

# 中国科学院科学仪器自主研制概述

陈代谢 张红松 牟乾辉 曹 凝

中国科学院 条件保障与财务局 北京 100864

科学仪器是科学创新的重要基础和条件，科学发现不仅仅需要理论创新，还需要依靠科学仪器进行实验观察和测量。只有掌握了先进的实验技术和方法，才能掌握科学发现的主动权。科学仪器也是人才培养的重要平台，科学仪器研制往往是技术密集、管理复杂的创新活动，需要不同学科的交叉融合，是培养兼具科研、工程和管理能力的复合型人才的重要基地。百年科学发展史和众多诺贝尔科学奖都证明，科学进步离不开科学仪器的技术进步和发展。

中国科学院（简称“中科院”）作为中国自然科学最高学术机构、科学技术最高咨询机构、自然科学与高技术综合研究发展中心，其前沿科学研究和技术创新都依赖于科学仪器设备发展，科学仪器自主研制已经成为中科院落实“率先行动”计划的重要工作内容之一。中科院也是科学仪器发展和突破的重要推动力量，其承担的国家级科学仪器研制项目相继完成验收，并取得重要进展。本文将对国内外科学仪器的研制发展情况以及中科院仪器研制工作的最新进展进行概述，并对中科院下一阶段仪器研制工作进行展望。

## 1 国内外科学仪器研制发展概况

科学仪器设备作为一个产业，在国外已经形成了从创新思想到研发关键技术进而提升科学仪器设备产品性能的完整体系，科研机构与企业之间良性循环，国际上科研人员使用的高端仪器设备基本被少数国外企业垄断。与国外 19 世纪就开始科学仪器设备研究和生产相

比，我国的科学仪器研发还有着很大的差距，而起步晚、底子薄是主要原因之一。近年来，随着我国经济社会发展对科技自主创新需求的逐步增强，以及对基础科学研究投入的不断加大，科学仪器自主创新的重要性日益凸显。国家相关指导文件相继出台，明确提出要“重视科学仪器与设备对科学研究的作用，加强科学仪器设备及检测技术的自主研究开发”，这些政策充分显示了国家对科学仪器自主研制的重视程度。

### 1.1 国外科学仪器研制

国外科学仪器的发展可以追溯到文艺复兴时期，当时科学家既擅长科学仪器的使用，同时也是先进科学仪器的发明人，科学仪器和科学研究形成了明显的伴生关系。例如牛顿、开普勒等人的很多科学设想都通过特制的科学仪器得到验证。同时，科学仪器也成为科学家的重要科学产出，如光谱仪、光学显微镜、气压计等。

进入 20 世纪，科学技术特别是工业的高速发展使得科学研究工作出现了明显分工，一批高水平的科研人员独立出来成立专门制造科学仪器的公司，如卡尔·蔡司、岛津源藏等。这种分工对于科学仪器的发展具有很大的推动作用：科学仪器公司不仅能从事科学仪器的生产，公司创始人的科学家身份也更容易建立一种生产与科研良好互动的交流方式；科学研究指导技术发展，技术进步支撑科学创新，科学与技术、科研机构与企业形成良性循环，大大促进了科学仪器产业技术进步和创新。

21 世纪以来，美国、法国、德国、英国和日本等主要的科学仪器制造国家纷纷设立专项计划（资金）发

展“重大科学仪器”，通过制定长期规划、设定科学目标和资助领域、提供持续经费支持、建立良好组织模式、不断完善管理办法等，来保障科学仪器的良好可持续发展。如美国国家科学基金会（NSF）在2005年发布的《NSF 2020 愿景》中规划了未来15年的发展战略，其中将包括先进的仪器、设备、网络基础设施和尖端的实验能力在内的基础设施项目确定为三个战略重点之一；NSF将“人才、思想、工具、管理”作为四大战略目标，形成三大资助板块，对其中代表科学仪器的“工具”设立了“提供广泛可用的、世界领先水平的、共享的研究与教育工具”总体目标。

