

光伏电池片传输机械臂协同控制策略

周湖滨 陈培杰 金君斌

浙江晶盛机电股份有限公司, 浙江省绍兴市, 312300;

摘要: 本文聚焦光伏电池片传输机械臂协同控制。指出其存在协同定位精度不足、动态协同响应滞后、负载与姿态协同控制失衡等挑战。针对这些问题, 提出协同定位精度控制策略, 包括传感器和算法模型控制; 动态协同响应控制策略, 涵盖通信、算法与执行层面控制; 负载与姿态协同控制优化策略, 涉及负载监测与动态补偿、姿态控制算法优化与协同控制, 以提升协同控制水平。

关键词: 光伏电池片; 传输; 机械臂; 协同控制

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 031

引言

在光伏产业蓬勃发展的当下, 光伏电池片传输机械臂的协同控制至关重要。其协同控制水平直接影响电池片的生产效率与质量。然而, 当前机械臂协同控制面临诸多难题, 如定位精度、响应速度以及负载与姿态控制等方面的问题, 制约了生产线的稳定运行。因此, 深入研究并解决这些问题, 探索有效的协同控制策略, 具有重要的现实意义和应用价值。

1 光伏电池片传输机械臂协同控制存在的挑战

1.1 协同定位精度不足

鉴于光伏电池片厚度通常严格控制在 $100\sim 150\ \mu\text{m}$, 其边缘抗冲击性相对较差, 且在后续焊接层底等工序中对位置精确度要求颇高, 当多机械臂协同定位时, 其精度极易受到多重因素干扰。一方面, 存在机械臂本体误差累积问题, 由于单个机械臂的重复定位误差会在持续协同过程中不断叠加, 倘若两个机械臂配合传递电池片, 误差可能会放大至 ± 0.1 毫米以上, 进而在对接时致使电池片边缘产生碰撞刮擦。另一方面, 环境干扰的动态影响也不容忽视, 车间温度变化会使机械臂连杆热胀冷缩, 气流扰动会让悬空的电池片产生微小偏移, 这些都会进一步放大偏差; 此外, 多元信息同步后, 在机械臂间通过工业总线传输位置指令时, 若存在一定通信延迟, 在高速传输场景下会导致预判位置与实际位置偏差达到 $1\sim 4\text{mm}$, 最终造成电池片掉落或者边缘破损。

1.2 动态协同响应滞后

光伏生产线节拍通常要求在 $3\sim 5$ 秒内完成每片电池片的操作, 机械臂需要快速完成抓取、传递、释放的协同动作, 一旦产生响应滞后便会打破整个生产节奏。首

先, 通信与计算延迟问题突出, 多机械臂协同依赖中央控制器实时计算轨迹, 当机械臂数量大于三台时, 协同算法的计算量会呈指数增长, 同时机械臂的信息状态通过无线或有线传输时, 一旦受到电磁干扰会进一步导致数据传输出现延迟。其次, 动力学特性不匹配, 不同机械臂的加速度、加加速度等相关参数存在一定差异, 协同时若未精确校准会出现动作不同步的问题, 导致电池在传输时承受额外压力, 进而产生变形。最后, 突发扰动的适应性差, 若机械臂抓取误差需临时调整轨迹, 其他机械臂无法在 10ms 内响应并修正动作, 便容易出现动作冲突的问题。

1.3 负载与姿态协同控制失衡

由于光伏电池片自身刚性相对较低, 弯曲超过 0.5mm 则可能产生隐裂, 而多机械臂协同传输过程中, 负载分配与姿态控制的失衡会导致电池片变形或者断裂。一方面, 负载分配不均会导致电池片断裂变形, 针对尺寸大于等于 1.2m 的电池片, 需要同时 $2\sim 3$ 台机械臂从边缘或背面协同承载, 若控制系统精度不足则会导致某一机械臂负载过大, 进而使电池片出现变形, 若负载过小也会导致电池片滑落。另一方面, 姿态协同偏差也会引发上述问题, 在传输过程中需要保持电池片水平, 但机械臂的姿态传感器存在 ± 0.1 度的误差, 协同中通过不断累积会导致倾斜超过 ± 0.3 度, 若 AGV 抬高速度快于机械臂, 则会在 1 秒内导致电池片倾斜三度以上, 进而使电池片产生隐裂。

