

智能数控机床及其技术体系框架*

王 勃,杜宝瑞,王碧玲

(中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳 110850)

[摘要] 首先简要介绍了数控机床的发展趋势,其次结合当前学术界及工业界的实践,对智能机床的概念进行了定义,然后提出了智能机床的技术体系框架,并详细阐述了智能数控系统、智能元器件以及智能化应用技术等智能机床中的关键技术。

关键词: 智能; 数控机床; 制造; 体系框架

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.055



王 勃

工学博士,毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,主要研究方向为飞机数字化制造及智能制造技术的研究与应用。

数控机床发展趋势

加工设备的研制技术与制造业水平具有非常紧密的关系。如图1所示,制造业水平的发展历程主要可划分为如下几个阶段。(1)20世纪30年代至50年代:此阶段的加工设

* 基金项目: 智能制造专项综合标准化试验验证项目。

备主要是传统的机床,机械加工主要以手工或人工操作传统机床为主;(2)20世纪50年代至70年代:出现了应用电子管、程序纸带等技术的第一代数控机床,能够解决传统机床在曲线或曲面加工中的难题,同时也促进了自动化生产线的发展;(3)20世纪70年代至20世纪末:出现了多功能、复合化的机床,以及较为先进的柔性制造系统,此阶段的先进制造技术主要体现为以信息技术等为核心的计算机集成制造;(4)21世纪初至今,各大厂商在优化机床结构、完善数控计算内核的同时,广泛研究了智能加工、智能维护等技术,制造装备已向智能化方向发展,制造技术也在

自动化的基础上逐步向智能制造发展。

中国工程学会给出的智能设备技术路线为^[1]:在2020年前,实现智能感知、智能决策和智能执行,其中主要涉及到工况智能感知技术、智能维护技术、智能工艺规划技术以及智能伺服驱动技术;在2030年前,实现学习、推理和自律,其中主要涉及到智能编程技术、智能数控技术。

智能机床概念

自20世纪90年代以来,美国国家标准技术研究所、辛辛那提-朗姆公司、英国汉普郡大学等机构都对智能机床进行了研究,世界各知名机床

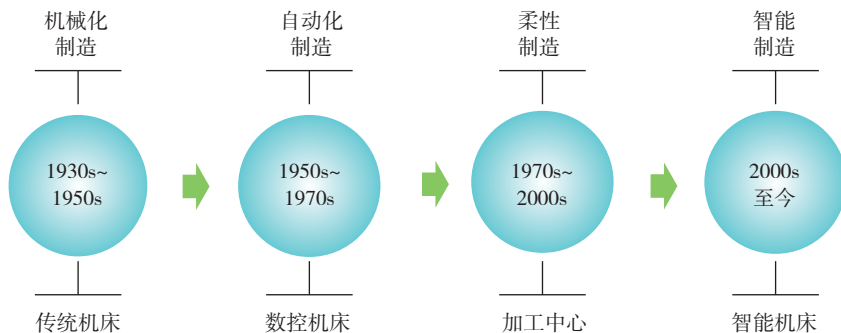


图1 加工设备的发展历程

Fig.1 Development of the processing equipment

厂商也分别推出了具备智能化功能的先进机床,如图2所示,下面分别对具有代表性的研究进行简要介绍。

美国国家标准技术研究所^[2-3]认为智能机床或智能加工中心应具有如下行为能力:(1)能够感知自身状态和加工能力并能够进行自我标定;(2)能够监视和优化加工行为;(3)能够对工件的加工质量进行评估;(4)具有自学习能力。瑞士米克朗公司^[4]认为智能机床能够实现人与机床的互动通信,进而将大量的加工信息提供给操作人员,并能够提供多种工具辅助操作人员优化加工过程;同时,智能机床可以检查自身状态并独立优化工艺,进而提高工艺可靠性和工件加工质量。日本Mazak公司^[5]认为智能机床能够进行自我监控,对与机床、加工状态、环境等相关信息进行综合分析,并采取应对措施来保证最优化的加工。

综上所述,尽管学术界及工业界尚未给出智能机床的标准定义,但一般认为智能机床应具有自感知、自分析、自适应、自维护、自学习等能力,并能够实现加工优化、实时补偿、智能测量、远程监控和诊断等功能,从而能够支持加工过程的高效运行^[6-8]。

