

新能源汽车热管理系统集成开发中的交付风险优化研究

石海涛

上海爱斯达克汽车空调系统有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i3.21359

[摘要] 随着新能源汽车产业高速发展,热管理系统集成化成为提升整车性能与续航的关键,但其多学科耦合、跨系统接口复杂等特性,使集成开发面临接口定义模糊、开发节拍与整车节点失配、供应链波动及验证迭代周期长等多维交付风险,严重制约项目成功率。针对此问题,本文以系统工程与项目风险管理理论为基础,构建覆盖“需求-设计-验证-交付”全生命周期的风险识别框架,建立技术-进度-成本多因素权重评估模型实现风险量化分级,并引入动态优化方法,通过关键路径节点重构与缓冲配置优化提升交付韧性。案例验证表明,所提模型可显著缩短开发周期、降低返工率、提升节点达成率。创新点在于将系统工程风险建模与动态优化方法深度融合,实现了复杂系统交付管理从被动应对向主动预测的范式转变,为新能源汽车热管理系统集成开发提供可量化、可预测的风险管控解决方案。

[关键词] 新能源汽车; 热管理系统; 集成开发

中图分类号: U469.7 **文献标识码:** A

Research on delivery risk optimization in integrated development of new energy vehicle thermal management system

Haitao Shi

Shanghai SDAAC Automotive Air-conditioning System Co., Ltd.

[Abstract] with the rapid development of the new energy vehicle industry, the integration of thermal management system has become the key to improve the vehicle performance and endurance. However, due to its multidisciplinary coupling and complex cross system interface, the integrated development faces multi-dimensional delivery risks, such as fuzzy interface definition, mismatch between development pace and vehicle nodes, supply chain fluctuations and long verification iteration cycle, which seriously restricts the success rate of the project. To solve this problem, based on the theory of system engineering and project risk management, this paper constructs a risk identification framework covering the whole life cycle of "demand design verification delivery", establishes a multi factor weight evaluation model of technology schedule cost to achieve risk quantification and classification, and introduces dynamic optimization method to improve delivery toughness through critical path node reconstruction and buffer configuration optimization. Case verification shows that the proposed model can significantly shorten the development cycle, reduce the rework rate and improve the node achievement rate. The innovation lies in the deep integration of system engineering risk modeling and dynamic optimization methods, which realizes the paradigm shift of complex system delivery management from passive response to active prediction, and provides a quantifiable and predictable risk management and control solution for the integrated development of new energy vehicle thermal management system.

[Key words] new energy vehicles; Thermal management system; Integrated development

1 引言

随着全球汽车产业向新能源化、智能化深度转型,新能源汽车热管理系统作为保障动力电池安全、提升续航里程及驾乘舒适性的核心子系统,其技术复杂度与集成度显著提升,已从单一

功能模块演变为涵盖电池、电机、座舱等多域热负荷协同管理的复杂工程系统。然而在易变复杂不确定的时代背景下,热管理系统集成开发项目面临跨系统接口定义模糊、开发节拍与整车节点失配、供应链波动及验证测试迭代周期长等多维交付风险,

严重制约项目成功率,系统论证并优化交付风险已成为决定项目成败的关键变量。当前,国内外研究虽在项目风险管理、汽车开发流程及系统工程等领域积累了丰富成果,但多聚焦于单一领域或通用方法论,针对新能源汽车热管理系统这一多物理场耦合、跨学科集成的专项交付风险研究尚显不足,存在理论与实践的结合缺口。为此,本文聚焦新能源汽车热管理系统集成开发全过程,以构建“识别—评估—优化”一体化风险管理模型为目标,通过全生命周期风险识别、多因素权重量化评估及关键路径动态优化,提升项目交付确定性。

2 热管理系统集成开发交付风险识别与评估模型构建

2.1 基于全生命周期的风险识别框架

新能源汽车热管理系统的集成开发是一个多阶段、多学科交叉的复杂过程,风险贯穿于项目始终。为确保风险识别的全面性与系统性,本文借鉴系统工程中的V模型开发框架,构建了一个覆盖“需求—设计—验证—交付”四个核心阶段的风险识别框架。该框架旨在将风险管理工作前移,实现从被动应对向主动预防的转变。

2.1.1 需求阶段风险识别

需求是项目开发的基石,此阶段的风险具有源头性和放大性。主要风险点包括:①需求模糊与频繁变更:客户对热管理系统性能指标的期望不明确,或随着竞品技术迭代而频繁变更需求,导致项目范围蔓延。②跨系统接口定义不清:热管理系统与电池管理系统、整车控制器等存在复杂的物理与逻辑接口。若接口协议、性能边界未在项目早期明确定义,将导致后续集成时出现严重兼容性问题。③相关方需求冲突:整车性能、成本控制、用户体验等不同相关方的需求可能存在矛盾,如为实现快速降温而采用大功率压缩机,却与成本控制目标相冲突,若未有效协调,将成为项目隐患。

