

## 数字化背景下光伏自动化设备智能控制研究

邵巍巍<sup>1</sup> 豆钊龙<sup>2</sup>

1 江苏辉伦太阳能科技有限公司, 江苏 南京 210061

2 森萨塔科技(宝应)有限公司, 江苏 扬州 225000

**[摘要]**数字化技术同光伏制造设备相结合,正在改变传统的生产方式。光伏自动化设备是智能工厂的主体,光伏自动化设备控制系统智能化程度直接影响产线综合效率和产品质量。太阳能是清洁能源的主要代表,在能源领域中应用也越来越广泛,太阳能设备的生产效率直接关系到整个产业链的健康发展。针对光伏组件生产设备智能控制的技术路径展开研究,选取焊接工段自动化优化、AGV 智能物流部署、AI 视觉检测应用这三个典型案例,从设备管理的角度出发,探究智能控制技术如何在效率提高和运维降本方面发挥作用,提出全生命周期管理和预测性维护的策略,给光伏制造企业设备智能化转型提供一些借鉴。

**[关键词]**数字化;光伏组件;生产设备;智能控制

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19885

中图分类号: TP2

文献标识码: A

### Research on Intelligent Control of Photovoltaic Automation Equipment under Digital Background

SHAO Weiwei<sup>1</sup>, DOU Qianlong<sup>2</sup>

1 Jiangsu Huilun Solar Energy Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210061, China

2 Sensata Technology (Baoying) Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

**Abstract:** The combination of digital technology and photovoltaic manufacturing equipment is changing traditional production methods. Photovoltaic automation equipment is the mainstay of smart factories, and the level of intelligence in the control system of photovoltaic automation equipment directly affects the overall efficiency and product quality of the production line. Solar energy is the main representative of clean energy, and its application in the energy field is becoming increasingly widespread. The production efficiency of solar energy equipment is directly related to the healthy development of the entire industry chain. Research is conducted on the technological path of intelligent control for photovoltaic module production equipment. Three typical cases are selected: automation optimization of welding sections, deployment of AGV intelligent logistics, and application of AI visual inspection. From the perspective of equipment management, this study explores how intelligent control technology can play a role in improving efficiency and reducing operation and maintenance costs. Strategies for full lifecycle management and predictive maintenance are proposed, providing some reference for the intelligent transformation of photovoltaic manufacturing enterprises' equipment.

**Keywords:** digitalization; photovoltaic modules; production equipment; intelligent control

#### 引言

在全球能源转型和双碳目标大背景之下,光伏产业迎来了历史性发展机遇。光伏组件是光伏产业链的下游,制造工艺对设备的精度、稳定性、自动化程度有更高的要求。传统的太阳能设备生产方式存在着生产效率低、生产成本高等问题,限制了太阳能产业的发展。金辰股份组件整线方案采用模块化全流程自动化生产;先导智能 OBB 串焊机胶高均匀性达到 0.02mm,最高产能为 11000 半片/小时。设备技术进步产生新的问题,怎样对日益繁杂的自动化设

备体系加以科学管理,怎样借助智能控制来达成产线综合效能的最大化。根据光伏组件生产线设备管理实践,分析自动化、智能控制技术的应用经验。

#### 1 光伏组件生产工艺与核心设备体系

##### 1.1 生产工艺流程概述

光伏组件的制备工艺流程可以分为焊接、叠层、层压、EL 测试、装框、装接线盒、清洗、IV 测试、成品检验、包装等环节,技术含量和价值量最高的环节是焊接和层压。焊接环节决定着组件的电性能,层压环节保证着组件的环

境耐受性以及机械性能，是组件 25 年使用寿命的主要保障。目前主流的生产工艺由整片组件向半片组件转变，半片组件把电池片切成两半，使电池的工作电流减半，大大减少焊带上的电学损失，提高组件效率。

