

基于微服务架构的智能数控系统*

卓越,刘建康,富宏亚,韩振宇

(哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150001)

[摘要] 提出了一种基于微服务架构的开放式智能数控系统体系结构,构建了基于微服务架构的数控系统设计技术框架。采用领域驱动设计思想,将数控系统拆分为一系列松散耦合、独立部署的微服务,从而提高可重构、可扩展性,将颤振抑制等智能功能封装在微服务中,实现热插拔式的集成,并进行叶轮切削试验。结果表明,微服务架构的智能数控系统具有良好的动态扩展和可重构性,并且加载颤振抑制微服务后可有效提高表面质量。

关键词: 微服务;智能数控系统;智能数控机床;实时优化;颤振抑制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.056



卓越

博士研究生,主要研究方向为开放式智能数控系统、切削过程分析与建模、切削过程实时控制等。

随着高速数控机床向高加工精度、高生产效率方向发展,与之配套的数控系统除了具备精密切削加工的能力外,还需具有复合化、智能化、网络化的特点,能够实现自主决策、

自主优化等多种功能^[1-3]。目前数控系统的发展趋势主要包括开放式体系架构、智能决策优化、网络化等多个方面。开放式体系架构是数控系统网络化和智能化集成的基础,通过传感器和物联网技术获取加工中的信息,利用大数据和人工智能技术开发智能算法,实现数控系统的自主优化和决策。在开放式智能数控系统中开发和集成诸多智能功能,仍是国内外专家和学者的重点研究方向。

目前,我国数控机床的智能化与国外尚存在较大差距,以 FANUC、SIEMENS 等公司为代表的商用数控系统在世界范围内被广泛使用,其中 SIEMENS 公司利用数字孪生的概念开发 Siemens PLM 平台实现智能工厂循环,提高生产效率和质量,同时也开发了 MindSphere 应用平台实现优化生产规划,提高设备利用率,降低生产成本,开发了 Weiss 智能主轴,实现对主轴和轴承状态快速、简便的信息智能掌控等。FANUC 公司利用物联网和大数据技术开发了云端远程服务和诸多智能功能,如机床云应用、旋转轴补偿、伺服抖动学习控制、AI 热位移补偿等。Cus

等^[4]通过力信号对球头铣削加工状态进行监控,并通过遗传算法对切削条件进行优化。爱尔兰贝尔实验室 Mativenga^[5]采用最低能量标准进行工艺参数优化,探讨了考虑了最低成本与最低能耗之间的协同作用。Scanlon 等^[6]通过采集声音信号对旋转机械进行剩余寿命预测。Simm 等^[7]基于非接触激光的测量方法实时监视旋转轴的位置变化,可将结果用于修正轴角偏差偏移。Mourtzis 等^[8]在考虑传感系统和移动设备的情况下,利用物联网产生具有海量、异构、多源特征的工业大数据。

国内的一些数控厂商和高校也在智能化方面取得了一定的成果,沈阳机床开发了 i5 数控系统,具有智能编程、智能操作、智能维护、智能管理等功能,华中数控也推出了智能数控系统 (Intelligent NC, iNC) 产品,利用大数据、人工智能、数据孪生等技术实现数控系统的自主感知、自主决策等。上海交通大学的熊振华等^[9]提出一种颤振的实时辨识与在线抑制系统,在数控机床上实现加工颤振的智能抑制,以加权小波包熵作为特征实时地监测车削加工过程,

*基金项目: 国家科技重大专项 (2013ZX04013-011-09); 国家自然科学基金 (51805116)。

根据颤振频率,使主轴转速按照指定的幅值和频率周期性变化。北京航空航天大学李伯虎等^[10]在开放式架构数控系统上开发了面向服务的网络化云数控系统。清华大学的叶佩青等^[11]提出基于大数据的组件式数控平台结构体系,通过创建数控APP实现信息集中。清华大学的曹宇男等^[12]提出了时间转化模型/全时轴实时时态逻辑的建模方法,可用于描述开放式体系结构数控系统。中国科学院的Yu等^[13]提出了基于组件技术的数控系统架构,并进行了比较试验。同济大学的张曙^[14]对沈阳机床集团的i5智能机床进行了分析。刘贵杰等^[15]利用神经网络建立了磨削过程计算机集成智能监控系统。哈尔滨工业大学的富宏亚等^[16-17]实现了颤振与变形的在线控制,并进行了相应的试验。

