

面向箱体类零件的智能化柔性生产线的设计研究

蔡萍¹, 赵文忠¹, 穆琪¹, 徐卫刚², 许培伦¹, 沈志涛¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 西安 710069; 2. 成都四威高科技产业园有限公司, 四川 成都 610097)

摘要: 箱体类零件是电子装备制造业大量使用的一类重要零件, 针对当前企业箱体类零件生产存在的诸多问题, 根据箱体产品加工工艺和多品种、小批量加工特点, 建设一条含立式加工中心、钻孔攻丝加工中心、工业机器人在内的智能化柔性生产线, 本文详细介绍了生产线的布局组成、加工工艺和 workflow, 实现零件上下料、数控程序传输、机床程序起停、工件坐标系建立、机内自动对刀和机床数据采集等环节的自动化, 从而达到箱体类零件的自动化生产, 能够提升机床利用率、提高生产效率、保障零件加工质量。该生产线的建设实施可对电子行业智能化车间建设提供借鉴。

关键词: 箱体类零件; 柔性生产线; 工业机器人; 零点定位系统; 机床上下料; 控制系统

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Design and Research of an Intelligent Flexible Production Line for Box-Type Parts

CAI Ping¹, ZHAO Wenzhong¹, MU Qi¹, XU Weigang², XU Peilun¹, SHEN Zhitao¹

(1. The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an Shanxi 710069, China;
2. Chengdu Siwei High-Tech Industrial Park Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610097, China)

Abstract: Box-type parts are critical components widely used in the electronics equipment manufacturing industry. Aiming to address the challenges in current production processes for box-type parts, such as multi-variety and small-batch processing characteristics, this study proposes the development of an intelligent flexible production line incorporating vertical machining centers, drilling and tapping centers, and industrial robots. This paper details the layout, processing techniques, and workflow of the production line. Automation is achieved in key stages including part loading/unloading, CNC program transmission, machine tool start/stop control, workpiece coordinate system setup, in-machine automatic tool calibration, and machine data acquisition. The implementation of this system enables automated production of box-type parts, significantly enhancing machine tool utilization, improving production efficiency, and ensuring machining quality. The construction of this production line provides a valuable reference for the development of intelligent workshops in the electronics industry.

Keywords: box-type parts; flexible production line; industrial robots; zero-point positioning system; machine tool loading/unloading; control system

1 引言

近年来, 产品创新化、个性化和多样化成为必然的趋势^[1], 随着某研究所研制生产能力的快速发展, 生产

制造任务呈爆发式增长, 其中预研研制任务、重点任务、紧急任务等层出不穷。对生产排产调度造成巨大困扰, 并且频繁的产品切换导致机床设备利用率低下。因此,

对生产制造产能的要求大幅提高，也对其快速反应能力提出了更高的要求。但是，熟练的数控操作工人招聘困难且后期人力成本巨大，通过加设备加人来解决现有产能缺口的手段必然不可持续。柔性制造系统是由数控加工设备、物料运储装置和计算机控制系统等组成的自动化制造系统^[2]，可进行零件产品加工过程的自动控制、故障自动诊断和处理，以及制造信息的自动采集和处理，同时可自动控制和管理零件产品、刀具和工装等的运输和存储过程^[3]，适用于多品种、中小批量生产^[4]。通过编制不同自动化加工工艺，柔性制造系统可对具有相同零件特征的多种零件进行柔性化加工。柔性制造技术作为一种新的制造技术，在汽车、航空等机械制造行业已得到快速发展^[5]。基于上述情况，本研究针对箱体类零件多品种、小批量加工，设计智能化柔性生产线。

2 箱体类零件生产现状

在电子行业，作为电子器件的载体，箱体类零件是某单位装备大量使用的一类重要零件，其生产模式呈“多品种、小批量”特点，且研制与批产交叉明显。目前生产组织及制造仍为传统的“一人一机”模式，数字化、

智能化水平低，现存痛点问题如下：①产品切换频率高，生产准备时间过长，导致机床运行效率低；②紧急插单、计划变更、工艺调整等动态事件对计划、排产冲击大；③零件批次质量一致性不高；④人工成本高，对员工技能要求高；⑤缺少信息化、数字化手段，生产过程中管控能力不足。

近年来客户对成本和交付期要求越来越高，人工单机作业的传统制造方式无法适应多品种箱体类零件高质量制造，需采用自动化、数字化等先进技术，将传统离散制造作业模式改造升级为类流水混合制造模式成为迫切需求^[6]。

