

CCD 星跟踪器光学系统

尤英奇 刘光亚 崔更尧

摘要: 本文论述了星跟踪器光学系统设计的特点及其像差校正, 给出了确定参数的依据。最后, 以设计实例说明了点扩散函数的变化。

在星光制导的空间飞行器中是由星跟踪器来提供精确的空间方位信息。自七十年代以来, 由于, 电荷耦合器件 (CCD) 的问世使星跟踪器的精度、稳定性和可靠性都得到了大大地提高。

以 CCD 作为探测器的星跟踪器应用图像求心技术可以获得比象素角分辨率还要高的测量和跟踪精度。星跟踪器光学系统的结构参数、成像质量和最佳离焦量 (用来获得最佳的点扩散函数) 的选择对提高测量和跟踪精度都是至关重要的。

一、光学系统参数的确定

星跟踪器光学系统的参数主要有口径、焦距和视场。

1. 光学系统的口径

通常的光学系统对目标细节的分辨能力和所接收到的能量与口径大小密切相关。由于星跟踪器所探测的是点目标, 因此不存在细节的分辨问题, 它的口径完全由系统所要获得的信噪比, 也可以说由所能接收到的能量所决定。星跟踪器光学系统的信噪比除口径外尚与星光辐射、焦面技术和 CCD 光电特性有关。

(1) CCD 的光电特性

面阵 CCD 是由纵横排列的象素所组成。每个象素所产生的电荷与辐照的强度和积分时间有关。不同波长的辐照, CCD 所产生的电信号输出也不相同, 图 1 给出了“仙童”CCD₂₂ 的光谱响应曲线。

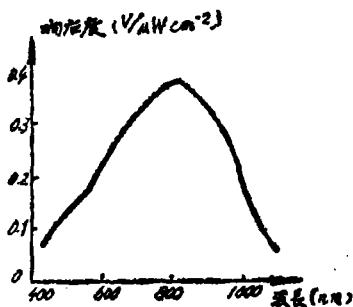


图 1 CCD 光谱响应

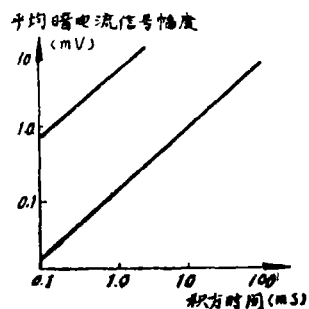


图 2 CCD 暗电流与积分时间的关系

为了适应不同的星等亮度, 需要选择不同的积分时间以保证系统正常的电信号输出。积分时间加长会导致热噪声所引起的暗电流增大, 从而限制了目标信号的动态范围。CCD 器件平均暗电流与积分时间的关系如图 2 所示。

(2) 焦面技术

通常的光学系统是将目标成像在接收器上以获得最佳的分辨率。如果星跟踪器也将 CCD 置于光学系统的焦面上, 那么所成的星像比一个象素还要小。因此, 在焦距确定之后, 星跟踪器的跟踪精度受到象素尺寸的限制。为了提高测量和跟踪精度 CCD 需离焦使用, 这样星像的点扩散函数就能覆盖一组象素 (3 × 3 或 4 × 4)^[1], 采用内插技术求出星像的亮度中心能够有效地把测量和跟踪精度提高一至二个数量级。

(3) 星光辐射

星的能见亮度用星等来描述, 以在地球大气层外所接收到的星辐射照度来度量。两个星等的照度关系式为:

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0.4(m_2 - m_1)} \quad (1)$$

其中 E_1 、 E_2 为照度; m 表示星等。

所有恒星除了按能见亮度分类外, 还可根据它们的固有温度按光谱组成分类, 即光谱型。不同光谱型的恒星其光谱辐照度是不同的, 图 3 给出了大气层外织女星(AOV 零等星) 计算所得的分谱辐照度^[2]。它作为计算其它恒星的基准。恒星的辐照度可用下面的关系式表示:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

