

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.19

高端测长仪器设计原则在步距规校准仪设计中的应用

孙玉玖, 孙安斌, 钱丰, 邹晓喻

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 制造和测量过程的不断迭代是提升产品性能的关键, 目前高端仪器自主研发能力不足使我国高端制造业的发展受到了制约。长度计量仪器是保障制造业量值溯源准确性的重要基础之一, 本文以步距规校准装置的研制过程为例, 介绍阿贝原则、最小变形原则、最短测量链原则在高端长度计量仪器设计中的具体应用, 为高端长度计量仪器的研制提供技术借鉴, 推动我国高端仪器自主研发能力的提升。

关键词: 高端仪器; 设计原则; 量值溯源; 步距规; 步距规校准仪

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0135-04

Application of High-end Length Measuring Instrument Design Principles to Step Gauge Calibration Device

SUN Yujia, SUN Anbin, QIAN Feng, ZOU Xiaoyu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The continuous iteration of the manufacturing and measurement process is the key to improving product performance. The current shortage of high-end measuring instruments has restricted the development of high-end manufacturing technology in China. Geometric measurement instrument is the basis of manufacturing traceability. Taking the step gauge calibration device developed as an example, this paper introduces the specific applications of Abbe principle, minimum deformation principle and shortest measuring chain principle for high-end length measuring instruments design, so as to provide technical reference for the development of high-end length measuring instruments and promote the improvement of China's independent development ability of high-end instruments.

Key words: high-end instrument; design principle; quantity traceability; step gauge; step gauge calibration device

0 引言

计量是科学生产的技术基础, 产品质量的提升离不开计量^[1]。我国在“十四五”规划中强调完善国家质量基础设施, 加强标准、计量、专利等体系和能力建设, 深入开展质量提升行动, 作为加快发展现代产业体系, 推动经济体系优化升级的重要手段^[2]。王大珩院士对计量仪器的作用曾有过高度概括: “仪器仪表是科学研究的先行官, 工业生产的倍增器, 军事上的战斗力, 社会生活中的物化法官”^[3]。早在 2010 年, 中国就已成为全球制造业第一大国, 但是 90% 的高端仪器被国外公司垄断, 我国每年需要花费近千亿美元进口仪器设备, 这严重制约了我国高端制造的发展。谭久彬院士指出: “建设世界科技强国, 首先必须建设世界仪器强国”^[4]。高端仪器国产化能力不足已经成为制约我国科技和高端制造业发展的瓶颈, 面对复杂的国

际环境, 我国亟需提高高端仪器的自主研制能力。本文通过介绍高端测长仪器设计原则在步距规校准装置设计中的应用, 为高端长度计量仪器的研制提供技术参考, 推动高端仪器国产化研制能力的提升。

1 测长仪器设计基本原则

长度计量是最基础的计量专业之一, 芯片尺寸的纳米级控制、珠穆朗玛峰高度的精确测量、空间站的精准对接, 都依赖于长度测量结果的准确性。我国现代制造业的快速发展, 对高端长度测量仪器的需求尤为迫切^[5]。航空工业计量所在高端长度仪器研发领域进行了深入研究, 积累了丰富的高端长度仪器设计经验。本文以解决高准确度步距规的量值溯源问题, 开展步距规校准技术研究, 并完成步距规校准仪研制为例, 说明该仪器在设计上是如何充分遵循高端测长仪器设计原则——阿贝原则, 最小变形原则和最短测量链原则的^[6]。

阿贝原则要求被测量轴线应与标准量的测量轴线重合或在其延长线上。这里重点强调的是：阿贝原则是长度计量的最基本原则，其意义在于避免了因导轨误差引起的测量误差。在高端长度仪器设计过程中，有些设计师为了压缩仪器结构尺寸而放弃了阿贝原则，并试图通过误差补偿进行修正，但实际上阿贝误差是无法补偿的。所以设计高端长度计量仪器时应严格遵守阿贝原则，以保证长度测量结果的高准确度。

