屋盖 MRD 隔震升船机结构模型振动台试验

吕明云 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

瞿伟廉

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 升船机结构塔柱平台处的刚度突变会引起升船机顶部厂房强烈的地震鞭梢效应,在升船机结构模型上设置屋盖磁流变阻尼器 MRD(Magnetorhelogical Damper)隔震系统并进行振动台试验,以验证该系统对控制升船机结构顶部厂房地震鞭梢效应的有效性. 设计制作了升船机结构模型和磁流变阻尼器隔震系统,分别进行了原结构模型和屋盖 MRD 隔震结构模型的振动台试验,并对模型结构的动力特性和振动反应进行了对比分析. 试验结果表明:MRD 隔震系统改变了模型结构的动力特性,有效地减小了升船机结构模型顶部排架层的层间侧移反应. 最后进行了数值分析,并与试验结果进行了比较,验证了屋盖 MRD 隔震-升船机结构系统力学模型与数值分析方法的正确性.

关 键 词: 数值分析; 升船机结构; 鞭梢效应; 屋盖 MRD 隔震系统; 振动台试验

中图分类号: TU 352. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0288-05

Shaking table test on ship lifts model with roof MR damper isolation system

Lü Mingyun Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Qu Weilian

(Institute of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The sudden stiffness change on the top of tube towers of ship lifts caused the intensive seismic whipping effect to the top machinery building. To suppress the whipping effect, a roof MRD (magnetorhelogical damper) isolation system were presented. The structure model of ship lifts and MRD isolation system designed, the shaking table tests were carried on a ship lifts structure model with and without the roof MRD respectively. The dynamic characteristics and the responses were compared for these two shaking model. Test results show that the roof MRD isolation system changed the dynamic characteristics of the model structure, the proposed control system is quite valid in reducing seismic responses of top building of the model structure. The validity of the numerical model and analysis method for roof MRD isolation system were verified by the comparisons between the results of the shaking table tests and numerical analysis.

Key words: numerical analysis; ship lifts; whipping effect; roof MR damper isolation system; shaking table test

收稿日期: 2003-08-25

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA339020)

作者简介: 吕明云(1969-),男,湖北公安人,博士生, lvmingyun@ sina. com.

升船机是水利枢纽工程中重要的通航设施之一,它一般由 2 个或 4 个巨大的钢筋砼塔柱结构支撑一个顶部大跨机房组成[1]. 由于升船机塔柱要支撑巨大的荷载,升船机塔柱的抗侧刚度很大,通常是顶部机房排架柱的数百倍. 于是在塔柱顶部钢筋砼平台处会产生侧移刚度突变,这种巨大的刚度突变会引起升船机顶部机房强烈的地震鞭梢效应. 由于升船机顶部厂房排架方向较难设置各种耗能支撑系统,因此难以用常规的结构振动控制方法来抑制升船机顶部厂房的鞭梢效应[2]. 而磁流变阻尼器 MRD(Magnetorhelogical Damper)是一种性能非常优越的可控阻尼器,根据结构的振动反应调节阻尼器磁场强度可以在毫秒数量级改变磁流变液的力学阻尼性能,实现对结构振动的智能控制[3,4]. 屋盖隔震垫和磁流变阻尼器组成的智能隔震系统能有效地减小升船机结构顶部厂房的最大层间侧移和厂房柱底的最大弯矩反应,是抑制升船机结构顶部厂房地震反应鞭梢效应的一种有效和实用的半主动控制装置[5]. 文献[5]在确立屋盖 MRD 隔震升船结构计算力学模型的基础上,建立了屋盖 MRD 隔震系统对升船结构顶部厂房地震反应控制的控制方法,并以中国某大坝巨型升船结构为背景进行了数值仿真分析. 为验证屋盖 MRD 隔震控制装置的有效性,本文对设置屋盖 MRD 隔震系统的升船机结构振动台模型进行了振动控制的机理性试验;同时对振动台模型进行数值分析计算,比较数值计算结果和实测结果,以验证设置屋盖 MRD 隔震-升船机结构系统的力学模型和数值分析方法的正确性.