智能机床技术体系框架

目前工业界对智能机床的研究主要涉及智能数控系统、智能基础元器件以及智能化应用

技术等领域,下面分别针对这些领域的关键技术进行简要阐述。

1 智能数控系统

智能数控系统是机床的“大脑”,直接决定了数控机床的智能化水平。智能数控是在传统数控技术的基础上发展而来的,集成了开放式数控系统架构、大数据采集与分析等关键技术。

(1) 开放式数控系统架构。

开放式数控系统是指数控系统遵循公开性、可扩展性、兼容性等原则开发,进而使得应用于机床中的软硬件具备互换性、可移植性、可扩展性和互操作性。开放式数控系统的基本体系结构可分为系统平台和应用软件两大部分,图3所示为某开放式数控系统的体系架构。

系统平台是对机床运动部件实施数字量控制的基础部件,包括硬件

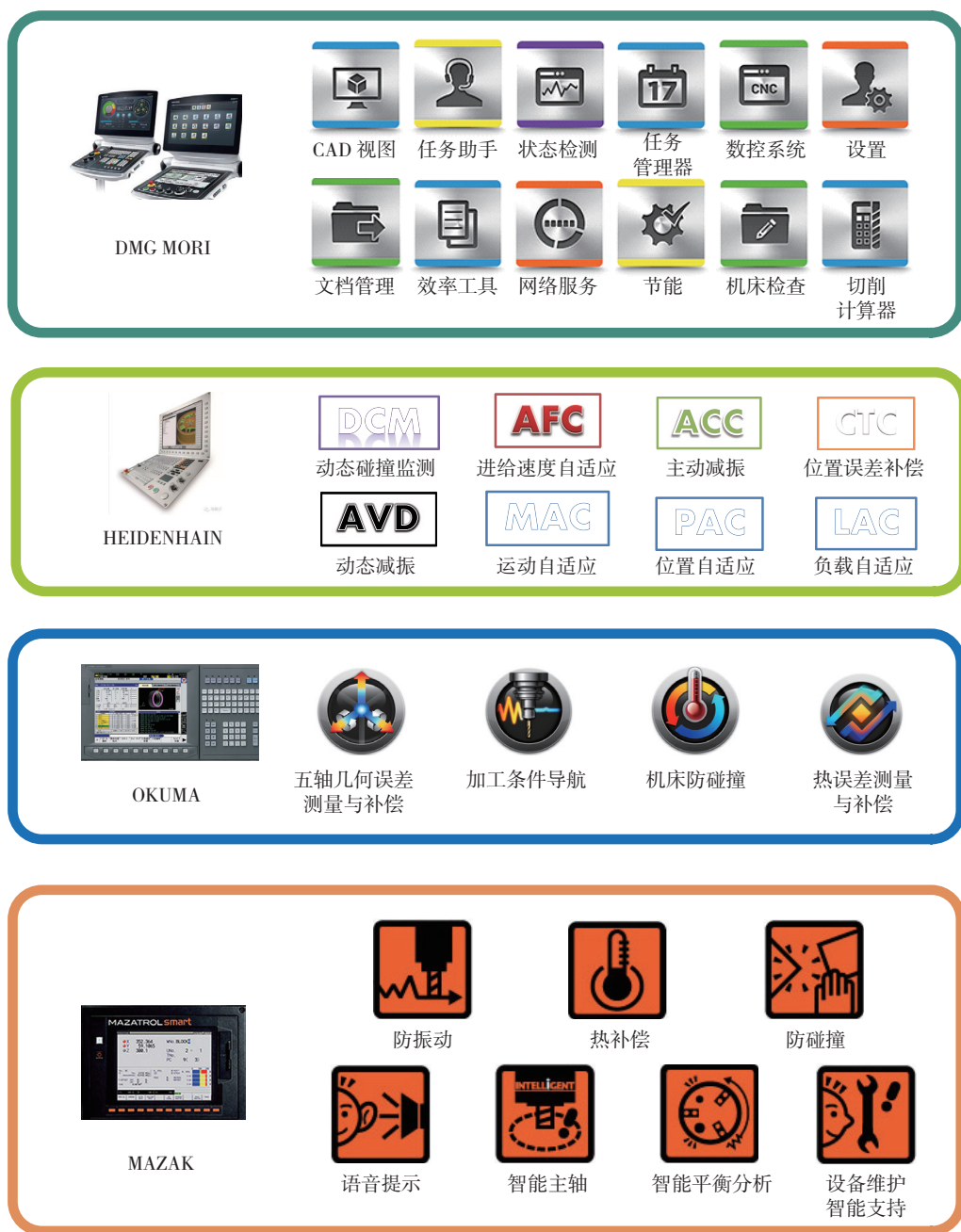


图2 各知名机床厂商推出的智能化机床功能

Fig.2 Functions of the smart machine tools provided by famous manufacturers

平台和软件平台,主要用于运行数控系统的应用软件。硬件平台是实现系统功能的物理实体,主要包括微处理器系统、信息存储介质、电源系统、I/O 驱动、显示器、各类功能面板和其他外设。这些硬件可以分为 NC 硬件、PLC 硬件以及计算机基本硬件等类型,它们在操作系统、支撑软件和设备驱动程序的支持下,执行各项任务。软件平台是联系硬件平台和应用软件的纽带,是开放式数控系统体系结构的核心,由操作系统、通信系统、图形系统以及开放式数控系统应用编程接口等软件组成。它通过应用程序编程接口向应用软件提供服务,只有在软件平台的作用下,应用软件才能实现对系统硬件资源的利用和控制。软件平台的性能在很大程度上影响整个系统的性能,也影响应用软件的开发效率^[9-10]。

应用软件是以模块化的结构开