3 产线布局及组成

结合箱体类零件的生产特点及加工过程中凸显的问题，设计了箱体类零件智能化柔性生产线。生产线布局中包含数控加工中心、四轴转台、零点定位系统、工业机器人及导轨、托盘库、装卸站、倒液装置、安全门、安全围栏和线外工作台等组成项。生产线总体三维布局如图1所示。

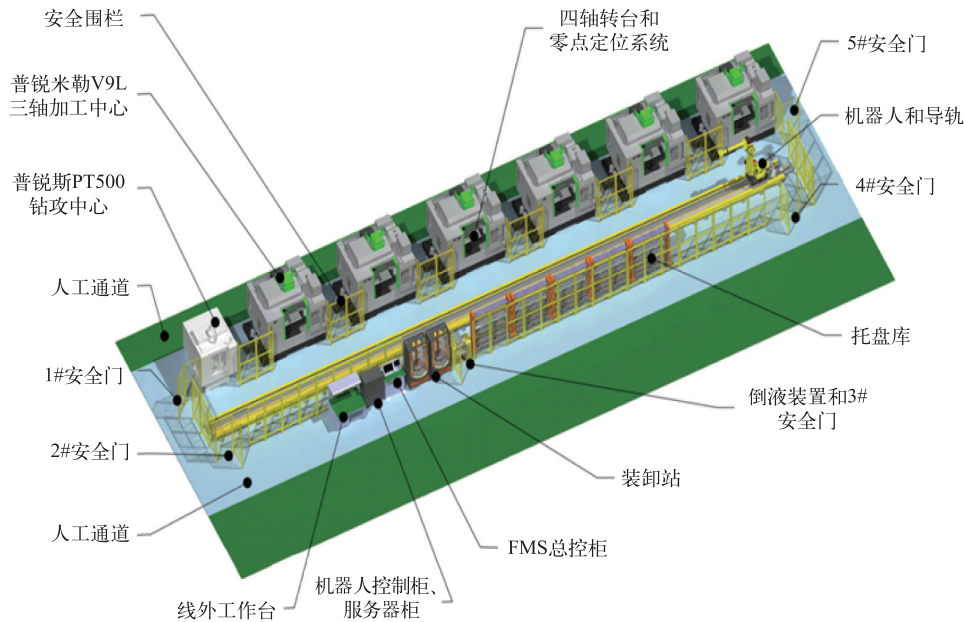


图1 生产线总体三维布局

3.1 数控加工中心及机内附件

生产线包含六台普瑞米勒 V9L 三轴立式加工中心和 1 台普瑞斯 PT500 钻攻中心。零件在三轴加工中心完成

主要特征切削后，无需出线装夹，直接到钻孔攻丝加工中心进行钻孔攻丝，在机床层面上最大化满足了产线柔性。为减少工件装夹及机床换料频次，提高机床利用率，

其中3台加工中心配置带桥板的四轴转台，并且在桥板上安装零点定位底座，通过零点快换托盘实现机床的快速上下料。根据四轴转台和所在机床上和三轴机床上零件加工时间的长短，同时考虑到工艺集中的布局原则，将三轴机床部署在距离托盘库较近的位置，将四轴转台安装在距离托盘库较远的三台加工中心上，具体所在机床位置如图2蓝框所示。

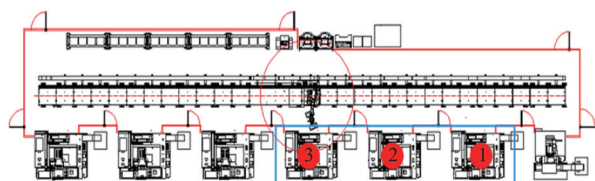


图2 安装四轴转台机床位置图

利用夹具进行装夹定位有时会因工件基准位置偏差过大，导致最后加工的工件不合格，费时又增加成本。为此，生产线的7台机床均安装机内工件测头和机内对刀仪。机内工件测头可以精确地找正工件的位置，并将结果发送到数控系统，进而自动补偿工件位置偏差。这样不仅缩小手动装夹误差，降低对夹具的依赖、废品率和成本，而且整个找正过程无需人工干预，极大地缩短了找正时间，满足了不同类型箱体零件的柔性快速切换。另外，为了满足产线对刀具的需求，机内对刀仪能自动检测刀具长度、直径，并将测量值自动更新到机床刀具表中，当自动监测到刀具破损后，程序会暂停并报警。

