

光伏电池片插片设备关键技术研究与应用

侯大伟¹ 王发明² 周永刚¹

1 浙江晶盛机电股份有限公司, 浙江省绍兴市, 312300;

2 浙江晶鸿精密机械制造有限公司, 浙江省绍兴市, 312300;

摘要: 全球能源转型与碳中和目标推动光伏产业快速发展, n型电池技术规模化应用促使光伏电池向薄片化、大尺寸化演进, 对插片设备的精度、速度及稳定性提出严苛要求。针对传统设备适配性不足的问题, 研究聚焦视觉引导精准定位与柔性自适应抓取两大核心技术, 通过张正友平面标定法、手眼标定建立坐标系映射, 结合偏振滤波、SIFT算法优化特征提取与匹配; 依托三维传感器、机器学习算法实现接触状态识别与抓取力动态调控, 搭配形变补偿与姿态优化完成无损抓取。案例应用验证表明, 相关技术可将定位误差控制在要求范围内, 特征匹配准确率达99.8%以上, 有效满足高效量产需求。

关键词: 光伏电池片; 插片设备; 关键技术; 应用

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.085

引言

传统设备存在精度不足、节拍偏低等短板, 难以适配薄片电池量产需求。基于这一行业痛点, 研究围绕设备核心性能提升展开, 通过视觉引导定位技术破解精准对齐难题, 借助柔性自适应抓取技术规避隐裂风险, 旨在构建适配新型电池特性的插片设备技术体系, 为产业高效发展提供技术支撑。

1 研究背景

在全球能源转型进程深化与碳中和目标全面驱动的背景下, 光伏产业已稳固成为可再生能源领域的核心支柱产业。据中国光伏行业协会发布的权威数据显示, 我国光伏电池片产量占全球总产量的90%以上, 全球光伏电池片市场规模已成功突破2500亿美元。伴随n型电池技术的规模化应用推进, 光伏电池正持续朝着薄片化与大尺寸化的双重方向加速发展, 电池厚度已从原先的180 μm 逐步下降至120 μm 以下, 尺寸则从156mm拓展至210mm, 这一发展趋势对插片设备的精度指标、运行速度及稳定性能均提出了更为严苛的要求, 具体而言, 电池与定位卡槽的间隙需严格控制在0.2mm以内, 擦片轨迹的重复性误差要确保小于0.15mm, 同时还必须有效避免因机械应力作用而引发的隐裂、碎片等质量问题。传统插片设备却因自身精度不足、运行节拍偏低且缺乏对薄片电池的适配能力, 难以满足高效电池片量产阶段的实际需求, 基于此, 本文旨在针对上述核心问题展开系统性研究, 实现对光伏电池片插片设备关键技术的深度探索、拓展创新与实践应用。

2 光伏电池片插片设备关键技术

2.1 视觉引导精准定位技术

视觉引导精准定位技术的核心要求是建立相机坐标系与机器人坐标系之间的精准空间映射关系, 这一核心目标的实现必须依托系统化的标准策略逐步推进。

2.1.1 内参标定

首要任务是完成相机内参标定, 该环节采用张正友平面标定法, 通过拍摄多组不同角度的棋盘格图像, 借助角点检测算法提取特征点坐标信息, 再结合最小二乘法进行优化计算, 求解得出相机焦距、主点偏移量以及畸变系数等关键参数, 以此保障图像采集集合的信息准确性。

2.1.2 手眼标定

紧接着开展手眼标定工作, 选用基于n点标定的cogcalibnpointhonpoint工具, 在机器人末端执行器上固定标定杆, 同步记录机器人移动至多个已知位置时, 标定板特征点在相机坐标系中的像素坐标与在机器人坐标系中的空间坐标, 通过求解线性方程组确定相机坐标系与机器人基坐标系之间的旋转矩阵和平移向量, 从而完成两个坐标系的空间对齐。标定过程中需严格管控环境光照条件, 规避反光或阴影对特征点提取工作的干扰, 同时保障机器人运动轨迹的重复定位精度, 降低标定误差对后续定位任务的不利影响。

2.1.3 特征提取

在此基础上推进特征提取与匹配工作, 这一环节是视觉引导定位技术的核心关键, 其技术内核在于从复杂图形中提取具有唯一性的特征描述符, 并构建与模板图像的稳定对应关系。实施过程中需依据目标物体的材质特性选用适配的图像预处理方法, 对于光伏电池片这类

高反射率物体,可采用偏振滤波技术抑制镜面反射现象,同时结合高斯滤波消除图像噪音,提升特征边缘的清晰度;随后采用 sift 或 surf 算法提取特征点,这类算法通过构建高斯金字塔与方向直方图,分层生成对旋转、缩放以及光色变化具有强鲁棒性的 128 维特征向量。

