

· 光电器件与材料 ·

## 高精度太阳传感器原理与精度可信度分析

张万永

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**从太阳传感器的原理出发,分析了儿种典型类型的太阳传感器的原理和对应精度的可信度表达式,并发现以现有器件为基础的复合型太阳传感器的精度仍有进一步提高的潜力:在文献中给出的器件基础上,确定相应的理论上的角分辨率可信绝对精度可以达到  $10^{-5}$  级;提出实现精度存在近 2 个量级提高空间.随着器件和其他相关技术的进步,未来使用的太阳传感器精度可以达到 5 个量级以上.

**关键词:**太阳传感器;高精度;精度可信度

**中图分类号:** TP212; TN215

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)06-0032-04

## Analysis of Principle and Accuracy Reliability of High Accurate Sun Sensor

ZHANG Wan-yong

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The principle and the expression of accuracy reliability of some kinds of sun sensor were analyzed to find that the accuracy of the compound sun sensor based on the existing device have the potential to be enhanced. Based on the device used in disquisition, it was confidence that in theory the absolute accuracy reliability of angle resolution can be at digitally  $10^{-5}$ , and the accuracy can be improved digitally 2; along with the progressing of the device, the accuracy of sun sensor to be used in future can reach digitally 5, or even more.

**Key words:** sun sensor; high accuracy; reliability of accuracy

太阳传感器广泛用于航天器中,目前的主要用法是用于对太阳帆板的对日定向,以保证航天器的能量有效供给.太阳传感器深入应用在航天器自身的实时精确定位.采用太阳传感器、星敏器、地球敏感器的测角参量和对地距离长度参量构成的本体坐标反演得到天球坐标可以实现航天器本体的精确定位.实现本体的精确定位要求各本体测量参量达到相应的精度.太阳传感器的精度决定对日定位精度,因此提高太阳传感器的精度对于精确定位具有重要意义<sup>[1,2]</sup>.

### 1 能量型太阳传感器原理与误差来源

能量型太阳传感器探测太阳方位最基本的原

理是太阳辐射在光敏元器件产生的光伏效应值与受光角度的关系.光敏元件把光能输入转换成电信号输出,利用输出能量的强度值和角度的关系来解算出太阳的方位.

面型光敏元件光伏效应单位面积产生电流  $I$  与光敏面法矢和太阳光矢夹角  $\alpha$  的关系式为<sup>[3]</sup>

$$I = \eta E \cos \alpha \quad (1)$$

其中,  $E$  为探测元件处太阳的辐照度;  $\eta$  为元件的光电转换系数.

在转换系数和光能为常数的情况下,输出的电信号与角度参量是简单的余弦关系.由于太阳辐照度与太阳的辐出射度和光敏面到太阳的距离有关,由于航天器的运动和太阳的自身活动,太阳的辐照度显然不能满足近似为常数.差值的大小足以破坏

作为导航数据所要求的精度.以飞行器从地球到月球的飞行距离上为例,由距离产生的照度误差高达 2 个量级.即使在地球卫星轨道上也存在相当大的差值.应用中必须消去这个参量.

能量型敏感器有多种,这里介绍一种比较精确、易于校准的夹角式原理能量敏感器.对于两光敏面法矢夹角为  $2\theta$  的 2 个光敏元件,由式(1),其输出电流存在如下关系

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{1 + \tan\theta \tan\varphi}{1 - \tan\theta \tan\varphi} \quad (2)$$

其中,  $\varphi$  为太阳光矢与两光敏面等倾角的平面的夹角,变化范围是  $\pm(\pi/2 - \theta)$ .进而得到

$$\tan\varphi = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \cdot c \tan\theta \quad (3)$$

其中

$$\xi = I_1 \eta_2 / I_2 \eta_1 \quad (4)$$

式(4)中只存在 2 个测量和 2 个可标定量,结果代入式(3)就得到太阳矢量的其中一个参数.同样的方法可以得到另一个参量  $\tan\psi$ ,进而可得到相对于敏感器本体坐标系内的太阳位置的方向矢量

$$\mathbf{r}_s = r_s(\tan\varphi, \tan\psi, 1) \quad (5)$$

定性分析可取  $\theta$  在  $\pi/4$  处的理论分析,其表达式可以简化表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\xi}{1 + \xi^2} \cdot \Delta\theta + \frac{1}{1 + \xi^2} \cdot \frac{2I_1 I_2}{(I_2 \eta_1 + I_1 \eta_2)^2} \cdot (\eta_1 \Delta\eta_2 - \eta_2 \Delta\eta_1) \quad (6)$$

