

高精度大视场多星模拟器设计与验证

许洪刚 韩冰 李曼丽 马洪涛 张鹏宇 鞠德晗

Design and verification of high-precision multi-star simulator with a wide field of view

XU Hong-gang, HAN Bing, LI Man-li, MA Hong-tao, ZHANG Peng-yu, JU De-han

引用本文:

许洪刚, 韩冰, 李曼丽, 马洪涛, 张鹏宇, 鞠德晗. 高精度大视场多星模拟器设计与验证[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1343–1351. doi: 10.37188/CO.2020–0024

XU Hong-gang, HAN Bing, LI Man-li, MA Hong-tao, ZHANG Peng-yu, JU De-han. Design and verification of high-precision multi-star simulator with a wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1343-1351. doi: 10.37188/CO.2020-0024

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating

中国光学. 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view

中国光学. 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

星上剩磁对惯性传感器的影响

Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors

中国光学. 2019, 12(3): 515 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0515>

大视场高像质简单光学系统的光学-算法协同设计

Optical/algorithmic co-design of large-field high-quality simple optical system

中国光学. 2019, 12(5): 1090 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1090>

基于区域滤波的模糊星图复原方法

Restoration method for blurred star images based on region filters

中国光学. 2019, 12(2): 321 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0321>

高精度连续变倍率激光扩束系统设计

Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios

中国光学. 2019, 12(3): 693 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0693>

文章编号 2095-1531(2020)06-1343-09

高精度大视场多星模拟器设计与验证

许洪刚, 韩冰*, 李曼丽, 马洪涛, 张鹏宇, 鞠德晗
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 在星传感器高精度的地面精确标定任务中, 为满足其对高精度大视场多星模拟器的需求, 研制了可实现 $20^\circ \times 40^\circ$ 视场内 65 颗恒星位置、星等精确模拟的高精度星模拟器。文章从星模拟器原理出发, 基于星模拟器空间坐标系转换设计了模拟星支架, 通过分析影响模拟星指向的误差, 采用“主次镜一体式安装”、“全铝式模拟星系统”、“星孔位置补偿”等关键技术, 设计高精度模拟星系统; 建立各模拟星在 $o-x'y'z'$ 坐标系中的空间位置模型, 推导出各模拟星俯仰偏摆角度、单星指向及星间角距数学模型, 并计算出单星指向理论误差及星间角距理论误差, 作为装调及试验的理论基础。试验结果显示, 所有模拟星单星指向误差均优于 $1.914''$, 任意两模拟星角距误差优于 $4.3''$; 设计的高精度大视场多星模拟器精度满足要求, 解决了新型星传感器对高精度大视场多星模拟器的需求, 可以作为高精度星传感器地面性能标定的重要设备。

关键词: 星模拟器; 高精度; 大视场; 全铝式; 单星指向; 星间角距

中图分类号: V249.4; TH74

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0024

Design and verification of high-precision multi-star simulator with a wide field of view

XU Hong-gang, HAN Bing*, LI Man-li, MA Hong-tao, ZHANG Peng-yu, JU De-han
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to achieve high-precision ground calibration of star sensors and meet the needs of a high-precision multi-star simulator with a wide field of view, a high-precision star simulator which can accurately simulate the position and magnitude of 65 stars in the $20^\circ \times 40^\circ$ field of view was developed. Based on the principles of star simulators and the transformation of the space coordinate systems of star simulators, a simulation star bracket was designed. By the analysis and calculation of errors that affect the pointing error of star simulations, the high-precision simulation star system was designed using key technologies such as "integrated installation of primary and secondary mirrors", "all-aluminum simulation star systems" and "star point position compensation". A space-position model of each simulation star in the $o-x'y'z'$ coordinate system was established, and the mathematical models of pitch, yaw, single star direction and star angular distance were derived. Also, the theoretical errors in single-star direction and star angular distance, which were

used as the theoretical basis for adjustment and testing, were calculated. The single-star direction error of all simulated stars was better than 1.914", and the angular distance error of any two simulated stars was better than 4.3". The accuracy of the designed high-precision wide-field-of-view multi-star simulator meets the requirements. It can be used as an important piece of equipment for ground calibration of high-precision star sensors.