## 1.2 国内科学仪器研制

科学仪器在我国早期仅被简单地看作是科技发展的“支撑条件”，加上市场经济的冲击、国外仪器的涌入和国有体制的束缚，我国科学仪器产业在改革开放初期经历了低潮期，我国也未按国际惯例将科学仪器产业归入“高技术产业”。国家推行的“863”计划和“973”计划，其中科学仪器研究仅作为这些研究计划中的辅助工作，分散于各个项目中。与此同时，高水平科学仪器创新人才培养体系处在初级建设阶段，科学仪器研制工作普遍面临经费投入不足、研发与生产加工能力弱、高级技术人才培养乏力等问题。

近年来，随着国家对科技自主创新的需求，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》和《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2011—2030年）》等指导文件相继出台，明确提出要“重视科学仪器与设备对科学研究的作用，加强科学仪器设备及检测技术的自主研究开发”，我国逐步加大了对科学仪器设备自主研制的支持力度。

2006年，财政部组织国家重大科研装备研制试点项目，支持自主创新性仪器、设备或装置的研制，主要包括：（1）具有国际领先水平，能够促进基础研究、应用基础研究发展，明显提升实验手段、带动学科发展、开拓研究领域；（2）满足解决国家重大共性关键技术的战

略需求；（3）应用新原理、新技术，具有原始性、集成性创新特点，可获得自主知识产权，有推广应用前景，能够提升国家相关产业或行业的技术等级，产生明显的经济效益。

国家自然科学基金委员会（以下简称“基金委”）早期从国家自然科学基金中拿出部分专款资助科学仪器基础研究。2011年，基金委设立了国家重大科研仪器研制项目，旨在面向科学前沿和国家需求，以科学目标为导向，鼓励和培育具有原创性思想的探索性科研仪器研制工作，为科学研究提供新颖手段和先进工具，推动科技资源共享，全面提高我国科学研究原始创新能力。主要包括：（1）面向科学前沿和国家需求，促进科学发展、开拓研究领域具有重要作用的原创性科研仪器的研制；（2）通过关键核心技术突破或集成创新，用于发现新现象、揭示新规律、验证新原理、获取新数据的科研仪器的研制。

2011年，科技部启动了国家重大科学仪器设备开发专项；2016年，其被调整为国家重点研发计划重大科学仪器设备开发重点专项，专门用于支持重大科学仪器设备的开发，以提高我国科学仪器设备的自主创新能力和自我装备水平。该重点专项强调面向市场、面向应用、面向产业化，重点支持具有市场推广前景的重大科学仪器设备开发，主要包括：（1）基于新原理、新方法和新技术的重大科学仪器设备的开发；（2）基于已有重大科学仪器设备（装置）创新成果的工程化开发；（3）重要通用科学仪器设备（含核心基础器件）的开发。

中科院早在成立之初，就高度重视科学仪器设备研制工作，并专门设立加工制造中心，如沈阳科学仪器厂、北京科学仪器厂。自“八五”期间开始，中科院率先设立了科学仪器研制和改造专项，截至目前共支持仪器研制项目800余项，项目经费约20亿元。2002年，中科院发布《中国科学院“十五”科学仪器设备建设计划》，其中“中科院科学仪器设备专项计划”包括“择优支持”“共建共用”和“创新研制”3部分内容。

2010年,在科学仪器共用共享管理的基础上,增设了仪器设备功能开发项目,通过对现有仪器设备的功能开发和技术改进,拓展仪器设备的使用功能,提升仪器设备性能指标。目前,为贯彻落实“四个率先”目标要求,进一步提高中科院科学仪器设备的自主创新能力,促进原创性科技创新成果产出,引领我国科学仪器设备的自主研制和创新发展,中科院科学仪器设备研制项目采取研究所自由申请和中科院自上而下部署相结合的方式继续推进,并积极争取国家级重大项目的支持。

## 2 中科院科学仪器研制工作进展

经过多年的科学仪器研制工作积累,中科院的很多研究所已经在科学仪器方面培养了优秀的研发团队,形成了独特优势。2006年,以解决国家前瞻性科学研究和战略性重大需求为目标,中科院在财政部组织支持下试点国家重大科研装备研制项目,牵头组织了8个具有良好科研基础和仪器研发条件的团队,开展了深紫外全固态激光光源前沿设备、复现高超声速飞行条件的脉冲风洞等具有明显自主创新特点、意义重大的科研装备研制工作,并取得了重大科研创新成果。2011年,科技部、基金委启动千万元以上重大科学仪器研制项目,中科院主动布局,在院仪器研制前期培育项目的基础上,遴选出一批项目推荐到科技部和基金委,经评审、批准立项实施。随着承担的国家重大科学仪器研制项目相继验收,相关成果逐渐展现出来,主要体现在以下3个方面。