1　振动台试验模型

1.1　振动台试验模型

振动台试验采用的升船机结构模型为 2 层框架结构,平面尺寸为 1.6 m×1.6 m,立面图如图 1 所示. 结构模型中上下 2 层的水平抗侧刚度相差较大,上部 2 榀钢排架用于模拟升船机顶部厂房,下部两榀钢筋混凝土框架结构模拟升船机塔柱结构. 上层钢排架柱截面为 12 mm×160 mm,高 600 mm;下层钢筋混凝土框架柱截面为 200 mm×200 mm,高 1 600 mm,混凝土等级 C20.

为了便于安装屋盖 MRD 隔震系统,将上部钢排架的屋面分为 2 个质量块. 进行原结构模型振动台试验时,2 个质量块通过螺栓连接成整体作为顶部钢排架的屋盖层;进行设置屋盖 MRD 隔震系统结构模型振动台试验时,2 个质量块之间用隔振支座隔开,下面的质量块模拟升船机结构顶部厂房维护结构及柱子的质量,其质量 m_2 = 550 kg,上面的质量块模拟升船机结构顶部厂房的空间网架屋盖, 其质量 m_3 = 800 kg.

安装 MRD 隔震系统时,在质量块 m_2 和 m_3 的 4 个支座之间安装 4 个隔振垫,在顶层钢排架柱顶和质量块 m_3 结构层之间安装 4 个磁流变阻尼器,MR 阻尼器和隔震支座并联组成屋盖 MRD 隔震系统,如图 2 所示.

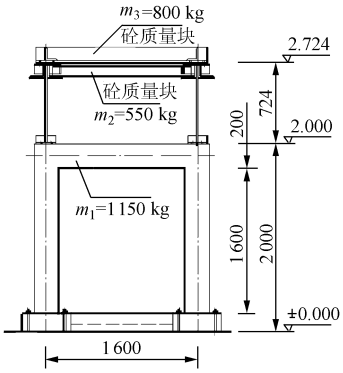

图 1　原结构振动台模型图(单位:mm)

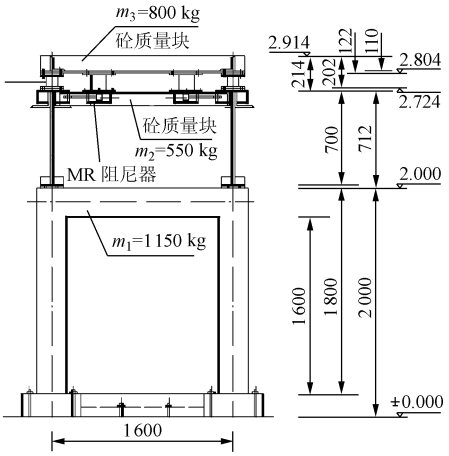

图 2　设置屋盖 MRD 隔震振动台模型图(单位:mm)

1.2　试验用 **MRD** 隔震系统及安装

升船机结构模型中屋盖 MRD 隔震系统的连接大样如图 3 所示. 隔振支座与质量块 m_2,m_3 之间用螺栓连接,磁流变阻尼器外缸体与质量块 m_3 刚接,其活塞杆与质量块 m_2 刚接. 这样在地震干

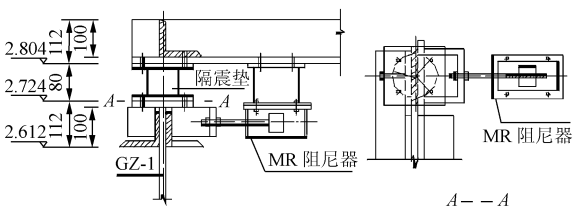

图 3　屋盖 MRD 隔震连接大样图(单位:mm)

扰作用下,屋盖隔震层的层间侧移会带动磁流变阻尼器运动,磁流变阻尼器调节参数产生的阻尼力会反作用于屋盖和顶部排架柱顶,抑制顶部排架的地震反应. 振动台试验用的橡胶隔振支座构造见图 4,橡胶隔振垫性能参数见表 1.

