

钢筋混凝土墙 - 钢排架混合结构阀厅地震效应分析

胡乐生, 池代波, 韦文兵

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]旨在研究钢筋混凝土墙 - 钢排架混合结构阀厅在地震作用下的荷载效应, 为工程设计提供依据。[方法]进行了地震效应的弹性时程分析; 选取了 2 条天然波并生成 1 条基于反应谱的人工波, 采用 Midas/gen 软件进行计算, 与振型分解反应谱法进行了结果对比。[结果]结果表明: 对于这种不规则的混合结构, 振型分解反应谱法可能对于地震效应的估计偏小。[结论]在高烈度地区, 对于类似结构应采用时程分析法进行补充计算。

关键词: 混合结构; 阀厅; 时程分析; 地震波

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0064-06

Seismic Effect Study of RC Wall-Steel Hybrid Structure Valve Hall By Time-history Analysis

HU Lesheng, CHI Daibo, WEI Wenbing

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In order to study the seismic effect of RC wall-steel hybrid structure valve hall and provide basis for engineering design, a time-history analysis is carried out. [Method] Two natural seismic waves and an artificial seismic waves based on response spectrum were adopted. The calculation was done via Midas/gen program. [Result] Comparison between time-history analysis and response spectrum method indicates that response spectrum method may underestimate the seismic effect of such irregular hybrid structure. [Conclusion] So for structures in high intensity earthquake area, time-history analysis is necessary in addition to response spectrum method.

Key words: hybrid structure; valve hall; time-history; seismic wave

高压直流输电技术在长距离、大容量输电中优势明显, 我国在该领域处于国际领先地位, 国内已经建成多条高压直流线路。阀厅作为直流换流站最重要的结构物, 有体量大、布置复杂、造价高的特点。阀厅内的设备(含换流变)占到整个换流站设备造价的 50% 以上, 其对结构的安全性要求极高。

阀厅由于工艺布置的需要, 常采用混凝土 + 钢的混合结构形式^[1], 换流变一侧采用混凝土框架或整片式混凝土墙结构, 另一侧为钢排架柱, 屋盖结构采用梯形屋架, 承受悬吊的阀塔荷载。自汶川地震后, 电力设施的抗震性能引起了关注, 目前国内

针对阀厅抗震性能也展开了多项研究: 文献^[2-4]针对阀厅与悬吊的阀塔耦合作用展开了研究, 结果显示阀厅结构在悬吊阀塔之后, 对结构的抗震是有利的, 但减震效果非常有限, 在设计中可不予考虑。文献^[5]对采用了两种混凝土部分结构形式的阀厅结构进行了扭转效应研究, 认为换流变侧采用框架结构的阀厅扭转效应较小。

在工程设计中, 多采用振型分解反应谱法进行地震效应分析, 实际上对于阀厅结构, 该方法存在以下问题: (1) 质量参与系数无法达到规范规定值^[5]: 由于混凝土结构部分自重及刚度都远大于钢结构部分, 造成除前 3 ~ 5 阶振型外, 均为质量参与极低的钢结构局部震动。计算振型增至 50 阶, 质量参与系数仍不足 80%; (2) 结构扭转效应明显: 由于结构的非对称性, 在地震作用下的扭转效

应明显, 对于整片式混凝土的结构尤甚, 属于不规则结构。因此非常有必要采用时程分析法与对地震效应进行补充计算。

1 工程概况

某 ±800 kV 换流站位于烈度 6 度(0.05 g)区, 场地类别 II 类, 设计地震分组第三组, 场地特征周期 0.45 s。阀厅换流变侧采用整片式混凝土墙, 屋架跨度 36 m, 下弦标高 28.65 m, 阀厅长度 96 m, 钢排架柱典型柱距 8 m, 换流变防火墙间距 12 m。阀厅三维结构模型如图 1 所示。