2.1.2 设计阶段风险识别

设计阶段是将需求转化为技术方案的关键环节,其风险直接决定了产品的固有质量和项目成败。主要风险点包括:①系统架构缺陷:系统架构设计不合理,如冷媒回路设计复杂导致压力损失过大,或热管理策略与整车能耗目标不匹配。②关键部件选型与技术成熟度风险:电子水泵、多通阀、电子膨胀阀等关键部件的性能、可靠性及与系统匹配度至关重要。若选型不当,或采用技术尚不成熟的新材料、新工艺,可能导致性能不达标或批量生产时良率低下。③仿真模型与物理样机性能偏差:过度依赖仿真分析,而仿真模型的边界条件设置不当或简化过多,可能导致仿真结果与物理样机测试数据存在较大偏差,引发设计返工。

2.1.3 验证阶段风险识别

验证阶段是检验设计是否满足需求的试金石,其风险主要体现在测试活动的有效性和效率上。主要风险点包括:①测试资源冲突与准备不足:环境仓、测功机、数据采集系统等核心测试设备在多项目并行时资源紧张,或测试工装、软件版本准备

不及时,导致测试计划延误。②测试用例覆盖不全:测试用例未能完全覆盖所有用户场景和极端工况,导致潜在缺陷无法在实验室阶段被发现,流入后续阶段造成更大损失。③试验失败与迭代周期过长:关键试验若多次失败,将触发“设计—修改—再验证”的迭代循环,严重拖慢项目整体进度。问题根本原因分析不彻底,也会导致无效迭代,延长验证周期。

2.1.4 交付阶段风险识别

交付阶段是项目成果向生产制造和最终用户转移的过程,风险集中于供应链和生产爬坡。主要风险点包括:①供应链中断与波动:全球芯片短缺等事件已证明,单一供应商或地理集中的供应链存在巨大风险。关键芯片、传感器、阀体等部件的供应中断或价格剧烈波动,将直接导致项目停产或成本失控。②生产制造与质量一致性风险:从试制线到大规模生产,工艺稳定性、设备能力、人员操作等因素可能导致产品质量不一致,无法满足设计要求的公差和性能标准。③软件与数据交付延迟:嵌入式软件刷写、整车标定数据冻结是交付前的最后环节。软件缺陷或为优化性能而进行的反复标定,可能导致数据无法按时冻结,影响整下车下线。

2.2 多因素权重评估模型

2.2.1 风险评价指标体系构建

为全面评估风险的综合影响,建立了技术(T)、进度(S)、成本(C)三个一级指标。技术风险(T)主要衡量风险对系统功能、性能、可靠性及安全性的影响程度;进度风险(S)评估风险对项目关键路径和整体交付时间的延误影响;成本风险(C)则评估风险导致的直接经济损失和间接成本增加。每个一级指标可进一步细分为若干二级指标,构成完整的评价指标体系。

2.2.2 基于AHP的权重确定

由于技术、进度、成本三个维度的重要性并非均等,且在不同项目或阶段可能有所侧重,本文采用层次分析法来确定其权重。AHP是一种将定性分析与定量计算相结合的多目标决策分析方法,其步骤如下:先邀请行业专家对T、S、C三项指标进行两两比较,构建判断矩阵;然后计算判断矩阵的特征向量,得到各指标的初始权重;最后进行一致性检验,若 $CR < 0.1$,则判断矩阵的一致性可接受,权重分配合理。通过此方法,可以科学、客观地反映不同专家经验,得出综合权重,避免了主观随意性。

2.2.3 风险矩阵与优先级排序

在确定各风险因素的T、S、C影响分值后,结合其权重计算出综合风险影响值。将风险的发生概率与综合影响值置于一个风险矩阵中。风险矩阵将风险划分为不同的区域,如高风险区、中风险区和低风险区。落入高风险区的风险项,即为需要优先处理和配置资源进行应对的关键风险。此模型将模糊的风险感知转化为直观的量化等级,为项目经理提供了清晰的决策依据,实现了从定性经验判断向定量科学决策的转变。

3 基于动态优化的交付风险优化策略

3.1 关键路径节点重构

关键路径法是项目进度管理的核心工具,其确定的关键路径决定了项目的最短工期。在传统应用中,CPM往往基于固定的任务工期估算,未充分考虑任务本身的风险属性。本文提出一种风险导向的关键路径重构方法。基于第三章的风险评估结果,将风险等级作为权重,融入项目网络图中,识别出“高风险-长周期”任务集中的路径,这可能是比传统CPM更真实的“关键约束路径”。针对此路径上的高风险节点,采取以下优化策略:①任务解耦与并行化:通过细化任务颗粒度,将强依赖的串行任务拆解为可并行的子任务。例如将系统级测试的部分准备工作与详细设计后期工作并行开展。②采用快速原型法:对于技术不确定性高的设计任务,采用快速制造原型样件进行早期验证,通过快速迭代收敛技术方案,避免在后期验证阶段出现颠覆性问题导致关键路径严重延误。

