

基于随机概率密度演化的结构-TMD 参数优化

孙 永^{1,2}, 秦 云¹, 王宪杰^{1,2}, 项梦洁¹, 陈彦昇¹

(1. 云南大学 建筑与规划学院, 昆明 650091; 2. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 基于地震载荷随机性的事实, 以及传统的采用特定地震波研究结构控制条件具有严重缺陷的问题, 本文提出以结构最大层间位移作为控制指标, 基于概率密度演化理论, 采用改进遗传算法对 TMD 参数进行优化的设计方法. 该方法结合改进遗传算法以及概率密度演化方法, 充分考虑了随机性对结构影响的本质, 根据随机载荷下结构-TMD 控制体系中结构层间位移响应和动力可靠度的前后对比, 说明优化方法的优越性. 以三层剪切型混凝土框架结构-TMD 参数优化为例, 验证所提方法的正确性, 为随机激励下的多自由度结构-TMD 系统优化设计提供了一条新的解决途径.

关键词: 随机性; 可靠度; 概率密度演化方法; 改进遗传算法; TMD 结构参数优化

中图分类号: TU **文献标志码:** A

Structure-TMD Parameters Optimization Based on the Stochastic Probability Density Evolution

SUN Yong^{1,2}, QIN Yun¹, WANG Xianjie^{1,2}, XIANG Mengjie¹, CHEN Yansheng¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Considering the randomness of seismic loads and the serious defects brought by the adoption of some particular seismic wave excitation in the structural control simulation, the maximum inter-layer displacement was chosen as the control index and based on the probability density evolution theory, a modified genetic algorithm was proposed to optimize TMD parameters. In the developed method, the improved genetic algorithm was combined with the probability density evolution method, and the nature of the effect of randomness on the structure was taken into full consideration. The superiority of the optimization method was illustrated by the comparison between the inter layer displacement response and the dynamic reliability under random loads of the original and optimized structure-TMD systems. A three-layer shear concrete frame structure with TMD system was given as an example to verify the correctness of the proposed method, which

收稿日期: 2017-04-06

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2016zzx005); 云南大学理工科校级项目(KC1710166); 广西重点实验室系统性研究资助项目(2016ZDK009); 云南大学研究生科研创新基金资助项目(ynuy2016115)

第一作者: 孙 永(1992-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 结构优化. E-mail: 751537272@qq.com

通信作者: 王宪杰(1984-), 男, 讲师. 研究方向: 结构分析、计算与设计理论. E-mail: xianjiawang@ynu.edu.cn

provides a new way for the optimal design of the structure-TMD systems under stochastic excitation.

Keywords: *stochastic; reliability; probability density evolution method; improved genetic algorithm; TMD structural parameters optimization*

调频质量阻尼器(TMD)可以通过调整弹簧系数与阻尼系数的大小使吸振阻尼器尽量接近激振频率,从而起到减小建筑结构在风、地震等外部激励下的振动响应的作用,是一种有效、常用的被动控制装置.为此,合理地选择 TMD 参数显得尤为重要.在实际工程中,地震等随机激励往往成为建筑结构破坏的主因,因此带来的结构-TMD 参数的不确定性优化选择成为研究的重点.

近几十年,由于力学、数学以及计算机的进展,确定性激励下的结构优化设计和随机激励下线性优化得到了快速而广泛的发展.但是,随机激励作用下的结构非线性响应约束条件求解困难,成为随机优化设计问题的瓶颈.

在结构全寿命周期内,由于载荷的随机性,结构将不可避免地进入非线性阶段.然而,为了处理问题的方便,人们常常将随机振动与随机结构人为割裂开来,不考虑两者的耦合效应.其中,具有代表性的有功率谱分析、矩演化方法与 FPK 方程(Fokker Planck Kolmogorov equation)等^[1-2],而在随机结构分析中具有代表性的方法主要有随机模拟方法、随机摄动技术与正交多项式展开理论等.这些方法主要集中在平稳激励和低自由度情况,而对于多自由度非线性系统,结构非线性与随机性的耦合效应对随机激励下随机结构非线性分析带来了巨大困难,而陈建兵等^[3-4]提出的广义概率密度理论,其演化方程的维数与原系统的维数无关,因此,求解多自由度问题更为方便.而且既可以直接获得随机结构响应的概率密度函数,又可以同时考虑结构特性与激励的随机性.