Key words: star simulator; high precision; wide field of view; all aluminum; single star pointing; star angular distance

1 引言

随着我国空间技术、军事力量的不断发展,对各类空间飞船、卫星等在轨姿态调整精度的要求不断提高,作为导航装置的星敏感器得到了大规模的使用^[1-2]。为保证各类星敏感器的导航精度,需对其精确标定,星模拟器作为星敏感器高精度的地面标定系统得到广泛应用^[3-5]。根据工作方式可分标定型和功能检测型,标定型星模拟器对星图中多个恒星的实际位置分布进行模拟,对模拟星指向、各星角距的模拟有很高的要求^[6-7];功能检测型主要用于星敏感器探测能力、光信号分辨能力的标定^[8-9]。本文主要对标定型星模拟器进行设计研究。

国外对星模拟器的研究起步较早,特别是美国,其星模拟器的研发水平一直处于国际领先地位,伊思曼柯达公司将色温各异的光引到准直光管的焦面上,通过在光路中添加不同衰减片来模拟不同星等,但其可模拟星数量少;蔡司公司研制的星模拟器可模拟 16 颗星,但其各星间角距、星等不可单独调整。国内从 70 年代末期开始在星模拟器方面进行研究,目前已有的多星模拟器星数少、视场小(大多在 20°以下)、标定精度低,难以满足新型星敏感器对高精度及大视场的需求^[10-11]。针对上述问题,本文通过研究星模拟器空间坐标系转换、模拟星系统及装调指向误差,设计了高精度大视场多星模拟器,并进行试验,验证系统的可行性,解决了新型星敏感器对高精度大视场多星模拟器需求。

2 标定及工作原理

2.1 标定原理

星敏感器通过恒星角距、星等等特征对某一特定天区内恒星进行观测,并与导航星库进行比对识别,进而得到恒星坐标信息,然后通过坐标变换获得星敏感器光轴在空间内的指向^[12]。设任意导航星 $P_i(\alpha_i, \varepsilon_i)$ 和 $P_j(\alpha_j, \varepsilon_j)$, 如图 1 所示。

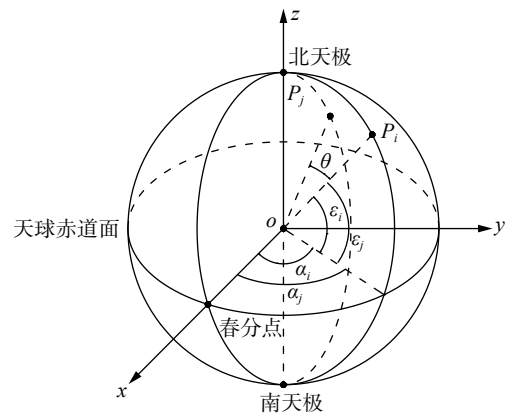


图 1 天球坐标系下的角距图

Fig. 1 The angular distance in celestial coordinate system

天球坐标系中的角距 $\theta_{(P_i, P_j)}$ 可通过式(1)计算:

$$\theta_{(P_i, P_j)} = \arccos(\mathbf{D}_{P_i} \cdot \mathbf{D}_{P_j} / |\mathbf{D}_{P_i}| \cdot |\mathbf{D}_{P_j}|) \quad (1)$$

式中 \mathbf{D}_{P_i} 、 \mathbf{D}_{P_j} 分别为星 P_i 和 P_j 的方向矢量,其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{P_i} &= [\cos(\varepsilon_i) \cdot \cos(\alpha_i) \quad \cos(\varepsilon_i) \cdot \sin(\alpha_i) \quad \sin(\varepsilon_i)]^T, \\ \mathbf{D}_{P_j} &= [\cos(\varepsilon_j) \cdot \cos(\alpha_j) \quad \cos(\varepsilon_j) \cdot \sin(\alpha_j) \quad \sin(\varepsilon_j)]^T. \end{aligned}$$

同理,在星敏感器坐标系下的任意两星角距设为 $\theta'_{(P_i, P_j)}$,若满足式(2),则表示观测星和导航星能匹配。

$$|\theta_{(P_i, P_j)} - \theta'_{(P_i, P_j)}| \leq \lambda \quad (2)$$

λ 是指角距测量的误差容限, 通常不止一个导航星能够满足上式, 要做到精确识别必须依赖星等等特征。因此, 精确模拟天区内的恒星分布及星等信息是实现星敏传感器标定的关键。

2.2 工作原理

标定型模拟器侧重于对指定天区内各恒星单星指向、星间角距、星等等特征的模拟。为保证各模拟星星等分别可调, 且实现大视场、高精度的恒星模拟, 本文的高精度大视场多星模拟器通过 65 个准直系统模拟指定天区内的恒星分布, 工作原理如图 2 所示。控制器接收指令信号, 通过调节电流占空比结合衰减片控制 LED 光源发出不同照度的光, 经过匀光系统照射到位于焦平面的星点孔上, 星点孔的光线经过准直光学系统后以平行光出射, 星敏传感器接收平行光并在其像面汇聚形成一幅完整的固定天区恒星模拟星图, 从而实现无穷远恒星的模拟。

