

长度计量标准技术探讨

郭亮 郭超 于倩

内蒙古自治区计量测试研究院 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要：长度计量是计量领域的重要分支，贯穿人类生产生活与科技发展全过程。本文围绕长度计量标准技术展开探讨，梳理其古代、近代、现代三阶段发展历程，阐述量值比较、基面选择、量值传递三大基本原理，分类分析接触与非接触测量技术的特征及适用场景，并研究该技术在制造业、航空航天、精密仪器制造、医疗健康领域的具体应用。研究表明，长度计量标准技术是保障各领域尺寸精度与量值统一的关键，其发展与科技进步、生产需求紧密相关，为相关领域高质量发展提供重要技术支撑。

关键词：长度计量；标准技术原理；应用

引言：随着制造业精密化、航空航天高可靠性、医疗健康高安全性等需求提升，长度计量标准技术的重要性愈发凸显。当前，该技术已从传统实物基准迈向量子化基准，测量精度不断突破。本文系统研究长度计量标准技术的发展、原理、分类及应用，旨在明晰技术脉络，为其在各关键领域的进一步应用与创新提供理论参考，推动该技术更好适配现代产业发展需求。

1 长度计量标准技术的发展历程

长度计量标准技术的演进与人类生产需求、科技进步深度绑定，可分为古代、近代、现代三个关键阶段。（1）古代以自然参照物和人体部位为基准，具有经验性与地域性特征。彼时虽有实物量具初步规范，但精度仅达厘米级，且不同文明的计量标准缺乏统一参照，难以形成广泛适用的计量体系。（2）1875年《米制公约》签订，标志着长度计量进入近代标准化阶段。当时确立以铂铱合金“国际米原器”为基准，将1米定义为“0℃时米原器两端刻线间的距离”，首次实现全球长度标准统一，精度提升至微米级，为工业革命时期的机械制造与国际贸易提供关键技术支撑。（3）20世纪后，现代科技推动长度计量实现根本性突破。1960年国际计量大会将米定义为“氩-86原子特定能级跃迁辐射真空波长的1650763.73倍”，精度达纳米级；1983年再次修订，将米定义为“光在真空中1/299792458秒内行进的距离”，彻底摆脱实物基准限制，建立基于基本物理常数的量子化计量体系，为纳米科技、精密制造、航空航天等领域发展奠定精准计量基础^[1]。

2 长度计量的基本原理

长度计量的核心是通过特定方法实现被测量与已知标准量的精准比较，其基本原理可从以下三个层面构建逻辑框架。（1）从测量本质看，长度计量遵循“比较测

量”逻辑，即建立被测量与法定长度单位的定量关系，实现物体线性尺寸的量化表征。该过程可简化为“被测量=比较系数×标准量”，其中比较系数由测量方法与仪器精度决定，标准量需溯源至国际法定长度基准，以保障测量结果的准确性与统一性。（2）基面选择是长度计量的基础前提，核心原则为“基面统一”，要求测量基面与被测量对象的设计、工艺、装配基面保持一致，消除基面不重合引发的测量误差。常用基面包括点基面与线基面：点基面通过单一基准点建立测量坐标系，线基面以直线或轴线为基准构建测量参照系，二者选择需依据被测量的几何特征与精度要求确定，本质是通过明确测量参照，确保结果真实反映物体实际尺寸属性。（3）量值传递体系是保障长度计量准确性的关键支撑，原理是建立不同精度等级的标准器序列，将国际基准量值逐级传递至实际测量场景。体系遵循“自上而下、逐级溯源”逻辑，从最高等级国家基准器出发，经次级标准器、工作标准器至日常测量仪器，形成完整传递链条^[2]。

3 常见的长度计量技术分类

3.1 接触测量技术

接触测量技术是通过测量器具的敏感元件与被测物体表面直接接触，获取尺寸信息的技术类型。（1）机械式接触测量技术。该技术以机械结构为核心，通过测头与被测表面的接触变形或位移传递，将尺寸变化转化为可读的物理信号。其关键特征是依赖机械传动机构（如齿轮、丝杆）实现位移放大与读数，常见的技术形式包括游标式测量（如游标卡尺）、螺旋副式测量（如千分尺）、杠杆式测量（如杠杆百分表）等。这类技术操作简便、成本较低，适用于中低精度（微米至毫米级）的常规尺寸测量，尤其在金属工件、塑料零件等硬质材料的尺寸检测中应用广泛，但测量效率受操作熟练度影响

