

基于 DSP 的高精度陀螺稳定平台伺服控制器研制

Research on DSP-based High Precise Servo Controller for Gyro Stabilization Platform

陈冬冬 李奇 杨蒲

(东南大学自动化学院,江苏 南京 210096)

摘要: 设计了一个基于 TMS320F2812 DSP 的陀螺稳定平台伺服控制器,详细介绍了系统的软硬件设计。该控制器充分利用了 DSP 芯片周边接口丰富、运算速度快的特点,使所设计的系统硬件结构简单;将摄像机的位置和速度采样值作为反馈值组成位置和速度闭环,摄像机获得的目标位置作为给定值,控制器速度环采用模糊控制。实验结果表明,该系统硬件结构简单、稳定性好,具有良好的稳态和动态性能,能够满足稳定平台的性能要求。

关键词: 陀螺稳定平台 模糊控制 数字信号处理器 伺服控制 软硬件设计

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Abstract: A servo controller based on TMS320F2812 DSP is designed for gyro stabilization platform. The design of hardware and software for the system is introduced in detail. The features of DSP chip, i. e. wealthy peripherals and high speed operations are fully adopted in the controller; so the hardware structure of the system designed is simple. The sampling values of the position and speed of the camera are used as the feedback to constitute the position and speed closed loop; the position of target captured by the camera is used as the set point. The fuzzy control is used in speed loop. The results of experiments indicate that the hardware structure of system is simple and stable, the system features excellent stability and dynamic performance, it is able to satisfy the requirements of stabilization platform.

Keywords: Gyro stabilization platform Fuzzy control Digital signal processor Servo control Software/Hardware design

0 引言

近年来,随着数字信号处理技术和数字信号处理器的发展,陀螺稳定平台技术广泛应用于制导、车载武器等军事领域和公安消防、环境监测等民用领域。其能够有效地隔离扰动以保证视轴在惯性空间内的稳定;实现自动/手动搜索、目标自动跟踪(目标可以是图像处理得到,也可以是通过上位机给出仿真信号)等^[2]。因此,稳定平台性能的好坏直接影响到跟踪系统的性能,是跟踪系统的核心技术部分。本文设计的陀螺稳定平台控制器以 TI 公司推出的 TMS320F2812 芯片为核心,充分发挥了 DSP 的高速运算能力和电机高效控制的优点,实验结果表明该稳定平台具有良好的性能。

1 稳定平台结构

陀螺稳定平台系统结构如图 1 所示。台体结构采用三轴正交的框架式结构,由内而外依次是方位/俯仰/横滚框。三轴结构相似,均由负载、执行器(力矩

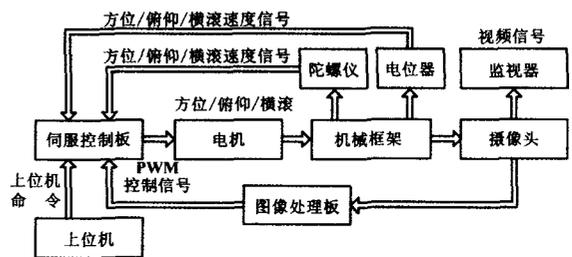


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 The sketch of the systematic structure

电机)、测量元件(速率陀螺和电位器)组成。平台采用速度陀螺随动平台稳定方案,即将光学镜头摄像机与陀螺仪均安装在由力矩电机驱动的框架上。这种结构使摄像机和陀螺仪速度一致,且都处于受电机直接推动的框架上,系统精度高、快速性好。伺服控制板可以接受上位机命令和图像板的目标偏差信号,通过控制方位/俯仰/横滚三轴电机来控制摄像头的工作区域,陀螺仪用于检测摄像机的运动速度,电位器用于检测摄像机的运动位置,当检测到摄像机处于框架边界时强制电机速度为零,以达到保护硬件的作用。

2 伺服控制板硬件设计

陀螺稳定平台系统中,伺服控制板是核心部分。

修改稿收到日期:2008-05-27。

第一作者陈冬冬,男,1984年生,现为东南大学自动化专业在读硕士研究生;主要从事控制理论与控制工程的研究。

伺服控制板在稳定平台中需要进行实时数据采样,完成控制量的实时计算和输出,以及与图像板间的通信,所以处理器必须具备很强的处理能力。另外,系统处于复杂的干扰环境中,所以必须要求控制板具有很好的抗干扰能力。

