

角分辨光电子能谱仪器搭建的成本分析与方案优化

王 瑜¹ 董敬伟²

1.大连市自来水集团有限公司 辽宁 大连 116000

2.中国科学院大连化学物理研究所 辽宁 大连 116023

【摘 要】：角分辨光电子能谱（ARPES）仪器作为表征材料电子能带结构的核心设备，其不仅在基础科研领域意义重大，更对国家经济发展具有多维度推动作用，其影响涵盖技术创新、产业升级、国际竞争力提升等多个关键领域。因此，搭建 ARPES 设备既是推动前沿科学探索的“利器”，也是提升国家科研硬实力与战略竞争力的关键支撑。但是搭建方案的经济性直接影响科研投入效益与技术推广可行性。文章系统分析自行搭建、采购国内产品、采购国外产品三种方案的工程造价构成，通过初始成本、运维成本、时间成本、性能匹配度等参数对比，结合典型案例验证不同方案的适用场景。研究表明，国内产品在性价比上优势显著，自行搭建适合高端定制化需求，国外产品则需承担额外关税与技术服务成本。研究结果可为科研机构根据自身需求选择最优搭建方案提供量化参考。

【关键词】：科研仪器；设备搭建；成本分析；方案优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.084

1 引言

角分辨光电子能谱技术通过测量光电子的能量与动量分布，可直接获取材料的电子能带结构、费米面形态等关键信息，在高温超导、拓扑绝缘体、量子霍尔效应等前沿研究中具有不可替代的作用^[1]。ARPES 不仅是研究材料电子信息的核心工具，而且对国家经济发展具有多维度的推动作用，涵盖技术创新、产业升级、国际竞争力提升等关键领域。例如，中国在深紫外固态激光源领域的突破，不仅使我国成为全球唯一能制造实用化深紫外全固态激光器的国家，还带动了 KBBF 晶体等核心材料的小批量生产，并推动了拓扑绝缘体、高温超导体等前沿材料的研究。这些成果直接促进了新能源、半导体等产业的技术迭代。美国安普瑞斯公司利用 ARPES 对硅纳米线负极材料的电子结构分析，成功商业化生产高能量密度锂电池，其产品在航空、无人机等领域广泛应用，并获得国际资本青睐（如赛富投资基金、谷歌董事长施密特等注资）。而我国上海科技大学建成的 NanoARPES 实验站，将光斑缩小至纳米级，为量子材料和量子器件研究提供了关键平台，直接支持了我国在 3 nm 及以下先进制程中的界面光刻动力学研究。ARPES 技术通过基础研究突破—产业应用—经济价值转化的链条，成为国家经济发展的重要驱动力。其在直接的技术创新和产业升级、构建高端人才储备、国际合作网络、创新生态、以及为长期经济增长提供持续动力方面都发挥着重要作用。未来，随着量子材料、新能源等领域的技术迭代，ARPES 的经济价值将进一步

凸显，成为国家在全球科技竞争中的关键筹码。

虽然随着科学研究的蓬勃发展，ARPES 仪器的需求持续增长，但其高昂的造价与复杂的技术构成成为制约普及的重要因素。目前，ARPES 仪器搭建主要存在三种路径：科研团队自行搭建、采购国内厂商产品、采购国外品牌产品。不同方案在成本构成、性能指标、运维难度等方面存在显著差异。例如，自行搭建需承担研发风险与长周期投入，而采购成品仪器则面临关税、技术服务等附加成本^[2]。因此，对不同方案的工程造价进行系统分析，明确各环节成本占比与影响因素，对优化科研设备投入结构、提高资金使用效益具有重要现实意义。本文基于国内近年来 ARPES 仪器的采购与研发案例，构建工程造价分析框架，从初始投入、长期运维、时间成本、性能适配性四个维度对比三种方案的经济性，旨在为科研机构提供科学的决策依据。