### 2.1 大力支撑前沿科学研究

中科院大连化学物理研究所在基金委国家重大科研仪器研制项目支持下,2017年初成功建成基于新一代极紫外高增益自由电子激光(大连相干光源)综合实验装置,这是世界上唯一运行在极紫外区域的自由电子激光用户装置。极紫外区域光源是探测原子分子及其外壳层电子结构最重要的光子能量区域,在能源、化学、物理学、环境、光刻技术等领域有着重要的应用前景,是独一无二的研究工具,有望产生世界领先的研究成果。相

干光源团队科学家已在中性水分子团簇的振动光谱、水分子的极紫外光解动力学等方面取得了重要进展,目前正在与国内外多个领域的科学家展开广泛的合作研究,向世界级的基础科学研究中心迈进。

中科院生物物理研究所承担的基金委国家重大科研仪器研制项目“光电融合超分辨生物显微成像系统”2016年通过验收。该系统首次实现了三维冷冻单分子定位超分辨成像与低温透射电镜融合成像、片层光超分辨成像与扫描电镜融合成像,可用于系统地研究生物分子机器在细胞内的分布、原位结构以及动态变化等,对生命科学前沿领域的发展具有重要意义。目前,应用该系统首次实现了荧光标记的哺乳动物细胞线粒体外膜蛋白的冷冻超分辨三维荧光成像与线粒体膜结构电镜图像的纳米精度融合成像;应用该系统诠释了“一个电压门控钾离子通道需要几个电压感受单元”这一重要生物学问题。

中科院紫金山天文台承担的基金委国家重大科研仪器研制项目“太赫兹超导阵列成像系统”于2017年通过验收。该项目研制了一台350  $\mu\text{m}$ 波段 $32 \times 32$ 像元超导阵列成像系统。该系统探测灵敏度达到地面观测设备背景极限,实现了我国太赫兹超导探测器阵列芯片技术“零”的突破,整体性能处于国际同类探测器系统的前沿水平;并且其将作为我国南极天文台5 m太赫兹望远镜DATE5的下一代主观测设备。这些新观测仪器使高红移富尘埃星系的探测和大规模亚毫米波连续谱巡天成为可能,可能为早期宇宙、星系形成以及恒星形成初始条件等研究领域带来前所未有的突破性进展。

中科院物理研究所牵头承担的财政部国家重大科研装备研制项目“综合极端条件实验系统”于2012年完成。该实验系统的核心是相互交叉的极低温、强磁场、超高压、超强激光、超快激光等极端实验条件,以及围绕这一核心集成的一系列适合于在极端条件下工作的外围实验支撑和测量系统。主要用于开展量子输运、量子自旋电子学、固态量子计算、极端相对论物理、高能量密度物理以及超快物理与化学过程等量子论、相对论方面的前沿研



究,并为发现量子反常霍尔效应等重要研究成果作出了贡献,有关应用实验结果被霍尔丹(F. D. M. Haldane)教授在其2016年诺贝尔物理学奖获奖演说中作为拓扑量子物质领域最重要的实验结果之一加以介绍。

中科院物理研究所牵头承担的财政部国家重大科研装备研制项目“超高分辨宽能段光电子实验系统”于2015年通过验收并投入使用。该系统是在上海光源同步辐射装置上建造的具有超高能量分辨率和超宽能段的光束线与光电子能谱—光电子显微镜双实验站的实验系统,是上海光源的“亮点”实验线站。其具有独特的设计理念和多项国际领先的设备指标,是目前世界上性能指标最高的光电子实验系统之一。系统投入运行以来,在实验证实固体材料中的奇异费米子、超大磁阻材料LaSb电子结构研究、光电子显微镜辅助实现石墨烯快速生长、实现准一维周期势调控石墨烯能带结构等方面取得多项重大突破,这些重大成果均发表在国际顶尖科学期刊上。该系统的建成不仅提升了我国利用光电子实验设备开展重大科学研究的实力,而且为我国尖端科研设备的协同研制积累了经验。

