

邢磊,贾宝新,邢锐.地震作用下钢框架高层结构的抗震性能研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1482-1487.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1482

XING Lei, JIA Baoxin, XING Rui. Seismic Performance of High-rise Steel-frame Structures under Seismic Action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1482-1487. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1482

地震作用下钢框架高层结构的抗震性能研究

邢磊¹, 贾宝新², 邢锐³

(1. 兴安职业技术学院, 内蒙古 兴安盟 137400; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000;
3. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 钢框架高层建筑结构是当前高层建筑设计中使用最为广泛的技术,为提升其抗震性能,本文研究将调谐质量阻尼器安装在钢框架高层建筑结构顶部,考虑到建筑空间需求、防止集中荷载和提升控制效果等因素,在相同楼层或同顶部接近楼层中设置数个较小的、频率一致的子控制装置,通过设置调谐质量阻尼器受控结构等效阻尼比求极值的方法,获取最优刚度与最优阻尼系数;将获取的结果在有限元软件中进行模态分析获取模态质量,实现钢框架高层建筑结构扭转振动的减振控制。实验结果表明,地震荷载下,该方法使得建筑结构顶层角位移峰值和角加速度峰值分别降低50%和30%左右,建筑结构响应下降19%~26%,提高了高层建筑结构的稳定性。

关键词: 地震; 钢框架; 高层建筑结构; 调谐质量阻尼; 控制; 减振

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1482-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1482

Seismic Performance of High-rise Steel-frame Structures under Seismic Action

XING Lei¹, JIA Baoxin², XING Rui³

(1. Xing'an Vocational and Technical College, Xing'an League 137400, Inner Mongolia, China;

2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: Today, high-rise steel-frame structures are widely used in high-rise building design. To improve the seismic performance of high-rise steel-frame buildings under earthquake action, we installed a tuned mass damper on the top of a high-rise steel-frame building structure. By considering several factors, i.e., the building space requirements, the prevention of concentrated load, and the improvement of control, we obtained the optimal stiffness and damping coefficient by setting the tuned mass damper to obtain the extreme equivalent damping ratio of the controlled structure. Then, we determined the modal mass by modal analysis of the obtained results using finite element software and achieved reduction control of the torsional vibration of the high-rise steel-frame building. The experimental results show that by using the proposed method, the peak

收稿日期: 2019-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774173)

第一作者简介: 邢磊(1984-),男(蒙古族),内蒙古乌兰浩特人,硕士,讲师,研究方向:大跨度空间结构研究。

E-mail: zixcan1001@163.com。

values of angular displacement and acceleration at the top floor of building structures can be reduced by 50% and 30%, respectively, and the response of the building structure can be decreased by 19—26%, which indicates that this method can improve the stability of the high-rise building structures.

Keywords: earthquake; steel frame; high-rise building structure; tuned mass damper; control; vibration reduction

0 引言

钢框架结构以其自重轻,施工方便等优势成为当前高层建筑设计中使用最为广泛的技术^[1],钢框架高层建筑能满足社会发展与人口城市化发展的需求。然而钢框架高层建筑结构中根据建筑高度情况,整体结构刚度分布呈现不均状态,易出现结构薄弱层,地震作用下较大概率出现鞭梢效应产生震害^[2],且地震作用下钢框架高层建筑结构的扭转振动难以避免,易加重结构震害,需通过阻尼器对钢框架高层建筑结构进行减振^[3],因此对钢框架高层建筑结构的阻尼控制研究十分重要。

钢框架高层建筑结构阻尼控制方法的研究较多,但均具有一定缺陷,例如文献[4]采用数值仿真法研究黏弹性碰撞调谐质量阻尼控制器的参数优化问题,数值仿真需要大量参数,对控制效果产生影响;文献[5]提出基于动力放大系数控制方法,通过弹塑性动力时程进行分析,利用三维弹塑性有限元分析模型,并且分析罕遇地震下采用调谐质量阻尼器的钢框架高层建筑结构变化过程;文献[6]将调谐质量阻尼器与调谐黏滞质量阻尼器相结合,共同控制钢框架高层建筑结构地震反应。

