

飞机结构件智能数控加工关键技术研究现状

Key Technology for Intelligent NC Machining of Aircraft Structural Parts

中航工业成飞数控加工厂 牟文平 隋少春
南京航空航天大学机电学院 李迎光



牟文平

高级工程师,中航工业成飞数控加工厂高级工程师。长期从事飞机结构件数控加工技术及数字化集成制造技术的研究与应用工作,发表相关学术论文 15 篇,其中 SCI/EI 索引论文 7 篇。多次作为中方专家代表参加国际标准化组织机床测试条件技术委员会组织的国际标准化会议,为中国 S 形试件国际标准的立项和推进作出了重要贡献。

根据英国 Warwick 大学与 ICF 国际咨询公司的统计数据,2012 年全球飞机结构件的制造费用约占整机制造费用的 27%,统计数据表明的制造成本分布情况如图 1 所示。作为飞机的主要承力部件,飞机结构件

智能制造的目的是在满足个性化需求的同时,还要达到缩短制造周期、降低制造成本、减少环境污染以及降低能源消耗的目的。因此,研究飞机结构件智能制造相关关键技术,打造飞机结构件智慧加工工厂,对飞机制造行业具有重大而又现实的意义。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.13.056

在整机制造费用中占据很大的比重。

我国航空工业起步较晚,作为飞机结构件加工的主要制造装备是在 20 世纪 90 年代以后才在中国航空工业开始得到初步应用。进入 2000 年以后,五轴联动机床以及高速切削机床开始得到推广应用,对应的数控编程及加工仿真的技术水平显著

提高,加工效率及质量也得到显著提高。特别是信息化技术的应用,使飞机结构件加工行业的生产力得到了进一步提升,航空工业的数控机床设备利用率不断提高,先进数字化车间的平均设备利用率已经达到 60%,逐步接近国外同行水平。大量采用先进数控机床的飞机结构件制造行业

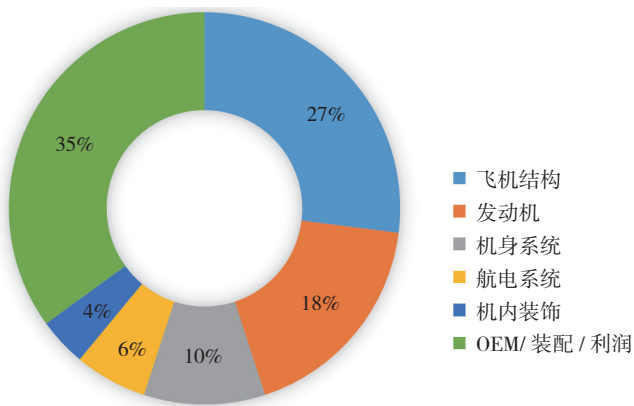


图1 2012年飞机行业制造费用分布情况

自动化程度较高,具备了实施智能制造的基础条件,但与国外先进制造企业相比,仍存在着巨大差距。

飞机结构件的生产是典型的多品种、小批量生产,特别是军用飞行器,由于对性能要求的不断提高,研制、生产过程中往往伴随大量的设计更改。智能制造的目的是在满足个性化需求的同时,还要达到缩短制造周期、降低制造成本、减少环境污染以及降低能源消耗的目的。因此,研究飞机结构件智能制造相关关键技术,打造飞机结构件智慧加工工厂,对飞机制造行业具有重大而又现实的意义。