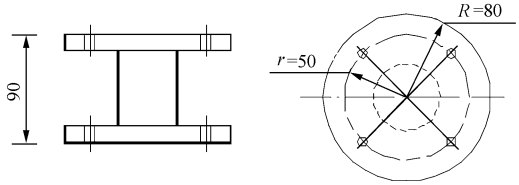

图 4 橡胶隔振垫示意图(单位:mm)

表 1 橡胶隔振垫性能参数

序号	橡胶隔振垫参数	参数值
1	外直径/mm	50
2	内直径/mm	24
3	橡胶层厚度/mm	1
4	橡胶层数	26
5	橡胶硬度	邵氏 A43 度
6	钢板厚度/mm	1
7	钢板层数	25
8	形状系数	6.5
9	水平刚度/(N·mm^{-1})	26
10	竖向刚度/(N·mm^{-1})	7 300

用于升船机结构振动台模型 MRD 隔震控制的小尺寸磁流变阻尼器由武汉理工大学工程结构振动研究中心研制,振动台试验用磁流变阻尼器力-位移关系曲线和力-速度关系曲线分别如图 5、图 6 所示.

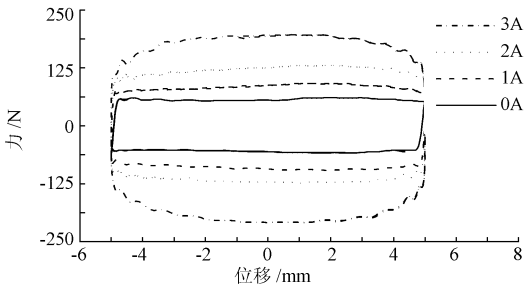

图 5 磁流变阻尼器位移阻尼力-关系曲线

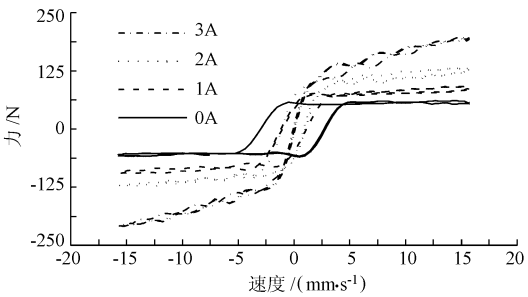

图 6 磁流变阻尼器阻尼力-速度关系曲线

振动台试验用磁流变液及磁流变阻尼器主要参数见表 2.

表 2 磁流变阻尼器及主要材料参数

参数	K_d/(N·m^{-1})	L/m	A_p/m^2
数值	4.1×10^4	0.02	1.102×10^{-3}
参数	b/m	η_o/(kPa·s)	H/m
数值	0.132	0.002	0.002
参数	τ_{ymin}/kPa	P_y/N	τ_{ymax}/kPa
数值	0.42	30	3.51

2 振动台模拟试验

升船机结构模型振动台试验在武汉理工大学结构振动工程研究中心实验室进行. 为了研究屋盖 MRD 隔震系统对升船机结构模型上部钢排架的减震效果,分别进行了原结构模型、屋盖 MRD 隔震结构模型的振动台试验. 试验采用三峡人工模拟地震波,并将其时间压缩一半,时间步长取为 0.01 s. 整个试验过程中,振动台仅沿上部钢排架方向振动. 各层及台面安装有加速度传感器和位移传感器,测试内容有台面及各层加速度反应、各层位移反应等.

