

文章编号 1004-924X(2016)增-0665-10

采用前馈校正的光谱仪直流位置闭环系统

刘泽昆, 刘 杰*, 王智宏

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要:以光谱仪机械系统中的驱动机构为研究对象,采用直流力矩电动机和 AS5048A 磁性旋转编码,设计了基于 DSP F2812 的位置闭环控制系统,替换原有的开环步进系统,实现步进系统功能。该电机转子每转动 3.6° ,经分光系统分光后的光波长增加 1 nm,角位移精度为 0.15° 。首先,介绍了磁性旋转编码器的工作原理及使用安装,并设计了驱动电路以及限位功能电路。然后,依据系统设计指标,研究了直流电机各类控制算法,提出了适用于本系统的前馈校正 PID 控制策略。最后,通过实验检验了直流系统的可靠性。依据数据分析结果,采用一种分段控制的补偿算法,解决了由于电机轴线与丝杠轴线不同轴度引入周期性变化干扰的问题。实验结果表明,系统角位移精度可达 0.15° 。该位置闭环系统运行可靠,精度高,抗干扰能力强,有效避免了开环系统下步进电机的丢步现象。

关键词:光谱仪;直流力矩电机;磁编码器;DSP;前馈校正;限位功能

中图分类号: TM331 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0665

DC position close-loop system of spectrometer by feed-forward correction

LIU Ze-kun, LIU Jie*, WANG Zhi-hong

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Jilin 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: l_jie@jlu.edu.cn

Abstract: In this paper, driving mechanism of spectrometer mechanical system was taken as research object, and DC torque motor and magnetic spin encoding were adopted. On the basis of above, DSP F2812 was used to design a position closed-loop control system to take the place of the original open-loop stepper motor system. It can realize the function of stepper system that the wavelength of light splitted by optical-splitting system increase 1 nm, while motor runs angle displacement 3.6° . The accuracy of angle displacement is 0.15° . First, operating principle and installation of magnetic spin encoder were presented, and driving circuit and limited position mechanism were also designed. Then according to system design index, all kinds of control algorithms for DC motor were investigated. Thus, the feed-forward correction PID control strategy suitable for the system was proposed. Finally, the reliability of DC system was confirmed via experiment. Taking the experiment results as reference, a compensation algorithm for piecewise control was used to solve the problem of period interference caused by the low coaxiality between motor axis and screw axis. Experimental results indicate that the accuracy of angle displacement can reach to 0.15° . The position closed-loop system runs reliably, crit-

收稿日期:2016-05-20;修订日期:2016-06-03.

基金项目:固定翼时间域航空电磁系统实用化资助项目(No. SS2013AA063903)

ically and has strong anti-interference ability so that losing step phenomenon of open-loop stepper motor system is avoided efficiently.

Key words: spectrometer; DC torque motor; magnetic spin encoder; DSP; feed-forward correction; limited position function

1 引言

目前近红外光谱分析技术已在我国石油化工、烟草、乳品、酒类、农业等行业得到广泛应用^[1]。吉林大学光谱仪器研究室是国内近红外光谱仪器研制比较领先的单位,已成功研制了光栅扫描型和 CCD 平场型两种光谱仪^[2-5]。光栅分光扫描型光谱仪基于近红外光谱技术,主要包括光学系统、机械系统、电路系统、软件系统 4 部分。机械系统又分为驱动机构和执行机构。目前,光栅扫描型光谱仪的驱动机构全部由步进电机作为驱动源,其带动精密丝杠、螺母、连杆组成的执行机构,完成光谱仪扫描进给功能。步进电机因具有开环简单、性价比高等优点被广泛应用,但步进电机使用时,运行平稳性、匀速性和开环丢步现象等均无法保证,进而导致光谱数据存在不稳定因素,影响光谱仪分析的准确性。直流力矩电机具有响应快速、转速低、力矩大、特性线性度好、力矩波动小等特点^[6];而且结构简单、紧凑、具有软机械特性及宽调速范围等优点,是一种高精度伺服系统功率元件。在高精度闭环位置伺服系统中,电机可以直接驱动负载,无须减速装置,在高精度位置和速度控制系统中^[7],具有相对明显的优势。

针对步进系统的缺点,人们利用永磁直流力矩电机替换步进电机带动扫描执行机构运行。改变光栅转动角度,分光得到 1 200~2 600 nm 波段的各波长单色近红外光线^[2]。单色光线波长变化率为 1nm,折算为直流力矩电机转子角位移量为 3.6°。本文采用一种新型磁编码器和霍尔开关组成反馈回路,基于 TI 公司电机控制专用芯片 DSP TMS320 F2812 设计了前馈校正的 PID 控制算法,并提出了一种分段控制的补偿算法,用来补偿不同轴度引起的负载扰动。

2 直流闭环位置伺服系统

2.1 总体架构

位置控制系统的硬件主要由微控制器、电平转换(电源模块)、H 桥驱动、转子角度位置检测电路及相关软件构成,系统整体框图如图 1 所示。系统以 DSP F2812 为核心控制单元,通过比较角位移设定值与实际角位移测量值,输出控制信号,之后直接作用于 H 桥功率驱动电路。驱动电路的输出信号控制电机正向或反向旋转带动丝杠进给,AS5048A 磁旋转编码器实时采集角位移变化,并反馈到控制器 DSP F2812 中。如此往复,构成闭环。

