

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412906

地平式光电望远镜全链路指向误差建模及其补偿研究*

李广振, 张 雷, 王行行, 牟洪元, 霍占伟, 谭陆洋
(长光卫星技术股份有限公司 长春 130000)

摘 要:地平式光电望远镜作为天文观测与激光通信等领域的关键仪器,其指向误差与底层结构参数之间的关系仍然失联。为建立地平式光电望远镜底层结构参数与指向误差间的联系,为仪器误差设计和补偿提供理论依据,本文首先介绍了典型的地平式结构,提出了指向误差的两级误差源的分类和定义。然后采用误差合成理论自上至下建立了底层结构参数到系统光轴的全链路指向误差模型,并通过文献中的公开标校数据验证了所提模型的正确性。接着对所提全链路指向误差模型中的 9 项加工参数和 9 项设计参数进行了灵敏度分析,结果表明不同底层结构参数的指向误差贡献存在显著差别,应根据结构参数灵敏度进行区别设计,且结构参数对指向误差具有显著的非线性效益。最后基于所提模型对某 500 mm 口径激光通信地平式光电望远镜的指向误差进行了补偿,指向误差的方位和俯仰分量的极限误差值分别从 218.83"、-208.66"降低至 16.45"、6.89",提高了 12 倍以上。该研究所提全链路指向误差模型揭示了指向误差的底层结构因素及其作用规律,证明了该模型用于误差补偿的优越性,为地平式光电望远镜的仪器误差设计和系统误差补偿提供了理论依据,具有重要的借鉴意义。

关键词: 指向误差模型;地平式光电望远镜;数值模拟;误差补偿

中图分类号: TH115 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

All-link pointing error modelling and error compensation for Alt-Azimuth photoelectric telescope

Li Guangzhen, Zhang Lei, Wang Hanghang, Mu Hongyuan, Huo Zhanwei, Tan Luyang
(Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd, Changchun 130000, China)

Abstract: The relationship between the pointing error and the underlying structural parameters of Alt-Azimuth photoelectric telescopes, which are crucial instruments in astronomical observations and laser communications, has not been fully understood. To establish the connection between the underlying structural parameters and the pointing error, and to provide a theoretical basis for the design and compensation of instrumental errors, this paper first introduces the typical Alt-Azimuth structure and proposes the classification and definition of two-level error sources for pointing errors. A top-down all-link pointing error model, which extends from the underlying structural parameters to the system's optical axis, is developed using error synthesis theory. The proposed model is then verified using open calibration data from the literature. Subsequently, a sensitivity analysis is conducted on nine processing parameters and nine design parameters within the proposed all-link pointing error model. The results indicate significant variations in the contributions of different underlying structural parameters to pointing errors. It is determined that these structural parameters should be designed differently according to their sensitivities. Furthermore, it is found that the structural parameters significantly influence the nonlinear effects of pointing errors. Finally, based on the proposed model, the pointing error of a 500 mm aperture laser communication Alt-Azimuth photoelectric telescope is compensated. The maximum values of the azimuth and pitch components of the pointing error are reduced from 218.83" and -208.66" to 16.45" and 6.89", respectively, which is more than 12 times better. The all-link pointing error model proposed in this paper reveals the underlying structural factors of pointing errors and their mechanisms. It demonstrates the superiority of the model for error compensation and provides a theoretical basis for the design of instrumental errors and systematic error compensation of Alt-Azimuth photoelectric telescopes, which is of great significance.

Keywords: pointing error model; Alt-Azimuth photoelectric telescope; numerical simulation; error compensation

收稿日期: 2024-05-31 Received Date: 2024-05-31

* 基金项目: 长光卫星技术股份有限公司横向课题(ZYGCABKZ2021123003, ZYGCABKY02023100804)项目资助

0 引言

地平式光电望远镜是集精密机械、光电和测量于一体的复杂仪器,在航天航空、军事、测量与星地通信等领域应用广泛,如星地量子通信望远镜、室内测角全站仪和靶场经纬仪等^[1-5]。这类仪器工作时要求视轴能够非常精准、稳定的指向目标,指向精度要求一般为数角秒^[6]。地平式光电望远镜的指向精度是仪器核心指标,代表了仪器所达到的制造水平。

提高仪器指向精度有2个方向,其一是误差的控制,体现在仪器的初始设计阶段;其二是系统误差的补偿,体现在仪器制造完成后的使用阶段。目前研究更多关注于后者^[7-8],主要有2种指向误差模型:球谐模型和基本参数模型^[9]。其中球谐模型的通用性更好,经球谐模型补偿后指向误差的极限值基本能降低至 $10''$ 内^[9-10],但是球谐函数的各项系数不具备物理意义,模型稳定性较差。传统基本参数模型通用性不如球谐模型,需要针对具体结构添加补偿项,如大口径望远镜的重力补偿项^[11]等,但是基本参数模型由仪器各关键分系统误差合成得到,如轴系晃动、照准差等,每一项系数具有物理意义,相比球谐模型更加稳定,实现的精度也与球谐模型相当^[10,12-14]。此外,也有基于天文定向^[15]、神经网络^[16]的补偿方法,与球谐模型的特点类似。因此,基本参数模型的应用更加广泛,但是误差分解仅到分系统级别,底层结构参数与指向误差间的关系仍然失联。

综上所述,对地平式光电望远镜的指向模型的研究已取得了显著的成果。但在目前研究基础上,认为

还有两个问题值得进一步研究:1)指向误差与底层结构参数之间的关系仍然失联,使得早期仪器误差设计缺乏理论依据。2)现有模型只考虑了角度误差如晃动误差、定位误差等,而没有考虑平移对指向误差的影响。

因此,首先介绍了典型的地平式光电望远镜结构,对指向误差的两级误差源进行了分类。然后自上至下建立了底层结构参数到系统的全链路指向误差模型,通过公开数据对所建立模型的正确性进行了验证。然后对模型进行了数值分析,得到了具有实际意义的设计结论,基于模型对某500 mm口径激光通信光电望远镜的指向误差进行了补偿。