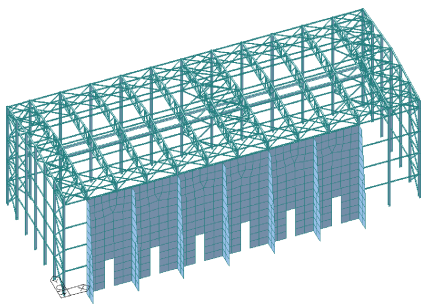


图 1 阀厅整体三维结构模型
Fig. 1 3D Model of valve hall

2 弹性时程分析

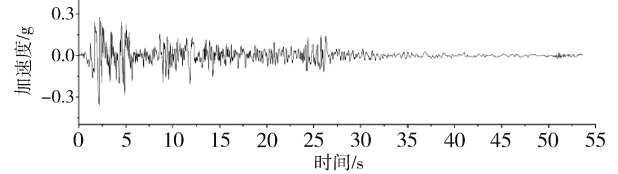
2.1 地震波选取

地震波的选取直接决定了时程分析的准确性及工程意义, 计算结果根据不同的地震波离散性可能很大^[6]。整体而言无论对于何种结构响应, 天然地震波的离散性都大于人工地震波的离散性。

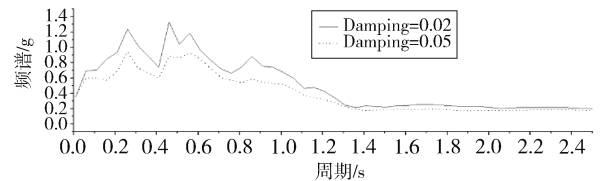
规范^[7]对时程分析地震波的数量及质量有如下规定: 当取三组加速度时程曲线输入时, 计算结果宜取时程法的包络值和振型分解反应谱法的较大值; 当取七组及七组以上的时程曲线时, 计算结果可取时程法的平均值和振型分解反应谱法的较大值。应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线, 其中实际强震记录的数量不少于总数 2/3, 多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。

为满足上述条件需对地震波进行频谱分析, 使地震波的卓越周期能够包含工程场地的特征周期^[8]。常用的天然地震波及其频谱如图 2 ~ 图 5 所示。可见, EI Centro 波的卓越周期在 0.25 ~ 0.35 s

及 0.45 ~ 0.55 s 之间, Taft 波的卓越周期在 0.35 ~ 0.4 s, Northridge 波的卓越周期在 0.35 ~ 0.65 s 之间, Mexico 波的卓越周期在 2 ~ 2.3 s 之间。所以考虑场地的特征周期 0.45 s, EI Centro 波及 Northridge 波较适宜。



