

先进金属加工技术的应用

■ 中国重汽集团济南桥箱有限公司高级工程师 刘胜勇

摘要：本文从数控多轴化、高速高精化、全程自动化、多主轴大功率化、全生命周期绿色化、配套设备国产化、全程数据化及成形刀具标准化等方面，指出了“新常态”发展阶段先进金属加工技术的应用趋势。



在以创新突破和供给侧改革为特征的“新常态”时期，伴随数控技术、网络技术、控制技术、现场总线及传感器等技术的高速发展，大数据、云存储和智能技术在工业制造领域应用日趋广泛。以第7代计算机数控CNC（即“工业4.0”和《中国制造2025》的实施智能化制造并构建智能工厂）为平台的现代数控装备，历经赶星超月般发展后，多数已具备运行高速化、加工高精度、控制智能化、模块总线化、维护可视化、网络互联化、二次开放化和生产绿色化的性能。这就为现阶段乃至未来一段时间的金属加工提供了有利的发展契机。

1. 金属加工数控多轴化

早期，受数控系统运算能力差、伺服控制动态响应弱、伺服执行转矩小以及制造成本高等因素的影响，仅有极少量的空间曲面零件和昂贵的航空航天关键部件采用最高配置为3轴联动的数控机床进行切削加工。例如，1957年在美国投用的第1台数控机床，1965年在中国批量生产的晶体管数控系统的数控铣床。此时的数控机床绝大多数为开环伺服驱动，产品成形质量不能趋于完美。

近代，随着超大规模集成电路的产生、交流伺服系统的出现与软件精度补偿的实施，数控机

床呈现飞速发展趋势，其研制成本显著降低、CPU运算处理速度大幅提高、伺服动态响应增强、无人化运转的故障率愈来愈低。此时的数控机床已由开环伺服驱动迈向半闭环伺服控制，联动控制轴数由2~3轴升级到3~4轴，最大控制轴数也由4~5轴升级到6~9轴。

目前，随着计算机技术的飞速发展、现场总线技术的应用、模块化集成度进一步加大、高分辨率位置检测装置的大量使用等，数控机床的CNC装用极快运算速度的32位甚至64位的多核微处理器，主轴采用内装式电主轴，伺服驱动由半闭环控制升至全闭环控制，有的进给传动链在直线电动机的配合下缩短为零。此时的数控机床在多CPU处理和多通道技术的支持下，联动轴数普遍为4~6轴，最大控制轴数已接近100轴，最多同时控制轴数也已接近30轴。例如，FANUC 30iMB系统的最多同时控制轴数为24轴，10路径的最大控制轴数为96轴（72个进给轴和24根主轴），15路径的最大控制轴数

为72轴（56个进给轴和16根主轴）；采用“蓝天数控”开放式体系结构的GJ400全数字数控系统的最大控制轴数为65轴，联动轴数为8通道8轴联动。

2. 金属加工高速高精化

一般情况下，高速切削的切削速率比常规速率高出5~10倍，其材料去除率是常规切削的3~5倍。加之部分零部件的材料加入了Si、Cu、Mn等合金元素，虽使其硬度和熔点降低，但切削时易

粘刀并产生积屑瘤，造成加工表面质量降低。这为具有加工效率高、切削力小、工件热变形和热膨胀小、加工表面质量好以及经济效益高等特点的高速高精加工提供了广阔的应用舞台。表1所示为采用高速高精机床的金属加工领域产品。

3. 金属加工全程自动化

近年来，世界各国正紧抓“工业4.0”的有利契机，争相投入大量资金，如火如荼地进行

现有生产线的机器换人式改造、新建柔性线的智能化装备增添以及基于互联网的大数据融合。金属加工领域正逢其时，在智能化制造与智能工厂构建的平台支撑下，既可使工序集成复合化，也可使上/下料、切削和测量等功能集成自动化，还可将刀具、夹具、辅具和装备高端智能化。

（1）金属加工的工序集成复合化。图1所示为某重型载货汽车用主动锥齿轮热处理后机加工尺寸示意。

先前的机加工流程为：采用装有MITSUBISHI M700系统的QTN250 II ML/500卧式数控车床车削螺纹并铣削键槽→采用装有FANUC 0iTF系统的MKS1632A×750数控端面外圆磨床磨削 $\phi 80\text{mm}$ 和 $\phi 65\text{mm}$ 的外圆面及两处端面→采用MKS1632A×750数控端面外圆磨床磨削 $\phi 45\text{mm}$ 外圆面。一般配置4台数控机床（300余万元）和每班2名操作者，单件工时约4min。

