

星 光 仿 真 器

尤英奇 王家骐 居贵东

摘要：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。在宇宙空间应用之前必须在实验室中用仿真星来测试和标定星跟踪器的性能，这就需要研制星光仿真器。介绍了星光仿真器的原理及其实施方案，论述了几何特性和能谱特性仿真的理论和实现的途径，简述了主物镜设计中一些有关的问题。

一、引 言

星光惯性制导是提高战略导弹命中精度的重要途径，因此随着空间飞行器的迅速发展对星光惯性制导技术提出了越来越高的要求。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。在宇宙空间应用之前必需在实验室中用仿真星来测试和标定星跟踪器的性能，完成星光惯性制导的地面实验以便鉴定系统的精度与可靠性。因此，星光仿真器在星光惯性制导技术的研究和应用中是不可缺少的一门技术和装备。

来自人工星——星仿真器的辐射与来自位于规定高度的真实星所能被接收到的辐射必须使星跟踪器的探测器产生相同的信号，这就要求星仿真器实现真实星的几何特性和能谱特性仿真。

二、星仿真器的光学原理

我们研制的星仿真器光学系统由仿真星光和背景光光谱辐射的照明系统、仿真星体尺寸的针孔及主物镜所组成，光学系统的布局如图1所示。

四个光源通道(6)分别提供不同波段(I.R.V.B)的光谱辐射，由积分球(5)混色后经聚光镜(4)照亮针孔(3)。针孔位于主物镜(1)的焦点处，主物镜提供近平面的波前。照明系统(7)用来产生背景光的辐射，经分光棱镜(2)与其星孔辐射相重叠以获得真实的背景仿真。

1. 几何特性仿真

宇宙中恒星距地球相当遥远，最近也在十光年以上。因此，恒星辐射的光束对星跟踪而言已是平面波前，其恒星的张角也相当小。星仿真器既要仿真星体的直径的张角又要给出近平面波前的光束质量。

在确定仿真星直径的张角时必须考虑对星跟踪器衍射花样的影响^[1]。星体直径的张角是由针孔直径和主物镜焦距来实现的。在确定针孔直径时要权衡辐射能量、针孔制作工艺、光学系统长度和主物镜的相对孔径等诸因素的影响。

要使代表恒星的针孔辐射通过主物镜获得近平面波前的光束质量，主物镜的成像质量必

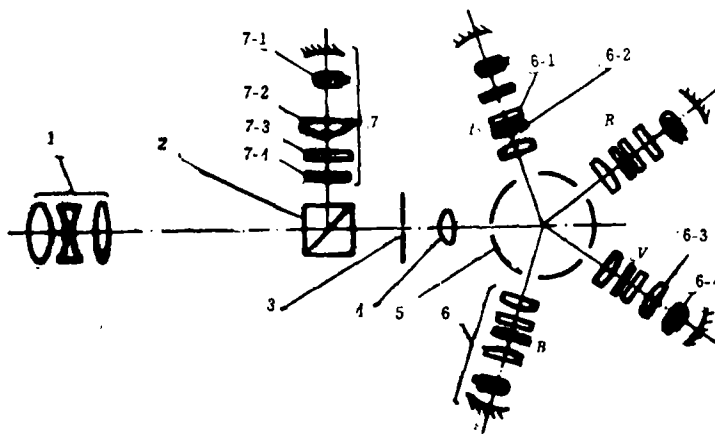


图 1

- 1-主物镜, 2-分光棱镜, 3-针孔, 4-聚光镜, 5-积分球, 6-单色聚光系统, 6-1-中性变密度盘, 6-2-滤光片, 6-3-聚光镜, 6-4-光源, 7-背景光系统, 7-1-光源, 7-2-聚光镜, 7-3-中性变密度盘, 7-4-滤光片