1 典型地平式结构及其指向误差

典型地平式结构及指向误差的定义如图1所示,主要由基座、方位轴系、U型架、俯仰轴系和圆光栅测角系统组成,其中 OA 表示方位轴, OE 表示俯仰轴, OP 表示光电望远镜的光轴,三轴理论上应保证严格的正交关系并相交于点 O 。图1中 L 为方位轴系支撑跨距即滚动体所在节圆直径, H 为俯仰轴系两侧轴承支撑点间的跨距, D_a 和 D_e 分别为方位和俯仰轴的圆光栅直径, k_a 和 k_e 分别为方位和俯仰轴的圆光栅安装偏心距。当三轴为严格正交时,假设方位轴转过角度 A ,俯仰轴转过角度 E ,此时仪器指向为 OP 。但由于存在角度和平移误差,实际指向为 OP' ,则 OP' 与 OP 之间的偏差即为指向误差,其中沿水平方向的分量为方位误差 ΔA ,沿竖直方向的分量为俯仰误差 ΔE 。

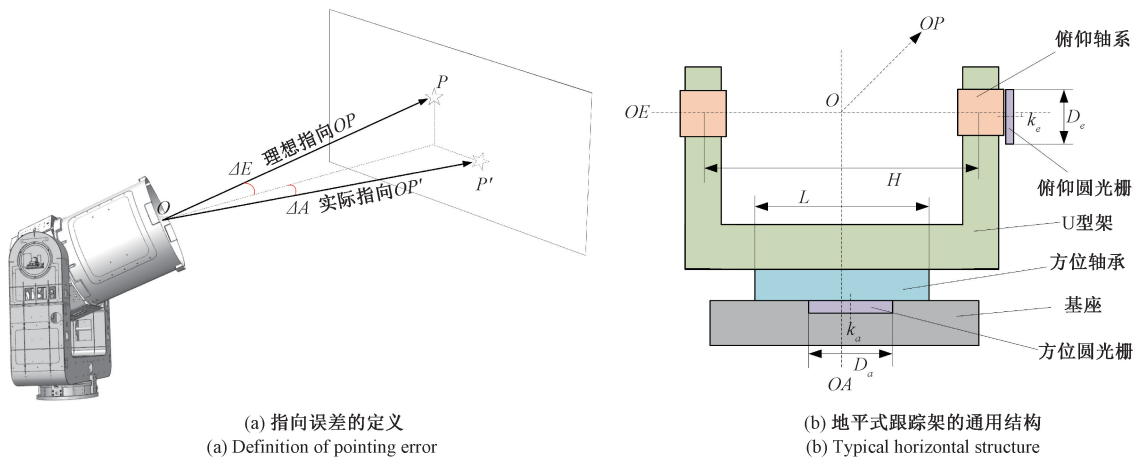


图1 典型地平式结构及其指向误差的定义

Fig. 1 Typical Alt-Azimuth structure and definition of pointing error

对指向误差的两级误差源的定义如下:

1) 一级误差源。直接影响指向精度的分系统级误差为一级误差源,主要为三轴不正交的平移误差和角度误差,如角晃动误差、两轴垂直度误差和角定位误差等。

2) 二级误差源。影响一级误差源的底层结构参数为二级误差源,主要可以分为加工参数和设计参数,如加工误差和轴承跨距等。

2 考虑结构参数的指向误差建模

2.1 一级误差源向光轴指向的误差模型

一级误差源可以分为三维平移误差和三维角度误差。平移误差主要为光轴起点相较于理论三轴交点 O 的偏距 e ,这类误差往往被现有研究所忽略。平移造成的指向误差与观测距离有关,习惯上将指向误差写成角度的形式,因此平移造成的指向误差可以写为:

$$\Delta A_e = \arcsin\left(\frac{e_a}{I}\right)\rho \quad (1)$$

$$\Delta E_e = \arcsin\left(\frac{e_e}{I}\right)\rho \quad (2)$$

式中: e_a 和 e_e 分别为总偏距在水平面和竖直面的偏距分量; I 为光电仪器的观测距离; ρ 为长度单位 mm 向角度单位”的转换系数, $\rho = 206\ 265$ 。

角度误差主要包括方位轴和俯仰轴晃动、两轴垂直度、照准差、两轴圆光栅定位误差、方位定向差和俯仰零位差。对于角度误差,已有相当多的文献进行过研究。假设各误差源间相互独立,并忽略计算过程中的高阶小量,可以得到地平式光电望远镜在东北天测量坐标系下的机架模型表达式。

$$\Delta A = -\varphi_x \sin A \tan E + \varphi_y \cos A \tan E + \gamma \tan E - \tau \sec E + S_a + C_a \quad (3)$$

$$\Delta E = -\psi_x \cos A - \psi_y \sin A + S_e + C_e \quad (4)$$

式中: A 为跟踪架的方位角; E 为跟踪架的俯仰角; ΔA 为跟踪架的方位指向误差; ΔE 为跟踪架的俯仰指向误差; φ_x 为跟踪架方位轴系晃动误差的向北分量; φ_y 为跟踪架方位轴系晃动误差的向东分量; γ 为跟踪架方位轴系与俯仰轴系的不垂直误差,同时也包括俯仰轴系的晃动误差; τ 为望远镜光轴与跟踪架俯仰轴系的不垂直误差; S_a 和 S_e 分别为跟踪架方位轴系角定位误差和俯仰轴系角定位误差; C_a 和 C_e 分别为跟踪架方位轴的定向差和俯仰轴系的零位差。

2.2 二级向一级误差源的误差模型

1) 平移误差源

误差传递过程如图 2 所示, $O_0X_0Y_0Z_0$ 为方位轴坐标系, Z_0 表示方位回转轴线; $O_1X_1Y_1Z_1$ 为 U 型架坐标系,U 型架关于 Z_1 轴回转对称; $O_2X_2Y_2Z_2$ 为俯仰轴坐标系,

X_2 表示俯仰回转轴线; $O_3X_3Y_3Z_3$ 为 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系沿 Z_1 轴平移至 X_3 轴与 X_2 轴共轴的坐标系; $O_4X_4Y_4Z_4$ 为 $O_3X_3Y_3Z_3$ 平移至光轴原点所在的坐标系。