针对上述文献中存在的缺陷,提出地震作用下钢框架高层建筑结构调谐质量阻尼控制方法,实现更优的减振效果。

1 地震作用下钢框架建筑结构调谐质量阻尼控制

1.1 调谐质量阻尼优化控制

调谐质量阻尼器的组成部分包括惯性质量、刚度元件和阻尼元件等^[7],其主要作用是进行振动控制。在钢框架高层建筑结构中,调谐质量阻尼器多位于建筑结构顶部,以控制地震作用下建筑结构的振动响应。图 1 为钢框架高层建筑结构与调谐质量阻尼器示意图。

如图所示, z_T 表示调谐质量阻尼器的质量, l_T 表示刚度, z_1 表示钢框架高层建筑结构的第一阶振

型广义质量, $f_1(t)$ 表示第一阶振型广义荷载。

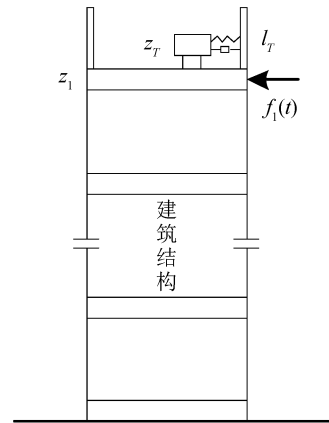


图 1 建筑结构-调谐质量阻尼器示意图

Fig.1 Schematic diagram of building structure-tuned mass damper

由于地震作用下,钢框架高层建筑结构的响应中最常见的是第一阶振型^[8],所以在计算钢框架高层建筑结构的地震振动反应只需考虑第一阶振型的影响。钢框架高层建筑结构第一阶模态在某种程度上能够转化为单自由度结构,图 2 为单自由度结构同调谐质量阻尼器构建的振动控制体系的运行简图,式(1)为其运动方程:

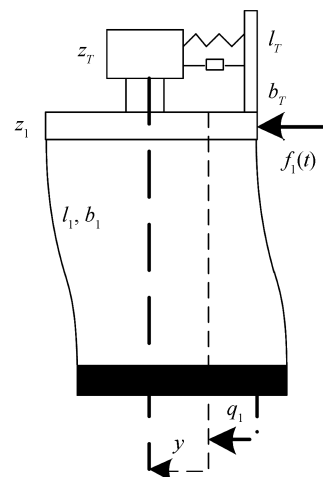


图 2 建筑结构第一阶模态-调谐质量阻尼器示意图

Fig.2 Schematic diagram of the first mode of building structure and the tuned mass damper

$$\begin{cases} z_T \ddot{y} + b_T \dot{y} + l_T y = -z_T \ddot{q}_1 \\ z_1 \ddot{q}_1 + b_1 \dot{q}_1 + l_1 q_1 - b_T \dot{y} - l_T y = f_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

式内: b_T 为阻尼系数; y 为惯性质量相对于其在钢框架高层建筑结构安装位置的位移; b_1 为广义阻尼系数; l_1 为广义刚度; \ddot{q}_1 、 \dot{q}_1 和 q_1 分别表示第一阶振型广义坐标下的位移、速度和加速度。将调谐质量阻尼器所在位置归一化作为振型归一化方法^[9], 也就是以 $1:q_1$ 表示的调谐质量阻尼器安装位置的振型系数描述钢框架高层建筑结构第一阶广义位移坐标。

针对钢框架建筑结构的震动控制, 调谐质量阻尼器通常安装在建筑结构顶端, 然而因建筑空间需求、防止集中荷载和提升控制效果等缘故^[10], 往往会在相同楼层或同顶部接近楼层中设置数个较小的、频率一致的子控制装置。若 $H_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 表示子控制装置在钢框架高层建筑结构中的安装高度, z_i 表示各子控制装置的质量, 那么全部子控制装置总等效质量计算公式如下:

$$z_T = \sum_{i=1}^n z_i [\pi_1(H_i)]^2 \quad (2)$$

式中: $\pi_1(H_i)$ 表示 H_i 高度处运算建筑结构第一阶振型广义质量过程中需要的归一化振型系数。

以 θ 、 ϵ_1 、 ϵ_T 、 α_T 、 ξ_1 和 ξ_T 分别表示调谐质量阻尼器惯性质量同建筑结构第一阶振型广义质量比、建筑结构第一阶振型圆频率、调谐质量阻尼器圆频率、调谐质量阻尼器调频比、建筑结构第一阶振型阻尼比和调谐质量阻尼器阻尼比, 公式表达分别为:

$$\theta = z_T / z_1 \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = \sqrt{l_1 / z_1} \quad (4)$$

$$\epsilon_T = \sqrt{l_T / z_T} \quad (5)$$

$$\alpha_T = \epsilon_T / \epsilon_1 \quad (6)$$

$$\xi_1 = b_1 / (2z_1 \epsilon_1) \quad (7)$$

$$\xi_T = z_T / (2z_T \epsilon_T) \quad (8)$$

在获取调谐质量阻尼器最优刚度与最优阻尼比时可采用设置调谐质量阻尼器受控结构等效阻尼比求极值的方法^[11], 计算过程如下:

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{1+0.5\theta}}{1+\theta} \quad (9)$$

$$\xi_T = \sqrt{\frac{\theta(1+0.75\theta)}{(1+\theta)(1+0.5\theta)}} \quad (10)$$

那么调谐质量阻尼器最优刚度如下:

$$l_T = z_T \epsilon_T^2 = z_T (\alpha_T \epsilon_1)^2 \quad (11)$$

最优阻尼系数如下:

$$b_T = 2z_T \epsilon_T \xi_T = 2z_T (\alpha_T \epsilon_1) \xi_T \quad (12)$$

1.2 钢框架高层建筑结构扭转振动的减振设计

控制建筑结构扭转振动是减振设计的主要目的^[12], 在钢框架高层建筑结构内设置调谐质量阻尼器, 基于 2.1 小节中的调谐质量阻尼优化控制方法获取的最优刚度与最优阻尼系数进行模态分析, 将地震作用下钢框架高层建筑结构的扭转振动控制在一定范围内。

利用有限元软件 ANSYS 分析计算钢框架高层建筑结构^[13-15], 假设钢框架高层建筑内柱同地面为刚性连接, 忽略钢框架受地基的影响, 自地面以上建模, 建筑结构同地面间为固定约束。由于钢框架高层建筑结构内框架梁与次梁截面尺寸较大, 所以构建有限元模型过程中, 可忽略楼板作用。采用有限元软件内不同的单元仿真钢框架高层建筑结构中包含的混凝土、钢筋、梁柱以及钢斜撑等力学特征有所差异的构件^[16-18]。依照钢框架高层建筑结构设计图, 以东西方向、南北方向和高度分别为 X 轴、Z 轴和 Y 轴, 输入地震波, 构建三维模型进行分析。

根据模态分析结果, 得到地震作用下钢框架高层建筑结构的扭转振动为第一振型, 由此可知需控制建筑结构的第一振型。模态分析时打开软件内振型型则化命令开关, 能够令软件将每阶模态的最大位移单位化, 获取模态质量^[19-21]。

利用 ANSYS 有限元软件模型运算得到地震波作用下, 钢框架高层建筑结构的第一阶模态质量为 4.06×10^6 kg, 调谐质量阻尼器的质量比为 0.063, 调谐频率比为 0.927。

将调谐质量阻尼器安装在钢框架高层建筑结构上分析建筑结构模态, 计算建筑结构前 10 阶的扭转振动频率。表 1 中描述的是建筑结构 1~5 阶的扭转振动频率。

表 1 结构 1~5 阶扭转振动频率

Table 1 The first five orders of torsional vibration frequencies of the structure

扭转振动频率	未加入调谐质量阻尼器	加入调谐质量阻尼器
一阶	0.424 05	0.343 10
二阶	0.444 07	0.346 55
三阶	0.568 50	0.352 53
四阶	1.356 02	1.037 35
五阶	1.442 31	1.063 01

2 实验分析

实验为验证本文提出的地震作用下钢框架高层

建筑结构调谐质量阻尼控制方法的控制效果,采用 ANSYS 有限元软件构建实验模拟钢框架各层建筑结构模型,并从模型的 X 方向输入 2 条不同地震波(分别为 0.3g 地震波 1 和 0.2g 地震波 2),分析采用

