

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.005

遗传算法工具箱在半主动-TMD参数优化中的应用

周小波, 禹见达, 李 东

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 提出一种新型的结构振动控制变频 TMD 半主动控制系统, 采用遗传算法工具箱分析了结构的动力放大系数, 证实了其对结构振动控制的可行性和有效性。结果表明, 单个变频-TMD 作为一种半主动驱动器能有效降低结构反应, 与传统 TMD 相比, 具有更大的减振频带宽度, 而且效果显著。

关键词: 半主动-TMD; 结构振动控制; 控制效果; 遗传算法工具箱; 参数优化

中图分类号: TB123

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)02-0019-05

The Semi-Active-TMD Parameters Optimization Based on Genetic Algorithm Toolbox

Zhou Xiaobo, Yu Jianda, Li Dong

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: A new frequency conversion TMD(tuned mass dampers) semi-active actuator system for structural vibration control was proposed. By means of the genetic algorithm toolbox, the dynamic magnification factor of the structure was analyzed and the feasibility and effectiveness of the TMD system to the structural vibration control was proved. The results show that single frequency conversion-TMD as a semi-active drive can effectively reduce the structure reaction, and it has a wider vibration frequency bandwidth and better control effect compared with the traditional TMD.

Keywords: semi-active-TMD; structural vibration control; control effect; genetic algorithm toolbox; optimized parameters

0 引言

结构振动控制是土木工程行业的一门前沿研究课题, 该技术的发展为结构减振提供了一种行之有效的新途径^[1]。调谐质量阻尼器(tuned mass dampers, TMD)是一种被动控制装置, 由弹簧、阻尼器和质量块组成, 因其造价低、构造简单、安装维护方便、可靠性高而被广泛应用于工程结构中。大量的研究表明^[2-4], 该控制装置无论是对风振, 还是对地震引起的结构振动, 都具有非常明显的减振

效果。但 TMD 系统受频率影响较大, 表现出控制窄频带的特性, 而在实际工程中, 结构受外界因素的影响, 很难保证 TMD 系统的自振频率和结构自振频率完全一致, 从而会出现减振失灵的现象, 这导致其应用受到较大限制。为此, 有研究人员提出了一种半主动控制策略, 该策略通过变刚度或变阻尼来进行结构的减振和抗震^[5-6]。但是在这种半主动控制策略中, 必须编写相应的控制算法以实现其最优控制。

遗传算法(genetic algorithms, GA)^[7]起源于对生

收稿日期: 2011-10-11

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(09B034)

作者简介: 周小波(1985-), 男, 湖南衡阳人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为大跨度桥梁的振动控制,

E-mail: zxb1226@126.com

物系统所进行的计算机模拟研究，是一种模拟生物界的遗传和进化过程而建立起来的搜索算法。相对于其他的优化算法，遗传算法有其自身独特的特点和优越性，因此，在各个领域都得到了不同程度的应用。但在实际应用过程中必须编写大量的程序进行计算，这给使用者增加了一定的负担。然而，遗传算法工具箱^[8]使用模块化设计，使用者可以不考虑遗传算法的内部结构，在解决具体优化问题时，只需根据其设计要求，编制相应的适应度函数即可，从而大大提高了工作效率。因此，本文提出一种自适应频半主动-TMD，同时利用遗传算法工具箱优化其参数，并对其减振效果进行初步探讨。

1 结构-TMD 系统的工作原理

TMD 系统对结构进行振动控制的机理为：当结构在外部激励作用下产生振动时，带动 TMD 系统一起振动，这时 TMD 系统相对运动产生的惯性力反作用到结构上，调谐这个惯性力，使其对结构的振动产生抵制作用，实际上是给结构增加了负阻尼效果，从而达到减小结构振动反应的目的^[4,9]。

1.1 系统力学模型及运动微分方程

为便于对 TMD 系统参数进行研究，研究者将被控结构简化为单自由度体系，则添加 TMD 减振装置后，系统在结构上变为一个两自由度振动系统，其力学模型如图 1 所示。其中 m_s, k_s, c_s 分别为结构的质量、刚度和阻尼； m, k, c 分别为 TMD 的质量、刚度和阻尼， $F_0 e^{i\omega t}$ 为结构所受的外界激励。

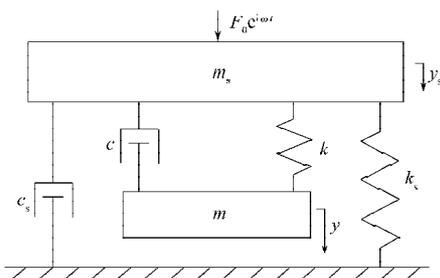


图 1 TMD 力学模型

Fig.1 Mechanics model of TMD

由结构动力学知该 TMD- 结构体系运动方程的矩阵形式为 $M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F$ ，

