

# 基于多功能数据采集卡和变速 PID 的转台控制系统设计

李敏, 赵剡, 杨辉, 张海峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为了提高采用转台对惯性导航系统和惯性仪表进行误差模型标定时可靠性和精度, 对角位置转台的控制系统进行了研究; 首先借助 NI 公司 PXI-8101 控制器和功能强大的数据采集卡 PXIe-6363 对转台控制系统进行了硬件设计; 随后在对转台常规 PID 控制方法研究的基础上提出了一种能随系统调节偏差自动改变积分项累加速度的变速 PID 控制方法; 接着又对基于软件实现的双通道旋转变压器轴角解调算法进行了研究并提出了一种粗精组合角纠错方法; 最后文章设计的转台控制系统进行了测试实验, 结果表明提出的轴角解调算法具有较好的解码速度和精度, 并且变速 PID 控制方法大大提高了转台控制系统的自学习能力和鲁棒性, 显著地改善了转台控制过程的稳定性。

**关键词:** 角位置转台; 力矩电机; 数据采集卡; 变速 PID; 粗精组合; LabVIEW

## Control System Design of Turntable Based on Multifunction Data Acquisition Card and Variable Speed PID

Li Min, Zhao Yan, Yang Hui, Zhang Haifeng

(School of Instrumentation and Opto-electronic Engineering, Bei Hang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability and accuracy of the calibration process for the error model of the inertial navigation system and inertial instruments, the paper focuses on the study of control system of angle position turntable. First of all, the hardware of the turntable control system is designed by the data acquisition card PXIe-6363 and the controller PXI-8101 from NI company. After the modeling and analyzing of the control system, a new speed PID control method which can adjust deviation automatically according to the system and amend integral term to accumulate velocity is proposed. Then based on the research of the angle measuring of two-channel resolver, a brand-new approach for error correction for combination of coarse and fine code is advanced also. Finally, the test experiment is carried out and the results show the good decoding speed and accuracy of the axis angle demodulation algorithm, and variable speed PID algorithm greatly improves the system's self-learning ability and robustness, which makes a significant improvement in the stability of the control process.

**Keywords:** angle position turntable; torque motor; data acquisition card; variable speed PID; combination of coarse and fine code; LabVIEW

## 0 引言

高精度测试转台是检测和评价惯性导航与制导系统的主要设备, 其性能优劣直接关系到测试试验的可靠性和精度, 是保证航空、航天型号产品和武器系统精度和性能的基础。因此对转台的控制系统进行研究具有重要的意义。在转台伺服控制系统中, 作为驱动机构的直流力矩电机, 由于其电枢的非线性、转动惯量和电阻的变化等因素的影响, 采用传统的 PID 控制方法对转台实施控制容易因积分饱和而产生超调现象, 这严重影响了伺服过程的稳定性<sup>[1-2]</sup>。若采用现代控制方法的理论又因为其算法本身尚不够完善, 实时性相对较差的缘故, 导致目前的应用大多仍停留在理论分析和仿真的阶段, 工程实际应用的则很少。

为了提高采用转台对惯性导航系统和惯性仪表进行误差模型标定时可靠性和精度, 本文基于 NI 公司的高速数据采集卡和图形化编程软件 LabVIEW 研制了一台角位置转台控制系统。重点对双通道旋转变压器测角解调算法和变速积分 PID 控制方法进行了介绍。实验结果表明提出的轴角解调算法具有

较好的解码速度和精度, 并且变速 PID 控制方法显著地改善了转台控制过程的稳定性。

## 1 角位置转台控制系统的硬件设计

### 1.1 角位置转台控制系统的总体方案

本文基于 NI 公司的高速数据采集卡和图形化编程软件 LabVIEW 设计的角位置转台控制系统方案如图 1 所示, 整个系统主要是由控制器 PXI-8101、多功能数据采集卡 PXIe-6363、角位置转台、各类传感器及电源等组成的。

