

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.015

基于陀螺仪与伺服舵机的自动安平系统设计

郑思航,陈永良*,李琛,任峻辰

(中国计量学院 质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对目前传统的安平系统在实用性和适用性未能满足多方面要求,无法解决同时兼顾安平范围、调节精度和响应速度的问题,根据三轴陀螺仪传感器与伺服舵机控制原理,设计了一种新型的自动安平系统,通过三轴陀螺仪传感器检测重力加速度方向以获取倾角信息,由STM32F103系列微控制器对采集获取的数据进行了数字滤波和分析计算等处理,并结合PWM脉宽调制技术和PID算法控制伺服舵机机组,实现了双自由度的水平调节,并且对系统的机械结构进行了优化设计,有效增大了安平范围。研究结果表明,该自动安平系统在 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 范围内的调节精度达到 $10'33''$,水平度误差控制在 $0.1\%\sim 0.5\%$ 范围之内,调整时间小于2 s,相对于其他安平系统,具有更低的生产成本和更高的自动化程度。

关键词: 自动安平; 三轴陀螺仪; 伺服舵机; STM32

中图分类号: TH7; TH122; TP272 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1509-06

Automatic horizontal control system based on gyroscope and servo steering gear

ZHENG Si-hang, CHEN Yong-liang, LI-Chen, REN Jun-chen

(College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the applicability and serviceability of traditional horizontal control systems which can not satisfy various requirements, to solve the problem that the leveling range, adjusting accuracy and response speed can not be considered at the same time, according to the principles of gyroscopic sensor and servo steering gear control, a new type of automatic horizontal control system was developed. With the three-axis gyroscope sensor detecting the direction of the acceleration of gravity to gain dip information, and digital filtering and analysis by the STM32F103 microcontroller on the data collected, combined with PWM pulse width modulation technology and PID algorithm to control the servo unit, the adjustment of two degrees of freedom was completed. And the mechanical structure of the system was optimally designed, effectively increasing the leveling range. The results indicate that the regulation accuracy of this automatic horizontal control system below $10'33''$ and the range of $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ can be achieved, and the horizontal error can be controlled within the range of $0.1\%\sim 0.5\%$. In addition, the adjustment time is less than 2 s, and relative to other horizontal adjustment systems, it has lower production costs and a higher degree of automation.

Key words: automatic leveling; three-axis gyroscope; servo steering gear; STM32

0 引言

目前,在建筑、测量及各类工程安装行业使用的水平/垂直测距仪、激光发射仪、汽车前照灯等装置中,自动安平技术得到了十分广泛的应用^[1-2]。同时,随着

科学技术的高速发展,在生产生活中人们对仪器设备工作的精确度、响应速度等要求也愈来愈高。设计一种能够实现高精度、快响应、低成本的新型的自动安平系统,具有较高的实用价值^[3]。

目前,市场上大部分的安平系统采用摆锤配合磁阻尼方式、电子式或是机械式的水平调节机制^[4-7]。

收稿日期: 2013-07-02

作者简介: 郑思航(1991-),男,浙江余姚人,主要从事电子测量及微机自动化控制方面的研究。E-mail:1000604114@cjlu.edu.cn

通信联系人: 陈永良,男,教授。E-mail:cimeyl@cjlu.edu.cn

磁阻尼方式的安平系统具有抗干扰能力强、调节精度高的优点,但是其装配工艺较为复杂、对部件要求较高、生产成本也相对较高,限制了其应用范围;电子式的自动安平系统一般都是用电容式或者光电式来检测水泡的位置,然后用直流电机或者步进电机调节机芯水平的方式,存在调整时间长、精度不足的问题;而机械式的安平系统由于对外部的振荡比较敏感,在使用中比较不便,而且安平的角度范围在 $\pm 4^\circ$ 之内,在很多场合甚至要手动调节机身而达到水平位置,自动化程度明显不足。

本研究选用STM32F103微处理器作为主控单元,应用三轴陀螺仪传感与伺服舵机控制原理,结合机械机构设计,提出一种新型的自动安平系统^[8],同时定性及定量地比较本研究设计的系统与市场上现有安平系统在响应速度、控制精度以及生产成本等方面的不同。