2.1 芯片选择

芯片选择主要从运算速度、运算精度、片内外设资源等方面考虑。目前,同类系统多采用单片机或TMS320LF2407 DSP 作为主控芯片的选择,而本系统采用 TI 公司新推出的 TMS320F2812 作为主控芯片。

与单片机相比, TMS320F2812 DSP 运算速度更快^[1]。采用改进的哈佛结构可以同时执行指令和读取数据,特别是该 DSP 芯片专为控制系统设计,具有更高的集成度,集成了 A/D 转换器、串口通信接口、带有 PWM 波形产生的事件管理器等模块。相比单片机,该 DSP 可以很大程度地减少外围电路的设计。

而 TMS320F2812 DSP 与 TMS320LF2407 DSP 相比,2812 芯片的 CPU 为 32 位定点处理器,最高频率可以达到 150 MHz,这种高速的运算能力可以实现自适应控制、卡尔曼滤波等复杂算法而不会影响系统控制的响应速度;具有 128 kB 的 Flash 容量和更大的外扩数据程序空间;具有 12 位的 A/D 转换器,通过软件校正算法可以有更高精度的转换;2812 芯片有 2 个具有缓冲单元的串口通信接口。所以对于控制系统而言, TMS320F2812 比 TMS320F2407 更加有效。

综上所述,伺服控制板采用 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 芯片为主控芯片。

2.2 伺服控制板硬件组成

伺服控制板硬件结构示意图如图 2 所示。

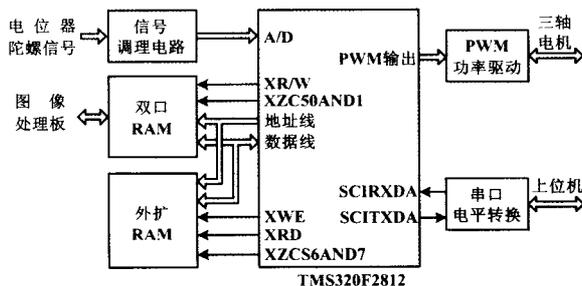


图 2 主要硬件结构

Fig. 2 Structure of main hardware

伺服控制板主要功能包括:①完成与图像处理板之间的通信,获取目标偏差信号,实现目标跟踪、自动搜索和手动搜索功能;②获取上位机命令信号,实现系统的性能测试和跟踪仿真;③对方位/俯仰/横滚三轴的陀螺、电位器信号进行采样,作为控制的反馈信号;

④控制电机在限定的区域内按所需的速度运行。

2.2.1 电源设计

TMS320F2812 DSP 对电源模块的上电顺序要求比较严格,要求 I/O 先上电,然后是内核上电。本设计电源芯片采用 TI 公司的 TPS767D318,设计中采用场效应管 IRF540 控制上电顺序,具体电路如图 3 所示。TPS767D318 的输出电流为 0 mA ~ 1 A,能将 5 V 电压转换成 3.3 V 和 1.8 V 双电压输出,能够满足 DSP 对供电电源的要求。此外,该芯片还带有上电复位功能,可以产生一个时间为 200 ms 的低电平复位信号。

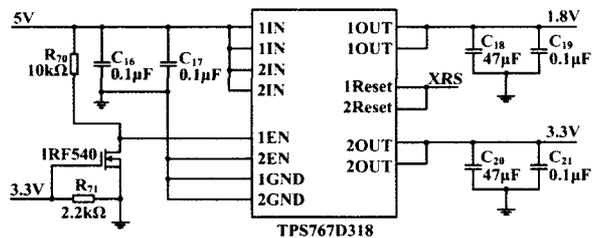


图 3 电源电路

Fig. 3 Power circuit

2.2.2 信号调理电路设计

伺服控制板对陀螺、电位器信号的采样采用片内的 ADC 转换模块, TMS320F2812 的 A/D 输入信号的范围为 0 ~ 3 V,而陀螺仪的输出信号是 -15 ~ +15 V,电位器的输出信号是 0 ~ 5 V,所以在采样陀螺和电位器的信号前必须对他们进行调理,使电压控制在 0 ~ 3 V 之间。由于 3 路陀螺信号和 3 路电位器信号的调理原理一样,现以一路陀螺信号的调理为例,介绍信号调理电路的设计。方位轴陀螺信号调理电路如图 4 所示。电路中 $V_{CC} = +3.0 V$ 由 TI 公司的精密电压基准芯片 LM4040 产生,调理电路的运算放大器均采用 RAIL-TO-RAIL 的精密运放 TLC2274,这样可以避免电压放大的死区问题。电路的最后一级是低通滤波。

