

一种新型浮筏的模糊减振控制

孙涛^{1,2}, 陈大跃², 黄震宇², 李凡冰³

(1. 山东轻工业学院 控制工程系, 山东 济南 250100; 2. 上海交通大学 信息检测技术与仪器系, 上海 200030;

3. 山东建筑工程学院 机械工程系, 山东 济南 250014)

摘要: 本文针对带有电流变液智能阻尼器的新型浮筏装置提出了前馈和反馈两种模糊控制策略并进行了实验研究. 前馈模糊控制策略根据浮筏所受到的振动激励信号的主频特性来确定模糊控制器的控制规则, 反馈模糊控制策略则是根据簧载质量的位移响应来制定控制规则, 二者的最终目的都是通过模糊控制算法来得到最优的电流变液阻尼器控制电压, 达到期望的隔振效果. 实验结果证明, 两种模糊控制策略控制下的浮筏隔振系统的隔振性能都要远远好于传统的最优被动浮筏隔振系统.

关键词: 模糊控制; 浮筏; 隔振

中图分类号: TP273.4, TB533

文献标识码: A

Fuzzy vibration isolation control for a new type of floating raft

SUN Tao^{1,2}, CHEN Da-yue², HUANG Zhen-yu², LI Fan-bing³

(1. Department of Control Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan Shandong 250100, China;

2. Department of Information Measurement Technology and Instruments, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Shandong Institute of Architecture and Technology, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: Two fuzzy control methods are proposed to control a new type of floating raft whose damper could be adjusted with the voltage. The first is a feed forward fuzzy control method whose rules are made by analyzing the main frequency of the excited signal. The second fuzzy control method is a feedback control method whose rules are made according to the displacement of the spring-loaded mass. The objective of the methods is to apply a maximum control voltage to the damper to achieve the best vibration isolation effect of the floating raft. The experiment has indicated that the proposed control methods are very effective in vibration isolation than the passive optimal system through the experimental results.

Key words: fuzzy control; floating raft; vibration isolation

1 引言(Introduction)

浮筏是一种旨在通过多层结构, 实现逐级减振的隔振系统. 通过将船上的马达、泵、风机等设备安装在类似于双层隔振的柔性支架上, 利用其间的阻尼器来耗散向船体传递的振动能量, 提高船舰的减振性能. 因此阻尼器的隔振性能对整个浮筏装置的减振效果起着至关重要的作用. 目前在大多数浮筏装置中的阻尼器是固定不变的, 只能在某一有限的频段范围内有好的减振效果, 为了解决这一问题, 一种新型的潜艇浮筏装置应运而生. 这种浮筏装置的阻尼器是利用电流变液而制成的智能阻尼器, 能够随着外加电压的变化而改变其阻尼特性, 从而适应不同频段内的振动激励情况. 同时具备了能耗小、响应快, 控制简单和可靠性高等优点^[1~3].

电流变液智能阻尼器是一非线性器件, 因此对此类浮筏装置的控制系统的提出了较高的要求. 模糊控制器是一种不需对控制对象精确建模的控制器, 而且对过程参数的变化不敏感, 具有很强的鲁棒性. 适合对非线性系统进行比较准确的控制^[4~7]. 本文就利用模糊控制器对这种新型的浮筏装置提出了前馈模糊控制和反馈模糊控制两种不同的模糊控制策略. 仿真和实验结果表明, 在两种方法控制下的新型浮筏的减振效果要比传统的最优被动浮筏装置有明显的提高.

2 浮筏结构(Structure of floating raft system)

为了研究方便, 在此把浮筏结构简化为如图 1 所示的双层隔振系统. 其中 m_1 为安置在浮筏之上的所有动力设备的质量总和, m_2 为浮筏结构的质量,

k_1, k_2 为弹簧刚度, 电流变智能阻尼器被分成了两个组成部分, 其中 ER_1 为不可控部分, ER_2 为可随外加电场改变的可控部分. F_{m_1} 为马达等动力设备运转时所产生的激振力, F_b 为经过浮筏隔振之后, 传递到船表壳上的振动力, z_1, z_2, r_b 分别为簧载质量 m_1 , 非簧载质量 m_2 和船表壳的位移.

