

锂电池涂布设备电气控制系统设计与优化研究

符顺露

纳科诺尔智能装备(深圳)有限公司, 广东 深圳 518100

[摘要]锂电池涂布工序面密度偏差控制在1%以内,对电气控制系统响应速度、控制精度、抗干扰能力有很高的要求。文章主要对高速宽幅涂布设备的电气控制系统进行研究,从硬件结构、软件策略、性能提高三个方面入手。硬件使用PROFINET总线结构,以西门子S7-1500系列PLC为主控单元,配置伺服驱动和变频驱动共同构成的执行子系统。软件上设计了电子齿轮多轴协同运动控制逻辑、双闭环张力速度控制算法、烘箱温度分区独立控制策略、变频调速热风循环控制方案。根据工程实践中的关键问题,对涂布面密度一致性进行电气侧补偿的方法进行了分析,对启停阶段张力波动抑制和加速度规划策略进行了研究,对干燥箱温度抗干扰和多变量解耦控制方案进行了探讨,对运行数据状态监测和节能优化路径进行了研究。

[关键词]锂电池涂布;电气控制系统;张力控制;多轴协同;温度控制

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20328

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on the Design and Optimization of Electrical Control System for Lithium Battery Coating Equipment

FU Shunlu

Naknor Smart Equipment (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518100, China

Abstract: The surface density deviation of lithium battery coating process should be controlled within 1%, which has high requirements for the response speed, control accuracy, and anti-interference ability of the electrical control system. The article mainly studies the electrical control system of high-speed wide width coating equipment, starting from three aspects: hardware structure, software strategy, and performance improvement. The hardware uses PROFINET bus structure, with Siemens S7-1500 series PLC as the main control unit, and is configured with an execution subsystem consisting of servo drive and variable frequency drive. The software has been designed with electronic gear multi axis coordinated motion control logic, dual closed-loop tension speed control algorithm, independent control strategy for oven temperature zoning, and variable frequency speed regulation hot air circulation control scheme. Based on key issues in engineering practice, the method of electrical side compensation for consistency of coating surface density was analyzed. The strategies for suppressing tension fluctuations and acceleration planning during the start stop phase were studied. The anti-interference and multivariable decoupling control scheme for drying oven temperature was explored, and the monitoring of operating data status and energy-saving optimization path were studied.

Keywords: lithium battery coating; electrical control system; tension control; multi axis collaboration; temperature control

引言

涂布是锂电池极片制造的关键工序,浆料经过模头挤出之后,在集流体上形成均匀的涂层,面密度的一致性以及干燥的质量直接影响到电芯的容量一致性、能量密度和安全性能。伴随着新能源汽车及储能产业的迅速发展,锂电池的出货量也不断上升,涂布设备向着宽幅化、高速化、智能化的方向发展。目前先进的涂布机可以达到1600mm宽幅、100m/min稳定速度下面密度 $COV \leq 0.25\%$ 的控制指

标,对电气控制系统响应速度、控制精度、抗干扰能力提出了前所未有的要求。电气控制系统属于涂布设备的“神经中枢”,其设计水平直接关系到涂布过程是否稳定以及产品的良品率。涂布工序的难点就是张力、速度、温度、风量等很多参数之间存在着很强的耦合性,所有的变量都必须处于一个叫做“涂布窗口”的范围内才能保证制程的稳定。但是现有的研究大多只针对一个控制环节进行改进,缺少对电气控制系统从硬件选型、软件策略到性能优化的

系统性设计框架。

1 锂电池涂布工艺与设备电气系统总体架构

锂电池涂布设备工艺流程包含放卷、纠偏、牵引、涂布、干燥、收卷等过程。放卷区将成卷的集流体基材展开,经纠偏装置校正走带位置后进入涂布区;涂布区通过背辊与涂辊的精密配合将浆料均匀涂覆于基材表面^[1];湿极片随后进入多节烘箱组成的干燥通道,在热风作用下完成溶剂蒸发;最后经牵引辊牵引后由收卷机构完成成品收卷。根据以上工艺流程,电气控制系统总体结构为三层结构,设备层布置传感器、执行器、驱动装置,控制层以 PLC 为主,用工业以太网总线和各个从站进行通信,管理层用 HMI 和 SCADA 系统进行生产监控和数据管理。控制层和设备层之间使用 PROFINET 总线,循环周期设为 1~2ms,以保证高速涂布的实时性。系统所接 I/O 点数为 200~900 个,通信节点大于 50 个。另外,由于锂电池产线 24 小时连续运转的特点,PLC 系统要具备冗余配置,即 CPU 冗余加电源冗余的双重保障,防止因为控制器出现故障造成停机事故的发生^[2]。

