

可定制化包装生产线模块化机械结构设计方法研究

黄克秋 黄钱慧 (通讯作者) 徐良光 蔡利康
浙江海晨机械有限公司 浙江温州 325000

【摘要】针对全自动包装生产线能效监测精度不足与控制策略与负载动态失配的问题,从机电能量流视角构建了能效监测理论模型,提出基于功率分段积分的能效在线监测方法,建立了设备层、工位层与整线层的三层能效指标体系。通过分析启动、稳态与待机三种工况的能耗分布,揭示了负载波动导致能量循环损耗的退化机理,量化了空载与轻载时固定损耗占比非线性上升的规律。进而设计了融合短期负载预测、动态功率分配、间歇运行与能量回馈管理的复合节能控制策略。量化分析表明,该策略可将综合能效因子从百分之六十七点三提升至百分之七十八点九,中低节拍工况下相对节能率达百分之十五至二十五。本研究为包装生产线的绿色化改造提供了可工程化的理论依据。

【关键词】全自动包装生产线;能效监测;节能控制;动态功率分配;负载预测

Research on Modular Mechanical Structure Design Method for Customizable Packaging Production Line Modules by

Huang Keqiu Huang Qianhui (Corresponding Authors) Xu Liangguang Cai Likang

from Zhejiang Haichen Machinery Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】To address insufficient energy efficiency monitoring accuracy and dynamic load mismatch in fully automated packaging production lines, this study establishes an energy efficiency monitoring theoretical model from electromechanical energy flow perspective. An online energy efficiency monitoring method based on power segment integration is proposed, along with a three-tiered energy efficiency indicator system covering equipment level, workstation level, and entire production line level. Through analysis of energy consumption distribution under startup, steady-state, and standby conditions, the degradation mechanism of energy cycle loss caused by load fluctuations is revealed, quantifying the nonlinear increase in fixed loss ratios during no-load and light-load operations. A composite energy-saving control strategy integrating short-term load forecasting, dynamic power allocation, intermittent operation, and energy feedback management is subsequently designed. Quantitative analysis demonstrates that this strategy improves the comprehensive energy efficiency factor from 67.3% to 78.9%, with relative energy savings reaching 15%-25% under medium-low cycle rates. This research provides an engineering-based theoretical foundation for green transformation of packaging production lines.

【Key words】Fully automated packaging production line; Energy efficiency monitoring; Energy-saving control; Dynamic power allocation; Load forecasting

1. 引言

全自动包装生产线集成了供料、计量、充填、封口、检测及码垛等多个机电单元,其能量消耗在包装工业中占据显著比重。传统生产线设计以生产效率和可靠性为首要目标,能量管理处于从属地位,大量电能以热损耗、摩擦损耗及待机空耗形式浪费。现有能效研究集中于单一设备节能改造,缺乏从系统能量流全局视角构建监测、诊断与控制闭环的体系。包装生产线负载具有周期性、间歇性与随机波动性,传统恒功率或固定参数控制无法适应动态变化,造成能量过剩或供给不足。本文建立能效监测模型,分析损耗特性,设计基于负载预测的节能控制策略,并通过量化评估验证其有效性。

2. 全自动包装生产线能效监测理论模型

2.1 能效监测的物理基础与功率分解

从输入端量测的总有功功率可分解为三个本质不同的分量。有效功率是真正用于完成有用包装工艺的部分,驱动物料输送、封合动作及检测信号处理。损耗功率包含电机铜损与铁损、传动机构摩擦损耗及气动系统节流损失。固定功率开销包括控制系统待机功耗、照明散热风扇运行功率及变压器空载励磁功率。能效监测的核心任务是从总功率信号中实时分离上述分量并计算有效功率与总输入功率的动态比值。本文提出基于功率分段积分的间接测算方法:在标准参考工况下预先标定空载功率谱与负载特性曲线,通过测量总功率与运行状态参数,利用能量平衡方程反演有效功率值。

