

模糊 + 经典复合控制在光电稳瞄平台中的应用*

庞新良¹ 范大鹏¹ 李忱刚² 谭红军²

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)(2. 衡阳北方光电集团股份有限公司,衡阳 421000)

摘要 依托于光电稳瞄平台的理论模型来进行实测频率特性的系统辨识,由此建立与理论和实测模型均较吻合的系统仿真模型.并针对光电稳瞄平台的系统要求和应用特性设计了模糊+经典复合型控制方法.经典方式的零极点配置控制器低频增益高、系统稳态误差小.实际应用表明:光电稳瞄平台的隔离度达到了1%以内,实测的系统稳像精度达到较高的指标要求.二维模糊控制器可减小系统超调、缩短系统响应时间、并适当提高系统响应带宽,采用智能协调器切换经典控制器和模糊控制器,使系统的隔离度小于1%的同时,将超调从50%减少到4%,达到较好的控制效果.

关键词 模糊控制, 复合控制, 光电伺服系统, 超调

引言

光电技术的迅速发展极大地促进了光电平台系统的研发和应用,光电平台系统是一种广泛应用于航空、航天及军事领域的高精度跟踪、定位、测量的侦察和制导系统.光电侦察技术和光电精确制导技术要求跟踪控制系统具有较高的控制精度和快速跟踪的能力.快速的跟踪能力意味着系统对阶跃输入的响应要快,过渡过程要短,系统带宽要宽,较高的控制精度意味着系统稳态误差要小.快速响应会引入系统超调,宽带宽势必引入高频噪声,降低系统稳定裕度,从而影响控制精度,一般来说,传统的伺服控制算法在快速性和控制精度之间会存在一些矛盾.传统控制系统大都采用超前滞后零极点配置控制算法或PID控制算法,为了克服快速性和控制精度的矛盾,本文提出一种将模糊控制和超前滞后控制算法相结合的复合性控制方法,充分利用模糊控制对系统的输入响应快、过渡过程短和对参数不敏感的特性,使系统既有较高的控制精度,又有快跟踪目标的能力,以实现更佳的控制效果.

1 光电稳瞄平台系统描述

光电稳瞄平台主要由光电探测器、伺服机构、电控单元和检测传感器组成,其中光电探测器一般包括红外成像、激光指示、电视成像系统,伺服机构

是多轴多环架伺服系统,光电探测器安装在伺服机构的内环,检测传感器由惯性元件陀螺仪、旋转变压器等组成.光电控制系统一般由电流环、速度环及位置环构成三环调节系统,如图1所示.电流环采用模拟方式实现,中环的速度环是光电稳瞄系统的关键.光电稳瞄设备的位置环的位置命令由光电探测器给出.

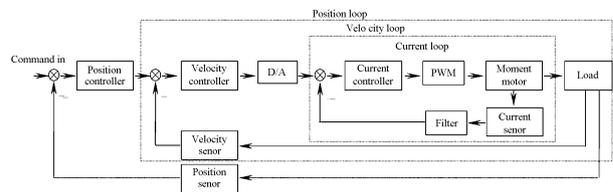


图1 光电稳瞄平台控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of electro-optical platform control system

1.1 电流环

直流电机控制电压_输出电流传递函数为:

$$G_a(s) \approx \frac{J_{Ges}/(K_e * K_T) * s}{(1 + T_M * s)(1 + T_a * s)}$$

其中 J_{Ges} 为负载及电机轴惯量, K_e 为电机反电动势系数, K_T 为电机力矩系数, $T_M = R_a J_{Ges} / K_e K_T$ 为平台系统电机机电时间常数, $T_a = L_a / R_a$ 为平台系统电机电气时间常数, R_a 为电机电阻值, L_a 为电机电感值,选择电流环调节器为: $G_c(s) = k_c * (1 + T_a * s) / s$,则单位负反馈闭环传递函数为:

$$G_B(s) = \frac{G_a(s)}{1 + G_a(s) * H(s)} = \frac{k_B}{1 + T_B * s}$$

2007-06-13 收到第1稿,2007-07-09 收到修改稿.

* "十一五"国防预研基金资助项目(10401020202a)

某光电系统参数为: $R_a = 15\Omega$, $L_a = 9\text{mH}$, $K_e = K_T = 0.93\text{V} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $J_{Ges} = 0.03\text{kg} \cdot \text{m}$, 电流环调节器设计为:

$$G_c(s) = k_c * (1 + T_a * s) / s = 4000 * (1 + 0.0006s) / s$$

采用由运放组成的比例积分 (PI) 电路实现, 电流开环和闭环的频率特性如图 2 所示. 电流闭环 -3db 带宽为 1250Hz.

