

文章编号:1006-1355(2015)06-0082-05

大坝升船机—承船厢耦合振动被动与半主动控制

罗志机¹, 阙 广², 涂建维¹

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070;
2. 悉地国际设计顾问(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要:大坝升船机是利用机械装置升降船舶使之快速过坝的重要通航建筑物。承船厢是引导船舶过坝的载体,是大坝升船机的核心设备。由于承船厢的体形与质量巨大,在地震作用下将与升船机塔柱之间发生复杂的耦合振动。以三峡大坝升船机为工程背景,利用动力等效原理,将传统的升船机三维板壳有限元模型简化为三维杆系有限元模型;通过静力缩聚建立适用于升船机结构耦合振动分析的数值模型,验证对升船机塔柱和承船厢耦合振动进行控制的必要性;讨论弹簧、黏滞液体阻尼器和磁流变液阻尼器三种连接装置对地震作用下结构耦合振动的控制效果。计算结果显示,与被动控制装置相比,采用合适半主动控制策略的磁流变液阻尼器具有更好的减振效果,在实际工程中有着广阔的应用前景。

关键词:振动与波;大坝升船机;承船厢;耦合振动;被动控制;半主动控制

中图分类号: TB53

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1335.2015.06.018

Passive and Semi-active Control of Ship Lift's Tower-chamber Coupling Vibration

LUO Zhi-ji¹, QUE Guang², TU Jian-wei¹

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. CCDI Group, Shenzhen 518000, Guangdong China)

Abstract : Vertical ship lift is a navigation structure using mechanical device for lifting the ship to quickly pass across the dam. Ship chamber is the carrier to guide the ships passing the dam as well as the core equipment of the ship lift. Because of the large size and the mass of the huge ship chamber, complex coupling vibration will happen between the chamber and the tower of the ship lift under the earthquake condition. In this article, taking the ship lift of the Three Gorges Dam as the engineering background, a three dimensional finite element model was established based on the dynamic equivalence principle. In this model, the plate and shell component structure was simplified to a rod system. Numerical model for coupled vibration analysis of the ship lift structure was established based on the static condensation principle. The simulation results demonstrate that the coupled vibration between the tower and the chamber of the ship lift needs to be controlled. The effect of spring, fluid viscous damper and magneto-rheological damper on structural coupling vibration control under seismic condition was discussed. Calculation results show that using the magneto-rheological damper for semi-active control is better than using the passive control device for vibration reduction of the structure.

Key words : vibration and wave ; ship lift tower ; ship chamber ; coupling vibration ; passive control ; semi-active control

大坝升船机是利用机械装置垂直升降船舶、帮助船只通过大坝的重要通航建筑物。大坝升船机承受荷载巨大,受力情况复杂,机械设备运行对结构的变形要求极高。在地震和强风作用下,升船机塔柱

结构与承船厢之间将发生复杂的耦合振动,甚至两者还会发生碰撞,严重威胁到升船机结构及承船厢内人员和船舶的安全。因此,分析大坝升船机和承船厢在地震作用下的耦合振动并对其采取适当的减振控制措施是十分必要的。

目前,在对大坝升船机结构进行动力分析的传统有限元模型中,一般都将承船厢结构简化为集中质量进行分析^[1-5]。其原因在于升船机主体结构本身的形式十分复杂,在其基础上建立承船厢及连接

收稿日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金(51178368;51478372)

作者简介:罗志机(1991-)男,硕士生,主要研究方向:防震减灾。

E-mail: 82642089@qq.com

装置的模型十分困难。因此,有必要对传统有限元模型进行简化。此外,目前对升船机进行减振控制方面的研究主要集中在减小升船机顶部机房地震鞭梢效应振动控制分析^[6-8]。

针对以上大坝升船机的研究现状及存在的问题,以三峡大坝升船机为工程背景建立三峡大坝升船机的三维板壳有限元模型,将传统的升船机板壳有限元模型简化为三维杆系模型。在杆系模型的基础上,通过静力缩聚建立大坝升船机的数值模型,并通过数值计算得到在塔柱与承船厢采用不同连接控制装置时升船机结构的地震响应,最终验证不同控制方法的减振效果。

