

# 激光与光电子学进展

## 超精密测量技术与仪器是高端制造发展的前提与基础

谭久彬

哈尔滨工业大学精密仪器工程研究院

“现代热力学之父”开尔文有一条著名结论：“只有测量出来，才能制造出来。”精密测量技术的发展不断促进着工业制造的换代升级。在当代科技和工业领域，高水平的精密测量技术和精密仪器制造能力，反映了一个国家科学研究和整体工业领先程度，更是发展高端制造业的必备条件。随着精密测量技术不断进步，其在科学研究、工程科技、现代工业、现代农业、医疗卫生和环境保护等领域发挥着越来越重要的作用。

### 1 精密测量技术促进了现代工业的发展

精密测量是一个泛指的、大的范畴。凡是准确度很高的各类测量，都可称之为精密测量。在精密和超精密工程领域，精密测量有具体的数量级概念：精密测量是指测量准确度在  $1\ \mu\text{m}\sim 0.1\ \mu\text{m}$  量级的测量，超精密测量是指测量准确度优于  $100\ \text{nm}$ ，如  $10\ \text{nm}$ 、 $1\ \text{nm}$ ，甚至  $\text{pm}$ （千分之一纳米）量级的测量。

精密测量兴起于工业大生产。规模化大生产是现代工业的重要特征，产业分工与专业化配套越来越细化、越来越精密，地域分布越来越广、产业链遍布全世界。也就是说，一个产品由成百上千甚至成千上万个零部件组成，这些零部件不可能由一个厂家生产，需要遍布各地的很多个优势生产厂家合作完成。比如一部智能手机，有 1600 多个零件和元器件，由分布在世界上 11 个国家和地区的 150 多家工厂提供。这带来一系列好处：大批量标准化生产，生产效率高、质量高、成本低。但技术层面存在一个大问题——把如此多的零件、元器件集成到一起时，其中任何之一的尺寸精度或其他技术指标不合格，就无法高精度、高效率地把它们集成到一起，即便勉强集成到一起，产品质量也可能不合格。

为了解决这类问题，国际标准化组织 (ISO) 和国际计量局 (BIPM) 制定了一系列标准与规范。依据这些标准与规范，对产品的每一个零件和元器件的所有技术参数进行精密测量，以保证成千上万的同一种零件或元器件都具有互换性。通俗地说，就是用到哪一个零部件都是合格的。这需要一个前提为保障：发生在世界各地的千千万万次测量都是准确无误的。怎么才能保证准确无误？BIPM 用一个公认的标准量值传递给每一台测量仪器，以保证这个标准量值在全世界范围内准确一致，进而保证所有的测量仪器都是精准的，所有的测量数据都是精准的。从那时起，精密测量已成为促进科技发展的重要新兴学科。

### 2 超精密测量技术是引领现代工业向高端发展的火车头

对一个国家而言，精密测量与装备制造业紧密相关。装备制造业向中高端跨越的关键是提升制造质量，提升制造质量的关键，是先解决精密测量能力问题。只有通过精密测量，才能知道产品哪里不合格；只有通过大量精密测量数据的积累，才能找到产品不合格的根源与规律；只有基于精密测量数据建立起成体系的误差补偿模型，才能有效实现制造精度和产品性能的精确调控，产品质量才能在不断地精确调控中逐渐提升。

超精密光刻机的研制，很好地证明了这条结论。

超精密光刻机被称为“超精密尖端装备的珠穆朗玛峰”，挑战着人类超精密制造的精度和性能极限。超精密光刻机是在超精密量级上把最先进的光机电控等几十个分系统、几万个零部件集成在一起，使其高性能协同工作，是人类装备制造史上复杂程度最高，技术难度最大，综合精度性能最高的尖端装备之一。它在高速和高加速度下，实现纳米级的同步精度、单机套刻精度和匹配套刻精度等，这与传统的精度提升环境完全不同。同时，超精

密光刻机的制造精度已接近现有制造能力的极限,其精度提升一点点,通常都要付出几倍、十几倍的努力。比如,用于 28 nm 节点制程的深紫外(DUV)光刻机拥有 7 万多个光机零件,涉及到上游 5000 多家供应商。这些零部件对精度和稳定性的要求极高,其中 85% 的零部件集成了供应链上所有制造商的优势,才共同研发成功。

