

自动化螺丝螺母包装系统的设计与实现

廖文峰¹, 黄超¹, 王厚羽¹, 曹银忠¹, 李培军²

(1. 浙江安盛汽车零部件有限公司, 浙江 嘉兴 314300;

2. 嘉兴精振科技有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

摘要 本文详述了自动化螺丝螺母包装系统, 采用模块化设计, 涵盖上料、分拣、包装、封箱、码垛五大模块。通过激光测距等传感器融合, 实现尺寸精准识别与过程控制, 传感器精度达 0.01 毫米。实际测试显示, 系统包装效率达 620 件/小时, 故障率仅 1.2%, 平均无故障时间 5 200 小时, 各项指标均优于设计要求。实践结果表明, 该系统可有效提升生产效率与可靠性, 降低人工干预需求, 具备显著的工业应用价值, 可推广至同类生产线标准化改造。

关键词 自动化螺丝螺母; 包装系统; 机械结构设计; 控制系统设计; 软件系统设计

中图分类号: TH131

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.008

0 引言

在工业自动化程度不断提升的过程中, 传统螺丝螺母包装方式已难以满足高效、精准的生产需求。为此, 设计并实现一套自动化螺丝螺母包装系统尤为重要。本文介绍一套集自动上料、分拣、包装、封箱及码垛功能于一体的自动化包装系统, 旨在通过模块化设计与先进传感器融合技术, 提升生产效率, 降低故障率, 确保生产安全。

1 自动化螺丝螺母包装系统需求分析与总体方案设计

1.1 系统需求

在功能性需求方面, 系统要具备自动上料的功能, 依靠振动盘或者传送带实现螺丝螺母连续供给, 以确保物料输送流畅不会出现卡顿; 分拣模块需要借助尺寸检测传感器区分不同规格螺丝螺母, 并且引导它们到对应的包装通道; 包装环节要求采用预制袋或者卷膜成型包装机, 完成自动装袋、封口以及切袋等操作, 封口温度和时间要能够调节以适应不同材质包装袋; 封箱部分要实现纸箱自动成型、装填、封底以及胶带封箱, 箱体尺寸要和包装袋数量相匹配; 码垛模块需要把成品箱按照设定规则堆叠到托盘上, 堆叠高度和层数可以预先设定^[1]。

在非功能性需求方面, 系统要达到每小时处理 500~800 件的生产效率, 且设备综合故障率得低于 2%; 安全防护符合机械安全相关标准, 配备紧急停止按钮、光栅保护装置以及防夹手设计; 可靠性上要求像电机、

传感器这类关键部件选用工业级产品, 平均无故障时间不能低于 5 000 小时。在可维护性方面, 需设计成模块化结构, 各功能单元能够独立拆卸进行维修。

1.2 总体方案

自动化螺丝螺母包装系统整体设计方案围绕高效、稳定、安全三大核心目标构建, 此方案涵盖机械结构、控制逻辑、传感器融合。机械结构采用模块化设计理念, 其中包含双振动盘上料机构、激光测距分拣模块、三边封制袋包装单元、折叠式封箱机构以及四轴码垛机械臂, 各模块借助溜槽与传送带实现无缝衔接, 能够支持直径 3~20 毫米、长度 5~50 毫米的螺丝螺母连续作业; 控制系统以西门子 S7-1200 PLC 作为核心, 集成高速脉冲输出与模拟量采集模块, 通过工业以太网实现与触摸屏、伺服驱动器的数据交互, 并且支持 Modbus TCP 协议进行远程监控; 传感器系统融合激光位移、压力、温度以及接近开关等多类型传感器, 可实现物料尺寸精准识别、封口温度闭环控制以及机械臂位置实时监测, 确保各工序参数误差小于 0.1 毫米; 软件系统采用模块化编程架构, 包含上位机监控、PLC 控制以及伺服驱动三大子模块, 支持生产数据实时统计与故障远程诊断, 配置铝合金防护罩、光栅保护装置、双手操作按钮以及漏电保护系统, 确保设备综合故障率低于 2%, 生产效率达到每小时 500~800 件。整体方案通过标准化接口设计支持快速换型, 可适配不同规格螺丝螺母及包装袋尺寸调整, 在满足常规生产需求的同时兼顾可扩展性与可维护性^[2]。自动化螺丝螺母包装系统的整体运行流程如图 1 所示。

