

# 光学计量仪器精度评估与不确定度分析方法

胡志伟 许奇炜

焦作市产品质量检验检测中心 河南 焦作 454000

**摘要:** 光学计量仪器在科学研究和工业生产中扮演着至关重要的角色,其精度直接影响到测量结果的准确性和可靠性。因此,对光学计量仪器的精度进行准确评估,并分析其不确定度来源,是确保测量结果质量的关键。本文简要介绍了光学计量仪器的分类与原理,分析了光学计量仪器精度评估与不确定度分析方法,旨在为相关研究人员提供参考和借鉴。

**关键词:** 光学计量仪器;精度评估;不确定度;分析方法

## 引言

随着科技的进步和社会的发展,光学计量仪器在科学研究和工业生产中的应用越来越广泛。光学计量仪器以其高精度、高分辨率和非接触测量等优点,成为许多领域不可或缺的测量工具。然而,光学计量仪器的精度和可靠性直接影响到测量结果的准确性和可信度,因此对其进行精度评估和不确定度分析显得尤为重要。

## 1 光学计量仪器概述

### 1.1 光学计量仪器的分类

光学计量仪器是基于不同的光学原理进行分类的,这些原理主要包括望远光学原理、显微光学原理、投影光学原理和干涉光学原理。基于这些原理,光学计量仪器可以细分为四大类:自准直类光学计量仪器、显微镜类光学计量仪器、投影类光学计量仪器以及光干涉类光学计量仪器。(1)望远系统的主要性能是视角放大率,这使得它非常适合用来扩大眼睛对远处物体的视角,便于观察。在测量过程中,望远系统常被用来产生平行光,以进行各种用途的测量<sup>[1]</sup>。应用望远光学原理的光学计量仪器包括自准直光管、测角仪和立式或卧式光学计等,这些仪器在需要精确测量角度和距离的场景中发挥着重要作用,例如在建筑施工中确定方位和角度,确保建筑物的精准定位。(2)显微系统的主要特点是具有较高的放大率和分辨本领,这使得它能够清楚地观察和分辨微小物体以及物体的细小部位。与放大镜相比,显微镜在放大率和分辨能力上更为优越。应用显微光学原理的光学计量仪器有工具显微镜、光学分度头、测长仪、测长机以及双管显微镜等。这些仪器在生物学、医学等领域大放异彩,使得科学家们能够深入观察和研究微小生物和细胞的结构和功能。(3)投影系统的主要性能是具有较高的、准确的横向放大率。被测量的形状复杂、细小的物体或物体表面的缺陷等,经过强投射光或强反

射光的照射,再经过投影物镜放大成像在影屏上,然后进行测量。(4)光干涉系统的主要特点是具有很高的检测精度,它利用光波波长作为“尺子”,实现了对表面粗糙度、长度微小变化等几何量的高精度测量。应用干涉光学原理的光学计量仪器包括平面平晶等厚干涉仪、接触式干涉仪以及干涉显微镜等,这些仪器在高精度机床、仪器设备的校准和检测中发挥着重要作用,确保了设备的准确性和稳定性。

### 1.2 光学仪器的工作原理

光学仪器的工作原理主要基于光学原理,利用光的传播、反射、折射和干涉等特性进行测量。这些仪器通过精确的光学路径设计和信号处理,能够实现对物体长度、角度、平面度、轮廓等多种物理量的高精度测量。具体来说,光学仪器通常由光源、照射系统、检测系统等多个部分组成。光源产生光束,这些光束经过照射系统被聚焦到被测量物体上;照射系统的作用是将光准确地引导到待测物体上,确保测量的准确性和稳定性;当光束与物体相互作用时,会发生反射、折射等现象,这些光信号随后被检测系统捕捉。而检测系统通常由光学透镜、探测器等组件构成,用于测量反射回来的光的强度和相位。通过精确测量这些光信号的参数,可以计算出被测量物体的各种物理量。例如,在干涉类光学计量仪器中,两束或多束相干光波相遇时,由于它们的相位差异会产生干涉条纹。这些干涉条纹的间距、形状等参数与被测量物体的尺寸、形状等密切相关,因此可以通过对干涉条纹的观测和分析来得出被测量物体的精确尺寸。此外,随着科技的不断发展,光学计量仪器也在不断创新和改进。现代光学计量仪器通常采用先进的数字信号处理技术,对检测到的光信号进行精确的分析和处理。这些技术包括光电转换、信号放大、滤波、模数转换等步骤,能够确保测量结果的准确性和稳

