

文章编号: 1000-8152(2010)09-1159-07

# 基于调谐转动惯量阻尼器的结构摆振控制方法(I): 参数影响分析与小型比例模型试验

张春巍<sup>1</sup>, 徐怀兵<sup>1</sup>, 李芦钰<sup>2</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 由于常用的调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)对悬吊结构转动和摆振运动控制无效, 本文结合数值模拟和模型试验对前期研究提出的新型调谐转动惯量阻尼器(tuned rotary inertia damper, TRID)控制系统应用的可行性进行深入研究. 在建立了TRID系统与悬吊结构相互作用力学分析模型以后, 通过数值模拟分析比较了控制系统参数对控制效果的影响; 基于Simulink系统进行非线性运动微分方程数值求解和ADAMS(automatic dynamic analysis of mechanical systems)机构动力学运动仿真分析, 研究了TRID系统控制结构摆振运动的最优参数, 如转动惯量比、调频比、阻尼比等; 通过小型比例模型系统试验验证了TRID系统控制结构摆振的可行性和有效性.

**关键词:** 悬吊结构; 摆振控制; 调谐转动惯量阻尼器; 参数优化; 模型试验

**中图分类号:** TU313.3; TB123 **文献标识码:** A

## Structural pendulum vibration control methods based on tuned-rotary-inertia-damper (I): parametric impact analysis and bench-scale model tests

ZHANG Chun-wei<sup>1</sup>, XU Huai-bing<sup>1</sup>, LI Lu-yu<sup>2</sup>, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Because the commonly-used tuned-mass-damper(TMD) is ineffective in controlling the pendulum vibration of a suspended structure, we explore, by numerical analysis and practical experiments, the swing-motion control of such structures by using an innovative tuned-rotary-inertia-damper(TRID). First, by the non-linear differential equations and the simplified analytical model, we determine the interaction effects between the TRID system and the suspended structure. These effects are studied through Simulink and ADAMS dynamical codes, and the results are summarized and systematically analyzed. Optimal key-parameters of the TRID, such as the inertia ratio, the tuning ratio and the damping ratio, etc., are determined for controlling the swing-motion of structures. The effectiveness and feasibility of TRID control system are further validated by the bench-scale-shaking-table-tests.

**Key words:** suspended structure; pendulum vibration control; tuned-rotary-inertia-damper; parametric optimization; model test

### 1 引言(Introduction)

悬吊质量体的摆动是自然界中普遍而且典型的一种振动/运动形式. 根据吊点与结构运动方向的关系, 悬吊模式可以简化为图1所示3种基本形式.

被动调谐质量阻尼器TMD(tuned mass damper)系统作为土木工程结构振动控制广泛采用的一种被动控制装置, 其突出特点是控制装置结构简单、工作可靠、效果稳定<sup>[1~6]</sup>. 大量试验研究结果已表明TMD系统对平动悬吊模式的摆动有良好的控制效果, 但本

文作者发现传统TMD对于转动悬吊模式摆动的控制基本无效. 本文的前期工作<sup>[7~10]</sup>基于TMD系统控制结构平动运动状态的工作原理, 提出了类似的用于结构回转摆振控制的调谐转动惯量阻尼器(tuned-rotary-inertia-damper, TRID)控制系统的概念. 具体是在具有回转运动特征的结构上附加具有回转惯量的质量体, 在该质量体与主结构之间设置扭转弹簧, 形成与主结构摆振频率调谐的“惯量-扭簧”振子, 构成TRID控制系统; 建立了悬吊质量体系摆振运动

的非线性微分方程,对比分析了平动与转动控制系统的异同;提出了回转TRID控制系统与经典的结构—平动TMD控制系统的工作原理的相似性问题.本文在此基础上研究TRID控制系统详细的数值分析和有关试验验证,包括回转惯量比的优化、系统的最优调频比和阻尼比等,有关结果将为实际悬吊结

构的复杂非线性运动及其摆振控制建立部分理论基础.此外,对于图1所示平动与转动耦合的悬吊质量运动模式,质量体做既有位移又有转角的平面运动模式,由于其位移与转角是相关的<sup>[11,12]</sup>,因此只要把质量体的转角作为控制目标,采用与转动悬吊模式相应的控制装置,即可有效控制其摆动.

