

基于遗传算法的 TMD 系统参数优化和设计^①

王爱文¹, 史扬², 缪升¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院; 2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

摘要 为了达到调频质量阻尼系统最佳减振效果, 需要对系统的参数进行优化, 即求出最优频率比和最优阻尼比. 通过引进遗传算法, 针对目标函数采用惩罚函数和适值标定有效引导遗传搜索, 从而达到最优解. 计算结果表明了该算法对求解复杂优化问题的优越性.

关键词: TMD 系统; 遗传算法; 约束优化

中图分类号: TU 311. 3 文献标识码: A 文章编号: 1007- 855X(2002)01- 069- 04

0 引言

近年来, 在结构主动控制方面, 研究比较多的是调频质量阻尼控制(Tuned Mass Damper Control, 简称 TMD). TMD 是一个小的振动系统, 由质量块弹簧, 阻尼延迟器组成. 这种装置一般安装在建筑物的顶部, 依靠它与结构作相对运动, 凭惯性对结构产生作用力来抵消干扰力, 达到减振的目的^[1].

理论计算表明, 当 TMD 频率接近原结构的频率时, 减振效果最好. 因此 TMD 振动系统的参数的选择存在着一个优化问题, 即最优频率比和最优阻尼比.

遗传算法(GA)是基于生物进化论的原理发展起来的一种广为应用的、高效率的随机搜索与优化的方法. 本文以单自由度系统为研究对象, 利用遗传算法搜索面广的特点, 根据现有设备, 提出了一种 TMD 最优参数设计方法.

1 计算模型

一单层建筑物被理想化为无重柱子支承的刚性大梁^[2]. 图 1 所示:

m_1, k_1, c_1 分别为结构质量、侧向刚度和阻尼. 在其顶部安装一 TMD 系统, 质量为 m_2 , 刚度为 k_2 , 阻尼为 c_2 . 假定结构承受幅值为 p_0 , 圆频率为 ω 的简谐变化荷载 $p(t)$, 结构和 TMD 相对地面位移分别为 x_1, x_2 . 利用动力学定律, 写出系统的运动方程:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) = p(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

对方程组进行拉氏变换, 得结构位移 x_1 对激振力 $p(t)$ 的传递函数为:

$$G(s) = \frac{m_2 s^2 + c_2 + k_2}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 c_2 + m_2 c_1 + m_2 c_2) s^3 + (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2 + c_2^2) s^2 + k_2 c_2 s + k_2^2} \quad (3)$$

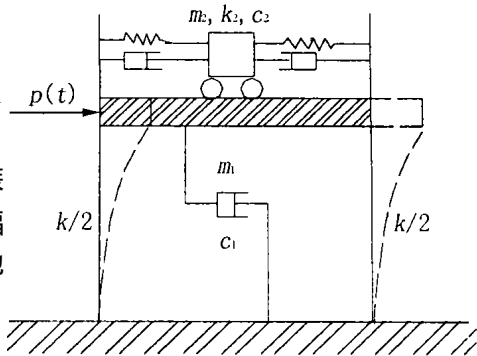


图 1 计算模型

令 $s = j\omega$, 对复数求模, 导出结构位移 x_1 对激振力 $p(t)$ 的复频特性, 定义

① 收稿日期: 2001- 04- 02;

基金项目: 云南省应用基础研究基金(项目编号: 1999E0039M);

第一作者简介: 王爱文, 男, 1972 年生, 在读硕士研究生; 主要研究方向: 防灾减灾及工程抗震.

$$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, \omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, f = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \gamma = \frac{\omega}{\omega_1} \mu = \frac{m_2}{m_1}, \zeta_1 = \frac{c_1}{2(m_1 k_1)^{\frac{1}{2}}}, \zeta_2 = \frac{c_2}{2(m_2 k_2)^{\frac{1}{2}}}$$

结构位移 x_1 的动力放大系数为:

$$D(\gamma) = \left[\frac{(f^2 - \gamma^2)^2 + 4\zeta_2^2 f^2 \gamma^2}{[f(1 - \gamma^2) - \mu^2 \gamma^2 - \gamma^2(1 - \gamma^2) - 4\zeta_1 \zeta_2 f \gamma^2]^2 + [2\zeta_2 f \gamma(1 - \gamma^2 - \mu \gamma^2) + 2\zeta_1 \gamma(f^2 - \gamma^2)]^2} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

2 TMD 系统参数配置对结构消振的影响

从公式(4)可以看出,在给定结构阻尼比 ζ_2 值时,TMD 系统对结构控制效率取决于结构体系的动力放大系数在不同质量比 μ 、固有频率比 f 和阻尼比 ζ_2 情况下随激振频率比 γ 变化而变化.根据极值理论,应将公式(4)分别对 γ, f 和 ζ_2 求导并令其等于零,得到一组方程,联立求解可得最优频率比和最优阻尼比.但此方法过于复杂,实际很难进行.

