新常态下国产数控系统的发展对策及案例

■ 中国重汽集团济南桥箱有限公司高级工程师　刘胜勇

摘要：本文从运行高速化、加工高精化、控制智能化、模块总线化、维护可视化、网络互联化、二次开放化、生产绿色化和招投标国产化等方面，给出了新常态下国产数控系统的发展对策及相关案例。



数控机床控制技术是高度集成了机械制造技术、自动化技术、计算机技术、传感器技术、信息处理技术和光电液一体化技术的现代制造技术，它以国内外各类型的数控系统为平台，通过微处理器（CPU）和可编程序控制器（PLC/PMC）对机床的运动及其加工过程进行自动控制。这一控制过程不仅包含单机孤岛模式下工件的夹紧/松开、刀具的选择、刀具与工件的相对位置、切削液的开/关、主轴运行、伺服驱动、各机械耦合部件的润滑以及相应部位的冷却降温等，还涉及联机集群模式下操作门的开/闭、机器人或机械手的装/卸料、运行数据的采集/传输以及协同指令的发布/取消等。可以说，硬件和软件组成的数控系统是现代机床装备的“大脑”，是决定数控机床功能、性能、可靠性和成本价格的关键因素，是制约企业实施智能化制造并构建高柔性高效率智能工厂的瓶颈之一。

从1952年美国研制第1台数控铣床及1974年我国制成第1台加工中心至今，数控系统经历了2个阶段和7代的发展，如表1所示。

近些年来，在引进消化国外数控技术的基础上，我国已生产出自主版权的数控系统（见表2）。其中，国产经济型数控系统已形成规模优势并占领了我国经济型数控系统95%以上的市场份额；国产中型数控系统的功能性已达到国外同类产品水平，市场占有率不断提高；国产高档数控系统受技术水平的限制，市场占有率非常少，绝大部分市场被FANUC、SIEMENS、MITSUBISHI和NUM等国外品牌占领。为此，国内数控系统制造商应立足于当前基础之上，抢抓“高档数控机床与基础制造装备”发展机遇，主动变革，持续自主创新，不断突破国外技术封锁，强力打破国外数控的市场生态圈，以高速率计算、高可靠性运行和全方位智能化等优势，切实做到习近平总书记要求的“只有把核心技术掌握在自己手中，才能真正掌握竞争和发展的主动权，才能从根本上保障国家经济安全、国防安全和其他安全”。

作为数控系统的最终用户，结合多年的使用心得和维护经验，对新常态下国产数控系统的发展提出如下几点建议。

1. 数控系统要匹配运行高速化

随着汽车、国防和航空航天等工业的高速发展以及铝合金等新材料的应用，数控机床加工的高速化成为企业提高生产效率、降低制造成本并获取高质量加工精度的有效手段之一。这就要求数控系统一是装用高性能极快运

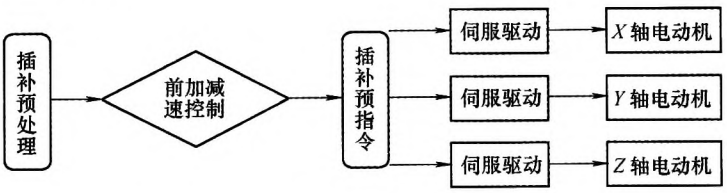
表1　世界和我国数控系统的发展历程

分类	世代	诞生年代		系统元件及电路构成
		世界	中国	
硬件数控NC（Numerical Control）	第一代	1952年	1958年	电子管、继电器，模拟电路
	第二代	1959年	1965年	晶体管，数字电路（分立元件：相对集成电路而言，仅为普通的电阻、电容和晶体管等电子元件）
	第三代	1965年	1972年	小规模集成数字电路
计算机数控CNC（Computer Numerical Control）	第四代	1970年	1976年	内装小型计算机，中规模集成电路
	第五代	1974年	1982年	内装微处理器的NC字符显示，故障自诊断
	第六代	1979年		超大规模集成电路，大容量存储器，可编程接口，遥控接口
		1981年		人机对话，动态图形显示，实施软件精度补偿，适应机床无人化运转要求
		1987年		32位CPU，可控15轴，设定0.000 1mm，进给速度24m/min，带前馈控制的交流数字伺服、智能化系统
		1991年		利用RISC（Reduced Instruction Set Computing的缩写，即精简指令集计算机）技术的64位系统
		1995年	2004年	微机开放式CNC系统、STEP-NC（“国家数控机床产业发展专项规划”）
	第七代	2013年	2015年	工业4.0和中国制造2025，实施智能化制造并构建智能工厂

