

开放式、智能化“蓝天数控” 系统及应用实践*

于东^{1,2}, 毕筱雪^{1,3}, 刘劲松^{1,3}, 郎言书^{1,3}, 于皓宇^{1,3}, 黄艳²

(1. 中国科学院沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168;

2. 沈阳高精数控智能技术股份有限公司, 沈阳 110168;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 针对新一代信息技术的发展和航空航天领域智能制造的应用需求,通过分析数控系统的技术趋势,建立了开放式、智能化数控系统的多维度需求框架,提出了开放式、智能化数控系统的可重构数控系统平台、基于信息终端的工艺链集成以及基于工业大数据产品生命周期管理体系结构,研制出“蓝天数控”系统,并通过航空制造领域典型零件的加工控制应用实践,探索了实现开放式、智能化数控系统的实现路径。

关键词: 智能制造; 新一代信息技术; 开放式体系结构; 可重构系统; 工艺链集成; 工业大数据

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.022



于东

研究员、博士生导师,中科院沈阳计算所高档数控国家工程研究中心总工程师、沈阳高精数控智能技术股份有限公司总经理。主要从事高档数控技术的研发与产业化工作,作为04专项课题负责人,研制出总线式全数字高档数控系统“蓝天数控”产品,产品在航空航天等重点领域应用,获数控技术方面的发明专利20余项。

随着新一代信息技术的发展及其与先进制造技术深度融合,全球兴起了以智能制造为代表的新一轮产业变革。德国提出“工业4.0”战略^[1],美国提出工业互联网^[2],中国提出《中国制造2025》^[3],大力发展智能制造技术,通过以数字化、网络化、智能化为代表的智能制造技术,实施以批量化的制造成本,实现客户化的制造模式,以快速响应市场来应对激烈的市场竞争。

数控系统作为制造技术与信息技术融合的产物,“工业4.0”、“工业互联网”以及“智能制造”的发展对其设计提出了新要求^[4]。在开放式数控系统的基础上,通过将工业互联网、大数据、数字孪生、人工智能等新一代信息技术融入数控系统,开展开放式、智能化数控系统的

*基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题(2018ZX04035001)。

研发,在确保加工控制要求的基础上,进一步实现数控系统对加工过程的全面感知及智能控制,以增强系统加工处理能力;并通过智能编程、智能故障诊断和远程监控,以及设备故障的预测诊断等功能,提升数控机床的性能和可靠性,提高复杂零件的加工效率和质量,在航空航天、汽车制造等领域具有广泛的应用前景。

本文通过分析智能制造与新一代信息技术对数控技术产生的新要求,提出了开放式、智能化数控系统的多维度需求框架,建立了可重构数控系统平台和基于信息终端的工艺链集成以及基于工业大数据产品生命周期管理体系结构,研制了“蓝天数控”系统,并通过航空制造领域关键零件的加工控制应用,探索了开放式、智能化数控系统的实现路径。

数控系统的新需求

作为制造技术与信息技术融合的产物,数控系统伴随着信息技术的发展而不断演化。传统的数控系统为满足其对功能与性能安全、可靠的要求,通常采用封闭式结构^[5]。开放式及PC技术的发展推动了数控系统从封闭走向开放,并促使其使用成本的降低^[6]。开放式数控技术不仅使数控系统在制造车间得到普及,也为融入新的技术奠定了基础。近年来,信息与通信技术(ICT)的发展,特别是传感器、物联网、大数据、人工智能的发展,为研制基于ICT技术的智能化数控系统创造了条件,新技术、新功能不断与数控系统发生融合。

(1)将智能控制技术与自动化技术融合数控系统,以提高加工的精度、质量和效率。如FANUC推出的Series 0i MODEL F具备满足自动化需求的工件装卸控制功能,强化了循环时间缩短功能。HEIDENHAN系统的集成自适应控制(AFC),可根据刀具轴性能和其他工艺参数优化进给速率。MAZAK的Intelligent Thermal Shield(ITS)功能,可通过热补偿技术提高加工精度^[7]。

(2)通过工业互联网技术实现加工过程的感知及与智能工厂的融合。如OKUMA等国外数控通过引入温度、振动、噪声等新一代传感器监测主轴健康、刀具磨损、冷却液温度、能耗等,全面感知加工过程,实现基于RFID的刀具管理。SIEMENS产品通过OPC UA实现数控系统与数字化车间的互联互通。

(3)通过数字化技术实现工件设计与编程、机床配套调试的优化、加工过程仿真等工序链的一体化。如SIEMENS产品通过数字孪生技术进行工件设计和编程、机床参数的调试与优化、工件加工过程的仿真,以及CAD/CAM-CNC工序链的集