本文方法控制下的调谐质量阻尼器与未采用调谐质量阻尼器两种条件下建筑结构模型的动力时程,分别提取不同地震波下建筑结构顶层的角位移以及角加速度时程曲线,结果见图 3 和图 4。

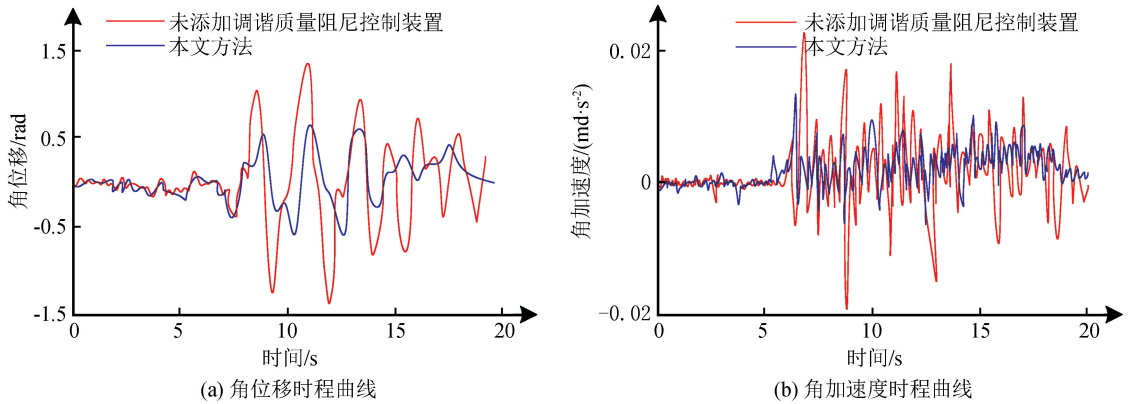


图 3 地震波 1 作用下的时程曲线

Fig.3 Time-history curves under the action of seismic wave 1

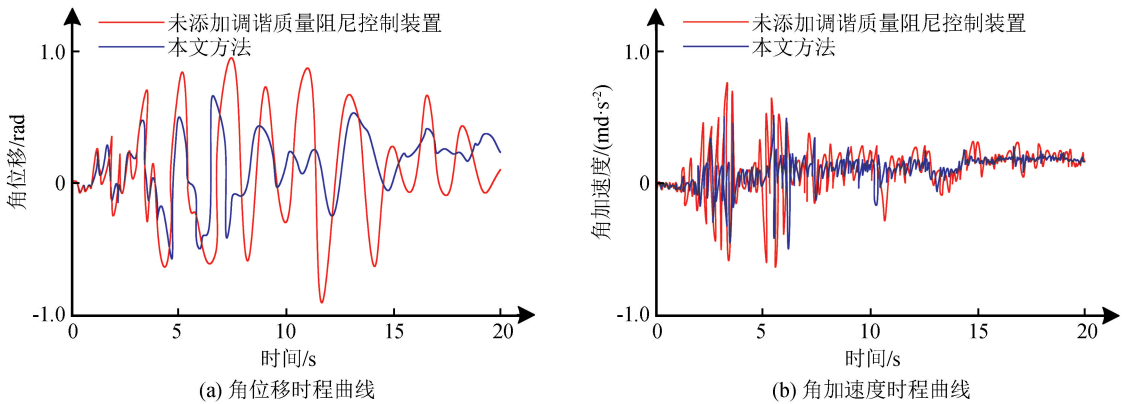


图 4 地震波 2 作用下的时程曲线

Fig.4 Time-history curves under the action of seismic wave 2

由图 3 和图 4 得到,相较于未采用调谐质量阻尼器的建筑结构时程曲线,本文方法控制下的调谐质量阻尼器建筑结构的时程曲线明显滞后,说明采用调谐质量阻尼器后,建筑结构顶层的角位移与角加速度受到一定程度控制。在输入地震波 1 时,建筑结构的角位移峰值下降 52.3%,角加速度峰值下降 32.4%;在输入地震波 2 时,建筑结构的角位移峰值下降 29.3%,角加速度峰值下降 19.1%。实验结果表明,采用本文方法控制下的调谐质量阻尼器能够很好的控制地震作用下钢框架高层建筑结构的扭转振动。