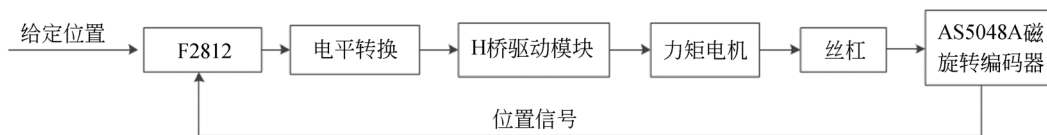


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

直流力矩电机轴伸出端由联轴器与丝杠连接,丝杠外端用于安装磁编码器,丝杠两端各安装一个霍尔开关,磁铁、编码器、丝杠、电机与控制器连接安装示意图如图 2。

2.2 转子角位移检测电路

位置闭环系统中,角位置检测元件的精度和分辨率将直接决定整个系统最终的精度。编码器

作为控制系统中常用的检测角位移的反馈元件,可分为光电编码器和磁旋转编码器。系统设计要要求:角位移精度要控制在 $\pm 0.15^\circ$ 。两类编码器均可达到此精度,但光电编码器是通过在码盘上刻线来计算精度的,所以精度越高,码盘就会越大,编码器体积越大。考虑到经济成本结合实验室仪器便携式小型化的特点,选择方便安装调试、体积

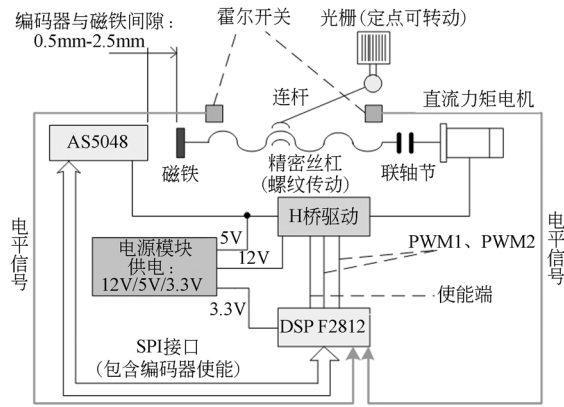


图 2 各组件连接安装示意图

Fig. 2 Connection and installation schematic of components

小、环境要求低的磁旋转编码器,型号为 AS5048A。磁编码器采用磁电式设计,通过磁感应器件,利用磁场的变化来产生和提供转子的绝对位置,利用磁器件代替了传统的码盘,具有抗震、耐腐蚀、耐污染、性能可靠、结构简单等优点。图 3 为磁编码器原理图。其工作原理为:在芯片上固定一个可产生正弦磁场的两极磁铁,当磁体围绕芯片中心做 360°旋转时,可以探测 16 384 个绝对位置,分辨率可达 14 位^[8]。

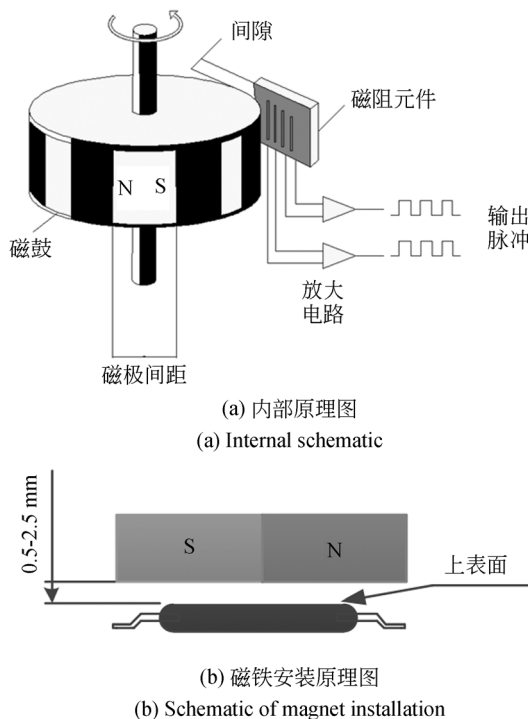


图 3 磁编码器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic encoder

AS5048 是由奥地利微电子有限公司生产的一款 14 位的磁性编码器芯片,提供 PWM 输出以及 SPI 或 I²C 接口,为微控制器提供绝对角度测量。可工作在 3.3 V/5 V 下,其 14 位的测量模拟前端提供低至 0.021 9°的测量分辨率,采样输出率可达 12.4 kHz,磁场输入低至 30 mT。通过微控制器进行线性化和平均化处理,能实现 0.05°的角度测量。其精度完全满足闭环系统的角度控制精度要求。图 4 为 AS5048A 的内部组成结构框图。

系统采用 SPI 接口连接 DSP 和 AS5048,这是因为 F2812 没有硬件的 I2C 接口,需要 I/O 口模拟,为节省开发时间,故采用 SPI 接口。F2812 中 SPI 采用的四线制,即串行时钟线 SCK、主机输入从机输出线 MISO、主机输出从机输入线 MOSI、低电平有效的从机选择线 CS。AS5048 只支持从机模式,因此时钟 CLK、CSn 信号由 DSP 提供,即 DSP 工作于主机模式。

