

文章编号:1671-6833(2012)01-0040-03

大跨度屋盖风振控制的遗传算法研究

孙文彬¹, 孙芳锦^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对大跨度屋盖的遗传算法风振控制进行了研究, 提出了一种采用主动调谐质量阻尼器(ATMD)进行风振控制的方法. 首先介绍了风振控制理论, 然后提出了大跨度屋盖风振控制的遗传算法, 将位移和加速度响应均方差作为控制效率的评价标准, 并给出了该方法的实施步骤. 最后将该方法应用于一大跨度平屋盖的风振控制, 计算了屋盖上典型测点的位移和加速度均方差值, 并与采用其他控制方法的计算结果进行了比较. 结果发现笔者提出的遗传算法控制器准确高效, 其中位移和加速度均方差分别平均减少了53.8%和44.6%, 结构竖向位移峰值平均减少65.7%, 加速度峰值平均减少56.2%, 有效地控制了屋盖结构的风振响应. 结果证明遗传算法可以准确预测相关参数, 进而有效地控制大跨度屋盖风振响应, 为工程实践提供了相应参考.

关键词: 大跨度屋盖; 风振控制; 遗传算法; ATMD; 主动控制

中图分类号: TU312.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.010

0 引言

近年来大跨度屋盖越来越多地应用到体育场、机场等公共建筑中. 大跨度屋盖由于其柔性大、质量轻、阻尼低等特点成为风敏感结构. 风荷载是引起大跨度结构破坏的主要原因, 因此为保证大跨度屋盖的安全使用, 对大跨度屋盖风振响应进行控制是非常有必要的. 目前控制研究大都集中在高层和桥梁的地震控制中, 对于大跨度屋盖的风振控制研究还是非常有限的. 应用于土木工程结构的控制方法比较多, 近年来采用遗传算法对结构控制的参数选择、能量吸收装置设置方式等进行控制研究成为了一种新的趋势^[1-4]. 文献[1]采用了最小传递函数方法研究了阻尼器位置放置方式的影响. 文献[2-4]研究了在剪切型框架中粘滞阻尼器的优化放置方法. 但是这些研究都主要是高层建筑的地震控制. 对于大跨度屋盖的风振控制还没有涉及.

笔者基于遗传算法提出了大跨度屋盖风振控制的一种方法. 该方法将遗传算法应用于主动调

谐质量阻尼器中, 将位移和加速度响应均方差作为控制效率的评价标准, 并给出了该方法的实施步骤. 通过大跨度屋盖的风振响应控制算例对控制效果进行分析, 并将结果与其他方法所得结果进行了比较分析.

1 大跨度屋盖的风振控制基本理论

大跨度屋盖的运动控制方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f, \quad (1)$$

式中: M 是质量矩阵; C 是结构阻尼矩阵; K 是结构刚度矩阵; x 是屋面位移向量; f 是脉动风荷载, 由下式给出

$$f = \rho C_{Li} A_i V v(t), \quad (2)$$

式中: ρ 表示空气密度; C_{Li} 表示平均风压系数, 一般由风洞实验获得; A_i 是与 i 点相关的屋面面积; V 是该高度处的平均风速; $v(t)$ 是该高度处的脉动风速.

采用模态分解法求解方程(1), 假设 $\{X\} = [\varphi] \{Y(t)\}$, 那么对于第 j 模态有

$$M_j \ddot{Y}(t) + C_j \dot{Y}(t) + K_j Y(t) = P_j(t), \quad (3)$$

收稿日期: 2011-08-29; 修订日期: 2011-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108345)

作者简介: 孙文彬(1963-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为混凝土结构抗风及材料, E-mail: lnfxswb@sina.com; 通信作者: 孙芳锦, 主要研究方向为混凝土结构抗风及材料.

$$Y(t) + 2\beta_j\omega_j\dot{Y}(t) + \omega_j^2Y(t) = \frac{P_j(t)}{M_j}, \quad (4)$$