发的,能够实现专门领域的功能要求。应用软件通过不同的应用编程接口封装后可以运行在不同的系统平台上。一般而言,应用软件可分为标准模块库、系统配置软件 and 用户应用软件。标准模块库中包括运动控制模块、I/O 控制模块、逻辑控制模块、网络模块等;系统配置软件提供集成、配置功能模块的工具和方法,以便将所需的模块配置成一致的、完整的应用软件系统;用户应用软件可以根据应用协议自行开发,也可以由系统制造商开发。

(2) 大数据采集与分析技术。

随着数控机床的开放性逐步提高,现代机床可支持的基础元器件种类显著增多,同时,针对不同的数据采集需求,越来越多的传感器内嵌到数控机床中。机床数据采集种类不仅包括机床内部信息,如光栅尺位置、指令信息、主轴电流、力矩电流、

G 指令时间、刀具信息等,也包括外加传感器的信息,如主轴径向变形、床身振动、机床热误差等。这些数据不仅能够支持一般的制造过程管理,而且足以支持基于大数据分析的制造过程优化。

从技术发展途径的角度来看,实现基于大数据分析的加工过程优化分为以下 3 个步骤:首先,实现机床大数据的可视化。显性的、量化的制造过程数据是分析与决策的依据,目前大多数控系统均提供了数据采集接口,能够方便地从中提取相关参数信息,其基本原理如图 4 所示。其次,实现基于可视化数据的辅助智能。当制造数据被提取出来之后,建立这些数据与加工过程、加工指令之间的映射关系,并通过人工分析影响加工效率或加工质量的程序片段予以优化。最后,实现基于大数据的人工智能。建立制造数据与质量、效率之间的关联知识库,通过对机床运行参数的实时分析来预判产品质量、机床故障等,并进行实时优化调整,进而真正达到自适应加工的水平。

2 智能元器件

数控加工过程是一种动态、非线性、时变和非确定性的过程^[11],其中伴随着大量复杂的物理现象,它要求数控机床具有状态监测、误差补偿与故障诊断等智能化功能,而具备工况感知与识别功能的基础元器件是实现上述功能的先决条件。

传感器是现代数控机床中非常重要的元器件,它们能够实时采集加工过程中的位移、加速度、振动、温度、噪声、切削力、转矩等制造数据,并将这些数据传送至控制系统参与计算与控制。其中,典型的传感器类型如表 1 所示。

