基于创新链模型的民机制造关键装备突破路径研究

李晋章，张虎翼，邢宏文，周光哲

（上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所，上海 201326）

摘要：基于民机制造关键装备内涵及特点构建创新链模型，分析其产业化障碍及突破路径。首先，对民机制造关键装备内涵及特点进行分析，构建民机制造关键装备创新链模型。然后，根据创新链模型发展逻辑，对民机制造关键装备产业化障碍进行分析，提出由用户企业牵头引入并完善首台（套）鉴定体系。最后，从整合资源、协同联动、产业生态构建及政策支撑4个维度，提出民机制造关键装备发展具有针对性和可操作性的政策建议。

关键词：民机制造；生产装备；装备鉴定；创新链

中图分类号：G311 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)11－0114－05

当前，世界航空工业正在发生深刻变革，大国博弈与技术封锁交织，民机制造领域已成为国家综合实力与战略安全的必争之地。推动中国民机制造产业链升级，正遭遇严峻的装备瓶颈制约。产业链上游高端材料制备装备、中游核心部件制造装备以及下游智能化总装集成装备仍依赖进口。这些装备不仅价值高昂、供应受制于人，其技术“黑箱”更严重阻碍工艺创新与迭代速度，成为制约民机性能提升、成本优化与产能爬坡的关键痛点。尽管国内已投入大量资源进行关键装备研发，但产品在稳定性和精度方面还有差距，导致从研制到产业应用脱节，整体研发和产业化进程缓慢。

当前针对关键装备的研究主要聚焦高端装备的研发障碍分析、突破路径及实践案例，侧重技术自主性与供应链安全。王昶等[1]提出，国产装备面临“不愿用、不敢用、不好用”3大难题，其根源主要在于用户单位的刻板印象、高昂的转换成本及整体技术生态不完善。郑达敏等[2]通过对比国产与进口装备参数，得出国产装备在稳定性与工艺精度上仍存在差距，强调了装备性能对标的重要性。张冰等[3]构建了涵盖通用基础、研制生产、检测评价的国产集成电路装备验证标准体系，提出通过验证线平台降低首台（套）应用风险。关键[4]以LNG（液化天然气）接收站、储气库装备为例，论证了国产化在降本增效、供应链安全方面的价值，并强调需通过“试点示范＋标准固化”提升装备可靠性。然而，民机制造关键装备在形势上是非常紧迫的，需要将关键装备产业化置于创新链全流程的系统分析。

实现民机制造关键装备突破，不仅需要长期投入大量的资源，还要整合产业链优势力量协同攻关。高校、科研院所擅长基础研究与技术创新，企业在应用验证、工程化推广具有优势，整合高校、科研院所和企业的创新资源，形成科技创新完整链条，才能实现产学研用深度协同。杨忠等[5]认为，在开放创新背景下，单靠任一创新主体都难以实现重大创新，必须整合多方创新资源协同攻关，提出创新链是以市场需求为导向、多主体参与的价值创造过程。陈云等[6]提出“底座刚性-运行柔性-风险韧性”三维目标模型，强调创新链须具备基础支撑能力、动态适应能力和抗风险能力。杨忠等[7]揭示了领军企业在创新链中的主导作用，提出创新链、产业链、资金链、政策链4链融合和产学研用协同是实现高质量创新链的核心路径等。因此，面向民机产业链升级，基于创新链理论针对民机制造关键装备突破路径进行研究具有重大意义。首先构建“创新链-关键装备”耦合模型，用以系统分析关键装备产业化障碍；然后，设计首台（套）鉴定流程，明确设计方、制造方、使用方在鉴定中的角色与协作机制；最后，提出具有针对性和可操作性的政策建议，旨在为民机制造关键装备的产业化推广提供决策支持。

收稿日期：2026-03-17

作者简介：李晋章（1995—），男，河南浚县人，硕士，工程师，研究方向为关键装备鉴定、技术创新管理；张虎翼（1986—）男，河南渑池人，博士，研究员，研究方向为科技创新平台搭建及科研创新体制机制建设；邢宏文（1984—），男，湖北枣阳人，硕士，研究员，研究方向为先进装备工程技术、智能制造；周光哲（1993—），男，山东济南人，硕士，高级工程师，研究方向为特种加工技术。

1 民机制造关键装备的内涵及其创新链模型

1.1 民机制造关键装备的内涵

民机制造关键装备是指对飞机结构完整性、安全性、经济性及生产效能产生决定性影响的专用制造设备、生产线及核心工艺装备。其价值远超普通生产设备,是先进材料转化、复杂结构成形与高精度智能装配的核心载体,直接决定了飞机的性能边界与制造竞争力。其内涵可概括为以下几点。

(1)承载核心工艺。它们直接执行对飞机安全性和性能至关重要的制造工艺,如大型结构件精密加工等。装备的性能直接决定了最终产品的关键质量特性。

(2)质量与安全的基础。民机对安全性和可靠性的极端要求,使得其制造过程必须具有极高的稳定性和一致性。关键装备是实现这种稳定性和一致性的物理基础和技术保障,是满足严格适航要求的关键环节。

(3)生产效率和成本的决定因素。现代民机制造追求高效率和低成本。关键装备的自动化、智能化水平和稳定性直接影响生产节拍、产能、良品率和运营成本。先进装备是实现规模化经济生产的关键。

(4)技术壁垒与核心竞争力的体现。关键装备通常融合了多学科技术,研发难度大,投入成本高,构成了深厚的产业技术壁垒,是衡量一个国家或企业航空制造核心竞争力的关键标志。

根据民机制造关键装备的内涵可以得出,其具有以下特征。

(1)在生产中的核心地位与不可替代性。关键装备处于生产流程的核心环节,对产品的进度、质量、产量有直接决定作用,并且通常没有有效的替代设备或替代成本极高,一旦缺失或失效,将直接导致生产中断、质量失控乃至安全风险。

(2)技术与运行的高复杂性和严苛要求。关键装备往往技术复杂、精度要求高,其稳定运行高度依赖专业的操作规范、精密的监测系统以及完善的维护保障体系。

(3)高价值与高风险影响。关键装备购置成本高,对企业生产效益和市场竞争力影响显著;其故障可能引发生产中断、质量事故或安全风险,带来重大经济损失。

1.2 民机制造关键装备创新链模型

创新链描述了科技成果从基础研究到产业应用的价值实现过程,通常是围绕某一创新核心主体,通过一系列创新活动将成果推向商品化,过程中将不同主体连接在一起所形成的链式结构。

基于此,民机制造关键装备创新链模型可从结构与主体两个维度解析。在结构维度,其核心活动环节包括基础研究、应用验证与产业化推广、资源整合。基础研究是创新链的源头,提供原创性技术原理或科学发现。应用验证是将基础研究成果转化为可工程化、可商业化的原型产品或技术方案的过程,包括概念验证、中试熟化等环节。产业化推广是将成熟技术转化为规模化商品,并通过市场渗透实现经济价值与社会价值的过程。资源整合作为创新链的引擎,为上述各环节跨主体配置资金、人才、技术、政策等要素,提供基础支撑。各环节紧密关联,任一环节的突破都可能触发新的创新循环。

在主体维度,创新链涉及高校、科研院所、企业、政府等多元主体。一条完整的创新链是由“链长”“链”和“链上的主体”三者构成的统一体。其中链长具有支配引导创新链系统发展方向的能力,链上的主体则处于不断发展和演化的过程中,因此创新链并不是一直保持在初期的形态,而是处于动态演变过程中,不断向新的平衡和稳定状态靠拢。在创新链不同阶段,各主体作用各有侧重。基础研究阶段以高校为主要力量,应用验证阶段以科研院所和企业为核心,产业化推广阶段则由企业发挥主体作用。政府主要通过制定政策法规、搭建创新平台、优化营商环境等方式,为创新链的稳定运行提供支撑与保障。随着创新进程深入,企业的创新主体地位日益突出,更需坚持以市场为导向、以企业为主体,协同各创新成员实现创新目标。民机制造关键装备创新链模型如图1所示。

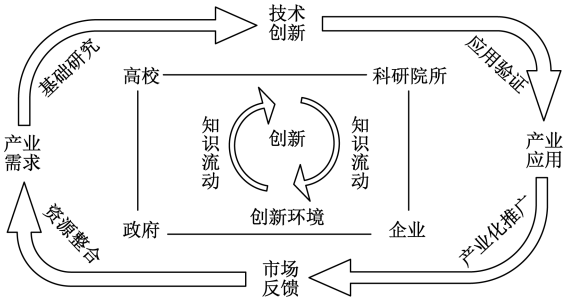


图1 民机制造关键装备创新链模型

2 民机制造关键装备产业化障碍分析及突破路径

推动民机制造关键装备产业化突破,需超越高校、科研院所与企业间简单的项目合作,迈向涵盖

创新协作、知识流动与技术转移的深度融合。首先基于创新链模型，系统分析民机制造关键装备产业化的主要障碍；进而，针对这些障碍，设计并提出一套首台(套)装备鉴定流程，旨在打通从研发到产业应用的路径，最终实现关键装备的产业化突破。

2.1　民机制造关键装备产业化障碍分析

从民机制造关键装备创新链模型可以看出，民机制造关键装备的研发主体主要包括高校、科研院所、国企和民营企业。对于市场规模小、国外禁运且研发投入大的装备，主要以高校或科研院所研发为主体，如复材铺丝机等。这类机构装备研发主要以项目为形式，以科研论文为导向，以完成任务书中的装备性能指标为结题目标，而对于生产中常见的精度保持、系统稳定性和可靠性等工程化应用关键问题的研究不深入。在研发团队的专业配置和科研、质量管理体系上也有所不足。在售后服务方面，也缺乏持续解决客户工程实践问题的长效机制，导致后续产品市场化推广困难。

对于市场规模较大、国外目前没有禁运，能够通过逆向工程而制造的装备，主要以企业为研发主体。这类装备大多数是以市场化的形式来运作，作为研发主体的企业，其研发管理和质量管理体系相对完善，能提供一定程度的售后保障。但其研发多基于逆向工程，缺乏先进的正向设计手段与深层技术洞察，导致对部分基础技术环节掌握不牢，使得装备在综合性能、可靠性及稳定性方面与国际先进水平存在差距。由于价格、售后服务有优势，在一般的民用工业领域有一定的市场份额。但对于性能要求高、可靠性和稳定性都有要求的民机行业，其竞争力较差。

2.2　民机制造关键装备产业化突破路径

基于上述对民机制造关键装备产业化障碍的剖析可知，当前制约民机制造关键装备实现产业化的不仅是技术本身的差距，更在于研发模式、质量体系以及工程化应用能力的系统性短板。无论是高校或科研院所主导的项目制研发，还是部分企业的逆向研发路径，均难以实现从实验室样机到工程化产品的跨越。因此，如何将原理可行、已有样机但未经过充分工程化验证的创新成果，转化为真正具备商业竞争力和产业推广价值的成熟装备，是推动民机产业高质量发展的关键。因此，构建并实施以用户企业为主导、以工程应用为导向的首台(套)装备鉴定体系至关重要。该体系旨在解决研发导向偏差、质量体系缺失及工程化经验不足等问题，引导民机制造关键装备的研发从“造出来”向“好用、耐用、管用”转变，为规模化应用奠定基础。

针对民机制造关键装备的高度复杂性，应遵循“需求明确、标准统一、方法科学、流程规范”的原则，建立起首台(套)鉴定的标准与流程。明确装备开发与应用的衔接过程，推动关键装备的鉴定、验收、入册、采购、使用等各项环节稳步有序开展。民机制造关键装备首台(套)鉴定流程如图2所示。

鉴定流程始于装备使用方基于需求制定鉴定计划并组建鉴定专家组。鉴定计划需明确工作目标、内容、程序、进度及专家组构成方案。专家组成员应具备高水平专业知识，熟悉相关领域及鉴定标准，恪守职业道德。装备供应商则需根据使用方要求及装备现状，提交资质证明、检测报告等材料，并依据鉴定计划制定相应工作计划。

(1)鉴定流程发起。装备使用方根据装备使用需求完成装备需求定义及产品规范。同时完成装备供应商调研报告，确定潜在装备供应商，经专家组批准后，完成项目启动审查工作。装备供应商需要向装备使用方提出装备鉴定申请，并提供申请材料，装备使用方评估是否接受鉴定申请。

(2)装备技术条件编制。在接受鉴定申请以后，由装备使用方编制装备的技术条件，明确装备的各项参数指标、功能、性能，并与接受鉴定的装备供应商确认一致。完成装备技术条件编制之后，由专家组评审，根据评审意见修改完善后正式实施。

(3)装备功能参数鉴定。装备使用方根据装备技术条件完成装备技术功能参数鉴定方案编制。由专家组批准。在进行鉴定之前，装备使用方需根

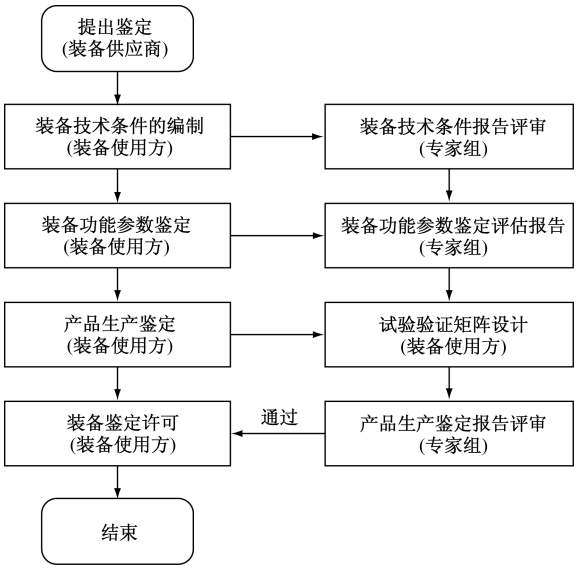


图2　民机制造关键装备首台(套)鉴定流程

据鉴定测试方案编制鉴定测试计划。装备鉴定的过程中,参与人员需按照数据记录表记录检测数据。鉴定测试结束后,出具装备功能参数鉴定评估报告,由专家组评审,确定是否允许进入产品生产鉴定。

(4)产品生产鉴定。参与产品生产鉴定的装备需要通过装备功能参数鉴定,并在鉴定开始时提供鉴定测试评估报告。装备使用方需根据装备使用工况和工艺要求设计产品生产鉴定的试验验证矩阵,完成产品试生产鉴定试验矩阵编制并由专家组评审,以证明装备/过程能够满足所有适用的工程要求。根据试验验证矩阵制定产品生产鉴定计划,启动产品生产鉴定,应开展不少于3批次鉴定试验。完成产品试生产鉴定并形成鉴定试验报告,并由专家组批准。在产品生产鉴定的过程中,参与人员需按照数据记录表记录检测数据。鉴定结束后,整理形成鉴定报告。对于鉴定过程中发现的问题,应同装备供应商充分沟通后形成优化或整改意见。完成整改后的鉴定文件,由专家组评审对鉴定过程和报告进行讨论,确定装备是否通过鉴定以及适用的范围。

(5)装备鉴定许可。装备使用方组织专家组召开最终评审会,对全套鉴定过程与文件进行审议。评审通过后,正式签署装备鉴定许可文件,并向装备供应商颁发鉴定合格证明,标志着该装备首台(套)鉴定工作圆满完成,具备纳入合格供应商名录或采购流程的资格。

3 民机制造关键装备产业化的对策建议

民机制造关键装备的产业化进程是一项涉及技术攻关、产业链协同、市场培育及政策引导的复杂系统工程。基于创新链模型对民机制造关键装备现状的剖析表明,要实现从首台(套)突破到产业化应用,单纯依靠技术供给方的单点突破是非常难的,必须构建全链条、多主体、多维度的支撑体系。针对需求分散、协同不足、产业链断层及市场应用生态薄弱等民机制造关键装备产业化障碍,从整合资源、协同联动、产业生态构建及政策支撑4个维度,提出具有针对性和可操作性的政策建议,旨在打通民机制造关键装备产业化的堵点与断点,加速民机制造关键装备的工程化验证与市场化推广,从而推动民机产业高质量发展。

3.1 整合资源以目标为导向推动技术实现

民机制造关键装备的研制具有高投入、长周期、高风险的特征,根据其特征就必须有明确的需求指引,避免研发资源的分散与浪费。因此,要坚持以产品实现为核心目标,通过顶层设计与机制创新,推动技术突破。首先,应加大对民机生产自动化装备的投入力度,特别是针对现有生产线的智能化改造与升级,通过设立专项基金,鼓励企业采用先进的自动化工艺,并推动建立统一的行业标准,提高整体生产效率。其次,要积极对接国家各类设备类重大科技专项,改变过去单一项目申报的模式,转而推动面向核心产品制造的应用项目组织模式,确保关键装备在研发初期就能融入实际的生产体系之中。最后,应完善由用户单位牵头的新型项目管理机制,在考核指标中不仅关注技术指标是否达标,更应强化对工程化应用、稳定性及可靠性的考核权重,并建立相应的激励容错机制,从而有效引导国家资源向真正解决生产痛点的关键技术环节集中导入,从源头上提升民机制造关键装备的研制成功率。

3.2 深化“用户+供应商”协同攻关

在民机产业链中,主机厂与装备供应商之间不能仅限于买卖关系的合作,必须建立一种基于长期战略合作的利益共享与风险共担机制,形成共同发展的新型伙伴关系。一方面,重点支持一批具备技术基础和创新潜力的企业,特别是具有灵活机制的民营企业,通过政策引导推动其与主机厂开展深层次的合作,如共建创新联合体、设立示范验证中心等,形成紧密利益共同体。另一方面,集中优势力量协同攻克若干项对产业发展具有决定性影响的技术与装备。同时,还需要在制度层面研究制定针对性的政策措施,明确对于通过联合研发并已在实际生产中验证合格的关键装备,在后续的同类产品采购中可以实行“直接指定供应商”的制度条款。这不仅能够有效避免行业内低价恶性竞争,还能通过稳定的市场预期帮助优质供应商回收研发成本,进而培育出1~2家在特定细分领域具有国际竞争力的领军企业。

3.3 打造产业集聚高地,贯通上下游产业链

民机制造高端装备由于其小批量、定制化的特点,这就要求必须通过提升附加值和技术溢出效应来增强产业吸引力。为此,以产业园区为载体,着力打造集研发、制造、配套于一体的民机制造关键装备产业集群,打通上下游产业链。具体而言,充分利用产业园区的集聚优势,出台具有竞争力的招商引资政策,吸引国内外优秀的智能制造装备、特种材料、数控系统等配套企业入驻,通过完善的园区基础设施和公共服务平台降低企业的运营成本。

同时，配套企业可以依托其积累的先进技术和高精度加工能力，逐渐向轨道交通、医疗器械等其他高端装备领域辐射，从而形成良性的产业生态循环。

3.4 完善采供与维保政策，降低产业化风险

尽管民机制造关键装备在技术上已取得很大进步，但在实际推广过程中仍面临着“用户不敢用、不愿用”的困境，主要因为对装备稳定性、可靠性及后期维护能力的担忧。因此，必须从国家宏观政策和企业微观运营两个层面解决。在采购策略上，针对国产装备处于市场导入期的实际情况，制定灵活多样的采供政策，适度降低对过往业绩的硬性门槛要求，给予国产装备公平的竞争机会。同时，要建立“应用-反馈-改进”的闭环迭代机制，鼓励用户单位大胆试用国产装备，通过实际使用中的数据积累推动技术的快速迭代与成熟。在维保服务方面，鉴于国产装备可能存在的维护难度大、备件供应周期长等问题，与设备供应商积极探索新型商业模式，由供应商提供驻厂服务，主机厂提供必要的现场条件，双方共同承担设备运维的风险与成本。

4 结论

从创新链的理论视角出发，研究了民机制造关键装备的产业化突破路径。通过构建“创新链-关键装备”耦合模型，系统剖析了其产业化障碍，并据此设计了一套首台（套）装备鉴定流程。研究在理论上扩展了创新链理论的应用范畴，在实践上为打通关键装备从实验室研发到产业化应用的“最后一公里”提供了可操作的路径参考，对行业发展和相关政策制定具有借鉴意义。

研究侧重于从创新链理论出发，对关键装备产业化的突破路径与鉴定流程进行构建与论证，属于初步的探索。围绕民机制造关键装备的产业化发展，未来研究可在以下方面进一步深化。

（1）开展关键装备全产业链的现状与瓶颈分析。在本文中主要从研发主体视角剖析产业化障碍。未来可进一步聚焦于关键装备从材料、零部件到整机集成的全产业链，系统识别制约其安全发展的瓶颈要素，从而为制定清晰的产业发展战略与目标提供依据。

（2）深化产学研协同创新机制研究。在本文中构建的模型与流程为协同提供了框架，但未揭示其内在作用机理。未来需深入探究产学研用各方在关键装备创新链中的动态互动、知识流动与利益分配机制，为设计更有效的协同创新政策与治理模式提供理论支撑。

参考文献

[1] 王昶，何琪，周依芳. 高端装备国产化替代应用的主要障碍与突破路径[J]. 科技导报，2023，41(6)：13-20.

[2] 郑达敏，赵增超，刘舟，等. 高效太阳电池技术及其核心装备国产化进展[J]. 有色设备，2021，35(5)：78-82，88.

[3] 张冰，罗超，禹庆荣，等. 国产集成电路装备验证线标准体系研究与设计[J]. 中国标准化，2023(10)：93-99.

[4] 关键. 天然气产业链国产装备科技创新与实践[J]. 当代石油石化，2023，31(6)：23-27.

[5] 杨忠，李嘉，巫强. 创新链研究：内涵、效应及方向[J]. 南京大学学报（哲学·人文科学·社会科学），2019，56(5)：62-70，159.

[6] 陈云，陈凯，谢科范，等. 打造高质量创新链[J]. 科技与管理，2022，24(5)：1-10.

[7] 杨忠，花磊，余义勇，等. 领军企业创新链模式研究：基于不同创新情境的多案例分析[J]. 管理科学学报，2024，27(4)：21-40.

Research on Breakthrough Pathways of Key Equipment in Civil Aircraft Manufacturing Based on Innovation Chain Model

LI Jinzhang, ZHANG Huyi, XING Hongwen, ZHOU Guangzhe

(Aviatioon Manufacturing Technology Research Institute, Shanghai Aircraft Manufacturning Co., Ltd., Shanghai 201326, China)

Abstract: Based on the connotation and characteristics of key equipment in civil aircraft manufacturing, an innovation chain model was constructed to analyze its industrialization obstacles and breakthrough paths. First, the connotation and features of key manufacturing equipment for civil aircraft were analyzed, and an innovation chain model for such equipment was constructed. Then, following the development logic of the innovation chain model, the industrialization obstacles were examined, and a user-enterprise-led approach was proposed to introduce and improve the first-set appraisal system. Finally, targeted and actionable policy recommendations were put forward from four dimensions: resource integration, collaborative coordination, industrial ecosystem development, and policy support for promoting the independent development of key equipment in civil aircraft manufacturing.

Keywords: civil aircraft manufacturing; production equipment; equipment appraisal; innovation chain