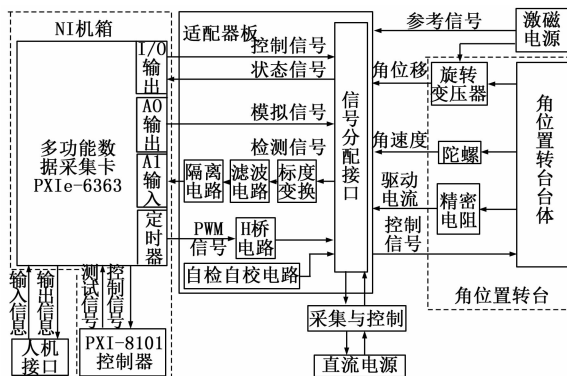


图 1 角位置转台控制系统的原理方案

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-10-13。

**作者简介:** 李敏 (1991-), 女, 福建人, 在读研究生, 主要从事仪器仪表与自动化、惯性导航与控制方向的研究。

1.2 模拟量输入预处理电路的设计

模拟量预处理电路的功能主要是将通过陀螺仪、旋转变压器及精密电阻采集到的差分信号转换为单输入信号, 并且根据采集到的信号值大小进行适当的标度变换以满足多功能数据采集卡 PXIe-6363 的输入量程需要。因为要检测的信号中有小信号, 所以设计时采用芯片 TLE2084 和 OP07 设计了一个差分输入两级放大结构的电路。当驱动电流、速度和位置信号以电压信号的形式被输入到 PXIe-6363 的模拟量输入通道进行 AD 变换之前, 均需要先经过各自采集通道的放大电路进行标度变换, 然后又经过各自回路的低通滤波电路进行滤波处理。

1.3 电源控制电路的设计

为了防止电路中存在的故障导致上电对陀螺仪和角位置转台造成损坏, 所以在系统加电的过程中, 人为的设置了保护逻辑。当继电器开关 PJ1 闭合后, 系统开始为适配器板供入 ±12 V 电源, 如果没有故障, 适配器板开始工作。当继电器开关 PJ2 闭合后, 系统开始为陀螺仪供入 +6 V 电源, 如果没有故障, 陀螺仪开始工作。当陀螺仪没有故障并且继电器开关 PJ3 闭合后, 系统才开始为 H 桥控制电路供入 +27V 电源, 同时向旋转变压器提供交流 20 V 旋变激磁信号。这些电源、驱动电路及传感器等的工作状态都可以借助自检电路, 通过 PXIe-6363 的 I/O 口在上位机上进行观察<sup>[3]</sup>。电源逻辑控制电路的设计图如图 2 所示。

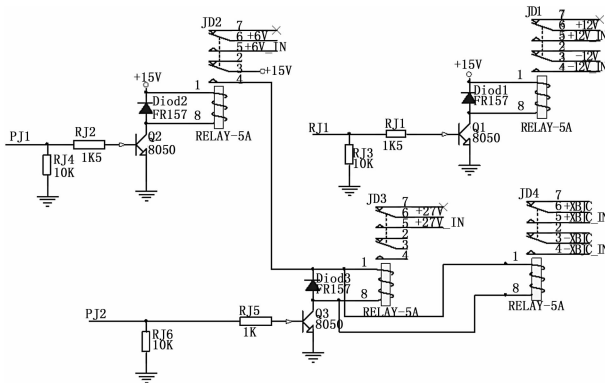


图 2 电源逻辑控制电路

1.4 电机驱动电路的设计

上位机 PXI-8101 控制数据采集卡 PXIe-6363 的定时器输出口向转台电机驱动电路发送 PWM 信号并通过 I/O 口向驱动电路发送方向和停止信号就可以控制转台进行转动。电机驱动电路主要包括 H 桥、方向控制、急停控制、电流采样、过流保护单元等。H 桥的设计采用了全桥 N 沟道 MOS 管设计, 这种设计方式比上桥臂采用 P 沟道 MOS 管、下桥臂采用 N 沟道 MOS 设计有更强的过电流能力。使用 IR2104 芯片升压(自举)保证上桥 N 沟道 MOS 管能够正常工作, 使用 IR2175 芯片对采样电流进行过流监测<sup>[4-5]</sup>。H 桥以及其电流采样、过流检测电路如图 3 所示。

过流保护电路采用了软硬件双重控制。一方面一旦发生过流(采样电流 ≥ 2.6 A), 则产生一个低电平的脉冲, 通过硬件保持电路保持有效低电平, 并且立即禁用 IR2104 芯片, 从而切断了 H 桥的使用, 保护电机不被烧毁; 另一方面, 如果上位机给出的 DShutdown 信号有效, 同样立即禁用 IR2104 芯片, 即软件过流控制信号经光电隔离后使 ShutDown1 成为有效信号。一旦电机过流, 将导致 IR2175 芯片输出的脉冲信号使得 ShutDown2 又变成有效信号, 保护电机不被烧毁。

