

自动化设备开发中的机械设计：风险性与功能评估的融合

胡贵

广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025080013

摘要：本文围绕自动化设备机械设计，阐述多方面内容。从基础理论体系出发，分析风险因素与功能需求的耦合，强调构建多维度评估体系的重要性。介绍风险评估对概念设计优化的作用，以及 CAD 建模等阶段的风险识别与控制方法，还探讨数字孪生等技术的应用，最终提出融合设计方法对行业发展的价值。

关键词：自动化设备；风险评估；功能验证

Mechanical Design in Automation Equipment Development: Integration of Risk and Functional Evaluation

Hu Gui

Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper focuses on the mechanical design of automation equipment, addressing multiple aspects. Starting from the fundamental theoretical framework, it analyzes the coupling of risk factors and functional requirements, emphasizing the importance of establishing a multi-dimensional evaluation system. The role of risk assessment in optimizing conceptual design is discussed, along with methods for risk identification and control in stages such as CAD modeling. The application of technologies like digital twins is also explored. Finally, the value of integrated design methods for industry development is proposed.

Keywords : automation equipment; risk assessment; functional verification

引言

《“十四五”智能制造发展规划（2021 年颁布）》旨在推动制造业数字化转型，自动化设备机械设计作为其中关键环节，其研究意义重大。自动化设备机械设计涵盖运动学原理与材料力学特性等基础理论，风险因素与功能需求存在紧密耦合，开发方案需多维度评估，各阶段如概念设计、CAD 建模等均需进行风险评估与功能验证。通过构建评估体系、运用多种评估方法及建立全流程闭环系统等，实现风险性与功能评估的融合，此融合方法对推动自动化设备开发及装备制造业数字化转型意义非凡，契合最新政策发展导向。

一、自动化设备机械设计理论框架

（一）机械设计基础理论体系

自动化设备机械设计的基础理论体系，主要涵盖运动学原理与材料力学特性。运动学原理对设备的运动方式、速度、加速度等进行精确分析，这是确保自动化设备按预定轨迹与节奏运行的关键。例如，在工业机械臂设计中，需依据运动学原理规划其各关节运动，实现精准定位与操作。材料力学特性关乎材料的强度、刚度、韧性等性能。合理选择材料并掌握其力学特性，才能使机械结构在承受载荷时不发生变形、断裂等失效现象。通过对运动学原理和材料力学特性的深入解析，进而建立起设备功能需求与机械结构设计间的紧密映射关系，确保设计出的自动化设备

既满足功能要求，又具备可靠的机械性能^[1]。

（二）风险因素与功能需求的耦合机制

在自动化设备机械设计中，风险因素与功能需求存在紧密的耦合机制。通过构建机械失效模式与功能参数的关联模型，能清晰洞察两者的关系。结构强度、运动精度等参数对设备性能有着交叉影响，若结构强度不足，在运行过程中设备可能出现变形、断裂等失效情况，直接影响其功能实现，同时也会带来安全风险；而运动精度不够，会使设备加工或操作的准确性降低，无法满足功能需求，并且长期的精度偏差可能引发部件磨损，进一步增加故障风险^[2]。这种耦合关系表明，在机械设计时，需综合考量风险因素与功能需求，确保设计出的自动化设备既能高效实现功能，又具备较低的风险，以保障设备的可靠运行。

二、设备开发方案设计方法论

(一) 方案选择的多维度评估体系

在自动化设备开发的方案选择中，构建多维度评估体系至关重要。通过建立评价矩阵，将工艺可行性与经济性指数纳入其中。工艺可行性考量设备在实际生产工艺中的可操作性与适配性，若工艺复杂度过高，可能导致设备开发难度增大，风险上升。经济性指数则涉及开发成本、运营成本及预期收益等，这直接关系到项目的经济可行性^[3]。同时，基于 QFD 的质量功能展开法，能有效将用户需求与产品功能关联，从质量维度评估方案。此方法将用户对设备的功能需求层层分解，转化为设备开发各阶段的技术要求，精准地评估方案能否满足实际需求，进而综合多维度因素，选出最适宜的自动化设备开发方案。

(二) 风险评估驱动的概念设计优化

在自动化设备开发的机械设计中，风险评估对概念设计优化起着关键作用。通过开发故障树分析（FTA）与方案设计的并行工程方法，可有效应对高危险工况。故障树分析能够系统地找出导致特定故障的所有可能原因组合，从顶事件出发，层层分解，明确各因素间逻辑关系^[4]。将其与方案设计并行开展，能在概念设计阶段就充分考虑潜在风险。针对高危险工况，基于故障树分析的结果，对设备结构进行拓扑优化。例如，若发现某部位在特定工况下因结构不合理易引发故障，可调整该部位的拓扑结构，提高其可靠性与安全性。如此，实现风险评估驱动下概念设计的优化，提升自动化设备整体性能，确保在危险工况下稳定运行。

