

CCD 太阳角计中的形心计算法

冯 琛

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文提出了 CCD 太阳角计的形心计算法, 按这一方法制成的二轴细分型 CCD 太阳角计的精度比用传统方法在相同条件下制成的太阳角计的精度高几十倍。形心计算法还可以广泛应用于各种 CCD 测量仪器, 从而根本上改善这类仪器的性能。

一、引 言

电荷耦合器件(CCD)太阳角计有以下几种典型的仪器: 荷兰天文卫星上采用的太阳角计, 是 CCD 太阳角计的雏形^[1], 其中敏感器是光敏二极管列阵; 中国科学院上海技术物理研究所研制的 CCD 太阳角计, 是一种典型的 CCD 太阳角计, 采用线列 CCD 作检测元件, 处理方法是边缘检测法; 比这类仪器更完善的是 Flamenbaum. S.^[2] 发表的仪器, 采用两侧边缘检测; 还有一种是欧洲空间研究技术中心^[3] 提出的高精度太阳角计, 采用模拟平衡的处理方法。

图 1 是 CCD 太阳角计的典型结构示意图。边缘检测法就是由第一个超过门限的输出的光敏元位置 x_1 来确定太阳的位置。这种方法的理想精度只能达到 ± 0.5 个光敏元尺寸。另外, 门限变化的读数精度影响很大; 目标辐射强度变化也影响读数精度; 对光敏元的一致性要求也很高。因此, 这种方法的精度难以做得很高; 例如, 由中国科学院上海技术物理研究所研制的 150 元 CCD 太阳角计, 在 $\pm 1.2^\circ$ 视场范围内, 精度为 $58''$ 。

作者在 150 元线阵 CCD 太阳角计的基础上试制了一台样机。处理方法上提出了全新的方法——形心计算法, 使精度得到提高。在电路形式上, 用微处理机完成所有处理和控制在, 并使结构得到简化。

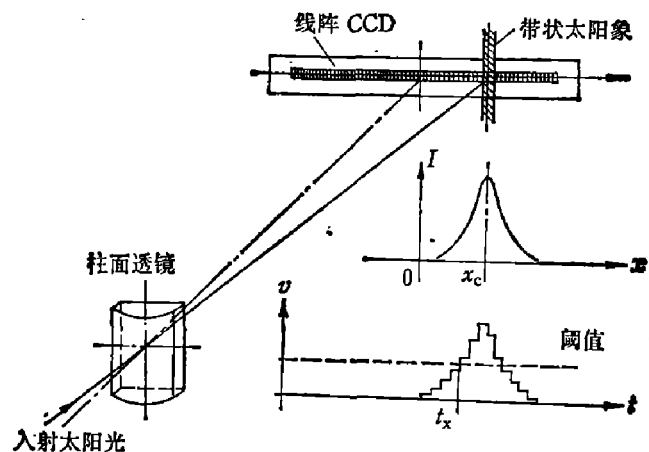


图 1 CCD 太阳角计结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the CCD sun sensor.

二、CCD 太阳角计的形心算法

由于 CCD 象面上的太阳象所占象元不止一个, 可以利用多个光敏元的输出, 采用一种算法来计算太阳象的中心位置。由于利用了几乎全部的图象信息, 所得的结果可以使位置测量精度大为提高, 实现 CCD 光敏元之间的内插细分。

形心算法具有常定增益, 具有积分降低噪声的优点。可以证明, 若入射辐射分布接近抛物型(一种极普遍模型), 而噪声是寄生噪声。白噪声和高斯噪声, 则形心算法是最佳的细分法^[4]。

形心算法可以写成

$$x_0 = b \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot v'_i}{\sum_{i=1}^n v'_i}; \quad (1)$$

式中, x_0 为形心位置; b 为 CCD 相邻两个光敏元中心距; i 为光敏元序号; v'_i 为第 i 个光敏元经阈值处理后的输出值。阈值处理表示为:

$$v'_i = \begin{cases} v_i - v_g, & v_i - v_g > 0; \\ 0, & v_i - v_g \leq 0; \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_i 为第 i 个光敏元的输出值, v_g 为固定的阈值。

