线簇在第4节间处开始发散,表明输电塔响应与高度呈正相关,且随着输入系数的增大,发散现象更加明显。

4 结论

1) 基于静力推覆分析和等能量法,得到了输电塔结构薄弱节间能力曲线和结构延性系数。

2) 基于IDA分析得到各层倒塌延性系数,表明20条地震动下,原输电塔结构薄弱节间均在输入系数为0.4 g时失效倒塌,因此将0.4 g作为关键输入系数。

3) 提出了基于倒塌延性系数的输电塔优化方法,优化后的输电塔结构抗倒塌能力显著提高。PGA为0.4 g时,薄弱节间(1~4节)的优化效果分别达到71.53%和45.04%,非薄弱节间(5~7节)的结构响也明显减小。结果表明,本研究所提出优化方法可有效提高输电塔的抗震性能。

参 考 文 献

[1] TIAN L, YI S, 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.

[2] HALL F J. Northridge earthquake of January 17, 1994: reconnaissance report[J]. Earthquake Spectral, 1995, 11(3): 212-215.

[3] 田利,董旭,周梦瑶,等.输电塔-线体系抗震研究综述[J].世界地震工程,2020,36(3):201-212. TIAN Li, DONG Xu, ZHOU Mengyao, et al. A review of seismic research on transmission tower-line systems[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(3): 201-212.(in Chinese)

[4] LONG X, WANG W, FAN J. Collapse analysis of transmission tower subjected to earthquake ground motion[J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2018, 2018(1): 2687561.

[5] 付朝阳.地震下输电塔-线体系不确定性响应与倒塌分析[D].济南:山东大学,2021.

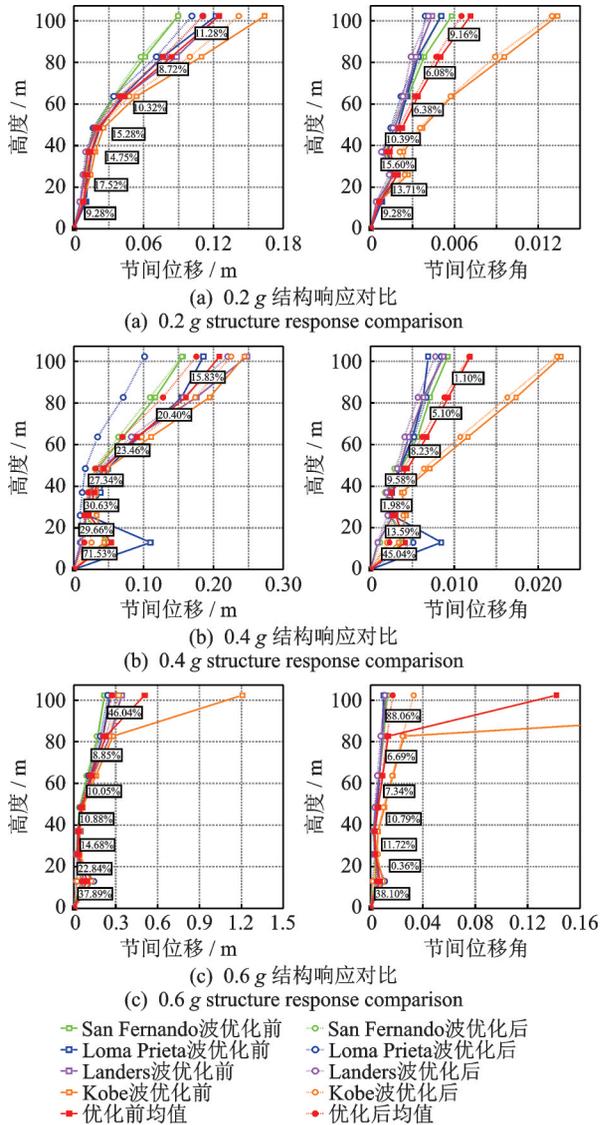


图8 输电塔优化前后地震动响应对比
Fig.8 Comparison of seismic response before and after transmission tower optimization

- [6] JIANG Y, YI W J, HU Q G. The new method for estimating seismic performance of structures[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 123-131.
- [7] 易伟建, 尹翠. 基于位移及滞回耗能的结构抗震性能评估新方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(8): 1-6.
YI Weijian, YIN Jiang. A new method for evaluating seismic performance based on displacement and hysteretic energy [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(8): 1-6.(in Chinese)
- [8] 张卓群. 基于蚁群算法的输电塔结构离散变量优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [9] 冯侃, 陆蕾玲, 夏雨, 等. 基于高频动态特性的点阵结构损伤识别研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 945-950.
FENG Kan, LU Leiling, XIA Yu, et al. Research on damage recognition of lattice structure based on high-frequency dynamic characteristics [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 945-950.(in Chinese)
- [10] 董志骞, 李钢, 李宏男. 多层中心支撑钢框架结构抗震性能简化评估方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 1-9.
DONG Zhiqian, LI Gang, LI Hongnan. A simplified method for seismic performance evaluation of MDOF steel concentrically braced frames [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 1-9.(in Chinese)
- [11] 谢开仲, 王红伟, 梁栋. 基于强度和延性的钢管混凝土拱桥抗震性能评估方法[J]. 桥梁建设, 2021, 51(2): 26-33.
XIE Kaizhong, WANG Hongwei, LIANG Dong. Seismic performance evaluation method of concrete-filled steel tubular arch bridge based on strength and ductility [J]. Bridge Construction, 2021, 51(2): 26-33.(in Chinese)
- [12] 史庆轩, 门进杰. 建筑结构基于性能的抗震评估的等 ζ 延性谱法[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 54-58.
SHI Qingxuan, MEN Jinjie. Ductility spectrum method with constant ζ in performance-based seismic evaluation of building structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(1): 54-58. (in Chinese)
- [13] TIAN L, MA R S, QU B. Influence of different criteria for selecting ground motions compatible with IEEE 693 required response spectrum on seismic performance assessment of electricity transmission towers [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 337-350.
- [14] TIAN L, MA R S, PAN H Y, et al. Progressive collapse analysis of long-span transmission tower-line system under multi-component seismic excitations [J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(12): 1920-1932.
- [15] FEMA. Quantification of building seismic performance factors: FEMA-P695 F[R]. Washington DC: FEMA, 2009.
- [16] 张伟, 周强, 马智勇, 等. 输电塔 Pushover 分析的侧向力分布模式选取研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(6): 1764-1771.
ZHANG Wei, ZHOU Qiang, MA Zhiyong, et al. Selection of lateral load patterns for Pushover analysis of transmission tower [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(6): 1764-1771. (in Chinese)
- [17] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 143-150.
YIN Xiaosan. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(3): 143-150.(in Chinese)
- [18] 余斌. 基于倒塌能力的结构抗震优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.



第一作者简介:田利,男,1982年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为工程结构防灾减灾。
E-mail:tianli@sdu.edu.cn