3 TMD 控制最优频率比和最优阻尼比的优化计算

3.1 目标函数的建立

由上面讨论可知,TMD 系统参数的选择可转化为如下目标函数的优化

$$\min_{f, \zeta_2} \max_{\gamma} (D) = \min_{f, \zeta_2} \max_{\gamma} \left[\frac{(f^2 - \gamma^2)^2 + 4\zeta_2^2 f^2 \gamma^2}{[f(1 - \gamma^2) - \mu^2 \gamma^2 - \gamma^2(1 - \gamma^2) - 4\zeta_1 \zeta_2 f \gamma^2]^2 + [2\zeta_2 f \gamma(1 - \gamma^2 - \mu \gamma^2) + 2\zeta_1 \gamma(f^2 - \gamma^2)]^2} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

其中 $0 \leq f, \zeta_2 \leq 0$,若给定 μ, ζ_1 则上述目标函数可转化为在 $D(\gamma, f, \zeta_2)$ 对 γ 求偏导等于 0 的约束条件下求 f, ζ_2 变化所引起的 $D(\gamma, f, \zeta_2)$ 极小值.这是一个典型的约束条件优化问题.

3.2 遗传算法的特点

要在庞大的模型空间中搜索使目标函数最小的模型,一个自然的想法就是利用目标函数变化的信息,使搜索从一个初始点出发,沿着目标函数下降的方向前进到达目标函数的最小点.遗传算法将模型空间中的模型看作为个体,将个体编码为二进制代码串,并以一定的规模将多个个体组成群体反复实施选择、交叉、变异三个操作,使群体犹如生物群体一样不断进化,直至收敛到问题的全局优化解.尤其在求解约束条件优化问题方面具有非常大的潜力^[3].

3.3 带约束条件优化问题的遗传算法

具体的算法步骤如下:

(1) 基因表达与初始化

a. 设定参数

种群大小: pop_size= 20;

最大代数: max_gen= 1000;

变异率: $P_m = 0.1$;

交叉率: $P_c = 0.3$.

b. 在给定区间内随机产生初始种群(采用实数编码, $X = X(x_1, x_2, x_3), x_1, x_2, x_3 \in [0, 1]$)

(2) 计算相应的适值;

(3) 计算种群中所有染色体的适值的和;

(4) 对各染色体,计算选择概率 p_k 及累积概率 q_k ;

在确定每个染色体的选择概率时,需对适值进行适当的标定(变换).由于本文中的 $D(\gamma, f, \zeta_2)$ 是一分式,故采用正规化方法对其进行标定,令:

$$D'_k = \frac{D_{\max} - D_k + \epsilon}{D_{\max} - D_{\min} + \epsilon} \tag{6}$$

式中 $\varepsilon \in (0, 1)$

D_{\max} —— 为当前种群中最好的原适值

D_{\min} —— 为当前种群中最坏的原适值

(5) 采用惩罚函数

$$P(\tau, y, f, \zeta_2) = \frac{1}{2\tau} \left[\frac{\partial D}{\partial y} \right]^2 \quad (7)$$

式中: τ 为可变因子, 称为温度, $\tau \in R^+$, τ 从初始温度 τ_0 开始, 终止在冻结温度 τ_f .

并取加法形式的评估函数:

$$\text{eval}(D) = D'_k + P \quad (8)$$

(6) 交叉

基于凸集理论, 两向量 x_1 和 x_2 的加权平均计算如下:

$$\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2$$

若其乘子限制为 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$. 则此加权形式称为凸组合. 将两个染色体(父代) 进行如下组合进行交叉^[4]:

$$x'_1 = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2, x'_2 = \lambda_1 x_2 + \lambda_2 x_1 \quad (9)$$

取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$.