2.1 原结构模型试验

将结构模型砼底板与振动台台面用螺栓连接进行升船机结构模型振动试验. 此时 2 个质量块 m_2 和 m_3 间通过螺栓连接成整体作为顶部钢排架层的集中质量. 试验前先对结构模型进行白噪声振动试验以获取结构模型的自振频率和阻尼比,输入白噪声峰值为 0.05g.

2.2 屋盖 MRD 隔震结构模型试验

屋盖 MRD 隔震结构模型在原结构模型基础上设置了屋面 MRD 隔震系统. 将质量块 m_2 和 m_3 的支座分开,中间插入橡胶隔振支座并用螺栓连接,在顶层钢排架柱顶和质量块 m_3 结构层之间连接磁流变阻尼器,橡胶隔振支座和磁流变阻尼器并联形成屋盖 MRD 隔震系统. 试验前先对屋盖隔震结构模型(无磁流变阻尼器)进行白噪声振动试验以获取屋盖隔震模型结构的自振频率和阻尼比,输入白噪声峰值为 0.05g.

进行屋盖 MRD 隔震结构模型振动台试验时分别进行了 passive-on(磁流变阻尼器所加电流为 1 A)控制和 passive-off(磁流变阻尼器所加电流为 0 A)控制下的振动台试验. 试验结束后对隔震支座及磁流变阻尼器进行了仔细检查,支座复位良好.

3 试验结果分析

3.1　模型动力特性

测得原结构模型自振频率:$f_1 = 3.81$ Hz,$f_2 = 16.83$ Hz;阻尼比:$\zeta_1 = 2.9\%$,$\zeta_2 = 0.8\%$. 设置屋盖隔震系统(无磁流变阻尼器)结构模型自振频率:$f_1 = 1.44$ Hz,$f_2 = 6.14$ Hz,$f_3 = 16.88$ Hz;阻尼比:$\zeta_1 = 5\%$,$\zeta_2 = 2.9\%$,$\zeta_3 = 0.8\%$.

比较 2 种结构模型的自振频率可以看出,设置屋盖隔震系统后,主要改变了模型顶部排架结构的自振频率,延长了结构模型的第一自振周期.

3.2　结构模型层间侧移反应

3 种工况下结构模型各层层间侧移反应峰值见表 3. 从表 3 可以看出,设置屋盖 MRD 隔震系统后,passive-on 和 passive-off 2 种隔震情况下模型结构顶部排架层层间侧移反应峰值均得到了减小,而隔震层的侧移变形也较小,磁流变阻尼器对隔震装置提供了附加阻尼,减小了隔震层的变形.

表 3　结构模型层间侧移反应峰值

控制工况	输入加速度	反应峰值/mm		
	峰值/g	砼框架层	顶部排架层	隔震层
原模型结构	0.1	0.26	2.53	
passive-on	0.1	0.24	2.10	3.97
passive-off	0.1	0.24	1.95	4.25

3.3　结构模型绝对加速度反应

3 种工况下结构模型各层绝对加速度反应峰值见表 4. 从表 4 可以看出,设置屋盖 MRD 隔震系统后,passive-on 和 passive-off 2 种隔震情况下屋盖层的绝对加速度反应得到了减小,但放大了排架柱顶层的绝对加速度反应.

表 4　结构模型绝对加速度反应

控制工况	输入加速度	加速度反应/($m \cdot s^{-2}$)		
	峰值/g	砼框架层	顶部排架层	隔震层
原模型结构	0.1	2.46	2.08	
passive-on	0.1	1.88	2.93	1.33
passive-off	0.1	1.62	3.25	1.16

3.4　结构模型各层相对台面位移反应

3 种工况下结构模型各层相对台面位移反应的峰值见表 5.

表 5　结构模型相对台面位移反应峰值

控制工况	输入加速度	反应峰值/mm		
	峰值/g	砼框架层	顶部排架层	隔震层
原模型结构	0.1	0.26	2.68	
passive-on	0.1	0.24	2.15	5.10
passive-off	0.1	0.24	2.23	5.24

从表 5 可以看出,结构模型设置屋盖 MRD 隔震系统后,passive-on 和 passive-off 2 种隔震情况下二层相对台面的位移峰值均得到了减小.