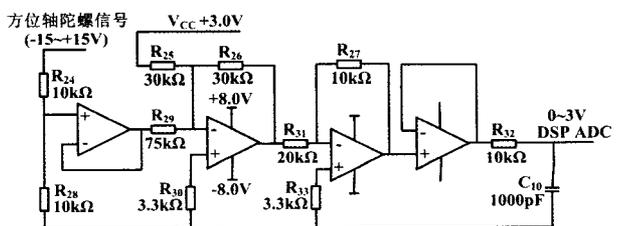


图 4 信号调理电路

Fig. 4 Signal conditioning circuit

2.2.3 PWM 功率驱动电路设计

伺服控制板对电机的控制采用 H 型双极性可逆 PWM 驱动控制^[7],由 TMS320F2812 DSP 的 EVA 和 EVB 两个事件管理器的比较单元产生 PWM 波形。电

机控制的功率驱动芯片采用 L6203,以方位轴电机的控制为例,用比较单元 4 产生的一对 PWM 输出与 L6203 的 IN₁ 和 IN₂ 连接控制电机的正反转。当 IN₁ 为逻辑 1 的时间大于 IN₂ 为逻辑 1 的时间,则电机正转,反之则反转;当两者的时间相等,即各占 50% 周期时,电机的转速为零,通过 L6203 的 ENABLE 与 DSP 的 I/O 口连接来控制方位电机使能。控制电机时必须禁止同一桥臂上的 2 个开关管出现直通的情况,因为这会导致短路情况的发生,所以必须在产生 PWM 波形时加入死区时间。PWM 功率驱动电路如图 5 所示。

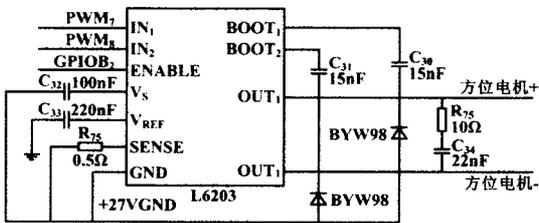


图 5 PWM 功率驱动电路

Fig. 5 Circuit of PWM power driver

2.2.4 双口 RAM 电路设计

由于图像处理板每隔 40 ms 向伺服控制板发送一次数据,所以对于它们之间的通信速度要求较高,故本设计中采用双口 RAM 和图像处理板进行数据通信,其最高读写速率可以达到 20 ns。由于双口 RAM 的工作电压为 5 V,而 TMS320F2812 的工作电压是 3.3 V,所以在和双口 RAM 连接前必须考虑电平问题。本设计中采用 SN74LVTH16245A 和 SN74LVTH245A 芯片对地址线 and 数据线进行电平转换。该芯片采用 3.3 V 单电源供电,但是仍具有 5 V 的容限接口,双口 RAM 通信电路如图 6 所示。由于数据线的传输是双向的,所以使用读写信号控制 SN74LVTH245A 中数据线的数据传输方向,双口 RAM 被映射到 TMS320F2812 的外部存储器接口 0 区。