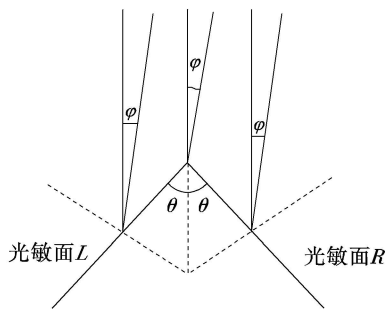


图 1 夹角式能量型太阳模拟器原理图

式中,  $\xi = \frac{1 - \xi}{1 + \xi}$  在区间  $(-1, 1)$  内变化.式中电流按无误差处理,如考虑此项因素,存在第 3 项,形式与式(6)第 2 项相同,把电流与光电转换系数互换即得.作为原理误差分析与光电转换数引入误差形式相同.

由式(6)利用式(3)易得安装角度的误差与由此

引起的测量误差同量级;如果器件的差异值为小量,当  $\varphi$  角为小角度时,与  $\Delta\eta/\eta$  同量级,当  $\varphi$  角为大角度时,这时电流比值可以很大,测量的绝对误差与  $\Delta\eta/(\eta \cdot I)$  同量级,表明较大的测量电流对提高测量精度有好处.

这种能量型太阳敏感器的精度主要取决于光电转换系数  $\eta$  的标定精度和电流的噪声.一般情况下,光电转换系数  $\eta$  可以表示为

$$\eta = \eta(T, \theta, \varphi) \quad (7)$$

其中,  $T$  为温度;  $\theta$  为法矢俯仰角;  $\varphi$  为方位角.系数  $\eta$  标定具有实际意义,3 位精度可以保证角分级太阳方向角度精度.每提高一个量级可以保证由式(3)得出的太阳矢量精度提高一个量级.2 个角度参量对作为敏感器件的工艺水平提出了要求,而温度参量对使用环境设下了限制,尽管可以通过实测的方式取得参数值,同时也增加了系统的复杂性,对其精度必然产生影响.能量型太阳敏感器存在多种结构形式,基本原理都可归结为式(1),其误差形式可能不同,但误差产生的原因与这里给出的实例是一样的,而且误差大小在同一个数量级上.目前以地球物理所的精度为最高  $6''^{[4]}$ .

能量型太阳敏感器测量依靠输入能量的绝对值,敏感器的精度由以下几个方面因素确定:信噪比,一般 80 dB 左右;前置光学窗口材料性能(如为保护光敏元件而增加的衰减片);其他如敏感元件安装的共面度和 2 组敏感元件的两轴正交性.

## 2 方位型太阳敏感器原理和误差来源

方位型数字式太阳敏感器原理是利用几何光学的光线直线传播特性,计算不同角度的入射光线与基准角度入射光线经过光瞳后在光敏面感光形成的位置偏移量来计算入射光线的角度.

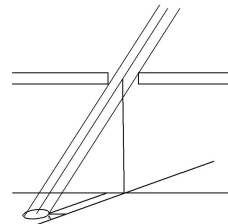


图 2 面元方位型太阳模拟器原理图

对于面接收元件,入射光线在感光面内感光位

置用坐标表示出来,加上光瞳与感光面之间的距离  $h$ ,就构成了太阳位置的方向矢量

$$\mathbf{r}_s = r_s(-x, -y, h) \quad (8)$$

为便于比较和误差分析,改写为

$$\mathbf{r}_s = r_s(-\tan\alpha, -\tan\beta, 1) \quad (9)$$

式中

$$\alpha = \arctan(x/h); \beta = \arctan(y/h) \quad (10)$$

方位型数字式太阳传感器基本原理是光阑在位形空间的位移形成的偏移量和光阑面和感光面之间的距离的比值关系来解算太阳的方向矢量.孔式和缝式是2种主要形式.孔式方位型数字太阳传感器近年研究的比较多.

方位型传感器中光线的偏移量  $x_i$  的表达式为

$$x_i = i \cdot s_p \quad (11)$$

其中,  $s_p$  为像素尺寸;  $i$  为离散标.

方位型传感器的测量最小单位作为感光元的像素,本身是离散量,像点一般情况下是多像素,为了实现偏移量的测量精确,必须对像素数据进行处理.均值法是最简单做法,其数学形式如下<sup>[6]</sup>

$$x_{ci} = \frac{\sum_m \sum_n x_m u(m, n)}{\sum_m \sum_n u(m, n)} \quad (12)$$

其中,  $x_c$  为坐标参量;  $i$  表示维度;  $m, n$  为统计区域离散标;  $u(m, n)$  为归属函数,其表达式为

$$u(m, n) = \begin{cases} 1 \rightarrow (m, n) \in \text{像域} \\ 0 \rightarrow \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

光阑的孔径以圆形为例分析其误差比较方便,由圆孔径的对称性,只分析一维情况就足以说明误差分布及量级.