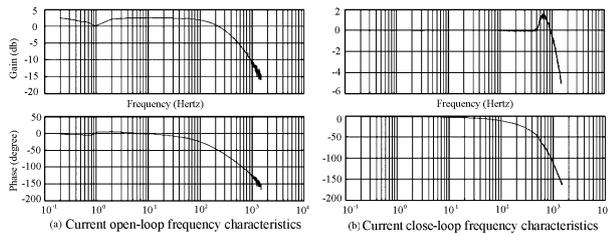


图 2 光电平台系统电流环开、闭环频率特性
Fig. 2 Current-loop frequency characteristics of electro-optical platform system

1.2 速度环

某型光电系统要求伺服控制系统能隔离载体运动和振动, 在惯性空间实现稳像, 在系统指标上体现为隔离度的概念. 采用光纤陀螺敏感载体惯性空间的速度作为速度反馈实现速度闭环的稳像功能. 采用 dSpace 系统对速度开环进行扫频, 得到速度环控制对象的频率特性如图 3(a) 所示.

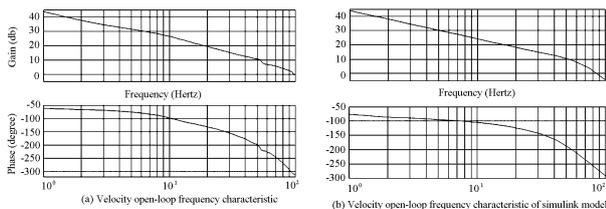


图 3 光电平台系统速度开环频率特性
Fig. 3 Velocity open-loop frequency characteristic of electro-optical platform system

通过对比本系统直流力矩机电流环的模型和实际速度环控制对象频率特性可辨识到本系统机械谐振频率为 70Hz, 谐振点的阻尼为 0.5. 由此可建立光电稳瞄平台 simulink 模型如图 4 所示, 由此 simulink 模型得到的速度环控制对象的频率特性如图 3(b) 所示, 实际特性和模型中的特性基本上一致. 依据此频率特性, 用零极点配置方式设计速度环控制器为:

$$G_c(s) = 35.5 * (0.071s + 1)^2 / s^2$$

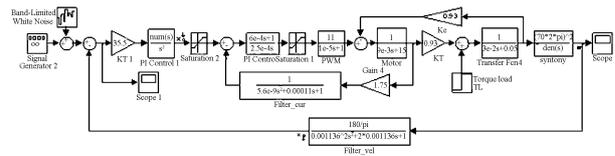


图 4 经典零极点配置速度闭环 simulink 模型
Fig. 4 Classical lead-lag simulink model of velocity close-loop

采用零极点配置设计速度控制器后, 实测陀螺稳像系统隔离度可达到 1% 以内 ($0.135/25.2 = 0.536\%$), 如图 5 所示. 零极点配置控制是基于模型的经典控制方式, 速度控制器含有积分环节, 稳态误差为零, 且能达到较高的隔离度, 但是存在阶跃响应超调较大的缺点. 我们采用模糊控制解决超调问题.

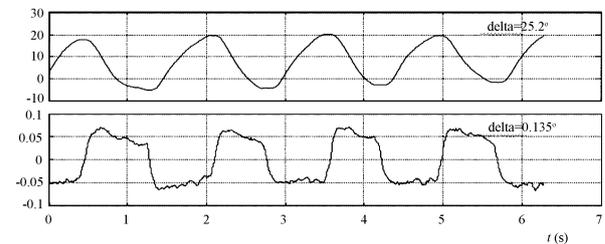


图 5 陀螺速度环稳像精度 (实测值)
Fig. 5 Image stabilization precision of gyro velocity-loop

2 模糊控制器的设计

2.1 模糊 + 经典复合控制器结构

图 6 所示为模糊 + 经典控制器结构图, 基本控制思想为误差大时采用模糊控制器, 误差小时采用经典零极点配置控制器. 其 simulink 模型见图 7.

