国家科技重大专项

高档数控机床与基础制造装备

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施管理办公室 主办　2018 年第 1 期（总第 22 期）

汽车行业专刊（一）

面向汽车行业基础制造装备创新进展

超高强钢热冲压生产线

汽车驱动桥螺旋锥齿轮绿色制造成套技术与装备的研制

汽车曲轴加工柔性、敏捷、高效、精密、自动化生产线示范工程

铸件砂型近净成形成套装备的研究及应用

锡柴重型柴油发动机缸体、缸盖柔性加工生产线示范工程

（内部资料）

国家科技重大专项

高档数控机床与基础制造装备

主办

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施管理办公室

协办

中国一汽无锡油泵油嘴研究所

支持

中国重型机械研究院股份公司

祝贺《高档数控机床与基础制造装备》成功创刊！希冀集行业之力量，肩负产业之责任，共同打造一个综合的信息交流与成果展示平台，助力专项工作的全面发展，见证：04专项：的今天和明天！

苏波

二零一二年 十一月二十六日

时任工业和信息化部副部长、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施管理办公室主任苏波为《高档数控机床与基础制造装备》创刊题词

征稿启事

各课题单位：

现将本刊有关投稿范围和要求启事如下：

1. 新闻类：是指与专项课题有关的事件或动态信息。请整理成简短的文字＋图片，文字原则上控制在 1 000 字以内。如：成果产品在用户端的应用信息、课题会议、协作单位之间的交流活动、课题取得新的进展、验收或预验收活动、课题管理新的措施或制度等。

2. 研发成果类：主要是指课题的阶段性技术研发或产品成果或者最终成果。可以整理成 3 000 字以内的文章＋图片。要求突出技术性能和创新等。

3. 成果应用类：是指课题成果在用户端成功应用的文章，也称为“应用案例”，字数控制在 3 000 字以内并配相关图片。文章要求突出成果应用过程中表现的性能和产生的经济和社会效益等。该类文章最好请用户单位结合其具体生产过程的具体加工产品来描述其体现出来的效率、质量和效益等。

4. 经验交流类：该类文章是要求总结并挖掘数控专项课题的实施对企业在管理、生产、转型、研发、创新、市场应对能力、企业理念等方面带来的改变和创新。当然，也可以任选其中一个方面重点总结；或者其他任何好的经验和方法。

5. 投稿方式：请将以上各类稿件以 WORD 文档电邮至 skjc@vogel.com.cn 信箱。或者登陆 www.vogel.com.cn/skjc 参阅电子刊。

注意：在本刊上发表的技术文章，可以作为课题验收时的论文成果纳入课题验收文件。

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项
实施管理办公室
《高档数控机床与基础制造装备》编辑部

目录

2018 年 第 1 期（内部资料）

领导题词

领导题词 3

动态信息

数控机床“大脑”国际标准将采用中国方案 6

华中数控荣获国家科学技术进步奖 7

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项管理制度培训会在武汉召开 9

“华中标准型数控系统和专用数控系统开发及规模化推广应用”课题通过技术终验收 11

汽车行业专刊（一）

总论

面向汽车行业基础制造装备创新进展 16

冲压生产线

超高强钢热冲压生产线 22

金属切削生产线

汽车驱动桥螺旋锥齿轮绿色制造成套技术与装备的研制 27

汽车曲轴加工柔性、敏捷、高效、精密、自动化生产线示范工程 30

铸造技术

铸件砂型近净成形成套装备的研究及应用 34

示范生产线

锡柴重型柴油发动机缸体、缸盖柔性加工生产线示范工程 37

经验交流

基于加工过程在线监测的刀具柔性管理技术研究 43

立式加工中心综合误差补偿技术应用 48

成果及应用

超重型数控单柱移动立式铣车床研制成功 53

技术跟踪

为加工传动轴而精确订制磨削解决方案 55

汽车行业专刊（一）

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施以来，围绕整车制造“四大工艺”、汽车发动机和变速器等关键零部件制造需求，在冲压、焊接、涂装、关键零部件制造以及检测与试验装配等成套设备的创新方面，安排课题 50 余项，经费总投入超过 25 亿元，取得了显著的经济和社会效益，汽车行业急需的基础制造装备取得了显著成效，形成了以全自动冲压生产线为代表的一系列标志性成果，自主化创新保障能力基本形成。但国产装备在精度、效率、可靠性和成套性方面仍有差距，有待通过课题项目的持续实施，满足汽车行业个性化、柔性化和智能化制造的新需求。

数控机床“大脑”国际标准将采用中国方案

——我国机床数控系统自主技术国际标准成功立项

2018年2月12日，由国家机床质量监督检验中心副主任黄祖广博士带领的团队提出的《工业自动化系统与集成 机床数控系统 一般要求》国际标准提案，经国际标准化组织自动化系统与集成技术委员会物理设备控制分会（ISO/TC184/SC1）投票，以无反对票的投票结果获批正式立项，编号ISO 23218。这是ISO/TC184/SC1中首次由中国负责提出并成功立项的项目，也是该团队在完成我国机床行业首项国际标准IEC/TS 60204-34:2016《机械安全 机械电气设备 第34部分：机床技术条件》之后，在国际标准化方面取得的又一重大突破。我国机床数控系统自主技术国际标准的成功立项，标志着我国在机床数控系统国际标准领域实现了“零”的突破，数控机床“大脑”国际标准将采用中国智慧和中国方案。

数控系统是数控机床的“大脑”，关系到国防、产业与经济安全。数控系统标准是指导、引领数控系统产品迈向高端，促进数控系统产业转型升级的战略支撑。我国数控系统关键技术标准缺失、不成体系。在国家“863”计划、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（以下简称“04专项”）等课题的支持下，由国家机床质量监督检验中心牵头，组织行业骨干企业历经10余年联合攻关，突破了“开放平台同一、安全门槛同一和测评尺子同一”的核心难题，创制了我国开放式高档数控系统系列国家标准，提出了数控系统功能安全评估方法，主导制定了我国机床行业首项IEC国际标准，研发出高档数控系统功能/性能测评关键技术与成套检测设备，实现了标准创制过程中全生命周期验证，形成了数控系统关键技术标准43项，其中国际标准1项，国家标准31项，行业标准11项，创建了较完备的高档数控系统关键技术标准体系。项目成果获2017年中国机械工业科学技术一等奖，并获中国机械工业联合会2018年国家科技进步奖提名。这些标准成果的取得，为我国主导并推动机床数控系统关键技术国际标准立项奠定了坚实基础。

ISO/TC184/SC1产生的首项由中国提出的国际标准，标志着我国在欧、美、日国家为主导的机床数控系统领域中逐渐从跟随转为并跑和领先。此项国际标准是04专项的标志性成果之一，它的成功立项，表明在04专项支持下建立的“高档数控系统关键技术标准体系”成果得到了国际认可，成为国际上机床数控系统行业规则的制定者。

（文/国家机床质量监督检验中心 薛瑞娟）

华中数控荣获国家科学技术进步奖

2018 年 1 月 8 日，作为国家三大奖项（另两个奖项是国家自然科学奖和国家技术发明奖）之一的国家科学技术进步奖颁奖大会在北京人民大会堂隆重举行，党和国家领导人习近平、李克强、张高丽和王沪宁等出席了大会并为获奖单位颁奖。武汉华中数控股份有限公司（以下简称“华中数控”）参与完成的“高性能数控系统关键技术及产业化”项目获得国家科技进步二等奖，这是数控系统行业获得的最高奖项，充分彰显了华中数控的技术实力和产业化成果。华中数控董事长陈吉红代表华中数控领奖。

华中数控获国家科技进步二等奖

数控机床是制造业的“工作母机”，而高性能数控系统是机床装备的“大脑”，是我国航空航天和军工行业急需的高端制造装备的基础，代表了国家制造业的核心竞争力。长期以来，西方发达国家在高性能数控系统方面对我国进行技术封锁和高价垄断。使用进口数控系统，随时有被国外控制、核查、限用、信息泄露甚至停机的安全隐患。自主可控的数控系统技术，是保证我国工业信息安全和实现智能制造的关键。从历史上的“东芝事件”、“考克斯报告”可以看出，数控系统是关系到我国国防安全、产业安全和经济安全的战略高技术。数控系统的研发涉及计算机、机、电、液和控等多个领域，技术难度大，尤其是设备间信息的实时同步通信、高速高精复杂轨迹运动控制以及伺服电机高增益宽域控制等难题亟待解决。

陈吉红董事长代表华中数控领奖

多年来，我国数控系统产业经历了艰辛坎坷的发展历程，数控系统一直是导致中国制造“基础薄弱，缺心少脑”的典型关键基础部件。如何在性能、功能和可靠性方面缩小与国外的差距，破解产业化的难题，是中国制造业的梦想。

在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，华中数控、华中科技大学、宝鸡机床集团与沈阳飞机工业（集团）有限公司、上海航天设备制造总厂等单位一起，通过产、学、

华中 8 型高性能数控系统

研、用联合攻关，开展基础理论、应用技术和系统集成等创新研究，攻克了上述难题，成功地研制出具有自主知识产权的系列化高性能数控系统成套产品，并实现了产业化，使得中国的航空航天和国防军工领域能够安全使用我国自主可控的数控系统。

该项目攻克了高速、高精度运动控制技术，实现了纳米级插补和高速、高刚度伺服驱动控制；突破了现场总线、五轴联动和多轴协同控制技术，研制了硬件可置换、软件跨平台的全数字数控系统软硬件平台，构建了数控系统云服务平台，实现了全数字化的系统内部通信和外部互联；提出了指令域大数据分析方法，实现了工艺参数优化、机床健康评估和热误差补偿等智能化功能的工程应用。

华中 8 型数控系统通过了国家级鉴定，鉴定评语是：自主可控的数控系统，全面达到国际先进水平，为高档数控机床重大专项作出了突出的贡献，为中国智能制造提供了智能平台。

目前，华中数控系列化的高性能数控系统成套产品已替代进口，在沈阳飞机工业（集团）有限公司、上海航天设备制造总厂、成都飞机工业（集团）有限责任公司、核九院、大连机床集团有限责任公司和四川普什宁江机床有限公司等国内重点企业得到成功应用，实现了在航空航天、能源动力、汽车及其零部件、3C 制造和机床等领域与高档数控装备的批量配套，改变了我国高性能数控系统被国外垄断的局面，为我国高档数控装备的自主可控提供了重要技术保障。

不忘初心，继续前行。华中数控将在获得国家科技进步二等奖的基础上，进一步激发创新潜力，立足数控系统核心技术突破，完善“数控一代”，发展“智能一代”，促进中国制造业的转型升级。

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项管理制度培训会在武汉召开

来自 MT 机床网的报道，2018 年 1 月 24 日，“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项管理制度培训会在武汉召开。本次会议由数控机床专项实施管理办公室委托工信部产业发展促进中心举办，工信部装备工业司罗俊杰副司长、王建宇副巡视员，工信部产业发展促进中心王伟主任、科技部重大专项办公室刘翔副处长、数控机床专项技术总师卢秉恒院士和湖北省经信委陶红兵总工程师到会并讲话。培训会由工信部产业发展促进中心李进忠处长主持。工信部财务司、科技司，国投创业投资管理有限公司参加了会议。

工信部装备工业司罗俊杰副司长

工信部装备工业司王建宇副巡视员

工信部产业发展促进中心王伟主任

数控机床专项技术总师卢秉恒院士

会议解读了近期发布实施的国家科技重大专项制度文件、相关项目管理规定和资金管理办法及细则，开展了专项任务和预算执行及验收的培训，3 家课题单位交流了专项项目管理经验。数控机床专项相关部门、总体组专家、有关地方工业主管部门及中央企业、行业协会以及在研课题单位代表近 400 人参加了此次培训会议。

近 400 人参加了此次培训会议

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项管理制度培训会在武汉召开

会上，工信部产业发展促进中心王伟主任介绍了此次管理制度培训的目的和安排，强调了工信部产业发展促进中心“两个专业化，一条管理链”的发展思路和“一三五”管理模式，并表示将与装备工业司共同加强数控机床专项的过程管理，合力推动专项的顺利实施。

卢秉恒院士简要介绍了数控机床专项的总体进展情况及取得的成效，并提出了专项下一步的发展思路和想法。

王建宇副巡视员介绍了召开本次专项管理制度培训会的背景，要求课题单位深刻领会和贯彻党的十九大精神，深入了解数控机床专项各项管理制度，加强过程管理，保质保量推进课题验收。

罗俊杰副司长做培训总结发言。他强调，要深入贯彻党的十九大精神，坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面落实创新驱动发展战略。罗俊杰副司长总结了数控机床专项 2017 年各项工作的完成情况和实施成效，介绍了 2018 年度工作重点和安排部署，并提出了“强化学习研究，落实改革要求；强化目标管理，挂图推进；强化过程管理，督查督办；强化制度建设，照章办事；强化执纪问责，层层传压；强化作风建设，严守廉政底线”的六点希望和要求。

“华中标准型数控系统和专用数控系统开发及规模化推广应用”课题通过技术终验收

2017 年 12 月 22 日，由武汉华中数控股份有限公司（以下简称“华中数控”）牵头承担的“华中标准型数控系统和专用数控系统开发及规模化推广应用”课题，在广东省东莞市广东劲胜智能股份有限公司（以下简称“劲胜智能”）顺利通过了工信部组织的技术终验收。

课题验收会议现场

课题验收专家组由中国机械工业联合会执行副会长杨学桐担任组长，中航工业成都飞机工业（集团）有限责任公司数控加工厂厂长汤立民为副组长，专家组成员包括：中国科学院沈阳计算技术研究所有限公司所长林浒、国家机床质量监督检验中心主任赵钦志、沈阳机床（集团）有限责任公司原副总经理路远达、北京航空航天大学教授刘强、大连光洋科技集团有限公司总经理陈虎、广州数控设备有限公司副总经理杨堂勇以及北京凯恩帝数控技术有限责任公司副总工程师杨洪丽。验收会期间，专家组还参观考察了由劲胜智能和华中数控等单位联合建设的 3C 智能工厂，并给予了高度评价。

