

模块化包装机的设计与柔性生产适应性研究

张廷建 高扬 王宇
辽宁工业大学 辽宁 锦州 121000

摘要: 文章聚焦模块化包装机设计与柔性生产适应性。阐述其设计基础理论,包括核心概念、设计原则与适配性评价指标。给出整体设计方案,涵盖设计目标、功能模块划分及结构布局。对关键模块设计与优化展开研究,经仿真分析与结构验证确保性能。构建评价体系评价其柔性生产适应性,通过对比分析提出优化建议,为模块化包装机发展提供理论与实践参考。

关键词: 模块化包装机; 模块化设计; 柔性生产; 适应性

引言: 在制造业柔性生产需求日益增长的背景下,传统一体化包装机“一机一用”的局限愈发凸显,难以快速适应多变的包装需求。模块化包装机凭借其模块独立性、接口通用性等优势,成为解决这一问题的关键。本文深入探究模块化包装机设计基础理论,制定整体设计方案,对关键模块进行设计与优化,并构建评价体系评估其柔性生产适应性,以推动包装机械行业的创新发展。

1 模块化包装机设计基础理论

1.1 核心概念界定

模块化包装机是将包装流程中各类功能拆解为独立、标准化模块,通过模块组合、替换实现多品类包装需求的设备,其核心特征体现为模块独立性、接口通用性与功能可扩展性。模块是具备特定功能、标准化接口的最小设计单元,可单独研发、生产与维护,兼顾通用性与专用性。与传统一体化包装机相比,模块化设计打破了“一机一用”的局限,通过模块重组适配不同物料、包装规格及工艺要求^[1]。核心概念还涵盖接口设计、模块编码与标准化体系,其中接口作为模块间连接的关键,需满足机械、电气、控制信号的兼容匹配,模块编码则为生产管理、库存调配及后期运维提供统一依据,标准化体系是保障模块互换性、降低设计与制造成本的核心前提,为后续整体设计与柔性生产适配奠定理论基础。

1.2 模块化设计核心原则

模块化包装机设计需遵循四大核心原则,确保设计科学性与实操性。首先是功能独立性原则,需按包装工艺(送料、封装、贴标、检测等)拆分功能,使每个模块仅承担单一核心功能,减少模块间功能耦合,便于单独优化与故障排查。其次是接口标准化原则,统一模块间机械连接尺寸、电气接口类型及控制信号协议,保障不同批次、不同功能模块的互换性与兼容性,降低组合调试成本。再者是经济性原则,在满足功能需求的前提

下,通过通用模块复用、简化非标设计,降低研发、生产及后期运维成本,同时兼顾模块轻量化设计,减少设备整体能耗。最后是柔性适配原则,模块设计需预留扩展接口,可根据生产需求新增、替换模块,适配物料特性(颗粒、液体、粉剂)、包装规格及工艺升级,兼顾当前生产需求与未来发展空间,实现“一次设计、多次复用、灵活调整”的设计目标。

1.3 柔性生产适配性核心评价指标

模块化包装机柔性生产适配性需通过多维度核心指标评价,精准反映设备对生产需求变化的响应能力。一是模块互换性指标,衡量不同模块在相同接口条件下的替换效率与适配精度,以替换耗时、调试合格率为核心量化依据,要求替换后无需大幅调整即可正常运行。二是工艺适配范围指标,评估设备通过模块组合可覆盖的包装物料类型、包装规格及工艺流程,适配范围越广,柔性水平越高,需兼顾常规需求与特殊工艺的适配能力。三是调整响应速度指标,指生产需求变化时,设备完成模块重组、参数调整的总耗时,包括模块拆装、程序调试等环节,直接影响生产效率。四是可靠性指标,考核模块组合运行时的稳定性,以无故障运行时间、故障排查修复效率为核心,避免因模块兼容问题影响生产连续性。五是成本适配性指标,评估柔性调整过程中的综合成本,包括模块采购、调试及停机损失,确保柔性提升与成本控制的平衡。

2 模块化包装机整体设计方案

2.1 设计目标与约束条件

本次模块化包装机整体设计以“高效、柔性、可靠、节能”为核心目标,具体实现三大目标:一是柔性适配能力,可通过模块组合覆盖食品、医药、日化等多行业物料包装,适配5-500mm规格范围的包装需求,模块替换调试时间控制在1小时内。二是生产效率提升,单

机包装速度不低于80件/分钟,设备综合效率(OEE) \geq 85%,满足规模化生产需求。三是运维便捷性,模块故障排查时间 \leq 30分钟,易损件更换无需专业工具,降低运维门槛。设计同时面临多重约束条件:技术约束上,需符合GB/T 26943包装机械安全标准,接口精度控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内,适配现有车间PLC控制系统^[2]。成本约束上,单台设备研发制造成本不超过80万元,投资回报率 \geq 30%。环境约束上,设备运行噪音 \leq 75dB,能耗较传统设备降低15%,适应车间常温、无尘生产环境,同时需兼顾设备占地面积 \leq 15m²的空间约束。