式中： M 为质量矩阵，且 $M = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$ ；

C 为阻尼矩阵，且 $C = \begin{bmatrix} c_s + c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}$ ；

K 为刚度矩阵，且 $K = \begin{bmatrix} k_s + k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$ ；

Y 为位移列向量，且 $Y = [y_s \quad y]^T$ ；

F 为荷载列向量，且 $F = \{f(t) \quad 0\}^T$ 。

1.2 系统动力放大系数公式

设被控结构所受荷载为简谐激振力 $f(t) = F_0 e^{i\omega t}$ ，求解方程 (1) 得结构-TMD 系统的动力放大系数表达式为 $DMF = \left[1 / \left(R(z)^2 + I(z)^2 \right) \right]^{1/2}$ ，

(2)

式中： $R(z) = 1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2 \frac{\alpha^4 - \alpha^2\lambda^2 + 4\lambda^2\xi^2}{(\alpha^2 - \lambda^2)^2 + 4\lambda^2\xi^2}$ ，

$$I(z) = 2\lambda\xi_s + \frac{4\xi\mu\alpha^2\lambda^5}{(\alpha^2 - \lambda^2)^2 + 4\lambda^2\xi^2}$$

其中： μ 为 TMD 质量比，即 $\mu = m/m_s$ ； λ 为激振力频率与被控结构被控频率比，即 $\lambda = \omega / \omega_s$ ； α 为 TMD 频率比，即 $\alpha = \omega_0 / \omega_s$ ； ξ 为 TMD 阻尼比，即 $\xi = c / 2m\omega_s$ ； ξ_s 为 TMD 被控结构阻尼比，即 $\xi_s = c_s / 2m_s\omega_s$ 。

2 半主动-TMD 系统的参数优化

2.1 参数优化模型的建立

根据 TMD 减振控制的特点，建立如下半主动-TMD 参数优化模型：

目标函数为

$$\text{function} = \min[\max(DMF)]$$

约束条件为

$$\text{bounds} = [l_\mu \quad u_\mu ; l_\xi \quad u_\xi ; l_\alpha \quad u_\alpha]$$

式中： l 和 u 分别为每个变量使用的下界和上界；

下标 μ, ξ, α 分别为质量比、阻尼比和频率比。

主程序调用程序为

```
[x,endPop,bPop,traceInfo]=ga(bounds,'function',
[],[],[],'maxGenTerm',1000);
```

2.2 变刚度参数的优化

实际工程中，许多结构的频率在使用过程中并不是固定不变的，如果采用传统的 TMD 结构减振系统，容易出现振动控制失灵，也就是我们常说的 TMD 工作窄频带的特性。而结构频率的改变，主要为刚度和质量的改变（本文仅研究主结构为单自由度体系，对于多自由度体系，仅需利用动力学知识转换为单自由度体系即可），而刚度为物体的固有属性，一般情况下不会改变，因此，本文仅研究主结构质量改变引起的频率改变情况。

基于工程经验，取半主动-TMD 控制系统的质量比 μ 为 0.02， ξ_s 为 0.04，主结构频率 f 为 1.22 Hz，利用 2.1 中建立的半主动-TMD 参数优化遗传算法模型

进行搜索寻优, 得到 TMD 的优化参数为:

$$\xi=0.088\ 437, \omega_0=7.450\ 1\ \text{rad/s.}$$

由于质量比已知, 可求得 TMD 的质量, 利用优化得到的圆频率进而可求得 TMD 的刚度, 因此, TMD 的参数全部可以确定下来。

为了研究方便, 定义系统的减振率计算式为

$$\eta = \frac{D_s - D_d}{D_s}, \quad (3)$$

式中 D_s, D_d 分别为无控和受控结构的动力放大系数。

由式 (3) 可求得此时系统的减振率为 51.8%。其有控和无控 DMF 效果如图 2 所示。

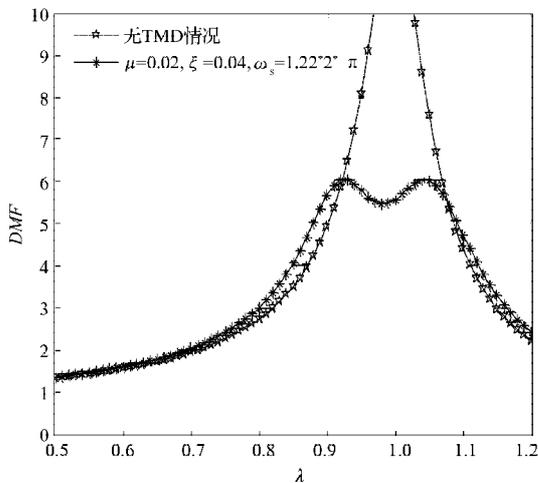


图 2 有控和无控 DMF 效果图

Fig. 2 The effect of controlled and uncontrolled DMF

由图 2 可知 TMD 的减振效果非常显著。

下面研究当主结构的质量 m_s 分别以 5%, 10%, 15%, ..., 50% 增加时, TMD 参数优化情况。当 m_s 质量增加, TMD 各参数不变时, 其动力放大系数效果如图 3 所示。

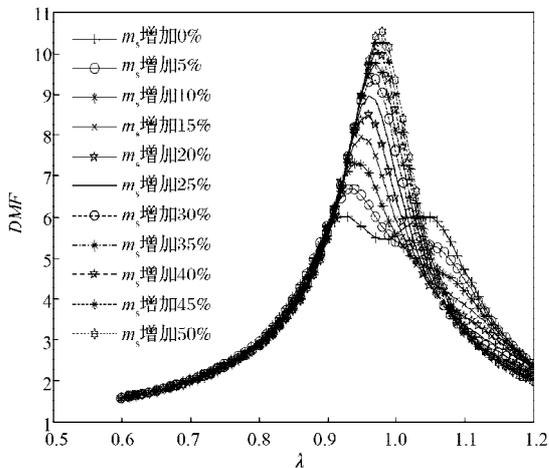


图 3 m_s 改变时优化一次的 DMF 效果图

Fig. 3 The DMF effect of optimized once when m_s changed

由图 3 可知, 优化后的 TMD 结构系统, 随着 m_s 的增加, TMD 优化减振效果迅速下降, 或者说根本达不到所需的预期效果。

基于此情况, 本文提出变刚度半主动-TMD, 其减振原理与传统 TMD 一致, 只是在传统 TMD 基础上增加了可控弹簧 k_1, k_2, \dots, k_i , 其结构模型见图 4。

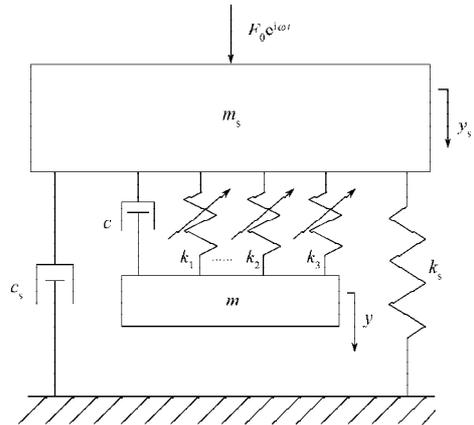


图 4 变刚度结构模型

Fig. 4 Structure model of variable stiffness

变刚度半主动-TMD 模型中, 可控弹簧由可控开关控制, 对应弹簧参与工作与否。它们分别对应不同的档位, 由它们来控制参与工作的 TMD 刚度改变, 各弹簧具体值可由本文提出的优化算法及预设的档位确定求得。实际应用中, 可控弹簧再与连接相应的控制装置连接, 实现 TMD 刚度的改变, 从而实现其半主动控制。图 5 显示了变刚度半主动-TMD 的控制效果。

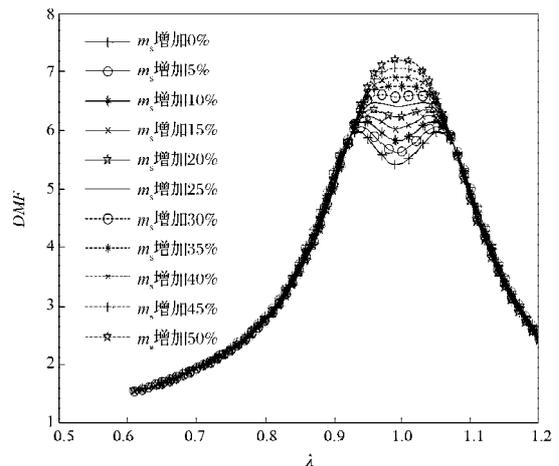


图 5 变刚度半主动-TMD 控制效果图

Fig. 5 The control effect of variable stiffness semi-active TMD

由图 5 可知, 变刚度半主动-TMD 起到了非常好的减振控制效果。

表 1 为变刚度半主动-TMD 在 m_s 增加时, 对应的 3 个参数值 μ, ξ, ω_0 优化和无优化下 (仅优化第

一次)的动力放大系数值、TMD刚度改变量及相应的减振率。

由表1可知, m_s 由0增加到30%时,变刚度半主动-TMD减振率保持着较高的值;当 m_s 增加到30%

后,效果稍微差一点,但实际工程中 m_s 增加到30%的概率非常小。实际设计中,还可以通过调大 μ 的初始值,其减振效果更佳,比如增加到5%,笔者做了相应的计算,效果非常好,这里不再赘述。

