

迈向智能数控系统的需求与展望

樊留群¹, 刘琛¹, 丁凯¹, 黄云鹰²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092;

2. 沈机(上海)智能系统研发设计有限公司, 上海 200433)

[摘要] 对数控系统的发展历史及现状进行了分析,重点从组成结构、驱动特点、工艺方法及功能等方面总结了不同发展阶段的特征。随着PC及开放体系结构的影响,数控系统呈现百花齐放的发展。数字化、网络化到智能化成为智能制造发展的共识,数控系统从诞生开始就走着数字化的道路,现场总线、实时以太网及工业互联网技术不仅使数控系统自身,而且与外界实现网络化互联。在分析数控机床智能化需求的基础上,对国内外智能化数控系统的技术路线和实现案例进行了剖析,指出了发展智能数控系统的关键技术。

关键词: 智能数控;云平台;工业4.0组件;人工智能;面向服务

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.032



樊留群

教授,博士生导师,主要研究领域为数控机床及机电一体化技术、机器人及智能装备技术、工业互联网及实时总线技术等。承担过多项国家以及省部级科研项目,获得国家科技进步二等奖等多项国家和省部级奖,以及多项发明专利和软件著作权,出版专著3部,发表论文100多篇。

自从瓦特发明飞轮调速系统,人类开始能够对能量利用、机械设备的运动进行控制,开启了工业革命的机械化时代。人类从利用自然界“看得见”的物理资源如凸轮、气动及液压作为指令的存储器和执行器,完成事先设计好的有固定控制逻辑的任务。随着麦克斯韦电磁理论的提出,不仅出现了发电机、电动机等能量的转换装置,使人类对能量的使用便捷化、分散化,而且出现了阻容调谐电路、继电器等方便用于控制调节的器件及装置,控制任务逐渐从机械装备中独立出来,由专门的控制系统完成,工业进入了自动化时代。20世纪中叶,计算机引领人类迈入了数字化时代,随着半个多世纪的建设,不仅使机床控制的“大脑”完全进入了数字世界,机床的“身体”也逐渐现身在数字世界,构建起数字世界的孪生体,为智能化打下了基础。

智能制造成为中国制造业转型的主攻方向,而作为制造母机机床的智能化更是成为关注的焦点。什么是智能机床?如何通过数控系统实

现机床的智能化?中国工程院周济院士领衔的团队提出了智能制造的技术路线^[1],以数字化为基础,实现网络化,进而进行智能化。智能制造概念早在20世纪80年代就已提出^[2],但由于支撑技术和条件的限制,没有发展起来。随着先进制造及工艺技术的发展,制造中需要解决的不确定问题越来越多。在2006年的美国芝加哥国际机床展上,日本的Mazak公司和Okuma公司分别推出了以“智能机床”命名的数控机床产品,开启了数控机床的智能化之路^[3]。

数控系统的现状及发展

数控技术从诞生到今天的60多年发展,根据系统组成、数控功能及驱动控制等方面特征,大致可划分为6个发展阶段,如表1所示,当前随着赛博物理系统CPS的理念走向了智能化的第6个阶段。由于不同时期市场需求及技术发展水平呈现出不同的特点。数控技术逐渐从所谓的“硬件数控”发展到“软件定义”的智能化产品。当前在实际应用中,

根据数控系统提供的功能和性能指标,一般分为低端、中端和高端3个级别,但随着电子信息技术的发展,中低端的区别越来越不明显了^[4]。

20世纪80年代开始,针对传统数控系统的封闭性,欧美日等发达国家和地区就纷纷启动了开放式控制系统的研究,针对开放式数控系统的体系结构规范、通信与配置规范、运行平台等核心问题进行深入研究,如美国的“OMAC”、欧盟的“OSACA”、日本的“OSEC”以及我国的开放式数控体系结构标准“ONC”等计划^[5],提出了开放式控制系统的设想,旨在建立一个与制造商无关的、标准化的、开放的控制系统平台。随着开放式数控系统的不断发展,业内出现了不少商业化和非商业化的开源开放式数控系统,其典型代表包括 OpenCNC、LinuxCNC 以及 Machinekit 等^[6]。

数控系统是一种典型的实时多任务的系统,今天的开放式数控系统以 PC 平台及实时操作系统通过总线将部件互联。数控系统的开放程度具体表现在人机界面的二次开发、数控核心的裁剪以及整个体系结构的开放性^[7]。特别是开放体系结构,系统拓扑结构可变,规模可变、可移植,组成模块可以更换和协同工作,可在标准规范下按需配置成不同的

数控系统,甚至以工业 APP 或云数控的形式组成数控系统^[8],如图1所示,机床2的数控上层核心位于云端,操作人机界面位于异地,通过高速网络与本地机床的过程控制互联,实现对机床的控制。