本文通过基于概率密度演化理论的动力可靠度计算方法求解结构的位移可靠度,将随机激励下结构-TMD 系统优化设计的位移约束拓展到可靠度层面,准确描述随机激励下结构-TMD 系统的约束条件.从而建立了随机激励下多自由度剪切型框架结构-TMD 体系的优化模型.并采用遗传算法对 TMD 结构的质量、阻尼与刚度进行优化设计.实现了概率密度演化方法在随机激励下 TMD 建筑结构优化设计中的成功应用.

1 结构-TMD 系统优化模型

如图 1 所示,在框架结构顶层安装 TMD 控制装置的多自由度 TMD 建筑结构形式^[5-7],图 1 中 m_i 表示结构体系第 i 层质量,假设主结构受地震激励,则 TMD 装置运动方程为

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = -m_d(\ddot{x}_g + \ddot{x}_n) \quad (1)$$

式中: m_d, c_d, k_d 分别为 TMD 的质量、阻尼与刚度; $\ddot{x}_d, \dot{x}_d, x_d$ 分别为 TMD 减震控制装置的惯性质量相对主体结构顶层的加速度、速度与位移; $\ddot{x}_n$ 表示主体结构顶层相对于地面的加速度; $\ddot{x}_g$ 为地震地面运动加速度.

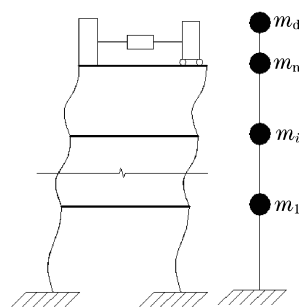


图 1 多层剪切模型

Fig.1 Multilayer shear model

由于在工程实际中结构的基础尺寸远远小于地震波的波长,而且在每次地震中造成结构破坏的最主要因素是剪切地震波的作用,所以,假设建筑结构为剪切型模型,即各层之间的梁和板的刚度无穷大,不考虑结构层间的梁板转动变形,则主结构的运动方程为

$$[M_0]\{\ddot{X}\} + [C_0]\{\dot{X}\} + [K_0]\{X\} = \{F_{cd}\} + \{F_{kd}\} - [M_0]\{I_n\}\ddot{x}_g \quad (2)$$

式中: $[M_0], [C_0], [K_0]$ 分别表示主体结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\{X\}$ 为主结构的位移列向量; I_n 为单位列向量.

TMD 控制装置对主结构的阻尼调制作用及刚度调制作用分别为

$$\mathbf{F}_{cd} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{n-1} \\ c_d \dot{x}_d \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{kd} = \begin{Bmatrix} \{0\}_{n-1} \\ k_d x_d \end{Bmatrix}$$

综合式(1)和式(2),可列矩阵方程式(3).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{C}$ 分别表示多层剪切型框架结构-TMD 系统的的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$ 分别为多层框架结构-TMD 系统各个质点相对于地面的位移向量、速度向量和加速度向量; $\mathbf{I}$ 表示 $n+l$ 阶的单位列向量.

$\mathbf{M} = \text{diag}(\mathbf{M}_j(i)), j = 1, 2, 3, \dots, n, \mathbf{M}_j(i)$ 为结构各层质量.

而结构-TMD 系统的刚度矩阵

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_0 m_1 + a_1(k_1 + k_2) & -a_1 k_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -a_1 k_2 & a_0 m_2 + a_1(k_2 + k_3) & -a_1 k_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 k_3 & a_0 m_3 + a_1(k_3 + k_4) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_0 m_{n-1} + a_1(k_{n-1} + k_n) & -a_1 k_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -a_1 k_n & a_0 m_n + a_1 k_n + c_d - c_d & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, a_0, a_1 为不依赖于频率的常数,通常采用实测的结构阻尼比来确定,或通过给定的 2 个振型的阻尼比的值来确定.

