

文章编号:1673-2049(2009)01-0075-05

内置挡板调谐液体阻尼器对高层结构的地震反应控制研究

尹 飞¹, 谭 平¹, 黄东阳², 周福霖¹

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405; 2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:提出一种新型调谐液体阻尼器——内置横向挡板的调谐液体阻尼器(TLDEB)。通过在普通调谐液体阻尼器(TLD)装置中设置横向挡板,使液体绕流时产生附加阻尼来增强其耗能作用,以改善 TLD 对高层建筑的减振效果。结合经典势流理论以及能量耗散原理推导了 TLDEB 的等效位移、附加阻尼比,并对其进行了等效线性化。以某实际高层建筑结构作为算例,通过对地面随机激励和地震波激励的数值仿真来验证 TLDEB 的减振效果。结果表明:TLDEB 可有效地增大结构阻尼,具有比普通 TLD 更优良的减振控制效果。

关键词:内置挡板调谐液体阻尼器;结构控制;阻尼特性;高层建筑;仿真分析;地震反应

中图分类号:TU352.11

文献标志码:A

Research on Seismic Responses of High-rise Structures Controlled by Tuned Liquid Damper Embedded Baffles

YIN Fei¹, TAN Ping¹, HUANG Dong-yang², ZHOU Fu-lin¹

(1. Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China; 2. Graduate School in Shenzhen, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: A new tuned liquid damper device, tuned liquid damper embedded baffles (TLDEB), was proposed to increase energy dissipation through setting transverse baffles in a common tuned liquid damper (TLD) device. The proposed TLDEB was expected to achieve a better control performance for a high-rise building under earthquakes than an common TLD. The equivalent displacement, additional damping ratio and its equivalent linearization of a TLDEB were formulated by using classic potential-flow theory and principle of energy dissipation. A real high-rise building structure was used as a numerical example to demonstrate the damping effectiveness of the proposed TLDEB system subjected to ground random excitation and earthquake wave excitation. The results indicate that TLDEB is capable of improving the structural damping and it has more excellent damping effectiveness than common TLD.

Key words: TLDEB; structural control; damping characteristic; high-rise building; simulation analysis; seismic response

收稿日期:2009-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50608021);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20061078001)

作者简介:尹 飞(1981-),男,天津市人,工学硕士研究生,E-mail:causalgia@sina.com。

0 引言

随着高层建筑日益向大高宽比以及轻质高强材料的方向发展,结构刚度和阻尼不断下降,对风、地震等强激励越来越敏感。结构振动控制作为一种经济、有效的手段,近年来越来越受到重视。其中调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper, TLD)已经成为常用的结构振动控制装置^[1-3]。TLD的阻尼特性直接影响其减振效果,而普通 TLD 难以达到其最优工作阻尼,因此许多学者提出利用内置隔栅的方式来提高 TLD 晃动阻尼^[4-9],但往往隔栅布置很密,影响了液体晃动的稳定性。本文中提出了在水箱内部设置挡板的 TLDEB,使液体绕流时产生附加阻尼,以达到增强 TLD 减振控制效果的目的。对比其他增设格栅的 TLD,较小的有效截面下该设置能产生更明显的附加阻尼,且简单易行,便于实际工程设置。笔者采用经典势流理论与能量耗散原理相结合的方法来研究增设格栅 TLD 的控制性能,并以某实际高层建筑结构作为算例,分别通过随机激励和地震波激励来验证 TLDEB 的减振效果,得到了一系列有意义的结论。

1 TLDEB 模型

本文中提出的内置横向挡板 TLD 装置的模型如图 1 所示。假定挡板为刚性挡板,嵌于矩形水箱中部(半箱长处)。图 1 中, M 为液体总质量, A 为水箱长度, H 为 TLDEB 的液体深度; d 为单边挡板的长度; B 为水箱宽度。此外,水箱中的液体为普通消防用水,其密度 $\rho=1\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

