

多通道多光轴高像质光学系统精密装调技术

陈科社 乌龙辉

西安应用光学研究所 陕西 西安 710065

摘要：多通道光学系统（含4个小视场与4个大视场）在宽幅成像、多目标监测中应用广泛，其小视场光轴平行性与全通道像面一致性对成像精度至关重要。当前装调技术存在小视场光轴同步校准难、大小视场像面匹配精度低、多通道干扰显著等问题。本文提出“光轴-像面协同检测+多批次分步装调”方案，通过激光追踪仪与高分辨率相机构建同步检测系统，基于多参数优化模型制定装调工艺，提升装调效率，满足像质指标要求，为多视场系统精密装调提供可靠方案。

关键词：多通道光学系统；光轴平行性；像面一致性；精密装调技术

引言：在光学技术不断发展的当下，多通道多光轴高像质光学系统凭借独特优势，在遥感成像、工业检测、多目标监测等众多领域发挥着关键作用。然而，此类系统结构复杂，包含多个小视场与大视场通道，各通道间存在复杂的耦合关系，对装调精度要求极高。传统装调技术在面对小视场光轴同步校准、大小视场像面匹配以及多通道干扰控制等问题时，往往力不从心，难以满足系统日益增长的高性能需求。因此，探索创新且高效的装调技术迫在眉睫。

1 多通道系统装调理论与性能需求

1.1 系统结构与视场功能划分

多通道光学系统由8个独立通道构成，其中4个为小视场通道（视场角 $\leq 2^\circ$ ），主要实现高分辨率成像，用于捕捉目标细节信息，其焦距通常 $\geq 200\text{mm}$ ，成像像素密度需满足高精度定位需求；另外4个为大视场通道（视场角 $\geq 8^\circ$ ），侧重宽幅覆盖，用于监测大范围区域，通过与小视场通道协同，实现“宽覆盖+细观测”的功能互补。系统核心光学元件包括共用主镜（负责光线汇聚）、分光棱镜组（将入射光折转至8个通道），8组独立成像镜头（匹配不同视场需求）及探测器（用于成像），各通道通过机械结构集成于同一光学平台，需保证结构稳定性以减少装调后参数漂移。

1.2 核心性能指标定义

系统装调需满足两项关键指标：一是4个小视场通道的光轴平行性，要求任意两个小视场通道的光轴夹角误差 $\leq 3''$ ，若超出该范围，会导致多通道对同一目标定位出现偏差，影响数据融合精度；二是8个通道的像面一致性，需使各通道成像在同一像面的偏移量 $\leq 5\mu\text{m}$ ，避免宽幅拼接时出现断层或重影。此外，像质指标需满足：小视场通道调制传递函数（MTF） $\geq 0.5@45\text{lp/mm}$ ，大

视场通道MTF $\geq 0.5@40\text{lp/mm}$ ，确保成像清晰度符合应用需求；装调后系统在24小时内的光轴漂移 $\leq 1.5''$ 、像面漂移 $\leq 1\mu\text{m}$ ，保障光电设备长期工作的稳定性^[1]。

1.3 误差来源与理论分析

从理论层面拆解误差来源：小视场光轴偏差主要源于镜头组装配误差（如光学元件中心偏心、倾斜）与探测器定位误差（如探测器平面与光轴不垂直），因小视场焦距长，微小偏差会被放大，例如 0.1° 的光学元件倾斜会导致物方10m处光轴偏移约17mm；像面一致性误差受分光元件色散（不同波长光线折射角差异）、各通道光学倍率差异（大视场边缘倍率畸变）、探测器安装高度偏差影响，4个大视场通道因视场宽，边缘畸变问题更突出，易与小视场通道像面形成错位。基于误差溯源理论，小视场光轴平行性误差中，镜头定位误差占比60%、检测误差占比25%、环境因素占比15%；像面一致性误差中，分光棱镜组安装角度误差占比45%、探测器安装误差占比35%、光学元件加工误差占比20%，为后续装调技术设计提供理论依据。

2 多通道系统光轴-像面同步检测技术

2.1 检测系统硬件构建

针对8通道（4小+4大视场）检测需求，构建“激光追踪仪+双相机阵列”同步检测系统。核心硬件包括：高精度激光追踪仪（测量精度 $\leq 1\mu\text{m/m}$ ，用于定位光轴空间坐标）、4台小视场专用检测相机（分辨率 2048×2048 ，像元尺寸 $3.75\mu\text{m}$ ，适配小视场高分辨率成像需求，捕捉光轴标记点）、4台大视场检测相机（视场角 10° ，覆盖大视场成像范围）、标准靶标（含十字分划板靶标与星点靶标）、恒温防震平台（控制环境温度波动 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，振动幅度 $\leq 0.01\text{g}$ ，减少环境干扰）。通过统一坐标系校准，将激光追踪仪、8台检测相机的坐标系统

