

太阳敏感器输出误差测量装置研究

熊小平, 王传魁

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

摘要 设计完成了一种太阳敏感器输出误差测量装置,其原理简单、成本较低,可以满足大部分太阳敏感器地面测试测量精度的需求。太阳敏感器是卫星动态模拟器敏感器部件的重要组成部分之一。太阳敏感器输出误差测量是卫星动态模拟器研制和实验操作的一项重要的前期工作,精确测量太阳敏感器误差对以后的理论计算和仿真实验有重要意义。太阳敏感器主要通过测量太阳光线与卫星某一体轴之间的夹角,确定太阳在敏感器本体坐标系中的位置,通过坐标矩阵变换得到太阳在卫星本体坐标系中的位置,最终在卫星的姿态控制系统中求出卫星姿态,即卫星的空间方位。提出了一种新的基于 ARM7 单片机的数字太阳敏感器输出误差测量装置设计方法。采用高精度数字式二自由度电动转台作为测量装置的基台,用于改变输入角度。采用 ARM 单片机控制器控制转台的转动角度和转动速度;采用专用的太阳模拟器作为太阳敏感器的输入光源;太阳敏感器的输出角度通过无线模块传送至 PC 机进行输出处理操作。对比转台角度和太阳敏感器的输出实测角度,可以得到太阳敏感器的输出误差曲线。本测试系统误差来源较少,主要为动力学转台的运动误差和太阳模拟器光源误差。转台的运动控制精度为 $0.001\ 25\ \text{mm}/(^{\circ})$ 。理想情形本装置的测量精度为角秒级。

关键词 太阳敏感器;单片机控制器;ARM 单片机;转台

中图分类号 V448.25+1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0038-04

Measuring Device for Output Error of the Solar Sensor

XIONG Xiaoping, WANG Chuankui

School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The device for measuring output error is simple in principle and with a low cost. It can meet most requirements of the measurement accuracy for the solar sensor. Its development is a sub-project of the project of the satellite dynamic simulator, as one of the important problems before the study and test of the satellite dynamic simulator, to measure the output error of the solar sensor. A design of the device is presented in this paper. It is based on the powerful ARM7 microchip controller. The high precision digital two-axis electric rotating platform is used to change the input angle. The ARM microchip controller is used to control the rotating angle and the rotating speed. A specific solar simulator is used as the light source of the solar sensor. The output angle of the solar sensor is transferred to the PC by the wireless URAT communication module. The error curve is obtained while comparing the changed

angle of the rotating platform with the output angle from the solar sensor. The sources of the error of the device are reduced greatly. The main error sources are from the rotating platform and the solar simulator. The accuracy of the rotating platform reaches $0.001\ 25\ \text{mm per degree}$. The accuracy of the device can be in arcsec level if the surrounding is at a perfect state.

Keywords Solar sensor, microchip controller, ARM, rotate platform

0 引言

太阳敏感器是航天器姿态控制系统中的重要测量部件^[1]。它主要通过测量太阳光线与卫星某一体轴之间的夹角,确定太阳在敏感器本体坐标系中的位置,然后通过坐标矩阵变换得到太阳在卫星本体坐标系中的位置,最终在卫星的姿态控制系统中求出卫星姿态。

太阳敏感器的种类繁多,其中美国和欧洲为领先,亚洲等也在极力开发^[1-2]。但是出于技术保密等原因,各种型号的太阳敏感器测量方法和精度都差别甚大,没有统一的技术测量或标定的方法或设备。从另一角度说,人们也不可能真正到太空中去对太阳敏感器进行测量、验证和标定。所以,能够简单、方便地测量出太阳敏感器的输出误差,对太阳敏感器地面模拟试验、性能测试与标定都有重要的实际意义;既可以

收稿日期: 2009-07-28

作者简介: 熊小平,研究方向为航天卫星飞行器姿轨控动态模拟器地面验证测试,电子信箱:tristin@yeah.net

利用测量出的误差数据,根据不同情况选择安装在航天器上需要的太阳敏感器,又可以通过对误差数据进一步的分析所得出的外界条件因素对误差大小的影响,对现有的太阳敏感器进行改进,提高现有太阳敏感器的精度,使之能够更精确地控制太空中航天器的姿态。

