

航发产品适应性数控加工技术 探索研究

张森棠,李美荣,贺芳,赵恒,马明阳

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司,沈阳 110043)

[摘要] 基于柔性制造和适应性控制的适应性数控加工技术在高性能航空发动机和延寿大修机产品的加工中具有显著的优势。适应性控制要素包括余量、误差、精度、切削速度、进给速度、切削力等,在数控加工过程中主要体现在工件空间几何位置适应性控制、零件装夹定位适应性控制、加工切削载荷适应性控制和机床生产运行适应性控制4个方面。对航空发动机产品适应性加工工艺及其关键技术做了综合阐述,并探讨了适应性数控加工的应用及控制要素。最后指出适应性数控加工技术是提高数控加工效率和精度的有效方法,智能控制的适应性数控加工技术将成为智能制造的重要发展方向。

关键词: 适应性控制;航空发动机;数控加工;装夹定位;余量优化;智能制造

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.042



张森棠

研究员级高级工程师,主要研究方向为精密加工工艺、工艺仿真、工厂自动化技术和适应性数控加工系统,长期从事航空发动机关重零部件的高效能数控加工和机加工工艺综合仿真优化应用研究工作。

航空发动机制造业正面临着前所未有的挑战。新一代航空发动机的涵道比、推重比,以及服役寿命和可靠性等性能要求不断提高,使产品生产制造要求比以往更加苛刻。在此前提下,数控加工面临的问题越来越多,需要加以控制的过程或对象日趋复杂。单纯的自适应控制虽然可在一定程度上使问题得到缓解,但由于此类控制技术在很大程度上受制于机床-夹具-刀具-工件系统本身诸多不可控因素,并未从根本上解决问题。这些需求迫使航空发动机制造业应用新技术新工艺,运用科学方法和手段对零件制造的过程进行全面的监控和分析,以达到降低生产成本和提高加工效率之目的。

适应性控制工作原理及研究现状

1 适应性控制与机械加工

适应性控制是使系统顺应客观条件的变化而进行调节的过程。适应性一般是指:系统按照环境的变化调整其自身,使得其行为在新的或者已经改变了的环境下达到最好或者至少是容许的特性和功能。多年来,机械加工适应性控制研究集中在两个领域,一是切削效能适应性控制,它包括优化适应性控制(Adaptive Control for Optimization, ACO)和约束适应性控制(Adaptive Control for Constraint, ACC),其主要任务是在保证质量的前提下提高生产效率或降低成本。ACO追求一种最佳的加工过程指标,如加工时间、切除率或表面质量中某项指标达到最优;ACC则是要保持某种约束的恒定,如扭矩、切削力或切削功率,以提高加工效率、保持加工过程稳定及保证加工质量,ACC目前在设备上的应用相对较广^[1]。二是几

何适应性控制(Geometrical Adaptive Control, GAC),几何自适应是随零件的形状或位置变化而进行的加工,也称为适应性加工,其主要任务是提高零件的加工准确度。到目前为止,适应性控制系统大多为GAC和ACC系统,可靠性高,其中大多数ACC系统只调节进给量。机械制造系统的适应性控制如图1所示。

2 国内外研究现状

目前,国外主流发动机公司和数控机床生产商在自适应数控加工技术方面开展了相关研究工作并取得了一定进展。负责向英国罗罗公司和美国普惠公司提供加工设备的Hamuel与BCT GmbH公司合作开发了钛合金宽弦空心叶片数控加工成套技术,并为STARRAG公司机床产品植入了专门的数控加工软件系统。同时罗罗公司在宽弦空心叶片加工与修理需求的推动下,与Delcam及TTL公司合作,花10年时间开发了包含多轴数控加工、6轴砂带磨削以及叶片快速测量的成套加工技术,研究成果已成功应用于罗罗公司全部Trent系列叶片以及OGV叶片的制造过程^[2-3]。同时,英国帝国理工大

学Mihailo Ristic博士系统地研究了自适应加工方法涉及的各项关键技术,并在测量、模型重构、修正及配准算法方面发表了数篇学术论文。

国内在自适应加工技术研究方面起步较晚。西北工业大学的学者研究了精锻叶片自适应加工中的进排气边模型重构技术^[4-5]。北京航空航天大学学者基于航空叶片设计特征参数,提出了面向自适应数控加工的逆向建模技术^[6]。大连理工大学和广东工业大学的学者在叶片等航空零件自适应维修方面开展了研究工作并取得相关进展。总的来说,当前国内在自适应加工技术方面的研究集中在测量和模型重构等技术上,还没有出现成套的、能够面向实际应用生产的自适应加工软件^[7-8]。

