

太阳能电池镀膜上下料自动化设备研发及关键技术优化

武振海, 刘鹏飞, 任云星

中国电子科技集团公司第二研究所, 山西 太原

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月27日; 发布日期: 2026年4月3日

摘要

本文介绍了一款用于太阳能电池镀膜工艺的上下料自动化设备的研发与设计。文章详述了设备的总体布局及四大核心组成单元的机械结构与工作流程。简要提及了针对石墨舟变形定位、硅片缺陷视觉检测(2D + 3D结合)、机器人奇异点规避等关键技术难点的解决方案, 并列出了设备的主要技术指标(如产能、碎片率等), 旨在通过自动化手段提升光伏电池生产的效率与良率。

关键词

镀膜工艺, 自动化设备, 太阳能电池, PLC控制, 机器人转运

R&D of Automatic Loading and Unloading Equipment for Solar Cell Coating and Optimization of Key Technologies

Zhenhai Wu, Pengfei Liu, Yunxing Ren

The 2nd Research Institute of CETC, Taiyuan Shanxi

Received: March 3, 2026; accepted: March 27, 2026; published: April 3, 2026

Abstract

This paper introduces the research and development as well as the design of an automatic loading and unloading equipment for solar cell coating processes. The article elaborates on the overall layout of the equipment and the mechanical structure and working process of its four core components. It briefly mentions the solutions to key technical difficulties such as graphite boat deformation positioning, silicon wafer defect visual inspection (combined 2D + 3D), and robot singularity avoidance,

and lists the main technical indicators of the equipment (such as production capacity, chip rate, etc.), aiming to improve the efficiency and yield of photovoltaic cell production through automated means.

Keywords

Coating Process, Automated Equipment, Solar Cell, PLC Control, Robot Transfer

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳能电池凭借清洁、可再生等独特优势,相较于风能、水能、地热能、核能等能源形式更具发展潜力,有望成为未来全球电力供应的核心支柱[1]。太阳能电池的生产需历经硅料到硅片、硅片到电池片、电池片到光伏组件等十余道核心工艺环节,其中镀膜工艺是提升太阳能电池光电转换性能的关键核心步骤。

该工艺基于光的干涉原理,可有效降低入射光的反射损耗,提升光伏电池片对可见光的吸收效率,进而提高电池的短路电流;同时,能够降低硅片表面载流子复合速率(实现表面钝化),并增强烧结后电池内部的钝化能力(实现体内钝化),双重提升电池性能。

当前主流的太阳能电池镀膜上下料技术主要分为三类,各有优缺点,具体分析如下:

第一类为半自动化上下料设备,核心依赖人工辅助完成花篮对接、硅片规整等操作,仅实现硅片传输、机器人转运等核心环节的自动化。其优点是设备结构简单、研发成本低、占地面积小;缺点是人工干预环节较多,易因人为操作失误导致硅片破损、污染,生产效率受人力限制,难以适配大规模、高产能的生产需求,且人力成本长期投入较高。

第二类为全自动化上下料设备(进口主流方案),以德国、日本进口设备为代表,核心优势是定位精度高(石墨舟定位误差 $\leq \pm 0.02$ mm)、运行稳定性强(设备运行率 $\geq 98.5\%$),可实现全流程无人工干预,适配大规模量产需求;但其缺点显著,设备造价高昂(单台设备造价约为国产设备的 2~3 倍),核心技术封锁,后期维护成本高、改造难度大。

第三类为国产全自动化上下料设备(国内主流方案),近年来逐步实现技术突破,核心优势是造价适中、适配性强,可灵活适配国内主流硅片与石墨舟规格,维护成本低;但存在以下短板,一是石墨舟定位精度不足,易受舟体变形影响,导致装片精度下降,碎片率偏高(通常在 0.1%~0.2%);二是机器人转运过程中易出现奇异点卡顿,影响运行效率与硅片转运稳定性;三是硅片缺陷检测精度不足,漏检率、误检率较高,难以满足高端太阳能电池的质量要求;四是控制系统响应速度较慢,多单元协同控制的稳定性有待提升。