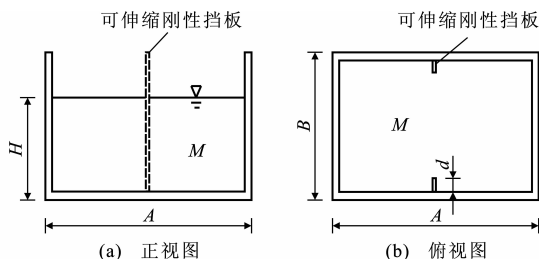


图 1 TLDEB 模型

Fig. 1 TLDEB Model

2 TLDEB 的减振原理

根据流体力学在 TLD 方程推导过程中的基本假定^[10],水箱中的消防用水被认为是不可压缩、非黏滞以及作无旋运动,因此,必存在一速度势函数 Φ , $\Phi=\Phi(x, z, t)$, 其中, x, z 为坐标轴, t 为时间, Φ

满足 Laplace 方程和定解条件,即

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

水箱侧壁速度 u 的边界条件为

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{A}{2}} = 0 \quad -H \leq z \leq 0 \quad (2)$$

水箱底部速度 v 的边界条件为

$$v(x, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-H} = 0 \quad -\frac{A}{2} \leq x \leq \frac{A}{2} \quad (3)$$

满足边界条件式(2)、(3)时可求得速度势函数

$$\Phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^{+\infty} \{ \dot{q}_n(t) \cosh \frac{n\pi(z+H)}{A} \cdot [(\frac{n\pi}{A} \sinh \frac{n\pi H}{A})^{-1}] \cos \frac{n\pi x}{A} \} \quad (4)$$

式中: $q_n(t)$ 为液体晃动第 n 阶振型相对水箱的位移; $\dot{q}_n(t)$ 为相应速度的量值。

在微幅晃动假设下可获得线性化自由面条件,由此可得液面晃动高度 $\eta(x, t)$ 的表达式为

$$\eta(x, t) = \int_0^t \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} dt = \sum_{n=1}^{+\infty} q_n(t) \cos \frac{n\pi x}{A} \quad (5)$$

因此,晃动液体的动能 T 和势能 V 可分别表示为

$$T = \frac{1}{2} \rho B \int_{-H}^0 \int_0^A [(\dot{X} + \frac{\partial \Phi}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \Phi}{\partial z})^2] dx dz \quad (6)$$

$$V = \frac{1}{2} \rho g B \int_0^A \eta^2(x, t) dx \quad (7)$$

式中: \dot{X} 为水平方向的速度; g 为重力加速度。

将式(4)、(5)分别代入式(6)、(7),再将晃动液体的动能和势能引入 Lagrange 方程可得

$$\left. \begin{aligned} m_n \ddot{q}_n(t) + c_n \dot{q}_n(t) + m_n \omega_n^2 q_n(t) &= \gamma_n \ddot{X}(t) \\ n &= 1, 2, 3, \dots \\ m_n &= \frac{8\rho B A^2}{(n\pi)^3} \tanh \frac{n\pi H}{A} \\ \omega_n^2 &= \frac{n\pi g}{A} \tanh \frac{n\pi H}{A} \\ \Gamma_n = \frac{\gamma_n}{m_n} &= \frac{n\pi}{8} \{ [1 - \cos(n\pi)] (\tanh \frac{n\pi H}{A})^{-1} \} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: m_n 为第 n 阶晃动质量; ω_n 为第 n 阶晃动圆频率; Γ_n 为第 n 阶晃动模态参与系数; c_n 为第 n 阶阻尼; γ_n 为系数; $\ddot{X}(t)$ 为水平方向的加速度。

