

文章编号: 1000-4750(2011)05-0031-04

# TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系的 减振计算方法

\*柳国环, 李宏男, 国 巍

(大连理工大学土木水利学院, 辽宁, 大连 116024)

**摘 要:** 提出了调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper, TLD)转化为调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)对结构减振控制的计算方法, 采用该方法可方便地采用能够容易数值模拟的 TMD 实现 TLD 对结构的减振控制分析。TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系的理论推导过程简洁、物理概念清晰, 并通过实例分析了一幢 250m 的高层建筑结构, 进而说明该文方法的可行性与合理性, 可便于结构工程师直接利用商业有限元程序对 TLD-结构体系进行数值仿真。

**关键词:** TLD; TMD; 减振控制; 数值模拟; 高层建筑

**中图分类号:** TU311.3 **文献标识码:** A

## AN EQUIVALENT CALCULATION METHOD FOR ANALYSIS OF STRUCTURAL VIBRATION CONTROL OF TRANSFORMING TLD-STRUCTURE TO TMD -STRUCTURE SYSTEM

\*LIU Guo-huan, LI Hong-nan, GUO Wei

(School of Civil &amp; Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** An equivalent calculation method for structural vibration control of a transforming TLD-structure to TMD-structure system is presented and proposed due to the easy implementation of TMD by numerical simulation. The derivation process of the transformation is reasonable and has explicit physical meaning. The analysis of a high-rise building structure 250m in height shows that the proposed method is feasible, accurate and can be directly used in the numerical analysis of the TLD-structure system by adopting commercial finite element software.

**Key words:** tuned liquid damper; tuned mass damper; vibration control; numerical simulation; high-rise building

随着社会进步和经济发展, 大跨、超高层和高耸结构日渐增多。由于此类结构一般兼有高、柔和小阻尼特点, 在强风作用下, 其振动加速度可能不满足舒适度要求; 在大震作用下, 部分构件可能进入屈服阶段甚至破坏<sup>[1]</sup>。TMD 作为一种被动控制装置<sup>[2-3]</sup>, 其理论发展相对比较成熟, 十分容易通过大型有限元程序的数值模拟技术加以实现——弹

簧与阻尼并联后再与质量点连接, 可以有效减小结构的动力反应, 但该装置系统的设计、制作较为复杂, 投入使用后需要经常性维护; 而 TLD 可结合结构上的储水装置来实现, 它是利用液体的惯性和粘性耗能来减小结构的振动反应, 具有经济、多用途、简单易行以及维护费用少等优点<sup>[4-6]</sup>。从 20 世纪 80 年代末起, TLD 引起了土木工程界的广泛关

收稿日期: 2008-09-25; 修改日期: 2011-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50638010); 高等学校学科创新引智计划项目(B08014); 教育部创新团队项目(IRT0518)

作者简介: \*柳国环(1980—), 男, 天津人, 博士, 从事工程结构抗震、抗风研究(E-mail: carecivil@yahoo.com.cn);

李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士, 博导, 院长, 从事工程结构抗震、抗风、健康监测与诊断研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn);

国 巍(1982—), 男, 山东人, 博士, 从事大跨结构抗震研究(E-mail: wei.guo.86@gmail.com).

注<sup>[7-8]</sup>, 但是与 TMD 相比, TLD 的数值模拟相对复杂。鉴此, 寻求一种有效的计算方法, 即将 TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系进行分析则具有工程实用意义, 这也是本文的出发点。

本文针对结构一阶振型控制, 首先回顾了设置动力减振器的结构体系运动统一动力方程, 然后结合两种更为常用的圆形调液阻尼器(Circular Tuned Liquid Damper, C-TLD)和矩形调液阻尼器(Rectangular Tuned Liquid Damper, R-TLD)分别介绍了其可用于工程实际的计算参数, 进而提出将 TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系的数值计算方法。该转化方法巧妙、物理意义清晰且简单易行, 并给出推导过程和可供参考的具体实现方法, 同时还给出了可供参考的说明或注记。最后, 采用本文提出的方法对一幢顶层设置 TLD 的 250m 高的建筑结构分析, 旨在进一步说明本文方法的合理性和准确度。

