

CCD星跟踪器

郝志航 王家骥

摘要：自七十年代以来，CCD星跟踪器在各种航天飞行器上得到越来越广泛的应用。本文叙述了XG—1型CCD星跟踪器的设计思想，系统结构和工作原理。整个系统的工作由单片微计算机控制；由于采用了内插细分的矩心算法，XG—1 CCD星跟踪器达到了亚象元精度。实验结果说明，在视场角为 $2^\circ \times 2^\circ$ 时，测量精度优于2角秒。系统具有多星跟踪的功能，可以稳定跟踪+6.4等恒星。

一、引 言

本世纪五十年代初，飞机和导弹的自动导航系统就开始应用星跟踪器了。由于以恒星为参照所测量出的位置精度比以太阳为参照的精度高得多，因此六十~七十年代的各种空间飞行器上都广泛地使用星跟踪器来进行指向和姿态的控制。这期间，星跟踪器的敏感器通常使用析像管 (Image dissector)。尽管析像管星跟踪器成功地完成了许多空间飞行任务，但析像管本身固有的不足之处限制了析像管星跟踪器的应用，因为它很难满足长寿命、超高指向精度和多星跟踪等空间飞行任务的要求。

七十年代初电荷耦合器件 (CCD) 成像阵列的出现为星跟踪器的发展和应用开辟了一条崭新的途径。CCD器件体积小、几何精度高、光谱范围宽、灵敏度高、动态范围大、不怕强光直射，不使用高压电源等等这些非常突出的优点使CCD成像阵列成为星跟踪器中敏感元件的理想选择。自七十年代后期以来，对CCD星跟踪器进行了理论上和实验上的广泛研究，为空间飞行任务的需要，已经研制并正在研制各种不同指标的CCD星跟踪器。

本文介绍长春光学精密机械研究所研制的XG—1型CCD星跟踪器的情况。主要论述研制过程中的设计思想，样机的结构，工作原理，实验及实际测试结果。

二、设计思想

XG—1星跟踪器的设计目的是要研制出一台能够进行功能测试的CCD星跟踪器样机。这台样机应具有较高的灵活性，很容易修改为在特定任务中实际应用的星跟踪器。为此，在XG—1星跟踪器的设计中对光学结构和机械结构要求结构紧凑、体积小、重量轻、光学成像质量高、机械稳定性好，对电子学部件要求模块化，主要的控制和处理部件采用单片计算机完成，这就更增加了系统的灵活性、易修改性和可扩充性。

设计所依据的CCD是美国仙童公司制造的行间转移结构的CCD222。逐行使用时，象光数为380 (水平) \times 244 (垂直)。其象元结构如图1所示，象元有效面积为 $12\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$ 。CCD222的整个有效面积为 $8.8 \times 11.4\text{mm}$ 。

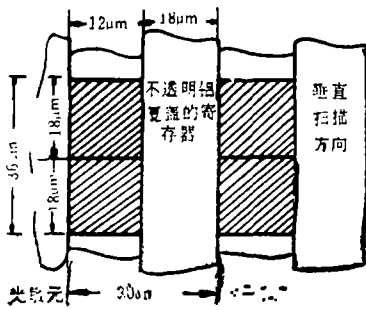


图1 CCD222象元结构
表1

光学系统的结构采用折反式，焦距为210mm，相对孔径为1:2.8。光学系统参数说明整个CCD像面所对应的视场为 $2.4^\circ \times 3.1^\circ$ 。在这个视场内95%以上可能出现一颗星的星等 $m_v = 5$ 取做星跟踪器的极限探测星等。实际上在这个视场中常常会有多颗5等以下星等的星出现，因此星跟踪器应具备多星跟踪的能力。系统设计最多可以跟踪四颗星。跟踪测量精度设计为3角秒（均方误差）。表1列出了有关的主要设计参数和指标。

传感器	CCD222
结构	行间转移
象元数	380×241
象元尺寸	$30\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$
光学系统	
结构	折反式
焦距	210mm
相对孔径	1:2.8
视场	$3.1^\circ \times 2.4^\circ$
极限探测星等	$m_v = 5.0$
可跟踪最大星数	4
跟踪精度	3角秒 (RMS)

三、系统结构

XG-1星跟踪器由敏感头，处理器和主计算机构成。敏感头包括光学系统、CCD器件、驱动电路、预视放电路、半导体致冷器、CCD焦面安装机构和镜筒组成。处理器主要由视频处理器、A/D转换器、CCD时序发生器、座标发生器、单片计算机和相应的存储器、接口电路组成。主计算机在系统中的作用是作为控制星跟踪器的仿真导航计算机而设置的。

