

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.042

# 气膜孔电加工智能产线控制系统研究

赵晓梦, 蒋毅, 王少航

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**针对航空发动机叶片气膜孔电加工领域生产线自动化程度不高、生产效率较低的问题,对电加工智能产线控制系统展开研究。基于叶片电加工的工艺特点,设计智能生产线的工艺流程及产线布局;根据所需功能要求设计产线控制系统总体结构,并对控制原理及具体实现进行研究,包括控制系统具体的产线控制流程及内部控制机制,用以保证产线的稳定运行。在模拟环境下对系统进行验证,研究结果表明:系统运行正常,能够实现叶片的自动化加工。

**关键词:**航发叶片;气膜孔;电加工生产线;控制系统;产线调度

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0198-05

## Research on Intelligent Production Line Control System of Electro Machining Film Cooling Hole

ZHAO Xiaomeng, JIANG Yi, WANG Shaohang

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** For low automation degree of production line and production inefficiency in present aero-engine blade film hole electric machining, this paper conducts research on intelligent electric machining production line control system. In line with the characteristics of blade machining process, the technological process of intelligent production line and production line layout are designed, and the general structure of the production line control system is schemed as required by functions, and the control principle and the concrete implementation including concrete production line control system control process and internal control mechanism are studied to ensure the stable operation of the production line. The system is simulated, which verifies that the system can run normally and realize automatic processing of blades.

**Keywords:** aero engine blade; film cooling hole; EDM production line; control system; production line scheduling

### 0 引言

在航空发动机制造领域,叶片冷却气膜孔的加工质量直接影响到发动机的核心性能,而气膜孔孔径小、数量多、结构复杂、精度要求较高等特点也决定了其加工难度较大<sup>[1]</sup>。

电火花打孔是目前较为成熟的气膜孔加工方法,在国内外应用广泛<sup>[2]</sup>。然而,目前国内的气膜孔电加工产线大多自动化程度不高,虽在单台数控机床已经实现了打孔工作的智能化,但是仍需要人工进行上下料、参数设置等工作<sup>[3]</sup>,浪费大量人力资源。在实现基本自动化生产的基础上,还需要保证多台设备之间的信息交流以实现数字化,完成数据的集中存储,便于生产后期大批量、长周期的生产管理工作<sup>[4]</sup>。

基于以上现状,本文在设计航空发动机叶片气膜孔电加工智能生产线布局组成的基础上,对

产线控制系统架构和控制软件进行设计和研究,实现自动上下料、加工过程自动化、数据集中管理的功能,完成车间信息化及智能化精益生产的目标。

### 1 产线工艺流程及布局

针对航发叶片在铸造过程中极易产生误差这一特点,在加工气膜孔前先对叶片进行三维测量<sup>[5]</sup>,以光栅测量为主要技术手段,获取叶片与标准模型之间的轮廓差值,并根据叶片具体的形位特征对加工程序做出有针对性的调整以保证单个叶片在加工过程中加工孔位的准确性。气膜孔的加工主要由电火花小孔机完成,叶片测量合格进入小孔机后,机床根据叶片打孔工艺要求对加工参数进行调整,并按照所测量叶片的具体形状而调整好的加工程序进行加工。除此之外,为了进一步提升叶片冷却效果,采用电火花成型工艺,在

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51675233)

**第一作者简介:**赵晓梦(1998—),女,山东莱阳人,硕士研究生,研究方向为机电控制与自动化,18151521978@163.com。

打好的气膜孔处利用电火花成型机床加工一个簸箕形导气型腔,在气膜孔冷却的基础上,增大气体流动,加速气膜层的形成。加工工艺流程如图 1 所示。

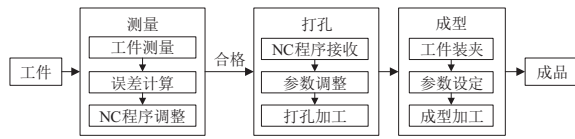


图 1 产线加工工艺流程

根据上述工艺流程对智能生产线的产线布局进行设计,产线以工业机器人导轨为中线,各加工设备均匀分布于两侧。根据工序时长确定加工机床数量以保证整批工件在加工过程尽可能地减少等待时间,最终确定测量机数量为 1,小孔机数量为 4,成型机数量为 2。除加工机床外,产线有辅助加工设备,上料机与下料机合并组成输送机,前后端设有电眼检测,自动进退位实现自动上下料;工业机器人搭配行走轴完成工件的线内转运<sup>[6]</sup>;引入 RFID 技术,实现加工过程中工件的追踪,方便后续控制系统数据传输,同时降低后期数据存储难度,实现加工过程追溯<sup>[7]</sup>。产线布局如图 2 所示。