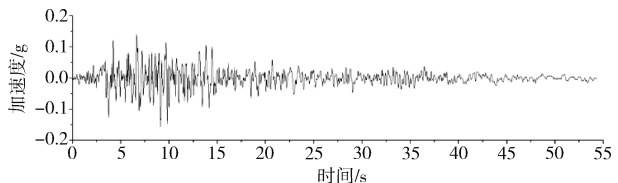
(a) EI Centro波加速度曲线



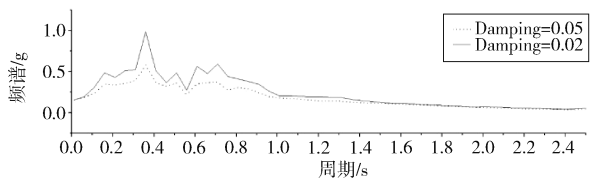
(a) EI Centro波频谱

图 2 EI Centro 波及其频谱

Fig. 2 El centro wave and its frequency spectrum



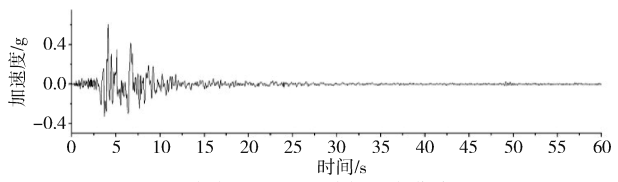
(a) Taft波加速度曲线



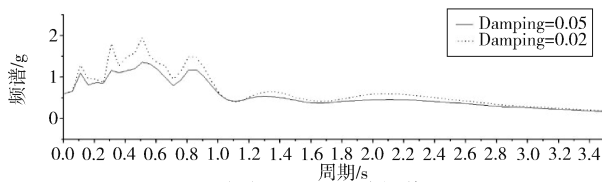
(b) Taft波频谱

图 3 Taft 波及其频谱

Fig. 3 Taft wave and its frequency spectrum



(a) Northridge波加速度曲线



(b) Northridge波频谱

图 4 Northridge 波及其频谱

Fig. 4 Northridge wave and its frequency spectrum

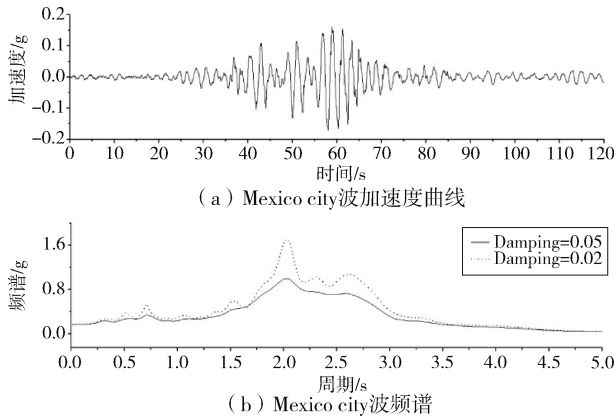


图5 Mexico city波及其频谱

Fig. 5 Mexico wave and its frequency spectrum

人工波采用 SeismoAtif 软件生成的基于规范反应谱的波形, 其波形及频谱如图 6 所示。由图可见, 该人工波的频谱与规范反应谱拟合较好, 可以体现本工程场地特性。

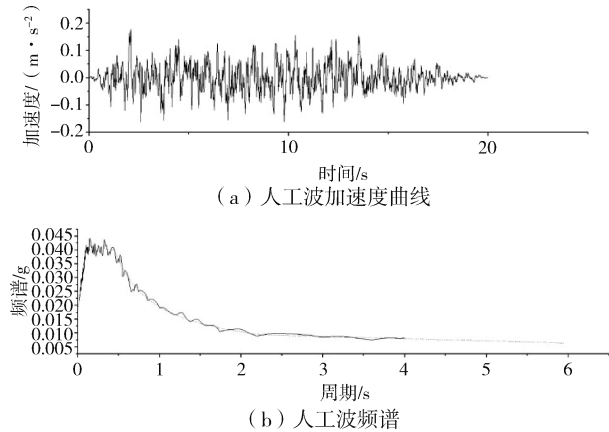


图6 人工波及其频谱

Fig. 6 Artificial Wave and Its Frequency Spectrum

本文时程分析采用 EI Centro 波、Northridge 波以及上述人工波作为输入, 将各时程最大值调整为规范^[6]规定的 18GAL, 其频谱对比如图 7 所示。

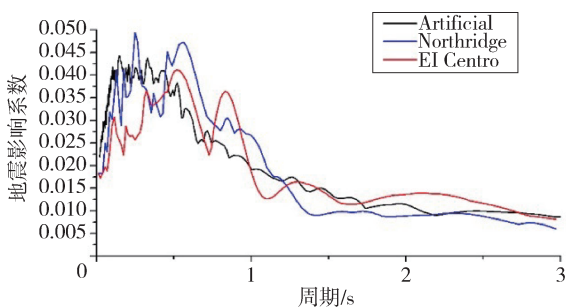


图7 多组时程曲线的影响系数曲线

Fig. 7 Influence coefficient curve of multiple time history

在前五阶振型周期 0.646 9, 0.567 7, 0.525 8, 0.435 6 及 0.379 7 时, 其对应加速度影响系数与规范反应谱对比如表 1 所示。其中人工波、EI Centro 波以及 Northridge 波的五阶平均偏差为 99.52%、115.36% 及 102.7%。最大偏差为 EI Centro 波在二阶时的 142.3%。基本上可认为多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。

表1 多组时程曲线的影响系数与反应谱对比

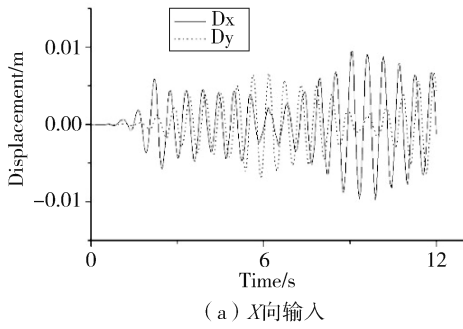
Tab. 1 Comparison of Influence coefficient and response spectrum of multiple time history curves