任何一个重要零件不合格都会导致超精密光刻机研制失败。以其中一个构件——激光反射镜的制造精度为例。它由微晶玻璃制成,有 108 项尺寸公差和 62 项形状、位置、方向公差,还有内部应力等技术要求。要完成这样一个复杂构件的超精密测量,需要 20 多种专用超精密测量仪器。而光刻机有 7 万多个光机零件,其中 80% 以上的零件处于精密和超精密级,需要 700 多种专用精密和超精密测量仪器。如果没有成体系的专用超精密测量技术与仪器来管控制造精度,就不可能制造出合格的零件,也不可能装配调试出合格的部件与分系统,更不可能装配调试出合格的光刻机整机。从一类装备到整个装备制造业,一个普遍的规律是,只要建立起遍布装备全制造链、全产业链和全生命周期的精密和超精密测量整体能力,就能对整个装备制造业高质量运行形成有效的调控能力和稳定可靠的支撑能力。

### 3 超精密测量只有形成体系,才能对高端制造形成整体支撑能力

精密和超精密测量整体能力的提升还可推动国家测量体系的建立。其中国家计量体系能够有效管控工业测量体系,保障全制造链、全产业链和全生命周期内的产品质量,赋能高科技产业高质量发展。目前国际上工业发达的国家,其产品都经历了从低质量向高质量的曲折的发展历程。正是因为建立起了完整的精密测量体系,培育起了一批顶尖的超精密仪器企业,才能为高端装备制造提供强有力支撑,打造出诸多世界品牌。

凡是制造强国和质量强国,都是仪器强国和测量强国。世界前 20 强仪器企业被美、日、德、瑞、英占据,世界前 5 名仪器企业的高端仪器市场占有率超过 50%,世界前 10 名仪器企业高端仪器市场占有率超过 75%,这些仪器强国同时都是测量强国,都早已经构建起了先进的国家测量体系。

为什么我国制造业从中低端向中高端跨越时,遇到的困难非常多,难度非常大?目前,我国工业,特别是制造业仍处于中低端,产品制造质量基础十分薄弱。

从体制机制层面看,一是现行计量体系不完整等问题导致量值传递能力薄弱、大量传递链断裂,质量调控能力在底层失控;二是现行计量管理体制僵化,市场化程度低,不利于培育服务型测量业态,不利于发展工业测量服务市场。

从技术层面看,一是尚未形成完备的整体工业测量能力;二是精密级测量还没有形成整体能力,超精密级测量能力还处于初级阶段;三是关键测量技术亟待突破,高端测量仪器仪表和核心零部件长期依赖国外。无论是管理模式,还是技术支撑,都已经无法满足经济社会各领域对精准测量测试的需求,深层次改革势在必行。

新一代国家测量体系可以分步推进:在国家计量体系层面,要系统布局面向工程参量的国家计量基标准建立;在工业测量体系层面,可以先从一些重要产业的精密测量和超精密测量做起,如航空发动机产业、汽车产业、平板显示器产业和半导体照明产业等,可建设面向各类产业的产业工业测量体系;对工业集群集中的区域,如哈大齐工业走廊、辽中南制造业集中区、长三角制造业集中区、长三角制造业集中区等,可建立各具区域产业背景的区域工业测量体系。在面向各行各业的工业测量体系和覆盖国内各个制造业集中区的区域工业测量体系的基础上,构建具有计量量子化和量值传递扁平化特征的新一代国家测量体系。只有这样,才能对我国整个高端制造形成整体支撑能力

2023 年 2 月 6 日党中央国务院印发了《质量强国建设纲要》,提出了 2025 年和 2035 年发展目标,为工业转型升级指明方向。国家新型工业测量体系是质量强国建设的坚实基础,是我国工业,特别是制造业从中低端向中高端跨越的核心支撑,是提升产业核心竞争力的关键。进入中高端制造阶段,精密和超精密测量就成为不可或缺的核心能力,要想造得出,必先测得出,要想造得精,必先测得准。构建国家新型工业测量体系是实现产业高质量发展的必然选择,也是补齐我国工业,特别是高端装备制造质量短板的必由之路。