三、D 结构细化设计中的风险控制

(一) CAD 建模阶段风险识别

1. 三维建模的干涉分析技术

在 CAD 建模阶段，三维建模的干涉分析技术至关重要。需借助专业分析软件对自动化设备各部件进行全面干涉检查，细致排查静态干涉，如零部件安装空间是否冲突^[5]。同时，对于设备运行时产生的动态干涉，通过应用多体动力学仿真验证运动包络空间，精准模拟各部件运动轨迹及范围，提前察觉潜在的动态干涉风险。为进一步控制风险，开发基于参数化建模的动态间隙预警系统，依据设定的间隙安全阈值，实时监测部件间间隙变化。一旦间隙逼近或超出阈值，系统立即发出预警，以便设计人员及时调整模型，优化结构设计，有效降低因干涉问题导致的设备故障风险，确保自动化设备机械设计的可靠性与稳定性。

2. 有限元分析的应力风险预测

在自动化设备开发的机械设计中，CAD 建模阶段需准确识别风险。此阶段若模型构建不准确，如尺寸偏差、结构缺失等，会致使后续分析结果失真。例如关键部件尺寸不符，可能在实际运行时出现干涉，引发设备故障。有限元分析应力风险预测也至关重要，借助应力云图能直观呈现结构应力分布。通过分析应力云图可发现应力集中区域，即结构的薄弱环节^[6]。依据应力风险预测结果，采用基于应力云图的薄弱环节迭代优化策略，针对应力

集中处调整结构参数，如增加壁厚、优化过渡圆角等，从而提升结构强度，保障自动化设备在多载荷工况下安全稳定运行，实现风险性与功能评估的有效融合。

(二) 功能可靠性验证技术

1. 数字孪生测试验证平台

在自动化设备开发的机械设计中，数字孪生测试验证平台对功能可靠性验证技术的风险控制至关重要。借助该平台，可构建与物理实体高度匹配的数字孪生模型，全方位模拟设备在不同工况下的运行状态。通过实时采集物理设备数据并与数字模型比对，能及时察觉偏差，有效识别潜在故障风险。例如，分析设备关键部件的应力应变、振动频率等参数，预测部件是否会提前失效，对风险进行预警^[7]。同时，基于平台数据深入挖掘，可优化设备结构设计与运行参数，进一步提升功能可靠性，降低风险发生概率，保障自动化设备在整个生命周期内稳定可靠运行。

2. 样机实测数据回溯优化

在自动化设备开发的机械设计中，对样机实测数据进行回溯优化，对于实现风险性与功能评估的融合十分关键。通过建立实测振动频谱与仿真数据的偏差分析模型，可精准识别二者差异。基于此，提出运用基于 Kriging 代理模型的校正方法^[8]。该方法能有效利用少量样本数据构建高精度代理模型，对仿真模型进行校正，从而减小与实测数据的偏差。经此校正，可更准确地评估设备功能可靠性，及时发现潜在风险，实现对设计的优化，确保自动化设备在实际运行中，既能满足功能需求，又能降低因设计不当带来的风险，达到风险性与功能评估的有机融合，提升设备整体性能。

四、综合评估体系构建与实践

(一) 风险 – 功能二元评估模型

1. 评估指标体系的层次化构建

在自动化设备开发的机械设计综合评估体系里，风险 – 功能二元评估模型下评估指标体系的层次化构建极为关键。借助 AHP 层次分析法，能有效确定安全系数、MTBF 等核心指标的权重分配方案。先将评估目标分解为不同层次，最高层为综合评估目标，即实现风险性与功能评估的融合。中间层可分为风险评估指标和功能评估指标。风险评估指标涵盖如安全系数，它直接关系到设备运行过程中的危险程度；功能评估指标则包含 MTBF 等，体现设备的可靠运行能力。通过层次分析法，对各指标两两比较，确定相对重要性，构建判断矩阵，计算得出各指标权重^[9]，从而使评估指标体系层次分明、权重合理，为自动化设备机械设计的综合评估提供坚实基础。

2. 模糊综合评价方法应用

在自动化设备开发的机械设计中，模糊综合评价方法能有效应用于风险 – 功能二元评估模型。通过开发考虑不确定性因素的模糊评判模型，可将设计方案中难以精确量化的风险和功能因素进行有效处理。先确定影响自动化设备机械设计的风险和功能相关评价指标，例如风险方面的零部件故障概率、安全隐患程度，

功能方面的设备运行效率、操作便捷性等^[10]。对每个指标设定相应的隶属度函数，将定性描述转化为定量数据。再利用层次分析法等确定各指标权重，通过模糊合成算子将各指标的评价结果综合起来，实现对设计方案的量化等级评估，以清晰判断设计方案在风险与功能方面的综合表现，为设计方案的优化与选择提供科学依据。

