

## 星跟踪器光学系统的优化设计

王立秋, 田明, 崔士宝

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 在星光制导的空间飞行器中, 为准确确定空间方位信息, 提高导航系统的精度, 对星跟踪器光学镜头设计提出很高的要求。针对精度要求, 设计了一种新型星跟踪器的光学镜头, 系统地阐述了星跟踪器的工作原理, 通过光学设计及相差分析, 使光学系统的畸变小于0.2%、轴向球差小于0.1, 该设计满足用户对高精度天文导航系统的需求。

**关键词:** 星跟踪器; 远心光路设计; 光学系统设计; ZEMAX 优化

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0001-04

## Optimized Design of Optical Lens of Star Tracker

WANG Li-qiu, TIAN Ming, Cui Shi-bao

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In the star light guidance of space vehicles, the optical lens design requirements for star tracker are critical to determine accurately the spatial location information and to improve the accuracy of navigation system. A new type of star tracker optical lens system is designed according to the requirements and the operation principle is presented. With the optical design and difference analysis, the optical system distortion is less than 0.2%, the axial spherical aberration is less than 0.1, which can meet the demand for high-precision astronomical navigation system.

**Key words:** star tracker; telecentric beam path design; optical lens design; ZEMAX optimization

星跟踪器(star tracker)<sup>[1]</sup>, 是高精度和高灵敏度的导航和制导用传感设备, 它利用天上的恒星为系统提供方向基准, 使用 CCD 照相机实拍到的星图, 经过恒星质心提取、星图识别和姿态估算等一系列计算获得飞行器姿态参数<sup>[2]</sup>。

星跟踪器光学镜头的基本功能是将视场中的恒星成像于探测器, 因此其成像质量直接影响恒星点提取和定位, 进而影响星图识别和最终的航天器姿态计算。所以星跟踪器的光学镜头被作为整套系统的基础而得到重视<sup>[3]</sup>。它的测量姿态相对于其他姿态测量仪器而言, 具有指向精度高、体积小、自主性强、无姿态累积误差等优点, 因而自出现以来发展很快, 目前已经能够实现完全自主姿态确定<sup>[4]</sup>。

### 1 星跟踪器组成与工作原理

星跟踪器由光学镜头、消光罩、自检光源、光敏 CCD 元件和致冷器、CCD 逻辑和驱动电路、模拟信号处理电路、数据采集 and 数据处理电路、致冷和温控电路、太阳敏感器和保护快门以及抗辐射装置等组成<sup>[5-6]</sup>, 其结构框图如图 1 所示。进入系统的光线首先经消光罩作用消除太阳、月亮和地球等强光源产生的杂散光对星跟踪器的影响; 然后通过保护快门进入光学系统, 光学系统将瞬时视场中的若干恒星成像于光敏 CCD 上, 再经过信号处理, 完成信息的采集与星图识别; 最后经过数据处理系统得出航天器在空间惯性坐标系中的瞬间姿态数据。文中

收稿日期: 2015-05-05

作者简介: 王立秋(1989-), 女, 吉林长春人, 硕士, 从事现代测试计量技术与质量控制; 田明(1971-), 男, 吉林长春人, 副教授, 从事精密仪器设计的研究。

主要对星跟踪器光学镜头进行设计与优化,进而提高星跟踪器的测量精度。

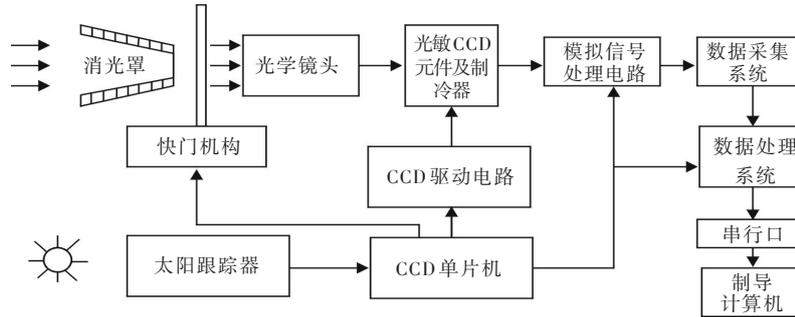


图1 星跟踪器组成框图

## 2 星跟踪器测量精度

星跟踪器测量精度  $\varepsilon$  是星跟踪器最重要的指标之一,其与单星测量精度和视场内参与星图识别和姿态计算的恒星数量  $\overline{N_{FOV}}$  有关,用公式表示为<sup>[7-8]</sup>