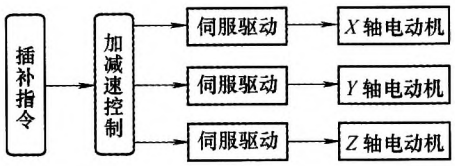
表2　国产数控系统主要制造商及其代表产品

序号	国产数控系统主要制造商	代表产品	产品特性	产品外观
1	广州数控设备有限公司	GSK 25iMB	可5轴联动和二次开发，GSK-Link实时工业以太网总线控制，程序容量12 000步，基本指令处理时间0.5μs/步	
		GSK 988TR	双通道车/铣削生产线数控系统基于双核硬件架构，采用GSK-Link总线与伺服驱动单元级I/O单元相连，可接入GPC网关设备，可接入多联机柔性制造线	
		GSK 986	磨床数控系统采用多个高性能微处理器，实现0.1μm的插补及显示精度，既可控制4个进给轴加2个主轴，也可经GSK-Link总线控制双通道8个进给轴和4个主轴	
2	武汉华中数控股份有限公司	华中8型全数字数控系统	具有HNC-848高档型数控系统、HNC-818标准型数控系统和HNC-808精简型数控系统等，系统具备全数字现场总线、多通道、多轴联动、高速高精、使用方便和配套齐全特点 HNC-848的最大控制轴数为9个进给轴和4个主轴，联动轴数为9，最小插补周期0.125ms，最小分辨率10^{-6}mm，小线段最大前瞻2 048段，程序段处理速度7 200段/s	
3	北京凯恩帝数控技术有限责任公司	K2000TC(i) K2000GC(i)	总线式高档车床/磨床用数控系统，经KND串行伺服总线KSSB与伺服单元实时通讯，可实现0.1μm级位置精度，最大控制轴数和联动轴数均为8，系统插补周期2ms，最小指令单位0.1μm，最高进给速度60m/min，最高快移速度240m/min	
4	沈阳高精数控智能技术股份有限公司	GJ400全数字高档数控系统	采用“蓝天数控”开放式体系结构，控制轴数为64轴，联动轴数为8通道8轴联动，最小指令单位0.001μm，320GB大容量存储，最小插补周期0.125ms，小线段最大前瞻2 000段，高速同步串行总线SSB3，同步精度1μs，可配EtherCAT等现场总线，64位处理器模块	
		GJ310多轴多过程高档系统	基于SSB同步串行总线的分体式结构设计的数控系统，控制轴数标配6轴（扩至16轴），联动轴数为6轴，最小指令单位0.01μm，支持语句编程和梯形图编程	
		GJ303高性能4轴数控系统	采用高性能工业级PC平台的开放式普及型数控系统，经模拟、脉冲或总线连接伺服单元，控制轴数标配4轴，联动轴数为2～3轴（选配第4轴），最小指令单位0.1μm	

算速度的32位甚至64位的多核微处理器（CPU），通过CNC主板上电子元器件的性能优化，使其运算频率提高至几百兆赫、上千兆赫，做到微米、纳米和皮米级的控制精度；二是在保证机床高速平稳运行的前提下，通过梯形加减速、指数加减速、三角函数加减速、S曲线加减速和多项式加减速等控制技术，使其获得最优前加减速控制性能和后加减速控制性能。例如，MITSUBISHI M800/M80系列CNC的微小线段处理能力达到270k程序段/min，具备第4代SSS（Super Smooth Surface）控制及样条曲线功能，部分工序可同步执行，机床动态和静态特性有效改善。强化数控系统运算能力，通常要综合考虑5个指标，即直线插补、PLC/PMC处理、辅助程序调出、宏运算和辅助功能。数控系统的加减速控制模型如图1所示。



