

文章编号:1004-4213(2010)s1-0105-4

全天时机载星跟踪器镜头设计

王洋^{1,2}, 张立平¹, 王智¹, 乔克¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了提高飞机导航系统的精度, 本文设计了一种全天时机载星跟踪器的光学镜头, 通过光学设计和像差分析, 使光学系统的角分辨率为 2 角秒, 在一个 CCD 像元尺寸内光学系统的能量集中度达到 90% 以上, 畸变小于 3%, 弥散斑直径最大 $7.6 \mu\text{m}$, 其他各种像差也得到了很好的校正。同时为了提高星跟踪器探测的极限星等, 设计了有六个档位的滤光片调节机构。本设计满足用户对高精度天文导航系统的需求。

关键词: 天文导航; 星跟踪器; 光谱滤光; 光学设计; 结构设计

中图分类号: V249.32+3

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0105

0 引言

航空导航系统是飞机完成各种飞行任务的重要保障, 目前飞机上的导航系统主要是惯性导航系统, 随着长航时作战飞机平台的发展, 导航精度与长航时的需求对导航系统提出了更高的要求。

惯性导航系统的优点是完全自主、隐蔽性好、导航信息完备、短时精度高、数据输出率高等, 但其长时间工作漂移量较大, 只能达到短时间的高精度; 另外一种应用较广的导航系统是天文导航系统, 利用天球上的恒星为各种航天系统提供方向基准, 其重要设备就是星跟踪器(也称星敏感器, 指向精度和姿态测量精度可达角秒的量级)。天文导航系统的优点是自主、隐蔽性好、抗干扰能力强, 不存在随时间增长而积累的误差, 可以获得长期精度较高的姿态信息, 但是在天气恶劣的情况下, 飞机在中低空飞行时其导航性能会受影响(本文考虑飞机飞行高度 $8\,000 \sim 12\,000 \text{ m}$, 天气晴朗, 受大气影响较小, 可忽略)。现有的惯性导航、天文导航各具特点, 如果综合使用两种导航方式, 通过信息融合技术用天文导航系统来修正惯导系统的漂移, 将极大地提高飞机导航系统的精度和可靠性。

惯性/天文导航系统在国外机载领域得到了一定范围的应用。美军的中远程轰炸机 B-2、B-58、FB-141、大型运输机 C-141A 和俄罗斯的 TU-16、TU-95、TU-160 轰炸机等均使用了惯性/天文组合导航系统。美军 B-2 远程战略轰炸机上安装的是

Northrop 公司研制的 NAS-26 型惯性/天文导航系统, 当纯惯导工作时导航精度不高, 约为 926 m/h , 采用天文导航校正惯导后, 飞行 10 h 后的导航定位精度仍优于 324.8 m (圆概率)。性能更好的 NAS-27 型惯性/天文导航系统已研制成功, 将加装在 B-2A 轰炸机上。

在国内, 惯性/天文导航系统在机载领域的发展尚处空白, 只是在航海领域有所应用。所以研制天文导航系统的重要设备——机载星跟踪器是目前的迫切需要。本文在参考以往的星跟踪器基础上, 设计了一种星跟踪器镜头, 创新之处是引入光谱滤波技术, 进行全天时测星。

1 机载星跟踪器的全天时测星

机载星跟踪器的工作原理是用一台望远摄影镜头, 安装在高精度两维跟踪架上, 初始与飞机的惯性陀螺基准标校好, 飞机在空中飞行时寻找到所要找的导航恒星, 把恒星成像到镜头的视场中心, 然后不断调整两维跟踪架保持像点一直在像面的中心, 再由两维跟踪架输出的高、低角信息送给飞机的惯性导航控制系统, 修正惯性导航系统的基准漂移, 确认当前飞机在天体的精确位置坐标。机载星跟踪器的基本组成为: 遮光罩、光学系统、光电器件、电子学处理电路。遮光罩的作用是衰弱或克服杂散光(主要是太阳光和地球反射光)的影响。光学系统的作用是将目标成像在光电器件的光敏面上。光电转换器件经常使用电荷耦合元件 (Charge-coupled Device,

第一作者: 王洋(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为星敏感技术。Email: wangyang11.17@163.com

导 师: 张立平(1957-), 男, 研究员, 主要研究方向为空间光学仪器结构设计。Email: zhang_lp2005@163.com

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2010-12-08

CCD),将目标信号转换成电子信号供后续电路处理.图1为典型星跟踪器的系统结构图.本文主要介绍星跟踪器的光学镜头部分结构.