由式(10)易得误差的表达式

$$\Delta\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2} \left( \frac{1}{h} \Delta x - \frac{x}{h^2} \Delta h \right) \quad (14)$$

为了保证合适的视场角,要求  $x$  与  $h$  在同一个量级上.因此,由式(14)易见安装精度与偏移量的测量精度对测量误差的贡献相当.一般情况下,如果安装精度足够,偏移量的测量精度与光阑和感光面的距离  $h$  的比值就是传感器的精度.对于采用 CCD、APS MEMS 技术的二值型太阳传感器,太阳的方向矢的可信物理精度为:  $s_p/h$  ( $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ) 级.

方位型太阳传感器测量依靠输入能量的相对值,能量作为辅助测量手段,而不作为测量值的直接判据,可以最大限度地减少信号的电噪声的干扰.传感器的精度由以下几个方面因素确定:光敏元件

的最小分辨尺寸与总尺寸;视场角允许的最大测量范围;前置光学窗口材料性能(如为保护光敏元件而增加的衰减片);其他如敏感元件平面度和安装的尺寸精度.

### 3 复合型太阳传感器及理论精度极限

复合型太阳传感器是在方位型传感器的物理基础上,采用能量参量来提高精度的新型太阳传感器.硬件就是方位型太阳传感器.只是在提取偏移量方面增加了能量参量以提高测量精度.

多个文献<sup>[4,5,7,8,10]</sup>中都提到了所谓的质心算法,其核心思想是利用光斑能量在各光敏元件感光的能量输出为电信号,按信号强弱加权平均取得光斑能量分布中心.如果以垂直入射时的光斑坐标为坐标原点,中心坐标就是相对偏移量.

采用绝对能量参量后,偏移量的表达式为

$$x_{ci} = \frac{\sum_m \sum_n x_m g(m, n)}{\sum_m \sum_n g(m, n)} \quad (15)$$

式中,  $g(m, n)$  为像元的灰度.可以看到形式与式(11)一致.事实上,式(11)是式(14)二值化的结果.就数学形式而言是标准的加权平均算法.如果求和分度可以分得足够细,那么求和就可以用积分表示.做线性变换使积分坐标系以光斑中心为原点,如果光斑具有完全的对称性,  $\delta x$  为奇数,  $\Delta g_i$  为偶函数,求积的区域完全包含光斑,求积区与光斑之间的灰度为无穷小,光敏单元产生的测量误差为无穷小量,由奇偶函数的积分特性,求积的结果应趋于零.其数学意义是加权不引入误差,物理意义是实现了虚拟的物理过程——光束压缩.

对于面元阵列器件,面元的像素尺寸可以写成如下关系

$$s_p = s_w / s_c \quad (16)$$

其中,  $s_w$  为面阵列的维度尺寸限度;  $s_c$  为面阵列的维度单元集成总数.

利用式(11)、式(15)、式(16)和式(14)中的第1项误差可以进一步写为

$$\Delta x = \frac{1}{g} \cdot \sum -i \cdot s_p \cdot \frac{\Delta s_c}{s_c} \cdot g_i + \frac{1}{g} \sum \delta x_i \cdot \frac{\Delta g_i}{g_i} \cdot g_i \quad (17)$$

为了书写方便,式中采用通用的简略记法,其中

$$\delta x_i = x_i - x_c \quad (18)$$

式(17)从形式上看,偏移量方面的误差仍是2个均值.其中第1项含有单元集成相对精度,第2项含有灰度测量相对精度,足以说明这是这种原理的理论精度极限.如果式(15)中的 $x$ 用式(11)代入,可以发现与式(17)第1项形式相同,区别在于 $S_p$ 换成了 $S_p * \Delta S_c / S_c$ ,如果可以认为是常数,只是计量的单位变化,而数值完全相同.考察 $\Delta S_c$ 的物理意义,当其变化 $1/S_c$ 时,光敏元的离散标就会发生一个标度值占据另一个标度位的移动.明显与式(11)和工艺现实不符.因此 $\Delta S_c$ 的可累加绝对数值的可信上界为 $1/S_c$ .取 $\Delta S_c = 1/S_c$ 应是值的上限.按此推理,代入式(17)第1项,并把常数 $S_p$ 提到求和号之外,得到

$$\frac{1}{g} \sum -i \cdot S_p \cdot \frac{\Delta S_c}{S_c} \cdot g_i = -\frac{S_p}{g} \sum \frac{i}{S_c} \cdot \frac{1}{S_c} g_i \quad (19)$$