在工序集成复合化后，采用1

表1 采用高速高精机床的金属加工领域产品

序号	行业类别	产品明细
1	汽车	发动机：气缸盖、涡轮增压器、连杆、曲轴、活塞、主轴盖等 前悬架：转向器关节、等速接头、刹车钳、刹车盘等
2	工程机械与农用机械	车架零件、发动机零件、传动装置零件、液压缸、液压泵、包括环形齿轮及传动轴在内的驱动系统基础零件等
3	消费性电子行业	智能手机、便携式电脑、大型平板显示器、半导体、台式计算机、平板电脑
4	能源行业	石油和天然气：钻探管和套管、管道控制阀、泵送装置、井口装置 发电设备：转子轴和刹车盘、箱体、叶轮、发动机、叶片和叶根
5	医疗器械	骨科：全膝关节置换零件、骨骼螺钉、臀部组装零件、膝盖骨、腰椎、胫骨、定制植入器 手术器械：植入器、夹钳、弯管机、拉割刀具 口腔正畸：骨膜下植入物、牙齿架桥、牙齿刀具、牙冠
6	航空航天	基于钛合金TC4、高温合金GH6149和超高强度钢300M等难加工材料的零件：叶盘、叶轮、起落架外作动筒 薄壁结构：机身整体框、整体壁板、整体翼盒肋板

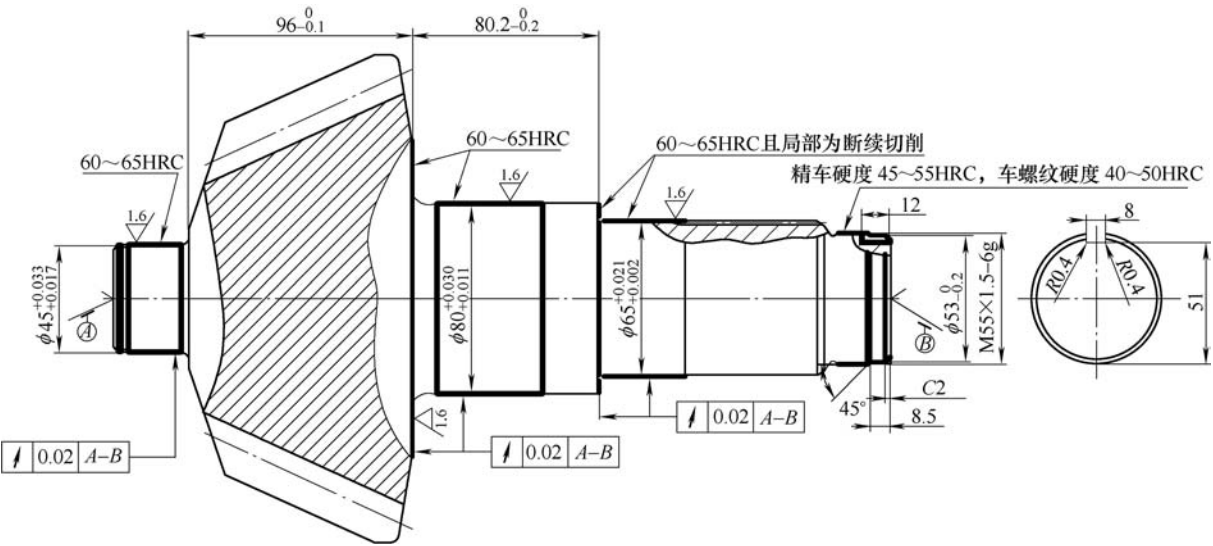


图1 主动锥齿轮热处理后机加工尺寸示意

台装有FANUC 31iMB系统且售价450余万元的埃马克VT系列倒置式车床（见图2），每班配置1名操作者，便能一次装夹同时完成上述主动锥齿轮的热后机加工，单件工时仅为2.9min。

（2）金属加工的功能集成自动化。国内某用户在用的一条变速箱齿轮柔性制造线，基于“车削→滚齿→剃齿”工艺，采用图3所示生产装备组件加工路线如下：①由配置了FANUC 0iTD系统的DT300双通道车削中心，将毛坯加工成齿坯。②由配置了FANUC 35iB分离型系统的桁架机械手，将齿坯运至滚齿机。③由配置了FANUC 31iMB系统的YE3120CNC滚齿机，完成滚齿、倒棱和毛刺的加工后，经桁架机

