

文章编号 1004-924X(2013)11-2844-08

数字化单杆控制系统设计

陈 健^{1,2,3*}, 高慧斌¹, 郭 劲¹, 陈贺新³

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:针对某些特殊环境中单杆控制装置与伺服系统距离远,造成电压衰减,从而影响精度等问题,设计了数字化单杆控制系统。介绍了数字化单杆控制系统的硬件设计方案,描述了主电路板设计原理;给出了数字化单杆控制系统的软件设计方案,描述了软件工作方式;最后分别综述了该系统可以实现的 3 种对外通讯方式及它们的工作原理。该单杆控制系统能够实现手柄两轴模拟电压值的 AD 采样、AD 转换和数据处理,可以直接与数字接口计算机或数字伺服控制器进行数据通讯。实验结果表明:数字化单杆控制系统的采样精度可以达到 10 bit,误差仅为 0.098%,而且能够远距离传输;基本满足实现单杆控制数字化、小型化、集成化、模块化、稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求。

关键词:单杆控制系统;单片机;数字化;无线通讯;CAN 总线通讯

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2844

Design of digital handle control system

CHEN Jian^{1,2,3*}, GAO Hui-bin¹, GUO Jin¹, CHEN He-xin³

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)
* *Corresponding author, E-mail: chenjian4500@163.com*

Abstract: A digital handle control system was established to overcome the voltage attenuation and poor accuracy come from the handle control equipment far from the servo system in a special environment. Firstly, the design scheme of the system hardware was introduced and the design theory of the main circuit was described particularly. Then, the system software and its working mode were given. Finally, three kinds of communication modes were discussed. The digital handle control system can simulate AD sampling, AD transform and data processing for voltage values by a handle level and can complete data communication with a digital computer and a digital servo controller by a RS422 serial directly. Experimental results indicate that the sampling precision of the digital handle control system can achieve 10 bit and the error is 0.098%. These results satisfy the system requirements for digitalization, miniaturization, integration, modularization, higher precision, as well as strong anti-jamming.

Key words: handle control system; Single Chip Machine(SCM); digitalization; wireless communication; CAN communication

1 引 言

单杆控制装置由手柄及制作于单杆壳体内部的机械传动部分、方位位移电位计、俯仰位移电位计构成,在伺服跟踪系统中通过人工操作向伺服系统提供位置参数,或将其位置数据提供给跟踪设备,完成目标跟踪和跟踪目标的选择,以及被跟踪目标的部位指定等。现在所使用的单杆控制装置都是由位移电位计输出的模拟电压值作为输出控制量,经过模数转换后接入到数字接口的伺服控制器中^[1-5]。

单杆广泛应用于各种类型的远程控制。一些处于特殊环境中的设备必须使用远程控制,例如处于生化实验或放射环境中的转台,单杆用来控制平台按指定的方向和速度运动,从而实现对平台的远程控制。另外,在大型经纬仪中,手动控制是一种必不可少的控制方式,单杆可用来实现手动控制^[6-9]。

在某些系统中,单杆控制装置与伺服系统距离很远,造成电压的衰减,影响了精度。同时,还有一些系统,单杆控制装置与伺服系统不能直接相连,比如机载伺服系统在飞机上,单杆控制装置在地面上,两者不能采用电缆连接,而不经处理的单杆模拟值,是不能进行无线通信传输的^[10-11]。

本文所设计的数字化单杆控制系统能够实现手柄两轴模拟电压值的 AD 采样、AD 转换和数据处理,可以直接与数字接口计算机或数字伺服控制器进行数据通讯。软件设计能够实现 10 位 AD 采样,模数转换,与数字接口计算机之间可通过 RS422 串口通讯,满足了单杆远距离传输和抗干扰能力强的特点。

2 数字化单杆控制系统设计

2.1 单杆基本原理

采用精密电位计作为敏感元件沿轴向贴在细杆件上,其电位计输出电阻变化与细杆相对变形成正比,即:

$$k = \frac{dR/R}{dl/l}. \quad (1)$$

电位计敏感栅可以看成是由细金属丝绕成的电阻,在忽略温度影响因素下,电阻值为 R 、电阻

率为 ρ 、长度为 l 、截面为 s 的电阻丝在轴向应力作用下由变形而引起电阻值变化可以表示为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s}, \quad (2)$$

式中: $ds/s = -2\mu dl/l$, μ 为泊松比,故:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}. \quad (3)$$