2.2 功能模块划分

基于包装工艺流程与模块化设计原则,将设备划分为五大核心功能模块,各模块功能独立且接口兼容。送料模块,按物料类型细分颗粒、液体、粉剂专用子模块,配备可调速输送机构与物料定位装置,实现物料精准、稳定供料,适配不同物料流动性与形态需求。封装模块,涵盖热封、冷封、缠绕等子模块,可根据包装材质(塑料、纸质、复合膜)切换封装方式,封装压力与温度可精准调控。贴标检测模块,集成自动贴标、条码识别、外观检测功能,可检测漏贴、错贴、包装破损等问题,不合格品自动分拣。控制模块,采用PLC+触摸屏控制系统,内置标准化模块控制程序,支持模块参数一键调用与远程监控,实现各模块协同运行。机架与辅助模块,提供设备支撑与安装基础,集成散热、除尘、安全防护装置,预留模块扩展安装位。

2.3 整体结构布局设计

整体结构布局采用“直线式流程+模块化组装”设计,兼顾生产效率与空间利用率,符合人机工程学要求。设备整体呈狭长型布局,长度8m、宽度1.8m、高度2.2m,各功能模块按送料→封装→贴标检测→出料的工艺顺序依次排列,物料输送路径直线延伸,减少周转损耗,提升传输效率。机架采用高强度铝合金型材焊接而成,表面经防腐处理,重量轻且稳定性强,各模块通过螺栓与机架连接,底部配备可调地脚,便于设备水平校准与位置调整。控制模块安装在设备中部操作区,触摸屏高度1.5m,操作人员可便捷操作与参数监控;安全防护装置采用透明亚克力挡板,覆盖核心运动部件,既保障操作安全,又便于观察设备运行状态。辅助模块集成于机架内部,散热口朝向设备两侧,避免影响周边环境;预留3个模块扩展安装位,位于送料模块前端与贴标检测模块后端,可新增预处理或后处理模块。整体布局确保各模块接口对齐,减少管线缠绕,便于后期维护与模块重组。

3 模块化包装机关键模块设计与优化

3.1 核心功能模块详细设计

核心功能模块详细设计聚焦送料、封装与控制模块,兼顾精度与稳定性。送料模块采用伺服电机驱动,输送速度0-120m/min可调,配备变频调速系统与物料限位装置,颗粒物料子模块增设振动送料器,避免物料堆积;液体物料子模块采用定量泵供料,精度控制在 $\pm 1\text{ml}$,适配不同容量包装需求。模块接口采用快拆式结构,对接处安装密封垫圈,防止物料泄漏与粉尘进入。封装模块核心部件采用铬锆铜材质,耐高温、耐磨性强,热封温度控制范围0-250℃,精度 $\pm 2\text{℃}$,压力调节范围0.1-0.5MPa,通过气缸驱动实现压力稳定输出;冷封模块配备硅胶压辊,适配热敏性包装材质,避免包装变形。控制模块选用西门子S7-1200PLC,搭配昆仑通态触摸屏,内置模块联动控制算法,支持多模块同步运行与故障自诊断;接口采用Profinet通讯协议,数据传输速率快,兼容性强,可对接MES生产管理系统,实现生产数据实时上传与追溯,模块内部线路采用集成布线设计,提升抗干扰能力^[3]。

3.2 关键技术优化

针对设备运行精度与柔性适配短板,开展三项关键技术优化。一是接口适配技术优化,将传统刚性接口改为柔性密封接口,内置导向定位销,降低模块对接时的安装误差,接口重复定位精度提升至 $\pm 0.01\text{mm}$,同时增强接口耐磨性,使用寿命延长至5000小时以上。二是控制算法优化,采用模糊PID控制算法替代传统PID算法,优化模块参数调节响应速度,封装温度、送料速度的调节滞后时间缩短至0.2秒,减少因参数波动导致的包装缺陷,不合格率降低至0.3%以下。三是轻量化与节能优化,核心模块零部件采用高强度工程塑料替代部分金属材料,模块重量减轻18%,同时优化伺服电机控制策略,采用按需供电模式,非工作状态下电机自动休眠,设备能耗进一步降低10%。另外,对封装模块压辊结构进行优化,采用可拆卸式设计,更换压辊时间缩短至15分钟,提升特殊包装工艺的适配效率。

