

透射式望远镜的装调技术研究

谭乃悦, 马拥华, 蒋 蔚

中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林

收稿日期: 2025年7月11日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

随着高分辨率光学系统的应用领域持续拓展, 人们对光学系统的像差要求愈发严格。透射式望远光学系统由于光学元件数量较多、控制过程复杂, 且失调量的定位与分析难度较大等诸多因素限制了其发展。文章通过理论分析以及设计实验研究了透射式望远镜光学系统的光束成像质量, 分析了横向失调误差对望远镜光学系统的影响, 设计装调方案减小结构和镜片与基准轴间的偏差值, 实验验证了该装调方案的可行性。研究结果表明, 该方案校正后的望远镜光学系统不仅达到了在相同机械加工和光学加工的要求精度情况下降低物镜的光轴相对于基准轴的偏差值的目的, 且装调操作简单, 实现了降本增效。这一成果对推动透射式望远镜光学系统的商业化应用具有重要的工程实用价值和商业推广意义。

关键词

透射式望远镜, 横向失调误差, 装调方案, 降本增效, 商业化

Research on Installation and Adjustment Technology of Transmission Telescope

Naiyue Tan, Yonghua Ma, Wei Jiang

The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin Guangxi

Received: Jul. 11th, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

With the continuous expansion of the application field of high-resolution optical systems, people have increasingly strict requirements on the aberration of optical systems. The development of the transmission telescope optical system is limited by many factors, such as the large number of optical elements, the complex control process, and the difficulty in locating and analyzing the misalignment. The beam imaging quality of the transmission telescope optical system is studied through theoretical

文章引用: 谭乃悦, 马拥华, 蒋蔚. 透射式望远镜的装调技术研究[J]. 光电子, 2025, 15(3): 56-62.

DOI: 10.12677/oe.2025.153006

analysis and design experiments. The influence of lateral misalignment error on the telescope optical system is analyzed. The alignment scheme is designed to reduce the deviation between the structure and the lens and the reference axis. The feasibility of the alignment scheme is verified by experiments. The research results show that the telescope optical system corrected by this scheme not only achieves the purpose of reducing the deviation value of the optical axis of the objective lens relative to the reference axis under the condition of the same required accuracy of mechanical and optical processing, but also has the advantages of simple operation, achieving cost reduction and efficiency increase. This achievement has important engineering practical value and commercial significance for promoting the commercial application of the optical system of the transmission telescope.

Keywords

Transmission Telescope, Lateral Misalignment Error, Assembly and Adjustment Scheme, Cost Reduction and Efficiency Increase, Commercialization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着高分辨率光学系统的应用领域持续拓展，人们对光学系统的像差要求愈发严格。在众多影响像差的因素中，光学元件的装调误差是极为重要的因素之一。目前，在反射式望远光学系统的装调工作中，像差对失调量的影响已得到充分考量，基于像差理论的计算机辅助装调技术也已相对成熟，相关研究成果可参考文献[1]-[3]。

然而，透射式望远光学系统由于光学元件数量较多、控制过程复杂，且失调量的定位与分析难度较大等诸多限制因素，使得像差问题在透射式光学系统的失调校正中尚未引起足够的重视，相关研究工作也才刚刚拉开序幕。参考文献[4]-[7]运用光学设计软件针对特定的光学系统展开仿真分析，并据此确定调整对象。但这种研究方式存在一定局限性，其分析结果具有较强的特殊性，仅仅适用于所指定的光学系统，缺乏广泛的通用性。

利用一个高精度的轴系，将被测物镜固定于轴系的工作台上，用一个高精度的对心器测定光学系统球心偏差的方法，具有设备简单、精度较高的优点，但是在工艺上如何使每片透镜的光轴相对于基准轴线的角偏差达到角秒量级内有一定的困难。因为这意味着，透镜光轴和透镜基面，以及结构各镜片安装面，所有这些基面之间的平行度、平面度均要达到微米级精度。这对机械加工和光学镜片加工来说是十分困难和代价昂贵的。

本文在深入分析望远镜的透镜横向位移对像差影响的基础上，提出了一种基于像差约束条件的透射式望远镜光学系统失调校正方法。通过实验验证，该方法能够在相同的机械加工和光学加工的要求精度情况下提高整个望远镜的成像质量，对降本增效具有显著的优势。本文所提出的装调方案为透射式望远镜光学系统横向失调校正提供了一种新的思路和有效途径。

2. 结构设计

随着对望远镜分辨能力的要求越来越高，光学系统的加工、装调难度也随之增加。在光学系统的各个元件投入加工前，为该系统建立一套误差分配体系是非常必要的。望远镜光学系统的误差可以分为静

