第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

太阳翼刚性基板研制中计划管理与产品保证协同管控研究与实践

马玉洋　刘希妮　张莹　王超　田莉
北京空间机电研究所

DOI:10.32629/jpm.v7i10.9076

[摘　要] 太阳翼刚性基板是航天器太阳电池阵的核心承载结构，其制造品质、研制进度直接影响航天器在轨服役表现。刚性基板的整体研制工作呈现工序交叉耦合度高、加工精度标准严苛、质量隐患隐蔽性强、项目周期约束刚性突出等显著特征。本文基于航天刚性基板实际研制工程项目，搭建了一套适配基板全研制周期的协同管控体系，明确两大管理模块的工作权责边界、常态化联动方式以及关键管控节点，针对设计、工艺、生产、试验等不同研制阶段，制定针对性的协同管控实施办法。某遥感卫星太阳翼刚性基板项目应用结果表明：该协同管控体系能够压缩研制周期、提升批量产品一致性，实现研制过程数据完整可追溯，可为航天精密结构件的精细化、规范化研制管理提供实操性强的参考方案。

[关键词] 太阳翼；刚性基板；研制过程；计划管理；产品保证；协同管控

Research and Practice on the Collaborative Control of Planning Management and Product Assurance in the Development of Rigid Substrates for Solar Wings

Ma Yuyang　Liu Xini　Zhang Ying　Wang Chao　Tian Li
Beijing Institute of Space Electromechanical

[Abstract] The rigid substrate of a solar array serves as the core supporting structure for a spacecraft's solar cell array; its manufacturing quality and development progress directly influence the spacecraft's in-orbit operational performance. The overall development of rigid substrates is characterized by high process intercoupling, stringent machining precision standards, highly concealed quality risks, and pronounced constraints on project cycles. Based on a real-world aerospace rigid substrate development project, this paper establishes a collaborative control and management system tailored to the entire development cycle of the substrate. It defines the boundaries of responsibility and authority for the two primary management modules, establishes regular coordination mechanisms, and identifies key control nodes; furthermore, it formulates targeted collaborative control implementation measures for different development stages, including design, process engineering, production, and testing. Application results from a rigid substrate project for a remote sensing satellite demonstrate that this collaborative control system can shorten the development cycle, improve the consistency of batch products, and ensure the completeness and traceability of development process data, thereby providing a highly practical reference solution for the refined and standardized development and management of precision structural components in aerospace applications.

[Key words] solar array; rigid substrate; development process; schedule management; product assurance; collaborative control and management

1 引言

航天太阳翼是航天器在轨获取能源的核心关键设备，而刚性基板作为太阳电池片的直接承载基体，在轨服役期间需要长期应对太空高低温循环交变、真空辐射、微陨石撞击等复杂恶劣的空间环境，同时还要满足航天产品轻量化、高结构刚度、高尺寸精度、低形变误差的严苛技术指标[1]。计划管理是刚性

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

基板研制进度把控的核心手段，相关管理人员通过拆解整体研制任务、制定分阶段时序计划、统筹调配人力与设备资源、督办关键节点落地，保障基板研制工作严格按照型号交付要求按期完成[2]。产品保证工作则以全流程质量可控为核心目标，通过建立标准化质量管控体系、开展各工序过程检验、排查潜在质量风险、落实不合格项整改闭环、完善全流程数据追溯体系，确保成品基板完全符合航天高可靠性技术规范[3]。在航天型号管理领域，计划管理、产品保证均已有较为成熟的标准与实践，但多数情况下两类工作分线开展，针对复合材料基板多工序耦合场景下的进度-质量深度协同管控研究仍较为有限。传统研制模式中，计划管理以节点交付为导向，产品保证以风险防控为核心，岗位间信息互通不及时，易出现赶进度弱化质量管控、质量整改未纳入计划统筹等问题。推动计划管理与产品保证深度融合、协同发力，是化解刚性基板研制进度与质量矛盾、补齐过程管控短板、提升产品研制成熟度的关键途径。为此，本文开展计划管理与产品保证协同管控体系构建与实践研究。

2 太阳翼刚性基板研制中计划管理与产品保证协同管控体系构建方法

本文以“进度全程可控、产品质量可靠、风险提前可防、过程全程可溯”为核心设计原则，搭建计划管理与产品保证深度融合的一体化协同管控体系，明确体系整体架构、岗位协同职责、常态化联动机制和标准化管控规范，实现两大管控模块覆盖研制全流程、贯穿各环节的全方位协同管控。

2.1 协同管控体系整体架构

本次搭建的协同管控体系以刚性基板全研制周期为主线，全面覆盖设计、工艺、生产、试验、交付五大核心阶段，构建形成“层级统筹、双线并行、节点联动、闭环管控”的四维一体化管控架构。层级统筹层面，设置型号研制总负责人，统一统筹计划管理与产品保证各项工作，协调解决两大模块工作推进中的矛盾问题，统筹调配各类研制资源。双线并行层面，保留进度管控、质量保证两大核心工作体系，维持各自专业工作职能，确保进度推进的高效性与质量管控的专业性互不冲突、同步推进[4]。节点联动层面，重新梳理重构全流程管控节点，将进度推进节点与质量核验节点一一绑定，实现每一项进度任务对应固定的质量检验、风险核查环节。闭环管控层面，建立信息互通共享、问题联动处置、进度质量偏差整改、阶段复盘优化的全链条闭环机制，实现各类管控问题全程可追溯、彻底清零整改。

2.2 重构协同岗位职责

为彻底解决传统岗位权责割裂、工作脱节的问题，本次体系对计划管理与产品保证岗位的协同工作职责进行重新梳理界定，打破原有固定的岗位工作边界。计划管理人员在完成计划编制、进度督办、节点管控等基础工作之外，应参与各研制阶段的质量风险评审，将质量缺陷整改活动纳入正式研制计划，统筹整改周期，避免盲目抢工；计划人员不替代开展质量判定工作。产品保证人员除完成常规的质量检验、风险排查、标准落地、缺陷整改监督等工作外，需全程参与研制计划评审、关键节点把控等进度管理工作，识别高风险工序提前制定专项质量管控方案，对计划安排的合理性给出质量方面意见，不直接负责排产调度。

2.3 全流程信息协同机制

信息双向互通是协同管控体系落地实施的核心基础。本文依托现有航天型号研制信息化平台，搭建适配刚性基板研制的专属信息共享模块，打通计划与质保的信息壁垒。计划管理人员每日实时更新各工序开工状态、任务完成进度、资源调配情况、计划调整内容等进度数据。产品保证人员同步上传原材料复验结果、工艺过程检验记录、工序质量检测数据、成品试验结果、缺陷问题清单等质量数据。两大岗位人员可随时查阅共享平台数据，实现进度信息与质量信息的实时互通、双向联动。

3 各研制阶段协同管控关键实施策略

本文结合太阳翼刚性基板不同研制阶段的技术特点、管控难点和核心需求，针对性制定分阶段、差异化的协同管控实施策略，实现协同管控全覆盖、无死角，精准补齐各环节的管控短板。

3.1 设计定型阶段协同管控

设计定型是基板研制的源头环节，设计方案的合理性、可行性直接决定后续生产难度、产品性能和在轨可靠性，是进度与质量管控的核心源头。计划管理人员提前梳理设计阶段全部工作内容，制定方案设计、参数校核、图纸输出、评审整改的分阶段时序计划，明确各细分工作的完成时限、人员配置与资源保障方案，保障设计工作有序推进。产品保证人员全程介入设计全流程，严格依据航天刚性基板质量标准和太空在轨服役环境要求，对设计方案的原材料选型、结构布局设计、力学性能冗余设计、工艺可实现性进行全方位审核，提前排查设计层面的先天质量隐患。针对设计评审提出的整改问题，计划管理人员同步制定专项整改进度计划，明确整改时限；产品保证人员全程跟踪整改过程、核验整改质量，确保设计问题按期保质闭环，从源头杜绝后续生产阶段出现设计返工问题。

3.2 工艺准备阶段协同管控

工艺准备阶段的工艺参数合理性、工艺文件规范性、生产工装设备可靠性，是保障批量生产质量稳定、工序推进顺畅的关键前提。计划管理人员统筹工艺文件编制、工装校准调试、工艺试验验证、工艺文件固化全流程进度，细化各环节时间节点，确保工艺准备工作按期完成，为批量生产奠定基础。产品保证人员针对基板热压成型、铺层叠加、蜂窝粘接等核心特殊工序，制定专项工艺质量保证方案，严格审核工艺参数合规性、工艺文件完整性、工装设备精度达标情况，全程监督工艺试制试验过程，验证工艺方案的稳定性与可行性。针对工艺试验过

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

程中出现的参数偏差、成型缺陷等问题，计划管理人员及时暂停后续生产工序计划，配合质保人员完成工艺优化与参数调试，待工艺状态完全稳定、验证合格后，再重启批量研制工作，杜绝不合格工艺流入量产环节，引发批量质量问题。

3.3 批量试制阶段协同管控

批量试制阶段工序繁杂、工艺风险点多、管控难度最大，是协同管控的核心重点环节。计划管理人员严格按照细化后的工序生产计划，逐工序督办开工、完工进度，实时监控整体生产节拍，及时协调解决生产过程中的人员、设备、物料短缺等资源问题，保障生产线高效顺畅运转。同时，计划人员根据质保人员反馈的实时工序质量数据，动态微调生产计划，针对轻微质量缺陷预留充足整改工时，针对重大质量问题立即启动停工整改机制，避免不合格产品批量产出、问题持续扩大。产品保证人员严格执行工序全检、关键工序专项专检制度，对原材料预处理效果、铺层精度、热压温压参数、粘接间隙、精加工尺寸等核心关键参数实施全程动态监控，实时记录工序质量数据，第一时间排查识别尺寸超差、粘接空鼓、铺层错位等常见工艺缺陷。

3.4 检测试验与交付阶段协同管控

检测试验是验证基板综合性能、排查潜在隐性隐患的最终核心环节，交付归档是保障产品完整交付、研制资料齐全闭环的收尾环节。计划管理人员制定专项的检测、试验、验收、归档进度计划，明确各类试验的开展顺序、设备使用时序、成品交付时限，统筹调配检测设备、试验人员等核心资源，避免因资源等待造成工期延误。产品保证人员针对性制定试验质量管控方案，严格审核试验方案的合规性、试验设备的有效性、试验环境的符合性，全程监督力学性能试验、空间环境适应性试验、无损探伤检测等核心试验过程，核验试验数据的真实性、准确性与有效性。针对试验不合格项目，第一时间联动计划管理人员制定整改、复测专项计划，快速完成问题闭环整改。交付阶段，计划管理人员全程督办成品交付进度，保障交付节点达标；产品保证人员完成成品最终质量验收、全套质量资料审核、全过程研制数据追溯核查，确保交付产品质量合格、技术资料完整规范，实现整个研制工作全闭环落地。

4 工程应用实践与成效分析

4.1 工程应用概况

本文所构建的计划管理与产品保证协同管控体系，已正式应用于某型号遥感卫星太阳翼刚性基板批量研制项目。该项目所用基板采用碳纤维蜂窝夹层结构，具备成品尺寸精度要求高、在轨力学载荷复杂、服役周期长、可靠性要求严苛等特点，项目原定整体研制周期为 60 天，对产品批量一致性、交付时效性均有着极高标准。该项目前期采用传统独立管控模式，曾多次出现工艺整改滞后、工序质量波动、进度偏差累积等管控问题，影响项目推进质量与效率。引入全新协同管控体系后，项目团队全面落实全流程协同管控策略，重新梳理绑定进度与质量管控节点，完善信息共享与联动机制，落地岗位协同工作职责，对原有研制管控流程进行全方位优化升级，保障项目高质量、高效率推进。

4.2 应用成效分析

该项目通过全新协同管控体系的落地实施，刚性基板研制的进度管控、质量管控、过程规范化水平均得到显著提升，具体成效体现在三个方面。一是进度管控精度大幅提升。协同管控模式实现了质量整改与进度推进同步统筹、并行开展。该项目实际研制周期压缩至 50 天，整体研制工作效率提升 16.6%（基于原定 60 天计划周期与实际 50 天完成周期对比计算），项目全程无节点滞后、无批量返工问题发生，进度管控稳定性大幅提升。二是产品研制质量显著优化。依托全流程协同质检和前置风险预判机制，有效补齐了传统管控模式的质量漏洞，该项目基板尺寸检测合格率、力学性能指标合格率、各类环境试验通过率均达到 100%，批量产品质量一致性显著提升，未出现空鼓、结构变形、尺寸超差等常见工艺缺陷，产品整体研制成熟度大幅升级。受项目样本量限制，本次为单型号工程验证，后续还需要多型号项目进一步积累数据开展验证。三是过程管控规范性全面增强。依托信息共享、节点联动、阶段复盘闭环机制，基板研制全流程数据实现 100%完整追溯，各类管控漏洞得到全面补齐，研制过程的标准化、精细化管控水平显著提升，可为后续同类型航天精密结构件研制提供成熟、可复制的标准化管控模板。

5 结语

综上所述，太阳翼刚性基板作为航天器核心精密承载构件，其高精度、高可靠的研制要求，决定了研制过程必须实现进度管控与质量管控的深度融合、协同发力。本文搭建的全流程协同管控体系，实现了质量风险前置预判、研制过程动态管控、问题隐患全程闭环清零。本型号工程实践表明，该协同管控体系能够有效提升刚性基板研制效率、优化成品质量、规范研制全流程，具备较好的工程实用性和行业推广价值。

[参考文献]

[1]于红英，许栋铭，吕学庚. 太阳翼基板的构型分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报， 2016， 48 (1): 46-52.

[2]荀仲秋，张永，王杰. 航天器刚性太阳翼在轨一维展开时间近似算法 [J]. 航天器工程， 2019， 28 (2): 51-55.

[3]赵春娟. 基于耦合动力学分析的挠性太阳翼结构优化设计[D]. 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)， 2022.

[4]尹理楠，于明礼，郭勤涛，等. 太阳翼展开机构刚柔耦合模型分层修正和展开预测 [J]. 机械设计与制造工程，2026， 55 (6): 7-11.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.