（a）前加减速控制



（b）后加减速控制

图1　数控系统的加减速模型

2. 数控系统要达到加工高精化

现代数控机床就像人的一只手，工作时它抓着刀具或工件，按照预定轨迹控制刀具或工件沿运动方向进给，最终加工出用户要求的零件形状或实现应有的用途。高精度的零件形状与精密级的定位机能既离不开主轴的高速化、位置检测装置的高分辨率以及全方位的误差补偿技术，也离不开机械的制造和装配精度及IC装备的制造精密性，更离不开CNC系统的微米、纳米甚至皮米级的控制精度。

为此，数控系统一是采用直接过渡、曲线过渡或NURBS曲线拟合等连续短线段加工技术，并运用具有轨迹通用、计算高效且加减速最优特性的轨迹前瞻处理技术（即实时插补的同时向前预插补一段距离，判断此距离内是否存在需提前减速的路径段）进行速度规划，以实现复杂型面CAM编程下连续短线段加工的升降速控制；二是采用单轴跟随误差、多轴交叉耦合等控制方法以及机床几何误差与热变形误差的检测补偿等技术，进行轮廓误差的补偿，以提高复杂型面加工的轮廓精度，例如FANUC系统的轮廓误差控制、Axium Power系统的跟随误差控制及Mazak机床的纳米轮廓控制等。

3. 数控系统要做到控制智能化

现代机床的性能不仅取决于机械本身，还取决于机械的控制技术。最新型的数控系统既要最大限度地发挥出机械能力，又要依靠防振控制、热变位控制、干涉防止、语音导航、主轴监测、保养监控、工作台平衡感知和棒材供给控制等功能，满足制造业生产柔性化和制造智能化的发展需求，不断适应新常态下工厂环境变化，有效减轻操作人员负担。

（1）数控系统要具备加工过程的自适应控制机能。例如，通过监测主轴和进给电机的功率、电流和电压等信息，辨识出刀具的受力、磨损以及破损状态，机械加工的稳定性状态，可实时修调加工参数（主轴转速、进给速度）和加工指令，使设备处于最佳运行状态，以提高产品加工精度和设备运行安全性。加工过程中进给率优化控制示意如图2所示。

（2）数控系统可对加工参数进行智能优化。数控系统应能集合零件加工的一般规律和特殊工艺经验，运用现代智能方法，构造基于专家系统或模型的“加工参数的智能优化与选择器”，以获取最优化的加工参数，使加工系统始终处于合理经济的工作状态。

