

文章编号 1004-924X(2009)11-2744-06

## 稳定平台的自适应逆控制

李 英<sup>1,2,3</sup>, 葛文奇<sup>1</sup>, 王绍彬<sup>3</sup>, 徐正平<sup>1,2</sup>, 张淑梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为提高稳定平台的性能指标, 满足其高精度、快响应的要求, 实现对目标的实时跟踪, 对稳定平台的控制方法进行了研究。首先, 根据自适应逆控制的基本原理设计出稳定平台自适应逆控制系统的结构。然后, 采用模型参考自适应逆作为控制器来完成稳定平台转轴的控制并尝试利用其开环特性来改进稳定平台的控制性能。稳定平台模型辨识和控制器的设计算法都采用最小二乘法(LSM), 最后分别采用传统的PID控制和自适应逆控制分析比较其输出效果。仿真结果显示, 采用自适应逆控制时的定位精度可达 $29''$ , 表明采用自适应逆控制的稳定平台具有响应快、无超调、抗干扰能力强以及稳态误差小等优点, 其动、静态性能均优于常规的PID控制。

**关键词:** 稳定平台; 自适应逆控制; LSM算法; PID

中图分类号: V243; TJ765 文献标识码: A

## Adaptive inverse control of stable platform

LI Ying<sup>1,2,3</sup>, GE Wen-qi<sup>1</sup>, WANG Shao-bin<sup>3</sup>, XU Zheng-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-mei<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** To improve dynamic performance and to meet the demands of high precision, fast transient response and real-time tracking, an automatic control method for stabilizing a airborne platform is researched. On the basis of the principle of Adaptive Inverse Control(AIC), an adoptive inverse control system is designed. Then, the system takes the model reference adaptive inverse as a controller to stabilize the axis of the platform and utilizes its character of open circle to improve the system capability. The algorithm for the identification and control of model uses the least square method (LSM) to identify the parameters and the PID control and AIC analysis to compare its output. Simulation experiments indicate that the precision of the AIC system can reach  $29''$ , which shows the proposed system has several advantages of sensitive response, non-overshoot, good anti-disturbance, and minimal stable error. Its dynamic/static performance is superior to those of conventional PID methods.

**Key words:** stable platform; adaptive inverse control; Least Square Method(LSM); PID

# 1 引 言

稳定平台是一种能够使被稳对象相对某惯性空间保持方位不变,或者在一定力矩作下,按给定规律调节被稳对象位置方位的装置,一般用于目标的跟踪、运动轨迹的模拟等场合,属于一个非线性、存在不确定干扰、负载时变的随动系统。迄今为止,平台稳定回路的设计,都是把实际系统看作线性系统,并采用线性经典控制技术进行设计。近年来,稳定平台的发展很快,结构越来越复杂,功能越来越强大,其精度要求越来越高,对平台稳定回路的性能指标的要求也越来越高,采用超前-滞后校正控制、PID 控制等传统控制方法已经不能满足目标跟踪中响应速度快、跟踪误差小等要求<sup>[1-5]</sup>。近年来,国内外的学者陆续提出了惯性平台稳定回路的复合控制、自适应控制、变结构控制及平台稳定回路的模糊 PID 控制等等,并取得了较好的数值仿真结果,但是它们都显得比较复杂。本文把自适应逆控制算法引入到稳定平台控制中,尝试利用其开环特性来改进平台的动态特性,提高平台的稳定精度和响应速度。

# 2 稳定平台的系统结构

光电稳定平台控制系统包括一个内回路速度环以及速度环之外的外回路位置环,其实质是一个典型的伺服系统。平台框架既有双轴平台也有三轴平台,它们具有相似的构成,双回路稳定平台框架的跟踪结构框图如图 1 所示。

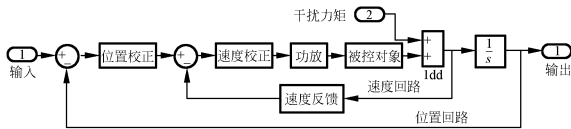


图 1 平台伺服系统结构框图  
Fig.1 Serve system of platform

图 1 中,陀螺、平台、电机以及速度补偿器构成稳定环,跟踪器、补偿器以及稳定环组成位置环。机载光电跟踪系统陀螺稳定平台由执行装置、负载、放大器和测量元件组成。执行装置为直流力矩电机,负载为平台框架以及安装在平台上的光电组件,放大器采用脉冲宽度调制功率放大