## 1 减振器-结构体系运动统一方程

在结构顶层位置设置动力减振器, 其动力平衡方程可统一表示为<sup>[9-10]</sup>:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{P}(z, t) - \mathbf{H}(G_1\ddot{X}_n + G_2\ddot{d}) \quad (1)$$

$$G_2\ddot{d} + C_d\dot{d} + K_d d = -G_2\ddot{X}_n \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  表示主结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $G_1$  和  $G_2$  分别对应于 TMD、C-TLD 和 R-TLD 的统一表达参数;  $C_d$  和  $K_d$  为动力吸振器的阻尼系数和刚度系数, 具体参数表达式可见表 1。地震动作用下  $\mathbf{P}(z, t) = \mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{x}_g(t)$ ,  $\mathbf{E}$  和  $\ddot{x}_g(t)$  分别表示单位列向量和地震加速度时程; 风作用下  $\mathbf{P}(z, t)$  表示脉动风力;  $\mathbf{H} = [0, \dots, 0, \dots, 0, 1]^T$ , 即第  $n$  个分量为 1, 其余分量为 0;  $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$  和  $\ddot{\mathbf{X}}$  表示结构相对地面的位移、速度和加速度列向量;  $d$  表示图 1 中所示的 TMD 振子与结构顶层在水平方向的相对位移, 或图 2 和图 3 中分别对应的 C-TLD

表 1 三种动力吸振器的参数表达式

Table 1 Parameter expressions for three type of absorbers

参数	TMD	C-TLD	R-TLD
$G_1$	$m_t$	$\rho\pi r^2 h$	$\rho abh$
$G_2$	$m_t$	$d_1 f_1 m_t$	$d_1 f_1 m_t$
$K_d$	$m_t \omega_t^2$	$m_t \omega_t^2$	$m_t \omega_t^2$
$C_d$	$2\xi_t \omega_t m_t$	$2\xi_t \omega_t m_t$	$2\xi_t \omega_t m_t$
		$d_1 = 1/2.386$	$d_1 = 8/\pi^2$
注:		$\omega_t^2 = 1.84(g/r) \tanh(1.84h/r)$	$\omega_t^2 = \pi(g/a) \tanh(\pi h/a)$
		$f_1 = (r/1.84h) \tanh(1.84h/r)$	$f_1 = (a/\pi h) \tanh(\pi h/a)$

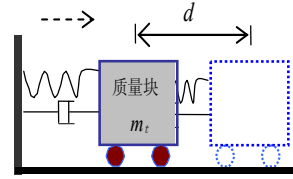


图 1 TMD 示意图

Fig.1 Sketch of TMD device

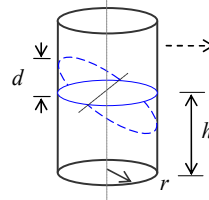


图 2 C-TLD 示意图

Fig.2 Sketch of C-TLD device

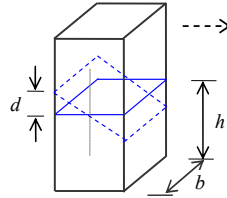


图 3 R-TLD 示意图

Fig.3 Sketch of R-TLD device

和 R-TLD 液面变化的高度;  $X_n$  表示结构顶层的位移。应该说明, 采用数值模拟技术容易实现 TMD 仿真, 即弹簧与阻尼单元并联后再与质量块相连。

考察表 1, 可以发现: 1) 对于三种不同的动力吸振器, 它们的参数  $K_d$  与  $C_d$  表达式均相同; 2) 对于 TMD,  $G_1 = G_2 = m_t$ , 而对于 C-TLD 和 R-TLD,  $G_1 \neq G_2$ 。