4. 数控系统要适合模块总线化

随着数控技术的不断发展，现代数控机床的自动化程度愈来愈高、模块化程度愈来愈强。通

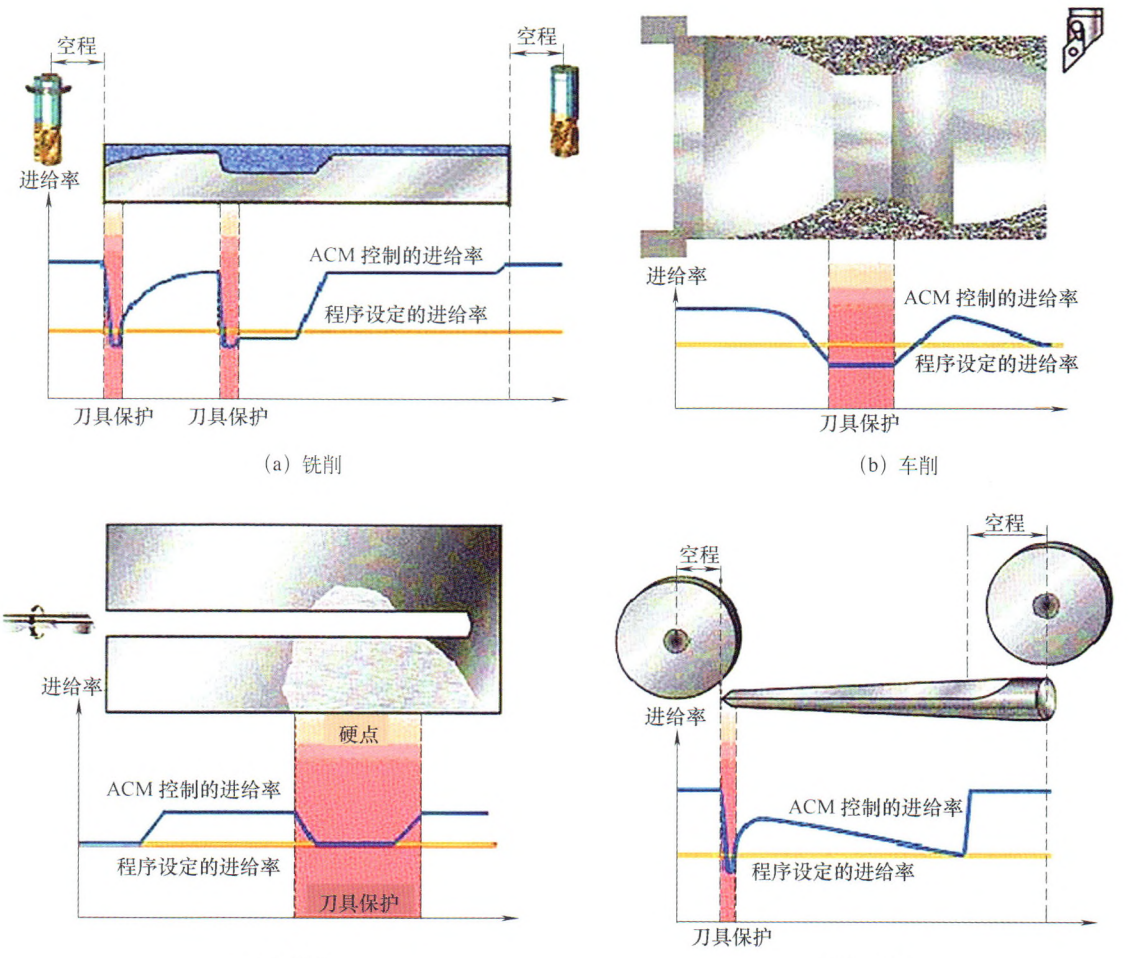


图2 加工过程中进给率优化控制示意

过信息的传输和数据的交换，将数控机床集成到复杂的生产生命周期工作流和公司的IT结构中，已成为现代制造公司发展的一种趋势。由此，自动化的通信网络成为数控系统不可缺少的重要组成部分。IEC 61158第4版给定的现场总线类型有20种之多，即TS61158现场总线、Profibus现场总线（见图3）、ProfiNET实时以太网（见图4）、EtherCAT实时以太网、CC-Link现场总线、TC NET实时以太网、Ethernet Powerlink实时以太网与Interbus现场总线等。