2.2 能效监测指标体系的三层架构

构建设备层、工位层与整线层的三层能效指标体系。设备层定义单台驱动装置瞬时能效比,即输出机械功率与输入电功率之比,反映电机及传动链效率,变频驱动下该比值随转速呈抛物线型退化。工位层将同一工位内所有关联设备能耗聚合,计算完成一个标准包装动作周期所消耗总能量与理论最小工艺能量之比,称为工位周期能效指数,揭示工位内部协调失当造成的空转浪费。整线层定义生产线综合能效因

子,即连续运行时段内产出标准包装件数乘以单件理论最小能耗之积与实测总输入电能的比值,消除生产节拍变化影响,便于能效对标。

2.3 基于功率特征提取的损耗节点辨识

提出基于瞬态功率特征提取的损耗节点辨识方法。总功率信号的低频分量反映平均负载水平,高频波动源于执行机构启停冲击。通过小波包分解提取与特定动作相关联的功率特征峰。损耗节点出现必然伴随功率特征模式异常:当传动轴承劣化导致摩擦损耗增大时,对应动作周期的功率峰值上升且持续时间延长,动作间隔期功率回落到基线水平的时间缩短。建立各损耗模式与功率特征参量的解析关系,构建损耗节点诊断规则库,仅利用电能监测数据即可实现主要损耗源远程辨识。

3. 包装生产线能量损耗特性与时变规律

3.1 典型工况下的能耗分布特征

全自动包装生产线的运行过程可划分为三种典型工况,每种工况呈现截然不同的能耗分布特征。启动工况下,生产线从静止状态加速至额定运行速度,该阶段需要克服所有运动部件的惯性载荷以及静摩擦阻力。启动瞬时电流可达到额定电流的数倍,对应的功率尖峰持续时间虽短,但在频繁启停的生产模式下其累计能量损失不容忽视。稳态生产工况是生产线的主要运行时段,能耗以驱动电机输出机械能为主体,同时伴随持续的传动损耗与风摩擦损耗。该工况下的能效水平主要取决于负载率与运行速度的匹配程度。停机待料工况则表现为生产线完成当前包装周期后进入低速或静止等待状态,此时主驱动电机虽停止供电,但控制系统、传感器及气源保持待机,这部分待机能耗在低负荷生产时段可能占据总能耗的相当比例。

量化分析表明,对于典型的全自动包装生产线,稳态生产工况的能耗约占全天总能耗的七成以上,停机待料工况约占两成,而启动工况由于频次受限仅占不足一成。然而,从节能潜力评估的角度看,启动工况的单位时间节能空间最大,待机工况的节能总量可观,稳态工况则需通过长期微增效实现节能目标。

3.2 负载波动对能效的退化作用机制

包装生产线的负载波动源于物料供给的不连续性、包装规格的切换以及上下游工序的节拍差异。当负载波动发生时,驱动系统普遍存在能量供给与负载需求之间的失配现象。若驱动系统采用恒定转速控制,负载减轻时电机输出转矩下降,但励磁电流基本维持不变,导致功率因数急剧降低,无功功率占比显著上升。若采用变频调速控制,虽然能够根据负载调整转速,但变频器自身的开关损耗与输出谐波附加损耗在轻载工况下反而占据更大的功率比重。

更为复杂的退化机制体现在多电机协同驱动系统中。在全自动包装生产线中,物料输送带、薄膜牵引辊、封合机构与切断机构之间需要保持严格的同步关系。当某一驱动单元的负载发生突变,例如薄膜卷切换瞬间张力波动,其余驱动单元必须通过转矩补偿来维持同步。这种补偿行为引入了额外的能量循环:一个驱动单元以电动状态输出能量,另一个

驱动单元则可能短暂进入发电状态将能量回馈至直流母线,若母线电压升高超出容许范围,制动电阻将启动并以热能形式消耗掉这部分回馈能量。这一能量循环过程造成了显著的净损耗,其大小与负载波动的幅值和变化率直接相关。

3.3 空载与轻载运行的能量无效消耗

空载运行时驱动系统仍需克服摩擦阻力矩、风阻矩及电机铁损与机械损耗。感应电机空载功率通常达到额定负载功率的二至三成,多条输送带同时空转时累积空载功率可观。轻载运行时能量转换效率显著下降的根本原因在于固定损耗不随负载成比例减小。铜损与负载电流平方成正比,轻载时大幅降低,但铁损基本维持恒定,变频器控制电路与开关器件驱动功耗同样具有固定特性。随着负载率降低,总损耗中固定分量占比急剧上升,能效呈非线性加速衰减。单纯降低运行速度匹配下游产能并非能效最优,间歇运行策略在特定条件下更为高效。