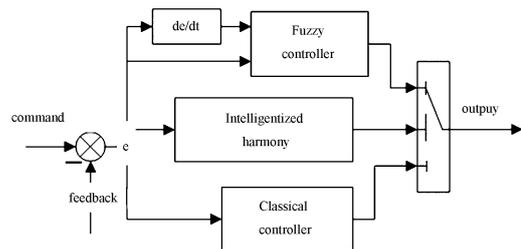


图 6 模糊 + 经典控制器结构图
Fig. 6 Controller frame of fuzzy + classical

二维模糊控制器的输入为速度偏差 e 和偏差变化量 e_c , 输出为电流控制量 u_c . e 的论域为 $[-150\ 150]$, e_c 的论域为 $[-50\ 50]$, u_c 的论域为 $[-6\ 6]$. e 在其论域上取 5 个语言变量: NB, NS, ZERO, PS, PB. e_c 在其论域上取 3 个语言变量: N, ZERO, P. u_c 在其论域上取 5 个语言变量: NB, NS, ZERO, PS, PB. e 、 e_c 和 u_c 对应的隶属度如图 8 所示.

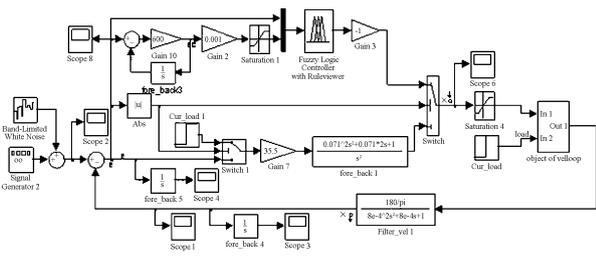


图7 模糊 + 经典控制速度闭环模型

Fig. 7 Velocity close-loop simlink model of fuzzy + classical controller

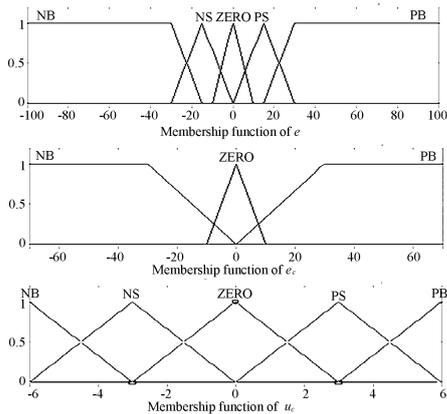


图8 隶属度函数

Fig. 8 Membership function

模糊推理系统采用 Mamdani 类型,即采用如下形式的模糊蕴涵关系:

If e is A and e_c is B , then u_c is C .

模糊控制规则集如下表 1 所示:

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules

| e_c | NB | NS | ZERO | PS | PB |
|-------|----|----|------|----|----|
| N | PB | PB | PS | NS | NB |
| ZERO | PB | PS | ZERO | NS | NB |
| P | PB | PS | NS | NB | NB |

协调器采用如下规则:

$$\begin{cases} abs(e) \leq M, & \text{经典控制器} \\ abs(e) > M, & \text{模糊控制器} \end{cases}$$

M 越小,超调越小,但振荡次数增多.通过反复验证取 $M = 7$.

3 结果与结论

采用经典零极点配置法设计的控制器含有二阶积分环节,其 1rad/sec 点的幅值增益可达到 80db 以上,在实测隔离度达到 0.536% 时,阶跃响

应的如图 9a) 所示,超调达到 50% ,在采用模糊 + 经典控制器之后,阶跃响应如图 9b) 所示:为 4% ,复合控制器在保证同样隔离度精度情况下阶跃响应的控制效果有了非常明显的改善.

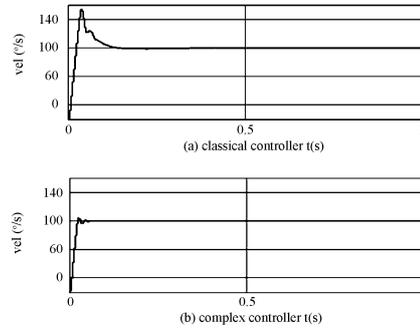


图9 速度闭环阶跃响应图

Fig. 9 Step response of velocity close-loop

在高精度伺服系统中引入模糊 + 经典复合控制方法,既可以保持经典控制方法稳态误差小的优点,又可以抑制高阶经典控制的超调大的缺点,发挥模糊控制的智能优势.在保证速度环较高隔离度的前提下,使系统超调从原来的 50% 下降到 4% .系统性能有明显的改善.