5. 数控系统要力求维护可视化

当下，随着智能化制造的全面实施及智能工厂构建的稳步推进，愈来愈多的制造企业立足于智能机器人与自动线构建的数字

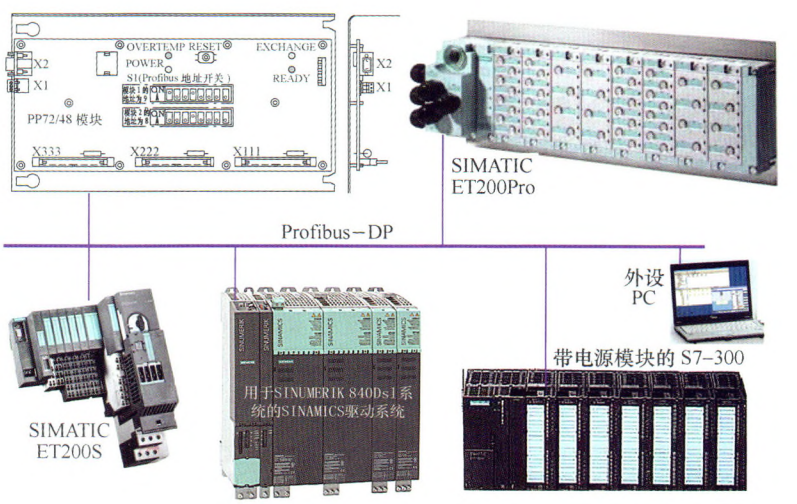


图3 SINUMERIK 840Dsl系统的Profibus-DP通信网络

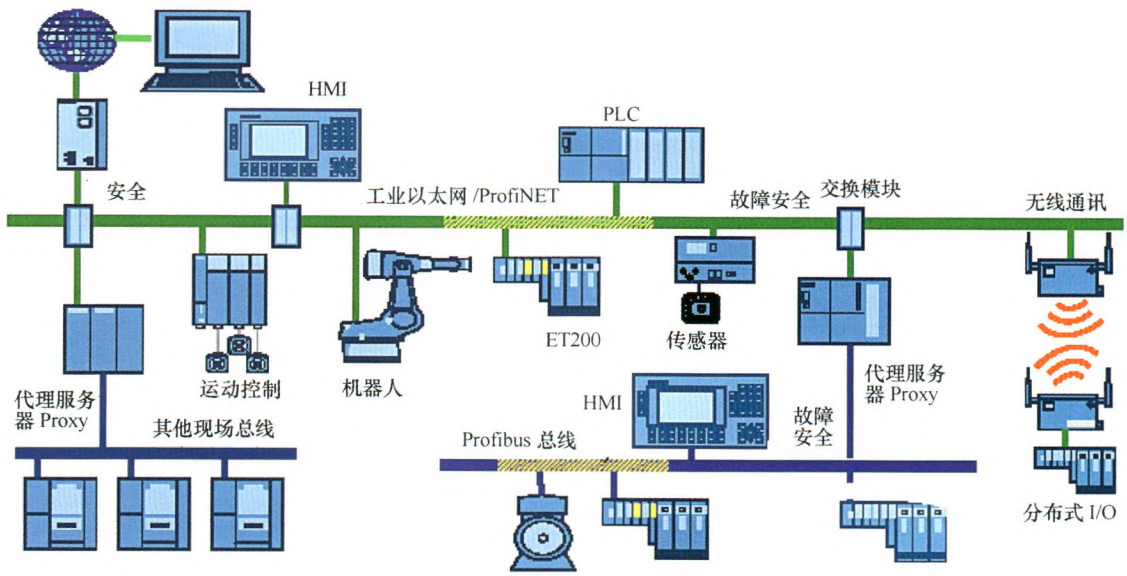


图4　基于工业以太网的ProfiNET网络

化工厂，拟采用物联网技术和设备监控技术，强化内在的信息管理和服务。例如，清楚掌握产销流程，提高生产过程的可控性，剔除生产线上的人工干预，即时正确地采集生产线数据，合理编排生产计划及控制生产进度，将一切信息汇总到管理系统，进而控制整个企业的生产作业。这就要求数控系统一是显示各种诊断信息，以帮助确定报警发生时的状态；二是嵌入故障诊断引导画面（见图5），以辅助维修者迅速确定报警发生的原因；三是以3D动画方式嵌入零部件在整机布局的位置（见图6），并在其故障时图解文字红色闪烁，方便机床的维护维修；四是适应网络互联的要求，既可单机孤岛式运转，也可联机集群式运行，还能够远程监视，以使车间执行层准确获知每台数控机床的运行状况和实时数据，方便后续巡检人员的调度、维修人员的指挥及计划生产的调整；五是采用智能故障自修