2 电气控制系统硬件设计

2.1 主控单元与通信网络选型

主控单元选型要兼顾运算能力、运动控制功能、通信接口、可靠性等各方面因素。涂布工序对于模拟量处理精度有较高的要求,面密度偏差要控制在 1%以内,PLC 的模拟量处理精度不能低于 16 位。大型挤压涂布机上西门子 S7-1500 系列 PLC 使用较多,TIA Portal 平台对于多轴同步控制的编程支持较好。该系列 1517-3 CPU 可以实现双 PLC 主控结构,完全适合于大型涂布机全部工艺过程的控制。运动控制要求高时用 S7-1500T 系列工艺 CPU,内嵌插补和同步指令可以实现电子齿轮、相位同步等功能控制。

通信网络上 PROFINET 总线因为具有高速、低延迟、灵活拓扑等特点,已经成为锂电涂布设备的主要选择。

PROFINET 总线循环周期可以设为 1~2ms,可以满足多轴伺服高速同步的要求。现场设备层可以使用 Modbus RTU 和 IO-Link 协议混合使用,用于变频器等标准设备通信时采用 Modbus RTU 协议,用于智能传感器、执行器的参数配置和诊断时采用 IO-Link 协议。主控 PLC 用 PROFINET 总线把各个伺服驱动器、远程 I/O 模块、模拟量模块连起来,形成一个高速、确定的控制网络。

2.2 驱动与执行子系统配置

驱动和执行子系统根据负载特性以及控制精度的要求来使用伺服驱动和变频驱动相结合的方式。涂布辊、背辊、调刀机构对定位精度、动态响应要求最高,用伺服驱动器加高分辨率编码器做闭环控制。伺服驱动器用 PROFINET 总线接收 PLC 速度或者位置指令,把实际运行状态及时反馈给控制器。收放卷及牵引辊的转矩控制要求高,用变频器驱动异步电机,用模拟量或者总线通信接受速度指令。

表 1 中各个执行单元的驱动方式与它的功能要求相适应。收放卷单元还要装设张力传感器,对料带张力进行实时检测,并把检测结果反馈给 PLC 进行闭环调节。烘箱区的风机用变频器来驱动,通过调节风机转速来改变热风风量,从而达到对干燥强度进行灵活控制的目的。

3 电气控制系统软件与控制策略

3.1 多轴协同运动控制逻辑

涂布设备的运动控制包含放卷轴、涂布轴、牵引轴、展平轴、烘箱轴,各个运动轴之间要保持严格同步。多轴协同控制采用主轴-从轴架构,把虚拟主轴或者涂布辊轴作为速度基准,其他从轴用电子齿轮或者电子凸轮跟随主轴运动。电子齿轮模式下,轴速度与主轴速度固定,两者之比会随卷径变化而变。卷径计算是电子齿轮比设定的关键步骤,常用的有基于编码器脉冲累积的厚度积分法、基于线速度和角速度关系的间接计算法。

表 1 涂布设备各执行单元驱动配置

执行单元	驱动方式	控制模式	反馈元件	通信接口
放卷辊	变频器+异步电机	速度控制/转矩控制	张力传感器、编码器	PROFINET/模拟量
涂布辊	伺服驱动器+伺服电机	速度控制/位置控制	高分辨率编码器	PROFINET
背辊	伺服驱动器+伺服电机	速度控制	编码器	PROFINET
调刀机构	伺服驱动器+伺服电机	位置控制	编码器	PROFINET
牵引辊	变频器+异步电机	速度控制	编码器	PROFINET/模拟量
收卷辊	变频器+异步电机	转矩控制/速度控制	张力传感器、编码器	PROFINET/模拟量
烘箱风机	变频器+异步电机	速度控制	无	模拟量/RS-485