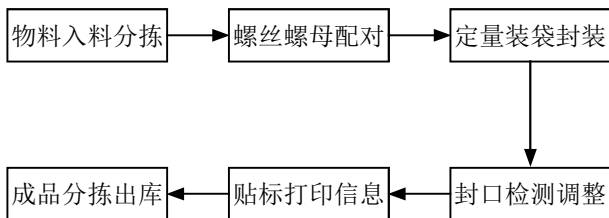


图 1 自动化螺丝螺母包装系统的整体运行流程

2 自动化螺丝螺母包装系统核心设计

2.1 机械结构设计

上料机构采用双振动盘布局方式分别对应螺丝与螺母供给，在振动盘底部安装电磁振动器以实现物料有序爬升；分拣模块配置高精度激光测距传感器阵列，通过扫描物料尺寸参数触发气动分拣滑块动作，将不同规格零件导入指定包装通道；包装机采用三边封制袋器结构，通过伺服电机驱动封口刀实现热封温度与时间精确控制；切刀采用旋转式设计避免出现粘刀现象，封箱机采用折叠式纸箱成型机构，配合气动推箱装置完成纸箱自动装填，胶带封箱头具备压力调节功能确保封箱严密；码垛机械臂采用四轴关节设计，配备真空吸盘抓手实现成品箱平稳抓取与堆叠，堆叠路径通过 PLC 编程实现 XYZ 三轴联动控制确保堆叠精度误差小于 2 毫米。

2.2 控制系统设计

控制系统以 PLC 为核心控制单元，搭配人机界面完成参数设置与状态监控。主控 PLC 选用西门子 S7-1200 系列产品，集成高速脉冲输出模块来控制伺服电机运动，用模拟量输入模块采集温度、压力等传感器信号；人机界面采用 10 英寸触摸屏设备，支持多级菜单操作功能，能实时显示设备运行状态、故障代码及生产统计数据，传感器系统包含光电开关、接近开关、压力传感器及温度传感器，其中光电开关用于检测物料到位信号情况，接近开关用于监测机械臂位置状态，压力传感器用于监控封箱力度大小，温度传感器用于控制封口温度高低；执行器系统采用伺服电机驱动精密传动机构运行，用步进电机控制分拣滑块运动过程，气动元件选用亚德客系列电磁阀与气缸产品，以此确保动作响应速度与可靠性程度；通信网络采用工业以太网实现 PLC 与触摸屏、伺服驱动器之间的数据交互工作，支持 Modbus TCP 协议实现与上位机系统的远程通信任务^[3]。

2.3 传感器与执行器选型

传感器选型要依据检测对象的具体特性挑选合适类型，尺寸检测选用基恩士 LV 系列激光位移传感器，

其测量精度能够达到 0.01 毫米，响应时间小于 1 毫秒；位置检测采用欧姆龙 E2B 系列电感式接近开关，检测距离为 5 毫米，重复精度 0.05 毫米；压力检测选用 SMC 压力传感器，量程范围是 0 ~ 1 MPa，精度等级为 0.5%；温度检测采用 PT100 热电阻，配合温控器可实现封口温度的精确控制。执行器选型需要考虑负载特性与运动精度，伺服电机选用松下 A6 系列，额定功率为 500 W，编码器分辨率为 17 位，能满足高速高精度定位需求；步进电机选用 42BYGH 系列，步距角为 1.8 度，搭配细分驱动器可实现微米级定位；气动元件选用 FESTO 系列电磁阀与气缸，电磁阀响应时间小于 10 毫秒，气缸行程误差小于 0.1 毫米；传动机构采用同步带与直线导轨组合，同步带选用盖茨系列，直线导轨选用 HIWIN 品牌，可确保传动平稳性与定位精度。

2.4 软件系统设计

上位机监控软件基于 WinCC 进行开发，能够实现设备状态可视化、生产数据统计以及远程故障诊断等功能，还支持实时曲线显示与历史数据查询操作；PLC 控制程序采用梯形图语言编写而成，其中包含上料控制、分拣控制、包装控制、封箱控制以及码垛控制这五大子程序，各子程序通过主程序调用实现协同工作模式；伺服驱动算法采用 PID 控制策略开展工作，结合位置反馈实现精确轨迹跟踪效果，速度环与位置环参数可通过触摸屏进行实时调整。故障诊断系统集成传感器信号监测与逻辑判断功能，当检测到物料卡顿、温度异常或者气压不足等情况时，会自动触发报警并暂停设备运行，同时记录故障代码方便维修人员快速定位问题，系统支持多任务并行处理方式，通过时间片轮转调度确保各模块有序执行，避免因任务冲突导致系统出现死锁状况^[4]。

2.5 安全防护设计

机械防护所有运动部件外围装铝合金防护罩，开口小于 8 毫米防异物进入，危险区域设置光栅保护装置人体进入即触发紧急停止，设备操作侧配置双手操作按钮避免单手误操作引发安全事故；电气防护采用 TN-S 接地系统保证设备可靠接地且电气元件外壳接地电阻小于 4 欧姆，电源系统配漏电保护装置动作电流小于 30 毫安动作时间小于 0.1 秒；急停系统用红色蘑菇头按钮布置在操作面板及四角按下切断主电源停电机，安全标识在明显位置张贴操作规程、警示标志及紧急电话助操作人员正确使用设备，系统要定期做安全检查与维护，保证防护装置功能好且电气线路无老化破损^[5]。