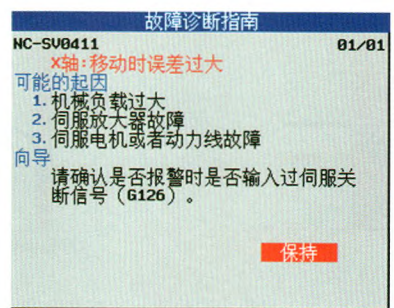


图5 FANUC系统内嵌的故障诊断引导画面

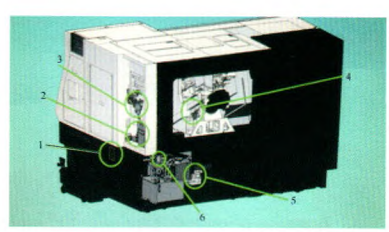


图6 LGMazak QTN250 II卧式车床内嵌的维修图解

1.冷却扇过滤器　2.润滑压力开关
3.通风组件　4.润滑脂压力开关
5.C撅制动阀夹紧，第2主轴制动/夹紧
6.液压压力开关

复技术，据故障原因的自我诊断和故障部位的自行确定，自动排除故障或引导维修人员排除故障，进而使CNC集自诊断、自排除、自恢复和自调节于一体并贯穿于全生命周期。

6. 数控系统要满足网络互联化

在“工业4.0”的驱动下，各制造企业正全面建设低时延、高可靠和广覆盖的工业互联网，开发App，开通微博和微信，开展网络营销，发展电子商务；正建设商业智能系统，对生产经营数据进行大数据分析以优化工艺流程，对销售数据进行大数据分析以开展精确营销和改进产品设计，对管理数据进行大数据分析以优化、重组和再造管理流程。这就要求数控系统具有双向、高速的联网通讯功能，以保证信息流在部门间畅通无阻，进而使得机床、加工程序、刀具夹具和生产计划表等信息共享，经由软件实现企业的实时管理，使得网络监视下的机床在突发故障时自动发送警报至服务部门，力求提高维修效率并缩短停机时间。例如，LGMazak公司在其数控系统中嵌入MAZA-Care远程诊断软件，能够代替用户365天24小时一

直守护机床，机床发生故障时，自动通知LGMazak进行远程维护支持；FANUC系统可经操作人员的便携终端随时随地确认机床状态。

7. 数控系统要二次开发开放化

受PC计算机技术飞速发展、CNC功能部件模块化程序愈来愈高、机床用户需求功能趋于定向复杂化及数控系统制造成本急需下降等因素的影响，开放型数控系统（见图7）的优势得以显现——不同平台的可移植性、不同模块同一平台的可扩展性、模块间数据的互操作性、用户的便于维护性以及统一的人机界面，有的已成为发达国家的战略技术。例如，FANUC开放型数控系统可实现CNC与PC计算机的最佳结合，数控系统的功能可非常简单地内装于市场上购买到的硬件和软件之中，从而使系统更加智能化，实现机床厂家的个性化。

现今，开放型数控系统的结构主要有3种，即基于PC的CNC系统（又称SoftCNC）、PC嵌入式系统、PC与CNC融合系统。其中，基于PC的CNC系统是以PC机为平台，数控功能由软件模块实现，运动执行先经伺服轴卡传递数据，再由伺服装置驱动坐标轴电动机；PC嵌入式系统是把一块多轴运动卡插入传统的PC中，PC为人机接口平台，运动卡实时控制坐标轴运动；PC与CNC融合系统是增加一块PC板并提供键盘，使PC与CNC联系在一起，通过相应软件实现定制性界面开发，此方式已被很多数控系统制造商采用。

8. 数控系统要全程生产绿色化

随着日趋严格的环境与资源约束，制造加工的绿色化越来越重要，这就要求数控系统全生命周期绿色环保化（见图8），既要节约能源、削减消耗功率，又要节省资源、削减消费油剂，还有减少废弃物、削减废弃油剂的排放等。

9. 数控系统招投标趋于国产化

国外数控系统因其在技术和性能上的优势及其在中国市场上深耕几十年，现已具备了很好的市场品牌与客户美誉度，并在国内众多客户中形成了一个“市场生态圈”。国产数控系统这些年虽有长足发展，与国外的差距逐步缩小，但其品牌效应和客户美誉度与国外品牌仍有巨大差距。为此，国内数控系统制造商要改善其产品架构，增强应用可靠性，提升售后服务质量，勇于自我创新设计，形成独特技术优势；设备制造商要做好国产数控系统的推广工作，积极装用国产系统，强化与系统制造商的密切协作关系；企业终端用户不仅要在招标过程中积极响应国产系统，给予CNC产品同台公平竞争机会，还要切实抓好数控系统应