针对现有主流技术的短板,本文重点研发一款高适配性、高精度、高稳定性的镀膜工艺上下料自动化设备,攻克石墨舟变形适配、机器人奇异点规避、硅片高精度检测等关键技术痛点,优化控制系统性能,同时控制设备研发与维护成本,为光伏产业自动化升级提供高性价比的解决方案,本文重点针对该上下料设备的研发展开详细阐述。

2. 系统整体方案

本镀膜自动化上下料设备主要由花篮传送单元、硅片传送单元、硅片搬运机器人单元及石墨舟传送单元四部分构成,图 1 为设备整体布局图。

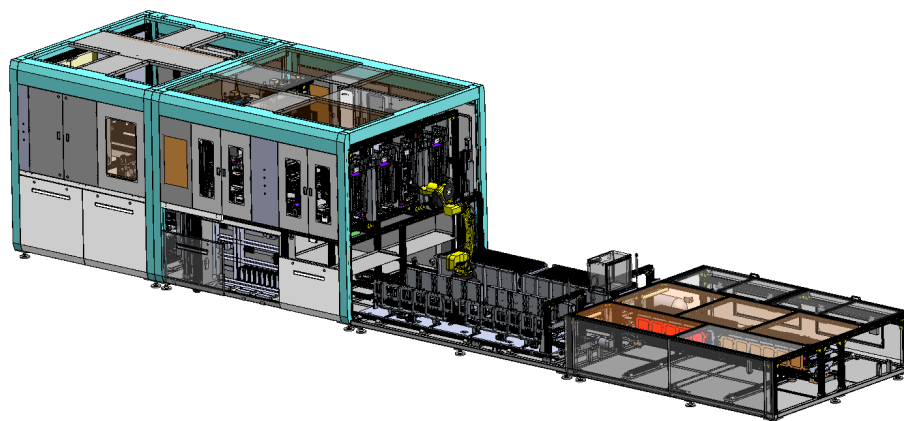


Figure 1. Equipment schematic diagram
图 1. 设备示意图

设备核心技术特性参数如下：设备尺寸 L * W * H = 12,100 * 2650 * 2500 mm，电源供应三相 380 V 50 Hz，功率 ≤ 21 kW，压缩空气需求 2 路 $\phi 16$ 的进气，气压为：0.5~0.7 MPa，产能 ≥ 5000 片/小时，碎片率 $\leq 0.05\%$ (不含本身缺陷片，A 类片)，石墨舟双通道 + 上料 2 通道 + 下料 2 通道 + NG 片通道。

3. 分单元介绍

各单元采用模块化设计，协同完成硅片从花篮到石墨舟、再从石墨舟回收入花篮的全流程转运，核心功能与关键结构如下。

3.1. 花篮传输单元

核心功能为实现待工艺与已工艺硅片花篮的分流传输、精准定位与 AGV 对接，由 AGV 小车对接道、花篮传送道及花篮升降道组成，设两条独立通道避免交叉干扰。采用交流电机驱动传输皮带，伺服电机控制升降行程，夹缸实现花篮夹紧定位，当出花篮对接到累积 10 个花篮时，系统自动召唤 AGV 小车对接转运。花篮传送道如图 2 所示：