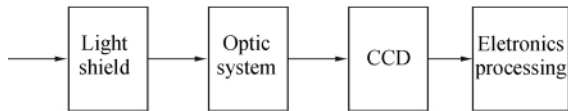


图1 星跟踪器基本组成

Fig.1 The basic structure of star tracker

研制作为飞机导航系统的星跟踪器,首先要解决的问题就是白天测星.一般而言,夜晚测星,只要星跟踪器的光学系统口径和光电器件的灵敏度满足一定条件,就会观测到指定的恒星.然而白天测星问题却复杂得多,其主要原因就是在满足星体通过光学系统所成像点大小大于接收器分辨率的前提下,星体能否被看见,主要取决于星体与背景光的对比度(信噪比).

根据相关需求,要求星跟踪器白天观测恒星的视星等为 3^m ,夜晚观测 6^m .查阅相关资料,白天晴朗天空亮度可能变化范围为每平方角秒 $4.3^m \sim 3.2^m$.由此可见,白天所观测的星体与背景光的对比度很低,很难进行观测.所以在设计星跟踪器时,根据天空背景和恒星的亮度和光谱特性,采用光谱滤波技术.

图2为晴天时天空背景光与M、K、G光谱型恒星的有效光子分布曲线,晴天时天空背景光以短波为主,峰值大约在 $0.45 \sim 0.55 \mu\text{m}$ 波段,峰值较长的波段能量很低;而M、K、G星在短波段强度较弱,在 $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 的长波段能量很高.有关天文资料显示,很多恒星具有与M、K、G星类似的光谱特性.根据天空背景和恒星的光谱特性,在星跟踪器进行光学设计时,选用灵敏度峰值在 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的CCD探测器(本设计选用TH7888A,其光谱响应曲线如图3),并且在光路中加一块短波前截止滤光片(如 $0.6 \mu\text{m}$ 前截止),这样就可以将背景光滤掉,提高星光和背景光的对比度,从而提高白天测星的能力.

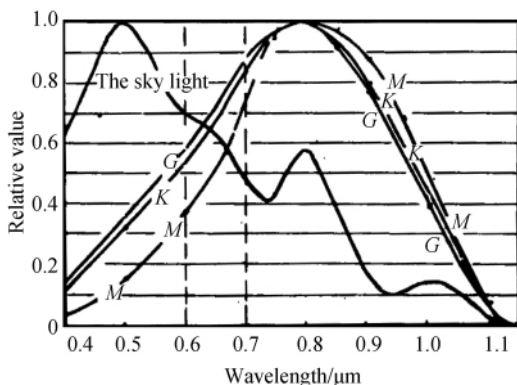


图2 恒星和天空背景光谱响应曲线

Fig.2 Spectral response curve of star and sky

根据不同太阳高角时天空背景光和观测恒星的亮度和光谱特性,在设计滤光片时,可以设置几个不同档位.其中一个档位就是一块玻璃平板,用于夜晚进行观星,不进行滤光;其他的几个档位根据不同背景光和恒星的能量和光谱,在玻璃平板上镀不同的膜层,实现光谱滤光.这些档位根据不同观测条件现场随时切换,在后续光学设计和结构设计时将提供具体方案.

