

半主动控制浮筏隔振系统的开关算法研究^①

翁泽宇^② 王 喆^③ 唐 杰 耿 超

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014)

摘 要 为了弥补浮筏隔振系统的隔振效果在低频段尤其是共振频率附近的不足,引入半主动控制技术。建立半主动控制浮筏隔振系统的动力学模型,以传递至筏体的动能最小为原则,提出算法 1;以筏体动能最小且输入能量最小为原则,提出算法 2。建立 Simu-link 仿真模型,对无控制和按算法进行控制的基础加速度响应进行仿真。结果表明,采用算法 1 和算法 2 对浮筏隔振系统进行开关半主动控制,可明显抑制系统在共振频率附近的基础振动加速度响应。通过试验对仿真结果进行验证,证明了仿真结果的可靠性以及两种算法的有效性。

关键词 半主动控制,浮筏隔振,开关控制算法,基础加速度响应

0 引 言

浮筏隔振系统作为双层隔振系统多振源化的拓展,因其具有良好的隔振效果而广泛用于舰船动力机组的隔振设计中^[1]。但传统浮筏在低频段,尤其是在系统的共振频率附近并无任何减振效果,甚至有所恶化,已有不少学者^[2]针对这一问题进行了相关研究。为提高浮筏隔振系统的隔振性能,将控制技术和浮筏隔振技术相结合成为船舶动力系统隔振的重要手段。

振动控制的基本方式有被动控制、主动控制和半主动控制^[3]。与被动控制相比,主动控制的控制效果更佳,适应性更强。在浮筏系统的主动控制方面,国内外已有许多学者^[4,5]进行了大量研究。虽然主动控制技术已有较大的发展,但其对控制器的要求较高,控制频带有限,多频、变频问题尚未突破,且系统的可靠性和稳定性也较难保证。因此,介于被动控制与主动控制之间的半主动控制技术引起人们的关注。

振动半主动控制实质上是一种振动系统的参数控制,根据系统输入的变化和对系统输出的要求,采用合适的控制算法实时调节系统中某环节的刚度和阻尼,使系统获得良好的振动特性。其控制效果接近主动控制,且控制较为简单,稳定性好,能耗少。目前,半主动控制技术在车辆悬架和建筑抗震等方面已有不少成熟的应用^[6,7],关于浮筏隔振系统的半主动控制,尚未发现国外有相关研究的文献介绍,国内的研究也较少。文献[8]提出了一种将神经控制用于磁悬浮支承的浮筏系统,实现了半主动控制;文献[9]将一种半主动吸振器用于浮筏隔振系统,实现了“平时减振”、“遇冲抗冲”;赵成^[10]、高新科^[11]和王辉^[12]等人分别就可控阻尼器的连续半主动控制和开关半主动控制开展了一系列研究,通过实时调节浮筏的阻尼参数以达到较好的隔振效果。连续半主动控制的控制方式灵活,具有较大的控制潜力,但阻尼器的阻尼调节范围只有数倍(一般不超过 10 倍),以及阻尼特性的非线性使得很难设计出理想的控制策略,应用受到很大的限制。开关半主动控制通过切换可控阻尼器开与关的状态来实现

① 国家自然科学基金(51275474)资助项目。
② 男,1962 年生,教授;研究方向:机械动力学及减振降噪技术;E-mail: wengzy8888@163.com
③ 通信作者,E-mail: wzwangzhe316@163.com
(收稿日期:2018-09-21)

半主动控制,控制算法简单易行,控制系统的可靠性高,更重要的是,所研制的开关可控阻尼器的阻尼具有严格的线性特性,控制响应时间达毫秒级,且开与关两种状态下的阻尼调节范围达数十倍,使得控制效果更为明显。综上所述,将开关半主动控制应用于浮筏隔振系统具有重大的研究和应用价值。