目前实现数控系统的开放性主要有3种方案。(1)集中式。主要是传统数控系统厂家采用的开放性技术路线,将人机界面在 PC 平台上构建,通过计算机总线将数控核心等 CPU 系统连接在一起,结构紧凑,典型产品如西门子的 828D、发那科的 30i。(2)分离式。人机界面在 PC 平台及通用操作系统下开发,其数控核心硬件系统和伺服控制保持原来结构,如西门子 840D sl、海德汉 iTNC 530。(3)软件定义型数控。硬件以 PC 平台加网络总线方式将部件互联,软件在实时操作系统上进行开发,典型产品如德国倍福数控、沈阳机床的 i5 数控系统、华中数控等。

随着硬件资源虚拟化及系统软件平台化技术的发展,软件定义控制、软件定义汽车,甚至软件定义一切的理念得到广泛的认可。数控是典型的实时多任务系统,应用系统软件构建在实时操作系统之上,主要有3种路线:(1)专用的实时操作系统,如 VxWorks,由于成本及开发难度,一般很少采用;(2)Windows 加实时扩

展 RTX,由于 Windows 资源的丰富,许多厂家采用这种方式;(3)Linux 加实时内核,如 preempt_rt、xenomai 和 RTAI 等,这种方式实现的数控系统,由于是基于开源通用操作系统,因而可用资源丰富,价格优势明显,具有更好的开放性。

插补功能从简单的直线圆弧发展到了直接能够进行样条曲线插补,从而改变了传统数控只能采用以直代曲,曲面曲线只能事先用微小直线段逼近,造成加工程序长,不易进行速度规划,因而影响加工效率和质量。具有旋转刀具中心 RTCP 编程的五轴联动数控加工一直是数控系统竞争的焦点,随着汽车、航空航天工业的发展,零件轮廓曲面越来越复杂,因此拥有样条曲线插补功能已成为是否是高档数控的标志。图2对比了相同控制点采用不同样条曲线的平滑度:AKIMA 采用过控制点且在控制点处一阶导数连续进行拟合;3次多项式曲线采用插值方式,使拟合曲线通过所有给定控制点,且二阶导数连续,从图2中可以看出3次多项式曲线比 AKIMA 曲线的波动稍大些;NURBS 样条曲线通过首末控制点,其他部分不受给定控制点多边形的限制,曲线整体平滑,系统实现了所谓双样条插补,除了刀尖点样条曲线外,同时增加了一条描述刀具上

表1 数控技术发展的不同阶段

Table 1 Different development stages of CNC technology

特点	第1阶段 研究开发期 (1952~1970)	第2阶段 推广应用期 (1970~1980)	第3阶段 系统化 (1980~1990)	第4阶段 集成化 (1990~2000)	第5阶段 网络化 (2000~2015)	第6阶段 智能化 (2015~)
典型应用	数控车床、铣床	加工中心、电加工机床和成形机床	柔性制造单元 柔性制造系统	复合加工机床 5轴联动机床	数字化工厂	智能、可重构 制造系统
系统组成	电子管、晶体管 小规模集成电路	专用 CPU 芯片	多 CPU 处理器	模块化多处理器	开放体系结构 工业微机	赛博物理系统 CPS
工艺方法	简单加工工艺	多种工艺方法	完整的加工过程	复合多任务加工	高速、高效加工 微纳加工	混合高效绿色
数控功能	NC 数字逻辑控制 2~3轴控制	全数字控制刀具自 动交换	多轴联动控制 人机界面友好	多过程多任务 复合化、集成化	样条插补曲面优化 加工过程管理	虚拟、云化自适应及 智能化
驱动特点	步进电动机 伺服液压马达	直流伺服电动机	交流伺服电动机	总线及直线电机 驱动	高速高精度 全数字、网络化	高动态特性 自适应自诊断

参考点的样条,两条样条同时插补形成刀轴矢量,从而实现对刀轴的精确插补控制。

编程方面,人们逐渐意识到数控系统一直沿用的ISO 6983标准的G、M代码已不能适应现代化生产和技术发展的需要。这种面向运动和开关逻辑控制的数控程序限制了数控系统的开放性和智能化发展,同时也使得CNC与CAx技术之间形成了隔阂。欧共体1997年开始了面向对象的数控加工标准化研究,提出了STEP-NC(ISO14649)的概念^[9],为此也研发了STEP-NC原型概念机

投入实践验证,随着计算机算力及算法的发展,影响STEP-NC发展的障碍逐渐被消除,STEP-NC会迎来新的发展^[10]。

数控系统智能化的主要需求及关键技术

长期以来,数控加工智能化的研究主要应用实时人工智能技术,如模糊控制、人工神经网络、自适应控制等,这些智能化的模块只在某个方面提高了数控系统的智能,而且对使用的条件又有许多限制,所以在实际应用中很难发挥出效益。人们对智能

机床定义有不同的理解,就如同对智能的定义存在分歧一样。随着人类的科学技术和认知水平发展,人们对智能制造的内涵理解也不断变化^[11],本文从机床智能化的需求特点进行分析,从以下4个方面讨论,如图3所示。

