

文章编号: 1000-6893(2000) 05-0462-03

# 速率偏频激光陀螺偏频速率模糊 PID 自适应控制的设计与实现

王锦瑜, 冯培德, 陈 璞, 雷宝权

(飞行自动控制研究所 第 2 研究部, 陕西 西安 710065)

## DESIGN AND ACCOMPLISHMENT OF FUZZY-PID ADAPTIVE RATE CONTROL FOR RATE-BIAS LASER GYRO

WANG Jin-yu, FENG Pei-de, CHEN Pu, LEI Bao-quan

(No. 2 Dept., Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**摘要:** 应用模糊 PID 自适应技术设计并实现了激光陀螺偏频速率的控制系统, 结果表明: 偏频台速率平稳性优于  $3.12 \times 10^{-4}$ ; 角速率正反换向速度快, 在  $\pm 60^\circ/\text{s}$  之间的转换时间约为 14ms, 而且换向过程速率超调很小。该控制系统在实际系统中得到了良好的应用。

**关键词:** 模糊控制; 自适应控制; 激光陀螺; 速率偏频

中图分类号: V241.5 文献标识码: A

**Abstract:** In order to reduce the measuring error caused by the rate-bias mechanism, a rate-bias laser gyro will not only require the rotate-back time of laser gyro platform as short as possible, but also call for the angle rate of rate-bias platform very steady (about  $10^{-4}$  stability). This paper applies fuzzy-PID adaptive control technology to design and accomplish the rate control system. The results show that the angle rate stability of rate-bias platform is superior to  $3.12 \times 10^{-4}$ ; the rotate-back of platform is very fast (the whole time from  $-60^\circ/\text{s}$  to  $60^\circ/\text{s}$  is about 14ms), and the rate overshoot in this course is very small. This control system is applied successfully in a practical system.

**Key words:** fuzzy control; adaptive control; laser gyro; rate bias

由于激光陀螺中激光反射镜的背向散射相互耦合, 使激光陀螺在输入转速较小时无输出(频率), 产生随机游走误差, 形成了特有的‘闭锁效应’等问题。要使激光陀螺能够敏感小转速就需采用偏频技术, 使陀螺工作点远离锁区范围, 如用恒速偏频、Zeemen 偏频、磁镜偏频、抖动偏频、速率偏频等方法。而引入的偏频装置也会影响激光陀螺的测试精度, 因此并非有了偏频就一定能提高陀螺精度, 还需对所用偏频装置提出相应的要求。恒速偏频激光陀螺由于对偏频装置的性能要求太高 ( $10^{-8} \sim 10^{-7}$  稳定度的恒速), 工程难以实现; 而用 Zeemen 偏频、磁镜偏频的激光陀螺均因一些技术缺陷而难以达到高精度要求; 抖动偏频用陀螺腔体不断抖动的方法使陀螺周期性地快速穿越锁区以减小过锁产生的随机游走误差, 抖动偏频激光陀螺精度已达到了惯导级精度的水平, 但是由于高频抖动(几百到上千赫兹)陀螺频繁地过锁, 在锁区一定的条件下其精度难以进一步提高<sup>[1]</sup>, 于是人们利用 Maytag 盘原理使激光陀螺

在偏频台上正转几周后快速回转, 再反转几周, 周而复始, 即形成了速率偏频激光陀螺, 这种偏频方式使激光陀螺快速过锁后, 旋转几周(如 2 周)后才返转陀螺再次过锁, 因此过锁的次数比抖动偏频过锁次数大大的减少, 由锁区产生的随机游走误差减小, 提高了激光陀螺的精度<sup>[2, 3]</sup>。为了减小速率偏频装置对激光陀螺测试精度的影响, 对速率偏频装置也提出了一些要求, 如要求转速在正(反)方向转 2 周后快速回转, 而且偏频台运转过程中转速应非常平稳 ( $10^{-4}$  的平稳度)。即要求偏频台转速的变化尽可能成为一种方波形式。

