

制造约束下的农业机械外观精益设计方法^{*}

傅燕翔¹, 王世卓², 余祥杰¹, 曾雅涛²

(1. 湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 湘潭大学 艺术学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为解决农业机械产品外观设计中存在的设计效率低、制造脱节及验证滞后等问题,构建以聚焦瓶颈-快速迭代-嵌入制造-验证闭环(focus-improve-embed-verify, FIEV)为核心的精益设计流程模型。模型以阶段性任务驱动方式统筹设计全流程,系统聚焦设计瓶颈、提升模型迭代效率及嵌入制造可行性并闭环验证输出质量;整合约束理论-精益生产-六西格玛(theory of constraints-lean production-six sigma, TLS)与面向制造的设计(design for manufacturing, DFM)并提出 TLS-DFM 实施路径,明确各阶段所匹配的流程改进与质量控制工具。结果表明:评估周期由 20 d 缩短至 12 d,整体开发周期较传统缩短 23%,模型一次性通过率由 48%提升至 76%。该方法可提升设计方案的制造匹配度与参数稳定性,降低试错成本与开发周期,适用于中小批量、定制化农机产品的外观设计流程改进,具备良好的工程应用前景。

关键词:农业机械;外观设计;精益设计;FIEV 模型;TLS-DFM 方法;制造约束

中图分类号:TH122;S220.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2354(2025)12-0084-07

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2025.12.006

Lean design method for agricultural machinery appearance under manufacturing constraints

FU Yanxiang¹, WANG Shizhuo², YU Xiangjie¹, ZENG Yatao²

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105;

2. Art Institute, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract: To solve low design efficiency, manufacturing disconnect and delayed validation in agricultural machinery appearance design, a lean process model centered on focus-improve-embed-verify (FIEV) was developed. Driven by phase-specific tasks, the model systematically focused on design bottlenecks, accelerated prototype iteration, embedded manufacturing feasibility and verified closed loop on output quality. The theory of constraints-lean production-six sigma (TLS) and design for manufacturing (DFM) were integrated to propose a TLS-DFM implementation pathway. The process-improvement and quality-control tools were specified to match to each phase. The results show that evaluation cycle was reduced from 20 d to 12 d. The overall development time decreased by 23%, and first-pass prototype approval rates rose from 48% to 76%. The proposed method enhanced manufacturing compatibility and parameter stability of design schemes, reduced trial-and-error costs and shortened development cycles. This model is applicable to small-to-medium batch and customized agricultural machinery, demonstrating strong potential for engineering deployment.

Key words: agricultural machinery; appearance design; lean design; FIEV model; TLS-DFM method; manufacturing constraints

农业机械化是加快农业农村现代化的关键抓手与
基础支撑,强化农机装备自主研发与制造对推动产业

转型升级、全面推进乡村振兴具有重要意义^[1]。随着
精细农业深入发展与市场定制化需求提升,农机产品

^{*} 收稿日期:2025-05-26;修订日期:2025-08-23

对耐久性、作业效率及模块化互换性等性能要求日益严苛,由经验驱动的传统设计模式在平衡创新美学、制造成本与工艺可行性方面具有局限性。尤其在外观设计环节,核心挑战主要表现为创新动力不足,设计流程过度依赖个人经验或对标竞品缺乏系统创新机制,导致产品同质化现象严重^[2];设计与制造脱节,设计阶段对模具成本、生产工艺等制造端约束考量不充分,导致设计优良却难以量产的矛盾,引发高昂的返工成本^[3];验证机制滞后,现有评估方法多聚焦于单一维度,忽视多因素综合影响,对后续设计迭代指导作用有限。当前研究在概念生成、用户需求挖掘及智能化设计工具等方面取得显著进展^[4-7],但在实现农机外观设计与制造过程融合上亟需进一步发展。