参 考 文 献

- 1 沈明星,杨农林. 并联混合动力汽车模糊逻辑控制策略的建模和仿真. 动力学与控制学报,2006,4(4):353 ~ 358 (Shen Mingxing, Yang Nonglin. Modeling and simulation of fuzzy logic control strategy on parallel hybrid electrical vehicle. *Journal of Dynamics and Control*, 2006, 4(4): 353 ~ 358 (in Chinese))
- 2 韩晓泉. 模糊控制在光电跟踪伺服系统中的应用研究. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文,2005 (Xiaoquan Han. Application of fuzzy control in an opto-electronic tracking servo system. Changchun: Doctor thesis of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, 2005 (in Chinese))
- 3 Krzysztof Zawirski, Konrad Urbanski. Application of fuzzy control technique to thyristor DC drive. ISIE' 97-Guimaraes, Portugal. 1173 ~ 1178

- 4 侯宏录,周德云,王伟,国蓉. 模糊PID控制在光电跟踪控制系统中的应用. 光电工程,2006,33(5):12~16(Honglu Hou, Deyun Zhou, Wei Wang, Rong Guo. Application of fuzzy-PID control in system of photo-electric tracking. *Opto-Electronic Engineering*,2006,33(5):12~16(in Chinese))
- 5 司洪伟,李东旭. 桁架结构振动的主动模糊控制中主动杆数目与位置优化. 动力学与控制学报,2006,4(3):259~266(Si Hongwei, Li Dongxu. Optimal design of number and locations of actuators when adopting the adaptive fuzzy control in active control. *Journal of Dynamics and Control*,2006,4(3):259~266(in Chinese))
- 6 庞新良,范大鹏,滕旭东,彭建新. 数字式机载光电伺服系统的实现. 光电工程,2007,34(3):10~15(Xinliang Pang, Dapeng Fan, Xudong Teng, Jianxin Peng. Realization of digital airborne electro-optical servo~system. *Opto-Electronic Engineering*,2007,34(3):10~15(in Chinese))
- 7 王健,曹秉刚,王昆,唱东颖. 基于模糊PID控制的导引头角跟踪系统. 系统仿真学报,2004,16(6):1330~1332(Wang Jian, Binggang Cao, Kun Wang, Dongying Chang. A seeker-angle-tracking system on fuzzy PID. *Journal of System Simulation*,2004,16(6):1330~1332(in Chinese))
- 8 韩晓泉,王建立,赵金宇,陈涛. 模糊控制算法在光电跟踪伺服系统中的应用. 光电工程,2004,31:19~21(Xiaoquan HAN, Jianli WANG, Jinyu ZHAO, Tao CHEN. Application on fuzzy control algorithm in an opto~electronic tracking servo system. *Opto~Electronic Engineering*,2004,31:19~21(in Chinese))
- 9 张国良,曾静,柯熙政,邓方林. 模糊控制及其MATLAB应用. 西安:西安交通大学出版社,2002(11)(Guoliang ZHANG, Jing ZENG, Xizhen KE, Fanglin DENG. Fuzzy Control and MATLAB Application. Xi'an: Xi'an Jiaotong University publishing house, 2002(11)(in Chinese))
- 10 沈明星,杨农林. 并联混合动力汽车模糊逻辑控制策略的建模和仿真. 动力学与控制学报,2006,4(4):353~358(Shen Mingxing, Yang Nonglin. Modeling and simulation of fuzzy logic control strategy on parallel hybrid electrical vehicle. *Journal of Dynamics and Control*,2006,4(4):353~358(in Chinese))
- 11 程佩青. 数字信号处理. 北京:清华大学出版社,2000(Peiqing Cheng. Digital signal processing. Beijing: Tsinghua publishing house, 2000(in Chinese))

APPLICATION OF FUZZY + CLASSICAL COMPLEX CONTROLLER ON ELECTRO-OPTICAL AIM PLATFORM SYSTEM*

Pang Xinliang¹ Fan Dapeng¹ Li Chengang² Tan Hongjun²

(1. Department of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(2. Hengyang North Electro-Optical Ltd, Hengyang 421000, China)

Abstract Based on the theoretical model of the electro-optical aim platform system, the actual frequency characteristic of the system was identified, and the simulink model of the system, which anastomose with the theoretical model and the actual frequency characteristic, was obtained. According to the demand and application characteristics of the electro-optical aim platform system, the fuzzy + classical complex controller was designed. Classical zero-pole assignment controller has the characteristic of high low-frequency gain and small steady error. Actual application implies that the isolation of the electro-optical aim platform system has reached 1%. The actual precision has arrived at the target demand. Planar fuzzy controller can decrease the overshoot, shorten the rise time, and increase the bandwidth. Using intelligent coordinator to switch classical controller and fuzzy controller, the isolation is <1%, and the overshoot decreases from 50% to 4%.

Key words fuzzy controller, complex controller, electro-optical servo-system, overshoot

Received 13 June 2007, revised 9 July 2007.

* The project supported by the "Eleventh Five" national defence foundation of China (10401020202a)