本文以抑制系统动力机组的振动向基础传递为目标,以基础加速度响应为评价参数,提出了两种开关控制算法,并通过仿真和试验证明了两种算法的有效性。

1 半主动控制浮筏隔振系统动力学模型

半主动控制浮筏隔振系统由动力机组、弹性元件、可控阻尼器、筏体和基础等组成,其动力学模型如图 1 所示。 F 为机组的激振力,机组、筏体和基础的等效质量分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 ; 机组和筏体间的等效阻尼和等效刚度为 c_1 和 k_1 ; 筏体和基础间的等效阻尼和等效刚度为 c_2 和 k_2 ; 基础的等效阻尼和等效刚度为 c_3 和 k_3 ; c_4 为可控阻尼器的阻尼, c_{on} 表示高阻尼状态, c_{off} 表示低阻尼状态; 机组、筏体和基础的位移响应分别为 x_1 、 x_2 和 x_3 , 速度响应分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 , 加速度响应分别为 a_1 、 a_2 和 a_3 。

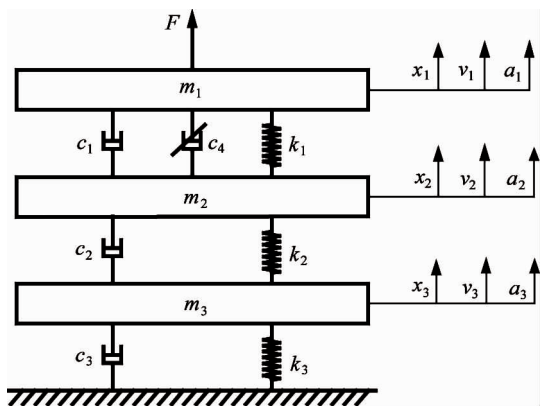


图 1 半主动控制浮筏隔振系统动力学模型

该模型对应的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} c_1 + c_4 & -c_1 & 0 \\ -c_1 - c_4 & c_1 + c_2 + c_4 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对实际的浮筏隔振系统而言, k_3 要比 k_1 和 k_2 大得多; 阻尼 c_1 和阻尼 c_2 一般都很小, 在不少简化模型中甚至将 c_1 和 c_2 忽略。

从系统的微分方程来看, 通过调节可控阻尼器 c_4 的状态可以改变系统的阻尼矩阵, 从而影响浮筏隔振系统的振动响应。

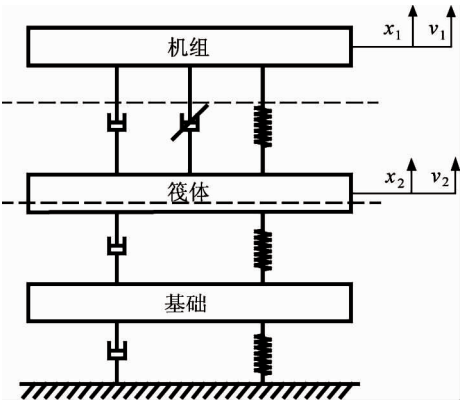
2 半主动控制浮筏隔振系统开关算法

为了实现浮筏隔振系统的开关半主动控制, 改善系统的隔振效果, 本文提出了“算法 1”和“算法 2”两种开关控制算法。

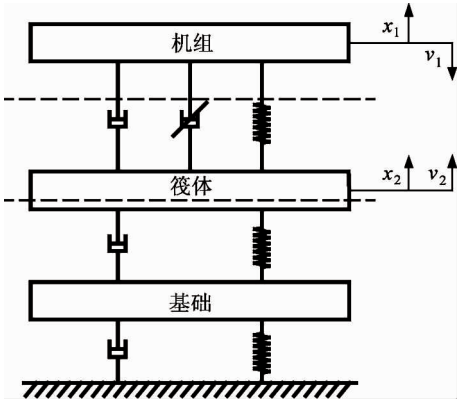
2.1 算法 1

激振力传递给系统的振动能量会转化为质量元件的动能、阻尼元件的耗能和弹性元件的势能。阻尼元件“耗能”会使能量消耗, 质量元件的动能和弹性元件的势能会相互转化。更具体地说, 激振力传递给系统的振动能量会同时转化为机组动能、机组与筏体之间弹性元件的势能、机组与筏体之间阻尼元件的耗能和筏体动能。其中, 筏体动能的增加将导致传递至基础的能量增加, 加剧基础的振动, 通过控制可控阻尼力可以尽可能减少筏体动能的增加。当弹性元件吸收能量时, 将可控阻尼器转换到关 (off) 状态, 使阻尼值为最小, 让弹性元件吸收更多的能量, 减少传递至筏体的能量; 当弹性元件释放能量时, 将可控阻尼器转换到开 (on) 状态, 使阻尼值为最大, 让阻尼器消耗更多的能量, 减少弹簧释放给筏体的能量。