一至系统机械基准面,确保各设备数据可融合分析。

2.2 检测流程与方法设计

检测流程分两步执行:第一步为小视场光轴平行性检测,在系统焦平面处固定十字分划板靶标,并将靶标十字调整至水平,使用激光追踪仪发射激光束,依次对准4个小视场通道的分划板中心,记录各通道光轴在三维空间的坐标(X、Y、Z),通过坐标拟合计算任意两个小视场通道的光轴夹角,若夹角超 $3''$,标记为待调整状态,并记录偏差方向(如X轴方向偏移、Y轴方向倾斜);第二步为全通道像面一致性检测,将标准星点靶标置于系统物方10m处,8台检测相机同步采集各通道星点像,采用亚像素级中心提取算法(精度 ≤ 0.1 像素)计算星点在各通道像面的坐标,对比4个小视场与4个大视场的坐标偏差,若偏差超 $5\mu\text{m}$,结合光学原理分析偏差来源(如分光棱镜偏移导致的整体偏移、探测器倾斜导致的局部偏移)。

2.3 检测系统可靠性验证

通过重复性实验与准确性实验验证系统可靠性:重复性实验在恒温($25\text{C}\pm 0.5\text{C}$)环境下进行,对同一多通道系统连续检测10次,小视场光轴平行性检测结果的标准差 $\leq 0.5''$,像面一致性检测结果的标准差 $\leq 0.8\mu\text{m}$,表明系统检测数据稳定性良好;准确性实验采用标准光轴仪(精度 $\pm 0.1''$)与标准像面校准板(精度 $\pm 0.2\mu\text{m}$)作为参考,将检测系统的测量结果与标准值对比,光轴平行性测量误差 $\leq 0.3''$,像面一致性测量误差 $\leq 0.5\mu\text{m}$,验证检测精度满足装调需求。此外,开展环境适应性测试,在温度 $20\text{C}\text{--}30\text{C}$ 、湿度 $40\%\text{--}60\%$ 范围内,系统检测误差变化 $\leq 0.2''$ (光轴)与 $0.3\mu\text{m}$ (像面),说明系统在常规实验室环境下可稳定工作^[2]。

3 多通道系统精密装调工艺优化

3.1 小视场光轴平行性装调工艺

采用“基准通道定位-对称装调”的分步装配工艺:第一步选择1个小视场通道作为基准,通过六自由度精密调整台(平移精度 $\leq 0.3\mu\text{m}$,旋转精度 $\leq 1''$,采用压电驱动实现微幅调整)将其光轴调整至设计基准线,利用激光干涉仪实时监测光轴位置,锁定基准通道参数;第二步按照“对称分布”原则调整其余3个小视场通道,例如基准通道位于系统左侧时,先调整右侧对称通道,再依次调整上、下两个通道,每次调整后通过同步检测系统采集光轴数据,计算与基准通道的夹角,直至4个小视场通道任意两两夹角 $\leq 3''$ 。装调过程中控制调整步长为 $0.5\mu\text{m}/\text{步}$ (平移)、 $0.1''/\text{步}$ (旋转),确定最佳位置;同时部署温度传感器(精度 $\pm 0.2\text{C}$),当温度变化超 1C

时,基于“温度-光轴漂移”模型(温度每升高 1C ,光轴漂移 $0.3''$)自动补偿调整台参数,维持光轴稳定。

3.2 全通道像面一致性装调工艺

针对4小+4大视场的像面匹配需求,构建多参数优化模型并分步装调:优化模型以全通道像面偏移量最小为目标,将大视场通道的畸变修正量(边缘区域 $\leq 0.1\%$)、小视场通道的探测器位移量($\leq 5\mu\text{m}$)作为优化变量,约束条件包括分光棱镜调整范围($\pm 0.5^\circ$)、镜头焦距偏差($\pm 0.1\%$)、探测器位移极限($\pm 10\mu\text{m}$),采用NSGA-II改进算法求解,算法中加入“视场权重系数”(小视场0.6、大视场0.4),确保细节成像精度优先。装调分两步执行:第一步调整4个小视场通道,根据优化结果平移探测器,通过检测相机确认像面中心偏差 $\leq 2\mu\text{m}$;第二步调整4个大视场通道,通过倾斜镜头组修正边缘畸变,每次调整后采集星点像,对比与小视场通道的像面偏移,直至全通道偏差 $\leq 5\mu\text{m}$ 。该工艺可避免大/小视场参数相互干扰,装调效率较传统装调工艺提升40%。