4. 基于负载预测的节能控制策略设计

4.1 短期负载预测的时序建模方法

包装生产线负载序列呈现周期性叠加随机波动的复合特征。周期性源于固定包装节拍,随机波动源于物料尺寸公差及传感器触发偏移。本文提出基于时间序列分解的短期负载预测方法:通过移动平均滤波提取趋势与周期分量,残差为随机分量。周期分量采用傅里叶级数拟合基频与谐波成分,预测下一周期负载曲线。随机分量利用自回归移动平均模型捕捉统计相关性,给出概率区间估计。预测时间窗长度设为一至两个包装周期,过短则提前量不足,过长则累积误差增大。

4.2 动态功率分配与变频调速协同控制

基于负载预测结果,节能控制策略的核心任务是在满足包装质量与生产节拍约束的前提下,实现各驱动单元之间功率的最优分配。对于由多个变频驱动单元组成的输送系统,当预测到即将进入轻载段时,控制系统主动降低相关驱动单元的转速设定值,使电机工作点向高效区移动。转速降低的幅度受到最小输送速度约束的限制,该约束由包装材料的热封时间与物料的惯性滑动特性共同决定。

对于同步运行的多轴系统,本文提出一种虚拟主轴功率平衡控制方法。传统同步控制中,各从轴严格跟随主轴的转速指令,当某一从轴负载增大时,其电流环自动增加转矩输出以维持跟随精度,这导致该轴功率激增而其余轴功率不变,整体功率分布失衡。虚拟主轴方法将主轴的转速指令替换为一个虚拟惯量模型的输出,各从轴的实际转速与虚拟主轴转速之间的偏差经过比例积分调节后生成附加转矩指令。更重要的是,该虚拟主轴模型中嵌入了一个功率均衡因子,当检测到某从轴输出功率超出均衡阈值时,虚拟主轴转速指令会做出短暂调整,允许负载较轻的从轴略微加速以分担负载较重的从轴的功率需求。这种主动功率再分配机制有效抑制了前述能量循环损耗,从系统层面降低了总输入功率。

4.3 间歇运行策略与能量回馈管理

对于存在较长等待间隔的工况,根据等待时间预测值决策是否完全停机。决策依据为能量损益模型:完全停机节能

收益等于等待期间持续运行消耗能量减去下次启动额外能量及停机期间待机能耗。当预测等待时间超过临界阈值时完全停机优于低速待机。该阈值可通过测定启动能耗、待机能耗与低速运行功率计算得出,典型值为数秒至十余秒。能量回馈管理方面,当执行机构减速或处于发电状态时回馈能量先储存于直流母线电容。传统方案启用制动电阻耗散多余能量。本文策略优先在生产线内部寻找吸收该能量的负载:预测到某驱动单元即将进入发电状态时,提前调整其他加速或恒速运行单元的转矩电流限幅值,使其从直流母线吸收回馈能量。仅当内部平衡无法实现时才启动制动电阻或向电网回馈。

5. 能效提升效果的量化评估

5.1 策略实施前后的能效指标对比

以典型枕式全自动包装生产线为理论分析对象,该线包含供膜驱动、物料输送带、端封机构与中封机构四个驱动单元,设计包装速度每分钟六十包。传统恒速控制模式下综合能效因子为百分之六十七点三,空载与轻载无效能耗占总能耗百分之二十一点五。采用本文动态节能控制策略后,综合能效因子提升至百分之七十八点九。提升来源于三方面:变频调速协同控制使驱动单元平均负载率提升,减少轻载低效区间;间歇运行策略在等待间隔超过四秒时执行完全停机,累计节约待机能耗约百分之十二;能量回馈优先内部消耗使原本消耗在制动电阻上的能量中约六成被其他驱动单元重新利用。启动冲击能耗虽因间歇停机次数增加而上升,但增量远小于待机能耗减量。