4　数值分析验证

文献[5]对升船机结构顶部厂房地震鞭梢效应提出了设置屋盖 MRD 隔震减震系统,并对屋盖 MRD 隔震-结构系统的运动方程及求解算法进行了详细研究. 为了验证该文提出的屋盖 MRD 隔震-结构系统的运动方程及求解算法的正确性,将试验模型的结构参数输入到所编制的计算程序中,并从采集到的台面加速度时程曲线中截取一个完整波作为计算输入地震波,比较数值计算结果和实测结果,以验证设置屋盖 MRD 隔震-升船机结构系统运动方程及数值算法的正确性.

原结构模型的参数为

$$\boldsymbol{m} = \begin{bmatrix} 1\,150 & 0 \\ 0 & 1\,350 \end{bmatrix} \text{ (kg)}$$

$$\boldsymbol{k} = 10^4 \times \begin{bmatrix} 1\,280 & -80 \\ -80 & 80 \end{bmatrix} \text{ (N/m)}$$

$$\boldsymbol{c} = 10^3 \times \begin{bmatrix} 3.392 & -1.694 \\ -1.694 & 1.694 \end{bmatrix} \text{ (N} \cdot \text{s/m)}$$

屋盖隔震结构模型的参数为

$$\boldsymbol{m} = \begin{bmatrix} 1\,150 & 0 & 0 \\ 0 & 550 & 0 \\ 0 & 0 & 800 \end{bmatrix} \text{ (kg)}$$

$$\boldsymbol{k} = 10^4 \times \begin{bmatrix} 1\,280 & -80 & 0 \\ -80 & 87.2 & -7.2 \\ 0 & -7.2 & 7.2 \end{bmatrix} \text{ (N/m)}$$

$$\boldsymbol{c} = 10^3 \times \begin{bmatrix} 2.903 & -1.205 & 0 \\ -1.205 & 8.794 & -7.590 \\ 0 & -7.590 & 7.590 \end{bmatrix} \text{ (N} \cdot \text{s/m)}$$

将原结构模型和屋盖 MRD 隔震结构模型的参数分别带入文献[5]所给出的系统运动方程,计算得到结构模型的自振频率,与实测值比较见表 6,二者吻合得较好.

表 6　模型结构的基频计算值与实测值比较

控制工况	频率序号	计算值/Hz	实测值/Hz	误差/%
模型结构	第一频率	3.75	3.81	1.6
	第二频率	16.82	16.83	0.1
隔震模型结构	第一频率	1.44	1.50	4.0
	第二频率	6.14	6.14	0
	第三频率	16.87	16.88	0.1

利用文献[5]所研究的数值计算方法,可计算得到原模型结构和屋盖 MRD 隔震结构的振动反应. 因篇幅限制,仅给出了在三峡人工模拟地震波(0.1 g)作用下原结构模型顶部排架层间侧移反应时程曲线,以及分别在 passive-on 和 passive-off 控制下屋盖隔震结构模型顶部排架层间侧移

反应时程曲线和隔震层层间侧移时程曲线,如图 7 ~ 图 11 所示.