航空发动机零件适应性加工工艺分析

航空发动机制造领域适应性加工技术需求来自于新产品研制和已使用零件的再制造,主要加工对象包括机匣、燃烧室、整体叶盘、空心风扇叶片、涡轮叶片、导流叶片冷却孔、3D打印结构件等航空发动机关键重

要零部件。

1 航空发动机适应性数控加工主要零件

通过对航空发动机新产品和再制造产品梳理,目前对适应性数控加工需求较为迫切的产品大致可归纳为4类:3D打印零件、大修机再制造产品、线性摩擦焊联结零组件和钣金焊接类结构件。

(1)3D打印零件:典型零件为整体机匣、燃烧室组件和其他结构件。此类零件采用了3D打印成形新工艺,多属于大型薄壁结构零件,成形后零件形状精度、位置精度控制难度较大,为保证壁厚以及配合件高精度连接的要求,对零件配合及连接部位的位置、壁厚均有较高的技术指标要求。

(2)大修机再制造零件:典型零件为机匣、锥齿轮、叶片等。机匣零件主要为安装座、凸台等部位焊后补加工和配合零件组装后再加工,锥齿轮零件主要为齿面、齿尖倒圆等部位修复加工,叶片为叶尖部位、进排气边缘受损部位补加工。

(3)线性摩擦焊联结零组件:典型零件为焊接式整体叶盘。由于整体叶盘采用了线性摩擦焊焊接工艺将盘体与叶片联结成一体,需要对焊缝区域进行清根加工处理。

(4)钣金焊接类零件:典型零件为焊接机匣、内流道(后段/前段)、加力筒体等。此类零件需要对有内圆、端面孔、花边焊缝等区域进行加工处理。

2 航发零件适应性加工工艺分析

(1)零件实际位置与理论位置有明显偏离,常规工艺方法无法准确确定其空间几何位置和余量;

(2)待加工区域或部位的材料性能与零件基体的材料性能有较大差异;

(3)零件待加工部位或区域结构复杂、形状多变,待加工区域或部位多为精密连接配合部位,加工精度

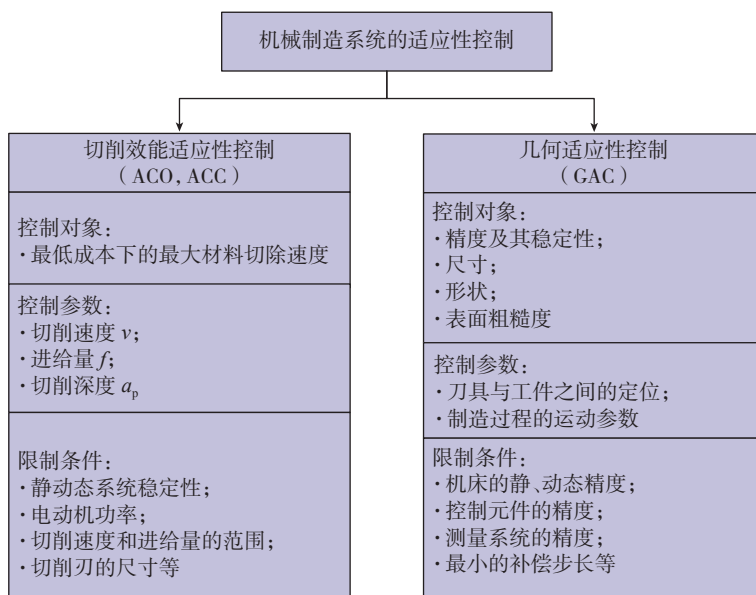


图1 机械制造系统中的适应性控制

Fig.1 Adaptive control in mechanical manufacture system

和表面质量要求较高；

(4) 适应性加工既可能是零件整体加工,也可能是零件局部加工,加工方式以铣、钻、镗方式为主；

(5) 零件多为弱刚性薄壁零件,实际加工时通常有严格的表面粗糙度、尺寸公差、形位公差等技术指标要求。

数控加工的核心在于构建稳定的工艺系统,而由于以上问题的存在,使得工件的空间几何位置和形状难以定义、工艺参数难以量化、加工过程难以控制,因此要实现航发零件适应性数控加工,就必须解决4方面的技术难题:

(1) 由于毛坯形状和位置不确定而带来的首件或单件能否加工出成品的问题；

(2) 实际加工部位与零件非加工部位能否光滑转接的问题；

(3) 零件刚性较差所带来的加工表面颤振现象能否抑制及控制的问题；

(4) 加工不确定因素较多所带来的零件加工主要技术指标无法保证的问题。

通过以上分析,可以看出这些结构件有两个共同的特点:一是按现有制造工艺几乎不可能实现小批量生产,而必须以单件生产方式为主;二是零件严格的加工精度、形状、位置要求需要最终的数控加工手段来保证。这就要求零件加工控制应具有柔性化、适应性的能力,在这种前提下,以柔性制造和适应性控制为核心的适应性数控加工工艺有利于从技术层面提高产品加工效率和加工质量,并成为航空发动机的关键技术。

航发产品适应性加工流程和系统架构

1 航发产品适应性加工流程

航发产品的适应性加工包括工艺模型创建、工件在线检测、模型比

对及数据处理、数控加工、实时工况监测和生产运行监控等环节,集成应用了数字化检测、模型重构及配准、装夹定位及余量优化、适应性数控加工等多项技术,是面向航空发动机产品的数字化制造技术背景下的一种系统解决方案。

2 航发产品适应性加工系统架构

根据航发产品适应性数控加工流程,适应性数控加工系统包括了4方面的功能,分别是适应性加工工艺设计、数字检测及数据获取、适应性加工数据处理和适应性加工。航发产品适应性数控加工流程及其工艺系统对应逻辑关系如图2所示。

(1) 适应性加工工艺规划设计可直接依托企业已有CAD/CAM/CAE集成环境进行,主要完成工艺模型创建、数控加工工艺规划及设计、NC代码生成及管理、工艺仿真及优化等业务工作。其主要功能不仅包括数

控加工区域模型的建立,生成的工艺数据是适应性加工的原始数据源,并作为数控加工工艺系统的输入端。

(2) 数字检测及数据获取有两种选择,分别是机床自带测量装置和机外测量装置,可以是接触式测量方式,也可以是非接触式测量方式,主要完成加工前的工件数据检测,获取的当前加工零件几何数据信息通过网络传输给模型比对及数据处理模块。

在硬件方面,机床必须配备测头套件和在机检测软件工具。目前,机床控制系统均有在线检测模块包,具有检测程序、评价评估等功能,能够满足工件简单特征或单一特征的检测与标定。根据航发产品适应性加工的特点,在线测量包括加工前的工件在机床定位位置和加工部位空间位置测量,若机床控制系统自带的检测及标定模块无法全部满足以上检