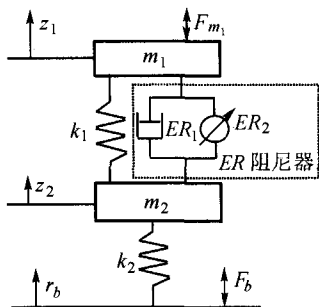


图1 半主动双层浮筏系统

Fig. 1 Two-stage semi-active floating raft system

$$T_f(s) = T_d(s) = \frac{k_2 cs + k_1 k_2}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) cs^3 + (m_1 k_1 + m_1 k_2 + m_2 k_1) s^2 + k_2 cs + k_1 k_2}. \quad (3)$$

因此, 为了利用实验室里的振动台等设备, 在此通过对被动隔振系统的研究来代替浮筏主动隔振系统. 由图1可得到其动力学方程式为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k_1(z_1 - z_2) - c_0(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + u \operatorname{sgn}(\dot{x}_p), \\ m_2 \ddot{z}_2 = k_1(z_1 - z_2) + c_0(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_2(z_2 - r_b) - u \operatorname{sgn}(\dot{x}_p). \end{cases} \quad (4)$$

其中 c_0 是零电场粘性阻尼系数, u 是当电压加到阻尼器上产生的可控阻尼力, 其方向与 $\dot{x}_p$ 一致, $\dot{x}_p$ 是阻尼器活塞的相对速度, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 是符号函数. 本实验中选用的电流变液阻尼器结构为旁路压差模式, 工作频率最高可达 800 Hz. 阻尼器的阻尼力 F 为

$$F = c_0 \dot{x}_p + u \operatorname{sgn}(\dot{x}_p). \quad (5)$$

根据实验数据, 可以拟合出可控阻尼力 u 与外

工程中有许多隔振指标来表示隔振系统的隔振效果. 对于浮筏结构这类积极隔振系统来说, 动力传递系数 T_f 能够清楚的表示出隔振效果, 是一个很常用的隔振指标. 其表达式为

$$T_f = \frac{F_b}{F_{m_1}}. \quad (1)$$

相反, 在图1中, 如果振动源为船的表壳, 隔振目的是为了减少浮筏之上的动力设备的振动幅度, 这种隔振方式称为被动隔振. 位移传递系数 T_d 常用来作为衡量被动隔振系统的隔振指标. 其表达式为

$$T_d = \frac{z_1}{r_b}. \quad (2)$$

由振动理论可以证明, 同一结构的隔振系统在被用来分别作主动隔振和被动隔振时, 其动力传递系数 T_f 和位移传递系数 T_d 是相同的. 对于图1所示的浮筏隔振系统, 通过其动力学方程可以得出传递系数为

加电压 U 的关系式

$$u = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2. \quad (6)$$

其中: U 为外加电压, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 为实验中与阻尼器结构参数有关的常数.

3 前馈模糊控制策略 (Feed forward fuzzy control method)

图2给出了浮筏的前馈模糊控制系统. 首先通过传感器采集振动台发出的振动信号, 通过信号主频识别模块来对信号进行分析, 得出其包含的各个主频特性并送入到模糊控制器, 模糊控制器根据事先制定的规则给各个主频不同的权值, 进而计算出此时的最优阻尼比, 最后通过电压发生器产生相应的电压加到电流变液阻尼器上完成控制过程.

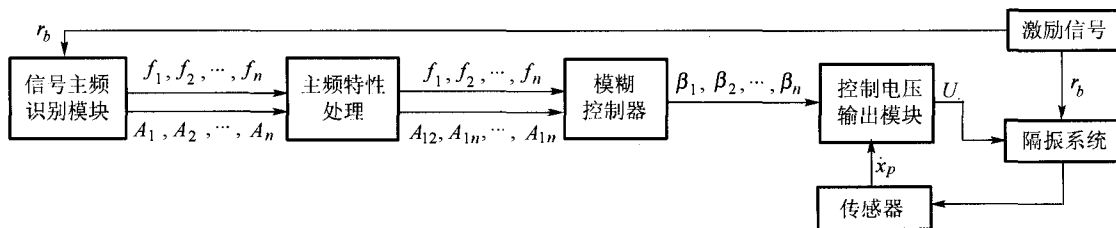


图2 前馈模糊控制系统方框图

Fig. 2 Structure of feed forward fuzzy control system

3.1 信号主频识别 (Identification of signal main frequency)

信号主频识别模块的作用是从激励信号中快速准确的识别出主频特性, 包括各个主频的位置和幅

值, 因为它们反映了信号能量集中的频段和大小. 在此过程中, 主要运用了短时傅立叶变换和主频变化趋势相结合的方法, 并且利用不同的窗函数来提高主频的识别精度.