液体晃动的第 1 阶振型的动力效应是最有效的^[11],因此在研究 TLD 的动力特性时,只考虑液体第 1 阶振型所产生的能量耗散。普通 TLD 的阻尼是由水箱与水接触面的黏滞剪切引起的,一般不足 1%^[12],所以增大 TLD 的阻尼是十分必要的。液体绕流过挡板所产生的阻力可以由 Morison 公式得到,即

$$f(x, z, t) = f_d(x, z, t) + f_m(x, z, t) = \rho d C_d [u|u|]_{x=A/2} + 2\rho b d C_m \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]_{x=A/2} \quad (9)$$

式中: $f(x, z, t)$ 为挡板所受到沿晃动方向的液体作用力; $f_d(x, z, t)$ 、 $f_m(x, z, t)$ 分别为阻力系数与惯性力分量; b 为挡板的厚度; C_d 、 C_m 分别为阻力与惯性力系数, 在此可取 $C_d = 6.9$, $C_m = 2^{[13]}$ 。惯性力分量 f_m 对整体的动能有所贡献, 产生了附加晃动质量, 附加晃动质量对固有频率的改变可以忽略不计^[14]。

由于第 1 阶惯性力 $f_{m1}(\frac{A}{2}, z, t)$ 为保守力, 不产生能量的耗散, 故 TLDEB 的耗能特性由第 1 阶阻力 $f_{d1}(\frac{A}{2}, z, t)$ 决定。 $f_{d1}(\frac{A}{2}, z, t)$ 所对应的位移由式(2)对 t 积分得到, 即

$$\delta U_1 = \left[\cosh \frac{\pi(z+H)}{A} (\sinh \frac{\pi H}{A})^{-1} \right] \delta q_1(t) \quad (10)$$

所以, 此阻尼产生的能量耗散可由式(11)表示

$$\left. \begin{aligned} \delta W_1 &= \int_{-H}^0 f_{d1}(\frac{A}{2}, z, t) \delta U_1 dz = \\ &\left. \begin{aligned} &\frac{C_d \rho d A B}{12\pi} \Omega |\dot{q}_1(t)| |\dot{q}_1(t)| \delta q_1(t) \\ &\Omega = (\sinh \frac{3\pi H}{A} + 9 \sinh \frac{\pi H}{A}) (\sinh \frac{\pi H}{A})^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

式中: $q(t)$ 为虚位移。

虚功可由虚力 Q_1 与虚位移 $q_1(t)$ 的乘积来表示

$$\left. \begin{aligned} \delta W_1 &= Q_1 \delta q_1(t) \\ Q_1 &= \frac{C_d \rho d A B}{12\pi} \Omega |\dot{q}_1(t)| |\dot{q}_1(t)| \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对虚力 Q_1 中的非线性阻力进行等效线性化^[15], 等效线性阻尼误差 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \frac{C_d \rho d A B}{12\pi} \Omega |\dot{q}_1(t)| |\dot{q}_1(t)| - c_{eq} \dot{q}_1(t) \quad (13)$$

式中: c_{eq} 为等效阻尼。

将 ϵ 最小化, 通过对 $\frac{\partial E(\epsilon^2)}{\partial c_{eq}} = 0$ 求极值的方法可以确定 c_{eq} , 其中 $E(\cdot)$ 为求期望。将式(13)整理可得

$$c_{eq} = \frac{C_d \rho d A B}{12\pi} \Omega \frac{E[|\dot{q}_1(t)| |\dot{q}_1(t)|]}{E[\dot{q}_1(t)]} \quad (14)$$

假设外激励为高斯稳态随机过程, 将 TLDEB 的等效位移 $x_{TLDEB} = q/\Gamma$ 代入式(14), 且取 σ_{TLDEB} 为 x_{TLDEB} 的标准差^[16], ω 为阻尼器的晃动频率, 由此可将等效阻尼系数和等效阻尼比整理为

$$c_{eq} = C_d \rho \pi d A B (24 \tanh \frac{\pi H}{A})^{-1} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \Omega \omega \sigma_{TLDEB} \quad (15)$$