1 三峡大坝升船机结构模型简化

1.1 三维板壳有限元模型

三峡大坝升船机的主体结构主要由下部塔柱、承船厢和顶部机房组成。塔柱由四个筒体组成,对称布置于承船厢的两侧,通过连梁和剪力墙连接。两侧的筒体则通过顶部的中控室、参观平台和横梁实现连接。承船厢与厢内船只、水体总重达到了16 000 t,最大提升高度为113 m。利用ANSYS软件建立三峡大坝升船机三维板壳模型(如图1所示),其中承船厢被简化为集中质量。

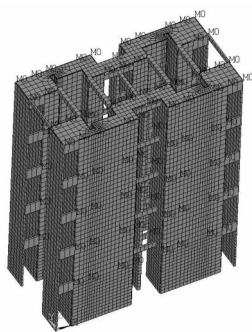


图1 三峡升船机主体结构三维板壳模型

1.2 三维杆系有限元模型

三维板壳模型简化为三维杆系模型的方法是将板壳模型中的筒体、剪力墙和连梁简化为离散的独立杆件,然后根据实际结构的连接形式建立三者的连接关系。在简化过程中,需要重点考虑承船厢的建模及承船厢和塔柱之间的连接。根据实际结构的

连接形式,三峡大坝升船机的三维杆系有限元模型如图2所示,此时承船厢位于+122.3 m高度处,在模型建立过程中,塔柱和承船厢都被简化为杆件形式,减振装置采用弹簧单元模拟,弹簧刚度取100 MN/m。

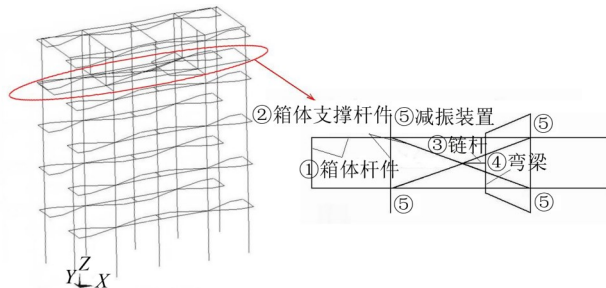


图2 大坝升船机三维杆系有限元模型

1.3 数值模型

从三维杆系有限元模型中提取集中质量矩阵和对应的刚度矩阵,得到大坝升船机结构的完整质量矩阵和刚度矩阵均为1 560阶。此矩阵维数仍过于庞大,需要采用静力缩聚方法进行第二步简化。静力缩聚后结构矩阵维数下降为780阶。最后,可将简化后的质量矩阵和刚度矩阵按照瑞利阻尼的公式计算结构的阻尼矩阵。

们对该数值模型进行了模态分析,并将结果与之前的两种有限元模型计算结果进行了比较。表1给出了大坝升船机简化数值模型与两种有限元模型的模态分析结果对比。通过比较可以发现,简化后数值模型自振频率与杆系及板壳有限元模型的自振频率基本相同,振型基本吻合,验证了数值模型的精确性。

根据大坝升船机塔柱和承船厢的动力方程,利用MATLAB软件的仿真模块建立结构的动力学模型,计算塔柱和承船厢之间无横向连接和横向刚性连接两种情况时在三峡人工模拟地震波作用下的结构响应。为了避免承船厢与塔柱结构的碰撞以及尽量减小地震作用下承船厢内水体和船舶的晃动,将地震作用下承船厢与塔柱之间的相对位移和承船厢的绝对加速度作为评价横向连接装置减振效果的指标。

经计算承船厢与塔柱的相对位移最大值达到了

表1 三维板壳有限元模型与三维杆系有限元模型动力特性对比

三维板壳模型		三维杆系模型		数值模型		模态形式
频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	
0.34	2.94	0.35	2.86	0.35	2.86	第1阶横向振动
0.89	1.12	0.96	1.04	0.95	1.05	第1阶纵向振动
1.97	0.51	2.21	0.45	2.18	0.46	第2阶横向振动
3.39	0.30	3.90	0.26	3.88	0.26	第2阶纵向振动