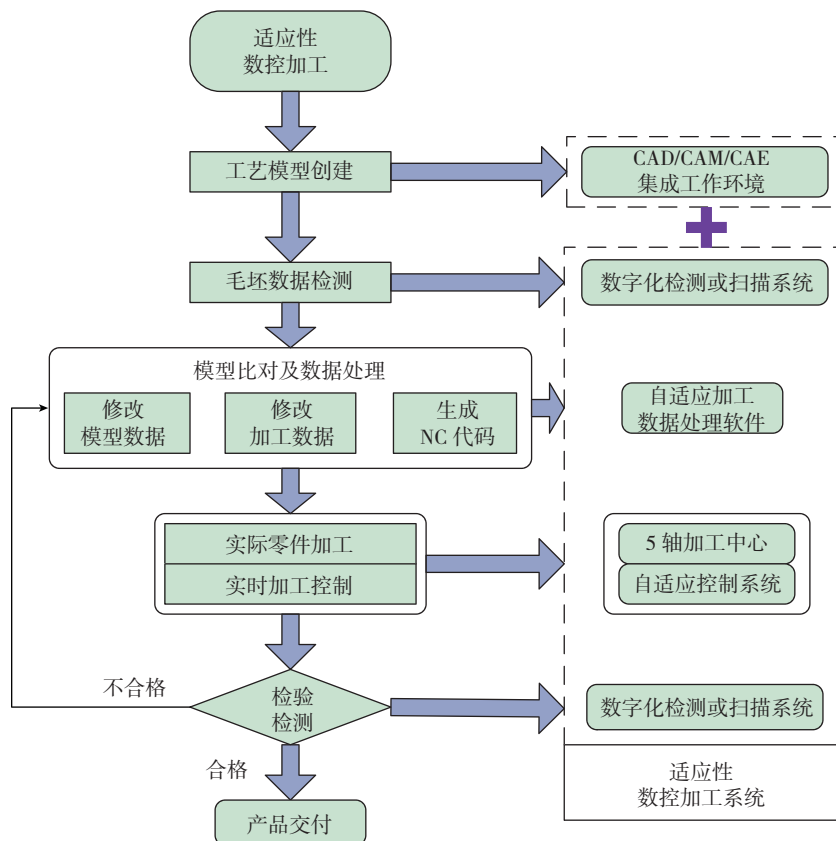


图2 适应性数控加工及其工艺系统对应逻辑关系

Fig.2 Adaptive machining and adaptive NC machining system correspond to logical diagram

测要求,需要配备专业的机床在机检测工具,该工具需具备几何特征检测、形位公差检测、曲面检测、边缘检测、截面检测等具体检测功能。

(3)模型比对及数据处理作为适应性加工工艺数据的中央处理器,其原理是通过直接对比检测数据与原始模型数据,采用逆向工程中模型重构的方法建立待加工零件工艺模型、重新建立零件加工坐标系和重新生成数控加工 NC 代码。涉及必要的模型重构与分析、工件定位与余量优化、工艺模型变形创建、适应性变形量综合补偿、数值模拟分析等使能工具开发及定制,其核心是余量优化模型、工艺变形模型以及质量检测模型的建立,其输出结果是机床实际加工零件的 NC 代码,并以此作为控制机床数控加工的工控数据。

该模块包括硬件和软件两部分,硬件是与机床控制系统连接的通信接口,软件通过硬件实现与机床的网络通信,既是适应性加工工艺数据处理的核心应用程序,也是适应性加工得以实现的基本保障。该模块的软件、硬件密不可分,只有组合后才能发挥作用。

在硬件方面,需要与机床控制系统连接的通信接口,用于读取和传递机床控制系统网络输入和输出的数据信息。输入数据主要包括在线检测的工件坐标系数据、加工部位的形状及空间位置数据,以及所提取的控制系统中的刀长、直径、刀具补偿值等刀具数据信息;输出数据为经过处理后直接用于零件实际加工的工件坐标系数据和数控加工 NC 代码。

在软件方面,需要一套专用的数据处理包,专门处理从机床控制系统导出的工件坐标系检测数据、NC 代码和刀具数据信息 3 类数据。

(4)机床适应性加工包括工件定位基准及加工坐标系二次或多次修正、加工部位的空间位置及形状拟合、加工区域的余量优化及变形误差

量补偿,以及适应性加工过程控制等内容。

3 航发产品适应性数控加工涉及的关键技术

为了不断地革新和发展数控加工工艺技术,改进制造过程、提高质量、降低成本,有必要进一步探索和探索研究数控加工过程中所发生的各种现象,掌握其本质和规律,以便对数控加工过程进行科学、有效的控制。近年来,随着计算机技术、控制理论和现代应用数学的发展,研究人员有可能正确地解析和估算制造过程的静态和动态特性,揭示制造系统的内在联系和探讨制造过程的识别和优化问题。适应性加工按工作流程可具体分解为数控加工工艺准备、机床在线检测、适应性加工工艺数据处理和适应性数控加工 4 个阶段,通过梳理各环节的技术需求,分别提炼出各个阶段的关键技术,如图 3 所示。

适应性数控加工技术应用探索

数控加工技术是运用系统的观点和方法来研究数控加工过程和制造手段的,它把计算机技术、数控技术、高精度测试技术、控制理论及系统工程的理论和方法与制造结合起来,使产品制造建立在更加科学的基

础上,为多品种、小批量生产的自动化开辟了途径。适应性控制在数控加工过程中主要体现在工件空间几何位置适应性控制、零件装夹定位适应性控制、加工切削载荷适应性控制和机床生产运行适应性控制 4 个方面,贯穿了整个数控加工过程,从零件加工前准备开始到零件加工结束,主要对余量、误差、精度、切削速度、进给速度、切削力等要素进行适应性控制,能够依据实际工况的变化做出实时调整,以满足当前状态的变化需求。数控加工中的适应性控制要素如图 4 所示。

