

# 变频单 TMD 对框架结构的减振效果分析

张茂雨<sup>1</sup>, 薛松涛<sup>1,2</sup>, 陈榕<sup>1</sup>, 唐和生<sup>1</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本近畿大学 理工学部建筑学科, 日本大阪 577-8502)

摘要: 变频单 TMD 系统是对普通单 TMD 系统的改进, 在普通单 TMD 系统的基础上提供附加刚度, 并通过位移条件控制该附加刚度是否参与 TMD 系统的工作。变频单 TMD 系统在不同位移条件下具有不同的频率, 具有 MTMD (Multiple Tuned Mass Damper) 的性能和优点, 能减小结构多个自振频率引起的较大的动力响应, 显著提高结构的振动控制效果。将变频单 TMD 系统应用于高层框架结构, 分析其动力响应。计算结果表明, 变频单 TMD 系统能有效减小结构的动力响应, 与普通单 TMD 相比, 减震效果更为显著。

关键词: 变频单 TMD; 减振效果分析; 框架结构

中图分类号: TU311 文献标识码: A 文章编号: 0254-0053(2007)02-346-6

## Control Effect Analysis of Variable Frequency TMD Applied to Frame Structure

ZHANG Mao-yu<sup>1</sup>, XUE Song-tao<sup>1,2</sup>, CHEN Rong<sup>1</sup>, TANG He-sheng<sup>1</sup>

(1. Research Institution of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, School of Science and Engineering, Kinki University, Osaka 577-8502, Japan)

Abstract: The variable frequency single TMD (VF-TMD for short) was constructed. It is composed of common single TMD and an additional spring, and the displacement condition determines whether the additional spring works or not. In comparison with the common single TMD, the VF-TMD has different frequencies in different condition, and it can reduce the dynamic responses which are caused by several natural frequencies, and improve the control effect. VF-TMD was applied to the frame structure to analyze the control effect. The results indicate that VF-TMD can effectively reduce dynamic responses, and the effect is much more obvious than common single TMD.

Key words: variable frequency TMD; control effect analysis; frame structure

近年来, 结构减振技术飞速发展, 振动控制技术在生产和实践中不断地得到应用, 其效果和功能已被接受。大量的实际应用表明, 结构振动控制能取得较好的减振效果, 显著降低了结构的动力响应。减振技术有主动控制和被动控制, 其中被动调谐振动控制体系是一种附加在主结构上的子结构, 通过调谐子结构的频率实现主结构的振动反应控制<sup>[1]</sup>。附加子结构具有质量、刚度和阻尼, 质量可为固体或液体质量, 子结构可支撑或悬挂在主结构上。由于该技术的优越性, 已被应用于土木工程领域风振、地震、机械振动、海浪等作用下的减振防灾控制。结构调谐振动控制装置有调谐质量阻尼器(TMD)、调谐液体阻尼器(TLD)、调谐晃动阻尼器(TDS)、质量泵(MP)、摆式质量阻尼器、液体-质量控制器等, 其中 TMD 是一种普遍采用的简单而有效的形式。本文就是在普通单 TMD 系统的基础上加以改进, 使得单 TMD 系统具有多个频率, 从而具有 MTMD 的性能和优点, 改善其振动控制效果<sup>[2]</sup>。将变频 TMD 系统(VF-TMD)应用于高层框架结构体系, 分析其在地震作用下的减震效果。结果表明变频单 TMD 系统与普通单 TMD 相比减震

收稿日期: 2006-04-26

作者简介: 张茂雨(1980-), 男, 浙江瑞安人, 博士生, 研究方向: 结构抗震和损伤检测。

效果更加显著, 是一种简单而十分有效的振动控制形式。

## 1 变频单 TMD 系统原理

### 1.1 普通单 TMD 系统原理

假设主结构为单自由度, TMD 减振原理如图 1 所示。主结构和 TMD 系统构成的整体结构的运动方程为

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + (C+c)x_1 - cx_2 + (K+k)x_1 - kx_2 = p(t) \\ m\ddot{x}_2 - cx_1 + cx_2 - kx_1 + kx_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $M$ 、 $K$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $k$ 、 $c$  分别为主结构和 TMD 系统的质量、刚度和阻尼系数;  $p(t)$  为作用在主结构上的荷载;  $x_1$ 、 $x_2$  分别为主结构和 TMD 系统质点相对于地面的位移。