(1) 光学系统

XG-1星跟踪器的光学系统选用卡塞格林折反式望远系统，这种结构的优点除了可以使结构紧凑、缩小体积、减轻重量以外，还可以在CCD对应的 $4000\text{\AA} \sim 11000\text{\AA}$ 的宽光谱范围内完全消除二级光谱像差，这是一般折射结构的系统所不能做到的。图2是光学系统的结构图。

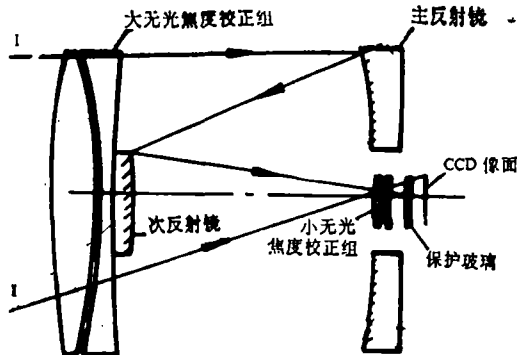


图2 光学系统结构图

星跟踪器光学系统引起跟踪精度下降的主要问题是**不对称像差**，如**彗差、像散和色差、畸变等**，在XG—1星跟踪器的光学系统中设计了相应的校正组对**彗差、像散和畸变**都进行了很好的校正。

超高精度星跟踪器的跟踪测量工作中，光学系统处于离焦状态下。对于象CCD222这样的行间转移CCD探测器，最佳的弥散斑大小应为象元大小的2~3倍。计算表明，最佳离焦量为0.1mm左右。对这个离焦量计算的点扩散函数强度表明，分布对称成像质量很好。

(2) 处理器

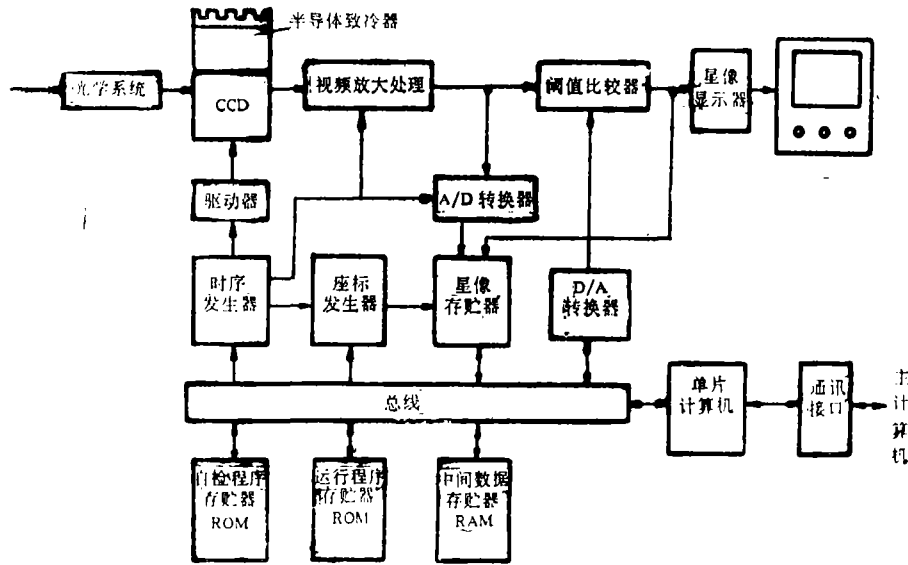


图3 处理器方框图

处理器内电子学部件的构成及其相互联接关系由图3说明。时序发生器提供CCD所需的各种驱动时钟信号，也为A/D转换器和坐标发生器提供必需的脉冲信号。时序发生器由单片计算机控制，使得CCD的积分时间可以由软件加以调整。

CCD像面上星光形成的电荷图像移出后，经敏感头的预视放大后送至处理器。视频信号在处理器内先由视频放大处理单元进行放大和处理，获得幅度足够大的高信噪比信号。这个信号一路送至阈值比较器在捕获过程中使用，另一路经A/D转换器转换为数字信号供跟踪过程中使用。阈值比较器由单片计算机控制，根据选定导航星的星等由软件设置阈值，这样可以保证可靠地跟踪选定的导航星。

星像存储器在捕获过程中存贮整个视场的二值图像，以便捕获进入视场内亮度超过设定阈值的每一颗星。而在跟踪过程中，星像存储器存贮每颗星邻域子空间内的强度图像。为跟踪测量提供必要的数据库。

