

计量力学在精密测量领域的应用与发展

黄 凯

玉林市检验检测研究院 广西 玉林 537000

摘 要：随着科技发展，精密测量在高端制造、航空航天等领域的作用愈发关键，而计量力学作为其理论基础，支撑着测量精度的突破。本阐释计量力学的基础理论，包括基本概念、相关定律及作用。分析其在长度、质量、力值、压力及其他物理量精密测量中的具体应用，涉及激光干涉、原子力显微镜、等臂天平、静重式测力机等技术的力学原理与实践方式。探讨该领域的发展趋势，如高精度、智能化、微型化等方向。研究表明，计量力学为精密测量提供了理论支撑与技术保障，其创新发展将推动多行业测量精度与效率的提升。

关键词：计量力学；精密测量领域；具体应用；发展趋势

引言：当前各行业对测量的要求从微米级向纳米级、从单一参量向多参量综合测量升级，传统方法面临挑战。本文旨在系统梳理计量力学的基础理论，剖析其在各类物理量精密测量中的应用机制，结合实际技术细节，为相关领域研究提供参考，同时探索未来发展趋势，助力解决测量领域的技术难题。

1 计量力学基础理论

1.1 计量力学基本概念

计量力学是研究测量过程中力学量与物理量之间定量关系的交叉学科，核心在于通过力学原理实现物理量的精确量化。其研究对象涵盖长度、质量、力值、压力等基本物理量，以及这些量在测量系统中传递、转换和校准的规律。与纯理论力学不同，计量力学更注重测量环境、仪器特性与物理量真值之间的关联性，强调测量结果的溯源性和不确定度评估，是精密测量领域的理论基础和技术支撑。

1.2 计量力学相关定律与原理

计量力学的理论体系建立在经典力学与现代计量学的融合之上。牛顿运动定律为力值测量提供了基础框架，例如静重式测力机通过重力与被测力的平衡实现力值溯源，其原理直接源于牛顿第三定律。胡克定律则支撑着弹性元件在压力、位移测量中的应用，如活塞式压力计利用液体压力传递规律，将力与面积的关系转化为可测量的压力值。计量力学还引入了量子力学中的基本常数作为基准，例如以普朗克常数定义质量单位“千克”，通过约瑟夫森效应实现电压的量子化校准，使传统力学量测量突破了实物基准的局限，进入量子化精密测量时代。

1.3 计量力学在精密测量中的作用

计量力学在精密测量中通过以下“建模-校准-溯源”

三级机制保障测量精度。（1）基于力学原理构建测量系统数学模型，例如激光干涉测长中，将光的波长与机械位移关联，通过多普勒效应公式推导位移与频率的关系。（2）通过校准消除系统误差，如原子力显微镜利用探针与样品间的范德华力模型，校准针尖形变对微观形貌测量的影响。（3）依托量值溯源体系，将测量结果与国际基准关联，例如通过力值传递系统，使工业现场的力传感器测量结果可溯源至国家基准，确保不同测量系统间的一致性^[1]。

2 计量力学在精密测量领域的具体应用

2.1 在长度精密测量中的应用

长度精密测量依赖计量力学中几何量与力学量的关联特性，实现微观到宏观尺度的精准量化，主要应用如下：（1）激光干涉测量技术通过计量力学原理建立光程差与位移的定量关系，利用激光波长稳定性将机械位移转化为干涉条纹变化。其核心是通过力学约束保证光路稳定，采用刚性导轨时，依据材料杨氏模量和泊松比优化截面形状以抵消振动影响；按弹性力学原理设计反射镜支撑结构，通过分布式载荷计算确定支撑点，避免镜面应力形变。动态测量中引入阻尼系数计算，调整导轨与基座连接刚度，将振动频率控制在系统截止频率外。

（2）原子力显微镜测量中，计量力学为探针与样品作用提供量化依据。探针悬臂梁遵循胡克定律，形变与作用力成正比，通过监测弯曲量反推样品表面起伏。悬臂梁材料需综合考虑弹性模量、密度和热膨胀系数，确保不同温度下形变与力值的线性关系。测量中建立针尖三维力学模型，将几何参数纳入补偿算法；利用阻尼原理设计阻尼层，调整材料厚度和弹性系数抑制扫描共振，保障纳米级测量准确性。（3）光栅测量技术基于计量力学周期性位移传递原理，光栅尺栅距精度通过机械加工

力学控制实现。光刻或刻划时,精确控制刀具或光束作用力大小和方向,根据材料屈服强度和硬度调整进给速度,保证栅线边缘垂直度与一致性。测量中利用光衍射效应将栅距变化转为电信号,导轨直线度误差通过力学矫正装置补偿;采用气浮导轨时,计算气膜承载能力和刚度,调整气压与流量维持稳定间隙,减少摩擦干扰。