对开放式智能数控系统的基本要求是具有可移植、可扩展、可重构、可伸缩的特性。传统的开放式数控系统采用基于类、组件的模块化软件设计结构,需要专业的开发人员才能对系统进行拓展并进行编译重构,而对于普通用户而言,难以实现数控系统可重构配置。本文以松散耦合、独立部署的微服务为基本单元实现数控系统开放式扩展和重构,制订具有标准化语义规则的数控微服务接口契约,并开发多个数控微服务,主要包括NCK微服务、Gcode微服务、实时以太网主站微服务、HMI微服务、智能颤振抑制微服务等。

微服务架构智能数控系统结构设计

在传统的基于类、组件的模块化架构下,组件间是静态绑定、紧密耦合的,一旦应用需求发生变化,整个系统需要重新进行部署,且往往依赖于早期的一些技术或平台。而利用微服务架构可实现微服务的独立部署,在应用需求发生变化后,可对微

服务进行替换更新,实现系统结构的动态重构,便于系统的维护与升级。

为保证智能数控系统充分发挥低耦合、易维护的优势,利用子领域分解的方法,采用子领域和限界上下文的概念,建立层次化功能领域模型,根据不同的粒度大小和层次结构进行数控系统微服务单元的划分,服务间通过API接口和消息通信实现信息交互。首先根据数控系统的具体功能进行子领域划分,不同子领域具有不同的微服务。子领域主要包括以下3个方面。

(1) 核心域。核心域需实现NC程序的信息转化、运动控制、逻辑控制以及人机界面相关的功能,因此,核心域主要包括:数控核心(Numerical Control Kernel, NCK)微服务、实时以太网(Real-Time Ethernet, RTE)微服务、Gcode微服务、人机界面(Human Machine Interface, HMI)微服务。其中NCK微服务是微服务架构数控系统的核心,需要实现包括NC程序信息转化、运动控制、逻辑控制以及人机界面相关的诸多功能,具有硬实时的特点;RTE微服务可根据需要进行替换,实现不同实时以太网协议的支持,如Powerlink、EtherCAT等,可将实时以太网的主站封装为一个单独的微服务,根据需要进行替换,通过可重构配置实现支持多种实时以太网;Gcode微服务主要负责生成刀具轨迹,可根据需要替换成STEP-NC微服务,而不涉及其他微服务;HMI微服务可以通过Web服务的方式提供远程人机界面的访问。

(2) 支撑子域。支撑子域主要实现系统除核心功能以外的功能,智能化功能也是在支撑子域中实现的,如故障诊断、工艺参数优化、刀具磨损检测及寿命估计、机床健康状态监测、碰撞预测、加工颤振识别及抑制、机床热误差/变形误差补偿等。这些功能往往通过特定的算法如深度

学习、信号处理等进行分析,并提供优化参数和决策控制指令。

(3) 通用子域。通用子域主要包括帮助系统、日志系统、网络通信、实时数据库等。

微服务间通信都属于进程间通信(Inter Process Communication, IPC),而数控系统微服务往往具有实时性需求,因此微服务间采用异步消息通讯,而不是远程过程调用(Reomote Procedure Call, RPC),并采用消息代理作为消息服务中间件,不同的微服务也可以通过消息代理通信,进一步提高了微服务架构的灵活性:一方面,可以实现微服务间的松耦合,有利于数控系统微服务架构的动态扩展和重构;另一方面,通过消息代理在消息被处理之前将消息缓存在序列中,实现消息缓存,防止信息覆盖或遗漏。基于微服务架构的智能数控系统结构如图1所示。

智能微服务扩展策略

通过集成多种传感器,广泛获取加工过程中的实时数据和历史数据,并通过机器学习、大数据处理等方法对多源数据进行分析,获取优化后的工艺参数或加工方法,大幅度提高加工效率和加工质量。在本文中,诸多智能功能封装在不同的微服务中,并与NCK微服务进行信息交互,辅助数控系统进行智能化决策。根据智能微服务与NCK微服务交互的不同,将其分为事件通知类型的智能功能微服务和实时参数调整类智能功能微服务。其中事件通知类型的智能功能微服务检测到突发事件发生时,直接通知NCK微服务执行,比如当刀具磨损检测微服务检测到刀具磨损量达到阈值时,将通知NCK微服务控制机床停止加工。而实时参数调整类智能功能微服务主要是对加工过程进行实时干预与调整,保证加工质量,比如颤振抑制、实时误差补偿等,通过调整NCK微服务的参

