

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.004

半主动控制浮筏隔振系统的开关算法与仿真研究

朱雅辉¹, 翁泽宇^{1*}, 耿超¹, 朱甫宏²

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 中国人民解放军 73021 部队, 浙江 杭州 310023)

摘要:为解决船舶动力系统的隔振等问题,将浮筏隔振技术应用到船舶动力系统的隔振中。针对半主动控制浮筏隔振的三自由度系统,通过研究半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法,给出了两种开关控制算法。在建立了两种半主动开关控制浮筏隔振系统的仿真模型的基础上,实现了半主动控制浮筏隔振系统基础加速度响应的仿真分析。研究了半主动控制浮筏隔振系统在这两种开关控制算法控制下,不同的激振频率对基础加速度的影响。最后,讨论了两种算法对提高浮筏隔振系统隔振效果的有效性。研究结果表明,两种开关控制算法下的半主动控制浮筏隔振系统在不同的激振频率时,基础加速度幅值有一定的衰减。

关键词:浮筏隔振;半主动控制;开关算法

中图分类号:TH113.1;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0265-06

Switching algorithms and simulation research on semi-active control of floating raft vibration isolation system

ZHU Ya-hui¹, WENG Ze-yu¹, GENG Chao¹, ZHU Fu-hong²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Chinese people's Liberation Army 73021 Troops, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to solve the problems of vibration for ship power system, the technology of floating raft vibration isolation was investigated. Aiming at researching the switch control algorithm of the semi-active control floating raft isolation system of three freedom degrees, by studying the switching control algorithm of semi-active control of floating raft isolation system, two kinds of switching control algorithms were presented. Through the establishment of two kinds of semi-active switch control floating raft isolation system simulation models, the base acceleration response of simulation analysis of the semi-active control floating raft isolation system was completed. The influence of excitation frequency on the base acceleration about semi-active control floating raft isolation system under the control of two switch control algorithms was studied. The effectiveness that two switch control algorithms improve the vibration isolation effect of floating raft isolation system was discussed. The results indicate that the semi-active control of floating raft isolation system under the two switch control algorithm has a certain attenuation at different excitation frequencies.

Key words: floating raft isolation; semi-active vibration control; switch algorithm

0 引言

浮筏隔振是应用于舰船上的一种减振降噪装置,其机理是利用浮筏隔振装置中弹性元件和中间质量的设计来衰减振动能量,使舰船壳体的振动减小。振动

的半主动控制系统在控制效果上接近于主动控制系统,系统只需要少量外加能量控制,利用一定的控制策略来自动调节系统内部参数,使系统的响应处于最优状态^[1-2]。因此,半主动控制具有很大的研究和应用价值,是当前研究振动控制的一个热点。

收稿日期:2015-10-26

作者简介:朱雅辉(1991-),男,浙江永康人,主要从事机械振动噪声方面的研究。E-mail:1156152818@qq.com

通信联系人:翁泽宇,男,教授,硕士生导师。E-mail:wengzy8888@163.com

将半主动控制技术和浮筏隔振技术相结合,研制半主动控制浮筏隔振系统,有望进一步提高浮筏隔振系统的隔振效果。以上海交通大学陈大跃教授为主的团队,采用前馈模糊控制策略^[3]、基于变分法的原理得到优化阻尼控制策略^[4]、半主动静态输出反馈模糊滑模控制^[5]等来研究半主动控制浮筏隔振系统的隔振效果,均有较好的控制效果。但对可控阻尼器性能要求较高,实际应用有一定的局限性。为此,本研究采用开关可控阻尼器,将开关可控阻尼器应用于半主动控制浮筏隔振系统,开关控制策略在车辆悬架系统中应用较多,半主动开关控制的浮筏隔振系统目前尚无文献介绍。

笔者在研究半主动控制浮筏隔振系统开关算法的基础上,通过半主动开关控制浮筏隔振系统的仿真,研究系统在不同激励信号下,系统的基础加速度的响应,讨论控制对系统隔振效果的影响。