面临的挑战

与其他行业相比,飞机结构件的加工具有明显的特点与难点。随着飞机性能要求的提高,飞机结构件大量采用整体化设计,这使得单个结构件的尺寸越来越大,集成的功能特征越来越多,结构也越来越复杂。重型战斗机的机身整体框尺寸达到4000mm×2000mm×200mm以上,大型运输机的整体壁板可能长达20m。在工艺设计阶段,一些大型零件的数控编程周期长达1~2个月,工艺设计质量严重依赖工艺人员的经验。飞机结构件不仅尺寸大,而且精度要求高,在加工过程中,由于需要去除大量材料,材料去除率达到90%以上,故零件容易变形,变形控制难度较大。以钛合金为代表的难加工材料大量应用于飞机结构件,加工难度大,加工周期长,刀具磨损快,因为刀具破损导致的零件烧伤等状况时有发生,质量控制难度大。这些工艺特点决定了目前在飞机结构件制造过程中,仍然非常依赖人员经验,且加工时很多情况下仍然需要工人的监控和干预,这就增加了智能制造在飞机结构件制造行业的实施难度。智慧加工工厂的目标是针对订单或产品的变化能够自动分析自身资源情

况,实现生产系统的快速自组织、自优化,达到对订单的快速响应。要打造飞机结构件智慧加工工厂,需要面临以下挑战。

(1) 数控编程的效率与质量的提升。

飞机结构件的数控加工程序编制工作量非常大,大型铝合金结构件的编程时间与零件实际加工时间的比例为10:1。在过去的工艺设计过程中,零件的工艺路线往往是固定的,即一个零件只有一条工艺路线和配套的数控加工程序。当机床出现故障或订单变化导致需要调整工艺路线时,由于机床结构、性能以及数控系统的不同,往往需要重新编制数控加工程序,这就大大降低了生产调度的柔性,从而无法满足智能制造的快速自组织、自由化的目标。因此,飞机结构件智能制造对数控编程提出了新的挑战。

(2) 设备性能的实时评估与故障预测。

智慧加工工厂的生产调度系统不仅要根据生产的任务量对产品的工艺路线进行决策,还要保证设备的性能能够满足产品的制造需求。数控机床的精度会随着使用的年限增加而下降,如何在工艺路线决策过程中快速地评估出设备的性能是否满足产品制造的需求,也是智慧加工工厂必须解决的问题。设备利用率是衡量工厂综合能力的重要指标,而机床的故障则是影响设备利用率的重要因素之一。智慧加工工厂需要对设备的健康状态进行实时监测,以便设备工程师对机床进行预修或维护,从而减少故障停工时间。

(3) 加工过程的无人工干预。

当前在飞机结构件加工过程中,仍然有大量的人工干预存在。比如,为控制零件的加工变形,往往需要通过调整装夹状态、多次修正基准来满足变形控制要求;一些关键尺寸还要依靠工人通过过程检测来控制;一些

难加工材料零件在加工过程中需要工人观察刀具状态来避免铣削烧伤等。这些需要人为干预控制的环节在未来的智慧加工工厂的运行中,都要采用自适应加工工艺方法来控制。

(4) 智慧加工工厂生产管控中心。智能生产管控中心是智慧加工工厂的大脑。智能管控中心需要能够获取工厂内部所有资源信息、物流信息以及设备运行状态信息,这就需要建立庞大的信息感知系统来实现实时信息和获取;另一方面,智能管控中心要能够根据掌握的信息结合工厂订单的情况自动地进行分析处理,协助生产管控部门实现动态的资源调度和生产组织,并依据决策结果驱动工厂现场执行层进行生产。

关键技术研究现状

(1) 智能数控编程技术及系统。

飞机结构件加工特征多,包含大量自由曲面、相交特征和特殊加工区域,制造精度要求高,加工难度大。飞机结构件加工工艺规程编制过程中需手工处理大量的图形信息、数据信息、文字信息,对工艺人员的要求高。随着整体薄壁件、特种材料件的增多,工艺设计工作量大幅增加,飞机结构件的工艺加工方案设计日益成为影响飞机结构件加工周期的重要瓶颈之一。特征技术是实现CAD/CAPP/CAM有效集成的方法,对提高企业生产组织的集成化、自动化程度大有裨益。基于特征的工艺决策技术以特征为信息载体,能有效集成加工知识和专家经验。智慧加工工厂对工艺路线的很高的柔性需求,要求在工艺路线确定后,能够依据零件MBD数模和制造资源的约束快速地完成数控加工程序的编制,而基于特征的数控编程技术是实现全自动、高效数控编程的有效技术手段。