态误差和动态误差。静态误差包括加工和装调误差：加工误差包括元件的面形、曲率半径、厚度误差等；装调误差包括各元件相对之间的偏心、倾斜、距离误差。动态误差包括运动状态中各个元件的偏差、图像抖动误差和圆顶以及视宁度误差等。综合考虑动态稳定性和加工难度等实际情况，望远镜的结构形式不宜过于复杂，本文望远镜的结构形式采用简单的同轴镜筒形式，如图 1 所示。

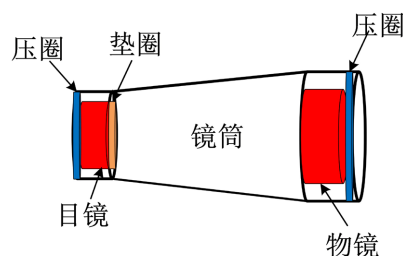


Figure 1. Structural diagram of telescope
图 1. 望远镜的结构形式图

从上述结构形式可知，易通过调整垫片的厚度来控制镜片间距 S 满足纵向失调的设计要求。横向失调涉及物镜和目镜光轴的横向位移，通过调整垫片的厚度对横向失调的校正没有任何明显改善。物镜结构和镜片的横向失调分别如图 2、图 3 所示。

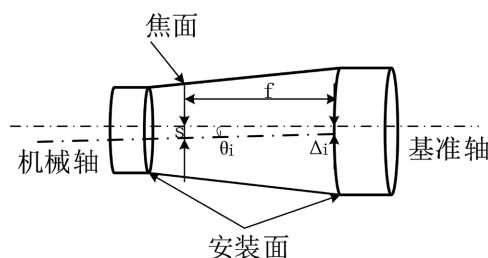


Figure 2. Lateral misalignment of objective lens structure
图 2. 物镜结构的横向失调

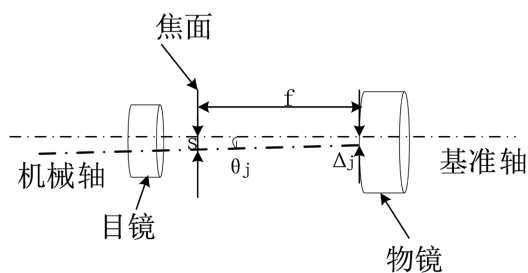


Figure 3. Lateral misalignment of objective lens
图 3. 物镜镜片的横向失调

上述图 2、图 3 中 f 为物镜的焦距， Δ_i 为结构机械轴与基准轴在物镜安装面处的偏差值， θ_i 为结构机械轴与基准轴间的夹角， s_i 为结构机械轴与基准轴在焦面处的偏差值； Δ_j 为物镜光轴与基准轴在物镜安装面处的偏差值， θ_j 为物镜光轴与基准轴间的夹角， s_2 为物镜光轴与基准轴在焦面处的偏差值。目镜的横向失调与物镜同理，不再赘述。

横向失调会导致系统产生三阶轴向彗差, 并导致图像位置的横向偏移。通常倾斜和偏心都会为系统引入相同形式的轴向彗差, 通过适当地调整主次镜偏心, 可以消除给定倾斜引起的彗差, 然而该结构形式无法调节主次镜偏心。若采用新增顶丝、调整垫片角度等方式来调节横向失调误差, 一方面会新增体积重量, 另一方面新增的结构形式在各种环境(如冲击振动, 高低温)下状态会变得不稳定, 降低其适用性, 这与设计初衷相违背, 是不能接受的。

3. 理论分析

波前像差理论基础是 1976 年由 Buchroeder 在对失调光学系统像差特性研究的情况下提出的, 常用的三阶光学系统像差公式如下[8]:

$$W = W_{040}\rho^4 + W_{131}H\rho^3 \cos\theta + W_{222}H^2\rho^2 \cos^2\theta + W_{220}H^2\rho^2 + W_{311}H^3\rho \cos\theta \quad (1)$$

式中, W_{040} 为球差系数, W_{131} 为彗差系数, W_{222} 为像散系数, W_{220} 为场曲, W_{311} 为畸变系数, H 是视场矢量, ρ 是光瞳矢量, θ 表示视场矢量与光瞳矢量的夹角。