文献[3]给出了单 TMD 系统减振效果最佳的参数选择, 假定 TMD 与主结构质量之比为  $\mu$ , 则最佳频率比(TMD 系统频率与主结构第 1 阶自振频率的比值)及 TMD 最佳阻尼比为

$$\begin{cases} \lambda_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \\ \zeta_{opt} = \left[ \frac{3\mu}{8(1+\mu)^3} \right]^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

此时动力放大系数为

$$D_{opt} = \left[ 1 + \frac{2}{\mu} \right]^{1/2} \quad (3)$$

当 TMD 频率接近主结构自振频率或输入激励的频率时, 减振效果较好; 此外, 质量比  $\mu$  越大, TMD 提供的反向控制力越大, 减振效果越好<sup>[4]</sup>。但实际工程中  $\mu$  很大是不实际的, 一般情况下取 1%~5%, 可根据式(3)综合考虑放大系数与质量比  $\mu$  之间的平衡关系, 确定  $\mu$ ; 再根据式(2)求解最佳参数。

在结构承受地震作用时, 采用普通单 TMD 减振技术有一定的局限性。第一, 普通单 TMD 的频率只有一个, 但在地震作用下的结构往往会有多个频率处的动力响应很大, 这时单频率的 TMD 只能对主结构中 1 处峰值进行较好的控制; 第二, TMD 的控制效果要对输入地震波频率的依赖性较大<sup>[5]</sup>。对于上述的局限性, 已有一些解决方案, 比如采用多个 TMD(MTMD)可以改善减震效果。本文从另外一个角度出发, 对普通单 TMD 加以改进, 使其具有两个或两个以上的频率, 从而提高减震效果。

### 1.2 变频单 TMD 系统原理

改进后的变频单 TMD 系统的工作原理如图 2 所示。在普通单 TMD 系统基础上再提供一个刚度  $k_2$ , 但这个附加的刚度只在符合条件的情况下参与工作, 条件可以设置为时间条件或者位移条件, 本文中涉及的是位移条件, 即在主结构和 TMD 系统之间的相对位移大于 0( $x_1 - x_2 > 0$ )时, 附加刚度参与工作。为了简化分析, 假定不考虑调谐质量块和附加刚度之间的碰振问题。

变频单 TMD 系统的运动方程为

$$\begin{cases} M\ddot{x}_1 + (C+c)x_1 - cx_2 + (K+k_1)x_1 - k_1x_2 = p(t) - F \\ m\ddot{x}_2 - cx_1 + cx_2 - k_1x_1 + k_1x_2 = F \end{cases} \quad (4)$$

其中  $F$  为附加弹簧与调谐质量块之间的接触力

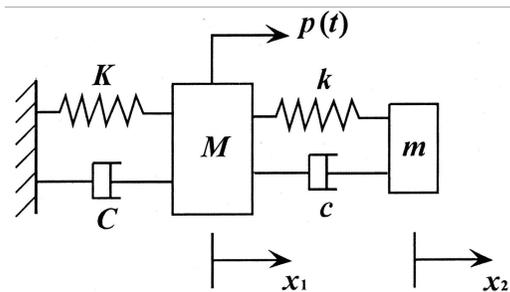


图 1 普通 TMD 减振原理图  
Fig 1 Principle of TMD

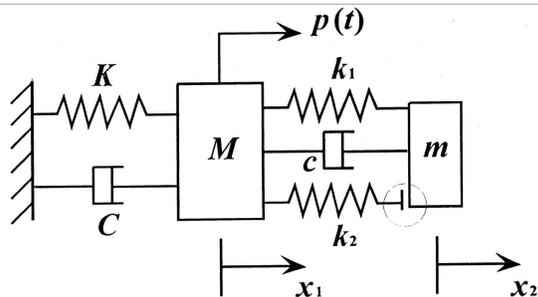


图 2 变频 TMD 减振原理图  
Fig 2 Principle of VF-TMD

$$F = \hat{k}_2(x_1 - x_2) \begin{cases} \delta = 1 & x_1 - x_2 > 0 \\ \delta = 0 & x_1 - x_2 \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

整理后得到下面的运动方程

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_1 + (C+c)x_1 - cx_2 + (K+k)x_1 - kx_2 &= p(t) \\ m\ddot{x}_2 - cx_1 + cx_2 - kx_1 + kx_2 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} k = k_1 & x_1 - x_2 \leq 0 \\ k = k_1 + k_2 & x_1 - x_2 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