械手送至剃齿机。④由配置了FANUC 0iMD系统的Y4232CNC5剃齿机，完成剃齿加工后，经桁架机械手送至OP40序。⑤分别经过甩干脱油、激光打标工位后，成品齿轮进入出料仓。

齿轮柔性线的全程生产为无人化操作，由运行于上位机（所有机床与上下料单元之外部分）的智能化监控管理系统对生产过程和质检控制进行信息化集成，操作者仅需关注上位机终端的数据与状态，即可完成整条线的操作、管理与维护。其中，智能化监控管理系统具有7个功能，即生产任务管理与动态生产调度、生产进度监控与信息提取、数控编程与工艺参数优化支持、能耗监控管理、质量信息采集与分析监

控、柔性线装备运行状态监控以及与企业信息系统的网络化集成运行。

4. 金属加工多主轴大功率化

（1）工序集成下的多主轴化趋势。在零件生产过程中，工件搬运、上/下料、安装调整、换刀与主轴升/降速等动作会形成大量的非切削时间，使得单件加工节拍较长。为此，现代金属加工在数控机床多CPU处理和多通道技术的支持下，不仅通过单台机床上不同加工功能（如车、铣、镗、钻及装卸料、换刀和测量等）的集成，尽可能降低无用时间并提高机床利用率；还采用多主轴多面体切削的方式，同时对一个零件的不同部位进行多道工序的加工，以进一步提高工效。例如，埃马克VLC1200倒置式多功能车削中心集成了车、铣、钻、镗、铣、磨和滚齿等切削工艺，一次装夹中可自动实现所有加工，如图4所示。

（2）主轴功率限制机床能力。一台配置了FANUC 31iMA系统的Oerlikon L60型研齿机（见图5）在某锥齿轮副研磨过程中，屏显“FANUC NC ERROR 0436 C SOFTTHERMAL (OVC)”并停机。在将被动轮主轴C的转速由1100r/min降为950r/min后，报警消除，机床复转。这表明旋

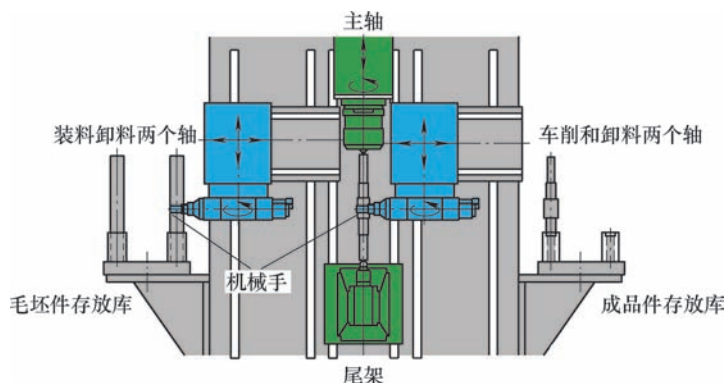


图2 埃马克VT系列倒置式车床工作原理

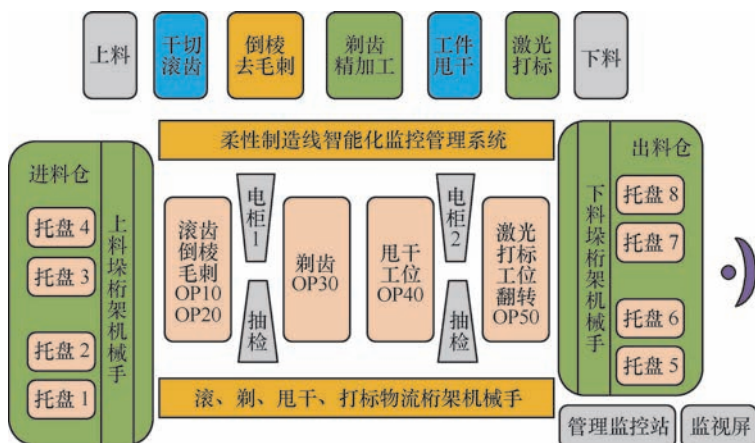


图3 齿轮柔性线工艺路线及设备配置



图4 VLC1200车削中心加工火车轮示意

转中的工件受尺寸、夹持方式和离心力的影响，转速会受到一定限制，严重时主轴“闷车”或刀具破损。为此，金属加工既要选配大功率主轴及刚性足够的数控机床，又要基于产品特性、刀具能力和主轴电动机转矩合理优化工艺参数。例如，零件切削所需功率 $N_e = \frac{a_p \times f \times v_c \times K_s}{60 \times 10^3 \times \eta}$ (kW)，切削转矩 $T = a_p \times f \times \frac{D}{2} \times K_s$ (N·m)，主轴转速 $n = \frac{v_c}{\pi \times D}$ (r/min)。式中， a_p 为切削深度(mm)； f 为进给量(mm/r)； v_c 为切削线速度(m/min)； K_s 为单位切削面积的切削力(N/mm²)； η 为机床总效率(一般取0.8或0.9)； D 为切削工件直径(m)。