本课题是与卫星动态模拟器研制项目相关的子课题。本装置的测量研究对象为数字式太阳敏感器。在分析实验室已有太阳敏感器误差测量技术及相关研究的基础上,取长补短,将应用广泛的嵌入式单板机控制器应用于本测试装置,对数字式电动转台转动的角度和转动速度进行精确控制,并且采用具有较高稳定度太阳模拟器作为太阳敏感器输入光源,大大降低了敏感器的测量输出误差。

1 测试原理与计算

作为姿态敏感器的一种,太阳敏感器主要用于测量卫星等航天器的本体坐标系相对于太阳坐标系的相对速度和角速度,从而确定航天器姿态,也就是相对空间位置。首先,需要建立一个本体坐标系。将垂直于太阳敏感器的感光屏幕的坐标定为 z 轴,它是基准光轴对应于敏感器的角度零位,感光屏的行、列分别与 x 、 y 轴方向一致,太阳敏感器的输出以安装平面为参考基准。

数字式太阳敏感器的原理是太阳光信号经光学系统成像在光电探测器上光信号转变成电信号,模拟电信号经过处理后被转换成数字量信号,最后数字量格式化输出。本装置测量对象的太阳敏感器是以太阳为基准方位,用以测量太阳视线与卫星等航天器某一体轴或坐标平面之间夹角的一种姿态敏感器。其工作原理如图1所示,运用光学小孔成像原理对太阳进行成像,使其成像光斑投射在CMOS图像传感器上,然后信息处理电路用某种算法提取像光斑中心位置,并测算出太阳入射角。将坐标原点取在小孔中心 O_M ,假设太阳光入射的矢量方向为 V , V 在 yOz 平面的投影与 z 轴的夹角为 α , V 在 xOz 平面的投影与 z 轴的夹角为 β 。太阳敏感器的输出角为 α 、 β 。小孔平面与成像平面的距离为 F 。由此可以得到该坐标系下像点坐标 (x_c, y_c) ,以及入射角度 α 、 β 的表达式为

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F \tan \beta \\ F \tan \alpha \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{y_c}{F} \right) \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{x_c}{F} \right) \quad (3)$$

太阳入射光与太阳敏感器 z 轴的夹角记为 γ ,由式(2)、(3)即可计算出 γ 值。有

$$\tan \gamma = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta} \quad (4)$$

数字式二自由度电动转台为绕 y 轴和 x 轴转动自由度。当转台绕 y 轴旋转,旋转角度记为输入角 ϕ ,光线在 yOz 平面的投影与 z 轴的夹角 α 不变。当转台绕 x 轴旋转,绕 x 轴旋转的角度记为输入角度 ϕ ,光线在 xOz 平面的投影与 z 轴的夹

角 β 不变。因此,在测试时可以采用单轴转动方式。假设转台绕 x 轴转动时候,则 y 轴不动,反之绕 y 轴转动时候, x 轴不动。这样,就可以将太阳敏感器的输出角与转台输入角对应起来,独立观察某一个角度,以简化由于太阳敏感器输出角 α 和 β 之间具有相关性而给测量结果分析带来的麻烦。

太阳敏感器角度输出 y 轴向误差为 δ_1 ,等于输出角 β 与输入角也即转台绕 y 轴转动角 ϕ 之间的差值:

$$\delta_1 = \beta - \phi \quad (5)$$

太阳敏感器角度输出 x 轴向误差为 δ_2 ,等于输出角 α 与输入角也即转台绕 x 轴转动角度 ϕ 之间的差值:

$$\delta_2 = \alpha - \phi \quad (6)$$

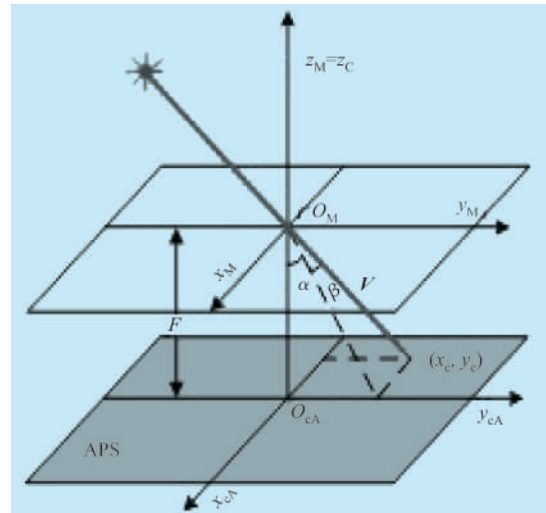


图1 太阳敏感器原理

Fig. 1 Schematic diagram of the solar sensor

2 测试装置结构与组成

太阳敏感器误差测试装置组成包括入射角调节装置、太阳光源模拟器、太阳敏感器、PC机,其中入射角调节装置由单片机控制器、步进电机驱动器和二自由度电动转台三部分组成^[5]。