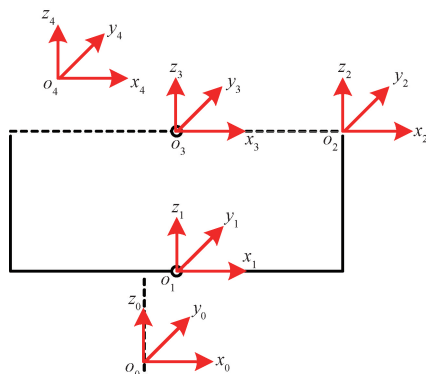


图 2 平移误差传递链

Fig. 2 Transmission chain of translation error

总偏距即为原点 O_4 至 O_3 的距离,总偏距在水平面的分量 e_a 为各坐标系在 XY 平面内的误差累计,在竖直面的分量 e_e 为各坐标系在 Z 向量上的误差累计。

e_a 的主要误差源有方位轴承径跳 δ_{ea1} 、U 型架安装偏心 δ_{ea2} 、固定端俯仰轴承端跳 δ_{ea3} 和载荷安装偏心 δ_{ea4} ,各误差相互独立,可得:

$$e_a = \sqrt{\sum_{ea1=1}^{n_{ea}} \delta_{ea1}^2} \quad (5)$$

式中: n_{ea} 为误差传递链长度。

e_e 主要误差源为方位轴端跳 δ_{ee1} 和固定端俯仰轴承端跳 δ_{ee2} ,各误差相互独立,可得:

$$e_e = \sqrt{\sum_{ee1=1}^{n_{ee}} \delta_{ee1}^2} \quad (6)$$

式中: n_{ee} 为误差传递链长度。

2) 角度误差源

(1) 方位轴晃动

方位轴晃动主要取决于轴承自身晃动,轴承晃动的最短误差传递链由外圈滚道加工误差 δ_{a1} 、滚动体误差 δ_{a2} 和内圈滚道误差 δ_{a3} 组成。对于不同形式的方位轴系,假设有效误差传递链长度为 n_a ,且各个误差之间相互独立,则可以求得方位轴晃动误差为:

$$\varphi = \frac{\sqrt{\sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{L} \rho \quad (7)$$

式中: L 为轴承跨距; ρ 为转换系数 206 265。

方位轴晃动服从均匀分布,假设方位轴晃动向北分量与向东分量相等,根据矢量合成原理有:

$$\varphi_x = \varphi_y = \frac{\sqrt{2 \sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{2L} \rho \quad (8)$$

(2) 俯仰轴晃动

俯仰轴晃动则与轴承精度、加工装配精度均有关系,建立从固定轴到游动轴的最短误差传递链如图3所示,由固定轴圆柱度 δ_{e1} 、固定端轴承跳动 δ_{e2} 、左右安装孔同轴度 δ_{e3} 、游动端轴承跳动 δ_{e4} 和游动轴圆柱度 δ_{e5} 组成。同理可以求得俯仰轴晃动误差为:

$$\eta = \frac{\sqrt{\sum_{ei=1}^{n_e} \delta_{ei}^2}}{H} \rho \quad (9)$$

式中: n_e 为误差传递链长度,最短误差传递链 $n_e=5$; H 为两端轴承的支撑跨距; ρ 为转换系数206 265。

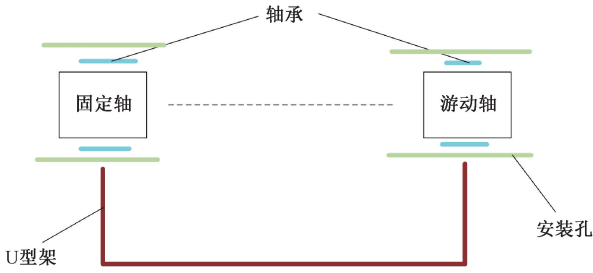


图3 俯仰轴晃动传递链

Fig. 3 Transmission chain of pitch axis wobble error

(3) 两轴垂直度

两轴垂直度来源示意如图4所示,主要由方位轴上台面与方位轴的不垂直度和U型架左右安装孔的不等高导致的。

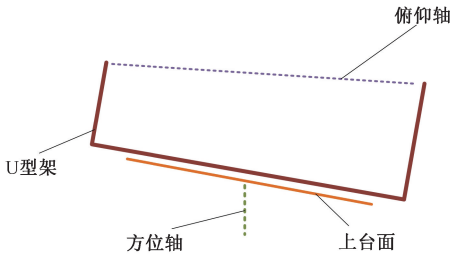


图4 两轴垂直度误差传递链

Fig. 4 Transmission chain of perpendicularity

其中由方位轴上台面导致的不垂直度 γ_1 为:

$$\gamma_1 = \frac{\delta_{c1}}{L} \rho \quad (10)$$

式中: δ_{c1} 为方位轴上台面跳动。

由U型架两侧安装孔不等高导致的不垂直度 γ_2 为:

$$\gamma_2 = \frac{\delta_{c2}}{H} \rho \quad (11)$$

式中: δ_{c2} 为U型架两侧安装孔的不等高度。

γ_1 和 γ_2 相互独立,则可得总的垂直度误差为:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} = \sqrt{\frac{\delta_{c1}^2}{L^2} + \frac{\delta_{c2}^2}{H^2}} \rho \quad (12)$$

(4) 角定位误差

角定位误差主要由光栅安装偏心导致,误差原理如图5所示,假设圆光栅理想的回转中心是 O 点,实际回转中心为 O_1 点,偏心量是 e 。圆光栅实际转过的角度为 A ,外径为 D ,根据几何关系可知,则测角误差 δ_p 为^[17]:

$$\delta_p = \arcsin\left(\frac{2e}{D}\right) \sin A \quad (13)$$

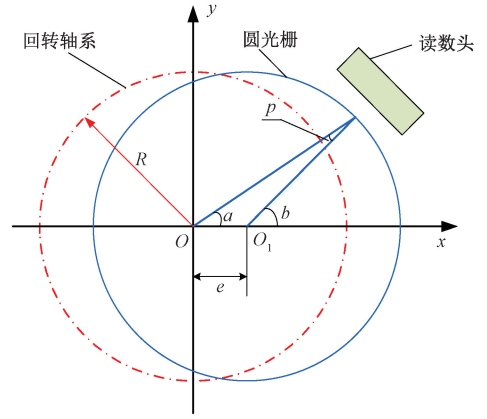


图5 光栅安装偏心

Fig. 5 Grating installation eccentricity

2.3 全链路指向误差模型

将式(5)~(13)代入式(1)~(4),就得到了共含有18项结构参数的全链路指向误差模型。

$$\Delta A = -\frac{\sqrt{2 \sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{2L} \rho \sin A \tan E + \frac{\sqrt{2 \sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{2L} \rho \cos A \tan E + \sqrt{\frac{\delta_{c1}^2}{L^2} + \frac{\delta_{c2}^2}{H^2}} \rho \tan E + \frac{\sqrt{\sum_{ei=1}^{n_e} \delta_{ei}^2}}{H} \rho \tan E - \tau \sec E + \arcsin\left(\frac{2k_a}{D_a}\right) \sin A + C_a + \arcsin\left(\sqrt{\frac{\sum_{eai=1}^{n_{ea}} \delta_{eai}^2}{I}}\right) \rho \quad (14)$$

$$\Delta E = -\frac{\sqrt{2 \sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{2L} \rho \cos A - \frac{\sqrt{2 \sum_{ai=1}^{n_a} \delta_{ai}^2}}{2L} \rho \sin A + \arcsin\left(\frac{2k_e}{D_e}\right) \sin E + C_e + \arcsin\left(\sqrt{\frac{\sum_{eei=1}^{n_{ee}} \delta_{eei}^2}{I}}\right) \rho \quad (15)$$