曲线	项目	人工波	EI Centro	Northridge	规范反应谱
一阶振型	数值	0.025 63	0.038 38	0.031 03	0.028 89
	对比	88.7%	132.8%	107.1%	100%
二阶振型	数值	0.032 48	0.046 28	0.038 91	0.032 53
	对比	99.9%	142.3%	119.6%	100%
三阶振型	数值	0.037 84	0.045 18	0.040 41	0.034 85
	对比	108.6%	129.6%	115.9%	100%
四阶振型	数值	0.040 94	0.034 86	0.035 24	0.040
	对比	102.4%	87.2%	88.1%	100%
五阶振型	数值	0.039 19	0.033 95	0.033 13	0.040
	对比	98.0%	84.9%	82.8%	100%

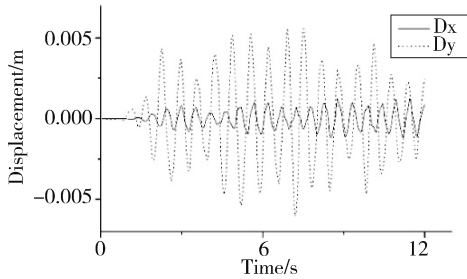
2.2 时程分析结果

时程分析的地面加速度输入峰值为 18 GAL。分析时长要求大于结构周期 5 倍以上, 且能涵盖地震波峰值, 本次计算取 12 s。采用 Midas/Gen 程序进行计算, 混合结构的阻尼采用能量加权等效综合阻尼(应变能法)^[9]。

计算得到屋盖某角点在地震波分别在 X、Y 向输入时的位移时程曲线如图 8~图 10 所示。在地震波 Y 向输入时, 该节点以 Y 向位移为主, EI Centro 波、Northridge 波及人工波对应的 Y 向最大位移分别为 6.1 mm、7.8 mm 及 4.6 mm。在地震波 X 向输入时, 该节点在 X 向震动时, 伴随着显著的 Y 向震动, 说明了结构纵向刚度的不对称导致了较大的扭转效应。EI Centro 波、Northridge 波及人工波对应的 X 向最大位移分别为 9.7 mm、6.4 mm 及 5.8 mm。



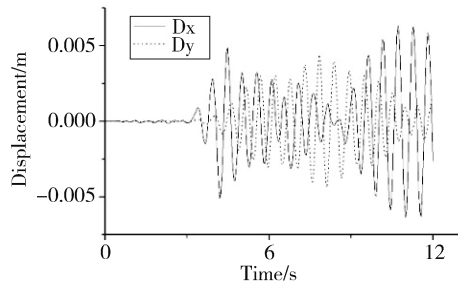
(a) X向输入



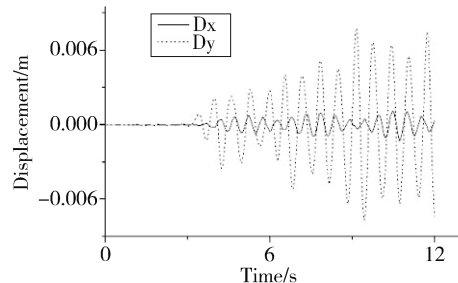
(b) Y向输入

图 8 屋盖角点位移曲线(EI Centro 波)

Fig. 8 Displacement curve of roof corner (EI centro wave)



(a) X向输入



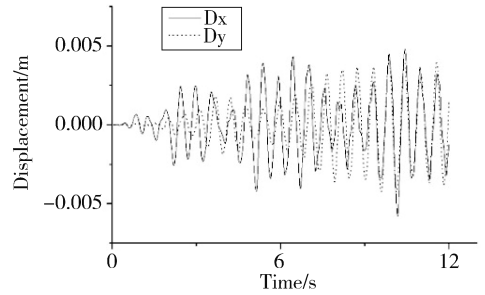
(b) Y向输入

图 9 屋盖角点位移曲线(Northridge 波)

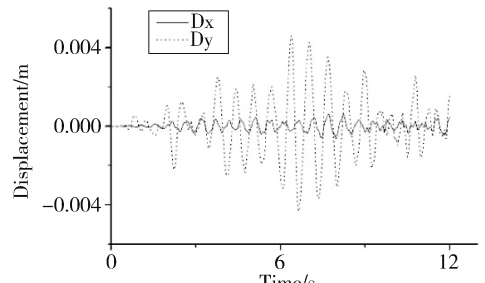
Fig. 9 Displacement curve of roof corner (northridge wave)