位置传感器是数控机床中应用最多的一类,这类传感器能够精准地获知机床运动部件的位置信息,进而使机床的加工精度与加工效率获得极大提升。力传感器也是数控机床

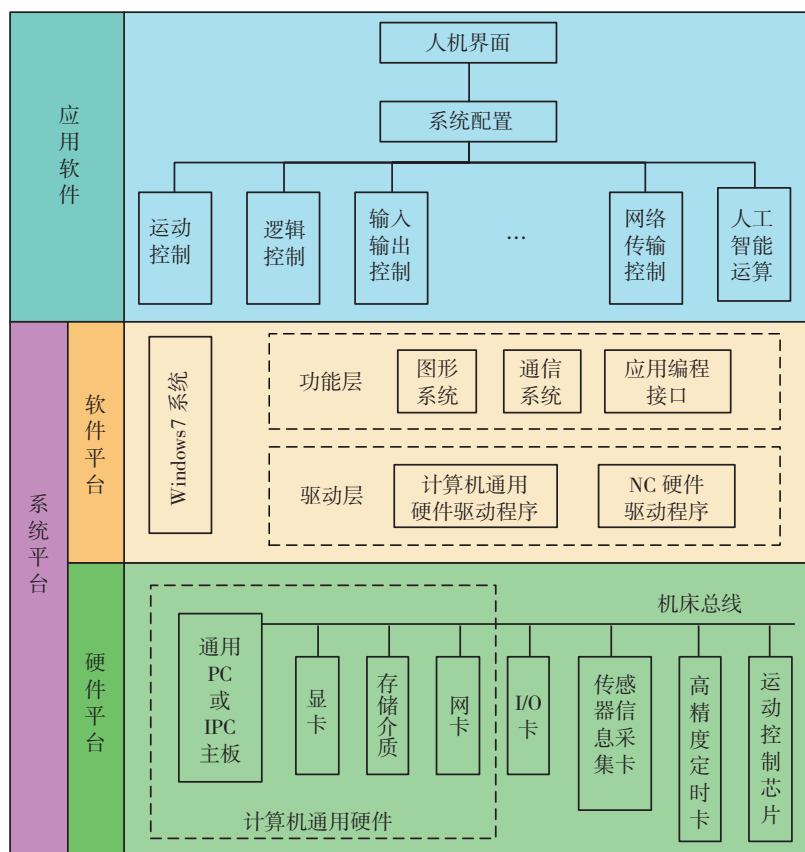


图3 某开放式数控系统体系架构

Fig.3 Architecture of one open CNC system

中普遍采用的一类,在加工过程中,机床通过这些传感器感知工件的夹紧力、切削力等关键数据。同时,在润滑、液压、气动等辅助系统中也安装有压力传感器,用于对这些系统进行监控,并保证机床的正常运转。温度传感器在数控机床中具有广泛的应用,这是由于数控机床中采用的部分元器件在工作过程中将产生大量热,温度过高不仅会对零件的加工质量产生影响,同时也会对机床元器件的寿命造成不利影响。例如,机床的主轴箱、轴承等部位易产生过热现象,如不及时诊断并加以排除,则可能引起零件的烧损。

除了单纯嵌入上述传统的传感器之外,智能机床中还采用了多传感器融合、智能传感器等先进技术。如图5所示,国外机床厂商^[12-13]研制的“智能主轴”中嵌入了智能传感器,能够同时检测温度、振动、位移、距离等信号,实现对工作状态的监控、预警以及补偿,不但具有温度、振动、夹具寿命监控和防护等功能,而且能够对加工参数进行实时优化。又如,国外某厂商将集成为力传感器、扭矩传感器、温度传感器、处理器、无线收发器等装置的芯片嵌入到刀具夹具内,能够实现刀具颤动频率的预估,并能够自动计算出合适的主轴转速与进给速率等加工参数^[14-15]。

3 智能化应用技术

在数控机床中搭载具有开放性架构、支持大数据分析等功能的智能数控系统,并嵌入必要的智能基础元器件,数控机床便具备了智能化的必要条件。在此基础上,可以根据实际需求开发出智能化应用程序并嵌入到数控系统中,使设备能够充分发挥其最佳效能,提升产品制造质量,并实现设备的健康监控与故障诊断等。在数控机床的智能化应用技术研究中,国内外主要集中于机床智能化运行、机床智能化维护以及机床智能化管理等方向,其中以智能化运行与智