1 半主动控制浮筏隔振的三自由度系统模型

半主动控制浮筏隔振系统可以用一个三层隔振系统来表示,其简化模型如图 1 所示。

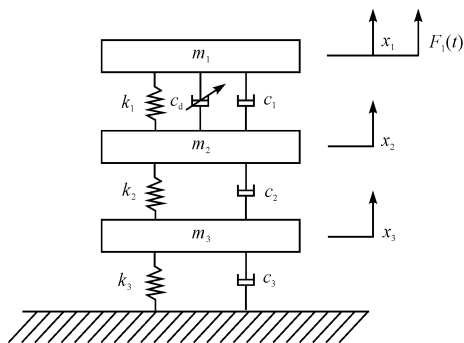


图 1 半主动控制浮筏隔振系统的三自由度模型

m_1 —被隔振对象(机组)质量; m_2 —筏体质量; m_3 —基础质量; k_1, c_1 —上层隔振器的刚度系数和阻尼系数分别; k_2, c_2 —下层隔振器的刚度系数和阻尼系数分别; k_3, c_3 —基础的等效刚度与阻尼可称为底层支撑的刚度与阻尼; c_4 —可控阻尼器的阻尼系数; $x_1(t)$ —机组的振动位移; $x_2(t)$ —筏体的振动位移; $x_3(t)$ —基础的振动位移。

根据牛顿定律,建立半主动控制浮筏隔振系统的运动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = F - k_1(z_1 - z_2) - c_m(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2 \ddot{z}_2 = k_1(z_1 - z_2) + c_m(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ - k_2(z_2 - z_3) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) \\ m_3 \ddot{z}_3 = k_2(z_2 - z_3) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) - k_3 z_3 - c_3 \dot{z}_3 \end{cases} \quad (1)$$

2 半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法

1974 年, Crosby 和 Karnop^[6-7]最先提出了“天棚”阻尼控制算法。由于这种“天棚”阻尼仅是一种理论实现,1975 年, Margolis 在“天棚”阻尼的基础上提出了开关控制策略,可以部分等效“天棚”阻尼。Rakheja 提出了相对控制,提供了一种新思维去设计开关控制算法。开关控制就是依据不同开关控制算法来实现开、关两种不同状态的切换,由于其算法简单,响应快,易于实现,并能实现较好的控制效果,在实际工程有很好的应用前景^[8]。

在半主动控制浮筏隔振系统的三自由度模型中,中间筏体传递给基础的力通过下层隔振器来传递,为了减小中间筏体传递到基础的力,可以通过调节可控阻尼器来减小中间筏体的振动来实现。依据车辆半主动悬架控制系统基于“天棚”阻尼控制提出的开关控制策略思想,本研究对半主动控制浮筏隔振系统上层隔振器进行分析,以机组为研究对象,当 $\dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \geq 0$ 时,为减小机组传递给中间筏体的能量,从而减小中间筏体的振动,此时调节可控阻尼器使其处于关闭状态;当 $\dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) < 0$ 时,为减小中间筏体的能量,将中间筏体的能量传递到机组,从而减小中间筏体的振动能量,调节可控阻尼器处于开启状态。从而得到半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法 1:

$$C = \begin{cases} C_{\text{off}} & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \geq 0 \\ C_{\text{on}} & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

本研究对半主动控制浮筏隔振系统上层隔振器进行分析,以中间筏体为研究对象,当 $\dot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) < 0$ 时,为减小机组传递给中间筏体的能量,从而减小中间筏体的振动,此时调节可控阻尼器使其处于关闭状态;当 $\dot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \geq 0$ 时,为减小中间筏体的能量,将中间筏体的能量传递到机组,从而减小中间筏体的振动能量,调节可控阻尼器处于开启状态。从而得到半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法 2:

$$C = \begin{cases} C_{\text{off}} & \dot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) < 0 \\ C_{\text{on}} & \dot{x}_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

系统的状态空间不仅描述了系统外部的输入、输出特性,而且揭示了系统内部的结构特性,能够完全表征系统的所有动力学行为,为了便于后续控制系统分析和设计的进行,本研究在此将式(1)运动微分方程转化为状态空间方程。

其数学表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}=AX+BU \\ Y=CX+DU \end{cases} \quad (4)$$

式中: X —状态向量, U —输入向量, Y —输出向量, A —状态矩阵, B —输入状态矩阵, C —输出矩阵, D —输出反馈矩阵。

针对半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法 1:

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_1 & \dot{x}_1 & x_2 & \dot{x}_2 & x_3 & \dot{x}_3 \end{bmatrix}^T \\ U &= [F] \\ Y &= \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_1 - \dot{x}_2 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ D &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1+c_4}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{c_1+c_4}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{m_3} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_1+c_4}{m_1} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1+c_2+c_4}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_2}{m_3} & -\frac{k_2+k_3}{m_3} & -\frac{c_2+c_3}{m_3} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{k_2}{m_3} & \frac{c_2}{m_3} & -\frac{k_2+k_3}{m_3} & -\frac{c_2+c_3}{m_3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