为求得一定长、宽和水深下 TLDEB 的最优附加等效阻尼, 对式(15)中 H 、 d 求偏导, 经整理可得

$$\frac{\partial}{\partial H} [\Omega / \tanh^2(\pi H/A)] = 0 \quad (16)$$

取 $r = H/A$, 对式(16)用最小二乘法拟合可得 r - d 曲线, 如图 2 所示。

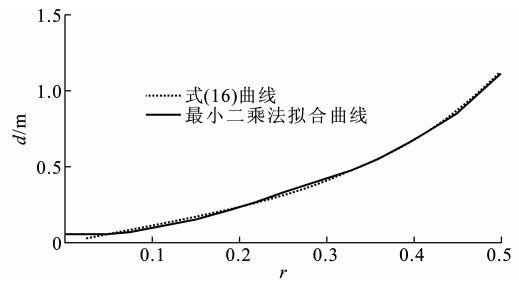


图 2 r 和 d 的关系曲线

Fig. 2 Relation Curves of r and d

为不影响液体晃动的稳定性, d 取值一般不超过水箱长度的 $1/10$ 。

3 仿真分析

为验证 TLDEB 的有效性, 本文中采用 Matlab 语言编制了 TLDEB 体系动力分析的计算机仿真程序, 并对不同激励类型进行了仿真分析。某 18 层剪切型框架结构, 结构层质量(单位: 10^5 kg)分别为 2.45、2.45、2.45、2.45、2.45、2.45、2.254、2.254、2.254、2.254、2.254、2.156、2.156、2.156、2.156、2.156; 层刚度(单位: 10^8 N·m⁻¹)分别为 1.47、1.47、1.47、1.47、1.47、1.47、1.42、1.42、1.42、1.42、1.42、1.37、1.37、1.37、1.37、1.37; 结构阻尼为阻尼比为 5% 的瑞利阻尼。结构频率 $\omega_s = 2.1724$ rad·s⁻¹, 取 TLD、TLDEB 频率与结构频率一致, 可得水箱尺寸(长、宽、水深)为 5 m×5 m×1.61 m, $d = 0.5$ m, 水的质量为结构质量的 1%, 取 $\beta = \omega/\omega_s$ 。

3.1 非平稳随机激励下结构的反应

采用均匀调制演变随机地面加速度激励谱, 其中, 均匀调制演变函数 $p(t) = 4[\exp(-0.0995t) - \exp(-0.199t)]$; 自功率谱为 Kanai-Tajimi 过滤白谱, 各参数取值为功率谱密度 $S_0 = 142.75$, 圆频率 $\omega_g = 19.07$ rad·s⁻¹, 阻尼比 $\zeta_g = 0.544^{[17]}$ 。采用虚拟激励法和精细积分可得结构反应功率谱及均方差, 如图 3、4 所示, 在结构反应开始阶段, TLDEB 和 TLD 的控制效果相差不大, 在经过一定时间的过渡阶段后, TLDEB 对结构的控制效果明显优于