2 光伏电池片传输机械臂协同控制策略

2.1 协同定位精度控制

2.1.1 传感器控制

当确定传感器误差是导致协同定位精度的主要因素后,在传感器层面执行控制策略需严格遵循一系列操作细节。对于位置传感器,要先进行静态校准,将其放置在已知精确位置的标准平台上,通过调整传感器内部参数,使测量值与标准值高度一致;完成静态校准后进行动态校准,模拟光伏电池片传输过程中机械臂的实际运动状态,采集不同速度、加速度下的传感器数据与理论值对比分析,进一步微调传感器参数,消除动态误差。同时,采用多传感器数据融合技术,将不同类型传感器的数据进行综合处理,例如将位置传感器与视觉传感器的数据进行融合,利用视觉传感器的高分辨率与位置传感器的实时性,通过加权平均、卡尔曼滤波等算法,提高位置信息的准确性与可靠性。在数据融合过程中,要根据不同传感器的工作原理和性能特点合理确定权重参数,保证融合后的数据能够真实反映机械臂的实际位置,提升协同定位精度^[1]。

我公司在光伏组件装配线调试中,发现激光位移传感器(型号 LDS-800)与编码器的测量偏差导致机械臂对接误差超 0.5mm,遂启动传感器控制方案。技术人员将激光位移传感器固定在精度 0.01mm 的大理石平台上,通过配套软件调整增益参数至 8.2,使测量值与平台基准值差控制在 0.03mm 内;再以 0.5m/s 速度、 2m/s^2 加速度驱动机械臂模拟传输,采集 500 组数据,用最小二乘法拟合修正曲线,将动态误差压缩至 0.08mm。同时,将该传感器数据与工业相机(分辨率 2048×1536)的图像数据融合,按 7:3 权重分配,经卡尔曼滤波处理,定位偏差稳定在 0.1mm 内。

2.1.2 算法模型控制

若协同定位精度不足是由于算法模型偏差,在算法层面执行控制策略时,要深入剖析现有协同控制算法的原理与结构,找出可能导致精确度下降的关键环节,对算法中的关键参数进行优化调整。例如采用智能优化算法,如遗传算法、粒子群优化算法等,以定位精确度指标为优化目标,对算法参数进行全局搜索和优化。在优化过程中要合理设置优化算法的参数,如种群规模、迭代次数、变异概率等,确保优化过程能够高效收敛到全局最优解。此外,还可以引入先进的控制理论和方法对协同控制算法进行改进,例如采用模糊控制理论,根据机械臂运动中的不同状态动态调整控制参数,提高算法的适应性和鲁棒性。

2.2 动态协同响应控制

2.2.1 通信层面的控制

当诊断出动态协同响应滞后原因主要是由于信号传输问题导致时,首先要对现有的通信协议进行全面评估,分析其数据传输速率、可靠性、实时性等指标是否满足光伏电池片传输机械臂协同控制的需求,若存在协议不足的问题,则需要选择更合适的通信协议,如采用实时性更强的工业以太网协议,其具有高带宽、低延迟的特点,能够有效减少信号传输时间。同时优化网络拓扑结构,避免出现信号传输瓶颈,可采用星型拓扑结构,将控制中心作为核心节点,各机械臂作为子节点直接与核心节点相连,减少信号中转环节,降低传输延迟。此外,还需要设置合理的通信缓冲区,避免因数据冲突传输导致缓冲区溢出,造成信号丢失或延迟,进而全面提高通信系统的实时性与可靠性,缓解动态协同响应滞后的问题^[2]。

我司在光伏电池片传输线调试时,发现机械臂协同响应滞后超 50ms,经诊断是信号传输问题所致,遂从通信层面执行控制策略:技术人员先对现有 RS485 协议进行评估,发现其数据传输速率仅 115.2kbps、实时性不足,无法满足需求,于是选择更换为 EtherCAT 工业以太网协议,该协议带宽达 100Mbps、延迟可控制在 1ms 内,能有效减少信号传输时间;同时他们优化网络拓扑结构,将原来的总线型改为星型,以控制中心作为核心节点,各机械臂通过专用网线直接与核心节点相连,减少了 3 个中转环节,使传输延迟降低 20ms;此外,技术人员在通信模块中设置 8KB 缓冲区,并编写数据优先级调度程序,让机械臂定位指令优先传输,避免了因数据冲突导致的缓冲区溢出,使信号丢失率从 1.2%降至 0.1%,全面提高了通信系统的实时性与可靠性,缓解了动态协同响应滞后的问题。

2.2.2 算法与执行层面的控制

若动态响应滞后原因主要是由于控制算法计算耗时过长或机械执行环节响应缓慢,则需要对现有的协同控制算法进行深入剖析,识别出计算复杂度高的关键模块,采用算法简化技术,例如模型降阶、近似计算等方法,在保证控制精准度的前提下减少算法的计算量,同时也可以引入并行计算技术,将算法中的可并行计算部分分配到多个计算单元中同步处理,提高算法的计算速度。针对机械执行层面,需要对机械臂的机械结构进行