针对半主动控制浮筏隔振系统的开关控制算法 2:

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_1 & \dot{x}_1 & x_2 & \dot{x}_2 & x_3 & \dot{x}_3 \end{bmatrix}^T \\ U &= [F] \\ Y &= \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_1 - \dot{x}_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{k_2}{m_3} & \frac{c_2}{m_3} & -\frac{k_2+k_3}{m_3} & -\frac{c_2+c_3}{m_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ D &= [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1+c_4}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{c_1+c_4}{m_2} & -\frac{k_1+k_2}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{m_3} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_1+c_4}{m_1} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1+c_2+c_4}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_2}{m_3} & -\frac{k_2+k_3}{m_3} & -\frac{c_2+c_3}{m_3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3 半主动开关控制浮筏隔振系统仿真

基于半主动控制浮筏隔振系统的三自由度模型及其状态方程,本研究结合半主动控制浮筏隔振系统的两种开关控制算法,可建立半主动控制浮筏隔振系统在两种开关控制算法下的 *simulink* 模型如图 2、图 3 所示。

为研究半主动控制浮筏隔振系统在这两种开关控制算法的作用下的控制效果,笔者以单频激励作用于系统的机组,对半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度响应进行分析,并与可控阻尼器在开启状态和关闭状态下系统的基础加速度响应进行比较。

3.1 基于开关控制算法 1 的系统仿真

当半主动控制浮筏隔振系统输入力的幅值为 5 000 N,本研究选取正弦激励频率分别为 4 Hz、12 Hz、30 Hz,对可控阻尼器在开关控制算法 1 控制状态下进行 *simulink* 仿真,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度响应曲线分别如图 4~6 所示。从图 4 可知,可控阻尼器在开关控制算法 1 的作用下,此时半主动控制浮筏

隔振系统的基础加速度响应曲线幅值明显小于可控阻尼器在开启状态下的基础加速度响应曲线的幅值,也略小于关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值。从图 5 可知,此时半主动控制浮筏隔振系统在开关控制算法 1 作用下的基础加速度响应曲线幅值略大于可控阻尼器在

开启状态和关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值。从图 6 可知,此时半主动控制浮筏隔振系统在开关控制算法 1 作用下的基础加速度响应曲线幅值明显小于可控阻尼器在开启状态下的基础加速度响应曲线的幅值,也略小于关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值。