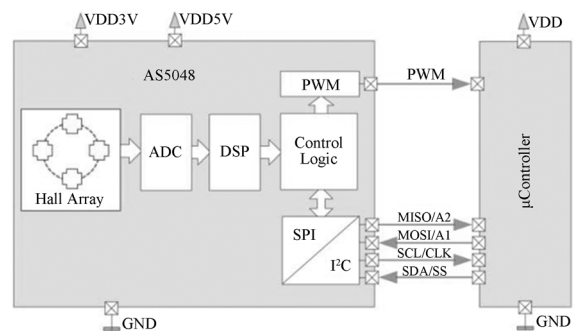


图 4 AS5048A 内部组成结构框图

Fig. 4 AS5048 internal composition construction

2.3 力矩电机驱动电路

作为直流电机的一种,直流力矩电机选用了 BEYOND 科技 H 桥架构 MOS 单路电机驱动模块,模块主要由 74HC08 高速 CMOS、MC34063 双极性线性集成电路(DC-DC 变相器)、HIP4082 H 桥 FET 驱动芯片组成。具有 5 个排针作为输入端:5V、GND、PWM1、PWM2、EN,其中 PWM1、PWM2 为脉冲控制信号。PWM1 为正常 PWM 波,PWM2 为低电平,电机正转;PWM1 为低电平,PWM2 为正常 PWM 波,电机反转;PWM1、PWM2 同时为低或高电平,电机制动。另外 4 个接线端子作为 DC-DC 变换器输入输出端为力矩电机供电。

DSP F2812 作为 TI 公司推出的电机控制专用的高集成芯片,既具有数字信号处理能力,又具有强大的时间管理能力和嵌入式控制功能^[9],其中事件管理器是实现电机脉宽调速的主要寄存器。

力矩电机实现了正反转和调速功能。其中,实现正反转的过程就是改变 PWM1 和 PWM2 电平的过程,可以通过两种方式实现:①改变 I/O 的配置, EVB 配置不变:即 I/O 口在功能引脚和通用引脚间切换;②I/O 口配置不变,改变 EVB 配置:即 EVB 的比较行为寄存器在 0x0100 和 0x0400 间切换,此时 PWM1 和 PWM2 的输出电平可绕过通用输入输出多路选择寄存器对外围引脚工作方式设置,强制输出低电平或高电平。其次,电机实现调速过程,可以通过改变比较寄存器的值,改变 PWM 波的占空比,从而改变电机转速。驱动模块可工作在 0%~98% PWM 调制占空比下,因此可实现宽范围、无级调速。

2.4 限位功能电路

限位是指本文中,较准确地使电机所驱动的精密丝杠螺母在某一特定直线范围内运转,类似于接近开关。本文中采用单极性霍尔开关,霍尔开关的输入端是以磁感应强度 B 来表征的,当 B 值达到一定的程度时,霍尔开关内部的触发器翻转,霍尔开关的输出电平状态也随之翻转。因此当丝杠螺母上的磁铁接近霍尔开关时,霍尔开关信号引脚由高电平变成低电平,此下降沿作为 DSP 芯片两个优先级等级为 1 的外部中断的触发条件,在中断服务程序中控制电机做相关动作及反应——制动。

限位的目的:第一,限制电机带动丝杠螺母运动的距离范围,防止光栅随之转动到饱和处,致使光栅卡死或改变光栅固定位置,从而影响光谱仪光信号的一致性。第二,防止驱动电路失灵,电机失去控制的情况下,实现终端强制制动,以免造成光谱仪其他电路或机械零件的损坏;第三,右侧霍尔开关的主要作用是寻找机械零点,使得扫描初始波长为 1 200 nm。霍尔开关管脚示意图与硬件原理图如图 5。

上拉电阻必须连接在电源和输出引脚之间,上拉电阻的阻值一般是 1-10 kΩ。最小上拉电阻是霍尔开关最大输出电流和电源的函数。本电路中上拉阻值为 4.7 kΩ。如果上拉电阻过大,那么即使外部的磁场是磁关断状态,电路的输出也将

是低电平。这是因为上拉电阻和传感器输出引脚发生电流泄露,严重情况下,会大幅降低输出电压,使其失去逻辑功能。

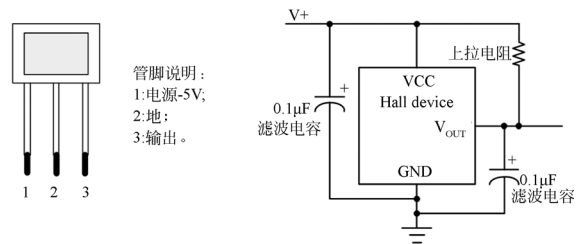


图 5 霍尔开关管脚示意图与硬件原理图

Fig. 5 Diagram of Hall switch pin and hardware schematic

3 直流伺服系统控制算法实现

3.1 主程序

主程序的功能在于初始化 DSP 的各个寄存器、开启中断、设置中断,作为后台程序,实现对整个闭环系统任务的调度和状态管理。程序流程图如图 6:



图 6 主程序流程图

Fig. 6 Flowchart of main program

3.2 前馈校正的 PID 算法

直流永磁力矩电机动态过程中电气过渡过程和机械过渡过程同时存在,两者交叠在一起,相互影响^[10]。其过渡过程的机电动力学方程组:

$$\begin{cases} e = C_e \Phi \omega \\ L \frac{di}{dt} + C_T \Phi \omega + Ri = U \\ T_{em} = C_T \Phi i \\ J \frac{d\omega}{dt} + k\omega + T_L = C_T \Phi i \end{cases}, \quad (1)$$

其中 U, i, e, T_{em}, T_L 分别表示电压、电流、感应电动势、电磁转矩瞬时值和折合负载转矩; C_T, C_e 分别表示电动势常数、电磁力矩常数; J, L, k 分别表示折合到电机轴上的转动惯量, 电动机电感和电机的旋转摩擦系数。将上述(1)的微分方程进行 Laplace 变换, 并令初始条件为零, 转换后的方程组如下:

$$\begin{cases} E(s) = C_T \Phi \omega(s) = K_t \Omega(s) \\ U(s) - E(s) = (Ls + R) I(s) \\ T_{em}(s) = C_T \Phi I(s) = K_t I(s) \\ T_{em}(s) - T_L(s) = (Js + k) \Omega(s) \end{cases}, \quad (2)$$

其中以电枢电压 $U(s)$ 为输入量, 以折算到电动机轴上的总的负载转矩 $T_L(s)$ 视为扰动量输入, 以电动机输出轴角速度 $\Omega(s)$ 为输入量, 同时考虑到电动机输出轴的转角 $\theta(s)$ 是转速 $\Omega(s)$ 的积分, 于是由式(2)可得永磁直流力矩电动机的动态方程框图, 如图 7 所示。

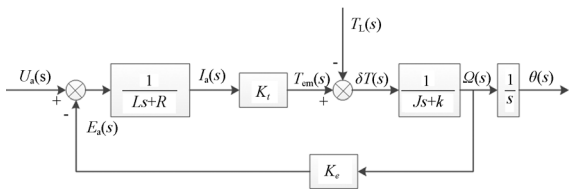


图 7 动态方程框图

Fig. 7 Dynamic equation block diagram

令负载转矩 $T_L(s) = 0$, 可以得到电机在给定电枢电压 $U(s)$ 作用下的角位移 $\theta(s)$ 之间的传递函数, 表示为:

$$G(s) = \frac{K_t}{\tau_m \tau_e R k s^3 + (\tau_m + \tau_e) R k s^2 + R k s + K_e K_t}, \quad (3)$$

式中 τ_m 为机械时间常数, $\tau_m = \frac{J}{k}$; τ_e 为电气时间常数, $\tau_e = \frac{L}{R}$ 。

本文中位置伺服系统不但要求有良好的快速响应特性, 而且跟踪误差要尽可能小^[11-13]。PID 控制器作为普适性的控制算法, 控制作用由偏差产生 $E(s) = E_1(s)H(s)$, 即闭环反馈系统是靠误差来减少误差的^[14]。此外, 采用的脉宽调制调速方法, 使得系统存在很大的相位滞后。而且由于电机位置与丝杠轴线的同轴度偏差, 使得负载转矩 $T_L(s)$ 不再是恒定转矩, 存在负载之外的周

期性扰动。因此本文采用了前馈位置控制算法来控制, 不依靠系统偏差, 在干扰引起误差之前就对它进行近似补偿, 及时消除不同轴度引入干扰的影响。

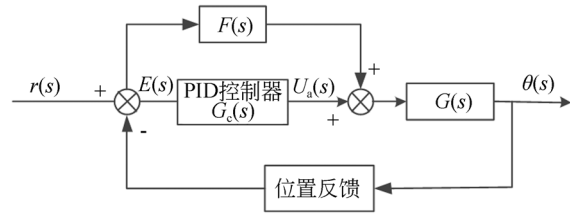


图 8 前馈环节

Fig. 8 Feed-forward loop

加入前馈环节 $F(s)$ 后, 如图 8 所示, 即:

$$\begin{aligned} \theta(s) &= G_c(s)G(s)E(s) + F(s)G(s)E(s) = \\ &\theta_1(s) + \theta_2(s) \end{aligned}, \quad (4)$$

式(4)表示前馈补偿为开环补偿, 相当于系统通过 $F(s)G(s)$ 增加了一个输出 $\theta_2(s)$, 以补偿原来的误差。等效闭环传递函数为:

$$G_F(s) = \frac{\theta(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G(s) + F(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}, \quad (5)$$

当 $F(s) = 1/G(s)$ 时, $G_F(s) = 1$, 即 $\theta(s) = r(s)$, 所以 $E(s) = 0$ 。此时为全补偿的前馈校正, 但系统的稳定性没有受到影响, 因为特征方程仍然是 $1 + G_c(s)G(s) = 0$ 。在绝大多数情况下, 不要求实现全补偿, 只要通过部分补偿将系统的误差减小至允许范围内便可^[14], 本系统也如此。