中科院国家天文台在财政部国家重大科研装备研制项目支持下,于2016年建成明安图射电频谱日像仪(MUSER)。该日像仪由100个天线单元组成三螺旋阵列,最大基线长度3 km,能在584个频率通道上以综合孔径成像方式对全日面进行快速频谱成像,具有在超宽频带上同时以高时间、空间和频率分辨率观测太阳的能力。MUSER的成功研制填补了太阳爆发能量初始释放区高分辨射电成像观测的科学空白,为研究太阳剧烈活动打开了一个全新的窗口,最大限度地保证了开展太阳物理相关科学研究的需要,将极大促进太阳物理、空间天气学的发展。

## 2.2 满足国家重大任务需求

中科院力学研究所承担的财政部国家重大科研装备研制项目“复现高超声速飞行条件的激波风洞”于2012年通过验收。相关成果鉴定委员会认为:“成

功研制了国际首座可复现飞行条件的超大型高超声速风洞,实现了风洞实验状态从‘模拟’到‘复现’的跨越,攻克了60年来久攻未破的世界难题,代表了国际高超声速风洞技术的领先水平。”复现风洞是世界上首次建成,对于21世纪宇航技术发展具有开创性影响,已成功应用于国家重大研究项目、航天部门多个任务的重大和特种试验,对专项关键技术突破、航天研发和气动规律认知发挥了不可替代的作用,在推动我国高超声速技术发展和避免飞行试验风险方面产生了重大社会效益。

在财政部、科技部仪器研发专项的支持下,中科院理化技术研究所研制出具有自主知识产权的系列化深紫外全固态激光光源(DUV-DPL)及前沿装备,充分利用我国独创的深紫外技术,打造了深紫外“晶体—光源—装备—科研—产业化”自主创新链,推动了我国大型科学仪器的发展,使我国在该领域的研究处于国际领先地位,目前深紫外全固态激光相关技术禁止出口。这些DUV前沿装备,为物理学、材料学、化学等学科领域研究提供了全新的探索手段,在新材料物性(高温超导、拓扑绝缘体、石墨烯、超宽禁带半导体、新型光刻胶等)、表面物理/化学动态原位反应、C—C $\sigma$ 键活化、小纳米体系激发等前沿领域获得了一批科研成果,在深紫外前沿探索中占据主动,使我国深紫外领域科研水平处于国际领先地位。

大型低温制冷系统广泛应用于航空航天、大科学工程、核磁共振、气体提纯和分离、激光点火、超导电力等领域,能源和环境安全(核废料处理、热核聚变等)、资源和国防安全(战略氦资源、聚能武器超导电磁炮等)、大科学装置(强流重离子加速装置、中国散裂中子源等)等领域对更低温区(液氢/超流氦)大型低温设备更是有着迫切需求,这关系到前沿科学、国家安全及高技术产业的发展,是国家战略高技术领域不可替代的核心平台技术。中科院理化技术研究所承担财政部仪器研制项目的支持下,先后成功实现了液氢温区和液氢/超流氦温区大型低温制冷设备的研制,性能指标达到国

际先进水平，逐步打破国外低温公司长期垄断国际低温市场的局面，具有重要意义。

中科院长春光学精密机械与物理研究所承担的财政部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”于2016年通过验收，成功研制了面积最大、精度最高的光栅刻划机，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，将有力支撑我国在 $193\text{ nm}$ 光刻、高分辨率对地观测等领域重大战略部署的实施，解决了我国光谱仪器“有器无心”的问题，实现了“中国光栅梦”。

中科院长春光学精密机械与物理研究所在财政部国家重大科研装备研制项目支持下成功研制出 $4\text{ m}$ 量级高精度SiC非球面反射镜集成制造系统，打破了国外在大口径非球面制造技术的垄断地位，形成了具备自主知识产权的 $4\text{ m}$ 量级大口径反射镜研制能力；已成功应用于多项国家重大型号项目及背景预研项目中，牵引出国家重大型号项目7项，总经费近50亿元。项目成果将持续应用于空间站多功能光学设施（未来国家空间站的标志性成果）、国家重点研发计划——“静止轨道高分辨率轻型成像相机系统技术”等一系列国家重大基础研究和工程项目研制，对我国的国防安全、基础科研、防灾减灾、公共安全、应急响应等领域具有重要战略意义。

