

不规则建筑结构振动固有频率估算方法

陈亦文¹, 张锦光²

(1. 武汉大学 后勤保障部, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘要: 为更加准确估计不规则建筑结构振动固有频率, 研究了不规则建筑结构振动固有频率估算方法。本文采用有限元方法, 解决了不规则建筑结构振动固有频率难以准确估算的问题。该方法通过细致地将建筑结构分割成多个单元, 并计算每个单元的质量、刚度和阻尼, 然后将这些单元的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵按照节点连接关系进行组装, 从而得到整个结构的全局质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。这一全局矩阵有效地描述了整个建筑结构的力学性质, 并用于模拟结构在外部激励下的动态响应。基于上述全局矩阵, 本文进一步建立了描述结构振动的动力学方程, 从而实现了不规则建筑结构振动固有频率的估算。实验结果表明: 采用该方法估算的固有频率最大误差值仅为 0.02 Hz, 展现了极高的准确性。

关键词: 建筑技术; 不规则建筑; 结构振动; 固有频率; 估算方法; 振动行为特性

中图分类号: TU323.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2270-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240601

Estimation method of natural frequency of irregular building structure vibration

CHEN Yi-wen¹, ZHANG Jin-guang²

(1. Department of Logistics, Wuhan University, Wuhan 430070, China; 2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To more accurately estimate the natural frequency of vibration in irregular building structures, a method for estimating the natural frequency of vibration in irregular building structures is studied. This article uses the finite element method to solve the problem of difficulty in accurately estimating the natural frequency of vibration in irregular building structures. This method meticulously divides the building structure into multiple elements and calculates the mass, stiffness, and damping of each element. Then, the mass matrix, stiffness matrix, and damping matrix of these elements are assembled according to the node connection relationship to obtain the global mass matrix, stiffness matrix, and damping matrix of the entire structure. This global matrix effectively describes the mechanical properties of the entire building structure and is used to simulate the dynamic response of the structure under external excitation. Based on the above global matrix, this paper further establishes a dynamic equation to describe structural vibration,

收稿日期: 2024-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975435).

作者简介: 陈亦文 (1967-), 女, 高级工程师, 硕士. 研究方向: 工程维修与文物修缮. E-mail: 00003881@whu.edu.cn

通信作者: 张锦光 (1966-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 机械工程. E-mail: jgzhang@whut.edu.cn

thereby achieving the estimation of the natural frequency of irregular building structure vibration. The experimental results show that the maximum error value of the estimated natural frequency using this method is only 0.02 Hz, demonstrating extremely high accuracy.

Key words: building technology; irregular buildings; structural vibration; natural frequency; estimation method; vibration behavior characteristics

0 引言

现代建筑结构往往具有非线性、非均匀和非对称等特点,传统基于规则结构的振动分析方法难以准确预测其动态响应^[1,2]。因此,开发适用于不规则建筑结构的固有频率估算方法,对确保结构的安全性、舒适性和耐久性具有重要意义^[3],同时也是结构动力学和地震工程领域研究的热点问题。

目前有很多相关学者研究建筑振动固有频率估算方法,如汪益敏等^[4]在建筑不同位置布设振动传感器采集振动信号,将其输入 Matlab 仿真软件内,通过该仿真软件估算建筑振动固有频率。地铁车辆段咽喉区是一个复杂的振动环境,除了地铁车辆引起的振动外,还可能存在其他来源的振动噪声和干扰,这些噪声和干扰可能会混入采集到的振动信号中,导致信号失真,从而影响振动固有频率估算的精准性。Matsumoto 等^[5]建立不规则框架振动数学模型,通过不规则框架振动数学模型求解的方式得到建筑振动固有频率估算结果。在建立不规则框架振动数学模型时,往往需要对实际建筑结构进行一定程度的简化,可能导致模型无法完全反映实际结构的复杂性,从而影响振动固有频率的估算精度。李广生等^[6]利用轴对称边界元法描述建筑结构振动场,运用边界积分方程求解的方式得到建筑结构振动固有频率估算结果。轴对称边界元法假设了结构的轴对称性,但在实际应用中,圆柱壳结构可能受到复杂的边界条件影响,导致结构振动特性发生变化,从而影响固有频率的估算结果。牛国华等^[7]依据欧拉-伯努利梁理论,推导建筑结构梁的固有频率和振型,使用有限元方法对其进行了有效性验证。梁在振动过程中会受到阻尼的影响,导致振动能量的耗散。然而,欧拉-伯努利梁理论并没有考虑阻尼的影响,因此,理论估算的固有频率可能会偏高。