有研究表明,材料体积的变化是电阻率变化的决定因素,可以认为:

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dv}{v} = m \left(\frac{ds}{s} + \frac{dl}{l} \right) = m(1 - 2\mu) \frac{dl}{l}. \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)、(4)可以得:

$$k = \frac{dR/R}{dl/l} = (1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu), \quad (5)$$

式中: k 为应变灵敏度系数。为保证足够的精度和动态范围,希望 k 为常数,当 $m=1$ 时, $k=2$, 康铜(铜镍合金)具有良好特性,无论是弹性变形区还是塑性变形区它的 $k_e = k_p = 2.0$, 故康铜作为应变计材料具有有利条件。利用康铜电位计这种应变 dl/l 与电阻值变化 dR/R 的线性关系,直接使单杆的位移量转换为控制跟踪器件的电量。图 1 所示为单杆原理示意图。将两组电位计沿单杆轴向互为 90° 分布,其中一组垂直于 X 轴控制方位,一组垂直于 Y 轴控制俯仰,4 个电位计组成电桥,当操作手在任意方向作用于杆顶端以推力时,在 X 、 Y 方向产生 2 个分力,引起杆子表面产生拉伸或压缩变形,贴在表面上 2 对电位计电阻值同时发生相应变化,此电阻变化量经过桥路转换成对俯仰和方位控制的模拟电量,对跟踪系统速度环进行控制从而实现光电经纬仪的手动跟踪。操作

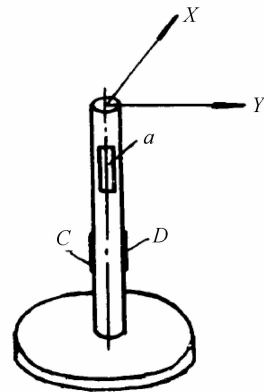


图 1 单杆原理示意图

Fig. 1 Sketch of principle of handle

手可根据观察望远镜中观察目标实际飞行速度与方向,自由地提动单杆,掌握好单杆的位移量和位移方向可以获得良好的跟踪效果。

2.2 系统硬件设计

单片机包括下述功能模块:

(1)系统设置模块:进行系统设置,包括振荡器基准频率的设置、单片机 2 个模拟采样端口的设置,定时器的初始化设置和定时器中断频率设置。

(2)数据采集模块:采集方位位移电位计和俯仰位移电位计输出的两轴模拟电压值并将其存储于单片机内部的寄存器组中,等待 AD 转换中断、定时器中断。

(3)AD 转换中断模块:当 AD 中断信号到来,取出寄存器组存储的数据并进行滤波处理得到数字化控制量;然后将得到的数字化控制量数据按照通讯协议设置双帧头和异或和帧尾。

(4)定时器中断模块:当定时器中断信号到来,将 AD 转换中断模块处理好的有效数据发送到外部设备。

(5)主电路工作原理:主电路选用 dsPIC30F4011 单片机作为处理器。此种型号的单片机在工程中使用较多,稳定性较好。另外由于设备车空间要求,使得单杆控制系统的体积要做得很小。通过选择体积小巧的单片机作为处理器,设计了主电路板。由于体积要求,电路板尺寸只有 3.4 cm 直径的圆形,和一元硬币大小相当。

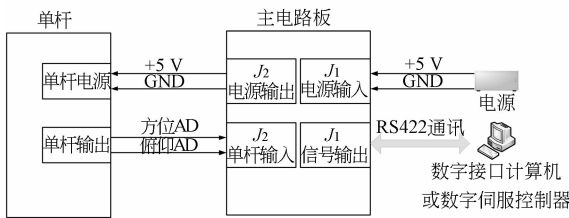


图 2 主电路拓扑结构图

Fig. 2 Topology block diagram of main circuit

图 2 所示为主电路采用的拓扑结构。其中,单杆为普通的模拟单杆。单杆输入信号包括 +5 V 和 GND,由主电路提供电源。单杆输出为单杆两轴的模拟电压值,通常两轴伺服系统中将其命名为方位 AD 和俯仰 AD,代表控制两轴转动的模拟量化数据。主电路板包括 2 个对外接口, J_1 为外部输入电源和输出通讯接口,电源输入为通