PC机在本实验装置实现的功能包括通过无线串口接收太阳敏感器的输出角度和通过串口输出给单片机控制器需要的两个通道输入角度参数值,此参数为与角度相对应的脉冲数及脉宽时间。PC机的人机交互界面可以实现控制转台参数输入、太阳敏感器输出角度显示以及误差测量结果显示。人机交互界面图如图2所示。

单片机控制器是入射角调节装置的核心部分,它控制着步进电机的正反转方向、转动速度和转动角度值。基于现有的技术积累采用ARM7TDMI系列AT91SAM7X256芯片作为单片机控制器的主芯片^[3]。AT91SAM7X256芯片功能强大且性能稳定,足可以满足测试装置的系统控制应用需求^[3]。在本课题中,对AT91SAM7X256单片机的资源配置情况为4个IO

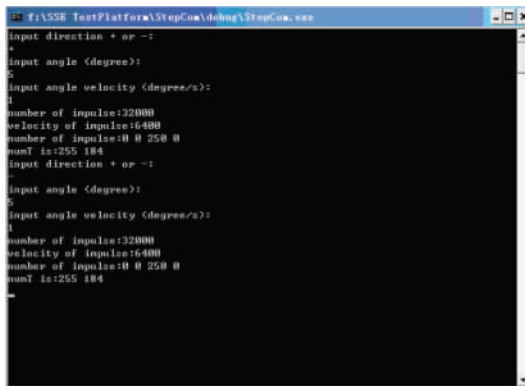


图2 人机交互界面

Fig. 2 Device's interface

口通道 P2.1~P2.4、定时器 TIME0、定时器 TIME1、串口 UART0。通道 P2.1 为 y 轴转轴方向控制通道,通道 P2.2 为 x 轴转轴方向控制通道,P2.3 为 y 轴转轴转动速度及角度控制通道,P2.4 为 x 轴转轴转动速度及角度控制通道。PC 机给单片机控制器的指令通过串口通道实现。下面给出太阳敏感器输出误差测量装置单板机控制器 PCB 图,如图 3 所示。

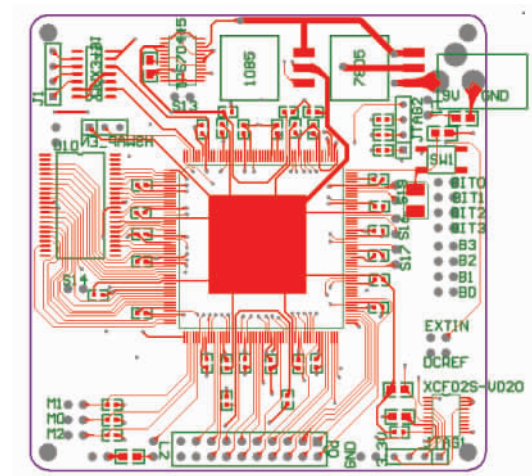


图3 ARM 单板机控制器 PCB 图

Fig. 3 PCB diagram of ARM micro-controller

一般步进电机需要专门的伺服控制器进行控制,不能直接使用普通的交流或直流驱动,本课题采用森创 SH-20403 型号两相混合式步进电机细分驱动器。SH-20403 驱动器采用 10~24 V 直流供电,最大 3 A 电流 8 种输出电流可选,最大 64 细分 7 种细分模式可选,输入信号光电隔离,而且还具有错项自我保护功能。步进电机驱动器接线图如图 4 所示。

数字式二自由度电动转台是太阳敏感器的基台,可以将 2 自由度电动转台视为卫星本体,因此可以按照卫星本体坐标系方式建立数字式 2 自由度电动转台坐标系。将太阳敏感器固定在电动转台上,太阳敏感器的采光面与电动转台 z 轴平行。电动转台的 x 轴和 y 轴垂直于光轴。此时,太阳敏感器处于光学零位,两轴转台的 y 轴给出 β 角, x 轴给出 α 角。