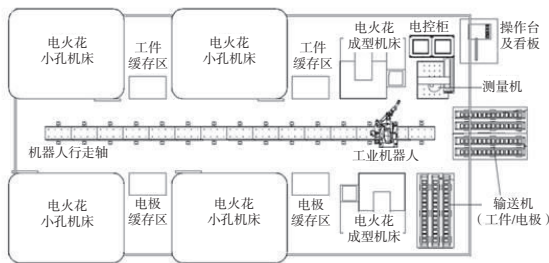


图 2 生产线布局图

## 2 系统总体控制方案

### 2.1 控制系统整体结构

本文所研究智能产线非简单串联结构,其中存在机床并联的情况,使用传统的简单流程控制结构复杂。本文引入排产算法,对资源调度进行优化,控制系统只需根据排产得到的生产计划对生产进行安排加工即可。

叶片气膜孔电加工智能产线控制系统结构如图 3 所示。工控上位机主要用于对产线整体流程进行调度,先从车间管理层的 WMS(仓储管理系统)或 MES(制造执行系统)获取产线订单,然后对单批订单的加工过程进行排产,最后根据排产

计划对产线资源进行调度并完成加工。计划的具体执行主要由下位机 PLC 进行,选用西门子 S7-1200PLC,通过西门子 S7 协议与工控机进行数据交换,接收工控机的控制指令并作为主站,通过 TCP/IP 协议与机床、机器人等设备通信<sup>[8]</sup>,将命令下发,控制机床设备完成指定动作。

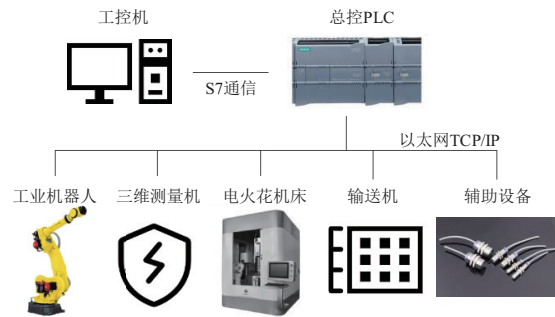


图 3 控制系统结构图

控制系统在实现基本自动化功能外,还需实现产线的信息化。本系统搭建 MySQL 数据库对产线数据进行存储,分设产线实时数据库、管理数据库。实时数据库在产线加工过程中进行更新,包括产线当前进程、工件当前位置等信息。该数据库内数据时效性高,有新数据产生后会执行覆盖。管理数据库也可以称为历史数据库,主要用于记录产线及设备运行情况、历史工件加工情况等,便于后期实现加工过程追溯。

### 2.2 系统控制原理

本文所设计控制系统默认自动模式下运行,系统获得订单任务后,对排产所需参数(算法初始化参数、订单数量、各工件加工时长等)进行设置,调用动态链接库中的排产函数对加工计划进行计算并将计算结果进行转换,最终输出控制指令下发至 PLC,由 PLC 具体控制机床设备完成指定命令,实现产线的自动化运行。

上文所述计算结果为工件在产线内部转运、加工的具体起止时间点,以矩阵的形式表示,包括工件加工时间(相对时间)、机器人搬运时间、工件进出缓存区时间。以工件加工时间为例,矩阵如图 4 所示,纵轴表示工件,一行即为一个工件在各个机床上的加工时间信息;横轴则表示机床,从左至右依次为测量机、4 台电火花小孔机、2 台电火花成型机,每台机床的信息占两列,左侧数值为该工件在该机床上的计划加工开始时间,右侧则为预计加工结束时间。机器人搬运时间与工件进出缓存时间与工件加工时间矩阵结构类似。