软件实现中,多轴协同控制逻辑用独立功能块(FB)来实现(轴使能、速度设置、位置检测、故障诊断等),作为一个整体功能块。主控 PLC 在每一个总线循环周期里完成各个轴的状态采集、控制量计算以及指令输出,保证所有的运动轴在同一时间基准上共同动作。

3.2 张力-速度闭环控制算法

张力控制属于涂布品质保证的关键部分。张力过大会造成基材弹性形变或者断裂,张力过小就会造成走带松弛和涂布不均。本系统使用双闭环 PID 控制结构,内环是速度环,外环是张力环。张力传感器实时检测料带张力,与设定值比较后经过 PID 运算得到速度修正量,叠加到主轴速度指令上驱动执行机构调节。

对收放卷过程中卷径变化引起的张力扰动,在 PID 控制的基础上加入前馈补偿。卷径变化造成相同角速度下线速度发生变化,如果不加以补偿就会引起张力波动。系统用实时计算出的当前卷径来不断改变速度指令,从而保证线速度不变。模糊卷径计算技术可以不需要卷径测量传感器就达到 $\pm 1\text{mm}$ 的卷径计算精度,简化了机械结构、提高了系统的稳定性。

3.3 温度场分区独立调控策略

干燥工序一般是由多节烘箱串联而成,每节烘箱要根据极片的湿度变化来设定不同的温度目标。温度场分区独立调控策略就是对每一节烘箱分别设置独立的温度控制回路,各个回路用 PID 算法独立调节加热器的输出功率。温度传感器安装在烘箱出口处检测热风温度或者极片附近温度,控制器根据实测值和目标值的偏差来计算加热器的控制量。

由于各个烘箱之间存在热气流串扰,单纯的独立 PID 控制不能同时保证所有的温区精度。因此,在温度设定值规划阶段,根据极片在干燥通道中湿度的变化曲线来给各个烘箱分配不同的温度目标,前段烘箱温度低以防止表层结皮,中段烘箱温度高以加快溶剂蒸发,后段烘箱温度低以防止过度干燥。该种“低-高-低”的温度分布方式既能保证干燥效率,又不会造成涂层缺陷。

3.4 风量/风速与热风循环控制逻辑

烘箱热风系统由风机、加热器、风嘴组成,风量的多少影响干燥速度及涂层质量。风量/风速控制采用变频调速方式,PLC 根据当前干燥阶段的工艺要求发出模拟量信号或者总线指令给变频器,变频器根据该信号或者指令来调节风机转速,进而改变进入风室的风量。风嘴内装有匀风板、可调挡板,用伺服电机控制挡板位置偏移来改变

出风截面积,达到局部风量精细调节的目的。

热风循环控制就是进风与排风之间动态平衡的过程。系统利用烘箱内部压力或者温度的变化来调节进风风机和排风风机的转速,保持烘箱内微正压或者微负压的状态。排风量过大会增大热量损失,排风量不足会影响溶剂蒸气的及时排出。在控制逻辑里加入压力前馈环节,在进风量发生变化的时候提前调节排风量,防止压力波动对温度场造成影响。

4 系统性能优化与关键问题研究

4.1 涂布面密度一致性影响因素与电气侧补偿方法

涂布面密度一致是评价涂布质量的主要指标。影响面密度一致性的因素有浆料流变性波动、模头间隙变化、走带速度波动、基材张力波动等。从电气控制角度出发,可采取的补偿方法主要有三类:一是通过面密度在线检测仪实时监测涂布后的面密度分布,将检测数据反馈给控制系统,通过调节供料泵速或模头间隙实现纵向面密度的闭环调节;二是通过伺服电机缸精确控制模头间隙,响应面密度偏差信号实现横向涂布厚度的动态修正^[3];三是通过稳定走带速度和张力间接保障面密度的一致性,减少速度波动和张力波动对面密度的间接影响。面密度闭环控制的实现依赖于高精度的检测手段和快速响应的执行机构。全检面密度仪通过射线源与探测器阵列组合,在涂布走带过程中实现全幅面动态检测。检测数据经过卡尔曼滤波等算法处理之后得到调节量,驱动模头上的线性执行机构来完成间隙的调节。整个闭环响应时间应小于 1s,满足涂布速度变化的要求。