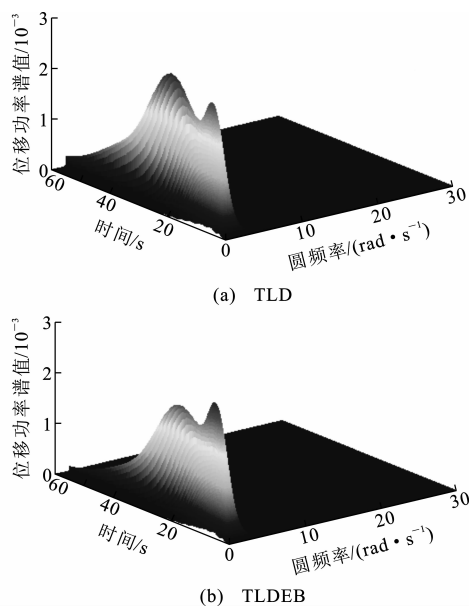


图 3 结构顶层位移功率谱
Fig. 3 Displacement Power Spectra of Top Floor of Structure

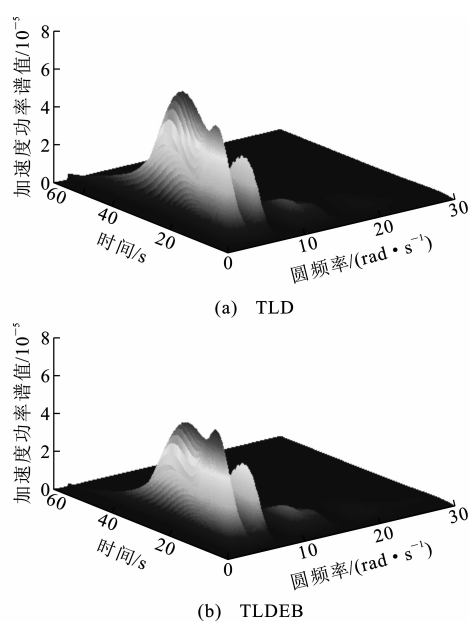


图 4 结构顶层加速度功率谱
Fig. 4 Acceleration Power Spectra of Top Floor of Structure

TLD。其原因是,由于 TLDEB 能提供更大的阻尼,改善结构的能量耗散,对结构的位移和顶层加速度都有了更好的控制效果。

3.2 地震激励下结构的反应

地震动输入分别选取 El Centro 波、Taft 波和 Kobe 波,按中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)调幅为 7 度大震下的峰值加速度为 $220 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,本文中仅给出 El Centro 波下结构顶

层的位移时程和加速度反应时程,如图 5、6 所示。由图 5、6 可以看出,在前 10 s,TLDEB 与 TLD 控制下的结构位移与加速度时程曲线几乎完全一致,之后 TLDEB 体现出了其相对普通 TLD 控制的优势。

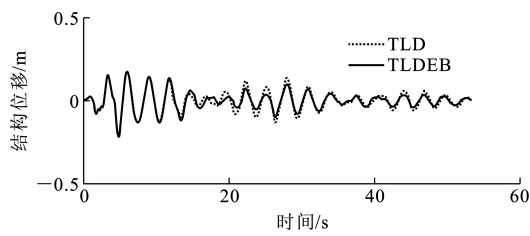


图 5 El Centro 波激励下的顶层位移时程
Fig. 5 Time Histories of Displacements of Top Floor Under El Centro Wave Excitation

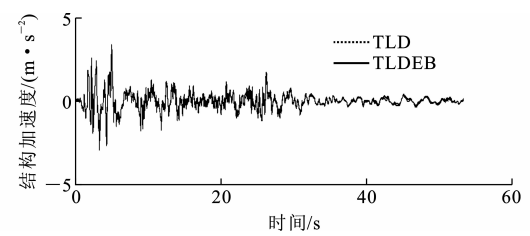


图 6 El Centro 波激励下的顶层加速度时程
Fig. 6 Time Histories of Accelerations of Top Floor Under El Centro Wave Excitation

3.3 减振效果对比

2 种激励下 TLDEB 与普通 TLD 均方差减振效果对比情况列于表 1 之中(随机激励方差最大时变方差 R)。表 1 中减振效果的计算公式为: $R = (\lambda_{\text{TLD}} - \lambda_{\text{TLDEB}}) / \lambda_{\text{TLD}} \times 100\%$,其中 λ_{TLD} 、 λ_{TLDEB} 分别为 TLD 与 TLDEB 的减振效果。由表 1 可知,上述 2 种激励下,TLDEB 均具有比普通 TLD 更优的减振效果。

表 1 TLDEB 与 TLD 均方差减振效果对比

Tab. 1 Comparisons of Average Variance Damping Effects of TLDEB with TLD				
反应激励方式	随机激励	El Centro 波	Taft 波	Kobe 波
位移均方差减振率/%	15.43	10.56	10.59	9.26
加速度均方差减振率/%	16.21	11.24	4.15	10.23