## 2 TLD-结构体系转化为 TMD-结构体系方法的提出

由上节容易联想到: 若对应于 C-TLD 和 R-TLD 的  $G_1 = G_2$ , 则将其视为 TMD 减振器, 进而容易利用大型有限元软件实现数值计算。为此, 为了实现这一目的, 换角变度分析, 即可以“强迫”C-TLD 和 R-TLD 中的  $G_1 = G_2 = con = d_1 f_1 m_t$ , 这时对式(1)需要作如下的变化:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{P}(z, t) - \mathbf{H}[(G_2\ddot{X}_n + G_2\ddot{d}) + \Delta f] \quad (3)$$

式中,  $\Delta f = (G_1 - G_2)\ddot{X}_n = \delta_m \ddot{X}_n$ 。

进一步, 将  $\mathbf{H}\Delta f$  项移到式(3)左边, 可整理为:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{P}(z, t) - \mathbf{H}(G_2\ddot{X}_n + G_2\ddot{d}) = \mathbf{P}(z, t) - \mathbf{H}[G_2(\ddot{X}_n + \ddot{d})] \quad (4)$$

式中,

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{H} \Delta f = \\
 & \begin{bmatrix} M_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & M_i & & & \\ \mathbf{0} & & & \ddots & & \\ & & & & M_n & \\ & & & & & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \vdots \\ \ddot{X}_i \\ \vdots \\ \ddot{X}_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} \delta_m \ddot{X}_n = \\
 & \begin{bmatrix} M_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & M_i & & & \\ \mathbf{0} & & & \ddots & & \\ & & & & M_n + \delta_m & \\ & & & & & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \vdots \\ \ddot{X}_i \\ \vdots \\ \ddot{X}_n \end{Bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{M} = \text{diag}(M_1, \dots, M_i, \dots, M_n); \\
 & \mathbf{M}^* = \text{diag}(M_1, \dots, M_i, \dots, M_n + \delta_m).
 \end{aligned}$$

由式(1)~式(5)的转变如图4所示,从物理角度可作如下解释:将C-TLD和R-TLD转化为TMD, TMD质量等于 $G_2$ (而不是 $G_1$ ),而弹簧刚度和阻尼系数不改变;同时,顶层的质量由 $M_n$ 需要变化为 $M_n + \delta_m$ 。通过这样处理,可以将C-TLD-结构体系和R-TLD-结构体系转化为TMD-结构体系,进而可更方便地直接建立有限元模型进行数值计算。

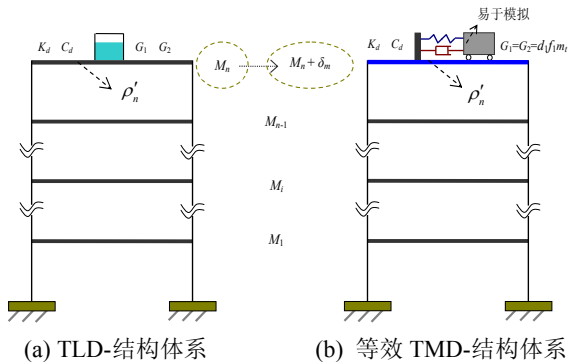


图4 TLD-结构体系等效为TMD-结构体系  
Fig.4 Sketch of transforming TLD-structure to TMD-structure system

由上述分析可知, C-TLD 与 R-TLD 等效转化为 TMD 进行数值模拟, 一般需要如下两方面的工作: 1) 设置 TMD 振子质量为  $G_1 = G_2 = d_1 f_1 m_t$ , 而不是相应水箱中水的质量  $\rho \pi r^2 h$  或  $\rho \pi a b h$ ; 2) 结构模型顶层质量  $M_n$  调整为  $M_n + \delta_m$ , 可通过改变顶层材料密度  $\rho'_n = [(M_n + \delta_m) / M_n] \times \rho_n$  而无需通过改变材料的其他属性和几何属性这一途径加以实现。