由几何学中形心的定义 $\bar{x} = \int x ds / \int ds$ 可以看出: 这种算法计算所得到的是辐射强度分布图形中包络线以下, 阈值线以上所围面积的形心(见图 2)。

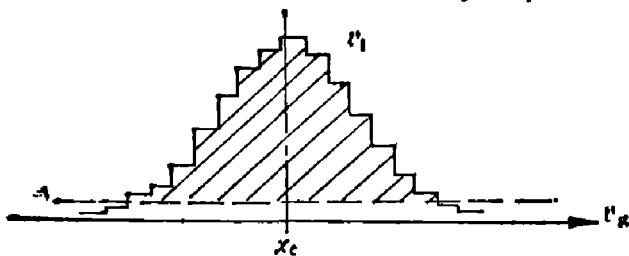


图 2 计算所得到的形心

Fig. 2 Calculated centre of figure.

布图形中包络线以下, 阈值线以上所围面积的形心(见图 2)。

形心算法的一个特点是, 尽管 CCD 光敏元分布在空间位置上是不连续的, 但形心计算的结果 x_0 是连续的, 不受光敏元尺寸及数目的影响。这是因为随入射光移动的辐射分布图形变化是连续的, 各光敏元输出值 v_i 的变化也是连续的。实验也证实了这一点, 这样就实现了光敏元之间的内插细分, 并提高了分辨率的精度。形心算法的另一个特点是: 对于所有对称变化, 都不会产生误差, 例如太阳辐射变化、电路增益变化及 CCD 器件使用日久的灵敏度变化等对精度都不产生影响。这对用于空间飞行的太阳角计是至关重要的。至于其它一些影响因素, 如不对称辐射分布, CCD 响应不一致等, 可以通过校正来消除。

三、样机研制

我们根据形心计算原理, 研制了一台实用 CCD 太阳角计样机。样机由头部和处理电络盒两部分组成(见图 3)。由图 3 可见, 柱面透镜 L 将太阳以带状成象于 CCD 上; CCD 将太阳象变为相应的电信号; 该信号经采样(S/H)、放大(A_1)送模数转换(A/D); 所得的数字量由微处理机(PC)处理解算出结果。微处理机还发出采样信号及 CCD 驱动脉冲, 与驱

动形成逻辑 (T) 一起构成脉冲经放大 (A_2) 送至 CCD 器件。

采用的 Z80 CPU 集中安装在一块 $160 \times 170 \text{ mm}^2$ 的印刷电路板上, 大大简化了电路结构, 所有控制处理及驱动均由 CPU 完成。

固化软件在运行中功能有: (1) 产生各路驱动脉冲使 CCD 工作; (2) 搜索整个视场直至捕获太阳象; (3) 在有太阳象的区域顺序采样; (4) 阈值处理, 去除非目标信号; (5) 求形心; (6) 修正采样区域而跟踪太阳; (7) 对结果进行数字滤波并输出; (8) 目标出视场处理及再入视场再捕获; (9) 错误处理; (10) 上电自举, 开机后自动由引导程序进入正常工作。

程序为模块结构, 长度为 $1.3k$, 采用多个中断来满足各路要求。光学系统焦距为 96.43 mm , CCD 采用国产 150 元线列, 其光敏元中心距为 $27 \mu\text{m}$, 信噪比较低, 约 60。一个光敏元所对应的角度为

$$\alpha = b/f = 2.8 \times 10^{-4} \text{ rad} \doteq 58 \text{ sec.}$$

总视场为

$$\theta \doteq 1502 = 8700 \text{ sec} \doteq 2.4 \text{ deg.}$$

样机主要指标: 测量范围(二维视场)为 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$; 测量精度(绝对误差) $< 2'' (3\sigma)$; 输出速率 $> b/s$; 功耗 $< 4W$; 外形尺寸头部为 $60 \times 100 \times 190 \text{ mm}$, 电路盒为 $100 \times 120 \times 230 \text{ mm}$ 。

四、试验结果

将 CCD 太阳角计头部安放在光学分度头上, 用平行光管模拟太阳。用计算机接收并显示太阳角计的读数, 光学分度头提供基准转角。在整个视场范围内, 共测了 900 多个位置, 送入计算机进行分析, 得出如下结果: (1) 由各种系统误差引起的测量读数的非线性很容易

