

航空发动机精锻叶片数字化 生产线

Digital Production Line of Precision Forging Aeroengine Blade

中航工业西安航空发动机(集团)有限公司 陈贵林 赵春蓉



陈贵林

研究员级高级工程师,中航工业首席技术专家,享受国务院政府特殊津贴,中航工业西安航空发动机(集团)有限公司总工艺师,长期从事发动机制造工艺研究、规划、管理及体系建设工作。曾获得中航工业技术奖7项,国防及省部级技术奖7项。

风扇和压气机叶片是涡扇发动机的核心零件。随着航空发动机涵道比、推重比及服役寿命要求的不断提高,航空发动机叶片已经大量采用三元流理论设计,叶片型面及进排气边形状日趋复杂,对其制造精度、检测技术提出了更为严格的要求。目前年产达数十万片,且产量逐年上升。属于唯一可以按大批量生产规

叶片数字化生产线技术集成了多门先进的制造工艺技术,主要有:五轴联动数控加工技术、快换工装应用技术、叶片硬装夹夹具设计制造技术、非接触在线检测技术、自适应加工技术、机械手物流管控技术,基于数字化制造、动态自动识别、工业以太网的信息管理技术、自动化控制技术。它的规划建设标志着叶片加工迈入数字化制造时代,实现了航空发动机叶片智能化制造的升级转变,对促进国防科技工业自主化、体系化、复合式发展具有重要价值。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.078

划布局专业化生产线的零件。随着工业化生产向自动化、数字化、智能化发展的步伐日益加速,航空发动机叶片数字化生产线建设迫在眉睫。

国外GE、R·R、MTU等知名航空发动机公司已经实现精锻叶片数字化制造技术的工程化应用,加工的产品具有极强的过程一致性和动态快速响应性,稳定、可靠的产品质量也为航空发动机的安全性、可靠性提供了重要保障。

国内无余量精锻叶片的锻造及精密加工,目前仅在中航工业西安航空发动机(集团)有限公司(以下简称西航)实现了批生产,主要以多轴数控单机加工为主要制造手段。为

了加速叶片制造技术成熟度的提升,西航开展了叶片数字化生产线的探索研究、规划建设。本文从分析三代发动机精锻叶片加工工艺入手,对比国外知名发动机公司叶片制造的加工技术优势,梳理压气机叶片工艺流程,分析工艺难点,制定解决方案,合理确立生产线建线纲领、技术指标,同时对该生产线未来发展方向进行简要概述。

叶片数字化生产线建设 必要性分析

航空发动机叶片制造技术的历史从20世纪70年代以前的普通铣床仿形加工,逐步发展到80~90年代

初期的五轴联动数控加工,以及90年代后期精益生产单元,到21世纪的数字化生产线,跨越了漫长的40年历程(图1)。

进入21世纪以来,信息技术高度发展,与制造业逐步融合,工业发展模式发生变化。为了在新一轮工业革命中占领制高点,德国推出以信息物理系统融合为核心的工业4.0,美国推出了以互联网技术为核心的先进制造技术计划,法国、日本等发达国家都在不同层面出台相应策略、计划,对高端制造业进行再调整再布局,打造国家制造业竞争新优势。面对挑战,我国推出“两化融合”及“中国制造2025”等战略规划,大力推进“中国制造”向“中国智造”加速转变,提高制造业数字化和智能化水平,实现制造工业的快速发展。

随着航空发动机性能要求不断提高,制造技术向高效、低成本、高精度、精益化方向发展,迫使传统的制造技术不断转型升级,由自动化、数字化向智能化方向发展,智能制造已成为航空发动机制造技术未来的主要发展方向。

航空发动机制造必须跨越自动化、数字化、智能化3个台阶。第一步实现自动化制造。通过使用自动化设备、工具,建设自动化生产线、生产车间,使生产过程标准化,提高制

造精度,降低人工劳动强度;第二步实现数字化制造。通过各种生产要素的电子化,借助计算机工具和网络工具对相关数据进行分析和处理,使制造过程更加高效,解放人的脑力;第三步实现智能制造。使生产过程具有自感知、自适应、自诊断、自决策、自修复的能力,由“人脑分析+机器制造”转变为“机器分析+机器制造”。实现智能制造是一个相当漫长的过程,需要航空人不断地努力与探索。