式(19)按数学原理,可用定积分计算,积分结果为

$$\frac{1}{g} \sum -i \cdot S_p \cdot \frac{\Delta S_c}{S_c} \cdot g_i = -\frac{g_\xi}{g} \cdot \frac{2nm + m^2}{2S_c^2} S_p \quad (20)$$

式中, $g_\xi$ 是光敏元的灰度中值; $n, m$ 分别为光斑位置的起始离散标和离散标的跨度值.作为量级估计, $g_\xi/g$ 应与 $1/m$ 同量级, $n$ 与 $S_c$ 同量级,一般情况下 $m \ll S_c$ .不失一般性,取 $g_\xi/g = 1/m$ ,并略去 $m/S_c$ 平方项的高阶小量,这样由式(20)得到式(17)第1项的近似表达式为

$$\frac{1}{g} \sum -i \cdot S_p \cdot \frac{\Delta S_c}{S_c} \cdot g_i \approx -S_p / S_c \quad (21)$$

式(17)第2项的误差来源为物理实际引起的对称性破坏,其中存在的随机误差不可消除,引入误差大小和级别可以通过实际图像处理才能确定.

## 4 实际图像仿真

实际图像采用文献[6]中给定的图像(如图3),仿真主要用于验证式(17)第2项的误差级别.仿真的前提是误差只来自于太阳本身和测量过程中产生的随机误差.

仿真采用了色度学中能量值的方法,并进行了由光度量到辐射度量的转换.其形式如下

$$F_e = V_{rgb} F_v = v_r \cdot R \cdot (R) + v_g \cdot G \cdot (G) + v_b \cdot B \cdot (B) \quad (22)$$

其中, $v_i$ 为视见函数, $i = r, g, b$ ;  $R, G, B$ 与 $(R), (G), (B)$ 分别为RGB色度坐标值和RGB坐标基.

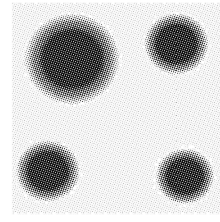


图3 仿真用图(已反转)

通过对比 NASA 公布的太阳图像和采集得到的图像数据分布情况,可以看到太阳活动的痕迹很清晰,而由器件引入的误差不明显.仿真输入按现有器件给出的具体技术指标和相关技术<sup>[9]</sup>确定的1%随机误差.按式(15)和式(17)分别对未经任何算法处理和采用了消除太阳活动简单算法处理后的数据进行了仿真处理.式(17)第1项中 $g_\xi/g$ 的数值介于 $1/m$ 与 $2/m$ 之间,由此可以确定式(17)第1项可信上界为 $2S_p/S_c$ .式(17)第2项得到的结果为:处理前为误差不超过0.004像素;处理后误差不超过0.002像素.

对应相关文献[8]采用的 STAR\_1000 图像处理芯片,由式(17)第2项得到的误差结果的可信上界分别为:处理前小于 $6.0 \times 10^{-8}$ ;处理后小于 $3.0 \times 10^{-8}$ .对应 $h$ 值为7 mm的情况,如果其加工精度达到与偏移量相同的精度,则由太阳敏感器得到的方向矢分量的角分辨绝对精度的可信上界为 $10^{-5}$ 级.

## 5 高精度太阳敏感器展望

从2003年以前面世的相关配件产品的技术指标来看,理论值角分辨绝对精度的可信上界可以达到 $10^{-5}$ 级.相关文献[5,7-8]介绍的复合型太阳敏感器的精度只达到了 $10^{-2}$ 级,还有较大提高空间.标定使用的设备、仪器精度不够是传感器精度不够高的原因之一,其他原因有待于进一步深入挖掘.基于现有配件产品的技术参数,理论上可以得到方位视角接近 $2\pi$ 、俯仰接近 $\pi/2$ 的高精度太阳敏感器.如果只实现2个量级的绝对精度,俯仰角可大于 $5\pi/12$ .尽管对于真空条件下的使用情况还需实验数据进一步验证,但从理论和实验角度已分别进入到准应用阶段.从公开信息和相关文献来看,把太阳敏感器的绝对精度提高到5个数量级以上并进入实际应用还需要几项工作要做:

(下转第54页)