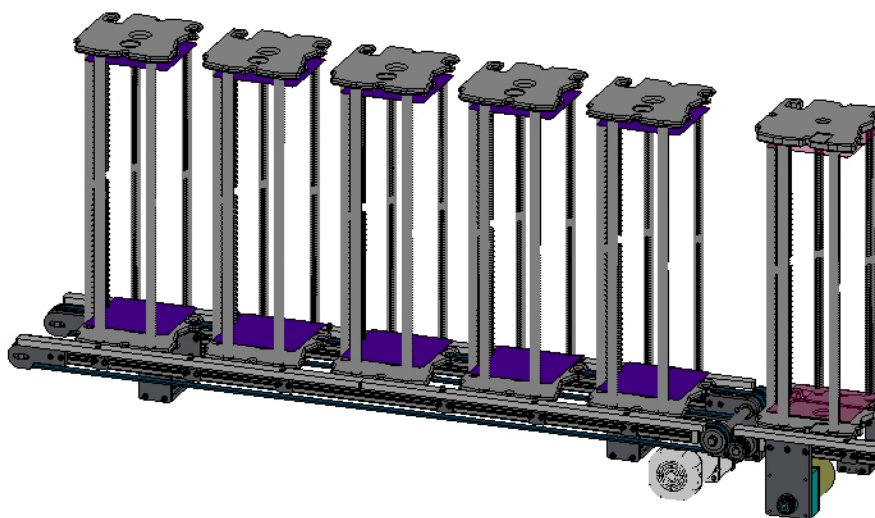


Figure 2. Flower basket conveyor belt
图 2. 花篮传送道

3.2. 硅片传输单元

核心功能为硅片传输、缺陷检测与缓存矫正,由硅片传输皮带组件、AOI 检测系统、硅片剔除组件、Buffer 缓存组件、硅片矫正组件及硅片变截距组件构成,两条独立通道分别负责待工艺与已工艺硅片传输。步进电机驱动皮带运行,矫正组件保障硅片定位一致性,Buffer 组件避免传输停滞,AOI 检测系统实时检测硅片缺陷并反馈至控制系统,不合格硅片回收至 NG 花篮。图 3 为硅片传送道。

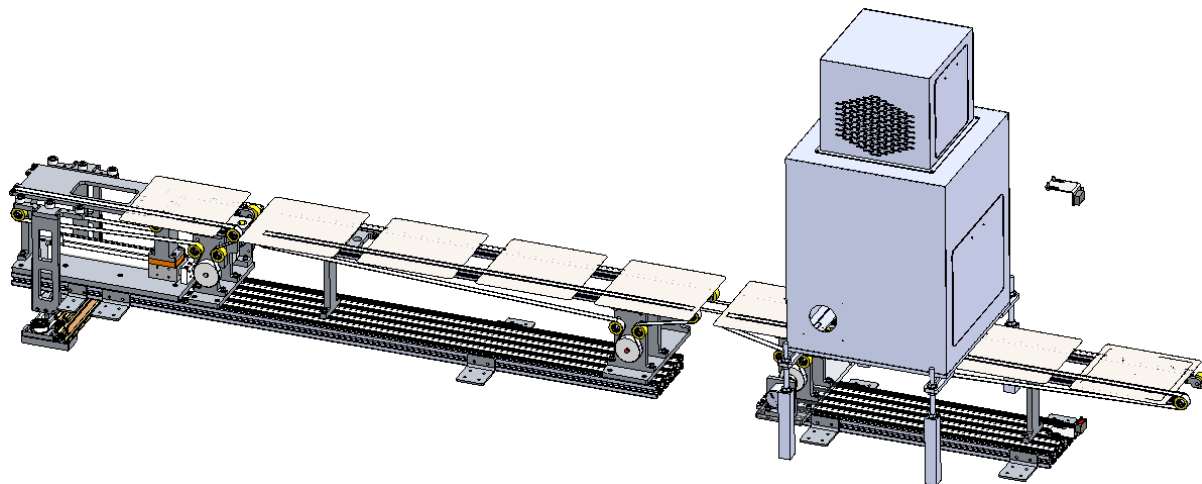


Figure 3. Silicon wafer conveyor belt

图 3. 硅片传送道

3.3. 搬运机器人单元

核心执行部件,负责硅片与石墨舟之间的精准转运,选用六轴工业机器人,搭载高精度吸盘抓手,实现待工艺硅片从变截距组件到石墨舟、已工艺硅片从石墨舟到变截距组件的转运,核心保障转运精度与速度,规避奇异点卡顿问题。图 4 为搬运机器人和石墨舟载体。