3 模型验证

为了验证所提全链路误差模型的正确性,使用某地平式激光测距望远镜^[18]和1.8 m地平式天文观测望远

镜^[19]中的公开数据进行验证,结果如图6所示。激光测距望远镜^[18]的方位分量拟合结果由图6(a)可知,拟合后极限误差从-107.03"降低至7.41",误差的均方根(root mean square, RMS)值从54.06"降低至1.75";由图6(b)可知俯仰分量拟合后的极限误差从-39.06"降低至

4.79",RMS值从23.79"降低至1.77"。而1.8 m地平式天文观测望远镜^[19]的方位拟合结果如图6(c)所示,极限误差从281.46降低至3.58",RMS值从99.49"降低至1.08";俯仰分量拟合结果如图6(d)所示,极限误差从23.55"降低至-15.44",RMS值从13.26"降低至2.97"。

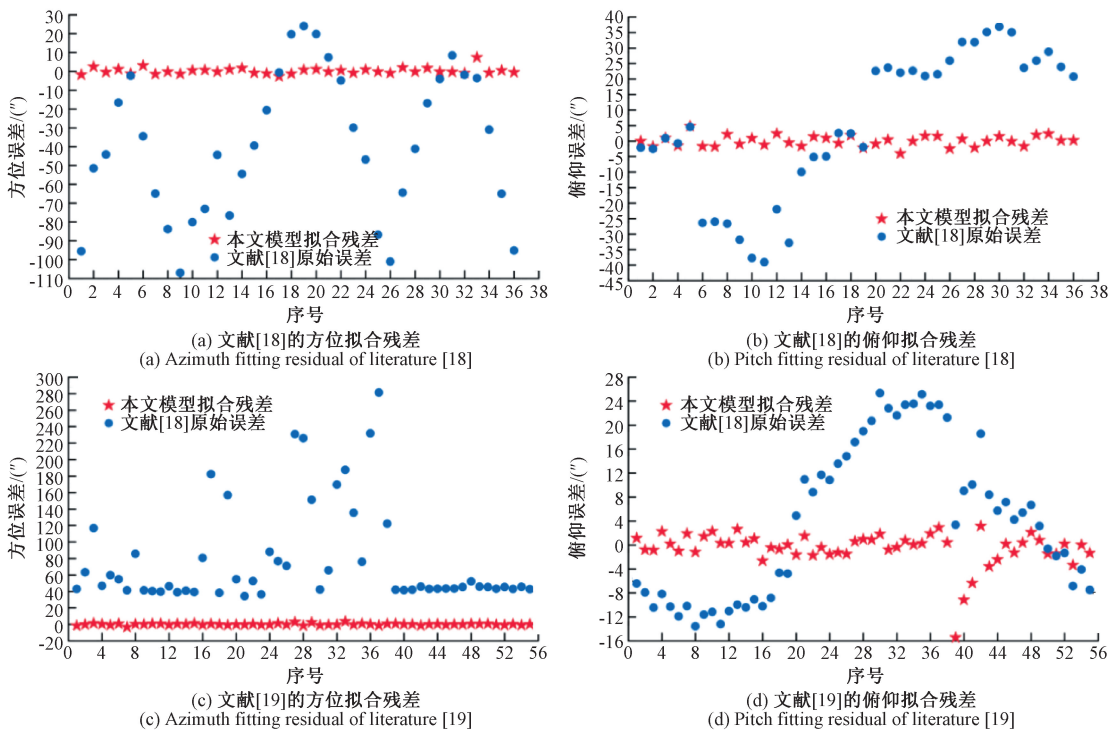


图6 对文献数据的拟合结果
Fig.6 Fitting results of literature data

上述对公开数据的拟合结果表明了所提模型的正确性及通用性,能够准确的描述地平式光电望远镜的误差特性。因此能够用于底层结构参数对指向误差的作用机理分析,为仪器误差设计提供实际依据,也能为系统误差补偿提供准确的理论模型。

4 数值模拟

4.1 初始值的假设

式(14)和(15)中,共有18项结构参数,其中的9项为加工相关参数,另外9项为设计相关参数。根据地平式跟踪架的设计经验,对这18项未知参数进行合理初始赋值,如表1和2所示。

将表1和2数据带入式(14)和(15),可以得到在该初始值下随仪器方位、俯仰角的指向误差特点如图7所示,可知地平式光电望远镜的指向误差具有显著的周期特性。

表1 加工相关参数的初始值

Table 1 Initial value of machining-related parameters			
序号	代号	初始值	含义
1	δ_{ai}	0.003 mm	方位各零件加工误差
2	δ_{ei}	0.005 mm	俯仰各零件加工误差
3	δ_{c1}	0.005 mm	方位轴上台面跳动
4	δ_{c2}	0.01 mm	U型架两侧等高
5	τ	10"	照准差
6	k_a	0.005 mm	方位圆光栅安装偏心
7	k_e	0.005 mm	俯仰圆光栅安装偏心
8	δ_{ea}	0.005 mm	水平面的平移误差源
9	δ_{ee}	0.005 mm	竖直面的平移误差源

4.2 数值模拟

式(14)和(15)所描述的指向模型为矢量模型,即各误差源均具有方向性,因此各误差源之间具备误差相消的可能,随着某一项误差的增大,指向误差反而可能

表 2 设计相关参数的初始值

Table 2 Initial value of design-related parameters

序号	代号	初始值	含义
1	L	300 mm	方位轴承跨距
2	H	800 mm	U 型架跨距
3	I	20 km	观测距离
4	D_a	150 mm	方位圆光栅外径
5	D_e	150 mm	俯仰圆光栅外径
6	n_a	3	方位误差传递链长度
7	n_e	5	俯仰误差传递链长度
8	n_{ea}	4	水平面平移误差传递链长度
9	n_{ee}	2	竖直面平移误差传递链长度