中科院西安光学精密机械研究所在财政部国家重大科研装备研制项目支持下，建成了国内唯一的集设计、生产、检测为一体的条纹相机研发基地，成功研制出8种类型的条纹相机，在电子光学系统设计、高性能光电阴极制作、超快斜坡脉冲产生电路以及电子脉冲时空调制等关键技术上取得了系列突破，获得了数十项国家发明专利，并拥有完全自主知识产权。项目研制的条纹相机已经在我国的3个重大专项中得到应用，如中国工程物理研究院激光聚变研究、国防科技大学高超发动机燃

烧诊断从定性到定量转化研究、哈尔滨工业大学某重大专项某激光三维测绘系统研究。条纹相机的成功研制打破了国外封锁，使我国相关高精尖技术研究不再受制于人，已为国家大科学工程、基础前沿和国防安全提供了核心技术保障。

中科院地质与地球物理研究所牵头承担的财政部国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”于2017年通过验收。该项目依据矿产资源“攻深探盲”勘探流程中靶区优选、矿区勘查、矿体详查3个层面的技术需求，对卫星磁测载荷、航空超导全张量磁梯度测量装置、航空瞬变电磁勘探仪、探矿重力仪、多通道大功率电法勘探仪、金属矿地震探测系统、深部矿床测井系统、组合式海底地震探测装备8套深部资源探测装备开展了攻关研制，突破了深部探测装备传感器等核心技术，初步形成空间、地面、海洋、钻井立体探测装备体系，支撑了我国 $4000\text{ m}$ 深部资源探测，为“向地球深部进军”的国家战略提供了强有力的技术支撑。

### 2.3 引领高端仪器产业化

中科院武汉物理与数学研究所在科技部国家重大科学仪器设备开发专项“ $500\text{ MHz}$ 超导核磁共振波谱仪的工程化开发”支持下，解决了600多个软硬件可靠性问题，核心技术具有完全自主知识产权；组建了武汉中科波谱技术有限公司。该公司与国际知名磁体供货商英国牛津公司合作生产超导磁体；并在瑞典设立探头研发中心，实现了超导核磁共振波谱仪全套技术和产品的国产化；所生产的谱仪已销售到全国各地，在化学、生物学、材料学等众多应用领域部分替代进口设备，每年为国家节省数千万美元外汇支出，目前已安装到位的用户有38家。项目通过产业技术合作，为我国大型科学仪器的国产化战略实施迈出了重要步伐，并带动了人口健康与医疗设备产业的快速发展，具有重要的社会价值和经济效益。

中科院西安光学精密机械研究所在科技部国家重大科学仪器设备开发专项“用于新型航空发动机性能提升

研究的飞秒激光设备研发”支持下，在国内率先研制出两代三类系列化（四轴/五轴/七轴）超快激光极端制造装备，并在航空、航天、汽车等领域实现了重大示范应用。依托成熟的“西光模式”，推动科学技术的成果转化，2015年先后孵化西安中科微精光子制造科技有限公司和深圳中科光子科技有限公司，建立了高端代加工服务、定制化产品服务、标准化产品销售、成果转移的多产品组合协同发展的商业模式，为电子行业提供指纹模块切割智能化全套生产线6条，销售设备40余台，代加工8万余件。

中科院高能物理研究所在科技部国家重大科学仪器设备开发专项“分布式动态放射性探测成像系统”项目支持下，针对国家在放射性材料及各种核废料的实时搜寻监测方面的需求，研发了具有高灵敏度射线成像功能、全方向射线自动定位功能、物理定位功能、数据通信功能、联网功能的分布式射线检测系统。该系统成功应用于国家大型重要活动安全检查和核安全监测，我国铀浓缩、核燃料后处理等重要核基地监测，核电站运行现场辐射热点分布探测，以及大科学装置放射性环境监测和评估等。通过与相关公司合作，产品化了三大类10余种系列产品，涵盖了核探测领域的3个应用方向（数值、核素、图像），其中伽马射线成像仪已在核电、核燃料、安保反恐、环境监测、放射物退役等诸多领域打开了市场。