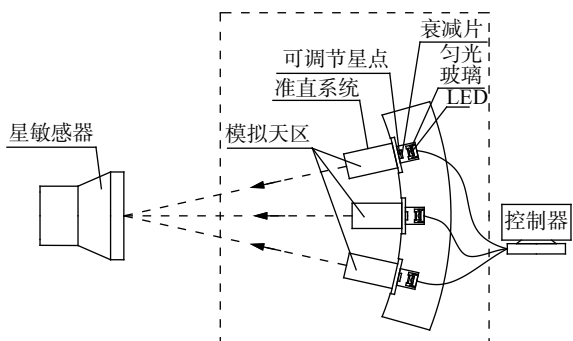


图 2 高精度大视场多星模拟器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of high-precision multi-star simulator with wide field of view

3 多星模拟器设计

本文所设计的多星模拟器由模拟星系统、模拟星支架及基座等部件构成。模拟星系统及模拟星支架的安装位置设计是实现多星模拟器地面标定能力的关键, 直接影响星敏传感器的地面标定精度^[13-14]。

3.1 模拟星支架设计

在设计模拟星支架安装位置时, 为了准确模拟指定天区各恒星间夹角关系, 需将给定的天球坐标系转换为以星敏传感器为坐标系中心的星敏传感器坐标系。

3.1.1 模拟星的天球直角坐标

设任意模拟星 P_i 的赤经为 α_i , 赤纬为 ε_i , 综合考虑 65 个模拟星口径及空间尺寸, 将天区最优半径 R 设置为 2500 mm, 如图 3 所示。

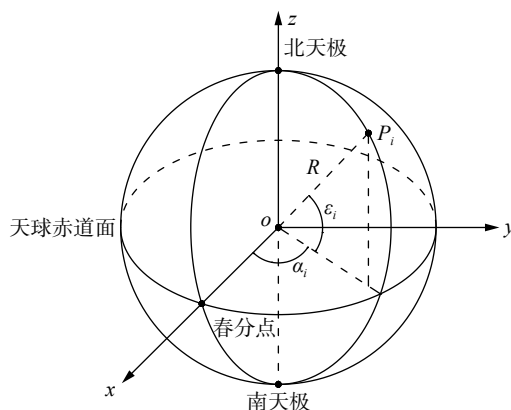


图 3 模拟星 P_i 空间模型

Fig. 3 The space model of P_i simulation star

相应的天球直角坐标 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 按式(3)计算:

$$\begin{cases} x_i = R \cdot \cos(\varepsilon_i) \cdot \cos(\alpha_i) \\ y_i = R \cdot \cos(\varepsilon_i) \cdot \sin(\alpha_i) \\ z_i = R \cdot \sin(\varepsilon_i) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, R 为该模拟天区设计半径, α_i 为模拟星 P_i 的赤经值, ε_i 为模拟星 P_i 的赤纬值。

3.1.2 坐标轴旋转

图 4 为天球坐标系旋转模型。由图 4 可知, 天球坐标系为 $o-xyz$, o_n 点表示 HIP3821 中心恒星, $o_n-x_n y_n z_n$ 表示以 HIP3821 为原点的多星模拟器坐标系。现将 $o-xyz$ 坐标系转换为星敏传感器坐标系 $o-x' y' z'$, 使得 $o y'$ 轴指向点 o_n , $o z'$ 轴与 $o_n z_n$ 轴平行, $o x'$ 轴与 $o_n y_n$ 轴平行, 如图 5 所示。