光学系统未失调的三阶彗差:

$$W = W_{131}H\rho^3 \cos\theta \quad (2)$$

当光学系统失调时, 公式(2)中的视场矢量应该由有效视场矢量 H_A 所代替

$$H_A = \vec{H} - \sum_j \sigma_j \quad (3)$$

式中 σ_j 表示像差中心的偏移矢量。

将公式(3)代入公式(2), 失调光学系统的三阶彗差可表示为:

$$W = W_{131} \left(H - \sum_j \sigma_j \right) \rho^3 \cos\theta \quad (4)$$

从公式(4)中可以看出, 失调的离轴系统三阶彗差主要由残余的视场线性彗差以及由倾斜失调误差和偏心失调误差引入的视场常量彗差两个部分组成。综上所述可知, 离轴系统的任意横向失调都会为系统引入常量彗差。通过求解公式(4), 即 $W = 0$, 可以得到系统零彗差节点的位置矢量:

$$\vec{H} = \sum_j \sigma_j \quad (5)$$

当 $\vec{H} = \sum_j \sigma_j = 0$ 时, 即零彗差节点位置矢量回到视场中心位置。但此时系统仍旧有可能存在失调, 这是因为不同失调量之间的耦合会导致系统常量彗差相互抵消。换言之, 当光学镜片横向失调误差引入的彗差和光机结构横向失调误差产生的彗差等值反向时, 系统的彗差为零。

根据上述像差理论, 由横向失调引起的倾斜和偏心组合相当于围绕基准轴的一个固定点旋转, 只要物镜和目镜光轴在焦面处相交, 就不会有轴向彗差。为了降低机械加工和光学加工的精度要求, 我们可以利用误差互补原理来对透镜光轴进行校正。也就是说, 当物镜光轴与基准轴在焦面处的偏差值为 s_2 , 结构机械轴与基准轴在焦面处的偏差值为 s_1 时, 可以通过转动物镜, 使两者的偏差方向正好相反。这时, 透镜在结构中的光轴相对于基准轴的实际偏差 Δ_s 等于两者偏差值的差, 即

$$\Delta_s = s_1 - s_2 = (\Delta_i + f \times \tan\theta_i) - (\Delta_j + f \times \tan\theta_j) \quad (6)$$

对于某一批次产品, 其加工零件的精度是一定的。只要我们在基准轴上较准确地确定了它们的大小, 由公式(6)可知, 通过合理选取结构机械轴与基准轴在焦面处的偏差值 s_1 和物镜光轴与基准轴在焦面处的

偏差值 s_2 相接近, 通过转动镜片的安装角度, 就可以使光轴的实际偏心达到极小的数值, 从而实现在相同的机械加工和光学加工的精度要求下减小物镜在结构中的实际光轴相对于基准轴的偏差值。若转动镜片的安装角度后, Δ_s 满足光学系统的设计公差, 此时光学系统的横向失调误差得到校正。

4. 实验验证

为了验证上述理论, 本文设计的实验验证光路示意图如图 4 所示, 通过准直器发出一束准直光束(波长 808 nm), 该准直光束经望远镜系统扩束后用平行光管(焦距 4 米)和光束质量分析仪(像元尺寸 5.2 微米)测量光束质量。由平行光管焦距和光束质量分析仪像元尺寸可知, 该光束质量测试系统测量精度为 $1.3 \mu\text{rad}$ 。

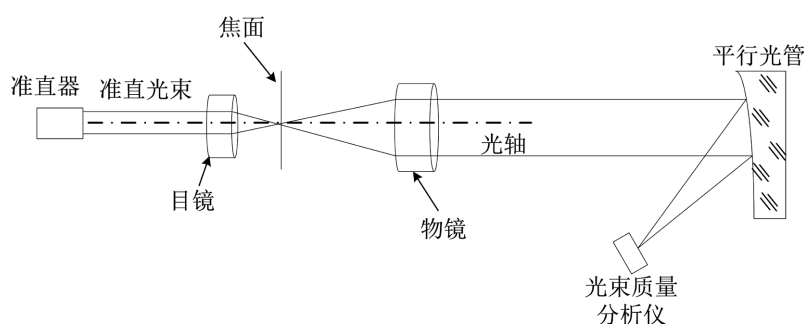


Figure 4. Schematic diagram of experimental verification optical path
图 4. 实验验证光路示意图

望远镜筒实物如图 5 所示。



Figure 5. Actual telescope tube
图 5. 望远镜筒实物

本文设计的光学系统扩束比为 9.3, 即物镜与目镜的焦距比为 9.3。光学系统的横向失调公差设计约为 0.02 mm , 加工回来的望远镜结构同轴度约为 0.06 mm , 物镜光轴与基准轴在焦面处的偏差值约为 0.05 mm , 可知望远镜的结构与物镜的横向失调均超出设计要求, 正常装配将大概率发生由横向失调引起的严重彗差, 通过转动镜片的安装角度后, $\Delta_s = s_1 - s_2 \approx 0.06 - 0.05 = 0.01(\text{mm})$, 在光学系统的设计公差内, 此时光学系统的横向失调误差得到校正。通过调整望远镜筒整体结构使得目镜光轴与基准光轴接近一致(准直光束经望远镜后传播方向保持不变), 为了控制变量, 在保持目镜和望远镜筒不动的前提下, 只旋转物镜的角度进行光束质量测试, 物镜旋转角度与光斑圆度变化曲线如图 6 所示, 物镜旋转角度与光束发散角变化曲线如图 7 所示。