2.2 在质量精密测量中的应用

质量精密测量以计量力学重力平衡原理为核心,实现量值精准传递,具体应用如下:(1)等臂天平通过杠杆平衡条件比对被测物体与标准砝码质量,横梁刚性设计需满足材料力学强度要求,采用高强度合金并经有限元分析优化,避免载荷形变影响平衡精度。刀口支撑结构力学特性决定天平灵敏度,需经硬度强化提高耐磨性,精确控制角度和曲率半径以减少摩擦力矩。(2)电磁力平衡天平利用电磁力与重力平衡实现质量测量,核心是依据安培力定律,通过控制线圈电流产生与重力相等的电磁力。线圈受力稳定性需通过力学结构保证,采用悬丝结构时,根据材料抗拉强度和弹性模量确定直径与长度,减少摩擦力矩干扰;悬丝采用无应力夹持,避免安装张力导致弹性形变影响力值传递。(3)质量比较仪通过计量力学差示测量原理放大微小质量差异,机械结构中弹性元件需满足胡克定律线性特性,常用金属膜片或螺旋弹簧,经热处理保证弹性模量稳定,确保力值变化与质量差异线性对应。弹性元件预紧力需精确控制,消除非线性形变段影响。同时利用减震设计隔离环境振动,基座采用多层阻尼结构,通过不同密度材料组合降低振动传递率;内部设主动减震装置,根据传感器信号实时调整支撑力,实现微克级乃至纳克级分辨力。

2.3 在力值精密测量中的应用

力值精密测量依靠计量力学力的等效传递与平衡原理,建立溯源链条。主要应用如下:(1)静重式测力机直接利用重力与被测力平衡,通过叠加标准砝码产生已知力值,承重结构需满足材料力学抗压强度要求,立柱和横梁截面经有限元分析确定,确保最大载荷下形变在允许范围。砝码加载与卸载通过力学缓冲装置实现平稳过渡,装置采用弹性与阻尼元件组合,调整弹簧刚度和阻尼系数控制加载速度,避免冲击载荷影响。同时依据帕斯卡定律设计液压传力系统,精确计算活塞有效面积和液体体积弹性模量,实现力值放大与传递,密封结构需保证无泄漏以维持传递准确性。(2)拉压力传感器校准中,计量力学为输出信号与受力关系提供标定依据。通过标准力源施加已知力值,建立输出电压与力值线性关系,加载装置力学刚性需足够高,机架采用整体铸造

结构,材料选择考虑弹性模量和泊松比,避免结构形变导致力值损失。加载轴线与传感器轴线同轴度通过精密导向机构保证,利用导轨直线度和垂直度控制,使力的作用方向与传感器轴线一致,减少侧向力对校准精度的影响。动态校准时,需计算加载系统惯性力,调整加载速度和加速度,将动态误差控制在规定不确定度内。

(3)扭矩测量中广泛应用计量力学力矩平衡原理,扭矩传感器通过弹性轴扭转变形测量扭矩,依据材料力学扭转定律,弹性轴扭转角与所受扭矩成正比。弹性轴材料需具有高剪切模量和良好韧性,直径和长度经扭转强度计算确定,确保测量范围内线性形变。测量时通过力学固定装置保证两端约束稳定,一端刚性固定,另一端采用万向节连接消除附加弯矩。同时采用温度补偿结构,在弹性轴粘贴温度传感器,将剪切模量变化转为电信号,通过补偿电路修正测量值,抵消材料弹性模量随温度的变化影响,信号传输采用非接触式结构避免导线拉扯产生附加扭矩^[2]。

2.4 在压力精密测量中的应用

压力精密测量基于计量力学力与面积比值关系,实现量值精准溯源。具体应用如下:(1)活塞式压力计利用液体静压力传递原理,通过砝码重力与活塞有效面积比值计算压力值,核心是保证活塞与缸体间隙均匀性,间隙大小根据液体黏度和压力范围确定以形成稳定润滑膜。依据流体力学与力学耦合模型,计算不同压力下泄漏量,通过修正公式控制泄漏对测量的影响。活塞垂直度需通过力学矫正装置调整,采用三点支撑结构,通过微调螺丝改变支撑点高度,使轴线与水平面垂直度控制在规定范围,避免侧向力导致偏差。(2)压力传感器校准中,计量力学为压力与力的转换提供理论支撑。通过液压或气压系统施加已知压力于传感器,其弹性敏感元件依据力学形变规律产生输出信号,敏感元件结构需经有限元分析优化,确保压力作用下均匀形变,避免应力集中导致非线性误差。校准中通过力学加载装置保证压力均匀性,采用刚性承压面时,平面度需控制在微米级以减少应力集中。(3)差压测量装置利用计量力学力平衡原理,通过测量两压力差产生的力值实现差压测量,核心部件膜片或波纹管形变需满足线性力学特性,膜片厚度和波纹形状经力学计算确定,确保差压范围内线性输出。波纹管有效面积需经实验标定,考虑压力变化影响引入修正系数。同时通过力学阻尼结构抑制流体脉动干扰,阻尼元件参数根据流体流速和脉动频率设计,调整阻尼孔直径和长度使脉动信号衰减率达标,保证微小差压信号稳定采集。