式中: $\omega_j = \sqrt{K_j/M_j}$ 是第 j 振型的基本频率; β_j 是结构阻尼率; M_j, C_j, K_j 分别是广义质量、阻尼和刚度。

基于 Davenport 阵风响应理论, 最大位移响应可以写为

$$X_{\max} = \mu\sigma_x, \quad (5)$$

式中: μ 是峰值系数, 此处取 $\mu = 3.5$; σ_x 是位移响应的均方差值。

σ_x 可以通过在频域内进行 Fourier 转换获得, 那么拥有 q 个自由度的位移响应均方差可以写为

$$\sigma_{xq}^2 = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}^2 \frac{\sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^n \varphi_{rj}\varphi_{kj}\rho^2 V_r V_k C_r C_k A_r A_k}{M_j^2} \times \int_0^\infty \frac{\sqrt{S_r^*(\omega)S_r^k(\omega) \cdot \text{coh}(r, k, \omega)}}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\beta_j\omega_j)^2} d\omega, \quad (6)$$

式中: 如果第 r 和第 k 个自由度分别在节点 i 和 j 上, 那么 $\varphi_{rj}, \varphi_{kj}$ 就是第 j 振型的第 r 和第 k 个自由度分量; V_r 和 V_k 分别是节点 i 和 j 的平均风速; A_r 和 A_k 是关于节点 i 和 j 的屋面面积; C_r 和 C_k 分别是风洞试验中测得的气动力系数。

加速度均方差响应可以写为

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^4 \sigma_{xj}}, \quad (7)$$

式中: σ_{xj} 是第 j 振型的加速度响应均方差。

2 基于遗传算法的大跨度屋盖风振控制

遗传算法 (GA) 在土木工程领域的应用较多^[5-6], 它的优点是算法中无需使用梯度或 Hessian 矩阵。它在计算中采用群的概念, 而不是单一的求解。此处将位移和加速度响应均方差作为控制效率的评价标准, 利用遗传算法采用主动调谐质量阻尼器 (ATMD) 进行风振控制。遗传算法控制器的实施步骤如图 1 所示。

3 算例分析

3.1 数值计算结果

将上述算法应用于一大跨度平屋盖的风振响应控制中, 以验证笔者方法的正确性及效率。大跨度屋盖如图 2 所示^[7], 其上有 5 个典型测点。弹性模量 $E = 7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 材料密度 $\rho = 2420 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\gamma = 0.31$ 。模拟 B 类地貌, 屋面上

各点的风速时程由 AR 模型获得, 时间间隔 0.05 s, 考虑脉动风的空间相关性, 受篇幅所限, 这里不给出各点的模拟风速时程。风向角为 0° , 风速为 25 m/s。

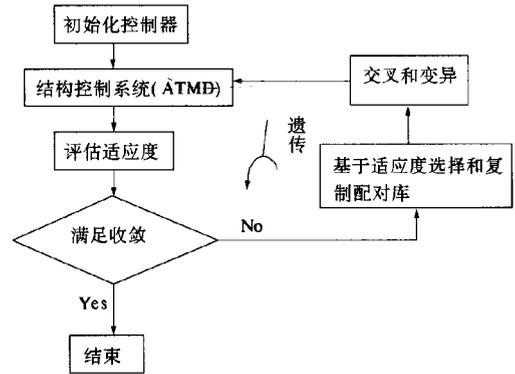


图 1 基于遗传算法的风振控制算法步骤

Fig. 1 GA based controller design procedures

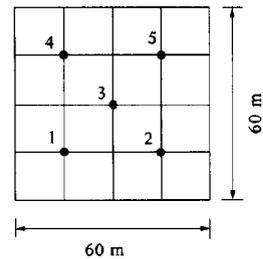


图 2 大跨度平屋盖计算简图

Fig. 2 Computation model of long-span flat roof

这里基于遗传算法的屋盖风振响应控制采用 MATLAB7.0 进行数值模拟, 表 1 为 GA 控制器中的基本参数。

表 1 遗传算法中的基本参数

Tab. 1 Parameters used for GA operation

参数	种群数量	遗传数量	二进制代码长度	交叉率	变异率
初始值	50	200	10	1.0	0.4

表 2 给出了屋盖上典型测点采用笔者控制方法计算得到的位移和加速度响应均方差值, 由于该屋盖的动力响应主要受前 6 阶振型影响, 因此这里考虑了位移和加速度响应均方差前 6 阶振型的相互作用。同时表 2 中还给出了笔者方法与不采用任何控制手段及采用线性二次型高斯 (LQG) 控制器的计算结果的对比。