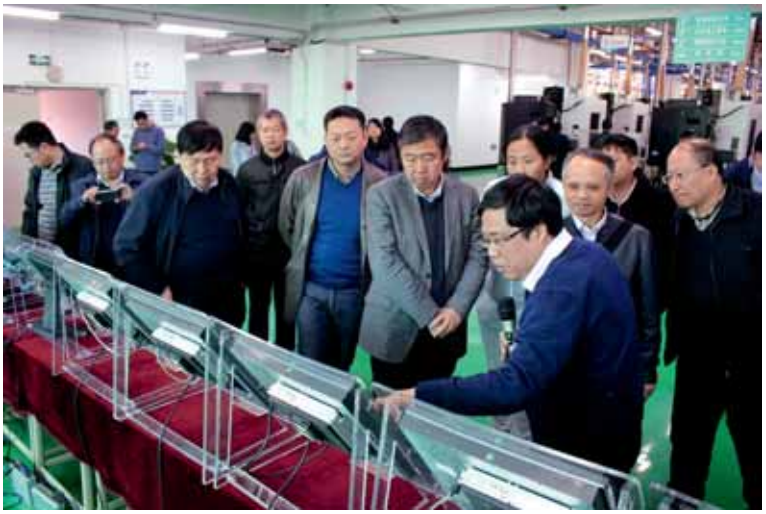
课题负责人——华中数控朱志红总工程师汇报课题执行情况

首先，课题负责人——华中数控总工程师朱志红汇报了课题执行情况及成果，随后，华中科技大学、武汉华大新型电机科技股份有限公司、武汉登奇机电技术有限公司、大连机床集团有限责任公司和江西杰克机床有限公司等 10 家课题参与单位分别作了汇报，深圳市鼎泰智能装备股份有限公司、东莞市巨高机床有限公司和广东隆凯股份有限公司 3 家用户企业分

华中 8 型数控系统系列产品

别介绍了华中 8 型产品的应用和测试情况。

本课题完成了任务合同书规定的 8 种规格标准型数控装置、磨削类 6 种规格和板材加工类 3 种规格的专用型数控系统、8 种规格全数字交流伺服驱动装置，以及 6 个系列 24 种规格交流伺服电机和 2 个系列 10 种规格交流主轴电机的产品化开发，成功解决了系统配套过程中的成套性、系列化以及自主可控的问题；在技术上攻克了高速高精运动控制、NCUC 总线、多轴同步、硬件电流环、可靠性设计、评测以及增长设计、嵌入专有加工工艺的专用型数控系统开发设计等一批关键技术，达到了国外主流数控系统技术水平；产品可靠性得到大幅度提升，达到与国外主流数控系统可靠性水平。



专家组参观华中 8 型标准型数控系统系列产品

目前，华中 8 型标准型数控系统已在航空航天、汽车零部件制造、3C 制造、机床工具、通用机械加工、木工和玻璃加工等行业得到批量应用，实现推广销售 3 万多台套。特别是在 3C 加工领域，华中数控的产品打破了国外知名品牌数控系统的长期垄断局面。基于对智能化技术和高动态特性伺服电机的应用，在同等加工质量的前提下，与国外品牌数控系统相比，配置华中数控系统的钻攻中心，加工效率高出了 10% ～ 20%，迫使国外解除了对中、高档数控

专家组参观华中 8 型标准型数控系统与国外系统对比测试样件

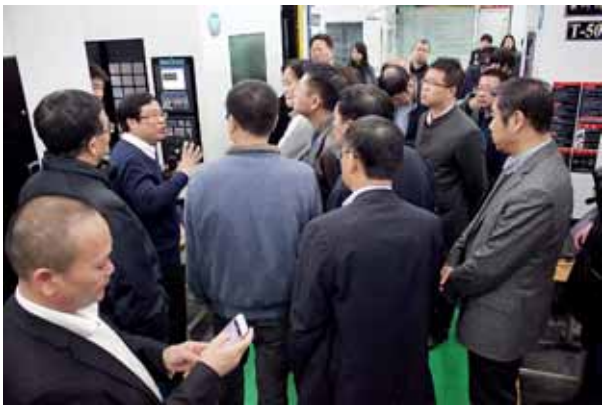
系统的技术封锁，令进口数控系统大幅降价，为中国制造业创造了重要的经济和社会效益。例如，日本某知名数控系统公司将其最高端的某型号数控系统的功能进行裁剪，大幅度降价，以争夺中国钻攻中心市场。自 2015 年至今，华中数控为钻攻中心市场配套了数万套数控系统，典型用户有劲胜智能、福建嘉泰、深圳创世纪（台群）、深圳鼎泰、深圳巨高和苏州胜利精密等知名企业。

劲胜智能与华中数控共建的智能制造工厂

劲胜智能的智能工厂大量应用了华中 8 型标准型数控系统

华中数控在华中 8 型数控系统的基础上，还基于云计算、大数据和 CPS 等单元技术，开发了智能管理、智能调试、智能补偿、智能加工、健康保障、网络销售平台、租赁服务和云端工厂等智能化软件，并在全国建立了若干国家级智能制造示范工厂。

劲胜智能子公司——东莞中创智能制造系统有限公司总经理黄河先生向与会专家介绍了与华中数控等单位联合建设的 3C 智能工厂。作为 2015 年国家 94 家智能制造专项之一，该项目已建成拥有 10 条自动化钻攻生产线的智能车间，智能车间包括 180 台配置华中数控 HNC-818AM 系统的高速高精钻攻中心、81 台华数机器人、30 台 RGV、10 台 AGV 小车以及一套全自动配料检测系统。该项目的特点是："三国"、"六化"和"一核心"。"三国"是指智能工厂全部使用国产智能装备、国产数控系统和国产工业软件；"六化"是指装备自动化、工艺数字化、生产柔性化、过程可视化、信息集成化和决策自主化；"一核心"是指建立了智能工厂设备大数据平台，通过对设备实时大数据的采集、分析，实现了机床健康保障、G 代码智能优化和断刀监测等智能化功能。华中数控参与了整个项目的规划和实施，并主要负责提供机床数控系统、机器人、产线总控系统和智能工厂大数据，打通了最底端的设备层到最高的决策层，实现了真正意义上的智能化生产。



专家们参观应用华中标准型数控系统及华数机器人的智能制造车间

与会代表合影

深圳市鼎泰智能装备股份有限公司周远贵副总经理在发言中介绍说：“我公司在厂内对华中 8 型数控系统与日本数控系统进行功能、性能对比测试，测试结果表明，华中数控系统功能、性能均不逊于国外数控系统，在加工效率上高于国外数控系统。目前，我公司已批量配套华中 8 型数控系统达 5 000 台套。”

东莞市巨高机床有限公司廖巨清总经理在发言中表示：“我们通过市场观察，发现华中数控系统在市场上有较好的声誉，性能和可靠性不比国外同类产品差，用户口碑非常好。从 2016 年年底开始，我公司开始与华中数控开展合作，经过实际加工对比测试，无论是加工效率，还是可靠性、售后服务等，完全符合用户需求，大大增强了我们与华中数控合作的信心。”

在对华中数控提问并听取了答疑后，验收专家组经内部讨论一致同意，“华中标准型数控系统和专用数控系统开发及规模化推广应用”课题通过技术终验收。

开篇语

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（简称“04 专项”）实施以来，围绕汽车整车制造“四大工艺”、汽车发动机和变速器等关键零部件制造需求，在冲压、焊接、涂装、关键零部件制造以及检测与试验装配等成套设备的创新方面，共安排了课题 50 余项，经费总投入超过 25 亿元，取得了显著的经济效益和社会效益。

04 专项的实施，不仅推动了单一企业、单一产品的提升，更重要的是，建立并完善了整个创新体系，为我国汽车产业的自主化提供了关键技术和装备的支撑，提升了我国汽车企业、装备制造企业的国内外市场竞争力和话语权。

04 专项的实施，对汽车行业带来的影响主要体现在：

第一，在研发模式上的创新。采取“产、学、研、用”相结合的任务攻关模式，以市场需求为导向，形成了“市场考核产品、主机考核部件和部件考核工艺”的创新方式，通过市场层层考核，解决了“长期以来基础制造装备研发成果难以在汽车领域形成应用”的瓶颈，确保了专项研究成果取得实效并得到应用。

第二，国产基础制造装备的自主化能力大幅提升。汽车制造所急需的基础制造装备，一部分领域实现了从无到有、一些重点产品实现了由弱到强以及市场份额实现了由小变大的逐渐转变过程。在专项平台的支撑、制造企业的努力及用户的支持下，汽车整车厂对国产装备的认可度正在逐渐提升。

第三，完善了行业创新体系，推动了汽车装备制造骨干企业联合用户、高校和院所开展联合开发，搭建了基础制造装备企业与汽车领域需求对接的平台，促进了产、学、研的合作，逐渐形成了长效合作机制，使企业能够充分利用公共科技资源。同时，专项所布局的共性技术与市场需求紧密结合，具有很强的市场和技术前瞻性，为整个行业的持续发展奠定了基础。

第四，树立了中国装备制造的新形象。多家企业通过承担 04 专项课题，形成了具备国际先进水平的机床产品，占据了部分国际市场，树立了中国装备的新形象。

通过 04 专项的实施，汽车行业急需的基础制造装备取得了显著成效，形成了以全自动冲压生产线为代表的一系列标志性成果，自主化创新保障能力基本形成。但国产装备在精度、效率、可靠性和成套性方面仍有差距，有待通过课题项目的持续实施，满足汽车行业个性化、柔性化和智能化制造的新需求。

——04 专项技术副总师 王德成

面向汽车行业基础制造装备创新进展

文 /04 专项技术副总师 王德成

04 专项面向汽车行业基础制造装备任务部署

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（以下简称“04 专项”）实施以来，围绕汽车整车制造“四大工艺”、汽车发动机和变速器等关键零部件制造需求，在冲压、焊接、涂装、关键零部件制造以及检测与试验装配等成套设备的创新方面，共安排了课题 50 余项，经费总投入超过 25 亿元，取得了显著的经济和社会效益。

冲压作为汽车制造的四大工艺之一，主要用于生产汽车覆盖件。汽车制造的质量与效率，要求冲压生产线必须具有高生产效率、高可靠性和高稳定性的特点。04 专项前期，在单机、生产线、创新平台和示范工程等方面开展了系列任务部署。在车身覆盖件方面，围绕“形成具有国际先进水平的系列化汽车车身自动化冲压生产线”这一目标，先后开展了大型快速高效数控全自动冲压生产线、大型多工位压力机自动化生产线、大型数控单双动薄板液压机、大型伺服压力机和全伺服冲压生产线等任务的攻关。在车身结构件方面，重点安排了内高压成形、高强钢冷热冲压成形技术与装备等课题，满足了关键瓶颈性装备的急需，填补了国内空白。围绕汽车发动机与变速器关键零部件的制造，加强了高速精密数控冲床、大公称力行程冷锻成形压力机、精冲压力机和冲压模具等产品的攻关部署，形成了全面的自主化保障能力。

在焊装方面，部署了焊接自动化成套装备、点焊机器人、弧焊机器人、全自动激光拼焊生产线以及基于国产激光器和机器人的白车身焊接自动化生产线等任务，主要为了解决长期制约国产焊接生产线的核心装备和关键工艺瓶颈问题。

在涂装方面，聚焦了涂装机器人、乘用车车身环保柔性涂装生产线和多材质车身柔性涂装生产线等任务，为形成自主化整线能力提供核心装备支撑。

在发动机关键零部件制造方面，以填补空白为导向，部署了发动机铸件砂型近净成形成套设备、铝合金低压铸造成套装备以及 3 500 t 精密卧式实时控制压铸机、数字化无模铸造成形装备和大型精密压铸模具等任务，以满足关键瓶颈装备的自主化急需。

在检测与装配方面，部署了汽车变速器在线检测设备、汽车精密液压系统 (ABS/ESP) 智能化检测与装配系统和柴油发动机柔性自动化装试生产线等任务，以满足汽车发动机、变速器关键检测与装配装备的自主

化急需。

同时，04 专项还设立了精密塑性成形和大型精密复合冲压两个创新能力平台，以技术开发、技术推广和工艺研究为基础，为汽车企业及装备开发企业提供持续的技术支撑。

到 2020 年，通过 04 专项的深入实施，面向汽车行业的基础制造装备将形成从无到有、从低端到高端以及从单机到成套设备的自主创新能力，为汽车行业快速发展提供关键的装备保障支撑。

基础制造装备取得显著成效

自 2009 年起，通过 9 年的实施，面向汽车行业的基础制造装备在产品设计、制造与应用方面的能力均显著增强，取得了显著成效，具体表现在：

1. 整车制造“四大工艺”装备取得重大突破，部分装备实现了出口应用

目前，我国自主制造的冲压生产线已在市场中占据主导地位，覆盖件冲压设备的国产化率已达到 80%。国内主要冲压设备制造企业已经能够成套提供单机联线自动化生产线。例如，济南二机床集团有限公司开发的“大型快速高效全自动冲压生产线”，突破了多项关键核心技术，生产节拍最快可达 15 件 /min，整线全自动换模时间仅为 2.8 min，达到国际先进水平。该公司累计承接的 91 条大型快速全自动冲压生产线订单，装备了国内几乎所有自主品牌、合资品牌的汽车企业，国内市场占有率达到 70% 以上，并获得了福特美国工厂 9 条生产线、日本日产美国工厂和日本九州工厂 2 条生产线以及雪铁龙汽车公司法国工厂一条生产线的订单。

齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司研制的 2 500 t 多工位自动冲压生产线，应用于汽车薄板冲压零件的全自动高效加工，可代替由 4 ～ 6 台压力机组成的冲压生产线，冲压节拍最高可达 25 次 /min，与同等吨位多工位压力机相比，冲压生产效率提高了 2 ～ 3 倍，大幅降低了能耗，节省生产作业面积 40% 左右，达到国内领先水平。

在 04 专项的支持下，济南二机床集团有限公司、中国第一重型机械集团公司开展了大型伺服压力机技术的研究和应用工作，在此基础上，开发出了国产全伺服高速自动冲压线，与传统全自动冲压线相比，生产节拍达到 18 次 /min，生产效率提高了 20%，