采用哈密顿体系和 Wilson- θ 法对 TMD 框架结构进行了随机激励作用下的弹性动力时程分析,由层单元刚度矩阵,利用刚度集成法求得主结构刚度矩阵,叠加 TMD 系统的刚度,最后求得整体结构的刚度矩阵.质量矩阵采用集中质量法和瑞雷阻尼,采用 Wilson- θ 时程积分法对框架结构动力方程进行求解.

2 概率密度演化理论

对于一个包含 n 个自由度的系统,引入随机向量后,将运动方程^[8-9]可以改写为

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\Theta})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\Theta})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}(\boldsymbol{\Theta})\mathbf{X} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\Theta}, t) \quad (6)$$

式中: $\ddot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{X}$ 分别是主体结构的 n 维加速度、速度、位移向量;激励中的基本随机向量 $\boldsymbol{\Theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$, s 表示随机变量的数量.

对于一般的工程问题,方程(6)的解存在且唯一地依赖于随机向量 $\boldsymbol{\Theta}$.更一般地,系统的任意物理量 $\mathbf{Z}(t) = (Z_1, Z_2, Z_m)^T$ (如位移、速度等)均可表示为 $\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\Theta}, t), \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{h}(\boldsymbol{\Theta}, t)$.

$\mathbf{K} =$

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & k_{n-1} + k_n & -k_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n + k_d - k_d & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, k_i 表示第 i 层刚度.

主结构的阻尼形式采用瑞雷阻尼,针对设置 TMD 减震控制装置的结构体系,结构-TMD 体系的阻尼矩阵

本文选取的物理量是结构层间位移响应,根据概率守恒原理, $(\mathbf{Z}(t), \boldsymbol{\Theta})$ 所构成的系统概率是恒定不变的,联合概率密度函数 $p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t)$ 满足广义概率密度演化方程见式(7).广义概率密度演化方程的推导过程详见文献[10].

$$\frac{\partial p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \dot{\mathbf{Z}}(\boldsymbol{\Theta}, t) \frac{\partial p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t)}{\partial z_j} = 0 \quad (7)$$

式中, $\dot{\mathbf{Z}}(t)$ 为 $\boldsymbol{\Theta} = \theta$ 时 $\mathbf{Z}(t)$ 的速度.

式(7)联合概率密度函数 $p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t)$ 的初始条件可以表示为

$$p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t_0) = p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t) \delta(\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_0) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{Z}_0$ 为 $\mathbf{Z}(t)$ 的确定性初始值; $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数.

而对联合概率密度函数进行 θ 积分,可得到只关于 $\mathbf{Z}(t)$ 的概率密度函数

$$p_{\mathbf{Z}}(z, t) = \int_{\Omega_{\theta}} p_{\mathbf{Z}\boldsymbol{\Theta}}(z, \theta, t) d\theta \quad (9)$$

式中, Ω_{θ} 为 θ 的分布区域.

通过在基本随机向量 θ 的分布空间 Ω_{θ} 中选取连串离散代表点 $\theta_q = (\theta_{q,1}, \theta_{q,2}, \dots, \theta_{q,s})$, $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$, n_{sel} 为离散代表点数目,同时,可以相应地确定每个离散代表点的赋予概率 $P_q = \int_{V_q} p_{\boldsymbol{\Theta}}(\theta) d\theta$, $q = 1, 2, \dots, n_{\text{sel}}$, 这里的 V_q 代表离

散体体积.

通过对概率密度方程的求解,可以很简便地求出在随机作用下的线性与非线性动力反应的概率密度,从而获得二阶及更高阶的统计矩,完整地反映结构体系状态运动规律的随机信息.

3 位移可靠度约束

通常情况下,在结构优化设计中,以结构的最大弹性层间位移限值作为控制指标建立位移极限约束方程.

$$\mu_j \leq \mu_\beta, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (10)$$

式中: μ_j 为第 j 层层间位移响应最大值; μ_β 为给定的结构层间位移限值.

假设结构体系的层间位移响应需满足约束条件 $\mu_\gamma \leq \mu_j \leq \mu_\beta$, 则在 t 时刻, 结构体系层间位移满足约束条件的概率为

$$\int_{\mu_\gamma}^{\mu_\beta} p_{\mu_j}(\mu_j, t) d\mu_j \quad (11)$$

式中, $p_{\mu_j}(\mu_j, t)$ 为结构体系在随机激励下第 j 层层间位移概率密度函数.