2.1.4 特征匹配

特征匹配阶段采用快速近似最近邻搜索算法加速特征点对的匹配进程,同时引入随机抽样一致算法剔除误匹配点,通过迭代优化估计单应性矩阵,确保匹配结果的几何一致性。匹配过程中需动态调整特征提取的阈值参数,以适配不同批次电池片表面纹理的微小差异,并且建立特征库的动态更新机制,定期将新检测到的特征点纳入模板库,提升系统对新型号产品的兼容性能。

2.2 柔性自适应抓取技术

针对光伏电池片易碎、易产生隐裂的核心特性,相关单位应采用柔性自适应抓取技术优化设备结构,实现对不同规格电池片的无损抓取目标。

2.2.1 部署传感器

实践应用环节,企业可在抓取末端配置高精度六维传感器,该传感器需具备亚牛顿级的力分辨率与力矩分辨率,以精准捕捉抓取过程中的法向接触力、切向摩擦力以及绕三轴的扭转力矩变化数据;传感器信号通过高速数据采集卡进行同步采集,采样频率不低于 1000hz,防止因信号延迟导致接触状态误判情况的发生。

随后构建力学信号处理模型,该模型采用卡尔曼滤波算法对原始信号进行降噪处理,消除机械振动或电磁干扰引发的噪音与震动,同时通过滑动窗口平均算法提取信号的稳态特征值,为后续接触状态识别工作提供可靠的数据支撑。

2.2.2 接触状态识别

接触状态识别需基于机器学习算法构建分类模型,将预处理后的力学信号输入支持向量机或卷积神经网络,通过训练集数据学习不同接触状态的力学特征模式,最终实现接触状态的实时分类与状态标签输出,为抓取力的动态调整提供决策依据。

2.2.3 抓取力动态规划

抓取力动态规划是柔性自适应抓取技术的关键执行环节,其核心目标在于依据接触状态识别结果,实时调整抓取力的大小与方向,以适配目标物体物理特性的变化。实施过程中相关单位需建立抓取力规划模型,该模型需融合目标物体的质量、表面摩擦系数、刚度等物理参数,结合接触状态标签生成初始抓取力矢量,其中法向力根据物体质量与重力加速度计算得出,切向力依据滑动趋势进行动态调整,扭转力矩则根据接触面形变

程度实施适应性补偿。

在此之后设计分层控制架构,上层控制器根据接触状态标签选择预设的力控制模式,诸如恒力控制、阻抗控制或混合控制模式;下层控制器通过 pid 算法或模型预测控制算法实时调节电机输出扭矩,使实际抓取力精准跟踪规划值。控制过程中引入力反馈闭环机制,将六维力传感器实时测量的力信号与规划值进行对比,计算出误差信号并反馈至控制器,通过迭代优化调整控制参数,确保抓取力在动态变化过程中始终满足稳定性与安全性要求。以上控制逻辑中还需要设置力安全阈值,当实际抓取力超出物体材料屈服强度或设备最大负载时,立即触发紧急停机程序,避免因过载导致物体损坏或设备故障。

2.2.4 形变补偿与抓取姿态优化

形变补偿与抓取姿态优化是柔性自适应抓取技术应用的最终环节,其核心目的在于通过补偿目标物体或抓取机构的形变误差,实现抓取位姿的精确调整。工作人员需建立形变预测模型,对于薄膜电池片这类柔性目标物体,采用有限元分析法模拟其在抓取力作用下的弹性形变场,提取关键节点的位移矢量;对于刚性抓取机构,则通过激光位移传感器或视觉传感器测量末端执行器的实际位姿,与理论位姿进行对比计算得出形变误差。

随后设计形变补偿算法,针对柔性物体形变采用逆运动学方法,将预测的位移矢量转换为抓取点的调整量,通过调整末端执行器的空间坐标实现形变补偿;针对刚性机构形变采用前馈补偿策略,将形变误差提前输入至控制器,通过修正控制指令抵消形变带来的影响。最后结合形变补偿结果与接触状态信息,采用遗传算法或粒子群优化算法搜索最优抓取姿态参数,包括抓取点位置、抓取角度、手指开合距离等,优化目标需同时满足抓取稳定性、操作空间可达性与运行效率性要求,优化后的姿态参数通过机器人运动学模型转换为关节空间轨迹,驱动末端执行器调整至最优位姿,完成柔性自适应抓取的全流程闭环控制。

3 案例分析

3.1 内参标定

某光伏设备制造企业在 166mm 规格电池片插片设备中采用张正友平面标定法完成内参标定,技术人员选用 12×12 格点的棋盘格标定板(格点边长 20mm,材质为哑光亚克力),通过工业相机(像素分辨率 2448×2048)从 0°-45° 范围内拍摄 30 组不同角度的标定板图像,每组图像均覆盖完整棋盘格区域且无遮挡。图像采集完成后,系统调用角点检测算法自动识别每幅图

像中 144 个格点的亚像素级坐标,剔除 3 组存在模糊或畸变的异常图像后,采用最小二乘法对剩余 27 组有效数据进行拟合计算,最终输出相机内参参数并存储至控制系统。该标定流程通过多组数据交叉验证提升参数准确性,有效抵消了镜头光学畸变对定位精度的影响。

