

一种复合控制器在陀螺稳定平台中的应用

魏贵玲¹,王斌¹,邓劲松¹,张勋²,楚波³

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;2. 南京大桥机器有限公司,江苏 南京 211101;

3. 荆州南湖机械股份有限公司,湖北 荆州 434000)

摘要:简述了双轴陀螺稳定平台的基本原理和比例、积分、微分(PID)控制方法。针对传统 PID 控制器在双轴陀螺稳定平台的应用,提出一种模糊决策复合控制方法。该方法在传统的 PID 控制中加入模糊决策控制,使得 PID 控制器的调节参数具有模糊自适应性。利用综合数字滤波与估计环节的结果构成前馈控制支路,克服了闭环控制回路中的高增益与稳定性间的矛盾,并在双轴陀螺稳定平台中应用,取得了较好的效果。

关键词:模糊;控制;陀螺;稳定平台

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Compound Control Method is Applied in the Gyro Stabilized Platform

WEI Guiling¹, WANG Bing¹, DENG Jingsong¹, ZHANG Xun², CU Bo³

(1. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Nanjing Daqiao Machine CO., Ltd, Nanjing 211101, China; 3. Jingzhou nanhu Machinery CO., Ltd, Jingzhou 434000, China)

Abstract: This paper briefly describes the basic principle of two-axis gyro stabilized platform and PID control method. In view of the application of two-axis gyro stabilization platform to the traditional PID controller, a fuzzy decision compound control method is proposed in this paper. By adding the fuzzy decision control into the conventional PID control method, the proposed method enables the adjusting parameters of PID to be fuzzy adaptive. The integrated digital filtering and the estimation results are used to constitute the feedforward control branch, thus the contradiction between the high gain and stability of the closed control loop has been overcome. The method has been applied to the two-axis gyro stabilized platform and good results have been obtained.

Key words: fuzzy; control; gyro; stable platform

0 引言

陀螺稳定平台能够确保红外、激光和 CCD 等探测器在行进间更好地完成对目标的搜索、监控、截获和精确跟踪,保证海上或空中的武器、侦察装备具有高度的机动性和灵活性。陀螺稳定平台技术的不断发展更新,已成为侦察、测量、校射及打击效果评估的重要手段。本文在研制一种双轴陀螺稳定平台的过程中,提出设计一种基于稳定平台的模糊决策复合控制器,该复合控制器在稳定平台中的应用取得了较好的效果。

1 双轴陀螺稳定原理

双轴陀螺稳定平台由俯仰和横滚两个机械轴系组成。工作时,稳定平台的控制 CPU 自动采集被控对象水平方向的摇摆角速率和角位置,经解算后

对该对象的水平方向进行实时稳定补偿,使得平台在俯仰和横滚轴两个方向的补偿运动恰好与摇摆运动大小相等、方向相反,从而保证稳定后的基准面在大地坐标系中的水平姿态始终保持不变。图 1 为陀螺稳定平台组成图。平台稳定时,自稳定控制器采集惯性传感器(陀螺和加速度计)信息,测量出载体的水平姿态晃动量,然后控制电机和传动机构朝晃动量相反的方向转动,从而实现隔离载体晃动。

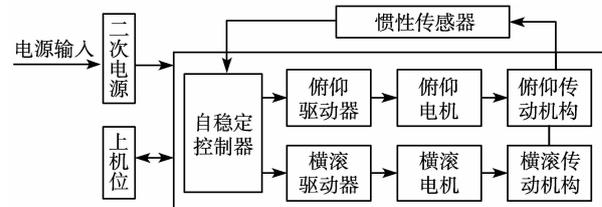


图 1 陀螺稳定平台组成框图

收稿日期:2015-11-30

基金项目:预研项目

作者简介:魏贵玲(1971-),女,重庆人,研究员,主要从事惯性和控制技术的研究。

陀螺稳定平台中常用的闭环控制回路有比例、积分、微分(PID)控制器。在调节稳定平台的过程中,如果采用传统的PID控制器,系统能否在最佳状态下工作,主要取决于控制器各参数的设置是否合适。研究发现,陀螺稳定平台由于受到传动误差、机械轴系误差、安装误差及机械轴系摩擦力矩等因素的影响,导致平台在稳定点附近来回振荡;运动换向时滞后,稳定误差增大。当动态干扰大或频响高时,系统振幅增大,呈发散趋势。因此,要达到较高的稳定精度,就不能忽略传统PID控制器中被控对