(1)操作智能化。现阶段从傻瓜型的精简便捷的操作开始,人机界面简洁高效,如DMG集团的CELOS。人机界面的自适应,能够自动适应操作者的水平和习惯,增加智能防呆功能及安全保护功能,如手动操作的防碰撞、快速辅助定位检测等智能化辅助工具。

(2)加工智能化。通过采用智能化技术不但能提高加工质量和稳定性,而且还能够提高能效降低制造成本。通过多传感器融合对现场加工状态的感知与识别,围绕误差补偿、自适应加工、颤振抑制、刀具状态监测、碰撞检测等方面展开。

(3)维护智能化。故障预测和健康管理PHM成为智能化在这领域的主题,它以工业互联网的视角,应用大数据进行赋能的典型应用领域,其目标:一是预先诊断部件或系统评估其功能的状态,实现基于状态的维修CBM;二是健康管理,即根据诊断/预测信息、可用资源和使用需求对机床保持良好的工作状态做出适

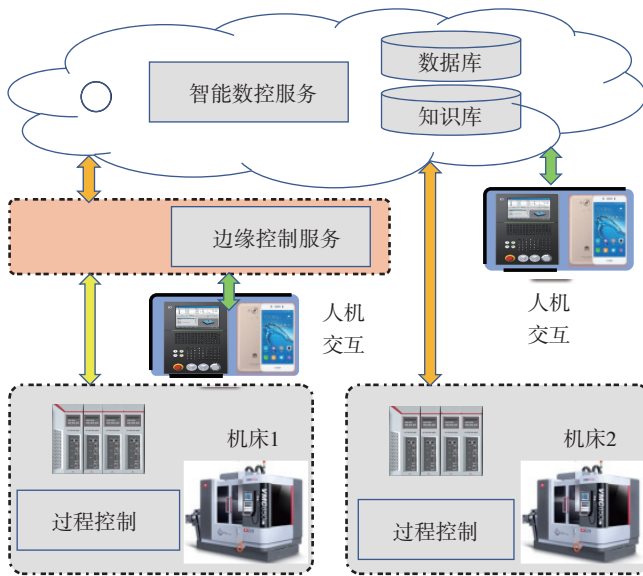


图1 云化数控系统的框架结构
Fig.1 Frame structure of cloudized CNC

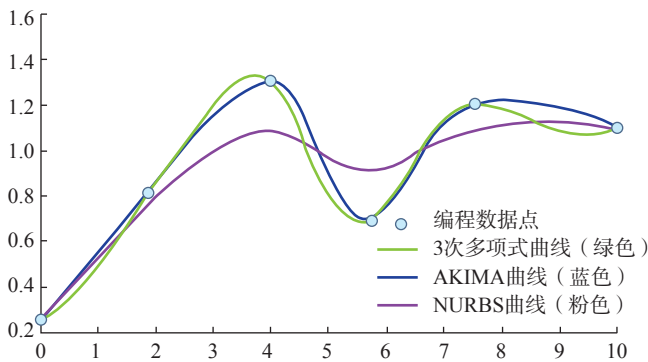


图2 拟合曲线与样条曲线
Fig.2 Fit curves and spline curves

p阶NURBS曲线定义为:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u)\omega_i P_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u)\omega_i}, 0 \leq u \leq 1$$

其中: $P_i (i=0,1,\dots,n)$ 为控制点; $\{N_{i,p}(u)\}$ 表示第*i*个*p*次B样条基函数,其定义为:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

规定 $\frac{0}{0} = 0$ (de Boor-cox递推公式)

当决策的能力。

(4)管理智能化。智能机床不仅是一个加工设备,同时也是智能制造系统中的一个信息节点,基于云平台的机床制造资源自主决策技术、大数据驱动的机床制造知识发现与知识库构建技术、基于数字孪生的机床虚拟调试及优化仿真技术、智能工厂中机床信息交互与管理技术使机床成为支撑智能制造生态系统中的关键设备。

智能机床涉及一系列基础支撑技术,除了传统的先进制造技术,新一代人工智能技术为制造赋能,成为智能机床的推进器^[12],其中大数据、深度学习和知识图谱成为新一代人工智能发展的核心推动力。以知识图谱为代表的知识工程,侧重于解决影响因素较多,但机理相对简单的问题;以深度学习为代表的机器学习,侧重于解决影响因素较少,但计算高度复杂的问题。从控制闭环角度出发,机床智能化围绕着适时感知、分析识别、智慧决策、精准执行和学习提升这五个关键技术,目标是使机床能够自主、高质量、高效益及绿色地进行加工制造,如图4所示。