4 仿真与实验验证

4.1 MATLAB/Simulink 仿真

Simulink 是一个在 MATLAB 下实现动态系统建模、仿真与分析的仿真集成环境。前馈校正是一种开环校正方式, 不会改变系统的闭环特性。图 9 为利用 Simulink 仿真得到的阶跃响应曲线。上升时间为 94.2 ms, 峰值时间为 193 ms, 系统最大超调量为 6%。

4.2 实验验证及数据分析

前文可知, 角位移控制系统角位移进给量为 3.6° , 精度设计为 0.15° 。磁编码器输出 14 位数字信号, 等分 360° , 每一个角度对应 $0 \sim 16383$ 间的一个数值。1LSB 相当于 0.0219° , 3.6° 对应

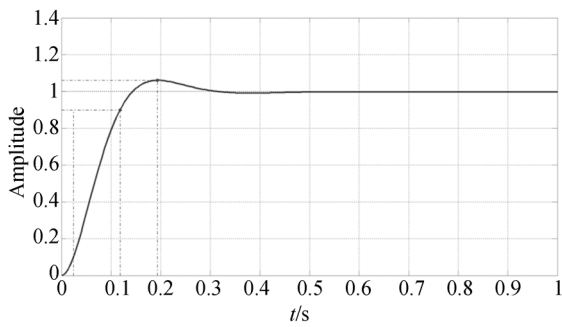


图 9 单位阶跃响应曲线

Fig. 9 Unit step response curve

于绝对角度 164。由于磁编码器精度最高达到 0.05° , 因此令 $\gamma = 3 \times 0.0219^\circ = 0.0657^\circ > 0.05^\circ$ 作为最小角度单位标量, 即 3 个绝对位置。控制量阈值计算公式为: $\epsilon = \text{角位移实际值 } \theta - \text{角位移设定值 } r$ 。其大小设置为 $[-3\gamma, +3\gamma]$ 。

磁编码器为绝对式编码器, 在软件控制实现过程中, 角位移偏差值以及角位移控制阈值均采用绝对角度值编写程序以及采集数据, 因此角位移进给量对应的绝对角度值为 161~167, 即绝对角度值落入 $[161, 167]$ 中就满足相应精度 $3.6^\circ \pm 0.15^\circ$ 。

利用设计的闭环位置控制系统搭建实验平台, 安装到光谱仪器上进行调试检验, 以及验证实验。调试平台完成如下动作: 初始化光零位置(连杆垂直于丝杠)、扫描 1 200~2 500 nm 波长点、停车停止扫描且返回起始点。由上述波长段可知, 测试实验中至少需要连续完成 1 300 次 3.6° 的角位移进给才能实现 1 200~2 500 nm 波长的扫描。实验过程中, 利用 CCS 软件, 随机选取 1 000 次连续进给下的角位移, 保存到相应文件。对数据分析如下。

表 1 100 点累积和 Σ 分析表

Tab. 1 Analysis table of 100 points cumulative sum

次数	连续 100 点	绝对 角度和	100 点角度和 $\sum_{i=1,2,3,4,5}$	差值 $\sum_{i=1,2,3,4,5} - 360^\circ$
1	1-100	16 255	357.17	-2.83
2	101-200	16 429	360.99	+0.99
3	201-300	16 401	360.37	+0.37
4	301-400	16 415	360.68	+0.68
5	401-500	16 386	360.04	+0.04
6	501-600	16 405	360.46	+0.46

表 2 补偿后, 100 点累积和 Σ 分析表

Tab. 2 Analysis table of 100 points cumulative sum after compensation

次数	连续 100 点	绝对 角度和	100 点角度和 $\sum_{i=1,2,3,4,5}$	差值 $\sum_{i=1,2,3,4,5} - 360^\circ$
1	1-100	16 332	358.85	-1.14
2	101-200	16 379	359.89	-0.11
3	201-300	16 397	360.29	+0.29
4	301-400	16 396	360.26	+0.26
5	401-500	16 390	360.15	+0.15
6	501-600	16 371	359.71	-0.29

利用 MATLAB 绘制电机启动后 1 000 次进给下角位移量散点图, 观察 1 000 次数据分布情况, 包含纵轴角度分布以及横轴分布情况, 如图 10 所示。

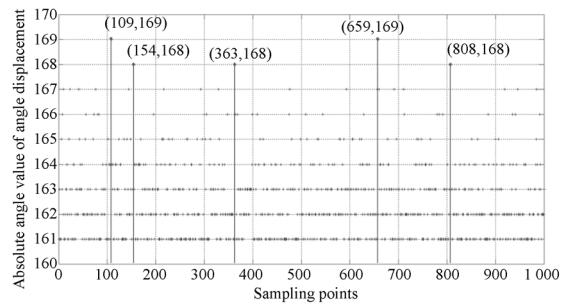


图 10 实验散点图

Fig. 10 Scatter plot diagram

实验测试结果表明: 在纵轴上, 99.70% 以上的进给角位移处于 $[161, 167]$ ($3.515^\circ \sim 3.75^\circ$) 之间; 在横轴上, 可以发现每隔 50 次进给(电机转动 180°), 就会出现一次角位移大点。通过分析机械系统可知, 横轴上周期性变化的现象出现的原因是电机轴中心线和丝杠中心线存在不同轴度, 在不同轴度引起的负载扭矩最大点处产生超阈值点。尽管采用了前馈校正补偿扰动, 但由于扰动无法实时准确得到, 仍会存在数据大点, 影响系统的整体精度。