3.2 零点定位系统

本产线中的零点定位系统分为零点定位底座和零点快换托盘，如图3所示。零点定位底座共有8套，4套安装在机床工作台上，3套安装在四轴转台桥板上，1套安装在倒液设备上。零点定位底座内嵌的零点定位器安装在机床工作台或四轴转台上，可实现重复定位精度小于0.005mm。零点快换托盘共15套，托盘底部装有4颗拉钉，与零点定位底座配合使用，托盘两侧设计有机器人叉取台阶和4个定位销孔，能保证机械手和托盘夹持牢固，并正常进出机床。另外，每个零点快换托盘上安装1个RFID芯片用来标识托盘身份，RFID芯片与系统数据库关联，具有唯一标志，可避免不同零件混线后发生混淆。每套零点定位系统配置一套气路控制组件，用于控制零点定位系统托盘的夹紧松开及气密检测。通过该零点定位系统能够直接得到工件在不同机床间统一的位置关系，

消除多工序间的累积误差。最重要的是，它能够统一设计基准、工艺基准和检测基准，显著减少传统加工过程中使用机床进行重复找正的时间，大大提升机床设备的开机率，同时也避免了因装夹导致的零件加工误差，提高了零件的加工精度。

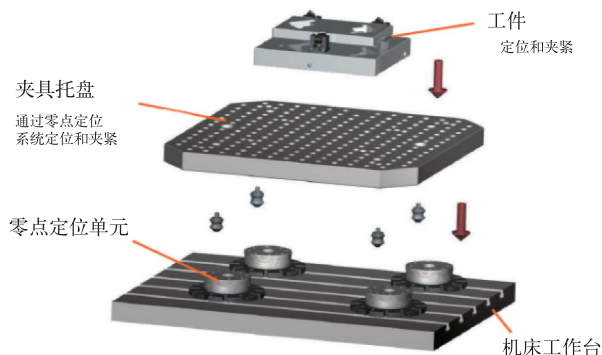


图3 零点定位系统

3.3 导轨机器人系统

产线中的导轨机器人系统由六关节机器人、导轨组件、机器人控制柜，以及机器人抓手、机器人控制柜底座、随行滴液盘等附件组成。导轨组件作为机器人的第七轴，可与机器人其他轴联动，提高执行效率。为减少机器人上下料过程中在托盘库和设备之间的周转次数，机器人抓手采用双爪结构，单爪最大负载不低于80kg。机器人第七轴平均运行速度为700mm/s；在系统响应时间为1s，托盘库库位与机床最远距离为24000mm的情况下，机器人自主更换工件即交换托盘时间不大于2min，机器人抓手与托盘接触面设计有定位销钉，保证在机器人运行时托盘不松动或掉落。机器人导轨长度约27m，机器人在导轨上的最大移动速度为1000mm/s，重复定位精度为±0.1mm，可满足该生产线内所有工位托盘上下料需求。

3.4 装卸站

为减少操作者等待时间，本生产线配置2个装卸站，如图4所示，操作者在装卸站完成零件的拆、装，机器人在装卸站完成零点快换托盘的取、放。装卸站的门上设置透明观察窗，便于操作者观察；为保证门运行稳定，在对开门上下配置滑轨及滑轮组件，门上还配置了两套电磁锁安全开关用于检测门打开及关闭状态，当安全门打开时控制系统不允许机器人进入。装卸站顶部安装的照明灯，用于观测和测量内部的工装治具；报警灯则用于显示装卸站的工作状态；托盘放置台的旋转盘可实现

约 360° 旋转和定位，方便操作者检查工件的装夹状态，放置台上设置托盘定位工装来保证装夹精度，为机器人抓取、放置托盘提供准确位置；另外，工作台上还安装了接近检测开关和 RFID 读写，前者用于检测工作台上有无托盘，后者则用于标记和识别托盘的身份。