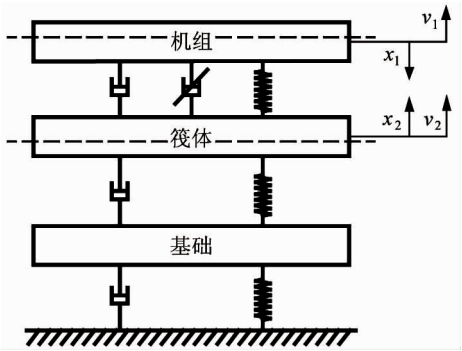
根据机组与筏体之间位移差和速度差的正负, 浮筏隔振系统的状态可以分为图 2 所示的 4 种, 其中虚线为机组和筏体的平衡位置。



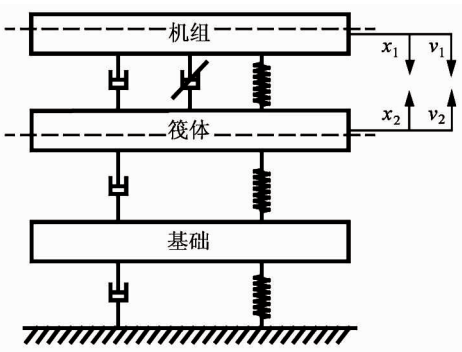
(a) $x_1 > x_2, v_1 > v_2$



(b) $x_1 > x_2, v_1 < v_2$



(c) $x_1 < x_2, v_1 > v_2$



(d) $x_1 < x_2, v_1 < v_2$

图 2 算法 1 对应的系统状态

当系统处于图 2(a)时,机组与筏体的位移差为正值($x_1 > x_2$),即机组与筏体间的弹簧元件处于伸长状态;速度差为正值($v_1 > v_2$),即两者之间的位移差会增大。在此过程中,弹性元件吸收能量,应使可控阻尼器处于 off 状态。

当系统处于图 2(b)时,机组与筏体的位移差为正值($x_1 > x_2$),即机组与筏体间的弹簧元件处于伸长状态;速度差为负值($v_1 < v_2$),即两者之间的位移差会减小。在此过程中,弹性元件释放能量,应使可控阻尼器处于 on 状态。

当系统处于图 2(c)时,机组与筏体的位移差为负值($x_1 < x_2$),即机组与筏体间的弹簧元件处于压缩状态;速度差为正值($v_1 > v_2$),即两者之间的位移差会增大。在此过程中,弹性元件释放能量,应使可控阻尼器处于 on 状态。

当系统处于图 2(d)时,机组与筏体的位移差为负值($x_1 < x_2$),即机组与筏体间的弹簧元件处于压缩状态;速度差为负值($v_1 < v_2$),即两者之间的位移差会减小。在此过程中,弹性元件吸收能量,应使可控阻尼器处于 off 状态。

综上所述,算法 1 的控制规律为

$$c_4 = \begin{cases} c_{off} & x_1 - x_2 > 0, v_1 - v_2 > 0 \\ c_{on} & x_1 - x_2 > 0, v_1 - v_2 < 0 \\ c_{on} & x_1 - x_2 < 0, v_1 - v_2 > 0 \\ c_{off} & x_1 - x_2 < 0, v_1 - v_2 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

简化为

$$c_4 = \begin{cases} c_{off} & (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) \geq 0 \\ c_{on} & (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 算法 2

激振力对机组做功为 $P_F = F \cdot v_1$, 筏体对机组的可控阻尼力也对机组做功为 $P_{c1} = c_4 \cdot (v_2 - v_1) \cdot v_1$ 。若 P_F 与 P_{c1} 都为正, $F \cdot c_4 \cdot (v_2 - v_1) \geq 0$, 即 $F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0$, 此时,激振力对系统输入能量且可控阻尼力将加剧这种输入,应使可控阻尼器处于 off 状态,以减小系统输入的能量;若 P_F 为正、 P_{c1} 为负, $F \cdot c_4 \cdot (v_2 - v_1) < 0$, 即 $F \cdot (v_2 - v_1) < 0$, 激振力对系统输入能量且可控阻尼力将减弱这种输入,应使可控阻尼器处于 on 状态,以减小系统输入的能量;若 P_F 为负、 P_{c1} 为正, $F \cdot c_4 \cdot (v_2 - v_1) < 0$,