0.18 m,而承船厢与塔柱导轨之间的间隙距离仅设计为0.08 m,承船厢和升船机塔柱会发生碰撞,无横向连接是不可取的。而采用刚性连接时,承船厢和塔柱之间虽不会产生相对位移,但承船厢的绝对加速度会显著增大,其峰值将达到 2.24 m/s^2 。这会导致承船厢内水体和船只的剧烈晃动,影响到承船厢结构的安全,因此横向刚性连接也不行。

2 被动控制

结构减振的被动控制方法具有构造简单、易于维护、造价较低的优点,在许多场合下能够达到令人满意的减振效果。因此首先尝试使用被动控制装置作为承船厢结构与升船机的横向连接装置。

2.1 弹簧连接

线性弹簧的力学模型如下

$$F = k \cdot \Delta x \quad (1)$$

其中 Δx 为弹簧两端相对位移,即升船机塔柱与承船厢之间的相对位移; k 为弹簧的刚度系数; F 为塔柱与承船厢之间的耦合作用力。

图3、图4给出了三峡人工模拟地震波作用下,以线性弹簧作为横向连接装置时,承船厢与升船机相对位移响应峰值及承船厢结构绝对加速度响应峰值与弹簧刚度系数的关系曲线。可以看到,随着弹簧刚度系数的增大,承船厢结构与升船机塔柱结构的相对位移响应总体上呈现减小趋势,而承船厢结构的绝对加速度响应的变化则与之相反。

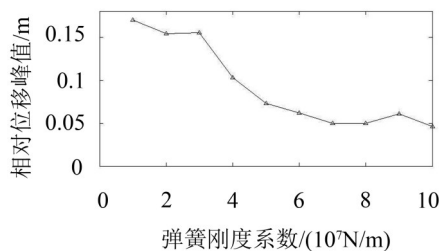


图3 承船厢—升船机相对位移峰值与弹簧刚度系数的关系曲线

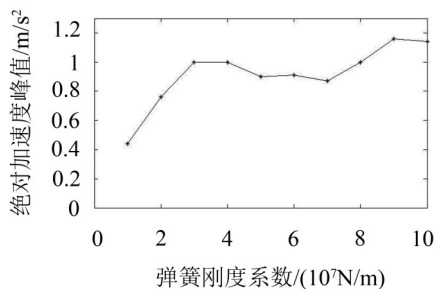


图4 承船厢绝对加速度峰值与弹簧刚度系数的关系曲线

2.2 黏滞液体阻尼器连接

黏滞液体阻尼器的力学模型可以表示为

$$F = c \cdot v^\alpha \quad (2)$$

其中 F 为粘滞液体阻尼器产生的阻尼力, c 为黏滞系数, v 为阻尼器两端的相对速度, α 为阻尼器的阻尼指数,本文仅考虑线性黏滞阻尼,取 $\alpha = 1$ 。

图5、图6分别给出了三峡人工模拟地震波作用下,以黏滞液体阻尼器作为横向连接装置时,承船厢与升船机相对位移峰值及承船厢结构绝对加速度峰值与阻尼器黏滞系数的关系。从图中可以看到,随着阻尼器黏滞系数的增大,承船厢结构与升船机塔柱结构的相对位移逐渐减小,承船厢结构的绝对加速度则随之显著增大。

