

# 大型高精度衍射光栅刻划系统

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

## 仪器研发背景

衍射光栅（以下简称“光栅”）是一种具有纳米精度周期性微结构的精密光学元件，可以把复色光分解为单色光。光栅不仅是各类光谱仪器的“心脏”，同时在光通信、激光器、激光惯性约束核聚变等众多领域都有非常重要的应用。光栅面积大可获得高集光率和分辨本领，精度高可获得高信噪比，但同时将光栅“做大”和“做精”属于世界性难题。

我国制造大面积高精度光栅，主要源自天文领域迫切的应用需求。早在1958年，我国就把研制2.16 m口径光学天文望远镜列为国家重点研究项目；该望远镜于1989年安装于中国科学院国家天文台兴隆观测站并正式投入使用，并荣获国家科技进步奖一等奖。项目实施过程中，于1979年11月召开该望远镜光谱仪研讨会，计划首期使用2块306 mm × 408 mm中阶梯光栅。由于美国对大光栅实施禁运，决定由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所（以下简称“长春光机所”）在1983年前自主完成研制任务。但由于资金限制，研制工作没有能够按照原计划持续下去。

长春光机所是我国光栅的发源地，1959年自主研制出国内第一台光栅刻划机，1964年第一块光栅诞生，并支持了我国第一颗原子弹爆炸试验的光谱分析工作。此后，从未间断对光栅研制技术、超精密加工技术等方面

的研究，为我国大面积高精度中阶梯光栅的研制打下了坚实基础。2008年底，获得国家重大科研装备研制项目支持，再次开展“大型高精度衍射光栅刻划系统”的研制工作，并于2009年1月正式启动。项目全体研究人员郑重地承接起了实现中国“光栅梦”的光辉使命。

## 取得的进展

2016年11月11日，中国科学院条件保障与财务局在长春光机所组织召开了国家重大科研装备研制项目“大型高精度衍射光栅刻划系统研制”验收会。专家组听取和审查了相关报告和材料，并现场考察了仪器设备运行情况，经质询和讨论，一致同意项目通过验收。



项目负责人唐玉国研究员在验收会上汇报工作

执笔人：巴音贺希格

通过数十年技术沉淀和八年不懈努力，长春光机所研制成功了大型高精度光栅刻划机，并利用该机器研制出了  $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  世界最大面积的中阶梯光栅。该项成果的取得，标志着我国的光栅制造能力达到国际领先水平，打破了我国大型光学系统、远程探测等战略高技术领域光栅应用受制于人的局面，解决了我国光谱仪器“有器无心”的问题，实现了“中国光栅梦”。

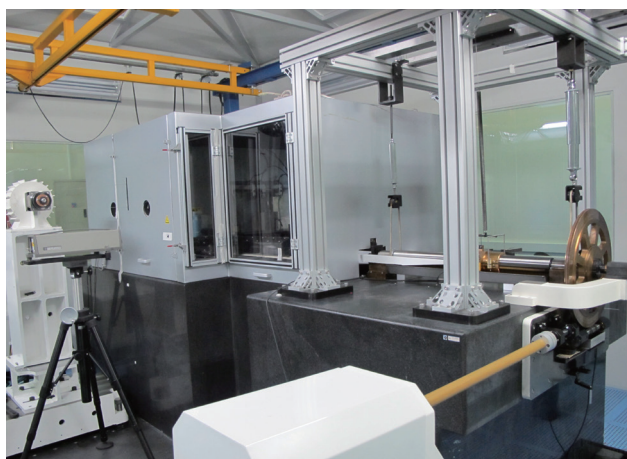
此项国家重大科研装备研制项目的实施和完成，在3个方面证明了我国的科技实力：① 证明了我国的精密机械加工技术达到了国际前沿水平。② 证明了我国大面积中阶梯光栅制造技术达到了国际前沿水平。③ 证明了我国相关高科技领域的战略部署由于缺乏大面积高精度光栅而受阻的时代已经结束了。

该项成果入选“中国科学院2016年月度（11月）重大科技成果”和“2016年中国科学院重大创新成果”；2017年作为“率先行动，砥砺奋进——‘十八大’以来中国科学院创新成果展”中制造业的典型成果展览于中国科学院文献情报中心，展区标题为《中国光栅梦：在精密机械王冠争夺战中拔得头筹》；同时，被列为“党的十八大以来中国科学院标志性重大成果”，其解说词标题为《终结了我国高精度大尺寸光栅制造受制于人的局面》。