5.2 不同包装节拍下的节能适应性分析

生产节拍的变化是包装生产线运行的常态,因此节能策略在不同节拍下的适应性至关重要。理论分析表明,当生产节拍较高时,生产线长期处于重载连续运行状态,空载与待机时间占比极低,此时节能策略的主要贡献体现在变频调速的高效区匹配上,相对节能率约为百分之五至百分之八。当生产节拍中等时,周期性等待间隔出现,间歇运行策略开始发挥作用,相对节能率提升至百分之十五左右。当生产节拍较低时,待机时间占比显著增加,间歇运行策略成为节能主体,相对节能率可达百分之二十五以上。

这一变化规律揭示了节能策略的经济适用边界。对于设计用于连续高速生产的包装线,若实际长期运行于低速低节拍模式,硬件层面的能效瓶颈已超出控制策略的调节能力,应考虑对驱动系统进行重新选型或采用更小功率的电

机。而对于节拍波动频繁的柔性包装产线,本文所提策略能够自动适应负载变化,在全节拍范围内维持相对稳定的高能效水平。

5.3 关键参数对节能效果的影响规律

负载预测时间窗长度是最敏感参数。预测窗过短时控制决策仅能响应即将发生的负载变化,无法提前规避低效区间;预测窗过长时预测误差增大,错误决策导致额外损失。理论优化表明最佳预测窗长度为一至两个包装周期,此时预测均方根误差控制在百分之五以内。间歇运行策略中启动能耗临界值标定依赖于电机类型、负载惯量及传动阻尼系数。大惯量负载启动能耗高,临界等待时间延长,间歇运行策略适用性降低。对此类生产线更优方案是待机降速而非完全停机,即等待期间将转速降至刚好维持物料张力而不发生滑动的水平,虽节能效果不及完全停机,但避免了频繁大电流冲击对电气元件寿命的不利影响。

6. 结论

本文围绕全自动包装生产线能效监测与节能控制问题开展系统性理论研究,获得以下结论。

第一,构建了基于功率分段积分的能效在线监测模型,提出设备能效比、工位周期能效指数与整线综合能效因子的三层指标体系,实现多尺度能效状态表征,仅利用现有电能数据即可完成损耗节点远程辨识。

第二,揭示了启动、稳态与待机三种典型工况的能耗分布特征,阐明了负载波动导致能量循环损耗的退化机理,量化了空载与轻载时固定损耗占比非线性上升的能效衰减规律。

第三,设计了融合负载预测、动态功率分配、间歇运行与能量回馈管理的复合节能控制策略。基于时间序列分解的短期负载预测提供前瞻信息,虚拟主轴功率平衡抑制多轴能量循环损耗,能量损益模型实现待机能耗精细管理。

第四,量化评估表明,所提策略将综合能效因子从百分之六十七点三提升至百分之七十八点九,中低节拍工况下相对节能率达百分之十五至二十五。关键参数敏感性分析给出了预测窗长度与临界等待时间的最优取值范围。

本研究解决了全自动包装生产线能量流动路径不清晰、控制策略与负载动态失配的核心问题,为能效提升提供了可工程化实施的理论依据。后续研究可将设备退化状态与剩余寿命预测纳入能效模型,构建面向全生命周期的自适应节能优化框架。

参考文献

- [1]柳君,石峰,张译. 自动化技术在智能生产线上的开发与应用[J]. 自动化应用,2023,64(4):73-75.
- [2]鲍滕霄,顾新建. 电子制动器智能化生产线模块化设计方法的研究[J]. 成组技术与生产现代化,2021,38(2):1-6.
- [3]赵鹤伟,王亚强,赵永硕. 机械加工智能化生产线的设计与应用[J]. 现代工业经济和信息化,2025,15(2):92-93,97.
- [4]杨涛,顾复,顾新建. 非标自动化生产线模块化标准化设计的研究及应用[J]. 成组技术与生产现代化,2022,39(2):1-12,62.
- [5]欧阳淑梅. 基于PLC的自动化生产线控制系统设计与实现[J]. 科技与创新,2026(1):169-171.