3.2 缓冲配置与动态管理

关键路径法虽能识别关键任务,但无法有效应对任务执行过程中的不确定性。关键链项目管理理论为此提供了解决方案,其核心思想是通过设置缓冲来吸收不确定性。本文将此思想与风险评估模型结合,实现智能化的缓冲配置与管理。在经重构后的关键链末端设置项目缓冲,其大小并非简单依据任务工期的安全余量,而是综合了关键链上各任务的风险等级,高风险任务贡献更大的缓冲时间。在非关键链任务汇入关键链的节点处,设置接驳缓冲,专门用于防范因高风险非关键任务延误而对关键链造成的冲击。最关键的是,提出一种动态缓冲管理机制。项目执行期间,通过每日站会或每周评审会监控各任务的进度与缓冲消耗情况,并持续更新风险登记册。当某项任务的缓冲消耗速率远超预期,或其风险等级因新情况而升高时,项目管理层可及时决策,如调配额外资源、启动备选方案或调整后续任务计划,实现对缓冲的“再充填”或重新分配。这种“监控-反馈-调整”的闭环管理,使项目计划具备动态适应性,将风险隔离在可控范围内,从而保障最终交付节点的稳定性。

4 案例分析与模型验证

4.1 案例背景与数据来源

该案例项目旨在为一款全新高端纯电SUV平台开发集成式热管理系统,需统筹电池冷却/加热、空调制冷/制热及电机冷却等多重功能。项目目标开发周期为18个月,涉及系统、软件、结构、测试等多个跨职能团队。为进行客观对比,本研究选取了该公司此前采用传统项目管理方法,且产品复杂度和规模相近的“某新能源轿车平台热管理系统开发项目”作为历史参照组。两组项目的关键绩效指标数据均来源于公司内部的项目管理信息系统与质量管理体系,确保了数据的真实性与可比性。

4.2 模型应用与效果对比

在SUV平台项目中,本研究系统应用了前述风险模型。通过“需求-设计-验证-交付”框架识别出32项关键风险,其中“热

泵系统低温除霜逻辑缺陷”、“芯片供应延迟”及“BMS接口协议变更”被评估为最高风险级。项目组依据评估结果对关键路径进行重构,将“热泵控制器软件集成测试”任务拆解并前置,并为“芯片采购”任务设置了占其工期40%的接驳缓冲。项目执行过程中,通过动态缓冲管理机制,成功吸收了因供应商芯片到货延迟2周带来的进度冲击。

与采用传统方法的轿车平台项目相比,SUV平台项目的KPIs得到显著优化。具体数据对比如下:开发周期从22个月缩短至18个月,降幅达18.2%;项目返工率从15%降低至5%;关键节点达成率由80%提升至95%。

4.3 结果分析与讨论

KPIs的显著提升验证了本文模型的有效性。开发周期的缩短主要得益于风险导向的关键路径重构,将技术不确定性高的任务提前暴露并解决;返工率的降低则源于全生命周期的风险识别与前置控制,避免了后期因接口或需求问题导致的颠覆性修改。模型应用也面临挑战:对历史数据质量要求高,若企业缺乏完善的项目数据库,将影响风险发生概率的准确评估;动态缓冲管理要求项目经理具备更高的决策权限与跨部门协调能力,对组织管理模式提出了挑战。建议企业在推广应用前,需要先建立标准化的项目数据采集流程,并明确跨部门风险协同应对的组织职责与流程,以最大化模型价值。

5 结论与展望

本研究通过构建“识别-评估-优化”一体化风险管理模型,系统解决了新能源汽车热管理系统集成开发中的交付风险问题,经案例验证,该模型可有效缩短开发周期、降低返工率并提升节点达成率。创新点在于将系统工程风险建模与项目管理动态优化方法跨学科融合,实现了从被动应对向主动预防的范式转变。尽管研究存在案例分析代表性有限、人为因素等软性风险量化不足等局限,但为行业提供了可量化、可预测的风险管控方案。未来可进一步探索人工智能在风险预测中的应用,或将此模型扩展至整车级开发项目管理,以提升更复杂工程系统的交付确定性。

[参考文献]

- [1]段歆烨,周培,余青桦,等.基于热泵架构的电动汽车直冷式热管理系统设计与控制优化[J/OL].合肥工业大学学报(自然科学版),1-8[2026-06-03].
- [2]焦红星,单超,李小静,等.燃料电池智能热管理系统设计与性能优化研究[J/OL].汽车文摘,1-5[2026-06-03].
- [3]董佳硕,丹聃,魏名山,等.基于平板热管的动力电池热管理系统[J].汽车安全与节能学报,2026,17(2):209-217.

作者简介:

石海涛(1983--),男,汉族,湖南邵阳人,硕士,新能源汽车热管理,系统协同与优化。