数控系统智能化案例

(1)DMG的CELOS,如图5所示,改变了传统数控界面形式,方便实现机床监测、分析、优化加工工艺以及融入上层系统。采用多点触控显示屏幕和类似智能手机的图形化操作界面,包括12个APP应用,将车间与公司管理整合在一起,使数控系统不仅是机床的控制器,而且成为车间的一个信息节点。CELOS能够连接CAD/CAM及ERP应用系统,还可将软件安装在电脑上使用所有的CELOS功能,可以规划、控制生产和制造工艺,可以创建、分配任务至机床,实时显示机床的状态,并随时掌控生产过程。CELOS还具有防碰撞、自适应、五轴标定及自动补偿

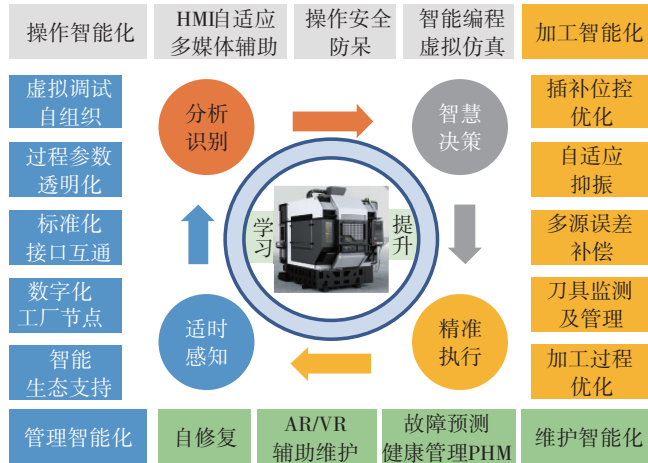


图3 数控机床智能化的主要需求

Fig.3 Main demands for intelligence of CNC machine tools

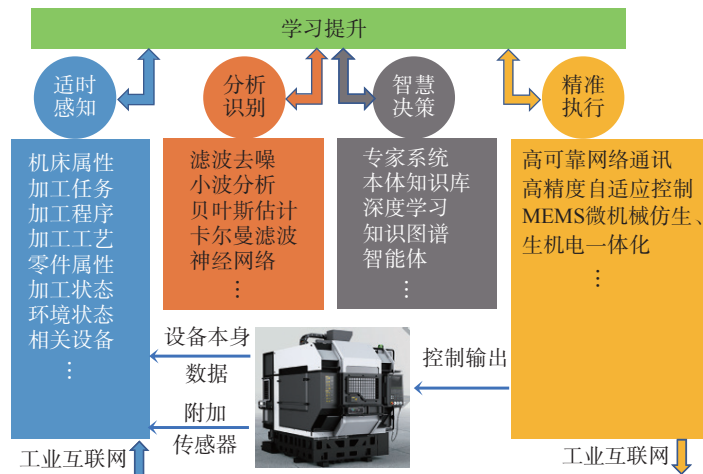


图4 机床智能化关键技术

Fig.4 Key technologies of intelligent CNC machine tools



图5 CELOS的APP图形菜单

Fig.5 Graphical APP menus of CELOS

等智能化功能^[13]。

(2) 日本大隈 OKUMA 智能化数控, 围绕机床安全稳定运行、加工质量保障和生产效率提高等 5 个方面(图 6)。一是“热亲和”功能。机床周围的温度变化及加工过程中产生的热量, 都会对加工精度产生很大的影响。大隈一方面通过设计热亲和的机床结构, 从机械上降低发热及发热变形对机床精度的影响, 另一方面通过对温度的检测在数控中实施对热变形的补偿。二是防碰撞系统。该功能实现机床自动与手动操作时都具有防碰撞功能, 通过建立三维模型, 通过仿真及机床实际状态的反馈, 防止碰撞的发生。操作者可以专心地进行加工, 大大缩短了工装、试件的调试时间。三是加工导航。系统依靠传感器对加工状态进行检测识别, 给出最佳的主轴转速, 从而抑制振动获得最佳的加工状态。图 6 中展示了实际加工零件表面效果。四是五轴机床参数自动测量补偿。五轴机床由于存在旋转轴, 各轴的标定误差(几何误差)对加工误差影响很大, 长期以来只能通过手工作业花费大量时间对 4 种几何误差进行补偿, 这个功能仅需 10min 即可实现高达 11 种几何误差测量及自动补偿。五是最佳伺服参数优化控制, 通过自动对工件重量、转动惯量的测量, 通过优化伺服控制, 动态适应加工负载的变化, 提高加工精度及加工表面质量。图 6 中显示打开功能后位置振动及幅值明显减小^[14]。

(3) 华中数控的智能数控系统 INC。华中 9 型工程样机在华中 8 型数控的基础上开发, 其架构如图 7 所示。其中本地部分包括数控装置、伺服驱动、电机和其他辅助装置, 承担数控机床的实时控制任务。INC 能对指令数据、响应数据以及通过传感器对如温度、振动、视频信号等信号进行实时采集和传输, 因而具有了基本的状态感知能力^[15]。采