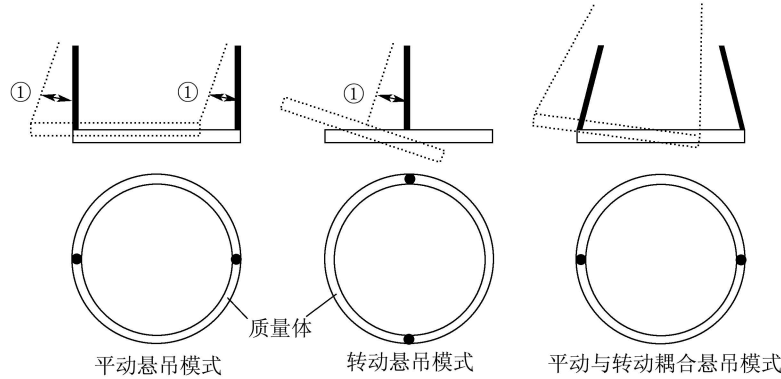


图1 悬吊质量体系运动模式的简化模型

Fig. 1 Simplified model for motion modes of suspended structures

## 2 结构摆振与TRID系统的简化分析模型(Simplified analysis model of pendulum and TRID system)

结合本文研制开发的大型桥式吊车试验系统与TRID控制装置具体情况,建立用于仿真分析的系统简化计算模型,如图2所示.

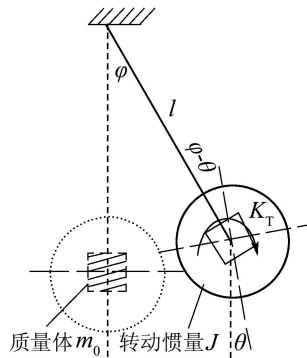


图2 悬吊质量及其摆振控制系统简化计算模型

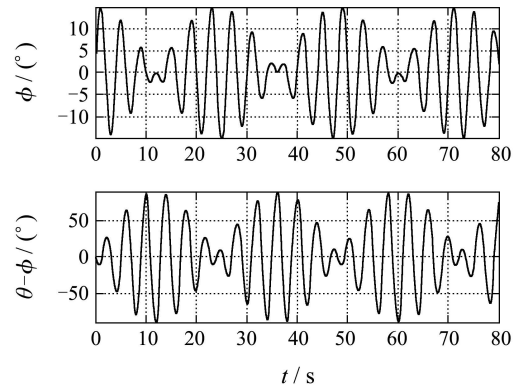
Fig. 2 Simplified calculation model for suspended structure and the TRID control system

基于Lagrange差分法推导出系统的运动微分方程为

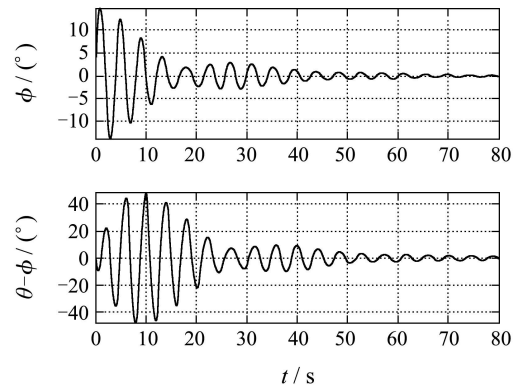
$$\begin{cases} (m_0 + m)l^2\ddot{\phi} - C_T(\dot{\theta} - \dot{\phi}) + \\ (m_0 + m)gl \sin \phi - K_T(\theta - \phi) = 0, \\ J\ddot{\theta} + C_T(\dot{\theta} - \dot{\phi}) + K_T(\theta - \phi) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

由基于上述系统运动微分方程建立的Simulink模型结合基于机构动力仿真软件ADAMS建立的运动机构仿真模型,进行数值模拟计算分析,考虑

TRID系统中无阻尼和有阻尼两种情况,在给定初始摆角的条件下得到结构摆角和TRID控制装置的转角(图3),以及系统的能量变化时程曲线(图4).