$$\varepsilon = \frac{A_{FOV}}{N} \times \frac{1}{\sqrt{\overline{N_{FOV}}}} \times s \quad (1)$$

$$\text{其中, } \overline{N_{FOV}} = 6.57 \cdot e^{1.08 \cdot M} \cdot \frac{1 - \cos(\frac{A_{FOV}}{2})}{2} \quad (2)$$

$$S = \frac{r}{d} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中,  $N$  表示探测器像元数;  $d$  表示探测器像元尺寸;  $A_{FOV}$  为光学系统视场;  $\overline{N_{FOV}}$  为视场平均星数;  $M$  为星跟踪器可探测星等数;  $S$  为亚像元质心精度;  $r$  为星点定位精度。

由式(1)~式(3)可知,星跟踪器测量精度由光学系统视场、探测器像元数、探测器像元大小、星跟踪器响应星等和星点定位精度  $r$  决定。当星跟踪器设计好后,式(1)中的  $N$ 、 $d$ 、 $A_{FOV}$  和  $\overline{N_{FOV}}$  均为恒值,星点定位精度  $r$  成为制约星跟踪器测量精度的主要因素。在文中的设计样例及各种讨论中,涉及一些探测器参数,在此设定所使用的探测器为一般探测器,其分辨率为  $1024 \times 1024$ ,像元尺寸为  $12 \mu m \times 12 \mu m$ 。

## 3 光学系统初始结构的选择

星跟踪器光学系统属于照相物镜,其作用是把恒星成像在接收器上<sup>[9]</sup>。其性能指标一般用焦距  $f'$ ,相对孔径  $D/f'$ ,视场角  $2X$  三个参数表示。就星跟踪器镜头而言,并不需要获取形体细节结构,因

此镜头的焦距不需要选择长焦距镜头,因而其焦距选定在  $100 \text{ mm}$ <sup>[10]</sup>。镜头的相对孔径  $(D/f')$  主要影响像面照度,其照度与相对孔径的平方成比例。星跟踪器因为需要对深空星点摄影,并尽可能多的获得恒星信息,因此对较暗的高星等恒星也有拍摄要求。因此需要较高像面照度;另一方面由于其安装在航天器上,具有一定的滚动角速度或翻滚角速度,因此是对运动景物摄影,要求采用很短的曝光时间,这同样要求提高像面的照度。因此光学系统需要采用大相对孔径的物镜,甚至超大孔径物镜,因此设系统相对孔径不大于  $1:1.2$ 。在物镜结构的复杂程度大致相同的情况下,提高其中任意一个光学特性,都必然使其他两个光学特性降低。例如,随着相对孔径的增加,相应的视场角便减小。光学系统的视场角决定了被摄天区范围。因为受限于感应器分辨率及像元大小,故降低光学系统视场,以获得更好的成像质量与画面分辨率,便于星点亚像元质心提取,取视场角为  $2\omega = 6^\circ$ 。最后决定选取匹兹伐尔物镜<sup>[11]</sup>。如表1是改进型匹兹伐尔物镜的结构参数。它的特点是有较严重的内像场弯曲,所以在紧贴像面之前的地方放置一个将像场致平场镜。该物镜系统的焦距是  $2.433 \text{ in}$ ,  $F$  是  $f/1.15$ ,视场角为  $9.9^\circ$ 。对应的像的对角线尺寸是  $0.42 \text{ in}$ ,适合于使用  $0.67 \text{ in}$  的 CCD(对角线  $11 \text{ mm}$ )。

## 4 镜头结构优化

优化过程涉及多个变量,包括曲率半径、厚度、材料参数、非球面锥度和高阶参数。优化的对象很多,变量的选取和配合至关重要。根据参数要求,在操作函数中添加焦距、轴向球差和畸变进行优

化。优化后的镜头已经满足星跟踪器镜头的设计要求,但由于星跟踪器光学镜头的特殊要求,因此对该镜头还需要进一步改进。

表1 含有致平场的改进型匹兹伐尔物镜的结构参数(单位:in)