1 工件空间几何位置适应性控制

在数控加工过程中,前一道工序的加工或多或少会对后续工序的加工产生一定的影响,主要体现在实际工序模型并非理论加工后的模型,存在着由于加工误差而产生的偏离,使得数控加工过程通常在一个不精确的坐标系和不精准的模型上实现,导致最终加工结果的偏离,轻则接近理论极限值,影响使用性能,重则超差报废,给企业带来重大的经济损失。

位置形状适应性控制旨在消除零件个体间几何形貌差异和坐标系的偏离对程序的影响,它通过引入“测量-反馈-修正”的机制^[9],采用逆向工程的方法,对加工前的零件及

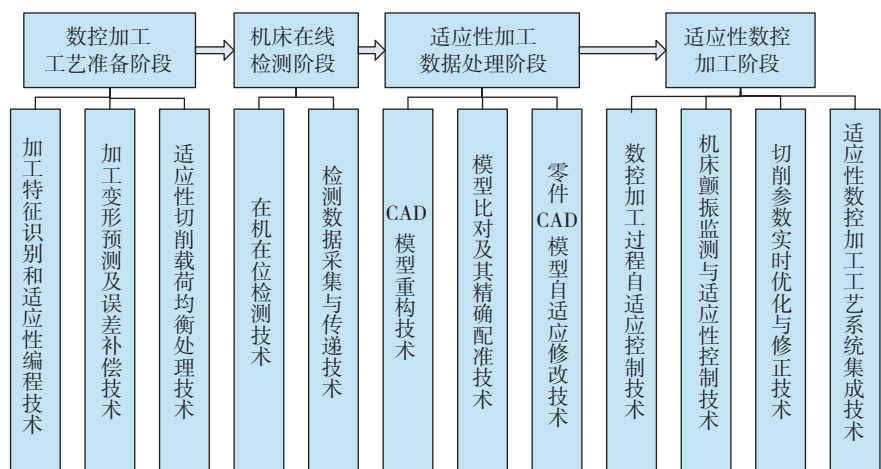


图3 适应性数控加工关键技术

Fig.3 Adaptive NC machining key techniques

其坐标位置进行快速测量,进而得到测量数据,通过将理论数模同实际模型进行对比分析,重构加工数模,用于程序编制,确定零件精确位置,调整加工坐标系,以适应零件的真实加工状态。具体工作流程见图5。它既可以帮助编程人员提前对零件的变形情况进行预估修正,还可以节省大量的高精度坐标系位置调整时间,是未来数字化快速高效加工的发展方向。

2 零件装夹过程中的定位精度适应性控制

航空发动机零件多以不规则复杂形状为主,需要经常性地机床间进行工序周转,这期间存在着大量重复性的定位、安装、找正、压紧/夹紧等操作。通常来讲,正是由于不规则形状的存在,加工基准的确定往往难以有效实现,找准定位基准有时会达到40%~60%的机床占用工时,产生大量的停机等待时间。

适应性定位装夹旨在有效压缩生产中的辅助装夹定位时间,使之能够和机床有效加工时间相匹配,实现工件的快速换装,不需打表找正,无论换装多少次,无论人工操作过程,工件的定位精度始终保持在规定要求以内,工件能够轻易而精确地在各

种机床之间交换。适应性定位的核心是基准的统一,零件传递过程中既需要消除零件个体差异对基准的影响,还要消除机床差异的影响,这就需要有一个中介机构来统一基准的差异。具体工作流程见图6。常见的中介机构为基准(零点)定位系统,由定位和锁紧两部分装置构成,锁紧装置安装在各机床加工平台之上,二者之间可以同步快速地实现定位和锁紧,以节省找正时间,保证工作的连续性。

3 数控加工中的切削载荷适应性控制

实际加工过程中,由于航空发动机产品加工成本高、加工周期长、加工难度大,如果在加工过程中由于刀具或机床碰撞等原因对工件造成损坏,其损失将会很大。为避免或减少因不能处理这些情况而可能出现的异常,在实际加工时切削参数的选择一般较保守,编程人员通过这种保守的设置来应对千变万化的切削状况。由于切削加工过程本质上是一个具有高度非线性、时变、随机干扰严重、不确定的复杂动态过程,工件硬度变化、切削深度不同、刀具磨损、冷却液流量变化等因素都将导致实际切削工况偏离理想状态,编程时预先指定

