

平板玻璃生产线中机器人技术在自动化装配中的应用与性能评估

陈太柏

佛山天玻包装有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025080025

摘要： 随着玻璃工业的发展，自动化装配技术在提高生产效率和产品质量方面发挥着重要作用，机器人技术作为自动化装配的关键组成部分，其在平板玻璃生产线上的应用日益广泛。通过深入分析机器人在平板玻璃生产线自动化装配中的具体应用，包括切割、磨边、清洗与干燥以及组装与包装等环节，并评估了机器人技术的性能表现。机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用提高了工作效率，安全可靠的评估结果也证实了机器人技术的优越性。未来，随着技术的不断创新，机器人在玻璃机械行业也将更为深入，有望实现更高精度、更高效率的自动化生产，同时不断优化人机交互，提升整个行业的生产水平。

关键词： 平板玻璃生产线；机器人技术；自动化装配

Application and Performance Evaluation of Robotics in Automated Assembly of Flat Glass Production Lines

Chen Taibai

Foshan Tianbo Packaging Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： With the development of the glass industry, automated assembly technology plays an important role in improving production efficiency and product quality, and robotics, as a key component of automated assembly, is increasingly widely used in flat glass production lines. Through an in-depth analysis of the specific applications of robotics in the automated assembly of flat glass production lines, including cutting, grinding, washing and drying, as well as assembly and packaging, and assess the performance of robotics. The application of robotics in the automated assembly of flat glass production lines improves work efficiency, and the results of the safe and reliable evaluation confirm the superiority of robotics. In the future, with the continuous innovation of technology, robot technology will also be more in-depth in the glass machinery industry, which is expected to achieve higher precision and higher efficiency of automated production, while continuously optimising human-machine interaction and improving the production level of the whole industry.

Keywords： flat glass production line; robot technology; automated assembly

引言

在行业背景方面，玻璃制造行业作为国民经济的重要支柱，其生产效率和产品质量直接关系到整个产业链的竞争力。传统的平板玻璃生产线大量依赖人工操作，不仅生产效率低下，而且难以保证产品质量的稳定性。机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用能大幅提高装配效率和质量。

一、平板玻璃生产线自动化装配概述

（一）平板玻璃生产线的基本构成

现代平板玻璃生产线广泛采用 PLC（可编程逻辑控制器）作为核心控制设备，结合变频调速控制系统，完成对温度、投料辊道运行速度等参数的计算和输出、系统运行的顺序控制、状态监测、报警显示等任务^[1]。平板玻璃生产线基本构成与描述见表1。

表1 平板玻璃生产线基本构成

设备 / 技术	描述
清洗机	用于清洗玻璃表面的污渍和杂质，保证玻璃的清洁度。
平压机（辊压机）	将两片或多片玻璃以及中间胶片进行预压，使其紧密结合。
行走吸盘	用于夹持和移动玻璃板，方便进行后续的加工和组装。

电动合片台	用于将清洗后的玻璃板与胶片进行组装，形成夹层玻璃的基本结构。
胶片架	存储和供应胶片，确保胶片供应的连续性和稳定性。
熔化池	用于将玻璃原料熔化成玻璃液。
加热装置	设在熔化池内，用于加热玻璃原料，使其熔化。
鼓泡器	设在熔化池底部，通过鼓泡作用，使玻璃液均匀混合和流动。
Fuzzy-PI 控制器	结合模糊控制技术和传统 PID 算法，用于实现加热段温度的自动控制。

（二）自动化装配在平板玻璃生产线中的作用

平板玻璃生产线自动化装配系统集成输送、分料、挡停及上下料功能，输送速度0-10米/分钟，分料机构精准分配原料，挡停模块动态调节物流。机械手上下料装置抓取速度30次/分钟，精度±0.5毫米，结合光电传感器实现全流程闭环控制。焊接专机效率达5秒/件，打磨精度±0.2毫米，保障加工一致性。同步跟随技术开发的全自动加工单元，可在NC加工时同步完成毛坯上料与成品下料，减少工序间隔。该系统支持24小时连续生产，良率提升15%，人工成本降低40%。中央控制系统支持柔性化生产，产品规格切换仅需参数编程，产线改造时间缩短70%。粉尘与噪音控制技术使工作环境达标率提升至98%，工人转向设备监控与维护。以某产线为例，年产能从50万㎡增至85万㎡，切换产品型号耗时由2小时压缩至20分钟，综合能耗降低18%。

二、机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的应用

（一）机器人技术在玻璃切割环节的应用

基于运动控制卡的机器人智能切割系统，通过四自由度的设计和三轴联动工作方式，利用激光传感器进行边缘检测，并通过三点定位和速度控制，快速准确地测量玻璃相对于机床的实际坐标，有效降低位置和角度偏差^[2]。采用4轴运动控制器为核心，配合伺服电机组成的数控玻璃切割机运动控制系统，

