

浅析航空航天元器件供应链管理环节

龚瑾

上海空间推进研究所 上海 201112

摘要：航空航天产业作为典型的高技术、高复杂度、高可靠性行业，其元器件种类繁多、技术门槛高、交付周期长，对供应链管理提出了极高要求。元器件供应链作为保障航空航天装备研发与生产的关键环节，其管理效率直接关系到产品质量、生产周期与成本控制。当前，航空航天元器件供应链普遍面临采购周期长、供应商管控难、信息不对称与质量追溯难等问题。应当优化供应链管理环节，有助于提升元器件保障能力，增强企业核心竞争力，推动我国航空航天产业的高质量发展。

关键词：航空航天；元器件；供应链管理；协同计划；质量控制

航空航天装备的研制具有周期长、任务急、技术密集度高等特点，其元器件供应链在整个研制生产过程中起着“血脉”作用。元器件通常来源广泛，涵盖电子、电气、机械、材料等多个门类，具有高精度、高可靠性、小批量、多品种等显著特征，加之外部环境不确定性强，导致供应链管理难度远高于一般制造业。特别是在国家政策推动自主可控、关键核心技术国产化的背景下，元器件的供应安全与质量保障成为制约航空航天发展的关键因素之一。当前我国部分航空航天企业在元器件供应链管理中仍存在协同机制弱、供应商管理松散、库存波动大、信息系统支撑不足等问题，严重影响了项目进度与产品质量。因此，对航空航天元器件供应链管理的关键环节进行系统分析，识别瓶颈问题并提出针对性优化对策，具有重要的理论价值与现实意义。

一、航空航天元器件供应链的基本特征

（一）高复杂度与高可靠性要求

航空航天系统集成数万乃至数十万个元器件，涵盖电子、机械、材料等多领域技术，其供应链呈现极高复杂度。单个卫星平台需协调太阳能电池、姿态控制系统、通信模块等组件，各环节技术参数、质量标准与交付周期均需精准匹配。同时，行业对元器件可靠性要求近乎严苛，例如运载火箭发动机控制系统元器件需满足“百万分之一”的失效率标准，任何微小故障都可能引发灾难性后果。以SpaceX的猎鹰火箭为例，其发动机涡轮泵轴承需承受超30万转/分钟的高速运转与极端温差，对材料耐磨性、密封性及制造工艺要求极高。为确保可靠性，供应链各环节需通过多轮环境模拟测试（如高温、

真空、辐射测试）与冗余设计，导致研发与生产周期显著延长，进一步加剧供应链管理难度。

（二）多层次小批量采购模式

航空航天产业采用“主承包商-一级供应商-多级分包商”的金字塔型供应链结构。以波音787客机为例，其供应链涉及全球1500余家供应商，核心部件由普惠、罗尔斯·罗伊斯等一级供应商提供，而精密元器件（如传感器、连接器）则依赖多层次分包商。由于航空航天产品定制化程度高，元器件采购呈现“小批量、多批次”特征。如某型号卫星姿态控制用陀螺仪，单次订单量通常仅10-20件，但需满足不同轨道参数的特殊需求。这种模式导致供应商生产计划分散，规模效应难以发挥，且需频繁调整生产线，推高制造成本与交付风险。同时，多层次结构使信息传递延迟，增加需求预测与库存管理难度。

（三）关键零部件依赖度高与替代性弱

航空航天领域部分关键元器件存在严重技术壁垒，全球市场呈现高度垄断格局。如高端MEMS惯性传感器、砷化镓功率器件等核心产品，长期依赖美国ADI、德国博世等企业，国内自给率不足10%。此外，航空发动机单晶叶片需采用定向凝固、超高温合金等前沿技术，全球仅GE、赛峰等少数企业具备量产能力。由于元器件性能直接影响系统整体效能，且替换需重新进行全系统验证（耗时可达2-3年），导致供应链替代性极弱。例如，某型号军机因进口导航芯片断供，被迫推迟交付18个月，凸显对外部供应商的过度依赖风险。同时，国际政治环境变化易引发供应链中断，加剧产业安全隐患。

二、供应链管理关键环节存在的问题

(一) 计划协同难：设计、研发、采购计划不匹配

航空航天项目研发周期长（通常5-10年），设计变更频繁，导致设计、研发与采购计划难以同步。例如，某新型无人机在原型机测试阶段发现气动布局需调整，引发飞控系统元器件规格变更，而此时采购部门已完成部分物料采购，造成资源浪费与交付延迟。此外，企业内部各部门信息系统相互独立，缺乏统一数据标准，导致需求传递失真。如设计部门采用CAD系统生成的元器件参数，无法直接对接采购部门的ERP系统，需人工二次录入，增加出错概率。据统计，因计划协同不畅导致的项目延期率在航空航天领域高达35%，严重影响产品交付与市场竞争力。