为保证测量结果准确可靠，在测量过程中，应尽量使各种因素所引起的变形最小，这就是最小变形原则。长度计量中，引起变形的因素主要有接触变形、自重变形和热变形。需要注意的是，在高端长度仪器设计过程中，有些设计师只考虑测量过程中可能导致被测对象变形的因素并加以规避，而忽视了可能导致测量仪器本身变形的因素（测量仪器本身的变形也会对测量结果的准确度造成很大的影响），因此在设计高端长度计量仪器时应全面考虑可能引起变形的因素，例如：运动姿态变化、温度变化、接触摩擦等。

最短测量链原则是指测量链的环节应尽可能地减少。测量链的环节包括测量信息信号的每一个转换过程，以百分表为例，长度变化经过测杆及齿条齿轮的传递放大，最后通过指针与表盘刻度的角位移来指示，此过程中每个元件在制造和装配中都可能存在误差。测量链的环节越多，测量结果的准确度就越难以保证。因此设计高端长度计量仪器时，应尽可能地减少测量链的环节以减少误差累积。

2 高精度步距规校准仪器

在长度计量领域中，量块作为一种重要的端度实物标准器已广泛应用于坐标测量机、数控机床及各类测长仪器的量值溯源^[7]，但是由于一块量块只能复现一个特定尺寸的量值，检测一台设备通常需要多个量块，工作效率较低，且现代设备都具有误差补偿的功能，量块规格有限，无法足够细密地对各点误差进行补偿。为了弥补量块的不足，研究人员发明了步距规，它通过沿直线排列的一系列平行端面给出几十甚至上百个独立的尺寸量值，如图1所示。

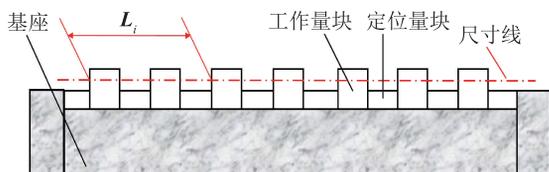


图1 步距规结构示意图

步距规具有效率高、稳定性好和补偿细密等优点，可替代量块作为长度实物标准器校准坐标测量机和数控机床，同时也适用于测高仪、千分尺、卡尺等通用计量器具的校准。为实现步距规的量值溯源，航空工业计量所研制了步距规校准仪，其结构示意图如图2所示。该装置严格遵循了高端测长仪器的设计原则，并实现了核心技术自主可控^[8]。

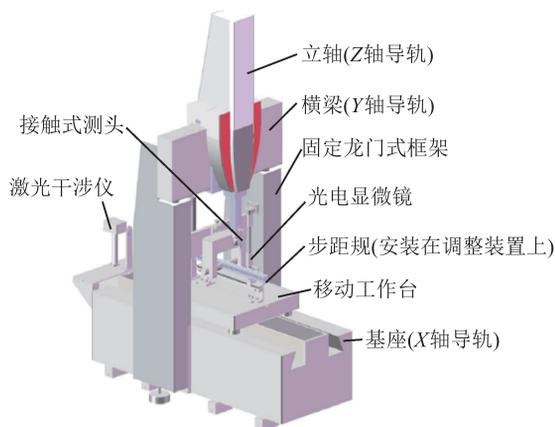


图2 步距规校准仪结构示意图

步距规校准仪以激光干涉仪作为长度基准，利用高准确度的温度、湿度、压力传感器测量环境参数，并进行修正补偿，采用自主研发的弱反射面大焦距光电显微镜进行瞄准，实现高准确度的非接触式测量。校准时，将步距规安装在移动工作台上，激光干涉仪和光电显微镜均固定不动，利用调整装置调整步距规尺寸线与激光轴线一致，测量时步距规跟随工作台沿X轴一维方向移动。具体测量过程如下：首先移动工作台，使步距规0工作面到达光电显微镜的瞄准位置，锁存此位置下激光干涉仪的读数；然后移动工作台，使步距规1工作面到达光电显微镜的瞄准位置，锁存此位置下激光干涉仪的读数，激光干涉仪测量得出的工作台移动距离即为步距规1工作面至0工作面在中心线上对应的工作尺寸；依次对步距规各工作面瞄准读数，并对采集的数据进行分析计算，得出步距规各测量面的工作尺寸，上述测量过程完全由计算机控制，实现自动测量。

3 设计原则在步距规校准仪设计中的应用

3.1 阿贝原则的应用

传统的步距规校准装置采用坐标机实现步距规校准，但由于坐标机的光栅尺通常安装在工作台下方，这种设计方式不符合阿贝原则。而本文研制的步距规校准仪在步距规测量线的延长线上增加激光干涉仪作