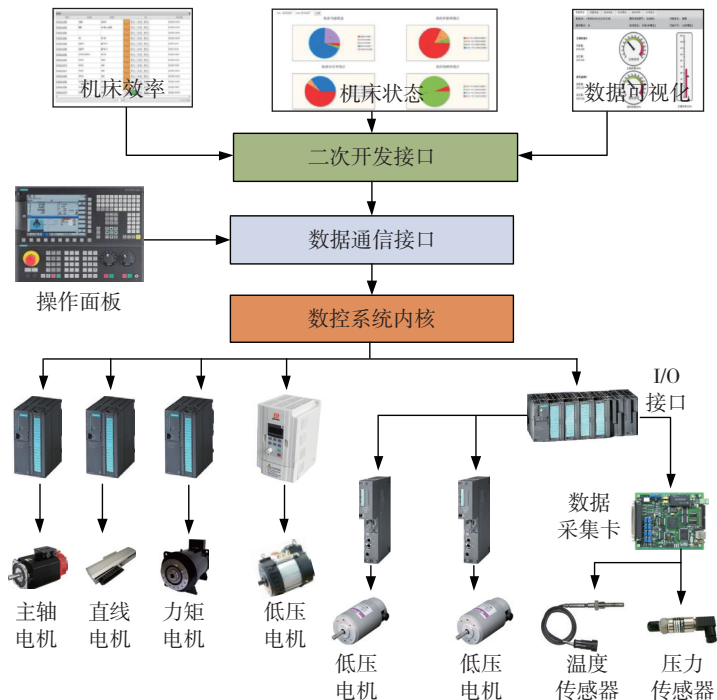


图4 机床运行数据提取的原理

Fig.4 Theory of running data extraction of machine tools

表1 数控机床常用传感器类型

类型	感知变量特征	感知变量
光传感器	光波特征	发射量、吸收量、反射量
电传感器	电场特征	电荷、电流、电势
磁传感器	磁场特征	磁通量、磁导率
热传感器	热量特征	温度、热容、热导、热流
声传感器	声波特征	声波波普、声波波矢
位置传感器	位置特征	位移、距离、角度速度、加速度
力传感器	力学特性	力、应力、应变、扭矩

能化维护的研究最具代表性。在机床智能化运行方面,主要的研究涉及机床热误差、几何误差等的补偿,机床振动检测与抑制,机床防碰撞,在机质量检测等方面。在机床的智能化维护方面,主要研究涉及机床故障诊断与维护、刀具磨损与破损的自动检测方法等方面,以下简要介绍几个智能机床的应用技术。

(1) 基于光纤传感器的机床热误差补偿。

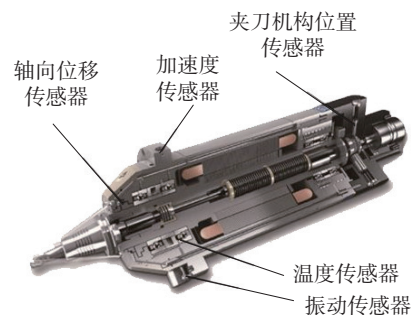


图5 瑞士普特电主轴传感器分布

Fig.5 Sensors squipped in the motorized spindle of Sprutt Swiss

结构变形是制约高端机床精度的重要因素之一。然而,机床的力热变形规律呈现出强烈的时变非线性,采用传统手段难以进行定量计算和预测,此前只能通过电类传感器监测技术进行补偿,不仅难度大,且技术稳定性较差,补偿效果难以满足需求。

基于光纤传感器的数控机床力热在线监测技术可以很好地解决上述问题。光纤传感器是以光纤作为感知材料的传感器,与传统传感器相比,光纤传感器具有敏感度高、抗电磁干扰、结构简单、体积小等优点。如图6所示为基于光纤的机床热误差监测系统结构示意图,为了对机床表面温度以及环境温度进行监测,系统采用多个测量点建立了机床表面及环境温度的测量场,其中床身与立柱上布有15个传感器,电机、主轴、变速箱上布置9个传感器,另外4个传感器用于对环境温度的测量。

在测量过程中,以24h为一个周期,记录期间机床刀尖位移的热误差以及各测量点的温度变化情况,同时记录机床周围环境温度在24h内的变化情况,所得的数据分别如图7、图8所示。在测量完毕后,以温度数据为输入、刀尖位移的热误差为输出建立神经网络模型,并利用神经网络模型对热误差进行预测补偿,试验数据表明,未补偿前热误差的最大值为 $15\mu\text{m}$,在经过补偿后,最大值显著降低至 $5\mu\text{m}$,如图9所示。由此可见,采用光纤传感器进行机床的热误差补偿可以取得良好的效果。

(2) 刀具智能管控。

刀具管理是智能机床的一项重要非常重要的功能,在提高设备的利用率、提高产品质量以及延长刀具寿命等方面起到关键作用。目前飞机制造领域中普遍采用的刀具管控系统主要有两个方面功能,即刀具寿命管理与刀具破损管理。在刀具寿命管理方面,智能机床的刀库或机床所在