1 系统结构和实现方法

该设计中的自动安平系统由机械结构和电子电路系统两个部分组成,其结构和工作原理如图1所示。

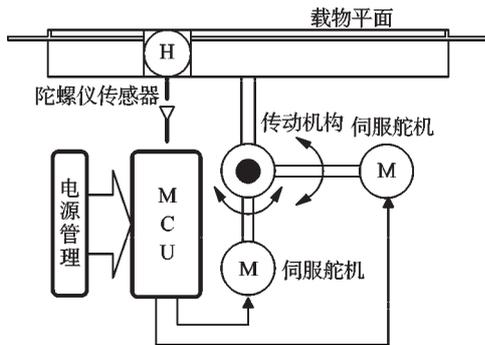


图1 安平系统的组成

其中,机械结构主要由执行器件、传动机构和固定框架组成,执行器件采用XQ-RS420型180°伺服舵机,具有1024个位置等级和0.15 sec/60°(4.8 V)的运转速度,从而保证系统具有较高的调节精度和较快的响应速度;电子电路系统包括电源管理模块、陀螺仪传感模块、STM32微处理器模块以及控制程序。

该系统的结构框图如图2所示。自动安平调节的基本原理是:在调节范围内,以陀螺仪传感器作为载物平面的重力加速度在O-XYZ空间坐标系中的方位感应器,采集重力加速度在x、y、z轴的垂直分量。微处理器根据采集的信息计算位置偏差和所需调节的角度,通过输出特定占空比的脉冲信号分别控制两架伺服舵机旋转所需调节的角度,从而实现双自由度水平调节^[9]。由于该系统采用伺服舵机作为执行机

构,可以使最小调节角度达到 $180^\circ/1024=0.176^\circ$,而且相对于以直流电机、步进电机或螺杆作为执行机构的安平系统,该系统中控制伺服舵机旋转到特定的位置无需复杂的控制算法,在保证调节精度的基础上可大大提高系统的响应速度。

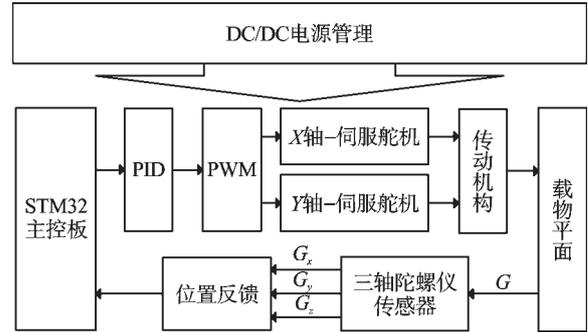


图2 系统的结构框图

2 硬件设计

2.1 机械结构设计

机械结构说明图如图3所示。该系统共使用了3种铝制金属固定架,分别为凹形固定架、直角固定架和舵机固定架。其中凹形固定架一端固定在上部伺服舵机的圆盘上,另一端预设通孔与轴承卡紧,凹形固定架的上端面作为载物平面,即水平调节平面,用于安装负载,如测距装置、光学投射器等。直角固定架一侧与凹形固定架一同固定于舵机圆盘上,用于安装固定陀螺仪模块,使陀螺仪传感器的检测平面与载物平面呈刚性的平行关系,这样可以保证陀螺仪检测的重力加速度即为载物平面的法向矢量。舵机固定架用于固定舵机位置,底部的舵机固定架一侧用于安装主控板,低端设有圆孔,用于整个装置的固定安装。

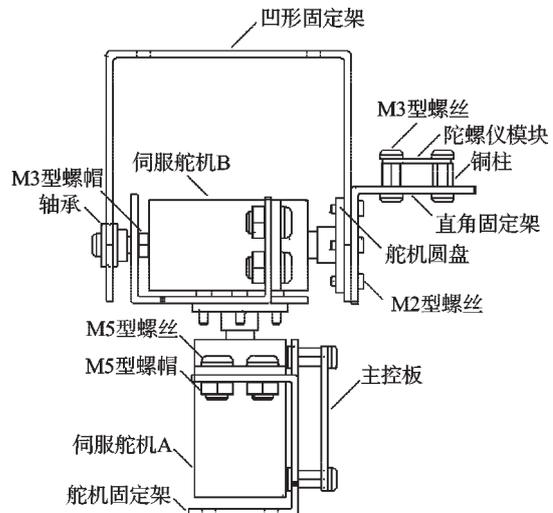


图3 机械结构说明图

需要强调的是,该装置在初始状态时,两架伺服舵机均处于 90° 旋转状态,载物平面与底部舵机固定架的安装底面相互平行。这样设计的优点在于,系统在每一次安平调节之前,可以先检测到安装底面的倾斜情况,而且每一次调节动作都是在初始状态的基础上执行的,这样可以简化控制程序,使调节过程有序地进行。