在此,有必要作如下解释:将 $G_1$ “强迫”为 $G_2$ ,不仅可以促成式(3)中 $\Delta f$ 的出现,关键是通过进一步整理可将其移至式(1)左边与 $\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}$ 可进一步合并为 $\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{X}}$ 的形式,同时式(2)不发生改变。反之,若将 $G_2$ “强迫”为 $G_1$ ,则不然。

### 3 工程算例验证

上海某高层建筑高250m,如图5和图6所示,主体为钢筋混凝土结构,由于该结构周围风场较为复杂,经风洞试验和计算其顶层加速度大于规范对舒适度的要求,为此采用通过对结构顶部水箱加工和改造等措施设置成了R-TLD。

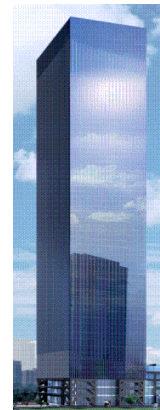


图5 建筑效果图

Fig.5 Architectural effect chart

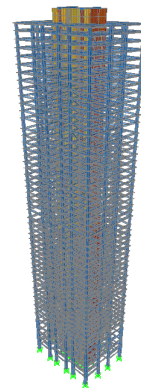


图6 三维有限元模型

Fig.6 3D finite element model

#### 3.1 模型与相关参数介绍

结构的前两阶振型如图7所示。顶层设置2个相同的R-TLD,每个水箱 $2.19 \times 10^5 \text{kg}$ ,总重为 $m_t = 4.38 \times 10^5 \text{kg}$ ,结构第一阶振型归一化模态质量 $M_1 = 20.8 \times 10^6 \text{kg}$ ,质量比 $\mu = m_t / M_1 = 2.1\%$ ;为了保证TLD的优化自振频率,设置水箱 $a = b = 9 \text{m}$ , $h = 2.7 \text{m}$ ;纯水阻尼不能满足优化阻尼的要求,阻尼比与振幅有关,单个水箱中放置了水平和竖直钢丝网的阻尼

比最小为  $\zeta_t=3.47\%$ ; 单个 R-TLD 的相关计算参数见表 2, 根据上文方法得到 TMD 的质量、刚度和阻尼系数依次分别为  $1.39 \times 10^5 \text{kg}$ 、 $5.51 \times 10^5 \text{N/m}$  和  $2.4 \times 10^4 \text{N}\cdot\text{s/m}$ , 同时通过上文可知  $\delta_m=0.8 \times 10^8 \text{kg}$ 。

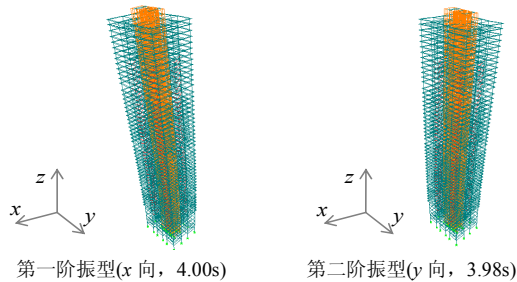


图 7 结构前两阶振型

Fig.7 The first two mode shapes

表 2 单个 R-TLD 相关参数

Table 2 Calculation parameters of single R-TLD

参数	$G_1/$ ( $\times 10^5 \text{kg}$ )	$G_2/$ ( $\times 10^5 \text{kg}$ )	$K_d/$ ( $\times 10^5 \text{N/m}$ )	$C_d/$ ( $\times 10^5 \text{N}\cdot\text{s/m}$ )	$\omega_d/$ (rad/s)	$d_1$	$f_1$
数值	2.19	1.39	5.51	2.41	1.57	0.81	0.78

### 3.2 数值验证

在此, 作两点说明: 1) 考虑到风场的复杂性, 并为寻求方便, 本文比较该 TLD-结构体系在地震作用下的结构反应, 图 8 为选取的上海人工地震波; 2) 如上文所述, 利用有限元软件对 TLD 模拟存在困难, 本文对上述工程等效模型运用 MATLAB 语言进行编程计算, 旨在考察方法本身的合理性。