须达到衍射极限并且要保证针孔轴向位置精度。主物镜所适用的光谱段是从0.4到1 μm , 从校正色差的角度选取反射系统最为有利。但是, 共轴反射系统存在中心遮拦而离轴反射系统因受工艺限制达不到衍射极限。在这种情况下只有选择折射式结构型式。对于单星仿真器的主物镜在设计中着重校正轴上点像差。对于球差和位置色差以及所对应的二级像差, 例如带球差、色球差和二级光谱必须校正到衍射极限所允许的程度, 也就是这些像差的均方值 (RMS) 小于 $\lambda/14$ 。对于相对孔径为1/10左右的主物镜满足上述要求的最简单结构是三片透镜结构。它同时达到消色差和校正二级光谱应满足下列方程式:

$$h_1\phi_1 + h_2\phi_2 + h_3\phi_3 = h\phi \quad (1)$$

$$h_1^2 \frac{\phi_1}{\nu_1} + h_2^2 \frac{\phi_2}{\nu_2} + h_3^2 \frac{\phi_3}{\nu_3} = 0 \quad (2)$$

$$h_1^2 \frac{\phi_1}{\nu_1} p_1 + h_2^2 \frac{\phi_2}{\nu_2} p_2 + h_3^2 \frac{\phi_3}{\nu_3} p_3 = 0 \quad (3)$$

式中 h_i 表示轴上光线在各片上的高度, ϕ_i 表示各片之光焦度, ν_i 表示各片玻璃相应波段的阿贝数, p_i 表示各片玻璃相应波段的相对色散。我们可以选取三种不同牌号的玻璃使得第一片和第三片两种玻璃组合成一种等效玻璃 \bar{p} 、 $\bar{\nu}$ 。若 \bar{p} 等于 p_2 而 $\bar{\nu}$ 与 ν_2 相差较大则系统就可以同时做到消色差和校正二级光谱。除此之外还可以利用二个空气间隔来控制带球差和色球差。主物镜的光学材料除了要求折射率的测量精度达到 10^{-5} 外还要求光学均匀性接近一级。

为了确保主物镜的成像质量机械结构设计和选材要使仪器具有高的刚度与尺寸的稳定性。在装配过程中光学系统不允许存在偏心差和应力。

针孔偏离主物镜焦面将使其出射光束失去平行性, 称这种不平行性为准直度。这种准直度会引起星跟踪器发生散焦, 因此必须在装校过程中采用专门的检测方法来确定针孔的准确位置。

2. 能谱特性仿真

(1) 星光的仿真

每颗恒星由于其构成的物质成分和色温不同,都具有各自的辐射能谱。星的可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:

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0.4(m_2 - m_1)} \quad (4)$$

其中 E_1 、 E_2 为辐照度; m 表示星等。

所有恒星除了按可见亮度分类外,还可根据它们的固有色温按光谱组成分类,即光谱型。不同光谱型的恒星其光谱辐照度是不同的,图2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]。星仿真器的能谱特性仿真就是真实的模拟出每颗星的分谱照度曲线,该曲线所包络的面积就是星的总辐射照度。

恒星的辐照度可用下面的关系式表示:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

用五种颜色对亮星进行度量^[3],将星光辐照度分为 U 、 B 、 V 、 R 、 I 光谱段,它们的峰值波长分别为 0.36 、 0.43 、 0.54 、 0.70 和 $0.90\mu\text{m}$ 在能谱仿真时都是以织女星(AOV零等星)作为计算其它恒星的基准。H. L. Johrson 在研究 $UBVRIK \dots Q$ 色系统^[4] 中给出了两个计算表,现摘录如下:

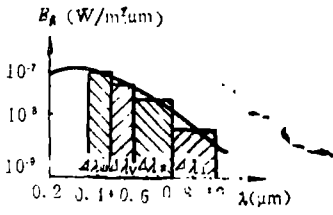


图2 AOV图星分谱照度

表1

参数	峰值波长 λ	半宽度 $\Delta\lambda$
光谱段	(μm)	(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

参数	波长辐照度 E_{λ}	峰值波长 λ
光谱段	$\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{\AA}$	(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: $\Delta\lambda_U = 0.10$; $\Delta\lambda_V = 0.12$; $\Delta\lambda_R = 0.2$; $\Delta\lambda_I = 0.20\mu\text{m}$) 再利用表2中的 E_{λ} 将图2曲线分成五个波段区间(图中只给出了四个波段区间,由于采用CCD作为探测器 U 波段不响应故没有考虑),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:

$$E_{AOV} = E_U \cdot \Delta\lambda_U + E_V \cdot \Delta\lambda_V + E_R \cdot \Delta\lambda_R + E_I \cdot \Delta\lambda_I \quad (6)$$