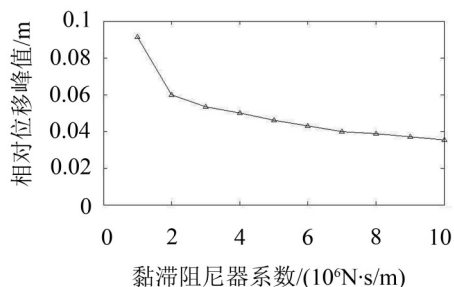


图5 承船厢—升船机相对位移峰值与阻尼器黏滞系数的关系曲线

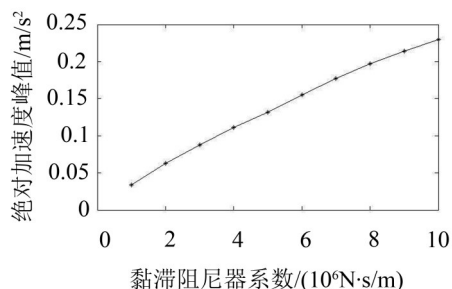


图6 承船厢绝对加速度峰值与阻尼器黏滞系数的关系曲线

通过图3—图6,我们可以知道,承船厢与升船机相对位移和承船厢绝对加速度是一对有着相反变化趋势的评价指标,减振装置的最优控制效果应使得这两项评价指标达到较理想的平衡状态。对于弹簧连接,当弹簧刚度系数取 $7 \times 10^7 \text{ N/m}$ 时,相对位移峰值约为0.05 m,绝对加速度峰值约为 0.87 m/s^2 ,两种指标的峰值均处于较低值,可将其作为弹簧的最优刚度系数。对于黏滞液体阻尼器连接,当黏滞系数为 $4 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,其相对位移峰值为0.05 m,绝对加速度峰值为 0.11 m/s^2 ,均能够满足工程要求。并且从图中还可以看到,当弹簧连接和黏滞液体阻尼器连接在相对位移峰值相近的情况下,黏滞液体阻尼器连接使得承船厢绝对加速度峰值仅为弹簧连接的1/8。这说明在地震作用下,黏滞液体阻尼器的耗能能力和减振效果明显优于弹簧。

图7显示了弹簧连接(刚度系数取 $7 \times 10^7 \text{ N/m}$)

和黏滞液体阻尼器连接(粘滞系数取 $4 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$)的阻尼力时程。从图中可以看到,弹簧的最大输出力为3 470 kN,远大于黏滞液体阻尼器的最大输出力450 kN。这一特点使得黏滞液体阻尼器连接对防止连接位置的局部受力破坏也是十分有利的。

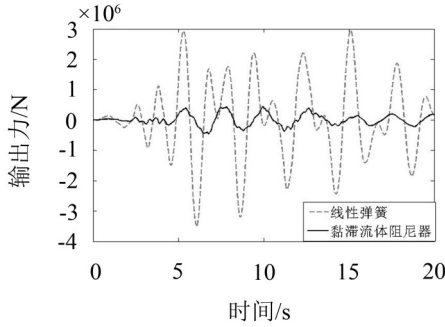


图7 减振装置的阻尼力时程

3 半主动控制

磁流变液阻尼器是目前结构振动控制最有效的半主动控制装置,它具有结构简单、能耗低、出力大、响应速度快、阻尼力连续可调等优点,目前已经在实际工程中得到应用,并已取得良好的工程效果。因此,选用磁流变液阻尼器对升船机塔柱与承船厢的耦合振动进行半主动控制。

3.1 磁流变液阻尼器力学模型

采用修正的Bingham模型来模拟磁流变液阻尼器的动力性能^[9]。该模型由Bingham单元与弹簧单元串联组成,阻尼力 $F(t)$ 为

$$F(t) = C_d \dot{e} + F_d(E) \text{sgn}(\dot{e}) - f_0 = K_d(x - e) - f_0 \quad (3)$$

式中, C_d 为粘滞阻尼系数; $F_d(E)$ 为可控库仑阻尼力,其大小与电流强度 E 有关; e 为Bingham单元位移; x 为阻尼器总位移; K_d 为磁流变液阻尼器的等效轴向刚度,它与磁流变液屈服前区的初始剪切模量和蓄能器的刚度有关; f_0 为由于蓄能器引起的阻尼器输出力偏差。为了使模型在改变电流强度下仍然有效,必须确定模型参数与电流强度之间的关系。上述参数中, C_d 、 F_d 、 K_d 均与电流有关,可取

$$\begin{cases} C_d = C_{ds} + C_{dd}u \\ F_d = F_{ds} + F_{dd}u \\ K_d = K_{ds} + K_{dd}u \end{cases} \quad (4)$$