实际应用时,先根据实际情况确定质量比  $\mu$ ,得到 TMD 质量  $m$ ,然后根据式(2)确定 TMD 系统的阻尼比  $\zeta_{opt}$ 。系统的刚度  $k_1$  和  $k_2$  取值依赖于主结构的频率,文中假定

$$\begin{cases} f_{T1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m}} = \alpha f_1 & x_1 - x_2 \leq 0 \\ f_{T2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1+k_2}{m}} = \beta f_2 & x_1 - x_2 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $f_{T2}, f_{T1}$  为变频单 TMD 系统的两个频率,但两个频率不同时工作,在不同位移条件下交替进行; $f_1, f_2$  为主结构的前 2 阶自振频率; $\alpha, \beta$  为取值系数。

若激励为简谐荷载,即假定  $p(t) = e^{i\omega t}$ ,则可以通过动力放大系数来优化结构参数。引入变量  $\omega_s =$

$$\frac{\sqrt{K}}{\sqrt{M}}, \zeta_s = \frac{C}{2M\omega_s}, \omega_T = \sqrt{\frac{k}{m}}, \zeta_T = \frac{C}{2m\omega_T}, \lambda = \frac{\omega}{\omega_s}, \gamma = \frac{\omega_T}{\omega_s},$$

$$DMF_s = \frac{\sqrt{A(\lambda)^2 + B(\lambda)^2}}{\sqrt{E(\lambda)^2 + F(\lambda)^2}} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} A(\lambda) = 1 + \mu[\gamma^2(\gamma^2 - \lambda^2) + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] / [(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] \\ B(\lambda) = 2\mu\zeta_T\gamma\lambda^3 / [(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] \\ E(\lambda) = 1 - \lambda^2 - \lambda^2\mu[\gamma^2(\gamma^2 - \lambda^2) + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] / [(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] \\ F(\lambda) = -2\zeta_s\lambda - 2\mu\zeta_T\gamma\lambda^5 / [(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + 4\zeta_T^2\gamma^2\lambda^2] \end{cases} \quad (10)$$

最优参数和有效性的评价准则为主结构最大动力放大系数的最小值的最小化,即

$$\text{Min. Min. Max. } (DMF_s) \quad (11)$$

在一般荷载情况下,TMD 系统的刚度  $k_1$  和  $k_2$  设计值(或系数  $\alpha, \beta$  的取值)要通过反复计算比较得到。

## 2 框架结构减震控制

本文分析的对象是一 12 层框架结构,其平面如图 3 所示。该框架层高 3m,总高 36m。材料为混凝土 C30,弹性模量为  $3.0 \times 10^4$  MPa。计算时做了相应的简化,每层的质量为 19800kg,总质量为 237600kg,结构阻尼比  $\zeta$  为 0.05。分析时假定结构在弹性范围内变形。

分析结构动力响应所采用的地震输入为 1940 年记录的 *EL Centro* 波,其最大加速度幅值为  $341.7 \text{ cm/s}^2$ ,其时程曲线如图 4 所示,取前 40 秒,记录时间间隔为 0.02 秒。

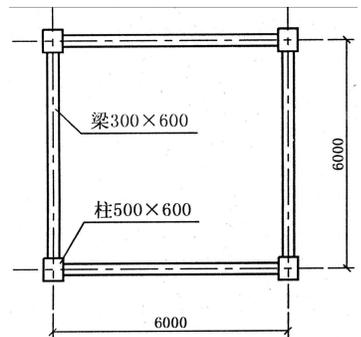


图 3 框架结构标准层平面图(单位: mm)

Fig 3 Plan of frame structure

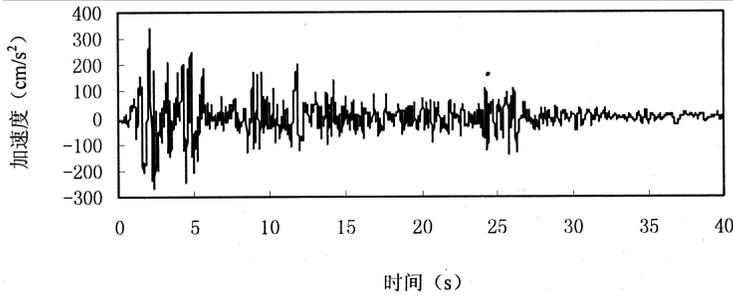


图 4 EL Centro 波加速度时程曲线

Fig 4 Acceleration-time history curve of EL Centro wave

在结构顶层设置 TMD 系统, 取质量比为  $\mu=0.02$ , 则 TMD 系统的质量为  $m=4992\text{kg}$ , 其阻尼比可根据式(2)求得

$$\zeta_T = \left[ \frac{3\mu}{8(1+\mu)^3} \right]^{1/2} = 0.084$$

下面比较无 TMD 系统, 设置普通单 TMD 系统和设置变频单 TMD 系统的动力响应, 不同情况下,  $\mu$  和  $\zeta_T$  不变。采用有限单元法进行计算, 梁和柱单元划分时采用具有横截面的一维梁单元, 在长度方向分为 3 个等长度单元。