即 $F \cdot (v_2 - v_1) < 0$, 激振力从系统吸收能量且可控阻尼力将增强这种吸收, 应使可控阻尼器处于 on 状态, 以增大激振力吸收的能量; 若 P_F 与 P_{c1} 均为负, $F \cdot c_4 \cdot (v_2 - v_1) \geq 0$, 即 $F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0$, 激振力从系统吸收能量且可控阻尼力将减弱这种吸收, 应使可控阻尼器处于 off 状态, 以增大激振力吸收的能量。简言之, 激励力与可控阻尼力同向时, 可控阻尼器应处于低阻尼状态; 激励力与可控阻尼力异向时, 可控阻尼器应处于高阻尼状态。从而得到表达式:

$$c_4 = \begin{cases} c_{off} & F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0 \\ c_{on} & F \cdot (v_2 - v_1) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

算法 1 和式(4)都给出了控制可控阻尼器的表达式, 两者是不兼容的。

算法 2 是将算法 1 和式(4)相结合, 若算法 1 和式(4)的控制结果一致, 则以共同的控制结果为准; 若控制结果不一致, 则从阻尼器消耗能量的角度来看, 使可控阻尼器处于高阻尼状态, 使其消耗更多的能量。

综上可得, 算法 2 的控制规律为

$$c_4 = \begin{cases} c_{off} & F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0, (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) \geq 0 \\ c_{on} & F \cdot (v_2 - v_1) < 0, (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) < 0 \\ c_{on} & F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0, (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) < 0 \\ c_{on} & F \cdot (v_2 - v_1) < 0, (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

简化为

$$c_4 = \begin{cases} c_{off} & F \cdot (v_2 - v_1) \geq 0 \cap (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) \geq 0 \\ c_{on} & F \cdot (v_2 - v_1) < 0 \cup (x_1 - x_2) \cdot (v_1 - v_2) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

算法 1 的出发点是通过调节弹性元件吸收或释放的弹性能大小, 使传递至筏体的动能最小, 但其只考虑了机组与筏体之间弹性元件和阻尼元件的能量变化, 未能顾及整体系统总能量的变化。算法 2 以筏体动能最小且输入能量最小为出发点, 既关心局部能量的吸收、释放和消耗, 也考虑了整体系统总能量的变化情况。

3 半主动控制浮筏隔振系统仿真分析

利用 Matlab 软件, 对半主动控制浮筏隔振系统的 Simulink 模型进行仿真。为了更好地说明隔振系统在算法 1 和算法 2 控制下的隔振效果, 同时研究了系统在无控制(即 $c_4 = c_{off}$)状态下的基础加速度响应。模型仿真参数如表 1 所示。

表 1 半主动控制浮筏隔振系统模型参数

参数	数值
等效质量(kg)	m_1 238.8
	m_2 175.1
	m_3 216
等效阻尼($N \cdot m^{-1} \cdot s$)	c_1 70
	c_2 50
	c_3 5 000
可控阻尼器阻尼($N \cdot m^{-1} \cdot s$)	c_{off} 2 100
	c_{on} 4.81×10^4
等效刚度($N \cdot m^{-1}$)	k_1 3.707×10^5
	k_2 3.468×10^5
	k_3 2.809×10^7

将机组的激振力幅值设置为 500 N, 通过编程改变 Simulink 模型中激振力的频率, 对不同频率激振力作用下的基础加速度响应进行连续仿真, 可以得到 0.1 ~ 20 Hz 范围内, 浮筏隔振系统的基础加速度响应幅值随激振频率的变化曲线, 如图 3 所示。

