

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202002001



# 遗传算法的平板建筑结构瞬态 隔振性能边界条件优化方法

欧达毅

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于遗传算法及平板建筑构件瞬态振动响应时域有限元模型,提出一种提高平板建筑构件瞬态隔振性能的边界条件优化方法.有限元模型可模拟任意弹性边界条件下平板结构的瞬态振动响应,并在此基础上引入遗传算法,以边界条件为优化变量、瞬态振动响应最小化为优化目标,对边界参数进行最优解搜索,最大程度提升平板建筑构件对已知瞬态激励的隔振性能.实例结果表明:运用所提优化方法可以在不改变平板自身参数(材质、尺寸、厚度)前提下,通过边界条件的优化设计,有效提升平板建筑构件的瞬态隔振性能.

**关键词:** 平板建筑构件; 瞬态响应; 建筑声学; 优化设计; 边界条件; 遗传算法

**中图分类号:** TU 112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)04-0474-04

## Boundary Condition Optimization Method for Transient Vibration Isolation of Plate-Like Building Structures Using Genetic Algorithm

OU Dayi

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on genetic algorithm and time-domain finite element model for transient vibration simulation of plate-like building elements, a boundary condition optimization method for improving plate-like structural transient vibration isolation performance was proposed. The finite element model can simulate the transient vibration response of plate structures with arbitrary elastic boundary conditions, and then the genetic algorithm was introduced, this optimization method can take boundary conditions as the optimization variables, take the transient vibration response minimization as the optimization objective. The boundary parameters are searched for the optimal solution. The known transient excitations vibration isolation performance of plate-like building structure components was improved maximally. The results of numerical studies show the proposed optimization method can effectively improve the transient vibration isolation performance of a plate-like building structure by optimizing its boundary conditions without changing the plate's intrinsic parameters (material, size and thickness).

**Keywords:** plate-like building structure; transient response; architecture acoustics; optimization design; boundary condition; genetic algorithm

**收稿日期:** 2020-02-02

**通信作者:** 欧达毅(1982-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑隔振隔声、建筑(城市)声环境的研究. E-mail: oudayi\_hqu@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51578252);福建省社会科学规划项目(FJ2017C018);福建省泉州市高层次人才创新创业项目(2017G039)

平板结构被广泛应用于建筑工程领域,门、窗、墙体、楼板等均可视为平板建筑构件,关于平板结构声振响应特性的预测模型<sup>[1-2]</sup>、测试技术<sup>[3]</sup>和评价方法<sup>[4]</sup>一直备受关注.边界条件是平板结构声振响应特性的重要因素.随着各种近似计算方法不断发展,研究复杂边界条件对平板结构声振响应特性的影响逐渐成为可能<sup>[5-7]</sup>.相关研究不仅证实了边界条件的重要作用,而且在结构声振响应优化中有应用价值.当平板结构本身的设计形式无法改变时,如平板材质、尺寸、厚度不可变的情况,对边界条件的优化可成为改善结构隔振性能的一种有效途径<sup>[7-8]</sup>.

相对于稳态响应问题,对建筑结构瞬态特性的研究仍较为缺乏.在现实生活中,很多激励源和噪声源都具有明显的瞬态特性<sup>[9-12]</sup>.已有研究结果表明,通过边界条件的优化设计,可有效提升建筑结构瞬态隔声隔振特性<sup>[8]</sup>.然而,平板结构的边界参数优化属于多参数并行寻优问题,穷举法等常规方法具有局限性.鉴于此,本文在平板建筑构件瞬态振动响应时域有限元模型的基础上,引入遗传算法,提出一种提高平板建筑构件瞬态隔振性能边界条件的优化方法.