4.2 启停阶段张力波动抑制与加速度规划

涂布设备的启停阶段就是张力波动最剧烈的时候。启动阶段各个运动轴从静止状态加速到工作速度,如果加速度规划不当就会造成张力突然冲击,停止时也有减速过程中张力松弛。加速度规划的关键就是对加加速(jerk)进行控制。加加速直接影响单位时间内张力的变化率,控制好主轴的加加速就成功抑制了大部分的张力波动。本系统使用 S 型加减速曲线进行加速度规划,将加速过程分为加速、匀加速、减加速三个阶段,使速度变化率连续,加速度变化率小。各从轴根据主轴的速度规划曲线同步调整自身速度,保持电子齿轮比的恒定。在收放卷单元中,启动时采用转矩预置法,在速度环投入前就先给电机一个转矩来消除传动间隙和静摩擦。停止时用逐渐减慢的速度和张力前馈来保证料带不松弛。

4.3 干燥箱温度抗干扰与多变量解耦控制

干燥箱温度控制主要的干扰有进料极片湿度波动、走

带速度改变、环境温度变动、相邻烘箱的热辐射干扰等。走带速度的变化对于温度场的影响最大。速度加快使单位时间内进入烘箱的湿料增加,需要更多的热量来蒸发溶剂。为了提高温度控制的抗干扰性,在 PID 反馈控制的基础上加上前馈补偿。前馈量按照走带速度、进料湿度等可测扰动事先计算出来,在扰动影响温度之前就施加补偿作用,使反馈调节的滞后时间变短。对多烘箱之间的热耦合问题,用相对增益矩阵来分析各个变量间的关联强度,对于强耦合的变量对设计解耦补偿器,把多变量系统分解成多个相对独立的单变量回路^[4]。实践中,根据实际情况合理确定各个烘箱的温度梯度,限制相邻两个烘箱的温差,在不影响控制的复杂性的情况下可以有效地减小耦合的影响。

4.4 基于运行数据的状态监测与节能优化

涂布设备长时间连续工作时,电气系统状态参数就包含了诸多设备健康状况的信息。利用 Modbus TCP 总线或者 OPC UA 协议对设备进行实时的数据采集和上传,从而达到对设备状态进行在线监测以及趋势分析的目的。当某个参数出现异常变化趋势的时候,系统就会发出预警,防止故障扩大造成停机。烘箱干燥环节为能耗主要部分,一台涂布设备一年的耗电量可达 15 万度以上。根据涂布速度和浆料特性动态调整各个烘箱的温度设定值以及风量,防止因过度干燥造成能源浪费,使用变频调速代替风门调节来减少节流损失,用排风余热预热进风来降低加热器的电功率消耗。通过对运行数据不断积累并加以分析,可以建立各个工艺参数同能耗之间的相关性模型,从而给不同工况下最佳参数设定赋予数据支持,促使能效不断改善。

5 结束语

本文从硬件架构、软件策略、性能优化三个方面对锂电池涂布设备的电气控制系统设计及优化进行阐述。硬件上使用 PROFINET 总线架构和伺服/变频混合驱动方案保证系统的实时性及控制精度;软件上用多轴协同运动控制、双闭环张力控制、温度分区调控和风量变频调节等方式对涂布过程中的各项参数进行协调控制;对面密度一致性、启停张力波动、温度抗干扰、节能运行等工程难点提出了可以落地的解决方案。伴随着锂电池产能不断增长以及工艺要求越来越高,电气控制系统的精度、实时性、智能化水平会越来越高。以数据驱动为基础的预测性维护、人工智能辅助的参数自整定和数字孪生驱动的虚拟调试等,都将是涂布设备电气控制系统未来发展的新方向。

[参考文献]

- [1]杨林林.高速、高精智能化锂电池涂布机关键技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(8):103-106.
- [2]邹海天,丁桐桐,张松岭,等.锂电涂布机新型节能技术研究[J].新技术新工艺,2024(2):60-67.
- [3]杨家沐,陈育新,练成,等.电极浆料涂布模头流场分析与结构优化[J].储能科学与技术,2024,13(4):1109-1117.
- [4]杨韵勑,苏振杨.涂布机张力控制系统设计[J].电气开关,2020,58(3):60-63.

作者简介:符顺露(1995—),男,汉族,海南省儋州市人,初级工程师,2017年6月毕业于吉林长春大学,从事机械工程专业,本科学历,目前主要从事锂电设备方向工作。