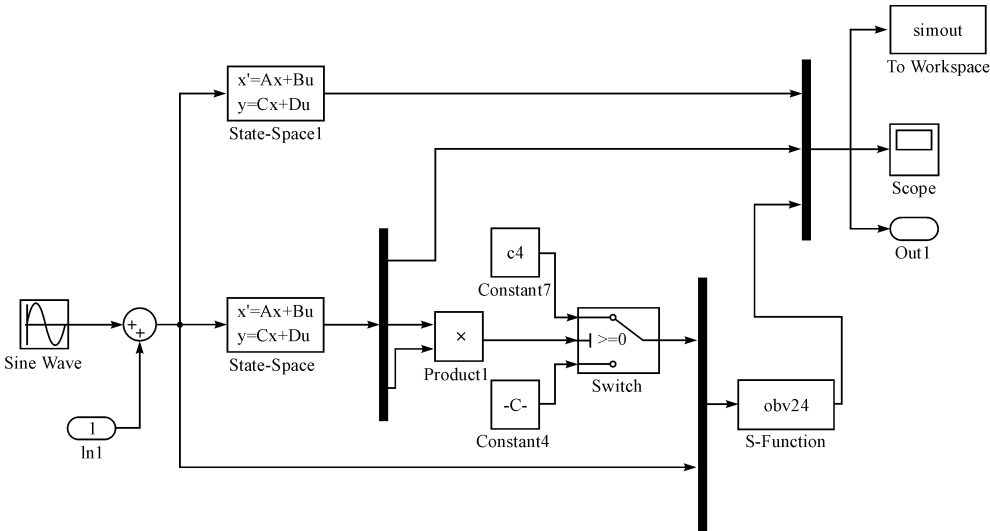


图 2 基于开关控制算法 1 的半主动控制浮筏隔振系统仿真模型

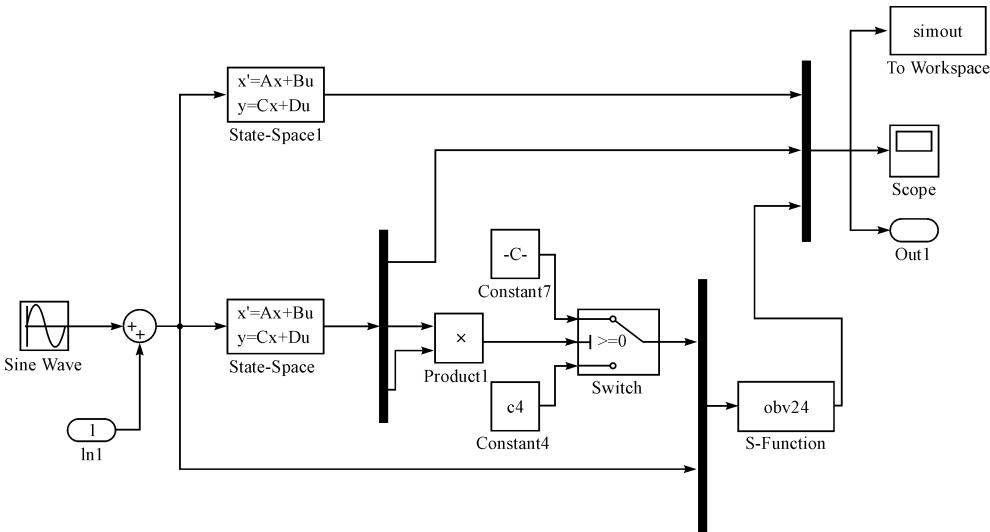


图 3 基于开关控制算法 2 的半主动控制浮筏隔振系统仿真模型

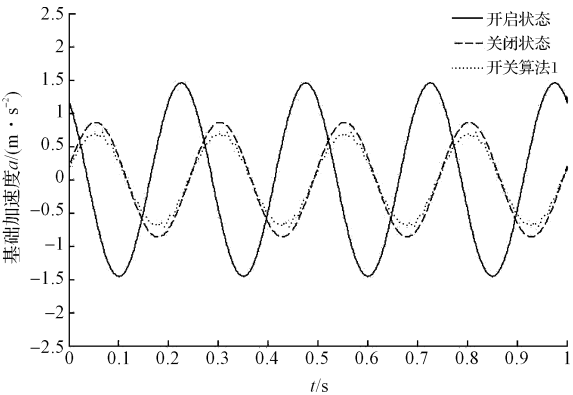


图 4 基于开关控制算法 1 下的 4 Hz 正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

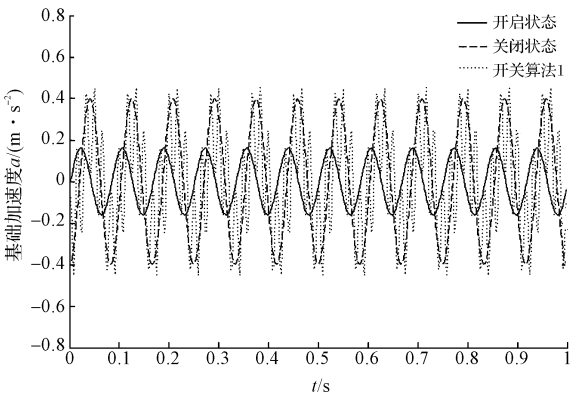


图 5 基于开关控制算法 1 下的 12 Hz 正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

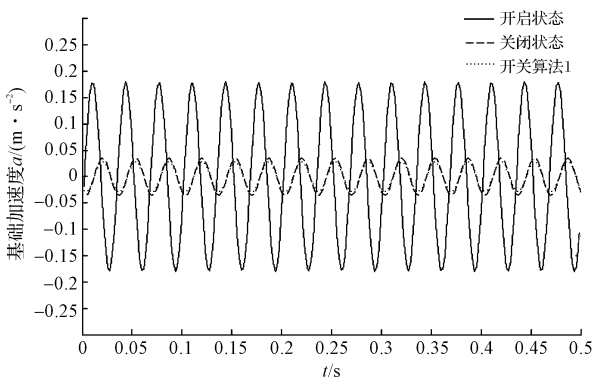


图6 基于开关控制算法1下的30 Hz正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

3.2 基于开关控制算法2的系统仿真

当半主动控制浮筏隔振系统输入力的幅值为5 000 N,选取正弦激励频率分别为4 Hz、12 Hz、30 Hz,对可控阻尼器在开关控制算法2控制状态下进行Simulink仿真,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度响应曲线分别如图7~9所示。从图7可知,可控阻尼器在开关控制算法2的作用下,此时半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度响应曲线幅值明显小于可控阻尼器在开启状态下的基础加速度响应曲线的幅值,也略小于关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值。从图8可知,此时半主动控制浮筏隔振系统在开关控制算法2作用下的基础加速度响应曲线幅值明显小于可控阻尼器在关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值,也略小于开启状态下的基础加速度响应曲线的幅值。