坐标发生器向单片计算机提供捕获时全视场的座标以及跟踪时每个子空间的座标。

单片计算机除了控制整个处理器的工作外在捕获和跟踪过程中还要进行大量的计算工作。最终给出视场内每颗星的精确座标位置。

为了性能评价的方便、直观，设计了星像显示器。利用它可以实时地观察进入视场内星的图像及其运动状况。

处理器通过RS—232标准通讯接口与主计算机相连。处理器接收主计算机发出的命令和数据并向主计算机发送测量结果和工作状态。

四、系统工作原理

XG-1星跟踪器的工作分捕获和跟踪两种方式。

捕获过程由主计算机起动。主计算机根据所选导航星的参数给出相应的积分时间和阈值。在捕获方式下工作时，星跟踪器首先将视场内超过阈值的视频信号以二值图像形式存入星像存储器。这时的二值图像除了包括导航星以外，还包含CCD的热点和外界的干扰信号。捕获过程中数据处理的第一步是热点补偿，其次是剔除干扰，最终确定导航星以CCD象元计的粗坐标。捕获过程的程序流程图如图4所示。

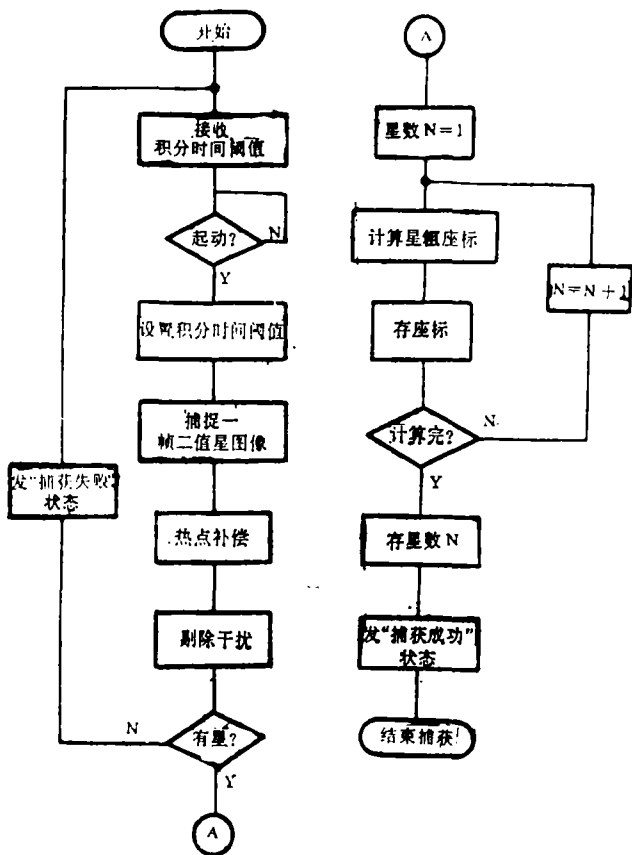


图4 流程图

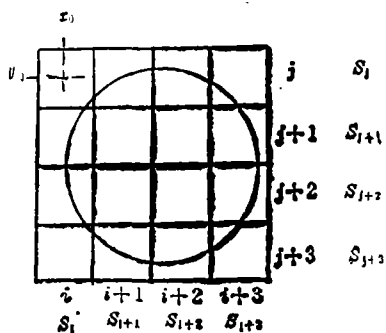


图5 星像弥散圆图

捕获成功后，系统立即转入跟踪过程。在跟踪方式下，利用在捕获过程中建立起来存有每颗星粗略坐标的星表，为每颗星建立一个子空间。将每个子空间内CCD输出的视频信号进行A/D转换后，存入星像存储器。由于光学系统的故意离焦，使星像在CCD像面上的弥散斑大小占 4×4 个象元，如图5所示。弥散圆的能量中心为星的精确位置。据此可以利用内插细分算法计算出星的精确位置，其精度可以达到每个CCD象元的几分之一甚至几十分之一。通常称这样的精度为亚象元精度或超高精

度。可以采用的内插细分算法有许多种，根据计算量少，精度高的标准进行比较，简单矩心法是最好的—种算法。结合图6，具体算法如下。

设象元 (i, j) 的强度为 $I(i, j)$ 。则可以计算出星像弥散圆能量中 (x_0, y_0) 为：

$$x_c = x_0 + 1.5 + \frac{S_{i+3} - S_{i+1} - 2S_i}{S_i + S_{i+1} + S_{i+2} + S_{i+3}}$$

$$y_c = y_0 + 1.5 + \frac{S_{j+3} - S_{j+1} - 2S_j}{S_j + S_{j+1} + S_{j+2} + S_{j+3}}$$