3.2 模糊控制器(Fuzzy controller)

通过信号主频识别模块得到了信号当前的主频特性,包括主频的位置 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 及其幅值 $A_1, A_2, \dots, A_n$ (其中 $A_1 > A_2 > \dots > A_n$). 根据各个主频对隔振体响应的影响,我们给出下式:

$$Y(\xi) = A_1 G(f_1, \xi) + \sum_2^n \beta_{1i} A_i G(f_i, \xi), \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (7)$$

其中: $G(f_i, \xi) (i = 1, 2, \dots, n)$ 为簧载质量幅频传递函数的模, $\beta_{1i} (i = 2, 3, \dots, n)$ 为各主频的加权系数,通过模糊控制器求出. 令上式中 Y 取最小即可求出阻尼器应采用的最优阻尼比 ξ_{OPT} .

3.2.1 输入输出变量模糊化(Fuzzification of input and output variables)

定义模糊控制器的两个输入变量为位置系数 $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和幅值系数 $A_{1i} (i = 1, 2, \dots, n)$. 位置系数即为主频的位置. 幅值系数 A_{1i} 定义为: $A_{1i} = A_1/A_i, i = 1, 2, \dots, n$. A_{1i} 代表了两个主频的幅值比. 由于 A_1 为最大的幅值,所以幅值系数总是大于 1 的. 在此把两个输入变量语言值模糊子集均划分为 5 个等级,为了计算方便,选取其隶属函数曲线为三角形.

将模糊控制器的输出变量定义为主频 f_i 的影响系数 β_i . 影响系数 β_i 表示了当主频 f_i 与 f_1 共同作用于隔振系统时,对主频 f_i 的重视程度. 很明显,此时主频 f_1 的影响系数为 $(1 - \beta_i)$. 以主频 f_1 为基准,则可得到主频 f_i 的加权系数:

$$\beta_{1i} = \beta_i / (1 - \beta_i). \quad (8)$$

β_i 的论域定义为 $0 \sim 1$. 考虑到电流变液阻尼器所受的控制电压变化不能过于频繁,因此只采用了 3 个语言变量.

3.2.2 模糊控制规则(Fuzzy control rules)

根据双层隔振系统的幅频响应特性及人们在实际工作当中的经验,可以得出如下所说的 3 条模糊控制规则:

- 1) 如果某一主频的位置在交叉频率之前,则其对系统的影响较大. 相反则较小.
- 2) 如果某一主频的位置在一阶共振频率附近,则其对系统的影响很大,相反则较小.
- 3) 如果某一主频的幅值系数很大,说明其在各个主频当中的幅值很小,对系统的影响很小,反之则很大.

由此可得模糊控制规则表 1.

表 1 前馈模糊控制规则表
Table 1 Feed forward fuzzy control rules

位置 系数 f_i	幅值系数 A_{1i}				
	VS	S	M	B	VB
VS	S	S	M	B	B
S	S	M	B	B	B
M	S	S	M	B	B
B	S	S	S	M	B
VB	S	S	S	S	M

3.2.3 解模糊化(Defuzzification)

解模糊化采用加权平均法得到影响系数 β_i 的精确值. 由公式(8)可计算出主频 f_i 的加权系数 β_{1i} . 再由公式(7)可求出电流变液智能阻尼器应采用的最优阻尼比 ξ_{OPT} .

3.3 控制电压输出(Output of control voltage)

由模糊控制器模块求出电流变液智能阻尼器应采用的最优阻尼比 ξ_{OPT} 后,必须将其转换成相应的控制电压加到阻尼器上,才能完成所需的控制. 由公式(5)(6)可以得出所需的控制电压. 定义 U_{max} 为电流变液阻尼器最高容许电压,当所加的电压超过 U_{max} 时,阻尼器将会被击穿而失效. 本实验中最高容许电压控制为 $U_{max} = 4 \text{ kV}$.