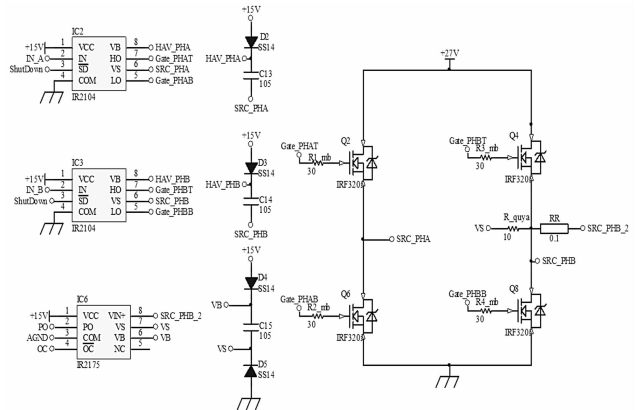


图 3 H 桥以及其电流采样、过流检测电路

2 变速 PID 控制算法

2.1 PID 控制的基本原理

转台控制系统通常采用 PID 方法进行调节, 常规 PID 控制方法就是根据转台的给定值和实际输出值构成控制偏差, 将偏差按比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 对被控转台进行控制<sup>[6]</sup>。由于计算机控制是一种采样控制, 它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量。因此, 在计算机 PID 控制中, 使用的位置式转台数字 PID 的表达式如式 (1) 所示。

$$u(k) = k_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(t) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (1)$$

式中,  $k_p$  为比例常数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数;  $e(k-1)$  和  $e(k)$  分别为第  $(k-1)$  和第  $k$  时刻所得的偏差信号;  $u(k)$  为第  $k$  次采样时刻的计算机输出值。

2.2 变速 PID 控制算法

在常规 PID 控制算法中, 由于积分系数  $T_i$  是常数, 所以在整个控制过程中, 积分增量不变, 而转台系统对积分项的要求是转台系统偏差大时积分作用应减弱或全无, 而在偏差小时则应加强, 积分系数取大了会产生超调, 甚至是积分饱和, 取小了又迟迟不能消除静差。因此, 为了使积分项的累加速度与偏差大小相对应, 本文设置了系数  $f[e(k)]$ , 它是  $e(k)$  的函数。转台变速积分 PID 的表达式如 (2) 式所示。

$$u_1 = \frac{k_p}{T_i} \cdot f[e(k)] \cdot \sum_{i=1}^k [\frac{e(i) + e(i-1)}{2}] \cdot T \quad (2)$$

考虑到转台系统的偏差是设定值与被控制量反馈回来比较之后的差值, 所以系数  $f[e(k)]$  应该与设定值的范围大小  $R$  也有一定的关系, 所以本文将系数  $f[e(k)]$  定义为 (3) 式:

$$f(e(k)) = [\frac{10e(i)^2}{R^2} + 1]^{-1} \quad (3)$$

由上式可以看出  $f[e(k)] \in (0, 1]$ , 而且当  $|e(k)|$  增大时,  $f[e(k)]$  减小, 当  $|e(k)|$  减小时,  $f[e(k)]$  增大, 把 (3) 式代入到 (2) 式后可得变速积分 PID 的表达式如 (4) 式所示。

$$u_1 = \frac{k_p}{T_i} \cdot [\frac{10e(i)^2}{R^2} + 1]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k [\frac{e(i) + e(i-1)}{2}] \cdot T \quad (4)$$

从上式 (4) 可以看出, 当  $|e(k)|$  越小, 积分作用越强, 反之则越弱。变速积分 PID 可以有效的防止了在转台调节过程的启动、结束或大幅度增减设定值时, 短时间内转台系统因输出很大的偏差而引起较大的超调, 甚至引起转台系统较大的振荡, 当被控量接近给定值时, 积分作用显著, 以便消除静

差,提高转台控制的精度<sup>[6]</sup>。

微分信号的引入可以改善转台系统的动态特性,但也容易引入高频干扰,在误差扰动突变的时候尤其显出微分项的不足。为此,在PID算法微分环节中加入一个一阶低通滤波器,引入了不完全微分。不完全微分表示为:

$$u_d(k) = k_d(1-\alpha)[e(k) - e(k-1)] + \alpha u_d(k-1) \quad (5)$$

式中,  $k_d = k_p \cdot T_d/T$ ;  $0 < \alpha < 1$ 。

从上式(5)可以看出,不完全微分的  $u_d(k)$  多了一项  $\alpha u_d(k-1)$ ,而原微分系数由  $k_d$  降至  $k_d(1-\alpha)$ 。