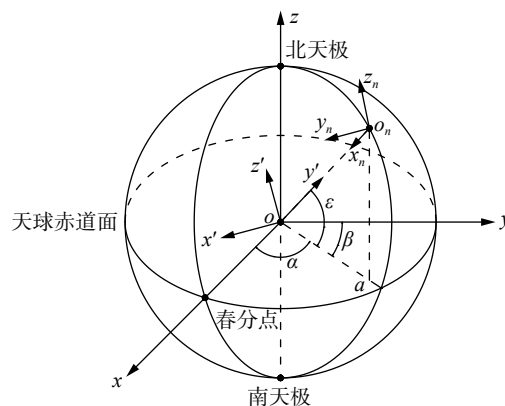


图 4 天球坐标系旋转模型

Fig. 4 The rotation model of celestial coordinate system

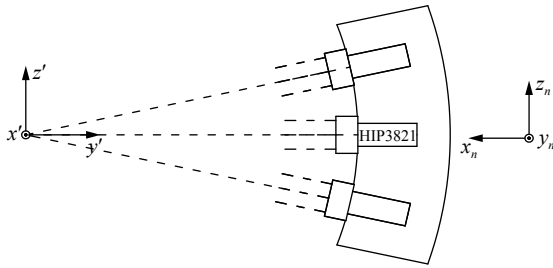


图 5 旋转坐标系对应图

Fig. 5 Corresponding diagram of rotation coordinate system

设 o_n 在天球赤道面 oxy 上的投影为 a 。坐标系 $o-xyz$ 的旋转分为两步进行: 首先将坐标系 $o-xyz$ 绕 z 轴旋转 β 角, 得到坐标系 $o-x'y'z'$ (图中未画出), 使得 oy' 轴与 oa 重合; 然后将坐标系 $o-x'y'z'$ 绕 x' 轴旋转 ε 角, 得到坐标系 $o-x''y''z''$, 此时 oy'' 轴与 $o_n x_n$ 重合。经过两步旋转, 实现了 oy'' 轴指向点 o_n , 并且 $oz'' // o_n z_n, ox'' // o_n y_n$, 模拟星在星敏感器坐标系 $o-x''y''z''$ 中的两次旋转矩阵 S_z, S_x 分别为:

$$S_z = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varepsilon & \sin\varepsilon \\ 0 & -\sin\varepsilon & \cos\varepsilon \end{bmatrix}. \quad (5)$$

则模拟星在坐标系 $o-x'y'z'$ 中的坐标 (x'_i, y'_i, z'_i) 按式 (6) 计算:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} &= S_x \cdot S_z \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varepsilon & \sin\varepsilon \\ 0 & -\sin\varepsilon & \cos\varepsilon \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

将各模拟星天球坐标系赤经赤纬值代入式 (6), 计算结果如表 1 所示。根据计算出的坐标值 (x'_i, y'_i, z'_i) 即可确定各个模拟星在星敏感器坐标系中的准确位置, 作为设计输入, 实现模拟星支架的设计。

表 1 各模拟星在 $o-x''y''z''$ 坐标系中的坐标值Tab. 1 Coordinate values of simulation stars in $o-x''y''z''$ coordinate system (mm)

序号	HIP号	x'_i 坐标	y'_i 坐标	z'_i 坐标
1	746	222.156	2488.992	74.603
2	2599	79.783	2488.551	225.271
.....
5	3821	0	2500	0
.....
64	116418	482.876	2446.708	-174.499
65	116962	339.63	2467.865	210.458

3.2 模拟星系统设计

综合考虑模拟星像质、体积、装调等因素, 将模拟星设计为卡塞格林式准直光学系统, 其体积小、谱段宽、无色差, 主要由主次镜主体、星点孔调节组件及 LED 光源等组成。

3.2.1 模拟星设计分析

为保证多星模拟器的位置精度, 同时缩短 65 套模拟星系统的加工周期, 降低装调难度, 保证成像质量, 应用了以下 4 项关键技术:

(1) 将模拟星主次镜及安装镜筒均设计为全

铝式结构, 避免因线膨胀系数差距较大导致的应变和热应力, 有利于成像质量的长期稳定, 同时便于批量加工;

(2) 主次镜采用一体式安装结构, 一致性、通用性较好, 安装调试简单、便捷;

(3) 星点孔调节组件可通过调整星点孔在焦平面内的位置, 实现星模拟器出射光角度补偿, 调整精度高, 而且可有效保证星模拟器安装后的稳定性;

(4) 通过调整 LED 光源组件的电流占空比配

合衰减片实现星等调整^[15-17], 控制简单, 调节精度高, 设计结构如图 6 所示。

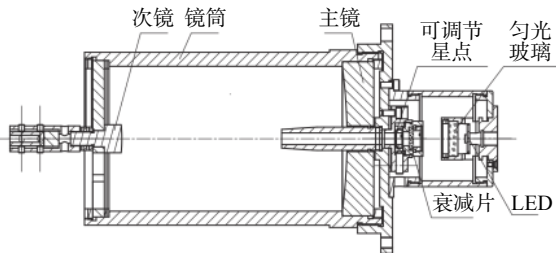


图 6 模拟星系统结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of simulation star system

3.2.2 误差分析

对机械加工及安装环节引入的误差 σ_0 进行分析, 作为星点孔调节组件设计的理论依据, 主要包含以下几个方面:

(1) 模拟星支架、模拟星安装法兰形状误差 σ_1 ;

$$\sigma_1 = \arctan[(\sigma_{s1} + \sigma_{s2})/2R_f] \quad (7)$$

其中, 模拟星支架采用加工精度为 0.01 mm 的加工中心加工, 考虑人为、环境等因素, 加工形状误差最大值 $\sigma_{s1}=0.05$ mm, 同理模拟星安装法兰可得 $\sigma_{s2}=0.05$ mm, 设计法兰面半径 $R_f=50$ mm, 代入式(7)可得 $\sigma_1=206.26''$ 。