为长度测量标准,严格遵循阿贝原则。激光干涉仪的激光器通过刚性支架固定在测量仪的前侧,这种与仪器一体化的设计方式可以明显减小测量机自身震动的影响。干涉镜固定在花岗岩基座前侧,反射镜放置在移动工作台上,置于步距规前侧,保证激光干涉仪光轴(测量标准的轴线)固定安装在步距规尺寸线(被测量的轴线)的延长线上。步距规校准仪定位瞄准状态如图3所示,光电显微镜瞄准装置采用卧轴结构型式设计,安装在固定式龙门框架上,并设计有微调机构,在仪器的安装调整阶段完成调整,使显微镜的焦点位于激光干涉仪测量线上,测量时显微镜的焦点即为步距规工作面上的瞄准点,保证了各工作面的测量瞄准状态一致。步距规安装在调整装置上,可以进行上下、左右以及偏摆方向调整,保证步距规的工作轴线与导轨运动方向一致,且中心点在显微镜的焦点上。这种步距规测量线、激光干涉仪测量线、光电显微镜焦点三者共线的设计,使得测量不同型号的步距规时均符合阿贝原则,避免了因导轨平面度/直线度误差引入的测量误差,使阿贝误差的影响可以忽略不计。

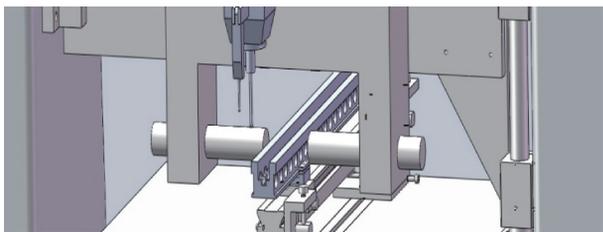


图3 步距规校准仪瞄准状态示意图

3.2 最小变形原则的应用

传统的步距规的校准装置采用测针瞄准,测量过程中测针需要上下(或左右)运动进出步距规工作面,测针与各被测面实际触点的运动轨迹可能是空间内的二维折线,偏离步距规尺寸线,瞄准重复性受到限制,同时测针在接触时存在接触变形问题,特别是双向尺寸测量过程中,接触变形无法补偿,导致准确度受影响。本文研制的步距规校准仪严格遵循从最小变形原则,采用弱反射面大焦距光电显微镜进行非接触瞄准,有效地避免了材料表面接触变形,同时光电显微镜在测量过程中固定不动,避免了因反复升降引入误差,瞄准重复性达16 nm,明显优于接触式瞄准。

仪器自重引起的变形以及工作台移动引起的变形可能导致标准轴线,测量轴线和光电显微镜光轴发生变化,影响测量准确度。针对此问题,步距规校准仪的基体、导轨和工作台均采用优质花岗岩制造,结构

稳定性好;各个连接定位面均严格遵守两点定一线、三点定一面的原则,避免了欠定位和过定位;由于工作台与被测工件一起运动,其重量相对较大,故设计采用无摩擦的气浮导轨,安装4块承载气浮,每块气浮的承载力约为500 kg,总承载力达2000 kg,以满足承载要求;4块导向气浮与4块承载气浮对称布置在工作台的两个截面上,基座的长度尺寸设计为3450 mm,大于工作台长度加上行程的总和(2800 mm),采用三点固定支撑加两点辅助支撑方式,保证测量过程的全行程中工作台始终处于基座长度内,以减小工作台移动引起的变形,运动直线度不超过2",对测量结果的影响可以忽略不计。

物体的热胀冷缩特性对长度测量会产生较大影响,所以最小变形原则还包括对热变形的控制。通常长度计量检定规程中都会规定对于实验室温度,温度变化以及恒温时间的要求,且高端测长仪器可通过自动化测量实现数据自动采集和实时补偿,但是很多设计者错误地认为只要按公式完成对温度等环境参数的补偿就可以获得高准确度的测量结果,而实际上温度波动以及温度场分布不均匀会造成补偿结果的严重失真。通常仪器放置在实验室的恒温间内,操作人员、计算机、灯光以及气流等都会引起温度的变化,为了避免这些影响,在恒温间内设计了保温层,步距规校准仪安装在保温层内,操作人员在保温层外通过计算机设置测量程序,实现全自动测量,避免步距规校准仪工作环境的温度波动和温度场变化带来的影响;同时配备了四只精密数显热敏电阻温度计,均匀地放置在步距规长度方向的不同部位,以减少由温度场不均匀引起的补偿数据误差,温度计由标准铂电阻温度计工作基准装置校准并赋值,用于修正因温度偏离标准温度而引起的激光波长变化和被测件的长度变化。独立的工作空间,稳定的工作环境,保证了对环境因素补偿和修正的可靠性。