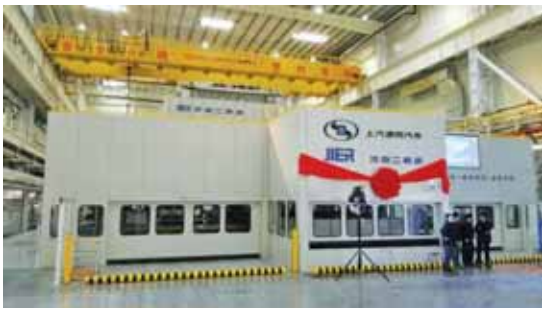
济南二机床集团有限公司的大型快速高效全自动冲压生产线

齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司的 2 500 t 多工位自动冲压生产线

生产柔性也更加优越，可实现“绿色、智能、融合”的全伺服高速冲压生产。

合肥合锻机床股份有限公司研制的大型数控单双动薄板液压机，解决了形状复杂、大拉伸比和高精度的覆盖件成形难题，打破了德国舒勒、日本川崎等国外产品的技术封锁和市场垄断，产品在比亚迪股份有限公司、安徽江淮汽车集团股份有限公司和南京依维柯汽车有限公司等 50 余家汽车整车企业及其零部件企业得到了批量应用，价格仅为国外价格的 1/3，性能达到了国际先进水平。

国产点焊机器人、弧焊机器人也取得了突破，并在焊装生产线上得到了示范应用，解决了长期制约国产焊接生产线的核心装备瓶颈问题。开发的全自动激光拼焊生产线，可焊接厚度 0.5 ～ 3 mm 的板 材，最大焊接速度达 9 m/min，最大焊接效率 5 件 /min，多组同时拼焊数≥ 3，满足了 250 ～ 2 200 mm 焊缝长度的焊接要求，打破了国外板材激光拼焊生产线对我国的垄断。



国产首条全伺服高速自动冲压生产线

合肥合锻机床股份有限公司研制的大型数控单双动薄板液压机

新松机器人自动化股份有限公司的点焊机器人

为奇瑞汽车股份有限公司装备的点焊机器人

涂装生产线的核心装备——涂装机器人实现了自主开发，为整线的国产化奠定了基础。多材质车身柔性涂装生产线的研发，将满足不同材质和多车型车身、短工艺等对节能环保、高效智能的柔性涂装生产线的需求，实现国产涂装生产线的完全自主可控。

2. 零部件核心制造装备自主保障能力显著提升，实现了进口替代

由机械科学研究总院集团有限公司研制的高强钢热冲压及连接技术、模具及成套装备，为汽车轻量化、节能减排提供了关键的

工艺技术支撑，并在北汽福田新能源汽车迷迪样车上获得应用，从而显著提高了轻量化及碰撞安全性能，填补了国内空白。

合肥合锻机床股份有限公司开发的超高强度汽车结构件热冲压技术和装备生产线，具有超高强度、高硬度、轻量化（厚度比普通钢板减薄达 35%）和几乎无回弹（制造精度高）等诸多优点，技术优势十分明显。

一汽铸造有限公司联合苏州三基铸造装备股份有限公司共同研制了 3 500 t 精密卧式实时控制压铸机及配套模具，主机最大空压射速、增压建压时间等性能均达到国际同类产品的先进水平，并在中国第一汽车集团有限公司建立了 3 500 t 全自动压铸生产示范线，实现了重卡 15 档变速器壳体、红旗轿车 7 档自动变速器壳体及 EA211 1.6L 发

机械科学研究总院集团有限公司的高强钢热冲压及连接成套技术

3 500 t 精密卧式实时控制压铸机

数字化无模铸造精密成形设备

动机缸体等大型复杂压铸件的生产。

机械科学研究总院集团有限公司自主开发的数字化无模铸造精密成形设备，改变了对传统铸造所需木模的依赖，解决了关键复杂零部件制造周期长、成本高、尺寸精度低和加工余量大等瓶颈问题，缩短了开发流程，如 105 系列柴油机缸盖，常规需 6 ～ 9 个月，现在缩短至 60 天。

济南铸造锻压机械研究所有限公司研制开发的轿车铝合金缸盖低压铸造成套设备，打破了国外在低压铸造生产轿车铝合金缸盖、缸体领域的技术垄断，满足了我国汽车行业的需要。

安徽江淮汽车集团股份有限公司自主开发了 50 000 kN 轿车车身铝合金覆盖件充液成形成套设备，掌握了面向批量化生产的充液成形装备以及充液 - 局部冲压成形模具设计和制造关键技术，解决了铝合金成形性差、表面易划伤和成品率低等难题，填补了国内空白。

扬州锻压机床股份有限公司开发的 10 000 kN 精冲压力机、高速精密数控冲床，

解决了多项高速冲压关键技术瓶颈，填补了国内空白，使我国精冲压力机总体水平跨入国际先进行列。

北京机械工业自动化研究所有限公司研发的汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验装备，在国内多条汽车变速器生产线上获得了应用，填补了国内空白。

3. 共性技术和创新平台成果引领作用凸显，行业可持续支撑能力基本形成

04 专项布局实施的共性技术和创新能力平台建设取得了系列突破，掌握了一批基础制造装备前沿技术和关键技术，显示出共性技术和创新能力平台对汽车行业的持续支撑和引领作用。

大型精密复合冲压成形机床创新能力平台，建立了大型冲压成形机床自动化系统试验平台、冲压装备分析与仿真平台和控制系统技术平台，提高了高端冲压生产线重大成套技术的自主开发、原始创新能力，使中国冲压装备走进了国际高端前沿技术领域，奠定了在国际市场的竞争基础。

精密塑性成形技术与装备创新能力平台，建立了精密塑性成形领域数字化设计、先进成形工艺和成形设备 8 个专业实验室，开展了 28 项专题技术研究，开发出一批核心技术，累计为企业提供 20 余台套关键成形设备，为 50 余家企业提供了重要技术服务。

由机械科学研究总院集团有限公司牵头的铝合金车身零部件典型成形工艺及关键装备技术研究，开展了铝合金材料冷 / 热冲压、充液、挤压和铸造等 4 种成形工艺的研究，开发了型材挤压 - 弯曲 - 淬火成形装备、500 t 级多功能压挤铸造设备等装备，实现了前盖和底板、车门防撞梁等典型产品的装车应用。

一汽轿车股份有限公司研制的首台大吨位（6 000 t）多轴数控内高压成形装备，填补了国内空白，打破了发达国家的技术封锁和装备垄断，解决了限制内高压成形技术应用的瓶颈问题，使国内大吨位内高压装备的设计及工艺开发水平提升到国际领先地位。

北京机电研究所有限公司开展了铝合金覆盖件超塑成形技术研究，突破了铝合金覆盖件难成形、生产效率低的难题，形成了快速超塑成形新工艺和新技术，开发了国产商业铝板覆盖件，并在长城汽车股份有限公司实现了推广应用。

专项实施对汽车行业的发展带来的影响

04 专项的实施，不仅推动了单一企业、单一产品的提升，更重要的是，建立并完善了整个创新体系，为我国汽车产业的自主化提供了关键技术和装备的支撑，提升了我国汽车企业、装备制造企业的国内外市场竞争力和话语权。总之，04 专项的实施对汽车行业带来的影响主要体现在以下几个方面：

第一，在研发模式上的创新。04 专项采取了“产、学、研、用”相结合的任务攻关模式，以市场需求为导向，形成了“市场考核产品、主机考核部件和部件考核工艺”的创新方式，通过市场层层考核，解决了“长期以来基础制造装备研发成果难以在汽车领域形成应用”的瓶颈，确保了专项研究成果取得实效并得到应用。

第二，国产基础制造装备的自主化能力

大幅提升。汽车制造所急需的基础制造装备，一部分领域实现了从无到有、一些重点产品实现了由弱到强以及市场份额实现了由小变大的逐渐转变过程。在专项平台的支撑、制造企业的努力及用户的支持下，汽车整车厂对国产装备的认可度正在逐渐提升。

第三，完善了行业创新体系。通过 04 专项的实施，推动了汽车装备制造骨干企业联合用户、高校和院所开展联合开发，搭建了基础制造装备企业与汽车领域需求对接的平台，促进了产、学、研的合作，逐渐形成了长效合作机制，使企业能够充分利用公共科技资源。同时，专项所布局的共性技术与市场需求紧密结合，具有很强的市场和技术前瞻性，为整个行业的持续发展奠定了基础。

第四，树立了中国装备制造的新形象。多家企业通过承担 04 专项课题，形成了具备国际先进水平的机床产品，占据了部分国际市场，树立了中国装备的新形象。例如，济南二机床集团有限公司制造的多条冲压生产线出口国外，使之成为世界公认的最高水平的冲压装备制造商之一。

存在的主要差距

与我国汽车行业快速发展的需求相比，目前，基础制造装备仍然有很大的不足，主要表现在：

第一，国产装备的成套性和工艺研究尚需加强。虽然在 04 专项的支持下，通过开展示范工程，加强了已有装备的应用验证，促进了制造工艺与装备的深度融合，但仍然存在很多装备开发完之后还不能成套，或者不能适应高效的联班大批量生产等问题，因此，必须加强工艺研究，提高国产装备的成套性和制造效率。

第二，国产装备的可靠性仍有差距。很多装备在短期内好用、长时间不好用，或者精度保持时间不够长，可靠性与进口高端装备相比还存在差距，导致汽车制造关键装备大量进口的局面仍未得到有效改变。

第三，难以满足轻量化、智能化的制造需求。轻量化已经成为汽车制造的重要发展趋势，轻合金、复合材料的应用比例将大幅提升，对新的成形工艺、新装备的需求将不断涌现，从而对 04 专项带来了新的挑战。与国外先进制造装备相比，我国多数基础制造装备处于数控化、自动化阶段，智能化程度有待提高，难以适应汽车行业个性化、柔性化和智能化制造的需求。

总体而言，通过 04 专项的实施，汽车行业急需的基础制造装备取得了显著成效，形成了以全自动冲压生产线为代表的一系列标志性成果，自主化创新保障能力基本形成。但国产装备在精度、效率、可靠性和成套性方面仍有差距，有待通过课题项目的持续实施，满足汽车行业个性化、柔性化和智能化制造的新需求。

合肥合锻智能制造股份有限公司

超高强钢热冲压生产线

文 / 张海杰 李贵闪

热冲压生产线概述

节能、环保和安全是当今汽车工业发展面临的三大挑战。实施汽车轻量化是降低汽车能耗、有效减轻车重的重要举措之一。新能源汽车轻量化是延长续航里程最主要的途径之一，其对轻量化的要求尤为突出。汽车轻量化除了优化车身设计外，还要求采用高强、轻质材料。目前，汽车行业采取多材料策略，即适合的材料用在适合的部位，但总的趋势仍以钢材为主。相关研究表明，若能使钢材的抗拉强度提高到 1 500 MPa 以上，相对于传统汽车用钢，可实现减重 30% 以上。在安全方面，普通高强钢的抗拉强度在 400 ～ 450 MPa 左右，而特殊热成形钢材在加热前的抗拉强度就已达到 500 ～ 800 MPa，热成形加工后，则提高至 1 300 ～ 1 600 MPa，为普通钢材的 3 ～ 4 倍，且硬度仅次于陶瓷，同时又具有钢材的韧性。因此，由热成形钢制成的车身，极大地提高了抗冲击性能和整体安全性。

基于此，目前越来越多的国家正在开发超高强度钢。但随着钢材强度的日益提高，也给汽车零部件的生产带来了巨大的挑战。因为强度越高，塑性就越差，变形就越不容易，零件的冲压就越困难。另外，强度越高，对模具的损害也越严重，生产成本会大幅提高。

最早由欧洲开发的热成形工艺，很好地解决了超高强度钢的冲压生产问题，即在奥氏体化下完成零件的冲压成形，然后在模具中完成马氏体转换，这使得热成形工艺得到

合肥合锻智能制造股份有限公司基于箱式炉的热冲压生产线配备高速热冲压液压机，适合中小批量的热冲压件生产

合肥合锻智能制造股份有限公司基于辊底炉的热冲压生产线配备高速热冲压液压机，适合中大批量的热冲压件生产

了越来越多的应用。

2010 ～ 2013 年，合肥合锻智能制造股份有限公司牵头承担了“超高强度汽车结构件热冲压技术和装备生产线”课题，成功地研制出具有自主知识产权的热冲压生产线。在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，连续 8 年对热冲压液压机不断进行试验和改进，迄今为止已形成了技术较为成熟的一系列热成形成套生产设备，主吨位涵盖 6 300 kN、8 000 kN、10 000 kN、12 000 kN 和 16 000 kN 等多种规格，可配套“多层箱式加热炉 + 六轴机器人”以及“辊底式加热炉 + 三坐标高速机械臂”，能够适应所有现有的热成形生产工艺，并针对未来可能出现的新零件工艺开展了预研，从而在设备设计、制造中预留了升级空间。

目前，合肥合锻智能制造股份有限公司已向国内外用户提供了近 30 套高速热冲压液压机，经过大批量的实际应用验证，完全满足了各项要求，技术及性能指标达到国际先进水平，从而迫使进口热冲压生产线及热冲压液压机的售价比 10 年前降低了 50% 以上。