在基于首次超越破坏准则的条件下, 结构位移响应满足约束条件的概率与结构在 t 时刻的位移可靠度 $p(\mu_\gamma \leq \mu_j \leq \mu_\beta, t)$ 相等, 即

$$p(\mu_\gamma \leq \mu_j \leq \mu_\beta, t) = \int_{\mu_\gamma}^{\mu_\beta} p_{\mu_j}(\mu_j, t) d\mu_j \quad (12)$$

若要使结构体系在 $0 \sim t$ 时间段内各个时间点的位移可靠度值不小于 $p_{\min}$, 只需要求解出结构体系在激励时间段内所有时间点的位移可靠度, 使之满足

$$p(\mu_\gamma \leq \mu_j \leq \mu_\beta, 0 \sim t) \geq p_{\min} \quad (13)$$

当采用方程(7)来求解 $p_{\mu_j}(\mu_j, t)$ 时, 参照文献[11], 可以对结构施加一个边界吸收壁条件:

$$p_{\mu_j, \theta}(\mu_j, \theta, t) = 0, \mu_j \in (-\infty, \mu_\gamma) \cup (\mu_\beta, +\infty) \quad (14)$$

这表明一旦不满足约束条件, 则概率进入失效区域, 且失效区域内的概率将不再返回有效区域, 即该部分的概率被完全吸收, 随之可靠度降低.

4 遗传算法

基于随机激励作用下多自由度 TMD 框架结构非线性响应特点, 以位移可靠度为约束条件, 采用遗传算法求解 TMD 的最优质量 m_d , 其模型定义为

$$\min f(x), \quad x = x_1, x_2, \dots, x_n$$

目标函数 $f(x)$ 为结构体系的顶层层间位移响应. 为了方便遗传算法的应用, 将有约束问题转化为无约束问题^[12], 当第 i 个个体约束条件满足时, $C_i = 0$; 否则, $C_i = 0.2$, 该无约束问题为

$$\min \varphi(x) = f(x)(1 + PC)$$

式中, 参数 P 表示违约对于目标函数的影响, 本文 P 取值为 1, 表示违约一次, 目标函数增大, 其代表的个体更容易被淘汰.

在迭代过程中, 需要对每一代种群个体的适应度进行评价, 其适应度

$$\mu_i = 1 - \frac{\varphi_i(x)}{\varphi(x)_{\min} + \varphi(x)_{\max}}$$

式中, μ_i 为该种群中第 i 个个体的适应度.

为了验证本文所选研究方法的严谨性和有效性, 以 3 层钢筋混凝土框架结构减震控制参数的优化设计为例, 设基本参数为: 第 1 至第 3 层质量 $m = 2\,762, 2\,760, 2\,300$ kg, 刚度分别为 $2.485 \times 10^4, 1.921 \times 10^4, 1.522 \times 10^4$ N/m. 位移可靠度约束为顶层位移在 $[-0.05\, 0.05]$ m 范围内的概率不小于 0.9. 在基底输入随机载荷, 随机载荷采用 20 条 $0.2\,g$ (g 为重力加速度) 人工波模拟, 采样周期 0.02 s. 在结构的层间位移响应最小的情况下, 得到结构-TMD 体系的最优参数.

初设设计变量的取值范围为: $m_d \in (0.03, 10.52)$ t, $c_d = 0.9 \times c_{11}$, $k_d = 0$, 其中, c_{11} 表示结构-TMD 体系中阻尼矩阵 C 内的第一个数.