定性。同时,一些先进的光学计量仪器还采用了自动化和智能化的技术,能够自动完成测量过程、数据处理和结果输出,大大提高了测量效率和准确性。例如,激光干涉仪就是一种典型的光学计量仪器,它利用激光光束的干涉现象来测量长度和形状。在测量过程中,激光干涉仪会发射一束激光,并将其分成两束相干光波。这两束光波在经过不同的路径后相遇,产生干涉条纹,通过精确测量这些干涉条纹的参数,可以计算出被测量物体的长度和形状等物理量。

## 2 精度评估方法

### 2.1 精度评估的基本概念

精度评估的基本概念在于衡量测量值或计算结果的可靠性、稳定性和准确性。在科学、工程、技术等领域,精确的测量和计算结果是保证产品质量、提升技术性能、优化设计方案的重要基础,精度作为评价这些结果的关键指标,其定义和评估方法至关重要。精度通常被理解为测量值与真实值(或标准值)之间的接近程度,这里的真实值是指被测物理量的实际大小,但由于各种因素的影响,如测量设备的精度限制、环境条件的变化、操作人员的技能水平等,我们往往无法直接获得真实值<sup>[2]</sup>。因此,在实际应用中,我们通常会采用一个公认的标准值或多次测量的平均值作为参考,来评估测量值的精度。另外,精度评估不仅关注单次测量的误差大小,还关注多次测量结果的稳定性和一致性。这涉及到精密度的概念,它表示在一定条件下进行多次测量时,所得测量结果彼此之间符合的程度,精密度反映了测量结果中随机误差的影响程度,是评估测量仪器稳定性和操作过程一致性的重要指标。

### 2.2 精度评估的指标与标准

#### 2.2.1 准确度

准确度是衡量测量结果与真实值之间一致程度的指标,一个准确的测量结果意味着它的偏差很小,即测量值与实际值之间差异小。准确度受系统误差的影响,这些误差可能源于设备的校准、环境因素或测量方法。系统误差通常具有可重复性和可预测性,因此,通过改进测量方法和校正设备,可以显著提高测量的准确度。例如,在称重传感器的精度评估中,准确度是指测得值与真值之间的符合程度,它要求传感器在测量过程中能够准确地反映被测物体的实际重量。

#### 2.2.2 精密度

精密度描述的是重复测量结果的一致性 or 分散程度,即使所有测量值都偏离了真值,只要它们彼此间差异很小,就认为这些测量具有高精密度。精密度通常用

偏差、标准偏差(SD)或相对标准偏差(RSD)来表示。偏差、标准偏差或相对标准偏差越小,说明测定结果越集中,精密度越好,精密度是衡量测量仪器稳定性和操作人员技能水平的重要指标。在光学计量仪器中,如激光干涉仪,精密度反映了仪器在多次测量中能够保持测量结果一致性的能力。

### 2.2.3 稳定性

稳定性是测量系统在一段时间内保持其性能不变的能力,设备可能会随时间而老化或漂移,从而影响测量结果。因此,稳定性是衡量测量系统长期可靠性的重要指标。在精度评估中,稳定性通常通过长期监测测量结果的变化来评估。例如,在称重传感器的应用中,稳定性要求传感器在长时间的使用过程中能够保持其测量结果的准确性和一致性。这要求传感器具有高精度材料、先进传感技术以及数字信号处理及补偿功能,以应对环境因素的变化和设备的老化。

## 2.3 精度评估的常用方法

### 2.3.1 对比分析法

对比分析法是一种通过比较不同来源或不同时间点的数据来评估精度的方法,它基于数据的相对性,通过对比找出数据之间的差异点和变化趋势,从而判断测量结果的准确性。这种方法在精度评估中广泛应用,因为它可以直观地展示数据之间的差异,并帮助我们找出影响精度的关键因素。在对比分析法中,通常会选择一个或多个已知准确度的参考数据作为基准,然后将待评估的测量结果与这些基准数据进行比较。通过计算误差、偏差等统计指标,可以量化地评估测量结果的精度。此外,对比分析法还可以用于不同测量方法或模型之间的比较,以找出最优的测量方案。

### 2.3.2 实验验证法

实验验证法是通过设计实验来验证测量结果的精度,这种方法通常需要一个已知准确度的标准样品或标准装置,以及一个或多个待验证的测量系统。在实验过程中,将标准样品置于测量系统中进行测量,并将测量结果与标准值进行比较。通过计算误差、不确定度等参数,可以评估测量系统的精度。实验验证法的优点在于它能够直接验证测量结果的准确性,并且可以提供关于测量系统误差来源和性质的信息<sup>[3]</sup>。然而,这种方法也可能受到实验条件、操作人员技能水平等因素的影响,因此需要严格控制实验条件,确保实验结果的可靠性和有效性。