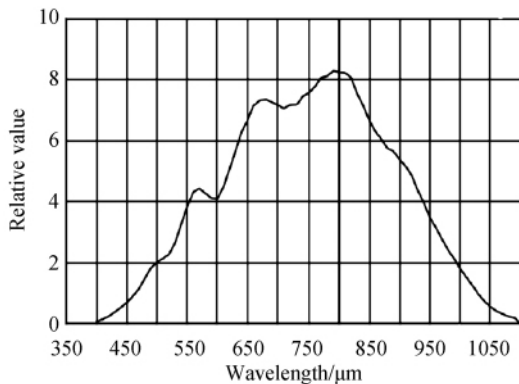


图3 TH7888A 光谱响应曲线

Fig.3 The spectral response curve of TH7888A

2 光学系统的设计与分析

2.1 光学系统参数的确定

星跟踪器的光学系统采用的是卡塞格林折反式望远系统,优点是结构紧凑、体积小、重量轻,并且可以在宽光谱范围内校正二级光谱.所设计星跟踪器是用于校正惯导系统的漂移,要求视场 2° 左右,光学系统能量集中度大于80%,畸变不大于 $\pm 3\%$.

焦距、视场和孔径是光学系统的三个重要参数,当CCD器件选定(TH7888A),焦距和视场的关系如下

$$\text{tg } \omega = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f'}, \text{tg } \omega_T = \frac{b}{2f'}, \text{tg } \omega_S = \frac{a}{2f'} \quad (1)$$

式中: $\omega, \omega_T, \omega_S$ 分别为光学系统的半视场,子午视场,弧矢视场; a, b 为探测元件的长和宽.

本设计在子午方向考虑,CCD像元尺寸 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,像元数为 1024×1024 ,光学系统像面尺寸为 $14.34 \text{ mm} \times 14.34 \text{ mm}$.由式(1),权衡视场和焦距,确定全视场 $2\omega = 2^\circ$,焦距 $f' = 400 \text{ mm}$.

相关指标要求星跟踪器白天观测的视星等为 3^m ,夜晚观测 6^m ,系统的角分辨率小于2角秒,根据瑞利准则 $\theta = 140''/D$,光学系统孔径:

$$D = 140''/2'' = 70(\text{mm}) \quad (2)$$

考虑到机载条件下全天时测星对光学系统和处理电路的影响因素较多,尤其白天测星环境比较复杂,取 $D = 150 \text{ mm}$,系统的 $F^\# = 2.67$.图4是光学

系统的结构图。

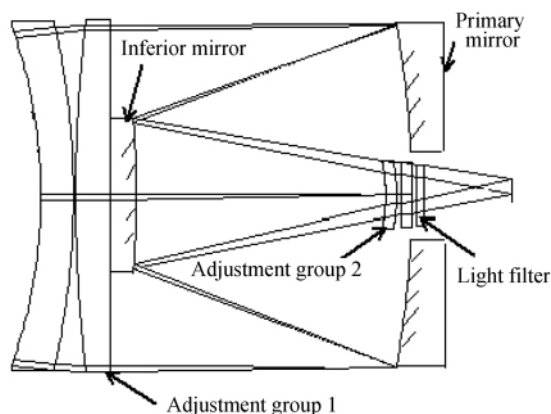


图4 光学设计结构图

Fig. 4 Optical system structure

其中滤光片在后期设计时位置适当调整,以符合滤光片不同档位调节机构的设计。

2.2 光学系统像差分析

影响星跟踪器光学系统跟踪精度的像差主要是不对称像差,如彗差、像散和色差、畸变等,因此在进行光学设计时应彗差、像散和畸变进行很好地校正。图5~8是光学系统像差曲线图。