### 2.1 无 TMD 系统时结构动力响应

结构前 10 阶频率如表 1 所示, 最大位移响应如表 2 所示。顶层最大剪力为 19.4kN, 底层最大剪力为 100.4kN。

表 1 主结构前 10 阶频率(Hz)

Tab. 1 First 10 natural frequencies (Hz)

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$
0.7447	1.2018	1.4465	2.4689	3.7606	4.3640	4.8198	6.8104	7.3180	7.5036

表 2 无 TMD 系统时结构位移响应最大值(cm)

Tab. 2 Maximum of displacement response without TMD (cm)

第 1 层	第 4 层	第 8 层	第 10 层	第 12 层(顶层)
0.50	4.55	9.35	10.71	11.51

### 2.2 普通单 TMD 系统情况下结构动力响应

频率比为  $\lambda_T = \frac{1}{1+\mu} = 0.98$ , TMD 系统的频率为:  $f_T = \lambda_T f_1 = 0.98 \times 0.7447 = 0.7298\text{Hz}$

此时整体结构的第 1 阶频率变为 0.65817Hz, 第 2 阶为 0.82148Hz, 第 3 阶为 1.2018Hz。其最大位移响应见表 3, 顶层最大剪力为 16.6kN, 底层最大剪力为 91.5kN。

表 3 在普通单 TMD 系统情况下主结构位移响应最大值(单位: cm)

Tab. 3 Maximum of displacement response with common single TMD (cm)

第 1 层	第 4 层	第 8 层	第 10 层	第 12 层(顶层)
0.45	4.03	8.07	9.56	10.15

### 2.3 变频单 TMD 系统情况下结构动力响应

在设置变频单 TMD 系统时,  $\alpha$  和  $\beta$  需要大量试算比较, 寻找最佳组合。通过计算发现, 在  $\alpha$  等于由式

(2) 计算得到的  $\lambda_{opt}$  时, 系统减振效果最好, 即  $\alpha = \lambda_{opt} = \frac{1}{1+\mu} = 0.98$ 。

在  $\alpha=0.98$  时, 减震效果与  $\beta$  的关系如图5所示。纵坐标为减震效果  $D = \frac{x^{12} - x_T^{12}}{x^{12}} \times 100\%$ , 其中  $x^{12}$  为无 TMD 系统时顶层最大位移,  $x_T^{12}$  为变频单 TMD 系统情况下顶层最大位移。

从图5可知, 在  $\beta=0.7715$  时, 减震效果最好, 顶层最大位移响应减少了 35.7%。位移响应最大值见表4。顶层最大剪力为 17.2kN, 底层最大剪力为 74.2kN。

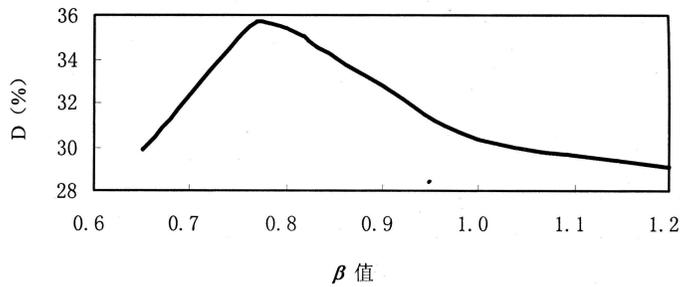


图5  $\beta$  值与减震效果关系图

Fig 5 Relation of  $\beta$  and control effect

表4 在变频单 TMD 系统情况下主结构位移响应最大值(单位: cm)

Tab. 4 Maximum of displacement response with variable frequency single TMD(cm)

