

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2020.1.13

主动隔振系统的模糊 PID 控制

张 帅¹, 沈铖武², 刘小波¹, 谢慕君^{1*}

(1.长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012;
2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对光电测量设备车载平台主动隔振控制,利用 MATLAB/Simulink 搭建模糊 PID 控制仿真模型进行了不同频率振源信号的仿真实验。仿真结果表明,模糊 PID 控制器效果好,鲁棒性强。

关键词: 车载平台; 主动隔振系统; 模糊 PID 控制

中图分类号: TB 535 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2020)01-0067-06

Active vibration isolation technology based on fuzzy PID

ZHANG Shuai¹, SHEN Chengwu², LIU Xiaobo¹, XIE Mujun^{1*}

(1.School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;
2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For the active vibration isolation control in optoelectronic vehicle-based platform, we build the fuzzy PID control model in MATLAB/Simulink for the simulation with different frequency vibration sources. The simulation results show that the fuzzy PID controller works well and has strong robustness.

Key words: vehicle-based platform; active vibration isolation system; fuzzy PID control.

0 引 言

现代工程上通常将光电精密测量仪器直接安装在车载平台上,来提高测量仪器在测量过程中的灵活性^[1]。车体传递振动的振源有大地振动、乘员活动引起的振动、发电机和发动机传递的振动等^[2]。与固定地基相比,车载光电精密仪器的测量基准会受到车辆发动机振动的干扰,车辆发

动机振动越大,测量基准的变化越大。为了解决光电精密测量仪器测量基准变化的问题,通常是将需要进行隔振^[3]处理的系统集成在一个平台上,然后对所搭建的隔振平台进行隔振处理,从而减小光电精密测量仪器测量基准变化。

在主动隔振领域,国内外许多学者提出了多种控制方法进行隔振控制,如控制^[4]、滑模控制^[5]、鲁棒控制^[6]、自适应控制^[7]等。这些算法各

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 吉林省科技厅重点攻关项目(20190302086GX)

作者简介: 张 帅(1994—),男,汉族,江苏宿迁人,长春工业大学硕士研究生,主要从事模糊 PID 控制方向研究,E-mail:977534989@qq.com. * 通讯作者: 谢慕君(1969—),女,汉族,吉林长春人,长春工业大学教授,博士,主要从事智能机械与机器人控制方向研究,E-mail:xiemujun@ccut.edu.cn.

有优缺点,因此可以将两个或者多个算法相结合,设计一个复合型的控制器以达到最好的控制效果。设计了一个模糊 PID 控制器对车载光电精密仪器进行主动控制,并通过 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,对文中所设计控制器的可行性进行分析。

1 主动隔振系统数学模型

文中研究的隔振系统以电磁作动器作为系统的执行机构。主动隔振系统结构如图 1 所示。

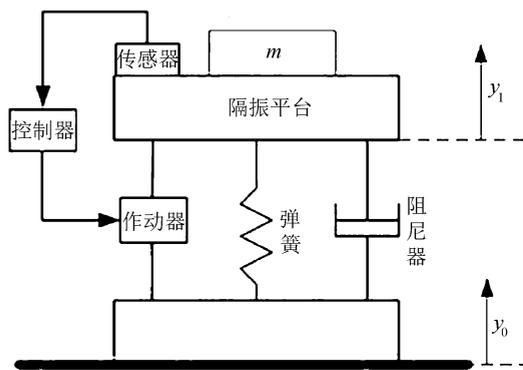


图 1 主动隔振系统结构

图中以隔振平台位移 y_1 为控制目标,通过控制作动器的输出,来抵消由于载车振源 y_0 引起的仪器隔振平台的振动,保证绝对位移 y_1 不变,进而确保光电精密测量仪器的测量精度。电磁作动器是整个隔振系统的执行机构,其工作原理是:当有电流通过导体时,导体周围会形成相应的磁场,磁场强度的大小取决于导体中电流的大小,处在该磁场中的铁磁物质就会受到相应大小的电磁力^[8],从而使得铁磁物质做机械运动。

隔振系统的数学模型^[9]如下

$$\begin{cases} F = m\ddot{y}_1 + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + k(y_1 - y_0), \\ F = P_1 x + P_2 [f(i_a) + d(i_a)], \\ f(i_a) = Q_s \frac{1 - e^{-\tau i_a}}{1 + e^{-\tau i_a}}, \\ \ddot{i}_a + k_1 \dot{i}_a + k_2 i_a = k_2 i_d, \end{cases} \quad (1)$$