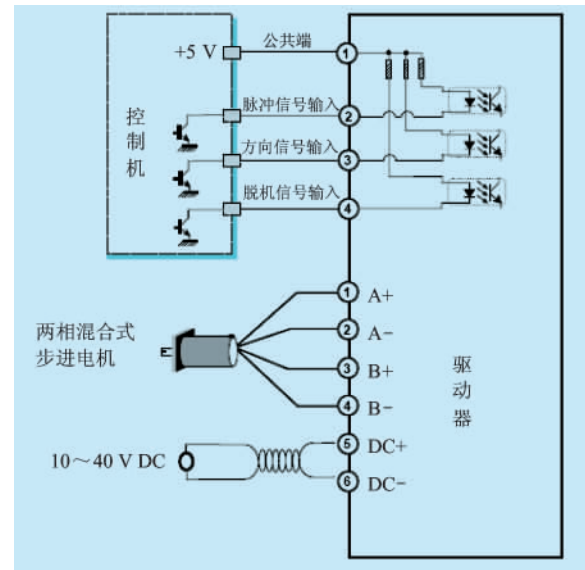


图4 驱动器接线图

Fig. 4 Drive wiring diagram

太阳光模拟器由一个光源和一个平行光管组合而成的,如图 5 所示。使用了太阳光模拟器作为太阳敏感器输入光源后,太阳敏感器的数据输出有了一定的稳定度,不再像最初使用手电筒时一样测得的数据不稳定^[5]。在光源上有亮度调节开关,可以调节光的强弱。

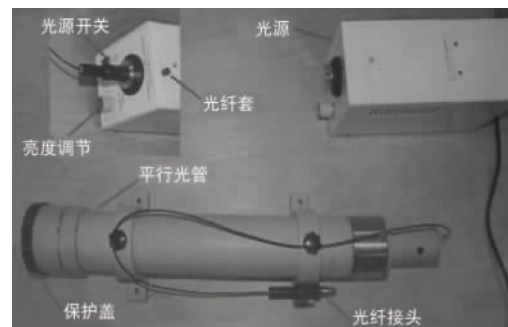


图5 太阳模拟器

Fig. 5 Solar Simulator

太阳敏感器为数字式,其输出为一个 DB9 连接器,与 422 串口连接,串口通信的波特率为 9 600。DB9 接插件各针脚定义情况为 1、2 脚连电源正极,4、5 脚接地,6 脚太阳敏感器接收端正极,7 脚太阳敏感器接收端负极,8 脚太阳敏感器发送端正极,9 脚太阳敏感器发送端负极。测量结果通过 422 至 232 串口转换器发送,再通过无线发送模块,发送至 PC 机。太阳敏感器最终返回的是太阳偏移角度 α 和 β 。 α 和 β 的输出格式是弧度,16 位,最高位为符号位,0 表示正,1 表示负,原码表示。前 2 位是整数部分,后 13 位是小数部分。

3 系统控制实现

3.1 硬件实现

按照图 2 所示结构图,逐次搭建太阳敏感器误差测试装



置。2 自由度电动转台可以绕 x 轴和 y 轴实现 360° 转动。再利用直角夹具将太阳敏感器固定在动力学转台上, 固定位置可以任意, 但要求太阳敏感器的采光面必须和光轴方向保持平行, 也即为 z 轴方向。太阳光源模拟器组件较多, 主要由光源和平行光管组成。把光源和平行光管放置在稳定的工作台上, 取下光纤头, 拔下光纤套, 把光纤接头插入光源上对应的接口, 给光源接上 220 V 交流, 取下平行光管的保护盖, 打开光源开关即可出光。连接系统各组件之间的线路以及各组件的供电电源线。

实现时, 可以将太阳敏感器按照原理图结构固定在 5 自由度平台上。调节太阳光源模拟器和太阳敏感器相互之间的高度, 要求应尽量使太阳敏感器的感光屏幕处于光斑的中心位置。打开太阳光源模拟器, 根据太阳敏感器输出角度是否稳定来调节太阳光源模拟器的高度及方向。光线初始方向应尽量垂直太阳敏感器采光面。

3.2 软件实现

太阳敏感器输出误差测试装置的软件实现分为两个部分。一是 PC 机 Windows 程序, 使用 Visual Studio C++ 6.0 工具, 实现的功能包括参数的输入和输出数据显示; 二是单板机控制器的嵌入式程序, C 语言编程, 实现的功能主要为将 Windows 程序下传的参数通过公式转换的到输出脉冲数和脉宽时间, 通过单板机控制器的定时器计数器控制脉冲输出。