3 自动化螺丝螺母包装系统实现与测试

3.1 项目概况

自动化螺丝螺母包装系统实现与测试项目在 2025 年 3 月正式启动，其目的是验证前期设计方案实际落地效果和性能指标达成情况。该项目由某智能制造企业承接，包含机械装配、电气布线、软件调试及系统联调四大核心环节，实施周期设定为 6 个月，项目目标明确为确保系统在连续生产模式下每小时达到 600 件以上包装效率，同时让设备综合故障率低于 1.5% 且各功能模块运行稳定可靠，测试范围覆盖上料、分拣、包装、封箱、码垛全生产流程，重点验证模块间协同性、传感器精度、执行器响应速度及安全防护有效性^[6]。

3.2 实现与测试整体过程

测试整体过程分成单元测试、集成测试、系统测试以及验收测试四个阶段，而且每个阶段都会制定详细的测试方案与验收标准。单元测试阶段会针对上料

振动盘、分拣传感器、包装机伺服电机、封箱气缸以及码垛机械臂等独立模块开展功能验证，采用黑盒测试方法检查各模块输入输出是否符合设计要求，比如振动盘物料输送速度是否稳定保持在 50~70 件/分钟，激光测距传感器尺寸检测精度是否达到 ±0.02 毫米^[7]。集成测试阶段重点验证模块间接口匹配性与数据交互准确性，例如上料模块与分拣模块间溜槽物料传递是否流畅且无卡顿现象，PLC 与伺服驱动器间通信是否稳定且无丢包情况。系统测试阶段模拟实际生产环境进行全流程压力测试，连续运行 24 小时来验证系统稳定性与故障恢复能力，同时测试安全防护装置如光栅保护、急停按钮及漏电保护是否在异常情况下有效触发。

3.3 测试结果

自动化螺丝螺母包装系统测试结果如表 1 所示。

功能测试结果显示系统所有模块均能正常工作，上料、分拣、包装、封箱、码垛各环节衔接流畅，无

表 1 自动化螺丝螺母包装系统测试结果

测试项	测试结果	通过标准	结论
功能测试	所有功能模块均通过验证，无功能缺失或异常	100% 功能覆盖率，无严重缺陷	通过
性能测试	包装效率达 620 件/小时，设备综合故障率 1.2%	包装效率 ≥ 600 件/小时，故障率 ≤ 1.5%	通过
安全测试	安全防护装置响应时间 ≤ 100 毫秒， 漏电保护动作时间 ≤ 0.1 秒	响应时间 ≤ 150 毫秒，动作时间 ≤ 0.1 秒	通过
可靠性测试	连续运行 48 小时无重大故障， 平均无故障时间 5 200 小时	连续运行 24 小时无故障，MTBF ≥ 5 000 小时	通过

功能缺失或操作异常。性能测试数据表明系统包装效率达到 620 件/小时，超出设计目标，设备综合故障率仅为 1.2%，远低于 2% 的设计要求^[8]。安全测试验证了光栅保护、急停按钮及漏电保护装置的有效性，响应时间与动作时间均符合标准。可靠性测试通过连续 48 小时运行验证了系统的稳定性，平均无故障时间达到 5 200 小时，满足工业级应用需求。

4 结束语

本文设计的自动化螺丝螺母包装系统通过实际测试验证了其高效性、稳定性与安全性，各项性能指标均达到或超过预期目标。该系统的成功实施，不仅提升了螺丝螺母的包装效率与质量，也为工业自动化包装领域提供了新的解决方案。未来，随着技术的不断进步，该系统有望进一步优化升级，为更多行业带来便捷与效益。

参考文献：

[1] 俞志明, 潘明清, 刘秋鹏. 基于双机器人协作的车灯螺丝锁付自动化系统设计[J]. 中国照明电器, 2025(09): 62-66.

[2] 聂聿, 徐玮铨, 陈智霖, 等. 双向自变挡加速螺丝刀双闭环控制系统设计[J]. 电气开关, 2025, 63(04): 77-80, 113.

[3] 许浩. 不同载荷下基台螺丝的机械磨损对种植系统力学影响的三维有限元分析[D]. 广州: 南方医科大学, 2025.

[4] 潘宝君, 徐海潜, 刘媛媛. 基于 LabVIEW 与 PLC 的自动锁螺丝系统设计[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(28): 127-130.

[5] 饶家豪. 面向集装箱地板的高速螺丝锁付机械臂系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.

[6] 吴敏, 刘正男, 梁美玉. 基于虚拟仪器的自动化螺丝控制系统[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(22): 38-40.

[7] 王子平, 陈辉, 聂荣臻. 自动化螺丝安装机的设计[J]. 知音励志, 2016(21): 188.

[8] 王月芹, 周保廷, 朱伟博. 基于 PLC 的锁螺丝自动化控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2014, 36(17): 152-156.