### 1.2 核心设备体系

组件设备和组件制备的各个工艺流程相对应，主要设备体系分为焊接工序设备、层压与封装设备、检测与测试设备三大部分。激光划片机用来精确地切割太阳能电池片，用高能激光束经过光学系统聚焦后进行非接触式的加工，电池片串焊机是组件生产线的主要设备，负责将电池片串联或者并联，汇流条焊接机负责将电池串通过汇流带相互连接。层压和封装设备中的自动叠层设备把钢化玻璃、EVA、电池片、背板按顺序叠放，层压机是组件封装的关键设备。检测与测试设备中 EL 测试仪用来检测电池片隐裂等内部缺陷，IV 曲线测试仪用来测试组件的电性能参数。该种设备形成完整的组件自动化生产线，各个工序之间用自动流水线相连，设备协同运转的效率直接影响整条产线的生产能力。

表 1 光伏组件核心生产设备及控制参数

设备名称	所属工序	关键控制参数	控制精度要求
串焊机	焊接	焊接温度、焊接时间、焊带张力	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.1\text{s}$ 、 $\pm 0.2\text{N}$
层压机	层压	层压温度、真空度、加压压力	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 10\text{Pa}$ 、 $\pm 0.05\text{MPa}$
EL 测试仪	检测	测试电流、曝光时间、图像增益	$\pm 1\text{mA}$ 、 $\pm 1\text{ms}$ 、自适应
IV 测试仪	测试	光强、扫描电压范围、采样精度	$\pm 1\%$ 、 $\pm 0.1\text{V}$ 、 $\pm 0.1\%$

## 2 智能控制技术在设备管理中的应用实践

### 2.1 自动化焊接工段的工艺优化与效率提升

焊接工序是组件生产技术含量最高、价值量最大的工序，焊接工艺质量的好坏直接影响到组件的电性能和使用寿命。传统产线焊接工段的效率瓶颈主要是由于设备换型时间长、焊接参数调校依靠经验、故障停机频次高等原因造成的。通过大数据对光伏组件生产工艺进行优化研究发现，实时采集、分析大量的生产数据，设计出智能控制系统，在生产过程中实施智能化管理与控制，可以明显提高生产效率，改善产品质量，有效地降低能耗。针对以上问题，在自动化焊接设备选型及调试过程中做了如下工作：一是创建焊接工艺参数数据库，把不同规格电池片的焊接温度、焊接时间、焊带张力等主要参数统一起来加以管理，从而大大缩减了换型时的参数调校时间；二是引入伺服控制系统来改进焊接运动轨迹，用新一代运动控制技术保证传片速度和运行平稳；三是增设缓存工位在串焊机和汇流

焊机之间，利用 PLC 控制实现缓冲量的自动调节，防止因为节拍不匹配造成的前后工序联锁停机。经过上述的改进，焊接工段设备综合效率提高了大约 12%，换型时间由原来的平均 45 分钟降低到现在的 25 分钟，焊接不良率降低了大约 30%。

### 2.2 智能物流系统的部署与设备控制协同

物料搬运属于组件生产当中仅次于核心工艺的成本消耗大户。传统车间物料配送靠人工和叉车，一趟要 15min，准确率在 95%~98% 之间。分离式自动导引车系统用在太阳能电池车间，对各个生产工序的花篮自动搬运和输送起到了提高车间自动化程度的作用，减少了人力成本的投入。自动导引车系统部署时，选用磁导航和激光即时定位与地图构建相结合的导航方式，既保证了固定路线的精准对接，又适应了复杂的工况。部署之后物料配送时间由原来的 10min 缩短到 5min，准确率提高到 99.9% 以上。运维上创建预防性维护计划，定时对导航传感器实施校准，定时对驱动轮进行检查并保养，定时清除充电触点，保证设备的稳定运行。