从图9可知,此时半主动控制浮筏隔振系统在开关控制算法2作用下的基础加速度响应曲线幅值介于可控阻尼器在开启状态和关闭状态下的基础加速度响应曲线的幅值之间。

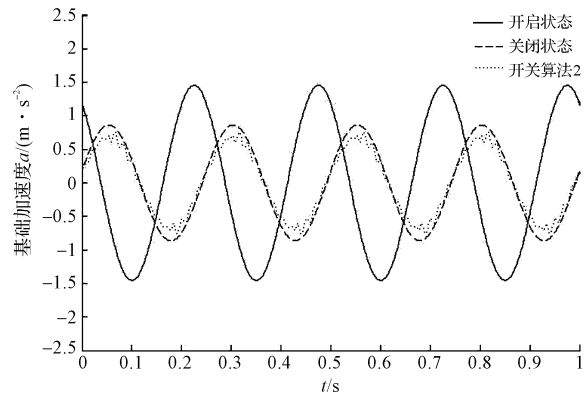


图7 基于开关控制算法2下的4Hz正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

3.3 两种开关控制算法下的系统仿真结果对比

针对3.1节、3.2节中半主动控制浮筏隔振系统

在输入力的幅值为5 000 N,选取正弦激励频率分别为4 Hz、12 Hz、30 Hz条件下获得的仿真结果进行对比。在正弦激励频率为4 Hz时,半主动控制浮筏隔振系统在开关算法1作用下的基础加速度响应的幅值略小于系统在开关算法2作用下的基础加速度响应的幅值。在正弦激励频率为12 Hz时,半主动控制浮筏隔振系统在开关算法1作用下的基础加速度响应的幅值明显大于系统在开关算法2作用下的基础加速度响应的幅值。在正弦激励频率为30 Hz时,半主动控制浮筏隔振系统在开关算法1作用下的基础加速度响应的幅值明显小于系统在开关算法2作用下的基础加速度响应的幅值。

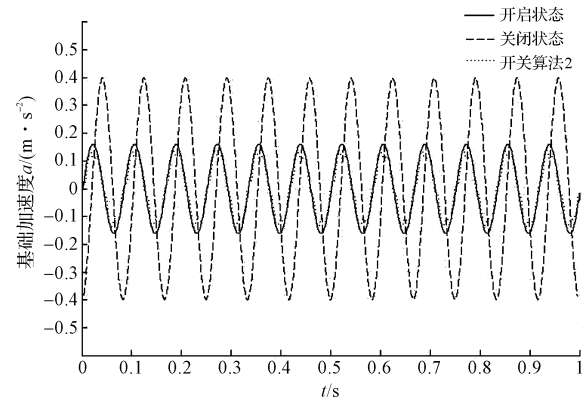


图8 基于开关控制算法2下的12 Hz正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

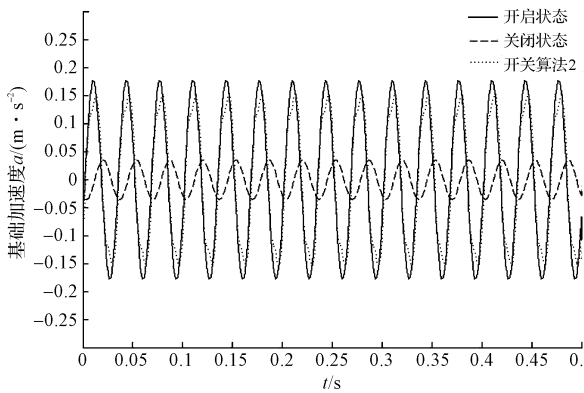


图9 基于开关控制算法2下的30 Hz正弦波激励信号时基础加速度的稳态响应

3.4 激振频率对半主动控制浮筏隔振系统基础加速度的影响

当半主动控制浮筏隔振系统输入力的幅值为5 000 N,正弦激励信号的频率从3 Hz逐渐递增到45 Hz,本研究分别采集记录可控阻尼器开启状态、可控阻尼器关闭状态、可控阻尼器在开关控制算法1作用下和可控阻尼器在开关控制算法2作用下的半主动