成。MAZAK的Smooth X数控系统采用图解界面和多点触屏操作,优化用户体验,简化五轴加工操作;内置应用软件可以根据实际加工材料和要求为操作者匹配设备参数。

(4)通过互操作技术将数控系统、车间工艺与企业信息系统整合在一起,为实现数字化和无纸化生产,实现智能工厂奠定基础。DMG推出的CELOS系统简化和加快了从构思到成品的进程,其应用程序(CELOSAPP)使用户能够对机床数据、工件图纸与程序、工艺流程以及合同订单等进行操作显示、数字化管理和文档化,如同操作智能手机一样简便、直观。

另一方面,近年来智能制造在航空航天、汽车制造的推广与应用,也使数控机床不再单纯是加工设备,而是智能工厂/数字化车间的重要组成部分。智能制造的批量客户化的制造需求,要求将加工现场的感知、大数据处理、数字化建模、智能决策等新功能集成到数控系统中,形成制造过程的闭环,研制开放式、智能化数控系统(图1),建立系统在不确定环境中智能行为^[8-9],应对不确定的市场环境,并对数控系统的开发与应用也提出了新需求。

在航空制造领域中,典型零件如机匣、叶片、大型的飞机结构件等具有壁薄、形状复杂的特点,由于加工工期长,所配套的高档数控系统须具



图1 开放式、智能化数控系统
Fig.1 Open and smart CNC system

有智能监控和故障诊断、自适应加工、刀具寿命动态管理等功能,以确保加工质量的稳定性;在航空机载设备中,典型的管路件等连接件具有多品种、小批量生产的加工需求,需要柔性加工单元或者柔性生产线来实现高效率的生产,这要求配套的高档数控系统具备协调控制与互联互通等功能。

在汽车制造领域,随着汽车工业规模化、自动化、专业化水平的提升,关键零部件的制造如汽车刹车盘、轮毂、齿轮等,要求高档数控系统具有加工过程的智能控制功能,以提高加工效率与质量;具有网络化功能,以形成相应的生产线;具有智能故障诊断与远程监控功能,以实时监控现场加工与快速排除故障。

开放式、智能化数控系统

针对新一代信息技术发展以及航空航天等领域的智能制造需求,本文基于开放式“蓝天数控”产品^[10],提出了一种多维度的开放式、智能化数控系统框架(图2),由功能/性能、工艺链、产品全生命周期3个维度要求组成。

(1)个性化功能/性能需求。客户化制造模式使得其个性化功能/性能成为系统的重要特征,要求系统满足可扩展、互操作、可移植、可伸缩等需求,以方便最终用户特殊应用的



图2 开放式、智能化数控系统的多维度需求
Fig.2 Multi-dimensional requirements for open architecture and smart CNC system

集成,快速实现不同品种、不同档次、具有鲜明个性的产品的生产。

(2) 工艺链集成需求。在网络化制造环境下,数控机床已不再是孤立的结点,而是整个制造系统中的重要环节。工业互联网、互联互通及互操作技术的发展,为促进产品设计、工艺、加工的一体化,实现制造过程闭环提供了支撑。

(3) 全生命周期管理需求。物联网、工业大数据以及人工智能技术的发展,为开展故障诊断、运行状态监测、设备健康管理等提供了技术支撑,从而为实现产品全生命周期管理、提高产品应用与维护水平创造了条件。

针对个性化功能/性能需求,系统在硬件上采用M:N的可重构方式,软件上采用基于中间件的二次开发平台,建立可重构的数控系统平台,以实现智能制造环境下数控装备可扩展、互操作、可移植、可伸

缩的可重构设计要求;针对工艺链集成需求,通过研制基于信息终端的网络化平台,以支持制造过程工艺链的集成;针对全生命周期管理需求,通过构建包含制造、用户、运行、诊断的大数据平台,开发相关支持工具,以实现数控产品全生命周期的管理。

1 可重构的数控系统平台

可重构的数控系统平台由软件平台和硬件平台组成。其中,硬件平台(图3)包含人机接口单元(HMU)和控制单元(NCU),采用M:N的可重构方式,即根据客户需求,可实现多个人机接口单元对应多个控制单元。每个控制单元通过现场总线实现对驱动器、I/O单元、传感器网关的控制。传感器网关支持有线/无线传感器介入。无线方式包括WiFi、RFID等无线射频方式。传感器通过广播同步与总线同步相结合的方式,实现传感器数据的采集与控