利用有限元分析软件计算地震作用下,实验高层建筑结构的地震荷载,以此计算钢框架高层建筑结构在地震荷载下的响应。对比本文方法和基于动力放大系数的控制方法得到的结果,验证了本文方

法的控制性能。两种控制方法下实验建筑结构在地震情况下的荷载以及结构响应情况如图 5 所示。

分析图 5 得到,在基于动力放大系数的控制方法控制调谐质量阻尼器时,建筑结构的地震荷载、楼层剪力、结构水平位移与结构地震加速度与未采用调谐质量阻尼器时相比均有所下降,下降幅度在 15%~21%之间;用本文方法控制调谐质量阻尼器时,建筑结构的地震荷载、楼层剪力、结构水平位移与结构地震加速度下降幅度更大,在 19%~26%之间。实验结果表明本文方法控制下的调谐质量阻尼器减振性能更好。

3 结论

钢框架高层建筑结构整体刚度分布不均,易出现结构薄弱层,地震作用下易出现鞭鞘效应,导致

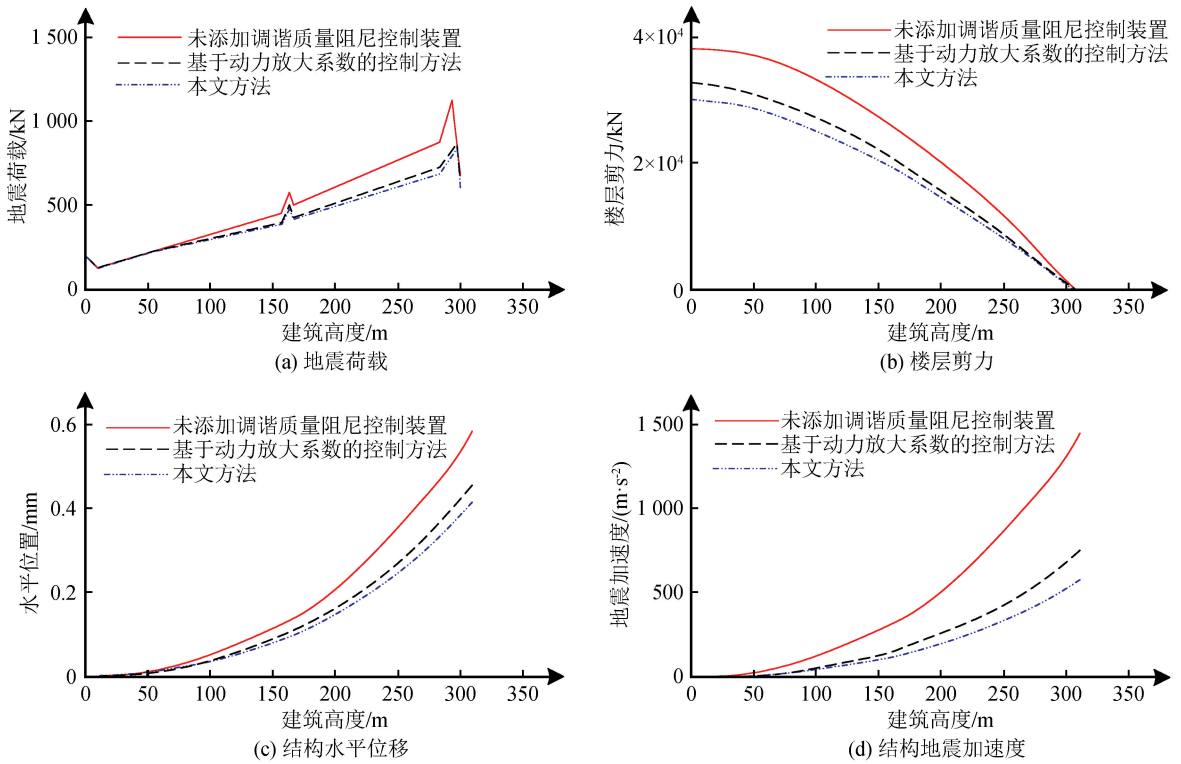


图5 地震荷载与结构响应

Fig.5 Seismic load and structural response

震灾。造成重大人员伤亡与经济损失的主要因素为房屋倒塌,因此,研究更有效的建筑结构抗振减振方法是亟待解决的问题。本文提出的钢框架高层建筑结构调谐质量阻尼控制方法,在调谐质量阻尼器中设置数个较小的、频率一致的子控制装置共同控制,获取调谐质量阻尼器最优刚度与最优阻尼系数;将获取的结果在有限元软件中进行模态分析,获取模态质量,实现建筑结构扭转振动的减振。实验结果表明地震作用下,本文方法控制下的钢框架高层建筑调谐质量阻尼器减振性能更好,建筑结构稳定性更强。

参考文献(References)

- [1] 鲁正,张鼎昌,吕西林.采用颗粒调谐质量阻尼器的钢框架结构振动台试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(4):10-17.
LU Zheng, ZHANG Dingchang, LU Xilin. Shaking Table Test of Steel Frame Structure with Particle Tuned Mass Damper [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 10-17.
- [2] 裴星洙,孙健杰.以带肋楼板为质量块形式的 TMD 设计方法研究[J].振动与冲击,2017,36(16):166-175.
PEI Xingzhu, SUN Jianjie. A Design Method of TMD with Ribbed Floor as the Mass [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 166-175.
- [3] 刘瑜新,闫安志,李庆波,等.高层工业煤气厂房在多重调谐质量阻尼器与黏滞流体阻尼器共同作用下的地震控制效果分析