文献[8]认为约束理论的系统产能由最薄弱环节决定,通过持续识别并缓解约束使非瓶颈环节与关键节点节奏一致以提升整体产出;文献[9]认为精益生产的核心为识别并消除非增值活动、优化价值流,借助价值流图、看板与并行工程等前置工艺约束,实现设计与制造同步。六西格玛是一种以数据驱动、面向项目的质量改进方法,通过 DMAIC 模型(define-measure-analyze-improve-control, DMAIC)将过程缺陷率降至每百万机会不超过 3.4 次,实现过程稳定与持续改进^[10]。其各阶段共同构成量化改进闭环,以降低缺陷率、控制成本并提升过程可重复性与稳定性。江志斌等^[11]系统回顾了不同方法的核心原理与局限,提出多种融合模式,并通过企业案例验证了其产能、质量与成本协同增效的效果;何桢等^[12]对精益六西格玛进行综述,强调其在制造业与服务业中的应用价值,指出文化变革、高层支持与全员参与等关键实施挑战;Gupta 等^[13]构建了 TLS 框架,使 TLS 框架在组织思维、全局指标与方法整合 3 个维度内进行融合,可显著提高产能并降低缺陷率;Khubalkar 等^[14]针对农机设备制造生产力提升问题,采用价值流图等精益工具,有效减少非增值活动,提升了生产效率与产品质量;Li 等^[15]以隧道掘进机为例,提出结合改进设计失效模式与影响分析(design failure mode and effects analysis, DFMEA)及知识图谱的复杂产品组件风险分析法,可减少对专家经验的依赖,提升复杂产品风险识别与分析效率。

尽管相关管理理论在制造业与服务业集成应用中

已取得一定成效,并在多行业案例中验证了其对流程改进、质量提升及成本控制的作用,但在农业机械外观设计领域尚未得到系统化应用。为此,文中提出 FIEV 模型,构建设计实施路径,将制造约束前置于设计初期,贯穿样件开发至量产的闭环流程。旨在缩短农机产品开发周期、降低返工风险,为农业机械外观设计提供精益化设计范式。

1 农机外观精益设计模型构建

1.1 农机外观设计的特点与顶层需求

农业机械外观设计不仅要考虑美学与品牌表达,更须在复杂的工艺环境和严苛的使用场景中保持高可行性和可制造性^[16]。相较于普通消费类产品,农机整体尺寸与质量要求较高,其大型结构构件的模具开发、材料选型及工艺验证易产生制造周期延长及成本上升等问题。外观组件需在田间泥土、振动冲击及腐蚀介质等恶劣环境中持续服役,对密封、防护、耐磨,以及耐候等性能提出较高要求^[17]。人机交互设计需平衡视野范围、操作舒适性与维护便捷性;拆装设计应满足接口标准化与快速更换的工程可行性;定制化需求则需顶层框架预留多版本快速适配扩展空间,响应不同地理区域、作物类型对功能模块及附属装置的差异化需求。

农机外观设计应突破先设计后制造或局部改进的传统模式,通过系统化视角前置制造约束与质量控制,实现创新表达与品牌竞争力的同时满足复杂工艺下的可制造性、质量一致性及灵活定制需求,为制造与迭代奠定坚实基础。

1.2 FIEV 模型的提出与定义

约束理论聚焦系统薄弱环节,通过关键资源改进配置提升整体效能;精益生产以价值流为核心,通过消除非增值环节、并行工程及快速迭代压缩设计周期;六西格玛通过关键质量特性识别、DMAIC 模型及统计过程控制(statistical process control, SPC)构建量化质量保障机制。三者 in 原理层面高度互补,约束理论负责全局约束与产能管理,精益生产保障流程连续性及资源产出效率,六西格玛确保整体过程稳定且可重复。约束理论、精益生产与六西格玛核心特征比较表如表 1 所示。

表 1 约束理论、精益生产与六西格玛核心特征比较

理论	核心理念	关注焦点	使用对象	局限
约束理论	瓶颈优化	关键资源	短周期	忽视波动
	系统聚焦	流程瓶颈	产能受限 ^[18]	局部最优
精益生产	消除浪费	价值流	流程优化	依赖供应 ^[19]
	流动优化	持续改进	成本控制	波动风险
六西格玛	降变提质	过程稳定	确保质量	成本高 ^[20]
	数据驱动	缺陷控制	追溯流程	流程刚性