用 NCUC2.0 总线实现伺服驱动、智能模块等设备的高速互联互通, 利用 NC-Link 实现与其他机床、工业机器人、AGV 以及管理信息系统等的连接, 获得大数据并存储于 INC-Cloud 云平台。建立了物理机床和真实数控系统所对应的数字孪生模型 Cyber MT 和 Cyber NC, 在虚拟空间中, Cyber MT 和 Cyber NC 模拟物理机床和真实数控的运行原理和响应规律, 实现了以虚拟实、虚实融合。

特别是 INC 创立了“双码联控”控制技术, 开辟了数控机床智能化新的技术路线, 使传统数控加工程序的“G-代码”(第 1 代码)和多目标优化加工的智能控制“i-代码”(第 2 代码)同步运行, 实现了数控加工的优质、高效、安全和绿色。将加工程序 G 代码在 Cyber NC 上进行模拟仿真优化迭代, 直到达到优化目标为止, 并根据优化结果生成第 2 代码(i

代码)指令。实际加工时, 原来加工程序 G 代码与含有优化结果的 i 代码在数控中同时运行, 从而实现加工过程的优化。配置这种智能数控的 3 种机床上的试验验证了这种体系架构的智能机床具明显的效果^[16]。

(4) 德国西门子围绕“机床数字化制造”, 借助“数字化孪生”来实现从产品研发、设计、生产, 直到服务的全过程数字化, 从而实现效率、可用性和可靠性的提高, 进一步优化加工精度、设计、加工过程乃至维护和服务。西门子于 2019 年国际机床展上推出了全新理念的数控系统 Sinumerik One^[17], 第 1 次将数字孪生纳入数控系统中, 从而在一个高性能硬件平台下实现虚拟与现实的融合, 依靠在虚拟与现实空间的无缝交互, 为机床控制器在功能、性能、数字化和智能化方面树立了新的标准。无论是机床制造商还是机床使用者, 都

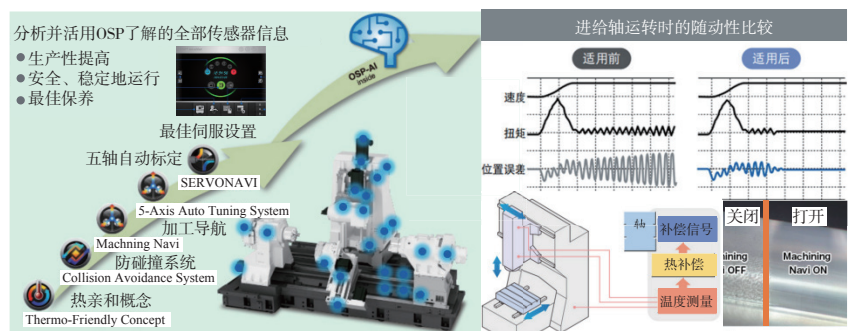


图6 日本大隈OKUMA公司的智能化机床

Fig.6 Intelligent CNC machine tools of OKUMA in Japan

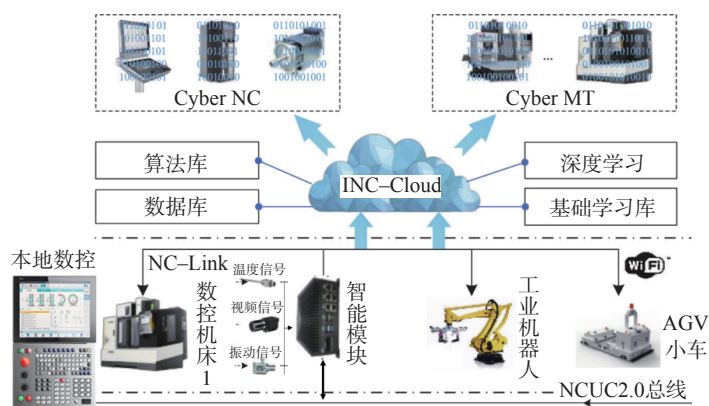


图7 华中9型智能数控系统架构

Fig.7 Architecture of Huazhong A9 intelligent CNC system

将直接从数字孪生数控系统上获益。

Sinumerik One 集成了 Simatic s7-1500F PLC, 通过 OPC UA 进行高效的数据交互, 可与 TIA 博途软件平台配合, 为机床制造商和用户提供一便捷高效的研制和使用环境, 还将信息安全集成至数控系统, 支持统一的西门子工业安全标准, 实现纵深防御的工业安全理念。Create Myvirtualmachine 和 Run Myvirtualmachine 两款应用软件也集成在数控系统中, 可使用户方便地在数控系统中创建机床的数字孪生, 实现数控对真实机床与虚拟机床(数字孪生)的同步操控, 促进制造业向数字化智能化转型。