当前,我国航空发动机制造企业还处在自动化、数字化制造阶段,智能制造尚处于探索研究的初级发展阶段。

西航精锻叶片生产制造中心拥有较为先进的数控加工和测量设备。通过多年的研究和探索,已掌握了精锻叶片精密定位、多种叶型、榫头、阻尼台的数控加工技术。具备了一定的钛合金、高温合金叶片制造和研发能力,拥有国内精锻叶片重点生产线,代表了国内精锻叶片制造技术的最高水平。但是,目前和国外先进水平相比还存在下述问题:

(1)混线生产,专业化、集成化程度低。在目前的生产资源配置中,普遍存在专业化程度低、集群式布局、各种类型产品交叉生产现象严重,制约了生产效率。

(2)数控加工准备时间、辅助时间占用过多。在数控加工中程序调整、工装夹具准备、刀具准备及零件检测等占用的时间较多。据统计,加工中心主轴利用率不足40%,影响了产品加工效率。

(3)信息化程度低,周转、等待、协调时间长。每个数控机床是一个信息碎片,各环节生产、质量数据信息传递和交换依赖人工载体,无法将检测结论信息及时传送到加工设备上进行补偿修正,总体上制约了企业的高效运作,影响生产效率。

(4)无余量精锻叶片的精密加工硬装夹技术尚未突破。长期以来的低熔点合金装夹方式,大量应用于弱刚性叶片的加工。不但存在定位偏移误差、环境污染等不利因素,而且无法实现快换。如何实现有效硬装夹、减少装夹次数并实现快换功能,是突破叶片加工的难题之一。

(5)自适应加工技术应用水平较低。目前进口五轴五联动加工中心、三坐标检测机只具备简单的旋转、平移坐标系的功能,因缺少自适应加工软件的深度开发,对于无余量精锻叶片的叶型面,难以实现进排气边与叶身、阻尼台与叶身及局部超差修复与原型面的平滑转接加工。

(6)研制成本高、风险大。无余量精锻叶片毛料型面复杂、精度要求高,导致生产周期长、价值高。任何质量损失、时间损失都会给企业带来巨大的风险。

综上所述,对于大批量无余量精锻叶片生产制造而言,现有的工艺技术和生产组织模式,存在着生产效率低、研制周期长、质量稳定性差、制造成本高、能耗高等问题,这已经成为制约航空发动机产业发展的瓶颈之一。自动化、标准化、数字化的生产线作业方式是解决问题的最佳途径,并且在行业内具有较强的示范效应。因此,西航迫切需要开展精锻叶片数字化化生产线建设工作。通过信息

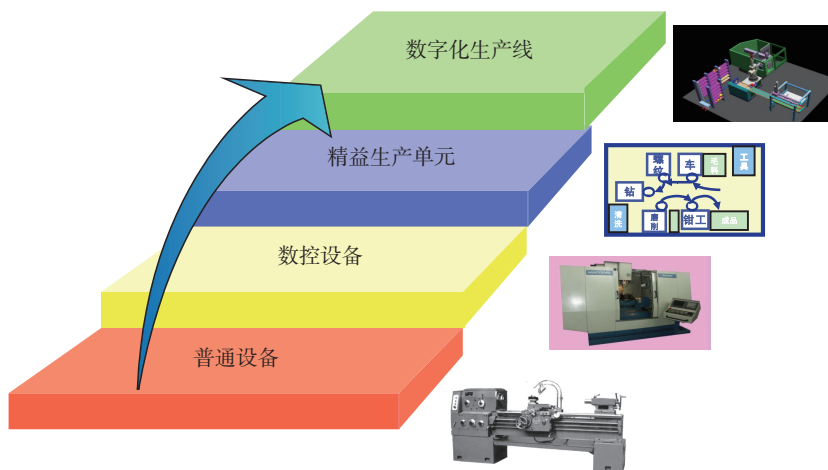


图1 航空叶片制造技术发展历程

技术和制造技术在叶片生产过程中的深度融合实现工程化应用,依托 AOS 中航工业运营管理体系强化工艺体系、质量控制体系、信息化管控等体系的创新,全面提高叶片生产制造能力和产品质量水平。

叶片数字化生产线设计要求

1 建线目标

通过国外、国内叶片数字化生产线在投资力度、建设面积、设备数量、人员、生产能力、质量等方面对比分析(见表 1),可以看出:在相似的投资力度下,集中投资比分散投资具有起点高、整体规划性强、布局完整统一、产能高、质量稳定、周期短等优点。而国内通常采用的分步实施的建设方案,建设时间一般在 10 年以上,对于投资大的项目时间会更长。而且因为投资分散、时间长、建设目标多发生偏离变化,所以整体规划性弱、布局分散、产品产能低、质量不稳定。