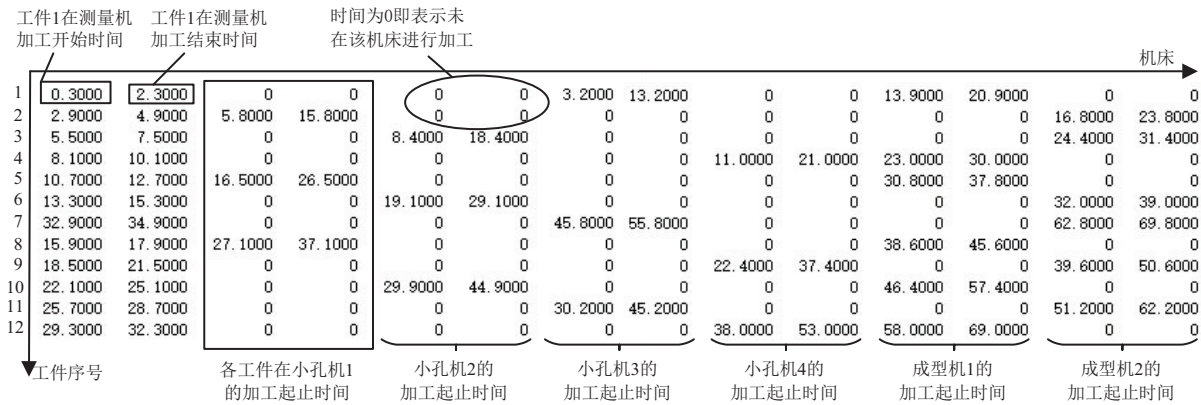


图4 工件加工时间矩阵

控制系统根据上述时间点即可获得工件在各工序的加工位置(机床序号)、在各机床的加工起止时间、机器人的工作流程等信息,利用这些信息可在指定时间点触发机器人的动作,获取机器人搬运工件ID、起始位置、目标位置并判断起止位置状态是否具备搬运条件,待工件安装完毕,给机床信号触发机床加工线程。循环此过程即可完成工件的完整加工。

### 3 控制系统软件设计

控制系统的软件部分包括下位机PLC程序以及上位机控制软件程序。PLC程序使用TIA Portal16进行编写,主要用于获取机床设备的运行数据并将上位机控制指令下发至机床设备;上位机控制软件利用C#语言在Visual Studio2019平台进行开发,主要负责产线控制逻辑的编写以及生产线状态的实时监控,同时在控制过程中对数据库内容进行更新与修改<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 PLC程序设计

PLC程序结构如图5所示,主要分为两部分:设备信息获取和指令传达。利用西门子功能块(FC)编写PLC控制程序的子程序,FC\_READ负责读取各机床设备的实时状态信息,存于机床对应的数据存储区以供上位机查询;FC\_WRITE负责编写机床设备的控制程序,与上位机搭配对机床进行控制,例如对机床的参数进行设置、开启或关闭机床设备的某项功能。子程序均在主程序OB1中进行调用,循环执行,实时更新存储区的数据。

PLC程序的数据存储区由DB块组成,可分为两大类:存放设备实时数据的数据块DB\_READ与存放上位机写入命令的数据块DB\_WRITE。上

位机向DB\_WRITE中写入数据,触发PLC中相应的控制指令,使得机床执行指定的动作,同时从DB\_READ中获取机床设备的实时状态信息,支撑系统的监控功能并逐步推动加工进程。

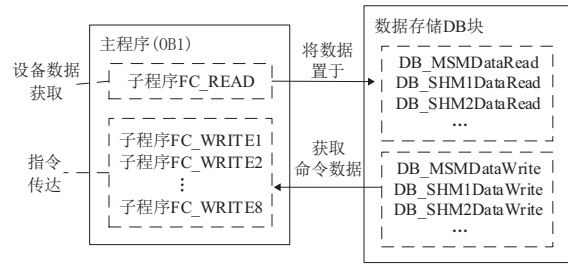


图5 PLC程序结构图

#### 3.2 上位机控制程序设计

##### 1) 上位机总体流程控制

上位机控制软件所涉及生产计划的时间数据由排产程序给出。该程序为MATLAB代码,故上位机软件部分采用C#语言与MATLAB混合编程的方式进行开发。

控制系统的调度流程如图6所示。在自动化加工前进行首次排产,获得初始排产结果,根据该结果获得产线加工一系列以时间为标志的工件转运计划列表。控制系统内设定定时器,从计划列表确定后开始启动,按照当前时间执行对应工件转运任务,待工件转运至目标位置并安装完成后,即可开始进行单道工序的加工生产。若在加工过程中触发重排产,则暂停定时器,设置参数后调用重排产函数,待排产结果更新后,重启定时器。此时,产线即按照新的生产计划进行加工。