柔性生产线的刀库中具有一个刀具列表,其中记录了所有刀具的参数。新刀具加入刀库时,会触发刀具管控系统的中央控制器,并触发对刀仪进行对刀操作,对刀仪读取刀具上的芯片,并将刀具的信息传递到刀具管控系统。在加工开始前,刀具管控系统首先检测当前刀具的剩余寿命,并能够在将要达到刀具寿命之前的一段时间内进行报警。在刀具破损或磨损管理方面,刀具管控系统可实时检测刀具的工作状态,一旦出现刀具破损或磨损的情况,刀具管控系统会自动将刀具退回刀库中,并进行锁死,直至人工将刀具处理完毕。

图10所示为某刀具管控系统的

硬件组成,该系统首先在数控机床中嵌入了声波、加速度等不同类型的传感器,这些传感器的信号通过数据采集卡进行采集,并被传送至控制单元,然后由控制单元对信号进行分析与处理。数据采集卡可直接安装在数控系统的控制器上,也可单独外置。在系统使用之前,首先需要采用试切法完成系统对加工过程的学习,在此过程中刀具管控系统记录加工过程中传感器的各种信号变化过程。在实际加工中,系统实时采集传感器的数据,并与学习中所获得的信号值进行比对,如图11所示。当出现断刀、缺刀或刀具严重磨损等情况时,系统将会弹出报警信息,进而避免机