热成形工艺过程

目前，热成形工艺主要分为两大类：直接热冲压成形和间接热冲压成形。

直接热冲压成形工艺过程包括：

第一步：开卷落料，即在下料设备上，按零件展开尺寸对整卷钢板进行下料，包括必要的表面处理等。

第二步：加热，完成下料后，放入加热炉中加热至 950 ℃并保温，直至材料完全奥氏体化。

第三步：上料输送，将加热好的材料快速传送至压力机内的模具上。

第四步：冲压成形，由高速液压压力机将材料快速冲压成形。

第五步：保压淬火，在压力机保压过程中，通过模具的特殊水冷处理，零件完成淬火硬化过程。

第六步：下料输送，将淬火后的零件传送至下料台上，并将出模约 200 ℃的零件冷却至室温。

第七步：尺寸精加工及表面处理，即在激光切割机上对零件进行切割、打孔，直至达到设计尺寸，然后进行最终的表面处理。

间接热冲压成形工艺过程包括：

第一步：开卷落料，在下料设备上按零件展开尺寸对整卷钢板下料，包括必要的表面处理等。

第二步：预冲压成形，在冷冲压设备上对零件进行预成形，将零件冷成形至接近最终形状。

第三步：加热，将预成形的零件在加热炉中加热至 950 ℃并保温，直至材料完全奥氏体化。

第四步：上料输送，将加热完成的零件快速传送至压力机内的模具上。

基于旋转箱式炉的热冲压生产线

第五步：冲压成形，由高速液压压力机将零件快速冲压成形。

第六步：保压淬火，在压力机保压的过程中，通过特殊水冷模具，零件完成淬火硬化过程。

第七步：下料输送，将淬火后的零件传送至下料台上，并将出模约 200 ℃的零件冷却至室温。

第八步：尺寸精加工及表面处理，在激光切割机上对零件进行切割、打孔至设计尺寸，然后进行最终的表面处理。

间接热冲压成形工艺与直接热冲压成形工艺相比的差别是，前者增加了冷模预成形冲压工序。间接热冲压成形工艺主要用于拉伸深度过大或者形状过于复杂、不能一次拉伸成形的零件。一般情况下，汽车零件基本都可以采用直接热冲压成形工艺进行生产。

热成形钢板

目前，热冲压成形工艺所用钢种均选用硼钢，如 22MnB5、27MnCrB5。这类钢种的典型化学成分是 C 约 0.221%、Mn 约 1.211% 和 Si 约 0.258%，加入微量的 B、P 和 Ti 等元素。微量的硼可有效提高钢的淬透性，使零件在模具中能以适当的冷却速度淬火，获得所需要的马氏体组织，从而保证零件的高强度。热冲压成形使用的板材主要为镀层板与无镀层板（裸板）。其中，无镀层板成本低、焊接性能好，但加热过程需要保护气体，冲压过程中有氧化皮产生，需要在冲压后进行喷丸处理，而且零件在存储中易生锈，耐腐蚀性能较差。镀层板一般为铝硅镀层板，相比无镀层板材，其优势为：在加热过程中无需保护气体，冲压过程中无氧化皮产生，无需喷丸处理，对模具无影响，零件在储存过程中不生锈，耐腐蚀性能好，但其缺点是，板材只能从国外采购，成本较高，当板料加热到一定温度时，镀层易与加热炉陶瓷辊粘结，需定期更换陶瓷辊，加热炉的使用和维护成本较高。

热冲压成形工艺的成套生产设备

热冲压生产工艺所需要的所有设备中，用于开卷落料、预冲压成形、尺寸精加工及表面处理这几道非核心工序的设备，一般为

通用设备。由于这几道工序的关联性不紧密，因此，通常所说的热冲压成形生产线的成套设备指的是完成加热、上料输送、冲压成形、保压淬火和下料输送这 5 道核心工序所用的设备。下面仅介绍核心工序的设备。

1. 加热炉

加热炉用于加热工序，对零件进行加热和保温，使材料组织完成奥氏体化。国内现有的热成形生产线常用的加热炉有两种：辊底式加热炉和层箱式加热炉。

辊底式加热炉是采用陶瓷辊棒滚动传送工件，在工件传送过程中进行加热和保温，通过调整炉体长度来调整最大生产节拍。

多层箱式加热炉使用的是固定式的加热腔体，工件在腔体内的托架上处于静止状态下得到加热和保温。通过采取对腔体进行叠加的方式来调整最大生产节拍。

辊底式加热炉占地面积大，使用、维护成本高，但是可以选择天然气、电两种加热方式，镀层和非镀层板均可使用，且配套的零件输送机构结构简单。多层箱式加热炉只能使用电加热，配套的零件输送机构结构复杂。因此，近两年来，综合考虑成本、工件类形和材料等因素，国内厂商用于大批量生产的生产线均采用辊底式加热炉，多层箱式加热炉仅用于试验线、试模线和小批量生产线。

2. 自动化设备

以辊底炉热冲压生产线为例，自动化设备包括炉前上料单元、炉后上下料单元、后处理单元和中央控制系统。其中，炉前上料单元、炉后上下料单元用于上料输送工序，后处理单元用于下料输送工序。

炉前上料单元主要采取两种上料方式，一种是，一个六轴机器人将工件拆垛，双料检测、打码后，送入加热炉；另一种是，采用拆垛机械手进行拆垛和上料。

炉后上下料单元利用一组三坐标机械手来将加热后的工件送入压机工作区的模具上。

后处理单元利用一组三坐标机械手将压制、淬火成形后的工件移出模具，放到下料台上，使其通风冷却至室温。

中央控制系统由一台工控机进行数据采集、监控，按工艺程序控制生产线的各台设备，协调各设备的动作时间、顺序，防止设备间出现干涉现象而造成事故，并提供生产线信息管理功能。

在对生产线成套设备实现国产化的进程中，自动化设备的技术难点在于：

（1）工件输送时的速度和定位精度。既要速度快，还要保持工件稳定，不能让红热状态下的工件产生大的抖动，防止工件变形，同时，要保证工件到位时的定位精确，使其能准确放入模具。

（2）中央控制系统的控制精度要高，连续生产的可靠性要好，要以最短的等待时间来协调生产线各组成设备的动作。

3. 模具

模具用于冲压成形和保压淬火工序，实现对工件的压制成形、淬火和淬火过程中的保压，是整条生产线的核心装备，也是整个热冲压成形工艺的核心。模具中有冷却水道，用于对模具进行冷却。在成形过程中，工件的热量传递给模具，通过冷却水道，工件可快速冷却、淬火。由于水道的分布至关重要，

因此目前采用的模具通常为机械加工水道组合模具、铸造模具和 3D 打印模具，以便于水道的加工。

4. 高速液压压力机

高速液压压力机可以实现快速合模，以将工件压制成形。一般，从坯料进入模具到完全合模压制成形，总的时间不到 2.5 s，这样，可以将工件的热量损失降到最低，防止工件温度降至 750 ℃以下，从而极大地降低了废品率。在淬火阶段，液压压力机可以提供很稳定的保压力，保压力波动幅度不大于 1%，从而极大地减少了工件在淬火过程中的形变，保证工件的尺寸精度。

高速液压压力机的技术难点在于：

（1）压力机工作时会产生冲击，速度越快，冲击越大。高速压力机由于工作速度很快，会产生极大的冲击，带来巨大的噪声和振动，导致设备本身产生疲劳，降低设备工作的稳定性和元器件的使用寿命，还会影响周边设备的工作，对附近的工作人员造成伤害。因此，需要消除冲击，让压力机工作更平稳。

（2）保压压力波动的幅度与工件的废品率直接相关，压力波动幅度越小，废品率越低。不仅如此，降低保压的压力波动，还可以有效降低生产成本。

目前，合肥合锻智能制造股份有限公司已完成高强钢热冲压成形工艺的开发以及成套生产线的国产化研发制造，研制的高速液压压力机达到了如下性能指标：滑块快降速度大于 1 000 mm/s，工作速度 40 ～ 300 mm/s，回程速度大于 600 ～ 800 mm/s，满足了生产线每分钟 3 ～ 4 冲次的需要，年产能可以达到 100 万冲次 / 年。该液压机采用动态力控制技术、变保压压力技术和变排量节能技术，整体上达到国际先进技术水平，可满足一模 1 ～ 6 件的大批量生产需求，整体技术和生产效率达到国际先进水平，制造成本不超过国际同档次产品的 60%，可完全替代进口。

湖南中大创远数控装备有限公司

汽车驱动桥螺旋锥齿轮绿色制造成套技术与装备的研制

在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，由湖南中大创远数控装备有限公司牵头，联合国内“螺旋锥齿轮制造产业战略联盟”的所有成员单位，组成了课题组，开展了“汽车驱动桥螺旋锥齿轮绿色制造成套技术与装备”课题的研究，以针对国内汽车行业的需求，开发生产驱动桥螺旋锥齿轮的高档装备。课题的主要目标是：

1. 掌握当前国际最先进的螺旋锥齿轮加工工艺和方法，开发具有国际先进水平的螺旋锥齿轮数字化闭环制造专家系统。

2. 开发由铣齿机、齿轮测量中心、新结构切齿刀盘、尖齿条形刀刃磨机和装刀单元组成的用于生产汽车后桥锥齿轮的高效率、高精度成套装备，从而为经济合理地大批量生产乘用车、微型车、轻型卡车、重型卡车、大型客车和工程机械等所需的 3 种规格的数控螺旋锥齿轮提供完整的生产线。

3. 掌握机床设计、制造和综合性能检测等关键技术，形成相关行业标准和具有自主知识产权的成套核心技术。

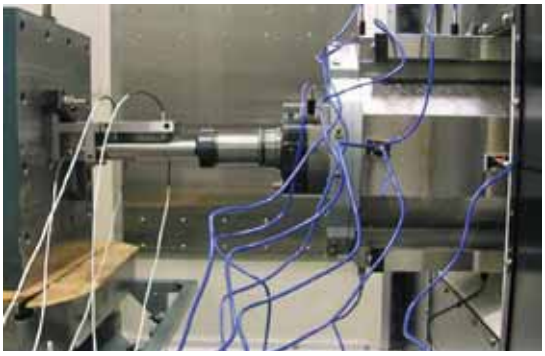
4. 深入开展螺旋锥齿轮干切加工机理的试验研究，形成具有指导意义的用户工艺规范，为汽车螺旋锥齿轮生产用户提供一揽子解决方案。

5. 开发集成上述专家系统、制造装备和用户工艺等的信息化平台，形成完整的汽车驱动桥锥齿轮数字化生产线，主要技术指标、可靠性与精度保持性要达到当前国际先进水平，并在用户生产现场构建示范生产线。

装刀机样机检测

YKA2265 样机调试

YKH2235 样机调试



机床热稳定性测试

6. 为我国培养一批螺旋锥齿轮设计分析、制造检验和应用的技术骨干，提升我国螺旋锥齿轮成套技术与高档装备的制造能力和市场竞争力，满足我国汽车和工程机械行业的高精、高效加工要求，扩大国内市场占有率，积极参与国际市场竞争，为中国装备制造业作出贡献。

课题完成情况

截止到目前，已完成的工作包括：

1. YKA2265 和 YKH2235 数控螺旋锥齿轮铣齿机样机的装配调试与检测，以及这两种机型的试验、制造平台建设；

测量中心

2. 测量中心的装配和调试；

3. 干切机床动态热变形技术的研究；

4. 磨刀机试验台测试平台的研制；

5. 高速高效干切技术及加工工艺的研究；

6. 数控螺旋锥齿轮装刀机零部件的加工和检验，装刀机的装配与调试，装刀机软件的功能检验与调试，装刀机的装刀测试效率、测试精度可信度的论证，确认了装刀机的测试精度，验证了装刀过程与测试结果的关联性。

尚待开展或正在进行中的研究包括：

1. YK2250 数控螺旋锥齿轮铣齿机样机的装配调试与检测，以及试验、制造平台的建设；

2. 针对 YKA2265、YK2250 和 YKH2235 数控螺旋锥齿轮铣齿机样机，开展 2 000 h 以上的模拟实际工况运行试验；

3. 干切加工低温冷风切削技术的研究；

4. 磨刀机磨削工艺的研究；

5. 制造数控螺旋锥齿轮磨刀机；

6. 验证环境温度对装刀机测试的影响，建立温度补偿数据库；

7. 试制典型规格的尖齿条形刀齿新结构刀盘；

8. 将试制刀具送达试切现场，进行试切准备；

9. 试切典型的尖齿条形刀齿新结构刀盘；

10. 螺旋锥齿轮干切加工机理的深入研究及总结；

11. 开发完整的专家系统模块以及对专家系统进行考核验证。

总之，课题已取得阶段性成果，研制出螺旋锥齿轮装刀机样机，开发了一套专用软件。同时，课题专家系统各系模块已全部完成，正在调试测量中心样机；螺旋锥齿轮铣齿装备已完成设计，正在进行样机测试；新型结构刀盘正在试制中。随着课题关键技术难题的逐一攻克，预计 2018 年底，即可在用户单位建成示范生产线。

目前，本课题各执行单位在螺旋锥齿轮绿色闭环制造领域均取得了突破性进展，不仅为汽车驱动桥螺旋锥齿轮的成套绿色制造技术在国内的推广应用奠定了基础，还积累了丰富的经验，提升了市场竞争力。

本课题目前已获得授权专利 8 项。根据目前对 YKA2265 和 YKH2235 铣齿机以及装刀单元（装刀机 YK9860、检刀仪 CB40）样机的测试结果，表明本课题重点研究的螺旋锥齿轮干切机床及干切技术已达到国际先进水平。

凭借本课题对关键技术的突破与积累，湖南中大创远数控装备有限公司奠定了其在螺旋锥齿轮技术领域、尤其在螺旋锥齿轮干切加工领域的国内领头羊地位，研制的干切机床已畅销国内，机床的功能、精度和效率完全可与国外最先进的螺旋锥齿轮干切机（克林贝格 C50）相媲美。

课题实施中存在的问题

在课题实施过程中，主要存在以下问题：

1. 与子课题单位在双方责任约束、知识产权约定及经费拨放等条款中存在严重分歧，最后在专项办的协调下才确定合作条款，致使 YKA2250 铣齿机及磨刀机的研制严重滞后。

2. 本课题研究的关键核心技术借鉴资料很少，在螺旋锥齿轮技术领域，国外技术封锁严重，很多技术需要反复研究、试验，花费了很多时间与精力。

湖南大学

汽车曲轴加工柔性、敏捷、高效、精密、自动化生产线示范工程

文 / 郭力　刘坚

课题完成情况概述

由天润曲轴股份有限公司牵头，沈阳机床成套设备有限责任公司、北京第二机床厂有限公司和湖南大学共同参与的“汽车曲轴加工柔性、敏捷、高效、精密、自动化生产线示范工程”课题，于 2017 年 12 月 6 日在山东天润曲轴股份有限公司圆满通过了结题验收。本课题结合 3L 汽车发动机曲轴自动化生产线的国产化开发要求，在课题参与人员的不懈努力下，攻克了一系列高精、高效加工曲轴的关键装备技术，并将它们集成应用于本课题的曲轴精加工生产线中，形成了汽车曲轴加工柔性自动生产线示范工程，提升了我国汽车成套装备自主制造能力与制造水平，推进了高档汽车发动机国产化的进程。