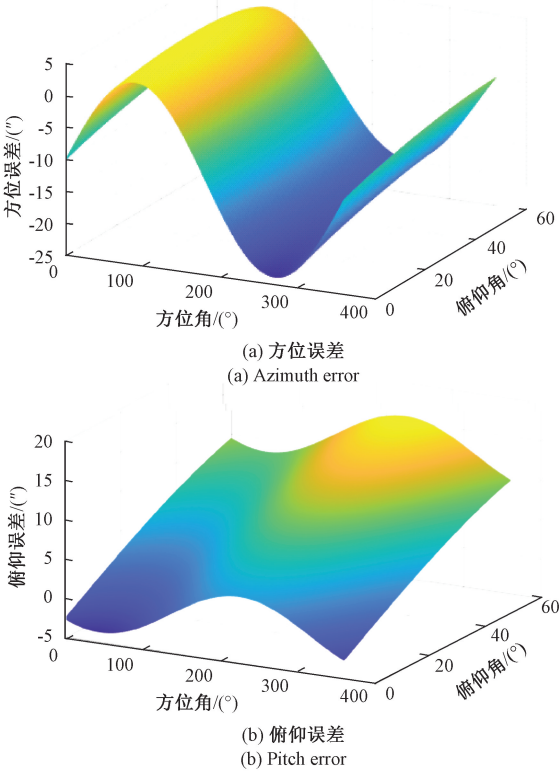


图 7 初始值下的指向模型

Fig. 7 Pointing model under initial values

减小,此时无法得到结构参数与指向误差之前的可靠结论。因此本文将指向模型改为各误差源独立作用然后合成的综合误差形式,以去除误差方向对结果的影响:

$$\Delta A' = \sqrt{(-\varphi_x \sin A \tan E)^2 + (\varphi_y \cos A \tan E)^2 + \sqrt{(\gamma \tan E)^2 + (-\tau \sec E)^2 + S_a^2 + C_a^2}} \quad (16)$$

$$\Delta E' = \sqrt{(-\psi_x \cos A)^2 + (-\psi_y \sin A)^2 + S_e^2 + C_e^2} \quad (17)$$

根据式(14)和(15)所描述的误差模型,误差随着方位角呈周期性变化,随俯仰角的增大而增大。为得到代表性的结果,选择在 $A=45^\circ$ 、 $E=60^\circ$ 处分析。得到此时的方位误差和俯仰误差值分别为 $A_0=26.50''$ 和 $E_0=12.63''$ 。单独改变某个误差源的数值,观察指向误差相较于 A_0 和 E_0 的变化,可以得到其误差作用规律。

1) 加工参数对指向误差的数值模拟

分别改变表 1 中各项参数的数值同时保持其他误差参数不变,得到 9 项加工参数对指向误差的数值模拟结果如图 8 所示,其中纵坐标表示改变某参数数值之后,指向误差相较 A_0 和 E_0 的变化,正数代表指向误差相比 A_0 和 E_0 变大,负数代表指向误差相比 A_0 和 E_0 减小。

由图 8 可知,除方位轴系结构误差 δ_{ai} 对方位指向误差和俯仰指向误差均有影响外,其余结构精度项仅对其某一个方向误差有影响:俯仰轴系结构误差 δ_{ei} 、方位轴上台面跳动误差 δ_{c1} 、U 型架等高误差 δ_{c2} 、方位轴圆光栅偏心误差 k_a 、水平面平移误差 δ_{ea} 和照准差 τ 仅对方位指向误差有影响;俯仰轴圆光栅偏心误差 k_e 和竖直面平移误差 δ_{ee} 仅对俯仰指向误差有影响。

从纵坐标体现的误差量级来看,俯仰轴圆光栅偏心误差 k_e 和照准差 τ 对指向误差的影响最大,数值分析过程中变化量均超过 $10''$;而水平面平移误差 δ_{ea} 和竖直面平移误差 δ_{ee} 对指向误差的影响仅为 $10^{-6}''$ 级别,基本可以忽略不计(在观测距离为 20 km 时)。其他误差源中 U 型架等高误差 δ_{c2} 对指向误差的影响在 $1''$ 内。

从曲线趋势上看,随着各误差源误差量的增大,指向误差随之增大,但结构参数对指向误差具有非线性效益,表明在仪器加工精度设计时应当在指向精度及其经济性之间做出平衡。

2) 设计参数对指向误差的数值模拟

同理,改变表 2 中任意一项误差源的数值而其他误差源初始值不变,得到结构参数对指向精度的数值模拟结果如图 9 所示,其中纵坐标表示的误差为改变某误差源数值之后,指向误差相较 A_0 和 E_0 的变化,正数代表指向误差相比 A_0 和 E_0 变大,负数代表指向误差相比 A_0 和 E_0 减小。

由图 9 可知,方位轴承跨距 L 、观测距离 I 和方位轴误差传递链长度 n_a 对方位指向误差和俯仰指向误差均有影响;U 型架跨距 H 、方位圆光栅直径 D_a 、俯仰轴误差传递链长度 n_e 和水平面平移误差链长度 n_{ea} 仅对方位指向误差有影响;俯仰圆光栅直径 D_e 和竖直面平移误差链长度 n_{ee} 仅对俯仰指向误差有影响。