制信息的同步。

软件平台采用基于中间件的层次化结构,以支持用户个性化功能的开发(图4)。其中,智能化中间件具有支持运算、插补、控制、I/O、工艺及人机交互的组件库,以实现数控系统实时、非实时及人机界面的控制;数据共享区为组件库提供数据源;基于Web方式的WebService服务模块实现数控系统与其他单元的数据交互,支持数据采集与云端应用。二次开发接口包含基于QT跨平台图形引擎、J2ME开发平台、Android SDK等形成数控系统二次开发平台的开发工具链,基于图形显示、组件操作、工艺编程、任务管理、状态监控的二次开发接口库,以及基于移动端智能APP软件的应用管理器,支持激光、磨削等特种加工及任务管理、机床监控及诊断等个性化功能的二次开发以及跨平台APP应用的开发和管理。

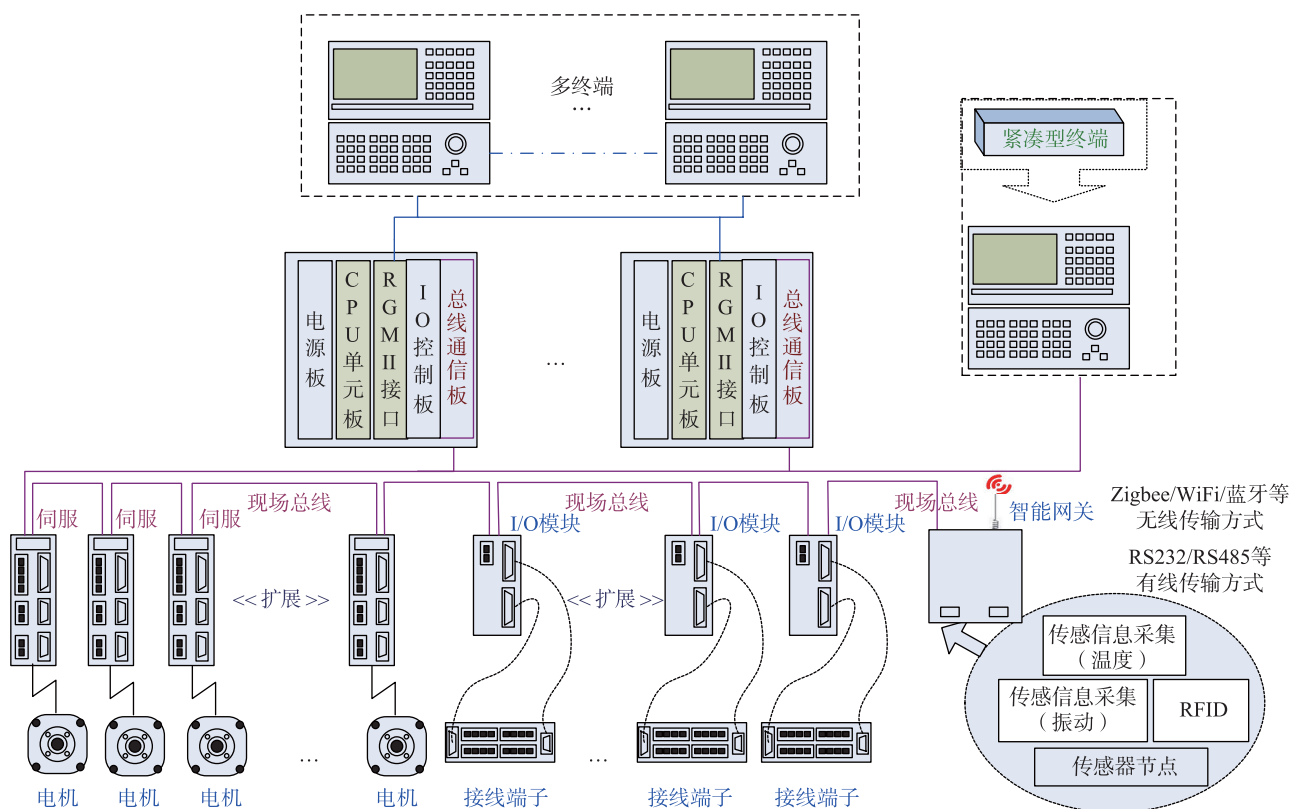


图3 可重构硬件平台

Fig.3 Reconfigurable hardware platform

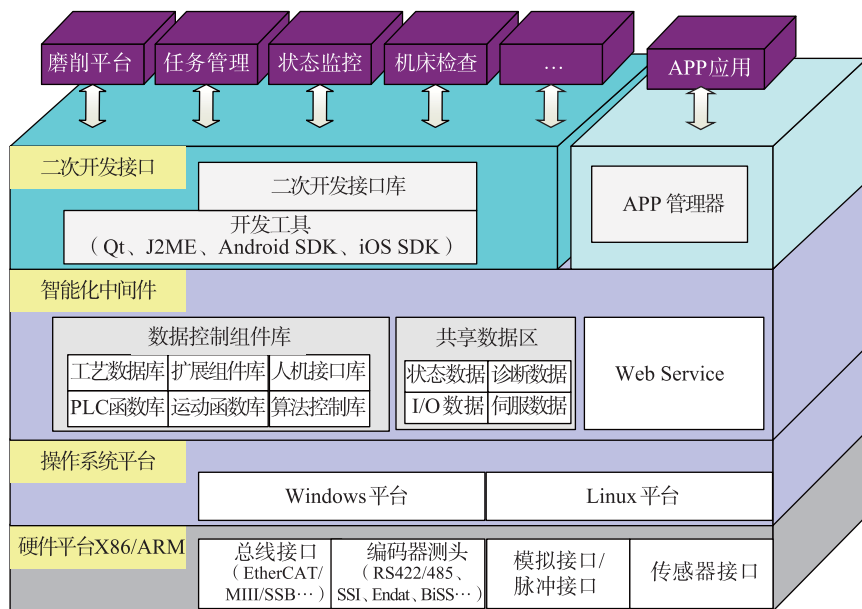


图4 基于中间件的二次开发平台
Fig.4 Redevelopment platform based on middleware

2 基于信息终端的工艺链集成平台

围绕工艺链集成需求,基于“蓝天数控”的开放式体系结构,构建了基于信息终端的网络化平台(图5)。通过信息终端建立智能设备、生产单元、车间的信息通道,支持设备间的互联互通及互操作,实现制造过程中工艺参数、设备状态、业务流程等数据、多媒体信息以及制造过程信息间的交互,从而确保从编程仿真→工艺辅助→加工准备→加工过程→工件测量的制造过程工艺链的集成与闭环控制。