### 1 优化方法

弹性边界支承平板结构示意图,如图 1 所示.平板建筑构件瞬态振动响应时域有限元模型为

$$M\ddot{\boldsymbol{\delta}}(t)+C\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{\delta}(t)=\boldsymbol{F}(t)+\boldsymbol{T}\boldsymbol{p}_0(t), \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\delta}}(t+\Delta t) &= \dot{\boldsymbol{\delta}}(t) + [(1-\gamma)\ddot{\boldsymbol{\delta}}(t) + \\ &\gamma\ddot{\boldsymbol{\delta}}(t+\Delta t)]\Delta t, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\delta}(t+\Delta t) &= \boldsymbol{\delta}(t) + \dot{\boldsymbol{\delta}}(t)\Delta t + \\ &\left[ \left( \frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\boldsymbol{\delta}}(t) + \alpha \ddot{\boldsymbol{\delta}}(t+\Delta t) \right] (\Delta t)^2. \end{aligned} \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $M$ 、 $C$ 和 $\boldsymbol{K}$ 分别为平板结构质量、阻尼和刚度矩阵,阻尼 $C=2\eta/\omega_0$ , $\eta$ 为平板阻尼因子, $\omega_0$ 为平板最低阶固有频率; $\ddot{\boldsymbol{\delta}}(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)$ 和 $\boldsymbol{\delta}(t)$ 分别为平板结构在 $t$ 时刻的瞬时节点加速度、节点速度,以及结点位移矢量; $\boldsymbol{F}(t)$ 为平板结构在 $t$ 时刻受到的瞬时外力激励矢量; $\boldsymbol{p}_0(t)$ 为平板结构在 $t$ 时刻受到的瞬时入射声波激励矢量; $\boldsymbol{T}$ 为入射声压转换为等效节点力的转换矩阵; $\alpha$ 和 $\gamma$ 分别为 Newmark 法时间积分常数.

刚度矩阵 $\boldsymbol{K}^{[8]}$ 可分解成平板刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_p$ 和边界刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_b$ 两个部分.边界刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_b$ 由平动刚度 $k_t$ 和旋转刚度 $k_r$ 两个参数确定,通过调整这两个参数,可实现对任意弹性边界支承的模拟.在数值模拟中,通常对边界刚度进行归一化操作,取

$$\bar{k}_t = k_t L_x^3 / D, \quad \bar{k}_r = k_r L_x / D.$$

上式中: $D$ 为矩形板抗弯刚度.

由式(1)~(3)可知:平板结构的振动特性除了与平板结构的材质、尺寸、厚度有关,还与其边界安装条件相关.

以达尔文生物进化理论为指导的遗传算法作为一种全局随机搜索方法,具有大多数其他算法所没有的鲁棒性、自适应性、全局优化性和隐含并行性,使其在处理多参数寻优问题上得到广泛应用<sup>[13]</sup>.引入遗传算法,将其与平板建筑构件瞬态振动响应时域有限元模型相结合,对平板结构边界参数进行最优解搜索.

优化算法示意图,如图 2 所示.

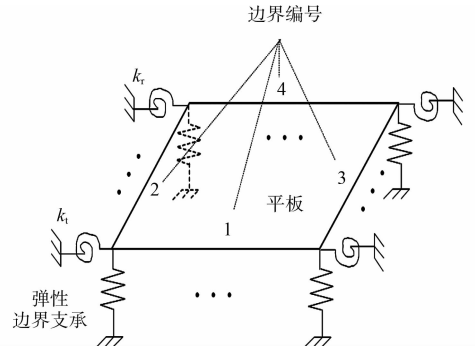


图 1 弹性边界支承平板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plate-like structure with elastic boundary supports

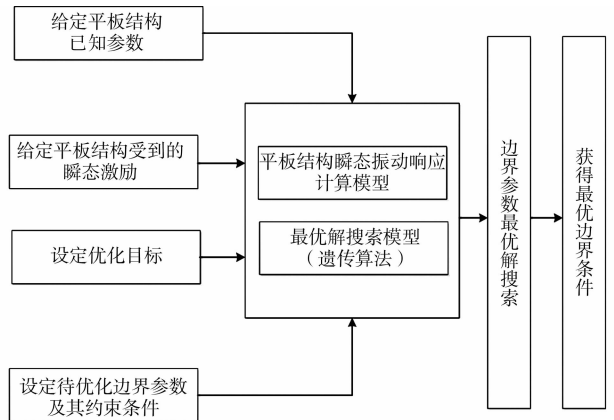


图 2 优化算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optimization algorithm

2 优化实例

有限元模拟参数<sup>[8]</sup>均为玻璃薄板参数,平板构件可在建筑外窗使用<sup>[14]</sup>;时域有限元模型网格数为 100(10×10);Newmark 法时间积分常数  $\alpha$  和  $\gamma$  分别为 0.25 和 0.5;遗传算法中初始化种群数为 100,以连续迭代 10 次内最优解均未发生变化作为算法终止条件。