(2) 模拟星支架位置误差及安装误差 σ_2 ;

$$\sigma_2 = \arctan[(\sigma_{r1} + \sigma_{r2} + \sigma_c)/R] \quad (8)$$

其中, 模拟星支架加工产生的位置误差最大值 $\sigma_{r1}=0.05$ mm, 同样模拟星安装法兰可得 $\sigma_{r2}=0.05$ mm, 轴向安装最大间隙 $\sigma_c=0.02$ mm, 天球半径 R 为 2500 mm, 代入式(8)可得 $\sigma_2=9.9''$ 。

综上, 机械加工及安装环节引入的误差极大值 $\sigma_{0max} = \sigma_1 + \sigma_2 = 3.6'$ 。上述计算为星点孔调节组件调节距离 ΔL 设计提供理论依据, ΔL 可通过下式计算得到:

$$\arctan[(\Delta L)/f] > \sigma_{0max} \quad (9)$$

其中 $f=500$ mm, 可得 $\Delta L > 0.523$ mm, 综合考虑调节距离对出射光的影响, 将 ΔL 设计为 ± 0.75 mm, 可覆盖 σ_{0max} 的最大角偏差。

3.2.3 像质检验及星等验证

设计的模拟星实物及其干涉检验图如图 7 所示, 像质完全满足使用要求。批量生产的模拟星经过一次装调后, 采用干涉仪进行像质检验, RMS 优于 $\lambda/10$ (其中, $\lambda=632.8$ nm) 的比例为 91%, 证明采用主次镜一体式安装的全铝式结构方案可行。通过上述方法可在保证像质的前提下可大幅缩短加工装调时间, 同时也为批量生产准直系统提供参考。

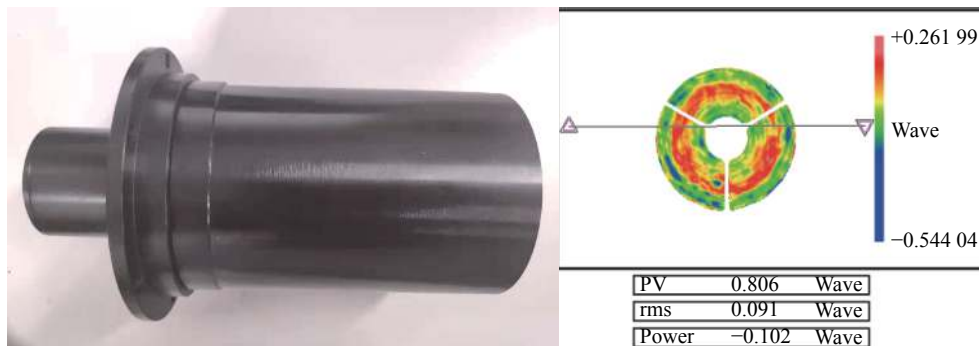


图 7 模拟星系统实物图及整机干涉检验图

Fig. 7 Physical map of simulation star system and its interference diagram

通过调节 LED 电流占空比结合衰减片的方式调节输出照度, 并在暗室环境使用微光照度计进行测量标定, 可实现各模拟星在理论星等 ± 1.5 Mv 范围内单独可调, 调节步长为 0.1 Mv。

3.3 系统装调

多星模拟器的核心参数包括单星指向误差和

星间角距误差, 误差大小决定了其标定精度。为保证多星模拟器核心参数的精度, 采用测量精度为 0.5'' 的徕卡经纬仪进行装调。

3.3.1 模拟星俯仰偏摆角度及星间角距计算

根据表 1 建立各模拟星在 $o-x'y'z'$ 坐标系中的位置空间模型, 并根据模型推导出星间角距数学

模型。为方便理解,图中只标出中心模拟星 HIP3821 及星图中任意两模拟星 S_i 、 S_k , 如图 8 所示。

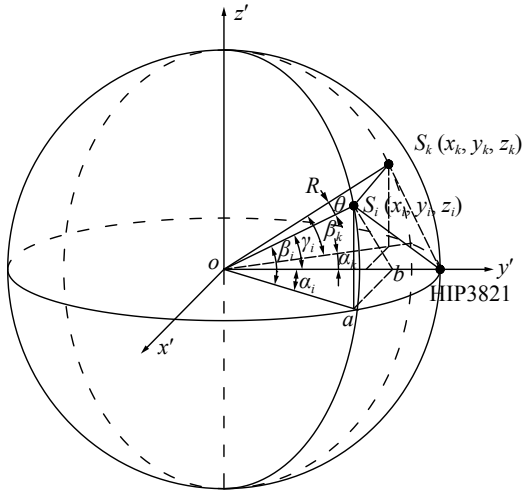


图 8 模拟星角距空间模型

Fig. 8 Space model of simulation star angular distance

其中 $\alpha_i(\alpha_k)$ 、 $\beta_i(\beta_k)$ 分别为任意模拟星相对于中心模拟星 HIP3821 的偏摆和俯仰角度, 可得式(10):

$$\begin{cases} \alpha_i = \arctan(x_i/y_i) \\ \beta_i = 90^\circ - \arcsin(z_i/R) \end{cases} \quad (10)$$