李迎光等人提出了一种面向复杂结构零件的用户自定义加工特征建模方法和面向MBD数模的加工特

征自动识别方法,并开发了基于特征的编程系统,实现了复杂结构件零件的智能编程。该系统首先对 MBD 数模信息进行分析提取,自动识别出加工特征及其制造公差等信息,依据知识库中的典型工艺模板自动进行工艺规划,最终在制造资源库、切削参数库等的支持下自动生成刀轨。该系统与商用 CAM 软件相比,编程效率提高 3 倍以上,大幅缩短了数控编程周期。目前该系统的数控程序自动生成率还达不到 100%,部分特征还需要进行人机交互操作来识别。随着系统功能的扩充和知识库的完善,未来数控编程的任务将全部由计算机系统来完成,编程效率将显著提高,从而满足智慧加工工厂工艺路线高度柔性的需求。而工艺人员的工作重心也从数控编程转化为对工艺知识库的更新、维护。

(2) 数控机床性能评估与故障预测技术。

智慧加工工厂在决策零件的工艺路线时,首先要考虑零件适合在什么样的数控机床上加工,以及机床精度是否满足需求,这就需要对数控机床的性能进行评估,其中机床的精度评估则最为关键。采用传统方法,要完成一台机床精度的检测需要花费相当长的时间,五轴机床的全方位精度检测可能耗时 1 周,因此,实际应用过程中无法经常对机床精度进行检测。德国 DST 公司开发了一套机床精度自诊断系统(SQS),该系统通过运行一套预先设定的标准测试,可以快速地、对机床自身的空间精度及五轴联动精度进行自动检测和补偿,并对补偿后的空间精度进行计算和评估。该系统在机床工作台的 4 个角分别放置一面激光反射镜,反射镜镜面与机床行程空间长方体的对角线垂直;首先对线性轴运动的空间精度进行检测,在此过程中,机床先换上一个带激光发射接收装置的摆角头来执行测试程序,测试时激光头

通过调整摆头角度以对准反射镜面,并沿着与镜面垂直的对角线来回移动,通过测量移动过程中激光头与镜面的距离变化与机床坐标轴移动距离变化的差异来检测空间误差,当 4 个对角线完成测试后,则可以完成线性轴的空间精度检测与补偿;针对五轴联动摆角头的精度检测,则是在换上摆角头后采用 R-TEST 进行检测,R-TEST 检测时,通过运行预先设定的旋转轴运动程序和检测球头在此过程中的位置变化,来计算旋转轴的姿态误差,通过一定的算法实现误差的估算与补偿。DST 开发的这套 SQS 系统可以在 30min 内完成对机床精度的自动检测,因此可以定期执行检测,以跟踪机床精度的变化,将其与车间信息系统进行集成,则可以为零件加工时选择机床提供决策依据。

数控机床本身是一个复杂的系统,机床利用率的提高对机床的故障预测和预先维修提出了更高的要求。成飞公司开发了一套面向机床关键部件的状态监测和故障诊断系统,通过网络化传感器系统,实时采集机床运行过程中的振动、电流、噪音等信息,并基于专家知识库和神经网络系统对信息进行分析处理,实现对关键部件健康状态的预警。当系统监测发现异常时,将向设备维护人员实时推送报警信息,以及结合专家知识库给出的故障预测信息,提醒设备维护人员进行设备检查和维护。一方面,可以避免在设备出现问题的情况下继续加工零件造成产品质量故障和设备的进一步损坏;另一方面,可以提醒设备维护人员提前准备维修备件,以减少由于设备故障造成的停工等待时间。当前的大部分数控机床,由于设计时未考虑传感器安装设置,所以该技术推广较为困难。用于未来工厂的数控机床将自带标准的网络化传感器,数控系统也将提供更加丰富的信息收集接口,从而实现对机床更加全面的健康状态监测与诊断。