4 结 语

(1)提出在水箱内部设置横向挡板来改善 TLD 的晃动阻尼,较其他增设横向格栅的 TLD 更为简单易行,便于实际工程设置。

(2)建立了 TLDEB 体系的力学模型,结合经典势流理论以及能量耗散原理推导了 TLDEB 的等效位移、附加阻尼比,并对其进行合理等效线性化,构

建了 TLDEB 减振分析的理论基础。

(3) 仿真分析表明,在随机激励和地震波激励时 TLDEB 的减振效果较普通 TLD 均有明显的改善。

(4) 由于 TLDEB 的优良阻尼特性以及简单易行、成本低廉的特点,可望有较好的工程应用前景。由于其内置挡板可通过控制算法来实现主动伸缩,其本质上是一个半主动减振装置。有关 TLDEB 的半主动控制策略以及相应的试验,笔者将展开进一步的研究。

参考文献:

References:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
ZHOU Fu-lin. Damping Control of Engineering Structures [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1997.
- [2] SOONG T T, DARGUSH G F. Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [3] 王肇民. 高耸结构振动控制[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
WANG Zhao-min. Vibration Control for High-rise Structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [4] NOJI T, YOSHIDA H, TATSUMI E, et al. Study on Vibration Control Damper Utilizing Sloshing of Water [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 37: 557-566.
- [5] FEDIW A A, ISYUMOV N, VICKERY B J. Performance of a Tuned Sloshing Water Damper [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(1/3): 237-247.
- [6] WARNITCHAI P, PINKAEW T. Modelling of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks with Flow-dampening Devices [J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 593-600.
- [7] KANEKO S, ISHIKAWA M. Modeling of Tuned Liquid Damper with Submerged Nets [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1999, 121(3): 334-343.
- [8] TAIT M J, EL DAMATTY A A, ISYUMOV N, et al. Numerical Flow Models to Simulate Tuned Liquid Dampers (TLD) with Slat Screens [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(8): 1007-1023.
- [9] TAIT M J. Modelling and Preliminary Design of a Structure-TLD System [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2644-2655.
- [10] 梁启智, 熊俊明. 圆柱形二层流体 TLD 的振动特性分析 [J]. 工程力学, 2001, 18(1): 7-13.
LIANG Qi-zhi, XIONG Jun-ming. An Analysis of Oscillation Characteristics of Two-layer Fluids TLD Using Circular Cylinder Container [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(1): 7-13.
- [11] 钱稼茹, WARNITCHAI P, 丁 雄. 环形调频液体阻尼器(TLD)的计算模型 [J]. 工程力学, 1995, 12(4): 36-46.
QIAN Jia-ru, WARNITCHAI P, DING Xiong. Modelling of Liquid Sloshing in the Annular Region for Damper Application [J]. Engineering Mechanics, 1995, 12(4): 36-46.
- [12] FUJINO Y, PACHECO B M, CHAISERI P, et al. Understanding of TLD Properties Based on TMD Analogy [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 36: 577-590.
- [13] 哈勒姆 M G, 黑弗 N J, 伍顿 L R. 海洋建筑物动力学 [M]. 侯国本, 徐立论, 钟礼英, 译. 北京: 海洋出版社, 1981.
HALLAM M G, HEAF N J, WOOTTON L R. Dynamics of Marine Structures [M]. Translated by HOU Guo-ben, XU Li-lun, ZHONG Li-ying. Beijing: Ocean Press, 1981.
- [14] LAZAN B J, GOODMAN L E. Shock and Vibration Handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [15] CAUGHEY T K. Equivalent Linearization Techniques [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(11): 1706-1711.
- [16] 李宏男, 李忠献, 祁 皑, 等. 结构振动与控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
LI Hong-nan, LI Zhong-xian, QI Ai, et al. Structure Vibration and Control [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [17] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui. Pseudo-excitation Method of Random Vibration [M]. Beijing: Science Press, 2004.