5. 金属加工全生命周期内绿色化

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。这就要求金属加工必须把环保和节能放在重要位置，在产品的全生命周期内实现绿色化，杜绝马斯河谷烟雾事件、四日市哮喘事件、水俣病事件及痛

痛病事件等重大环境灾害(见图6)的再次发生。金属加工在全生命周期内绿色化的几个主要措施如下：

(1) 建设可持续发展的工业生态系统(见图7)，使一种工业活动的废物(产出)变为另一种工业活动的原材料。

(2) 数控装备的零部件尽可能做到免润滑维护，上/下料、工件装夹等动作应在安全有效的前提下尽可能采用气动控制，传动环节尽可能采用直线电动机，

以缩短传动链并减少机械零部件的润滑，滑动导轨和静压导轨尽可能改用直线导轨或磁悬浮导轨等。

(3) 金切工艺通过干切削、准干切削或硬切削等措施，尽可能不使用水基切削液或油基切削液，以免污染环境和危害职工健康。例如，Oerlikon C50型螺旋锥齿轮切齿机(下称C50切齿机)经干式切削加工螺旋锥齿轮副。

(4) 金切工艺采用高速高精化的车削中心，变使用切削液的磨削加工为干切削的车削/铣削加工等。

6. 金属加工配套设备力求国产化

《中国制造2025》为我国制造业拟定了“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针。近些年来，国内机床工具企业历经合资自主、引进吸收与创新制造三个阶段的长足发展，其产品架构得到改善，应用可靠性得以增强，服务质量进一步提升，独特的技术优势日益凸显。这些均为金切设备的国产化奠定了坚实的基础。如此，国内用户在购买金切设备时，建议优先选用GSK数控系统、上海磨床、沈阳机床和青二



(a) 马斯河谷烟雾



(b) 水俣病危害



(c) 痛痛病与“杀手”镭

图6 重大环境灾害图片

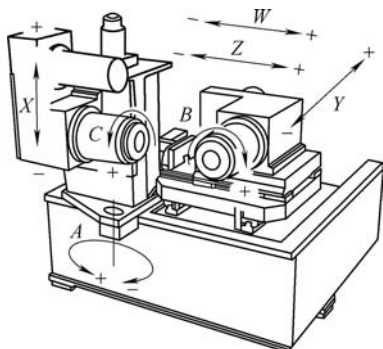


图5 Oerlikon L60型研齿机裸机示意

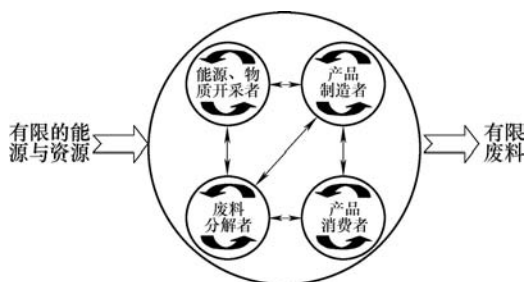


图7 理想工业生态系统示意

机花键铣等。

7. 金属加工过程要求全程数据化

现代化的数控机床在运行过程中，均会产生海量的过程数据。这些海量的数据具有快速、复杂和多变的特点，采用传统分析方式（纸质手工描点与Excel表格分析）的质管人员每天会耗费大量时间奔波于不同的生产线之间，处理不同的质量问题，有时还需加班加点地分析数据。显然，传统的数据分析方式已无法满足“工业4.0”时代下企业飞速发展的质量管控等要求。这时，通过先进的传感器技术对状态信息进行解读，并经由工业互联网平台对状态数据进行捕捉后，海量数据便可实现即时捕捉、快速存储、按需分配及在线分析。如此，机床制造商在准确获知用户机床的工况资料（见图8）后，对机床状态实施远程网络在线诊断，做到全生命周期服务的开放式监控；企业的质量管理者足不出户便可完全掌握当前生产线的整体运行状态，并按需随时调取数据对比分析（见图9），据表格