数实现机床能耗、加工表面质量、材料去除率等的优化。本文以颤振检测与抑制微服务为例来对智能微服务的扩展策略进行说明。如图2所示,数据采集微服务通过多种传感器和数据采集卡采集加工中的实时数据,并通过发布/订阅的方式将传感器数据流发送给不同的智能功能微服务。而颤振辨识与抑制微服务通过订阅传感器数据获取振动信号、力信号,通过多种方法,如短时傅里叶变换、经验模态分解、小波包变换等多种方法获取信号的时域、频域、时频域特征,对当前加工状态进行辨

识,但检测到颤振后,通过颤振频率计算主轴转速,通过 Kafka 消息代理发送 CMC 指令将优化后的进给速度和主轴转速发送给 NCK 微服务,继而向速度规划功能模块和轴组功能模块发送参数调整指令,实时调整加工参数,实现加工参数的优化。

智能数控系统功能验证

基于微服务框架的智能数控系统理念,开发了颤振辨识与抑制微服务,通过叶轮加工试验进行相关的试验验证,验证平台如图3所示。通过振动传感器收集加速度信号,进而进

行颤振辨识,加速度传感器粘贴在叶轮工件的底面,数据采集装置采用 Kistler 8765A250M5 型信号放大器和研华 USB-4711A 数据采集卡,信号采集频率为 10kHz。颤振监测微服务对传感器数据流进行实时处理和分析,检测到颤振状态发生以后,识别当前颤振频率,计算能使切削状态保持稳定的主轴转速,进而通过消息代理向 NCK 微服务发送参数调整命令,最终实现颤振抑制。加工模型为铝合金叶轮模型,实际加工效果如图3所示,通过局部放大图可以发现,未开启抑制算法时,加工工件表

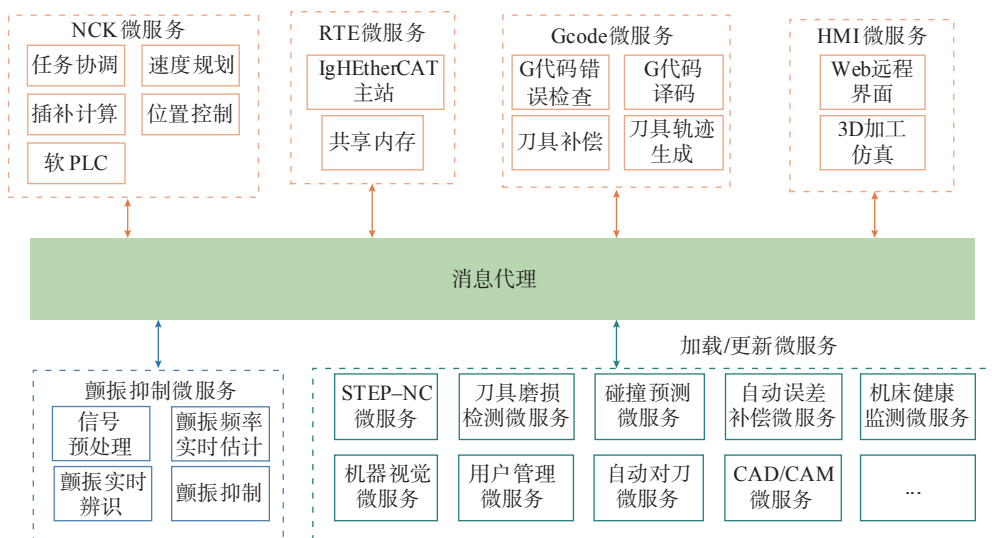


图1 基于微服务架构的智能数控系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of smart CNC system architecture based on microservices

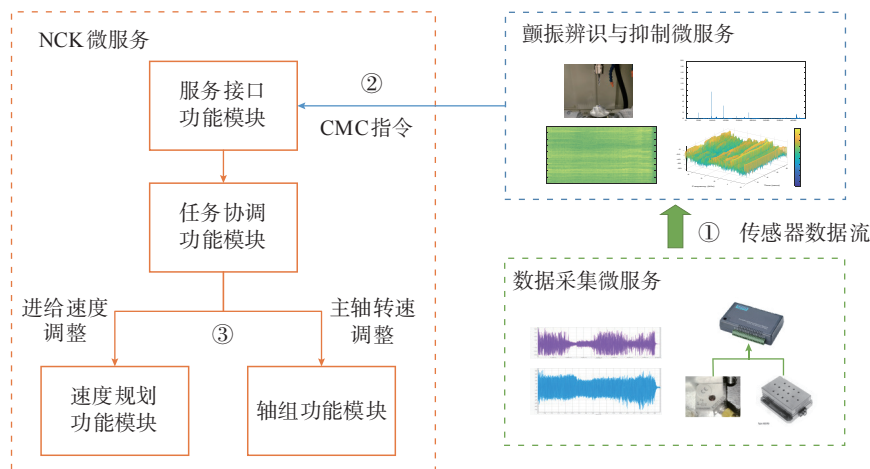


图2 颤振抑制微服务与NCK微服务信息交互

Fig.2 Interaction logic between NCK microservices and chatter suppression microservices