由公式(4)和(6)可求得任意制导星的总辐照度为:

$$E_m = \frac{E_U \cdot \Delta\lambda_U}{10^{0.4m_U}} + \frac{E_V \cdot \Delta\lambda_V}{10^{0.4m_V}} + \frac{E_R \cdot \Delta\lambda_R}{10^{0.4m_R}} + \frac{E_I \cdot \Delta\lambda_I}{10^{0.4m_I}} \quad (7)$$

其中 m_U 、 m_V 、 m_R 、 m_I 为各光谱波段的视星等。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。

方程式(7)是实现能谱仿真的理论依据。各光谱波段由图1中6-2四个带通滤光片来实现,各带通滤光片的分界波长按 K. Schaifers 等主编《天文学和天体物理学》所给出的能量分布及界限方程来确定。当 $\Delta\lambda_i$ 给定后各光谱区间的辐照度完全由该波段的视星等 m_i 所决定。 m_i 的影响由图1中6-1四个中性变密度盘来完成,其密度变化由下式决定:

$$K_1 = 10^{0.4m};$$

(8)

在四个光源通道中由带通滤光片和中性变密度盘共同实现了各光谱区间的辐照度模拟,再经过积分球混色后合成为制导星的分谱照度曲线,从而实现了制导星的能谱特性仿真。

(2) 背景光的仿真

在天空中除星光外还有背景光。背景光以噪音形式与星光一起进入探测器,因此必须考虑背景光的仿真。

背景光有银河光、大气辉光、极光和黄道光等等。前两种光等效星等在12等以下而后两种在12星等以上,因此背景光只考虑后两种。

背景光的光谱仿真是由图1中7-4的三块窄带滤光片来实现的,它们的峰值波长分别为5577 Å、5893 Å和6300 Å。

背景光的可见亮度相当于6~11等星,它的仿真是由图1中7-3中性变密度盘来完成的。

三、星仿真器的光学性能

我们所研制的星仿真器主要光学性能给在表3中

表3

物镜型式	透 射 式
焦 距	1400mm
口 径	140mm
光 谱 带 宽	0.4~1.014μm, 主峰在0.85μm
成 像 质 量	(0.58~1.014μm) 衍射极限 (0.4~0.58μm) 接近衍射极限
准 直 度	±0.075毫屈光度
针 孔 张 角	2.5±0.25角秒

如果对星跟踪器以 $\frac{1}{2}$ 瑞利容限做为判据,那么该仿真器对于几种规格的星跟踪都是适用的,各种计算结果如表4所示。

表4

焦 距 (f)	相 对 孔 径 (D/f)	$\frac{1}{2}$ 瑞利判据所对 应的离焦量	准直度所引起 星传感器离焦量	在艾利盘 上能量分布
210mm	1/2.8	0.0067mm	0.0033mm	80%以上
100mm	1/2	0.0034mm	0.0075mm	80%以上
800mm	1/8	0.0544mm	0.048mm	80%以上

四、结 束 语

我们所研制的星仿真器通过性能测试和惯性制导系统的实验证明方案是合理的。采用四

光谱段积分球合成能谱制成的星仿真器是先进的。

星光跟踪器的跟踪精度和稳定性与跟踪星数 N 成 $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 的关系。为了提高制导精度我们正在着手研制多星仿真器。

参 考 文 献

- [1] Harold H. Bloem, Opt. Eng., 1978, 17, No. 4, 432-439
- [2] [美] 无线电公司编, 《电光学手册》, 国防工业出版社, 1979 第48页,
- [3] H. L. Johrson, et al., Sky and Telescope, Vol. xxx, No. 1, (1965), 21
- [4] K. Schaifers and H. H. Voigt, Landolt-Börnstein, 2, 72-73
- [5] H. L. Johrson, et al., Sky and Telescope Vol. xxx, No.1, (1965), 24-31

Star Simulator

You Yingqi Wang Jiaqi Ju Gueidong

Abstract

The star tracker, which provides precise coordinates of the guided stars for spacecraft navigation, must be tested and calibrated in ground laboratory to evaluate its performance before space mission. The star simulator is needed to carry out the evaluation task. This paper introduces the principle and scheme of the star simulator, describes simulating theory and implementation approach of geometrical and power spectral characteristics and briefly describes some topics related to the primary objective design.