从纵坐标体现的误差量级来看,方位轴承跨距 L 对

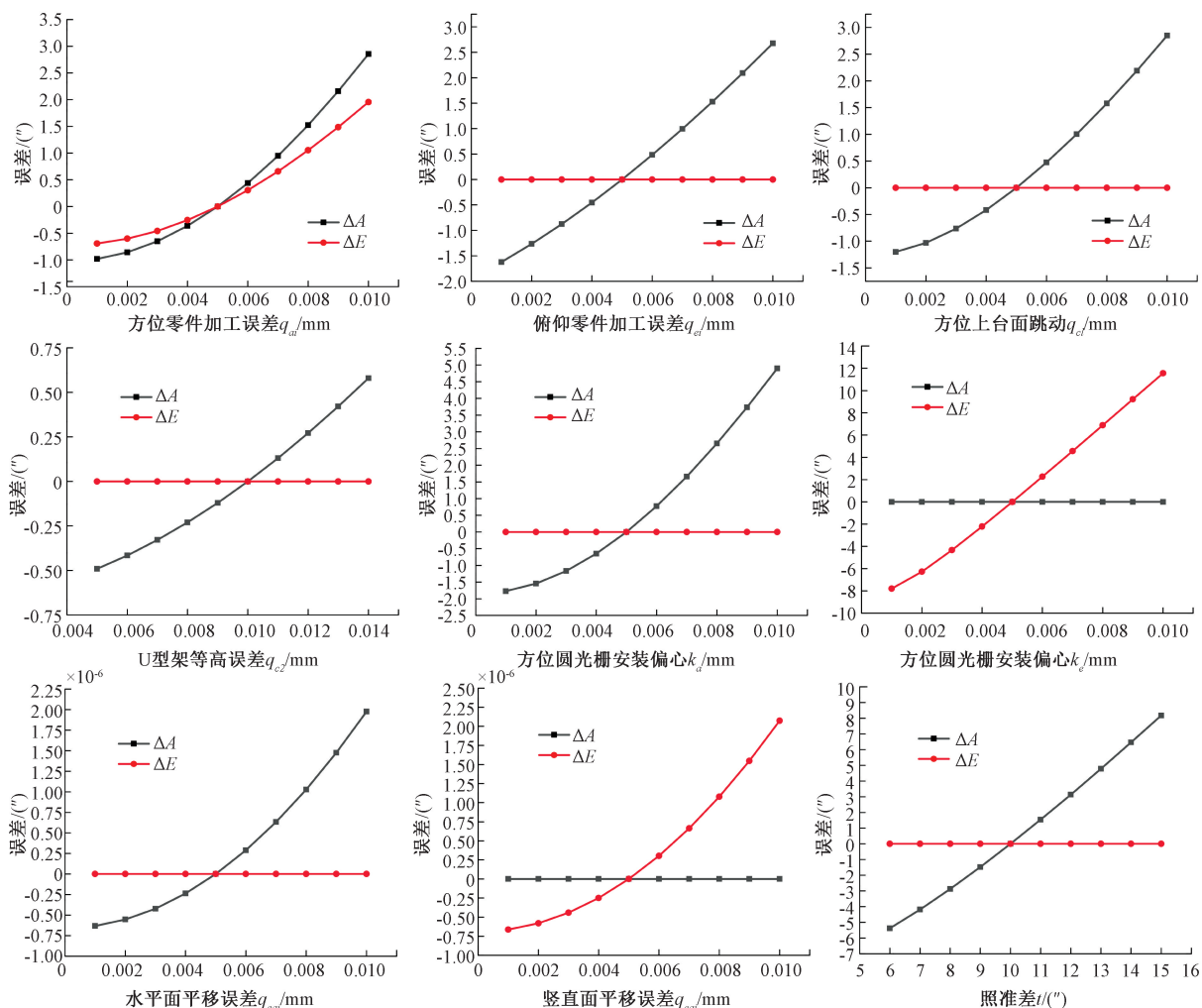


图8 加工参数对指向误差的影响

Fig. 8 Influence of machining parameter on pointing error

指向误差的影响最大,达到 $30''$ 量级,其次是俯仰和方位圆光栅直径 D_e 和 D_a ,分别达到 $20''$ 和 $10''$ 量级。而平移误差传递链长度 n_{ea} 和 n_{ee} 对指向误差的影响仅为 $10^{-6}''$ 级别,基本可以忽略不计(当观测距离为 20 km 时),其他误差源对指向误差的影响程度相当。

从趋势上分析,随着方位轴跨距 L 、U 型架跨距 H 、观测距离 I 、方位圆光栅直径 D_a 和俯仰圆光栅直径 D_e 的增大,指向误差随之减小,但减小的趋势变小,表明不同底层结构参数的指向误差贡献存在显著差别,应根据结构参数灵敏度进行区别设计。

此外,观测距离 I 对指向误差的影响很小,但指向误差的相对变化十分剧烈,在观测距离约为 10 m 时,造成的误差为 $2.5''$,在观测距离为 50 m 时,造成的指向误差仅为 $0.1''$,在更大的观测距离下,指向误差几乎不变。由式(14)和(15)可知,观测距离 I 仅与平移误差量 δ_{ea} 、 δ_{ee} 及误差传递链长度 n_{ea} 、 n_{ee} 共同作用指向误差,因此可以

得到结论,在光电仪器观测距离 $>50\text{ m}$ 时,可以忽略平移因素对指向误差的影响,但对于 $<10\text{ m}$ 的观测距离,平移因素是指向误差的重要来源。

5 指向误差补偿

基于所提模型对某 500 mm 口径车载地平式激光通信光电望远镜的指向误差进行补偿验证,补偿对象如图 10(a) 所示。选择的标校恒星具有较高星等,其天区分布如图 10(b) 所示,分布较为均匀。

补偿试验分两次标校,首先使用第 1 次的标校数据进行最小二乘回归分析,辨识出所提全链路指向误差模型中的未知参数,然后将补偿模型写入指向上位机程序中。第 2 次观测时会计算补偿模型的补偿量,从而改善光电望远镜的指向精度。