2 ARPES 仪器的核心构成与造价影响因素

2.1 核心技术模块

ARPES 仪器的核心构成包括：真空系统（超高真空腔体、真空泵组）、光源系统（氦灯、激光光源、同步辐射接口）、电子能量分析器（半球形分析器、时间飞行分析器）、样品操控系统（低温样品台、多轴定位装置）及数据采集与控制系统^[3]。其中，电子能量分析器的分辨率（通常要求优于 10 meV）、光源的单色性（线宽 <1 meV）、真空系统的极限压力（<1×

作者简介：王瑜（1996-），女，汉族，辽宁省大连市人，硕士研究生，大连市自来水集团有限公司，工程师，研究方向为：工程造价。

董敬伟（1991-），男，汉族，黑龙江省绥化市人，博士研究生，中国科学院大连化学物理研究所，副研究员，研究方向为：凝聚态物理。

10-10 mbar) 是决定仪器性能的关键指标, 也是造价差异的主要来源。

2.2 造价影响因素

若仅统计已公开报道或完成验收的单位, 截至 2025 年国内拥有 ARPES 设备的高校/研究机构已遍布国内多个城市。为方便分析, 按“光源线站”和“实验室自建”两大类列出代表性单位, 并给出已公开的设备类型或特色指标, 具体信息介绍如下所示。

(1) 同步辐射光源 ARPES 线站

中国科学技术大学(合肥光源)——ARPES 实验站, 2011 年试运行

中国科学院上海高等研究院(上海光源)——多条常规 ARPES 线站+纳米 ARPES 实验站(国内首台, 2021 年上科大承建)

中国科学院高能物理所(北京同步辐射)——X 射线 ARPES 光束线

(2) 高校/研究所自建 ARPES 实验室

表 1 部分国内高校/研究所自建 ARPES 实验室信息

单位	机型/特色	备注
复旦大学	激光 ARPES	封东来院士组
清华大学	激光 ARPES	物理系
上海交通大学	极低温 ARPES	费勉仪器交付
上海科技大学	激光 ARPES	物质学院
中科院物理所	高次谐波 ARPES	周兴江组
中科院大化所	高次谐波 ARPES	周传耀组
北京理工大学	国产 ARPES 系统	华萃仪器交付
南京理工大学	国产 ARPES 系统	华萃仪器交付
南京大学	真空互联 ARPES	物理学院
中山大学	真空互联 ARPES	费勉仪器交付
武汉大学	氦灯 ARPES	文理学部
浙江大学	氦灯 ARPES	材料学院
重庆大学	真空互联 ARPES	费勉仪器交付

ARPES 设备作为探究材料电子结构的尖端仪器, 其搭建过程中的造价受到多种复杂因素的交织影响。上述单位在搭建该设备时主要遇到以下四大造价影响因素, 每一项背后都蕴含

着深刻的技术原理、产业规律和科研实践逻辑, 值得进行深入且系统的剖析。这对加强国内在 ARPES 设备核心技术和部件方面的研发, 突破技术壁垒, 降低对进口部件的依赖, 从而降低设备的造价, 推动我国在材料科学等领域的研究具有极其重要的意义。

技术壁垒: 电子能量分析器的精密机械加工与真空系统的密封技术存在较高壁垒, 国内厂商近年来虽实现突破, 但高端产品仍部分依赖进口核心部件^[4]。例如, 半球形能量分析器的两个半球之间的间隙必须控制在微米级别, 且半球的曲率半径误差不能超过 0.1%, 否则会严重影响能量分辨率。要达到这样的加工精度, 需要采用超精密磨削、抛光等先进制造技术, 而国内在这些技术领域起步相对较晚。虽然近年来国内厂商通过技术攻关实现了一定的突破, 能够生产出满足基本科研需求的能量分析器, 但在高端产品上, 如用于探测超高能量分辨率(优于 1 meV)的分析器, 仍部分依赖进口核心部件。这是因为高端分析器的制造不仅涉及机械加工, 还需要结合先进的材料科学, 如采用超低膨胀系数的合金材料来减少温度变化对结构的影响, 而国内在这类特种材料的研发和生产上还存在短板。这种技术上的差距直接导致了高端核心部件的进口依赖, 进而推高了设备的造价。因为进口部件的生产厂商凭借其技术垄断地位, 往往会制定较高的价格, 而国内厂商由于技术储备不足, 难以在短时间内实现替代, 只能被动接受高价。此外, 真空系统通常要求真空度达到 10-10 mbar 以上, 以避免空气中的分子与光电子发生碰撞, 影响测量结果的准确性。要实现这样的超高真空, 真空系统的密封性能至关重要。从技术层面来说, 密封材料的选择、密封结构的设计以及加工工艺都需要达到极高的标准。例如, 密封垫圈需要采用具有良好弹性和耐腐蚀性的金属材料, 如无氧铜, 并且其表面粗糙度要控制在纳米级别。同时, 密封结构的设计要考虑温度变化、机械振动等因素对密封性能的影响。国内厂商在真空密封技术上虽然取得了一定的进步, 但在长期稳定性和极端条件下的密封性能方面, 与国外顶尖厂商相比仍有差距。为了保证设备的性能, 部分国内科研单位在搭建 ARPES 设备时, 不得不采用进口的真空密封部件, 这无疑增加了设备的造价。而且, 由于真空系统是一个整体, 某一个部件的密封性能不达标就可能影响整个系统的真空度, 因此在选择部件时往往采用高标准的产品, 进一步提高了成本。

供应链成本: 国外品牌的核心部件(如德国 SPECS 的分析器、美国 Kimball Physics 的电子枪)进口需承担关税(15%—25%)、增值税(13%)及国际运输费用(约占设备总价的 5%—8%)^[5], 这与不同国家的贸易政策以及部件的具体类别有关。从国际贸易的角度来看, 一些国家为了保护本国的高端制造业, 会对进口的高科技部件征收较高的关税, 这在一定程

度上增加了进口成本。增值税作为一种流转税,13%的税率是固定的,但由于进口部件的价格较高,其增值税的绝对金额也相当可观。国际运输费用约占设备总价的5%—8%,这部分费用受到运输距离、运输方式、部件重量和体积等多种因素的影响。例如,从德国运输一台大型电子能量分析器到中国,采用海运虽然运费相对较低,但运输时间长,且需要考虑货物的保险和装卸费用;而采用空运则运费高昂,但能缩短运输时间。对于 ARPES 设备这种精密仪器,运输过程中的振动、温度变化等因素都可能对部件的性能产生影响,因此往往需要采用特殊的包装和运输方式,这进一步增加了运输成本。此外,供应链的稳定性也会对成本产生间接影响。国外核心部件的供应可能会受到地缘政治、自然灾害等因素的影响,导致交货延迟。为了避免因部件短缺而影响设备搭建进度,科研单位可能需要提前储备一定数量的部件,这就增加了资金的占用成本。同时,一旦供应链出现中断,寻找替代部件需要花费大量的时间和精力,甚至可能需要对设备的设计进行修改,这无疑会进一步推高造价。例如,在全球疫情期间,许多国外厂商的生产和运输受到严重影响,导致国内部分科研单位进口的 ARPES 核心部件交货延迟,不仅影响了设备的搭建进度,还因为需要重新安排生产计划而增加了成本。

服务成本: 仪器安装调试、技术培训及后续维护的服务费用差异显著,国内厂商的本地化服务成本通常仅为国外品牌的1/3-1/2。从技术角度来看,ARPES 设备的安装调试需要专业的技术人员,他们需要熟悉设备的各个部件的工作原理和调试方法,能够精确地调整设备的光路、电路等参数,以确保设备达到最佳的性能。国外品牌由于其设备技术相对成熟,且在全球范围内有较为完善的服务网络,其技术人员往往具备丰富的经验,但这也导致了其服务成本较高。例如,国外厂商的技术人员可能需要从国外专程赶来进行安装调试,这期间的差旅费、住宿费等都需要计入服务成本,同时其技术人员的工时费也相对较高。国内厂商的本地化服务则具有明显的成本优势。国内厂商的技术人员能够更快速地响应客户的需求,减少了因远距离运输而产生的费用。同时,国内的劳动力成本相对较低,技术人员的工时费也低于国外厂商。此外,国内厂商在技术培训方面更能贴合国内科研人员的需求,能够根据实际情况制定更具针对性的培训方案,提高培训效率,降低培训成本。在后续维护方面,国内厂商能够更及时地提供维修服务和更换部件,减少了设备的停机时间,降低了因设备故障而造成的损失。例如,当设备出现故障时,国内厂商的技术人员可以在较短的时间内到达现场进行维修,而国外厂商的技术人员可能需要较长的时间才能赶到,这期间设备无法正常工作,会影响科研进度。

研发周期: 自行搭建的研发周期通常为2—5年,在这漫

长的过程中,人员投入与设备调试成本累积较高。从科研实践来看,自行搭建设备需要组建一支专业的研发团队,包括物理学家、材料学家、机械工程师、电子工程师等多个领域的专家。这些人员的薪酬、福利等是一笔不小的开支,而且在研发过程中,还需要不断地进行实验和测试,这就需要消耗大量的原材料和能源。设备调试是一个反复迭代的过程,需要不断地调整设备的参数,解决出现的各种问题。例如,在调试电子能量分析器时,可能会遇到能量分辨率不达标的问题,这就需要技术人员花费大量的时间去查找原因,可能是机械结构的精度问题,也可能是电路设计的问题,每一次调整都需要重新进行实验验证,这不仅增加了时间成本,也增加了材料和能源的消耗。而成品采购的安装周期仅为1-3个月,大幅缩短了设备投入使用的时间。成品设备已经经过了厂商的严格测试和调试,其性能已经得到了验证,采购方只需要进行简单的安装和调试就可以投入使用。这不仅减少了研发过程中的人员投入和设备调试成本,还能够让科研单位更快地利用设备开展科研工作,提前获得科研成果,从而在一定程度上降低了时间成本。例如,某科研单位如果选择自行搭建 ARPES 设备,可能需要5年时间才能投入使用,而如果选择采购成品设备,可能在3个月内就可以开始进行实验,这期间可以开展大量的科研工作,产生的科研价值是难以用金钱来衡量的。

综上所述,ARPES 设备搭建过程中的造价受到技术壁垒、供应链成本、服务成本和研发周期等多方面因素的影响。这些因素相互交织,共同决定了设备的最终造价。在实际的科研实践中,科研单位需要综合考虑这些因素,根据自身的科研需求、技术实力和资金状况,选择最适合的设备搭建方式,以最小的成本获得满足科研需求的设备。

3 三种搭建方案的工程造价对比

3.1 初始成本对比

(1) 自行搭建方案: 初始成本主要包括零部件采购(60%—70%)、研发人员薪酬(20%—25%)、场地与公用设施改造(5%—10%)。以高次谐波 ARPES 系统为例,其核心部件中,真空腔体(国产,约80万元)、电子分析器(进口,约180万元)、高次谐波光源(自研与进口结合,约220万元)占总投入的65%,研发团队(5人×3年)薪酬约150万元,总初始成本达720万元^[6]。该系统的时间分辨率达到了国际领先性能,但研发周期长达4—5年。

(2) 国内产品方案: 国内厂商(如费勉仪器、聚光科技)通过核心部件国产化降低成本。例如,费勉仪器提供的超高分辨 ARPES 系统(能量分辨率 $\leq 8\text{meV}$),包含真空系统、氦灯光源、六轴样品台及控制系统,标价385万元,较同性能国外产品低40%^[7]。其成本构成中,自研分析器(约120万元)、

国产真空部件（约 80 万元）占比达 52%，显著降低对进口部件的依赖。

（3）国外产品方案：国外主流品牌（Scienta Omicron、SPECS、VG Scienta）的 ARPES 系统初始成本显著较高。以 Scienta Omicron ARPES Lab 系统为例，包含 R4000 分析器（能量分辨率 $\leq 10\text{meV}$ ）、极紫外激光光源及低温样品台，合同价 749.95 万元，其中关税与增值税合计约 187 万元，占总价的 25%^[8]。若涉及定制化功能（如极低温样品环境），价格可升至 900 万-1200 万元。

3.2 运维成本对比

运维成本按年度计算，主要包括备件更换、真空系统维护、软件升级及技术服务等。

自行搭建方案：依赖内部技术团队，备件更换成本较高（进口分析器核心部件单次更换约 15 万-20 万元），年度维护成本约为初始成本的 8%—10%（如 720 万元系统年运维费约 58 万-72 万元）^[6]。

国内产品方案：本地化服务降低成本，费勉仪器提供的年度维护套餐（含真空腔体检漏、分析器校准）费用约为初始成本的 5%—6%（385 万元系统年运维费约 19 万-23 万元），且备件更换周期短（国产部件 1-2 周，进口部件 3~4 周）^[7]。

国外产品方案：年度维护费用约为初始成本的 12%—15%（750 万元系统年运维费约 90 万元-112 万元），且技术响应周期长（国外工程师到场平均需 2-4 周），停机损失较大^[8]。

3.3 时间成本对比

时间成本体现为从方案启动到仪器正常运行的周期：

自行搭建：需经历方案设计（6-12 个月）、部件采购（3-6 个月）、组装调试（12-24 个月），总周期 2-5 年，且存在因技术瓶颈导致延期的风险^[6]。

国内产品：标准化产品交货周期 3-6 个月，安装调试 1-2 个月，总周期 4-8 个月；定制化产品周期延长至 12-18 个月^[7]。

国外产品：标准型号交货周期 6-9 个月（含海运与清关），安装调试 2~3 个月，总周期 8-12 个月；定制型号需 18-24 个月^[8]。

3.4 性能匹配度与隐性成本

自行搭建：可针对性优化性能（如上海交通大学自研系统实现 0.4meV 能量分辨率），但需承担研发失败风险（据统计，约 30% 的自行搭建项目因核心技术未突破导致性能不达标）^[9]。

国内产品：基本满足常规研究需求（能量分辨率 $10-20\text{meV}$ ），但极端条件（如 $<1.5\text{K}$ 低温、高真空环境）适配性仍待提升，隐性成本主要体现在功能扩展时的二次开发费用^[7]。

国外产品：性能稳定性高（长期使用分辨率漂移 $<2\text{meV/年}$ ），但软件接口封闭，与国内自研辅助设备（如原位生长系统）的兼容性需额外付费解决，隐性成本约占初始成本的 5%—8%^[8]。

4 案例验证与适用性分析

针对三种搭建方案，表 2 给出了国内三家不同科研单位中 ARPES 设备的搭建成本和性能指标。

表2 国内三家科研单位的 ARPES 设备搭建成本和性能指标对比

单位	搭建方案	搭建总价	搭建周期	维护费用	性能指标
中科院物理所	自行搭建	720 万	5 年	80 万	可优化，存风险
中山大学	国内产品	635 万	1 年	30 万	基本满足需求
武汉大学	国外产品	770 万	1.5 年	90 万	性能好，隐形成本

4.1 自行搭建案例：中科院物理研究所的高次谐波 ARPES 系统

该系统针对超快时间分辨需求，采用自研高次谐波光源（20-60 eV 可调）与进口电子分析器，总投入 720 万元，研发周期 5 年。其时间分辨率达 120fs，成功观测到拓扑绝缘体表面态的动态演化，适合对极端性能有需求的国家级实验室，但成本是同功能国内产品的 2.1 倍^[6]。

4.2 国内产品案例：中山大学的费勉 ARPES 系统

采购费勉仪器的 ARPES 系统（含 MBE 原位生长模块），总价 635 万元，较国外同类产品节省 42%。系统运行 3 年来，完成铋硒拓扑绝缘体的能带测量等 20 余项实验，平均故障修复时间 <48 小时，适合高校及地方科研院所的常规研究^[10]。

4.3 国外产品案例：武汉大学的 Scienta Omicron 系统

采购价 770 万元（含关税 132 万元），主要用于高温超导体的精细能带研究。系统能量分辨率长期稳定在 8meV ，但 2023 年一次分析器故障导致停机 3 周，维修费用达 68 万元，适合对性能稳定性要求极高的国家级大科学装置^[11]。

5 结论与建议

5.1 研究结论

通过对比角分辨光电子能谱仪器搭建过程中涉及的各项参数与指标,得出以下结论。首先是成本结构差异:国外产品的初始成本最高(750万-1200万元),且关税与服务成本占比达30%—40%;国内产品初始成本最低(300万-650万元),运维成本仅为国外产品的1/3-1/2;自行搭建初始成本中等(600万-850万元),但时间成本与风险成本显著较高。再者适用场景分化:自行搭建适合追求极端性能(如<100fs时间分辨率)的顶尖研究团队;国内产品适合预算有限、需快速开展实验的高校与地方院所;国外产品适合对稳定性要求苛刻、资金充足的国家级平台。最后是经济性排序:常规研究中,国内产品性价比最优;高端定制化研究中,自行搭建虽成本高但可突破技术限制;国外产品仅在特定高稳定性需求场景下具有不可

替代性。

5.2 优化建议

预算导向选择:年度科研经费<500万元的机构,优先选择国内标准化产品;经费充足且需极端条件的团队,可考虑“国内核心模块+进口关键部件”的混合搭建模式,平衡成本与性能。运维成本控制:采购时需明确5年运维套餐包含的服务内容,国内产品建议预留初始成本的5%/年作为运维资金,国外产品需预留12%—15%。国产化支持:建议科研机构与国内厂商联合开展定制化开发,通过“用户需求反馈-厂商技术迭代”的良性循环,推动国内ARPES仪器在极端条件适配性等短板上的突破。

综上所述,本研究通过量化分析为ARPES仪器搭建提供了经济性评估框架,后续可进一步结合不同研究领域的性能需求阈值,建立更精细化且与时俱进的成本-效益模型。

参考文献:

- [1] 刘畅,刘祥瑞.强三维拓扑绝缘体与磁性拓扑绝缘体的角分辨光电子能谱学研究进展[J].物理学报,2019,68(22):227901.
- [2] 中国政府采购网.重庆大学角分辨光电子能谱仪真空系统采购中标公告[EB/OL].(2024-12-24).
- [3] Damascelli A,Hussain Z,Shen Z X.Angle-resolved photoemission spectroscopy studies of the cuprate superconductors[J].Rev.Mod.Phys.,2003,75(2):473.
- [4] Lv,B.,Qian,T.&Ding,H.Angle-resolved photoemission spectroscopy and its application to topological materials[J].Nat Rev Phys.,2019,1,609 - 626.
- [5] 中华人民共和国海关总署.2025年关税调整方案[Z].2025.
- [6] 中国科学院物理研究所.国内首台高重频高通量高次谐波超快角分辨光电子能谱仪搭建完成并实现应用[EB/OL].(2021-08-05).
- [7] 中国政府采购网.极低温超高分辨 ARPES 实验站主机系统中标公告[EB/OL].(2023-03-17).
- [8] 中国政府采购网.浙江省国际技术设备招标有限公司关于浙江大学角分辨光电子能谱仪的中标结果公告[EB/OL].(2022-12-21).
- [9] Duan S F,Li Y D,Yang L X,Zhang W T.High-performance time-and angle-resolved photoemission spectroscopy studies on quantum materials[J].Science China Physics,Mechanics&Astronomy,2023,66(6):267013.
- [10] 中山大学分析测试中心.多功能光电子能谱仪 ESCALAB Xi+[EB/OL].
- [11] 武汉大学.自旋 ARPES-STIM-MBE 联合系统[EB/OL].