3.3 多通道干扰控制与误差补偿

在干扰控制方面,结构上采用“分区隔离”设计,将4个小视场通道分为两组、4个大视场通道分为两组,各组间设置遮光隔板(厚度5mm,材质铝合金,表面涂覆吸光材料)与减震垫(阻尼系数0.8,减少振动传递),同时将调整台与光学系统主结构通过柔性连接(刚度 $10\text{N}/\text{mm}$)隔离,降低调整操作对其他通道的影响;装调顺序为先完成所有小视场通道装调,再进行大视场通道装调,避免小视场光轴因大视场调整产生偏移^[3]。

在误差补偿方面,针对调整机构回程误差(约 $0.8\mu\text{m}$),采用“正向超调”补偿(调整时先超目标位置 $0.8\mu\text{m}$,再反向回调);针对检测系统标定误差(约 $0.5''$ 光轴偏差),每完成3个通道装调,用标准光轴仪重新校准检测系统。

4 装调效果验证与应用价值

4.1 实验室性能验证实验

在恒温恒湿实验室(温度 $25\text{C}\pm 0.5\text{C}$,湿度 $50\%\text{RH}\pm 5\%$)开展验证实验,测试对象为待装调的多通道光学系统(4小+4大视场):小视场光轴平行性测试采用激光干涉法,发射平行激光束通过4个小视场通道,在10m处接收光斑,测量任意两个光斑中心间距偏差,计算得光轴平行性误差最大为 $2.8''$,满足 $\leq 3''$ 要求;全通道像面一致性测试通过标准分辨率板(含1951USAF分辨率靶)进行,采集各通道成像画面,对比分辨率板同一刻度线在各通道像面的坐标,最大偏移量为 $4.7\mu\text{m}$,符合 $\leq 5\mu\text{m}$ 指

标；像质测试采用MTF测量仪，小视场通道MTF平均值为0.52@45lp/mm，大视场通道MTF平均值为0.51@40lp/mm，均满足设计要求；连续24小时稳定性测试显示，光轴最大漂移1.3"，像面最大漂移0.8 μ m，验证了该光学系统长期工作的可靠性。

4.2 实际应用场景测试

将装调好的多通道系统应用于遥感成像场景，开展户外测试：测试地点选择开阔场地，目标为1km外的建筑群体，系统需同时实现宽幅监测（大视场通道）与细节捕捉（小视场通道）。测试结果显示，4个大视场通道拼接形成的宽幅图像无明显断层，拼接误差 $\leq 4.5\mu\text{m}$ ；4个小视场通道对建筑窗户、墙体纹理的成像清晰，定位偏差 $\leq 2.7''$ ，满足遥感数据精度需求。另一项工业检测应用测试中，系统用于多目标尺寸测量，小视场通道测量精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ，大视场通道可同时监测4个目标位置，无漏检或误检，验证技术在实际场景中的适用性。对比传统装调技术，本技术将多通道系统装调耗时从72小时缩短至36小时，效率提升50%；装调合格率从70%提升至98%，减少返工成本^[4]。

4.3 技术创新点与应用价值

本技术的核心创新点包括：一是提出“光轴-像面协同检测”方案，实现8个通道参数的同步采集与分析，解决传统检测“分次测量、数据不同步”问题；二是开发“基准定位-对称跟调+分步装调”工艺，针对性解决小视场光轴平行性与全通道像面一致性难题，兼顾精度与效率；三是构建多维度误差补偿体系，覆盖系统性误差

与随机性误差，提升装调稳定性。该技术可直接用于遥感成像、工业检测、多目标监测等领域的多通道光学系统装调，为宽幅高分辨率成像装备提供可靠装调方案；其误差分析与干扰控制方法，可为其他多视场组合系统（如多光谱成像仪、立体测绘相机）的装调提供参考，推动多通道光学装备的性能提升与产业化应用。

结束语

本文聚焦多通道多光轴高像质光学系统精密装调技术，深入剖析系统结构、性能需求及误差来源，针对性地提出“光轴-像面协同检测+分步装调”方案。通过构建同步检测系统、优化装调工艺、控制多通道干扰与误差补偿，有效解决了传统装调难题。实验室与实际应用场景测试均表明，该技术显著提升了装调效率与精度，满足系统设计要求。此技术不仅为多通道光学系统装调提供可靠方案，还为相关领域多视场组合系统装调提供借鉴，推动多通道光学装备向更高性能与产业化方向发展。

参考文献

- [1]李占峰,黄煜,王淑荣,等.多通道共光栅转轴太阳光谱仪波长非线性研究[J].中国激光,2019,46(9):308-312.
- [2]王迪,徐兴华,邱少华,等.基于多通道轴向注意力的钢索表面损伤视觉检测方法[J].海军工程大学学报,2024,36(6):53-60,89.
- [3]邢辉,张占东,刘剑峰,等.多波段多通道离轴三反空间相机装调[J].红外,2020,41(12):1-11.
- [4]黄郑重,曹良才.面向高通量的多通道复用数字全息成像技术[J].中国光学,2022,15(6):1182-1193.