4 反馈模糊控制策略(Feedback fuzzy control method)

图 3 显示了模糊 PID 反馈控制系统的工作原理. 将浮筏隔振系统中簧载质量的平衡位置 0 视为理想的控制目标,当有激励或扰动输入产生时,簧载质量将会偏离平衡位置而上下摆动,此时的偏差 $e = 0 - z_1$. 将此偏差 e 及其导数 $\dot{e}$ 按照大小和方向进行分类,然后针对不同的分类情况根据人们的经验知识给出不同的 PID 参数并将其输出给 PID 控制器,最后通过高压发生器生成相应的电压加到电流变智能阻尼器上,完成控制过程.

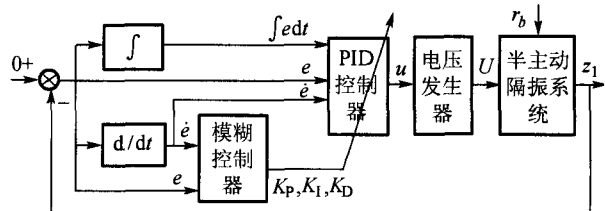


图 3 模糊 PID 控制系统方框图

Fig. 3 Structure of fuzzy-PID control system

4.1 PID 初始参数的设置(Initialization of PID parameters)

在模糊 PID 控制系统中,首先要确定 PID 控制器的初始参数 K_{P0}, K_{I0}, K_{D0} . 在此用工程中常用的

齐格勒-尼柯尔斯(Ziegler-Nichols)规则来确定这些参数.使控制器仅为比例控制作用,将比例增益逐渐由0增加至临界值,此时系统的单位阶跃响应曲线将会第一次出现固定的等幅振荡.利用此时系统的相应曲线特征并根据实际系统进一步的微调即可求出PID控制器的初始参数.

4.2 模糊控制器(Fuzzy controller)

4.2.1 输入输出变量模糊化(Fuzzification of input and output variables)

将输入变量 e 及 $\dot{e}$ 和输出变量 K_P, K_I 和 K_D 的物理论域量化到整数论域 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 中,在其论域上设有7个档次的语言变量值,其量化因子分别为 $K_e, K_{\dot{e}}, K_{u_p}, K_{u_i}, K_{u_d}$.

在仿真实验过程中,发现当输入输出的隶属函数曲线选用三角形或梯形时,会导致输出的PID参数的变化间隔过大,控制过程不够平滑.在此把输入输出变量的隶属函数选为高斯(Gaussian)型隶属函数.其表达式为

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}. \tag{9}$$

其中: $\sigma = 0.85, c = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$.

4.2.2 模糊控制规则(Fuzzy control rules)

根据簧载质量的位移偏差 e 及其导数 $\dot{e}$ 的方向不同,可以将位移响应曲线分为4种情况.在每一种情况内,又可根据位移偏差 e 的大小不同而对PID参数进行不同的调节.在此,可将人们积累的经验总结为如下的规则:

- 1) 当偏差的绝对值 $|e|$ 较大时,为使系统具有良好的快速跟踪性能,应取较大的 K_P 与较小的 K_D ,同时为避免系统响应出现较大的超调,应对积分作用加以限制,可令 K_I 为0或较小值.
- 2) 当 $|e|$ 处于中等大小时,为使系统具有较小的超调,应取中等 K_P 的,此时 K_D 的取值较大.
- 3) 当 $|e|$ 较小时,为使系统有较好的稳态性能, K_P 应较小, K_I 应取得大些.
- 4) 当偏差 e 与偏差的变化量 $\dot{e}$ 的方向一致时,说明此时的误差趋于增大,这时应该产生较大的控制作用来使偏差回落,故应加大 K_P ,同时,加强积分作用.
- 5) 当偏差 e 与偏差的变化量 $\dot{e}$ 的方向相反时,采取与规则4相反的控制策略.

根据上述规则,可以得出模糊控制规则表2.