为了准确估算固有频率,本文研究不规则建

筑结构振动固有频率估算方法。运用有限元方法精确估算不规则建筑结构的振动固有频率,通过单元分割和矩阵组装构建全局力学模型,模拟结构动态响应,并建立动力学方程实现频率估算,有效解决了估算难题,提高了准确性。

1 结构振动固有频率估算

质量分布、刚度特性和阻尼特性等结构特征直接决定了不规则建筑结构在受到外部激励(如地震、风等)时的动态响应。其中,质量分布影响着结构的惯性,刚度特性决定了结构抵抗变形的能力,而阻尼特性则反映了结构在振动过程中能量耗散的能力^[8-10]。通过分析这些特征,可以更准确地预测结构在不同频率下的振动行为,从而评估其稳定性、耐久性和安全性,因此,首先分析建筑结构特性。

使用有限元方法(Finite element method, FEM)将连续的结构体分割成一系列小的、离散的、相互连接的单元,这些单元通常具有简单的几何形状(如三角形、四边形、四面体等),每个单元都有其自己的质量、刚度和可能的阻尼特性。

单元的质量通常集中在节点上,假设单元 e 的节点 i 和 j 的质量分别为 m_i 和 m_j ,则它们可以由单元的总质量 M_e 分配得到,表达式如下:

$$\begin{cases} m_i = f_i \cdot M_e \\ m_j = f_j \cdot M_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_i 和 f_j 分别为节点 i 和 j 质量分配的比例。

单元的刚度矩阵 K_e 是基于弹性力学原理来确定的,对于每个单元,定义其弹性模量 E ,结合单元的几何尺寸来计算单元刚度矩阵,以一维杆单元的刚度矩阵为例^[11,12],其表达式为:

$$K_e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: A 为杆的横截面积; L 为杆的长度。

单元阻尼通过瑞利阻尼模型来定义,表达式为:

$$C_e = \alpha M_e + \beta K_e \quad (3)$$

式中: α 和 β 为瑞利阻尼系数。

将所有单元的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵按照节点的连接关系进行组装,得到全局的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,这些全局矩阵描述了整个结构的力学性质^[13-15],通过以下二阶常微分方程来描述:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (4)$$

式中: M 为全局质量矩阵; C 为全局阻尼矩阵; K 为全局刚度矩阵; $\ddot{u}$ 为节点加速度向量; $\dot{u}$ 为节点速度向量; u 为节点位移向量; F 为外部激励向量。

式(4)描述了结构在外部激励下的动态响应,通过求解这个方程,可以得到结构在不同时间点的位移、速度和加速度响应,从而评估结构的动态性能和稳定性。

通过深入分析不规则建筑结构的振动行为特性,有利于更准确地理解建筑物的振动模式,进而为估算其振动固有频率提供有力依据。根据不规则建筑结构的振动行为特性,建立描述结构振动的动力学方程,表达式如下:

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (5)$$

式中: ϕ 为振型向量; ω 为固有频率,其表达式为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\lambda_n}{M}} \quad (6)$$

式中: λ_n 为第 n 阶特征值。根据式(6)即可得到不规则建筑结构的振动固有频率估计结果。

2 实验分析

使用本文方法展开不规则建筑结构固有频率估算测试,以验证本文方法的有效性。

2.1 不规则建筑概况

以某市图书馆不规则建筑作为研究对象,该图书馆总建筑面积达到3 755.80 m³,整体建筑设计精巧且实用。该建筑地上共6层,地下为1层,其中地下为停车场。在该图书馆建筑结构顶部,使用无混凝土楼板框架搭建了顶部流线结构,使该图书馆建筑呈现不规则状态。该建筑地上6层层高在3.8~4.2 m,整体建筑高度为24.64 m。给出该不规则建筑结构的详细情况,如表1所示。