综上所述,前文的(1)式最后可以改变成下列(6)式:

$$u(k) = k_p e(k) + \frac{k_c}{T_i} \cdot \left[ \frac{10e(i)^2}{R^2} + 1 \right]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k \left[ \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right] \cdot T + u_d(k) + K_d(1-\alpha)[e(k) - e(k-1)] + \alpha u_d(k-1) \quad (6)$$

转台PID控制器参数的工程整定方法,主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。无论采用哪一种方法所得到的控制器参数,都需要在实际运行中进行最后调整与完善。本文采用的是临界比例法。

### 3 旋转变压器的工作原理及解调方法

由图1可知,旋转变压器是角位置转台的重要反馈器件,它的精度决定着转台伺服控制的性能。然而,双通道旋转变压器在轴角解调时很容易发生粗精极角组合解算不准的问题,而且这个不准不是因为变压器本身的原因造成的,而是由于解调算法造成的,所以本文需要对双通道旋转变压器轴角解调算法及纠错方法进行研究。

#### 3.1 旋转变压器的基本原理

旋转变压器是一种安装在电机轴上提供电机转子绝对角位置的传感器,它由激磁绕组和输出绕组组成。所谓粗精组合的双通道旋转变压器,就是把一个多极旋转变压器(精机)和一个单极旋转变压器(粗机)集成在一起构成的<sup>[7]</sup>。

不妨以单通道旋转变压器为例,假设采用如下的单频信号进行激磁:

$$U_{mf} = U_0 \cos(\omega t) \quad (7)$$

当转角为  $\theta$  时,其输出的正、余弦信号为:

$$\begin{cases} U_{\cos} = K_0 U_0 [\cos(\omega t) \cos(\theta) + \frac{1}{\omega} \frac{d\theta}{dt} \sin(\omega t) \sin(\theta)] \\ U_{\sin} = K_0 U_0 [\cos(\omega t) \sin(\theta) + \frac{1}{\omega} \frac{d\theta}{dt} \sin(\omega t) \cos(\theta)] \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $U_0$  表示输入激磁信号幅值;  $\omega$  为激磁信号频率;  $K_0$  表示旋转变压器定子与转子绕组间的比例系数;  $\theta$  表示转轴的角位置;  $t$  表示转轴的运行时间。

通常因为转轴角速度  $\dot{\theta}$  远远小于旋转变压器激磁电源频率  $\omega$ ,所以上式(8)可分别近似为:

$$\begin{cases} U_{\cos} = K_0 U_0 [\cos(\omega t) \cos(\theta)] \\ U_{\sin} = K_0 U_0 [\cos(\omega t) \sin(\theta)] \end{cases} \quad (9)$$

由(9)式得:

$$\theta = \arctan\left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}\right) = \arctan\left\{\frac{K_0 U_0 [\cos(\omega t) \sin(\theta)]}{K_0 U_0 [\cos(\omega t) \cos(\theta)]}\right\} \quad (10)$$

#### 3.2 双通道旋转变压器粗精角的组合及纠错

对于粗精机极对数比为  $N:1$  的双通道旋转变压器,精级的1圈( $2\pi$ )表示真实转角角度的1个  $\frac{2\pi}{N}$ 。数据组合时,先

由粗级数据计算真实转角所在区间,再由精级数据计算出该区间的精确值,最后粗精组合后得到转角的真实值<sup>[8]</sup>。

假设双通道旋转变压器粗机角的转角值  $\theta_c$  已经按照(10)式通过粗机端的输出电压  $U_{c\_sin}$  和  $U_{c\_cos}$  获得(同理,也利用精机端输出的电压  $U_{j\_sin}$  和  $U_{j\_cos}$  值可以获得精机角  $\theta_j$  的值),那么,被测轴的转角测量值  $\theta$  就可以利用旋转变压器的粗机角  $\theta_c$  和精机角  $\theta_j$  的值进行组合求得,其求解式如下式(11)所示。

$$\theta = \text{int}\left[\frac{\theta_c}{360^\circ} \times N\right] \cdot \left(\frac{360^\circ}{N}\right) + \frac{\theta_j}{N} \quad (11)$$