(a) 无阻尼情况

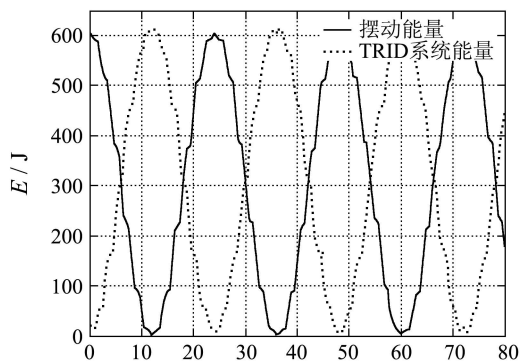


(b) 有阻尼情况

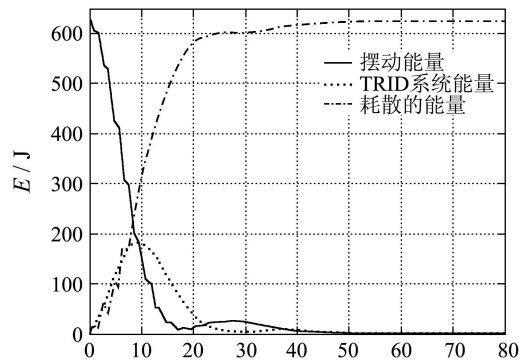
图3 结构摆角与TRID扭簧扭转角时程

Fig. 3 Time history of structural pendular angles and TRID rotation angles

由图3(a)和图4(a)可以看出, 无阻尼情况下, 吊摆摆角与TRID扭转角呈现此消彼长的现象, 这表明系统能量在TRID控制系统和吊摆之间来回传递, 系统总能量无损耗; 此时若在TRID系统中引入与扭转弹簧扭转角速度相关的回转阻尼, 就能有效地消耗系统运动能量, 起到控制摆角的作用, 如图3(b)和图4(b)所示. 图3(b)给出的TRID系统转角还表明控制系统工作需要结构摆动几个周期把能量逐渐传递给TRID控制系统. 此外, 基于ADAMS软件的样机仿真结果还表明TRID控制系统同样能有效地控制平动和转动耦合悬吊模式的摆动.



(a) 无阻尼情况



(b) 有阻尼情况

图4 系统能量变化历程

Fig. 4 Time history of system energy

### 3 TRID系统参数影响分析(Parametric impact analysis of TRID system)

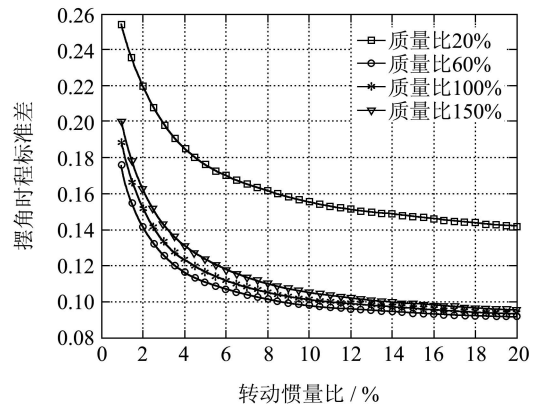
TRID控制系统有效工作的前提是摆动能量能够逐渐传递给TRID系统的转动惯量, 再由扭转阻尼耗散系统运动能量, 因此系统控制效果将受到转动惯量比、阻尼比和调频比等参数的耦合影响. 本节主要给出TRID控制系统各主要参数对结构转动模式摆振控制效果的影响规律.

### 3.1 转动惯量比对控制效果的影响(Impact of rotary inertia ratio on system control effectiveness)

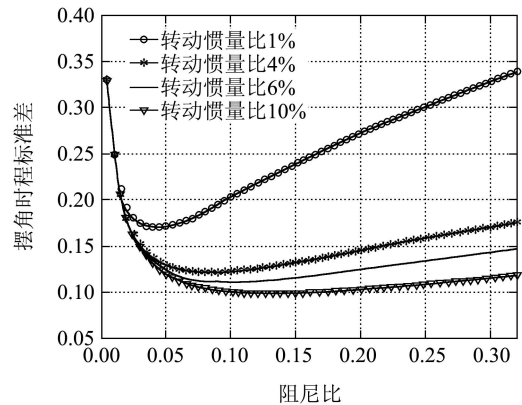
定义系统转动惯量比为

$$r_J = \frac{mr^2}{m_0l^2},$$

分析不同转动惯量比及质量比和TRID系统阻尼比对控制效果的影响规律. 基于Simulink求解运动微分方程的数值分析结果如图5所示.