(5) 孪生控制 “Twin Control” 是欧盟地平线 “Horizon 2020” 框架计划中项目^[18], 它通过在虚拟世界中不断更新集成各种仿真优化后的模型, 应用整体概念和方法使实时模型具有更逼真的性能和更准确的评价能力, 如图 8 所示, 在物理世界里, 机床制造商设计、生产机床, 然后卖给用户使用。“Twin Control” 模型在虚拟世界中集成了进给驱动、数控、机床结构、加工工艺过程等模型以及能耗模型, 能够实时预测机床加工及其部件工作状态, 并将相关数据上传到云平台的机床数据库, 通过与对机床实际监测和试验的数据进行比较, 进行模型的修正与更新。同时将物理机床的实际状态、性能预测、维修计划、补偿和控制数据传给机床用户和机床制造商, 使加工过程透明以及进一步利用数据。

数控系统智能化展望

互联网、物联网、移动通信, 云平台大数据、三维模型及 VR/AR 等新一代信息技术为数控系统带来新机遇, 这也要求数控系统向硬件资源虚拟化、系统软件平台化、应用软件开发化方向发展。智能机床是人工智能与制造技术的融合, 制造是主体,

人工智能技术是给制造赋能的技术, 目的是为制造升级服务。在制造智能化过程中, 以智能技术为主导, 依托制造技术这个本体, 两者辩证统一。智能制造主要的特征表现为智能设备组成智能工厂, 智能工厂进行智能产品制造, 依托智能产品进行智能服务。虽然智能制造以数字化制造为基础, 但它与上一代以数据和信息为核心的数字化制造有着明显的不同, 其特征表现在处理的对象是知识, 基于新一代人工智能、性能自我优化和安全容错。

数字化网络化时代标准化更加具有突出的意义, 一个产品或企业不在一个标准体系或生态系统下很难生存和发展, 所以各个先进国家都想主导标准的研发以引领技术的发展。随着 CPS 及工业 4.0 技术体系的发展, 工业 4.0 的理念和体系

架构被广泛接受, 中国和德国在工业 4.0 技术方面建立了良好的合作。所以在工业 4.0 理念下构建智能化机床框架体系, 以工业 4.0 组件技术构建智能型数控系统是发展机床智能化优先考虑的技术路线。通过工业 4.0 组件的资产管理壳 (Asset Administration Shell, AAS) 实现标准化组件封装^[19], 从而实现构建小到部件、到系统设备, 大到整个工厂甚至整个城市的智能化系统, 如图 9 所示。

智能数控在这个理念下研发, 可由不同的工业 4.0 组件, 如译码组件、插补组件、显示组件、伺服驱动组件或故障诊断组件等组合成一个智能数控系统, 组件之间实现标准化的互联互通, 从而构建出一个系统级的智能数控机床。目前管理壳 AAS 的标准还在制定和逐渐完善中, 按照

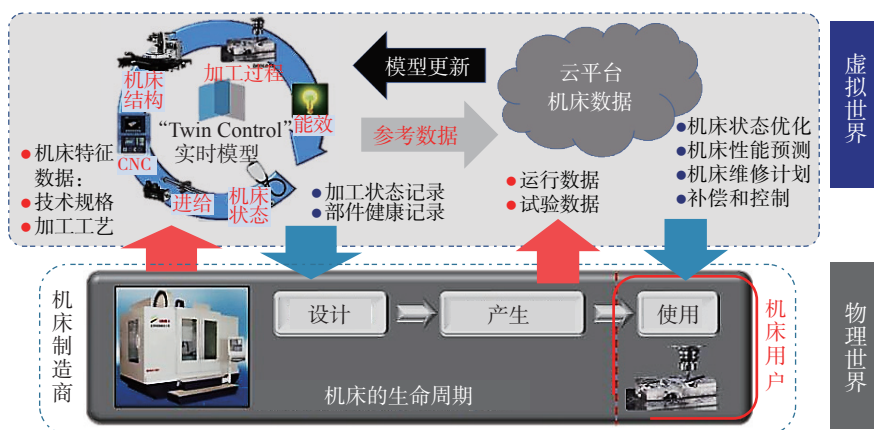


图8 欧盟 “Twin Control” 孪生控制项目

Fig.8 Project “Twin Control” of EU

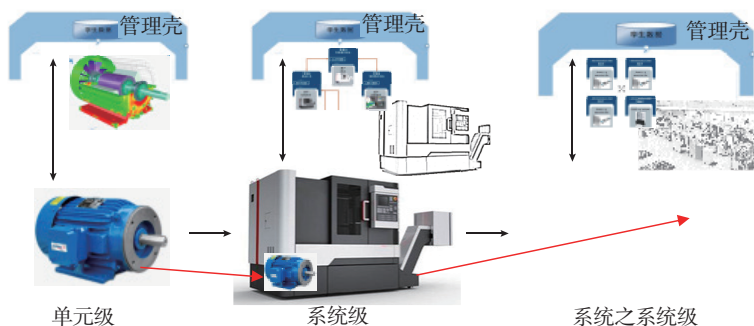


图9 基于工业4.0组件的数控技术发展路线

Fig.9 Development of CNC technology based on Industry 4.0 components

AAS 的架构和标准实现包含机床能力属性、历史履历以及数字孪生体等的智能数控管理壳 AAS,在语义层面将实现智慧的“交流”,从而自主适应环境和任务的变化。如果设备自身具有智能和学习能力,组成的“群体社会”车间或工厂就会衍生出更复杂智慧的能力,从而构建起智能制造坚实的基础。