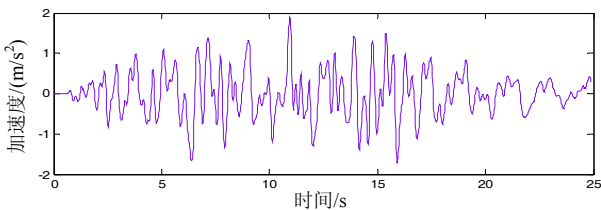


图 8 上海人工地震波

Fig.8 Artificial earthquake wave for Shanghai

结构顶层的位移和加速度时程反应如图 9 和图 10 所示。由计算结果不难发现, 采用本文方法

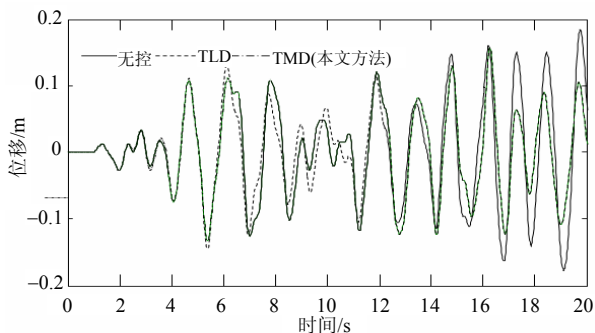


图 9 位移时程反应

Fig.9 Displacement history response of top floor

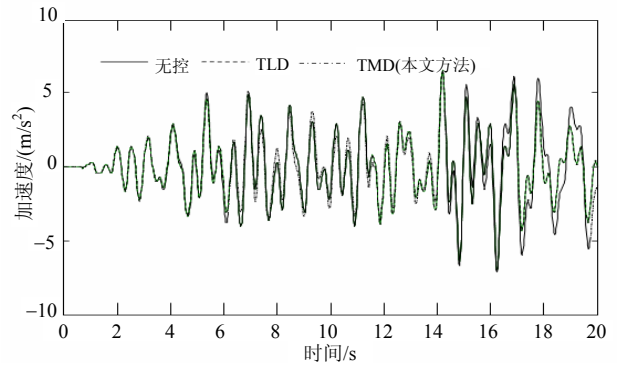


图 10 加速度时程反应

Fig.10 Acceleration history response of top floor

计算得到的结构反应与采用 TLD 方法得到时程曲线几乎完全重合, 从而从数值计算的角度, 进一步验证了本文方法的合理性和可行性。事实上, 吻合度之好是由于上文理论推导过程的严格性。因此, 对于设置 R-TLD 和 C-TLD 的结构体系, 可直接建立有限元模型采用本文提出的方法数值分析。

## 4 结论

鉴于采用有限元程序容易对 TMD 减振器进行模拟, 本文针对 R-TLD-结构体系和 C-TLD-结构体系的数值计算, 提出了将 TLD 转化为 TMD 对结构减振控制的计算方法, 并通过算例给予验证。该方法物理概念清晰, 合理可行, 为结构工程师直接利用有限元软件对 TLD-结构体系进行数值计算提供了方便。

### 参考文献:

- [1] 钱稼茹, Warnitchai P, 丁雄. 用 TLD 减小电视塔动力反应的振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(5): 32—39.  
Qian Jiaru, Warnitchai P, Ding Xiong. Shaking table experiment study on the suppression dynamic response of a TV tower with TLD [J]. Journal of Building Structure, 1995, 16(5): 32—39. (in Chinese)
- [2] 李春祥, 刘艳霞. TMD-高层钢结构系统风振舒适度控制设计方法[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 60—64.  
Li Chunxiang, Liu Yanxia. The design method regarding comfort control of wind-induced vibration for TMD-tall steel structure system [J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(2): 60—64. (in Chinese)
- [3] 李创第, 李瞰, 黄天立. 高层建筑 TMD 风振控制分析的复模态法[J]. 振动与冲击, 2003, 22(2): 1—7.  
Li Chuangdi, Li Tun, Huang Tianli. Complex mode theory used for random wind-induced response of structures with TMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(2): 1—7. (in Chinese)