### 2.3 AI 视觉检测设备在质量控制中的应用

光伏组件生产包含诸多工序的质量检测环节，传统的人工目检存在疲劳引发的漏检率高、标准不一致、效率低下的问题。AI 视觉检测技术可以很好地解决这个痛点。机器视觉运动控制一体机在光伏汇流焊机机器人系统中，利用视觉检测方案加深度学习技术，可以对引线缺陷的位置进行高精度的定位，节拍时间小于 500ms。在组件外观检测中采用了基于深度学习算法的 AI 视觉检测设备。以接线盒焊接检测为例，用算法平台搭建完整的激光焊和加锡焊检测方案，利用深度学习技术，可以对现场缺陷样本快速迭代 AI 模型，实现引线缺陷位置的高精度定位。在汇流带焊接检测时，视觉系统可以稳定地检测出焊带超出、偏移、虚焊、内缩、缺失等常见的缺陷。在 AI 视觉检测设备的设备管理方面主要关注模型的持续更新，随着产品规格改变、工艺调整等都会引起检测模型误检率、漏检率的变化<sup>[1]</sup>。因此建立了缺陷样本库以及模型定期更新制度，质量工程师定期对新增缺陷样本进行标注，和设备供应商一起完成模型的迭代升级。经过不断地改进，检测的误检率控制在 1.5% 以内，漏检率小于 0.5%，大大提高组件出厂质量的一致性。

## 3 设备管理策略的智能化升级路径

### 3.1 全生命周期设备管理体系建设

设备管理不能只停留在日常维护上，应该包括从选型采购到报废的全过程，在实际工作中创建起以选型、安装、

运行、维护、更新为内容的设备全生命周期管理机制。选型阶段创建设备技术评价矩阵,从产能指标、可靠程度、能耗、维护方便程度、供应商服务品质等诸多方面展开综合评判,防止因为只看重某一指标的先进而造成综合成本失控<sup>[2]</sup>。安装调试阶段制订出标准的验收程序,包括机械安装精度检验、电气控制系统联动调试、空载试运行、负载试运行等,保证设备交付使用时的状态符合设计要求。EAP 系统在光伏智造工厂应用中,根据现场实际情况采取了一系列措施对 EAP 系统应用进行优化,形成了一套可以在工厂内部独立于 MES 进行数据分析的 EAP 系统。运行阶段利用 MES 系统、SCADA 系统对设备运行状态数据进行实时采集,包括温度、振动、电流、运行节拍等参数,从而达到对设备状态的在线监测。

### 3.2 预测性维护技术的探索与引入

传统的事后维修、定期保养模式存在着明显的效率损失,事后维修会造成非计划停机影响生产,定期保养又会造成资源的浪费。以工业互联网、数据分析为基础的预测性维护技术给设备管理带来新的思路。预测性维护最大的价值不在于只做基于剩余使用寿命的预测,而在于利用建模工具、方法帮助企业做出全局最优的维护决策,达到降本增效的目的。光伏生产设备自动化、智能化研究提出,创建智能化生产模型,提出预测性维护、工艺改良、质量监管相结合的综合解决办法,以达到提高光伏制造过程灵活性、精确度、经济效益的目的。对串焊机、层压机等主要设备做了初步试验,在设备的关键部位加装了振动传感器、温度传感器,采集连续运行的数据,用阈值预警、趋势分析算法来实现设备异常的早期发现。以串焊机焊头为例,通过对焊头焊接力传感器历史数据的分析可知,焊接力在连续工作 200h 之后就开始出现衰减现象,因此把焊头保养周期由原来的固定 300h 改为动态的 200~220h,既防止了由于焊头过度磨损造成的批量质量事故,又比事后维修模式减少大约 40% 的异常停机时间。随着 AI 大模型技术的发展,可以对设备全生命周期参数性能退化规律进行故障准确预警,并且可以对设备故障进行智能闭环消缺。

### 3.3 设备控制与 MES 系统的深度协同

自动化设备既是生产工具又是数据采集的节点。建立设备控制同 MES、ERP 等信息系统的高效协同,是达成智能化工厂的重要部分。基于 5G 技术的太阳能电池智能制造应用中,大连接、低时延的 5G 网络把车间内智能装备互联起来,瞬间收集并交互数据,实现 5G 和智能制造的深度融合。实际工作当中促使生产设备联网率达到 100%,设备运行数据及时上传到 MES 系统,可以对生产

计划进行准确的安排以及质量可以被追溯。依靠数字化生产设备联网以及 MES 系统深入应用,达成生产计划制订、下达、执行、反馈、品质把控的全流程精准管控,产品合格率大于 99.8%,不良率下降 25%,生产速度提升 20%。设备管理数据同 ERP 系统进行集成为设备投资决策、备件库存管理赋予了量化支撑,经由剖析设备历史故障数据及维修成本,可更为科学地评判设备的经济寿命,改良备件库存策略,削减资金占用。光伏智造智维协同创新云平台实践证明,用工业互联网架构、智能算法以及优化调度算法可以实现光伏组件的高效检测和运维,大大提高焊接良品率、设备利用率和能耗效率。