表1 国外、国内航空发动机叶片生产线对比

项目	国外某叶片生产线	国内某叶片生产线
投资力度	一次性 1.25A 亿人民币	15 年累计 A 亿人民币
建设面积	1.5B 万 m ²	B 万 m ²
设备数	17 条自动化生产线,4 条精锻线,共计 C/2 台设备	混线生产, C 台单独设备
人员	D 人(检验人员占总人数 1.2%)	D 人(检验人员占总人数 10%)
生产能力	3E 万件/年	E 万件/年
质量	产品一致性好,自动检测(SPC 控制)	分散度大,稳定性差(人工检测、公差控制)

综合分析认为:要确立建线目标,首先需要梳理现阶段无余量精锻叶片精密加工在技术、管理等方面存在的差距、问题及落后原因。其次,了解国外叶片先进的机械加工设备、在线数字化检测设备、自适应加工软件、质量控制软件、生产管理软件等功能及应用情况。再通过对其他行业国内外数字化生产线建线成果、经验、教训的调研,汲取众家之长,规划建设精锻叶片数字化生产线,其具体

目标确定为:生产线年产两类 5 种压气机叶片 4 万片。

2 数字化生产线实现原则

依据建线目标,该生产线目前应达到智能制造生产线的国际水平。通过“集成化、数字化、自动化、智能化”的“四化”建线原则,实现数字化生产线“自感知、自适应、自诊断、自决策、自修复”的“五自”基本功能。

(1) 实现集成化。

集成化即利用 AOS 分族技术确定叶片类型,将叶片生产过程中的主要设备和工艺集成,通过 AOS 生产管理系统将生产、质量、检测、工装、物料移栽等单机生产信息集成管理,形成生产专线。

(2) 实现数字化。

数字化即将 2D 的 CAD 产品平面模型转换为 3D 数字模型,以数字化产品模型为单一数据源,进行叶片工艺设计、无余量锻造毛坯设计制造,加工、检测工装设计制造,数字化检测,数字化工艺仿真等。将零件、

参与,消除质量不确定因素;应用自动化控制技术使各环节物流信息、制造数据、质量数据信息传递和交换自动完成。

(4) 实现智能化。

智能化即运用先进传感器、仪器,通过监测、控制、工艺优化、过程优化技术和实践的组,可自动根据产品型别、数量制定生产计划,根据毛料状态及检测结果,实现自适应加工应用、自动生成数控加工程序、自动调整生产节拍,提高设备利用率,实现工厂能量、生产率和成本的实时管理。

在数字化生产线内实现“自感知、自适应、自诊断、自决策、自修复”功能。

· 自感知。应用各类型的数字化传感器获取机械手上下料、物料移栽,系统调取程序、夹具、刀具,对刀具自动检测刀具,设备自动加工零件,三坐标测量机/白光扫描机自动检测等过程产生的数据信息,系统各动作机构的联锁、互锁信息,并传输至中央控制器。

· 自适应。将叶片在夹具上可靠定位,通过自感知系统获取叶片信息,自动调取 3D 数字模型、检测程序,对待加工型面进行数字化在线检测,经过数控系统处理后,用自适应加工软件与数模进行比对,快速重构新模型,后置处理生成数控加工程序,完成叶片自适应加工,实现叶型与进排气边缘的平滑转接。

· 自诊断。通过对线内各环节的实时监测,实现在线自动感知、识别、诊断产品型号,设备运行状态,工装型号、使用情况及数量,系统工作状态及故障点;对异常情况发出声、光、电等信号报警,并对故障模式提出诊断报告。

· 自决策。系统根据自感知、自诊断所获取的信息,将过程信息实时反馈给控制系统,由控制系统统一记录、分析、判断,依据专家知识库、高

夹具、刀具等硬件资料用二维码标识,将原来人工统计、传输、处理信息提升为控制系统可自动读取、统计、传输、分析的数字化信息,减少非加工时间。

(3) 实现自动化。

自动化即在生产过程中应用机器人或机械手,实现零件在料库、设备间自动有序传送。实现自动识别,系统自动调用指令、程序、工装,设备自动找正、加工、清洗、检测的无人工

逼真度的仿真软件提供的支持,做出决策方案及报告,并传输至中央控制器。

· 自修复。根据自决策进行自动纠正,系统将处置指令发送给生产线各控制点的执行器,进行调节控制,完成系统自修复。对超差叶片利用自适应加工技术,在超差部位重新构建3D模型,通过反复叠代,在公差范围内自动生成新程序,自动完成修复加工。