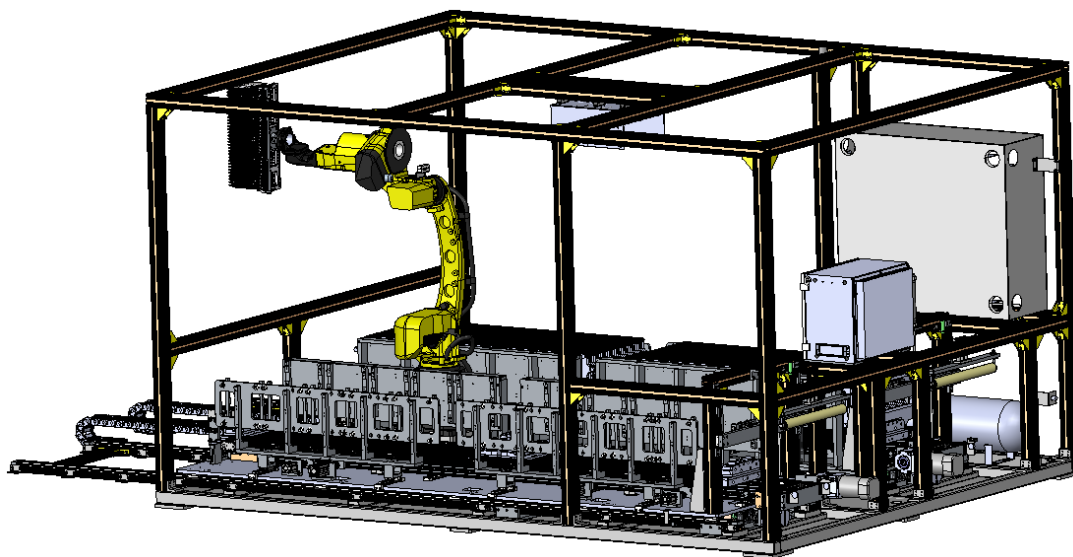


Figure 4. Handling robot, graphite boat carrier

图 4. 搬运机器人、石墨舟载体

3.4. 石墨舟单元

核心功能为石墨舟的定位、传输与工艺机台对接，由舟定位机构、舟传输机构及工艺机接驳台机构组成，采用 TCP/IP 通讯协议与工艺机台实现数据交互，保障石墨舟精准传输与稳定对接，支撑镀膜工艺连续推进。如图 5 所示。