器,测量元件由可以测量角位移的多极旋转变压器和可以测量角速度的双自由度挠性陀螺组成。对于这种机载光电跟踪系统陀螺稳定平台,由于同时要完成搜索跟踪目标以及激光指示等功能,因此,要求具有精度高、快速性好、频带宽、鲁棒性强等特点<sup>[6]</sup>。

# 3 自适应逆控制方案

## 3.1 自适应逆控制

自适应逆控制(Adaptive Inverse Control, AIC)是由美国斯坦福大学 B Widrow 教授首先提出来的。在控制系统和调节器设计中,这是一种很新颖的技术途径,目前引起了国内外许多专家学者的关注。它用被控对象传递函数的逆作为串联控制器来对系统的动态特性做开环控制,同时又能做到对系统动态特性的控制与对象扰动的控制分开处理而互不影响。将这一理论应用于直流伺服系统,可以避免因反馈而可能引起的不稳定及系统跟随性与抗扰性需折衷等问题。该方案是对传统反馈闭环控制方案的一种挑战。自适应逆控制系统的结构如图 2 所示,逆控制通过自适应使得控制器逼近控制对象的逆,从而使得整个系统前向通道的传递函数为 1,这样便可以保证输出跟踪输入的变化。对于该控制系统,只有系统误差和模型误差可测,无法获得控制器的输出误差,所以,要实现系统的在线自适应,必须首先获得系统的前向模型,获得系统的近似 Jacobian 矩阵,将系统的输出误差转化为控制器的输出误差,然后再通过自适应算法实现控制器的自适应,载体前向模型就作为误差反传通道,从而建立一种简单、鲁棒、而且精确的自适应控制形式<sup>[7-9]</sup>。

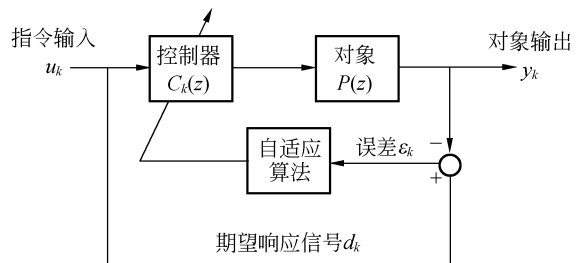


图 2 典型的自适应逆控制结构  
Fig.2 Typical structure of AIC

### 3.2 稳定平台模型参考自适应逆控制

参考模型的动态响应应选择与对象期望的动态响应一致。当误差趋向于 0 时,对象便跟踪上参考模型,参考模型的性能指标是对象的性能指标。这里用的性能指标指模型和对象动态响应误差最小。对于逆控制,将指令输入施加到一个非线性控制器,用控制器的输出作为对象的输入,使对象的输出与参考模型的输出按最小二乘匹配,而不是一般意义下的逆,如果指令输入信号的特征发生变化,控制器必须适应并跟不上这一变化。

稳定平台的自适应逆控制过程相当于 3 个自适应滤波的问题,即平台的动态模型滤波、逆模型滤波和自适应消噪滤波,如图 3 所示。通过对稳定平台建模得到其动态模型,通过平台模型和本身建立其逆模型,该逆模型即为随动系统中的控制器。

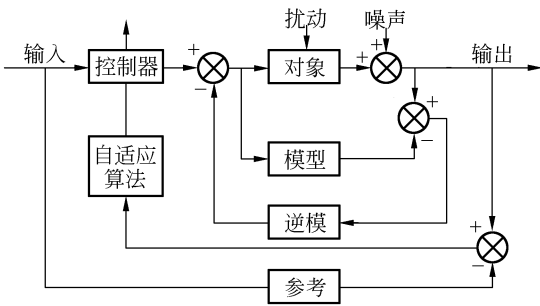


图 3 模型参考自适应逆控制原理框图  
Fig. 3 Structure of model reference AIC

### 3.3 自适应控制算法<sup>[10]</sup>

对于图 2 中的控制器,有很多自适应算法可以用来自动地调节其权系数,例如最速下降法,微分最速下降(DSD)算法和线性随机搜寻(LRS)算法。Widrow 和 Hof1960 年提出的最小均方误差算法即 LMS 自适应滤波算法广泛应用于系统辨识、线性预测、谱估计、消噪等诸多领域。LMS 算法基于估计梯度的最速下降法,具有计算量小,易于工程实现等特点。