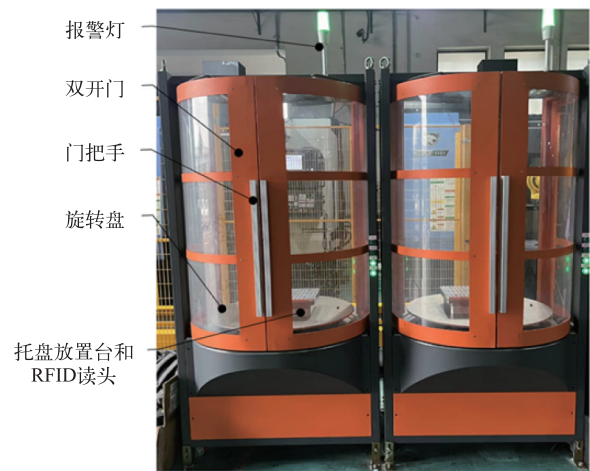


图 4 装卸站

3.5 托盘库

为用于零点快换托盘的线内缓存。产线中设置了托盘库，托盘库共 5 个货架，80 个货位，每个货架有 16 个托盘位。在每个货位上均设有托盘定位组件装置，包含定位盘、定位支撑柱及接近传感器。接近传感器用于检测该位置托盘的有无并反馈给控制系统；定位支撑柱中间加工通孔，用于拉钉避让，在稳定托盘支撑的同时，也帮助托盘在货位上定位，防止托盘发生滑移，满足机器人抓取要求；托盘库底层设置可拆卸接油盘，用于收集使用过程中产生的切削液和切屑；托盘库货架配置四个重型承载脚杯，单个脚杯负载 500kg，可满足整个托盘库满放托盘、工件及自重负载需求。托盘货架配置四个 L 型连接件，使用膨胀螺钉与地面固定，以防止货架在异常受力情况下发生倾覆。货架结构如图 5 所示。

3.6 倒液装置

考虑到在箱体类零件加工过程会造成切削液和废屑堆积到内腔不易清理，生产线配置一套自动倒液设备用于将工件内腔中的切削液和废屑倒入储液小车。为避免托盘翻转后掉落，倒液设备使用零点定位系统作为托盘夹紧机构，并通过伺服电机及减速器实现 180° 自动翻转，配有的高压气管和竹节管接头具有零件清洁功能；储液

小车与倒液装置对接，具有定位功能，且密封良好；倒液存储小车车体采用不锈钢材质，轮沿为软质材料，承重良好，具有轮毂定位、移动手柄，移动便捷。倒液装置如图 6 所示。

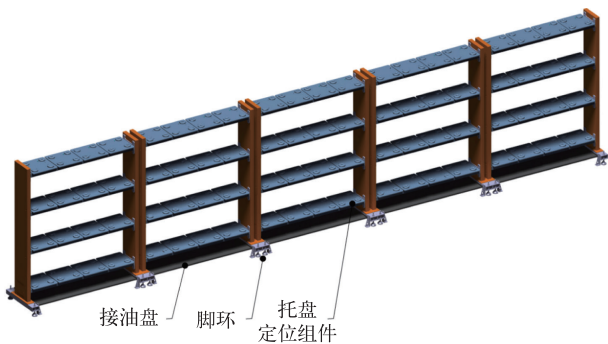


图 5 托盘库货架示意图

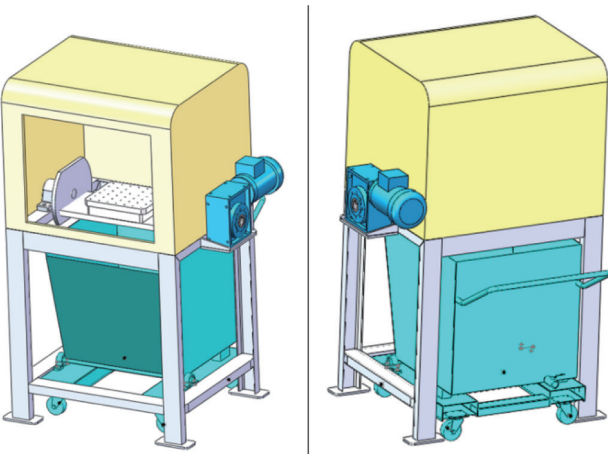


图 6 自动倒液装备示意图

3.7 安全围栏和线外工作台

生产线在设计时，为避免发生安全事故，设计了安全围栏用于将人员与机器人隔离。安全围栏的布局如图 7 所示。

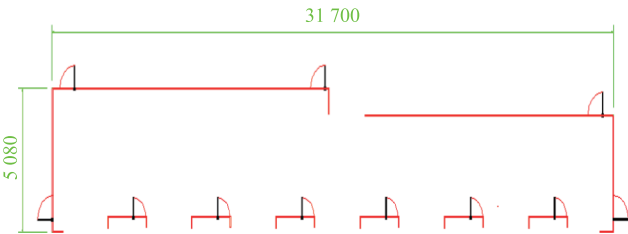


图 7 安全围栏布局图

安全围栏采用方钢管作为支撑立柱，黑色金属网作为隔断面，防护高度为 2 200mm。安全围栏留有 11 个安

全门，门打开后机器人急停，机床则不停机；每个安全门上装有安全开关和机械式门锁，其中安全开关与生产线控制系统连通，可反馈门开关状态给控制系统。当操作人员需要进入生产线时，可用安全挂锁将机械式门锁插销锁住，钥匙随身携带，使其他人员无法将安全门闭合，从而保证线内操作人员安全。