叶片数字化生产线布局与设计

1 压气机叶片特点及典型加工工艺流程分析

某型发动机精锻转子叶片为精密锻造钛合金毛坯,采用榫根定位装配,其结构特点是有带榫根、单缘板、基于三元流设计的叶型曲面、叶片厚薄不均、叶尖处仅为1mm,叶片具有刚性弱的特征。

目前,该叶片典型加工工艺流程主要包括:首先以叶片叶身定位加工榫根,再以榫根定位进行排气边加工,中间需要辅助测量工序。由于叶片的刚性不足,在加工榫根时,其叶身采用低熔点合金包裹定位,可靠性低。排气边加工采用手工抛修完成,导致叶片一致性差、合格率低。叶片检测评价方法定性多,定量少,未能实现在线测量。现行叶片的加工及检测方法较为落后,难以满足数字化生产的要求。

2 生产线难点分析

(1) 工艺技术方面。首先低熔点合金定位不稳定、基准面被包裹无法校正,冷却溶解繁琐,且存在对环境的污染,急需突破硬装夹技术,实现可调整基准、快速、可靠装夹、绿色制造;其次手工抛修进排气边,一致性差、质量不稳定,需探索数控变圆弧机械加工方法;再者传统专用工装无法实现加工、检测工装之间的快换、自动转移等功能,需设计具有统一标准接口的工装和托板。

(2) 生产管理方面。传统生产计划、调度、监管与过程控制依赖人工经验完成,工序间转换零件需要人工装卸,随着产品种类、数量增加,势必造成生产安排不均衡,物流线路交织反复,生产调度忙乱。需要寻找一套统一协调的管理方法,均衡生产、实现物流单向流动,提高生产管理效率,降低员工劳动强度。

(3) 质量控制方面。传统工序间检测属于人工检测、事后控制:即将不合格品检测结果告知工艺员,工艺员编制补加工工艺及程序,工人根据新的工艺及程序补加工零件,直至合格;其过程需要3个不同部门的人员协同完成,信息传递速度慢、且无法事前预知、预判。如何实现零件自动检测,并对超差趋势可以提前预知,实现自适应加工,将大幅提高产品的加工质量。

3 生产线功能设计

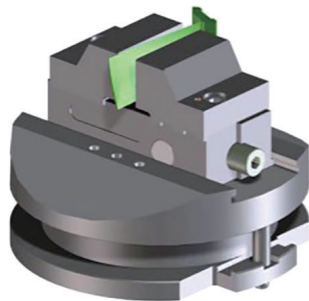
(1) 工艺技术方面。在现有PDM工艺技术管理模块的基础上,将叶片3D数字模型作为生产线加工、检测单一数据源,利用自适应加工技术实现模型重构,选取最佳加工、检测模型,实现叶片在五轴加工中心上的铣削加工。

硬装夹夹具:要求设计方案应便于机械手自动抓取,叶片装夹可靠稳定,叶片基准尺寸便于自动检测采集。

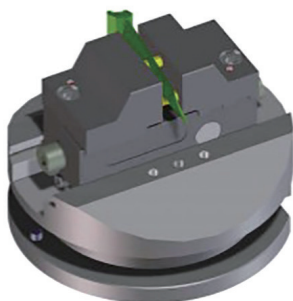
快换工装:设计统一的快换结构及快换托板并便于抓取,使不同的夹具、测具之间,能够在托板上实现机械手自动快速更换,其重复定位精度达到0.005~0.008mm。

如图2精锻叶片硬装夹快换夹具原理图及实物图所示。

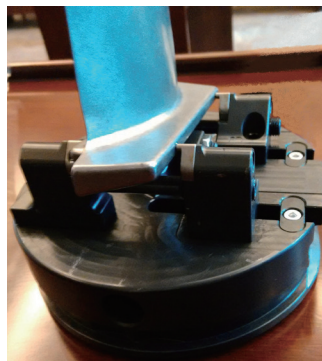
自适应加工技术:是基于数字模型的制造、修复、检测加工技术。从装载工件开始,先对产品进行三维扫描检测获取实物3D模型,应用自适应加工软件将实物3D模型与理论3D原型进行拟合、比对,加工坐