表面	半径	厚度	材料	直径
1	4.662 7	0.300 0	N-LAK33	2.380
2	0.000 0	0.015 0		2.380
3	2.079 9	0.539 1	N-PSK3	2.140
4	-2.647 6	0.170 0	F2	2.140
5	2.647 6	0.147 0		1.760
6	光阑	1.518 2		1.663
7	1.102 8	0.600 0	N-PSK3	1.360
8	-1.102 8	0.130 0	F2	1.360
9	-3.333 0	0.371 2		1.360
10	-1.040 0	0.060 0	SF2	0.600
11	3.808 5	0.100 0		0.600

为适应星跟踪器光学测量需要,将优化后的镜头结构改良为具有像方远心光路特性。像方远心光路是指将孔径光阑放置在光学系统的物方焦平面上。因此,像方的主光线都经过镜头前焦点。因而通过光组后,主光线皆平行于光轴。此时,无论像面设置在像方何处,皆不影响对以主光线为中心的成像光斑位置的测量,如图2所示。

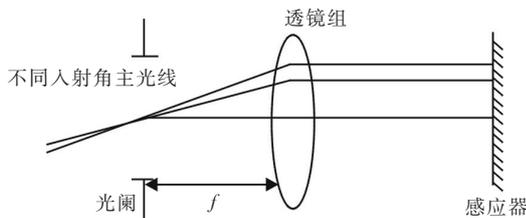


图2 像方远心光路原理图

特别的,对于 Petzval 镜头而言, Petzval 场曲固有存在,但由第二节讨论可知,这不影响系统对质心位置测量,故该场曲可利用为补偿其他像差影响。而在远心条件下,由于主光线保持正入射,场曲的校正不影响主光线偏折,仅影响轴外光线对聚焦位置,因此,选择适当场曲残余值便可直接校正慧差,给设计工作带来很大便利<sup>[12]</sup>。此外,对于以 CMOS、CCD 等电子感应器件而言,其表面一般附有保护玻璃,当主光线以同一入射角入射保护玻璃后,出射光线偏移量将一致,即不产生测量偏差。

因此远心结构应用在像星跟踪器等对测量精度要求较高的场合具有深远意义<sup>[13]</sup>,如图3所示。因此,本节将原有镜头设计为像方远心结构。

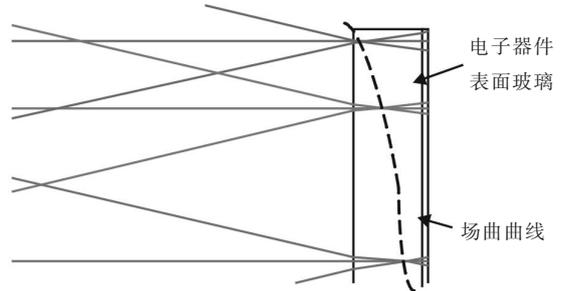


图3 像方远心效果图

像方远心可表述为两种形式,即“光阑设置在透镜前焦点处”以及“出瞳位于无穷远处”<sup>[14]</sup>。在实际设计过程中,可先运用第一种表述设置光阑,使镜头远心化。当前的光阑位置通过两种光学设计方法得到:第一种为采用光瞳位置计算方法计算入瞳位置;第二种为光具组倒推计算镜头后顶距<sup>[15]</sup>。在计算机辅助条件下,采用第二种方法,并将光阑设置好,光阑位置设置后,由于光阑位置改变将带来像质相应下降,需要重新优化。远心后的光学系统如图4所示。

编辑(Edit)(E) 求解(Solves)(S) 帮项(Options)(O)帮助(H)					
Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-diamecer
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard	279.528 263 V	6.300 000	LAK33	41.692 879
STO	Standard	Infinity	95.201 102 V		41.529 718
3	Standard	77.940 458 V	21.887 772 V	PSK3	35.234 716
4	Standard	-39.180 300 V	3.000 000 V	F2	35.182 656
5	Standard	246.062 573 V	60.128 965 V		32.032 045
6	Standard	32.107 541 V	19.595 776 V	PSK3	19.341 122
7	Standard	40.530 573 V	13.597 523 V	F2	13.521 708
8	Standard	-65.183 411 V	2.154 007 V		9.547 654
9	Standard	-32.305 388 V	2.999 985 V	SF2	7.705 801
10	Standard	66.525 739 V	2.999 975 V	M	6.418 309
IMA	Standard	Infinity	-		5.242 152