## 4 光伏自动化设备智能控制的关键技术支持

### 4.1 工业互联网与设备互联技术

工业互联网属于实现设备智能控制的根基性支撑。光伏产线中不同的品牌、代际的设备通信协议不一样,数据互联互通是第一个技术难题<sup>[3]</sup>。部署工业物联网网关,把各种主流工业通信协议转换成标准的数据接口,形成统一的数据接口。从太阳能硅片制造过程中的数据采集与监视控制系统的运用、制造执行系统的运用、数字孪生系统技术的应用等几个方面出发,在此基础上将数据采集、监视控制系统同自动化系统的技术结合起来使用,能有效地提高生产过程的智能化程度。设备互联使得数据采集频率可以达到毫秒级,给状态监测、参数优化、故障预警等智能控制功能提供可靠的基础数据。

### 4.2 数字孪生与控制策略仿真

控制策略的优化调整存在试错成本高的问题,参数不合适会造成批量质量事故。数字孪生技术创建产线数字镜像,控制策略仿真验证之后再搬到实际设备上。在层压设备控制优化过程中,先在数字孪生平台上对温度场控制算法进行验证,得到最佳的参数组合后才进行现场应用,防止因为参数不合适而造成组件损坏。数字孪生可以用来进行设备故障的复现和根因分析,在虚拟环境中再现故障的过程,迅速找到问题的原因,大大缩减了排查的时间。

### 4.3 人工智能算法在参数自优化中的应用

传统的控制策略大多采用固定的阈值以及经验规则,不能适应来料的波动以及环境的变化。人工智能算法的加入给控制参数自适应优化赋予了新的途径。对焊接温度控制问题,用基于极限学习机的工艺参数预测模型,以历史焊接数据作为训练样本,建立焊接温度、焊接时间和焊接质量之间的映射关系,从而达到在线动态调节的目的。根据大数据技术对光伏组件生产工艺进行改进,可以发现智能控制系统的出现使生产过程更加适应、鲁棒。在实际使

用中,焊接温度控制精度由原来的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 提高到现在的 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,焊接不良率不断降低。随着 AI 大模型技术的发展,将来会达到控制策略自主产生和不断进化的状态,从而提高光伏自动化设备的智能控制水平。

## 5 结语

数字化背景之下光伏自动化设备的智能控制,成为光伏制造业高质量发展的关键环节。目前光伏组件制造设备正处在快速更新换代的阶段,智能控制技术的应用也由原来的代替人工操作的工具,变成了提高产线综合效率、保证产品质量一致性的重要手段。利用焊接工段工艺改进、自动引导车智能物流布局、人工智能视觉检测等方式可以提高生产效率,减少质量危险。未来设备智能控制会是模块化标准化、人工智能向故障预测与参数自优化发展、工业互联网平台实现实时高效决策这三个趋势。5G 将使光伏电池制造更加智能化、管理更加精细,最大限度地降低

企业的生产成本,达到提质、降本、增效的目的。设备管理者要不断跟踪技术发展的动向,给光伏制造的高质量发展赋予可靠的装备支持。

## [参考文献]

- [1]张士刚,冯磊,杨千福.自动化控制系统在太阳能设备生产中的应用分析[J].造纸装备及材料,2024,53(6):52-54.
  - [2]李泽杨.智能化光伏系统的现状分析与展望[J].科技与创新,2024(9):142-144.
  - [3]杨宇,文福栓,周星龙,等.高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述[J].电力自动化设备,2023,43(10):48-58.
- 作者简介:邵巍巍(1990—),男,汉族,江苏盐城人,工程师,本科,毕业于盐城工学院自动化专业,任设备技术主管;豆轩龙(1989—),男,汉族,江苏扬州人,工程师,本科,毕业于盐城工学院自动化专业,现从事各类汽车/工业传感器生产相关工作。