2.5 在其他物理量精密测量中的应用

在以下其他物理量精密测量中的应用如下：（1）温度精密测量中，计量力学保障温度传感器结构稳定性。热电偶测量精度依赖电极材料力学稳定性，电极丝直径和张紧力需精确控制，张紧力大小根据材料弹性模量和热膨胀系数确定，避免温度变化产生过度应力或松弛。热胀冷缩需通过力学补偿结构抵消，采用双金属片补偿装置时，根据两种金属热膨胀系数差异计算弯曲量，调整长度和厚度使补偿量与热电偶误差匹配，修正机械形变误差。（2）电学量精密测量中，计量力学影响仪器结构稳定性。标准电阻阻值精度受引线力学张力影响，需通过弹性支撑结构控制张力恒定，支撑结构采用弹簧或弹性片，刚度经计算确定，确保温度变化和振动环境下张力波动在允许范围，避免振动导致接触电阻变化。电阻元件安装采用无应力固定，通过云母垫片或陶瓷支架实现热隔离和机械支撑，减少机械应力对阻值的影响。电容式位移传感器利用极板间距变化测量位移，极板平行度需通过力学微调装置保证，采用螺旋测微器调整相对位置，依据静电场与力学平衡关系，将平面度误差和倾斜度纳入电容值计算模型，补偿极板形变影响。（3）声学量测量中，计量力学为声波传播与力学振动关联提供量化方法。声压测量通过压电传感器将声压转为力信号，敏感元件需满足力学共振特性要求，固有频率需远离测量频段，通过调整厚度和边界条件改变共振频率位置^[3]。

3 计量力学在精密测量领域的发展趋势

计量力学在精密测量领域正朝着以下高精度、智能化、微型化、极端量值测量及多参量综合测量方向发展。（1）高精度。在长度测量方面，激光干涉测量技术持续优化，通过更精准控制测量光路稳定性，结合先进算法处理干涉条纹数据，有望突破现有精度极限，实现亚纳米级测量。质量测量领域，基于量子物理的方法不断深入研究，利用量子态稳定性，有望重新定义质量计量基准，大幅提升质量测量精度。（2）智能化。人工智能技术在计量力学中逐步应用，智能算法可对测量数据

实时分析与处理，自动识别、校正测量过程中的误差。例如，在力值测量中，智能传感器能依据测量环境变化自动调整参数，确保测量准确性。同时，智能机器人可用于复杂测量操作，像在压力测量中，实现对压力计的精准自动化校准，提高测量效率与精度。（3）微型化。在温度、电学量等物理量测量中，研发体积更小、集成度更高的测量设备，可应用于微型电子设备、生物医疗等领域。如将微型温度传感器集成到芯片中，实时监测芯片温度，保障其稳定运行。（4）极端量值测量。随着工业发展，对大力值、超高压、极低温度等极端条件下的测量需求增加。如研发能适应超高压环境的压力测量设备，满足石油化工、深海探测等领域需求。（5）多参量综合测量。在医疗设备中，结合力学、电学、温度等多物理量测量，对人体生理状态进行综合评估。计量力学将在多学科交叉融合中不断创新，满足各行业日益增长的精密测量需求，推动科技与产业进步^[4]。

结束语

计量力学通过基础理论与实际应用的结合，在精密测量领域发挥了不可替代的作用，从微观到宏观尺度、从单一到多物理量测量均展现出强大支撑能力。其在激光干涉、质量比较等技术中的应用，推动了测量精度与稳定性的提升。随着高精度、智能化等趋势的推进，计量力学需进一步与多学科融合，突破极端条件测量瓶颈。这不仅能满足各行业对精密测量的需求，更将为科技进步与产业升级提供重要保障。

参考文献

- [1]陶博洋.力学计量仪器检定工作对策[J].大众标准化,2025(4):193-195.
- [2]葛萌,张铁犁,刘浩,等.量子精密测量技术及其在测量领域的典型应用[J].宇航计测技术,2023,43(6):1-6.
- [3]徐静霞.电磁计量在精密测量领域的应用研究[J].中国质量监管,2024(10):83-84.
- [4]张子聪.力学计量技术标准装置的应用现状及未来的趋势分析[J].科技资讯,2024,22(12):253-256.