

文章编号: 1002-1582(2026)02-0135-05

共光路系统视场切换组件精密装配

赵红军¹, 徐红伟¹, 张向明¹, 王松林^{1*}, 刘伟光¹, 杨小强¹, 林琦², 阮越¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

(2. 北方光电股份有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 针对共光路光学系统精密装配技术的要求, 开展视场切换组件的装调工艺技术探索。基于理论分析与实验验证, 设计了兼顾视场切换效率与成像稳定性的齿轮驱动机构与磁铁吸附定位机构, 并根据结构特点, 提出高效精确的装配工艺方案。该工艺保障了视场切换组件在光学成像系统中的稳定性与可靠性, 提升整体性能, 对推动光学成像技术发展应用意义重大。

关 键 词: 光学成像系统; 视场切换组件; 装配工艺; 反射镜; 硅橡胶粘接

中图分类号: TJ05; TH745

文献标识码: A

Precise assembly of the field of view switching component of the common optical path system

ZHAO Hongjun¹, XV Hongwei¹, ZHANG Xiangming¹, WANG Songlin^{1*},
LIU Weiguang¹, YANG Xiaoqiang¹, LIN Qi², RUAN Yue¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

(2. North Optical-electric Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the requirements for precision assembly technology in common-path optical systems, the alignment and assembly process technology are explored for the field-of-view switching module. Based on theoretical analysis and experimental verification, a gear drive mechanism and a magnetic adsorption positioning mechanism were designed to balance switching efficiency with imaging stability. According to the structural characteristics, an efficient and precise assembly process scheme is proposed. This process ensures the stability and reliability of the field-of-view switching module in optical imaging systems, improves overall performance, and is of great significance for promoting the development and application of optical imaging technology.

Keywords: optical imaging system; Field-of-view switching component; assembly technology; mirrors; silicone rubber bonding

0 引 言

随着光学系统在天文观测、医疗成像、工业检测和军用探测等领域的广泛应用, 共光路系统因其结构紧凑、光能利用效率高和易于集成多光谱功能等优势受到广泛关注^[1-6]。近年来, 光学成

像技术向大视场、高分辨率、宽光谱方向发展, 反射式光学系统凭借其无色差、结构紧凑等优势逐步取代传统透射式系统成为主流技术路线。特别是在共光路系统中, 视场切换组件能够通过动态调整大小视场成像, 在机载光电吊舱领域展现出巨大应用潜力。典型的应用包括多目标跟踪望

收稿日期: 2025-06-26; 收到修改稿日期: 2025-11-11

作者简介: 赵红军 (1976—), 男, 高级工程师, 从事光机装调技术研究。2994524774@qq.com

王松林 (1988—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事光学薄膜与先进光学制造技术研究。

* 通讯作者: wangsr5527@163.com

远系统、扫描激光雷达、柔性光学内窥镜等^[7-9]。

视场切换组件的核心价值在于实现“单光路多视场”的高效协同，其性能表现直接决定了共光路系统的实战效能。该组件需同时满足动态响应速度与静态稳定性的双重要求：动态切换时需快速完成视场转换且无卡顿延迟，静态工作时需保持反射镜姿态精准无漂移，这对各部件的装配协同性提出了极致要求。驱动机构的啮合精度、定位机构的吸附一致性、反射镜的粘接稳定性等环节相互关联、相互影响，任何一处装配偏差都可能引发连锁反应，导致光轴偏移、成像模糊或切换失效等问题。

然而，共光路系统中视场切换组件的精密装配工艺成为制约其性能的关键因素^[10]。视场切换组件在装配过程中容易受应力变形、温度波动影响，导致成像质量不佳。共光路系统的核心在于通过可移动光学元件（如反射镜、棱镜或可调透镜）实现不同视场的切换，同时保持主光路的光学特性不变^[11]。视场切换组件的精度直接影响到系统的分辨率、对比度和稳定性，其装配需满足纳米级定位精度和为弧度级角度控制精度要求^[12]。从切换组件的装配工艺角度探讨反射式光学系统视场切换组件的装配质量控制方法，提出了一种高效、精确的装配方法，有效确保了切换组件在光学成像系统中的稳定性和可靠性，提升了光学系统的整体性能。