2.2 电子电路设计

2.2.1 电源管理模块

电源电路在前级采用开关电源转换芯片 TLE8366-EV5,该芯片具有较宽的输入电压范围 $7.0\text{ V}\sim 45\text{ V}$,适用于工业环境下提供稳定的电源。本研究在次级采用 AMS-1117-3.3 线性稳压器,为处理器和陀螺仪芯片提供 3.3 V 的电源电压。

系统电源电路如图4所示。

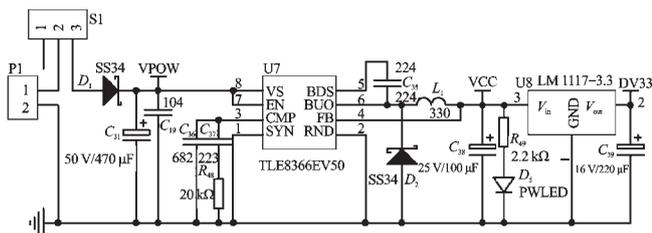


图4 系统电源电路

2.2.2 微处理器模块

该系统的核心处理器采用意法半导体 STMicroelectronics 公司生产的 STM32F103RET6 芯片为主 MCU。该处理器具有8个16位定时器,每个定时器有4个用于脉宽调制信号的输出通道;功耗低,兼容性好,开发资源丰富,成本较低。此外,本研究选择 LM393 比较器芯片与 MCU 通过 I/O 口相连,将 PWM 输出高电平提升至 5 V ,同时也对 MCU 的 I/O 口进行保护,即便外接负载上电压超限也不会对 I/O 口造成损坏。PWM 输出保护电路如图5所示。

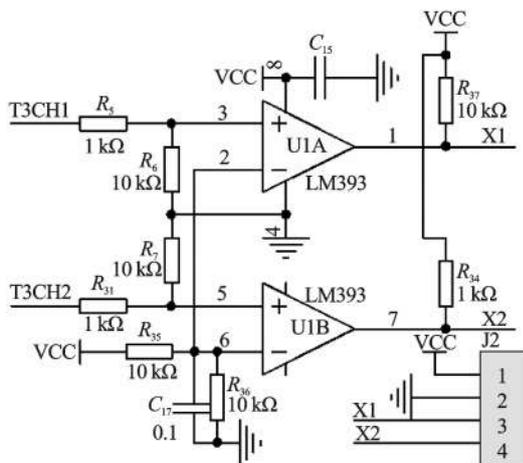


图5 PWM输出保护电路

2.2.3 三轴陀螺仪模块

该系统采用意法半导体公司生产的 LSM303DLH 三轴数字加速度传感器作为倾角传感单元,该芯片在内部采用12位 A/D 转换器,测量精度达到 1.0 mg ,可检测重力加速度在 $O-XYZ$ 空间坐标系的 x 、 y 、 z 轴上的垂直分量,并将数据传输给处理器。三轴数字加速度传感器的重力加速度检测方向如图6所示。

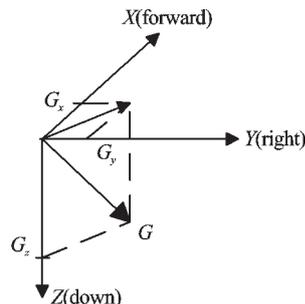


图6 加速度检测方向

三轴陀螺仪模块和微处理器的通信方式采用 I²C 总线协议,串行8位双向数据传输位速率在标准模式下可达 100 kbit/s 。由于 LSM303DLH 芯片在加速度检测模式下的 I/O 口供电为 1.8 V ,本研究在该模块中采用 LK112SM18 芯片作为辅助电源。三轴陀螺仪模块的电路原理图如图7所示。