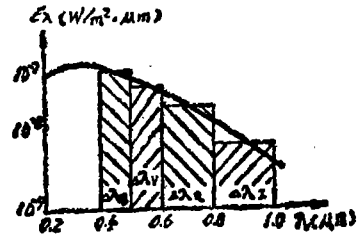


图 3 AOV 星分谱照度

用五种颜色对亮星进行度量^[3], 将星光辐照度分成 U 、 B 、 V 、 R 、 I 光谱段, 它们的峰值分别为 0.36、0.43、0.54、0.70 和 0.9 μm 。

H. L. Johnson 在研究 $UBVRIK \dots Q$ 色系统^[4]中给出两个计算表, 现摘录如下:

表 1

光谱段	峰值波长 λ (μm)	半宽度 $\Delta\lambda$ (μm)
U	0.36	0.04
B	0.44	0.10
V	0.55	0.08
R	0.70	0.21
I	0.88	0.22

表 2 AOV 星的绝对标定

光谱段	波长辐照度 E_λ ($\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{A}^\circ$)	峰值波长 λ (μm)
U	4.22×10^{-9}	0.36
B	6.40×10^{-9}	0.44
V	3.75×10^{-9}	0.55
R	1.75×10^{-9}	0.71
I	8.41×10^{-10}	0.97

对表 1 中半宽度 $\Delta\lambda$ 稍作改动 (其值为: $\Delta\lambda_B = 0.10$, $\Delta\lambda_V = 0.12$, $\Delta\lambda_R = 0.2$, $\Delta\lambda_I = 0.20 \mu\text{m}$), 再利用表 2 中的 E_λ 可将图 3 曲线分成五个波段区间 (图中只给出了四个波段, U 波段由于 CCD 探测器不响应故没有考虑), 而每个区间面积可近似表示为该谱段的辐照度。AOV 星在 CCD 响应的光谱范围内其绝对辐照度为:

$$E_{AOV} = E_B \cdot \Delta\lambda_B + E_V \cdot \Delta\lambda_V + E_R \cdot \Delta\lambda_R + E_I \cdot \Delta\lambda_I \quad (3)$$

当选定制导星后由 Arizona-Tonantzintla 星表^[5]可查出 V 的视星等和色指数 $U-V$ 、 $B-V$ 、 $V-R$ 和 $V-I$, 从而求出各光谱段的视星等。制导星的总辐照度为:

$$E_{制} = \frac{E_B \cdot \Delta\lambda_B}{10^{0.4m_B}} + \frac{E_V \cdot \Delta\lambda_V}{10^{0.4m_V}} + \frac{E_R \cdot \Delta\lambda_R}{10^{0.4m_R}} + \frac{E_I \cdot \Delta\lambda_I}{10^{0.4m_I}} \quad (4)$$

其中 m_B 、 m_V 、 m_R 、 m_I 为各光谱波段的视星等。

(4) 口径的确定

如果弥散后的星像在 CCD 上覆盖 4×4 个像素并且认为辐射能通量在各像素上的分布是均匀的, 那么在积分时间 t 内一个像素所产生的平均输出电压为:

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \tau \cdot t}{64S} \left(\frac{E_B \cdot \Delta\lambda_B \cdot R_B}{10^{0.4m_B}} + \frac{E_V \cdot \Delta\lambda_V \cdot R_V}{10^{0.4m_V}} + \frac{E_R \cdot \Delta\lambda_R \cdot R_R}{10^{0.4m_R}} + \frac{E_I \cdot \Delta\lambda_I \cdot R_I}{10^{0.4m_I}} \right) \quad (5)$$

其中: R_B 、 R_V 、 R_R 、 R_I 分别为各光谱段峰值波长所对应的响应度, D 为光学系统的口径, S 为每个像素的面积, τ 为光学系统透过率, t 为积分时间。

天空背景光被系统接收后产生背景噪音, 而背景光中影响较大的是极光和黄道光。极光在地球两极地区最为常见, 而黄道光多在黄昏和黎明时发生。因此, 二种光对预选时间和地点的条件下工作的星跟踪器影响是不大的, 在此予以忽略。