(二) 采购周期长：审批流程复杂、进口依赖较大

航空航天元器件采购涉及严格的资质审查、技术验证与合规审批，流程冗长。仅供应商准入审核就需经历文件审查、现场审计、样品测试等环节，耗时6-12个月。同时，关键进口元器件受国际贸易政策、物流运输等因素制约，交付周期长达180-240天。例如，某商业航天企业因进口星载计算机芯片遭遇海运延误与海关查验，导致卫星发射计划推迟半年。此外，国内部分高端元器件生产设备与原材料仍依赖进口，如光刻机、高纯半导体材料等，进一步加剧供应链脆弱性。冗长的采购周期迫使企业维持高额库存，增加资金占用成本与仓储风险。

(三) 质量追溯难：元器件全生命周期信息不透明

航空航天元器件从原材料采购、加工制造到系统集成，涉及多环节多主体，信息追溯难度大。当前多数企业仍采用纸质文档或分散的电子表格记录质量数据，缺乏统一的数字化管理平台，导致信息碎片化。如某航天企业曾因批次性电子元器件焊接缺陷引发卫星故障，但因生产批次记录缺失，无法快速定位问题源头，最终耗费数月排查。此外，跨企业质量数据共享存在壁垒，供应商不愿公开核心工艺参数，导致主机厂难以全面监控元器件质量。据调查，约60%的航空航天企业无法实现从原材料到成品的全流程质量追溯，严重威胁产品安全与可靠性。

三、优化元器件供应链环节的策略

(一) 搭建一体化数字化供应链协同平台

构建覆盖设计、研发、采购、生产全流程的数字化协同平台，通过统一的数据标准与接口，实现各环节信息实时共享。例如，利用PLM（产品生命周期管理）系

统与ERP系统集成，使设计变更信息自动同步至采购部门，触发供应商快速响应。引入数字孪生技术，对元器件制造过程进行虚拟仿真，提前验证工艺可行性与交付风险。同时，平台内置智能算法，可自动分析历史采购数据，预测需求波动，优化采购计划。某航空企业实施该平台后，设计变更响应时间缩短70%，采购计划准确率提升至92%，有效降低因协同不畅导致的成本损耗。

(二) 构建多级供应商管理与评估体系

建立“核心供应商-战略供应商-一般供应商”分级管理机制，对不同层级供应商实施差异化管控。核心供应商需参与产品早期设计，通过联合研发提升技术协同性；战略供应商则通过长期合同绑定，确保关键元器件稳定供应。同时，制定涵盖技术能力、质量水平、交付周期、成本控制等维度的动态评估指标，定期对供应商进行考核。引入区块链技术，实现供应商资质、生产记录、质量数据的不可篡改存储与共享，增强信任机制。例如，某航天集团通过该体系筛选出50家核心供应商，将关键元器件交付准时率从75%提升至95%，显著增强供应链稳定性。

(三) 推进全流程质量可追溯与智能监控系统

基于物联网与区块链技术，构建元器件全生命周期质量追溯体系。在生产环节，为每个元器件植入RFID标签或二维码，实时采集原材料批次、加工参数、质检数据等信息；在物流与使用环节，通过扫码实现数据更新与状态监控。同时，部署AI视觉检测、传感器网络等智能监控设备，对生产过程进行实时质量分析，如自动识别焊接缺陷、尺寸偏差等问题。例如，某电子元器件厂商应用该系统后，质量问题追溯时间从72小时缩短至2小时，缺陷产品召回成本降低40%。

四、提升供应链韧性与安全性的路径探索

(一) 强化国产替代与自主可控能力建设

在国际局势复杂多变的背景下，强化航空航天关键元器件国产替代与自主可控能力已成为保障产业安全的核心任务。国家层面通过设立专项基金、税收减免等政策，引导资源向高端芯片、特种合金材料、高精度传感器等“卡脖子”领域倾斜。例如，国家集成电路产业投资基金二期重点布局宇航级FPGA芯片研发，推动企业突破芯片架构设计、抗辐射工艺等关键技术，目前部分产品的性能指标已达到国际先进水平，实现对欧美同类产品的替代。同时，政府联合行业协会建立国产元器件认证标准体系，从材料性能、可靠性测试、环境适应性