(a) 叶身夹持加工榫根硬装夹夹具视图1



(b) 叶身夹持加工榫根硬装夹夹具视图2



(c) 检测硬装夹夹具

图2 精锻叶片硬装夹快换夹具实物图

标重构,通过多次迭代,快速构建新的最佳加工、检测模型,用于加工、检测产品,以获取最佳的产品质量。主要流程示意图如图3所示。

应用自适应加工技术后,叶片只需可靠装夹即可。通过叶片进排气边附近区域的光学测量,即可根据与3D数据源型比对,通过反复迭代,快速重新构建加工、检测模型,获得进排气边三元流曲面与精锻表面平滑过渡衔接,高度一致性表面和尺寸形位高精度检测评价,基于原材损失最小、用户可自定义边界的快速修整、修复,自动视觉识别特征、缺陷并作

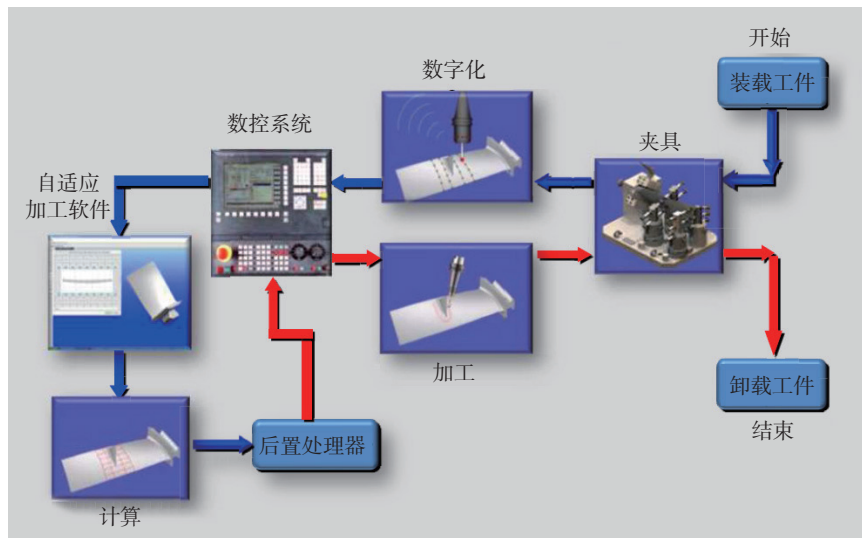
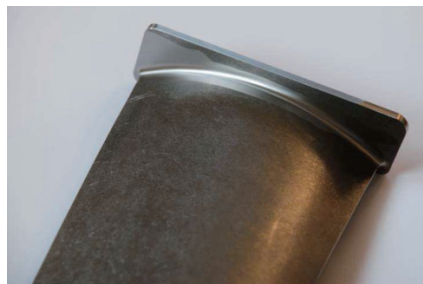


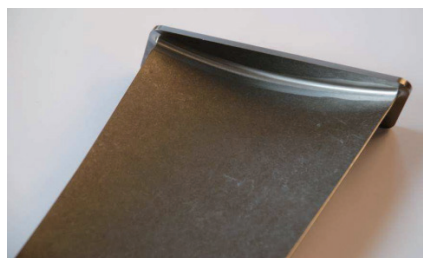
图3 精锻叶片自适应加工技术流程示意图

出决策等功能。图4为叶片自适应加工实物效果图。

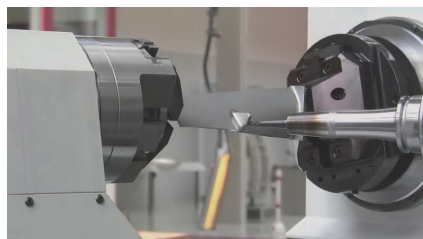
(2)生产管理方面。根据AOS运营管理体系要求,结合公司MES生产管理系统,建立新的生产运营系统模型。从原材料采购供应、生产计



(a)叶背自适应加工效果图



(b)叶盆自适应加工效果图



(c)阻尼台自适应加工效果图

图4 自适应加工实物效果图

划安排、产品工艺布局、物流通道设计、生产节拍控制、标准化作业指导书、生产现场按灯系统等各个环节对产品交付提供高效运营模式。

(3)质量控制方面。传统叶片测量大多采用专用测具,检验员完成工序检验和最终检验,数字化生产线要求采用三坐标或白光扫描实现在线检测,模型快速重建与精度评估。生产过程质量控制新增SPC自动监控功能,自动监控质量信息、分析原因并及时报警,见图5。