(a) 转动惯量比-质量比影响



(b) 转动惯量比-阻尼比影响

图5 转动惯量比对系统控制效果的影响

Fig. 5 Impact of rotation inertia on system control effectiveness

由图5(a)和图5(b)可以看出: 1) 当质量比一定时, 转动惯量比越大, 则控制效果越好; 2) 对于同样的转动惯量比, 质量比越小(回转半径越大), 控制效果越好; 3) 转动惯量比与阻尼比对控制效果的影响存在耦合效应, 定量结果变化规律不单调、存在优化区间. 例如当转动惯量比大于6%后, 摆角时程相对标准差减小趋于缓慢, 控制效果增加不多, 当转动惯量比小于4%时, 控制效果变差. 因此上述系统参数配置情况下转动惯量比的经济区间约为4%~6%.

### 3.2 阻尼比对控制效果的影响(Impact of damping ratio on system control effectiveness)

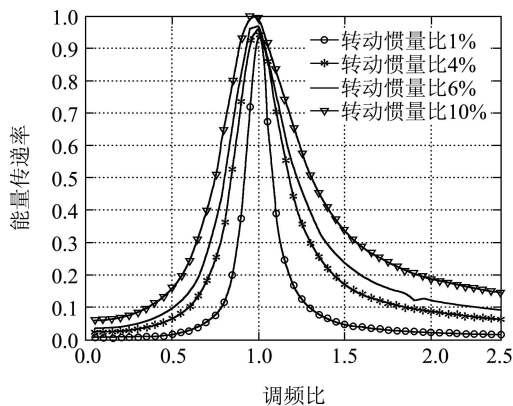
由图5(b)可见,在不同的转动惯量比时,阻尼比都有一个最优值,在此最优值时的控制效果最好,阻尼比过小和过大都会使控制效果变差.这是因为在阻尼比过小时,消耗能量较慢、系统耗能能力低;在阻尼比过大时,粘滞阻尼扭矩过大,TRID控制系统不能被充分地激励起来,TRID系统吸收的能量少,耗能也少.

由图5(b)还可以看出,转动惯量比越大其最优阻尼比也越大.且转动惯量比越大,控制效果对大阻尼情况下阻尼比越不敏感.因此在实际问题可以接受的范围内应尽量取用大的转动惯量比,以增大阻尼比的可选范围,提高TRID系统的适应性.

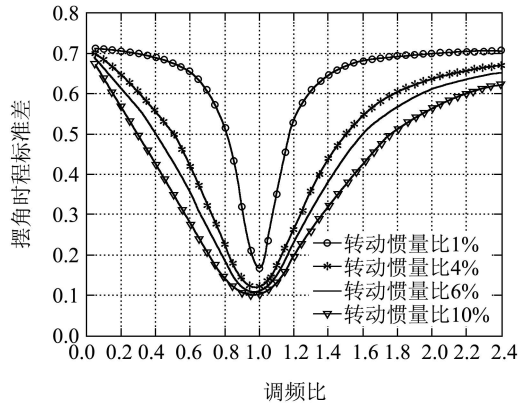
### 3.3 调频比对控制效果的影响(Impact of tuning ratio on system control effectiveness)

由图6(a)可见,在无阻尼情况下,当调频比接近1时,吊摆对TRID控制系统而言相当于一个与其自振周期调谐的激励源,使吊摆运动能量能够100%传递到TRID控制系统中,此时若在TRID控制系统中加入合适的阻尼就能够消耗掉吊摆摆动的能量,从而有较好的控制效果,如图6(b)所示.当频率偏离吊摆频率时,系统的能量传递率迅速下降,致使控制效果变差.