1 视场切换组件装配工艺分析

视场切换组件的构成与功能如图 1 所示，视场切换组件主要由反射镜框 11、反射镜 12、驱动机构以及连接件等部分组成。

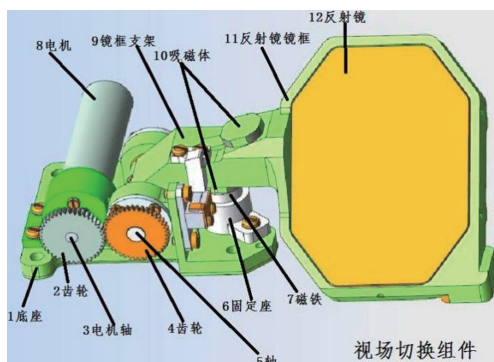


图 1 视场切换组件示意图

1.1 工作原理

视场切换机构主要由反射镜、反射镜镜框、磁铁、底座、电机和两个相互啮合的圆柱齿轮组成，其中，反射镜通过硅橡胶微应力粘接到反射镜镜框中，粘接前后需要关注反射镜的面形变化，

电机通过驱动两个相互啮合的圆柱齿轮实现反射镜摆动，磁铁起到定位和限位的作用，在振动环境下，磁铁通过磁力吸附，消除了反射镜的抖动，同时磁铁的位置限制了反射镜的旋转角度，通过调整磁铁的高度实现大小视场光轴的统一。

电机 8 通电旋转带动齿轮 2 转动，齿轮 2 旋转带动齿轮 4 转动，齿轮 4 旋转带动轴 5 转动，轴 5 旋转带动反射镜框 11 转动实现了反射镜 12 的切换位置，磁铁 7 与吸磁体 10 紧密吸附，保障了反射镜位置稳定可靠，反射镜是光学系统成像的核心部件，负责将光线反射至探测器或成像面上。反射镜框用于固定和支撑反射镜，确保其位置稳定。驱动机构用于实现反射镜的角度来改变成像系统的视场大小。连接件则用于将各部件紧密连接在一体，形成一个整体结构。

创新性地融合了高性能磁铁吸附技术与精密的结构优化设计理念，致力于提升反射镜切换系统的稳定性和可靠性。严格筛选了具有高吸附性能的磁铁材料，并注重吸附面的光洁度与平整度实施了严格的工艺控制，以确保最佳接触效果。同时，针对反射镜可能面临高低温环境变化及振动冲击等挑战，实施了加固措施，增强整体的稳固性与耐久性。通过以上举措成功实现了反射镜在大小视场位置间的稳定且可靠的切换动作，从而显著提升了光学系统整体成像性能。

1.2 装配工艺流程

视场切换组件的装配工艺流程包括驱动机构装配、磁铁安装、反射镜安装、连接件固定以及面形测试等步骤。

驱动机构与反射镜框连接可靠且能够灵活调整反射镜角度。驱动机构采用齿轮传动方式，齿轮转动速率为 5r/s，兼顾视场切换效率与成像稳定性，齿轮啮合润滑直接决定传动效率与使用寿命，本传动机构采用 PFPE 基润滑脂润滑，即可降低啮合面摩擦磨损，避免齿面点蚀、剥落，又可缓解冲击载荷、带走摩擦热量。齿轮 2 与电机轴 3、齿轮 4 与轴 5、镜框支架 9 与轴 5 均采用锥销固连，制销时，切记做好轴 3、轴 5 的固定，防止钻孔出现销孔位置偏移，齿轮啮合面基本平齐，必要时设计小工装进行固定更为妥当。

磁铁 7 安装时，采用环氧树脂胶粘接，吸磁体 10 安装时采用螺纹胶 290 固定，确保磁铁安装可靠。吸磁体 10 因为通过螺纹连接到反射镜框，所以镜框加工时一定要保障螺纹的加工精度和垂直度，如果吸磁体 10 和磁铁 7 不能满面贴合，磁力将大打折扣，反射镜的稳定性就无法保证。