## 核心关键技术

光栅刻划机是制作光栅的母机，被誉为“精密机械之王”。制作面积达  $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  中阶梯光栅的刻划机，要具备制作  $6000\text{ gr/mm}$  以上刻槽密度光栅的精度要求，且在约  $20\text{ km}$  行程范围内保证刻槽间距误差小于头发丝粗细的万分之一。光栅刻划机由上千个元件、部件构成，而且各部件加工精度、整机运行精度、环境控制精度以及光栅刻刀调节精度等各个环节的技术指标要求都几乎达到极限程度。

制作大面积中阶梯光栅，首先要实现光栅刻划机的纳米级定位精度。长春光机所项目团队经过误差分解



大型高精度衍射光栅刻划机

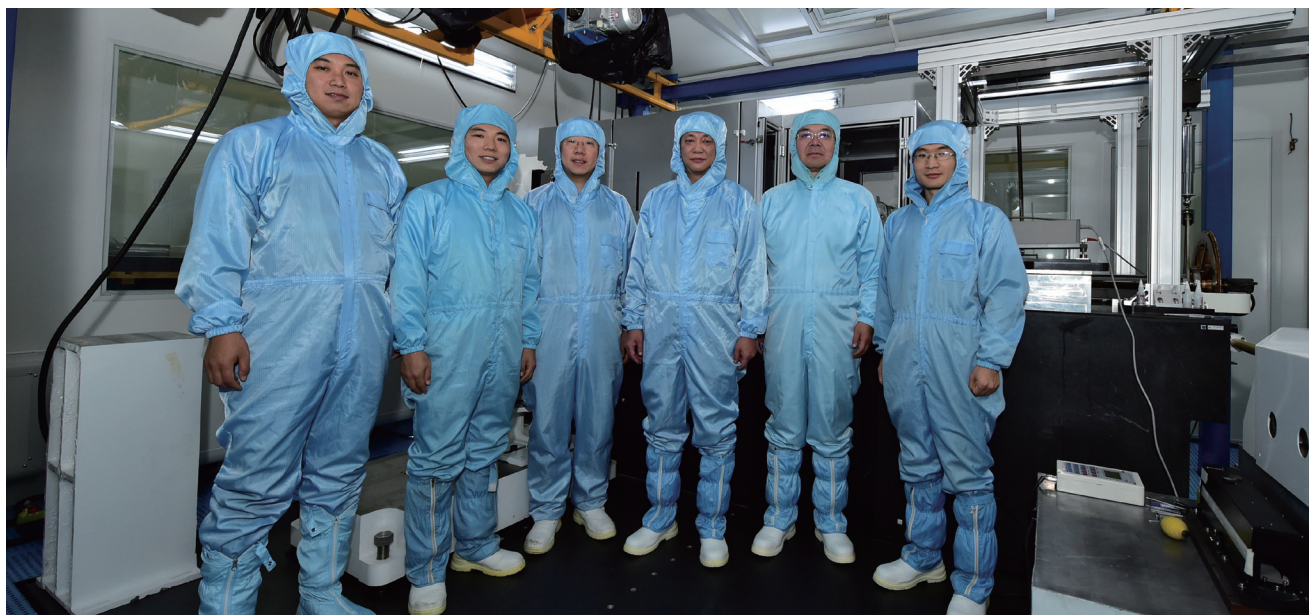


2017年10月31日，时任副总理刘延东在中国科学院文献情报中心参观大光栅刻划机成果展览

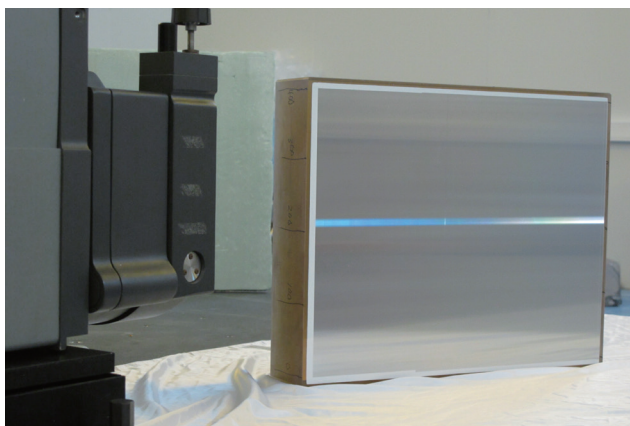
发现，丝杠、导轨等关键机械部件远超国标零级精度，现有技术状态下难以实现；之后经过从实际出发的大胆创新，在超精密机械设计和加工领域取得一系列重大突破。例如，提出“三基准合一、分体工装、组合加工”的小模数、大尺寸蜗轮蜗杆副研制新工艺；提出“几何误差五步排列消除法”研磨出超高精度、大行程三角螺纹丝杠；提出“纵横向精度交替逼近的机械部件表面光学抛光法”研制出精密双V型滚柱导轨副；首创基于主动调节金刚石刀具的光栅刻划技术，首创定位系统纳米级精度装调技术等，实现了光栅刻划机优于  $\pm 3\text{ nm}$  的定位精度。这些突破在客观上推动了我国精密机械领域的技术进步。