FIEV 模型流程涵盖聚焦瓶颈、快速迭代、嵌入制造,以及验证闭环 4 个环节。聚焦瓶颈阶段,通过梳

理需求与制造约束,锁定制约进度与质量的关键节点,为资源配置及风险缓冲奠定基础;快速迭代阶段在模块化设计中融入精益思维,开展早期制造评估加速方案优化;嵌入制造阶段通过预置 DFMEA、公差管理及仿真分析,将关键质量特性与工艺约束前置于设计流程,保障可制造性;验证闭环阶段依托 SPC 监控及样件、市场多源反馈可视化,实现设计绩效的持续监测与优化。流程具备系统性、可控性与灵活性,可支撑设计全周期的高效协同与质量保障,FIEV 模型如图 1 所示。

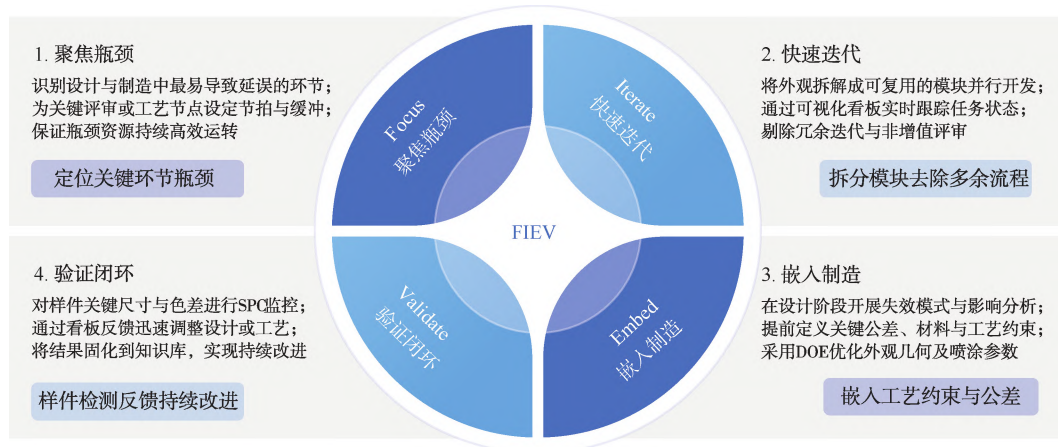


图 1 FIEV 模型

1.3 FIEV 模型的模块分解机制

1.3.1 聚焦瓶颈

聚焦瓶颈阶段通过量化分析应对农机外观设计制造脱节问题。在考虑 DFMEA 时,风险评估法由于简便、易于操作在工程上得到广泛应用^[21]。对模具开发周期、跨部门审批时长、供应商响应时延和返工率等 4 类关键设计指标进行标准化数据采集,按最大-最小法归一化映射至 0~1 区间以消除量纲差异。通过专家赋值法为每项指标分配权重,计算各项指标风险值,反映其对项目进度与质量的相对重要性:

$$r_i = w_i s_i o_i \quad (1)$$

式中: r_i ——第 i 项指标的风险值;

w_i ——权重(0~1 分,归一化满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$);

s_i ——指标严重度评分(1~5 分);

o_i ——发生频率评分(1~5 分)。

依据风险值排序提取高风险项,形成瓶颈清单并制定资源倾斜与缓冲策略,提前配置人力、物料及时间储备至制约进度或质量的关键环节。由设计、制造、质量及供

应链专家联合复核瓶颈判定结果,实时监测关键指标,动态调整优先级与资源投入以规避新制约因素。阶段输出包括瓶颈清单、节奏规划表及风险缓冲方案,提供量化依据以进行快速迭代与制造,最大限度减少返工及资源浪费。