信息终端由支持多平台的显示终端与多协议网络代理服务器组成,并通过现场总线、物联网、工业互联网等,实现复杂功能对加工过程中

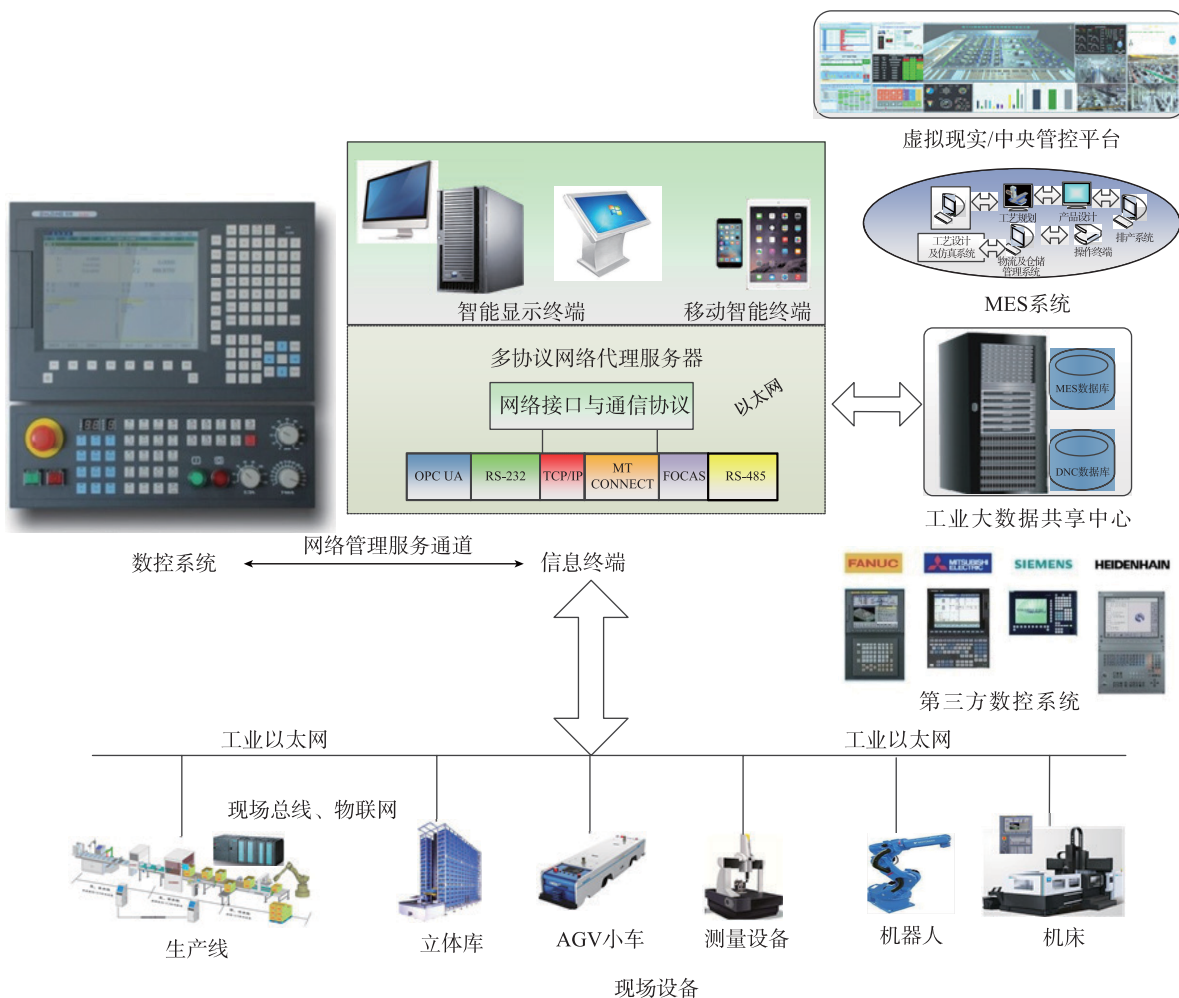


图5 基于信息终端的网络平台
Fig.5 Network platform based on information terminal

多种信息的采集需求。其中代理服务服务器通过融合不同厂商的通信协议,建立统一的数据模型,实现信息终端与蓝天数控系统、第三方数控系统,以及相关现场设备的互联互通及互操作,并为工业大数据平台、MES系统、虚拟现实与中央管控平台提供数据共享接口,实现智能化数控系统与车间智能设备和制造执行系统的信息集成。

3 基于工业大数据的产品生命周期管理平台

基于采用信息终端的网络化平台,通过解决工业大数据采集、存储、管理与挖掘等关键技术,研制了汇聚生产工艺参数、设备状态等工业大数

据信息平台(图6),为开展产品全生命周期的管理奠定基础。基于大数据平台,通过对产品制造信息、用户档案、产品跟踪、调试维护、参数导航、故障诊断等数据信息的采集,实现产品全生命周期管理,具体包括生产制造、安装调试、诊断维护、改进升级等管理(图7)。

生产制造管理根据产品制造过程中的生产、组装、测试等信息,建立产品的生产制造数据库,包括生产批次、功能测试、参数设定、质量检验等生产信息。产品安装调试管理按照客户的个性化需求建立用户档案,当数控系统在机床厂进行配套后,可将产品与机床的匹配参数上传到产品