优化设计,减轻机械臂的自重,降低惯性,提高其运动的灵活性,选用高性能的驱动系统,如同服电机与高精度减速器的组合,提升驱动系统的响应速度与控制精度,并且需要根据机械臂的实际运动特性调整控制器的比例、积分、微分参数。通过将以上两者的协同配合,实时监测机械臂的运动状态与控制算法的输出,及时调整策略参数,保证动态协同响应滞后问题得到有效解决。

2.3 负载与姿态协同控制优化

2.3.1 基于负载监测与动态补偿的控制

当确定负载突变是导致负载与姿态协同控制失衡的关键因素时,一方面,需持续强化负载监测的准确性与实时性,优化力传感器的布局与安装方式,确保其能够精确感知负载的大小、方向以及变化趋势,采用先进的信号处理技术对传感器采集到的原始信号进行滤波、放大等处理,消除噪声干扰,提高信号质量,为后续负载分析提供可靠数据依据。另一方面,需构建动态补偿机制,根据实时监测到的负载变化情况迅速调整机械臂的姿态控制参数,当负载增大时,可以通过增大关节驱动力矩、调整关节运动速度等方式,使机械臂能够保持稳定的姿态;当负载减少时,可以减少驱动力矩,避免机械臂因惯性产生过度运动。在动态补偿过程中,需建立精确的负载-姿态映射模型,明确不同负载条件下机械臂应采取的姿态调整策略,同时设置合理的补偿阈值与响应时间,确保补偿动作及时准确,避免因过度补偿或补偿不及时导致新的失衡问题。

2.3.2 姿态控制算法优化与协同控制

若问题主要是姿态控制算法的局限性,则需要对姿态控制算法进行全面优化并完善相应的控制策略。针对算法优化层面,需要深入研究现有的姿态控制算法,分析其在处理负载变化时的不足,引入先进的控制理论与方法,例如自适应控制、鲁棒控制等,全面提升算法对负载变化的适应性与鲁棒性。在协同控制策略方面,需要加强机械臂各关节之间的协同配合,通过建立协同控制模型,明确各关节在负载变化时的协同运动协调关系,实现关节间的信息共享与交互,当某一关节因负载影响而发生姿态变化时,其他关节能够及时做出相应的调整,共同维持机械臂的整体姿态稳定。同时也需要注重控制策略的实时性、高效性,优化控制算法的计算流程,减少计算时间,确保机械臂能够快速响应负载变化,并做

出正确的姿态调整^[3]。

我司的机械臂在抓取不同厚度光伏电池片(0.15mm-0.3mm)时,因姿态控制算法无法适配负载波动,出现末端姿态偏差达 2° ,故需优化算法并完善协同控制策略;技术团队剖析原有PID姿态控制算法,发现其在负载变化5%以上时跟踪误差剧增,于是引入模型参考自适应控制理论,在算法中嵌入负载观测器,实时识别负载变化参数并自动调整控制增益,使算法对负载波动的适应范围从 $\pm 10\%$ 扩展至 $\pm 30\%$;在协同控制方面,他们建立“肩关节-肘关节-腕关节”三关节协同模型,通过CAN总线实现关节间数据交互(传输速率500kbps),当腕关节因负载增加而下沉 0.5° 时,肩关节立即向上微调 0.3° ,肘关节同步向内收缩 0.2° ,共同维持整体姿态;同时优化算法计算流程,将姿态解算模块的循环迭代次数从200次减至80次,配合FPGA硬件加速,使单步计算时间从12ms缩至3ms,确保机械臂在负载变化0.5s内即可完成姿态调整,整体偏差控制在 0.4° 内。

3 总结

本文深入剖析了光伏电池片传输机械臂协同控制面临的挑战,并针对性地提出了一系列控制策略。通过传感器与算法模型控制提升协同定位精度,从通信、算法与执行层面缓解动态协同响应滞后,借助负载监测与姿态控制算法优化改善负载与姿态协同控制失衡。这些策略为提升机械臂协同控制性能提供了新思路,有助于推动光伏产业自动化生产迈向新高度,未来可进一步探索更智能高效的控制方法。

参考文献

- [1] 裴凤雀. 智能生产线过程质量大数据分析 with 协同优化[D]. 南京理工大学, 2020.
- [2] 白玉田. 太阳能电池板汇流条自动化焊接生产线机械系统方案设计与分析[D]. 宁夏大学, 2020.
- [3] 吕振兴, 胡庆明, 李军明, 等. 光伏发电项目太阳能电池组件裂片及隐裂质量控制[J]. 安装, 2024, (08): 78-80.

作者简介: 周湖滨(1996.03—), 男, 汉, 浙江绍兴, 本科, 电气工程师, 光伏电池片传输机械臂协同控制策略, 晶盛机电股份有限公司。