将表 1 中各模拟星的 (x'_i, y'_i, z'_i) 值代入上式可得任意模拟星相对于中心模拟星 HIP3821 的理论偏摆和俯仰角度, 如表 2 所示。

表 2 各个模拟星相对中心模拟星的理论偏摆和俯仰角度

Tab. 2 The theoretical yaw and pitch angle of each simulation star relative to its center (Unit: (°))

序号	HIP号	偏摆角 α	俯仰角
1	746	5.10044	88.28996
2	2599	1.83626	84.83016
.....
5	3821	0	90
.....
64	116418	11.16428	94.00247
65	116962	7.83589	85.17093

图中 γ 为 HIP3821 相对于任意模拟星的星间角距, a 为模拟星 S_i 在 $ox'y'$ 面上的投影, b 为 a 点在 y' 轴上的垂线, 根据图中几何关系可得式(11):

$$\begin{cases} oa = R \cdot \cos(\beta_i) \\ ob = oa \cdot \cos(\alpha_i) \\ \gamma = \arccos[\cos(\beta_i) \cdot \cos(\alpha_i)] \end{cases} \quad (11)$$

图中 θ 为任意两模拟星的角距, $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 、 $S_k(x_k, y_k, z_k)$ 分别为任意两模拟星在 $o-x'y'z'$ 坐标系下的空间坐标, 可推导出 θ 如式(12)、式(13):

$$\begin{cases} x_{i(k)} = R \cdot \cos(\beta_{i(k)}) \cdot \sin(\alpha_{i(k)}) \\ y_{i(k)} = R \cdot \cos(\beta_{i(k)}) \cdot \cos(\alpha_{i(k)}) \\ z_{i(k)} = R \cdot \sin(\beta_{i(k)}) \end{cases}, \quad (12)$$

$$(S_i S_k)^2 = (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2$$

$$\cos \theta = [(oS_i)^2 + (oS_k)^2 - (S_i S_k)^2] / 2oS_i \cdot oS_k \quad (13)$$

将式(10)代入到式(11)可得 θ 与 $\alpha_i(\alpha_k)$ 、 $\beta_i(\beta_k)$ 的关系如式(14)所示:

$$\theta = \arccos[\cos(\beta_i) \cdot \cos(\beta_k) \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_k) + \sin(\beta_i) \cdot \sin(\beta_k)]. \quad (14)$$

值得注意的是, 在进行星角距计算时, 需将经纬仪读数转换为各模拟星相对于中心模拟星 HIP3821 的偏摆和俯仰角度, 然后再进行计算。

3.3.2 装调流程

只有经过合理的装调才能保证星模拟器的精确性、稳定性, 各模拟星俯仰偏摆角计算完成后, 进行角度装调, 步骤如下:

(1)调整经纬仪高度, 使经纬仪与 HIP3821 模拟星光轴处于同一高度;

(2)将经纬仪调焦到无穷远后, 调节经纬仪使其水平, 再调整经纬仪方向, 使经纬仪的俯仰角读数为 90.0000° , 然后通过调节星点孔调节组件使 HIP3821 模拟星与经纬仪十字线重合, 此时将经纬仪的偏摆角设置为 0.0000° ;

(3)按照表 2 中数据调整经纬仪的偏摆角和俯仰角, 然后调整相应模拟星的星点孔调节组件, 使所有模拟星与经纬仪十字线重合。

装调后的高精度大视场多星模拟器实物图如图 9 所示。



图 9 高精度大视场多星模拟器实物图

Fig. 9 Physical diagram of high-precision multi-star simulator with wide field of view