用户数据库中,实现对产品的跟踪管理。当数控机床到最终用户进行加工应用时,产品用户数据库可以根据机床的具体加工对象,对数控产品的初始参数进行导航设置。当产品出现故障时,设备的故障类型、故障原因、维修记录等信息上传到故障维护数据库中。同时,故障维护数据库利用大数据以及专家系统,综合设备参数、设备运行状态、故障类型、故障原因、故障维修记录等信息,给出设备故障的原因分析与维修建议,以实现对产品全生命周期的管理。

“蓝天数控”及应用实践

围绕开放式、智能化数控系统的多维度需求,基于其功能/性能、工艺链集成以及全生命周期管理体系结构,研制了开放式、智能化“蓝天数控”系统,由车间网络层,控制层和设备层3个层次组成(图8)。车间网络层通过工业以太网实现车间设备与数控机床的互联互通,通过信息终端实现工艺链的集成与互操作;控制层采用M:N的可重构方式,通过基于中间件的二次开发平台实现个性化功能的开发;设备层通过智能网关实现传感器的介入,支持加工现场的感知和产品全生命周期的管理。

基于开放式、智能化“蓝天数控”系统,针对航空制造领域典型零件的制造需求,开发了相应的数控系统,以对系统的个性化功能/性能、工艺链集成以及产品全生命周期管理的应用验证。

其中,动梁桥式龙门双闭环反馈同步控制,对系统运动控制层面的个性化功能/性能需求进行了验证;双通道11轴激光微孔冷加工数控机床、双通道14轴数控砂带磨削中心,对系统工艺层面与运动控制层面的个性化功能/性能需求进行了验证;航空制造领域数字化车间验证了基于信息终端的工艺链集成与数控设