通过 PC 机人机交互界面输入动力学转台转动参数, 包括转动方向、转动角度、转动速度, 这些参数需要根据一系列公式将其转换得到能被单片机控制器识别的参数型式, 脉冲个数和脉冲时间。下面给出主要公式的实现程序。下文中将仅举例表述一个自由度的控制程序。

```
int sbdv=64;
double angImp=1.0/100.0/(double)sbdv;
unsigned int impCnt=(unsigned long)(ang/angImp);
double impVel=angVel/angImp;
```

其中, sbdv 为步进电机的细分数; double angImp 为一个脉冲对应转台转动角度, 单位为 $^\circ$ /脉冲; impCnt 为输入转动角度对应的总脉冲数; impVel 为输入转动角速度对应的脉冲速率。

PC 机 Windows 程序中的参数通过串口通道传送到 ARM 单板机控制器中去。ARM 单板机在取得参数后首先判断正反转方向, 然后读取脉冲个数以及脉冲速率参数。脉冲个数存储在计数器 empd 中, 而脉冲速率参数存储在计数器 T0 中。单板机脉冲产生方式为每输出一个脉冲响应两次 T0 中断, 中断的时间决定于计数器 T0。

```
get_data(); //取数据
if(data_da[0]=='+') P2_3=0; //正转
else if(data_da[0]=='-') P2_3=1; //反转
empd=data_da[3]*256+data_da[4];
TH0=data_da[1]; //T0 计数
TL0=data_da[2];
TR0=1; //启动 T0
```

```
P2_1=0;
put_data(chaStatus);
while(a<empd); //持续转动
TR0=0; //关闭 T0
a=0; //循环次数
```

4 结论

太阳敏感器误差测量是动态模拟器建设和实验操作的一项重要前期工作。精确测量其误差对以后的理论计算和仿真试验有重要意义。利用测试结果可以对太阳敏感器进行误差补偿或对其进行修正标定^[6]。

本课题采用的由单板机和计算机组成的测试系统减少了误差来源, 其误差主要来源为动力学转台的运动误差和太阳模拟器光源误差。转台的运动控制精度为 $0.001\ 25\ \text{mm}/(^{\circ})$ 。经过实验测试, 本装置理想测量精度可达角秒级。

参考文献 (References)

- [1] 屠善程. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京: 宇航出版社, 2003.
Tu Shancheng. Satellite attitude dynamics and control[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2003.
- [2] 朱鸿泰. 高精度太阳敏感器的发展[J]. 红外, 2003(12): 1-6.
Zhu Hongtai. Infrared, 2003(12): 1-6.
- [3] 孙祥国. 基于 ARM 单片机的步进电机控制系统设计 [J]. 机电工程技术, 2007, 36(6): 71-73, 105-106.
Sun Xiangguo. M&E Engineering Technology, 2007, 36(6): 71-73, 105-106.
- [4] 饶鹏, 孙胜利. 太阳敏感器的发展与应用[J]. 航天控制, 2003(4): 7-10, 17.
Rao Peng, Sun Shengli. Aerospace Control, 2003(4): 7-10, 17.
- [5] 丁天怀, 郑志敏. 微型数字式太阳敏感器的原理实验 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(2): 186-189.
Ding Tianhuai, Zheng Zhimin. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2005, 45(2): 186-189.
- [6] 余成武, 贾锦忠, 吕政欣, 等. CCD 太阳敏感器误差分析与标定方法研究[C]//全国第十二届空间及运动体控制技术学术年会, 2006, Yu Chenwu, Jia Jinhui, Lu Zhenxin, et al. Study on Sun CCD Sensor error analysis and calibration method [C]//The 12th National Academic Annual of the Space and Mobile Control Technology. 2006.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“科技工作者建议”征稿

“科技工作者建议”栏目专门刊登科技工作者近期提出的、与科学技术相关的工作意见和建议。科技建议应着眼于科技研究、发展、应用、政策等领域的实际问题, 要求有明确、具体的内容, 方法上尽量具有可操作性。文字应简洁明了, 非特别重大的建议以 500 字左右为宜, 特别重要的建议不超过 2 200 字。请注明建议人姓名、单位。欢迎国内外科技工作者及各级科协、学会投稿。栏目责任编辑: 王芷; 投稿邮箱: wangzhi@cast.org.cn。