象的非线性、时变性、无确切的模型等性质,这些性质引起传统PID控制方法的过程参数调节难、控制效果差等现象。为了抑制动态摆动不规则性的影响,在闭环控制回路上需要对系统进行必要、有效的数字补偿。在原线性PID控制算法的基础上加入非线性校正,通过对PID内部引入积分分离法,在PID输出端引入死区特性和饱和特性等^[1],消除原调节系统的积分饱和现象,实现PID非线性校正。图2为PID非线性校正技术图。

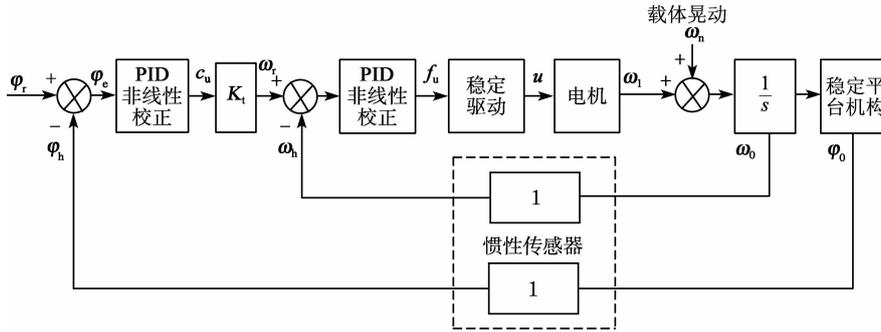


图2 PID非线性校正技术图

由图2可看出,稳定平台控制回路采用以电流、角速度反馈为内回路,角位置反馈为外回路的闭环控制方式。为了提高系统的稳定性,使被控对象在惯性空间绕水平轴系稳定,通过电流环、速度环和位置环的PID调节,解决转动平稳和动态干扰问题。研究^[1]结果表明,采用优化的PID非线性校正技术可以提高系统频响和稳定精度,得到较好的动态品质、足够的稳定裕度和抗干扰能力。

2 模糊决策复合控制器的设计

随着陀螺稳定技术的不断发展,对陀螺稳定控制回路中PID控制器的研究也提出了越来越高的要求。控制界提出了自适应PID控制、广义预测PID、神经网络PID、模糊PID等改进的PID控制器

方法,通过PID控制器方法的改进优化了控制系统,得到较好的系统性能。在惯性回路中模糊PID可根据系统的实际响应,利用设定的模糊规则实现对PID参数的最佳调节^[2]。在吊舱陀螺稳定系统中,应用模糊PID控制,改善了控制系统的过渡过程,减小了超调量,提高了跟踪精度和响应速度,增强了系统的鲁棒性^[3]。在光电跟踪系统中,通过建立数学模型、引入模型参数摄动和增加外界干扰的模糊PID控制方法得到了系统更稳定的结论^[4]。由此可得,模糊控制与PID控制器相结合的方法可以实现高级的PID控制算法,改善系统性能。

本文设计了一种基于陀螺稳定平台的模糊决策复合控制器(见图3),控制器的输入端接收闭环控

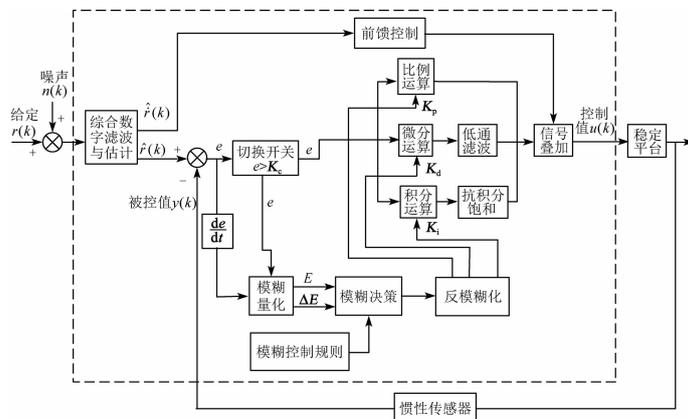


图3 模糊决策复合控制器框图

制系统外部输入的带随机噪声的给定随动信号,进入综合数字滤波环节与估计环节。综合数字滤波与估计单元由惯性数字滤波单元和离散卡尔曼滤波与估计单元构成,惯性数字滤波单元用于滤除外部输入给本复合控制系统的给定随动信号中的高频噪声。随动信号滤除高频噪声后输入到离散卡尔曼滤波与估计单元中,由离散卡尔曼滤波与估计单元滤除给定随动信号中每个时刻的随机噪声,得到给定随动信号代表的对应时刻的位置估计值 $\hat{r}(k)$ 和速度估计值 $\hat{v}(k)$ 。