1.3.2 快速迭代

快速迭代阶段针对创新性不足,系统梳理设计活动与信息流,剔除非增值环节并合并重复工作。采用价值流图拆解外观并开发全过程,量化各工序的周期时间、等待时间与返工率,识别并剔除重复评审和冗余返工节点。基于功能与工艺可行性对相似需求或共享资源的设计内容进行归并,确保各模块在依赖关系可控的前提下并行推进。并行过程中,借助看板管理同步分配任务与信息,各模块需实时共享工艺参数、材料规范与接口标准等基础数据,在预设的同步检查点开展质量与进度对比,防止模块间变更引发风险。

流程执行中,通过对进度节拍与资源可用性进行匹配,持续调整模块任务优先级和推进计划,避免在低价值阶段投入过多精力。阶段成果包括价值流优化

图、模块化任务清单及同步检查日志,为流程优化和资源再分配提供依据。

1.3.3 嵌入制造

嵌入制造阶段的核心为方案细化阶段对制造约束及质量风险要素前置,保障外观设计的工艺可行性与量产稳定性。依据设计功能与装配要求将组件拆解为关键尺寸、接口与工艺特征并逐条列出可能的失效模式及后果(如配合间隙不足、表面不平整及密封失效等),对各失效模式分别赋予严重度、发生度和可探测度评分,并计算风险优先级数:

$$r_j = s_j o_j d_j \tag{2}$$

式中: r_j ——第 j 项指标的风险优先级数;

s_j ——严重度评分(1~5 分);

o_j ——发生频率评分(1~5 分);

d_j ——失效模式可探测度评分(1~5 分)。

针对高于设定阈值的失效模式,制订优化公差、增加检测试验或改良工艺等缓解措施。对装配间隙及关键配合件进行统计仿真,评估材料与工艺偏差叠加条件下的装配稳定性。对于复杂曲面或高风险部件,结合有限元仿真或快速成型试制获取实际性能数据,将结果与 DFMEA 及仿真输出对比,根据项目要求调整公差分配或改进结构设计。参照模具开发周期、加工

能力与产能计划,确定设计进度与产能缓冲方案,避免设计提交与制造资源冲突。

缓解措施实施后,在试制阶段设定抽样方案对高风险项进行验证。验证通过后更新 DFMEA 条目,若严重度评分降至可接受阈值且关键质量特性验收满足放行标准,则对应项关闭并归档,否则按根因分析返回对策制订环节并继续迭代。最终产出 DFMEA 报告、公差仿真统计、节奏缓冲表及工艺验证记录,在方案细化期建立可验证、可追溯的制造可行性保障体系。

1.3.4 验证闭环

验证闭环阶段旨在弥补验证滞后问题,以样件试制与早期小批量试产为数据来源,构建持续反馈机制,确保方案在真实环境中的可行性与可靠性。基于初期设定的关键质量特性与制造约束选定评估指标,包括关键质量特性合格率、公差满足率、改进前后风险值降幅、人机工程反馈和环境适应性等。在样件试制或数字仿真中收集实测数据,将实测结果、设定目标及工艺约束进行对比,识别性能差距与改进需求,将改进措施融入设计或工艺调整流程,形成闭环改进。反馈信息应覆盖制造现场、质量检验和用户测试等环节,综合评估对外观造型、公差标准及材料选型的影响,动态调整约束边界与优先级。FIEV 模型输入-输出示意如图 2 所示。