表1 变刚度TMD优化情况
Table 1 Optimization of variable stiffness TMD

m_s 增加量 / %	优化参数			优化的 DMF_{max}	无优化下 DMF_{max}	TMD刚度减少量 / %	优化时减振率 / %	仅优化第一次减振率 / %
	μ	ξ	$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$					
0	0.020 000	0.088 437	7.450 1	6.024 4	6.024 4	0	51.80	51.80
5	0.019 048	0.090 621	7.276 5	6.110 7	6.689 5	4.61	51.11	46.48
10	0.018 182	0.092 754	7.115 8	6.186 6	7.326 6	8.77	50.51	41.39
15	0.017 391	0.094 838	6.965 4	6.291 9	7.946 9	12.59	49.66	36.42
20	0.016 667	0.096 878	6.824 2	6.392 3	8.489 0	16.10	48.86	32.09
25	0.016 000	0.098 876	6.691 8	6.517 1	8.966 4	19.32	47.86	28.27
30	0.015 385	0.100 830	6.566 6	6.649 4	9.381 2	22.31	46.80	24.95
35	0.014 815	0.102 750	6.448 5	6.795 8	9.765 3	25.08	45.63	21.88
40	0.014 286	0.104 640	6.337 3	6.954 5	10.052 7	27.64	44.36	19.58
45	0.013 793	0.106 490	6.232 9	7.108 9	10.288 2	30.01	43.13	17.69
50	0.013 333	0.108 310	6.134 3	7.257 1	10.551 2	32.20	41.94	15.59

由表1还可以看出,对于仅优化第一次的TMD控制系统,也即传统TMD控制系统,其减振率随着 m_s 的增加急剧下降,当 m_s 下降到30%时,其减振率下降到了24.95%,这对于许多实际工程而言,是难以接受的。

2.3 变质量参数优化

下面研究变质量半主动-TMD的控制效果,仍

然选取2.2中的初始条件,采用改变TMD的质量来达到所需的减振控制效果。理论上,在一定范围内,质量比 μ 越大越好。这里仅研究当 m_s 增加相同比例的情况下,即同变刚度半主动-TMD对应控制效果一致时所需要的质量改变量条件下的TMD优化情况,相应的优化参数及TMD质量增加量如表2所示,其动力放大系数DMF控制效果如图6所示。

表2 变质量TMD优化情况
Table 2 Optimization of variable mass TMD

m_s 增加量 / %	优化参数			TMD质量增加量 / %	优化的 DMF_{max}	优化时减振率 / %
	μ	ξ	$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$			
0	0.020 000	0.088 437	7.450 1	0	6.024 4	51.80
5	0.019 867	0.086 885	7.294 9	4.3	6.118 5	51.05
10	0.019 782	0.085 251	7.142 5	8.8	6.181 3	50.55
15	0.019 617	0.097 750	7.014 7	12.8	6.294 5	49.64
20	0.019 450	0.095 903	6.896 5	16.7	6.400 2	48.80
25	0.019 280	0.093 485	6.786 9	20.5	6.514 6	47.88
30	0.019 108	0.090 374	6.685 0	24.2	6.641 2	46.87
35	0.018 904	0.097 801	6.595 3	27.6	6.799 8	45.60
40	0.018 671	0.103 670	6.516 6	30.7	6.951 6	44.39
45	0.018 455	0.100 250	6.440 7	33.8	7.100 0	43.20
50	0.018 253	0.096 053	6.367 4	36.9	7.254 3	41.97

由表2可知,变质量半主动-TMD控制在 m_s 增加时,其TMD的质量增加一相对 m_s 增加稍小比例质量,即可达到同变刚度半主动-TMD对等的控制效果,但增加质量势必会造成体积增加,所以也有其劣势一面。通过将表1和表2中的数据进行对比,可以得出半主动变刚度-TMD和变质量-TMD在主结