式中: m ——光电精密测量仪器的质量;

k ——弹簧刚度系数;

c ——阻尼器的阻尼系数;

y_0 ——基础位移;

y_1 ——隔振平台位移;

$$P_1 = \frac{\mu_0 AN^2 i_0^2}{c_0^3};$$

$$P_2 = \frac{\mu_0 AN^2 i_0}{c_0^2};$$

$f(i_a)$ ——滞回骨架线;

$d(i_a)$ ——一种不确定的表示形式;

μ_0 ——真空或非铁磁物质的磁导率;

A ——磁路的横截面积;

N ——线圈匝数;

c_0 ——平衡位置的气隙;

i_0 ——偏磁电流;

i_a ——线圈内的实际电流;

k_1, k_2 ——系数,通过测试、估计得到。

设 $x_1 = y_1, x_2 = \dot{y}_1, x_3 = i_a, x_4 = \dot{i}_a, u = i_d$, 系统的状态空间方程为

$$\dot{X} = AX + Bu + Cw + D\Delta,$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{P_1 - k}{m} & -\frac{c}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_2 & -k_1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P_2}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$w = f(x_3) + d(x_3),$$

$$\Delta = \frac{k - P_1}{m} y_0 + \frac{c}{m} \dot{y}_0,$$

$$f(x_3) = Q_s \frac{1 - e^{-\tau x_3}}{1 + e^{-\tau x_3}}.$$

2 模糊 PID 控制器设计

在普通 PID 基础上,设计了一个模糊 PID 控制器。其中 PID 控制器为

$$\begin{aligned} u_{\text{PID}} &= K_{p0} \left[e(t) + \frac{K_{p0}}{T_{i0}} \int_0^t e(t) dt + K_{p0} T_{d0} \frac{de(t)}{dt} \right] = \\ &K_{p0} \left[e(t) + \frac{1}{T_{i0}} \int_0^t e(t) dt + T_{d0} \frac{de(t)}{dt} \right] = \\ &K_{p0} e(t) + K_{i0} \int_0^t e(t) dt + K_{d0} \frac{de(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

模糊 PID 控制流程如图 2 所示。

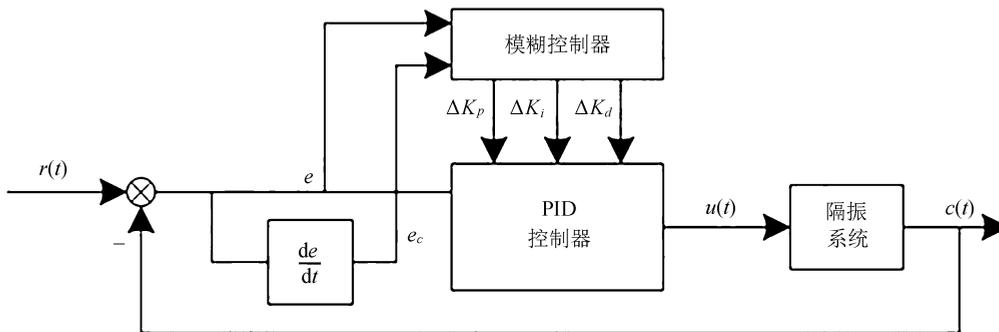


图 2 模糊 PID 控制流程

所设计的模糊控制器输入为输出值 $c(t)$ 与期望值 $r(t)$ 之间的误差 $e(t)$, 以及误差的变化率 $e_c(t)$, 输出为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。

因此可以得到

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p, \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d, \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ —— 模糊控制器的输出;

K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} —— PID 控制器的原本控制

参数。

模糊 PID 控制器可以表示为

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} = (K_{p0} + \Delta K_p) e(t) + (K_{i0} + \Delta K_i) \int_0^t e(t) dt + (K_{d0} + \Delta K_d) \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

设计模糊控制器, 选取三角形隶属度函数。

采用变量的模糊自己划分成 $\{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\}$, 其中子集元素对应为: 负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊规则分别见表 1 ~ 表 3。

表 1 ΔK_p 模糊规则

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 模糊规则

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	NS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	NS
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	NB
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO	NM
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	NM
PM	PB	PS	PS	PS	PS	NB	NB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZO	NB