用的 +5 V 电源,通讯输出接口为 RS422,直接连接到计算机; J_2 为与单杆之间的接口,输出给单杆提供电源,输入为单杆两轴模拟电压值。

主电路原理如图 3 所示。

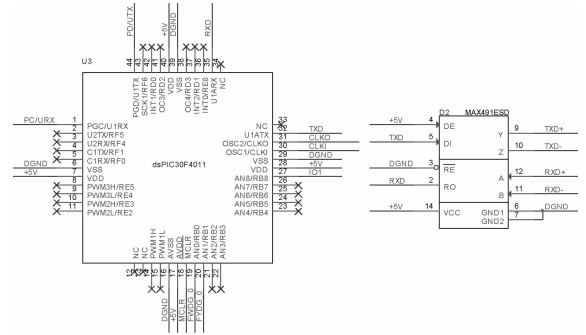


图 3 主电路板原理图

Fig. 3 Element diagram of main circuit

主电路板的主要功能是实现对单杆两路 AD 转换,再通过串口发送。

2.3 系统软件设计

单片机主程序如图 4 所示,具体包括下述步骤:

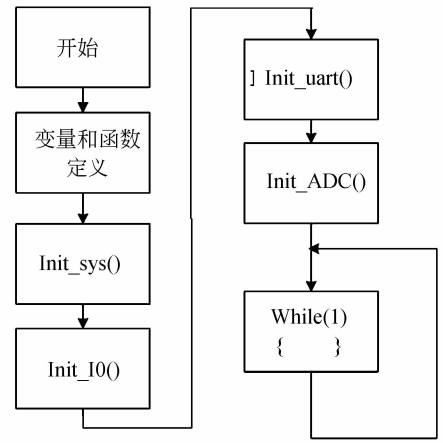


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of main program

初始化:对程序中使用的变量和函数进行定义。

执行 Init_sys() 函数,进行系统设置,包括振荡器基准频率的设置、单片机 2 个模拟采样端口的设置,定时器的初始化设置和定时器中断频率设置(即通讯频率)。

执行 Init_IO() 函数,定义 I/O 端口。

执行 Init_uart() 函数,定义 uart(异步串行通

信接口),设置接收和发送数据的波特率,起始位,数据位,停止位,校验位。

执行 Init_ADC()函数,对寄存器组进行采样存储方式设置,AD 中断方式设置(寄存器组存储满后产生 AD 采样完成中断信号)。

进入 while(1){ }死循环,采集两轴模拟电压值并将其存储于寄存器组,等待 AD 转换中断、定时器中断,通讯中断。当中断到来时,跳出循环,响应中断。中断执行完成后,再次进入循环。

当 AD 中断信号产生时,取出寄存器组存储的数据并进行滤波处理得到数字化控制量;然后将数字化控制量数据按照无线链路通讯协议设置固定的双帧头和可变的异或和帧尾。

当定时器中断信号到来,将 AD 转换中断模块处理好的有效数据发送到外部设备。

单片机可以采用下述方式存储两轴模拟电压值:

在第一个采样周期内,单片机将采集的方位轴模拟电压值存入第一个寄存器,第二个采样周期内,将采集的俯仰轴模拟电压值存入第二个寄存器;第三个采样周期内,以此类推,将方位轴模拟电压值和俯仰轴模拟电压值交替存储于 $2N$ 个寄存器中;当 AD 中断信号产生时,AD 转换中断模块取第 1、3、…… $2N-1$ 个寄存器中的方位轴模拟电压值进行滤波处理,同时取第 2、4、…… $2N$ 个寄存器中的俯仰轴模拟电压值进行滤波处理,得到数字化控制量。

由于方位模拟电压值和俯仰模拟电压值是交替存储,两者的存储基本同步,因而提高了控制精度。

3 数字化单杆控制系统通讯方式

单杆控制系统与外部设备通讯方式可以使用 3 种方式:RS422 数字通讯,RS422+无线通讯和 CAN 总线通讯。

RS422 数字通讯方式如图 5 所示,单杆控制系统通过标准 RS422 与数字接口计算机或者数字伺服控制器通讯。解决了数字接口计算机不能识别模拟电压信号的问题,同时对于数字伺服控制器可以直接接收数字化的单杆信息,减少了模数转换的工作,简化了数字伺服控制器设计的复杂度,减少了设计成本和设计电路的体积。这种

方式也解决了计算机不能直接做控制使用。同时,也解决了模拟信号一般只能传输几米,当传输距离增加时,带来电压的衰减,进而影响了单杆的精度。通过单片机 A/D 处理后,以 RS422 的形式发送,传输距离可以达到几百米,而且 RS422 的差分传输模式,可以抵抗衰减,进而增加了传输距离保证了传输的精度。而且 RS422 是通用的接口标准,可以连接到任何一台具有 RS422 接口的设备上,利于扩展和产品标准化。