控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值,将采集得到的数据经三次样条插值近似计算得到可控阻尼器在不同控制状态下的半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅频图,如图 10 所示。

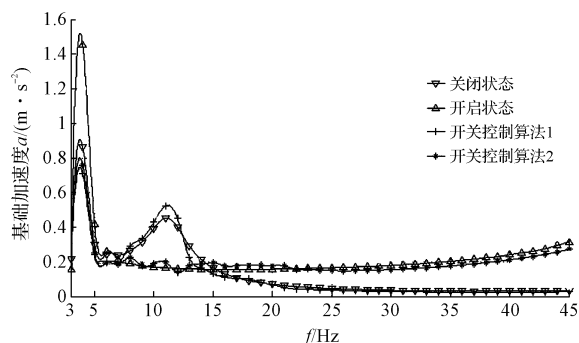


图 10 激振频率对半自动控制浮筏隔振系统基础加速度振幅的影响

从图 10 所得,在 3 Hz ~ 8 Hz 范围内,在开关控制算法 1 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值大体上介于可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值之间,在该区域范围内,有最小的基础加速度幅值;在 8 Hz ~ 13 Hz 范围内,在开关控制算法 1 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值较大;在 13 Hz ~ 45 Hz 范围内,在开关控制算法 1 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值总体上小于可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值,该区域范围内接近或稍微比可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下较小的半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值。

在 3 Hz ~ 4.5 Hz 范围内,在开关控制算法 2 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值大体上介于可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值之间;在 4.5 Hz ~ 14 Hz 范围内,在开关控制算法 2 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值总体上小于可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值,该区域范围内接近或稍微比可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下较小

的半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值;在 14 Hz ~ 20 Hz 范围内,在开关控制算法 2 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值较大;在 20 Hz ~ 45 Hz 范围内,在开关控制算法 2 的作用下,半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值大体上介于可控阻尼器在开启状态和在关闭状态下半主动控制浮筏隔振系统的基础加速度幅值之间。

无论是开关控制算法 1 还是开关控制算法 2,其控制思想均是为了减小中间筏体传递到基础的力,可以通过调节可控阻尼器来减小中间筏体的振动来实现。所不同的是对半主动控制浮筏隔振系统上层隔振器进行分析时,开关控制算法 1 以机组为研究对象,开关算法 2 以中间阀体为研究对象。

4 结束语

本研究针对半主动控制浮筏隔振系统,通过仿真分析阻尼器在:常开、常闭、开关算法 1 和开关算法 2 的 4 种工作状态下,不同激励信号对系统的基础加速度的稳态响应的影响。结果表明,两种算法的半主动开关控制浮筏隔振系统均有助于提高隔振效果。并且,笔者对半主动控制浮筏隔振系统在两种不同算法作用下的基础加速度响应的幅值进行对比,在 3 Hz ~ 15 Hz 范围内,开关控制算法 2 作用下的半主动控制浮筏隔振系统的隔振效果优于开关控制算法 1;在 15 Hz ~ 45 Hz 范围内,开关控制算法 1 作用下的半主动控制浮筏隔振系统的隔振效果优于开关控制算法 2。

致 谢

谨向我导师翁泽宇教授致以衷心的感谢和崇高的敬意。文章是在翁老师精心指导下完成的。在不同研究的领域,翁老师敏锐的洞察力、渊博的学识、严谨的科研态度、一丝不苟的工作作风,给我留下深刻的印象,使我受益匪浅。在此表示衷心的感谢。同时真诚感谢实验室师弟耿超及中国人民解放军 73021 部队朱甫宏对我在论文上的帮助。

(下转第 286 页)

本文引用格式:

朱雅辉,翁泽宇,耿超,等. 半主动控制浮筏隔振系统的开关算法与仿真研究[J]. 机电工程,2016,33(3):265-270,286.

ZHU Ya-hui, WENG Ze-yu, GENG Chao, et al. Switching algorithms and simulation research on semi-active control of floating raft vibration isolation system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):265-270,286.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>