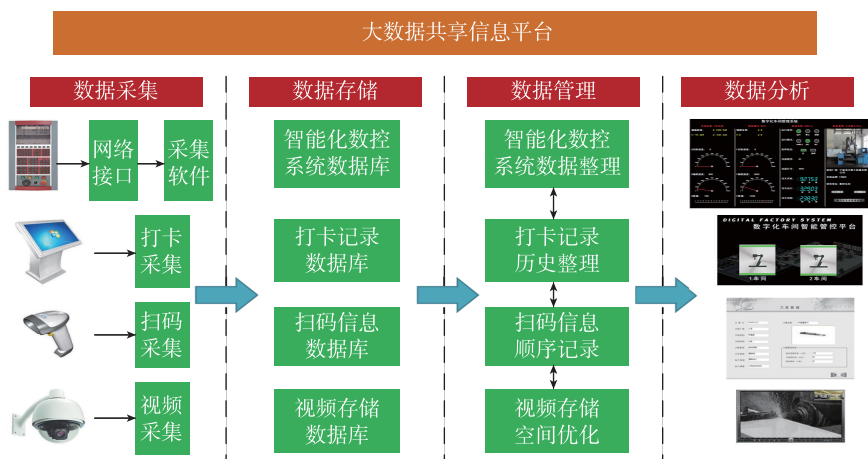


图6 工业大数据平台
Fig.6 Industrial big data platform

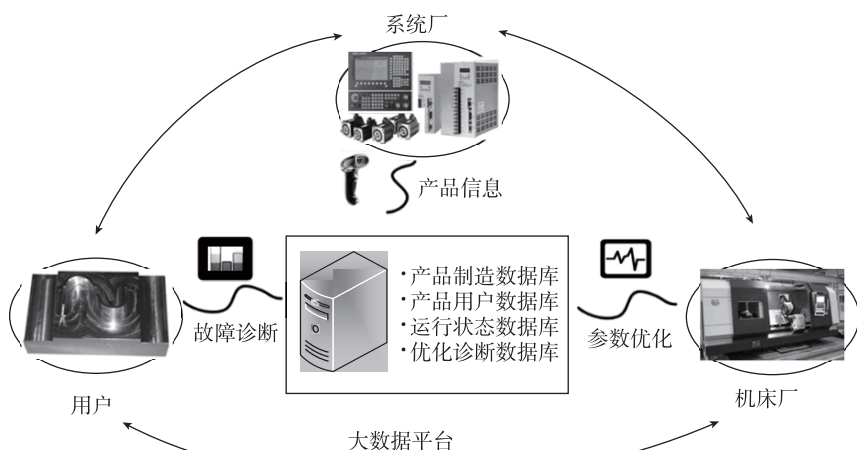


图7 基于大数据的产品全生命周期管理
Fig.7 Product lifecycle management based on big data

备生命周期管理需求。

1 动梁桥式龙门双闭环反馈同步控制

针对 GMC2060U 五轴动梁桥式龙门加工中心(图 9)及 GMC3060/GMC2060 高速龙门铣床的特点,6m 长的龙门轴 X 轴要求采用 4 个电机同步驱动,同时完成消除任务,并且在双驱龙门两侧同时安装了海德汉的距离编码格式的光栅尺作为位置检测反馈系统。要求系统既要保证 4 个电机的同步驱动控制及扭曲量误差,又要保证静态及动态的间隙消除,同时还要完成双尺的全闭环检测实时调整任务。

针对上述控制要求,“蓝天数控”系统采用 EtherCAT 高速总线通讯技术,由上位数控系统主机作为主站,与作为从站的各电机驱动器进行时间轮训的实时通讯,通过数据给定,

全站点状态监测,速度、位置、电流等三环采集,双尺位置及误差扭曲数据反馈,报警机制实时处理,并通过系统的智能调节、调整及自整定,以及驱动侧的工艺调节器的配合、优化等一系列核心算法,实现了配套应用。

2 双通道 11 轴激光微孔冷加工数控机床

双通道 11 轴激光叶片微孔冷加工机床(图 10)是集光、机、电、检测于一体的复杂系统,其控制对象包括机床轴运动控制、激光器功率监测与控制、复合光束扫描模块控制、光束指向监测与调整控制、光学扫描头切换伺服控制、终端监测控制、恒重叠率螺旋扫描控制、非圆形面扫描加工控制以及三维检测辅助定位控制等。

“蓝天数控”系统通过采用多通道控制、RTCP、高速程序预处理、焦

距测量、三维测量、光路切换、四光楔扫描以及功率检测等功能,实现一个通道 5 轴联动用于叶片工件姿态转换,一个通道 6 轴联动用于激光设备光束指向调整和打孔检测。设备适用于各类金属、非金属材料表面的微结构处理,如微腔、型腔、盲孔、通孔、异型孔异型槽及复杂形貌微结构的切割加工。

3 双通道 14 轴数控砂带磨削中心

针对航空制造领域典型零件的自适应砂带磨削中心(图 11)特点,采用双工位 14 轴的机床设计,其中七轴五联动数控砂带边缘磨削工位实现航空发动机叶片型面的磨削加工,七轴六联动圆角磨削工位实现根部转角、阻尼台或叶尖等易干涉部位的磨削加工,磨削中心具备在机检测、快速模型重构、快速装夹、自适应磨削功能。

围绕机床的控制要求(双通道、耦合轴、五轴联动、全闭环反馈、砂带张紧力控制等),通过开展多通道多轴联动砂带磨削运动控制方法、加工过程干涉检测技术、磨削轨迹优化技术、收放卷自适应磨削技术、数控系统与砂带磨削中心控制系统集成技术等关键技术研究,研制面向航空制造领域典型零件的自适应砂带磨削中心的数控产品,实现一次装夹完成多种尺寸和规格的发动机叶片叶尖、型面、进/排气边、叶根圆角和凸台过渡区部位的磨削集成加工。