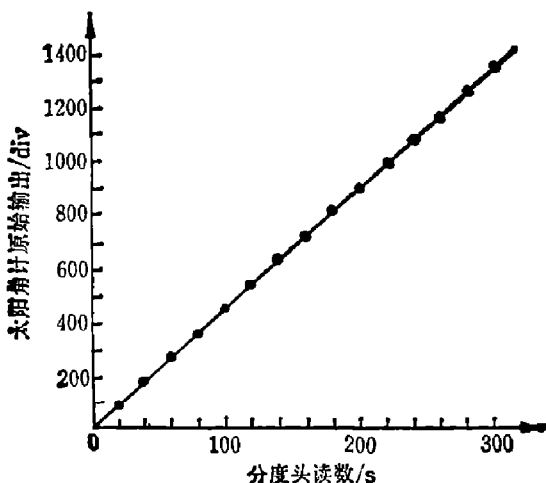


图 4 太阳角计输出与角度的关系
Fig. 4 Relation between output of the sun sensor and angle.

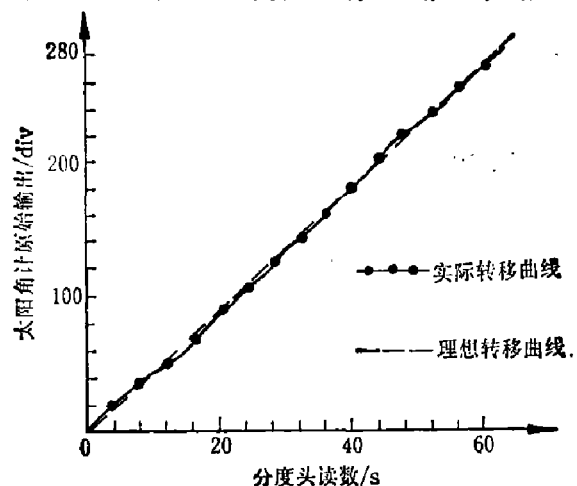


图 5 $60''$ 视场内太阳角计输出与角度的关系
Fig. 5 Relation between output of the sun sensor and angle in $60''$ field of view.

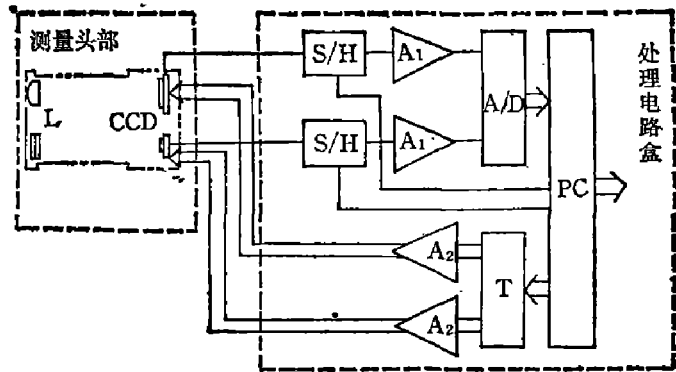


图 3 系统框图

Fig. 3 Block diagram of the system.

通过校正而消除, 只要每隔 5' 作一折线就可使结果与实际转角的误差小于 2"。(2) 整个测试区域内校正后的读数误差均小于 2", 从而证实了可实现光敏元间 30 点的内插细分。(3) 误差的主要成分是随机误差, 对一些点进行数百次测试, 统计得均方误差 $\sigma \approx 0.4''$ 即 $3\sigma \approx 1.2''$ 。另外, 间隔 2 小时重测同一点, 发现漂移不大于 1"。

图 4 是其中 5' 视场内测量读数与被测角度之间的关系, 读数的连续性和线性相当好, 说明 COD 光敏元之间的不一致已被形心算法中的多元作用抵消至很小。为了看清微小的非线性, 图 5 是其中 60" 视场中的情况, 线性仍能满足要求, 说明形心算法实现光敏元间的内插细分, 读数均匀, 方法引起的误差很小。