式中 C_{ds} 、 F_{ds} 和 K_{ds} 分别为无电场强度下的粘滞阻尼系数、库仑阻尼力和等效轴向刚度; u 为内变量,反映了模型参数与电流强度之间的关系,由下式确定。

$$\dot{u} = -\eta(u - I) \quad (5)$$

式中 η 反映阻尼器的响应时间, η 越大表示响应时间越短; I 表示电流强度。

因此,确定 C_{ds} 、 F_{ds} 、 K_{ds} 、 C_{dd} 、 F_{dd} 、 K_{dd} 、 f_0 和 η 后即可采用修正的Bingham模型来完整描述磁流变液阻尼器在时变电流强度下的动态模型。通过对自制的磁流变液阻尼器进行性能试验并完成参数优化,最后得到模型参数为: $C_{ds} = 2.86 \text{ kN} \cdot \text{s/mm}$, $F_{ds} = 30.13 \text{ kN}$, $K_{ds} = 12.43 \text{ kN/mm}$, $C_{dd} = 4.95 \text{ kN} \cdot \text{s/mm/A}$, $F_{dd} = 250.00 \text{ kN/A}$, $K_{dd} = 15.06 \text{ kN/mm/A}$, $f_0 = 0$, $\eta = 3 \text{ s}^{-1}$ 。

3.2 耦合振动半主动控制

采用一种基于泛布尔代数的逻辑控制方法^[10, 11],该方法以位移和速度作为半主动控制系统的反馈信号,其控制规则如表2所示,其中NC表示逻辑控制器输出零电流;LC表示输出低电流;CC表示输出电流保持不变;HC表示输出高电流; e 和 c 分别为控制系统的位移和速度指标。

表2 输出电流逻辑控制规则

位移 x_r	速度 \dot{x}_r		
	$\dot{x}_r < -c$	$ \dot{x}_r \leq c$	$\dot{x}_r > c$
$x_r < -e$	HC	LC	CC
$ x_r \leq e$	LC	NC	LC
$x_r > e$	CC	LC	HC

根据以上控制规则,利用泛布尔代数对上表进行符号化,可进一步得到该方法的逻辑控制模型,即可将该控制模型应用到磁流变液阻尼器中,对升船机塔柱与承船厢的耦合振动进行半主动控制。经调试,我们选取控制系统的位移指标 $e=20 \text{ mm}$,速度指标 $c=95 \text{ mm/s}$ 。

将基于泛布尔代数的逻辑控制效果与被动控制中效果最好的黏滞液体阻尼器进行对比,如图8、图9所示。可以看到,在两种阻尼器对承船厢与升船机相对位移响应的控制效果相当的情况下,使用磁流变液阻尼器连接时,对承船厢绝对加速度响应的减振效果要明显优于黏滞液体阻尼器,其峰值仅为 0.08 m/s^2 ,与黏滞液体阻尼器峰值相比下降了27%左右。图10给出了振动控制过程中两种阻尼器的出力时程,可以看到磁流变液阻尼器所需最大阻尼力也比黏滞液体阻尼器小很多,黏滞液体阻尼器最大出力约为450 kN,而磁流变液阻尼器最大出力仅为330 kN,这会使得减振控制更安全可靠。

最后,表3给出了使用三种减振装置时,在承船厢与升船机塔柱相对位移响应相近的前提下(峰值均为 0.05 m),其他指标的对比情况。从表中可以看到,与弹簧和黏滞液体阻尼器相比,应用合适的半主动控制策略,磁流变液阻尼器在各方面均能达到较理想的减振效果。

表3 三种减振装置振动控制效果对比

减振装置	相对位移峰值/m	绝对加速度峰值/(m/s ²)	绝对加速度峰值频率/Hz	最大输出力/kN
弹簧	0.05	1.1	0.85	4300
黏滞液体阻尼器	0.05	0.11	0.45	450
磁流变液阻尼器	0.05	0.08	0.40	330