此外,转动惯量比也是能量传递率的一个重要影响因素,随着转动惯量比的增加,能量传递率增加很快,转动惯量比越小,能量传递率对调频比越敏感,表现为图6(a)中曲线的共振区峰宽窄以及非共振区的幅值高低.这是因为在转动惯量比较小时,需要频率更接近的周期激励才能使控制系统充分运动起来,进而对吊摆施加较大的控制作用,才能有较好的控制效果.这同样说明,实际应用中TRID系统应采用较大的转动惯量.



(a) 无阻尼情况



(b) 有阻尼情况

图6 转动惯量比对系统控制效果的影响

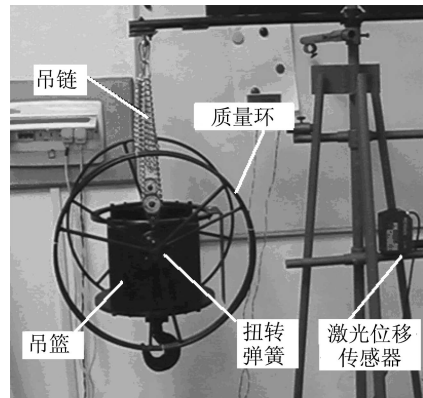
Fig. 6 Impact of rotation inertia on system control effectiveness

## 4 试验验证(Experimental verifications)

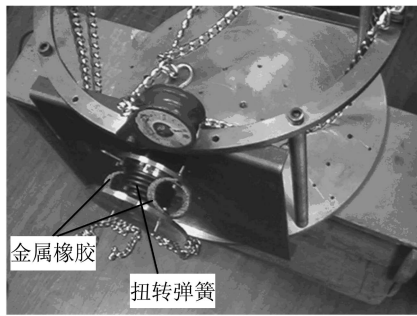
为了验证新型TRID控制系统的可行性,研制了一套小型比例模型试验系统.通过基于小型振动台的各种激励输入下有控和无控试验对比,验证了TRID系统控制悬吊结构转动运动的有效性.

### 4.1 小型比例模型试验(Bench scale model experiments)

为进行平动和转动控制的对比试验,设计制作了两套小型比例模型试验系统,该试验系统为摆长可调、配重可调、摆动方向可以任意调节以实现平动、转动、平转耦联转动等不同运动模式的小比例试验模型系统.试验系统整体悬挂于一钢质悬臂弹性杆上,通过调节悬臂段长度可以模拟船上吊钩的塔臂颤动影响.考虑振动台的承载能力,小型试验系统相似比设计为几何相似比1:25,质量相似比1:2000,时间相似比1:5,加速度相似比1:1.根据上述相似比例关系设计加工了如图7所示吊摆模型和小型TRID控制系统.并针对图7所示的试验装置进行一些典型工况的无控和有控试验.



(a) 模型试验系统



(b) 小型TRID系统

图 7 悬吊结构摆振控制小型比例模型试验系统照片  
Fig. 7 Photos of structural pendular vibration control test system

#### 4.2 初位移下自由振动衰减试验(Self-vibration experiments under initial offset)

对吊摆给定初始偏移然后释放, 吊篮做以吊点为中心的摆动, 图8, 9为试验得到的吊篮位移时程曲线及其幅频曲线.