通过采用自动SPC控制技术,将事后处理改为事前预防。确保叶片进排气边轮廓度、表面粗糙度、位置度达到设计要求;确保生产线叶片加工一致性、产品合格率达到95%以上,加工过程能力指数 $C_p \geq 1.33$ 。

4 数字化生产线总体布局

根据压气机叶片加工流程,设计“U”型线布局,如图6所示。该生产线主要由8大单元组成:生产线监测

与过程控制单元、机器人传送与控制单元、生产线物料库单元、人工装卸单元、榫根加工单元、进排气边加工(叶尖铣切)单元、清洗烘干单元、三坐标/光学测量单元。

5 数字化生产线设计方法

综上所述,数字化生产线布局设计应包括:

(1)确定产品。优先选取可大批量生产的加工对象。批量越大,生产效率提高越明显、单位建设成本越低。

(2)确定工艺。按照GJB7688《装备技术成熟度等级划分及定义》选取技术成熟度8级(含8级)以上的工艺方法。对产品特点及典型工艺流程进行分析,初步确定生产线涵盖工艺路线内容及初步的设备布局方案;根据生产线在工艺技术、生产管理、质量控制3方面存在制约生产效率、产品质量的因素,制定相应的解决方案并纳入到生产线功能设计之中。通过优化工艺方法、工艺过程,确定主设备加工节拍。

(3)确定产能。根据产品加工节拍和年度生产纲领,按照短板主设备生产能力配备生产线其他设备并留出生产能力安全空间。即:设备数量 = 实际加工时间 \div 5350 \div 80% (注:5350为年时基数,单位为h)。