还进行了典型测点竖向位移和加速度在未受控制和采用笔者方法控制时的对比研究。受篇幅所限, 这里只给出了中心点 3 的对比结果, 如图 3

所示.

表2 采用不同控制方法的屋盖风
振响应均方差值对比

Tab.2 Root mean square values comparison
under various controllers

测点	未控制		LQG 控制器		笔者方法(GA 控制器)	
	位移 $\sigma_x/$ cm	加速度 $\sigma_{\dot{x}}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	位移 $\sigma_x/$ cm	加速度 $\sigma_{\dot{x}}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	位移 $\sigma_x/$ cm	加速度 $\sigma_{\dot{x}}/$ ($m \cdot s^{-2}$)
1	1.185	0.108	0.501	0.081	0.474	0.071
2	1.462	0.113	0.691	0.052	0.672	0.067
3	1.483	0.129	0.824	0.069	0.653	0.075
4	2.049	0.156	1.210	0.067	1.004	0.081
5	2.161	0.167	1.168	0.084	1.124	0.070

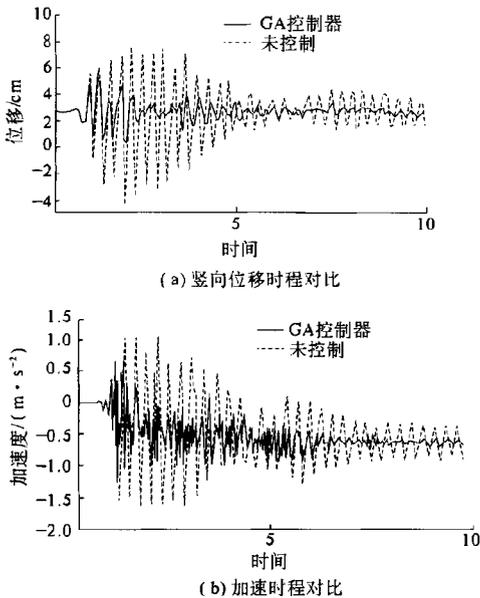


图3 采用控制和未控制时测点3的时程对比

Fig.3 Uncontrolled and controlled vertical displacement
and acceleration time histories of point 3

3.2 结果分析

(1)从表2中可以看出,采用笔者遗传算法的控制方法计算得到的典型测点的位移和加速度响应均方差值与采用LQG控制器得到的结果比较接近,从而证明了笔者方法的正确性.同时还可以看出,采用笔者方法进行控制的优越性:采用LQG控制器时,测点的位移和加速度均方差分别平均减小了47.5%和43.7%;采用笔者方法时,测点的位移和加速度均方差分别平均减小了53.8%和44.6%,从而证明了本方法进行风振控制的高效性.

(2)从图3中可以看出,与没有任何控制手

段的情况相比,本方法的使用大大减小了测点3的竖向位移和加速度.研究中发现对于屋面上的其他测点也是如此,通过计算发现,本方法可以平均减少测点竖向位移峰值达65.7%,减少加速度峰值达56.2%.

4 结论

研究了大跨度屋盖进行风振响应控制的遗传算法.将遗传算法应用于主动调谐质量阻尼器(ATMD)中,给出了采用遗传算法进行风振控制的步骤,并采用算例对该方法的准确性和效率进行了分析,得到如下结论:

(1)基于遗传算法的控制方法有明显的优越性,算例中屋盖上测点的位移和加速度均方差分别平均减小了53.8%和44.6%,结果优于LQG控制器的计算结果;

(2)采用基于遗传算法的控制方法,屋盖测点竖向位移峰值平均减少65.7%,加速度峰值平均减少56.2%,说明它在控制结构的风振响应上是高效的;

(3)与其他控制方法计算结果的对比,基于遗传算法的控制方法准确,适用于大跨度屋盖的风振控制.