2.1 瞬时节点加速度最小化

实例一. 优化目标是通过边界条件最优解搜索,获得结构瞬态振动指标  $A_{\max}$  最小化( $A_{\max}$  为平板结构的最大节点加速度级), $A_{\max}=20\lg(\max(|\ddot{\delta}|))$ 。

已知平板的长度为 1.2 m,宽度为 1.2 m,厚度为 5 mm,密度为  $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,杨氏模量为 65 GPa,泊松比为 0.25,阻尼因子为 0.01,则优化参数为  $\bar{k}_{t2}, \bar{k}_{t3}, \bar{k}_{t4}, \bar{k}_{r2}, \bar{k}_{r3}$  和  $\bar{k}_{r4}$ ;约束条件为  $\bar{k}_{t1}=\bar{k}_{r1}=\infty, \bar{k}_{t2}=\bar{k}_{t3}=\bar{k}_{t4}\in[0, \infty], \bar{k}_{r2}=\bar{k}_{r3}=\bar{k}_{r4}\in[0, \infty]$ ;优化目标为“最大节点加速度级( $A_{\max}$ )最小化”。

计算结果表明:当边界参数( $\bar{k}_t$  或  $\bar{k}_r$ )值大于  $1\times 10^{10}$ ,继续增大其数值对结构瞬态响应特性已无影响。因此,在计算过程中,统一以  $1\times 10^{10}$  代替  $\infty$ (下同)。假设该平板结构的中心位置受到瞬时外力激励,实例一所受瞬态激励时域波形图,如图 3 所示。图 3 中: $F$  为瞬态激励。该激励为轮胎撞击器产生的瞬时激励,常用作建筑楼板撞击声隔声实验的激励源<sup>[15]</sup>。

运用所提优化模型进行最优解搜索,且优化算法独立运行 5 次,所得优化效果非常一致。5 次运行结果中, $A_{\max}$  优化结果的最大差值为 0.04 dB,可确保最优解的准确性。优化结果比直接取边界条件约束范围的上限值和下限值的  $A_{\max}$  结果分别减小了 5.19,6.33 dB。

2.2 瞬时节点位移最小化

实例二. 优化目标是通过边界条件最优解搜索,获得结构瞬态振动指标  $d_{\max}$  最小化( $d_{\max}$  为平板结构的最大节点位移), $d_{\max}=20\lg(\max(|\delta(t)|)/10^{-6})$ 。

已知平板长为 1.5 m;宽为 1.5 m;厚为 5 mm;密度为  $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;杨氏模量 65 GPa;泊松比为 0.25;阻尼因子为 0.01;优化参数为  $\bar{k}_{t2}, \bar{k}_{t3}, \bar{k}_{t4}, \bar{k}_{r2}, \bar{k}_{r3}$  和  $\bar{k}_{r4}$ ;约束条件为  $\bar{k}_{t1}=\bar{k}_{r1}=\infty, \bar{k}_{t2}\in[0, \infty], \bar{k}_{t3}\in[0, \infty], \bar{k}_{t4}\in[0, \infty], \bar{k}_{r2}\in[0, \infty], \bar{k}_{r3}\in[0, \infty]$  和  $\bar{k}_{r4}\in[0, \infty]$ ;优化目标为“最大节点位移( $d_{\max}$ )最小化”。假设该平板结构受到的瞬时激励为垂直入射的瞬时平面声波,实例二所受瞬态激励时域波形图,如图 4 所示。图 4 中: $p$  为瞬态入射声波。该激励为实测塑胶炸药 C4 爆炸瞬时声波<sup>[16]</sup>。

运用所提优化模型进行最优解搜索,且优化算法独立运行 5 次,所得优化效果非常一致。5 次运行结果中, $d_{\max}$  优化结果的最大差值为 0.02 dB。该优化结果比直接取边界条件约束范围的上限值和下限值的  $d_{\max}$  结果分别减小了 4.67,4.23 dB。

3 结束语

提出一种提高平板建筑构件瞬态隔振性能的边界条件优化方法。该方法在平板建筑构件瞬态振动响应有限元分析模型的基础上,引入遗传优化算法,以弹性边界条件为优化变量,瞬态振动响应最小化为优化目标,进行平板结构边界参数最优解搜索,可实现平板结构对已知瞬态激励的隔振性能最大化。运用该方法进行了实例分析,以平板结构受瞬时外力(或瞬时入射声波)激励下的“最大节点加速度级”

