

浅析光机装调工艺中的量化分析技术

杨 熊 阮 越 史永航
西安应用光学研究所 陕西 西安 710065

摘要：光机装调工艺作为光学系统性能保障的关键环节，量化分析技术正逐步成为其核心驱动力。该技术通过高精度测量与数据分析，实现对光机组件位置、形状、性能参数的精准把控，显著提升装调的精度与效率。量化分析不仅简化复杂调试流程，还确保光学系统达到设计预期，推动光机装调向智能化、精细化方向发展。

关键词：光机装调工艺；量化分析；应用

引言：在光机装调工艺的精密世界中，量化分析技术正逐渐成为连接理论与实践的桥梁。面对日益复杂的光学系统要求，传统依赖经验与直觉的装调方法已难以满足高精度、高效率的需求。量化分析技术通过精确的数据测量与深度分析，为光机装调提供科学依据与精准指导，推动工艺水平的提升与创新。本文旨在浅析量化分析技术在光机装调工艺中的应用价值与影响，探索其未来发展趋势。

1 光机装调工艺概述

1.1 光机装调的定义和作用

光机装调，顾名思义，是光学机械系统组装与调试的简称，它涵盖了从光学元件的精密安装到整个光学系统性能调试的全过程。这一过程不仅要求高精度地组装各类光学镜片、棱镜、反射镜等元件，还需确保它们之间的相对位置、角度以及机械结构的稳定性，以达到设计的光学性能指标。光机装调的作用至关重要，它直接关系到光学系统成像质量、分辨率、光通量等关键参数的实现，是光学仪器、设备（如望远镜、显微镜、相机镜头、激光系统等）制造中不可或缺的一环。

1.2 光学元件的装配过程和机构

光学元件的装配过程通常包括几个步骤：（1）对元件进行严格的清洁处理，以去除表面尘埃、指纹等污染物，保证光学表面的洁净度；（2）根据设计图纸和装配要求，使用精密定位夹具和测量工具，将元件逐一安装到预定位置，此过程需严格控制元件间的平行度、垂直度及间距；（3）利用紧固装置（如螺丝、压圈等）将元件固定在机械结构上，确保其在工作过程中不会因振动或温度变化而发生位移；（4）进行初步的光学性能检测，以评估装配质量^[1]。光学元件的装配机构设计需考虑结构紧凑性、稳定性及可调整性。常见的机构包括镜筒结构（用于支撑和固定透镜）、调整架（用于微调元件位置和方向）、底座（提供整体支撑）等。这些机构通

常采用高强度、低膨胀系数的材料制成，如不锈钢、铝合金或特殊合金，以保证光学系统的长期稳定性和精度。

1.3 光学系统的调试与优化流程

光学系统的调试与优化是在元件装配完成后进行的，旨在通过调整系统参数，使其达到最佳的光学性能。调试流程一般包括几个步骤：第一、进行系统校准，包括焦距、视场角、畸变等参数的初步测量与调整；第二、利用干涉仪、自准直仪等高精度测量设备，对光学元件的面形、表面质量进行精确检测，并据此进行进一步的微调；第三、进行成像质量评估，通过拍摄标准测试图或利用特定测试软件，分析系统的分辨率、对比度、色散等性能指标；第四、根据评估结果，对系统参数进行迭代优化，直至满足设计要求。在调试过程中，还需注意环境温度、湿度等外部因素对光学性能的影响，并采取相应的措施进行控制和补偿，随着光学技术的不断发展，越来越多的自动化、智能化调试设备和技术被应用于光学系统的调试与优化中，极大地提高了调试效率和精度。

2 量化分析技术在光机装调中的应用

2.1 量化分析技术的概念和特点

量化分析技术，作为一种科学的研究与决策支持手段，其核心在于通过数学模型、统计方法和计算机技术对大量数据进行处理与分析，以揭示数据背后的规律、趋势及潜在关联。在光机装调领域，量化分析技术不再仅仅依赖于传统的经验判断和手工测量，而是借助高精度传感器、自动化测量设备以及先进的算法，实现对光学元件、系统性能的精确量化与评估。量化分析技术的特点主要体现在几个方面：（1）它具有高度的客观性和准确性，能够消除人为因素带来的误差，提高测量与评估的可靠性；（2）量化分析能够处理大规模数据，快速识别并提取关键信息，为决策提供有力支持；（3）该技术还具备灵活性和可扩展性，能够随着技术的进步和需