继续分析上述数据可知, 区间 $[161, 167]$ 内大部分点集中在区间 $[161, 164]$, 而在 $[165, 167]$ 的较稀疏。角位移控制系统的最理想控制结果: 电机转动一圈后又回到起始位置。理论上, 电机带动丝杠进给 100 次, 电机转动一圈, 电机回到起点。但实际上电机并没有达到理想的控制结果,

而是小于或者大于 360° 。从上组 1 000 个数据中,选取了连续进给 100 次,将 100 次角位移进行叠加。最终结果如下表 1 所示。100 点角度和 \sum_i 无规则的分布,总是大于 360° 或者小于 360° ,即系统闭环只是在每一次进给上实现了闭环。由此可知,电机每转动一圈将产生累计误差,即电机并没有回到起始位置。

因此,当电机进给 1 300 次,电机转动将远不足或远超 13 圈,最终的累积误差无法预估,因此在实验室光谱仪电机和丝杠安装位置固定而无法更改调整的条件下,针对上文中的两种现象,提出了一种具有针对性的软件补偿方案——分段控制的补偿算法,使得系统除了在单次进给中闭环,也在单圈进给中实现校正补偿。

具体补偿方案如下:每隔 100 次进给校验 100 点角位移和 \sum_i ,在以后 100 次进给中补偿该误差。当前 100 次 $\sum_i > 360^\circ$ 时,后 100 次进给中的第 45~55 次进给的控制过程中,适当减小角位移设定值 r ;当前 100 次 $\sum_i < 360^\circ$ 时,后 100 次进给中的第 45~55 次进给的控制过程中,适当增大角位移设定值 r 。补偿方案流程图如图 11 所示。

依据以上补偿方案进行实验,下称补偿实验,同样测得 1 000 次进给数据中,单次进给的全部数据均满足设定值为 164 时的阈值范围[161,

167],角度区间为[$3.537 6^\circ, 3.669 4^\circ$],不存在大点或者野点。平均值为 $3.606 1^\circ$,均方值为 $0.026 2^\circ$ 。本次实验数据如表 2。分析得:电机转动一圈后,控制器依据 \sum_i 的大小,作出响应,使得之

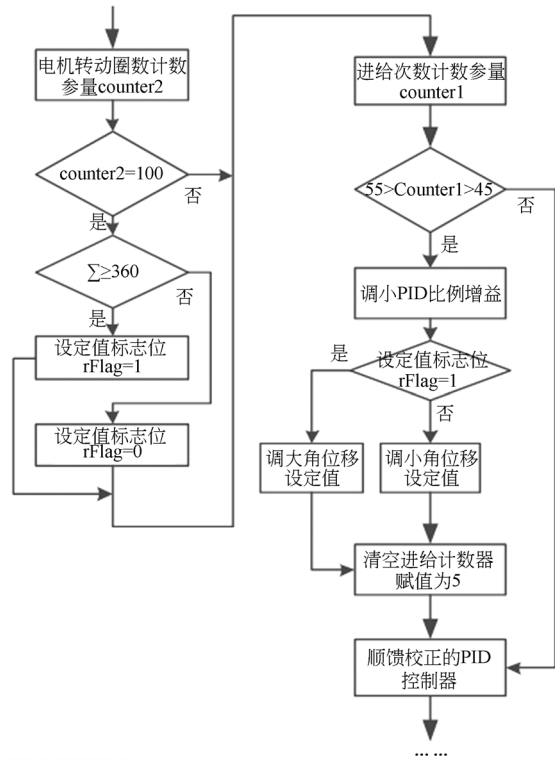


图 11 补偿方案流程图

Fig. 11 Compensatory method flow chart

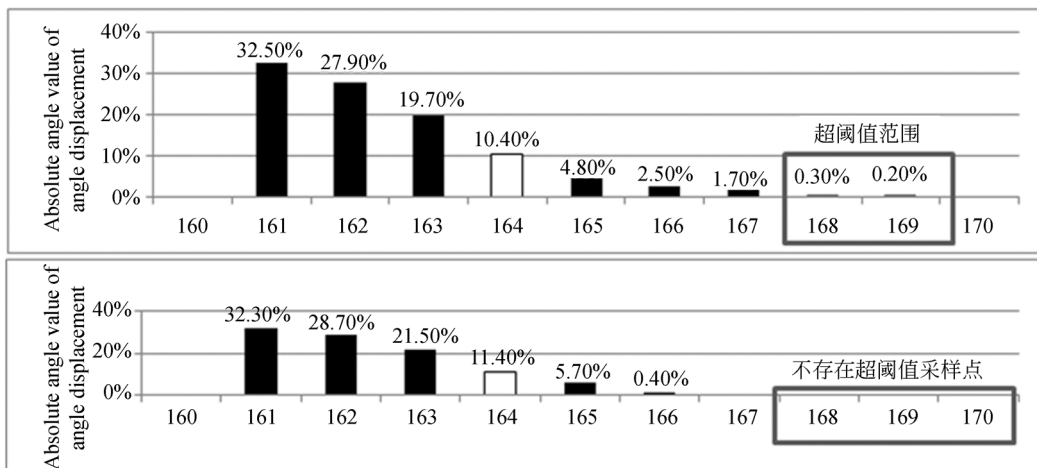


图 12 两组实验数据柱状图

Fig. 12 Two groups column of experimental data

后的进给角度和 \sum_i 有相反的变化,从而累积误差得到优化。补偿后,电机启动后 1 000 次进给角位移量不存在超阈值点,100 点累积和 \sum 分析表如表 2。