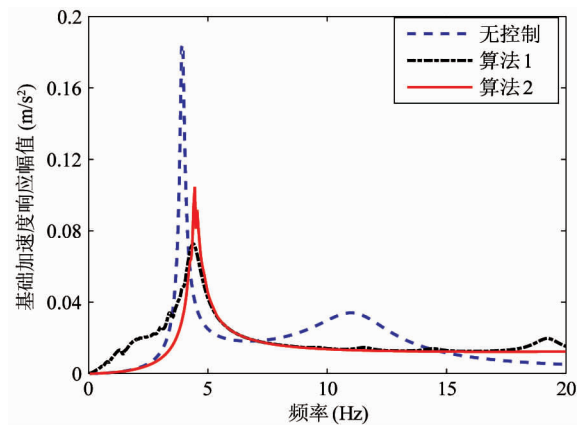


图 3 浮筏隔振系统基础加速度响应幅值曲线(仿真)

从图 3 可知, 在无控制和两种算法控制状态下, 浮筏隔振系统的基础加速度响应趋势大体一致, 均

在共振频率附近达到最大,但算法 1 和算法 2 的隔振效果比无控制有非常明显的改善。在共振频率附近,两种算法的基础加速度响应幅值较无控制显著变小;小于共振频率时,算法 1 较其他两种略有变大,而算法 2 明显优于其他两种;大于共振频率时,两种算法较无控制差异不大。相对于算法 2,算法 1 在共振频率附近有显著优势,但在低频段劣于算法 2;在高频段,两种算法表现基本一致。

从基础加速度响应曲线的共振幅值来看,算法 1、算法 2 以及无控制状态的基础加速度响应幅值的最大值如表 2 所示。算法 1 较无控制减小 60.4%;算法 2 较无控制减小 43.3%;算法 1 较算法 2 减小 30.1%。

表 2 三种状态的基础加速度响应最大值(仿真)		
状态	共振频率(Hz)	最大幅值(m/s^2)
无控制	3.9	0.1844
算法 1	4.4	0.07296
算法 2	4.5	0.1045

4 半主动控制浮筏隔振系统试验研究

4.1 试验系统及试验方案

搭建半主动控制浮筏隔振试验系统,系统框图如图 4 所示,包括开关控制系统、浮筏隔振试验台和测试评价系统 3 部分。

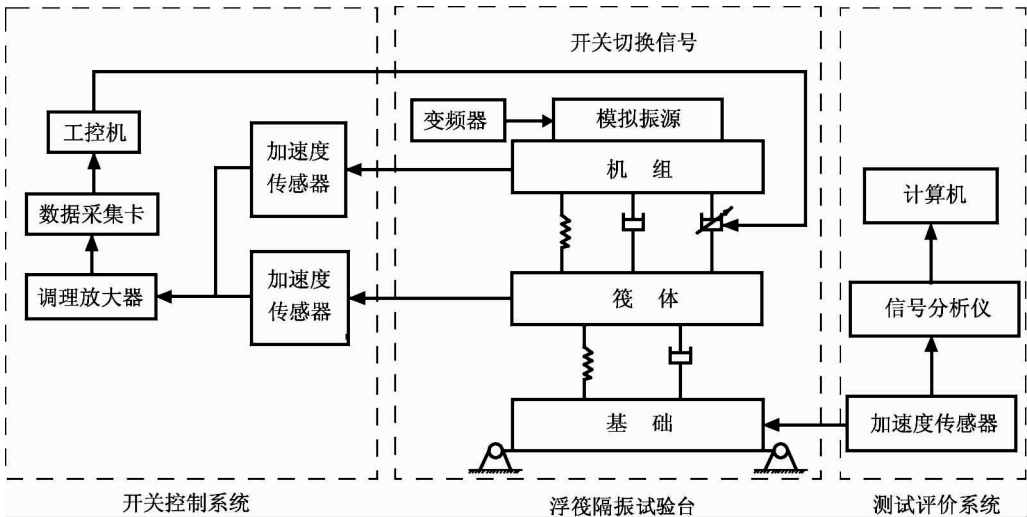


图 4 半主动控制浮筏隔振系统试验框图

浮筏隔振试验台由机组、变频器、上层隔振弹簧、筏体、下层隔振弹簧、基础和可控阻尼器等组成。开关控制系统主要由加速度传感器、调理放大器、PCI 数据采集卡、工控机和继电器等组成。测试评价系统主要由加速度传感器和信号分析仪组成。加速度传感器为美国 PCB 公司的 333B30,安装在试验台的基础上,用于测量基础加速度响应;信号分析仪为美国 Spectral Dynamic 公司的 Siglab20-42 信号分析仪,计算机上安装有 Siglab 分析软件。信号分析仪和 Siglab 对传感器采集到的加速度信号进行处理分析,得到加速度响应幅值。