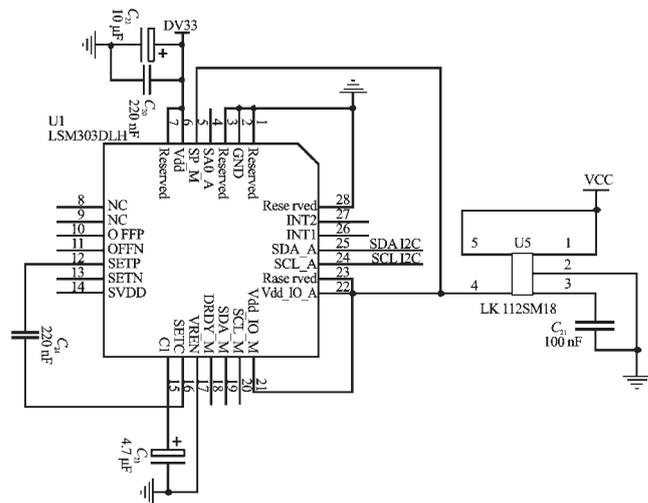


图7 三轴陀螺仪模块

3 系统软件设计

3.1 程序整体设计

系统软件由主程序、陀螺仪子程序、定时器子程序、延时子程序等组成。主程序的流程图如图8所示。

主程序在上电复位后,完成微处理器以及外围功能模块的初始化。为了保证伺服舵机的平稳运行和其驱动信号的分辨率达到微秒级,本研究在初始化

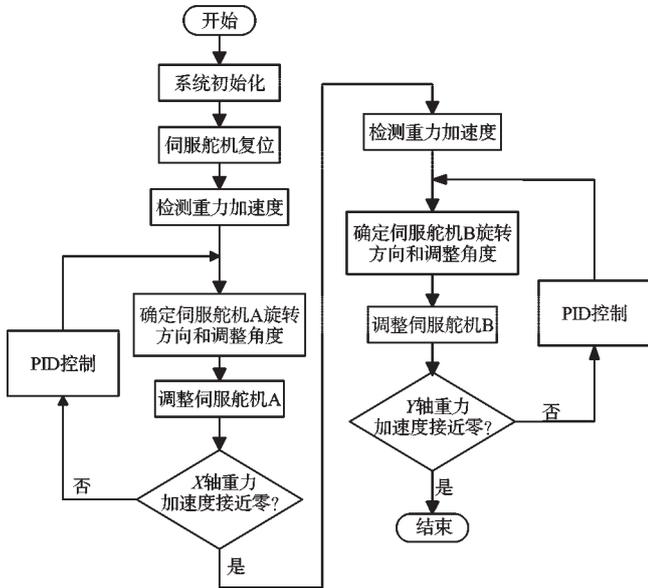


图8 主程序流程图

STM32 的定时器 PWM 输出状态时,将预分频器 TIM_Prescaler 和定时周期 TIM_Period 两个参数^[10]分别配置为 23 和 59 999,根据下式得 PWM 周期 T 为 20 ms:

$$T = \frac{(1 + \text{TIM_Prescaler})(1 + \text{TIM_Period})}{72\text{ M}} \quad (1)$$

下面结合实例来说明自动水平调节系统的具体步骤:首先,在程序初始化完成之后,由 STM32 输出两路周期为 20 ms、占空比为 7.5% 的 PWM 信号,分别控制两架伺服舵机旋转至 90° 位置,进行复位。装置复位示意图如图 9 所示。

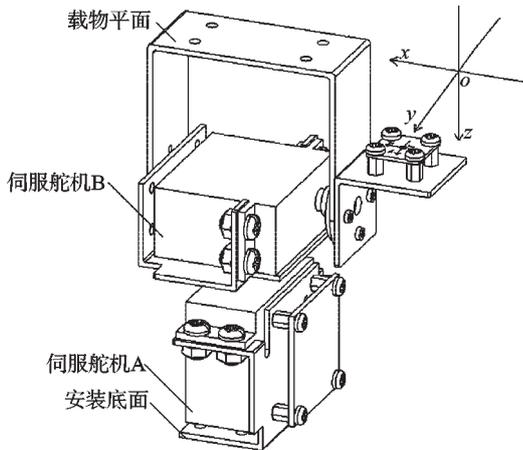


图9 装置复位示意图

此时,载物平面、安装底面和 XOY 面三者相互平行,则认为:伺服舵机 A 可调节载物平面围绕 z 轴旋转 $\pm 90^\circ$ (以逆时针方向为正),伺服舵机 B 可调节载物平面围绕 x 轴旋转 $\pm 90^\circ$,当检测到的重力加速度方向与 z 轴重合时,即重力加速度在 x 、 y 轴上的垂直分量均为零,载物平面达到预定的水平状态。