参考文献:

- [1] TROMBETTI T, SILVESTRI S. Added viscous dampers in shear-type structures: the effectiveness of mass proportional damping[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(2): 275 - 313.
- [2] SILVESTRI S, TROMBETTI T, CECCOLI C. Optimal insertion of viscous dampers into shear-type structures: seismic performances and applicability of the MPD system[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, 13WCEE, Canada, 2004.
- [3] SILVESTRI S, TROMBETTI T. Optimal insertion of viscous dampers into shear-type structures: dissipative properties of the MPD system[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, 13WCEE, Canada, August, 2004; 1 - 6.
- [4] TROMBETTI T, SILVESTRI S. On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with rayleigh damping systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 292(2): 21 - 58.
- [5] HOLLAND J H. Genetic algorithms[J]. Scientific American, 1992(4): 44 - 50.

(下转第50页)

Preparation and Properties of Al_2O_3 -SiC-SiAlON Composites

LIU Xin-hong, ZHOU Chao-jie, ZHANG Lei

(High Temperature Ceramics Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450052 China)

Abstract: The composite specimens were prepared using fused corundum, micro-powder Al_2O_3 , silicon powder and bauxite-based β -SiAlON as starting materials and resin as binder. The phase composition, microstructure, physical properties, high temperature modulus of rupture (HMOR) and thermal shock resistance (TSR) of the specimens after firing at 1500 °C have been studied. The results show: (1) The Al_2O_3 -SiC-SiAlON composite can be prepared by corundum and Si firing at high temperature in carbon embedded condition and β -SiAlON addition can promote Si reaction. This composite is sintered well at 1500 °C. (2) HMOR and TSR increase with the increase of Si content, thermo-mechanical properties is further increased with appropriate β -SiAlON addition. (3) The improved thermo-mechanical properties may be attributed to Si reacting with C, CO and N_2 to form SiC whisker or fiber and flocculent-like O'-SiAlON which would fill in the interstices of corundum skeleton structure, forming interlocking network structure, thus creating strengthening and toughening effect.

Key words: Al_2O_3 -SiC-SiAlON composite; SiC; β -SiAlON; thermo-mechanical property; microstructure

(上接第 42 页)

1997.

[6] GEN M, CHENG R. Genetic algorithms and engineering Design[M]. New York: John Wiley&Sons, Inc.,

[7] 陆锋, 大跨度平屋面结构的风振响应和风振系数研究[D]. 浙江大学建筑工程学院博士论文, 2001.

Study on Genetic Algorithms in Controlling of Wind-induced Vibration of Long-span Roofs

SUN Wen-bin¹, SUN Fang-jin^{1,2}

(1. Institute of Civil Engineering & Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A genetic algorithm based control design is proposed to control wind-induced vibration of long-span roof in this study. An active tuned mass damper (ATMD) controller is designed using the proposed methodology. Wind-induced control theory is presented firstly. The root mean square of displacement and acceleration responses are used as the evaluation criteria of control efficiency. Then procedures for control of wind-induced vibration of long-span roofs based on genetic algorithms are given. Finally the method is applied to the control of wind-induced responses of a long-span roof. The root mean square of displacement and acceleration responses is calculated for some typical measuring points. And the results are compared with those obtained from other controller. The overall results of GA-based controller are accurate and efficient. The root mean square values of displacement and acceleration of the sample points are reduced by 53.8% and 44.6% on average, respectively. GA-based controller reduces peak vertical displacement and acceleration of all sample points by 65.7% and 56.2% on average, respectively. GA-based control design methodology can obviously reduce wind-induced vibration of long-span roofs. As an accurate and effective tool in wind-induced vibration control, the proposed method can provides some references for practical projects.

Key words: long-span roofs; wind-induced vibration control; genetic algorithm; ATMD; active control