通过调节变频器的输出频率即可改变电机的转

— 782 —

速,进而控制机组主体上激振力的频率,实现不同频率的简谐激振;在计算机上运行对应的 LabVIEW 控制程序实现开关半主动控制算法;工控机实时获取机组与筏体的加速度响应信号,再根据算法控制继电器实现可控阻尼器的开关控制;测试评价系统则采集系统基础的加速度响应信号,进行处理分析,图 5 为本次试验的现场图。

4.2 试验结果与分析

对浮筏隔振试验台分别进行无控制试验、算法 1 与算法 2 的半主动开关控制试验,试验的激励频率变化范围为 1.5 ~ 13 Hz,得到浮筏隔振系统基础加速度响应幅值随激振频率变化的曲线如图 6 所

示。

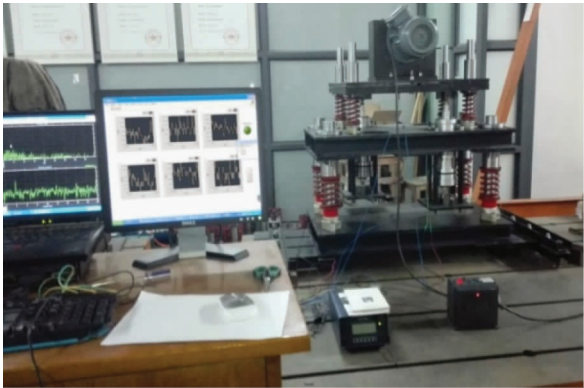


图5 半主动控制浮筏隔振系统试验现场

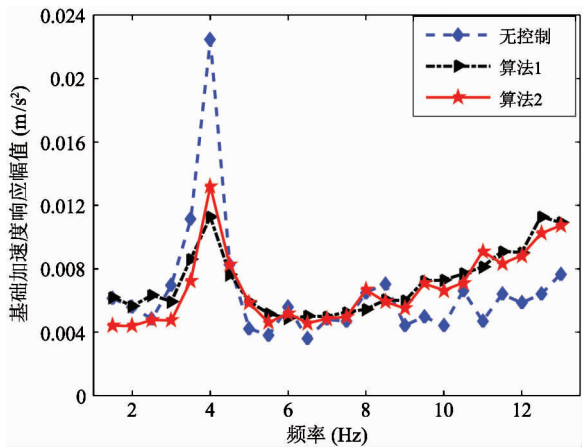


图6 浮筏隔振系统基础加速度响应幅值曲线(试验)

从图6可以看出,采用无控制与算法1、算法2控制时,浮筏隔振系统的基础加速度响应趋势大体一致,主要区别在于共振频率附近。在低频段和高频段,三种状态的基础加速度响应差异相对较小;在共振频率附近,两种算法的基础加速度响应较无控制显著变小,说明开关半主动控制的隔振效果比无控制有非常明显的改善。相对于算法1,算法2在低频段的基础加速度响应较小,隔振效果有明显优势;在共振频率附近,算法2的效果劣于算法1;在高频段,两种算法的表现基本一致。

从基础加速度响应曲线的共振幅值来看,无控制状态和两种控制算法的基础加速度响应幅值的最大值如表3所示。算法1较无控制状态减小49.7%,算法2较无控制状态减小41.1%,算法1较算法2减小14.6%。

表3 三种状态的基础加速度响应最大值(试验)

状态	共振频率(Hz)	最大幅值(m/s^2)
无控制	4	0.02243
算法1	4	0.01127
算法2	4	0.01321

比较图3和图6可知,仿真结果和试验研究结果具有较好的一致性。在共振频率附近,采用算法1和算法2进行半主动控制的隔振效果明显优于无控制状态的隔振效果,而在其他频率的隔振效果相差不大。这表明,算法1和算法2可以有效改善浮筏隔振系统的隔振性能。