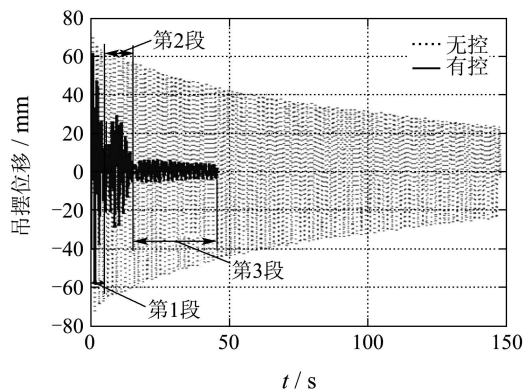


图 8 自由振动摆幅时程响应曲线

Fig. 8 Pendular displacement response curve

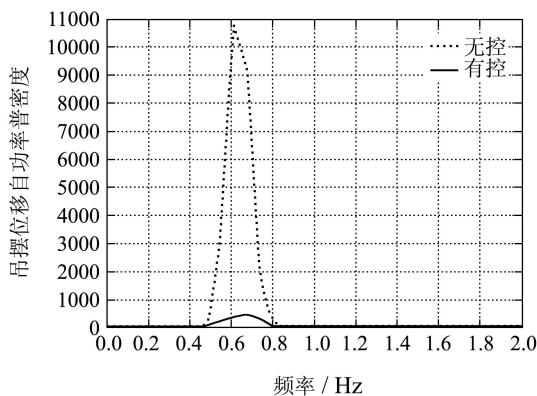


图 9 吊摆位移自功率谱密度

Fig. 9 Self-power spectral density of the pendular displacement

从无控和TRID控制试验结果对比可以看出: TRID系统对吊篮的摆动有很好的控制作用, 类

似于TMD系统对结构的平动施加有效的阻尼作用. 如图8所示, TRID控制时吊摆响应大致可以分为3个阶段: 1) 吊篮位移大约在5 s时已减到很小; 2) 随后吊篮位移又逐渐增大, 再减小. 这是因为TRID控制系统阻尼较小, 吊摆摆动能量传递到TRID系统后不能被及时耗散掉, 能量又从TRID系统传递回吊摆, 转化为吊摆摆动能量, 使吊篮位移减小后又变大; 然后吊篮摆动能量又逐渐被TRID系统吸收并耗散掉, 所以吊篮位移增大后又很快减小; 3) 在前面两阶段后, 吊篮摆动位移已经很小, 又由于TRID系统中存在摩擦, TRID系统不能再次启动, 此后吊篮摆动在自身摆动阻尼和摩擦作用下缓慢衰减.

实际上TRID控制下吊摆在20 s左右时吊篮位移响应幅值已经可以控制在5 mm以内, 而无控位移响应在150 s时仍然在20 mm以上, 试验结果表明无控时吊篮摆动的阻尼比随着振幅减小而减小, 实测结果表明若希望结构完全消摆可能需要相当长时间. 以上充分证明了TRID系统控制结构转动运动的有效性, 并且如果将TRID控制系统阻尼设置到最优阻尼, 可以避免图8第2段中TRID系统能量传递回吊摆, 使吊摆运动更快衰减.

通过调整吊链长度, 可以使吊摆以不同的频率摆动, 从而进行不同调频比(TRID系统的频率与摆动频率的比值)工况下的试验. 不同调频比时的控制效果总结见表1. 由表1中结果可以看出, 当控制系统与吊摆频率调谐一致时控制效果最佳; 当频率稍有偏离(例如 $\pm 10\%$ )时, TRID系统依然有较好的控制效果.

表 1 吊摆初始偏移工况试验结果  
Table 1 Typical test results subject to initial displacement condition

调频比	PSD峰值( $\times 10^3$ )		相对标准差	
	无控	有控	无控	有控
0.9	11.965	3.420	0.5463	0.3045
1.0	10.810	0.481	0.5239	0.1959
1.1	8.382	1.355	0.4549	0.2105

#### 4.3 正弦激励实验(Experiments under sine excitation)

采用Shaker II振动试验台对吊点输入与结构自振频率相接近的正弦位移激励, 分别在于无控和TRID控制时测量吊篮位移时程. 图10, 11为试验得到的吊篮位移响应曲线及其幅频曲线.

由图10可以看出:在无控情况下,输入正弦荷载时,吊篮位移逐渐增大,最后稳定于一个较大的位移响应.这是因为当振动台输入激励的频率与吊摆频率相近时,吊摆摆幅由于共振而迅速增大.又由于单摆为非线性系统,所以当达到一定摆幅后,由于自振周期的改变而进入非共振区,所以其幅值不会无限制的增大.

在TRID控制情况下,吊摆的位移起初逐渐增大然后稍有减小后趋于稳定.其原因为吊摆在正弦激励作用下起初因共振摆幅逐渐增大,然后安装于吊摆上的TRID系统逐渐吸收并耗散掉振动台输入的部分能量,因此TRID系统耗散能量有一定滞后.当振动台输入功率和TRID耗散功率相近时,吊摆逐渐稳定于一个较小摆幅.