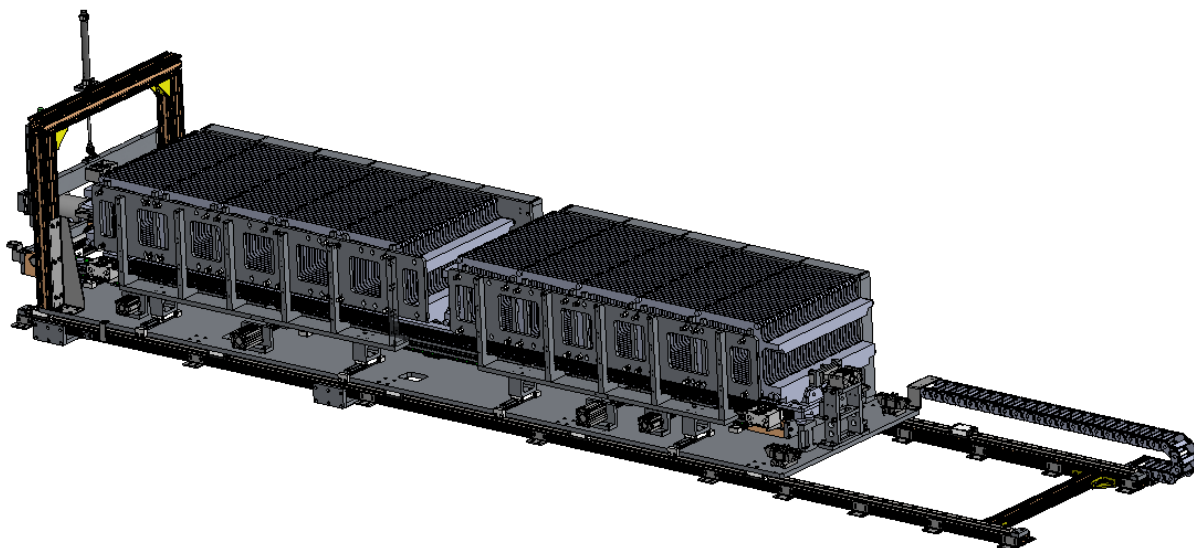


Figure 5. Graphite boat and boat transfer assembly

图 5. 石墨舟和传舟组件

4. 控制系统设计

本设备控制系统采用模块化设计思路，选用工业级 PLC 与 HMI 组成核心控制架构，基于标准化工业控制平台搭建控制体系。

4.1. 核心硬件选型

核心控制部件选用禾川 HCQ5-1500-A，该型号 PLC 属于禾川 HCQ5 系列高端总线型运动控制器，具备集逻辑控制、运动控制、高速通讯于一体的综合性能，可充分适配设备多单元协同控制需求。支持 64 轴运动控制，可满足多轴搬运机器人与多传输单元的同步控制需求；搭载高速 EtherCAT 通讯接口，同时兼容 Modbus TCP、CANOpen、OPC UA、EtherNet/IP 等多种工业总线通讯协议，保障与 AOI 检测系统、工艺机台、AGV 系统等设备的稳定数据交互；支持远程 I/O 模块，扩展灵活性强，可根据设备功能扩展需求灵活增减接口；具备较强的抗干扰能力与稳定的运算性能，可适应光伏生产车间复杂工业环境，保障设备长期稳定运行。控制架构如图 6。

4.2. 软件功能设计

本控制系统程序设计具备多重亮点：

1. 状态智能判断与干预功能：程序可实时记录硅片、花篮来源信息，自动判断运行流程；同时支持人工修改状态位，实现流程干预，提升系统灵活性。
2. 可视化监控功能：HMI 界面搭载设备对应监控图，直观呈现各单元运行状态，方便操作人员进行设备监控和参数修改，界面效果如图 7。