以下是需要触发重排产的情况:①有新的工单进入,优先级高于当前正在加工的工件;②某台机床出现故障,不具备继续加工条件;③机器人接

收到搬运指令,但起始位置机床加工未结束;④加工超时机床非故障原因导致超时,加工完成后需要将其重新加入排产中。

### 2) 上位机单机流程控制

生产计划对产线整体流程进行控制,但只对大方向动作的时间做出规定,具体实现流程由上位机进行编写。以某次机器人搬运工件为例,生产计划仅在  $t$  时刻告知上位机,此时机器人应将工件  $x$  由测量机运送至小孔机 1,上位机需要根据该命令调用相关功能函数(机器人位置移动、姿态变换等),完成相关的一系列动作。

由于机床加工任务与机器人下一次搬运任务同时进行,故本文利用多线程对产线任务进行分配,将机床加工放置在子线程中进行,主线程用于循环判断生产计划命令列表,执行机器人搬运任务指令。待搬运任务的加工工件安装完毕后,开启机床加工线程,加工完成后,将该线程挂起,等待下一次加工任务后再开启,如此可以使得整条产线的运行不发生冲突,保证系统的稳定性。

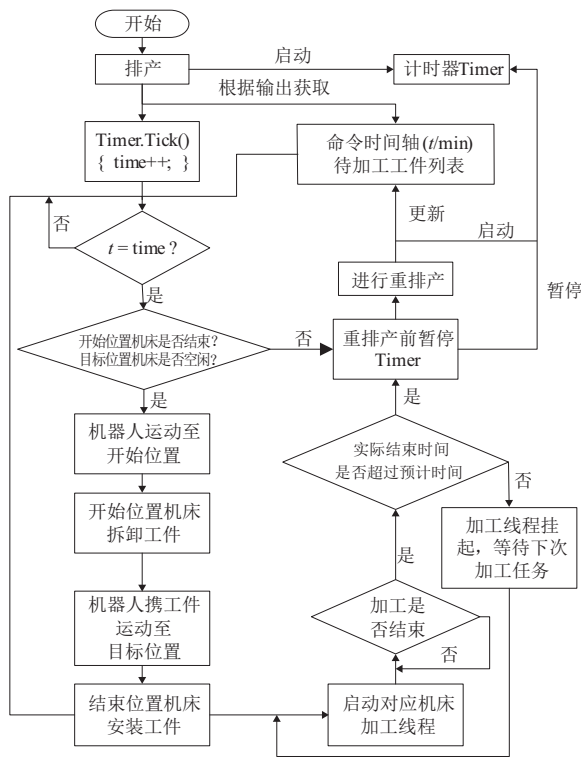


图6 系统调度流程图

### 3.3 人机界面设计及实现

产线默认自动模式下运行,主界面有启停按钮,留有参数设置接口,允许在加工过程中对机床进行参数修改。主界面如图7所示。图中右下部分所示为主监控界面,主要用于对产线各组成部

分的当前状态信息进行简要展示。除总监控界面外,系统分设单机状态的详细显示界面,可通过单击主监控界面中设备名称查看。



图7 上位机软件主界面

## 4 系统运行验证

为了验证本文所设计控制系统的功能,结合已有 PLC 等硬件设备搭建模拟环境对控制系统进行测试运行。在控制软件中下达任务订单后,启动系统开始运行,各工件的加工进度如图8所示。根据机床模拟软件的加工响应动作可证明,系统的控制指令能够完整无误下发至底层物理设备。而由监控界面可以看出,系统运行良好,已实现工件的自动化加工。由此证明,系统对于订单的生产流程控制无误。

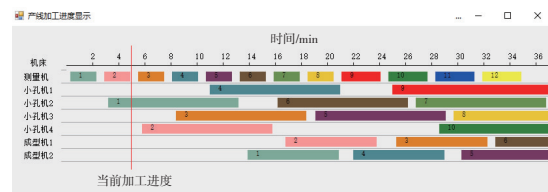


图8 产线加工进度图

在实现基本自动化控制功能后,对系统的故障处理功能进行验证。在机床模拟软件中设置故障点,假设在产线运行 13 min 时,小孔机床 2 出现故障,此时系统对生产计划重新计算,变更后的系统加工进度如图9所示。由图可以看出,加工计划已更新,故障机床未被排产,且故障机床所装载的未完成工件未进入后续机床加工。由此可以证明,系统对于特殊情况具备处理能力,能够对生产计划进行更新并继续进行加工。