由幅频关系曲线图11可以得出,回转控制装置对共振正弦激励时吊摆的摆动有很好的控制效果,有控时的吊摆位移自功率谱密度曲线的峰值仅为无控时的6.81%.正弦激励下吊摆响应控制效果列于表2.

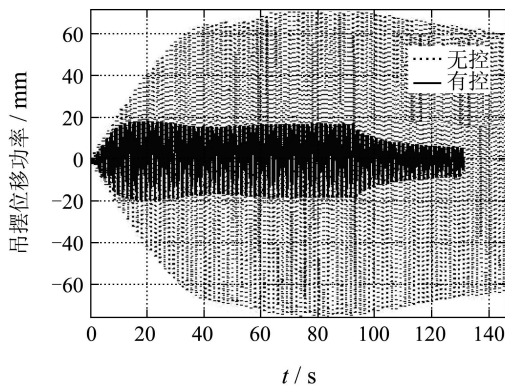


图10 正弦激励下摆幅曲线

Fig. 10 Displacement response curve under sine excitation

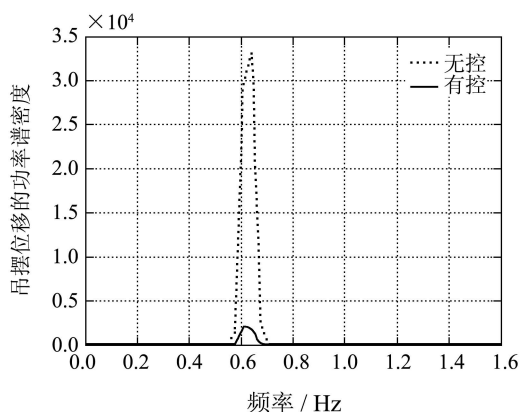


图11 正弦激励下吊摆位移自功率谱密度

Fig. 11 Self-power spectral density of the pendular displacement

表2 正弦激励下的吊摆响应控制结果

Table 2 Controlled response results under sine wave excitations

工况	位移峰值/mm	PSD峰值( $\times 10^3$ )	相对标准差
无控	71.5708	3.3326	0.5819
有控	18.0359	0.2172	0.1371

## 5 结论(Conclusions)

本文针对前期研究提出的控制悬吊结构转动运动模式摆动的新型调谐转动惯量阻尼器(TRID),详细分析了TRID系统参数的影响规律并进行了小型比例模型试验验证,得到以下主要结论:

1) 建立了TRID控制吊摆运动的系统模型,通过数值模拟分析和基于ADAMS软件的样机仿真证明了TRID系统控制吊摆摆动的有效性.此外,基于ADAMS软件的样机仿真结果还表明TRID系统同样能有效地控制平动和转动耦合模式的悬吊结构摆振.

2) TRID控制系统有效工作的前提是摆动能量能够逐渐传递给TRID系统的转动惯量,再由扭转阻尼耗散系统运动能量,本文分析了TRID系统转动惯量比、阻尼比和调频比等参数对控制效果的耦合影响,结果可以用于TRID控制机理分析和指导设计.大量数值分析结果表明TRID系统转动惯量比越大,其相应的最优阻尼比也越大,系统耗能能力越强,控制效果越好;并且转动惯量比越大,控制效果对最优阻尼比的敏感性越低.

3) 通过小型振动台在各种激励下的有控和无控试验,进一步验证了TRID系统控制悬吊结构摆动的有效性和可行性.揭示了当TRID控制系统与吊摆频率调谐一致时控制效果最佳,当频率稍有偏离时,控制效果有降低的趋势;当TRID系统阻尼比偏小时,TRID系统不能及时耗散激励输入能量,因此实际应用时应考虑按照最优阻尼设计;试验结果还表明TRID系统内摩擦效应使其在吊摆摆幅很小时不能正常启动,其定量影响规律还有待于深入研究.