3 仿真实验分析

通过 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,对

文中设计的控制器进行可行性分析。模糊 PID 控制器 Simulink 仿真结构如图 3 所示。

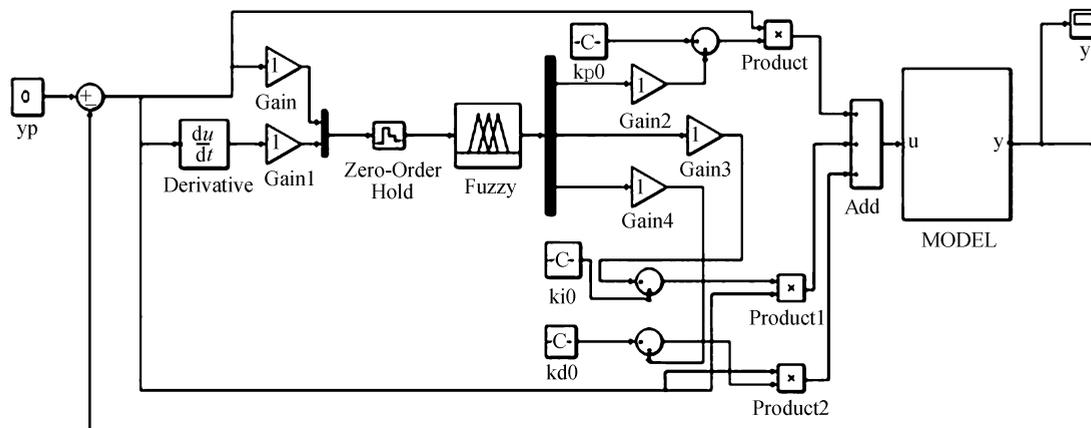


图 3 Simulink 仿真结构

图中 MODEL 为主动隔振系统的数学模型,前面部分为模糊 PID 控制器。

取系统参数为: $m = 5 \text{ kg}$, $k = 19\,719 \text{ N/m}$, $c = 25.12 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $c_0 = 0.008 \text{ m}$, $P_1 = 5\,000 \text{ N/m}$, $P_2 = 80 \text{ N/A}$, $Q_s = 300$, $d_{\max} = 0.5$, $\tau = 5$, $k_1 = 888$, $k_2 = 394\,384$ 。

PID 参数 $K_{p0} = 0.830\,8$, $K_{i0} = 0.665\,2$, $K_{d0} = 0.494\,2$ 。

取振源扰动 $y_0 = 0.004 \sin(2\pi * f * t)$, 振源频率 f 的取值为: $25 \sim 100 \text{ Hz}$ 。

文中仿真频率 f 分别取 $25, 50, 75, 100 \text{ Hz}$ 。

其仿真结果分别如图 4~图 7 所示。

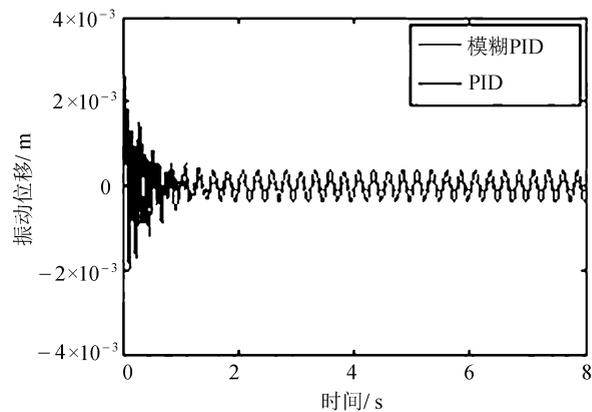


图 4 振源频率为 25 Hz 的仿真图

由图 4 可知, 振源频率为 25 Hz 时, 在 PID 控制下, 系统在 1.8 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 3.8×10^{-4} m, 幅值衰减了 90.50%; 在模糊 PID 控制下, 系统在 1.83 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 1.1×10^{-4} m, 幅值衰减了 97.25%。

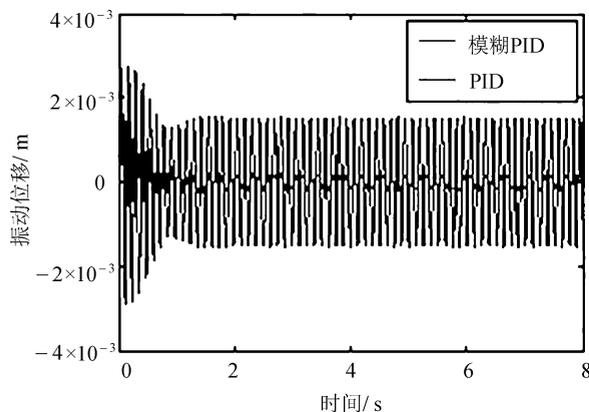


图 5 振源频率为 50 Hz 的仿真图

由图 5 可知, 振源频率为 50 Hz 时, 在 PID 控制下, 系统在 1.9 s 左右达到了稳定状态, 其振动幅值为 1.51×10^{-3} m, 幅值衰减了 62.25%; 在模糊 PID 控制下, 系统在 1.8 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 2.0×10^{-4} m, 幅值衰减了 95%。