对 CCD 及其光电转换电路的暗电流进行实测, 可求出 CCD 器件的等效噪声 V_N 。光学系统的信噪比为:

$$\frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_N} \quad (6)$$

根据整个系统分配给光学系统的信噪比便可求出通光口径 D 。

2. 焦距和视场

对于选定的 CCD 器件焦距和视场是成反比的。焦距越长像素角分辨率越高就越有利于提高跟踪和测量精度, 但是由于视场变小使得在视场内瞬时探测的制导星数减少又不利于提高测量和跟踪精度。焦距和视场的选取应根据具体使用要求加以权衡。

二、光学系统的像差校正

应用内插求心技术来提高测量和跟踪精度的光学系统必须保证星像在 CCD 上的点扩散函数是对称的。引起点扩散函数失对称的光学系统像差有彗差、像散和倍率色差。彗差将使星像的亮度中心朝向光轴移动, 像散使其点扩散函数变成两个相互分离且又垂直的线扩散函数, 倍率色差致使各色星像亮度中心(色心)不重合。这三种像差是首先要考虑校正的。其次是畸变及其像面弯曲的校正, 它们将会使测量和跟踪精度随视场而变化。为使不同波长的辐射通量在 CCD 上照射相同的面积(例如 3×3 个像素), 那么不同波长的星像必须重合。因此, 位置色差、二级光谱等也必须加以校正。

虽然球差不影响亮度中心的偏移但是为了便于最佳离焦量的选择也应适当地加以考虑。

光学系统在校正像差时仍以高斯像面作为参考面。当系统校正了彗差、像散和倍率色差后离焦不会引起点扩散函数的失对称。为了消除离焦量对测量和跟踪精度的影响光学系统设计成像方远心光路, 但这对有些结构是难以实现的。

三、设计实例

1. 参数与结构

光学系统的焦距为 210mm，视场角为 $2 \times 2^\circ$ ，相对孔径为 1:2.8，筒长为 100mm。采用 488×380 像素 ($11.4 \times 8.8\text{mm}^2$) 的 CCD 作接收器，它的光谱响应范围为 $0.4 \sim 1.1\mu\text{m}$ 。