可知,电机第一、二圈略小于 360° ,控制作用下,第三圈大于 360° ,第四、五圈也大于 360° 。之后补偿算法继续作用,第六圈又小于 360° 。如此反复进行。

将前后两组实验数据,形成柱状图,进行整理和对比分析。如图 12 所示为两组实验数据柱状图分布,可以明显看出,补偿后的数据分散优于补偿之前,且不存在超出阈值范围的点。充分表明:该补偿方案能够较好地抑制不同轴度引起的干扰。图 13 为表 1 和表 2 中差值($\sum_i - 360^\circ$)列数据折线图,由图中清晰可知,补偿后电机单圈差值分布均匀,波动小,补偿效果良好。

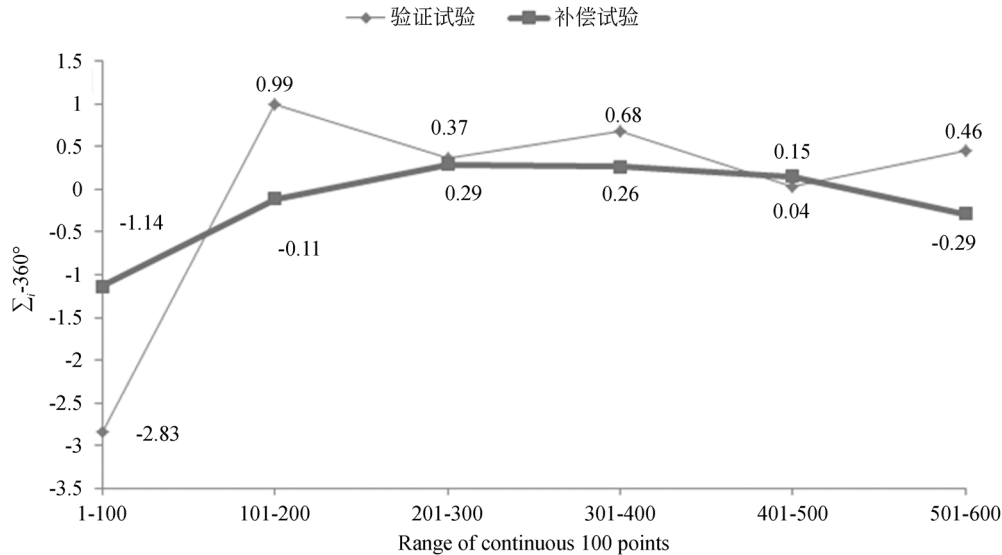


图 13 表 1 和表 2 中差值($\sum_i - 360^\circ$)列数据折线图

Fig. 13 Line chart of D-value column data in Tab. 1 and Tab. 2

5 结 论

本文根据光谱仪器实验现有光栅扫描型光谱仪机械系统的开环步进驱动机构存在的问题;开环下无法准确得知角位移进给精度,对于是否丢步无从可知。具有针对性地设计了基于 DSP 的直流电机位置闭环控制系统,采用了可重构模块化设计^[2],首先进行了总体设计,并介绍了转子角位移检测电路、力矩电机驱动电路、限位电路;然

后针对本系统提出了适用的前馈校正的 PID 控制算法,最后通过仿真和实验检验了所设计系统的稳定性和精度,角位移精度可达 0.15° ;给出了由于电机轴线和丝杠轴线同轴度引起的周期性干扰的补偿方法。本闭环位置控制系统,控制精度高、运行稳定可靠^[9],完全可以替换开环步进系统,作为光谱仪直流机械系统,融合与完善电路系统和软件系统后,采集光谱数据与步进系统形光谱数据成对比,对提高光谱仪的稳定性具有重大意义。

参考文献:

[1] 陆婉珍. 近红外光谱技术进展[J]. 现代科学仪器,

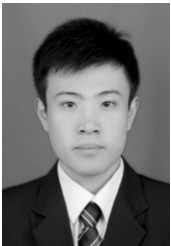
2006, 5: 5.

LU W ZH. Near infrared spectrum technology progress[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006, 5: 5.