中科院自动化研究所在科技部国家重大科学仪器设备开发专项“光电同步脑活动检测仪器开发”项目支持下，成功开发出融合了近红外光谱技术和脑电采集技术的光电同步检测系统。该系统应用到临床研究中，如癫痫儿童的认知功能研究、视觉障碍人群的脑功能研究、意识障碍患者脑功能研究、中风患者的神经反馈治疗、颅内出血检测以及神经调控下的脑活动等研究，在认知以及重大神经精神疾病的临床应用方面具有非常大的社会效益。

中科院武汉物理与数学研究所完成的基金委国家重大科研仪器研制项目“用于人体肺部重大疾病研究的磁共振成像仪器”，实现了人体肺部通气、微结构和气血

交换功能的定量、可视化探测，获得国内第一幅人体肺部MRI（核磁共振成像）影像，填补了国内肺部MRI的空白。研制仪器目前已成功应用于临床肺部MRI研究。随着社会发展对医用、科学研究用的影像仪器提出的更高要求，依托“中科武大·智谷”建设，项目团队与武昌区政府就推进高端医疗影像设备发展达成产业化项目、联合实验室、科创空间、龙头企业、院士工作站、高端战略论坛的“六个一”合作协议，预计于2020年完成人体肺部MRI仪首期5000万元的销售额。项目仪器的产业化还进一步获得中科院“弘光专项”的支持。另外，通过与上海联影公司、武汉大学中南医院及武昌区政府对接，打造“中科联影医学影像联合实验室”，为该项目仪器的产业化进一步提供了技术升级等有力支持。

中科院广州生物医药与健康研究院承担的财政部国家重大科研装备研制项目“全自动干细胞诱导培养设备研究”于2018年通过验收，是具有自主知识产权的，集自动化培养、显微在线观测、识别算法及自动克隆挑取功能于一体的，国际上首台全自动、大规模、规范化诱导及扩增的干细胞诱导生产系统。设备可利用隐马尔可夫模型完成对iPSC（诱导性多能干细胞）诱导过程的预测，并引导自动化选择iPSC克隆；对识别的克隆通过可以产生剪切力的钢制针头进行高精度挑取；减少了人为干预，可实现多人份、低成本、高品质、一体化的干细胞生产，社会效益巨大。设备的成功研制将促进iPSC在再生医学研究领域的实际应用，推进我国在干细胞装备领域的自主研发进程，推动我国干细胞基础研究和临床应用的快速发展，为干细胞再生医学及精准医疗的研究奠定基础。

中科院过程工程研究所在财政部国家重大科研装备研制项目“高效能低成本多尺度离散模拟超级计算应用系统”支持下，2010年正式发布完整体现EMMS（能量最小多尺度）计算范式的双精度千万亿次超级计算系统Mole-8.5，这是当时世界上最绿色的千万亿次系统。系统已服务于10余家世界500强企业的研发过程，其

中包括中石化、中石油、宝钢、神华等国内领军企业和壳牌、英国石油、道达尔、巴斯夫、通用电气、阿尔斯通、法国电力、联合利华、必和必拓等跨国产业巨头。在不久的将来，虚拟过程工程平台的研发将进入实用化阶段，下一代基于EMMS范式的超算系统的研制也提上日程，其建立将更加有力地推动过程工程的发展和过程工业的技术进步。

### 3 结语

党的十九大报告提出要“加强应用基础研究，突出关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠

覆性技术创新”，科学仪器作为应用基础研究的工具和技术创新的载体，自主研制将为解决我国关键核心技术受制于人的问题，促进科学仪器产业技术进步和创新，推动经济和社会发展发挥关键作用。经过多年的发展，中科院的科学仪器研制工作通过国家、院和研究所等多渠道支持，取得了一定的成效，但我国科学仪器相关产业基础薄弱，只有进一步加大投入、聚焦重点，实施科技政策、产业政策、财税政策、人才政策等系统规划、整体联动，才能扭转进口仪器设备占据市场主流的不利局面。