表2 反馈模糊控制规则表
Table 2 Feedback fuzzy control rules

			NB			NM			NS			0			PS			PM			PB		
			K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D
NB	PB	PB	PS	PB	PB	0	PM	PB	0	PM	PB	0	PS	PB	0	0	PB	PS	0	PB	PS		
NM	PB	PB	NB	PB	PS	NB	PM	PS	NM	PM	PS	NS	PS	PS	NM	0	PS	NB	0	PS	NB		
NS	PB	0	NB	PB	0	NB	PM	0	NM	PS	0	NS	0	0	NM	NM	NS	NB	NM	NS	NB		
0	PB	NS	NS	PB	NS	NS	PM	NS	NS	0	NS	NS	NM	NS	NS	NB	NB	NM	NB	NB	NM		
PS	PM	0	NB	PM	0	NB	0	0	NM	NS	0	NS	NM	0	NM	NB	NS	NB	NB	NS	NB		
PM	0	PB	NB	0	PS	NB	NS	PS	NM	NM	PS	NS	NM	PS	NM	NB	PS	NB	NB	PS	NB		
PB	0	PB	PS	0	PB	PS	NS	PB	0	NM	PB	0	NM	PB	0	NB	PB	PS	NB	PB	PS		

4.2.3 解模糊化(Defuzzification)

解模糊化采用面积重心法进行,可得到所要求的PID控制器的参数 K_P, K_I 和 K_D .

4.3 控制电压输出(Output of control voltage)

控制电压输出方法与前馈模糊控制系统相同.

5 实验结果与分析(Experimental results and analysis)

5.1 前馈模糊控制策略实验(Experiment for feed forward fuzzy control method)

取图1所示的系统进行实验.实验在上海交通大学振动、冲击与噪声国家重点实验室进行.其参数为: $m_1 = 60 \text{ kg}, m_2 = 16 \text{ kg}, k_1 = 33 \text{ kN/m}, k_2 = 185$

$\text{kN/m}, c_0 = 1013 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,最优被动阻尼器粘性阻尼系数 $c_p = 2100 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.此时测得系统的一阶共振峰频率在3.8 Hz,交叉频率在4.9 Hz.

图4的激励信号在0~1 s时为一幅值是1 mm,频率为2 Hz的正弦信号,在1~1.5 s叠加了一幅值为5 mm,频率为10 Hz的正弦信号.从图中可以看出,带有前馈模糊控制器的控制效果要明显好于最优被动浮筏系统(降低30%~50%).原因是此时两个正弦信号的幅值比不同,所以前馈模糊控制器对控制规则进行了调整,重点考虑了主频为10 Hz的激励的影响,增大了它的加权系数,而简单的模糊控制器则没有考虑这些,所以不能给出最佳的阻尼比.

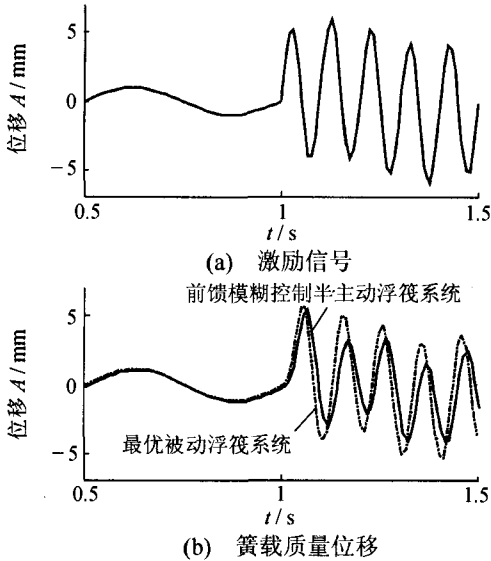


图4 主频幅值不同时的簧载质量位移

Fig. 4 Displacement of spring-loaded mass under changing amplitude

图5给出了簧载质量的位移响应曲线.此时的激励信号为两个正弦扫频信号的叠加,一个频率变化从0Hz到10Hz,另一个频率变化从10Hz到0Hz,扫频时间为30s.也就是说在每一时刻,系统都会受到两个不同主频的激励,而且随着时间的变化,两个主频也随之变化.图5(a)(b)分别给出了最优被动隔振系统和前馈模糊控制方法所控制的隔振系统的位移响应曲线.明显的,后者的减振效果要好于前者,位移最多可以减少50%.原因就在于模糊控制系统在每一个采样时刻都会对主频特性进行分析,