较大,且可能因接触压力导致软质材料(如橡胶、泡沫)的被测表面变形,影响测量精度。(2)电学式接触测量技术。该技术在机械接触基础上,融入电学传感元件,将测头的位移量转化为电信号(如电压、电流、电容),再通过信号处理电路实现尺寸的数字化测量。核心技术形式包括电感式测量(如电感测微仪)、电容式测量(如电容测微仪)、电阻式测量(如电阻应变式测头)等。其优势在于测量精度高、响应速度快,且能实现数据的自动采集与存储,适配现代化生产线的自动化检测需求。例如,在精密轴承滚道直径、发动机活塞销孔尺寸等高精度检测场景中,电学式接触测量技术可通过非旋转测头与被测表面的微量接触,避免机械磨损带来的误差,同时通过温度补偿电路降低环境温度变化对测量结果的影响,但对测头材料的耐磨性、抗腐蚀性要求较高,且需定期校准以保证传感元件的稳定性。

3.2 非接触测量技术

非接触测量技术无需与被测物体表面直接接触,通过光学、电磁、声学等物理效应获取尺寸信息,主要包括:(1)光学式非接触测量技术。该技术以光的传播、反射、干涉等物理特性为核心,通过光学系统捕捉被测物体的尺寸信息,是目前应用最广泛的非接触测量技术类型。常见技术形式包括激光干涉式测量(利用光的干涉现象实现长度的高精度测量)、光学成像式测量、光栅式测量(利用光栅的莫尔条纹效应实现位移测量)等。其核心优势在于测量范围广(从微米级微观尺寸到米级宏观尺寸)、测量效率高,且能实现复杂轮廓(如齿轮齿形、叶片曲面)的三维尺寸测量。例如,在半导体芯片引线间距检测中,激光干涉式测量技术可实现纳米级精度的尺寸反馈;在汽车车身覆盖件尺寸检测中,机器视觉测量系统可通过多相机协同拍摄,在几秒内完成数十个尺寸的同时测量,但易受环境光强度、被测物体表面反光率影响,需在避光或可控光源环境下使用,且对透明材料(如玻璃、塑料薄膜)的尺寸测量需特殊光学设计。(2)电磁式非接触测量技术。该技术利用电磁感应、电磁辐射等物理效应,通过检测电磁场变化与被测物体尺寸的关联关系,实现非接触式尺寸测量。主要技术形式包括感应同步器测量、涡流测厚仪测量、微波测距等。这类技术的优势在于抗环境干扰能力强(如耐高温、耐粉尘),适用于恶劣工业环境下的尺寸测量,例如在钢铁冶金生产中,涡流测厚仪可在高温环境下测量钢板的涂层厚度,无需接触高温工件;在大型机床导轨位移检测中,感应同步器可通过电磁耦合实现长距离(数米)的位移测量,且不受切削液、铁屑等污染物影响。但测量

精度通常低于光学式非接触测量技术(多为微米至亚毫米级),且对被测物体的材料导电性有一定要求,不适用于非金属材料的尺寸测量^[3]。

4 长度计量标准技术在关键领域的应用

4.1 在制造业领域的应用

制造业对零部件尺寸的一致性与精度要求直接决定产品质量,长度计量标准技术在此领域的应用如下:(1)零部件加工环节的应用。在金属切削、注塑成型等加工过程中,长度计量标准技术通过实时测量工具与工件的相对位置,实现对加工尺寸的动态控制。通过将计量标准集成至加工设备(如数控机床的光栅尺),可实时反馈刀具的位移量,确保加工过程中尺寸偏差控制在允许范围内;通过离线校准工具(如对刀仪),定期对刀具尺寸进行计量核查,避免因刀具磨损导致的加工尺寸偏差,保障批量生产中零部件尺寸的稳定性。(2)装配环节的应用。在组件装配过程中,长度计量标准技术用于验证零部件间的配合尺寸,确保装配间隙、过盈量符合设计要求。通过采用便携式计量仪器(如三坐标测量机、激光跟踪仪),对装配后的关键部位尺寸进行检测,判断零部件是否存在装配错位、尺寸超差等问题;对于高精度装配场景,还需通过环境温度、湿度的计量监测,修正环境因素对尺寸测量结果的影响,确保装配后的产品满足功能要求。(3)成品检测环节的应用。在成品出厂前,长度计量标准技术用于对产品的关键尺寸进行全面核查,依据国家或行业计量标准判定产品是否合格。通过建立与国际标准接轨的企业内部计量体系,将成品尺寸测量结果溯源至国家基准,确保检测数据的权威性与可比性;对于复杂结构产品,还需通过多维度尺寸测量,验证产品整体尺寸精度是否符合市场准入与客户要求。