其中:  $\text{int}[x]$  表示对括号中的  $x$  取整,  $N$  为粗、精机极对数之比,本文  $N = 16$ 。

在双通道旋转变压器粗精角的组合解算中,为了防止由粗机  $\theta_c$  所读整数与真实转角  $\theta$  所在区间多“1”或者少“1”事情发生,需要根据(12)式,来进行相应的纠错处理<sup>[9-11]</sup>。

$$\begin{cases} \theta_L = \theta & \text{if } -\frac{360^\circ}{2N} \leq \theta_c - \theta \leq \frac{360^\circ}{2N} \\ \theta_L = \theta - \left(\frac{360^\circ}{N}\right) & \text{if } \theta_c - \theta < -\frac{360^\circ}{2N} \\ \theta_L = \theta + \left(\frac{360^\circ}{N}\right) & \text{if } \theta_c - \theta > \frac{360^\circ}{2N} \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $\theta_L$  即为纠错之后转台转角的测试值。

### 4 转台控制系统的软件设计

由于在转台控制系统的硬件设计中较多的使用了NI公司的产品,所以系统的监控软件就采用图形化编程软件LabVIEW语言作为开发工具,在上位机上以动画、图表的形式完成对转台系统监控的所有功能。

转台控制系统的监控软件涉及的较多,主要有主程序、数据采集与转换程序、转台控制程序、电机PID控制程序、自检自校程序及人机接口程序等。这里仅详细介绍转台系统电机PID控制程序。直流电机PID控制程序主要用来完成转台运行参数的设定及状态检测功能<sup>[12]</sup>,其流程图如图4所示。

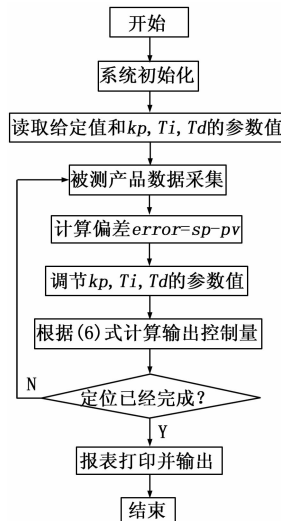


图4 电机PID控制流程图

### 5 测试试验及结果分析

#### 5.1 角位置转台定位性能测试

由于所用的旋转变压器的激磁频率为800Hz,所以本文用于旋转变压器粗精机端输出电压采样的频率最低不能低于1600Hz,否则就不能从旋转变压器粗精机端输出的电压解调

出有效的转台转动角度。但采样频率也不能取得太高, 太高就会因为数据太多而占用大量的内存资源, 使控制系统的运行速度降低, 容易造成死机, 经过权衡, 本文的采样频率取为 32 kHz, 这样就保证了在旋转变压器的一个激磁周期内, 可以有 4 次解调的机会。

为检验本文所提出的旋转变压器轴角解调算法的有效性和解调精度, 首先做了转台等间隔角转动定位性能测试, 测得的数据如表 1 所示。

表 1 角位置转台等间隔角转动测试数据 (单位: 度)

设定值	粗通道读数	精通道读数	测试值	误差
0	0.05	359.00	359.93	-0.07
45	43.25	0.32	45.02	+0.02
90	90.17	0.25	90.01	-0.01
135	134.32	0.15	135.01	0.01
180	180.12	0.32	180.02	0.02
225	224.72	0.34	225.02	0.02
270	270.22	0.45	270.03	0.03
315	316.22	0.24	315.01	0.01
359	343.14	343.07	358.94	-0.06

从表中可看出, 测量值与真实值误差的绝对值没有超出 0.10 度, 表明解调算法具有较高的精度。同时还可发现, 当转台在 0 度附近定位时, 旋转变压器的解调明显不如其它角度位置处的解调精度高。这是因为旋转变压器在 0 度附近的标度值从 360 度突变到 0 度时, 控制系统的调节有一定时间滞后。

### 5.2 角位置转台匀速转动测试

设定转台以  $\frac{10^\circ}{s}$  的速度匀速转动, 在内场试验中测得的数据如图 5 所示。由图 5 看出, 当转台匀速运动时, 旋转变压器输出的电压信号经本文算法解调后, 其角位置随时间变化的曲线近似为斜率为 10 的一系列锯齿波。从而说明本文实现的双通道旋转变压器测角解调算法具有很好高的解调精度及稳定性。