反射镜结构尺寸示意图如图 2 所示，结构尺寸长边 70mm，短边 50mm，厚度 6mm。要求粘接后面形误差 RMS 优于 $1/30\lambda$ 。

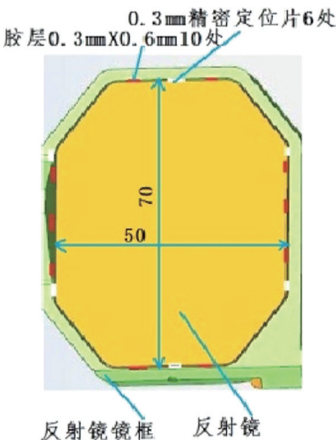


图 2 反射镜安装示意图

测量镜框及反射镜外形尺寸，确保尺寸符合图纸要求，用干涉仪对反射镜面形进行测试并做好记录。

实测反射镜与反射镜框存在 0.3mm 至 0.5mm 单面间隙，特设计厚度 $t=0.3\text{mm}$ 的精密定位片 6 处（图 1 中白色部分）插入间隙之中，以确保反射镜精准定位于反射镜框的中心位置。

反射镜的粘接主要考虑两方面：一是胶层强度足够；一是胶粘剂在固化时体积收缩所导致的收缩应力不会造成反射镜面型的明显变化；同时，环境温度、湿度对粘接应力和粘接强度有很大的影响，温度过低会降低硅橡胶的流动性、延长固化时间，温度过高易导致胶层收缩不均、产生内应力，引发反射镜面形畸变，湿度过高时，粘接面易凝结水汽，降低粘接强度，湿度过低则硅橡胶难以固化完全。通过试验，最终确定环境温度控制在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度（RH）控制在 30~50%，达到最佳的粘接效果。

传统全灌胶方式因粘接应力大而影响反射镜面形。为尽量消除粘接应力所导致的面形变化，装配过程中采取硅橡胶分段式粘接，确保反射镜粘接牢靠且面形精度高。这种粘接方式的优势在于粘接面积位置可控，粘接应力小。

反射镜的重量为 0.15kg，需要承受的最大冲击为 20g，所用胶层的强度约为 1Mpa，考虑到胶层质量难以检测，取安全系数为 6。则所需粘结面积计算如下

$$A=0.15\times 20\times 10\times 6/1=180\text{mm}^2$$

根据零件尺寸与理论公式，采用对称布局设计胶层，短边 2 处、长边 3 处共 10 处施胶。每处胶层尺寸 $3\text{mm}\times 6\text{mm}$ ，总胶层面积 180mm^2 。

胶层固化收缩带来的面型变化难以简单计算，此处采用光机联合仿真方法进行分析。对于本平面反射镜来说，期望装配完成后的反射镜面型 RMS 优于 $1/30\lambda$ 。仿真时假设所用胶的体固化收缩率为 1%，胶层厚度 0.5mm，胶层尺寸 $3\text{mm}\times 6\text{mm}$ ，材料参数见表 1。

表 1 材料参数

材料	弹性模量	泊松比
铝	70Gpa	0.33
K9	79.2Gpa	0.21
硅橡胶	3.45Mpa	0.49

视场切换组件面形变化仿真结果如图 3 所示，PV 值变化量为 0.201253，RMS 变化量为 0.016007， $\lambda=632.8\text{nm}$ 。从仿真结果看，胶接造成的反射镜面型 RMS 变化量 $1/62.5\lambda$ ，远小于最终期望的工作指标 $1/30\lambda$ ，胶接不会造成面型的明显变化，胶接方案可行。