- [2] 滕飞. PISA_S型光谱仪器调试平台设计[D]. 长春:吉林大学,2013.
TENG F. *Design of PISA_S spectral instrument debugging platform* [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [3] 王智宏,林君,武子玉,等. 便携式矿物近红外光谱仪器的研制[J]. 仪器仪表学报,2005,26(11):1136-1138.
WANG ZH H, LIN J, WU Z Y, *et al.*. The development of the portable mineral near infrared spectrum instrument[J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2005,26(11):1136-1138. (in Chinese)
- [4] 王智宏,林君,武子玉,等. 便携式近红外光谱矿物分析仪分光系统研制[J]. 岩矿测试,2005,2(3):59-61.
WANG ZH H, LIN J, WU Z Y, *et al.*. Portable near infrared spectrum mineral analyzer spectroscopic system is being developed [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2005,2(3):59-61. (in Chinese)
- [5] 邓小青. 多谱段平场便携式近红外光谱仪数据采集系统[D]. 长春:吉林大学,2012.
DENG X Q. *Multispectral flat-field portable near infrared spectrometer data acquisition system*[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [6] 李发海,王岩. 电机与拖动基础[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
LI F H, WANG Y. *Foundation of Electrical and Drag* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 李汉舟,杨世超. 基于模糊PID的直流力矩电机转速控制[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(6):79-80.
LI H ZH, YANG SH CH. DC torque motor based on fuzzy PID speed control[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004,12(6):79-80. (in Chinese)
- [8] 王力,杜坤梅,胡博,等. 基于磁编码器永磁同步电动机转速及位置的检测[J]. 哈尔滨理工大学学报,2007,12(6):80-83.
WANG L, DU K M, HU B, *et al.*. Speed and position detection of permanent magnet synchronous motor based on magnetic encoder[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology University*, 2007, 12(6):80-83. (in Chinese)
- [9] 褚新惠,官洪运,单一帆,等. 基于DSP的无刷直流电机调速系统[J]. 微计算机信息,2007(8):175-176.
CHU X H, GUAN H Y, DAN Y F, *et al.*. Brushless DC motor speed control system based on DSP [J]. *Micro Computer Information*, 2007(8):175-176. (in Chinese)
- [10] 黄科. 力矩电机动力学性能测试研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
HUANG K. *Torque motor dynamic performance test research*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 蒋锐权,王小椿. 数字前馈位置控制算法的研究[J]. 机械与电子,1998(6):36-37.
JIANG R Q, WANG X C. Research of digital feedforward position control algorithm [J]. *Mechanical and Electronic*, 1998(6):36-37. (in Chinese)
- [12] 舒志兵,严彩忠. 基于DSP56F805的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 机械与电子,2006(12):34-36.
SHU ZH B, YAN C ZH. The permanent magnet synchronous motor position servo system based on DSP56F805[J]. *Mechanical and Electronic*, 2006(12):34-36. (in Chinese)
- [13] 宋洋,叶秀芬. 直流电机位置伺服系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2009(2):67-70.
SONG Y, YE X F. Design of DC motor position servo system[J]. *Industrial Instrumentation and Automation Devices*, 2009(2):67-70. (in Chinese)
- [14] 杨叔子,杨克冲. 机械工程控制基础(第六版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2012.
YANG SH Z, YANG K CH. *Mechanical Engineering Control Basis* [M]. 6th edition, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [15] CHENG P J, CHENG CH H, TUNG CH CH. Design of DC motor's torque control using DSP[J]. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 2009,306:1197-1207.
- [16] 范大鹏,张智永,范世琦,等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):673-680.
FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Analysis and research of photoelectric stable tracking mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):673-680. (in Chinese)
- [17] 张智永,范大鹏,范世琦. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. 光学精密工程,2006,14(4):681-688.
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X, *et al.*.

- Control system design of photoelectric stable tracking mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):681-688. (in Chinese)
- [18] 范大鵬. 《光电稳定伺服机构控制技术》专题文章导读[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):673.
FAN D P. *The photoelectric stabilized servo control technology feature article reading* [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):673. (in Chinese)
- [19] DUAN H B, WANG D B, YU X F. Realization of nonlinear PID with feed-forward controller for 3-DOF flight simulator and hardware-in-the-loop simulation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(2): 342-345.
- [20] RGAB O, YU D L, GOMM J B. Polymer electrolyte membrane fuel cell control with feed-forward and feedback strategy[J]. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2010, 2(10).
- [21] 孙玉洋. 近红外光源稳定控制系统及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
SUN Y Y. *Near infrared light source stability control system and application research* [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [22] 王智宏, 张福东, 滕飞, 等. 基于近红外波长组合快速检测油页岩含油率[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):371-377.
WANG ZH H, ZHANG F D, TENG F, *et al.*. Rapid detection of shale oil content based on the near infrared wavelength combination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):371-377.
- [23] 王智宏, 刘杰, 孙玉洋, 等. 近红外等效光谱测量方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013(4):963-967.
WANG ZH H, LIU J, SUN Y Y, *et al.*. Research of Near infrared equivalent spectrum measurement method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013(4):963-967.

作者简介:



刘泽昆(1991—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 2014年于烟台大学获得学士学位, 主要从事自动控制、光谱分析仪器及应用技术等方面的研究。E-mail: mrluizekun@163.com



王智宏(1968—), 女, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 1999年于吉林大学(原吉林工业大学)获得硕士学位, 1990年于天津大学获得学士学位, 2005年于吉林大学获得博士学位, 主要从事光谱分析仪器及应用技术方面的研究。E-mail: zhwang@jlu.edu.cn

导师简介:



刘杰(1969—), 女, 吉林长春人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 1991年于吉林大学(原吉林工业大学)获得学士学位, 1994年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事光电传感仪器、自动控制方面的研究。E-mail: L_jie@jlu.edu.cn