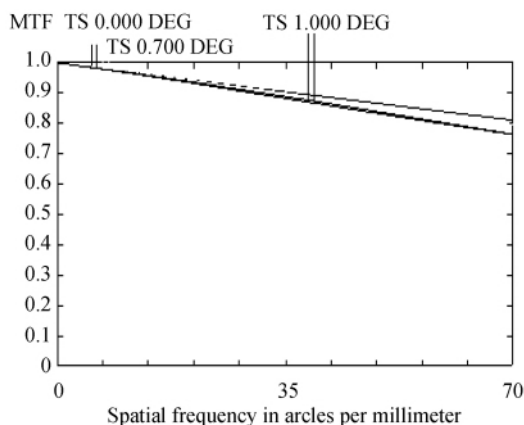


图5 光学系统的传递函数曲线

Fig. 5 The MTF of the optical system

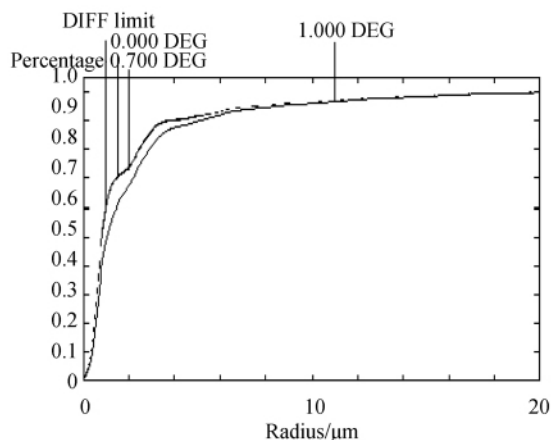


图6 光学系统能量集中度曲线

Fig. 6 Enclosed energy curve of optical system

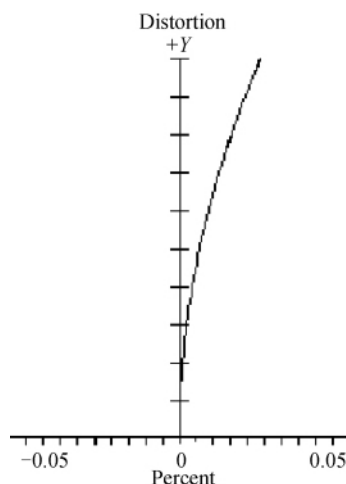


图7 光学系统畸变曲线

Fig. 7 Distortion curve of the optical system

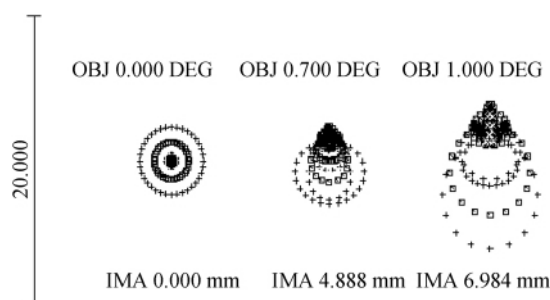


图8 光学系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of the optical system

由光学系统的传函曲线可以看出,光学系统最大视场在Nyquist频率35.7 lp/mm时的传递函数大于0.75,成像质量良好;从能量集中度曲线和点列图可以看出,最大弥散斑直径为7.57 μm (一个像元14 μm 内85%以上能量集中),畸变曲线显示畸变不大于2‰,满足对光学系统的指标要求。

3 镜头结构设计

根据光学设计提供的光学系统结构,综合考虑所选用光学玻璃的热学性能、机械性能以及整机的质量、体积要求,选用热膨胀系数与光学玻璃相近的材料铸钛合金,保证整个光学系统的光机结构稳定性,组合装调构成整机镜头。光学镜头的结构设计如图5。

单透镜的轴向固定有两种结构形式:对于凸透镜,将压圈或者隔圈与透镜接触部分设计成斜面,以减小透镜局部变形量;对于凹透镜,设计成平面接触形式,减小加工难度。次镜采用与第一个校正组中的第二个透镜相胶合的固定形式。滤光片的调节机构中,有六个不同的档位,通过一个两级传动装置来进行档位调节控制。电机选用的是常州美柯宝马电机有限公司的36BF003步进电机。一级传动选用的是传动比为2:1的双联齿轮结构,这样可以有效减小系统结构的尺寸。