柱间支撑是提供钢结构侧向刚度的主要构件, 所以结构的内力地震效应比对以柱间支撑的轴力作为指标。时程分析各工况的柱间支撑最大轴力如表 2 所示。各工况的柱间支撑最大轴力均发生在相应

方向地震效应工况下的最底层支撑。



(a) X向输入



(b) Y向输入

图 10 屋盖角点位移曲线(人工波)

Fig. 10 Displacement curve of roof corner (artificial wave)

表 2 各工况柱间支撑最大轴力

Tab. 2 Maximum axial force of column bracings under each load condition

	EI Centro 波		Northridge 波		人工波		平均值
	数值	偏差	数值	偏差	数值	偏差	
X 向输入	98.6 kN	32.2%	58.9 kN	-21.0%	66.2 kN	-11.3%	74.6 kN
Y 向输入	44.4 kN	1.1%	55.5 kN	23.6%	34.7 kN	-22.7%	44.9 kN

3 时程分析及反应谱法结构对比

3.1 反应谱法分析结果

振型分解反应谱法采用规范规定的反应谱, 计算振型取 50 阶。前三阶振型的周期分别为 0.646 9, 0.567 7, 0.525 8, 第一阶振型为结构横向震动, 第二阶振型为结构纵向震动伴随较大的结构扭转, 第三阶振型为扭转振型。与时程分析结果类似, 结构纵向震动时, 由于刚度的不对称, 产生了较为明显的扭转效应。

当截取振型取前 50 阶振型时, X 向(结构纵向), Y 向(结构横向)质量参与系数分别为 28.2% 及 76.9%。结构纵向的质量参与系数极低, 原因是纵向整片式混凝土墙体刚度极大, 其参与的振型周期极低, 振型非常偏后, 并且其所占的质量比重较

表3 结构 X 向震动时屋架角点最大位移

Tab. 3 Maximum displacement of roof corners while seismic is input in X direction

mm

节点号	振型分解反应谱法		EI Centro 波		Northridge 波		人工波	
	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y
105	2.467	1.951	9.628	6.810	6.320	4.401	4.796	4.131
106	2.381	2.031	9.587	6.470	6.130	4.062	4.575	4.834
123	0.300	2.069	1.219	6.579	0.705	4.072	0.905	4.859
126	0.231	1.961	0.953	6.890	0.490	4.362	0.800	4.237

表4 结构 Y 向震动时屋架角点最大位移

Tab. 4 Maximum displacement of roof corners while seismic is input in Y direction

mm

节点号	振型分解反应谱法		EI Centro 波		Northridge 波		人工波	
	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y
105	0.377	2.607	1.277	5.641	1.120	7.896	0.607	4.596
106	0.633	3.031	1.646	6.717	2.077	9.061	1.196	4.981
123	0.084	3.034	0.302	6.703	0.222	9.037	0.212	4.992
126	0.150	2.616	0.374	5.639	0.452	7.909	0.285	4.599

大。将振型增加至 150 阶, X 向(结构纵向), Y 向(结构横向)质量参与系数分别增加至为 85.4% 及 88.6%。然而荷载效应几乎没有变化。可见高阶振型虽然所占质量参与系数较大, 但对结构的荷载效应贡献非常小。故对于本结构而言, 虽然质量参与系数不足 90%, 但截断误差已远小于 0.1, 认为截取振型数量已能满足计算精度^[10]。

3.2 分析结果对比

取屋架角点的最大位移以及柱间支撑的最大轴力作为对比指标进行振型分解反应谱法即时程分析法的对比。X 向震动及 Y 向震动时的位移结果数据见表 3 及表 4。振型分解反应谱法 X 向震动及 Y 向震动时柱间支撑的最大轴力分别为 22.8 kN, 18.1 kN。通过表 3、表 4 以及表 2 的数据可见, 无论是位移还是柱间支撑内力, 时程分析法均大于振型分解反应谱法。在 X 向震动时, 呈现 EI Centro 波 > Northridge 波 > 人工波 > 振型分解反应谱法的顺序, 在 Y 向震动时, 呈现 Northridge 波 > EI Centro 波 > 人工波 > 振型分解反应谱法的顺序。人工波是与振型分解反应谱法最接近的, 但地震效应仍然高出反应谱法 80% 以上