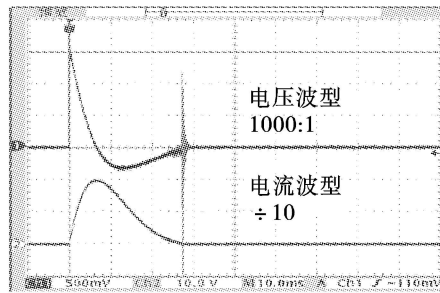


图 7 井中大功率脉冲电磁场源的发射电压与电流波形

电流波形如图 7 所示,所采电压信号为分压后发射源电压,其分压比例为 1 000:1.由图 7 可知最大电压为 1.5 V,则发射源电压为 1 500 V,所采集最低电压为 -0.4 V,则发射源电压为 -400 V.为方便对电流信号的采集,把电流信号经 0.5  $\Omega$  电阻变为电压进行采集,由图 7 知所采集最高电压 20 V,流经放电线圈的电流为 40 A,其电流波形与理论推导的波形相一致.经试验验证在强电压环境(1 500 ~ -400 V)下,连续对发射源信号进行采集,高压未烧毁采集卡.因此该隔离电路实现了对双极性信号隔离采集,且可隔离瞬变额定电压为 8 000 V.

### 3 结 束 语

实验结果表明,应用线性光耦 HCNR201 组成

(上接第 35 页)

(1) 加工精度.加工精度须达到纳米级.普通的飞秒激光加工的精度还不能满足要求.高精集束电子流或其他高精度集束粒子流有可能成为理想的加工手段.

(2) 解决光敏元件的辐射耐受性问题.真空条件下直接面对太阳辐射的恶劣环境要求对器件或窗口材料的性能进行进一步的深入研究.潜在的解决形式如下:①进一步开发耐辐射光敏器件;②开发高一致性光学窗口材料;③采用算法精确处理器件和材料的一致性,减小误差.

(3) 数据处理帧频需要提高.提高 AD 转换器采样速度或改进算法.

#### 参考文献

- [1] 郁发新,孙琳琳.基于太阳矢量的皮卫星姿态角测量误差分析[J].吉林大学学报,2008,38(4):976-981.
- [2] 母方欣,方群,罗建军.基于最小二乘法的月球探测器

的双极性信号隔离电路线性度好、电路简单,有效地解决了高压强电磁对高速采集系统的影响,且由于光耦输入阻抗小,极大地衰减了叠加在采集信号上的干扰信号,提高了信号的信噪比,提高了信号处理的精确度.文中所设计的双极性隔离电路以其低成本、高稳定性、高线性度的优点可广泛应用在自动化仪表输入输出隔离、热电偶的隔离、数据通信、电压电流检测和测量、工业控制等领域.

#### 参考文献

- [1] 谭颖琦,范大鹏,陶溢.基于线性光耦 HCNR200 的 DSP 采集电路设计与实现[J].电测与仪表,2006(6):46-48.
- [2] 秦伟刚.光电耦合隔离技术与应用[J].仪器仪表学报,2006(6):2603-2604.
- [3] 张宝生,王念生.基于高线性度模拟光耦器件 HCNR200 模拟量隔离板[J].仪表技术,2005(5):59-60.
- [4] AN SANG HOU. A Wide Bandwidth Isolation Amplifier Design Using Current Conveyors[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2004, 40: 31-38.
- [5] 邱吉冰,赵伟.电流小信号隔离采集板的设计与实现[J].自动化仪表,2007(4):61-63.
- [6] 李海波,林辉.线性光耦在电流采样中的应用[J].光电器件,2003(11):37-38.
- [7] 自主导航[J].计算机仿真,2007,24(11):45-48.
- [8] 陈非凡,陈益峰.采用光学非线性补偿的两轴微型太阳敏感器[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(2):197-201.
- [9] 何丽,胡以华.太阳敏感器的原理与技术发展趋势[J].电子元件与材料,2006,25(9):5-8.
- [10] 朱鸿泰,孙胜利,陈桂林. CMOS APS 在太阳敏感器中的应用研究[J].红外技术,2004,26(4):76-79.
- [11] 何丽,胡以华,杨勇.一种新的 APS 数字式太阳敏感器测姿算法[J].传感器世界,2007,13(6):6-10.
- [12] 樊巧云,江洁,张广军.小型 CMOS 太阳敏感器[J].光电工程,2007,34(2):133-137.
- [13] 丁天怀,毕研刚,王鹏.基于 CMOS APS 的微型数字式太阳敏感器[J].清华大学学报(自然科学版),2008,48(2):203.
- [14] 居戩之,韦晓茹,朱亚一,等. CCD 像元光电转换效率不一致性补偿技术[J].传感器世界,2007(10):18-22.
- [15] 朱鸿泰,孙胜利,陈桂林.基于 CMOS APS 高精度太阳敏感器[J].传感器世界,2006(9):26-30.