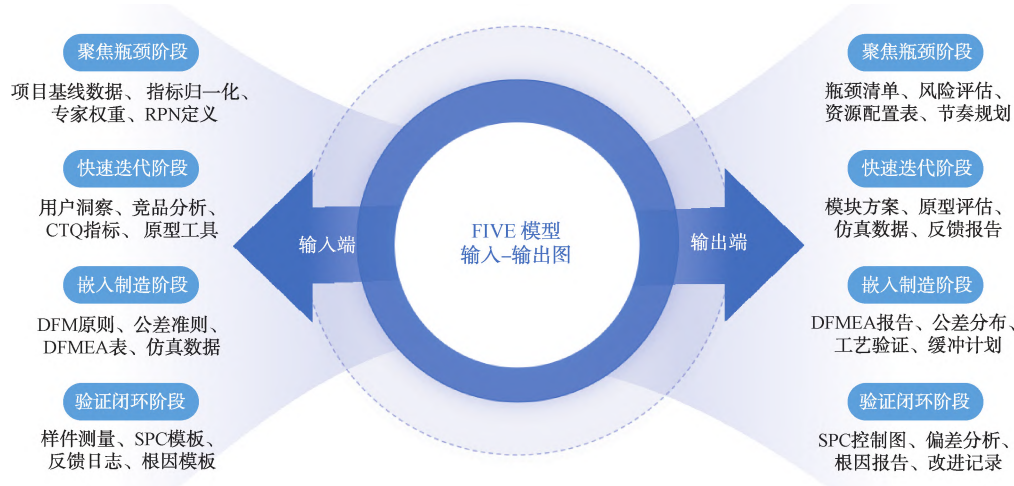


图 2 FIEV 模型输入-输出示意

2 基于农机外观精益设计模型的设计方法实施策略

2.1 TLS-DFM 方法的提出与设计逻辑

TLS-DFM 方法以 FIEV 模型为基础,采用约束理

论识别工艺难点与市场需求,转化为量化设计指标与节奏规划。快速迭代阶段依托精益生产价值流思维模块化拆解外观设计,通过看板管理与模型试验验证模块可行性。制造阶段按 DFM 原则评估公差分配和关键质量特性,采用六西格玛法开展统计分析与失效模