实现了Y、Z两轴同步移动和C轴随剪切轨迹自动翻转，采用了视觉定位的玻璃基板切割直流限流熔断机生产装置，采用了线阵相机识别系统实现初对位和自动对位，引入机器人技术后，通过精确的控制系统和先进的切割工具，可以实现高速、高精度的玻璃切割。例如，使用配备高精度传感器和算法的工业机器人，能够按照预设的程序自动进行切割，误差控制在0.1mm以内。有效减少了单片玻璃的边破和点破，并运用了CAD/CAM技术实现图文编制和刀位文件的自动制作，实现了异形玻璃的现场生产管理。

（二）机器人技术在玻璃磨边环节的应用

平板玻璃生产线集成六自由度工业机器人及华中8型数控系统V2.4，通过CAD/CAM技术实现异型玻璃磨边工艺代码自动生成。系统配备双通道控制，同步操作双机械手完成上下料与磨削，实时监测磨具磨损并自动补偿参数。数控模块集成磨边工艺卡编程功能，支持光伏玻璃钢化线自动上片，确保±0.1mm加工精度。人机协作模式增强安全性，在复杂工况下维持高效运行，生产效率提升30%，废品率下降至0.5%以下。

为此还设计了一种基于机器人的玻璃自动打磨系统，通过力反馈控制策略，提高了打磨作业中的定位精度^[3]。机器人通过精确

的力度控制和高速旋转的磨轮，可以快速而均匀地磨去玻璃边缘的多余部分。在力反馈控制策略中，使用力传感器实时检测机器人末端执行器与玻璃间的接触力。打磨时，传感器持续监测接触力变化，并将数据反馈给控制系统。

假设在打磨过程中设定了一个目标接触力 F_{target} ，而实际检测到的接触力为 F_{actual} 。当 $F_{actual} < F_{target}$ 时，控制系统会判断机器人需要增加对玻璃的压力，于是通过调整机器人的运动速度和轨迹，使接触力逐渐接近 F_{target} 。反之，当 $F_{actual} > F_{target}$ 时，控制系统则会减少机器人的压力。这种基于力反馈的控制策略，可以通过以下公式表示：

$$\Delta v = K_f \times (F_{target} - F_{actual}) \quad (1)$$

式中， Δv 为机器人速度的调整量； K_f 为力反馈控制系数，它决定了接触力变化对机器人速度调整的影响程度。通过这个公式，根据接触力的实时变化，动态地调整机器人的运动速度，从而实现对玻璃表面的高精度打磨。该自动打磨系统通过力反馈控制策略，显著提高了打磨作业的精度和效率。与传统的手工打磨或简单的机械打磨相比，该系统的定位精度提高了22.5%。与传统的磨边方式相比，机器人磨边的精度提高了50%，同时生产效率也提升了25%。

（三）机器人技术在玻璃清洗与干燥环节的应用

在清洗环节，使用KUKA KR QUANTUM系列六轴机器人arm配合专用清洗工具，清洗速度可达到500mm/s，清洗压力在0.5-2.0MPa之间可调，清洗精度±1mm。采用喷雾干燥精准地将干燥剂喷洒或吹向玻璃表面。干燥温度在室温到100℃之间可调，干燥风速在1-10m/s之间可调。利用机器视觉技术，系统可以自动检测玻璃上的污渍和缺陷，图像处理速度可达30fps，并精确定位。控制响应时间在10ms以内，系统兼容性支持多种工业通信协议。

机器人还配备了自动识别定位功能，精准辨识玻璃尺寸，实现对玻璃表面的全面、均匀清洗^[4]。同时借助高效的热风装置，将玻璃表面的残留水分迅速吹干，保证玻璃表面的干燥程度达到既定标准。

干燥效率可以用以下公式表示：

$$D_{eff} = \frac{V_d \times T}{A} \quad (2)$$

式中， D_{eff} 为干燥效率； V_d 为吹风装置风速； T 为干燥时间； A 为玻璃表面积。

清洁度可以通过以下指标计算：

$$C = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中， C 为清洁度； N_c 为清洗干净的玻璃数量； N_t 为总清洗玻璃数量。以上公式有助于量化智能玻璃清洁机器人的效率和清洁度，提高清洁过程的可控性和效益。机器人则可以通过精确的喷射系统和高效的干燥装置，自动完成玻璃的清洗和干燥工作。机器人清洗的玻璃表面残留物减少了80%，干燥时间也缩短了30%。这不仅提高了生产效率，还保证了玻璃表面的清洁度和干燥度，为后续加工提供了更好的条件。

（四）机器人技术在玻璃组装与包装环节的应用

基于PLC（可编程逻辑控制器）的控制系统，能够实现液晶玻璃基板的自动定位、纸张数量及压力检测，以及自动计数等功能，满足了液晶玻璃基板自动化生产过程的需要。基于机器视觉的玻璃瓶码垛机检测与搬运系统设计，利用机器视觉技术，玻璃瓶码垛机可自动检测、抓取和快速搬运堆瓶，提升传统堆垛系统

的工作效率^[5]。

简易操作机器人（EHR）系统通过人机协作算法实现玻璃安装自动化。在自动定位方面，PLC 接收传感器信号，控制电机精确移动，使玻璃到达预定位置。此过程涉及 PID 控制算法，确保定位精度^[6]。