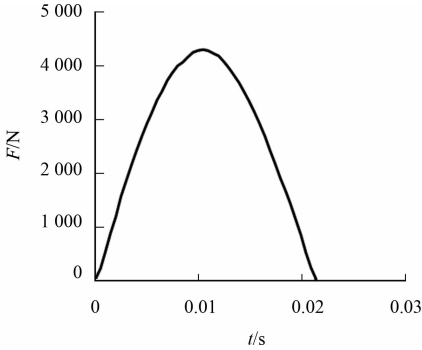


图 3 实例一所受瞬态激励时域波形图  
Fig. 3 Time history of transient excitation in case 1

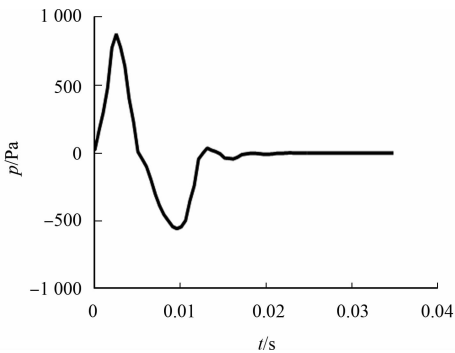


图 4 实例二所受瞬态激励时域波形图  
Fig. 4 Time history of transient excitation in case 2

(或“最大节点位移”)最小化为优化目标,对平板结构的边界条件进行优化设计。结果表明:通过合理的边界条件设计能有效提升平板建筑构件的瞬态隔振性能,同时,也证明了该方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] XIN Fengxian, LU Tianjian. Analytical and experimental investigation on transmission loss of clamped double panels: Implication of boundary effects[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(3): 1506-1517. DOI: 10.1121/1.3075766.
- [2] OU Dayi, MAK C M, DENG S M. Prediction of the sound transmission loss of a stiffened window[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2013, 4(34): 359-368. DOI: 10.1177/0143624412445932.
- [3] 欧达毅. 考虑加筋效应的薄板结构低频声传递损失[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 649-652. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201611056.
- [4] OU Dayi. Low frequency sound insulation analysis and evaluation of stiffened building structures[J]. Building & Environment, 2015, 94: 802-809. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.05.016.
- [5] XUE Kai, WANG Jiufa, LI Qihong, *et al.* An exact series solution for the vibration of mindlin rectangular plates with elastically restrained edges[J]. Shock and Vibration, 2014, 2014(1): 1-11. DOI: 10.1155/2014/286710.
- [6] LI W L. Vibration analysis of rectangular plates with general elastic boundary supports[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(3): 619-635. DOI: 10.1016/s0022-460x(03)00562-5.
- [7] 欧达毅. 建筑窗体低频隔声性能综合分析[J]. 建筑科学, 2013, 29(12): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2013.12.002.
- [8] OU Dayi, MAK C M. The effects of elastic supports on the transient vibroacoustic response of a window caused by sonic booms[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(2): 783-790. DOI: 10.1121/1.3613696.
- [9] AKAY A. A review of impact noise[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 64(4): 977-987. DOI: 10.1121/1.2773928.
- [10] 马大猷. 室内断续噪声的有源控制[J]. 声学学报, 1995, 20(2): 106-114.
- [11] OU Dayi, MAK C M. A review of prediction methods for the transient vibration and sound radiation of plates[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2013, 32(4): 309-322. DOI: 10.1260/0263-0923.32.4.309.
- [12] OU Dayi, MAK C M. Transient vibration and sound radiation of a stiffened plate[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 19(9): 1378-1385. DOI: 10.1177/1077546312450731.
- [13] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [14] 吴思璇. 天津市典型道路交通噪声频谱及建筑外窗隔声性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [15] PARK B, JEON J Y, PARK J. Force generation characteristics of standard heavyweight impact sources used in the sound generation of building floors[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(6): 3507-3512. DOI: 10.1121/1.3500690.
- [16] HOLE R L. Effects of strong sound velocity gradients on propagation of low-frequency impulse sound: Comparison of fast field program predictions and experimental data[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(3): 1443-1453. DOI: 10.1121/1.420059.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)