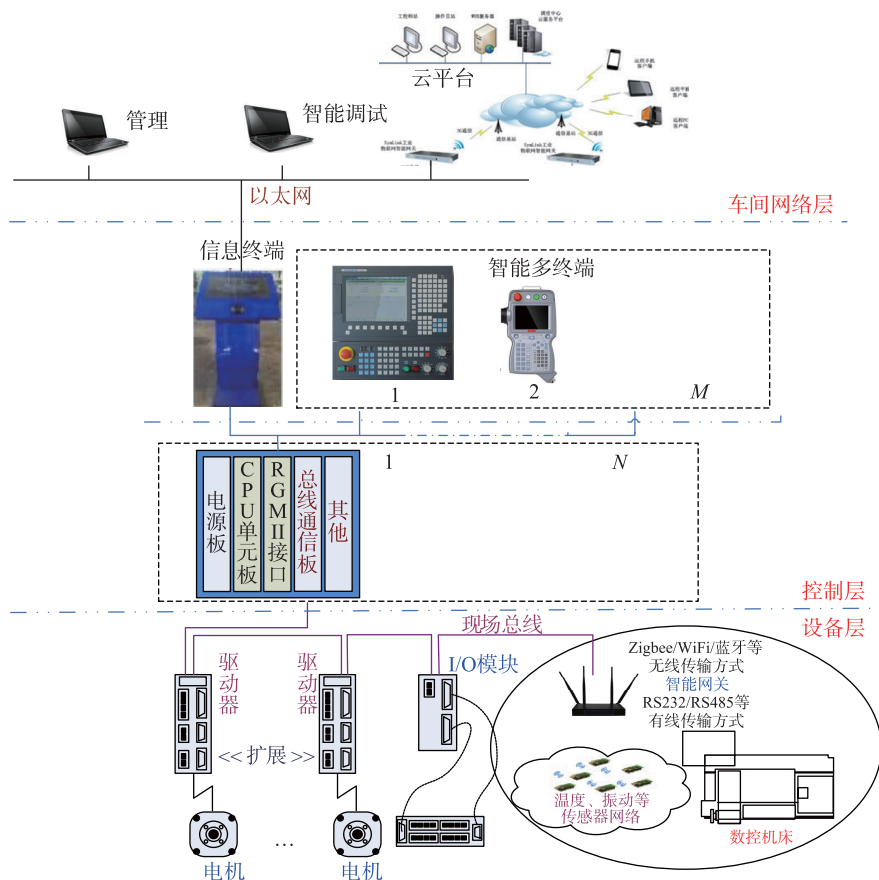


图8 开放式、智能化“蓝天数控”系统
Fig.8 Open and smart Lantian CNC system



图9 GMC2060U类设备动梁桥式龙门结构
Fig.9 Moving crosshead bridge gantry structure of GMC2060U

4 支持工艺链集成与设备管理的数字化车间

围绕航空制造领域数字化车间对工艺链集成的需求,通过开展设备互联互通、工业大数据管理、数字孪生与3D数字可视化等关键技术开发,解决了从设备控制到车间管理的数字化车间关键技术,建立了从设备层到车间层及企业层的数据通道,实现了机加设备、检测设备、后处理设备、物流设备、仓储设备等车间现场设备的实时互联互通,形成了基于工业互联网的数字化车间成套解决方案(图12),包括基于工业互联网的设备互联互通平台、工业大数据平台、3D数字可视化平台、故障预测与健康管理平台、能耗监控管理平台、网络化实时视频监控平台等。

基于数字化车间提供的网络化平台,开展了智能故障诊断与远程监控的开发(图13),实现了数控系统对加工过程的全面感知及智能控制,并支持设备故障的预测诊断能力,增强系统加工处理能力,提升了数控机床的性能和可靠性。

结论

本文通过分析智能制造的需求,以及新一代信息技术的发展趋势,归纳总结了开放式、智能化数控系统多维度需求框架,提出了开放式、智能化数控系统的可重构数控系统平台、基于信息终端的工艺链集成以及基于工业大数据产品生命周期管理体系结构,并通过研制“蓝天数控”系统,开展在航空制造领域关键部件的加工控制应用实践,探索实现开放式、智能化数控系统的实现路径。基于“蓝天数控”系统开展的应用实践,未来项目将进一步将人工智能技术集成到数控系统,支持国产数控系统的升级换代,实现其在航空航天领域的推广应用。