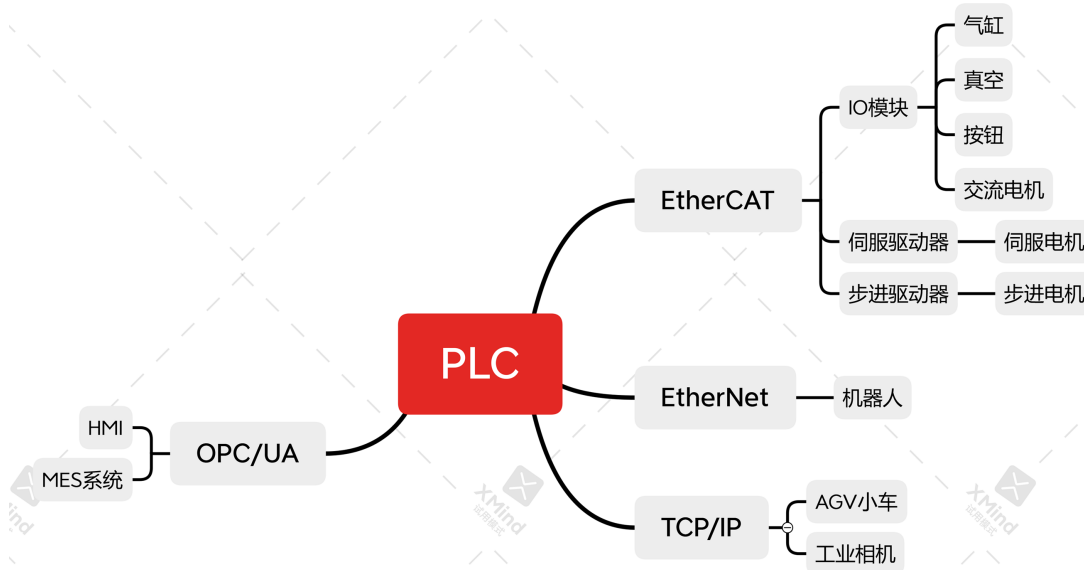


Figure 6. Device control architecture
图 6. 设备控制架构



Figure 7. Equipment operation monitoring
图 7. 设备运行监控

3. 全流程操作追溯功能：可记录轴、气缸、工艺参数等修改前后的信息及按钮操作记录，并同步记录时间，实现全流程可追溯，为问题排查提供依据。

4. 故障统计与诊断功能：详细记录花篮传输卡篮、硅片传输卡片等设备故障点，统计故障发生次数，方便维护人员对症维护，提升维护效率。

5. 设备难点与解决方案

针对设备运行中的核心技术难点，结合机械结构设计、力学分析、数学建模与算法优化，提出针对性解决方案，详细阐述如下。

5.1. 高精度定位与夹紧技术难点及解决方案

5.1.1. 难点分析

石墨舟在长期使用过程中,受镀膜工艺高温(400℃~600℃)、硅片装拆磨损等因素影响,易出现舟体变形(最大变形量可达 0.08~0.12 mm),导致石墨舟定位基准偏移,影响硅片装片精度(要求装片偏差 $\leq \pm 0.02$ mm),进而引发硅片破损、镀膜不均匀等问题,严重影响设备运行稳定性与产品质量[2]。

5.1.2. 解决方案

设计兼容舟体微小变形与批次差异的自适应定位结构,通过柔性定位与刚性限位结合的方式,将定位误差控制在 ± 0.015 mm 以内,保障装片精度[3]。

5.2. 硅片缺陷检测与分类的技术挑战及解决方案

5.2.1. 难点分析

硅片缺陷检测是保证产品质量的关键环节,面临三大核心难点:一是缺陷类型多样化,包括崩边、缺角、污染、色差、翘曲变形等;二是检测精度要求高,对于微小崩边(尺寸 ≤ 0.1 mm)、轻微污染等缺陷需准确识别,漏检率、误检率需控制在 0.03%以内;三是实时检测需求,设备产能 ≥ 5000 片/小时,单片硅片检测时间需 ≤ 0.72 s,要求检测算法具备高速运算能力。

5.2.2. 解决方案

采用 2D + 3D 双相机组合检测方案,结合深度学习模型,实现硅片缺陷的高精度、实时检测与自动分类。

1. 硬件配置:2D 工业相机(1200 万像素,60 fps)负责检测崩边、缺角等平面缺陷;3D 激光轮廓仪(精度 ± 0.005 mm)负责扫描厚度分布和翘曲变形。

2. 深度学习算法设计:构建基于 YOLOv8 的缺陷检测模型,输入为 2D 图像与 3D 轮廓数据的融合特征。算法逻辑包括图像预处理、特征提取、缺陷识别与分类、结果反馈四个步骤。通过大量样本(≥ 10 万张)训练,模型兼顾了检测速度与精度,确保在高产能下的检测可靠性[4]。

5.3. 六轴机器人的奇异点规避与轨迹平滑及解决方案

5.3.1. 难点分析

六轴机器人在硅片转运过程中易出现奇异点问题,此时雅可比矩阵奇异,导致关节角度趋于极限,运动卡顿、速度骤降,不仅影响效率,还会因抖动增加硅片碎片风险。

5.3.2. 解决方案:运动学建模与轨迹优化算法

通过建立六轴机器人运动学模型,在轨迹规划阶段进行路径优化,避开奇异点区域,同时采用 S 曲线加减速算法实现轨迹平滑。

采用 D-H 参数法建立机器人运动学模型,求解各关节角度。在轨迹规划阶段,选用 B 样条曲线进行插值,通过调整起点、终点间的中间控制点坐标,主动避开奇异点区域(雅可比矩阵条件数 $\kappa(J) < 1000$)。优化后的轨迹既满足了作业精度要求,又保证了运动的平稳性,彻底解决了卡顿问题[5]。

6. 实验与结果分析

为验证本设备的性能指标与技术优势,在某光伏企业生产车间搭建实际测试平台,采用 M10 规格硅片(182 mm \times 182 mm,厚度 0.15 mm)及标准石墨舟,进行为期 30 天的连续运行测试。测试环境与现有主流国产设备(对照方案)保持一致,记录关键运行数据,对比分析本设备的优势。

6.1. 实验方案与测试指标

6.1.1. 实验环境

测试环境：与光伏企业实际生产环境一致；测试设备：本研发设备(实验组)、现有主流国产自动化上下料设备(对照组)；测试样本：M10 规格硅片 100 万片(A 类片，无本身缺陷)，石墨舟 500 个(含不同变形程度的旧舟，变形量 0~0.12 mm)。