Wiener 滤波器理论和自适应滤波器理论都是自适应逆控制的基础。自适应滤波器是离散时间数字滤波器,且渐近收敛到 Wiener 解,可用于对象建模、对象逆建模以及对象扰动消除等。自适应滤波器通常由两个不同的部分构成:滤波器部分,其结构适合于完成所需要的处理功能;自适应算法部分,用来调整上述滤波器的系统。其结

构如图 5 所示:

$k$  时刻滤波器输出  $y_k$  为:

$$y_k = \sum_{i=1}^n \omega_{1k} x_{1k} = \mathbf{W}_k^T X_k = X_k^T \mathbf{W}_k,$$

其中,  $X_k = [x_{0k}, x_{1k}, \dots, x_{1k}, \dots, x_{nk}]^T$  为权的输入信号,满足  $x_{1k} = x_{(0, (k-1))}, \dots, x_{nk} = x_{(n-1, (k-1))}$ , 采样输入信号  $x_{0k} = i_k$ ;  $\mathbf{W}_k^T = [\omega_{0k}, \omega_{1k}, \dots, \omega_{1k}, \dots, \omega_{nk}]$  为权向量;

误差信号为:  $\epsilon_k = d_k - y_k$ ,

其中  $d_k$  为期望输出信号。

滤波器权向量是由自适应算法确定的,其确定方法有很多,最速下降法是获得滤波器权向量的一种基本方法。这种方法通过使权向量上的每一步变化都正比于梯度向量  $\nabla_k$  的负值来得到权向量,表达式如下:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu(-\nabla_k),$$

其中  $\mu$  是收敛因子,即学习速率,用来控制求解过程的自适应速率。

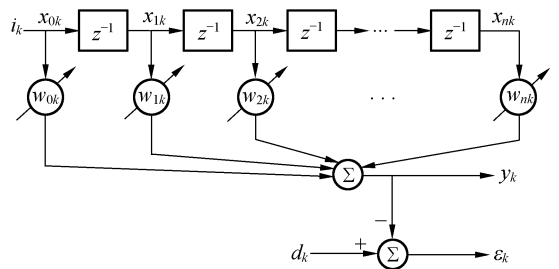


图 4 自适应横向滤波器结构

Fig. 4 Structure of adaptive transversal filter

设  $X_k$  的自相关矩阵为  $\mathbf{R}$ ,  $d_k$  与  $X_k$  的互相关向量为  $\mathbf{P}$ 。以  $\epsilon_k^2$  的期望值即均方误差为性能函数,求该性能函数对权向量的梯度:

$$\nabla_k = \frac{\partial (E[\epsilon_k^2])}{\partial \mathbf{W}_k} = \frac{\partial (E[d_k^2] - 2E[d_k X_k^T] \mathbf{W}_k + \mathbf{W}_k^T E[X_k X_k^T] \mathbf{W}_k)}{\partial \mathbf{W}_k} =$$

$$-2E[d_k X_k^T] + 2E[X_k X_k^T] \mathbf{W}_k,$$

即:  $\nabla_k = -2\mathbf{P} + 2\mathbf{R}\mathbf{W}_k,$

令  $\nabla_k = 0$  求得梯度向量的最优解  $\mathbf{W}^*$ :

$$\mathbf{W}^* = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}.$$

LMS 算法利用测量或估计梯度使最速下降算法变得简单易行。该算法简单地取  $\epsilon_k^2$  作为均方误差  $E[\epsilon_k^2]$  的估计值,在自适应过程的每次迭代时,其梯度估计具有如下形式:

$$\nabla_k = \left[ \frac{\partial \epsilon_k^2}{\partial w_1} \dots \frac{\partial \epsilon_k^2}{\partial w_n} \right]^T = 2\epsilon_k \left[ \frac{\partial \epsilon_k}{\partial w_1} \dots \frac{\partial \epsilon_k}{\partial w_n} \right] = -2\epsilon_k X_k,$$

此时权向量的递推表达式变为:

$$W_{k+1} = W_k + \mu(-\nabla_k),$$

可得 LMS 算法:

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu\epsilon_k X_k.$$

### 4 平台自适应逆控制实验方案

以目标跟踪转台中俯仰轴随动系统为试验对象对它应用自适应逆控制。其中力矩电机驱动器设置为速度闭环,电机为主要惯性负载,转动惯量  $J=470 \text{ kgm}^2$ ,系统中同时包含有摩擦负载,其值无法测量。角度传感器采用 21 位光电编码器。转台控制器采用 TMS320- F2812 型 DSP。