由陀螺稳定平台采集惯性传感器的信号,得到作为反馈信息的实际值 $y(k)$,再利用离散卡尔曼滤波与估计单元输出的 $\hat{r}(k)$,计算得到陀螺稳定平台的误差 e 。模糊量化单元将位置误差 e 及位置误差变化率 \dot{e} 进行模糊量化运算,以得到对应的模糊值 E 和 ΔE ; E 和 ΔE 输入给模糊决策单元,由模糊决策单元分别根据与 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 对应的模糊规则进行模糊推理,得到与其对应的模糊调节输出量;然后将 $\dot{r}(k)$ 进行前馈校正得到前馈控制信号,并输入到信号叠加单元;信号叠加单元将 PID 控制器输出的控制信号和前馈控制单元输出的控制信号叠加,得到最终的控制值 $u(k)$ 并输出到稳定平台的输入端。

综合数字滤波与估计环节由惯性数字滤波和离散卡尔曼滤波与估计两部分构成,惯性滤波离散化后得到的数字表达式为

$$y(k) = \frac{1}{\tau+1}x(k) + \frac{\tau}{\tau+1}y(k-1) = ax(k) + (1-a)y(k-1) \quad (1)$$

式中 $a = \frac{1}{\tau+1}$ 。选取适当的 a 值,可将输入信号中含有的高于工作频率带宽的高频噪声进行滤除。

为了滤除输入信号中的随机干扰信号和粗大误差,我们将经过惯性滤波后的输入信号引入到离散卡尔曼滤波与估计环节。假定系统的状态方程和量测方程分别为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (2)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (3)$$

式中: $\Phi_{k,k-1}$ 为 $t_{k-1} \sim t_k$ 时刻的一步转移阵; Γ_{k-1} 为系统噪声驱动阵; H_k 为量测阵; V_k 为量测噪声序列; W_k 为系统激励噪声序列。量测噪声与系统激励

噪声均为白噪声,且两者不相关。系统的离散卡尔曼滤波算式为

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (4)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (5)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (6)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (7)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \quad (8)$$

式中: Q_{k-1} 为系统噪声序列的方差阵; R_k 为量测噪声序列的方差阵; K_k 为卡尔曼滤波增益阵。由式(4)~(8)可知,根据 k 时刻的 Z_k ,可递推计算得 k 时刻的状态估计 \hat{X}_k 。将系统的位置、速度、加速度状态向量取为 $\mathbf{X} = [r(t), \dot{r}(t), \ddot{r}(t)]$,通过离散卡尔曼滤波可以滤除每个时刻的位置测量随机噪声,估计得到对应时刻的速度和加速度值。综合数字滤波与估计环节的输出量为 $\hat{r}(t)$, $\hat{v}(t)$ 。 $\hat{r}(t)$ 作为稳定闭环控制回路的直接输入,与稳定平台的测量反馈值 $y(t)$ 进行相减求取 e ,其数学表达式为

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (9)$$

将所得误差 e 与事先设定的误差阈值 K_e 进行比较,当 $e \geq K_e$ 时,则直接进行固定调节系数的 PID 控制, PID 控制算式离散数字表示为

$$u_1(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{n=1}^k e(n) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (10)$$

式中: K_p 为比例调节系数; K_i 为积分调节系数; K_d 为微分调节系数; $K_p e(k)$ 为比例调节; $K_i \sum_{n=1}^k e(n)$ 为积分调节; $K_d [e(k) - e(k-1)]$ 为微分调节。

积分调节得到的控制信号被送入抗积分饱和环节进行调节。具体做法是一旦控制量进入饱和区,将只执行削弱积分项的运算而停止增大积分项的运算。在计算 $u(k)$ 时,将判断上一周期的控制量 $u(k-1)$ 是否因超过限制范围而取边界值。当取上界时,积分控制仅将检测到的负值偏差累计到积分项中,当取下界时,积分控制仅将检测到的正值偏差累计到积分项中。