式评估,采用仿真和试验设计改进零部件细节。验证闭环阶段通过统计过程控制监测样件和市场反馈,将

偏差信息反馈至约束识别和迭代流程,支持持续改进。TLS-DFM 方法示意图如图 3 所示。

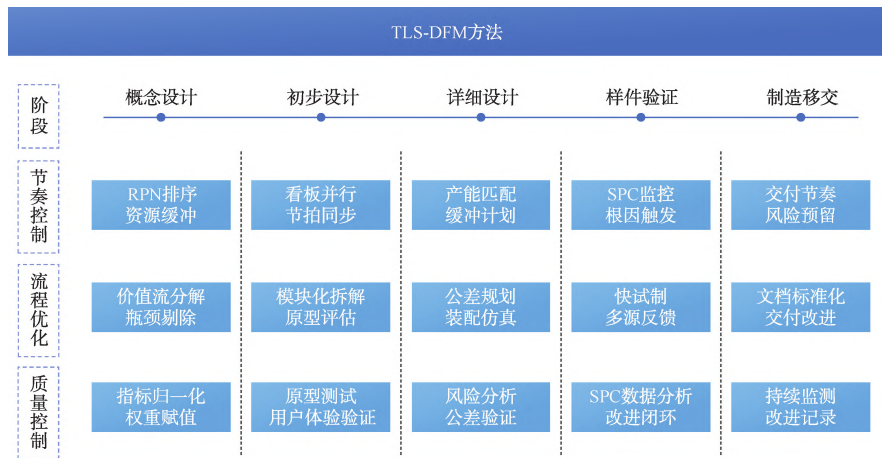


图 3 TLS-DFM 方法示意图

2.2 TLS-DFM 方法的实施路径

TLS-DFM 方法分为概念设计、初步设计、详细设

计、样件验证与制造移交 5 个阶段,TLS-DFM 方法耦合示意图如图 4 所示。

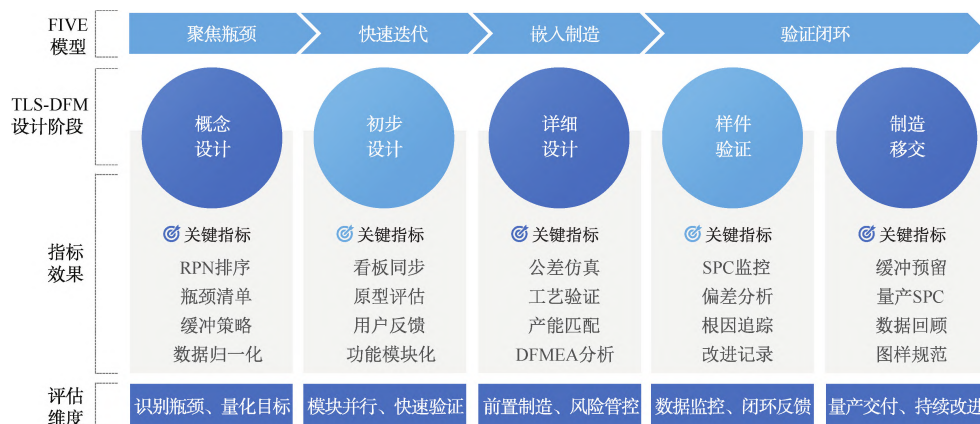


图 4 TLS-DFM 方法耦合示意图

1) 概念设计阶段 以量化识别核心约束为切入点,收集基线数据并归一化处理,结合专家赋权法确定指标权重,采用加权风险评估对严重度与发生频率评分并排序,形成瓶颈清单与资源缓冲方案。将关键质量特性转换为可度量指标,生成多套概念方案。采用快速仿真与低成本模型试制开展制造可行性与人机工程验证,采用统计分析明确关键尺寸,筛选出兼顾创新性与量产潜力的概念设计。

2) 初步设计阶段 聚焦模块化细化与跨团队协同,选定概念后,按功能拆解原则进行三维建模,通过看板管理同步设计、制造与质量的工作进度。基于初步识别的高风险失效模式,以模型或虚拟仿真结果为依据开展定向改进。每轮迭代仅针对性能偏差或新增需求进行调整,结合试验或历史数据评估方案稳定性。阶段成

果包括改进设计、更新后公差预估与后续验证清单。

3) 详细设计阶段 将制造约束融入造型细节,依据 DFM 原则与 DFMEA 分析结果划分关键尺寸与公差等级,结合有限元或工艺仿真验证装配间隙,合理调配模具与加工设备资源,采用标准接口与共用模块,降低重复工作量。通过小批试验或试验设计方法评估过程能力,确保设计在量产条件下的可重复性与稳定性,减少样件阶段返工风险。

4) 样件验证阶段 建立以数据为驱动的闭环反馈体系,首批样件生产后启动 SPC 监测,测量缝隙、色差与形状偏差等关键质量特性,将结果与预先设定的目标值进行对比。针对检测偏差开展分析,通过设计或工艺调整验证改进效果。所有测量数据与改进记录均进行存档,为后续量产准备提供决策支持。

5) 制造移交阶段 在保障设计交付完整性的同时,兼顾风险管控与资源调配。绘制工程图样、工艺规范和质量控制点,与制造部门协同完成试产准备。移交计划中预留适当缓冲,应对制造过程中的不确定性。量产初期继续执行 SPC 监测,将实际生产数据反馈至设计团队,以便对瓶颈与偏差进行再识别,确保持续改进。农机设计问题-对策矩阵如表 2 所示,面向制造约束的农机精益设计路线如图 5 所示。

表 2 农机设计问题-对策矩阵

设计痛点	应用工具
创新不足同质化	模块化并行开发
	看板管理
	风险评估法
制造脱节返工率高	公差仿真
	DFMEA
	工艺参数优化
验证滞后反馈失效	多源数据回流
	SPC 监控