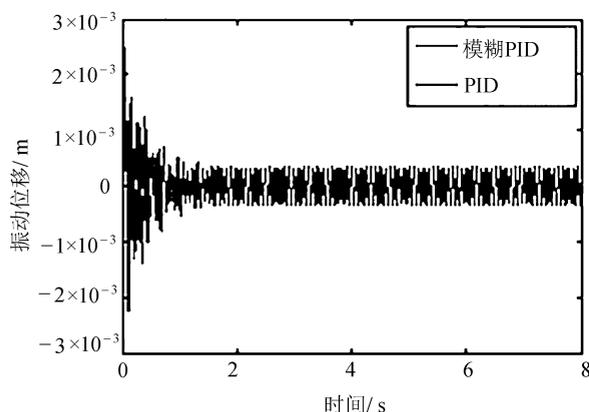


图 6 振源频率为 75 Hz 的仿真图

由图 6 可知, 振源频率为 75 Hz 时, 在 PID 控制下, 系统在 1.6 s 左右达到了稳定状态, 其振动幅值为 3.3×10^{-4} m, 幅值衰减了 91.75%; 在模糊 PID 控制下, 系统在 1.9 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 1.8×10^{-4} m, 幅值衰减了 95.50%。

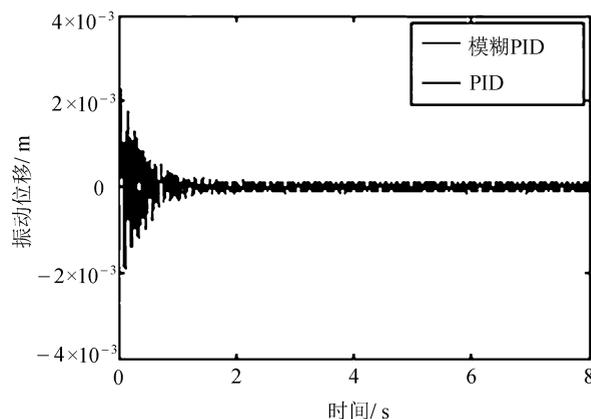


图 7 振源频率为 100 Hz 的仿真图

由图 7 可知, 振源频率为 100 Hz 时, 在 PID 控制下, 系统在 1.9 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 1.3×10^{-4} m, 幅值衰减了 96.75%; 在模糊 PID 控制下, 系统在 2.1 s 左右达到稳定状态, 其振动幅值为 4.5×10^{-5} m, 幅值衰减了 98.88%。

4 结 语

针对车载光电测量跟踪设备的主动隔振问题设计了模糊 PID 控制器, 通过 Matlab/Simulink 仿真实验。结果表明, 所设计的模糊 PID 控制器稳定效果好, 能够很好地应用在振源频率 25~100 Hz 的范围内, 但是响应时间较 PID 控制器略长。

在后续的工作中, 将针对文中所设计的控制器在主动隔振系统中响应时间相对较长的问题, 学习更多的算法, 寻求最优解决方案, 设计一个稳定性好、鲁棒性强且响应速度快的控制, 实现对主动隔振系统更好的控制, 进而提高光电精密测量仪器在复杂环境下测量的准确性。

参考文献:

- [1] 张振东. 车载光电设备动态跟踪技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- [2] 李明珠. 车载光电精密测量仪器振动信号小波降噪研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [3] Dai H, Jing X, Yu W, et al. Post-capture vibration suppression of spacecraft via a bio-inspired isolation system[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 105: 214-240.
- [4] 周婷. 四旋翼飞行器控制算法的研究[J]. 电子测试,

- 2018(z1):80-80.
- [5] Begnini M, Bertol D W, Martins N A. A robust adaptive fuzzy variable structure tracking control for the wheeled mobile robot: Simulation and experimental results [J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 64:27-43.
- [6] Maryam Brahem, Amira Amamou, Mnaouar Chouchane. Active Vibration Control of a Rotor Bearing System Using Piezoelectric Patch Actuators and an LQR Controller [C]//International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems. Springer, Cham, 2018.
- [7] 郑曼, 胡黄水, 杨兴旺. 基于自适应改进遗传算法的 MVB 周期调度表优化 [J]. *长春工业大学学报*, 2018, 39(4):362-366.
- [8] 张京军, 龙荣, 张海军, 等. 开关磁阻电机径向电磁力解析建模及有限元分析 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(4):700-704.
- [9] 潘存治. 含滞回非线性作动器的隔振系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.