## 参考文献(References):

- [1] DEN HARTOG J P. *Mechanical Vibrations*[M]. 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 1956.
- [2] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structure control: past, present, and future[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(9): 897 - 971.
- [3] SOONG T T, DARGUSH G F. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.

- [4] 欧进萍. 结构振动主动、半主动与智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
(OU Jinping. *Structural Vibration Control: Active, Semi-active and Smart Control*[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [5] 汪凡. 吊钩长周期摆振的齿轮摆式TMD控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
(WANG Fan. *Gear Type TMD Control For Long Period Motion of Suspended Hook Structure*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.)
- [6] 胡晓锋, 胡世德. 最小均方位移条件下的TMD参数设计[J]. 结构工程师, 1999, (2): 32–35.  
(HU Xiaofeng, HU Shide. TMD parametric design under minimum RMS displacement constraints[J]. *Structural Engineers*, 1999, (2): 32–35.)
- [7] OU J P, ZHANG C W, LI L Y, et al. Swinging motion control of flexible suspended hook structure system[C] //4th World Conference on Structural Control and Monitoring. San Diego, California: [s.n.], 2006.
- [8] ZHANG C W, OU J P. Modeling and active control of flexible suspensory structural system[C] //7th World Congress on Computational Mechanics. Los Angeles, California: [s.n.], 2006.
- [9] ZHANG C W, LI L Y, OU J P. Principles and applications of structural pendular vibration control[C] //Proceedings of Earth and Space Conference 2008. Long Beach, CA: [s.n.], 2008.
- [10] ZHANG C W, LI L Y, OU J P. Swinging motion control of suspended structures: Principles and applications[J]. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(5): 549–562.
- [11] CLOUGH R W, PENZIEN J. 结构动力学[M]. 王光远, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1983.  
(CLOUGH R W, PENZIEN J. *Dynamics of Structures*[M]. Wang Guangyuan, et al translate. Beijing: Science Press, 1975.)
- [12] BAKER G L, BLACKBURN J A. *The Pendulum – A Case Study in Physics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2006.

### 作者简介:

**张春巍** (1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事结构振动控制研究, E-mail: zhang\_chunwei@hit.edu.cn;

**徐怀兵** (1983—), 男, 博士生, 主要从事结构振动控制研究, E-mail: xuhuaibing07@126.com;

**李芦钰** (1980—), 男, 博士, 主要从事结构非线性振动控制研究, E-mail: liluyu@yeah.net;

**欧进萍** (1959—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事结构控制、监测与智能材料研究, E-mail: oujinpings@hit.edu.cn.

## 下 期 要 目

- 离散动力系统混沌化——配置若干个Lyapunov指数 ..... 陈旭, 晋建秀, 丘水生
- 多级生产批量规划问题的柔性惯量反捕食粒子群算法 ..... 韩毅, 蔡建湖, 周根贵, 李延来, 唐加福
- 斜拉索的磁流变半主动自适应控制器设计 ..... 樊晓平, 武利冲, 杨胜跃
- 竞争合作型协同进化免疫算法及其在旅行商问题中的应用 ..... 刘朝华, 章兢, 张英杰, 吴建辉
- 多约束条件蚁群优化算法的收敛性分析及其应用 ..... 金劲, 洪毅, 赵付青, 余冬梅
- 小波统计法的表面缺陷检测方法 ..... 张学武, 吕艳云, 丁燕琼, 梁瑞宇
- 目标自动跟踪系统中瞄准线控制器的综合化设计 ..... 邱晓波, 周启煌, 窦丽华, 单东升
- 求解无约束优化问题的知识进化算法及其收敛性分析 ..... 严太山, 崔杜武
- 一类新的时滞混沌系统及其最小能量引导控制 ..... 涂建军, 何汉林
- 基于仿射控制输入的输入状态稳定非线性预测控制 ..... 史冬琳, 毛志忠
- 多变量时滞过程解耦Smith控制 ..... 黄灿, 桂卫华, 阳春华, 蒋朝辉, 谢永芳
- 群活性与粒子群优化算法的稳定性分析 ..... 苏守宝, 曹喜滨, 孔敏
- 大规模编队空战队形优化算法 ..... 夏庆军, 张安, 张耀中