(参考文献[4]—[10]转第 40 页)

- Beijing: TsingHua University Press, 1987. (in Chinese)
- [7] 宋康祖, 陆明万, 张雄. 固体力学中的无网格方法[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 56—65.  
Song Kangzu, Lu Mingwan, Zhang Xiong. Meshless method for solid mechanics [J]. Advance in Mechanics, 2000, 30(1): 56—65. (in Chinese)
- [8] Ko J, Kurdila A J, Pilant M S. A class of finite element methods based on orthonormal, compactly supported wavelets [J]. Computational Mechanics, 1995, 16: 235—244.
- [9] Chen W H, Wu C W. Spline wavelets element method for frame structures vibration [J]. Computational Mechanics, 1995, 16(1): 11—21.
- [10] Chen W H, Wu C W. Extension of spline wavelets element method to membrane vibration analysis [J]. Computational Mechanics, 1996, 18(1): 46—54.
- [11] Chen W H, Wu C W. Adaptable spline element for membrane vibration analysis [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39: 2457—2476.
- [12] 何正嘉, 陈雪峰, 李兵, 向家伟. 小波有限元理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
He Zhengjia, Chen Xuefeng, Li Bing, Xiang Jiawei. The theory and engineering application of wavelet finite element [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [13] Law S S, Fang Y L. Moving force identification: optimal state estimation approach [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 239(2): 233—254.
- [14] Trujillo D M. Application of dynamic programming to the general inverse problem [J]. International Journal of Numerical Methods in Engineering, 1978, 12: 613—624.
- [15] Bellman R. Introduction to mathematical theory of control process [M]. New York: Academic press, 1965.
- [16] Hansen P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561—580.
- [17] Busby H R, Trujillo D M. Optimal regularization of an inverse dynamic problem [J]. Computers and Structures, 1997, 63(2): 243—248.

(上接第 34 页)

- [4] 李宏男, 闫石, 贾连光. 利用调液阻尼器减振的结构控制研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(3): 99—110.  
Li Hongnan, Yan Shi, Jia Lianguang. Review of current researches on structural vibration control by using tuned liquid damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(3): 99—110. (in Chinese)
- [5] 李宏男, 贾影, 李晓光. 利用 TLD 减小高柔结构多振型地震反应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 122—128.  
Li Hongnan, Jia Ying, Li Xiaoguang. Study on vibration control using TLDs for multi-mode responses of tall flexible structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 122—128. (in Chinese)
- [6] Sun L M. The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(8): 967—976.
- [7] 文永奎, 孙利民. 大跨度斜拉桥钢塔制振方案与参数分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 296—301.  
Wen Yongkui, Sun Limin. Parametric study on vibration control scheme for steel tower of large span cable-stayed bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(3): 296—301. (in Chinese)
- [8] 楼梦麟, 牛伟星, 宗刚, 陈根达. TLD 控制的钢结构振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 145—151.  
Lou Menglin, Niu Weixing, Zong Gang, Chen Genda. Shaking table model test for a steel structure under control of tuned liquid damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 145—151. (in Chinese)
- [9] Chang C C, Qu W L. Unified dynamic absorber design formulas for wind-induced vibration control of tall building [J]. The Structural Design of Tall Buildings, 1998, 7(2): 147—166.
- [10] 瞿伟廉, 陶牟华, Chang C C. 五种被动动力减振器对高层建筑脉动风振反应控制的实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 29—34.  
Qu Weilian, Tao Muhua, Chang C C. Practical design method for effect of five kinds of passive dynamic absorbers on fluctuation wind-induced vibration response control of tall buildings [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 29—34. (in Chinese)