微分调节的输出信号被送入低通滤波环节进行调节,对微分环节进行高频滤波。低通滤波采用二阶滤波形式,对二阶滤波器进行离散化后得到的传递函数为

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\omega_c^2 T_s^2}{(1 + \sqrt{2}\omega_c T_s + \omega_c^2 T_s^2) - (2 + \sqrt{2}\omega_c T_s)Z^{-1} + Z^{-2}} \quad (11)$$

式中 T_s 为采样周期。该滤波器中的 ω_c 根据微分环节信号的高频滤波需要, 设置成低频滤波器。

当 $e < K_c$ 时, 则求取 e 的误差变化量 \dot{e} 。将 e 和 \dot{e} 进行模糊化量化运算, 得到对应的模糊值 E 和 ΔE , 然后利用事先建立的模糊控制规则库进行模糊决策, 将模糊决策后的结果进行反模糊化, 得到当前的 PID 控制的调节参数 K_p, K_i, K_d , 然后再进行 PID 控制运算。

参数 K_p, K_i, K_d 的调节形式为

$$K_p = K_p^0 + \Delta K_p \quad (12)$$

$$K_i = K_i^0 + \Delta K_i \quad (13)$$

$$K_d = K_d^0 + \Delta K_d \quad (14)$$

将 3 个参数的调节量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d, e$ 及 \dot{e} 分别在其论域上划分为 7 个连续的模糊集合, 分别是 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(0)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。根据实际参数调试经验, 制定 3 个调节参数的 IF-THEN 模糊规则。控制器按照模糊规则, 确定模糊集合所对应的每个时刻的参数调整量, 实时地调整 3 个控制参数, 使得控制器具有自适应调节功能。

在此基础上, 我们利用惯性传感器测量被控量的值作为控制器的反馈输入, 并将输出的控制量作用于被控对象的方式, 将模糊决策的复合控制器加载到陀螺稳定平台的自稳定控制器中, 再利用系统辨识的方法对稳定平台的俯仰横滚轴进行被控对象模型的优化, 得到被控对象的传递函数, 并在此基础上, 进行控制参数的调节及仿真。经模型辨识, 俯仰轴执行机构的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.8742}{9.604e^{-5}s^2 + 0.00537s + 1} \quad (15)$$

图 4 为俯仰阶跃响应仿真曲线。

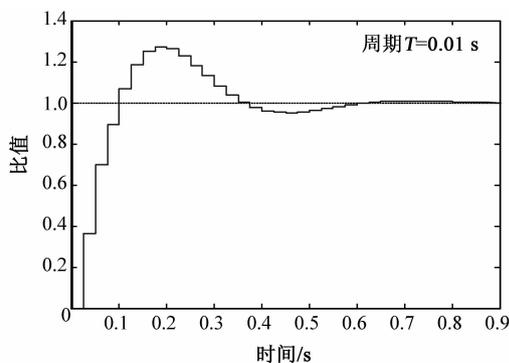


图 4 俯仰阶跃响应曲线

经模型辨识, 横滚执行机构的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.002092s + 0.9006}{0.0002283s^2 + 0.003036s + 1} \quad (16)$$

图 5 为俯仰阶跃响应仿真曲线。

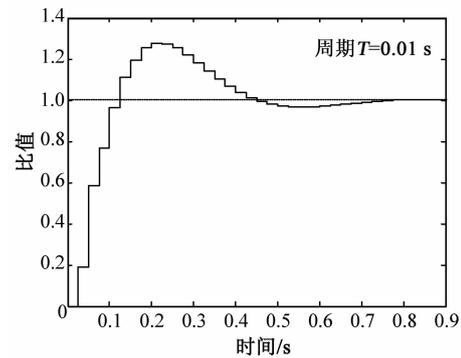


图 5 横滚阶跃响应曲线

3 试验结果

为了验证调试结果, 我们将稳定平台安装在摇摆台上, 摇摆台以频率 2 Hz、和幅度 $\pm 2.5^\circ$ 进行正弦运动, 监控计算机实时记录下稳定平台的响应曲线, 如图 6 所示。由图可看出, 采用模糊决策复合控制器后, 在稳定精度满足要求的情况下, 稳定平台的响应曲线与摇摆激励曲线周期和相位一致, 响应曲线振幅与激励曲线振幅的比值不小于 0.707, 达到了很好的效果。