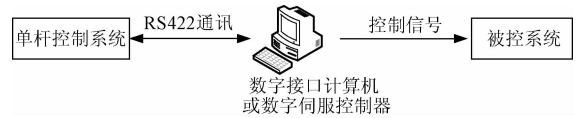


图 5 RS422 数字通讯方式

Fig. 5 Chart of RS422 digital communication

RS422+无线通讯方式如图 6 所示,单杆控制系统通过标准 RS422 与无线通讯设备相连接,数据信息通过无线通讯链路传输,再经无线通讯设备接收,传输给机载控制系统。机载控制系统需要使用单杆控制,但是普通单杆的模拟电压信号不能通过无线通讯链路上传到机上系统,只有将单杆的模拟电压信号转换成数字信号,才可以通过无线通讯链路传输,进而提供给机上控制系统使用。在使用此方案的一个项目中,通过对单杆控制系统的软件进行设计,设计适合在无线通讯链路传输的通讯协议,协议中设计了通讯判错机制,进而保证了无线通讯的纠错能力。同时,无线通讯的设计,不仅要考虑无线链路的纠错,判断有效帧,还要考虑无线链路的带宽,数据传输的延时。此种方式也可以推广应用,不仅可以应用于机载系统的控制,也可以应用于远程无线控制,在工业控制,生化实验室等高风险环境同样可以使用。



图 6 RS422+无线通讯方式

Fig. 6 Chart of RS422 and wireless communication

CAN 总线通讯方式如图 7 所示,主电路板所使用的单片机 dsPIC30F4011 自带 CAN 通讯接口。控制器局域网(Controller Area Network, CAN)模块是一个串行接口,可用于与其他设备

或者单片机之间通信。此接口/协议是针对允许噪声环境下通信而设计的。CAN 总线采用了多主竞争式总线结构,具有多主站运行和分散仲裁的串行总线以及广播通信的特点。CAN 总线上任意节点可在任意时刻主动地向网络上其它节点发送信息而不分主次,因此可在各节点之间实现自由通信。CAN 总线协议已被国际标准化组织认证,技术比较成熟,控制的芯片已经商品化,性价比高,特别适用于分布式测控系统之间的数通讯。CAN 总线插卡可以任意插在 PC AT XT 兼容机上,方便地构成分布式监控系统。

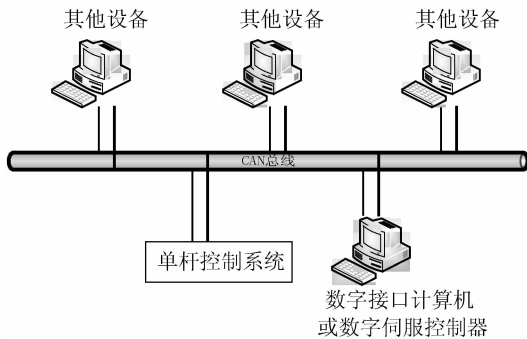


图 7 CAN 总线通讯方式

Fig. 7 Chart of CAN bus communication

设计的单杆控制系统,可以实现 CAN 总线通讯,通过 CAN 总线与数字接口计算机或者数字伺服控制器进行通讯。CAN 卓越的特性、极高的可靠性和独特的设计,特别适合工业过程监控设备的互连,越来越受到工业界的重视,并已公认为最有前途的现场总线之一。进而此单杆控制系统,可以广泛应用在工业控制中。

4 数字化单杆控制系统的优点

数字化单杆控制系统的优点主要体现在数字化、小型化,集成化和模块化 4 个方面。

4.1 数字化

将代表手柄两轴转动位移控制量的模拟电压值数字化,然后再将数字化控制量以 RS422 的通用标准通讯形式发送给伺服控制系统。

模拟信号一般传输距离只有几米,而且传输距离的增加,带来电压的衰减,进而影响了单杆的精度。本设计中的单杆控制量经过单片机数字化处理后,以 RS422 的通用标准通讯形式发送,传

输距离可以达到几百米,而且 RS422 的差分传输模式,具有抗衰减抗误码功能,所以可以保证传输的精度。同时,RS422 的通用标准通讯形式,兼容性强,接收端可以直接和计算机接口或者任意控制系统接口,接口定义兼容性强,有利于扩展和产品标准化。

4.2 小型化

在光电测量设备中,单杆的手动控制操作已经成为必不可少的操作模式。随着测量设备功能的发展,设备种类越来越多,设备车的空间也就越来越紧张。设计设备的时候,要尽量考虑设备的小型化,以能在有限的空间中安装更多的设备。

这样,所选单杆的体积也是越来越小。现在普遍使用的一款小型化单杆,体积直径只有 4 cm,高度只有 6 cm,是单杆中体积较小的类型。如何在这样小体积的单杆中实现电路设计,成为一个技术难题。

本设计采用单片机作为处理器,配合外围电路,可以将电路板设计成只有 3.2 cm 直径大小的一个圆形电路,双层电路设计,除晶振外,全部采用表贴型芯片,已经将此功能的电路设计到最小,可以直接安装在单杆内部,节约了空间,实现了真正的小型化。主电路结构简单、运行可靠。

4.3 集成化

将包含单片机和 RS422 通讯芯片的主电路板制作于单杆壳体内,这样由单杆控制装置发送出来的就是数字量,无需再做任何处理,伺服控制系统可以直接使用。减轻了伺服控制系统设计的复杂度。

以往单杆的 A/D 转换,一般都是在伺服控制电路上实现的。这样伺服控制电路就一定要设计有 A/D 转换电路,不仅增加了伺服控制电路的体积,也增加了伺服控制系统程序的复杂度。

由于高精度快速数字伺服系统,本身的伺服系统算法已经非常复杂。致使现在通用的伺服控制芯片 DSP 在控制中,已经处于临界状态。

本设计将单杆两轴控制量的 A/D 采样、数字化的工作在单杆控制系统中一步直接完成。把处理好的数据直接发送给高精度快速数字伺服系统,伺服系统无需再做任何处理,可以直接使用数据,进而降低了伺服系统设计的复杂度,减轻了伺服系统的负担。

4.4 模块化

接口定义 RS422 兼容性强,结构简单,控制接口可以直接和计算机接口,利于扩展和产品标准化。

5 实验数据

为了方便电路调试,使用 VC++6.0 设计了数字化单杆控制系统通讯接收软件,如图 8 所示,可以模拟主控计算机或数字伺服控制系统接收数字化单杆控制系统的数,判断通讯的故障,可以将数字量的单杆数据处理成模拟电压数据进行显示,进而对数字化单杆的数据进行分析。数字化单杆控制系统通讯协议按照无线链路通讯协议设置了固定的双帧头和可变的异或和帧尾,无线通讯纠错能力强。



图 8 通讯接收软件

Fig.8 Chart of communication receiving software

对单杆进行不同方式的操作,获得数据如图 9、10 所示:图 9 是单杆处于零点位置时采集到的数据;图 10 是单杆处于 X 方向零点,Y 正方向最大值时采集到的数据。另外 3 种情况,单杆处于 X 正方向最大值,Y 方向零点时;单杆处于 X 负方向最大值,Y 方向零点时;单杆处于 X 方向零点,Y 负方向最大值时。这三种情况与单杆处于 X 方向零点,Y 正方向最大值时的数据分析相同,故只对其中一种情况进行分析。

当单杆的 X 方向和 Y 方向都处于零点位置时,根据通讯协议理论数据码值是 0x00 或 0x20,其中最高位是符号位不影响精度。将实际接收到的 1000 组码值进行均值处理,得到的码值是 0x21。误差是 1 个码值,那么转换精度是 1LSB,数据均方根误差为 0.098%(1/2¹⁰)。相对参考文献[12]中的数据误差 0.5% 有一个数量级的

提高^[12]。

当单杆的 X 方向处于零点,Y 方向处于正方向最大值时,根据通讯协议理论数据码值是 0x1FF。将实际接收到的 1000 组码值进行均值处理,得到的码值是 0x1F4,误差是 3 个码值,那么转换精度是 3LSB,数据均方根误差为 0.29%(3/2¹⁰),相对参考文献[12]中的数据误差 0.5% 减少了一半。此时虽然有 3 个码值的误差,相对在零点是只有 1 个码值的误差,还要考虑到实际在用单杆测量时,使单杆处于 Y 方向最大值不一定准确。因为单杆活动范围是圆形,随机采样的数据中代入了不是 Y 方向最大值时的采样点,由此使误差增加。