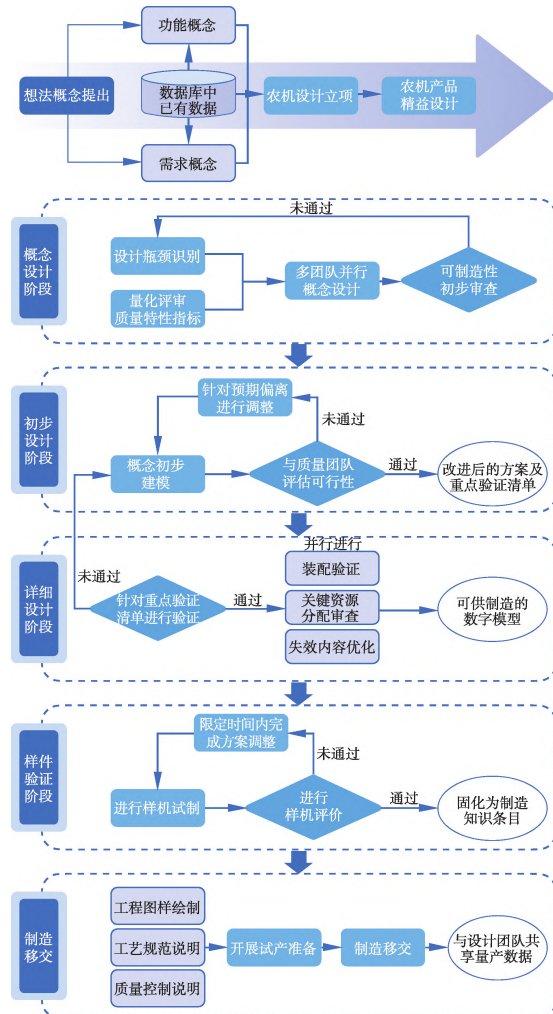


图 5 面向制造约束的农机精益设计路线图

2.3 S 企业拖拉机外观设计应用案例分析

以 S 企业拖拉机为研究对象开展应用分析,采用 FIEV 模型与 TLS-DFM 方法,对模具周期、审批时长、供应链响应,以及返工率等指标进行归一化处理与专家赋权,通过风险评估法识别设计团队瓶颈节点,针对瓶颈节点分别制订 3 d 与 5 d 缓冲策略,明确交付责任人。瓶颈识别结果如表 3 所示。

表 3 瓶颈识别结果

瓶颈项	权重	严重度	发生度	风险值
外壳型腔加工时长	0.25	5.0	4.2	5.25
设计初评反馈周期	0.20	4.8	3.8	3.65
喷涂产线排队时长	0.18	4.3	3.5	2.71
设计终评反馈周期	0.15	4.2	3.4	2.14
模具试制周期	0.10	4.5	4.0	1.80
产能制约	0.10	3.9	3.2	1.25
标准件供应时效	0.07	3.7	3.6	0.93
外观缺陷返修次数	0.05	4.0	2.8	0.56

基于价值流拆解与模块化设计原则,研制 4 种概念方案并开展模型与数字仿真验证。评估周期由 20 d 缩短至 12 d。首批 50 件样件测试中,模型一次性通过率由 48% 提升至 76%。采用 Wilson 置信区间法估计两组 95% 置信区间分别为改进前[30.0%,66.5%],改进后[56.6%,88.5%]。为判定改进效果的统计学显著性,实施两样本比例 z 检验,检验统计量 $z=2.04$,对应双侧 p 值约为 0.041。两组通过率之差为 0.28,其 95% 置信区间为[0.022,0.538],表明改进后一次性通过率显著提高,为后续批量生产提供了稳定的制造条件。

验证及移交阶段启动统计过程控制,对几何偏差、人机工效等关键特性进行监控,采用根因分析将改进措施反馈至设计与工艺流程。整体开发周期较传统流程缩短 23%。验证了模型方法在农机外观设计领域的可行性与有效性。

3 结论

研究针对农业机械外观设计中存在的常见问题,提出面向制造约束的精益设计路径。通过构建以聚焦-迭代-嵌入-验证为核心的流程框架,整合约束理论、

精益生产与六西格玛方法,形成了覆盖瓶颈识别、流程优化、质量控制与制造验证全周期的 TLS-DFM 实施体系,贯通了设计与制造的关键环节。研究结果可增强农机外观设计的制造适配性与质量一致性,通过流程优化缩短开发周期,降低返工率。突破传统设计与制造的割裂状态,提升产品开发流程的整体协同能力,为“设计即制造”理念提供可操作的流程工具组合,也为装备行业精益设计实践提供了理论范式与方法参考。