(7) 动态变异

为了提高精度, 增加细调能力采取动态变异运算. 对于父亲 X , 若元素 x_k 被选出作变异, 则后代为 $x' = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$, 其中 x'_k 是按如下两种可能选得的:

$$\begin{aligned} x'_k &= x_k + \Delta(t, x_k^U - x_k) \\ \text{或 } x'_k &= x_k - \Delta(t, x_k - x_k^L) \end{aligned} \quad (10)$$

这里 x_k^U, x_k^L 分别是 x_k 的上下界. 函数 $\Delta(t, y)$ 给出 $[0, y]$ 中的一个值, 使得 $\Delta(t, y)$ 随 t 增加而趋于 0 (t 是代数).

可取 $\Delta(t, y) = y \times a \times (1 - \frac{t}{T})^b$, 其中 a 是 $[0, 1]$ 间的随机数, T 是最大代数, b 是确定不均匀度的参数.

4 计算结果

根据本文提出的 TMD 系统参数优化基本原理和方法, 我们用 Matlab 语言编制了 TMD 系统参数优化程序 TMDOPT, 在 Matlab 5.1 for Window 95 环境下运行通过. 计算结果如表 1 所示.

从本文结果可以看出, 增加结构的阻尼, 会使 TMD 系统的最优固有频率比减小, 而最优阻尼比增加, 结构的动力放大系数减小. 特别是增加 TMD 系统的质量比时, 最大动力放大系数显著减小.

5 结 论

TMD 系统构造简单, 易于在工程中实现, 对风振、地震具有明显的减振作用. 结构安装 TMD 系统必须考虑最优频率比和最优阻尼比, 从而在最佳状态下启动 TMD 系统. 遗传算法在求解多目标约束优化问题具有无比的优越性. 将基于该算法编制的程序固化到激振器中可实现测量与安装一体化, 具有非常广阔的应用前景.

表 1 TMD 系统最优设计参数

μ	ζ_1	f_{opt}	ζ_2	$\min_{f, \zeta_2} \max_y(D)$
0.01	0.00	0.990 1	0.061	14. 18
0.01	0.01	0.988 6	0.062	11. 37
0.01	0.02	0.986 9	0.064	9.466
0.01	0.05	0.980 7	0.068	6.251
0.01	0.10	0.966 3	0.073	3.967
0.05	0.00	0.964 1	0.133	6.413
0.05	0.01	0.963 6	0.136	5.254
0.05	0.02	0.963 2	0.140	4.121
0.05	0.05	0.962 5	0.144	3.983
0.05	0.10	0.962 2	0.152	3.327
0.1	0.00	0.909 1	0.185	4.589
0.1	0.01	0.905 1	0.187	4.270
0.1	0.02	0.900 9	0.188	3.991
0.1	0.05	0.887 5	0.193	3.337
0.1	0.10	0.861 9	0.199	2.622
1.0	0.00	0.499 6	0.448	1.746
1.0	0.01	0.494 6	0.448	1.714
1.0	0.02	0.484 0	0.499	1.683
1.0	0.05	0.473 1	0.454	1.600
1.0	0.10	0.466 9	0.455	1.482

参考文献:

- [1] 李春祥等. 地震作用下高层建筑 TMD 控制优化设计[J]. 同济大学学报, 1996. 27(3): 287~ 291.
- [2] [美] R. W. 克拉夫 J. 彭津著. 结构动力学, [M]. 北京: 科学出版社, 1981. 36.
- [3] 刘勇等. 非数值并行算法——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 186~ 191.
- [4] [日] 玄光男等. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 35~ 37.

The Optimization and Design of TMD System Parameters Using Genetic Algorithm

WANG Ai-wen¹, SHI Yang², MAO Sheng¹

(1. Faculty of Architectural Engineering; 2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract In order to achieve the most effective results of TMD system applied in diminishing the vibrations, there exists an optimization problem such as the optimum frequency ratio and optimum damp ratio. By using Genetic Algorithm, according to objective function the earliness and tardiness penalties and the mapping of adaptive values are employed to guide genetic search for reliability design, thus the optimized solutions are obtained. Results in this paper also proved that the algorithm is very convenient to optimize complicated problems.

Key words: TMD system; genetic algorithm; resource constrained project scheduling