在小于共振频率的低频段,算法2的隔振效果较好的原因在于,算法2考虑了整体系统能量的变化。当系统处于低频段,激振力与可控阻尼力同向且两者对机组均做正功。此时,激振力对系统输入能量,且可控阻尼器的阻尼力将加剧这种输入。执行算法2可将可控阻尼器切换到off状态,以减少能量的输入,进而使基础加速度响应控制到一个比较小的幅值。

无论是无控制,还是以算法1或算法2进行开关半主动控制,仿真结果与试验结果得到的基础加速度响应曲线,具有相同的变化趋势。但试验结果的基础加速度响应幅值整体上逐步增大(尤其在高频段更为明显),这是由于仿真模型输入的激振力幅值在各频率激振时是恒定的,而试验输入的激振力由偏心机构产生的离心力形成,激振力具有随激振频率增大而逐步增大的特点。因此,试验结果的基础加速度响应幅值整体上逐步增大是合理的。

另外,仿真模型对实际试验系统简化后存在误差,以及试验激振力和仿真输入激振力的幅值误差存在的差异,导致试验和仿真得到的基础加速度响应的幅值大小与共振频率的大小存在一定差异,是可以接受的。总体来说,试验结果可以验证仿真结果。

5 结 论

本文针对浮筏隔振系统的半主动控制问题,提出了算法1和算法2两种开关控制算法。对无控制

和开关控制状态下的基础加速度响应分别进行仿真和试验研究,主要结论如下:

(1)无控制状态下的隔振效果在共振频率附近较差,开关控制明显改善了这一现状。

(2)两种控制算法各有优劣。在低频段,算法 2 的隔振效果较好;在共振频率附近,算法 1 的隔振效果较好。

(3)仿真和试验结果具有较好的一致性,证明了两种开关算法的有效性。

参考文献

[1] 何琳,徐伟. 舰船隔振装置技术及其进展[J]. 声学学报,2013,38(2):128-136

[2] 朱石坚,伍先俊. 一种混合式隔振器及其特性研究[J]. 海军工程大学学报, 2005,17(1):20-22 + 41

[3] Zhao C, Chen D. A two-stage floating raft isolation system featuring electrorheological Damper with semiactive fuzzy sliding mode control [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2008, 19(9):1041-1051

[4] 李嘉全,邵长星,陈亚东,等. 浮筏的主动吸振控制实验研究[J]. 实验力学,2008,23(1):71-76

[5] Darbyshire E P, Kerry C J. A multi-processor computer architecture for active control [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(10): 1429-1434

[6] Ghiringhelli G L. Testing of semiactive landing gear control for a general aviation aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 37(37):606-616

[7] Jung H J, Park K S, Spencer B F, et al. Hybrid seismic protection of cable-stayed bridges[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(7): 795-820

[8] 俞晓丰. 磁悬浮浮筏隔振系统神经控制研究与设计[D]. 武汉:武汉理工大学机电工程学院, 2010. 35-57

[9] 张博. 复杂隔振系统减振抗冲半主动控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 2012. 51-74

[10] 赵成,陈大跃. 潜艇浮筏隔振系统的半主动模糊滑模控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2):163-169

[11] 高新科,邵鸽. 智能阻尼双层隔振系统的半主动最优控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19):128-133

[12] 王辉. 面向半主动控制的可控浮筏隔振系统试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院, 2013. 41-82

Switching algorithm of semi-active controlled floating raft isolation system

Weng Zeyu, Wang Zhe, Tang Jie, Geng Chao

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

Technology of semi-active control is proposed for the sake of offsetting the insufficient of floating raft isolation system at low frequencies, especially at the surrounding of resonance frequencies. A dynamic model of semi-active controlled floating raft isolation system is established, Algorithm 1 based on the principle of minimum kinetic energy transmitted to the raft is proposed, and then Algorithm 2 based on the principle of minimum kinetic energy of raft and minimum input energy is proposed. Simulation model of Simulink is built to evaluate the acceleration response on the foundation with non-control and algorithm control, and the simulation results show that the foundation's vibration acceleration response near the resonance frequency of system is restrained significantly by Algorithm 1 and Algorithm 2 implemented for switching semi-active control of floating raft isolation system. The simulation results prove the reliability of the simulation results and the effectiveness of two proposed algorithms.

Key words: semi-active control, floating raft isolation, switching control algorithm, acceleration response