具体而言，课题圆满地完成了以下研究内容：

1. 根据曲轴多品种批量生产的特点，优化设计了汽车发动机曲轴零件的加工工艺以及整线设备的规划布置，实现了提高整线柔性化生产的目标。

2. 以新材料、新结构和新技术为切入点，提升了国产曲轴精加工设备的性能，优化了工艺匹配性，提高了生产线的设备工艺能力水平和数控化率，提高了整线的可靠性。

3. 研究开发了曲轴加工自动化生产线的核心技术和设备，提升了我国汽车成套装备自主制造能力与制造水平；

4. 实现了生产线的功能模块化、加工柔性化、操作自动化和控制智能化，总体技术达到了国际同类加工生产线的先进水平。

总之，通过课题研究，取得了一系列重大研究成果，开发出了一系列关键技术。这些研究成果不仅可在机械装备和汽车等离散制造行业的生产线规划、设计和优化中得到应用和推广，为企业投资生产线提供重要的决策支持；而且可为各机床设计制造企业及物流装备企业提供重要的技术支持。

研究成果具体如下：

1. 开发了基于 Plant-Simulation 仿真平台的曲轴生产线物流仿真模型，开展了协同仿真及分析研究。

2. 开展了曲轴示范生产线生产效率灵敏度仿真分析和瓶颈仿真分析，提出了优化方案。

3. 突破了质量定心机技术。

4. 突破了数控曲轴内铣机床关键技术并进行了改进。

课题开发的数控曲轴磨床

5. 实施了OP30、OP40和OP60 SUC8117j型曲轴双刀架主轴颈数控机床智能配置应用及软件开发。

6. 针对SUC8149型曲轴油孔加工数控机床，开发了曲轴油孔倒角插补铣削技术，进一步将MQL技术应用到曲轴油孔加工中。

7. 结合曲轴材料，研究并优化了曲轴的高速、高效磨削工艺。

8. 开发了以“数控随动精密高效磨削”为核心的多轴联动非圆超高速磨削工艺技术。

9. 开发了关键工序在线质量检测与误差补偿技术。

10. 开发了高速主轴颈/连杆颈数控磨床设计制造技术与工艺系统。

11. 开发了超高速数控止推面磨床设计制造技术与工艺系统。

12. 开发了数控曲轴多砂带整体超精密抛光工艺技术。

13. 开发了曲轴轴颈高效精密加工的高速（线速度120 m/s）磨削技术。

14. 开发了曲轴加工高速砂轮精密修整技术。

15. 开发了高速、超高速磨削条件下工件可控冷却技术。

16. 开发了大负荷、高刚性、高响应和高速静压支撑技术。

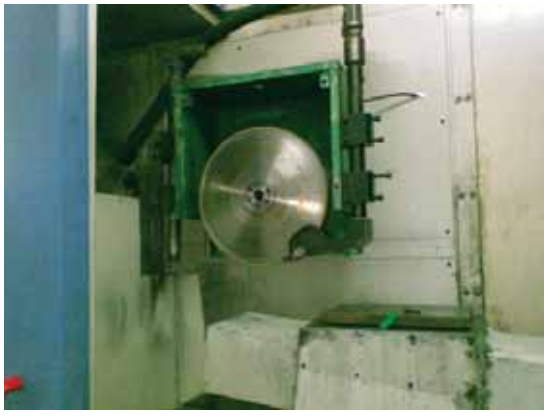
17. 实现了自动去重平衡机的升级改进。

通过课题研究，培养了多名研发人才和研究生，取得了多项知识产权，发表了多篇学术论文。

曲轴材料平面高速磨削试验

为了提高曲轴磨削加工效率，湖南大学开展了曲轴材料QT700-2平面高速高效磨削工艺试验，为北京第二机床厂有限公司开发高速曲轴随动磨床提供了曲轴磨削工艺技术支持。

要提高曲轴磨削效率，就需要提高磨削砂轮的线速度，加大磨削切深，减少磨削进



湖南大学的高速磨削试验台

给次数。也就是说，曲轴磨削采用“粗磨加精磨、最后再光磨”的3道工序完成，极大地缩短了磨削加工时间，提高了磨削效率。在粗磨阶段，选择原则是高的砂轮线速度和大切深；在精磨阶段，选择原则是适当的砂轮线速度和微小的切深，保证表面质量。此外，还研究了采用同一个砂轮进行粗、精磨削，以节省时间，提高效率。

依托湖南大学国家高效磨削工程技术中心的314 m/s超高速磨削试验台，本课题对曲轴QT700-2材料进行了高速高效平面磨削工艺试验。采用不同的磨削参数和砂轮，通过单因素试验法进行了平面磨削，研究了曲轴QT700-2材料在超高速磨削下的磨削力变化趋势和影响因素、磨削表面形貌、磨削表面粗糙度变化及特点，从而探讨了各磨削用量对曲轴材料磨削试件的加工效率和加工质量所带来的影响，并据此来优化曲轴材料磨削加工工艺。

试验采用Kistler 9257BA测力仪来测量磨削力，采用402MVA自动转塔显微维氏硬度计来测量表面硬度，采用超景深三维显微系统来对砂轮表面形貌和磨削后的材料表面形貌进行观测，采用JB-4C精密粗糙度测试仪来测量表面粗糙度。

通过试验，对汽车曲轴材料QT700-2粗磨时的磨削力、磨削力比和比磨削能、最大未变形切削深度等进行了研究，详细分析了磨削用量对磨削力、比磨削能等的影响，同时研究了曲轴材料磨除率、磨削力变化规律与最大未变形切屑厚度的关系。

随着砂轮线速度的增大，磨削力呈下降趋势。起初，随着砂轮线速度的增大，磨削力比呈上升趋势，当砂轮线速度达到140 m/s的超高速时，磨削力比有下降的趋势。

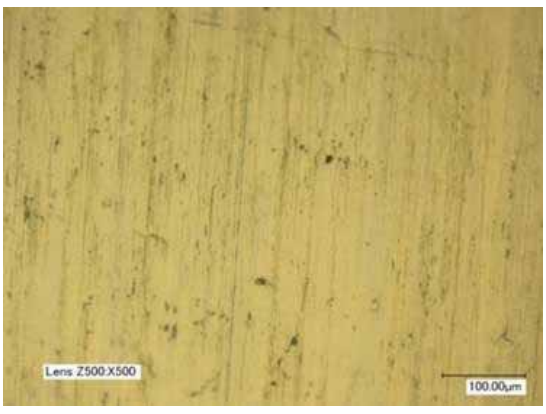
随着工件工作台速度的提升，磨削力有不同程度的增加，磨削力比变化较小。

在砂轮线速度一定时，改变磨削深度的大小，不同工作台速度条件下曲轴材料的磨削力有着不同程度的增大。在砂轮速度一定，不同的工作台速度下，随着磨削深度的增大，磨削力比呈下降趋势。

曲轴材料高速磨削工艺参数优选

结合曲轴磨削加工的要求，对曲轴球墨铸铁QT700-2材料工件使用的CBN砂轮进行了高速磨削参数的优选试验。在粗磨试验阶段，主要从材料磨除率、磨削力和比磨削能角度考虑，来提高磨削效率；在精磨试验阶段，主要从表面粗糙度和表面形貌的角度考虑，来保证工件磨削的加工质量。

粗磨阶段采用进口Winter1 CBN砂轮对曲轴材料QT700-2进行磨削，在此过程中，提高磨床工作台的进给速度以及增大磨削深度，都会导致磨削力的增加，而提高砂轮转速反而导致磨削力的减小。随着工作台速度和磨削深度的增加，比磨除率增大，提高了



磨削后的工件表面形貌

磨削效率。经综合考虑，决定砂轮参数选择超高速、较大的磨削深度和较高的工作台进给速度。

精磨阶段采用进口 Winter2 CBN 砂轮和国产 ZKS CBN 砂轮来磨削 QT700-2 曲轴材料，获得了较好的表面粗糙度和表面完整性，而且砂轮高速时获得的工件磨削表面质量要好于砂轮转速较低时。综合考虑，决定砂轮参数选择高速、微小的磨削深度和适中的工作台进给速度。

例如，使用一组粗、精磨配合参数磨削，其中，粗磨砂轮速度 160 m/s，切深 0.25 mm，工件速度 2 m/min；精磨砂轮速度 60 m/s，切深 0.015 mm，工件速度 1 m/min。粗磨采用 Winter1 砂轮，精磨采用国产 ZKS3 砂轮，磨削表面粗糙度值为 0.25 μ m，磨削工件表面完整性好，很好地满足了要求。

通过多组磨削试验分析，推荐曲轴材料 QT700-2 平面磨削优选参数是：粗磨阶段，砂轮线速度 120 ～ 160 m/s，工件工作台速度 2 ～ 2.5 m/min，磨削深度 0.2 ～ 0.25 mm，以此来提高曲轴磨削材料的磨除率；精磨阶段，砂轮线速度 60 ～ 100 m/s，工作台速度 1 ～ 1.5 m/min，磨削切深可选择 0.01 mm、0.015 mm 或 0.02 mm 的微小切深，以此可获得良好的表面质量。由此，为合理的曲轴高速高效磨削工艺打下了基础。

国机铸锻机械有限公司
济南铸造锻压机械研究所有限公司

铸件砂型近净成形成套装备的研究及应用

文 / 姚继成　李琛

在机械装备中，铸件占整机重量的比例很高，比如，在内燃机中占 80%，在拖拉机中占 50% ～ 80%，在液压和泵类机械中占 50% ～ 60%。通常，汽车发动机中的缸体、缸盖、曲轴、缸套、活塞、进气管和排气管等，几乎全部铸造而成。随着汽车制造技术的不断进步，对铸件毛坯的质量要求也日益提高，这些铸件毛坯的质量将直接影响到汽车的性能。因此，近年来，近净成形技术开始在国际铸造行业盛行，该技术可使铸件壁厚最薄达 3 mm 以下，重量可减轻 5% ～ 20%，同时还极大地提高了铸件的尺寸精度，实现了绿色铸造、清洁生产。

为紧跟国际技术的发展步伐，在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，济南铸造锻压机械研究所有限公司牵头承担了“铸件砂型近净成形成套装备”课题，为我国汽车行业开发急需的铸件生产关键近净成形成套装备。该课题的主要研究内容包括：研发汽车发动机缸体静压自动造型

在新乡美斯威精密机器有限公司得到示范应用的铸件砂型近净成形成套装备

钳体

支架

箱体

转向节

排气管

泵体

生产线、水平分型脱箱自动造型线和汽车缸体铸件生产用制芯中心。

围绕静压造型紧实技术、型砂精确定量技术、双面模板脱箱造型技术、模板自动更换技术、冷芯盒制芯技术以及机器人组芯技术、计算机监控技术、设备远程诊断与控制、自动浇注技术等，课题组开展了深入研究，在关键技术和核心技术上实现了突破，同时建立了创新平台和示范基地，具体表现在：

1. 汲取国内外静压造型机的成功经验，对静压造型进行了研究，自主创新完成了砂箱内尺寸 1 000 mm × 800 mm × 320/320 mm 的静压自动造型机总体设计方案，突破了德国、日本等少数发达国家在该领域的技术封锁和价格垄断，满足了我国汽车、航空航天、核电和船舶等重点行业对铸件的应用需求，实现了铸件近净、高效、精密、智能化的国产化生产目标，提升了我国基础制造装备的自主开发能力。

2. 攻克了静压造型线设计、制造和控制等技术难题，包括：静压造型紧实技术、型砂精确定量技术、模板自动更换技术、计算机监控技术、设备远程诊断与控制、自动浇注技术、关键件加工工艺技术、装配技术、调试技术和系统可靠性技术等，使本课题

飞轮

制动器

1 000 mm × 800 mm 规格的造型线整体达到了国际先进水平。其中，静压造型紧实技术系国内首次在造型主机上开发、应用的新技术，主要包括大流量快速启闭吹气阀和快速同步运行的多触头压头；型砂精确定量技术，令造型机定量斗定量精度达到 3%；双面模板脱箱造型技术，令合型精度≤ 0.3 mm，生产率达到目前国外同类产品的 240 箱 / 小时的水平；模板自动更换技术，实现了在线状态下的不停机自动更换模板，确保了全线运行参数的柔性管理。

3. 在无箱造型线技术领域，攻克了双面模板脱箱造型技术。通过调查研究，确定了水平脱箱自动造型线由主、辅机和自动浇注机组成，造型方式采用技术先进的垂直射砂、两侧压实的紧实工艺，采用大动力液压挤压压实，以及水平回程起模、合型、浇注和机外下芯等方式。完成了水平脱箱自动造型线总体设计方案，对双面模板脱箱造型关键技

术进行了详尽的研究，取得了创新性成果。

4. 在制芯中心技术领域，攻克了冷芯盒制芯技术、机器人组芯技术。通过调查研究，确定了制芯中心的技术方案：制芯中心由冷芯盒射芯机、锁芯机、组芯机器人及混砂机等构成。冷芯盒射芯机主要生产单体芯，锁芯机完成自动锁芯，组芯机器人完成砂芯的搬运、浸涂和组芯功能。

在新乡美斯威精密机器有限公司得到示范应用的铸件砂型近净成形成套装备

5. 建设了静压造型线创新能力平台：建立了完善的有箱线、无箱线和制芯专业的静压造型线研发体系，培养了从事造型装备及工艺开发的人才队伍。建成了静压造型线设计、试验平台和研发制造基地，为研发更高水平的静压造型线储备了技术。

6. 建立了我国静压造型线制造基地和应用示范工程，目前已形成年产 8 套近净成型成套装备的产业化生产能力，可为我国铸造行业造型、制芯设备及工艺研发提供全方位的优质高效服务，为我国静压造型线成套设备与工艺研发奠定了基础。

目前，课题成果已在新乡美斯威精密机器有限公司得到了示范应用，并建成了静压造型自动生产线应用示范基地。该生产线具备年产 4 万吨汽车转向节、制动器、排气管、泵体、发动机缸体和箱体等汽车部件的生产能力。