图1为实验测试平台示意图。

以该建筑地上6层作为实验对象,将每层屋顶板位置作为实验点,使用本文方法估算6个实验点的固有频率,同时在测试平台上获取实验点位置实际固有频率,将该数值与本文方法估算值

表1 建筑不规则详细描述

Table 1 Detailed description of irregular buildings

不规则类型	不规则描述
扭转不规则	部分建筑结构在Y向的位移比数值为1.41,超过建筑结构标准位移比限值1.2
局部不规则	建筑空间内部分在跃层柱
楼板不连续	楼板之间最小有限宽度低于50%
偏心布置	最大偏心率数值为0.23,超过偏心率限值0.15
凹凸不规则	建筑顶部最大凹进尺寸比例超过55%

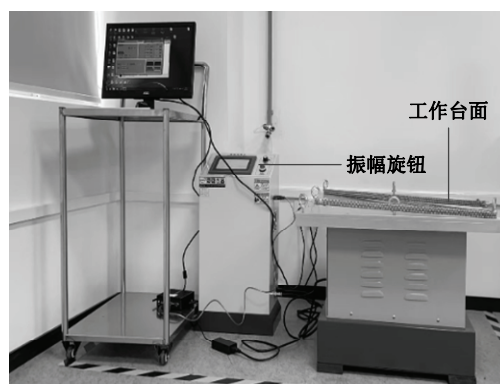


图1 实验测试平台

Fig. 1 Experimental testing platform

进行比较分析。

2.2 实验结果分析

首先验证本文方法对不规则建筑结构固有频率估算的准确性,估算结果如表2所示。

表2 不规则建筑结构固有频率估算结果精度验证

Table 2 Accuracy verification of natural frequency estimation results for irregular building structures

实验点编码	估算值/Hz	实际值/Hz
1	24.12	24.13
2	19.41	19.41
3	17.54	17.55
4	16.09	16.09
5	12.31	12.31
6	9.65	9.67

从表2来看,本文方法对不规则建筑结构固有频率的估计表现出了高度的准确性。其估计结果与实际值相比,最大差值仅为0.02 Hz,这一微小的差异充分证明了本文方法的有效性,反映了本文方法的准确性,说明其能够对不规则建筑结构固有频率的估计提供有力支持,为不规则建筑结构的振动分析提供准确可靠的估计结果。