求的变化不断升级和优化；（4）量化分析技术注重数据的可视化呈现，使得分析结果更加直观易懂，便于非专业人士理解和应用。

2.2 在光学元件装配中的量化分析方法

在光学元件的装配过程中，量化分析技术发挥着至关重要的作用，通过高精度的测量设备（如激光干涉仪、轮廓仪等）对元件的尺寸、形状、表面质量等参数进行量化测量，确保元件符合设计要求。这些测量数据不仅为装配过程中的定位与固定提供了精确依据，也为后续的性能评估和优化奠定了基础。利用先进的图像识别与处理技术，对装配过程中的元件位置、姿态进行实时监测与调整。通过摄像头捕捉元件图像，并利用算法进行图像处理与分析，可以实现对元件位置偏差、角度误差的精确测量与纠正，提高装配精度和效率^[2]。量化分析技术还应用于装配质量的评估与反馈，通过建立装配质量评估模型，将测量数据与预设标准进行对比分析，可以及时发现装配过程中的问题，并给出相应的改进建议。这种基于数据的评估方式，使得装配质量的控制更加科学、客观。

2.3 在光学系统调试中的量化分析技术应用案例

在光学系统的调试过程中，量化分析技术的应用案例丰富多彩，以下以某高精度望远镜的调试为例进行说明。该望远镜在调试初期，面临着成像质量不稳定、分辨率不足等问题。为了解决这些问题，调试团队引入了量化分析技术。首先，利用高精度干涉仪对望远镜的主镜、次镜等关键光学元件的面形进行量化测量，发现部分元件存在微小的面形误差。针对这些误差，团队通过调整元件的支撑结构、优化装配工艺等方式进行精确校正，显著提高元件的面形精度。团队利用光谱仪、成像质量分析仪等设备对望远镜的成像性能进行了全面量化评估。通过测量不同波长下的透过率、分辨率等参数，并与理论值进行对比分析，团队发现系统在设计上的一些不足之处。基于这些量化数据，团队对光学系统的光路设计进行了优化调整，包括调整镜片间距、改变镀膜工艺等，最终实现了成像质量的显著提升。在调试过程中，团队还充分利用了数据分析与可视化技术。他们建立系统的性能数据库，将每次测量的数据都录入其中，并利用数据分析软件对数据进行深入挖掘与分析。通过可视化呈现分析结果，团队能够直观地看到系统性能的变化趋势及潜在问题所在，为后续的调试工作提供了有力支持。该团队还注重将量化分析技术应用于调试流程的优化中，他们通过总结以往的调试经验，结合量化分析的结果，制定了一套科学、高效的调试流程。

3 光学性能参数的量化分析

3.1 光学系统性能评价的重要参数

在光学系统的性能评价中，一系列关键参数扮演着至关重要的角色。这些参数不仅直接反映了光学系统的成像质量、传输效率等核心特性，也是衡量系统是否达到设计要求的重要标准。常见的光学系统性能评价参数包括：（1）分辨率：衡量光学系统区分两个相近物体或细节的能力，通常以线对/毫米（lp/mm）或角分辨率（如弧秒）表示。（2）透过率：描述光学元件或系统对光能量的传输效率，即输出光强与输入光强的比值，通常以百分比表示。（3）畸变：反映成像过程中物体形状与图像形状之间的差异，特别是直线在图像中是否保持直线。（4）像差：包括球差、彗差、像散、场曲和畸变等多种类型，它们共同影响图像的清晰度和对比度。（5）光谱特性：如色散、色差等，描述光学系统在不同波长下的表现差异，对彩色成像系统尤为重要。（6）信噪比：衡量图像中信号与噪声的比例，是评价图像质量的重要指标。（7）视场角：表示光学系统能够清晰成像的最大区域范围，对于广角镜头尤为重要^[3]。

3.2 采用量化分析技术进行光学性能参数测量

为了准确获取上述光学性能参数，量化分析技术成为了不可或缺的工具。常采用分辨率测试图（如USAF 1951分辨率测试图）配合图像分析软件，通过识别图像中的最小可分辨元素来确定分辨率。利用光谱仪或积分球等设备，测量不同波长下光学元件或系统的透过率，并绘制透过率曲线。采用干涉仪、波前传感器等高精度设备，直接测量光学系统的波前像差，或通过拍摄标准测试图（如棋盘格图案）并计算图像变形来评估畸变。通过光谱仪测量不同波长下的光强分布，分析系统的色散和色散特性。利用图像处理软件对图像信号进行统计分析，计算信号与噪声的能量比或功率比。通过拍摄不同角度下的目标图像，并测量图像中目标尺寸的变化来确定视场角。