补偿前后的指向误差如图 11 所示,由图 11(a) 可知

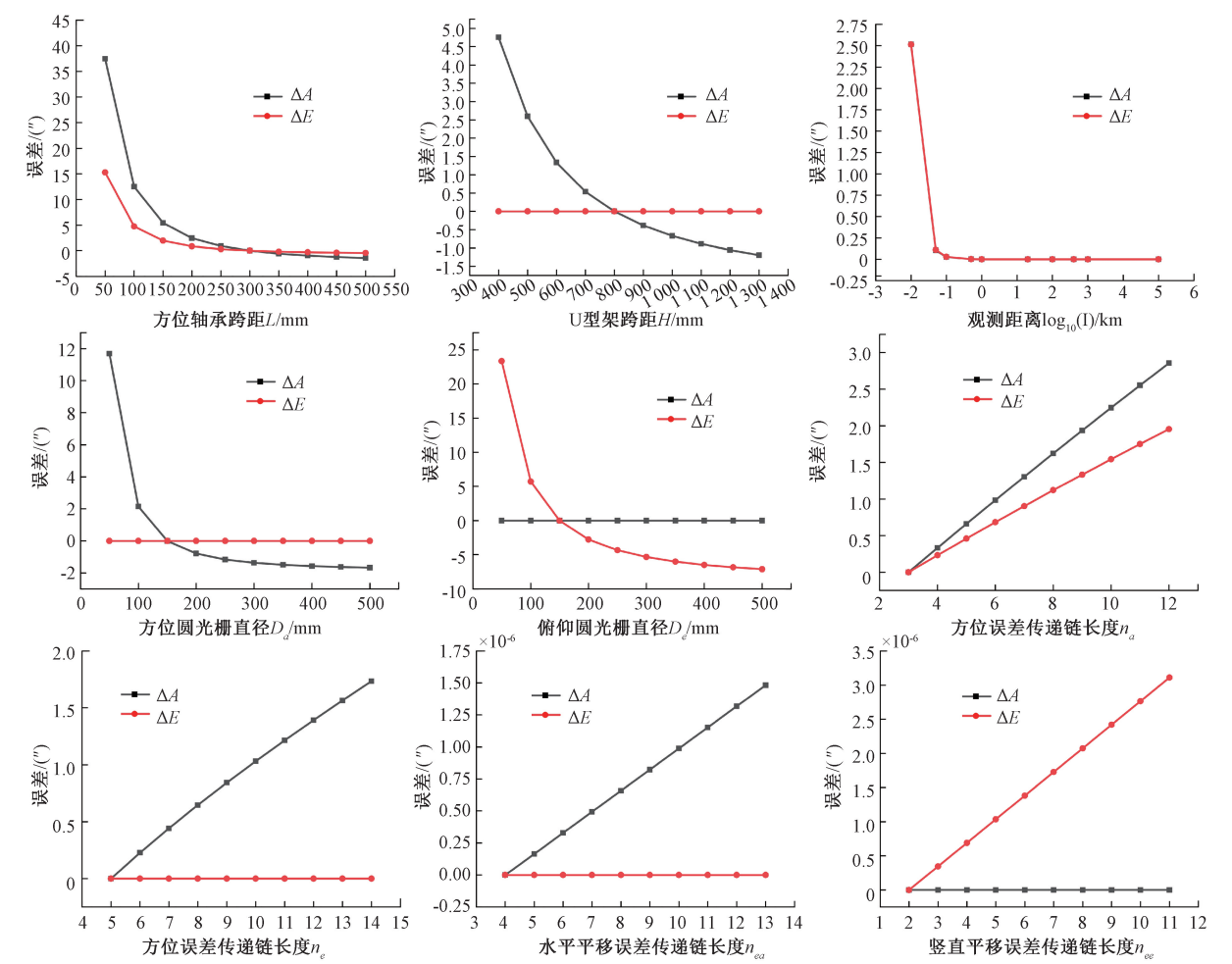


图9 设计参数对指向误差的影响

Fig. 9 Influence of design parameters on pointing error

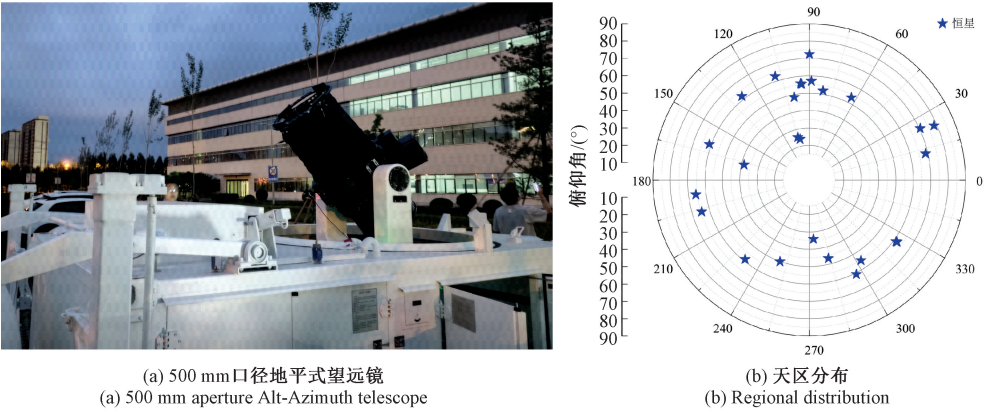


图10 实验情况

Fig. 10 Experimental condition

经所提模型补偿后方位误差分量的极限误差值从218.83"降低至16.45",RMS值从90.28"降低至5.77";由图11(b)可知俯仰分量的极限误差从-208.66"降低至6.89",RMS值从100.49"降低至4.29",均提高了12倍以上。上述结果说明了本文所提全链路指向误差模型在误差补偿上的可行性和优越性。

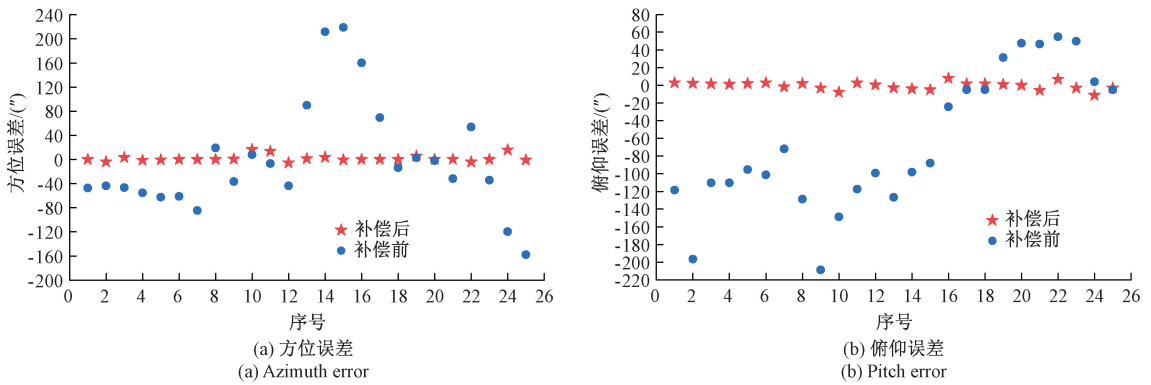


图 11 补偿前后的指向误差
Fig. 11 The pointing error before and after compensation

6 结 论

为建立地平式光电望远镜底层结构参数与指向误差间的联系,为仪器误差设计和误差补偿提供理论依据,建立了底层结构参数到系统光轴的全链路指向误差模型,通过公开数据验证了所建立模型的正确性。接着对所提指向误差模型进行了数值分析,结果表明不同底层结构参数的指向误差贡献存在显著差别,应根据结构参数灵敏度进行区别设计,且结构参数对指向误差具有非线性效益。最后基于模型对某 500 mm 口径激光通信光电望远镜的指向误差进行了补偿,指向误差的方位和俯仰分量的极限误差值分别从 218.83″、-208.66″降低至 16.45″和 6.89″,提高了 12 倍以上,表明了所提模型在误差补偿上的可行性。本研究为地平式光电望远镜的仪器误差设计和系统误差补偿提供了理论依据,具有重要的借鉴意义。