工作环境的恒温和隔振是保障光栅刻划机正常运行的必要前提。微小的温度波动和振动都将导致无法在纳





大光栅刻划机研发团队部分成员



检测 400 mm×500 mm 中阶梯光栅衍射波前



观察金刚石刻划刀刀口

米精度下捕获金刚石刻刀与光栅基底的相对位置，而且大面积中阶梯光栅刻划需要连续十几天稳定可靠的环境条件。长春光机所联合国内优势学科单位，采取多项创新环控技术，历时4年首次在国内实现了以空气调节方式达到 $< \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 的环境温控精度，建成自振频率 $< 1.0\text{ Hz}$ 的大型隔振基础，保障了刻划机刻出8000 gr/mm光栅的环境要求（我国隔振设计行业标准按3600 gr/mm光栅刻划机规定）。

光栅刻划是金刚石刻刀对铝膜进行连续微挤压形成阶梯状周期结构的过程，刀具寿命则是成功研制大面积光栅的“瓶颈”之一。项目团队开创性地采用X射线衍射金刚石晶向测量、矢量电磁场理论优化光栅槽形、微观力学分析刻划刀磨损行为和精度映射光栅性能综合评价相结合的方法，设计和研制出长寿命耐磨损金刚石刀具，保证了大面积高精度中阶梯光栅的成功研制。

### 在满足国家重大需求方面的代表性应用案例

长春光机所大型高精度光栅刻划机的成功研制，结束了我国天文学和深空探测领域相关核心技术受制于人的历史。例如，大型高精度光栅刻划机研制成功后，于

2017年底承担了为中国科学院云南天文台光纤阵列太阳望远镜研制8块300 mm × 500 mm中阶梯光栅,以及为中国科学院上海技术物理研究所火星表面物质成分分析仪器研制若干块专用光栅的任务。另外,还将有力支撑我国在193 nm光刻、高分辨率对地观测等领域重大战略部署的实施。193 nm光刻设备中,可以利用宽幅高精度中阶梯光栅对激光进行带宽压缩、聚焦等处理,从而获得高精度光刻所需的激光束;高分辨率对地观测中,以中阶梯光栅作为分光元件的全谱仪将具有宽光谱范围、低检出限、高分辨率和瞬态光谱等优势。可以说,拥有了大面积高精度光栅的制造能力,相关战略高技术领域的发展就会少一些“后顾之忧”。

与此同时,光谱分析技术的应用遍及各行各业,作为生产光谱分析技术基本设备的光谱仪器产业十分庞大。光栅是光谱仪器的核心元件,其品质的优劣直接决定仪器性能。长期以来,我国相当部分高精度光栅大量依赖进口,致使国产仪器面临“空心化”困境。大型高精度光栅刻划机的正常运行以及随之而来的高品质国产光栅的诞生,对我国光谱仪器行业发展具有里程碑意义,是从根本上改变我国光谱仪器行业“有器无心”、低端化现状的开端。正如习近平总书记所说:“只有把核心技术掌握在自己手中,才能真正掌握竞争和发展的主动权。”

#### 专家点评

超高精度三角螺纹丝杠、双V型滚柱导轨副、大尺寸蜗轮蜗杆副等所有关键部件都达到了国际顶尖水平。

——王立鼎,中国科学院院士,大连理工大学教授

项目取得的创新性成果不仅填补了国内空白,而且技术达到了国际领先。

——汪尔康,中国科学院院士,中国科学院长春应用化学研究所研究员

研制大光栅刻划机和大光栅过程中突破的18项关键技术就像18座珠穆朗玛峰。

——王家骥,中国科学院院士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员