### 2.3.3 数值模拟法

数值模拟法是一种基于数学模型和计算机仿真技术

的精度评估方法，它通过建立数学模型来描述测量过程或物理现象，并使用计算机仿真技术来模拟测量过程或物理现象的发生和发展。通过比较数值模拟结果与实验结果或理论值之间的差异，可以评估测量结果的精度。数值模拟法的优点在于它能够模拟复杂的测量过程和物理现象，并且可以提供关于测量误差来源和性质的详细信息。并且，数值模拟法还可以用于优化测量方法和模型参数，以提高测量结果的精度。然而，数值模拟法的准确性取决于数学模型的准确性和计算机仿真技术的可靠性，因此需要建立准确的数学模型，并选择合适的仿真技术和参数设置。

### 3 不确定度分析方法

#### 3.1 不确定度的评估方法

##### 3.1.1 A类不确定度（统计性不确定度）

A类不确定度是通过统计分析方法得到的测量不确定度，它反映了测量结果的离散程度。在评估A类不确定度时，我们通常会收集大量的测量数据，并计算这些数据的标准差或方差等统计量。这些统计量能够反映测量结果的分散性和稳定性，从而帮助我们评估测量结果的可靠性。A类不确定度的评估方法包括标准差法、t分布法等。标准差法是最常用的方法之一，它通过计算测量结果的标准差来估计测量不确定度，标准差反映了测量结果的离散程度，其值越大，表明测量结果的离散程度越大，测量不确定度也就越大。而t分布法则适用于测量次数较少的情况，它利用t分布来估计测量不确定度，考虑了测量次数对测量不确定度的影响。

##### 3.1.2 B类不确定度（系统性不确定度）

B类不确定度是根据经验或其他信息（如仪器说明书、校准证书等）获得的测量不确定度，它反映了测量系统中存在的系统性误差。与A类不确定度不同，B类不确定度的评估通常不依赖于大量的测量数据，而是依赖于对测量系统、测量方法和测量环境的深入了解和分析。B类不确定度的评估方法包括仪器不确定度法、已知扩展不确定度和包含因子法、已知扩展不确定度和置信水平的正态分布法等。仪器不确定度法是通过仪器的计量特性参数（如分辨率、灵敏度、示值误差等）来估计测量不确定度，而已知扩展不确定度和包含因子法则是根据已有的测量不确定度信息（如校准证书中提供的不确定度）和包含因子来计算测量结果的扩展不确定度<sup>[4]</sup>。

已知扩展不确定度和置信水平的正态分布法则是在已知扩展不确定度的基础上，考虑置信水平的影响，对不确定度进行扩展，得到测量结果的取值区间。

#### 3.2 不确定度的合成与表示

不确定度的合成与表示构成了测量科学中一个至关重要的环节，它涉及到将多个独立的不确定度分量（可能源于测量设备、环境条件、人为因素等）依据不确定度的加法定律进行综合处理，这一过程体现了不确定度的传递性和累积性。在合成不确定度时，我们通常根据测量模型或计算公式确定各个输入量的不确定度分量，然后利用这些分量平方和的平方根来计算合成标准不确定度。此外，为了提供更全面的测量结果信息，我们还在标准不确定度的基础上，通过乘以一个包含因子（该因子取决于所需的置信水平）来得到扩展不确定度，它给出了测量结果的更大置信区间。不确定度的表示通常包括测量值及其对应的标准不确定度或扩展不确定度，这样的表示方式不仅有助于我们评估测量结果的可靠性和准确性，还能为科学实验、工程设计、质量控制等领域提供重要的参考依据，从而指导我们优化测量方法和提高测量精度。在实际应用中，正确合成与表示不确定度是确保测量结果准确性和可靠性的关键步骤。

#### 结语

综上所述，精度评估是确保测量结果准确性的关键步骤，而不确定度分析则是量化测量结果可靠性的重要手段。我们介绍的对比分析法、实验验证法和数值模拟法等精度评估方法，以及A类不确定度和B类不确定度的评估方法，为光学计量仪器的精度评估和不确定度分析提供了有效的工具。未来，随着科技的不断发展，光学计量仪器的精度和可靠性将进一步提高，对精度评估和不确定度分析的要求也将更加严格。

#### 参考文献

- [1]李明.压力表计量检定中的常见问题及解决实践[J].大众标准化,2022(11):186-188.
- [2]栗虎.压力表计量检定及不确定度评定探析[J].仪器仪表标准化与计量,2021(04):44-45.
- [3]吕怡璇.探究压力表计量检定中的常见问题[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(04):64-66.
- [4]林斯娴.压力表计量检定中的常见问题分析及对策[J].现代制造技术与装备,2020,56(12):173-174.