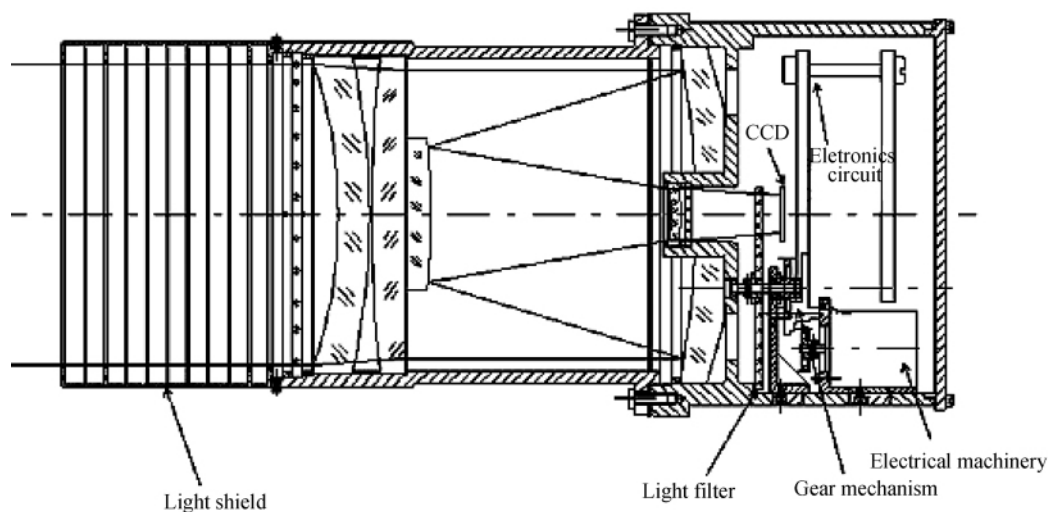


图9 星跟踪器镜头结构图

Fig. 9 The lens structure of star tracker

由于机载平台具有频带宽、随机角振动大等特点,所以整机设计时要设计适合机载环境的高性能随机振动抑制器来有效抑制基座的高频随机振动。

4 结论

惯性/天文导航系统在国外机载领域应用已久,但在我国发展才刚刚起步。本设计根据用户提出的光学系统指标要求,结合所选用的成像器件,设计了一种折反式卡塞格林系统。同时根据机载导航系统的环境,对光学镜头和滤光片调节机构进行了结构设计,将来需进行一些外场实验来满足用户对高精度机载星跟踪器的需求。

参考文献

- [1] HE Ju. Celestial navigation technology summary [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, **27**(5): 91-96.
何炬. 国外天文导航技术综述[J]. *舰船科学技术*, 2005, **27**(5): 91-96.
- [2] LI Bao-hua, LI Guo-liang. The star sensors in celestial navigation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7):

1615-1620.

李葆华, 李国良. 天文导航中的星敏感器技术[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1615-1620.

- [3] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, YAO Hui. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 227-231.

王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 227-231.

- [4] TIAN Tie-yin. Optical design on three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **11**(26): 92-98.

田铁印. 三线阵立体测绘相机光学系统设计, *光学精密工程*, 2009, **11**(26): 92-98.

- [5] YU Cheng-wu, HAO Hui, LU Xin. Stellar guidance based on APS star sensor and fiber-optic gyrol[J]. *Infra-red and Laser Engineering*, 2007, **36**(9): 593-596.

余成武, 郝慧, 卢欣. 基于 APS 星敏感器与光纤陀螺的星光制导[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(9): 593-596.

- [6] MIAO Jian-yu. Design, processing and assembly on mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1648-1653.

苗健宇. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1648-1653.

Design on Optical Lens of Aircraft-borne Star Tracker

WANG Yang^{1,2}, ZHANG LI ping¹, WANG Zhi¹, QIAO Ke¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article carries on the optical design and the structural design on one kind entire day aircraft-borne star tracker's optical lens. It uses Cassagrain refraction and reflecting system, and the angular resolution is 2 angular seconds, optical system's energy concentration degree achieves above 90% in a CCD pixel size, the distortion is smaller than 3%, the biggest spot's diameter is 7.6 μm , the others aberration also obtain very good adjustment. To enhance the limiting magnitude which the star tracker surveys, designing a light filter control element. This design satisfies the user to the high accuracy stellar guidance system's demand.

Key words: Celestial navigation; Star tracker; Spectrum filters; Optical design; Structural design