继续使用本文方法给出该不规则建筑结构负1层、第1层、第3层和第6层振动固有频率估算结果,如图2所示。

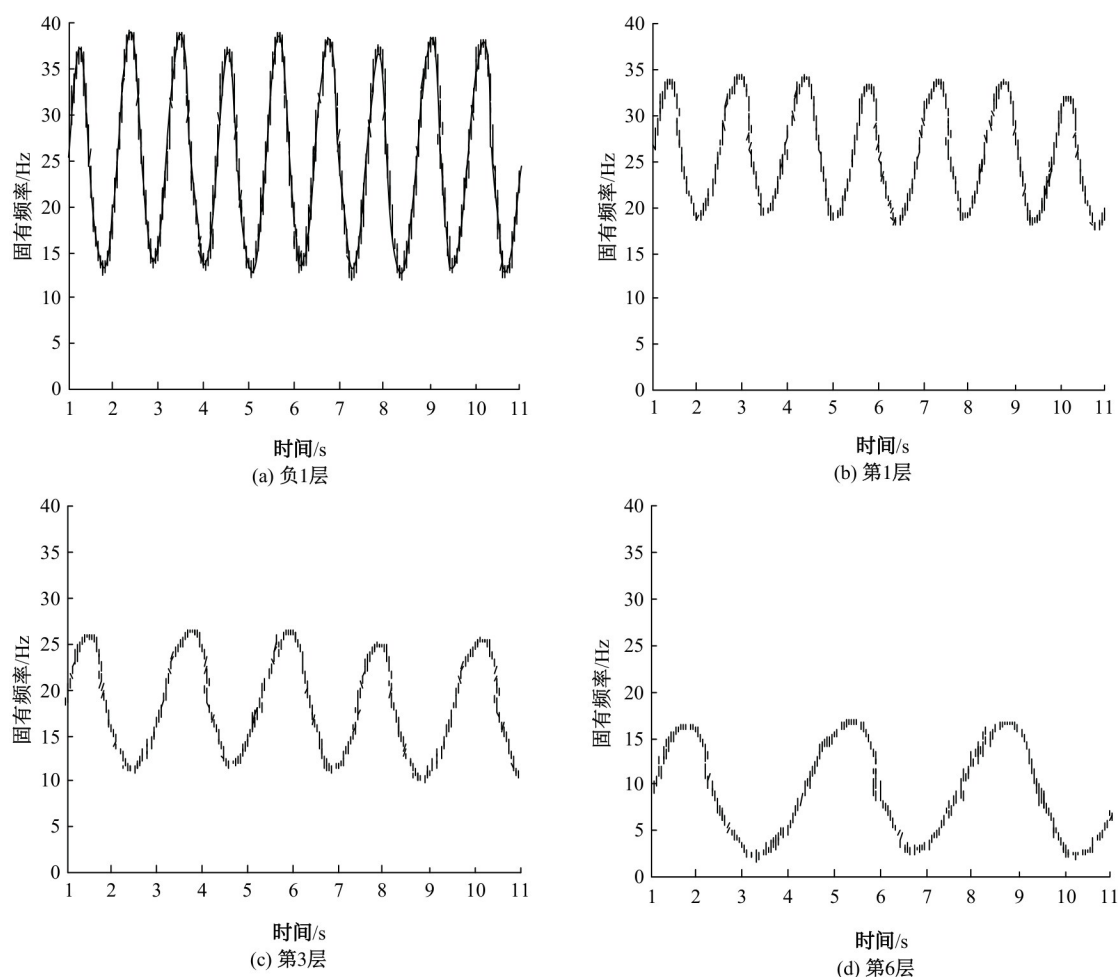


图2 不规则建筑不同楼层振动固有频率

Fig. 2 Natural frequencies of vibration on different floors of irregular buildings

不规则建筑结构振动固有频率出现上述特征的原因为:随着建筑高度的增加,结构的整体质量和刚度分布变得更加复杂和分散。这种复杂性导致结构在受到外部激励(如风、地震等)时,其振动响应的特性也会发生变化。更高的楼层意味着更大的质量和更长的跨度,使得结构在振动时具有更大的惯性和更慢的响应速度,因此,固有频率会降低,振动周期相应延长。由图2可知,不规则建筑在振动时的固有频率显示出特定的动态模式。其中,负1层结构的振动固有频率数值显著偏高,且波动幅度较大,这反映了该层结构在振动响应上的高灵敏度和不稳定性。此外,负1层结构的固有频率波动周期较短,意味着振动频率变化迅速。随着建筑楼层的增加,结构振动固有频率的数值逐渐降低,这表明较高楼层的结构在振动时表现出更为稳定的行为。与此同时,随着固有频率数值的降低,其波动周期也相应延长,这反映了高层结构在振动响应上的低频、长周期特性。由此可

知,本文方法测试得到的固有频率与实际情况较为吻合,说明其估算结果符合实际,具有较高的可信度。

不规则建筑材料的内部摩擦、结构之间连接摩擦等会出现一定的阻尼,阻尼会将不规则建筑结构固有振动频率能量转化成其他形式的能量而耗散,使不规则建筑结构固有振动频率出现衰减情况。在此以该不规则建筑的负1层、1层、3层和6层作为实验对象,使用本文方法估算其结构振动固有频率后,分析其结构振动固有频率衰减度,结果如图3所示。

分析图3可知,不规则建筑结构在振动过程中,其固有频率衰减度随时间延长而上升,这揭示了阻尼对结构振动的影响,即振动能量逐渐被阻尼消耗。然而,值得注意的是,图3还显示不同高度的结构振动固有频率衰减度几乎无显著差别,这一现象说明对于不规则建筑结构而言,其振动固有频率衰减度并不受建筑高度的影响。这可能