一个光学系统要做到筒长是焦距的一半并对宽波段校正二级光谱，只有采用折反射系统。它的结构型式如图 4 所示。

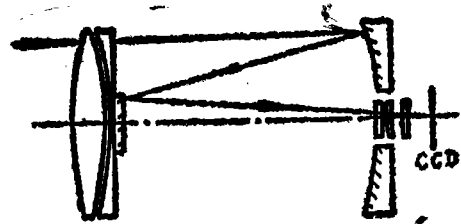


图 4 光学系统结构

2. 光学系统的像质

(1) 像差曲线

图 5 给出了以高斯像面作为参考面的像差曲线。从图中可以看出除了残余少量的高级色差外其他各种像差都进行了很好的校正，基本达到了理想成像的质量。

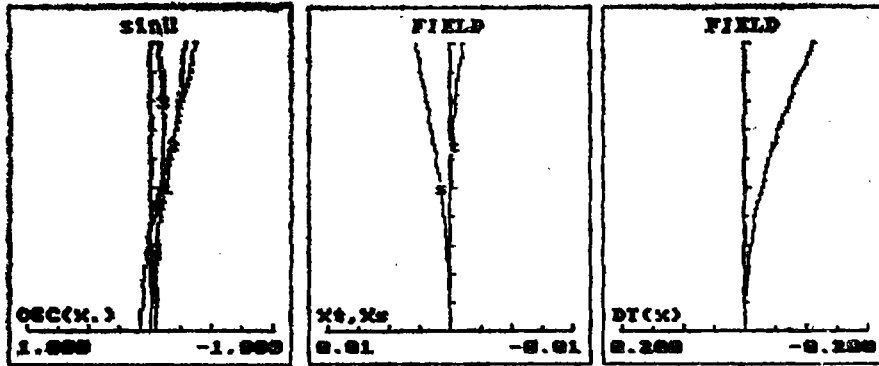


图 5-1

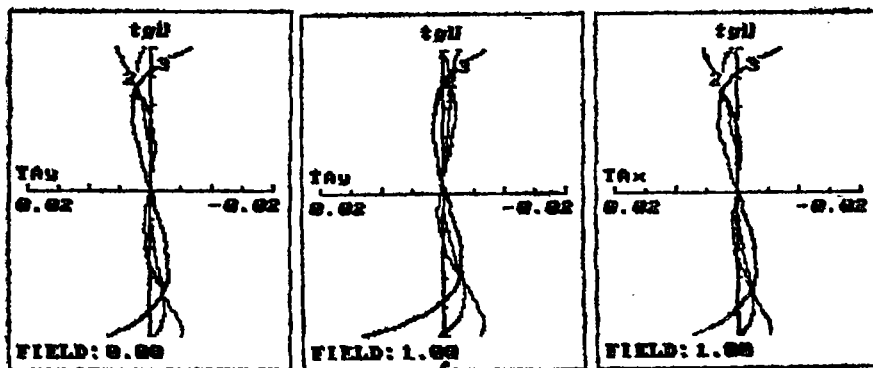


图 5-2

图 5 像差曲线

(2) 点扩散函数

图 6a 和图 6b 分别给出 CCD 峰值波长在高斯像面和离焦 0.2mm 处的点扩散函数立体图。

从图中可以看出没离焦时点扩散函数是很对称的，能量也是很集中的。离焦后引起强度降低、能量扩散，但仍还是很对称的。无论离焦还是没离焦轴上和轴外的点扩散函数基本是相同的。

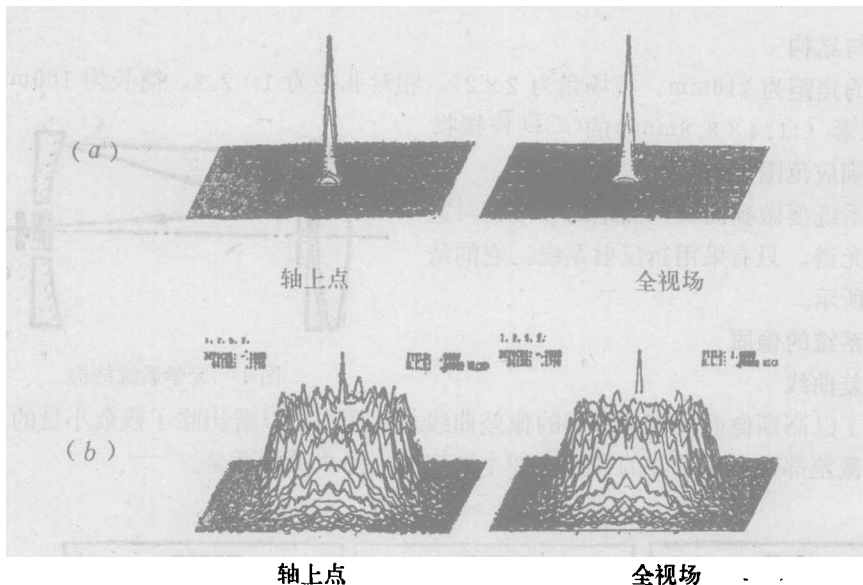


图 6 光学系统点扩散函数

最佳离焦量的选择与其光学系统的相对孔径和像差校正状态有关。根据所要求的测量和跟踪精度选择合适的覆盖象素数是很重要的。

本文得到王家骥同志的指导，居贵东同志也给予了一些有益的帮助，在此一并表示致谢。

参 考 文 献

- [1] M.Salomon, Opt. Eng., 20, No. 1, p137. (1981)
- [2] [美]无线电公司编,《电光学手册》,第48页,国防工业出版社;
- [3] H.L.Johnson, et al, Sky and Telescope, Vol. xxx, No. 1, p21 (1965);
- [4] K.Schaifers and H.H.Voigt, Landolt-Börnstein, 2, p72~73;
- [5] H.L.Johnson, et al, Sky and Telescope, Vol. xxx, No. 1, p24-31 (1965).

An Optical Ssystem Used for CCD Star Tracker

You Yingqi, Liu Guangya Cui Gengyao

Abstract

The design feature of an optical system used for CCD star tracker are expounded. The accordances used to determine parameters are given. The changes of the point-spread function are shown with an example of design.