在课题实施过程中，济南铸造锻压机械研究所有限公司应用本课题的科研成果，开发出了整个系列的静压自动造型线产品（砂箱尺寸从 1 000 mm × 8 00 mm ～ 1 850 mm × 1 250 mm），并在 20 多家用户单位开展了示范应用；制造了静压自动造型线配套的 1 500 kg 全自动浇注机、500 kg 主 - 从随动式缸体铸件搬运机械手等全套设备样机，并投入实际生产。到目前为止，静压造型线已推广应用 6 条，在国内高端用户市场达到了 50% 以上的占有率，在实际应用中累计创造产值 2.46 亿元。此外，配套德国 HWS 造型机的静压造型线也已推广应用了 6 条。2018 年一季度，再次签订了 6 条静压造型生产线订单。

本课题的成功实施，提升了我国近净成型成套装备的制造能力和水平，打破了国外厂家在该技术领域的垄断，使我国成为世界上继德国之后少数掌握这一绿色铸造技术的国家之一，为汽车行业对精密铸件的需求提供了关键装备。课题成果极大地提高了我国现有静压造型线和水平分型脱箱自动造型线的技术水平、可靠性和稳定性，为替代进口，打造自主品牌做出了应有的贡献。

该课题获授权专利 37 项，其中发明专利 5 项，形成国家标准 2 项，行业标准 4 项，企业规范 1 项，发表论文 6 篇。

一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂

锡柴重型柴油发动机缸体、缸盖柔性加工生产线示范工程

在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（以下简称“04 专项”）的支持下，一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂牵头，联合大连华根机械有限公司、同济大学、大连理工大学和大连新宇科技开发有限公司一起，共同承担了“锡柴重型柴油发动机缸体、缸盖柔性加工生产线示范工程”课题。该课题的主要目标是，建设基于国产高档数控机床的重型柴油发动机缸体、缸盖柔性加工生产示范线，对 04 专项成果——精密加工中心以及共性技术等进行集成性批量示范应用与验证，以此掌握并完善重型柴油发动机缸体、缸盖的加工工艺及关键制造技术，提高国产装备的应用率、可靠性和精度保持性，降低制造成本，提升我国汽车工业的自主化设计和制造能力。

通过对重型柴油机缸体、缸盖加工工艺、生产线的设计与制造、生产线数字化建模与仿真、刀具应用和管理，以及生产线的管理和控制、机床的精度保持性和可靠性等各项技术的研究，一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂建成了年产 5 万台的锡柴重型柴油机缸体、缸盖生产线，这是首次以国产设备为主、进口设备为辅自主集成的可以保证关键工序的全自动生产线。

缸体生产线

缸盖生产线

通过课题实施，共形成了 8 项发明专利、2 项软件著作权和 6 项企业标准，并提交了 41 篇技术论文及相关研究报告。该生产线植入了国际流行的节能环保等先进制造理念，对国产设备进行了创新设计，并应用了最新的制造技术和科技成果，因而技术难度大，无论对一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂而言，还是对国内的设备制造厂而言，都是一次考验。

最新制造技术和科技成果的应用

1. 应用先进制造技术，打造全自动柔性生产线

通过对国产高档数控机床进行自主集成，采用专机、专机自动线对缸体缸孔、缸盖螺栓孔等进行组合加工，提高了生产效率，保证了加工质量。与此同时，采用加工中心及三坐标单元完成其余的加工内容。由此形成的生产线，具备较高的柔性，形成了“敏捷柔性制造单元 + 专机”的全自动生产线。

该生产线采用桁架机械手结合 PZR 动力滚道实现自动输送，缸体、缸盖加工工艺先进可靠。通过对缸体主凸轮孔、缸盖油嘴孔和底面等关键难点精加工工艺进行研究攻关，采用线镗工艺、高复合刀具技术等，成功地解决了一系列工艺难题，确保了零件加工质量的稳定性，满足了产品设计要求。

2. 应用全过程质量控制技术，保障生产质量

该生产线采用线内测量（机床上配置

桁架机械手

刀具监控系统

在线监测系统

设备外防护

设备内防护

切削液集中处理系统

的测量装置，自动检测工位）、线外检测台、三坐标检测机和 SPC 检测站的组合方式来获取质量数据，针对关键工序，实时监控、自动在线反馈补偿，确保了加工质量的稳定性。同时，应用 SPC 统计技术，结合人、机、料、法、环和测等过程信息，分析变化趋势，有效预控，质量控制水平高。

该生产线采用 SANTEC 刀具监控系统，并首次将其用于国产柴油机气缸盖主油道孔的加工枪钻机床上，实现了对机床、刀具及加工状态（无刀、刀具磨损和刀具断裂）的实时监控，提高了加工效率和加工质量，避免了故障的出现并减少了损失。

3. 应用节能环保技术，实现绿色制造

该生产线采用全封闭加工模式，首次实现了“全防护”在国产设备上的大批量应用，形成企业标准《外购机加工设备安全防护系统通用技术条件》和《汽车发动机缸体、缸盖加工机床防护通用技术条件》，满足了安全、环保、密封及外形整齐美观的防护要求，为国产机加设备的制造提供了参考。

该生产线采用切削液集中处理和供给，上排上供，做到了对切削液的循环利用，每台设备顶部布置吸雾管路，集中过滤处理后向外排放，实现了绿色环保而经济的生产。

4. 应用先进装备技术，提升国产高档数控装备水平

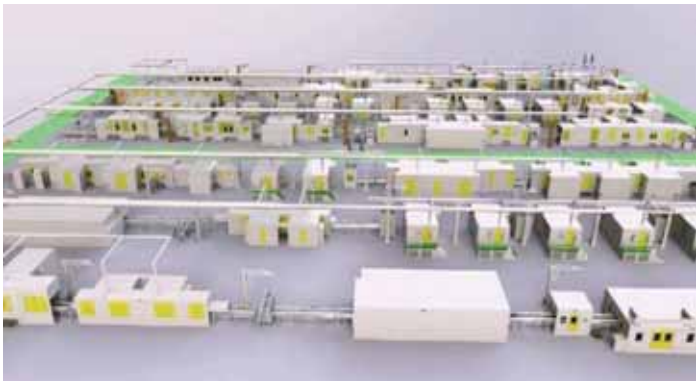
该生产线应用了大连华根机械有限公司的 04 专项成果——MDH80 精密加工中心和 HDL63 三坐标加工中心单元，并对原有机床参数和配置进行了改进，使其更适合于连线加工，提高了精度保持性。

针对 MDH80 精密加工中心，主要从以下几个方面进行了提升：

（1）*X*、*Y*、*Z* 三个坐标导轨采用了高刚

集中吸雾系统

MDH80 加工中心



生产线三维模型

性的直线滚动导轨，快速移动速度由原来的 36 m/min 提升至 45 m/min，在高刚性加工中心中，这一参数处于国内领先水平及国际先进水平。

（2）在对伺服驱动技术进行优化改进方面，通过增加快速移动程序块叠加功能，令单机加工节拍提升了 10%。

（3）选用最高转速为 8 000 r/min 的机床主轴。对设备主轴运行状态进行监控，在保证质量的情况下，可实现电主轴的预见性维修。

（4）机床 *X*、*Y*、*Z* 轴增加了精度 0.003 的光栅尺，实现了全闭环控制。

（5）回原位功能。特殊的刀具停在工件内，采用特定的回原位方式，不同长度的刀具采用不同的回原位轨迹，各轴按顺序安全回原位，简化操作，保障安全。

（6）检测件和报废件设置功能。通过设置诸如检测频次等，来确定检测件和报废件，使之自动流至相应出口，实现自动生产。

5. 应用数字化建模及仿真技术，提升生产线规划水平

在该生产线的设计过程中，利用 Plant Simulation 工具，构建整线数字化模型，对生产线的性能进行具体的分析及优化，如缓存区优化、物流优化等。利用 FactoryCAD 工具，进行生产线三维建模仿真及合理的布局设计，构造虚拟生产环境。通过数字化建模及仿真，优化了整线布局，获取了较优的节拍产量与成本支出等性能参数，使生产线规划更贴近实际、更合理，同时形成了相应的工艺知识库，为其他类似工艺规划奠定了基础，有效地提升了生产线的规划水平。

6. 开发刀具、机床相关管控系统，提升生产管控能力

开发的“刀具全生命周期管控系统”，以网络化、电子化和模块化管理为手段，实现了立体库帐、卡、物数据的实时更新，刀具库存预警，刀具技术参数的存储与自动传输，以及刀具管理报表的自动编制。通过程序的自动化运行，大大提升了刀具库存管理、采购管理、刀具技术文件管理及使用等方面的工作水平和效率。

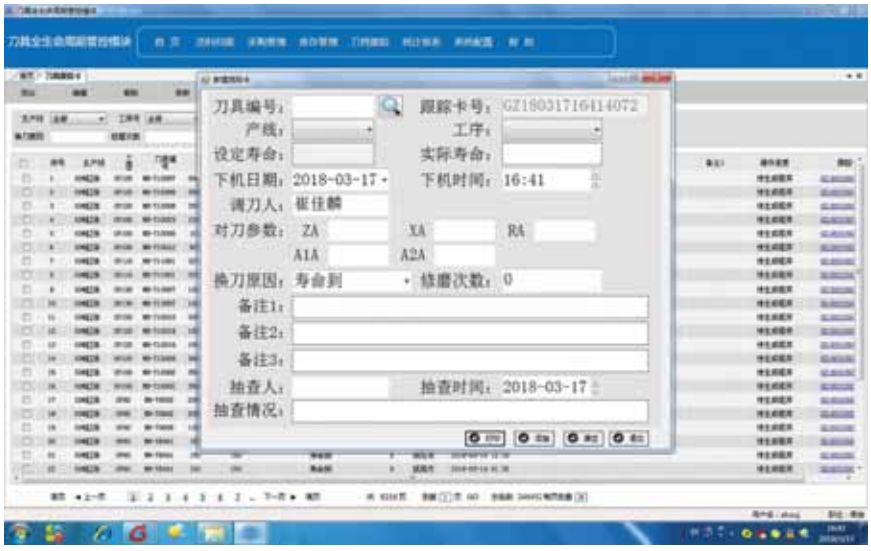
开发的“数控机床状态监控与刀具破损预警系统”，实现了各类自动化设备、各类数控系统之间的互联互通，实现了设备状态远程监控以及控制程序的远程传输管理。可建立 Intranet 物联网络，或基于 3G/4G 的无线远程五联网络，在批量生产环境下，实现刀具破损状态辨识与预警，实现国外进口同类产品的替代。

主要技术突破

1. 缸体、缸盖零件先进制造工艺技术

（1）缸盖座圈孔柔性加工技术：突破了发动机缸盖座圈传统加工方法，克服了现有技术的不足，凭借独特设计和非凡功能，实现了缸盖座圈孔的柔性加工，开创了国内重型发动机缸盖座圈加工新工艺，形成了专利的“同型号发生头加工进排气门座圈锥面”方法，提升了自主品牌发动机缸盖座圈加工的技术水平。

（2）刀具磨损补偿技术：随着加工系统自动化程度的提高，在加工过程中用于刀具磨损的补偿技术就显得格外重要。通过用自动检测系统取代人工观察来实现对刀具磨损的补偿，将由人为因素导致的故障停机时间较少了 75%，有效提高了生产效率。



刀具全生命周期管控系统

数控机床状态监控与刀具破损预警系统

（3）过程质量控制技术：生产线利用现代控制技术和测量技术，结合统计学原理，进行趋势分析，如预防不合格品产生的防错技术、控制关键工序质量的在线主动测量及补偿技术和 PC 统计分析技术等，实现了对不良产品的早期预警，便于过程能力的提升，保证了产品质量。

2. 生产线关键设计技术

（1）安全技术：

自动线主控制回路采用国际先进的双通道冗余回路设计，整个安全控制回路具备回路自检功能，保证人身安全，安全等级可达到 4 级。

（2）机床温度控制及热变形补偿技术：采用高精度、高刚度的滚珠丝杠及导轨，应用高精度闭环控制光栅尺及丝杠中空内冷技术，解决了传动系统部件的热变形补偿问题；参考国外先进结构及设计理念，解决了精密加工中心基础件的温度控制问题。

（3）精密回转工作台设计技术：通过对精密回转工作台的定位机构、拉紧机构等关键技术进行研究，形成了具有自主知识产权的（专利“对中机构”和“对中定位装置”）、达到国际先进水平的精密回转工作台系列产品。

（4）面向重型物料的敏捷物流技术：滚道物流输送系统，采用无碰撞输送方式，通过料位开关和制动电机控制工件的运动停止，从而达到快速、准确、无碰撞的输送效果；通过对桁架机械手的研究，采用双机械手上下料，保证自动线加工过程的连续完整，有效缓解了节拍压力。

3. 机床精度保持性和可靠性技术

（1）铣削颤振稳定性分析技术：通过绘制稳定性叶瓣图来直观表达稳定性的切削极限，形成专利的“一种平面切削过程的颤振稳定域建模方法”，以叶瓣图作为参考选择和优化切削参数，避免了加工过程中颤振的发生，延长了刀具使用寿命，获得了加工精度比较高的表面质量和机床精度保持性。

（2）机床可靠性分析技术：采用参数估计、模型检验和可靠性评价等方法，建立加工中心的可靠性评价体系，改善薄弱环节。形成了专利的“一种提高卧式加工中心可靠性的设计方法”，可利用旧批次的数据，来改进设计新批次加工中心的可靠性，更加贴合实际，有效提升了设备的可靠性。

应用情况及行业意义

锡柴重型柴油机缸体、缸盖柔性加工生产线设备主要采用了大连华根机械有限公司的 04 专项成果，包括精密加工中心和加工单元共计 23 台，且大量应用了国产功能部件和刀具，关键功能部件的国产化配套率达 56% 以上，刀具的国产化配套率达 57.8%，满足了多品种、多批量的轮番生产。

采用先进的自动连线技术和控制技术，主要工序能力指数 Cmk ≥ 1.33，生产线设备利用率≥ 85%。通过对机床精度可靠性和稳定性技术、刀具管理技术等关键技术的研究，提升了国产机床的性能。