取筛选概率 0.3, 交叉概率 0.2, 变异概率 0.2, 随机载荷采用 20 条人工波模拟, 种群大小分别取 20, 30, 40, 迭代 50 次, 计算结果如表 1 所示. 从表 1 中可以看出, 在最小可靠度 $p_{\min} = 0.9$ 的约束条件下, 当 TMD 质量取 4.13 t 时, 优化后的 TMD 结构对位移响应的控制效果最优, 优化后的最大位移可达到优化前的 56.27%. 随着种群数的增加, 计算结果越来越好, 且趋于稳定. 图 2 和图 3 给出了最优个体顶层的层间位移概率密度演化曲面和典型时刻的概率密度函数曲线. 由图 2 和图 3 可知, 通过对概率密度演化方程进行求解, 可以方便地提取任意时刻结构层间位移响应的概率密度信息, 这样能够准确地描述结构在任意时刻的随机响应, 进而计算出结构在任意时刻的位移可靠度. 结果表明, 虽然随机激励属于正态分布, 但是, 位移响应在任意时刻的概率分布既不属于通常假定的正态分布, 也不属于其他特殊分布, 它具有明显的多峰特性, 且随着时间改变

而变化.图4给出了优化过程中所有个体的结构顶层层间位移可靠度的平均值变化,由于是在一定的位移可靠度约束下,且目标函数是结构顶层层间位移响应最小,所以,位移可靠度随时间的增加逐渐增加,最终达到位移可靠度约束0.9,表明优化后位移可靠度增加,TMD具有减震效果.

表1 结构优化结果

Tab.1 Structural optimization results

种群大小	顶层层间位移可靠度	目标函数值	最优TMD质量	优化前后位移比
20	0.908 1	0.059 4	3.85	57.21%
30	0.908 4	0.058 4	4.13	56.27%
40	0.908 4	0.058 4	4.13	56.27%

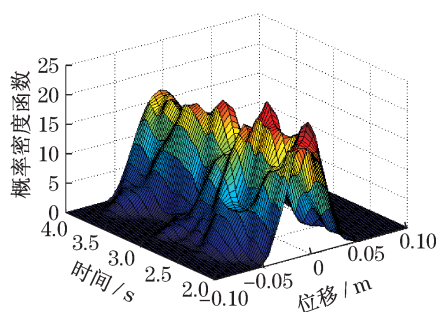


图2 顶层的层间位移概率密度演化曲面

Fig.2 Evolving surface of the displacement probability density function of the top floor

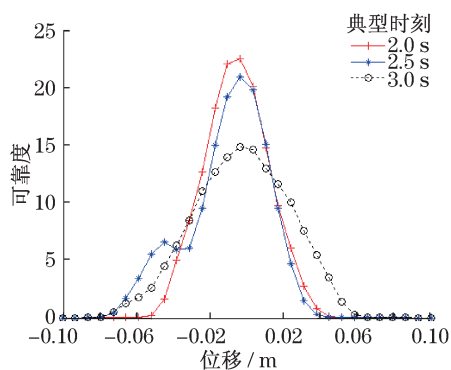


图3 典型时刻的概率密度函数

Fig.3 Probability density function at typical time

通过对比优化前后结构顶层层间的位移响应,如图5所示,可以发现:当结构本身位移响应越大的时候,控制效果越明显;当结构本身位移响应很小的时候,TMD装置对结构位移响应的控制效果不明显.所以,总体上TMD对降低结构响应具有很好的效果,优化后的峰值响应为优化前的56.27%.

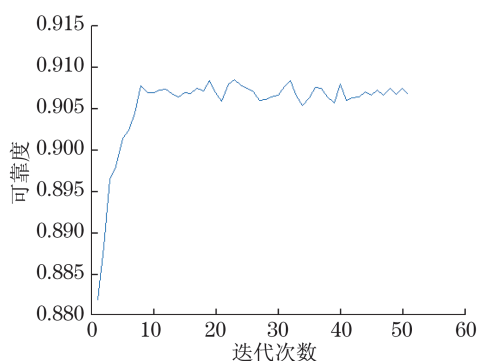


图4 顶层的层间位移可靠度

Fig.4 Vertical displacement reliability of the top floor

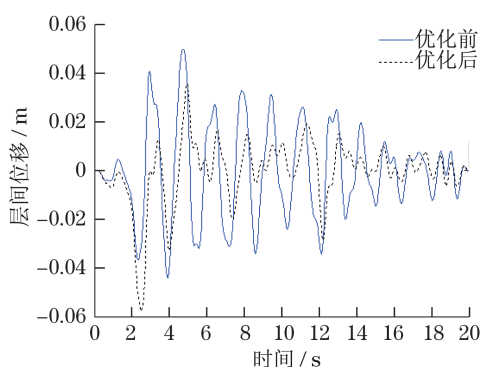


图5 优化前后结构顶层层间位移响应

Fig.5 Comparison between the displacement responses at the top and bottom of the structure before and after optimization