为满足操作者线外操作的需要，生产线还设置1个线外工作台，工作台采用优质钢材，表面铺设橡胶护垫，配置了工具收纳抽屉、计算机主机承载台、网络接口和电源接口等，特别方便操作者使用。

4 生产线信息化系统设计

生产线硬件系统及自动化功能实现设计的同时，产线还设计了自动化生产的信息化系统，该信息系统主要包括业务管理系统、执行管理系统、电气控制系统。业务管理系统是负责业务管控的软件系统，包括工艺数据管理、订单管理、任务绑定管理、线内任务管理、调度管理、托盘管理、刀具管理、夹具管理、设备管理、异常任务维护、看板管理、检验控制、数据采集与存储、用户权限管理、基础数据管理，以及综合查询等功能模块。

执行控制系统是柔性自动化的控制核心，向上与业务管理系统集成，向下与电气控制系统集成，主要实现产线内加工任务与物流任务的管理与实时调度、机床加工程序检索与下发，支持灵活插单、按照优先级调整加工顺序，任意指定零件进行检验等。

电气控制系统是基于PLC的自动化控制系统，主要负责设备状态监控，自动化设备协同控制，完成物流任务和加工任务；可实时展示各设备、零点定位系统、安全门和托盘位等的状态信息及异常告警信息。

5 生产线工艺设计和运行流程

产线主要生产电子类箱体零件为主，加工内容为盒体的正面及两个侧面，一般加工需要6道工序，包括备料-铣-钳-数控铣-钳-镀覆，其中数控铣在生产线上完成。毛坯或半成品采用侧向夹器配合一定的通用定位工装来实现装夹，由机器人在货架与机床间进行转运。结合箱体零件的加工特点，在五轴机床或配有四轴转台的三轴机床上，一次装夹可完成零件正面和两个侧面共三个面的加工，半成品零件退线后调面装夹，再次进线完成剩余三个侧面的加工。具体生产线运行流程如下。

1) 创建生产任务：操作者在业务管理系统中创建生产任务。

2) 工艺确认：根据已定义的工艺基础数据，操作者在业务管理系统中将生产任务逐级分解为工步任务，每个工步任务关联了相应的数控程序及可用机床；操作者对工艺和程序进行审核、确认。

3) 装夹及绑定：操作者在装卸站将已经加工出基准的零件装夹到零点快换托盘上，然后在业务管理系统中选择相应任务数据，通过RFID读头将托盘上RFID芯片与任务数据绑定，实现线内单件的追溯。

4) 托盘入线：系统通过RFID读头自动识别托盘身份，然后调用机器人将托盘周转至托盘库的货位上暂存，托盘入线完成。

5) 数控铣加工：当机床空闲时，系统为该机床分配待加工零件，并给机床传输相应的加工程序；机器人从托盘库取出已分配的零件，搬运至机床上进行装夹；系统远程启动机床并运行至程序结束；加工完成后，机器人将托盘送至倒液装置或托盘库，机床进入空闲状态；之后机器人再次给机床上料下一件待加工零件。对于倒液装置完成的托盘，机器人自动将托盘从倒液设备运送至托盘库。

6) 托盘出线：当装卸站空闲时，机器人将已加工完的托盘搬运至装卸站，操作工从零点快换托盘上拆下已完工零件。

7) 过程循环：重复步骤3~6。

8) 机床离线：当某台机床需要离线手动操作时，在系统上将该机床切换为离线模式，之后系统将不再为该机床分配任务。

6 柔性制造生产线应用效果

生产线建成后，以材质为铝合金、尺寸不大于450mm×450mm×70mm、质量不大于40kg并且毛坯为六方料的中小型箱体类零件加工对象为例，分析并比较了传统加工模式与柔性产线生产模式，得出如下结论。

6.1 产品质量和一致性改善

生产线采用零点定位系统和机内工件测头，实现零件快换，数控程序由柔性控制系统自动根据零件身份下发到机床控制系统，加工过程无干预，大幅减小因人为装夹造成的质量问题的概率，提升产品加工质量；同时，使用机内对刀仪大幅减少了刀具误差并及时发现刀具故