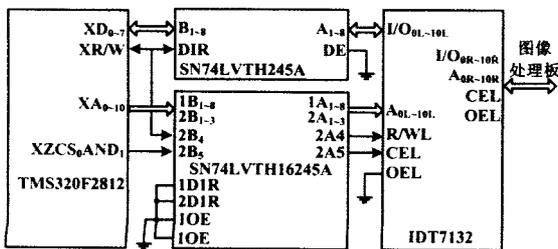


图 6 双口 RAM 通信电路

Fig. 6 Communication circuit of dual-port RAM

2.2.5 串口电平转换电路设计

TMS320F2812 片内串行通信接口 (SCI) 模块的电平标准属于 TTL 标准,而上位机采用 RS-232 串行接口

标准^[6]。所以 DSP 与上位机的通信之间必须加电平转换电路。本设计中采用符合 RS-232 串口标准的驱动芯片 MAX3232 实现,MAX3232 芯片功耗低,采用 3.3 V 供电,接口电路如图 7 所示。综上所述,本伺服控制板的设计充分利用了 TMS320F2812DSP 的资源,减少了外围设计的工作,提高了系统的处理速度和系统的稳定性。

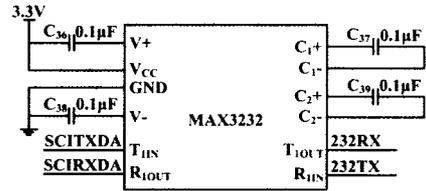


图 7 RS-232 接口电路

Fig. 7 RS-232 interface circuit

3 稳定平台控制器的软件设计

3.1 系统控制结构

稳定平台单轴的控制结构如图 8 所示。平台由方位、俯仰和横滚 3 个轴向的分系统组成,3 个分系统控制结构基本相同,都采用速度环和位置环控制,其中内环为速度环,外环为位置环。图中平台负载装有三轴的电机、陀螺仪、定位器和 CCD 摄像头,速度环误差由位置环输出值和陀螺测速值的差值给出,位置环误差由图像处理给出,目标位置由 CCD 摄像头获得。

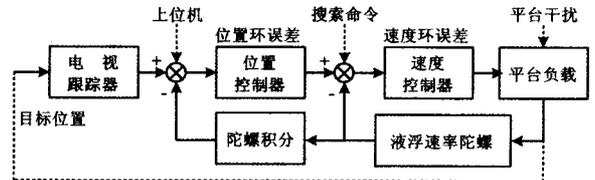


图 8 方位轴控制结构示意图

Fig. 8 The structure sketch of control for direction axis

当有扰动力矩作用在稳定平台上时,所引起的稳定输出轴的角运动速度被陀螺仪所检测,产生对应的输出电压信号,它经过和指令信号比较得到速度环误差,误差信号通过补偿和电机控制,在电机轴上产生控制力矩,该控制力矩和扰动力矩大小相等、方向相反,结果补偿扰动力矩的影响,达到稳定隔离的效果。

3.2 系统软件和算法实现

控制器需要两个定时中断,一个定时中断采样速率陀螺和电位器的值,得到速度环的反馈;另一个定时中断获取通过双口 RAM 传递的图像误差作为位置环的给定值。另外,需要一个串口接收中断获取上位机给定的命令。控制器的软件结构主要由 3 个不同优先级的中断组成:优先级最高的中断 1 每 30 μs 产生一

次,用于采样陀螺、定位器的值,速度环控制计算和 PWM 的更新;次优先级的中断 2 每 200 μs 产生一次,用于获取图像误差,位置环控制计算,消除陀螺积分带来的误差;低优先级的中断 3 由于串口接收中断,获取上位机的命令。

伺服控制器的位置环和速度环都采用积分分离的 PID 算法,常规的 PID 算法如式(1)所示。

$$u(n) = k_p \left\{ e(n) + k_i \sum_{j=0}^{j=n} e(j)T + k_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \right\} \quad (1)$$

式中: T 为采样周期; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分、微分系数; $u(n)$ 为 nT 时刻的控制量; $e(j)$ 为 jT 时刻的误差。

积分分离 PID 的算法如式(2)所示^[5],其思想是只当误差量小于某值时,才启用积分项;当误差足够大的时候,关闭积分调节输出。积分分离的采用可极大提高积分环节的控制效果。在该算法的使用中应该注意,不论误差值大小,每次伺服都应累计积分项,在误差较小时,使用积分项;在误差较大的时候不使用,而不是只在误差较大时累计积分项。

$$\begin{cases} u(n) = k_p e(n) + u_i(n) + k_p k_d \left[\frac{e(n) - e(n-1)}{T} \right] \\ u_i(n) = k_a k_p k_i \sum_{j=0}^{j=n} e(j)T, \quad k_a = \begin{cases} 0, & \text{当 } |e(n)| > e_0 \\ 1, & \text{当 } |e(n)| \leq e_0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_i(n)$ 为积分调节器输出; e_0 为误差阈值,只有在误差小于这个阈值时,积分调节器输出才被作为积分项加到 PID 控制器中。