### 1 控制任务要求及系统设计总思路

速率偏频激光陀螺要求换向时间尽可能地短(达到系统极限), 即要求控制系统的阶跃响应很快; 同时还要求转速非常平稳。对于经典的线性控制来说, 阶跃响应快易使系统出现大超调振荡甚至不稳定, 快速响应和快速平稳运转难以兼顾。而非线性控制中模糊控制技术对于解决快速响应的同时减小超调和振荡等问题卓有成效<sup>[4]</sup>。因此为兼顾这几方面的要求, 采用了模糊 PID 自适应控

制技术来实现控制系统的任务要求: 以 PID 控制作为基本控制模式, 而用模糊控制作为参数调节的自适应控制器。控制系统逻辑框图如图 1。

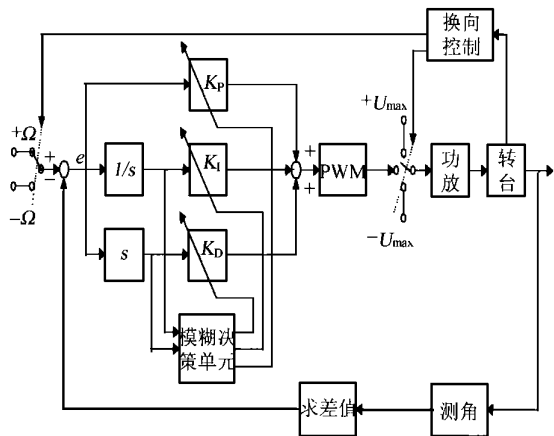


图 1 控制系统框图

## 2 线性控制律(PID)的设计

因为对转速的平稳性要求比较高, 而模糊控制对于高精度控制任务实现起来比较复杂, 因此采用 PID 控制和模糊控制相结合的方式。

总的控制量( $U_c$ )为

$$U_c = (K_{P0} + K_P)e + (K_{D0} + K_D)\dot{e} + K_I \int e dt$$

式中:  $K_{P0}$ ,  $K_{D0}$  为基本的 PID 参数(取  $K_{I0} = 0$ );  $K_P, K_D, K_I$  为模糊控制自适应参数调节变化量。

若当次采样( $k$  时刻)的转速为  $\Omega(k)$ , 若设定值为  $\Omega_d$ , 则  $e, \dot{e}, \int e dt$  的定义为

$$e = e(k) = \Omega_d - \Omega(k)$$

$$\dot{e} = e(k) - e(k-1)$$

$$\int e dt = e(k) + e(k-1)$$

## 3 模糊控制律的设计<sup>[4]</sup>

(1) 对(比例因子)  $K_P$  的调节 对  $K_P$  的调节是将  $K_P$  看作  $e$  和  $\dot{e}$  的二元函数关系, 通过模糊推理, 用模糊控制表格的形式给出。

由于要求系统的响应速度快, 刚度大, 所以应将比例因子  $K_P$  的值取得较大, 但比例因子的值大又会造成控制系统的不稳定, 因此, 为了兼顾使二者均满足, 对  $K_P$  的调节方法为: 当  $e\dot{e} > 0$  时,  $K_P$  为非负值, 而且  $|e|$  越大,  $K_P$  值越大(线性的或非线性的关系); 当  $e\dot{e} < 0$  时,  $K_P$  为零。

实际确定的  $K_P$  与  $(e, \dot{e})$  模糊关系如图 2。

(2) 对积分因子  $K_I$  的调节 积分因子有利于减小稳态误差, 提高控制系统的刚度, 但也容易引起振荡, 因此实际中对积分因子的调节方法为:

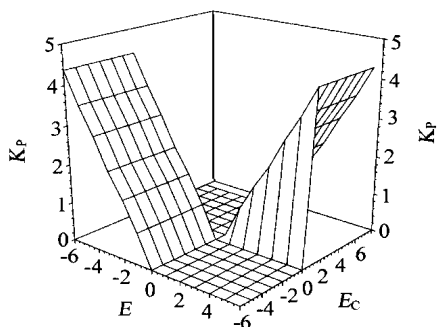


图 2  $K_P$  模糊关系图

设置一个阈值  $E_1$ , 当  $|e| > E_1$  时,  $K_I$  为一确定的值, 否则  $K_I = 0$ 。这个阈值接近线性 PID 控制时的稳态误差范围, 即在过渡过程中积分项不起作用, 这样不会因为积分因子的“储能”作用而产生超调或振荡, 而当转速进入设定的精度范围, 立即加上积分项以进一步提高精度, 加强刚度。

(3) 对微分因子  $K_D$  的调节 对微分因子的调节是将  $K_D$  看作  $e$  和  $\dot{e}$  的二元函数关系, 通过模糊推理, 用模糊控制表格的形式给出。其调节的方法为:

① 当  $e\dot{e} > 0$  时,  $|e|$  越大,  $|\dot{e}|$  越大,  $K_D$  值越大; 当  $e\dot{e} < 0$  时,  $|e|$  越小,  $|\dot{e}|$  越大,  $K_D$  值越大;

② 电机和转台的时间常数大约为 10~20ms, 而采样时间  $T = 5ms$ , 即系统的延时约为  $3T$ 。所以考虑存在响应时延因素, 应提前阻尼, 尤其在  $e$  变符号时刻,  $K_D$  应提前加大。

综合考虑几因素的影响, 最终确定的  $K_D$  与  $(e, \dot{e})$  之间的模糊关系如图 3 所示。

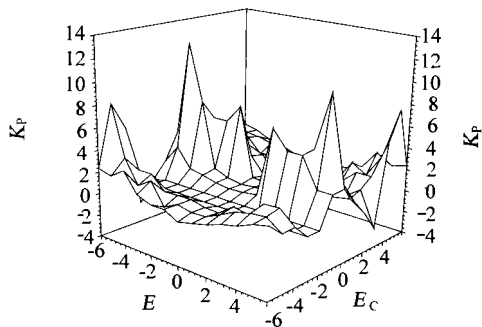


图 3  $K_D$  模糊关系图

根据以上设计, 用 8098 单片机为核心实现了速率控制系统, 并应用在实际系统中。

## 4 偏频速率的测试结果

在完成了控制系统的软硬件及参数调试后, 测试了控制速率几方面的性能, 结果如下:

(1) 图 4 所示为速率换向时测试的一条转速

变化曲线。图中横坐标为时间,一个数代表 5ms;纵坐标为转速,是 5ms 采样的角位置变化量(即角速率),一个数代表 1.236 / 5ms(即 0.0687 p/s)。转速为 63 p/s,可知转速在 ± 63 p/s 之间的转换很快,时间约为 14ms。

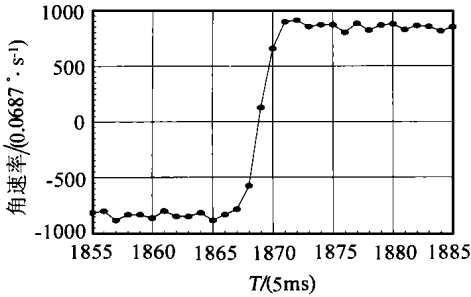


图4 速率换向过渡过程

(2) 速率换向后很快进入到 63 p/s 的平稳运转状态,过渡过程无振荡,仅在一个小超调后就回到平稳运行状态,如图 4 所示。

(3) 系统具有较大的刚度。当强行使正常运转状态停止时,电机功率已加到最大值,约为 0.49 N · m 的力矩(去掉外力后转台能够继续稳定地运转)。

(4) 转速平稳性的测定 图 5 是连续采样测得的一条角增量(即角转速)变化曲线:用 5ms 定时间间隔采样转台的角度增量(用  $\sigma_1 = 26$  的绝对式光电编码器测,未作平滑),得到固定时间角增量的变化,这样可计算出角增量的方差。而角增量误差值(可用  $\sigma_3$  标准差表征)是转台转速波动(用  $\sigma_2$  标准差来表征)和编码器的测量误差(用  $\sigma_1$  来表征)形成的,可表示为

$$\sigma_3^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2r\sigma_1\sigma_2$$