障，减少质量事故；自定心虎钳等标准夹具的使用也减少了人为因素和意外因素导致的质量风险，保证了产品的质量一致性，产品合格率由 98% 提高到 100%。

6.2 机床利用率提升

生产线能够根据零件与机床之间的匹配结果，自主调度可加工零件到空闲机床上进行自动装夹及加工，整个过程机床等待时间只是机器人上下料时间的 90s，人工在线外完成手工装夹，大幅缩短机床停机等待时间。机内的在线检测系统实现了自动检测和自动对刀，缩短对刀、找正、装夹等生产辅助时间。此外，通过托盘库实现毛坯缓存，可以实现长时间无人值守生产，机床 24h 不间断加工，从而大幅延长设备开机率。机床利用率约为传统加工方式利用率的 4.8 倍。

6.3 生产加工效率提升

传统加工模式时，零件加工所需时长为 560min，其中数控铣工序耗时 116min，在柔性产线模式下，加工过程中的生产准备时间大大减少，包括毛坯件的转运、放置、贴片 (RFID) 和装夹，时间约为 30min。生产线集中普铣 - 钳 - 数控铣 - 钳，以往手工钻孔、攻丝、去毛刺都可以在生产中自动完成，加工时间共约 198min，综上，传统加工与生产线加工的工时相差为 560 - (198 + 30) = 332min，生产加工效率提高了 1.7 倍。

6.4 计划管控能力和数字化管理水平提高

生产线控制系统能实时、直观地反映该工序的待加工任务和和在制任务，灵活地将重点任务调整到最优先的加工顺位，提升了生产任务计划的管控能力。订单、工艺、开完工时间等数据都在生产线控制系统保留记录，所有活动都按照既定流程执行，图纸、工艺文件、数控程序都可以用电子版形式规范存储。有效提升了车间的数字化管理水平，促进了生产管理能力的改善。

6.5 操作人员减少，劳动强度降低

生产线建成后，一般情况下只需 1 名操作者值守，即便是面对多品种、小批量、频换型的生产，操作者也能从容应对，不会造成忙不过来而导致机床闲停不均的现象。操作者只需按照作业指导书完成毛坯装夹操作，并在软件系统中进行身份绑定操作即可，大幅降低了操作者的劳动强度和对高水平操作者的依赖，将操作者从

繁琐的准备程序、准备垫铁、找正零点和对刀等工作中解放出来。

7 结束语

智能化柔性盒体类零件生产线是根据盒体产品加工工艺的特点，通过柔性自动化技术、机器人技术、物联网和信息技术将加工机床、机器人等智能装备互联互通，建成的一套含 6 台立式加工中心的智能化柔性生产线，该生产线具有高柔性且对零件加工没有严格的物理节拍限制，不但能够实现多品种、变批量零件的柔性混线生产，而且生产线内的任意机床可以离线以单机形式运行，不影响其他机床的运行。不仅提高了设备有效利用率，而且缓解了设备瓶颈问题^[7]，同时也实现了离散制造业的柔性加工，为多品种、小批量的离散制造的柔性自动化加工提供了可能。

参考文献

[1] 赵佳萌，梁增提，蒙万才，等. 汽车前轴焊接柔性生产线工艺设计与研究 [J]. 科技风，2020 (9) : 118-119.

[2] 王笛，金湘，张星. 柔性制造系统的发展 [J]. 新技术新工艺，2013 (8) : 24-26.

[3] 范牧昌，李玲. 柔性制造系统中刀具管理系统的研究 [J]. 现代机械，2001 (3) : 40-42.

[4] 曹运洪. 柔性制造系统、柔性制造单元和成组技术的发展及其应用 [J]. 飞航导弹，2024 (5) : 59-63.

[5] 王伟磊，张益，刘相国，等. 柔性制造系统在航空制造领域的应用研究 [J]. 机械制造，2018 (9) : 70-73.

[6] 陈兵，李晋航，石致远，等. 大型发电设备定子冲片柔性生产自动产线技术研究 [J]. 制造业自动化，2022 (2): 56-61.

[7] 李瑞，裴建平，王永鹏. 基于零点定位的柔性加工技术的研究与应用 [J]. 智能制造，2021 (3): 60-65.

作者简介：蔡萍（1980—），女，硕士，高级工程师，主要研究方向为智能制造、网络安全等。

收稿日期：2024-12-03