- J. An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1-3): 90-97.
- [5] MATIVENGA P T, RAJEMI M F. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 149-152.
- [6] SCANLON P, KAVANAGH D F, BOLAND F M. Residual life prediction of rotating machines using acoustic noise signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(1): 95-108.
- [7] SIMMA A, WANG Q, HUANG S L, et al. Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment[J]. Measurement, 2016, 87: 104-116.
- [8] MOURTZIS D, VLACHOU E, MILAS N. Industrial big data as a result of IoT adoption in manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2016, 55: 290-295.
- [9] 熊振华, 孙宇昕, 丁龙扬. 智能车床的颤振实时辨识与在线抑制系统研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 85-93.
- XIONG Zhenhua, SUN Yuxin, DING Longyang. Online chatter detection and suppression system for intelligent machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 85-93.
- [10] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7, 16.
- LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7, 16.
- [11] 叶佩青, 张勇, 张辉. 数控技术发展状况及策略综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 113-120.
- YE Peiqing, ZHANG Yong, ZHANG Hui. Review on the development and strategies of CNC technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 113-120.
- [12] 曹宇男, 张辉, 叶佩青, 等. 开放式体系结构数控系统实时性的建模与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 108-116.
- CAO Yunan, ZHANG Hui, YE Peiqing, et al. Modeling and analysis of real-time properties of open architecture computerized numerical control systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 108-116.
- [13] YU D, HU Y, XU X W, et al. An open CNC system based on component technology[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(2): 302-310.
- [14] 张曙. 智能制造与i5智能机床[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(1): 1-8.
- ZHANG Shu. Smart manufacturing and i5 smart machine tools[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(1): 1-8.
- [15] 刘贵杰, 刘立静, 唐婷, 等. 磨削过程计算机集成智能监控系统[J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1843-1845, 1850.
- LIU Guijie, LIU Lijing, TANG Ting, et al. Computer integrated intelligent monitoring and controlling system for grinding process[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(20): 1843-1845, 1850.
- [16] 富宏亚, 金鸿宇, 韩振宇. 智能加工技术在切削颤振在线抑制中的应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 16-21.
- FU Hongya, JIN Hongyu, HAN Zhenyu. Application of intelligent machining technology in on-line suppression of cutting chatter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(7): 16-21.
- [17] 韩振宇, 金鸿宇, 付云忠, 等. 基于有限元数值模型和进给速度优化的薄壁件侧铣变形在线控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 190-199.
- HAN Zhenyu, JIN Hongyu, FU Yunzhong, et al. FEM numerical model and feedrate optimization based on-line deflection control of thin-walled parts in flank milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 190-199.

通讯作者: 韩振宇, 教授, 博士, 主要研究方向为智能加工技术、热塑性复合材料铺放成型工艺研究等, E-mail: hanzy@hit.edu.cn。

Smart CNC System Based on Microservice Architecture

ZHUO Yue, LIU Jiankang, FU Hongya, HAN Zhenyu

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] CNC machine tools and basic manufacturing equipment have been listed as “strategic areas to accelerate breakthrough” in “made in China 2025”, and the high-end intelligent CNC system is the core component to ensure that CNC machine tools have high-speed, high-precision, compound, network, and intelligent functions. This paper proposes an open CNC system architecture based on microservice architecture. The CNC system is divided into a series of loosely coupled and independently deployed microservices by adopting the domain-driven design pattern to improve reconfigurability and scalability. Intelligent functions such as chatter suppression are packaged in microservices to realize hot-plug integration. An impeller cutting experiment is conducted. The results shows that the micro-service architecture intelligent CNC system has excellent dynamic expansion and reconfigurability, and the surface quality can be effectively improved after loading the intelligent algorithm.

Keywords: Microservice; Smart CNC system; Smart machine tool; Real-time optimization; Chatter suppression

(责编 古系)