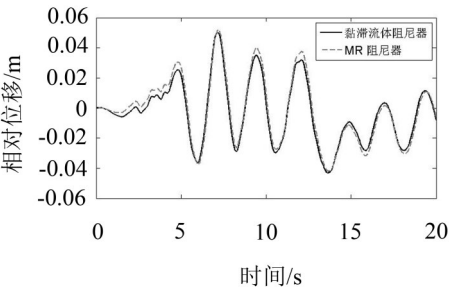


图8 黏滞液体阻尼器与逻辑控制MR阻尼器相对位移控制效果对比

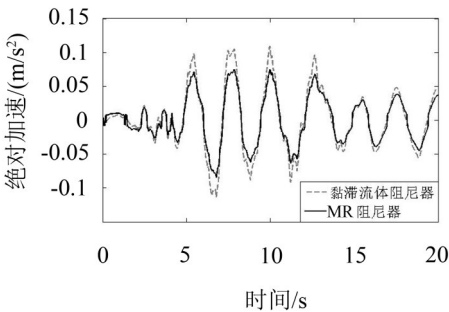


图9 黏滞液体阻尼器与逻辑控制MR阻尼器绝对加速度控制效果对比

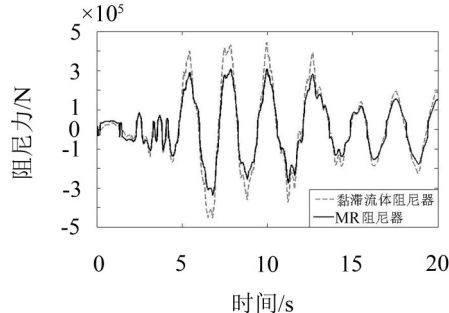


图10 黏滞液体阻尼器与逻辑控制MR阻尼器输出力对比

4 结 语

本文将传统的三维板壳模型简化为三维杆系有限元模型,并通过静力缩聚建立结构的简化数值模型。最后通过数值计算讨论了弹簧、黏滞液体阻尼器和磁流变液阻尼器三种不同连接装置对耦合振动的减振效果,得到以下结论:

(1) 提出的大坝升船机三维杆系模型以及经过静力缩聚得到的数值模型对实际结构的动力特性有着很高的模拟精度。该数值模型可以满足计算地震或强风作用下升船机振动响应的要求;

(2) 地震作用下,塔柱与承船厢之间不设置连接会导致彼此的碰撞;若设置刚性连接,会使得承船厢产生强烈振动,威胁到承船厢及船只的安全。两种方式均不可取,因此在承船厢与塔柱之间设置适当的减振装置对减小耦合振动十分重要。

(3) 与弹簧相比,黏滞液体阻尼器对结构的耦合振动有着更好的减振效果;而采用合适的半主动逻辑控制策略,磁流变液阻尼器的减振效果又优于黏滞液体阻尼器。

参考文献:

[1] HongWei Ma, Jiwei Wang, Jixiang Xu, et al. Dynamic characteristics analysis of tower columns of ship lift system[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 94-96: 531-534.

[2] 张艳红,胡晓,高季章. 三峡升船机结构地震反应分析[J]. **土木工程学报**,2010,43(9):144-149.

[3] 陈清军,王汉东. 地震作用下大型升船机结构的响应特征分析[J]. **振动与冲击**,2005,24(4):52-55.

[4] 陈清军,王汉东. 升船机结构抗震可靠度分析中若干问题的探讨[J]. **力学季刊**,2003,24(3):313-318.

[5] 程载斌,刘玉标,梁乃刚. 地震作用下大型升船机结构的时变动力可靠度[J]. **工程力学**,2009,26(4):221-227.

[6] W L Qu, Y L Xu, M Y Lv. Seismic response control of large-span machinery building on top of ship lift towers using ER/MR moment controllers[J]. **Engineering Structures**, 2002, 24, (4): 517-527.

[7] Jian Wei Tu, Wei Lian Qu, Jing Chen. An experimental study on semi-active seismic response control of a large-span building on top of ship lift towers[J]. **Journal of Vibration and Control**, 2008, 14, (7): 1055-1074.

[8] Wei Lian Qu, Jian Wei Tu. Theoretical and experimental study on seismic response control on top of Three-Gorges ship lift towers using magnetorheological intelligent isolation system and its key technique[J]. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, 2009, 3(1): 32-41.

[9] 周强,瞿伟廉. 磁流变阻尼器的两种力学模型和试验验证[J]. **地震工程与工程振动**,2002,22(4):144-150.

[10] 陈静. 结构振动逻辑控制[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:56-59.

[11] Y L Xu, J Chen, C L Ng, et al, Semiactive seismic response control of buildings with podium structure[J]. **Journal of Structural Engineering**, 2005, 131(6): 890-899.