在实际控制中,为了减少 DSP 的计算量和稳定平台运行平滑,还加入了输出限幅,故实际的控制算法如下:

$$\begin{cases} u(n) = K_1 e(n) + k_a K_2 \sum_{j=0}^{j=n} e(j)T + K_3 [e(n) - e(n-1)] \\ U(n) = \begin{cases} U_{\max}, & u(n) \geq U_{\max} \\ U(n), & U_{\min} < u(n) < U_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_1 = k_p$; $K_2 = k_p \times k_i \times T$; $K_3 = \frac{k_p \times k_d}{T}$; U_{\max} 为输出的最大值; $U(n)$ 为伺服控制器的实际输出值。

由于考虑到速度环受到电机死区特性的影响比较大^[4],低速运行时的“爬行”和换向时的“平顶”等情况比较严重,所以速度环的控制除了采用位置环的积分分离 PID 算法外,还采用了模糊控制实现电机死区的补偿^[3]。定义误差量 E 、误差变化量 EC 以及控制补偿量 U 的模糊集均为 {负小,零,正小}。建立模糊规则如表 1 所示,所以速度环的实际输出为 $U(n) + u(n) + U$ 。

表 1 模糊规则表

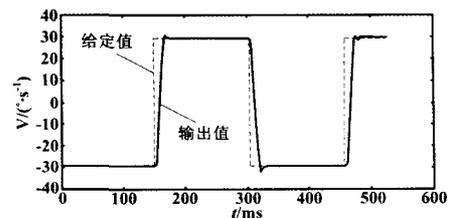
Tab.1 Fuzzy rule

U	E	EC
负小	负小	负小
负小	负小	零
零	负小	正小
负小	零	负小
零	零	零
正小	零	正小
零	正小	负小
正小	正小	零
正小	正小	正小

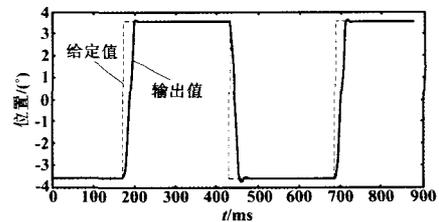
4 实验结果

伺服控制器通过脱离图像板实验,速度环和位置环的给定值都通过上位机给定,上位机程序用 VC 6.0 编写,通过串口和 DSP 进行数据交换,上位机可以向 DSP 发送手动搜索、自动搜索和目标跟踪的命令参数以及数据的保存命令,实现在线修改控制参数,而 DSP 向上位机发送控制系统的速度环和位置环的给定值和反馈值。

速度环的曲线响应是稳定平台在幅值为 29°/s 的方波下测得的,曲线如图 9(a) 所示;位置环的曲线响应是稳定平台在幅值为 3.6° 的方波下测得,曲线如图 9(b) 所示。由曲线可知道:速度环的上升时间为 8 ms,超调量为 7%,满足速度环快速调节的动态要求;位置环的上升时间为 35 ms,超调量为 3%,稳态误差为 0.1°,满足位置环稳态误差小的静态要求。



(a) 速度环响应曲线



(b) 位置环响应曲线

图 9 响应曲线

Fig.9 The response curves

(下转第 54 页)

4 炉温的采集与控制

实际炉温采集与控制系统是根据闭环负反馈系统得到的,对于自动控制的基本形式,闭环负反馈系统不仅可以应用虚拟仪器技术完成它的测量部分的功能,而且可以将虚拟仪器技术拓展到系统的控制器部分,构成一种基于虚拟仪器的测量控制系统^[4-6]。

为了便于操作人员日后对炉温数据的查询,可以将当前数据以“. bin”、“. txt”、“. excel”格式进行存盘。

对于管式加热炉,采用试凑法整定 PID 参数,得到: $K_p = 30; K_i = 2; K_d = 5$ 。考虑到实际的炉子热惯性比较大,若取较小的采样周期,炉温变化缓慢,重复运算 PID,白白耗费 CPU 资源;若采取较大的采样周期,炉温发生了变化,而此时仍未采集数据, PID 不运算,不能及时起到控制作用。所以取采样周期 $T = 1 \text{ s}$ 。