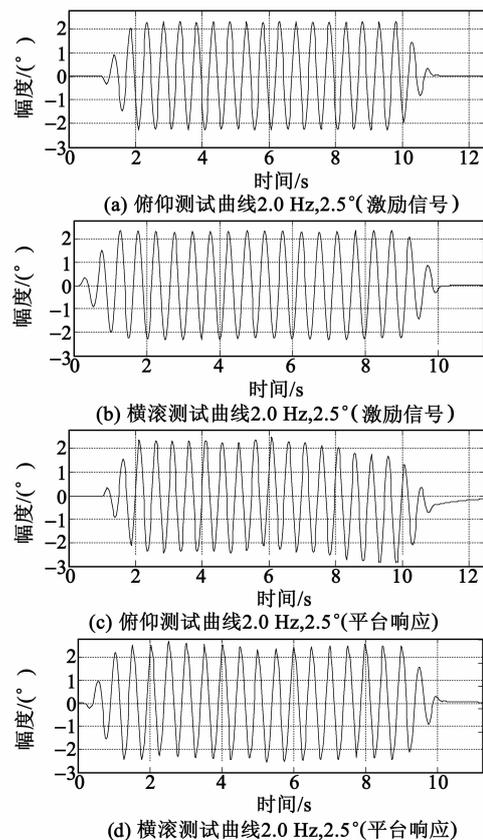


图 6 俯仰和横滚激励响应曲线

4 结束语

本文设计的模糊决策复合控制器应用于双轴陀螺稳定平台中,有效减小了稳定平台非线性、时变性和模型不确定性对系统稳定精度的影响,抑制了系统输入端的随机噪声,解决了闭环稳定性和高精度之间的矛盾,满足了此类双轴陀螺稳定平台高精度的需要。

参考文献:

[1] 魏贵玲,李勇建,邓劲松,等.小型惯性控制平台的设计

[J].压电与声光,2009,31(1):21-23.

WEI Guiling, LI Yongjian, DENG Jingsong, et al. Design of miniaturized inertial control platform[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009,31(1):21-23.

[2] 刘义,郭建都,金倩.模糊PID控制的惯性稳定回路[J].火力与指挥控制,2012,37(2):105-106.

[3] 谈振藩,郭立东.航空光电吊舱陀螺稳定系统模糊PID控制[J].应用科技,2008,35(6):18-20.

[4] 徐晓霞.模糊PID控制光电跟踪系统的抗干扰性分析[J].电子设计工程,2011,19(22):174-177.

(上接第414页)

[2] WOJTOWICZ A J, DROZDOWSKI W, WISNIEWSKI D, et al. Scintillation properties of selected oxide monocrystals activated with Ce and Pr[J]. Optical Materials, 2006, 28:85-93.

[3] VALAIS I, DAVID S, MICHAIL C, et al. Comparative study of luminescence properties of LuYAP:Ce and LYSO:Ce single-crystal scintillators for use in medical imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 580: 614-616.

[4] CHEWPRADITKUL W, WANARAK C, SZCZESNIAK T, et al. Comparative studies of Lu_{1.95}Y_{0.05}SiO₅:Ce and Lu_{0.7}Y_{0.3}AlO₃:Ce single crystal scintillators for gamma-ray detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2014, 326:103-105.

[5] KORZHIK M, FEDOROV A, ANNENKOV A, et al. Development of scintillation materials for PET scanners[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 571:122-125.

[6] PIÑERA I, CRUZ C M, ABREU Y, et al. Gamma

induced atom displacements in LYSO and LuYAP crystals as used in medical imaging applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2015, 356/357:46-52.

[7] WU Ping, PELTON A D. Coupled thermodynamic-phase diagram assessment of the rare earth oxide-aluminum oxide binary systems[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1992, 179(1/2):259-287.

[8] 赵广军,徐军.高光输出快衰减高温无机闪烁晶体的研究与进展[J].人工晶体学报,2002,31(3):291-297.

ZHAO Guangjun, XU Jun. Developments of high temperature inorganic scintillation single crystals with high light output and fast decay time constant[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(3):291-297.

[9] DROZDOWSKI W, WOJTOWICZ A J, LUKASIEWICZ T, et al. Scintillation properties of LuAP and LuYAP crystals activated with cerium and molybdenum[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 562:254-261.