图10 激光微孔冷加工数控机床

Fig.10 Laser-micropored cold working CNC machine tool

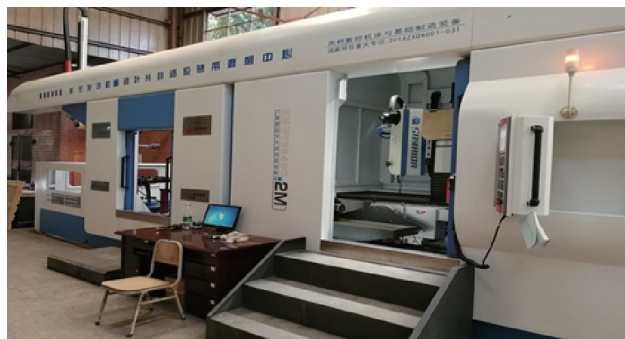


图11 砂带磨削中心

Fig.11 Abrasive belt grinding center



图12 支持工艺链集成的数字化车间

Fig.12 Digital workshop supporting process chain integration

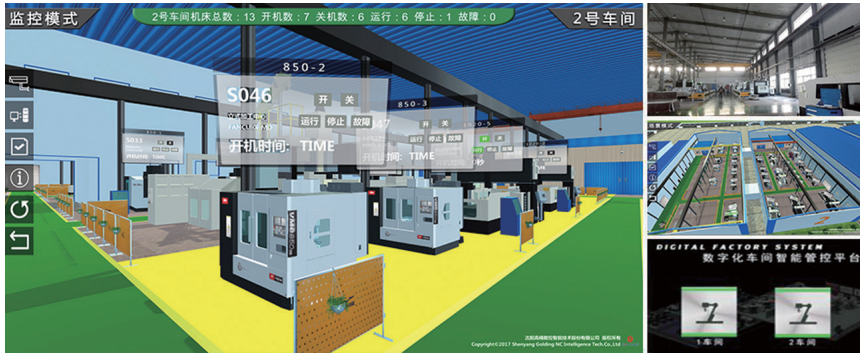


图13 设备的维护与可视化管理

Fig.13 Maintenance and visual management of equipment

参考文献

[1] KAGERMANN H, HELBIG J, HELLINGER A, et al. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0—securing the future of German manufacturing industry[M]. Berlin: Forschungunion, 2013.

[2] ANNUNZIATA M, EVANS P. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines[R]. General Electric, 2012: 1–23.

[3] 中华人民共和国国务院. 国务院

关于印发《中国制造 2025》的通知 [EB/OL]. [2015–05–08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.

State Council of the People's Republic of China. Circular of the state council on the issuance of Made in China 2025[EB/OL]. [2015–05–08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.

[4] WEYER S, SCHMITT M, OHMER M, et al. Towards Industry 4.0—standardization as the crucial challenge for highly modular, multivendor production systems[J]. IFAC—Papersonline, 2015, 48(3):

579–584.

[5] PROCTOR F M, ALBUS J S. Open-architecture controllers[J]. IEEE Spectrum, 2002, 34(6): 60–64.

[6] PRITSCHOW G, ALTINTAS Y, JOVANE F, et al. Open controller architecture—past, present and future[J]. CIRP Annals, 2001, 50(2): 463–470.

[7] TOTU A, SAITO K, TABACARU M. MAZAK—intelligent machine tools[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Manufacturing Systems—ICMaS. Bucharest, 2008.

[8] ALBUS J S. Outline for a theory of intelligence[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21(3): 473–509.

[9] MEYSTEL A M, ALBUS J S. Intelligent systems architecture, design, and control[M]. New York: Wiley–Interscience, 2001.

[10] 林浒. 蓝天数控系统编程与操作手册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2017.

LIN Hu. Handbook of programming and operation of Lantian CNC system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2017.

通讯作者: 于东, E-mail: yudong@sict.ac.cn.

Development and Application of Open and Smart Lantian CNC System

YU Dong^{1,2}, BI Xiaoxue^{1,3}, LIU Jinsong^{1,3}, LANG Yanshu^{1,3}, YU Haoyu^{1,3}, HUANG Yan²

(1. Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China;

2. Shenyang Golding NC Intelligence Technology Co., Ltd., Shenyang 110168, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] Aiming at the development of new information technology and the application requirements of intelligent manufacturing in the aerospace industry, the multi-dimensional framework of the open and smart CNC system was established by analyzing the technical trends of the CNC system. Then a reconfigurable CNC system platform, a process chain integration based on an information terminal and a product life cycle management system based on industrial big data was proposed. Finally, the Lantian CNC system was developed, and the implementation routine of the open and smart CNC system was explored through the application and practice of the processing and control of typical parts in aeronautical engineering.

Keywords: Intelligent manufacturing; New IT; Open system architecture; Reconfigurable system; Process chain integration; Industrial big data

(责编 逸飞)