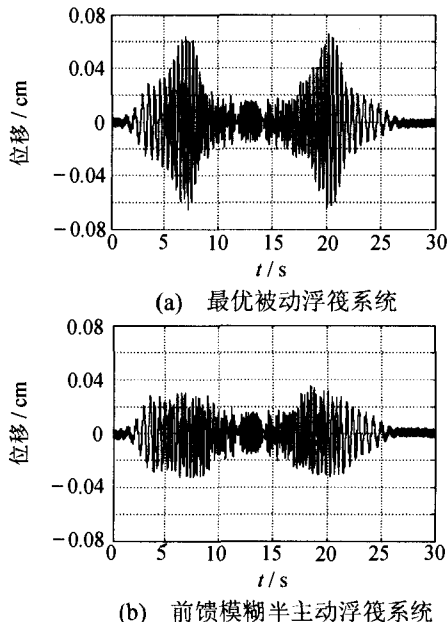


图5 双扫频信号激励下的簧载质量位移响应曲线

Fig. 5 Displacement of spring-loaded mass under two chirp signal

并给出最优的阻尼比和控制电压.图6给出了此时两个系统的幅频响应曲线,从中也可明显的看出,在整个扫频频段内,模糊控制系统的幅值比都要小于最优被动隔振系统的幅值比,达到了最优的减振目的.

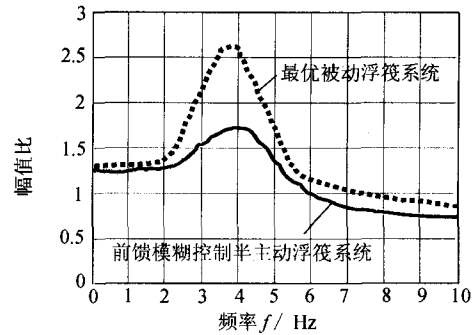


图6 双扫频信号激励下的幅频响应曲线

Fig. 6 Transmission ratios under two chirp excitation signal

5.2 反馈模糊控制策略仿真实验 (Simulate experiment for feedback fuzzy control method)

对图1所示的半主动隔振系统运用 Matlab Simulink 工具进行仿真.在仿真实验中的各个参数如下: $m_1 = 32 \text{ kg}$, $m_2 = 16 \text{ kg}$, $k_1 = 33 \text{ kN/m}$, $k_2 = 185 \text{ kN/m}$, $U_{\text{MAX}} = 5 \text{ kV}$, $u_{\text{max}} = 106 \text{ N}$, $c_0 = 1013 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, $c_P = 2100 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, $\alpha_0 = 10.23 \text{ N}$, $\alpha_1 = 6.38 \text{ N/kV}$, $\alpha_2 = 2.59 \text{ N/kV}^2$. $K_{P0} = 9422.8$, $K_{I0} = 785233$, $K_{D0} = 707$.

输入为均值为 e^{-5} , 方差为 $0.58e^{-3}$ 的随机信号, 采样频率为 500Hz, 时间为 20s. 其输出曲线的各个评价指标可见表3. 从表中可以看出模糊 PID 控制系统的随机扰动响应的均值 (Mean), 方差 (Std), 最大位移量 (Max) 和时间绝对误差的积分 (ITAE) 都要小于最优被动阻尼系统和固定参数 PID 控制系统.

表3 随机扰动响应特性

Table 3 Responses under random signal

	被动	PID	模糊-PID
Mean ($\times e^{-7}$)	7.343	9.645	3.037
Std ($\times e^{-4}$)	4.446	4.159	3.519
Max ($\times e^{-3}$)	1.22	1.181	0.966
ITAE	0.488	0.457	0.393

输入长度为 0.25 s 的半波正弦信号, 其振幅为 $e^{-3} \text{ m}$, 见图7中的点划线. 图7中的虚线, 虚点线, 实线分别是最优被动系统, PID 控制下的隔振系统和模糊 PID 控制下的隔振系统簧载质量位移响应曲线. 可以看出, 在半波正弦信号的冲激下, 各个系统

的簧载质量位移响应曲线有着很大的不同.最优被动系统在冲激的最高峰的响应明显要高出其他系统的响应,其最大值要高出模糊PID控制情况下的两倍.PID控制下的最大位移响应值虽然比最优被动系统也要小出很多,但它的振荡幅度明显要加大大许多,衰减速度要慢.模糊PID控制系统则可以大大的将响应最大值减小,而且其振荡次数也少,综合性能要好于其他两种系统.这是因为在冲激的不同阶段,模糊控制器根据其位移偏差及其导数的不同而调整了PID控制器的参数,使其能够达到较为理想的冲激响应.