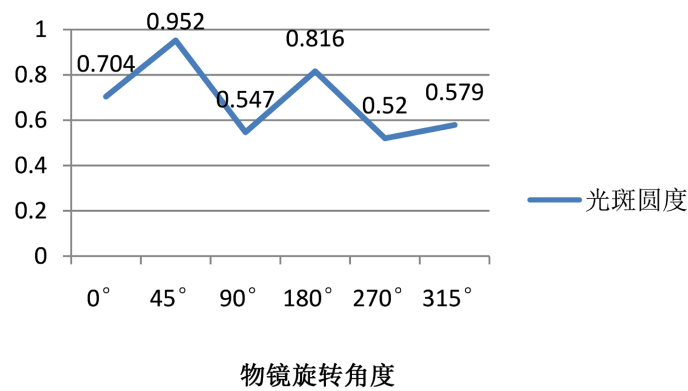


Figure 6. Curve of objective lens rotation angle and spot roundness variation
图 6. 物镜旋转角度与光斑圆度变化曲线

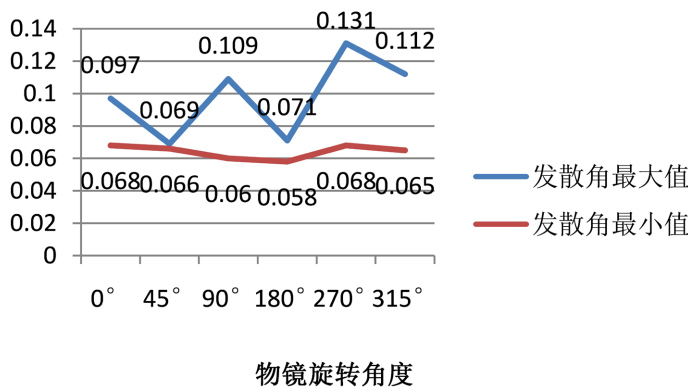


Figure 7. Curve of objective lens rotation angle and beam divergence angle variation
图 7. 物镜旋转角度与光束发散角变化曲线

从上述光束质量分析仪的测试结果可知，物镜角度旋转至 45°时望远镜成像光束质量最好，发散角最大值为 0.069 mrad，光斑圆度 0.952，接近 1，此时慧差的影响最小；物镜角度旋转至 270°时望远镜成像光束质量最差，发散角最大值为 0.131 mrad，光斑圆度 0.52，此时慧差的影响最大。由此可知，在相同的机械加工和光学加工的要求精度情况下，不同角度安装的物镜，其望远镜成像光束质量最好时与最差时的最大发散角与光斑圆度相差接近一倍。

本方案与顶丝调节的优缺点对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages between this scheme and the top thread adjustment
表 1. 本方案与顶丝调节的优缺点对比

维度	顶丝调节	本方案
精度	高(需专业操作)	中等(依赖设计)
动态稳定性	低	高
操作难度	复杂(需工具与经验)	简单(适合新手)
成本	较低	较低
维护需求	高(需定期检查顶丝)	低(一体化设计)

由表 1 可知, 与顶丝调节相比, 本研究成果更适用于动态稳定性要求高、操作难度简单、维护需求低的使用场景。

5. 结论

本文通过理论分析以及设计实验研究了望远镜光学系统的光束成像质量, 分析了横向失调误差对望远镜光学系统的影响, 通过旋转安装光学镜片的方式减小了结构和镜片与基准轴间的偏差值, 且实验验证了该装调方案的可行性。研究表明, 该方案校正后的望远镜光学系统不仅达到了在相同机械加工和光学加工的要求精度情况下降低物镜的光轴相对于基准轴的偏差值的目的, 且调试操作简单, 实现了降本增效。这一成果对推动望远镜光学系统的商业化应用具有重要的工程实用价值和商业推广意义。由于精力有限, 本研究是基于特定系统的个案研究, 其普适性有待进一步通过对不同 F 数、不同结构形式的望远镜进行仿真或实验来验证。

参考文献

- [1] 张东阁, 傅雨田. 计算机辅助装调的代理模型方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 680-685.
- [2] 孙敬伟. 利用像散分析实现的大口径望远镜装调技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 427-435.
- [3] 巩盾, 田铁印, 王红, 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [4] 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统[J]. 光学学报, 2004, 4(1): 115-120.
- [5] 赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 394-400.
- [6] 赵菲菲, 唐剑宇, 黄玮, 等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 206-211.
- [7] 廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- [8] 刘柱. 离轴望远镜失调误差检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.