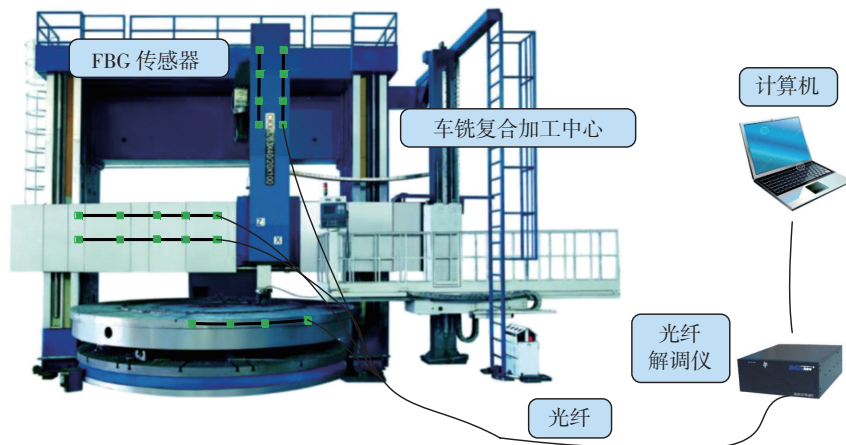


图6 机床热误差补偿系统组成

Fig.6 Composition of the thermal error compensation system of machine tools

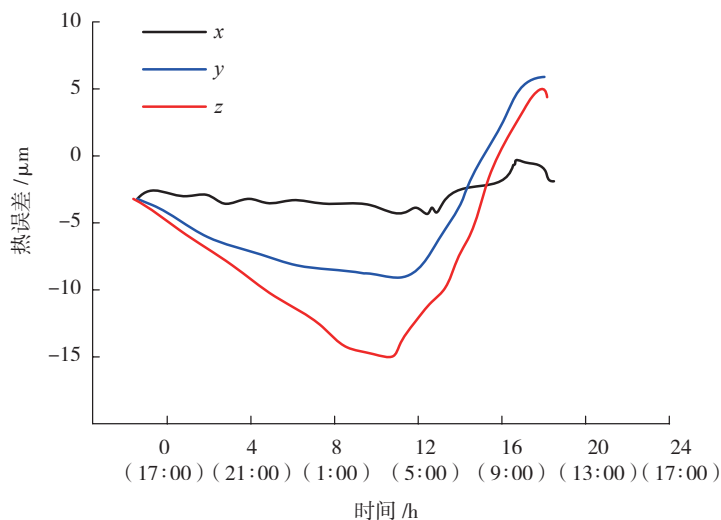


图7 刀尖位移误差在24h内的变化

Fig.7 Tool nose displacement change within 24h

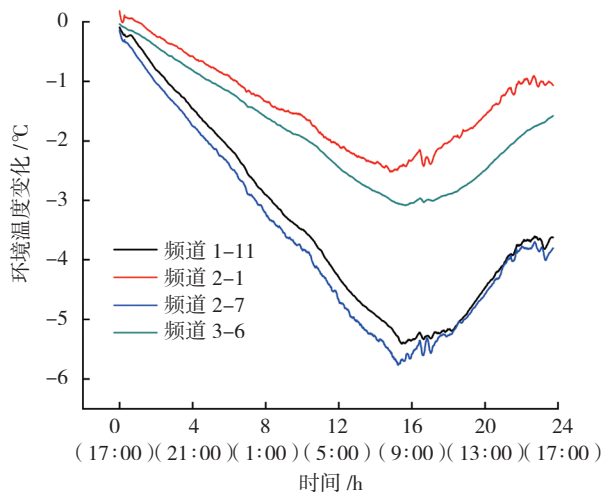


图8 机床周围温度在24h内的变化

Fig.8 Temperature changes around the machine tool within 24h

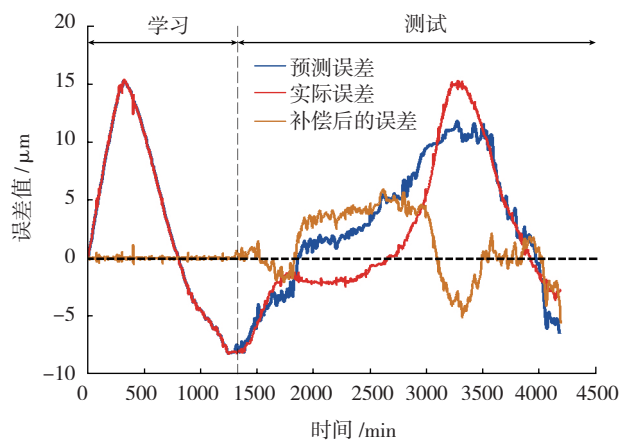


图9 补偿前后的误差对比

Fig.9 Error comparison before and after compensation

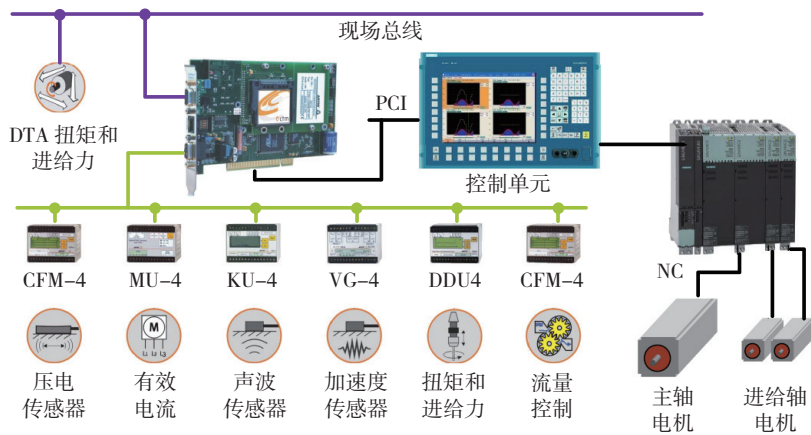


图10 某刀具管控系统的硬件组成

Fig.10 Hardware compositions of cutting tool management and control system

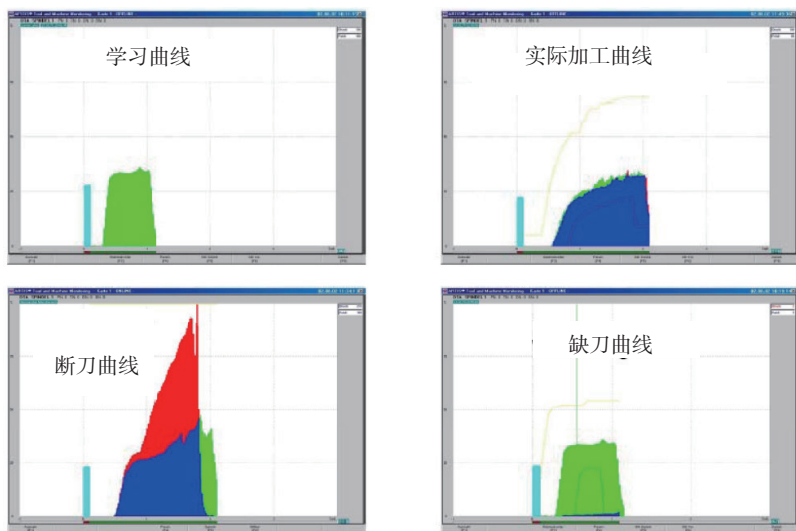


图11 刀具监控曲线

Fig.11 Monitoring curves of cutting tools

床或刀具的进一步破坏或零件的报废。

结束语

机床是制造业的基础和关键,高性能的智能机床是提高产品质量与生产效率的先决条件。虽然我国目前的机床产出量位居世界前列,但在高端智能机床的自主研发方面仍有待提高,尤其是在智能数控系统、智能元器件以及智能化应用技术的开发方面仍需更深入的探索研究。

参考文献

[1] 中国机械工程学会. 中国机械工程 技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
Chinese Mechanical Engineering Society. Chinese mechanical engineering technology map[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.