直流电机采用 PWM 控制,实时控制策略由 DSP 实现。编码器的信号可以直接与 DSP 的端口接口,系统采用 EPM7032 来实现编码器 21 位输出到 8 位输出的转换。通过电机轴上的编码器可以测量平台速度。在计算机上运行 DSP 集成开发环境,通过 DSP 仿真器与计算机交换数据,由此可以获得相关试验数据。通过自适应逆控制算法输出一个 16 位的 D/A 给电机驱动器。

根据给定的电机参数计算得稳定平台的数学模型为:

$$P(s) = \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{0.56}{(0.59s+1)(0.0095s+1)},$$

其简化的干扰力矩模型为:

$$M_d = 24\sin \theta(\text{N} \cdot \text{m}).$$

### 5 仿真结果

由于本伺服系统的控制对象是一个单输入、单输出系统。被控对象是最小相位的稳定系统,因此存在一个理想的逆  $C(z) = 1/P(z)$ ,且是稳定的。这样基于图 2 的一种自适应逆控制算法就会给出一个非常逼近  $C(z)$  的  $C(\hat{z})$ ,不断调节  $C(\hat{z})$  使得均方误差最小就能将误差趋近于 0,使  $C(z) = C(\hat{z})$ 。系统自适应逆控制框图如图 5 所示:

图中  $G_m$  为系统辨识得到的参考模型的传递函数。其仿真结果如图 6、图 7:

图 6、图 7 分别为系统采用 PID 控制的正弦

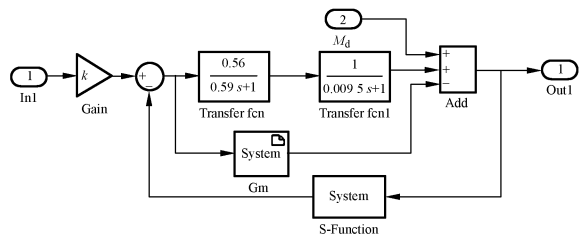


图 5 自适应逆控制系统框图

Fig. 5 Framework of AIC

响应和 II 为采用自适应逆控制时系统的正弦响应。从图中可以看出采用 PID 控制时虽然也能实现信号跟踪,但跟踪误差比较大,而采用自适应逆控制时的跟踪性能要好很多。从仿真结果看其定位精度大概为 PID 控制时的 3 倍,采用自适应

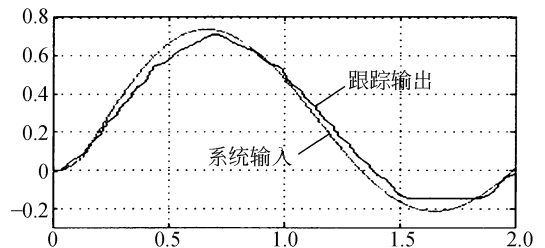


图 6 PID 控制系统响应曲线图

Fig. 6 Response of PID

逆控制时其定位精度可达 2.9"。当输入信号为工程实际应用比较多的等效正弦信号时,其输出响应如图 7 所示。

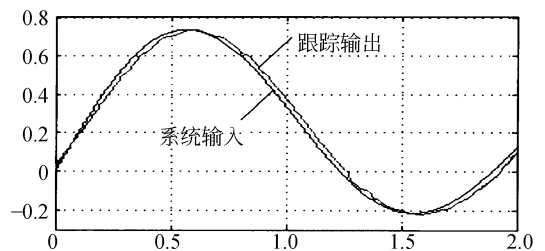


图 7 自适应逆控制系统响应曲线图

Fig. 7 Response of AIC

### 6 结 论

本文将自适应逆控制应用于稳定平台控制系统中,用横向滤波器实现了平台的建模、逆建

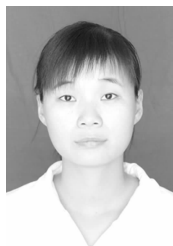
模,并设计了控制器。提出了稳定平台的自适应逆控制方案,从而减小稳态误差,最终得到了一种响应速度快且无超调的控制系统。数字仿真实验表明其控制动态性能好,定位精度可达到 2.9",稳态误差几乎为零,并且具有较强的适应性。自适应逆控制以其特有的结构实现了对象控制和扰

动消除分开进行,但是鉴于对象总是未知的,如何获得准确的对象模型、对象逆模型和参考模型都需要进一步探讨。因此目前自适应逆控制应用尚不广泛,大多数应用还是基于仿真试验,如何将自适应逆控制的原理应用到实际,还需要做许多工作。