复位动作完成之后,微处理器 STM32 通过 I²C 总线协议开始读取三轴陀螺仪的数据,并将其重力加速度在 x 、 y 、 z 轴的垂直分量分别赋值给变量 G_x 、 G_y 、 G_z 。

设重力加速度 g 的方向在 $x > 0$, $y > 0$, $z > 0$ 区域上,安平调节示意图(一)如图 10 所示,则首先确定载物平面围绕 z 轴顺时针旋转角度 α ,使得 $G_x = 0$,角度 α 由下式计算:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|G_x|}{|G_y|}\right) \quad (2)$$

调节伺服舵机 A 所需 PWM 信号占空比为:

$$\text{Duty_A} = 7.5\% - \frac{\alpha}{\pi}(12.5\% - 2.5\%) \quad (3)$$

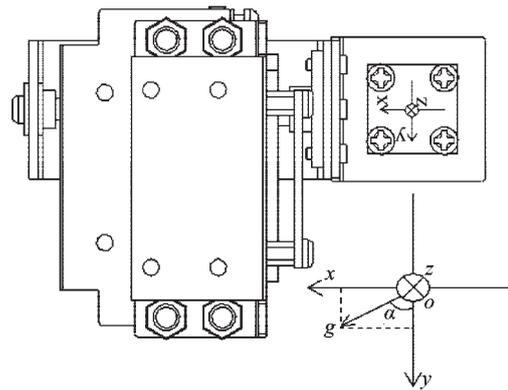


图10 安平调节示意图(一)

由于载物面存在负载且伺服舵机本身的执行误差,将会使得调节动作存在一定偏差,为了消除这一偏差,必须在首次调节动作之后检测新位置的重力加速度,记为 G'_x 、 G'_y 、 G'_z ,若 G'_x 不接近零值,则引入比例积分控制算法进行再次调节。可取偏差量为:

$$\text{Error} = G'_x - G_x \quad (4)$$

重新计算输出 PWM 的占空比,在参数整定过程中,比例系数 K_p 为:

$$K_p = \frac{G'_x - G_x}{\text{Duty_A} - 7.5\%} \quad (5)$$

积分系数 K_i 采用逐步使凑法,由小逐渐增加,反复试验几次,直至消除静态误差达到满意为止。

至此,载物平面的重力加速度 g 的方向处在 YOZ 面上,安平调节示意图(二)如图 11 所示。由于载物平面与水平面的相对位置已经发生变化,需要再次读取重力加速度在 y 、 z 轴的垂直分量并分别重新赋值给变量 G_y 、 G_z 。则确定载物平面围绕 x 轴顺时针旋转角度 β ,使得 $G_y = 0$,角度 β 由下式计算:

$$\beta = \arctan\left(\frac{|G_y|}{|G_z|}\right) \quad (6)$$

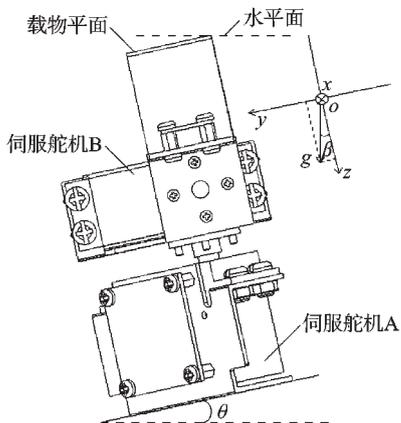


图11 安平调节示意图(二)

调节伺服舵机B所需的PWM信号占空比为:

$$Duty_B = 7.5\% - \frac{\beta}{\pi} \cdot (12.5\% - 2.5\%) \quad (7)$$

若调节完成后 G_y' 不接近零值,则再次引入比例积分控制器进行二次调节。

伺服舵机B完成调节动作后,载物平面的重力加速度方向与 z 轴重合,即达到了预定的水平状态 ($G_z \approx g$),安平调节示意图(三)如图12所示。自动安平调节程序结束。

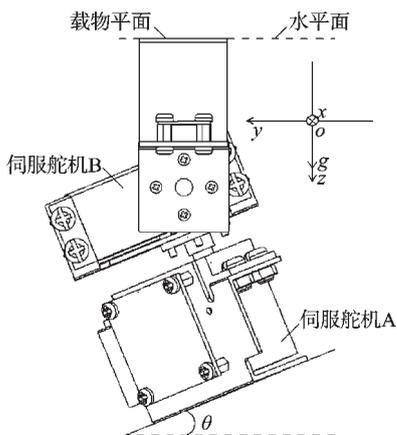


图12 安平调节示意图(三)