[2] ATLURU S, HUANG S H, SNYDER J P. A smart machine supervisory system framework[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5-8): 563-572.

[3] FLYNN J M, SHOKRANI A, NEWMAN S T, et al. Hybrid additive and subtractive machine tools: research and industrial developments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 79-101.

[4] HUANG J, ZHOU Z D, LIU M Y, et al. Real-time measurement of temperature field in heavy-duty machine tools using fiber Bragg

grating sensors and analysis of thermal shift errors[J]. *Mechatronics*, 2015, 31: 16–21.

[5] JANKOWSKI M, WOZNIAK A. Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools[J]. *Measurement*, 2016, 77: 317–326.

[6] 杜宝瑞, 王勃, 赵璐, 等. 航空智能工厂的基本特征与框架体系[J]. *航空制造技术*, 2015(8): 26–31.

DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. Basic characteristics and framework of aviation intelligent plant[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(8): 26–31.

[7] 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 of intelligent machine tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(21): 1–10.

[8] 杜宝瑞, 王勃, 赵璐, 等. 智能

制造系统及其层级模型[J]. *航空制造技术*, 2015(13): 46–50.

DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. Intelligent manufacturing system and its hierarchy model[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(13): 46–50.

[9] 王跃辉, 王民. 金属切削过程颤振控制技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(7): 166–174.

WANG Yuehui, WANG Min. Research progress of chatter control technology in metal cutting process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(7): 166–174.

[10] 姚明明, 吴波. 智能加工设备的研究综述[J]. *机械制造*, 2006(12): 60–63.

YAO Mingming, WU Bo. A research survey of smart machining equipment[J]. *Mechanical Engineering*, 2006(12): 60–63.

[11] 张存吉, 姚锡凡, 张翼翔, 等. 从“数控一代”到“智慧一代”[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(7): 1734–1743.

ZHANG Cunji, YAO Xifan, ZHANG Yixiang, et al. From NC generation to wisdom generation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(7): 1734–1743.

[12] Starrag Group. Machining solutions with shortest possible cycle times [EB/OL]. [2016–03–15]. <https://www.starrag.com/en-us/products/scharmann-244>.

[13] 邵泽明, 关大力. 数控机床智能化技术[J]. *航空制造技术*, 2015(5): 46–49.

SHAO Zeming, GUAN Dali. The intelligent technologies of NC machine tool[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(5): 46–49.

[14] HELU M, MORRIS K, JUNG K, et al. Identifying performance assurance challenges for smart manufacturing[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 6: 1–4.

[15] JUNG K, MORRIS K C. Mapping strategic goals and operational performance metrics for smart manufacturing systems[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 44: 184–193.

Smart CNC Machine Tool and Its Technological System Frame

WANG Bo, DU Baorui, WANG Biling

(AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] Firstly, the development trend of the CNC machine tools is introduced in this paper. Secondly, the concept of smart machine tool is given according to the practices both in the study field and industry field. Thirdly, the technological system frame of the smart machine tool is presented, and the key techniques of the smart CNC machine tool such as smart CNC system, smart components, and the smart application techniques are discussed in detail.

Keywords: Smart; CNC machine tool; Manufacturing; System frame

(责编 谷雨)

(上接第 54 页)

Intelligence of CNC Machine Tool and Its Application in the Field of Aviation

FANG Hui, XU Bin

(School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

[ABSTRACT] CNC machine tool is a kind of basic support equipment in key areas of national economy. Now it has become the basic requirement for the production system to carry out personalized design and manufacture according to the needs of users. Intelligent machine tool, embodied in intelligent processing, operation and management and processing capabilities, is not only a manifestation of advanced CNC machine tool, but also an effective way to deal with personalized manufacturing trends. Aviation industry is a typical field of personalized manufacturing, where machine tool design and manufacturing companies have taken measures to meet the requirements about CNC machine tool, for example, to enhance the level of intelligence, improve specialization, and provide a composite processing capacity of machine tool.

Keywords: CNC machine tool; Intelligence; Additive manufacturing; Aviation

(责编 谷雨)