的加工参数并不能保证加工目标总是维持在最佳加工状态。

适应性切削加工旨在通过监测加工过程中的切削力、主轴和进给电机的功率、电流、电压等信息,根据指定控制目标,利用传统的或现代的算法进行识别,以辨识出刀具的受力、磨损、破损状态及机床加工的稳定性状态,并根据这些状态实时调整加工参数(主轴转速、进给速度)和加工指令,使设备处于最佳运行状态,提高设备运行的可靠性。此工作流程见图7。

4 机床生产运行中的适应性控制

航空发动机零件生产过程涉及

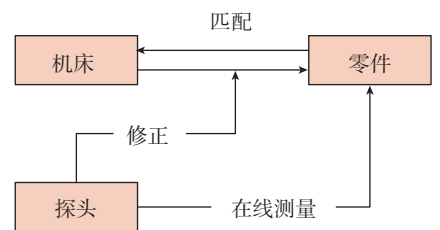


图5 工件空间几何位置适应性控制工作流程
Fig.5 Adaptive control workflow of workpiece space geometrical position

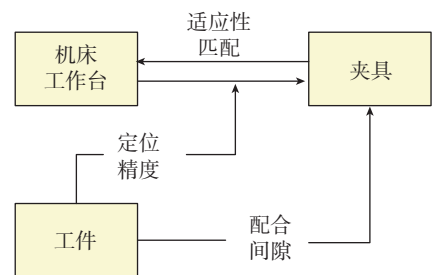


图6 零件装夹过程定位精度适应性控制工作流程
Fig.6 Adaptive control workflow of positional accuracy in the course of parts fixation

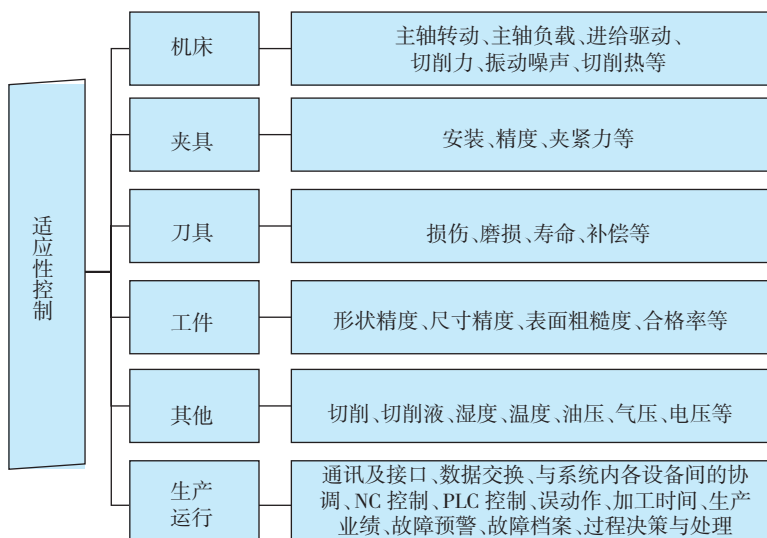


图4 数控加工中的适应性控制要素
Fig.4 Adaptive control factors in NC machining

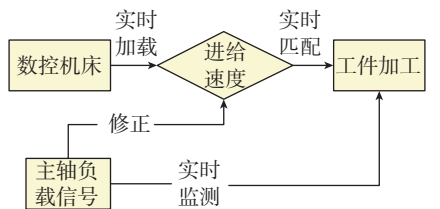


图7 数控加工中的切削载荷适应性控制工作流程
Fig.7 Adaptive control workflow of cutting load in NC machining

因素众多,各环节密切相关。生产目标的变更、意外事件的发生,都会对整个生产运行过程带来显著的影响,尤其是机床、夹具、刀具、刀柄、辅助工具、冷却液等因素的变化有可能使整个生产过程处于非可控状态。

机床生产运行适应性控制旨在通过对整个机床数控加工工艺系统内加工资源信息、机床性能参数的实时监控以及生产运行的决策机制,实现加工过程的统筹规划和系统控制,动态调节系统内的工艺参数及加工流程,以满足因不同目标而制定的生产需求,最终达到工作效能的最大化。该系统的核心是动态反馈决策机制^[10],专家系统可通过数据的实时反馈了解系统中关键节点的生产运行状态,通过数据的统计和分析,自动将总体目标分解为节点目标,优化资源配置,传递控制指令,使整个数控加工工艺系统处于灵活运作的状态,更好地应对机床有序生产的突发问题,真正意义上实现生产过程的最优控制,增强抗风险能力,降低资源储备阈值。此工作流程见图8。