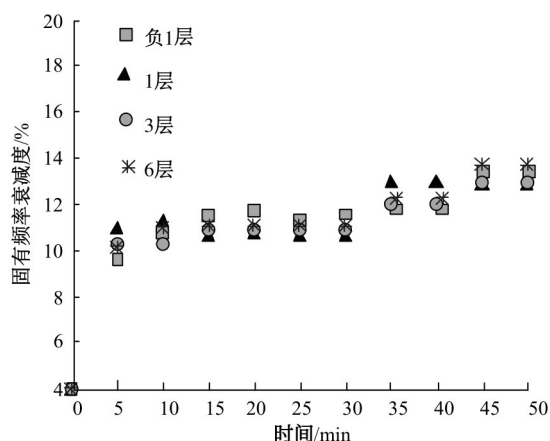


图3 不规则建筑结构振动固有频率衰减度

Fig. 3 Natural frequency attenuation of irregular building structure vibration

是因为不规则结构在设计中已经考虑了多种因素,使得其振动特性在不同高度上保持一致。

不规则建筑结构顶部做了不同坡度的造型,因此,其在X方向和Y方向上的结构振动固有频率存在一定差异,以该不规则建筑结构顶层作为实验对象,使用本文方法估算其顶部不同方向上的结构振动固有频率,结果如图4所示。

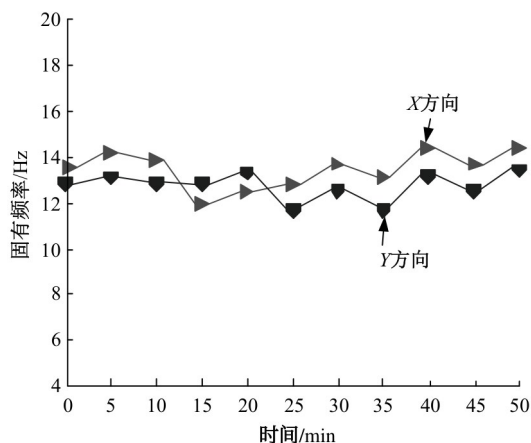


图4 不规则建筑结构顶层不同方向结构振动固有频率

Fig. 4 Natural frequencies of structural vibrations in different directions on the top floor of irregular building structures

分析图4可知,本文方法估算不规则建筑结构顶层不同方向上的结构振动固有频率,得到该建筑顶层不同方向上结构振动固有频率数值存在一定的差异,但差异不够明显,出现该种情况的原因在于:该不规则建筑顶层布局不同,导致其X方向和Y方向上的质量和刚度不够均匀,这种不均匀性使该不规则建筑结构顶层结构振动固有频率在不同方向上产生了差异。

3 结束语

本文提出了一种针对不规则建筑结构振动固有频率的估算方法,通过精确应用有限元方法将不规则建筑结构细分为多个单元,并细致计算每个单元的质量、刚度和阻尼,进而构建出能够全面描述整个结构力学性质的全局矩阵。该方法不仅成功克服了不规则建筑结构中复杂相互作用和耦合效应带来的估算挑战,而且实现了对振动固有频率的高精度估算,最大误差仅为0.02 Hz。这一创新方法不仅为建筑结构稳定性研究提供了坚实的理论依据,也为工程师和设计人员提供了一种有效的工具,以更准确地评估和优化不规则建筑结构的性能。

参考文献:

- [1] 李智超,郝育新. 微分求积法求解悬臂L梁固有振动特性研究[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(5): 525-534.
Li Zhi-chao, Hao Yu-xin. Study on natural vibration characteristics of L-shaped cantilever beams with the differential quadrature method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2023, 44(5): 525-534.
- [2] 袁嘉瑞,丁虎,陈立群. 微曲输流管道振动固有频率分析与仿真[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(7): 719-726.
Yuan Jia-rui, Ding Hu, Chen Li-qun. Analysis and simulation of natural frequencies of slightly curved pipes[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2022, 43(7): 719-726.
- [3] 马林林,薛建阳,张锡成,等. 考虑榫卯松动的古建筑木结构地震响应分析[J]. 振动工程学报, 2023, 36(4): 1083-1093.
Ma Lin-lin, Xue Jian-yang, Zhang Xi-cheng, et al. Seismic responses of ancient timber structures with looseness mortise-tenons[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(4): 1083-1093.
- [4] 汪益敏,陶子渝,邹超,等. 地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动传播规律[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 112-121.
Wang Yi-min, Tao Zi-yu, Zou Chao, et al. Vibration propagation law within over-track buildings above throat area of metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 112-121.
- [5] Matsumoto Y, Kunimatsu S. Evaluation of human perception thresholds of transient vibrations for the assessment of building vibration[J]. Applied Acoustics,

- 2022, 197(8): No. 108906.
- [6] 李广生, 陈美霞, 原春晖. 基于陆上振动测试的水中圆柱壳结构声响应计算方法[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 252-260.
- Li Guang-sheng, Chen Mei-xia, Yuan Chun-hui. Calculation method of underwater acoustic and vibration response of cabin segment based on onshore vibration test [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(6): 252-260.
- [7] 牛国华, 王刚锋, 王剑. 组合L型变截面梁的自由振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 228-234.
- Niu Guo-hua, Wang Gang-feng, Wang Jian. Analysis of free vibration characteristics of composite L-shaped variable cross-section beam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 228-234.
- [8] 贾宝新, 周志扬, 苑文雅, 等. 基于等效质点峰值振动速度的高铁线路周边建筑结构振动评价研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2696-2706.
- Jia Bao-xin, Zhou Zhi-yang, Yuan Wen-ya, et al. Vibration evaluation of buildings around high-speed railway line based on equivalent peak particle velocity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2696-2706.
- [9] 晁艳, 宋晓东, 黄江涛. 桩基施工对建筑结构环境振动影响分析[J]. 结构工程师, 2022, 38(6): 84-91.
- Chao Yan, Song Xiao-dong, Huang Jiang-tao. Study of influence of pile driving on environmental vibration of building[J]. Structural Engineers, 2022, 38(6): 84-91.
- [10] 刘霖, 牟思桐. 水平地震作用下严寒地区建筑结构振动响应分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(3): 689-695.
- Liu Lin, Mu Si-tong. Vibration response of building structures in severe cold regions under the action of horizontal earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(3): 689-695.
- [11] 邳伦海, 詹娟娟, 李阿龙. 基于改进EWT的超高层建筑模态参数识别[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2022, 45(1): 45-52.
- Zhi Lun-hai, Zhan Juan-juan, Li A-long. Modal parameter identification of super high-rise buildings based on improved EWT[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2022, 45(1): 45-52.
- [12] 薛红京, 束伟农, 陆新征, 等. 某高度522 m超高层结构振动台试验与理论分析研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(4): 63-73.
- Xue Hong-jing, Shu Wei-nong, Lu Xin-zheng, et al. Shaking table test and theoretical analysis on a 522 m super high-rise structure[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 63-73.
- [13] 郑国琛, 曹凌涛, 吴应雄, 等. 考虑高阶效应的高层基础隔震结构振动与控制[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 93-103.
- Zheng Guo-chen, Cao Ling-tao, Wu Ying-xiong, et al. Vibration and control of high-rise base-isolated structures considering high-order effects[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 93-103.
- [14] 雷鸣, 尹思阳, 王德玲, 等. 基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(9): 2573-2580.
- Lei Ming, Yin Si-yang, Wang De-ling, et al. Seismic performance simulation of high-rise concrete core tube based on static nappe analysis algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(9): 2573-2580.
- [15] 张泽鹏, 王仁义. 建筑混凝土轻钢结构损伤可靠检测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 256-260.
- Zhang Ze-peng, Wang Ren-yi. Simulation study on damage reliability detection of building concrete light steel structure[J]. Computer Simulation, 2024, 41(1): 256-260.