选择积分、微分加滤波的积分分离法位置式 PID 设计作为控制方法。加入 PID 控制的观察曲线如图 4 所示。

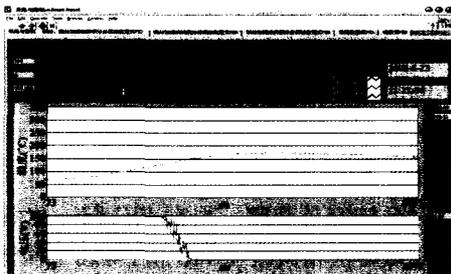


图 4 加入 PID 控制的观察曲线

Fig. 4 Observed curves with PID control added

从图 4 中的炉温观察界面可以看出,设定值为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,控制曲线的第一个波峰的峰值大约为 $173 \text{ }^\circ\text{C}$,第二个波峰的峰值大约为 $155 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由两个峰值得到曲线大约满足 4:1 的关系。系统再经过几次振荡,

达到设定值。

从实验结果可以看出,由于数据采集板卡的零点漂移的原因,使得在过渡区内, MV 值出现振荡,不能成为平滑的曲线。而在振荡区内,由于加热炉的惯性太大,使得升温不明显,需要很长时间才能升到设定值。

5 结束语

本文对管式加热炉的 PID 算法改进设计,并且针对带延迟的一阶惯性环节进行了仿真研究。研究表明,改进的 PID 算法比普通的 PID 算法更加稳定、快速地达到预期的目标值,且误差范围小,更好地使此算法应用在管式加热炉的控制应用中。通过管式加热炉平台搭建,实际检验了此改进的 PID 算法。

参考文献

- [1] 冉从容. 串级过程控制系统的抗干扰分析[J]. 北京广播电视大学学报:自然科学版,2000(4):35-36.
- [2] 张志杰. 加热炉控制系统的优化设计与应用[J]. 工业炉,2000,22(3):26-27.
- [3] 刘金波. MICONTS-32 型工业过程控制器在加热炉控制系统中的应用[J]. 自动化博览,2000(1):10-12.
- [4] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 7.1 程序设计与应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2005.
- [5] 杨乐平,李海涛,赵勇,等. LabVIEW 7.1 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [6] 张凯,郭栋. LabVIEW 7.1 虚拟仪器工程设计与开发[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [7] 冯丽辉,李琨. 工业计算机控制技术与应用(DDC&DCS)[M]. 昆明:云南科技出版社,2001.
- [8] 王士宏,周思永. 控制理论基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:168-280.
- [9] 张晋格. 计算机控制原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [10] 蒋大明,戴胜华. 自动控制原理[M]. 北京:清华大学出版社,2003:3-11.

(上接第 50 页)

5 结束语

本文从硬件和软件两个方面详细介绍了基于 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 为核心的陀螺稳定平台伺服控制器的设计,该陀螺稳定平台充分利用了 DSP 在控制电机方面的特点,所设计的控制板外围电路少、硬件稳定性好、处理速度快。通过实验证明:控制器满足了跟踪稳定平台所要求的动态和静态指标,具有良好的性能。

参考文献

- [1] 刘治钢,王军政,赵江波. 基于 DSP 三轴跟踪转台伺服控制系统

设计[J]. 微计算机信息,2006(22):170-172.

- [2] 杨海峰,姬伟. 高精度伺服稳定跟踪平台数字控制器研制[J]. 东南大学学报:自然科学版,2004,34(11):96-100.
- [3] 王健,曹秉刚,王昆,等. 基于模糊 PID 控制的导引头角跟踪系统[J]. 系统仿真学报,2004,16(6):1330-1332.
- [4] 毕永利,刘洵,葛文奇,等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程,2004,31(2):16-18.
- [5] 肖英奎,尚涛,陈殿生. 伺服系统实用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004:133-142.
- [6] 李现勇. Visual C++ 串口通信技术与工程实践[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2004:5-7.
- [7] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002:126-142.