# 航天产品部装生产中的动态排产管控方法应用探析

王雨萱　贾梅杰

首都航天机械有限公司　北京　100076

**摘　要：**本文在分析航天部装生产排产特殊性与管控难点的基础上，系统梳理了动态排产管控的理论内涵与技术演进，重点探讨了动态排产在航天部装场景中的信息感知、滚动决策与闭环控制等核心应用环节，进而从计划体系分层设计、扰动响应机制构建、数字化平台支撑和绩效评价体系完善等维度提出针对性应用策略。研究表明，航天产品部装生产排产需从静态优化走向动态闭环管控，通过构建“感知—决策—执行—反馈”的循环管控体系，有效提升排产计划对现场扰动的适应能力与响应效率，为航天多品种混线装配生产提供可行的排产管控思路。

**关键词：**航天产品；部装生产；动态排产；扰动响应；闭环管控

## 引言

航天产品装配制造是航天系统工程的重要组成部分，其中部装环节作为连接零件加工与总装集成的关键中间阶段，承担着组件装配、分系统集成和功能测试等重要任务。与一般机械装配不同，航天产品部装生产具有极强的任务专属性和技术复杂性，其排产计划的制定与执行直接关系到型号研制进度和最终交付节点。然而，实际生产中频繁出现的来料延期、设备故障、质量返工、设计变更等扰动因素，使得预先编制的静态排产计划往往与实际执行产生较大偏差，导致资源闲置与节点延误并存。近年来，随着航天发射任务密度持续攀升和型号研制周期不断压缩，多品种并行、资源竞争加剧、不确定性增大的生产环境对部装排产提出了更高要求。传统的凭经验调度和固定周期排产模式已难以应对动态扰动带来的执行风险，亟需探索适应航天部装特点的动态排产管控方法。

## 1 航天产品部装生产及其排产管控特殊性

### 1.1 部装生产的工艺与组织特征

航天产品部装是指将经过加工的零部件、标准件、外购件等按照装配工艺要求，组合成部件或分系统的生产环节。其工艺特征突出表现为：装配精度要求极高，部分配合公差达到微米级；作业过程涉及铆接、焊接、胶接、螺栓连接等多种连接方式，部分工序依赖专用工装和手工操作；测试环节穿插于装配过程之中，形成“装配—测试—调整—再装配”的迭代式作业流程。在组织层面，部装生产通常采用项目制管理，以型号为牵引组织生产，同一车间内可能存在多个型号的部装任务并行推进，形成典型的多品种小批量混线生产模式。这种工艺与组织特征决定了排产工作必须兼顾技术可行性、资源约束和任务优先级等多重目标。

### 1.2 排产管控面临的核心矛盾

航天部装排产管控面临的最根本矛盾，是计划的高刚性要求与现场的高不确定性之间的持续冲突。一方面，航天型号任务具有严格的时间窗口约束，部装节点直接影响后续总装和发射计划，计划一旦确定便具有指令性效力；另一方面，部装现场扰动因素密集，上游零件配套延迟、外购件到货滞后、检验发现的超标问题、设计更改通知等都会打乱原有排产安排。这种矛盾的累积效应表现为：计划编制时力求最优，执行中频繁调整，调整后又引发连锁反应，最终导致计划权威性和执行可靠性同步下降[1]。此外，多型号共享装配场地、人员和工装资源，某型号的排产延误往往通过资源占用链式传递至其他型号，形成扰动放大效应。

### 1.3 传统排产方式的局限性

目前航天部装生产排产多采用基于关键路径法的静态推演与人工经验调整相结合的方式。排产员依据工艺文件、物料齐套时间和设备台班定额编制月度或周度主计划，遇有扰动时依靠电话沟通和手工台账进行局部调整。这种方式的局限性在近年生产负荷快速提升的背景下愈发显著：一是计划编制周期长，难以及时响应上游变化；二是排产粒度粗，以工作日或班次为单位，缺乏对小时级作业冲突的预见能力；三是资源能力建模简单，未考虑操作人员技能差异、工装占用冲突等实际约束；四是扰动应对被动，往往事后补救而非主动预防，调整方案的全局最优性无法保证。这些局限表明，单纯依靠提高排产频次或增加人工投入已难以根本解决问

题，需要引入更为系统化的动态排产管控理念与方法。

## 2 动态排产管控的理论基础与方法特征

### 2.1 动态排产的内涵演进

动态排产是相对于静态排产而言的概念，其核心要义在于承认生产系统中不确定性的客观存在，将排产从一次性优化问题重新定义为持续性决策过程。早期的动态排产研究主要关注重调度策略，即在扰动发生后以原计划为基础进行局部修复或完全重新编排，代表性方法包括右移重调度、局部重调度和完全重调度等。随着信息技术的发展，动态排产的内涵进一步延伸，强调事前预测（基于历史数据识别扰动模式）、事中响应（实时调整作业序列）和事后学习（更新排产规则与参数）的有机统一。这种演进反映了动态排产从被动应急工具向主动管控能力的转变，其目标不再仅仅是“应对变化”，更在于“驾驭变化”。

### 2.2 关键技术方法概述

动态排产的方法体系可按决策时机和自动化程度进行划分。在决策时机维度，主要包括反应式调度（扰动发生后触发重调度）、鲁棒性调度（在计划编制阶段预留时间缓冲和资源裕度以吸收扰动）和预测—反应式调度（结合预测信息提前预判扰动并制定备选方案）。在技术手段维度，整数规划、约束规划等运筹学方法适用于理论建模，但计算复杂度较高；启发式规则（如最短加工时间优先、最小松弛时间优先等）因计算简单、易于理解而在实际中广泛应用；近年来，强化学习等数据驱动方法开始被引入排产决策，通过对历史调度数据的学习实现规则自适应选择[2]。航天部装场景对可靠性和可解释性的高要求，决定了其实用化路径更可能采取规则基础与优化算法相结合、人机协同的半结构化模式。

## 3 动态排产管控在部装生产中的关键应用环节

### 3.1 面向部装的生产信息实时感知

动态排产有效运行的首要前提是对生产现场状态信息的实时、准确感知。在航天部装场景中，需重点采集的信息包括：各型号部装工序的实际开工与完工时间、关键工位资源（装配平台、吊装设备、专用工装）占用状态、在制品质量检验结果与返工需求、操作人员出勤与技能匹配情况，以及上游零件和外购件的齐套进度。这些信息的采集方式应兼顾自动化（如工位终端扫码报工、设备状态自动采集）与人工录入（如质检结果填报、异常情况描述），并建立异常信息的自动推送机制。信息的时效性和准确性直接决定了后续排产决策的质量，因此需要配套相应的信息管理制度，明确数据采集责任人、采集频次和审核流程，防止因信息滞后或失真导致决策偏差。

### 3.2 滚动式计划编制与动态调整

针对航天部装生产中扰动频发的特点，滚动式计划编制是较为适用的排产管控模式。其基本思路是将计划期划分为若干滚动窗口，近期的计划细化到工序级且严格锁定执行，中期的计划细化到工段级允许适度调整，远期的计划只确定型号节点框架。随着时间窗口向前推进，根据最新的现场状态信息对后续窗口内的作业排序和资源分配进行更新优化。这种模式的优势在于：近期计划的稳定性保障了现场作业的可预期性，中期计划的灵活性为应对扰动预留了缓冲空间，远期计划的宽松性减少了不必要的频繁修订。滚动窗口的时长设定应根据部装工序的平均作业周期和扰动发生频率动态确定，一般建议以 3 至 5 个工作日为近期锁定期，以两周至一个月为中期滚动窗口。

### 3.3 扰动识别、分级与响应决策

有效的扰动管理是动态排产区别于静态排产的核心能力。首先需要建立扰动因素的分类体系，按照扰动来源可分为物料端（延期、缺件、质量不合格）、设备端（故障、维护）、人员端（缺勤、技能不符）、技术端（设计变更、工艺调整）和管理端（计划调整、临时任务插入）等类别[3]。其次，对不同扰动因素进行影响程度分级，可依据其导致的预期工期延误是否超过工序总时差的某一百分比（如 20%、50%、100%）划分为轻微、中等、严重三级，对应不同的响应策略——轻微扰动优先通过加班或内部调剂吸收，中等扰动触发局部重调度，严重扰动则启动跨型号资源调配甚至上报高层协调。分级响应机制既避免了过度反应导致的系统震荡，又防止了对重大风险的低估与忽视。

### 3.4 资源冲突消解与执行闭环反馈

当多型号并行生产时，装配场地、起重设备、测试仪器和关键技能人员等共享资源往往成为排产约束的瓶颈。动态排产须建立资源冲突的消解规则，可按照任务优先级（依据型号紧急程度、节点重要性综合评定）、资源占用时间最短优先、工艺顺序约束等原则进行冲突仲裁。同时，应建立排产计划执行的闭环反馈机制：每个作业班次结束后，将实际执行进度与计划进行偏差分析，识别偏差原因并更新系统状态数据库；每日召开生产调度短会，对偏差趋势进行研判并确认是否需要触发排产调整。通过这种高频次的“执行—监测—分析—调整”闭环，使排产管控真正融入日常生产管理节奏，而

非仅仅作为计划编制阶段的一次性活动。

## 4 动态排产管控方法的推进策略

### 4.1 建立分层融合的计划管控体系

建议构建战略层、管理层和执行层三级贯通的计划管控架构：战略层以型号研制主计划为牵引，确定各型号部装的关键节点和交付窗口，为动态排产提供边界约束；管理层将主计划分解为滚动式部装作业计划，负责窗口期内的排产优化与调整决策；执行层以工位日作业指令为落脚点，实时反馈执行状态并接收动态调整指令。三层之间通过信息平台实现纵向贯通，上层为下层提供约束框架，下层向上层反馈执行偏差，形成层级耦合而非简单传导的计划管控体系。这种分层设计既维护了型号主计划的权威性，又为现场排产赋予了合理的自主调整空间。

### 4.2 完善扰动响应与快速决策机制

应建立标准化的扰动处置流程，明确发现异常后的信息上报路径、决策责任主体、备选方案生成方式及审批权限。对于常见类型扰动，应预先制定模板化应急预案（如关键零件缺件时的工序提前或推后方案、设备临时故障时的替代工位切换方案），将应急响应时间压缩至最短。对于复杂或重大扰动，应建立跨部门联合研判机制，由生产管理部门牵头，工艺、质量、物资等部门协同参与，在综合评估对各型号节点影响的基础上做出排产调整决策[4]。此外，应建立扰动处置的知识库，将每次扰动的成因、处理过程和效果进行归档，为同类扰动的未来处置提供参考，逐步提升组织层面的扰动应对成熟度。

### 4.3 推进数字化排产管控平台建设

航天企业应在现有制造执行系统（MES）基础上，拓展排产决策支持功能模块。该平台应具备以下核心能力：一是基础数据管理，统一维护产品结构（BOM）、工艺路线、工时定额、资源日历等排产基础信息；二是计划编制与可视化，支持甘特图拖拽式排产、资源负荷热力图展示和多版本计划对比；三是动态调整引擎，内置重调度算法和规则库，能够根据输入扰动信息自动生成若干备选排产方案并评估其对交付节点的影响；四是看板推送，将每日作业指令、物料齐套提醒、资源占用提醒等信息精准推送至工位终端。平台建设应遵循“先规范数据、再上线功能”的实施路径，避免在数据混乱的情况下仓促推进系统应用。

### 4.4 构建动态排产绩效评价体系

建议从计划执行率和排产适应能力两个维度构建评价指标体系。计划执行率维度包括部装节点按期完成率、工序级计划达成率、计划调整频次等指标，反映排产计划的可靠程度。排产适应能力维度包括扰动平均响应时间、重调度方案生成效率、因排产不当导致的资源闲置率、排产调整对后续计划的影响范围等指标，反映排产管控系统的弹性与响应水平。绩效评价结果应纳入部门及岗位考核，并与排产调整权限的授予、滚动窗口长度的设定等管理决策挂钩，形成以评价促改进的良性循环。同时需注意，航天产品生产的特殊性决定了部分质量性指标和安全性指标同样应纳入评价视野，避免唯效率导向对产品可靠性产生潜在风险。

## 5 结语

航天产品部装生产中的动态排产管控，旨在将静态计划转化为适应环境变化的动态过程。本文基于航天工艺特征与管理现实，论证了其应用的合理性与必要性，重点阐述了信息感知、滚动编制、扰动响应及闭环反馈等关键环节，并从计划体系、响应机制、数字化平台及绩效评价四方面提出推进策略。研究表明，该应用不仅是技术引入，更涉及管理模式、组织协同与数据治理的系统性升级。实施中需平衡计划刚性与弹性、算法自动决策与人工审核、短期效率与长期可靠性。未来，随着柔性化、智能化演进，动态排产将与数字孪生等技术深度融合，实现从“响应变化”向“预判变化”的跨越，为航天产品高质量、高效率交付提供坚实保障。

## 参考文献

[1] 刘检华, 孙连胜, 张旭. 航天复杂产品装配过程管控技术研究综述 [J]. 航空制造技术,2022,65(21):36-45.

[2] 徐志涛, 周光辉, 张定. 面向扰动环境的动态作业车间调度方法研究进展 [J]. 机械工程学报,2023,59(7):201-218.

[3] 王爱民, 葛世伦, 唐敦兵. 基于数字孪生的生产系统动态调度架构及关键技术 [J]. 计算机集成制造系统,2022,28(6):1729-1743.

[4] 杨海成, 莫蓉, 常智勇. 航天多品种小批量装配生产计划与调度协同方法 [J]. 中国机械工程,2023,34(12):1438-1449.