## 参考文献:

- [1] 李珉,马军. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(5):847-852.
- MA M, MA J. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opto-electron engineer*, 2006, 14(5): 847-852. (in Chinese)
- [2] 毕永利,刘洵,葛文奇,等. 机载多框陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程. 2004,31(2):16-18.
- BI Y L, LIU X, GE W Q, et al.. Design of a velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope-stabilized platform [J]. *Opto-electron engineer*, 2004, 31(2): 16-18. (in Chinese)
- [3] 刘向,王连明,葛文奇. 用线性加速度实现无脱落稳定平台稳定的理论研究[J]. 光学精密工程,2004,12(1):21-24.
- LIU X, WANG L M, GE W Q. Application of linear accelerometer for stabilization of nongyroscopic platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 21-24. (in Chinese)
- [4] 秦继荣,沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- QIN J R, SHEN A J. *The DC Servocontrol Technology and Design* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [5] 陈占军,葛文奇,李英,等. 光电平台中陀螺解耦问题的研究[J]. 光学精密工程,2008,16(9):1712-1715.
- CHEN Z J, GE W Q, LI Y, et al. Research of gyro decoupling problem on photo-elctric platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1712-1715. (in Chinese)
- [6] 沈宏海,刘晶宏,张葆,等. 航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1293-1299.
- SHEN H H, LIU J H, ZHANG B, et al.. Stabilization properties of airborne imaging platform based on position gyro and rate gyro[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1293-1299(in Chinese)
- [7] 维德罗 B,瓦莱斯 E. 自适应逆控制[M]. 刘树棠,韩崇昭,译. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- WINDOW B, WALLEES E. *Adaptive Inverse Control*[M]. LIU S T, HANG C Z, translate. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 卢志刚,吴士昌,于灵慧. 非线性自适应逆控制及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- LU Z G, WU S C, YU L H. *Non-linear Adaptive Inverse Control and Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [9] WIDROW B, MCCOOL J M. A Comparison of adaptive algorithms based on the methods of steepest descent and random search[J]. *IEEE Trans. On Antennas and Propag*, 1976, 24(5): 615-637.
- [10] 胡文霏,黄金泉. 航空发动机自适应逆控制研究[J]. 航空动力学报,2005,20(2):293-297.
- HU W F, HUANG J Q. Study of aeroengine adaptive inverse control [J]. *Journal of Aerospace Power*. 2005, 20(2): 293-297. (in Chinese)

## 作者简介:



李 英(1979—),女,湖南沅江人,博士研究生,讲师,主要从事机载光电平台的伺服控制技术研究。E-mail:liyings-flyinghn@163.com



王绍彬(1980—),男,内蒙乌兰浩特人,助理研究员,主要从事电机伺服控制技术的研究。E-mail:yzb@cust.edu.cn



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士研究生,主要从事 CCD 几何超分辨成像方法及直流电机伺服控制技术的研究。E-mail:xuzp090@163.com

## 通讯作者:



张淑梅(1964—),女,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事光电测量、跟踪控制技术方面的研究。E-mail:zhangsm\_cicomp@yahoo.com.cn

## 导师简介:

葛文奇(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事机载光电设备稳定与跟踪控制技术研究。

## ● 下期预告

## 血红蛋白浓度的光学测量方法与装置

黄 博<sup>1</sup>,姚玉峰<sup>1</sup>,姜瑞举<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)机器人研究所,山东 威海 264209

2. 威海医用高分子集团,山东 威海 264209)

为了实现全血中血红蛋白浓度的无毒害、便携、精确测定,研制了血红蛋白浓度光学测量系统,对该系统的测量机理,浓度计算公式,药剂微片,测量装置及控制系统进行研究。首先基于叠氮高铁血红蛋白溶液的吸收光谱曲线设计了二次吸收测量机理,并明确了浓度计算公式;然后设计了供光学测量的微片,对该微片进行亲水处理以确保全血毛细吸附,并预填指定配方的药剂,光学容腔的公差可确保光学测量精度与一致性,最后,阐述了测量装置与控制系统的详细方案。该装置可在 30~60 s 内实现未稀释未溶血全血的在线快速测量。临床试验表明,对比氰化高铁血红蛋白法其相关性可达 0.983 6,准确性达到 96.32%。利用该测定仪的便携性、在线快速检测特性,可广泛应用于移动采供血机构、运动员机能评定以及家庭保健等。