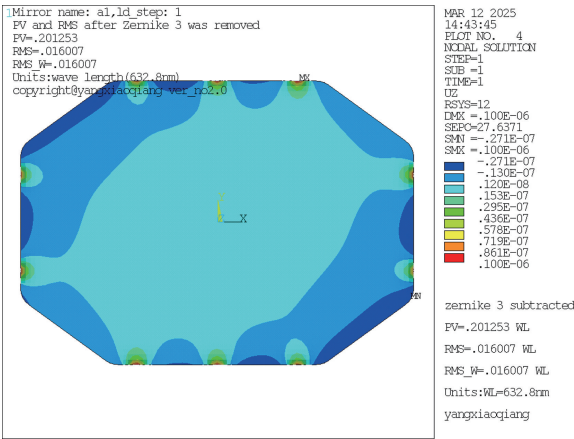


图 3 理想情况下视场切换组件反射镜装配后面形变化情况

2 工艺控制要点

2.1 精度控制

采用高精度设备和测量工具，严格把控反射镜、反射镜框以及驱动机构等部件的加工与装配精度。配过程中通过柔性调整方法，确保各部件的位置和角度精确无误。

2.2 点胶与固化

采用手动点胶工具精准控制胶量，避免气泡产生并采用阶梯固化工艺，常温 24h 静置升温，高温箱 60℃保温 2h，以释放内应力。

2.3 应力控制措施

为避免安装应力影响反射镜变形，选用硅橡胶连接，因其良好的柔韧性和耐腐蚀性被广泛应用于反射镜和反射镜框的连接中。此外，固化过程中利用干涉仪监测应力变化，确保装配精度。

3 工艺实验验证

为验证该装配工艺的有效性和可靠性，进行了装配工艺试验，采用高精度光学测试仪器对装配的视场切换组件进行性能测试与分析。胶层尺寸控制在 $3\text{mm}\times 6$ （红色），厚度在 $0.3\sim 0.5$ 之间，以避免气泡、缺陷、断裂、应力及缺胶等问题。硅橡胶固化 24h 后拔除定位片，放进高温箱 60°C ，保温 2h 以完全固化并释放内应力，确保面形稳定。

装配前面形测试结果如图 4（a），PV 值为 0.1110，RMS 值为 0.0174。装配后实测结果如图 4（b），PV 值为 0.2117，变化量为 0.1007；RMS 值为 0.0281。通常认为装配造成的面型变化与加工带来的面型误差线性无关，则可以认为装配带来变化量为 0.022。

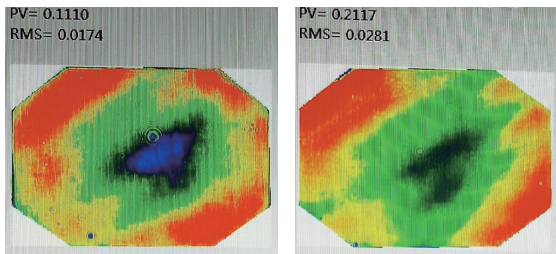


图 4 视场切换组件反射镜装配前后面形变化情况实测结果

测试结果表明，基于此装配工艺粘接的视场切换组件，面型变化量 RMS 为 0.022，而理论仿真 RMS 变化值为 0.016007，误差约 27%。这一误差对于确定装配工艺的可行性来说，满足使用要求。造成的实测值与理论仿真值之间偏差的主要是由有测试误差、实际胶层厚度与理论胶层厚度的偏差、胶层实际参数与理论参数的偏差、装配工装误差等造成的。

通过高低温循环测试面形误差，采用振动冲击试验检测胶层牢固性。结果表明，该装配工艺能够确保反射镜的位置精度和角度精度满足设计要求，且系统在不同温度环境下的稳定性良好。通过试验进一步证实，采用硅橡胶弹性材料进行分段式连接和固定，可显著降低安装应力对反射镜变形的影响，从而提升系统的成像质量。

4 结论与展望

视场切换组件可以实现大小视场的任意切换，在共用一套光路前提下，实现了大小两个视场的广域搜索和小视场的目标识别、跟踪，相比传统设计两套光路系统的方式，显著简化了结构，降低了制造成本。本文通过对光学成像系统视场切

换组件的装配工艺进行深入探究，提出了一种高效、精确的装配方法。通过理论分析，对视场切换组件的反射镜装配后面形变化情况进行了仿真计算，仿真结果显示，理想情况下视场切换组件反射镜装配后面形变化量 RMS 为 0.016007， $\lambda=632.8\text{nm}$ 。基于此装配方法，完成了视场切换组件反射镜的粘接装配，装配后的反射镜面形变化量 RMS 为 0.022， $\lambda=632.8\text{nm}$ 。该工艺确保了切换组件在光学成像系统中的稳定性和可靠性，提升光学系统的整体性能，在光学系统装配中具有显著的精度优势和工程应用价值。未来，随着光学成像技术的不断发展和技术指标的不断提高，视场切换组件的装配工艺将面临更多的挑战和机遇。因此，加强相关领域的研究和开发工作，对于推动光学成像技术的持续进步和创新发展至关重要。



图 5 应用实例

参考文献：

[1] Smith W J. Modern optical engineering[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017:218-243, 356—379.