3.3 量化分析结果的数据处理和解读

量化分析后得到的大量数据需要经过精心的处理与解读，才能转化为对光学系统性能的深入理解。（1）数据清洗：去除因测量误差、设备噪声等引起的异常值，确保数据的准确性和可靠性。（2）数据分析：运用统计学方法（如平均值、标准差、方差分析等）和信号处理技术（如滤波、傅里叶变换等），对数据进行深入分析，提取有用信息。（3）结果可视化：将分析结果以图表、曲线等形式直观展示，便于理解和比较不同参数之间的关系和变化趋势。（4）性能评估：将测量结果与预

设标准或设计要求进行对比,评估光学系统的性能是否达标,并识别潜在的问题区域。(5) 优化建议:基于分析结果,提出针对性的优化建议,如调整光学设计、改进制造工艺、优化装配调试流程等,以进一步提升光学系统的性能。以某高分辨率相机镜头的量化分析为例,经过上述步骤后,我们可能得到如下数据:分辨率达到300 lp/mm,透过率在可见光波段平均达到95%,畸变小于0.1%,像差得到有效控制。这些数据表明该镜头在成像质量方面表现出色,符合高分辨率成像的应用需求,通过进一步分析发现,镜头在边缘视场处的分辨率有所下降,提示可能需要优化边缘光路设计或改进装配工艺以提升整体性能。

4 光机装调中的标准化

4.1 标准化流程在光机装调中的应用

在光机装调领域,标准化流程的应用是确保装配质量和调试效率的关键。标准化流程通过制定一系列明确、可重复的操作步骤和规范,将复杂的装调过程分解为若干个简单、可控的环节,从而有效减少人为误差,提高工作的一致性和可靠性。这些流程通常涵盖了从元件清洁、预处理、定位装配到系统调试的每一个环节,并明确了所需的工具、设备、材料以及检验标准。通过遵循标准化流程,光机装调团队能够更加高效地组织工作,确保每一步都符合设计要求,最终实现光学系统的高性能输出。

4.2 基于量化分析技术的精确调试实践案例

在某高精度光学测量仪器的调试过程中,由于系统对成像质量和稳定性有着极高的要求,调试团队采用先进的量化分析技术来辅助调试工作,团队利用高精度干涉仪对光学系统的关键元件(如反射镜、透镜等)的面形进行了精确测量,并通过数据分析软件对测量结果进行详细分析,找出影响成像质量的潜在因素。团队利

用光谱仪对系统的光谱特性进行量化分析,确定系统在不同波长下的透过率和色散特性。基于这些量化分析结果,团队制定针对性的调试方案,并通过微调元件位置、优化镀膜工艺等手段对系统进行了精确调试^[4]。在调试过程中,团队还不断利用成像质量分析仪等设备对系统性能进行实时监测和评估,确保每一步调试都朝着提升系统性能的方向前进。经过多轮精确调试和优化,该光学测量仪器成功达到设计要求,并在实际应用中表现出优异的性能。这个案例充分展示量化分析技术在光机装调中的精确性和有效性,为类似项目的调试工作提供有益的借鉴和参考。

结束语

量化分析技术在光机装调工艺中的应用,不仅是技术进步的体现,更是对高精度光学系统追求的必然结果。随着技术的不断成熟与应用领域的拓展,量化分析将在提升装调效率、保障系统性能方面发挥更加重要的作用。未来,光机装调工艺与量化分析技术的深度融合,将开启光学系统发展的新篇章。

参考文献

- [1]王鹏.浅析光机装调工艺中的量化分析技术[J].军民两用技术与产品,2018(4):130. DOI:10.3969/j.issn.1009-8119.2018.04.118.
- [2]储从州,李永新,潘从元,等.激光诱导击穿光谱透镜组安装误差分析[J].机电一体化.2020,(8).DOI:10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2020.08.003.
- [3]周计辉.亚龙Y L-235A光机电一体化设备安装调试及故障检测探讨[J].无线互联科技.2019,(2).DOI:10.3969/j.issn.1672-6944.2019.02.107.
- [4]张权,李新,翟文超,等.可见-短波红外波段光谱模块光机装调及分析[J].应用光学,2019,40(2):193-201. DOI:10.5768/JAO201940.0201003.