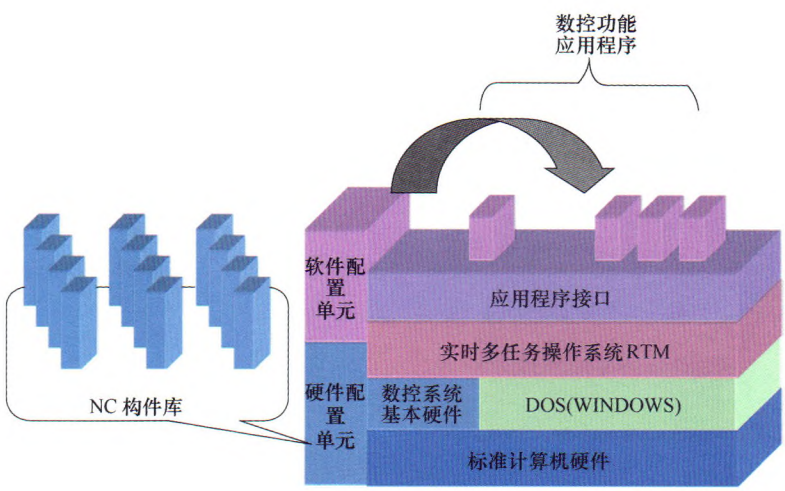


图7　开放型数控系统模型

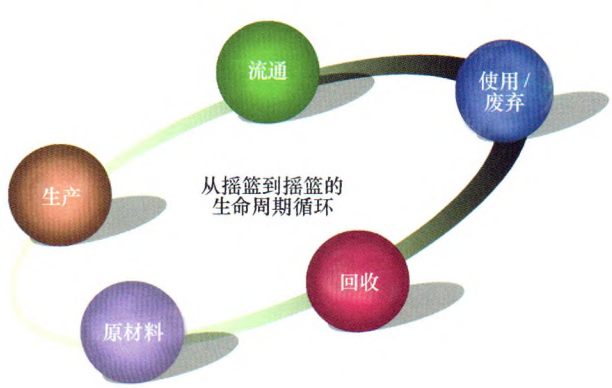


图8　数控系统全生命周期循环示意

航空发动机数控技术现状及发展趋势分析

■ 中航工业沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司　（辽宁 110043）　郑艳铭　卢成玉　孙洪昌

摘要： 本文对国内外航空发动机制造行业数控加工技术的现状进行了分析，对目前存在的问题进行了详细的论述。同时介绍了各种数控新技术，并就数控技术的发展趋势进行展望。



高级工程师　郑艳铭

1952年，世界上第一台数控机床诞生了，这标志着人类在制造技术上进入了新的时代。历经半个多世纪的发展，数控技术已经成为航空发动机制造的关键技术。数控技术的进步和发展使航空发动机的设计理念发生了转变，零件的设计逐渐向整体化、复杂化和精细化方向发展，这也对数控技术的发展提出了新的要求和挑战。

1. 现状分析

（1）数控设备基本普及，但自动化程度不高。提到数控技术，人们往往首先想到数控机床。国内发动机零部件65%以上都实现了数控加工，目前在用的普通设备主要是考虑加工类型、加工能力及设备利用率等问题，随着时间的推移，普通设备被数控设备代替是必然趋势。

国内尽管已经普及使用数控设备，但是在自动化程度上跟欧美先进发动机制造企业相比，差距还很大。整个数控加工过程如零件装夹、加工和换刀等都需要操作人员进行繁琐的操作，而像罗罗公司、GE等知名公司，航空

用维护队伍的建设，摈弃“习惯了就是好用，不习惯就是难用”的观念，唯有用好方可产生最佳效益。

如何才能从国外数控系统的习惯应用中快速跳至国产数控系统的娴熟使用呢？笔者认为，一是操作者认真学习机床制造商提供的系统操作说明书，要像试玩游戏一样接受其画面操作；二是维修者仔细研读随机资料，善于借助网络和电话求助，能够按照“机床故障→看报警说明书/维护说明书→阅电气说明书/机械说明书（含液压、气动原理图）→查参数说明书→调参数换配件”的顺序进行故障排除，系统故障时咨询系统制造商，机床故障时咨询机床制造商；三是系统制造商应像SIEMENS公司一样加大其官网的资料容量，提升知识共享性和公开性；四是机床制造商应强化售后服务队伍，建立故障立即反应机制，嵌入远程诊断软件。

参考文献：

[1] 刘胜勇. 数控机床FANUC系统模块化维修[M]. 北京：机械工业出版社，2013.

[2] 刘胜勇. 数控机床SINUMERIK系统模块化维修[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

MW（收稿日期：20170209）