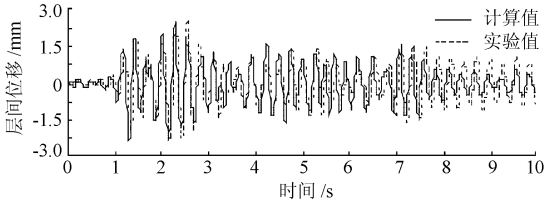

图 7 原结构模型顶部排架层层间侧移时程曲线

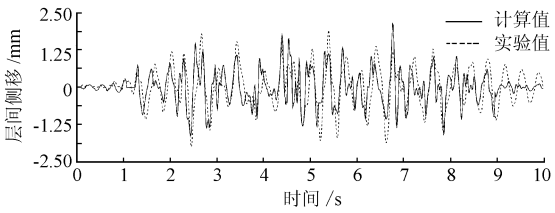

图 8 passive-on 控制下隔震模型结构顶部排架层层间侧移时程曲线

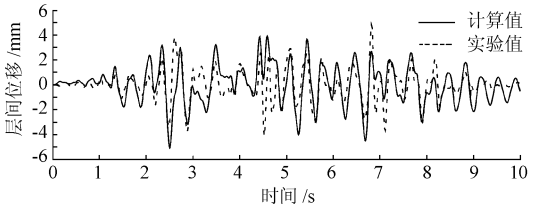

图 9 passive-on 控制下隔震模型结构隔震层层间侧移时程曲线

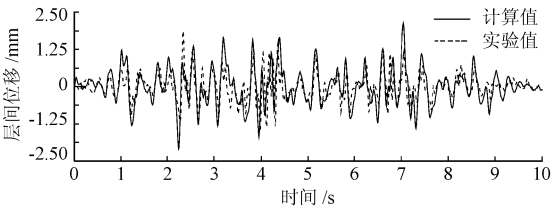

图 10 passive-off 控制下隔震结构模型顶部排架层层间侧移时程曲线

从图 7 ~ 图 11 所示可以看出数值计算结果和试验结果基本相符. 这说明数值计算中磁流变阻尼器和隔振垫的参数与振动台模型 MRD 隔震系统的参数比较吻合,同时表明 MRD 隔震结构系统的力学模型和数值分析方法基本是正确的.

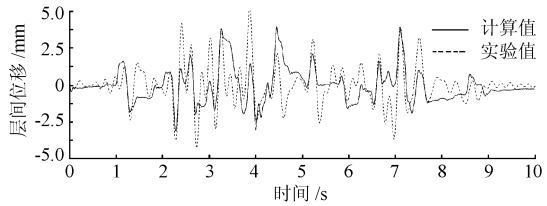

图 11 passive-off 控制下隔震结构模型隔震层层间侧移时程曲线

5 结 论

在升船机结构模型上设置屋盖 MRD 隔震系统,并分别对升船机模型进行原结构、屋盖 MRD 隔震模型结构的振动台试验和动力特性测试,得到以下几点结论:

1) 屋盖 MRD 隔震控制能够有效地减小上部钢排架结构的层间侧移,而隔震层的层间侧移也较小. 屋盖 MRD 隔震系统是减小升船机顶部厂房地震鞭梢效应的有效控制装置;

2) 数值计算结果和试验结果基本相符,验证了文献[5]提出的屋盖 MRD 隔震-升船机结构系统的力学模型和数值分析方法是正确的.

参考文献 (**References**)

[1] 长江水利委员会. 三峡大坝永久导航结构研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社,1997
The Water Conservancy Committee of Yangtze River. Research on permanent navigation structure of Three Gorge Dam[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Periodical Press, 1997 (in Chinese)

[2] Qu W L, Xu Y L, Lv M Y. Seismic response control of large span machinery building on top of lift towers using ER/MR moment controllers [J]. Engineering Structure, 2002,24:517 ~ 527

[3] Dyke S J, Spencer B F, Carlson J D. An experimental study of MR damper for seismic protection [J]. Smart Materials and Structures, 1998,7: 693 ~ 703

[4] Michael D Symans, Michael C Constantinou. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review[J]. Engineering Structure, 1999,21: 469 ~ 487

[5] 瞿伟廉,吕明云,李学安. 屋盖 MR 智能隔震系统对升船结构顶部厂房地震鞭梢效应的模糊控制[J]. 地震工程与工程振动, 2002,22(3):129 ~ 137
Qu Weilian, Lv Mingyun, Li Xuean. Fuzzy seismic control of top building of lift-ship structure with roof intelligent isolation system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3):129 ~ 137(in Chinese)