4 结论

本文通过振型分解反应谱法与弹性时程分析法的地震效应结果对比, 得出以下结论:

1) 对于换流站阀厅这种钢筋混凝土-钢混合结构, 振型分解反应谱法对于地震效应的计算结果可能偏低。在高烈度地区(地震效应可能其控制作用), 应采用时程分析法作为补充计算。

2) 当振型分解反应谱法取计算振型 50 阶及 150 阶时, X 向质量参与系数分别约为 30% 及 85%, 但计算得到的结构位移几乎没有区别。说明高阶振型对结构地震荷载效应贡献很小。

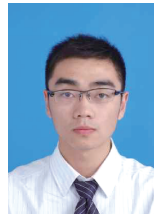
3) 本文仅分别在 X 向及 Y 向进项单向地震作用计算, 对于这类不规则结构后续研究可针对在双向地震作用下的地震效应。

参考文献:

- [1] 杨雪平, 张肖峰, 韦文兵. SRC 混合结构在大型风电场柔直户内换流站建筑中的应用 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 95-100.
YANG X P, ZHANG X F, WEI W B. Application of S-RC Hybrid structure in indoor substation of large wind farms transmission through VSC HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 95-100.
- [2] 魏文晖, 周兴乐, 胡孝平. 换流站阀厅结构地震效应动力分析 [J]. 建筑结构, 2010, 40(3): 75-77.
WEI W H, ZHOU X L, HU X P. Dynamic analysis on seismic behavior of inverter station valve hall [J]. Building Structure, 2010, 40(3): 75-77.
- [3] 刘宗辉, 吴轶, 蔡健, 等. 带悬挂阀体大型换流站阀厅结构地震反应分析 [J]. 建筑结构, 2012, 42(10): 119-123.

- LIU Z H, WU Y, CAI J, et al. Seismic response of valve-hall structure with suspended valves of large-scale converter station [J]. *Building Structure*, 2012, 42(10): 119-123.
- [4] 韦文兵, 吴轶, 蔡健, 等. 大型换流站阀厅结构地震响应弹塑性分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(5): 113-120.
- WEI W B, WU Y, Cai J, et al. Elasto-plastic analysis of seismic response of valve-hall structure with suspended valves of large-scale converter station [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2011, 31(5): 113-120.
- [5] 吴必华, 高湛, 陈俊, 等. ± 800 kV 换流站阀厅结构扭转变形分析 [J]. *电力建设*, 2011, 32(11): 28-30.
- WU B H, GAO Z, CHEN J, et al. Torison deformation of valve hall structure in ± 800 kV convertor station [J]. *Electric Power Construction*, 2011, 32(11): 28-30.
- [6] 杨志勇, 黄吉锋, 邵弘. 弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(增刊 S1): 213-217.
- YANG Z Y, HUANG J F, SHAO H. Discussion on linear and nonlinear time history analysis method [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(1): 213-217.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of building: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [8] 赵伯明, 王挺. 高层建筑结构时程分析的地震波输入 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 1111-1118.
- ZHAO B M, WANG T. Seismic waves input for the time-history analysis of high-rise building [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2010, 26(6): 1111-1118.
- [9] 俞欣, 阳光. 钢-混凝土混合结构阻尼分析方法 [J]. *建筑结构*, 2013, 43(增刊 S2): 467-471.
- YU X, YANG G. Damping analysis method on steel-concrete hybrid structure [J]. *Building structure*, 2013, 43(Sup. 2): 1111-1118.
- [10] 陈华霆, 谭平, 和雪峰, 等. 振型叠加法合理振型数目的确定 [J]. *应用力学学报*, 2017, 34(3): 404-409 + 603.
- CHEN H T, TAN P, HE X F, et al. Determination of reasonable node number for node superposition approach [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(3): 404-409 + 603.

作者简介:



HU L S

胡乐生(通信作者)

1986-, 男, 浙江乐清人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站、换流站土建设计工作(e-mail)hulesheng@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)



输横 ~ 潍坊 1000kV 特高压交流输电工程(设计)