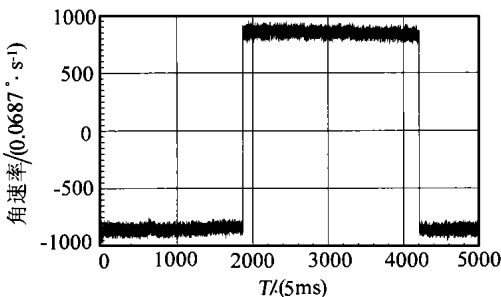


图5 转速平稳性测试结果

其中:  $r$  为相关系数,  $|r| \leq 1$ 。可取两个极值  $r = \pm 1$ , 以求取  $\sigma_2$  的取值范围和量级。当  $r = \pm 1$  时,  $\sigma_3^2 = (\sigma_1 \pm \sigma_2)^2$ 。由于  $\sigma_1 \neq 0$  则

$$\sigma_3 - \sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 + \sigma_1$$

因采样时间固定且已知,计算角增量方差暂不考虑时间( $\sigma$ 均用角秒量纲),则由测量结果计

算得  $\sigma_3 = 32.2$ , 可知  $\sigma_2$  的范围为:  $6.2 < \sigma_2 < 58.2$ 。

将  $\sigma_2$  的量纲转换为度,并除以 63 即得平滑时间为 1s 时的转速平稳性为:  $3.33 \times 10^{-5} \sim 3.12 \times 10^{-4}$ 。即平滑时间为 1s 时转速的平稳性优于  $3.12 \times 10^{-4}$ 。

### 参 考 文 献

[1] Kohl K W. The new high accuracy ship's inertial navigation system PL41 MK4[A]. In: Song H ed. Symposium Gyro Technology 1990[C]. Universitat Stuttgart Institute A fur Mechanik: Stuttgart Germany: Deutsche Gesellschaft fur Ortung und Navigation(DGON), 1990. 14.0~14.24.

[2] Matthews A, Wetter H. Cost-effective high-accuracy inertial navigation[J]. Navigation, 1989, 36(2): 157~172.

[3] Mangold U. Theory and performance prediction for continuous vector gravimetry based on a DGPS augmented rate bias inertial navigation system and a star tracker[J]. Navigation, 1997, 44(3): 329~345.

[4] 李友善, 李军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 117~151.

作者简介:



王锦瑜 男, 31岁, 中国航空第一集团公司西安飞行自动控制研究所第2研究部工程师, 从事惯性导航及相关技术的研究, 现攻读西北工业大学自控系博士学位, 主要研究方向: 激光捷联惯导系统。



冯培德 男, 58岁, 中国航空第一集团公司西安飞行自动控制研究所所长, 研究员, 博士生导师, 《中国惯性技术学报》副主编, 长期从事惯性技术及其相关技术的研究, 多年来研究和主持了多项国家重点科研项目, 被授予为国家“有突出贡献专家”。



陈璞 男, 29岁, 中国航空第一集团公司西安飞行自动控制研究所第2研究部工程师, 从事惯性导航及相关技术的研究, 现攻读西北工业大学自控系博士学位, 主要研究方向: 激光捷联惯导系统。



雷宝权 男, 38岁, 中国航空第一集团公司西安飞行自动控制研究所第2研究部系统室主任, 硕士, 高级工程师, 多年从事惯性导航、制导技术的研究。