参考文献

[1] 余毅,刘震宇,孙志远,等. 靶场光电测量设备发展现状及展望[J]. 光学学报,2023,43(6):24-40,343.
YU Y,LIU ZH Y,SUN ZH Y,et al. Development status and prospect of photoelectric measurement equipment in range[J]. Acta Optica Sinica,2023,43(6):24-40,343.
[2] TANG Q J,YANG Q P,WANG X J,et al. Pointing error compensation of electro-optical detection systems using Gaussian process regression[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering,2021,12:22-34.
[3] 郑德智,郑金雄,李中翔,等. 空基平台量子通信现状与展望[J]. 仪器仪表学报,2023,44(9):83-95.
ZHENG D ZH,ZHENG J X,LI ZH X,et al. Current status and prospect of quantum communication on space-

based platforms [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(9):83-95.
[4] 刘晓东,缪东晶,姚燕,等. 全站仪气象改正公式优化研究[J]. 计量学报,2024,45(3):386-394.
LIU X D,MIAO D J,YAO Y,et al. Optimization of meteorological correction formula of total station[J]. Acta Meteorologica Sinica,2024,45(3):386-394.
[5] 孙春生,吴依伦. 无人机载光电吊舱观瞄角误差分配方法研究[J]. 红外与激光工程,2023,52(11):234-244.
SUN CH SH,WU Y L. Research on the error distribution method of unmanned airborne electro-optical pod viewing angle[J]. Infrared and Laser Engineering,2023,52(11):234-244.
[6] 刘世涛,曹阳,彭小峰,等. 空间激光通信的视轴初始指向系统研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(5):658-662.
LIU SH T,CAO Y,PENG X F,et al. Research on line-of-sight initial alignment system in space laser communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2017,31(5):658-662.
[7] 贾建援,柴伟,于大林,等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1500-1508.
JIA J Y,CHAI W,YU D L,et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(7):1500-1508.
[8] RIESING K M,YOON H,CAHOY K L. Rapid telescope

- pointing calibration: A quaternion-based solution using low-cost hardware[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2018, 4(3): 034002.
- [9] 朱庆生,陈伟民,吴金虎. 卫星激光测距望远镜的指向改正[J]. *天文研究与技术*, 2011, 8(3): 268-271.
- ZHU Q SH, CHEN W M, WU J H. The correction of pointing of a 1 m SLR telescope [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2011, 8(3): 268-271.
- [10] 李振伟,杨文波,张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 263-269.
- LI ZH W, YANG W B, ZHANG N. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 263-269.
- [11] 王洪浩,王建立,陈涛,等. 地基大口径望远镜重力弯曲引起的指向变化检测与修正[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(23): 3021-3030.
- WANG H H, WANG J L, CHEN T, et al. Measurement and calibration of optical axis changes caused by gravity for ground-based large-aperture telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 3021-3030.
- [12] HUANG L, MA W L, HUANG J L. Modeling and calibration of pointing errors with alt-az telescope [J]. *New Astronomy*, 2016, 47: 105-110.
- [13] 孙正雄,毛银盾,王锦清,等. 采用光学指向系统建立天马 13 m 望远镜指向模型[J]. *天文学报*, 2023, 64(4): 3-13.
- SUN ZH X, MAO Y D, WANG J Q, et al. Using the optical pointing system to build the pointing model of the Tianma 13 m telescope [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2023, 64(4): 3-13.
- [14] PENG CH, HE D, WANG Y K, et al. Modeling and correction of pointing errors in gimbals-type optical communication terminals on motion platforms[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 1-15.
- [15] 柳鸣,杨文波,刘德龙,等. 基于星图匹配脱靶量标定的移动测站望远镜指向修正技术[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(5): 338-346.
- LIU M, YANG W B, LIU D L, et al. Pointing correction technology of telescope of mobile tracking station based on star pattern matching deviation calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 338-346.
- [16] 马天明,赵春梅,何正斌. 面向空间碎片的激光测距望远镜指向修正算法[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 37-46.
- MA T M, ZHAO CH M, HE ZH B. Pointing correction algorithm for laser ranging telescopes oriented toward space-based targets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 37-46.
- [17] 李尢丽,薛梓,黄垚,等. 圆光栅测角系统示值误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 59-65.
- LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5): 59-65.
- [18] 赵洁. 长春人卫站提高卫星激光测距望远镜指向精度的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2005.
- ZHAO J. The research on improving the pointing precision of SLR telescope in changchun observatory[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2005.
- [19] 黄龙. 大型望远镜指向精度及轴系技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- HUANG L. Research in pointing error and shafting technologies for large telescope [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2016.

作者简介



李广振, 2018 年于东北大学获得学士学位, 2021 年于东北大学获得硕士学位, 2025 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 现为长光卫星技术股份有限公司助理研究员, 主要研究方向为激光通信地面站结构关键技术、精密仪器与测量。

E-mail: liguangzhen@charmminglobe.com

Li Guangzhen received the B.Sc. degree from Northeastern University in 2018, the M.Sc. degree from Northeastern University in 2021, and the Ph.D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2025. He is currently an assistant researcher at Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd, with the main research interests in the structural key technologies of laser communication ground stations, precision instruments and measurements.



张雷(通信作者),2003 年于东北大学获得学士学位,2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院大学博士生导师,长光卫星技术股份有限公司副总经理及卫星型号总师,主要研究方向为星载一体化卫星总体技术、有效载荷结构优化设计。

E-mail: 18686344285@163.com

Zhang Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2003 and M. Sc. degree from Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS) in 2008. Currently, he is a doctoral supervisor at the University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), the deputy general manager and a satellite model chief of Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd, with

his main research interests in the overall technology of satellite on-board integration and the optimal design of payload structure.



王行行,2011 年于山东大学获得学士学位,2014 年于西安电子科技大学获得硕士学位,现为长光卫星技术股份有限公司研究员,主要研究方向为遥感卫星光电成像及探测、星地激光通信地面系统总体技术。

E-mail: wanghanghang@charmminglobe.com

Wang Hanghang received his B. Sc. degree from Shandong University in 2011 and M. Sc. degree from Xi'an University of Electronic Science and Technology in 2014. Now he is a researcher of Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. and his main research interests are in the field of photoelectric imaging and detection of remote sensing satellites, and the overall technology of the ground system of satellite-to-ground laser communication.