自动安平系统调节时序的波形图如图13所示。

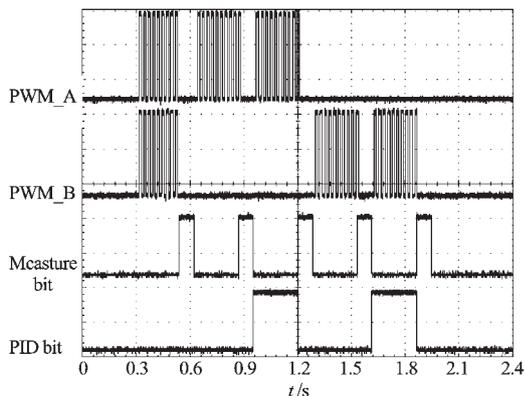


图13 调节时序波形图

3.2 抗干扰设计

引起该系统安平调节的误差主要来自3个方面^[11-13]:①陀螺仪模块本身存在的非线性偏差;②开关电源产生的高频噪声;③伺服舵机每次动作完成之后使整个结构产生的机械抖动。为了减小这些干扰,本研究设计了对加速度数据采用中值滤波器的方式,进一步提高系统的调节精准度。

假使重力加速度数据由下式来描述:

$$\{b_{i,j,k}\} (i=1,K,N_x; j=1,k,N_y; k=1,K,N_z) \quad (8)$$

式中: i, j, k —重力加速度在 x, y, z 轴上分量的下标; N_x, N_y, N_z —3个轴上数据的个数。

假设给定的中值滤波器的长度为 N ,第 i 号数据序列为 b_i ,则对第 i 号数据的第 K 个点的中值滤波为:

- (1) 取 N 个采样点,以第 K 个点为中心;
- (2) 对这 N 个采样点以数值从小到大排列;
- (3) 取排序后的 N 个样点的中心点数值作为第 K 的输出值。

重复上述过程,即实现了对重力加速度数据 $\{b_{i,j,k}\}$ 的中值滤波。系统在某一位置状态时测得的采样数据在滤波前和滤波后的对比分析如图14、图15所示。

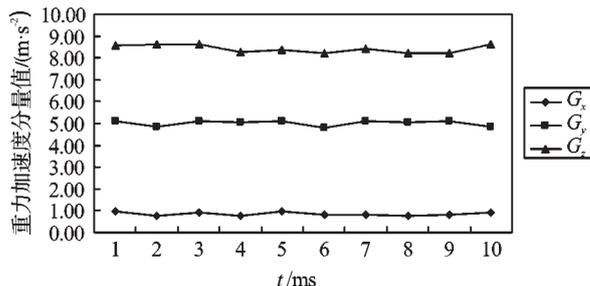


图14 滤波前的采样数据

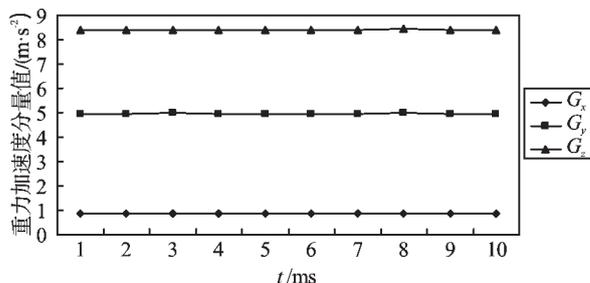


图15 滤波后的采样数据

4 实验验证

通过实际的制作调试工作,本研究分别选择负载重量间隔为 30 g (0~120 g) 的5种情况进行了指标测试,测试数据如表1所示。

分析表中数据,在伺服舵机转矩一定的情况下,

表1 不同负载情况下的测试数据

负载重量 /g	G_z /($m \cdot s^{-2}$)	当地重力加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	相对误差 /(%)	调整时间 /s
0	9.783	9.793	0.102	1.5
30	9.772	9.793	0.214	1.6
60	9.763	9.793	0.306	1.6
90	9.758	9.793	0.357	1.8
120	9.745	9.793	0.490	1.9