中不同的颜色或曲线来实时调整产品加工状态。此外，还有生产数据的大数据分析、销售数据的大数据分析及管理数据的大数据分析，用以分别优化工艺流程、精确营销和改进设计、重组再造管理流程。

8. 金属加工所用成形刀具标准化

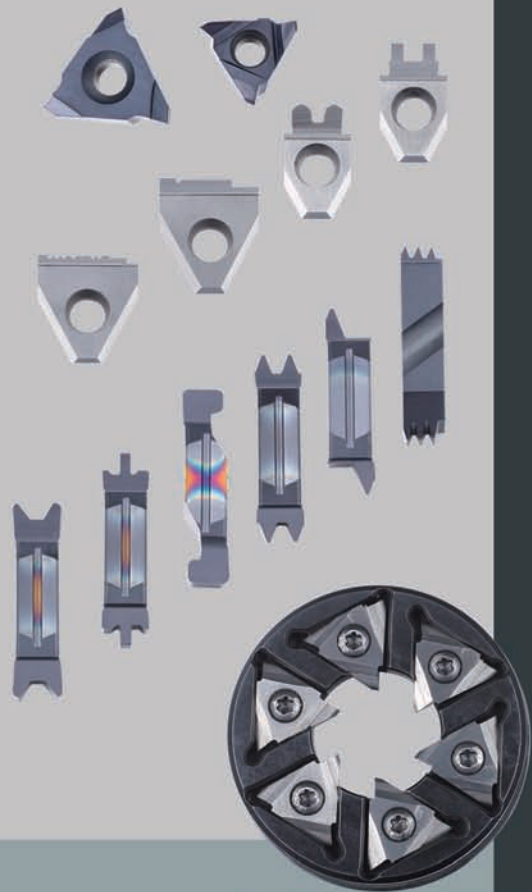
俗话说：三分手艺，七分工具。金属加工领域的工具就是指车刀、铣刀、钻头和砂轮等切削刀具。不合格的刀具会使复杂、昂贵的机床或加工系统变得形同虚设，完全不起作用。例如：国内某商用车企业的Oerlikon B27型刀条磨削中心所磨同类刀条的一致性误差超过 $5\mu\text{m}$ ，使得后续6台C50切齿机没有铣齿刀具而长时间停机。由此表明，刀具技术已成为日益高速高精度金属加工的关键技术之一。

在刀具材料方面，尽可能选择聚晶金刚石（PCD）、立方氮化硼（CBN）、陶瓷、Ti（C，N）基金属陶瓷和超细晶粒硬质合金等先进切削刀具材料。在刀具刀柄方面，车削/车铣/镗铣中



图8 网络互联下的设备状态示意

非标 刀片定制



让您的生产效率全面提速



东莞市锐锋精密刀具有限公司

地址：东莞市长安镇乌沙李屋第一工业区沙梨坝6号

电话：0769-85350968

传真：0769-85350917

网址：www.ruifeng-tools.com

邮箱：ruifeng@ruifeng-tools.com

高精度 专业化

拥有德国五轴数控磨削中心，专业技术团队，提供高品质非标刀片的定制





图9 国内某企业的海量数据分析画面示意

心等高速机床尽可能选用1:10空心圆锥型刀柄,常用的刀柄有德国标准HSK型真空刀柄(见图

10)、美国肯纳KM型钢夹紧短锥柄(采用ISO 26622.1—2008标准,命名代号TS)、瑞典山特维

克Capto型多棱短圆锥刀柄(采用ISO 26623.1—2008标准,命名代号PSC)等。在刀具结构方面,尽可能采用模块式或机夹可调式结构,以简化刀具的设计和制造,并方便用户的现场更换。在刀具涂层方面,采用先进的涂层设备,把TiSiN、TiSiCN、TiAlSiN、AlCrN、AlCrSiN、TiBN、ZrN、CrN和Al₂O₃等涂层材料附着于刀具基体上,涂层厚度在2~18μm,使得金属加工的干式切削成为“标准加工环境”。

参考文献:

- [1] 刘胜勇. 模具行业国产数控装备发展对策[J]. 金属加工(冷加工), 2017(11): VIII-3.
- [2] 刘胜勇. 新常态下国产数控系统的发展对策及案例[J]. 金属加工(冷加工), 2017(6): VIII-6.
- [3] 刘胜勇. 基于一键Ghost技术的西门子系统备份与还原[J]. 金属加工(冷加工), 2016(22): 63-66.

MW (收稿日期: 20170511)

