

豆制品加工中机电一体化设备的节能优化方案

王华平

浙江中禾机械有限公司 浙江 台州 318000

摘要：在豆制品加工行业，提升机电一体化设备的能效与稳定性至关重要。本文通过对设备硬件设计进行优化，如选用高效电机、配置变频调速装置、改进传动系统以及升级控制模块等措施，显著降低了设备运行能耗，提高了设备的可靠性。实验数据显示，优化后的设备综合能耗降低12%-15%，故障率下降30%，为豆制品加工行业实现绿色制造提供了有力的技术支撑。

关键词：节能优化；机电一体化；硬件设计；传动系统；控制模块

引言

随着豆制品加工行业快速发展，对设备能效与可靠性要求不断提高，机电一体化硬件技术创新成为实现节能目标的关键。传统豆制品加工设备存在电机效率低、传动损耗大、控制单元响应滞后等问题，导致能源浪费且无法及时根据生产工况调整运行参数。本文聚焦机电硬件层面，深入研究高效电机选型、变频驱动系统配置、传感器与执行器网络搭建及工业级控制模块应用，通过有机集成这些硬件并精确调优参数，实现对设备运行状态的精准把控，减少能量损耗，保障生产的连续性与高效性。

1 基于机电硬件的能效提升技术路径

1.1 高效电机与变频驱动系统的集成应用

选用永磁同步电机替代传统异步电机是提升能效的关键一步。永磁同步电机在设计上具有独特优势，通过优化定子绕组结构，使其在电流传输过程中电阻更小，从而降低铜耗；优化转子磁路设计，减少磁阻，降低铁损^[1]。经测试，永磁同步电机的效率相比传统异步电机可提升8%-10%，且功率密度更高，能够在更小的体积下输出更大的功率。搭配变频器使用，可实现电机的无级调速。变频器根据设备负载实时调整电机转速，在空载或轻载时降低电机转速，避免不必要的能量消耗。

采用IGBT模块化变频器，在硬件设计上优化PWM调制策略。通过精确控制脉冲宽度和频率，有效减少谐波干扰，降低对电网和其他设备的影响。同时，精心设计硬件过流保护电路，当电流异常增大时迅速切断电路，保护变频器和电机；配备高效散热系统，如采用大面积散热片和高性能风扇，确保变频器在高温高湿的豆制品加工环境下也能稳定运行，保证电机长期高效工作。

1.2 传动系统硬件优化设计

在传动系统中，以聚氨酯同步带替代链条传动可显

著降低能耗。聚氨酯同步带具有优异的耐磨性和低摩擦系数，相比链条传动，摩擦损耗降低20%，传动效率可提升至98%。采用高精度行星齿轮箱，其制造工艺精良，能够有效减小齿轮啮合间隙，降低设备运行时的振动和噪声，延长传动部件的使用寿命。

选用陶瓷混合轴承替代钢制轴承，陶瓷材料的低摩擦特性使得轴承在运转过程中的摩擦损耗大幅降低。配置自动润滑泵与油气润滑装置，自动润滑泵根据预设程序定时定量地为轴承提供润滑油，油气润滑装置则在高速运转时通过将润滑油雾化成微小颗粒，精准地输送到轴承各个部位，确保润滑效果，避免因润滑不足导致的能耗增加和设备损坏。

1.3 嵌入式控制模块与传感器网络设计

采用西门子S7-1200系列PLC作为核心控制器，该系列PLC集成了多路数字/模拟输入输出接口，具有强大的数据处理能力和稳定的性能^[2]。它能够快速准确地实现电机启停、温度调节、压力控制等各种复杂功能的指令下发，确保设备按照预设的生产工艺要求运行。

在加热罐、挤压机等关键工位部署PT100温度传感器、压电式压力传感器及霍尔电流传感器。PT100温度传感器利用铂电阻的温度特性，精确测量温度；压电式压力传感器通过检测压力变化产生的电荷信号来测量压力；霍尔电流传感器则基于霍尔效应，实时采集电机电流。这些传感器通过CAN总线协议与PLC进行高效通信，CAN总线具有高可靠性、抗干扰能力强等优点，通信响应延迟小于10ms，保证了设备运行参数能够及时准确地传输到PLC，为设备的精准控制提供数据支持。

2 机电硬件改进驱动的生产工艺优化

2.1 热管理硬件系统的节能设计

在热管理硬件系统的节能设计中，创新性地采用电磁感应加热技术取代传统的电阻丝加热方式。电磁感应

加热是基于电磁感应定律,当交变磁场穿过金属容器时,会在容器内产生感应电流,电流通过金属材料的电阻产生焦耳热,从而实现加热目的^[3]。这种加热方式热效率极高,可提升至 90% 以上。为进一步提高能源利用率,通过精密计算与模拟分析,对线圈绕制方式进行优化,使磁场分布更加均匀,有效减少能量损失;同时,重新设计磁轭结构,让磁场的利用率得到显著提高,降低涡流损耗,确保在豆浆煮沸阶段能够快速升温,并且实现精准控温,既保证了产品质量,又大幅节省能源消耗。