按照精益生产原则,设计设备布局、物流网络、物料存取方案。

(4)确保冗余。生产线内各单元设备既可联网成线,也可任意组合或独立使用,即便个别设备环节故障也不会导致整条线的完全瘫痪,具有足够安全冗余。必要时可在线外配

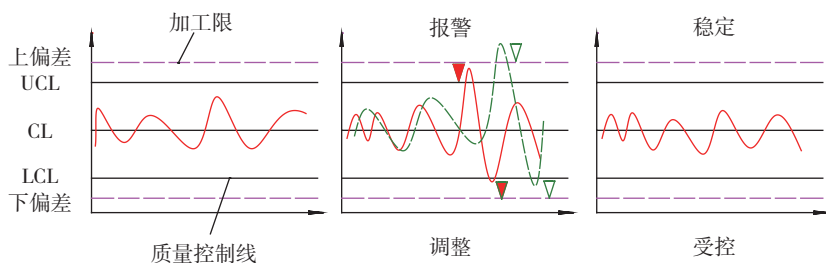


图5 SPC质量预警控制图

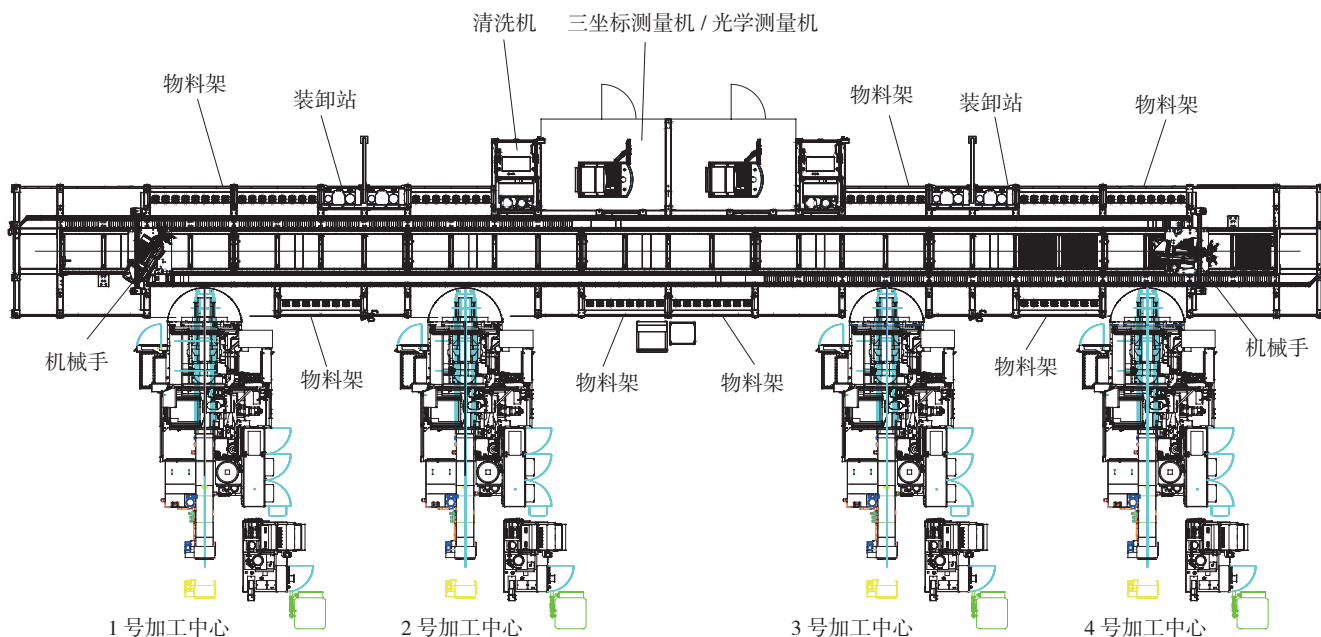


图6 精锻叶片机械加工数字化生产线示意图

置应急工艺设备。

叶片数字化生产线预期效果

根据生产线设计方案的建线目标、功能设计和单元构成与布局等方面的要求,现已完成最终结构设计和平面布局设计,叶片关键工艺难题的突破,叶片白光扫描检测评价方法等技术工作。

(1)生产线按“U”型封闭排列。工装库、半成品库、机械手2台、加工中心4台、三坐标/白光测量机2台、清洗烘干机2台全部封闭在线内,仅在线外安放装夹工作站等辅助装置。

(2)生产线内实现全自动化。通过中央计算机控制、管理整个生产线,自动完成生产安排,加工节拍分配,调用夹具、刀具、程序,SPC监控、机械加工、三坐标/白光测量、检测报告、自适应加工和异常报警等功能。

(3)生产线年产量4万件,合格率达到95%以上。年产量按阶段满足相应设计要求,加工过程能力指数 $C_p \geq 1.33$ 。

目前,该项目技术状态已全面确定,进入实施阶段。为最大程度规避

风险,设立了预验收、终验收两级验收方式。在预验收阶段,要求生产线应完成单件生产、少量零件连续生产及所有功能试运行;在终验收阶段,要求生产线应完成小批量、批量零件连续生产及所有功能正式运行,稳定、连续生产时间不小于2个月,每天工作24h,每年工作时间不少于300天。

未来叶片数字化工厂展望

目前,智能制造已成为世界制造业发展的主流方向,世界上主要工业发达国家正在大力倡导和推广。智能制造必将催生企业生产组织模式的变革。数字制造和设计技术是智能制造的基础和中枢。叶片数字化生产线的成功实践,积累了专业化建线经验,为数字化工厂在国内航空制造业的建设积累了经验,打下了坚实基础。

根据叶片中心现有技术及设备基础,规划精锻叶片数字化工厂未来的能力建设。数字化工厂由虚拟车间和物理实体车间构成。其中实体车间部署有大量的生产线、加工

设备、检测设备等,为制造过程提供硬件基础设施与制造资源。虚拟车间则是在这些制造资源基础之上,对整个制造过程进行全面的建模与验证。通过建设车间工业互联网,升级改造MDC、MES、ERP、PLM等系统,打通虚拟车间与现实物理车间的数据传递渠道,实现制造过程中各系统与设备、人员、产品之间信息的交互。在现有叶片数字化车间建设基础之上,完成叶片机加智能生产示范线的升级改造,后续逐步推广开展其他生产线建设工作。

结束语

该数字化生产线是一条集五轴数控铣加工、自适应加工、清洗、在线检验、机械手物料移载为一体的封闭式数字化生产线。利用信息化技术集成零件、刀具的数字式管理,自动优化生产节拍、最大限度减少人工参与其过程,将极大提高精锻叶片生产效率和质量稳定性,它的建成将成为国内首条航空发动机精锻叶片数字化生产示范线,叶片数字化工厂建设也将为期不远。(责编 叶枫)