第1层	第4层	第8层	第10层	第12层(顶层)
0.31	2.84	5.86	6.79	7.40

下面比较主结构在无 TMD 系统、设置普通单 TMD 系统和设置变频单 TMD 系统时的动力响应, 比较结果见图6、7和表5。

表5 减震效果比较

Tab. 5 Comparison of control effect

	普通单 TMD	变频单 TMD
顶层位移最大值	减小 11.8%	减小 35.7%
底层剪力最大值	减小 8.9%	减小 26.1%

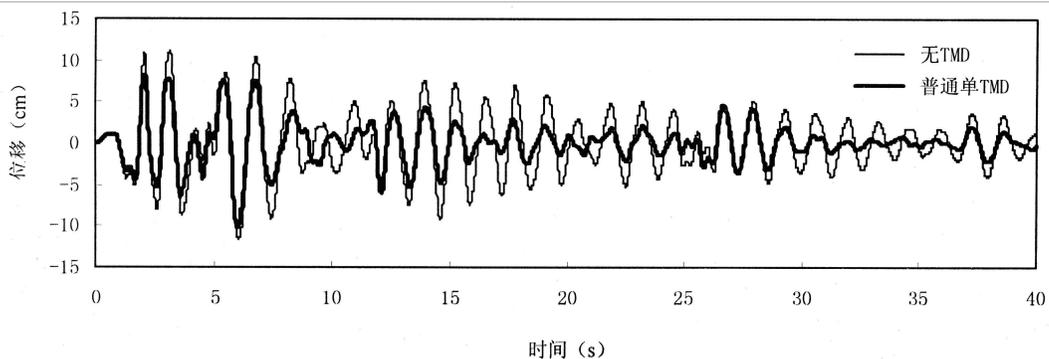


图6 无 TMD 与普通单 TMD 情况下顶层位移时程比较

Fig 6 Displacement-time history comparison of none TMD and common TMD

由以上结果可以看出, 变频单 TMD 系统能有效减小结构的动力响应, 与普通单 TMD 系统相比, 减震效果显著提高。

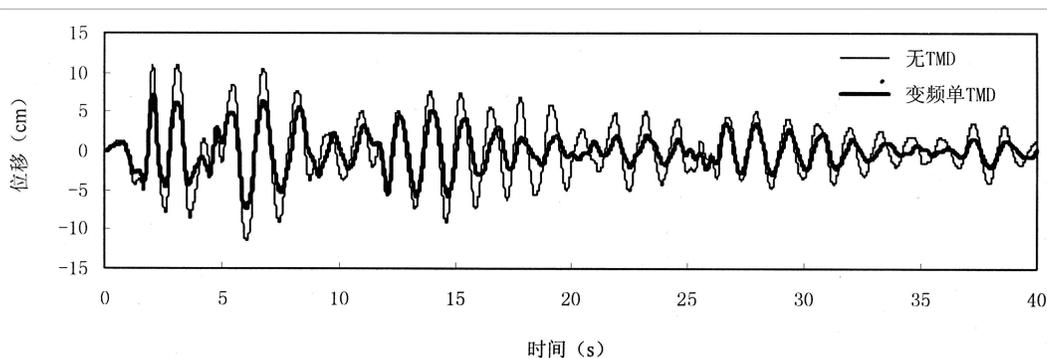


图 7 无 TMD 与变频单 TMD 情况下顶层位移时程比较

Fig 7 Displacement time history comparison of none TMD and variable frequency TMD

### 3 结论

变频单 TMD 系统具有 MTMD 的性能和优点, 能减小结构多个自振频率引起的较大的动力响应, 从而提高其振动控制效果。分析设置变频单 TMD 系统的高层框架结构的动力响应, 得到以下结论:

(1) 变频单 TMD 系统能有效减小结构的动力响应, 与普通单 TMD 相比, 减震效果更为显著。算例中在  $\alpha=0.98$ ,  $\beta=0.7715$  时减震效果最好, 位移响应能减小 35.7%, 与普通 TMD 系统相比, 减震效果提高了 24% 左右。

(2) 变频单 TMD 系统的质量根据实际情况确定, 然后根据式 (2) 确定系统阻尼比; 系统的刚度根据参数  $\alpha$  和  $\beta$  来确定,  $\alpha$  与普通 TMD 系统的最佳频率比  $\lambda_{opt}$  相等时, 系统减震效果较好; 参数  $\beta$  要根据实际情况通过计算比较寻找最优值。

#### 参考文献:

- [1] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structure control: past, present, and future[J]. J Engrg Mech ASCE, 1997, 123(9): 897-971.
- [2] 刘江, 秦岭. 新型变频 TMD 减振分析[J]. 建筑施工, 2004, 26(4): 419-420.
- [3] 张文学. MTMD 抑制铁路轻型桥墩横向振动研究[D]. 硕士学位论文. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2004.
- [4] 张文芳. 建筑结构 TMD 振动控制及新体系减震研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(1): 43-47.
- [5] Villaverde R. Seismic control of structures with damped resonant appendages[A]. Proc of First World Conf on Structure Control[C], 1994, 1, 4: 113-122.