[2] 常伟军, 李超良, 杨华梅, 等. 一种双视场电视/激光测距接收共光路一体化机设计[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 39—44

Chang Weijun, Li Chaoliang, Yang Huamei, et al. Integrated machine design with common path on TV camera with dual filed of view and laser ranging reception[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 39—44.

[3] 杨晓强, 陶忠, 刘莹奇. 中小型共光路系统支撑结构设计和分析[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 998—1009.

Yang Xiaoqiang, Tao Zhong, Liu Yingqi. Design and analysis of support structure of small and medium-sized common optical path system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 998—1009.

[4] 胡博, 陶忠, 秦川, 等. 用于激光定向红外对抗的光学系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 398—403.

Hu Bo, Tao Zhong, Qin Chuan, et al. Optical system design

- for laser directional Infrared countermeasure[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(3): 398—403.
- [5] 亓晨, 靳阳明, 谢晓喻, 等. 共光路红外双波段小型化光学镜头分析与设计[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(4): 20230722.
Qi Chen, Jin Yangming, Xie Xiaoyu, et al. Miniaturization analysis and design of the common-optical path dual-wave infrared optical lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(4): 20230722.
- [6] 方喜波, 乔红垒, 基于共光路中快反镜的复合轴控制和回扫补偿技术分析[J]. 红外技术, 2023, 45(11): 1230—1235.
Fang Xibo, Qiao Honglei. Analysis of composite axis control and flyback compensation technology based on fast reflector in common optical patch[J]. Infrared Technology, 2023, 45(11): 1230—1235.
- [7] Li Xet al. Machine learning-driven assembly optimization for complex optical systems[J]. Nature Communications, 2022, 13, 1234.
- [8] 王康生, 林峰, 谢忠鑫, 等. 用于多光谱相机的机器视觉系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 233—241.
Wang Kangsheng, Lin Feng, Xie Zhongxin, et al. Machine vision system design for multispectral cameras[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 233—241.
- [9] Chen L, et al. Nanometer-level positioning accuracy in diamond-turned optical components[J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21456—21465.
- [10] 惠刚阳, 张博, 左晓舟, 等. 高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 661—683.
Xi Gangyang, Zhang Bo, Zuo Xiaozhou, et al. Design of multi-spectral optical window assembly for high and low temperature test device[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 661—683.
- [11] Wang Y. Zhang X. MEMS-based active alignment for high-precision optical systems[J]. IEEE Transactions on Components, Packing and Manufacturing Technology, 2021, 11(3): 456—465.
- [12] Guo B, et al. Digital twin for predictive calibration of optical assemblies[J]. Optical Engineering, 2023, 62(3): 2911—2919.
- [13] 宫鹏, 程路超, 董健, 等. 铺层角度误差对CFRP平面反射镜面形影响研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(08): 185—191.
Gong Peng, Cheng Luchao, Dong Jian, et al. Influence of lay-up angle errors on surface figure of CFRP planar mirrors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(08): 185—191.
- [14] 李明, 张伟, 王芳. 机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 2345—2352.
Li Ming, Zhang Wei, Wang Fang, Design of mirror assembly and bonding layers for airborne wide-temperature conditions[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(12): 2345—2352.
- [15] 陈涛, 刘震宇. 单反式光端机反射镜柔性支撑参数优化设计[J]. 红外与激光工程, 2023, 48(S1): 112—118.
Chen Tao, Liu Zhenyu. Parametric design of flexible support for SLR optical terminal mirrors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 48(S1): 112—118.
- [16] 冯军, 李思远, 王飞橙, 等. 基于有限元分析的大口径曲面棱镜胶接优化设计[J]. 光子学报, 2024, 53(11): 1122002.
Feng Jun, Li Siyuan, Wang Feicheng, et al. Optimization design of large aperture curved prism bonding based on finite element analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(11): 1122002.