图4 远心后的系统数据

由图可知,畸变小于0.2%,达到了星跟踪器光学镜头的要求。图5、图6、图7分别为远心化后的二维光路图、远心后的调制传递函数及远心后的场曲及畸变图。



的光纤激光相控阵的偏转角度已经可以更好的满足深空通信的使用要求,且对探测接收器件的灵敏度要求较低。所以,在深空通信中,1.55  $\mu\text{m}$ 的光纤激光相控阵技术在深空通信中具有较好的应用前景。

#### 4 结 论

探讨了光纤激光相控阵在深空通信中的应用。通过模拟光纤激光相控阵在远场的强度分布图,得知在深空通信中以1.55  $\mu\text{m}$ 光源的光纤激光相控阵更适用于全光组网中。因此,1.55  $\mu\text{m}$ 的光纤激光相控阵技术应用于深空高速传输,省略了机械式精跟踪激光扫描系统,传输距离远、精度高,对研究深空高速信息传输具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 罗建将,李洪祚,唐雁峰,等.深空探测激光通信技术发展研究[J].航天器工程,2013,22(2):94-97.
- [2] Polishuk A, Arnon S. Communication performance analysis of microsatellites using an optical phased array antenna[J]. Opt.Engng.2003,42(7):2015-2024.
- [3] Mcmanamon P F, Porscher T A. Optical phased array technology.
- [4] IEEE. 1996,84(2):268-298.
- [5] Leeb W R, Neubert W M, Kudielka K H, et al. Optical phased array antennas for free space laser communications [c]. SPIE,1994,2210:14-29.
- [6] Zhao Y, Yang X, Cai Q, et al. Application of simulated annealing to design and realisation of two-dimension fiber-type optical phased array[J]. Electron. Lett.,2008,44:490-492.
- [7] Yin, Kim J H, Wu F, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam scanning using unequally spaced phased array technique[J]. Opt. Comm, 2007, 270:41-46.
- [8] ZHAO Si-si, YE Zheng-yu, YANG Deng-cai, et al. Far field analysis of fiber laser phased array for free space communication[J]. IEEE Photonics and Optoelectronics 2011 Symposium on, 978-1-4244-6554-5/11.
- [9] 刘宏展,孙建锋,刘立人.空间激光通信技术发展趋势分析[J].无线光通信,2010,8:39-42.
- [10] 夏贵进,占生宝,谢小平,等.空间激光通信技术及其发展[J].军事通信技术,2012,23(2):65-69.
- [11] KATE J. Phase-Locking of Semiconductor Injection lasers, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-46[C]. Pasadena, California, 1981: 101-104.
- [12] KATE J. High Power Semiconductor Lasers for Deep Space Communications, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-63[C]. Pasadena, California, 1981: 40-50.
- [13] KATE J. Power Efficiency of Semiconductor Injection Lasers, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-46[C]. Pasadena, California, 1981: 94-100.
- [14] DAHER J. Preliminary Results Toward Injection Locking of an Incoherent Laser Array, The telecommunication and Data Acquisition Progress Report 42-84[C]. Pasadena, California, 1986: 26-34.
- [15] HEMMAT H. Single Longitudinal Mode Operation of Semiconductor Laser Arrays With Etalon Control, the Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-86 [C]. Pasadena, California, 1986: 66-69.

(上接第4页)

- [6] 刘海波,谭吉春,沈本剑,等.像差对星跟踪器星点定位精度的影响[J].光学技术,2009,35(3):471-473.
- [7] Singla P. A new attitude determination approach using split field of view star camera[M]. Texas A&M University, 2002.
- [8] 刘海波,杨建坤,谭吉春,等.一种星跟踪器恒星像点位置提取方法[J].光学技术,2001,24(2):15-20.
- [9] 吴峰,沈为民.折反式大视场星跟踪器光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):142-145.
- [10] 董瑛,邢飞,尤政.基于CMOS APS的星跟踪器光学系统参数确定[J].宇航学报,2004,25(6):25-27.
- [11] Juergens R C, Coronato P A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes[J]. 2003,12(3):12-15.
- [12] 谈恒英,郁道银.工程光学[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.
- [13] 刘海波,谭吉春,沈本剑,等.像差对星跟踪器星点定位精度的影响[J].光学技术,2009,35(3):471-473.
- [14] 张登臣,郁道银.实用光学设计方法与现代光学系统[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [15] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1983.