等维度严格把关，通过“首台套”应用保险补偿等政策，鼓励主机厂优先采用国产产品。此外，依托产业园区构建“原材料研发-核心部件制造-系统集成”的全产业链生态，培育专精特新“小巨人”企业。如某民营航天企业自主研发的耐高温陶瓷基复合材料，成功应用于新一代运载火箭发动机，打破了国外在高温材料领域的长期垄断，显著提升了供应链的自主可控水平。

（二）推进供应链风险识别与应急管理机制

构建智能化供应链风险预警体系是提升航空航天产业抗风险能力的关键举措。企业通过整合政治局势、自然灾害预警、大宗商品价格波动、物流运输数据等多源信息，运用机器学习算法建立风险预测模型。例如，基于历史贸易摩擦数据和航运路线拥堵情况，预测进口元器件断供风险，并提前制定替代方案。针对不同风险等级，制定分级响应预案：一级风险（如关键供应商破产）启动全球紧急寻源机制，联合行业内企业共享备用产能；二级风险（如物流中断）启用多式联运备选方案，保障供应链连续性。同时，建立跨企业应急联盟，波音、空客等国际巨头通过搭建数字化平台，实现全球供应商库存信息实时共享，在突发危机时可快速调配资源。此外，定期开展“黑天鹅”“灰犀牛”事件模拟演练，如模拟极端天气导致的港口关闭、地缘政治冲突引发的贸易禁运等场景，检验应急预案的可行性，不断优化风险应对流程，确保供应链在复杂环境下的稳健运行。

（三）实施战略库存管理与柔性采购策略

创新库存管理与采购模式是增强航空航天供应链韧性的重要抓手。企业通过构建“中央储备库-区域分库-现场缓存”三级库存体系，实现元器件的科学布局。中央储备库聚焦高价值、长周期进口元器件，如高端惯性导航组件、星载处理器等，采用恒温恒湿、防静电存储环境保障物资安全；区域分库根据产业集群分布，储备通用型元器件，实现48小时内紧急调拨；现场缓存则针对生产线急需物料，确保生产连续性。引入智能库存管理系统，利用大数据分析预测元器件需求波动，动态调整库存水平，避免积压或缺货。在采购策略上，推行“框架协议+滚动订单”模式，与核心供应商签订3-5年长期协议锁定产能，同时根据项目进度每月滚动调整采购计划。建立替代元器件认证库，对性能相近的国产或

其他国际品牌产品进行预认证，当主供应商出现问题时，可在72小时内完成供应商切换。某卫星制造企业通过该策略，在某进口传感器断供事件中，快速启用备用供应商，将项目交付延迟时间从3个月缩短至2周，显著提升了供应链的响应速度与弹性。

结语

航空航天元器件供应链管理是保障重大工程任务顺利实施的核心支撑，其复杂性、战略性与安全性特征决定了管理工作的系统性与前瞻性。本文通过梳理航空航天元器件供应链的基本特征与关键管理环节，识别制约其效率与效能的主要问题，并提出了从数字化平台建设、供应商管理体系优化到质量追溯机制完善的系统性对策。实践表明，只有构建协同高效、质量可控、风险可管的元器件供应链体系，才能真正提升航空航天产业的自主创新能力与保障能力。未来应进一步推动产业链上下游协同发展，加快核心元器件的国产化替代进程，为我国航空航天强国战略提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王志刚, 李俊. 航空航天元器件供应链管理模式研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 45-49.
- [2] 陈晓东, 刘海燕. 高可靠元器件采购管理中的风险识别与控制[J]. 中国航天, 2021, 43(12): 58-62.
- [3] 郑宇翔, 黄伟. 航空电子产品元器件供应链协同管理研究[J]. 航空计算技术, 2020, 50(5): 33-37.
- [4] 刘倩, 王鹏飞. 军工企业元器件采购管理优化对策探讨[J]. 国防科技工业, 2023, 44(2): 88-92.
- [5] 李宏伟, 张丽. 基于信息化平台的元器件供应链质量追溯体系建设[J]. 现代制造工程, 2021, (6): 95-98.
- [6] 周晓峰, 赵志强. 提升航空航天供应链韧性的路径分析[J]. 物流科技, 2022, 45(1): 42-46.
- [7] 邹一帆, 雷俊. 航天企业多级元器件供应商管理体系研究[J]. 航天标准化, 2020, 30(4): 21-25.
- [8] 马晶晶, 徐海峰. 航空制造业中柔性供应链构建的实践路径[J]. 制造业自动化, 2023, 45(9): 66-70.
- [9] 胡佳, 何志鹏. 航空元器件国产化配套路径分析[J]. 中国航天科技, 2022, 40(7): 73-77.