[J].工业建筑,2015,45(4):62-66.

LIU Yuxin, YAN Anzhi, LI Qingbo, et al. The Control Effect Analysis of High-rise Industrial Gas Building in the Combined Action of Multiple Tuned Mass Dampers and Flow Viscous Damper under Earthquake Actions [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 62-66.

- [4] 赵培培,王振宇,薄景山.川滇甘陕地区设计谱的动力放大系数 [J].地震工程与工程振动,2018(3):171-177.

ZHAO Peipei, WANG Zhenyu, BO Jingshan. The Power Amplification Factor of the Design Spectrum in the Sichuan-Yunnan-Gansu-Gansu Region [J]. Seismic Engineering and Engineering Vibration, 2018 (3): 171-177.

- [5] 唐成,陈臻颖,王龙,等.罕遇地震作用下某超高层框架-核心筒结构混合减震控制研究[J].施工技术,2016,45(14):94-99.

TANG Cheng, CHEN Zhenying, WANG Long, et al. Study on Hybrid Vibration Control of the Super-high-rise Frame-core Tube Structure Under Rare Earthquake [J]. Construction Technology, 2016, 45(14): 94-99.

- [6] 张永春.基于转动惯性效应的调谐质量阻尼器控制方法[J].北京交通大学学报,2017,41(4):31-39.

ZHANG Yongchun. Control Method of Tuned Mass Damper Based on Rotating Inertial Effect [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(4): 31-39.

- [7] 张琪,吕西林.附加电涡流阻尼 TMD 的高层建筑结构振动台试验研究[J].结构工程师,2017,33(2):1-9.

ZHANG Qi, LU Xilin. Shaking Table Test on Tall Building Using Eddy-current TMD [J]. Structural Engineers, 2017, 33(2):