(3) 自适应加工工艺技术。

自适应加工工艺技术主要解决的是加工过程中的人为干预问题,当前针对自适应加工工艺的研究主要集中在以下几个方面:

检测加工一体化技术:检测加工一体化技术主要是在零件装夹或加工完成后,利用机床自带的检测系统对零件的空间位置及特征尺寸进行测量,完成测量之后,通过分析误差分布情况来重新调整加工坐标系或加工程序的技术。DELICAM 开发了一套利用机床接触式测头的检测加工一体化系统,该系统在零件装夹完成后对毛坯的检测,根据检测结果对加工坐标系进行调整,或在加工后对零件精度进行检测,根据误差情况调整加工程序进行补偿加工,从而实现对复杂零件或复杂特征的全自动加工。北京航空航天大学的赵慧洁等人开发了一套在机非接触式检测系统,与接触式检测系统相比,该系统可以实现复杂零件的全三维检测,获取更加丰富的误差分布数据,从而支撑更加精细化的自适应加工程序优化。但该检测系统目前在标准化、工程化还存在较大的差距,因此,该技术在行业的推广还有较长的路要走。

监测加工一体化技术:与检测加工一体化技术不同,监测加工一体化技术是在零件加工过程中实时监测需要的信息,从而实时决策是否需要进行调整或优化的技术。典型的应用如 MODIG 公司开发的用于型材类零件加工时的随动装夹技术,在加工过程中通过监测刀具的位置信息,结合数控程序信息来判断是否需要松开夹持模块以实现刀具的避让,在刀具离开后又能重新闭合夹持模块来实现零件的夹紧。镜像蒙皮铣工艺则是另一种应用,在加工过程中通过超声测厚装置监测蒙皮厚度,并将厚度信息反馈到机床系统中,从而对加工程序进行动态调整,来满足蒙皮加工厚度的公差要求。南航李迎