构质量增加时,都能达到较好的控制效果,相比较而言,在控制效果方面,变质量-TMD会有一定的优势,但是因其质量增加,会导致其体积相应增加,这给设计带来诸多不便。综合考虑可知,半主动变刚度-TMD更具优势,在具体的工程中应结合实际情况选择某种方案。

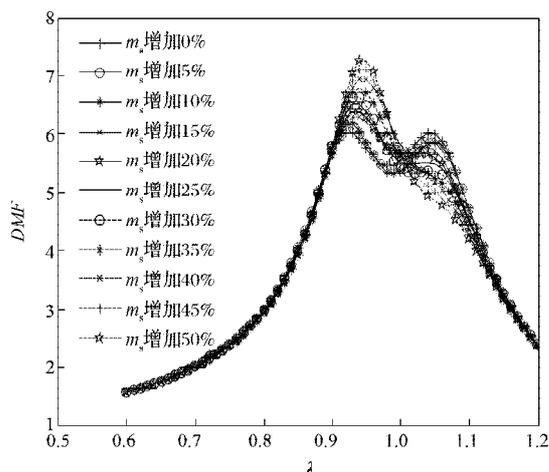


图6 变质量等效效果优化图

Fig. 6 Same optimization effect of variable mass

3 结论

通过对试验数据的整理和分析, 得到以下结论:

1) 传统TMD结构系统, 在主结构频率发生改变时, 减振效果显著下降, 甚至达不到减振效果, 出现减振“失灵”现象。

2) 在主结构体系发生改变时, 采用半主动控制能够有效减少结构动力反应, 而且减振率较高。

3) 变刚度半主动-TMD和变质量半主动-TMD在主结构频率发生改变时, 都能达到较好的减振效果, 且变质量半主动-TMD更具优势。但变质量半主动-TMD发挥较大优势时, 必须增加一个较大的质量比, 这在实际工程中将受到较大限制, 而变刚度半主动-TMD在这方面更胜一筹。

4) 单个半主动-TMD具有多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)的减振控制效果及性能, 能够有效地控制结构体系的多阶频率、减振频带宽, 而且其具有设计相对MTMD构造更加简单、造价低、易于在工程中实现等特点, 因而其在工程应用上更具优势。

参考文献:

[1] 潘琴存, 黄丽婷. FPS-TMD减震钢框架振动台试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2009, 8(8): 12-14.
Pan Qincun, Huang Liting. Shaking Table Test Research on Steel Structure with FPS Typed TMD[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009, 8(8): 12-14.

[2] Tsai H C, Lin G C. 用最优化调谐质量阻尼器使激励下的阻尼系统稳态反应最小[J]. 地震工程与结构动力学, 1993, 22: 957-973.

Tsai H C, Lin G C. Optimum Tuned Mass Dampers for Minimizing Steady State Response of Support Excited and Damped Systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22: 957-973.

[3] 欧进萍, 王永富. 设置TMD、TLD控制系统的高层建筑风振分析与设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2): 61-75.

Ou Jinping, Wang Yongfu. Wind Induced Vibration Analyses and Design Methods of Tall Buildings with Tuned Mass Dampers or Tuned Liquid Dampers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(2): 61-75.

[4] 龙复兴, 张旭, 顾平, 等. 调谐质量阻尼器系统控制结构地震反应的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(2): 87-94.

Long Fuxing, Zhang Xu, Gu Ping, et al. Problems in Seismic Responses of Structures under the Control of Tuned Mass Dampers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 87-94.

[5] 胡海岩, 郭大蕾, 翁建生. 振动半主动控制技术的进展[J]. 振动、测试与诊断, 2001, 21(4): 235-244.

Hu Haiyan, Guo Dalei, Weng Jiansheng. Recent Advances in Semi-Active Control of Vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2001, 21(4): 235-244.

[6] 陆建辉, 杜冬菊, 李宇生, 等. 调谐质量阻振变刚度控制器设计及其效果研究[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(4): 256-259.

Lu Jianhui, Du Dongju, Li Yusheng, et al. Study of Semi-Active Controller and Its Effect on Offshore Platform Based on Variable Stiffness Tuned Mass Damper[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2003, 23(4): 256-259.

[7] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 1-3.

Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu, et al. Matlab Genetic Algorithm Toolbox and Application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005: 1-3.

[8] 苏金明, 张莲花, 刘波, 等. MATLAB工具箱应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 1-3.

Su Jinming, Zhang Lianhua, Liu Bo, et al. Application of MATLAB Toolbox[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 1-3.

[9] 周福林. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 214-225.

Zhou Fuling. The Damping Control of Engineering Structure[M]. Beijing: The Earthquake Press, 1997: 214-225.

(责任编辑: 廖友媛)