3.3 最短测量链原则的应用

测长系统直接关系到测得量值的准确度,高端测长仪器设计应优先选择激光波长作为长度测量标准,量值直接溯源到米定义,减少测量参数的中间转换。步距规校准仪遵循了米定义,激光波长的稳定性控制在 2×10^{-8} 以内;测量过程中,步距规各工作面的测量点始终在激光轴线的延长线固定位置上,各被测面瞄准状态一致,激光干涉仪的示值差即为步距规各被测面在中心线上对应点间的距离,符合步距规工作长度量值的定义,满足最短测量链的设计原则。

4 结论

步距规校准仪在设计上严格遵循阿贝原则、最小变形原则和最短测量链原则,同时按照精益求精,量化设计的原则,采用了自主研发的瞄准定位系统,测量不确定度达到 $U = 0.07 \mu\text{m} + 0.25 \times 10^{-6} L (k = 2)$, 可以作为统一步距规量值的最高标准^[9]。现代制造业对产品计量特性提出了更高要求,需要利用高端仪器进行量值溯源,我国制造业要想占领国际制高点,需要研发大量的高端测量仪器^[10]。未来,高端测长仪器的国产化研制依旧任重道远,还有很多技术难关需要攻克,需要科研人员共同努力解决,为我国成为制造业强国打下坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 李宗扬. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [2] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[Z]. 北京, 2020.
- [3] 王大珩院士谈仪器仪表的价值[EB/OL]. <http://www.optics-journal.net/ViewObject.htm?oid=PT110511000050z7C0F&otype=PT>.
- [4] 谭久彬. 提升高端装备制造质量核心关键是解决超精密测量能力问题[R]. 中国仪器仪表行业协会, 2020.
- [5] 谭伟. 复杂零件长度检测技术研究与检测仪器的研制[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [6] 杨自本. 长度检测中的常用原则[J]. 中国计量, 1997(5).

- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 146 - 2011 量块检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [8] 孙玉玖, 唐英娜, 钱丰, 等. 步距规作为长度实物标准器的应用[J]. 计测技术, 2017, 37(Z1): 28 - 30.
- [9] Sun Y, Xu S, Qian F, et al. A non-contact calibration system for step gauges using automatic collimation techniques[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 035011.
- [10] 路伟光, 王帼媛, 王海亮, 等. 浅谈工业制造业中长度测量技术及应用[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(5): 43 - 46.

收稿日期: 2021 - 02 - 01; 修回日期: 2021 - 03 - 30

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(J052011A007)

作者简介



孙玉玖(1969 -), 女, 辽宁大连人, 研究员, 主要研究方向为几何量计量。1992年毕业于南昌航空工业学院机械工程系机械制造工艺与设备专业, 获工学学士学位; 2009年毕业于北京航空航天大学, 获控制工程硕士学位。全国螺旋纹标准化技术委员会副主任委员, 全国几何量工程参量计量技术委员会委员, 全国产品和尺寸技术规范标准化技术委员会委员, 中国航空航天工具协会标准化工作委员会委员, 国家计量考评员。已从事几何量计量领域研究二十余年, 负责和参与了量块、步距规、环规、螺纹、齿轮等多项科研工作, 获得2项省部级一等奖, 主持或参与制修订了二十多项国家标准、规程、规范, 已发表论文二十余篇。

委员会委员, 中国航空航天工具协会标准化工作委员会委员, 国家计量考评员。已从事几何量计量领域研究二十余年, 负责和参与了量块、步距规、环规、螺纹、齿轮等多项科研工作, 获得2项省部级一等奖, 主持或参与制修订了二十多项国家标准、规程、规范, 已发表论文二十余篇。