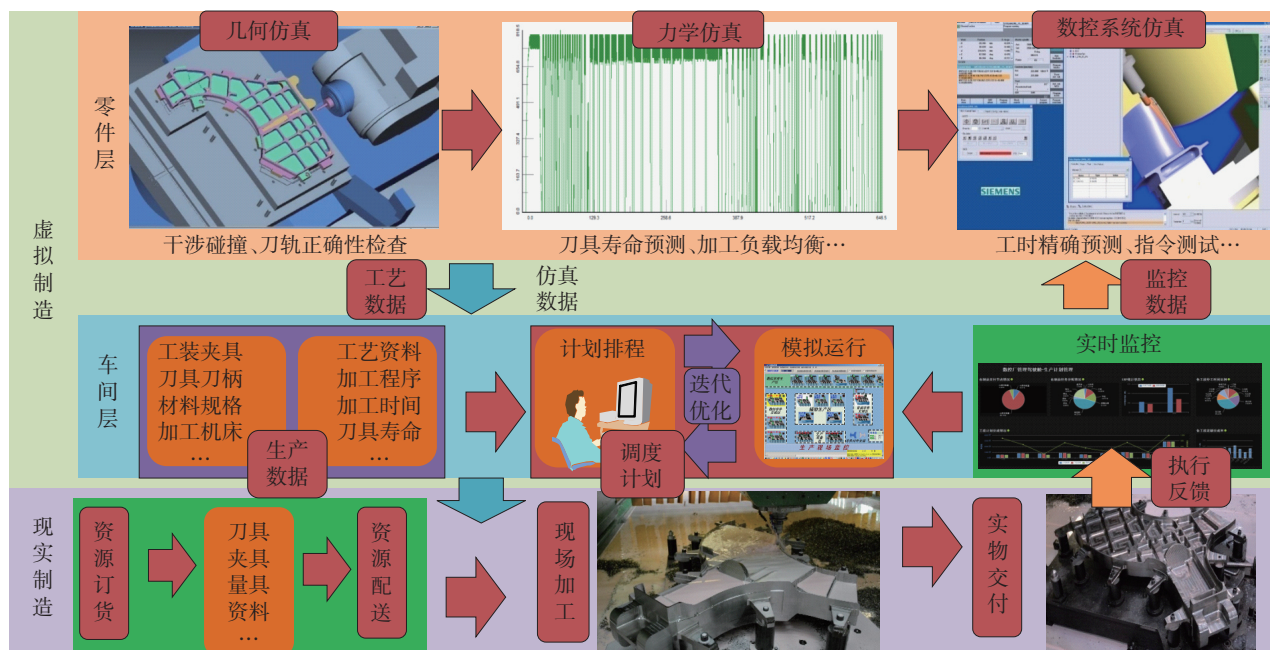


图2 虚拟工厂与现实工厂的关系

光等人提出了一种基于监测加工一体化的航空大型零件低应力装夹的加工模式,加工过程中装夹系统自适应调整,允许零件变形释放应力,实时监测零件变形,自动调整特征加工策略,保证加工完成后自由状态下工件变形量合格。该技术实现了由传统的反复修面、多次手动装夹到智能自适应装夹的转变。

监测加工一体化技术还有一种应用是针对刀具加工状态的监控。飞机结构件加工特征复杂,刀具在加工过程中实际切削余量不断变化,刀具寿命预测困难。通过在主轴或工作台上安装传感器来监测切削状态信息,可以实现对磨损或破损状态的预测,从而实现在加工过程中自动换刀、预警或加工速度调整等。目前,刀具状态监测的手段包括采用力学传感器、振动传感器、声发射传感器、功率传感器等,其中振动传感器和功率传感器由于部署成本低和通用性强,在工业界应用比较广泛,比如德国的 ARTIS 自适应加工系统就主要采用这两种传感器。但由于飞机结构件加工特征形状复杂,已有系统针对飞机结构件加工的刀具状态监测

仍然面临许多困难,需要用户对自身产品特点做大量的试验设计和开发才能真正起到作用。

(4) 智能生产管控技术。

智能生产管控中心是未来智慧加工工厂的大脑,它将负责工厂所有资源的统一调配和管控。未来工厂的智能生产管控中心需要建立与实际工厂同步运行的虚拟工厂,如图2所示。当新的订单到来时,智能生产管控中心在决策任务过程中首先将任务在虚拟的工厂进行模拟加工运行,以确定调度排产的有效性;另一方面,智能生产管控中心还将不断获取实际工厂的运行信息来驱动虚拟工厂的运行,管控中心将依据虚拟工厂的运行反馈情况来决策对现实工厂的调度控制。西门子成都工厂构建了工业 4.0 管控系统的原型,该系统的运行使得其宽敞的厂房里只有二三十名工人在工作,自动化程度惊人。传统工厂如果要实现混线生产,极易出现差错,而西门子全集成自动化解决方案在很大程度上替代了人类的大脑、视觉和手臂,大量工作由后台数据库和计算机完成。成飞数控加工厂在飞机结构件制造行

业内率先开发了车间级的智能管控中心雏形,该管控中心构建了与现实车间同步运行的虚拟车间,基本实现对车间内部设备运行数据、生产状态数据的实时监控,从而对生产资源数据、设备运转效率、工厂经营指标等开展统计、分析、优化、决策。

结束语

德国工业 4.0 背景下的智慧工厂的主要特征是实现复杂产品的高度定制化生产,并能根据订单需求实现生产系统的自组织、自优化。飞机结构件的生产是典型的多品种小批量生产,这与工业 4.0 的生产模式是高度一致的。智慧加工工厂是以信息高度集成的自动化生产为前提,目前国内大多数工厂离这一要求还有较大差距。尽管行业内针对飞机结构件智慧加工工厂相关的关键技术都开展了大量的研究,但还未见完整的飞机结构件智慧加工工厂的案例。因此,当务之急是打造一个智慧加工工厂的样板,从而推动相关标准体系的建立,才能实现智能制造在飞机结构件制造领域的落地实施。

(责编 玲犀)