基于该生产示范线，结合项目经验，大连华根机械有限公司通过进一步改进设计，成功地为大柴道依茨公司设计了两条发动机缸体、缸盖加工自动生产线，以及为重庆长安汽车公司设计了一条汽车发动机缸体、缸盖加工自动线。这些自动生产线以组合机床和 MDH80 高档卧式加工中心为核心，配以助力机械手和桁架机械手上下料，丰富了自动生产线的种类，提高了生产能力，成功实现了自动线的产业化推广。

一汽无锡油泵油嘴研究所
上海大学机电工程与自动化学院

基于加工过程在线监测的刀具柔性管理技术研究

文 / 宋国民　孙俊杰　吴欲龙　王永国

“中国制造 2025”提出，坚持“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，并通过“三步走”来逐步实现制造强国的战略目标，其五大工程之一就是智能制造，智能制造也是我国进入制造强国阵营最主要及有效的手段之一。

为推进智能制造，必须显著提高制造业重点领域的智能化水平，以达到企业运营成本下降、产品生产周期缩短和不良品率降低等目标。因此，智能制造的实施主体及原动力必须是企业自身，核心是有利于提升企业经营管理水平，支撑企业利润的增长。

在通常的机械制造过程中，刀具采购成本约占制造成本的 2% ～ 4%，却直接影响了占制造成本约 20% 的机床费用和 40% 的人工费用。因此，在制造过程中对刀具进行科学管控，能有效提升企业的经营水平，而且刀具与制造成本及产品质量息息相关。本文主要介绍在保证产品质量的前提下，结合加工过程，通过在线监测来研究刀具的柔性管理技术。

加工过程的在线监测原理

针对机械加工类的制造过程，刀具是影响成本和质量的核心控制点，通常的衡量指标包括寿命和耐用度。刀具寿命是指新刀具从投入切削起，直到报废为止的切削时间总和；而刀具耐用度是指刀具从开始切削到磨损失效所用的时间，其中发生的停机时间不计算在内。对于可刃磨的刀具，理论上刀具寿命等于所有耐用度之和，实际预测刀具寿命通常是指刀具耐用度。

企业在生产操作时可通过设定被加工件的频次来管理刀具寿命，这也是最常规的刀具管理及控制方法。显然，这种订制化的刀具管理策略的前提是，刀具及被加工零部件的材料性能一致、设备状态保持一致。为确保产品质量，采

用这种方式时，通常会设定偏于保守的刀具寿命。但实际情况要复杂得多，常常出现的情况是，有些仍满足生产使用要求的刀具被强制更换，或者在极端情况下，由于刀具自身或被加工件状态的差异，会出现尚未达到规定使用频次（预期寿命）就出现刀具严重磨损的情况，从而影响产品质量。可见，这种相对固定的刀具管理策略不能适应实际复杂多变的加工过程需求，难以同时兼顾质量和成本要求。

基于上述情况，在研究生产工艺的基础上，通过在线采集并分析监测数据，实现了对加工刀具的柔性管理，从而从企业实际经营的角度，在确保产品质量的基础上，降低了刀具的使用成本，提高了工作效率。基本思路是：

首先，在实际加工状态下，对多种因素影响的重复加工进行在线监测；

其次，根据采集的工艺数据，通过大数据分析，提取关键特性量，建立刀具磨损模型，设定刀具管控的限值；

最后，建立基于刀具耐用度的大数据分析应用平台，当关键特征量达到限值时会自动预警，从而实现“一刀一寿命”的柔性控制终极目标，其基本原理框图如图 1 所示。

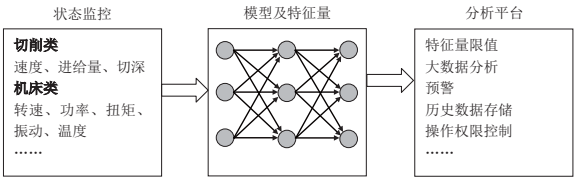


图 1　加工过程在线监测平台示意图

加工过程在线监测及数据处理

刀具工作状态监控可采用间接测量的方法来实现，常用的测量物理量有很多种，例如切削力、声发射（Acoustic Emission）、温度、主轴电机负荷和进给电机负荷等。刀具加工过程在线监控的核心是智能传感器技术，传感器把刀具切削过程的物理量转换为电信号，要求采集到的电信号必须能够如实准确地反映切削过程中刀具的实时状态信息。此外，由于传感器与机床配套使用，因此，传感器在具备在线检测功能的同时，还要确保其使用和安装简单易行，且具有较强的抗干扰能力。

目前，采用传统的单一传感器很难准确地检测刀具的切削状态，因此，多传感器融合发展是必由之路。同时，必须结合大数据分析技术，为现场决策提供依据。不仅如此，多传感器信号处理必须具备融合和自学习能力，以满足复杂多变的制造要求，并与智能制造技术紧密结合，这是未来传感和数据分析的重要发展趋势。

综上所述，实现加工过程的在线监测，其核心是数据获取和采集。以上所

述的多种测量技术，由于各种物理量相对独立，因此，为了安装特定的传感器，需要对设备、刀具或刀柄进行订制改造，这导致了技术难度和成本都相对较高，且机床改造后易影响性能。随着机床数控化技术的发展，针对 CNC 加工设备，数控系统已获取了机床的相关控制参数，可直接利用通信方法实时获取机床的参数，从而大大降低了数据获取的成本，且对加工设备无任何影响，有利于现场推广和实施。

机床在加工零部件的过程中，主轴动力参数是切削过程的综合性能指标，直接反映出切削负荷的变化，从而反映出刀具的磨损和过程状态，这在批量生产的重复加工过程中表现得尤为明显。在采用同一加工工序加工相同的零件时，驱动轴动力参数随时间的变化，能直接反应出刀具的切削状态。因此，该指标综合反映了刀具切削过程的状态变化。针对 CNC 设备，可利用标准的 PROFIBUS 通信协议与数控系统 MPI（Multi Point Interface）接口通信，读取数控系统的实时状态参数，常规的 CNC 机床获取数据的通信原理如图 2 所示。

下面，以电控高压燃油喷射系统共轨管的实际加工为例，来对机床的在线监测过程进行介绍。

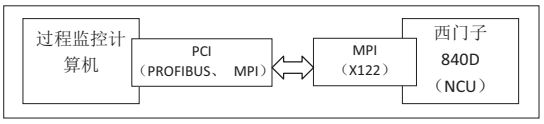


图 2　CNC 机床获数据的通信原理

共轨管管体的加工工艺涉及定位孔、安装孔和定位面的加工以及枪钻中孔等 10 多道工序。利用 MPI 通信技术，实现对巨浪加工中心数控系统内状态参数的在线获取，实时采集机床主轴的电压和电流，并通过电压及电流计算瞬时功率，其中设定的采样间隔为 0.1s，图 3 所示是共轨管管体某次加工过程的主轴功率曲线。

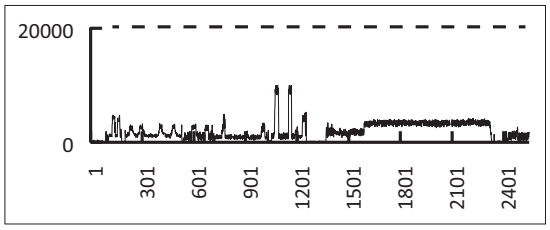


图 3　加工过程监测的功率曲线

从图 3 的测量结果，可以清楚地看出加工过程中主轴功率的实际变化情况，它直观地反映了工序过程的瞬时功率变化，并能够与刀具的切削过程一一对应。因此，测量结果可直接用于后续的数据分析、工艺优化及过程控制。由于功率可通过转速而转换为瞬时扭矩，因此，在分析中仅以功率作为参数。另外，由于研究的内容主要是针对切削过程，因此在数据处理时，忽略了机床启动、加速和制动状态引起的瞬态扭矩尖峰。

针对共轨管管体的加工所涉及的 10 多道工序，由于枪钻中孔花费的加工时间和刀具耗损较多，且枪钻刀具价值较高，因此，对枪钻中孔的加工工序进行

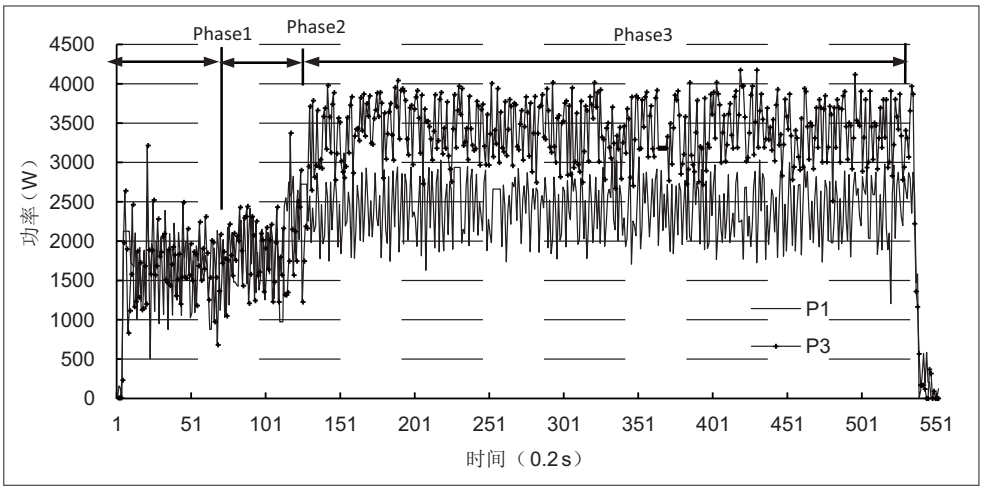


图 4　枪钻中孔工序的功率曲线

了单独研究。图 4 所示是两次枪钻中孔工序的功率测量结果，其中，曲线 P1 是新换刀时的测量结果，P3 是加工了数个工件后的测量结果。

从图 4 的测量结果可见，刀具在经过一段时间的使用后，主轴的功率有所增加。由于是针对同一批次的零部件，且工艺参数未发生改变，因此，这种变化主要是由刀具的磨损而引起的。从实际监控的数据可以发现刀具变化所引起的主轴功率变化情况。通过对实际数据的分析，在保证质量的前提下，经试验后确定了加工质量恶化时的主轴功率，并以此作为限值设定的基础，在实际监控时给出预警和提示动作，从而实现了对刀具的柔性管理。

为进一步分析功率曲线和刀具耗损之间的关系，根据该实际的工序过程，枪钻工序共分为 3 个阶段：Phase1 为导向孔，持续时间 15.5 s；Phase2 为慢速加工，持续时间 9 s；Phase3 为快速加工过程，持续时间 82 s。针对这 3 个不同阶段，对 P1 和 P3 时刻采集到的功率数据进行统计分析，两个时刻的主轴平均功率如图 5 所示。

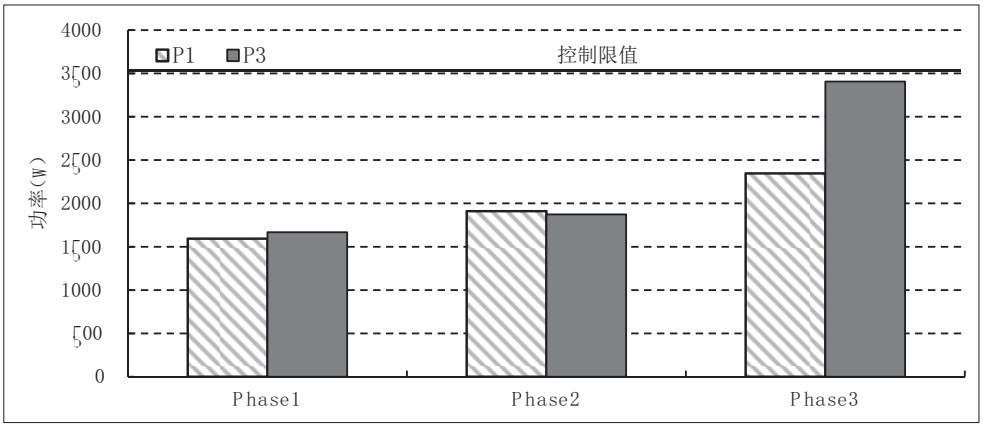


图 5　枪钻中孔不同阶段的主轴功率对比

从图 5 可见，P1 和 P3 这两个时刻 Phase1、Phase2 和 Phase3 的主轴功率变化分别为 4.69%、-1.96% 和 45.18%。其中，Phase1 和 Phase2 为枪钻中孔的准备工序，功率消耗较少，而 P1 和 P3 两个时刻变化不大。Phase3 为快速加工过程，也是主要的枪钻切削加工，是主要的动力消耗阶段，且经过多次重复加工后，由于刀具的磨损和变化，主轴功率增加较多。

根据以上实际加工零部件的质量和工艺时间参数，设定 Phase3 阶段功率增加的限值，当达到限值时执行换刀程序，若没有达到限值，则继续加工，从而实现了刀具的柔性管理。即每把刀的加工件数根据实际情况确定，而不是固定数值。显然，这种管理方式与实际情况更接近。在实际工程应用中，为达到刀具的柔性管理，必须结合实际加工工序和刀具，进行大量的工程试验和经验总结、归纳，主要工作集中在如下几个方面：

首先，在保证质量的前提下，分析特定工序监控功率的变化过程，当影响到实际的产品质量时，功率数值即可作为刀具柔性管理的限值；

其次，影响实际机械加工过程的因素很多，因此，必须根据实时的监控数据，建立过程自学习功能，并不断修正和优化设定的柔性换刀限值，从而真正做到实际加工过程刀具的柔性化管理，用足每把刀具的使用寿命，最终提高管理效率，降低产品的制造成本。

结束语

刀具作为机加工过程中重要的质量影响因素之一，直接影响到企业的经营和效率。基于加工频次的常规刀具管理方法，无法有效地控制过程质量和加工成本。随着智能制造及大数据时代的到来，通过制造过程数据的实时分析和采集，挖掘出特征参数，并采用设定限值的方法可有效提高刀具的管理水平，利于企业生产性向上。

本文所提出的方法，在实践中证明了其有效性。但针对制造过程数据的挖掘和特性量提取等核心技术，必须通过大量数据的自学习和数据挖掘进行实时改善，以确保在生产过程存在各种变化点时，仍能达到较为满意的效果。、