该系统安平调节的水平度误差在0~120 g的负载范围内可以控制在0.1%~0.5%之间,由于负载增加之后引入了PID控制环节,使得调节时间有所加长,整体可以控制在2 s之内。

为了将该系统应用到实际工作环境中,本研究在进行120 g负载条件下的测试时,选择一款激光位移测量仪将其安装于固定架进行安平测试,实验情况如图16所示,结果满足时间精度要求。

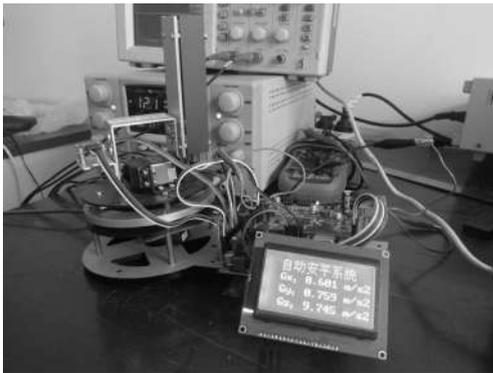


图16 实际测试情况

5 结束语

本研究通过对基于陀螺仪与伺服舵机的自动安平系统的设计研制,可以得出以下结论:

(1) 本研究系统通过三轴陀螺仪检测重力加速度矢量,获取倾角信息,并由微处理器控制伺服舵机组,实现双自由度的自动安平调节。

(2) 本研究对系统的机械结构和电子电路模块进行设计和选型,并对各部件的安装方式进行优化,以便简化控制流程。

(3) 本研究采用倾角计算与PID算法结合的控制方式,并引入抗干扰环节,在保证调节精度的基础上大大缩短了系统的调整时间。实验测试结果表明,该

系统0~120 g负载范围内的水平度误差控制在0.1%~0.5%范围之内,调整时间小于2 s。

(4) 相对于目前的安平系统,该系统具有更低的生产成本和更高的自动化程度,在生产和生活中具有较高的实用价值和广泛的应用前景。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Jian-gang, HUANG Da-gui, LU Chao-shuang. Research on Dynamic Model and Control Strategy of Auto-Leveling System for Vehicle-Borne Platform [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. China: [s.n.], 2007: 973-977.
- [2] YIN Qin, MIAO Nai-geng. Research on Automatic Control of Paver Leveling System based on DSP Host Controller [C]//Proceedings of ESAT 2010. China: [s.n.], 2010: 321-324.
- [3] WU Yu-hou, SUN Jia, ZHANG Ke, et al. Intelligent Leveling System of Suspended Access Platform [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control. Japan: [s.n.], 2010: 676-681.
- [4] 曹民, 王义斌, 喻凡. 机械式车高自动调平装置的研制[J]. 中国机械工程, 2008, 19(15): 1883-1889.
- [5] 汤君茂, 翁新华, 杨汝清. 带电清扫机器人液压自动调平收敛性研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2407-2411.
- [6] 徐逢秋, 许贤泽, 乐意, 等. 快速自动安平激光扫平仪设计及误差分析[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40(10): 34-38.
- [7] 徐进. 基于CMOS图像传感器的水准仪自动安平系统研究[D]. 杭州: 浙江大学光电信息工程学系, 2004.
- [8] LI Yan-hong, LI Shu-liang. Based on the ARM and PID control free pendulum balance system [J]. *Procedia Engineering*, 2012(29): 3491-3495.
- [9] 罗运辉, 刘红波, 贾磊, 等. 多变量解耦双自由度PID控制系统设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(7): 1282-1287.
- [10] 彭刚, 秦志强. 基于ARM Cortex-M3的STM32系列嵌入式微控制器应用实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [11] YOON S W, LEE S, NAJAFIA K. Vibration sensitivity analysis of MEMS vibratory ring gyroscopes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171(2): 163-177.
- [12] 王海伟, 李兴根. 基于步进电机控制的伺服钻孔机设计[J]. 轻工机械, 2012, 30(1): 56-58.
- [13] 陈殿生, 邵志浩, 雷旭升, 等. MEMS陀螺仪随机误差滤波[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 246-250.

[编辑: 张翔]

本文引用格式:

郑思航, 陈永良, 李琛, 等. 基于陀螺仪与伺服舵机的自动安平系统设计[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1509-1514.

ZHENG Si-hang, CHEN Yong-liang, LI-Chen, et al. Automatic horizontal control system based on gyroscope and servo steering gear [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1509-1514.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>