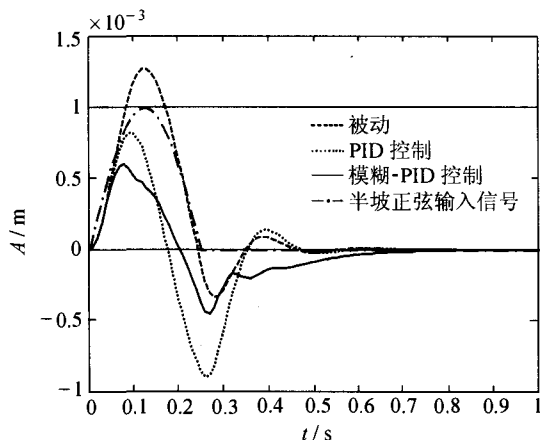


图7 各系统在半波正弦信号冲激下的簧载质量位移响应曲线

Fig. 7 Displacement of spring-loaded mass under half sine wave signal

6 结论(Conclusion)

传统浮筏阻尼器的参数不可调节性在一定程度上制约了其隔振性能.为适应船只在航速不断变化过程中保持良好稳定性能的需求,本研究利用可控电流变阻尼器阻隔宽频范围内由动力部件向船体的振动传播.文中提出了两种模糊控制策略来完成对这种带有电流变智能阻尼器的半主动浮筏装置进行控制,一是利用对激振信号特征提取和识别技术,研究能随激励信号特征改变而自适应跟踪的前馈模糊控制策略;二是通过对簧载质量位移偏差及其导数的分析,实时改变阻尼器控制电压的反馈模糊控制策略.仿真和实验结果表明这两种控制方法的隔振效果都要比传统的最优被动浮筏好.两种模糊控制

系统各有优点,适合不同的环境.主要表现为:

1) 前馈模糊控制策略根据激励信号的主频特性来确定阻尼器的控制电压,无需利用簧载质量的反馈信号,控制简单,适合激励信号比较稳定,变化频率较慢的场合.

2) 反馈模糊控制策略实时检测簧载质量的变化情况,并能给出最优的控制电压,无需关心激励信号的复杂程度,从时域的角度来完成控制,适合情况复杂的振动环境.

参考文献(References):

- [1] GAVIN H P, HANSON R D, FILISKO F E. Electrorheological dampers, part I: analysis and design [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1996, 63(3): 669 - 675.
- [2] GAVIN H P, HANSON R D, FILISKO F E. Electrorheological dampers, part II: analysis and design [J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1996, 63(3): 676 - 682.
- [3] JASON L, NORMAN M W. Analysis and testing of electrorheological bypass dampers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(5): 363 - 376.
- [4] LIN Y J, LU Y Q. Fuzzy logic control of vehicle suspension systems [J]. *Int J of Vehicle Design*, 1993, 14(5): 457 - 470.
- [5] RAO M. V. C, PRAHLAD V. A tunable fuzzy logic controller for vehicle-active suspension systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 85(1): 11 - 21.
- [6] HWANG H S, CHOI J N, LEE J K, et al. A tuning algorithm for the PID controller utilizing fuzzy theory [C]// *Proc of the Int Joint Conf on Neural Networks*. Washington, DC: IEEE Press, 1999: 2210 - 2215.
- [7] COPELAND R P, RATTAN K S. Fuzzy logic supervisor for PID control of unknown systems [C]// *IEEE Int Symposium on Intelligent Control Proceedings*, Control Systems Society. Columbus, Ohio: [n. s.], 1994: 22 - 26.

作者简介:

孙涛 (1976—),男,讲师,博士,主要从事信号处理,模糊控制方面的研究, E-mail: tao_sun@163.com;

陈大跃 (1958—),男,上海交通大学教授,博士生导师,主要研究方向为智能机电控制;

黄震宇 (1974—),男,讲师,主要研究方向为信号处理,减振控制;

李凡冰 (1975—),女,讲师,主要研究方向为单片机控制.