5 结论

针对多自由度TMD结构体系在非平稳随机地震作用下的最优TMD参数求解问题,将改进遗传算法中的位移约束条件用随机概率密度理论求解出的位移可靠度描述,解决了传统的位移约束条件对于随机激励下的结构响应的不适应性.通过算例可以看出:

a. TMD能够很好地发挥作用,特别是能够降低结构响应的最大峰值,优化后的峰值响应为优化前的56.27%,即大大降低了结构的失效概率.

b. 通过对任意时刻结构位移的概率密度信息进行提取,实现了结构全灾变的准确描述.结果表明,虽然随机激励属于正态分布,但是,位移响应具有多峰的性质,且随着时间的变化而变化,因此,对全过程的概率描述是必要的.

c. 在位移可靠度约束下,对优化过程中所有个体结构顶层层间位移可靠度平均值监测结果说明位

移可靠度随时间的增加逐渐增加,最终达到位移可靠度约束 0.9 的理想效果,进一步说明该方法得到的 TMD 参数具有良好的减震效果.

本文所提出的思路与方法为计算随机激励下的结构-TMD 系统可靠度提供了新的途径,实现了概率密度演化方法在随机激励下 TMD 建筑结构优化设计中的成功应用,为随机载荷下多塔结构控制优化设计提供了很好的技术支持.

参考文献:

- [1] FANG T, WANG Z N. Complex modal analysis of random vibrations[J]. AIAA Journal, 1986, 24(2): 342-344.
- [2] LUTES L D, SARKANI S. Random vibrations; analysis of structural and mechanical systems[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [3] 陈建兵, 李杰. 非线性随机地震响应的概率密度演化分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 6-10.
- [4] 陈建兵, 张圣涵. 非均布随机参数结果非线性响应的概率密度演化[J]. 力学学报, 2014, 46(1): 136-144.
- [5] 谭平, 卜国雄, 刘红军, 等. 带 TMD 结构的随机地震响应分析的新方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(4): 390-394.
- [6] 卜国雄. 高耸结构基于性能的 TMD/AMD 设计及其动力可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 王磊, 谭平, 赵卿卿, 等. 随机结构-TMD 优化设计与概率密度演化研究[J]. 振动工程学报, 2015(2): 285-290.
- [8] 陈建兵, 刘章军, 李杰. 非线性随机动力系统的概率密度演化分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 312-317.
- [9] 李涛, 张洵安. 基于概率密度演化方法的随机 MSCSS 构造研究[J]. 应用力学学报, 2011, 28(6): 576-582.
- [10] 陈建兵, 李杰. 结构随机响应概率密度演化分析的数论选点法[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 134-140.
- [11] 陈建兵, 李杰. 非线性随机结构动力可靠度的密度演化方法[J]. 力学学报, 2004, 36(2): 196-201.
- [12] 唐文艳. 结构优化中的遗传算法研究和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

(编辑: 石 瑛)

(上接第 90 页)

- [7] LANDAU R. Computational physics: a better model for physics education? [J]. Computing in Science & Engineering, 2006, 8(5): 22-30.
- [8] GUSTAVSSON I, ZACKRISSON J, HÅKANSSON L, et al. The VISIR project-an open source software initiative for distributed online laboratories [R]. REV, 2007.
- [9] GUSTAVSSON I, ZACKRISSON J, NILSSON K, et al. A flexible electronics laboratory with local and remote workbenches in a grid[J]. International Journal of Online Engineering, 2008, 4(2): 12-16.
- [10] SALZMANN C, GILLET D. Remote labs and social media: agile aggregation and exploitation in higher engineering education [C] // Proceedings of 2011 Global Engineering Education Conference. Amman, Jordan: IEEE, 2011: 307-311.

(编辑: 丁红艺)