3.3 仿真分析与结构验证

采用ANSYS与Adams仿真软件开展仿真分析,结合物理试验完成结构验证,确保模块性能达标。结构强度仿真针对机架与核心模块受力部件,模拟设备满负荷运行时的应力分布,机架最大应力值为120MPa,远低于铝合金屈服强度240MPa,无变形风险;振动仿真显示设备运行时振幅 \leq 0.05mm,避免振动影响包装精度。运动学仿真针对送料与封装模块,优化传动机构参数,消除

运动卡顿现象,送料定位精度误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$,封装平整度达标率100%。仿真完成后搭建试验平台,进行为期72小时连续运行试验,各模块无故障运行时间达68小时,模块替换调试合格率98%,包装精度、效率等指标均满足设计要求。针对仿真中发现的接口受力集中问题,优化接口过渡圆角结构,经二次试验验证,接口使用寿命提升30%,确保设备长期稳定运行。

4 模块化包装机柔性生产适应性评价

4.1 评价体系构建

基于柔性生产核心需求,构建多维度、可量化的评价体系,涵盖5个一级指标与15个二级指标,确保评价全面客观。一级指标包括模块适配能力、工艺调整能力、运行可靠性、运维便捷性与成本经济性,各指标权重通过层次分析法确定,其中模块适配能力权重最高(30%),凸显核心评价地位。二级指标细化为:模块适配能力包含互换效率、适配规格范围、接口兼容性;工艺调整能力包含参数调整速度、模块重组耗时、新增工艺适配性;运行可靠性包含无故障运行时间、故障发生率、兼容稳定性;运维便捷性包含故障排查速度、易损件更换难度、维护成本;成本经济性包含模块复用率、调整成本、能耗成本。评价体系采用百分制评分,各二级指标设定明确量化标准,如模块互换效率 ≥ 90 分需满足替换耗时 ≤ 30 分钟,为后续评价实施提供统一依据。

4.2 评价方法与实施

采用“仿真测试+现场试验+数据量化”的综合评价方法,分三个阶段实施评价。第一阶段仿真评价,基于前期仿真数据,对模块适配能力、运行可靠性等指标打分,通过仿真模型模拟不同生产场景下的设备表现,获取参数调整速度、兼容稳定性等数据,对照评价标准初步评分。第二阶段现场试验评价,在食品、医药两个行业试点应用,选取3种不同物料、5种包装规格开展试验,记录模块重组耗时、无故障运行时间、维护成本等实际运行数据,组织技术人员与操作人员共同打分,确保数据真实可靠^[4]。第三阶段数据汇总分析,对仿真与试验数据进行整理,按评价体系权重计算综合得分,同时收集用户反馈意见,作为定性评价补充。评价实施过程

中严格遵循标准化流程,每个测试项目重复3次,取平均值作为最终数据,避免偶然因素影响评价结果,确保评价结论客观准确。

4.3 对比分析与优化建议

将本次设计的模块化包装机与传统一体化包装机、同类模块化设备进行对比分析,凸显优势并提出优化建议。对比结果显示,本次设备综合评分为89分,较传统设备在模块适配能力、工艺调整能力上分别提升40%、35%,运行能耗降低15%,但相较于同类高端设备,在模块重组速度与远程运维能力上存在差距(评分低8-10分)。针对短板提出三项优化建议:一是优化模块快拆结构,采用气动快拆接口替代螺栓连接,将模块重组耗时缩短至20分钟以内;二是升级控制模块功能,新增远程故障诊断与运维系统,实现模块故障远程排查与参数远程调整;三是拓展模块适配范围,研发超小规格($\leq 5\text{mm}$)与超大规格($\geq 500\text{mm}$)包装子模块,提升极端工况适配能力。同时建议加强模块标准化推广,提高与行业内其他设备的兼容性,进一步降低用户使用成本。

结束语

本文围绕模块化包装机设计与柔性生产适应性展开全面研究,从基础理论到整体设计,再到关键模块优化与适应性评价,形成完整研究体系。研究成果表明,模块化包装机在柔性适配等方面优势显著,但仍有提升空间。后续研究可进一步优化模块结构、拓展功能,加强标准化推广,以更好地满足柔性生产需求,提升包装机械行业的整体竞争力。

参考文献

- [1]郑晓伟.模块化设计在包装机械设计中的应用研究[J].造纸装备及材料,2023,52(01):14-16.
- [2]蔡燕华.分析模块化设计方法及其在机械设计中的应用[J].科技传播,2022,06(04):160+154.
- [3]米良,殷国富,王志宏等.包装机械可重构模块化设计方法与研究展望[J].食品科技,2021,34(07):78-81.
- [4]曹巨江,张利平.模块化设计与控制在药品包装机械中的应用[J].包装工程,2020(07):92-93+142.