3.2 手眼标定

技术人员在机器人末端执行器上固定碳纤维材质标定杆(直径 8mm,长度 150mm,末端安装钨钢探针),将棋盘格标定板固定于设备工作台中心区域并确保其与工作台面绝对平行。机器人按照预设轨迹移动至 15 个已知空间位置(覆盖工作区域的四角与中心),每次停留时系统同步记录标定板特征点在相机坐标系中的像素坐标与在机器人基坐标系中的三维空间坐标(X、Y、Z 轴范围分别为 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mm}$)。标定过程中,技术人员通过加装遮光罩过滤环境杂光,调整 LED 光源入射角至 45° 减少反光,采用漫反射材质工作台规避阴影干扰,同时控制机器人关节运动速度 $\leq 5\text{mm/s}$ 以保障运动轨迹的平稳性。所有数据采集完成后,系统通过求解线性方程组计算出旋转矩阵(3×3 维度,元素精度 $\leq 1e-6$)与平移向量(3×1 维度,单位 mm),实现两个坐标系的空间对齐。

3.3 特征提取

针对某型表面反射率达 88% 的单晶硅电池片,技术团队采用偏振滤波与高斯滤波组合方案优化图像预处理效果,在相机镜头前加装线性偏振片(偏振方向与电池片表面反射光方向垂直),有效抑制镜面反射现象导致的图像过曝问题,同时通过高斯滤波算法(标准差 $\sigma=1.5$)对图像进行平滑处理,消除高频噪声对特征提取的干扰。预处理完成后,系统调用 SIFT 算法构建 6 层高斯金字塔(初始图层尺度 $\sigma=1.6$),对电池片边缘、倒角等关键区域进行特征点检测,每个特征点通过计算 16 个方向直方图生成 128 维特征向量,该向量对电池片旋转($0^\circ-360^\circ$)、缩放($\pm 10\%$ 尺寸偏差)及光照强度变化($\pm 20\%$)均保持强鲁棒性,能够精准识别不同批次电池片表面纹理的微小差异。

3.4 特征匹配

设备控制系统采用快速近似最近邻搜索算法(FLANN)加速特征点匹配进程,通过构建 KD 树索引结构将特征匹配时间缩短至 20ms 以内,满足插片设备的实时性要求。匹配过程中,系统引入随机抽样一致算法(RANSAC)剔除误匹配点,设置迭代次数 1000 次、内点阈值 2 像素,通过迭代估计单应性矩阵(3×3

维度)确保匹配结果的几何一致性。技术人员根据不同批次电池片的表面纹理差异,将特征提取阈值动态调整至 0.6-0.9 区间,当检测到新型号电池片时,系统自动将其特征点纳入模板库并更新索引结构,无需人工重新标定即可实现兼容。该方案在实际应用中使特征匹配准确率稳定在 99.8% 以上,有效避免了因误匹配导致的定位偏差。具体的参数如下。

匹配算法: FLANN 算法, KD 树索引层数 10 层, 匹配时间 $\leq 20\text{ms}$

RANSAC 算法: 迭代次数 1000 次, 内点阈值 2 像素, 单应性矩阵误差 $\leq 1e-4$

阈值调整: 特征提取阈值范围 0.6-0.9, 动态调整步长 0.05

特征库更新: 新增特征点数量 ≥ 50 个时触发更新, 模板库存储容量 ≥ 100 种型号

匹配性能: 准确率 $\geq 99.8\%$, 误匹配率 $\leq 0.2\%$, 实时性要求 $\leq 50\text{ms/帧}$ 。

4 结束语

总体来说,光伏电池插片设备关键技术的研究与实践,有效破解了薄片化、大尺寸化电池生产中的精准定位与无损抓取难题,形成了涵盖视觉引导、柔性控制的完整技术方案。通过多维度标定优化、特征提取匹配算法创新及力控与形变补偿机制构建,设备在精度、稳定性与适配性上实现显著提升,为光伏产业量产效率提升奠定了坚实基础。该技术体系不仅适用于当前主流电池型号,更具备向多规格、柔性化生产场景拓展的潜力。未来可进一步结合人工智能与大数据技术,优化控制策略的动态响应能力,推动设备向智能化、自适应方向升级,为可再生能源产业高质量发展注入持续动力。

参考文献

- [1] 刘灿邦. 成本压力显现光伏产业链多环节酝酿上调报价[N]. 证券时报, 2025-12-20(A04).
- [2] 吕青, 刘亚, 宋庆明, 等. 退役光伏组件物理法分选技术[J/OL]. 能源环境保护, 1-14[2025-12-23]. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20251205>.
- [3] 熊欢欢, 赖东升, 章小枫. 基于神经网络控制的光伏发电最大功率点跟踪算法研究[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2025, 38(04): 9-12.

作者简介: 侯大伟(1993.04-), 男, 汉族, 山西省浑源县, 本科, 职务: 初级工程师, 研究方向: 机械自动化, 单位: 浙江晶盛机电股份有限公司。