国内沈阳机床研制的 i5 数控及其生态系统,是应用工业互联网理念发展智能数控技术的典型代表。i5OS 以平台形式提供运动控制核心技术支持,同时向社会开发者和使用者开放。其突出的特点是互联网特性强,在 iSESOL 云平台下方便成为智能生态链中的节点;丰富的 APP 资源,便于扩展功能和定制开发,提供了基于 Windows、Linux 以及移动端 iOS、Android 的多平台 APP 统一的开发平台和实现框架,使用户能够专注高价值的应用开发^[20]。

i5OS 的技术架构分为 4 层,如图 10 所示,分别是用户应用层、应用通信及框架层、运动控制层以及 Linux 内核驱动层。其中运动控制层为核心部分,实现对机床运动轨迹的实时控制;用户应用层为用户可以直接应用各类 APP;应用通信

及框架层提供各类接口,实现 APP 和底层之间的通信;Linux 内核驱动层则负责处理线程、内存、资源等问题。i5OS+iSESOL 生态系统可以快速开发与 iSESOL 云平台互动的智能 APP,构建云数控系统,实现制造装备与云端的数据交互,如速度、电流、温度、加工程序、加工零件个数和切削时间等,iSESOL 工业互联网平台还可以对生产制造数据进行分析处理和用,从而在生产过程中实现提速增效、自适应控制加工、刀具寿命管理、设备状态监控预警以及生产计划的安排实施等。

结论

数控系统作为机床的大脑,承担着机床实现智能化的关键任务。智能化不是机床技术发展的目标,而只是提高机床效能获取最大效益的手段之一,所以提高机床本身的机电性能满足加工的需求仍然是重要的任务。结合传感器及嵌入式系统的应用,机床的零部件如主轴也有了自己的“大脑”,机床的智能化从这些零部件到加工过程的相关领域展开,目前机床智能化还是早期阶段,还不具备自主适配适应新的加工任务或环境的能力。日本的机床企业在智能

化应用实践方面起步较早,占据了世界领先的地位;德国企业在工业 4.0 技术的推动下,以系统化理念开展机床智能化的研发,展现出很好的发展前景;我国企业借助大市场和互联网的优势,在云平台技术支持下呈现出与国外数控系统的竞争能力。

参考文献

[1] ZHOU J, ZHOU Y H, WANG B C, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2019, 5(4): 624-636.

[2] LI R X, ZHANG X Z, HAO QING X, et al. Preparation and properties of micro-hydroxyapatite/chitosan composite membrane[J].Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1):97-103.

[3] 孙名佳. 数控机床智能化技术研究[J]. 世界制造技术与装备市场, 2012(4): 74-76, 81.

SUN Mingjia. Research on intelligent technology of NC machine tool[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2012(4): 74-76, 81.

[4] 樊留群, 朱志浩, 张曙, 等. 机床的数字控制(上)[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(9): 1-10.