- 1-9.
- [8] 杨德健,王笑楠,宋佳楠.超高层建筑风振控制方案的对比分析[J].建筑科学,2017,33(3):113-118.
YANG Dejian, WANG Xiaonan, SONG Jianan. Comparison and Analysis of wind Vibration Control Schemes for Super High-rise Buildings[J]. Building Science, 2017, 33(3): 113-118.
- [9] 黄致谦,丁勤卫,李春.漂浮式风力机多频调谐质量阻尼器控制及其参数优化设计[J].动力工程学报,2019,39(1):72-78.
HUANG Zhiqian, DING Qinwei, LI Chun. Control and Parameter Optimization of the MTMD System for Floating Wind Turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(1): 72-78.
- [10] 徐怀兵,欧进萍.设置混合调谐质量阻尼器的高层建筑风振控制实用设计方法[J].建筑结构学报,2017,38(6):144-154.
XU Huaibing, OU Jinping. Design Method for Wind-induced Vibration Control of High-rise Buildings with Hybrid Tuned Mass Dampers[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 144-154.
- [11] 张玥,高向宇,王琳,等.TB结构风振控制性能有限元分析[J].北京工业大学学报,2016,42(9):1345-1354.
ZHANG Yue, GAO Xiangyu, WANG Lin, et al. FEM Analysis and Investigation on the Wind-induced Vibration Control of Type TB Structure[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(9): 1345-1354.
- [12] 张艳霞,陈媛媛,王宗洋,等.罕遇地震下自复位钢框架抗震性能参数分析[J].地震研究,2016,39(2):327-339.
ZHANG Yanxia, CHEN Yuanyuan, WANG Zongyang, et al. Analysis of the Seismic Performance Influence Factor of Self-centering Steel Frame under the Rare Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(2): 327-339.
- [13] 田婉婷,姚天宇.基于模糊控制的惯导内阻尼改进方法[J].计算机仿真,2015,32(10):327-330.
TIAN Wanting, YAO Tianyu. Improved Internal Damping Method with Fuzzy Controller for INS[J]. Computer Simulation, 2015, 32(10): 327-330.
- [14] 李宏描,周颖.黏滞阻尼器伸臂桁架布置对超高层结构减震性能影响研究[J].结构工程师,2015,31(3):63-68.
LI Hongmiao, ZHOU Ying. The Effect of the Configurations of Viscous Damped Outriggers on the Seismic Performance of a Super-Tall Building[J]. Structural Engineers, 2015, 31(3): 63-68.
- [15] 魏家昊,宋海洋,赵玉林,等.基于虚阻尼控制的 T-SAPF 滤波系统谐振抑制研究[J].电力工程技术,2018,37(3):54-60.
WEI Jiahao, SONG Haiyang, ZHAO Yulin, et al. Research on Resonance Suppression Strategy of T-SAPF Filtering System Based on Virtual Damping Control[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(3): 54-60.
- [16] 王惠,申波,刘盼盼,等.钢筋混凝土空腹夹层板起拱的静力性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2017,34(6):90-97.
WANG Hui, SHEN Bo, LIU Panpan, et al. Analysis of the Static Performance of Arch Camber of the Reinforced Concrete Open-web Sandwich Plate[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2017, 34(6): 90-97.
- [17] 刘坤,陈幼佳,章敏.地震条件下桥台主动土压力的合理简化计算方法[J].太原理工大学学报,2016,47(2):249-253.
LIU Kun, CHEN Y. Frank, ZHANG Min. Simplified Approach for Rational Determination of Seismic Induced Earth Pressure on Abutments[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(2): 249-253.
- [18] 张凝,黄勇,等.大跨度悬挑混凝土框架斜拉索结构设计与研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2015,32(5):83-88.
ZHANG Ning, HUANG Yong, et al. Design and Analysis of Large Span Cantilever Concrete Frame-Cable Structure[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2015, 32(5): 83-88.
- [19] 冯进,包张君,方有珍,等.卷边 PEC 柱(弱轴)钢梁组合框架层间抗震机理试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):309-316.
FENG Jin, BAO Zhangjun, FANG Youzhen, et al. Experimental Study on Seismic Mechanism of Inter-story Substructure of PEC Column (Weak Axis)-Steel Beam Composite Frame[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(4): 309-316.
- [20] 秦向辉,陈群策,孟文,等.大地震前后实测地应力状态变化及其意义—以龙门山断裂带为例[J].地质力学学报,2018,24(3):553-557.
QIN Xianghui, CHEN Qunce, MENG Wen, et al. Evaluating Measured In-Situ Stress State Changes Associated with Earthquakes and its Implications: A Case Study in the LONGMENSHAN FAULT ZONE[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(3): 553-557.
- [21] 王飞,张宗亮,王佳俊,等.基于改进 M5'-主成分模型树的高心墙堆石坝沉降变形预测[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):353-359.
WANG Fei, ZHANG Zongliang, WANG Jiajun, et al. Forecasting of the Settlement Deformation for High Core Rock-fill Dam Based on the Improved M5'-PCR Model Tree[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(4): 353-359.