结论

适应性数控加工技术不仅能用于3D打印零件、线性摩擦焊联结零件等新产品精密数控加工,还适用于机匣、叶片、整体叶盘类零件的修复及再制造加工,同时也是提高传统零件加工精度和数控加工效率的有效方法。智能制造是未来自动化加工的发展方向,无序的人为干预性生产活动将会逐渐被智能控制的适应性数控加工技术所替代,高效能加工、

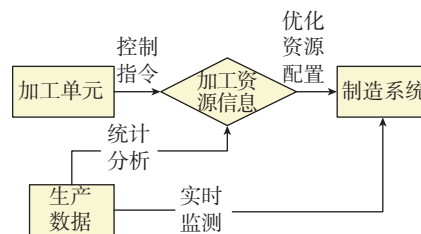


图8 机床生产运行中的适应性控制工作流程
Fig.8 Adaptive control workflow of machine tool production operation

无人工厂并不遥远。可以预见的是,适应性控制技术将会为航空发动机制造领域带来巨大的发展革新。

参考文献

- [1] 王文理,袁士平. 自适应加工技术在数控加工领域的分类与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(6): 26-29.
WANG Wenli, YUAN Shiping. Category adaptive machining technology NC machining field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(6): 26-29.
- [2] SULLY M. Delcam adaptive manufacturing: resolving problems and delivering a global productivity advantage[EB/OL]. [2012-11-02]. http://theoac.ca/Storage/27/2255_Flexible_Mfg_Systems_and_Adaptable_Machining_-_Delcam_-_Nov_2012.pdf.
- [3] WALTON P. Adaptive machining for turbine blade repair[EB/OL]. [2007-11-02]. <http://www.mmsonline.com/articles/adaptive-machining-for-turbine-blade-repair>.
- [4] 蔺小军,陈悦,王志伟,等. 面向自适应加工的精锻叶片前后缘模型重构[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1965-1703.
LIN Xiaojun, CHEN Yue, WANG Zhiwei, et al. Model restructuring about leading edge and tailing edge of precision forging blade for adaptive machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1695-1703.
- [5] 任军学,冯亚洲,米翔畅,等. 航空发动机精锻叶片自适应数控加工技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 52-55.
REN Junxue, FENG Yazhou, MI Xiangchang, et al. Adaptive techniques in CNC machining of aeroengine precision forging blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 52-55.
- [6] 蒋利洋,陈志同,江泽鹏,等. 基于模型重构的变形叶片配准定位技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 64-69.
JIANG Liyang, CHEN Zhitong, JIANG Zepeng, et al. Registration and positioning technology of deformable blade based on model reconstruction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 64-69.
- [7] 张定华,张莹,吴宝海,等. 自适应加工技术在整体叶盘制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(13): 51-55.
ZHANG Dinghua, ZHANG Ying, WU Baohai, et al. Application of adaptive machining technology in blisk manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(13): 51-55.
- [8] 袁士平. 随机定位加工在数控加工中的应用[J]. 制造技术与机床, 2014(7): 159-161.
YUAN Shiping. Application of random location machining in NC machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(7): 159-161.
- [9] 楚王伟,隋少春,汤立民. 基于智能化制造思想的测控-加工一体化技术的发展应用[J]. 航空制造技术, 2011, 54(6): 44-47.
CHU Wangwei, SUI Shaochun, TANG Limin. Application development of measurement-control-machining integrated technology based on intelligent manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(6): 44-47.
- [10] 程涛,左力,刘艳明,等. 数控机床切削加工过程智能自适应控制研究[J]. 中国机械工程, 1999(1): 26-31.
CHENG Tao, ZUO Li, LIU Yanming, et al. Study on intelligent adaptive control in CNC cutting processes[J]. China Mechanical Engineering, 1999(1): 26-31.

通讯作者: 张森棠, Email: zhangsentang@123.com。

Exploratory Research on Adaptive NC Machining Technology in Aero-Engine Product

ZHANG Sentang, LI Meirong, HE Fang, ZHAO Heng, MA Mingyang
(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

(下转第74页)