4.2 在航空航天领域的应用

航空航天领域对产品尺寸精度的要求远高于普通制造业,且需应对极端环境下的尺寸稳定性挑战,长度计量标准技术在此领域的应用如下:(1)飞行器结构制造的应用。在飞行器机身、机翼等大型结构件制造中,长度计量标准技术用于实现大尺寸、复杂曲面的精度测量。通过采用激光雷达、摄影测量等技术,对结构件的整体尺寸、形位公差进行检测,确保结构件的几何形状符合空气动力学设计要求;针对复合材料等特殊材料构件,通过适配材料特性的计量方法(如非接触式测量),避免测量过程对构件造成损伤,保障构件的结构完整性。(2)发动机核心部件制造的应用。在航空发动机涡轮叶片、燃烧室等核心部件制造中,长度计量标准技术用于控制微观尺寸与形位精度。通过纳米级精度的计量仪器,

对部件的表面粗糙度、壁厚均匀性等微观尺寸进行测量,确保部件在高温、高压工况下的性能稳定性;通过计量校准确保加工设备的精度,实现核心部件尺寸的超精密制造,降低因尺寸偏差导致的发动机故障风险。(3) 航天器运维阶段的应用。在航天器在轨运行或地面维护过程中,长度计量标准技术用于监测部件的尺寸变化。通过搭载在航天器上的微型计量传感器,实时监测关键结构的尺寸变形情况,为地面控制中心提供状态评估数据;在地面维护时,通过高精度计量仪器对返回或检修的部件进行尺寸检测,判断部件是否因空间环境(如微重力、辐射)产生不可逆的尺寸变化,为维护方案制定提供依据。

4.3 在精密仪器制造领域的应用

精密仪器的测量精度依赖自身核心部件的尺寸精度,长度计量标准技术在此领域的应用围绕以下方面:(1) 核心部件制造的应用。在精密仪器的核心部件(如镜头、探针)制造中,长度计量标准技术用于控制微米级甚至纳米级的尺寸精度。通过采用超精密加工与计量一体化技术,在加工过程中实时反馈尺寸数据,确保核心部件的尺寸误差控制在纳米级范围内;通过计量标准样品对部件尺寸进行验证,确保部件尺寸符合仪器整体设计的精度要求,为仪器的高测量精度奠定基础。(2) 仪器整体校准的应用。在精密仪器出厂前及使用过程中,长度计量标准技术用于对仪器的测量精度进行校准。通过使用经国家计量机构认证的标准件(如标准量块、标准光栅),按照规范的校准流程对仪器的测量范围、示值误差、重复性等指标进行检测,修正仪器的系统误差;对于使用中的仪器,定期依据计量校准规程进行核查,确保仪器测量精度始终处于合格状态,避免因仪器精度下降导致的测量数据失真。

4.4 在医疗健康领域的应用

医疗健康领域的长度计量标准技术应用聚焦于医疗

设备精度控制与医疗耗材尺寸合规性,直接关系到诊疗效果与患者安全,其应用如下:(1) 医疗设备制造与校准的应用。在诊断设备(如CT机、超声诊断仪)与治疗设备(如放疗设备、手术机器人)制造中,长度计量标准技术用于控制设备核心部件的尺寸精度,确保设备的成像分辨率、治疗定位精度符合医疗标准;在设备使用过程中,通过专用计量工具对设备的关键参数(如CT机的层厚、手术机器人的定位误差)进行定期校准,保障设备诊疗精度的稳定性,避免因设备精度问题影响诊疗结果。(2) 医疗耗材生产检测的应用。在医疗耗材生产中,长度计量标准技术用于控制耗材的关键尺寸(如注射器内径、支架外径),确保耗材尺寸符合人体生理结构与使用要求;在耗材出厂检测中,依据医疗行业计量标准对尺寸进行抽样检测,判断耗材是否存在尺寸超差问题,避免因耗材尺寸不当导致的使用风险(如注射剂量不准、植入体适配性差),保障患者使用安全^[4]。

结束语:长度计量标准技术历经多阶段演进,形成了完善的原理体系与丰富的技术类型,在多关键领域发挥着不可替代的作用。它不仅是保障尺寸精度的基础,更是推动产业升级、科技突破的重要支撑。随着纳米技术、人工智能等新兴技术发展,长度计量标准技术需持续突破精度瓶颈与环境适应性难题。

参考文献:

- [1]王雅倩.长度计量标准技术探讨[J].中国科技期刊数据库工业A,2020(7):434-435.
- [2]杨艳霞,赵德林,李慧茹.计量标准考核有关技术问题的探讨[J].中国计量,2025(4):89-92.
- [3]刘宁.浅谈长度计量技术及其发展趋势[J].魅力中国,2020(50):163.
- [4]程万强.长度计量技术标准化管理与应用的提升策略[J].大众标准化,2024(21):182-184.