6.1.2. 测试指标

核心测试指标包括：石墨舟定位精度、硅片碎片率、设备产能、AOI 检测性能(漏检率、误检率)及设备运行率。

6.2. 实验结果与分析

6.2.1. 石墨舟定位精度测试结果

连续运行 30 天，记录实验组与对照组的硅片碎片数量、实际产能，计算碎片率(碎片率 = 碎片数量/总测试数量 × 100%)与平均产能，结果如表 1 所示。

Table 1. Comparison of silicon wafer scrap rate and equipment capacity

表 1. 硅片碎片率与设备产能对比

测试组别	总测试硅片数(片)	碎片数量(片)	碎片率(%)	平均产能(片/小时)
实验组(本设备)	1,000,000	486	0.0486	5230
对照组(主流设备)	1,000,000	1620	0.162	4850

测试结果显示：实验组碎片率为 0.0486%，不仅低于 0.05%的设计要求，且远低于对照组的 0.162%；实验组平均产能为 5230 片/小时，高于设计要求(≥5000 片/小时)及对照组水平。

数据证明，本设备的定位优化与机器人轨迹平滑设计，有效降低了硅片破损风险，并通过消除机器人卡顿提升了整体生产节拍。

6.2.2. AOI 检测性能测试结果

选取 10000 片含各类缺陷的硅片(崩边、缺角、污染等，每种缺陷 1000 片)，测试实验组与对照组的 AOI 检测性能，绘制混淆矩阵(表 2、表 3)，计算漏检率与误检率(漏检率 = 漏检缺陷数/总缺陷数 × 100%；误检率 = 误检缺陷数/总检测数 × 100%)。

Table 2. Confusion matrix of AOI detection in the experimental group (unit: slice)

表 2. 实验组 AOI 检测混淆矩阵(单位：片)

真实类别/预测类别	崩边	缺角	污染	色差	翘曲	合格	合计
崩边	997	1	0	0	1	1	1000
缺角	1	996	0	1	1	1	1000
污染	0	0	998	1	0	1	1000
色差	0	1	1	997	0	1	1000
翘曲	1	0	0	0	998	1	1000
合格	0	0	1	0	0	5999	6000
合计	999	998	999	999	999	6004	10,000

Table 3. Confusion matrix of AOI detection in the control group (unit: slice)**表 3.** 对照组 AOI 检测混淆矩阵(单位: 片)

真实类别/预测类别	崩边	缺角	污染	色差	翘曲	合格	合计
崩边	982	5	2	3	4	4	1000
缺角	4	978	3	5	4	6	1000
污染	2	3	980	6	4	5	1000
色差	3	4	5	976	5	7	1000
翘曲	4	3	2	4	981	6	1000
合格	3	4	5	4	3	5977	6000
合计	998	997	997	998	997	6005	10,000

经计算,实验组漏检率为 0.02%,误检率为 0.01%;而对照组的漏检率与误检率分别为 0.24%和 0.23%。

实验结果表明,采用 2D + 3D 双相机融合的检测方案,结合深度学习算法,显著提升了缺陷识别的准确率,有效避免了不良品流入下道工序,保障了产品质量。

7. 结束语

该设备的研发与应用,不仅大幅提升了镀膜工艺的生产效率,降低了人为因素对产品质量的影响,还通过智能化控制系统提升了设备运维便捷性,为太阳能电池生产的自动化、智能化升级提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 李建明, 王浩, 张磊. 基于 PLC 的太阳能电池硅片自动化传输系统设计[J]. 光伏产业, 2023, 5(2): 45-50.
- [2] 岳军. 石墨舟上下料机的研制[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(6): 361-363+369.
- [3] 张奇巍, 任云星, 刺颖乾. 石墨舟定位机构的设计与优化[J]. 山西电子技术, 2022(3): 41-42+46.
- [4] 赵伟, 孙丽, 吴涛. 2D + 3D 视觉融合的光伏硅片缺陷检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 123-130.
- [5] 陈阳, 刘敏, 周杰. 六轴机器人在光伏硅片搬运中的轨迹优化与奇异点规避[J]. 机器人技术与应用, 2024(1): 28-33.