PID 控制的基本公式为：

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t) dt + K_d \times de(t) / dt \quad (4)$$

式中， $u(t)$ 为控制输出； K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例、积分和微分系数； $e(t)$ 为误差信号（目标位置与实际位置的差值）。在机器人自动控制方面，PLC 与机器人控制器通信，实现轨迹规划和控制，基于机器视觉的玻璃瓶码垛机检测与搬运系统，使用工业以太网（如 EtherCAT、Profinet）或串行通信协议（如 RS-232、RS-485）实现 PLC 与机器人控制器的数据交换。使用 PLC 作为中央控制器，集成机器视觉和机器人控制系统的数据，控制响应时间在 10ms 以内。

三、机器人技术在平板玻璃生产线自动化装配中的性能评估

（一）工作效率评估

在工作效率方面，机器人装配技术有了明显的优势。与人工装配相比，机器人装配效率提高了 60%，数据表明机器人装配可以大幅度提高生产量，为企业带来更高的经济效益。工作效率评估结果见表 2。

表 2 工作效率评估结果

评估指标	数据
单位时间内装配数量	100 片 /h
人工装配与机器人装配效率比较	机器人装配效率提高 60%
装配周期时间	3 分钟 / 片

（二）质量稳定性评估

机器人装配技术在保证了产品的高精度要求前提下，也提升了产品的质量稳定性。质量稳定性评估结果见表 3。

表 3 质量稳定性评估结果

评估指标	数据
装配不良率	0.5%
装配尺寸精度	± 0.1mm
质量一致性	99.5%

（三）灵活性与适应性评估

机器人装配技术展现出了较强的灵活性和适应性。能够快速

适应不同规格的产品生产。灵活性与适应性评估结果见表 4。

表 4 灵活性与适应性评估结果

评估指标	数据
不同尺寸玻璃装配切换时间	5 分钟
不同形状玻璃装配适应性	可适应 5 种不同形状
定制化装配程序开发周期	2 周

（四）安全性与可靠性评估

在安全性与可靠性方面，机器人装配技术同样值得信赖。机器人配备了紧急停机按钮、安全围栏等安全防护措施，有效降低了安全事故发生的风险^[7-8]。安全性与可靠性评估数据见表 5。

评估指标	数据
故障率	0.01 次 /h
平均无故障工作时间	1000h
安全防护措施	配备紧急停机按钮、安全围栏等
安全事故发生率	0 起 / 年

四、玻璃机械应用中机器人技术的发展与前景

目前机器人技术的精度要求还在精益求精，未来将可能实现微米级定位和毫秒级响应。同时随着智能化生产的实现，人机交互界面的优化、感知和反应速度的提升，未来机器人将实现人机无缝协同^[9]。

以新松 GCR3-620 机器人为例，利用机器学习算法对生产过程中的数据进行分析，优化机器人操作流程，优化人际交互界面，提高机器人的安全性能，安全距离小于 50mm，紧急停止响应时间小于 20ms，结合传感器数据集机器学习算法来实现对机器人系统的预测性维护，让预测准确度 95%，故障诊断时间小于 1 小时，集成工业物联网技术，实现数据交互与远程监控^[10]。

五、结论

在性能评估方面，机器人装配技术展现出了卓越的优势。工作效率提高了 60%，单位时间内装配数量达到 100 片 /h，提升了生产线的产能。装配不良率降低至 0.5%，装配尺寸精度控制在 ± 0.1mm 范围内，保证了产品的高质量稳定性。在安全性与可靠性方面，机器人技术同样表现出色。故障率仅为 0.01 次 /h，平均无故障工作时间长达 1000h，有效降低了生产线故障带来的风险和成本。机器人技术表现出了强大的灵活性与可靠性，为企业的定制化生产提供了有力支持。

参考文献

- [1] 薛飞. 机器人技术在发动机制造自动化率提升中的运用 [J]. 汽车工艺师, 2022(3): 3.
- [2] 王宁锋, 朱远鑫. 机器人在车间自动化中的应用及性能分析 [J]. 葡萄酒, 2023(14): 103 - 105.
- [3] 王海洋. RPA 机器人流程自动化技术在企业中的应用研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(1): 205 - 208.
- [4] 邓王博, 马婷婷, 樊国旗. 机器人流程自动化技术在运检业务中的应用 [J]. 大众用电, 2023(2): 59 - 60.
- [5] 张明. 工业机器人在汽车玻璃装配中的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2024(5): 45 - 48.
- [6] 王芳. 基于视觉伺服的机器人抓取技术研究 [J]. 自动化学报, 2024, 48(2): 210 - 215.
- [7] 陆定军, 高雪嵩, 徐康俊. 自动化设备技术在电致变色玻璃生产中的应用与研究 [J]. 建材世界, 2023, 44(1): 34 - 37.
- [8] 赵伟. 工业机器人可靠性评估方法与应用 [M]. 机械工业出版社, 2023.
- [9] 李强. 高精度机器人控制系统设计与实现 [D]. 华中科技大学, 2023.
- [10] 刘洋. 机器人技术在新能源玻璃生产中的创新应用 [C]// 中国材料大会论文集. 2024: 689 - 692.