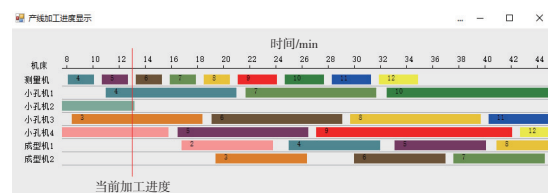


图9 变更后产线加工进度图

在模拟生产的连续工作过程中,本系统运行良好,能够连续完成单批订单工件的生产,故可以有效用于叶片气膜孔电加工的实际产线生产中。

## 5 结语

本文根据航空发动机叶片气膜孔的电加工工艺要求搭建了电加工智能产线,对控制结构和控制原理进行分析,确定数据传输及存储的方式,设计了产线控制系统并对其进行了实现。该控制系统主要通过对排产计划的输出数据进行后处理,获取产线订单生产的命令列表并结合控制系统的具体执行流程完成产线的调度工作。试验验证表明,系统运行稳定,能够代替产线原有人工部分,在保证精度的前提下,实现产线的信息化及自动化,一定程度上提高了生产效率。

### 参考文献:

- [1] 佟浩,李勇,李宝泉. 气膜冷却孔电加工工艺与装备技术研究[J]. 航空制造技术,2021,64(18):34-45.
- [2] 董一巍,吴宗璞,李效基,等. 叶片气膜孔加工与测量技术的现状及发展趋势[J]. 航空制造技术,2018,

61(13):16-25.

- [3] 张智斌. 航空发动机叶片气膜孔自动化生产的方法[J]. 精密制造与自动化,2021(4):51-54.
- [4] 张明德,杨文科,谢乐,等. 航发叶片数字化生产线管控执行系统研究与实现[J]. 现代制造工程,2020(7):11-18.
- [5] 李文忠. 基于光栅投影的发动机叶片三维形貌测量技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [6] 文清平. 基于工业机器人上下料的多工位机加工生产线设计[J]. 机床与液压,2020,48(17):49-52.
- [7] 王先月,潘松峰,刘镛震,等. 基于RFID的零件加工控制系统的设计[J]. 机械制造与自动化,2022,51(2):34-37.
- [8] 胡士靖,吴超群,陈翱,等. 基于西门子PLC的自动打磨控制系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(12):72-75.
- [9] 石朝阳,徐世许,史世良. 基于OPC UA技术的物料搬运监控系统设计[J]. 制造业自动化,2022,44(3):59-62.

收稿日期:2022-09-20

(上接第181页)

1) 在新型号/新工艺验证阶段,基于实测数据的仿真验证是必要的,一方面可以实现数据的闭环,另一方面也能用于验证工程要求与制造能力的符合性,提升装配效率和装配准确度,避免批生产过程中出现大量的超差;

2) 基于实测数据的预装配模型计算结果与测量数据一致,说明基于实测数据的VSA预装配模型可以用于预测装配结果,未来在虚拟装配领域有一定的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 阮和根,陈沈融,朱红萍,等. 基于VSA的冷锻机关键零部件公差设计[J]. 机械设计与研究,2009,25(6):69-71.
- [2] 林祖伟. 民机机身对接尺寸公差研究[J]. 机械制造,

2019,57(9):55-57,64.

- [3] 葛磊. 基于VSA的公差建模分析[J]. 科技视界,2018(25):21-22,11.
- [4] 韦余凤,郑丞. 基于VSA的主起落架舱门与主起落舱整流罩公差分析[J]. 中国科技信息,2019(19):27-29.
- [5] 罗振伟,梅中义. 基于测量数据的飞机数字化预装配技术[J]. 航空制造技术,2013,53(20):99-102,108.
- [6] 张敏,田锡天,耿俊浩,等. 基于预装配精度分析的飞机关键装配工序质量控制技术[J]. 航空制造技术,2019,62(5):51-56.
- [7] 唐健钧,田锡天,耿俊浩,等. 基于多维矢量环的装配偏差源敏感度分析[J]. 机械工程学报,2015,51(17):156-161.

收稿日期:2022-02-18