在冷却工段,引入高效的板式换热器,充分利用高温废水的余热来预热冷媒,实现能源的循环利用。板式换热器以其传热效率高、结构紧凑等优势,成为余热回收的理想设备。在安装过程中,通过精确计算流体流量、压力损失等参数,合理选型不锈钢管路与耐高温泵,确保整个余热回收系统能够长期稳定运行。经过实际运行验证,该系统有效降低了冷却系统的能耗,在提升生产效率的同时,践行了绿色生产理念。

2.2 机电一体化包装设备硬件升级

在封口模块,选用了技术领先的伺服电机驱动热封刀。该伺服电机采用先进的永磁同步技术,具备高分辨率的编码器,能够实现 $\pm 0.01\text{mm}$ 的超高定位精度,响应时间短至毫秒级。编码器如同伺服电机的“眼睛”,实时反馈热封刀的位置和速度信息,为精准的闭环控制提供数据支持。控制系统依据这些反馈数据,结合预设的包装工艺参数,利用先进的 PID 算法动态调节伺服电机运转,从而精确控制热封刀的压力和温度。

以薄型塑料包装为例,传统气动系统难以精准控制压力和温度,常因压力过大导致包装破裂,或温度过高致使塑料融化、变形,不仅造成产品损耗,还浪费大量能源。而新的伺服驱动系统可根据塑料材质特性,将封口压力精确设定在 5 - 10N,温度控制在 120 - 150℃ 之间,既确保了封口质量,又避免了能源的无谓消耗。此外,硬件中精心配置的过载保护电路采用先进的电流检测芯片和快速切断继电器。当热封刀在封口过程中遇到异常阻力,如包装材料卡滞时,电流检测芯片能在微秒级时间内捕捉到电流的异常变化,随后快速切断继电器迅速动作,在几毫秒内切断电源,有效防止热封刀因过度受力而损坏,同时全方位保护设备的其他关键部件,极大地减少了设备维修成本和停机时间。

在分拣模块,创新性地集成了高精度称重传感器与六轴机械臂。高精度称重传感器运用电磁力平衡原理,内部核心敏感元件采用高稳定性的应变片,能够在 1 秒内快速且准确地测量豆制品的重量,测量精度可达 $\pm 0.1\text{g}$,

为后续的分拣操作提供了精确的数据依据。六轴机械臂借鉴先进的机器人运动学原理,每个关节都配备高性能的伺服电机和精密减速机,具备极为灵活的运动能力,可在三维空间内实现全方位、多角度的自由移动,重复定位精度可达 $\pm 0.2\text{mm}$,能够轻松实现对不同位置豆制品的精准抓取和放置。

为确保分拣精度,在机械臂的关键运动部位安装了硬限位开关与光电传感器。硬限位开关采用坚固耐用的金属材质,通过物理接触精准限制机械臂的运动范围,防止其在高速运动过程中与周边设备发生剧烈碰撞,避免造成设备的严重损坏。光电传感器则利用红外线发射与接收技术,当豆制品进入其检测区域时,发射的红外线被遮挡,接收端接收到的光信号发生变化,传感器迅速将这一变化转化为电信号,向机械臂发送精准的位置检测信号。机械臂接收到信号后,依据预设的运动轨迹和抓取策略,精准抓取豆制品并将其放置到相应的包装位置,实现了全自动化分拣。

3 机电硬件维护与故障诊断方案

3.1 硬件状态监控系统搭建

在电机与传动轴这些关键的运动部件处,分别安装了压电式振动传感器与红外测温模块。压电式振动传感器基于压电效应工作,其内部的压电材料在受到机械振动产生的压力时,会在材料的两个表面产生电荷,电荷的大小与振动的幅度和频率相关。通过对这些电荷信号的采集和分析,能够实时、精准地监测设备的振动情况。一旦振动出现异常,如振动幅度突然增大、频率发生异常变化,就极有可能暗示设备存在机械故障,例如轴承磨损时,由于滚珠与滚道之间的摩擦加剧,会导致振动信号的幅值和频率出现特征性改变;齿轮啮合不良时,也会产生周期性的异常振动。红外测温模块则利用物体的红外辐射特性来测量温度。电机和传动轴在运行过程中会产生热量,红外测温模块通过接收它们辐射出的红外线,经过内部的光学系统和探测器将其转化为电信号,再经过信号处理和温度计算,就能实时准确地测量出电机和传动轴的温度。