(二) 动态评估机制设计

1. 全流程闭环评估系统架构

在自动化设备开发的机械设计中，全流程闭环评估系统架构以PDCA循环为驱动。从设计初始阶段，对机械设计的风险因素如材料疲劳、结构不稳定等进行全面识别，并将功能需求细化为可量化指标。在设计执行过程中，依据设定指标对设计进行实时监测，收集数据反馈。通过数据分析评估设计效果，一旦发现设计与预期的偏差，无论是功能未达标还是安全隐患，即刻启动调整环节，对设计进行修改完善。之后，再次对修改后的设计进行新一轮评估验证，如此循环往复，形成闭环。该架构确保机械设计在风险可控的前提下，不断优化功能，实现风险性与功能评估的深度融合，推动自动化设备开发中的机械设计持续改进。

2. 大数据驱动的评估优化

在自动化设备开发机械设计中，大数据驱动的评估优化借助机器学习算法挖掘历史数据规律，构建评估参数自适应调整模型。通过收集大量与自动化设备机械设计相关的历史数据，包括设备运行状况、故障信息、性能指标等，机器学习算法可发现数据间潜在联系与模式。依此建立的自适应调整模型，能依据实时数据动态调整评估参数。例如，当设备运行环境变化或出现新故障模式时，模型可及时感知并对风险评估和功能评估参数进行优化，使综合评估体系始终契合设备实际情况，更精准地反映机械设计的风险性与功能实现程度，助力开发者做出科学决策，提升自动化设备开发质量与效率。

(三) 工业应用案例分析

1. 包装机械开发实例验证

在自动化设备开发里，以高速包装机为例能清晰展现风险评估与功能验证并行的设计实施进程。在包装机械开发时，构建综

合评估体系，一方面对可能出现的风险进行全面评估，如机械结构磨损导致的精度降低风险、电气系统故障引发的运行中断风险等；另一方面对包装机的各项功能，像包装速度、包装精度、物料适应性等进行验证。实践过程中，通过模拟不同工况、运行参数调整等方式，在确保功能满足生产需求的同时，识别并降低潜在风险。例如，优化机械传动部件的选材与设计，既保障包装精度这一关键功能，又降低因部件磨损带来的风险，实现风险性与功能评估的有效融合，为包装机械稳定高效运行提供坚实保障。

2. 汽车焊装线设计改进

在汽车焊装线设计改进中，综合评估体系发挥着关键作用。以焊装机器人集成项目为例，传统设计常因对风险与功能评估的脱节，导致设计返工率较高。通过构建融合风险性与功能评估的综合体系，对每个设计环节进行细致分析，从机械结构强度、运动精度等功能层面，到设备故障可能性、维护成本等风险维度，全面考量。在实践中，依据该体系对焊装线进行优化设计，如对机器人手臂的选材与结构优化，不仅提升了功能稳定性，还降低了潜在风险。最终，经实践验证，此方法有效降低了20%的设计返工率，显著提高了汽车焊装线的设计质量与效率，为自动化设备开发中的机械设计提供了极具价值的参考。

五、总结

风险评估与功能验证的融合设计方法，对自动化设备开发中的机械设计具有重要价值。它能全面考量设计过程中的潜在风险，确保设备功能不仅满足预期，还具备更高安全性与可靠性，为产品质量提供坚实保障。从未来发展看，建立机械设计知识库，可系统整合设计经验、标准规范及各类案例，为设计人员提供丰富参考资源。开发智能评估系统，则能利用先进算法和数据分析技术，更高效精准地开展风险与功能评估。这一融合方法不仅推动自动化设备机械设计的创新发展，更在宏观层面有力推动装备制造业的数字化转型，使其在技术与管理上迈向新高度，提升产业竞争力。

参考文献

- [1] 施小龙. RS公司非标自动化设备定制项目管理优化研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [2] 杨超. 柔薄材料折叠仿真与自动包装设备开发 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [3] 王心迪. 袜业生产线关键设备开发与虚拟展示研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
- [4] 马鹏飞. J公司电力自动化设备泰国市场营销策略研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [5] 杨世凡. 吹胀型铝质均热板封口工艺研究及设备开发 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [6] 刘钟林. 机械设计与自动化设备的安全控制策略研析 [J]. 模型世界, 2022(33):28-30.
- [7] 李忠勇. 机械设计与自动化设备的安全控制策略研析 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(02):91-92.
- [8] 李海洋. 机械设计自动化设备安全控制研究 [J]. 无线互联科技, 2021, 018(007):65-66.
- [9] 马椿洋. 机械设计自动化设备安全控制研究 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(28):124-126.
- [10] 孙琳娜, 李佳兵. 机械设计自动化设备安全控制研究 [J]. 南方农机, 2021, 52(02):179-180.