当前研究主要集中于理论模型构建与流程设计,尚未在长期批量生产条件下进行持续跟踪验证。后续计划依托典型农机产品开展现场验证与数字化仿真试验,探索模型与智能制造平台的耦合路径。结合行业大数据与人工智能技术,推动精益设计方法向智能制造方向演进,为农业装备的高效与可持续发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 郭顺,倪豪豪,黄豪,等. 淬火-回火工艺对高速翻转犁用 28MnB5 铁基合金的组织及性能影响[J]. 稀有金属, 2024,48(2):187-195.
- [2] 文俊中,石元伍,朱玮辰. 基于 AHP/QFD/FBS 模型的果园管理机创新设计研究[J]. 包装工程,2024,45(2):99-110.
- [3] 刘佳. 机械零部件设计制造工艺加强研究——评《常用机械零部件设计与工艺性分析》[J]. 铸造,2021,70(1):134.
- [4] 王伟,李昕迪,聂子丰. 基于 TRIZ 理论的农机自动装载跟随 DFMEA 创新设计[J]. 机械设计,2022,39(2):101-106.
- [5] 邴媛,张建敏. 基于 Kano 模型与层次分析法的农机造型设计研究[J]. 机械设计,2022,39(4):149-155.
- [6] 张宁,余非凡,冯世璋,等. 生成式人工智能技术下的复杂农机装备设计[J]. 机械设计,2024,41(10):172-177.
- [7] Li C, Tang Y, Zou X, et al. A novel agricultural machinery intelligent design system based on integrating image processing and knowledge reasoning[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15):1-24.
- [8] 张万明,宫翔,李国芹,等. 基于 TOC/TRIZ 理论的数控机床自动夹具创新优化设计[J]. 机床与液压, 2025, 53(4):41-46.
- [9] 张根保,罗天洪. “高档数控机床的高端制造模式”(四):数控机床的先进制造模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(7):2191-2200.
- [10] 杨雪,贾文玲,王超,等. 六西格玛工具在生产白面牛卡纸时干强剂用量优化中的应用[J]. 中国造纸, 2024, 43(8):175-180.
- [11] 江志斌,周利平. 精益管理、六西格玛、约束理论等工业工程方法的系统化集成应用[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(2):1-7.
- [12] 何桢,胡浩,刘海龙,等. 精益六西格玛理论研究与应用综述[J]. 工业工程, 2021, 24(5):1-9.
- [13] Gupta M, Digalwar A, Gupta A, et al. Integrating theory of constraints, lean and six sigma: a framework development and its application[J]. Production Planning & Control, 2024, 35(3):238-261.
- [14] Khubalkar H, Jibhakate R A, Walke P V, et al. Productivity enhancement by using VSM tools in farm equipment manufacturing company [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nagpur, 2022:1-8.
- [15] Li S Q, Wang J F, Rong J. Combining improved DFMEA with knowledge graph for component risk analysis of complex products [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 251(11):1-15.
- [16] 张冉,孙景彬,张云龙,等. 基于大豆玉米复合种植的播种技术与装备研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4):35-41.
- [17] 赵春江,马晨,李瑾,等. 丘陵山地水稻机械化技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1):1-11.
- [18] Dutta S. The theory of constraints: a framework for enhancing efficiency and promoting growth[J]. American International Journal of Business Management, 2023, 6(12):36-44.
- [19] Eriksson K M, Olsson A K, Carlsson L. Beyond lean production practices and Industry 4.0 technologies toward the human-centric Industry 5.0[J]. Technological Sustainability, 2024, 3(3):286-308.
- [20] Sordan J E, Oprime P C, Pimenta M L, et al. Contact points between lean six sigma and industry 4.0: a systematic review and conceptual framework[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2022, 39(9):2155-2183.
- [21] 刘子辉,方艳红,锁斌. 基于改进乘性一致 HFLPRs-TOPSIS 的 FMEA 风险分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(11):178-187.

作者简介:傅燕翔(1979—),女,副教授,硕士,研究方向:人机交互设计、产品创新设计等。
王世卓(通信作者)(2002—),男,硕士研究生,研究方向:智能产品设计。