其中

$$S_i = I(i, j) + I(i, j+1) + I(i, j+2) + I(i, j+3)$$

$$S_{i+1} = I(i+1, j) + I(i+1, j+1) + I(i+1, j+2) + I(i+1, j+3)$$

$$S_{i+2} = I(i+2, j) + I(i+2, j+1) + I(i+2, j+2) + I(i+2, j+3)$$

$$S_{i+3} = I(i+3, j) + I(i+3, j+1) + I(i+3, j+2) + I(i+3, j+3)$$

为每列的强度和。同样可以计算每行的强度和 $S_j, S_{j+1}, S_{j+2}, S_{j+3}$ 。

跟踪过程中，对每颗星对应的子空间用上述算法进行计算，得出每颗星的精确座标。方面将计算结果发送给主计算机，另一方面利用这些结果更新星表为下一次跟踪使用。

五、实测及结果

XG—1星跟踪器样机完成后，对其静态精度作了测试，并在外场进行了实际的星体跟踪测试。

静态测试使用了长春光学精密机械研究所研制的星仿真器和单轴精密转台。星仿真器可以对 $m_v = +2 - +5$ 不同色温的星进行仿真，单轴精密转台可旋转 360° ，精度优于1角秒。

静态测试结果，XG—1星跟踪器 x 方向精度 $\sigma_x = 1.9$ 角秒， y 方向精度 $\sigma_y = 1.77$ 角秒。图6给出了 y 方向测试的误差曲线。

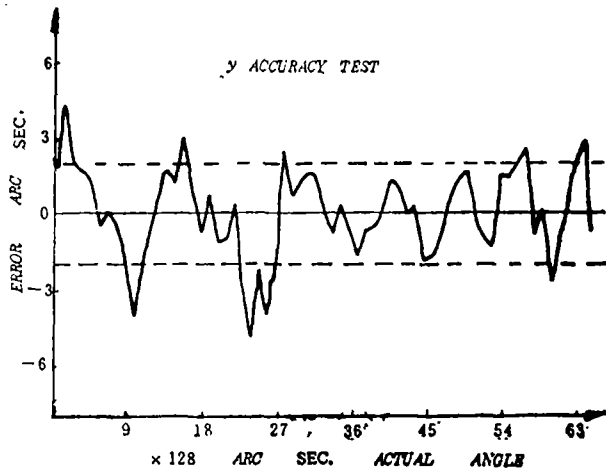


图6 y 方向静态精度测试误差曲线

外场观星测试是在北京郊区戒台寺进行的。测试时满月，与月亮最小夹角为 20° 左右。测试时，转动转台对准选定的星或星组，然后固定转台，使星或星组从视场内划过。这期间，等时间间隔测量，将跟踪测量数据与时间用最小二乘法拟合出一条直线，提出跟踪的均方误差 σ_x 和 σ_y ，求出总均方差

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_r^2}$$

测量结果列于表 2 中。

表 2

星 号	星 等	颜 色	总 误 差	备 注
4079 (五车二)	0 ^m .21	G ₀	4.65角秒	稳定跟踪
1618 (北极)	2 ^m .12	F ₃	3.23角秒	稳定跟踪
834 (小熊 2)	4 ^m .52	K ₀	2.44角秒	稳定跟踪
21009	5 ^m .62	K ₀	10.17角秒	稳定跟踪 3 颗星
920	6 ^m .4	K ₀	10.01角秒	稳定跟踪 2 颗星
18941	7 ^m .36	A ₃		跟踪不稳定

六、结 论

作为一台 CCD 星跟踪器的样机, XG—1 星跟踪器达到了原设计的各种要求。跟踪精度小于 2 角秒, 可以同时跟踪 4 颗星, 极限探测可达 6^m.4 等星。敏感头的结构紧凑, 重量实测只有 1.35kg, XG—1 星跟踪器为对 CCD 星跟踪器各项功能的测试和评价提供了方便的条件。并为进一步提高跟踪精度。提高动态跟踪性能打下了基础。

参加本项工作的还有尤英奇、卫丕昌、诸桂谦、耿玉芝、刘光亚、戴金铨、魏忠慧、王春霞、赵雁、吴辽力等同志。

参 考 文 献

- [1] P.M.Salomen et al., AIAA, 1976 76-116
- [2] S.E.Stanton, et al., Optical Engineering, 26, No. 9, 1987
- [3] 中国科学院长春光学精密机械研究所编, CCD 星跟踪器译文集, (光机情报增刊), 1986.3
- [4] J.A.Cox, SPIE, 292 1981
- [5] H.Bokhove, SPIE, 1111, 1989

CCD Star Tracker

Hao Zhihang Wang Jiaqi

Abstract

CCD star tracker has developed rapidly for various space application since 1970's. This paper describes design consideration, system construction, and operation principle of XG-1 CCD star tracker developed in CIOFM. In the system a single-chip computer is used to control CCD integration time and threshold selection. Due to centroiding algorithm is adopted the subpixel accuracy is obtained. The test results given in the end of this paper show that stationary accuracy of the star tracker is better than 2 arcsec (rms) and the stars with magnitude of 6.4 can be tracked steadily.