此外,配置了电能质量分析仪来实时采集电机电流波形。电能质量分析仪是一种高精度的电力监测设备,能够准确地获取电机运行时的电流数据。采集到的电流波形数据会被传输至 FFT 算法硬件模块,该模块基于快速傅里叶变换原理,能够在极短的时间内将时域的电流波形转换为频域信号,从而方便地检测谐波畸变率。正常情况下,电机电流的谐波畸变率处于一个相对稳定的范围。当谐波畸变率超过正常范围时,就意味着电机绕

组或变频器可能出现了异常。例如,电机绕组短路时,会导致电流的波形发生畸变,谐波含量增加;变频器 IGBT 模块故障时,也会使输出的电流波形产生异常的谐波。通过对谐波畸变率的实时监测,能够及时发现这些潜在问题,提前采取维修措施,确保设备正常运行,避免因电气故障引发的生产中断和设备损坏。

3.2 预防性维护硬件策略

基于 PLC 定时器模块控制润滑油泵启停,根据设备的运行时间和工况,预设润滑周期。例如,对于高负荷运行的轴承和齿轮箱,设定较短的润滑周期;对于低负荷运行的部件,适当延长润滑周期。确保各部件按预设周期补充润滑油,减少因磨损导致的能耗上升和设备故障。

结合电机运行时间、负载曲线及振动数据,通过硬件计数器记录关键部件(如轴承、同步带)的工作时长。利用建立的关键部件寿命预测模型,根据这些数据预测部件的剩余寿命,当部件接近使用寿命时,提前触发更换预警信号,避免因部件突然损坏造成生产中断。

表1 机电硬件优化前后效能对比

指标	优化前	优化后	提升幅度
综合能耗(kWh/t)	120	102	15%
传动效率(%)	82	95	13%
故障间隔(小时)	800	1200	50%
维护成本(万元/年)	18	12	33%

从表中数据可以清晰看出,在进行机电硬件优化后,设备的综合能耗显著降低,每生产 1 吨豆制品,能耗从 120kWh 降至 102kWh,降低了 15%,这意味着在大规模生产中,能源成本将大幅下降。传动效率从 82% 提升至 95%,提升了 13%,使得动力传输过程中的能量损失减少,设备运行更加高效。故障间隔时间从 800 小时延长至 1200 小时,提升了 50%,有效减少了因设备故障导致的生产中断,提高了生产效率。维护成本也从每年 18 万元降低至 12 万元,降低了 33%,为企业节省了大量的维护费用。这些数据充分证明了机电硬件优化方案的有效性和优越性。

4 机电操作培训与硬件维护能力提升

4.1 机电设备操作实训体系

通过实物展示电机、变频器、传感器等核心部件的内部结构,让员工直观了解其工作原理和构造。指导员工进行核心部件的拆解与组装实训,使其掌握拆装技巧,在实际工作中能够快速准确地进行设备维护和故障排查。基于实验台模拟生产场景,培训员工对 PLC 输入输出模块的配置。员工通过实际操作,学会根据不同的生产工艺要求设置输入输出参数;掌握 PID 参数整定方法,使设备在不同工况下都能稳定运行;学会设置报警阈值,当设备运行参数超出正常范围时及时发出警报,保障生产安全。

4.2 硬件维护技能强化

制定标准化的轴承更换与润滑操作流程,详细规定轴承拆卸工具的选用,如使用专用的拉马拆卸轴承,避免损坏轴和轴承;精确控制润滑脂加注量,根据轴承的型号和工作条件,确定合适的加注量,确保维护操作精准高效,延长轴承使用寿命。针对变频器常见故障(如 IGBT 击穿、电容老化),设计模块化更换方案。当变频器出现故障时,维修人员能够快速判断故障模块,按照模块化更换方案进行更换,缩短维修停机时间,提高设备的可用性。

结语

通过对机电一体化设备硬件的全面优化,从电机选型、传动系统设计到控制模块升级,构建了一套完整且高效的节能技术体系。实验数据有力地证明,硬件改进不仅显著降低了能耗与维护成本,还大幅提升了设备的可靠性。展望未来,需持续探索新型材料(如碳纤维传动部件)与智能硬件的融合应用,进一步推动豆制品加工行业朝着高效化、绿色化方向稳健发展。

参考文献

- [1]李志强.永磁同步电机在食品机械中的节能应用[J].机电工程,2023,40(5):78-82.
- [2]张伟,王磊.变频器谐波抑制技术研究[J].电力电子技术,2024,58(2):45-49.
- [3]陈昊.工业PLC在自动化生产线中的硬件配置优化[J].制造业自动化,2024,46(7):112-115.