3.3.3 装调误差分析

对装调过程中的测量误差、单星指向误差及任意星角距误差进行分析, 为后续实验提供理论基础^[18]。

由于经纬仪装调星模拟器的测量误差主要来源于人眼对准误差 δ_1 、环境误差 δ_2 、仪器测量精

度 δ_3 3 个方面, 所以装调过程中测量总误差 δ_0 由下式计算;

$$\delta_0 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (15)$$

其中, $\delta_1 = \varphi/\Gamma$, φ 为人眼对准误差, 与对准方式有关^[19-20], 本文中 $\varphi=10''$, $\Gamma=32$ 为经纬仪的视放大率, 可得 $\delta_1=0.3125''$; 环境误差 δ_2 主要来自大气扰动以及地面的震动 $\delta_2=0.72''$; 经纬仪测量精度 $\delta_3=0.5''$; 将上述值代入式(15)可得 $\delta_0=0.866''$ 。

将 δ_0 代入式(11)可得单星指向误差 $\Delta\gamma=1.225''$, 同理代入式(14)可得星角距误差 $\Delta\theta=1.732''$, 上述结果为后续实验提供理论比基础。

4 实验与分析

装调完成后, 静止放置 48 小时, 然后使用经纬仪对各模拟星进行检验, 读取每个模拟星的偏摆角度值 α' 和俯仰角度值 β' , 并对每个星的单星指向误差进行计算, 如表 3 所示, 表中所列为具有代表性数据, 其余模拟星便不再赘述。

表 3 各个模拟星实际检测偏摆和俯仰角度
Tab. 3 Practical detection of yaw and pitch angle of each simulation star

序号	HIP号	理论偏摆俯仰角(°)		测量偏摆俯仰角(°)		单星指向误差(")
		偏摆角 α	俯仰角 β	偏摆角 α'	俯仰角 β'	
1	746	5.10044	88.28996	5.10022	88.28973	-0.826820841
2	2599	1.83626	84.83016	1.83606	84.83038	0.789502782
.....
5	3821	0.00000	90.00000	0.00000	90.00000	0
6	4427	359.06675	87.08662	359.06662	87.08652	-0.359564154
.....
12	13268	343.5068	88.18147	343.50726	88.18198	1.745461436
13	14328	340.61185	89.39579	340.61242	89.39635	1.894486725
.....
51	111674	19.76467	91.41438	19.7641	91.41381	-1.913923243
.....
64	116418	11.16428	94.00247	11.16395	94.00284	1.322767965
65	116962	7.83589	85.17093	7.83568	85.17125	1.132461231

由表 3 可知,所有模拟星单星指向误差均优于 $1.914''$;各模拟星指向误差与离 HIP3821 中心恒星的距离成正比;在 $o-x'y'z'$ 坐标系下, x' 负向最大单星指向误差出现在 HIP14328 模拟星上, $\Delta\gamma'_{\max}\approx 1.894''$, x' 正向最大单星指向误差出现在 HIP111374 模拟星上, $\Delta\gamma'_{\max}\approx -1.914''$ 。通过对表中数据的分析计算知,任意两模拟星角距误差最大出现在 HIP14328 模拟星和 HIP111374 模拟星上, $\Delta\theta_{\max}=4.3''$,其余所有星间角距均优于 $4.3''$,星点指向误差及星角距误差均大于理论值,分析认为这与经纬仪累计误差及模拟星支架应力释放有关。通过用户星传感器对其进行成像验证,精度及像质均优于使用要求。

5 结 论

本文针对新型星传感器对高精度大视场多星模拟器的具体需求,从星模拟器原理出发,基于星

模拟器空间坐标系转换设计模拟星支架,通过分析影响模拟星的指向误差,采用“主次镜一体式安装”、“全铝式模拟星系统”、“星孔位置补偿”等关键技术,设计高精度模拟星系统。接着,建立了各模拟星在 $o-x'y'z'$ 坐标系中的空间位置模型,推导出各模拟星俯仰偏摆角度、单星指向及星间角距数学模型,并计算出单星指向理论误差及星角距理论误差,作为装调及试验的理论基础。最后,通过实验验证,65 颗模拟星单星指向误差优于 $1.914''$,任意两模拟星角距误差优于 $4.3''$,各模拟星指向误差与离 HIP3821 中心恒星的距离成正比,且误差均大于理论值,应与经纬仪累计误差及模拟星支架应力释放有关。实际成像结果表明,该设备满足使用要求,解决了新型星传感器对高精度大视场多星模拟器需求,可以作为高精度星传感器地面标定的重要设备,同时对各类航天器在轨运行姿态确定和空间探测具有重要意义。

参考文献:

- [1] XU B T, LV J H, ZHOU X L, *et al.*. Design and analysis of a star simulator suitable for confined space[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 504: 012088.
- [2] 张磊,何昕,魏仲慧,等.基于千兆网接口的星传感器图像显示与存储[J].*液晶与显示*, 2015, 30(1): 114-119.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Image display and storage of star sensor based on Gigabit Ethernet[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 114-119. (in Chinese)
- [3] 梁斌,朱海龙,张涛,等.星传感器技术研究现状及发展趋势[J].*中国光学*, 2016, 9(1): 16-29.
LIANG B, ZHU H L, ZHANG T, *et al.*. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 16-29. (in Chinese)
- [4] 郝云彩.空间光学传感器技术进展与应用[J].*空间控制技术与应用*, 2017, 43(4): 9-18.
HAO Y C. Technical progress and application of space optical sensor[J]. *Aerospace Control and Application*, 2017, 43(4): 9-18. (in Chinese)
- [5] DONG SH, GONG R, YE ZH L, *et al.*. The analysis of the impact of star sensor calibration precision about single star simulator pin hole size specification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10697: 106973J.
- [6] 徐达,张国玉,孙高飞.空间背景光星模拟器系统设计[J].*空间科学学报*, 2018, 38(4): 575-582.
XU D, ZHANG G Y, SUN G F. Design of star simulator of large- field-view[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(4): 575-582. (in Chinese)
- [7] 刘欢.大视场单星模拟器关键技术研究[D].长春:长春理工大学, 2018.
LIU H. Key technology of single star simulator of large-field-view[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese).
- [8] 孟遥,张国玉,孙高飞,等.基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统[J].*光学精密工程*, 2016, 24(3): 511-520.
MENG Y, ZHANG G Y, SUN G F, *et al.*. Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 511-520. (in Chinese)
- [9] 赵梓朝,陈启梦,唐子博,等.高精度动态星模拟器的光学系统设计[J].*计量学报*, 2018, 39(5): 641-644.
ZHAO Z CH, CHEN Q M, TANG Z B, *et al.*. Optical system design of high precision dynamic star simulator[J]. *Acta*

- Metrologica Sinica*, 2018, 39(5): 641-644. (in Chinese)
- [10] 林子祺. 星模拟器检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
LIN Z Q. Research on measurement technique of star simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese).
- [11] 李晓妮. 光谱可调星模拟器技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2015.
LI X N. The research for the star simulation with adjustable spectrum[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2015. (in Chinese).
- [12] 柳红岩, 孙慧婷, 李岩, 等. 漂移扫描CCD星图的smear现象快速消除方法研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(3): 310-316.
LIU H Y, SUN H T, LI Y, *et al.*. Fast smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 310-316. (in Chinese)
- [13] 陈启梦, 张国玉, 王哲, 等. 标定型星模拟器设计与关键参数测试[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 41-44.
CHEN Q M, ZHANG G Y, WANG ZH, *et al.*. Design of calibration star simulator and test of key parameters[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 40(4): 41-44. (in Chinese)
- [14] 高兴华, 李建永, 王霞. 高精度数字星等模拟器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 022202.
GAO X H, LI J Y, WANG X. Design of high-precision digital star magnitude simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 022202. (in Chinese)
- [15] 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于LED的多色温多星等单星模拟器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212003.
LIU H X, REN J W, LIU Z X, *et al.*. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003. (in Chinese)
- [16] 孙向阳, 付跃刚, 李杰, 等. 基于 μ LED发光技术的新型星模拟器设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0424002.
SUN X Y, FU Y G, LI J, *et al.*. New star simulator design based on μ LED luminous technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0424002. (in Chinese)
- [17] 张晓娟, 张健, 杨俊杰, 等. 星模拟器多星等模拟方法研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(9): 1150-1155.
ZHANG X J, ZHANG J, YANG J J, *et al.*. Research on multiple star magnitude simulation of star simulator[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(9): 1150-1155. (in Chinese)
- [18] 陈启梦, 张国玉, 王凌云, 等. 高精度星敏感器测试设备的设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2234-2239.
CHEN Q M, ZHANG G Y, WANG L Y, *et al.*. Test equipment design of high precision star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2234-2239. (in Chinese)
- [19] 周言敏, 李建芳, 王君. 光学测量技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
ZHOU Y M, LI J F, WANG J. *Optical Measurement Techniques*[M]. Xian: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 于国栋, 王春阳. 稳健估计下的光学经纬仪多站交会算法[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(4): 299-305.
YU G D, WANG CH Y. Multi-station intersection algorithm of optical theodolites based on robust estimation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(4): 299-305. (in Chinese)

作者简介:



许洪刚(1991—), 男, 山东临沂人, 硕士, 研究实习员, 2014年、2018年于东北林业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: nefuxhg@163.com



韩冰(1981—), 男, 吉林长春人, 副研究员, 国家光学机械质量监督检验中心副主任。全国光学和光子学标准化委员会委员, 中国光学学会光学测试委员会委员, 2004年于吉林大学获得学士学位, 主要从事光学测试技术和检测仪器的开发工作。E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn