成功包络线在航天产品质量管控中的应用路径研究

李骏　陆华　王毅鹏
上海航天电子通讯设备研究所　上海市闵行区　201908

【摘　要】航天产品试验子样有限，传统质量管控在方案设计阶段缺少充分数据支撑，质量评价长期依赖事后归零。成功包络线通过构建基于历史成功数据的量化通道，实现从失效驱动向数据驱动预防的转变，与FMEA/FTA分别回答"正常应长什么样"和"为何会变坏"两个互补命题。本文建立该方法从技术工具向组织级制度应用转化的框架：界定百分位数法与Bootstrap法在小样本下的适用边界，明确同分布检验为多源数据合并的前置约束；从技术、组织、数据三个维度辨识九项风险，按发生频次与影响等级确定优先防控对象；提出战略部署、数据治理、PDCA管控、人才培养、体系嵌入五维路径。三条创新形成闭环，本地计算边界管理解决数据组织问题，相似度量化与德尔菲赋权结合的冷启动策略填补无历史数据场景的方法空白，基线包络与动态包络分层运行的管理机制实现制度固化，为航天产品全生命周期质量管控提供了系统解决方案。

【关键词】成功包络线；航天产品；质量管控；小子样；百分位数法

Research on the Application Path of the Success Envelope Line in the Quality Control of Aerospace Products

Li Jun　Lu Hua　Wang Yipeng,
Shanghai Institute of Aerospace Electronic Communication Equipment, Minhang District, Shanghai　201908.

【Abstract】The number of test subsamples for aerospace products is limited; traditional quality control methods lack sufficient data support during the design phase of testing plans, while quality evaluation has long relied on post-event root cause analysis. The Success Envelope Line achieves a transition from failure-driven to data-driven prevention by constructing quantitative channels based on historical success data; it complements FMEA and FTA, which address the two complementary questions: "What should the normal state look like?" and "Why does it deteriorate?"? This paper establishes a framework for transforming this method from a technical tool into an organizational-level institutional practice: defining the applicable boundaries of the percentile method and the Bootstrap method under small-sample conditions, clarifying that the same-distribution test serves as a prerequisite constraint for merging multi-source data; identifying nine risk factors across three dimensions—technical, organizational, and data-based—and determining the priority targets for prevention and control based on their occurrence frequency and impact severity; and proposing a five-dimensional implementation path comprising strategic deployment, data governance, PDCA-based control, talent cultivation, and system integration. These three innovations form a closed-loop system: the local computational boundary management addresses data organization challenges; the cold-start strategy, combining similarity quantification with Delphi expert weighting, fills the methodological gap in scenarios lacking historical data; and the management mechanism featuring baseline envelope and dynamic envelope hierarchical operation ensures the institutionalization of the approach, thereby providing a systematic solution for quality control throughout the entire lifecycle of aerospace products.

【Key words】Success Enveloping Line; aerospace products; quality control; small sample sizes; percentile method

引言：

航天强国战略下高密度发射对产品质量管控提出新要求，航天产品小子样、高风险特征使传统依赖设计评审和试验验证的管控模式面临“事后补救多、事前预防少”的结构性短板[1-2]。成功包络线已在重量控制和原材料管理中完成概

念验证[3]，并被提出融入可靠性框架[4]，但既有研究存在统计失配、缺乏组织路径、未解决同分布检验与冷启动三大局限。如何将其上升为组织级可操作方法，是航天质量可靠性工程的重要课题。本文围绕成功包络线在航天产品质量管控中的应用路径展开研究，首先梳理方法内涵与应用现状，继而论证推广的战略必要性，进而识别技术、组织、数据三个维度的关键风险，最后构建覆盖战略规划、数据治理、机制运行、人才支撑、制度保障的五维应用路径体系。

1.成功包络线在航天产品质量管控中的应用现状

成功包络线分析的本质是对“成功实践”的系统化建模与结构化复用，其与 FMEA、FTA 等失效分析工具构成互补，前者建立“正常应长什么样”的量化基线，后者分析失效机理，共同形成质量管控闭环。针对航天“小子样”特征，本文区分该方法与休哈特控制图的本质差异：传统 SPC 依赖大样本估计过程标准差以计算控制限，适用于批量生产场景的过程稳定性监控；成功包络线则直接利用历史成功子样构建评价基准，可通过百分位数法排序取极值区间、或采用 Bootstrap 重抽样法估计参数经验分布实现，两种途径均不要求数据服从正态分布。

方法有效的前提是多源数据合并前须经同分布检验确认一致性，未通过时应分别建络不得强行合并。该法从单机产品关键性能数据分析起步，逐步向系统设计环节拓展。既有应用已在两个场景中完成概念验证：重量控制中基于空间站多飞行器数据建立包络评价模型，实现重量设计从定性判断到量化分级的转变；原材料管理中通过对多批次聚氨酯预聚体数据的百分位数包络分析，将 NCO 含量指标从经验波动范围收严为更窄的控制目标。

然而当前应用仍存在四方面局限，集中于重量参数和单一材料指标，未覆盖产品性能、可靠性等更广泛的质量特性，发动机推力等关键性能参数至今仍主要依赖专家经验划定合格区间，缺乏包络基线支撑；多为个别项目团队的自发行为，缺乏组织层面的制度安排和流程嵌入，呈现不可持续的态势；各型号成功数据以离散文档存储，标准化程度不足，且缺乏对多源数据同分布假设的检验流程，简单合并可能产生误导性结论；全新型号方案论证阶段无历史成功子样，亦无可操作的相似度量化评估方法。上述局限表明，成功包络线需从技术分析方法上升为组织级质量管控方法。

2.加强成功包络线在航天质量管控中应用的重要性

航天产品单件或小批量的生产特征，决定了其无法像民用产品那样依赖大样本统计获取质量分布规律，传统 SPC 因样本不足在方案设计阶段难以有效应用。成功包络线的百分位数法和 Bootstrap 法直接利用历史成功子样构建评价基准，不依赖大数定律和正态分布假设，仅凭少量成功数据即可建立初步包络参考模型，这一独特价值是传统 SPC 在小子样场景下无法提供的。正因为方案阶段缺乏有效评价工具，才需将包络线前置使用：以百分位数法计算的包络边界作为分系统指标分配的上限约束，使关键参数在设计源头即有量化靶向，可显著减少设计迭代次数、加速方案收敛。这种“设计前置”的预防功能与 FMEA、FTA 等失效分析工具形成互补，后者回答“哪里可能出问题”，包络线提供“正常值应落在哪里”的量化基准。进一步地，航天领域数十年研制积累了丰富的成功经验，但各型号项目数据分散在不同部门，同类问题在不同型号中反复出现、反复解决，重复劳动与重复代价亟待遏制。成功包络线通过统一算法和检验标准将分散的成功数据汇聚为组织基线，使隐性经验显性化、可调用，是推动组织级质量知识复用的战略选择。上述三重必要性表明，推广成功包络线不是可选项而是必答题。

3.识别成功包络线在航天质量管控中应用的关键风险

前文已论证推广的战略必要性，但必要不等于可行。推广过程中若关键风险失控，可能产生误导性评价和错误放行，比不用该方法危害更大，故须系统识别风险，为第四章防控措施提供输入。从技术应用、组织管理、数据治理三个维度排查，九项风险均评定为三级重点关注。

技术维度上，包络建立不当的风险在于成功数据定义不明、样本过小时未声明参考性质、多源数据未经同分布检验即合并，可能形成虚假包络；包络误用表现为将特定产品的包络跨品种套用；更新滞后则因未及时纳入新成功子样，过时基线将导致合理偏离被误判为超差，限制设计创新空间；冷启动缺失使全新型号在方案阶段无基准可依，若盲目主观赋值且缺乏相似度量化框架，可能误导设计方向。组织维度上，战略层缺乏统一部署导致方法应用随领导更替而起伏；流程嵌入缺失使包络分析在进度压力下被边缘化，设计完成后再补做；人才能力结构偏重流程管控而缺乏数理统计和异常判读训练。数据维度上，不同型号采集条件和记录格式各

异，未经同分布检验直接合并将产生不可比数据的虚假包络；同时各型号成功数据分散在不同部门，保密壁垒和产权归属导致单个项目可获取子样有限，统计效力不足。

上述九项风险中，风险 1、4、5、6、7、8 因发生频次高且影响严重，列为优先防控对象；其余三项由第四章相应机制予以覆盖。九项风险与五维路径的完整映射关系见表 1。

表 1　优先防控风险与五维路径映射关系

风险编号与名称	对应路径维度	核心防控要点
风险 1：包络建立不当	机制运行（P 环节）	同分布检验前置、小样本参考定位、专家评审
风险 2：跨品种套用	机制运行（D 环节）	适用性物理边界复核、严禁盲目套用
风险 3：更新滞后	机制运行（A 环节）	双层次更新机制（年度固化+动态预警）
风险 4：冷启动缺失	机制运行（P 环节）	相似度量化框架、德尔菲赋权、地面/飞行数据分层
风险 5：战略层缺乏统一部署	战略规划	分级应用策略、里程碑嵌入、上下联动
风险 6：流程嵌入缺失	制度保障	GJB 9001C 嵌入、关键节点强制检查
风险 7：人才支撑不足	人才支撑	分层培训体系、知识管理平台
风险 8：数据标准不统一	数据治理	采集存储标准、同分布检验流程
风险 9：数据壁垒	数据治理	本地计算边界管理+元信息标准化上报

4. 构建成功包络线在航天质量管控中的应用路径

4.1 强化顶层设计，建立上下联动的战略推进机制

以故障模式及影响分析的风险优先数为判据，由型号总体基于判据确定强制纳入包络分析的关键单机清单及其关键参数，对清单内产品建立强制性包络分析制度，一般产品采用推荐性策略。方案阶段对有历史数据的产品经同分布检验后建立初始包络，无数据的全新型号采用基于相似产品修正的虚拟包络，待获取首批地面试验子样后校验修正；初样阶段每新增成功子样即动态更新，并以此阶段累积的地面鉴定与验收试验数据为基础，建立正样产品出厂放行与验收判读的正式基线包络；正样飞行成功后，将飞行数据纳入组织级数据库，作为同批次后续产品及后续改进型号基线修正与迭代更新的关键输入，触发基线更新流程，而非在当前型号飞行过程中切换基线。总体部门制定通用要求，分系统负责异常上报，总体聚焦共性偏差定期发布预警。

4.2 统一数据标准，构建组织级成功数据基线体系

地面鉴定与验收试验数据是正样阶段产品放行基线建立的直接依据；飞行成功数据是组织级数据库迭代更新和后续型号基线修正的优先参考源。成功子样明确定义为：飞行任务圆满成功且经型号故障审查委员会确认无产品级异常事件记录的完整数据；凡经历在轨故障处置或参数超差但未影响任务最终结局的子样，应标记为“边际成功”并单独建络分析，不得混入标准成功基线，以防止基线失真。

各分系统采用本地计算边界管理方案：在本地完成包络边界计算，仅上报边界值、样本量、产品名称与代号、参数名称与单位、成功子样清单（含各子样试验或飞行编号及时间）、数据采集设备与测试方法、数据处理方式等元信息，原始实测数据不出域；建立联合基线时执行同分布检验，未通过则分别建络。联合基线建立时，若各分系统边界经同分布检验确认一致，则取各分系统边界的交集作为最严格联合基线（适用于串联可靠性场景）；若产品为冗余备份设计，则取并集作为参考基线，并在基线说明文件中明确标注综合策略及理由。建立双层次更新机制：技术状态基线包络经技术状态控制委员会审批后固化，每年或重大变更后正式发布；日常监测动态包络随新数据自动更新，偏离超限时触发预警。

4.3 规范分析流程，建立 PDCA 驱动的动态包络管控机制

建立包络建立、监测、评价、更新四步闭环。建立环节以历史成功子样为输入，执行同分布检验确认一致性后按百分位数或自助法计算包络。对于关键特性参数，正式基线包络应基于工程风险接受准则和参数重要等级选取适宜的分位数区间作为正常波动上下限；对于涉及安全裕度极低或单点失效模式的特性，应采用覆盖所有已知成功样本的极值包络作为底线约束，以确保对罕见偏差的零容忍。对于尚处于极小子样阶段的初样数据，暂不设定固定分位数阈值，仅以极值区间作为预警参考，待该参数成功子样积累至具备统计推断效力的样本容量后，方可依据累积分布转化为正式基线。对于极小子样条件下的同分布检验，其统计功效有限，结论需结合试验工况、安装边界及产品代际等物理机理一致

性进行综合判定，不能仅依赖统计检验结果。

当统计检验结论与上述物理机理一致性判断出现冲突时，以物理机理一致性为最终裁决依据：物理机理不一致时，无论统计检验结果是否通过，均不得强行合并数据；物理机理一致但统计检验未通过时，若已具备一定样本量，可尝试经数据变换或非参数检验方法复算确认，若复算仍未通过或样本尚不充分，则仍维持分别建络并附加工程说明。样本量较少时须标注参考性质并经专家评审后发布。冷启动型号从功能、结构、载荷、环境四个维度加权计算相似度，权重由领域专家组基于历史型号数据相关性分析结果确定，综合评分达标后方可作为参考基准，采用德尔菲法组织相关领域技术专家进行多轮匿名赋值，经联合评审后使用。若型号研制进度紧张，可由型号两总设计师牵头，基于相似型号历史经验数据直接赋权，待后续累积足够地面试验子样后再进行迭代修正，不必僵化执行多轮匿名程序。冷启动阶段建立的虚拟包络仅作为方案论证的方向性参考，不得直接用于正样出厂放行判读，须待获取该型号首批地面试验子样并经同分布校验后方可转入正式基线试用。获得足够地面试验子样后校验修正，获得首个飞行成功子样后正式切换为飞行基线。监测环节按实测值偏离程度分级响应：严重超差立即停止工作并组织技术归零，临界超差要求专项说明并制定纠正措施，包络内偏离中位线建议优化并记录备查。评价环节通过季度分析会和出厂放行审查确保偏离闭环。更新环节按年度将飞行验证数据纳入数据库完成迭代。

4.4 培育专业人才，构建数据分析能力支撑体系

将包络分析能力纳入型号质量师任职资格认证要求。面向全员开展统计基本概念和包络图判读培训，面向型号质量师开展包络建立流程和同分布检验操作培训，面向技术骨干开展包络线与基于模型的系统工程融合应用培训；同步建立包含典型案例和常见问题解决方案的结构化知识库，主动推送支撑研究设计。

4.5 完善制度保障，将包络线分析纳入质量管理体系

编制实施指南明确分析流程和评判准则，依据 GJB 9001C 第 8.3 条和第 8.5 条将成功包络线基线纳入技术状态基线管理，基线包络经技术状态控制委员会审批后作为关键节点强制检查项，变更须走正式流程，动态包络仅作监测参考。在方案设计评审、初样转正样、出厂放行审查等节点设置强制检查，未经偏离审查和闭环确认不得转入下一阶段。将包络线建立率、覆盖率、异常闭环率纳入质量工作考核指标，在需求管理系统中建立包络偏离追溯矩阵，明确需求条目、功能实现、包络参数、偏离处置的映射关系，由型号质量师负责维护，确保每项偏离均有原因分析和效果验证。

5 .结语

本文从航天产品方案设计阶段样本不足的方法论瓶颈出发，系统完成了成功包络线从概念验证到组织级应用框架的转化设计。在方法层面，百分位数法与 Bootstrap 法在小样本下的适用边界及同分布检验前置约束的确立，使该方法具备了区别于传统 SPC 的独立方法论基础；同时将飞行成功数据与地面试验数据分层使用，确立了前者作为正式基线唯一来源的工程原则。在风险防控层面，技术、组织、数据三维度九项风险的辨识与排序，为路径构建提供了精准靶向，其中六项优先风险分别对应战略部署、流程嵌入、人才建设、数据治理等不同维度的防控措施。在制度落地层面，以本地计算边界管理方案破解分位数不可合成的数学障碍，以双层次基线管理制度实现动态更新与状态变更之间的平衡，并通过纳入质量管理体系使方法获得持续运行的法规保障。进一步的研究将聚焦于包络边界阈值与基于模型的系统工程模型的深度融合，以及基于历史数据的包络参数趋势预测方法。

参考文献

[1]韩冬,巩生波,王丽俐,等.基于成功包络线理论的载人航天器产品重量控制方法研究[J].载人航天,2023,29(3):407-414.
[2]谭永华,邓永锋,胡海峰,等.基于数字技术的液体火箭发动机可靠性研究进展[J].火箭推进,2025,51(3):19-26.
[3]柯贤朝,沈曌隽,江琛.成功数据包络分析在原材料管理中的应用[J].理化检验-物理分册,2025,61(12):30-33.
[4]张亮,石欣亚,刘召军,等.面向航天工程的组织级风险管理机制构建与实施[J].航天工业管理,2025,(1):51-55.
作者简介：李骏（1978.10-），男，汉族，籍贯：安徽太和，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：质量管理。