均方根误差计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}, \dots, i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

其中:n 为测量次数;d_i 为一组测量值与平均值的偏差。

综合以上两种情况的误差分析,当单杆的 X 方向和 Y 方向都处于零点位置时的误差,可以说明系统精度的误差分析结果为 0.098%。



图 9 X=0,Y=0 的实验数据

Fig.9 Experiment data of X=0 and Y=0



图 10 X=0,Y=MAX 的实验数据

Fig.10 Experiment data of X=0 and Y=MAX

6 结 论

本文设计了数字化单杆控制系统,该系统由于采用了上述的软硬件设计方法而具有结构简

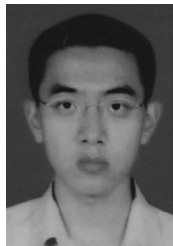
单、工作稳定可靠、数据采集精确和数据连续准确等特点,经工程实际应用完全符合工程要求。实验结果表明:数字化单杆控制系统的采样精度可以达到10位,误差仅为0.098%,而且能够远

距离传输,抗干扰能力强,基本满足实现单杆控制、数字化、小型化、集成化、模块化、稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求,解决了以往模拟单杆在使用中的技术问题。

参考文献:

- [1] 肖文礼. 单杆数据采集专用系统的软硬件设计[J]. 光学精密工程, 1996, 4(3):62-67.
XIAO W L. Software and hardware design of single rod data acquisition purpose system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3):62-67. (in Chinese)
- [2] 王帅,李洪文,孟浩然,等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10):2442-2449.
WANG SH, LI H W, MENG H R, *et al.*. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2442-2449. (in Chinese)
- [3] 柳景图,阮萍,熊仁生. 一种新颖的单杆操纵器.[J]. 光子学报, 1995, 24(6):540-543.
LIU J, RUAN P, XIONG R SH. A new kind of joy-stick controller [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(6):540-543. (in Chinese)
- [4] 吴志勇,于秀妍. 经纬仪训练仿真系统单杆操纵器读值的处理方法[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2):33-36.
WU ZH Y, YU X Y. Acquisition of the transit instrument training simulation system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2):33-36. (in Chinese)
- [5] 周虎,郝继贵,张滋黎,等. 激光电子经纬仪动态跟踪引导系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11):2671-2678.
ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, *et al.*. Design of dynamic tracking and guiding system for Laser-electronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2671-2678. (in Chinese)
- [6] 李焱,曹立华,王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):1126-1133.
LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of ship-borne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1126-1133. (in Chinese)
- [7] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9):1991-1998.
DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):1991-1998. (in Chinese)
- [8] 陈向坚,李迪,白越,等. 模糊神经网络在自适应双轴运动控制系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1633-1650.
CHEN X J, LI D, BAI Y, *et al.*. Application of type-II fuzzy neural network to adaptive double axis motion control system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1633-1650. (in Chinese)
- [9] 李嘉全,丁策,孔德杰,等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5):998-1004.
LI J Q, DING C, KONG D J, *et al.*. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):998-1004. (in Chinese)
- [10] 董岩,张涛,李文明,等. 机载立体测绘相机滚转轴伺服系统的辨识与设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1580-1586.
DONG Y, ZHANG T, LI W M, *et al.*. Identification and design of roll axis servo system in air borne solid mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1580-1586. (in Chinese)
- [11] 殷伯华,陈代谢,林云生,等. 高速大扫描范围原子力显微镜系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11):2651-2656.
YIN B H, CHEN D X, LIN Y SH, *et al.*. Design of AFM system with high speed and large scanning range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2651-2656. (in Chinese)
- [12] 李一芒,何昕,魏仲慧,等. 光电经纬仪单杆数据采集系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 6:14-16.
LI Y M, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Design and implementation of joystick data acquisition system for O-E theodolite [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011, 6:14-16. (in Chinese)

作者简介:



陈 健(1981—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2005年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事高精度快速数字伺服系统研究。E-mail: chenjian4500@163.com



郭 劲(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1989年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学设计及应用、光机电总体设计和军用光电装备研制工作。E-mail: zhaobing-dragon@163.com



陈贺新(1949—),男,吉林大安人,教授,博士生导师,主要从事图像处理、视频编码和多媒体信息检索的研究。E-mail: chx@jlu.edu.cn

导师简介:



高慧斌(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年、1990年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光电测量和精密跟踪控制技术。E-mail: gaohuibin1@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)