五、误差分析

1. 方法误差

形心的几何学定义为

$$c = \int x \cdot ds / \int ds \quad (3)$$

与式(1)相比, 本方法实际上是用一组条带的形心来近似连续图形的形心, 其误差为 $\varepsilon = x_0 - C$ 。显然条带越多, 其间隙越小, 则由此引起的误差越小。样机中太阳象复盖三十多个光敏元, 在计算机上进行了这项误差的计算, 得出结果为: 此项误差远小于条带中心距的百分之一。这就是说, 由 COD 的输出计算形心与实际太阳象中心的偏差相当小, 当内插细分不超过一百点时此项误差可不予考虑。实验结果也说明了这一点, 未发现有这项误差的影响。

2. 固定误差

固定误差主要是指 COD 各光敏元之间的不一致性。一般可达 10%, 故 COD 输出所得的形心与入射辐射分布的形心不会重合。由于形心计算的多元平均作用可以抵消相当一部分, 使得实际结果误差并不太大, 实验结果证实了这一点, 细分至 1/30 个象元(2")时, 还未出现该误差的影响。另外, 还有安装、透镜折射和以弦长代替弧长等误差, 所有固定误差组合成系统误差, 通过标定和校正, 可达到允许的程度。本样机采用分段折线校正达到了所需的 2" 精度。

3. 随机误差

COD 太阳角计无运动部件, 其随机误差仅来源于 COD 输出的随机起伏, 这是限制形心计算方法最终精度的因素。用误差理论可以证明(见附录), 此项误差可表示为

$$\Delta = \sqrt{n} \delta / \sqrt{12 \bar{A}}; \quad (4)$$

式中, Δ 为形心计算结果 x_0 的随机起伏, 以光敏元中心距为单位; n 为入射辐射图形所覆盖的光敏元数目; \bar{A} 为辐射分布图形归一化面积, 即包络线下, 阈值以上面积与等宽等高矩形面积之比; δ 为光敏元输出的最大随机起伏的归一化值, 即最大随机起伏与最大有效输出之比。

从式(4)可以看出, 提高精度途径有: (1) 在不改变视场的情况下, 减小光敏元覆盖数目 n , 这对于太阳来说是办不到了, 但对于其他用途, 就可以减小目标尺寸来减小误差; (2) 提高光学系统象质, 使光斑弥散减小, 使 \bar{A} 增大; (3) 采用信噪比高的 COD 器件。

采用国产 150 元 COD, 根据性能指标提供的和实测得知最大随机起伏约为 1/100, 即 $\delta = 1/100$; 对于 30' 角直径的太阳象覆盖元数 $n = 30$; 柱面透镜成象所得近似抛物线分布的

归一化面积值实测可达 $A=1/2$ 。代入式(4)得: $\Delta=0.032$ (光敏元中心距); 细分约 30 点。对应角度的随机误差为:

$$0.032 \times 58 = 1.9 \text{ sec};$$

实验结果证实了这一点, 实测统计得随机误差为 $1.2''(3\sigma)$ 。

国外产品 CCD 的随机起伏典型值为 $1/2500$ (仙童公司产品), 如用这种器件, 形心计算法的优越性将会更加明显。

六、结 论

用型心计算法的细分型太阳角计, 分辨率和精度的提高不受 CCD 光敏元尺寸的限制。已完成的样机实测精度在 $\pm 1.2^\circ \times 1.2^\circ$ 视场内小于 $2''(3\sigma)$, 而用同样结构同样 CCD 器件用传统方法制成的太阳角计, 仅能达到 $1'$ 的精度。

上述结论和实验结果, 接近近年来国外同类仪器研制所报道的水平(光敏元间细分为 60 点^[5])。本文提出的细分方法, 可以广泛用于各种 CCD 光电测量仪器, 使该类仪器的性能得到根本改善。

致谢——本项工作是在匡定波和陈桂林两位老师指导下完成的, 特此致谢。

附录 形心算法误差表示式的推导

对 n 个幅度分别为 A_1, A_2, \dots, A_n 的点求形心有

$$\frac{\sum_{i=1}^n i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}; \quad (\text{A1})$$

其中, i 也是这些点的位置。

由于各点存在随机起伏, 形心计算的随机起伏可由误差合成得出:

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial c}{\partial A_i} \right)^2 \sigma_{A_i}^2; \quad (\text{A2})$$