FAN Liuqun, ZHU Zhihao, ZHANG Shu, et al. The numerical control of machine

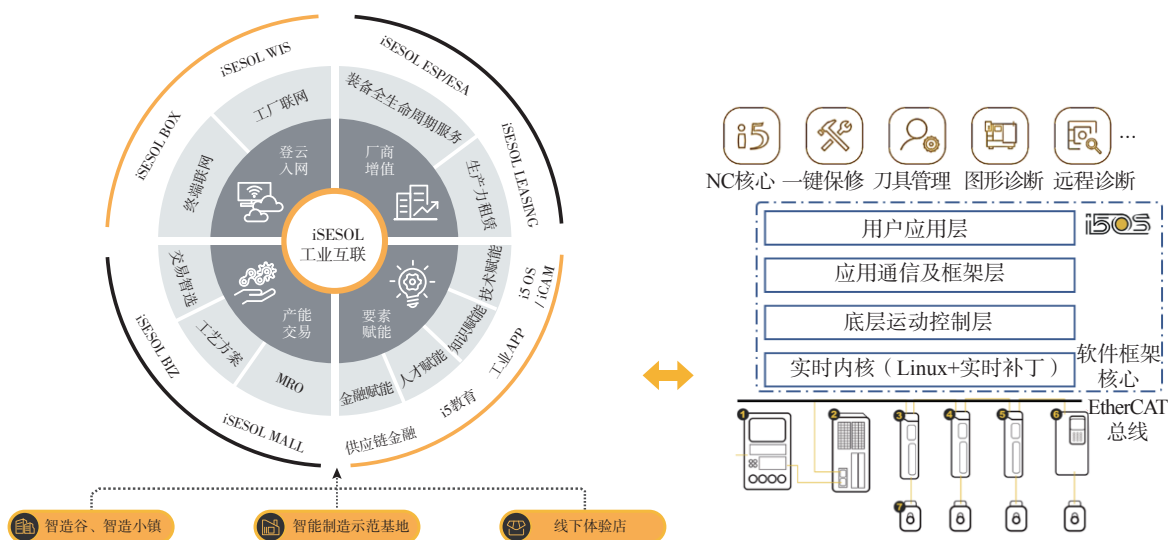


图10 i5OS及iSESOL智能生态系统
Fig.10 i5OS and iSESOL intelligent ecosystem

- tool[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(9): 1-10.
- [5] 张曙. 开放式数控系统的现状与趋势[J]. 世界制造技术与装备市场, 2007(1): 84-87.
- ZHANG Shu. State and tendency of open NC system[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2007(1): 84-87.
- [6] 韩振宇, 李茂月, 富宏亚, 等. 未来机床——开放式智能数控机床的研究进展[J]. 航空制造技术, 2010, 53(10): 38-44.
- HAN Zhenyu, LI Maoyue, FU Hongya, et al. Research progress of open type intelligent NC machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(10): 38-44.
- [7] PRITSCHOW G, ALTINTAS Y, JOVANE F, et al. Open controller architecture: past, present and future[J]. CIRP Annals, 2001, 50(2): 463-470.
- [8] 黄莹, 卢秉恒, 赵万华. 云计算在智能机床控制体系中的应用探析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 210-216.
- HUANG Ying, LU Bingheng, ZHAO Wanhua. Application of cloud computing in intelligent machine tool control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 210-216.
- [9] STEP Tools. The STEP-NC AP238 standard[EB/OL]. [2020-01-01]. <http://www.steptools.com/stds/stepnc/>.
- [10] 李炳燃, 张辉, 叶佩青. 智能制造环境下的数控系统发展需求[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6):24-30.
- LI Bingran, ZHANG Hui, YE Peiqing. Function requirements of CNC system for intelligent manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 24-30.
- [11] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(1): 11-20.
- [12] 鄢萍, 阎春平, 刘飞, 等. 智能机床发展现状与技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 1-10.
- YAN Ping, YAN Chunping, LIU Fei, et al. Development status and technical system framework for smart machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 1-10.
- [13] DMG Mori. CELOS—from the idea to the finished product[EB/OL]. [2020-07-29]. <https://en.industryarena.com/dmgmori/blog/celeos-from-the-idea-to-the-finished-product--1955.html>.
- [14] Okuma Global. Okuma's intelligent technology[EB/OL]. [2020-07-29]. <https://www.okuma.co.jp/english/onlyone/index.html>.
- [15] 赵亚楠. 华中数控: 自主可控, 定义智能数控[J]. 自动化博览, 2019, 36(5): 34-35.
- ZHAO Yanan. Huazhong NC: autonomous and controllable, defining intelligent NC[J]. Automation Panorama, 2019, 36(5): 34-35.
- [16] CHEN J H, HU P C, ZHOU H C, et al. Toward intelligent machine tool[J]. Engineering, 2019, 5(4): 679-690.
- [17] Siemens Automation. Sinumerik one[EB/OL]. [2020-07-29]. <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/sinumerik-one.html>.
- [18] Twin-Control. Project overview [EB/OL]. [2017-03-02]. <https://www.twincontrol.eu/project-overview>.
- [19] Industrie 4.0. Plattform industrie 4.0 [EB/OL]. [2017-03-02]. <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Home/home.html>.
- [20] 沈阳机床上海研究院. i5 车床系统编程手册[EB/OL]. [2015-11-13]. <http://www.fiyangcnc.com/files/chechuangbiancheng.pdf>.
- Shenyang Machine Tool Design Institute Shanghai Branch. i5 lathe system programming manual [EB/OL]. [2015-11-13]. <http://www.fiyangcnc.com/files/chechuangbiancheng.pdf>.
- 通讯作者: 樊留群, E-mail: lqfan@tongji.edu.cn.

Demand and Prospect of Intelligent CNC System

FAN Liuqun¹, LIU Chen¹, DING Kai¹, HUANG Yunying²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. SYMG (Shanghai) Intelligence System Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

[ABSTRACT] With the analysis of history and status of the numerical control system, the signs of different development stages are summarized focusing on composition structure, driving characteristics, process methods and functions. With the influence of PC and open architecture, numerical control system reaches a stage in which all flowers bloom together. Digitization, networking and intelligence have become the consensus for the development of intelligent manufacturing. CNC system has been on the road of digitization since its birth. Fieldbus, real-time Ethernet and industrial internet technologies not only enable the CNC system itself, but also realize network interconnection with the outside world. Based on the analysis of the demand of intelligent CNC machine tools, the technical routes and implementation cases of intelligent CNC systems at home and abroad are analyzed, and the key technologies and prospects for the development of intelligent CNC systems are given.

Keywords: Intelligent numerical control; Cloud platform; Industry 4.0 component; Artificial intelligence; Service-oriented

(责编 古系)