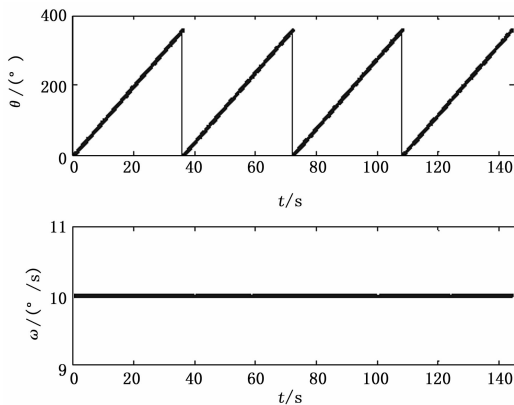


图 5 被测轴角位置及角速度

### 5.3 转台正弦角跟踪测试

设定角位置转台的跟踪信号为  $\theta = 5\sin(10t)$ , 分别采用传统的 PID 控制方法和变速 PID 方法对转台的运动过程进行控制并实时采集其数据绘出的跟踪曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 在跟踪的初始时刻采用变速 PID 方法和传统的 PID 方法分别对转台进行控制, 它们之间的控制性能相差不多, 但随着控制过程的进行, 采用变速 PID 方法对转台控制的性能逐渐超过了采用传统 PID 控制的性能。这充分说明变速 PID 方法与常规 PID 控制方法相比, 具有较强的自

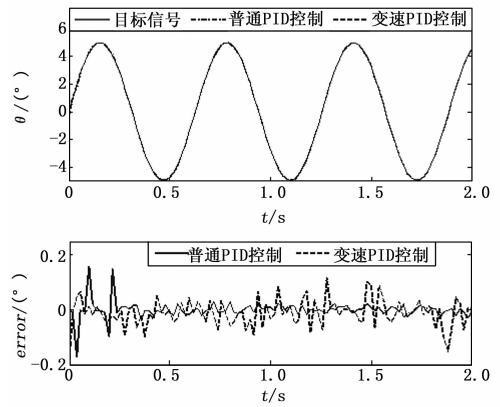


图 6 角位置转台跟踪响应曲线

适应能力, 采用变速 PID 方法对转台的稳定和跟踪实施控制, 被控系统更易获得强的鲁棒稳定性和很好的动态性能。

## 6 结语

为了提高惯性导航组件进行误差模型标定时转台的定位精度及运行时的平稳性, 对基于高速数据采集卡 PXIe-6363 和可视化编程软件 Lab VIEW 的转台控制系统进行了研究。提出了一种能随系统调节偏差自动改变积分项累加速度的变速 PID 控制算法。随后对双通道旋转变压器轴角解调算法进行了研究, 提出了一种粗精组合角纠错方法。实验结果表明提出的轴角解调算法具有较好的解码速度和精度, 并且采用变速 PID 方法对转台的稳定和跟踪实施控制, 被控系统更易获得强的鲁棒稳定性和更好的动态性能。

### 参考文献:

- [1] 林忠贤, 杨 晨. 空空导弹导引头位标器质量不平衡对制导精度的影响 [J]. 电光与控制, 1997, 66 (2): 24-29
- [2] Kevin M, S G J W. Pointing and Stabilization System for use in a High Hovering Helicopter [A]. Conference on Acquisition, Tracking and Pointing XIII [C]. SPIE, 1999.
- [3] 杨乐平, 李海涛. Lab VIEW 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 庞新良, 赵薇薇, 范大鹏, 等. 直流力矩电机在机载光电伺服系统中的应用研究 [J]. 红外技术, 2007, 29 (10): 573-578.
- [5] 宋恩哲, 姚 崇, 孙 军, 等. 有限转角直流力矩电机作为柴油机调速执行机构的控制策略研究 [J]. 内燃机工程, 2009, 30 (1): 45-49.
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M] (第 2 版). 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] 李彦勤, 徐国栋, 王俊雄. 基于虚拟仪器的旋转变压器角度测量系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (12): 3190-3192.
- [8] 黄卫权, 王宏健, 张伟民. 多极旋转变压器轴角粗、精组合软件方法 [J]. 自动化技术与应用, 2002, 21 (4): 47-48.
- [9] 杨 辉, 赵 剡, 野 超, 等. 基于切比雪夫多项式的旋变轴角快速解调算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2013 (4): 530-535.
- [10] 房建成, 徐向波, 魏 彤. 采用线性求角的旋变轴角解码与激磁系统 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (4): 794-795.
- [11] 刘柏林, 廖 勇, 何志明. 基于 FPGA 的旋转变压器解码算法研究与系统设计 [J]. 微电机, 2007, 40 (12): 48-50.
- [12] 庞 宇, 孙永维, 李 洋, 等. 某型飞行模拟器火控控制台设计与实现 [J], 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1910-1912.