注意到各 CCD 元的随机起伏分布是相同的, 即有

$$\sigma_{A1} = \sigma_{A2} = \dots = \sigma_{A_n} = \text{常量};$$

且有

$$\frac{\partial c}{\partial A_1} = \frac{(A_1 + A_2 + \dots + A_n) - (1A_1 + 2A_2 + \dots + nA_n)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)^2};$$

$$\frac{\partial c}{\partial A_1} = \frac{1 \cdot \sum A_i - c \sum A_i}{(\sum A_i)^2} = \frac{1-c}{\sum A_i};$$

$$\frac{\partial c}{\partial A_2} = \frac{2-c}{\sum A_i};$$

.....

所以,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial c}{\partial A_i} \right)^2 &= \left(\frac{1-c}{\sum A_i} \right)^2 + \left(\frac{2-c}{\sum A_i} \right)^2 + \dots + \left(\frac{n-c}{\sum A_i} \right)^2 \\ &= \frac{1}{(\sum A_i)^2} [(1-c)^2 + (2-c)^2 + \dots + (n-c)^2] \\ &= \frac{1}{(\sum A_i)^2} [(1^2 + 2^2 + \dots + n^2) + nc^2 - 2c(1+2+\dots+n)] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{(\sum A_i)^2} \left[\frac{1}{6} n(n+1)(2n+1) + nc^2 - 2c \frac{(1+n)}{2} n \right]. \quad (A3)$$

考虑图形是对称的有

$$c = \frac{n+1}{2}; \quad (A4)$$

代入式(A3)得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial c}{\partial A_i} \right)^2 &= \frac{1}{(\sum A_i)^2} \left[\frac{1}{6} n(n+1)(2n+1) + n \left(\frac{1+n}{2} \right)^2 - 2 \left(\frac{1+n}{2} \right)^2 n \right] \\ &= \frac{1}{12(\sum A_i)^2} n(n+1)(n-1) = \frac{n(n^2-1)}{12(\sum A_i)^2}. \end{aligned}$$

引入 \bar{A} 为归一化面积值, 即令 $\bar{A} = \frac{\sum A_i}{nA_m}$, 其中 A_m 是最大输出幅度。 $\sum A_i$ 就是线下面积, nA_m 是包含 $\sum A_i$ 的最小矩形面积。 \bar{A} 的物理意义为线下面积与等宽等高之矩形面积之比。 即

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial c}{\partial A_i} \right)^2 = \frac{n^2-1}{12n\bar{A}^2 A_m^2}. \quad (A5)$$

代入误差合成公式(A2)

$$\sigma_c^2 = \frac{(n^2-1)\sigma A_i^2}{12n\bar{A}^2 A_m^2}; \quad (A6)$$

当 $n^2 \gg 1$ 时, 上式简化为

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{n} \sigma A_i}{\sqrt{12} \bar{A} A_m}. \quad (A7)$$

令 $\delta = \frac{\sigma A_i}{A_m}$, 即起伏的归一化值, 有

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{n} \delta}{\sqrt{12} \bar{A}}; \quad (A8)$$

如用起伏最大值表示(此时 δ 也表示最大值)有

$$\Delta = \frac{\sqrt{n} \delta}{\sqrt{12} \bar{A}}. \quad (A9)$$

参 考 文 献

- [1] Smets A. J., *Philips Technical Review*, **34**(1974), 8:208.
- [2] Flamenbaum S., *9th IFAC Symposium, Noordwijkerhout, The Netherlands*, (1982), 273.
- [3] *European Space Research and Technology, High Accuracy Sun Sensor*, ESA-CP(P)-1983.
- [4] Maurer H. A., *Military Electronics Defence Expp 177 Conference Proceedings*, 347.
- [5] Bokhove H., *9th IFAC Symposium, Noordwijkerhout, The Netherlands*, (1982), 265.

CENTROID ALGORITHM IN PIXEL CCD SUN SENSOR

FENG CHEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A centroid algorithm method is presented in this paper. A two-dimensional fracture pixel CCD sun sensor is developed based on the method, which has the precision several-ten times as high as that based on the traditional methods. The method described may be widely used in all kinds of CCD measuring apparatus to improve their performances.