宝鸡忠诚机床股份有限公司

立式加工中心综合误差补偿技术应用

文 / 杨红军

“高精度”是装备制造重要的发展方向之一！随着国内外经济环境的不断变化与发展，制造业对高精度、高质量和高效率的要求在不断提升。作为制造业基础装备的数控机床，其精度等综合性能的提升，是制造业提高整体水平以及机床企业提升竞争力的关键所在。立式加工中心作为应用广泛的基础制造装备之一，在汽车、轮船、航空航天和模具等制造行业中应用广泛，其加工精度的提高，对于提升整个机械制造业的整体水平和质量起着十分重要的基础性作用。在我国大力发展航空航天业的推动下，高精度机床面临着巨大的市场需求，因此，采取切实有效的方法来提高数控机床的加工精度，其意义不言而喻。

作为“数控机床测量、分析与补偿技术”课题的参研单位，宝鸡忠诚机床股份有限公司联合高等院校，通过开展对机床误差预估、分析与优化设计的研究，在确保立式加工中心实现加工一致性的基础上，运用数控系统或模块补偿功能，建立了立式加工中心的综合误差补偿体系，并实现了示范应用，从而提升了立式加工中心的综合精度水平。

通过项目实施，宝鸡忠诚机床股份有限公司研究应用了对立式加工中心进行综合补偿的两种方式，在企业建立了立式加工中心综合误差补偿体系，有效地提高了加工中心产品的精度及稳定性，为持续提升机床产品的性能奠定了基础。目前，这项成果已被批量应用于宝鸡忠诚机床股份有限公司的立式加工中心单机、智能立式加工中心机及生产线装备中。

基于国内补偿技术的应用研究

宝鸡忠诚机床股份有限公司依据课题要求以及实际应用对整机成本控制的要求，选用了国内成熟的、能市场化应用的综合补偿系统，作为对立式加工中心的批量化综合补偿。根据补偿技术的成熟度、产品化能力以及合作的稳定性和系统的匹配性等综合要求，采取了两种用于立式加工中心的综合误差补偿方案：一是内置拥有综合补偿功能的华中高档数控系统，二是 FANUC-0iMF 数控系统配国产补偿功能模块。

1. 华中数控系统的补偿效果

采用华中HNC848CM数控系统的补偿原理是：为实现机床热误差补偿，必须测量指定温度条件（T）下机床各运动轴在行程范围内的误差值序列，并根据误差值序列绘制热误差曲线。在满足一定精度要求的前提下，热误差曲线可以用一条直线代替，该直线可以通过斜率与补偿参考点 P0 唯一确定，因此，机床各轴热误差可以由两部分构成：补偿参考点 P0 处的基准热误差，该误差在行程范围内为恒定值，并随温度的变化而改变，针对基准热误差的补偿被称为“位置无关式热误差补偿”；其余各点的热膨胀误差，在基准热误差的基础上存在额外偏置，偏置值随着补偿点与补偿参考点距离的增加而增大，因此被称为“位置相关式热误差补偿”。以 *X* 轴补偿为例，补偿值 Compx 由当前指令坐标值 Px 以及温度传感器测量得到的温度值 T 确定，补偿原理如图 1 所示。

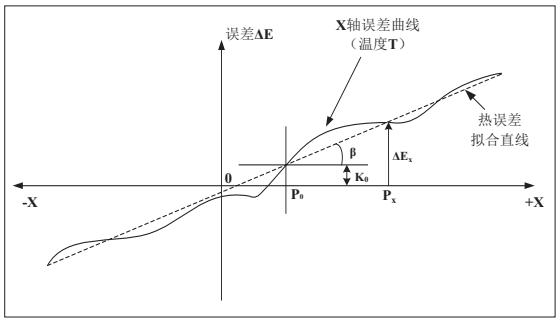


图 1　热误差补偿原理

补偿与建模步骤是：

（1）测量并补偿机床的几何误差，包括测量并补偿：螺距误差与反向间隙误差、垂直度误差和直线度误差。

（2）测量机床各温升状态的热误差。

（3）计算斜率。整理以上测量在不同温度下的机床 *X* 轴线性误差，取其中某一温度下的线性误差数据作为纵坐标（因变量，单位为 um），以机床 *X* 轴位置为横坐标（自变量，单位为 mm）所得到的曲线，即为所需要的热膨胀线性误差曲线（如图 2 所示）。利用数据处理软件拟合计算此曲线斜率，将所有不同温度下的 *X* 轴线性误差数据均按照以上方法处理并拟合计算。

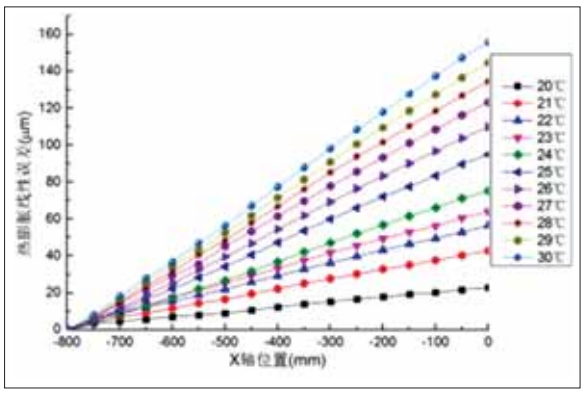


图 2　轴热膨胀线性误差曲线

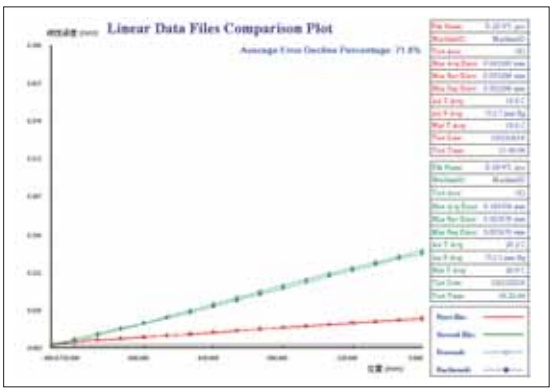


图 3　补偿前平台 II 的 29.9℃ 线性误差

（4）将斜率按照要求补偿到数控系统中。

补偿效果对比：以机床 *X* 轴为例，*X* 轴 20.9℃与 29.9℃的温度变化线性误差，API 激光测量的定位误差由 0.0452 mm 上升到 0.1605 mm，也就是说，*X* 轴温度变化全长 800 mm，误差为 0.1153 mm。*X* 轴升温到 29.9℃时，未补偿定位精度变化如图 3 所示。

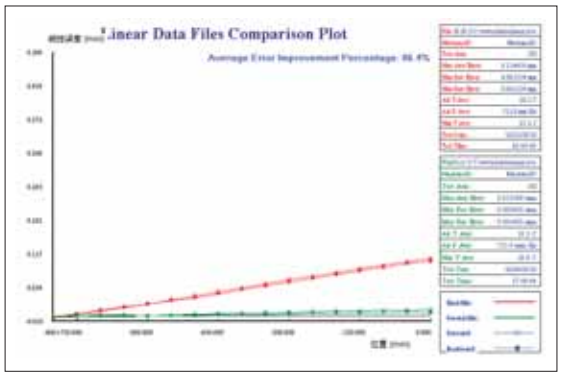


图 4 补偿后平台 II 的 28.2℃线性误差

采用误差补偿后，*X* 轴温度由 21℃变化到 28.2℃时，在 800 mm 的全长上线性误差范围为 0.015569 ～ 0.114430 mm，如图 4 所示。

机床的 *X*、*Y* 和 *Z* 这 3 个轴采用热误差补偿前后，在冷态和热态下的补偿效果见表 1，3 个轴的直线度补偿效果见表 2，3 个轴的垂直度补偿效果见表 3。

表 1 热误差定位精度补偿效果

项目	补偿前 μm	补偿后 μm	机床精度提升
X 轴的冷态定位误差	45.24	15.56	65.6%
X 轴的热态定位误差	139.55	114.4	18%
Y 轴的冷态定位误差	14.6	1.8	87.6%
Y 轴的热态定位误差	176.5	96	45.6%
Z 轴的冷态定位误差	27.9	27.9	0%
Z 轴的热态定位误差	161.2	133.1	17.4%
主轴热伸长误差	无	无	无

表 2 直线度补偿效果

轴名	项目	补偿前 mm	补偿后 mm
X 轴	在 *Z-X* 垂直平面内	0.02	0.004
	在 *X-Y* 水平平面内	0.003	--
Y 轴	在 *Y-Z* 垂直平面内	0.002	--
	在 *X-Y* 水平平面内	0.002	--
Z 轴	在平行于 *X* 轴轴线的 *Z-X* 垂直平面内	0.003	--
	在平行于 *Y* 轴轴线的 *Y-Z* 垂直平面内	0.003	--

2. FANUC 数控系统 + 补偿模块的补偿效果

由于机床的运动发热，在没有补

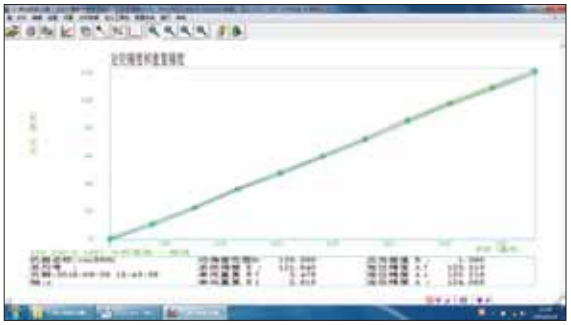


图 5 补偿前 X 轴热态的定位误差

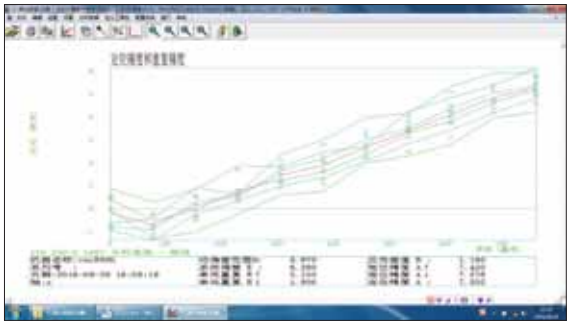


图 6 补偿后 X 轴热态的定位误差

表 3 垂直度补偿效果表

项目	补偿前 mm	补偿后 mm
Z 轴对 Y 轴	0.012/350	0.002/350
Z 轴对 X 轴	0.002/350	--
X 轴对 Y 轴	0.002/350	--

表 4 热误差定位精度补偿效果

项目	补偿前 μm	补偿后 μm	机床精度提升
X 轴的冷态定位误差	100	8	92%
X 轴的热态定位误差	129	7.5	94.2%
X 轴的热态转冷态定位误差	65	5.52	91.5%
Y 轴的冷态定位误差	81	6.5	74.2%
Y 轴的热态定位误差	70	2.3	94.3%
Y 轴的热态转冷态定位误差	60	-3	88.5%
Z 轴的冷态定位误差	60	11	88.3%
Z 轴的热态定位误差	86	3.5	95.9%
Z 轴的热态转冷态定位误差	74	5.5	88.3%
主轴热伸长误差	5	1	80%

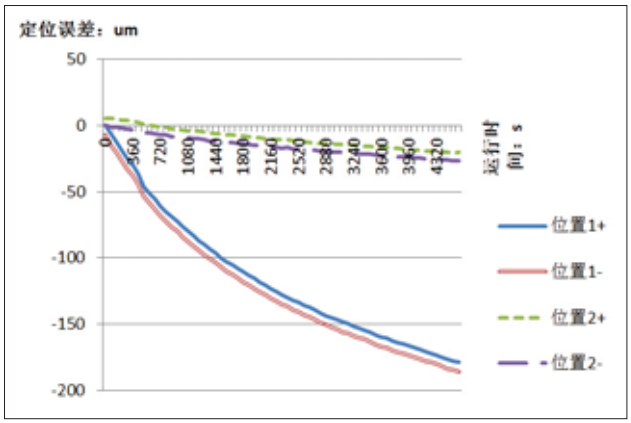


图 7 华中数控系统补偿直线轴热变形试验结果

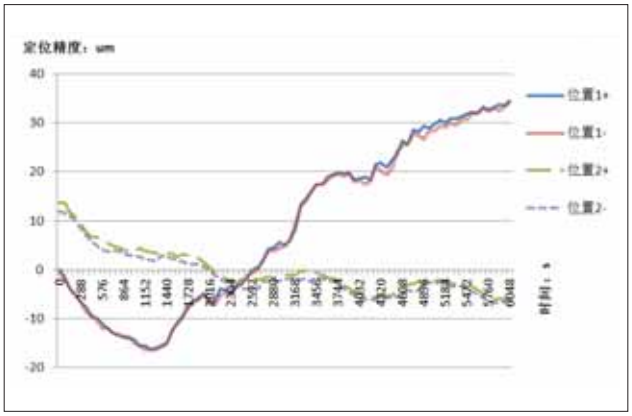


图 8 FANUC+ 补偿模块补偿直线轴热变形试验结果

偿时，X 轴热态的定位误差范围为 0.000 ~ 0.1249 mm，最大偏差量 129 μm，比冷态时的定位误差膨胀了 29 μm。而采用误差补偿后，X 轴热态定位误差范围为 -0.0015 ~ 0.006 mm，最大偏差量 7.5 μm，精度提高了 94.2%。补偿前的定位精度如图 5 所示，补偿后的定位精度如图 6 所示。

补偿前后，整机的 X、Y 和 Z 轴的定位精度大幅提升，见表 4。

3. 两种补偿模式的热补偿效果测试

上述两种补偿效果数值，是在误差建模过程中采集的数据。为综合直观地测试热补偿效果，依据 ISO230-3 直线轴热变形试验规范标准，对两种补偿方式进行测试。试验结果如图 7、图 8 所示。

成果的批量应用

在本课题实施的过程中，宝鸡忠诚机床股份有限公司制定了 4 项补偿规范及标准，申请发明专利 2 项，所开发的制造一致性技术，已在宝鸡忠诚机床股份有限公司所有的立式加工中心上

图 9 整机制造一致性的 CMK 值检测

图 10 批量应用综合误差补偿技术的立式加工中心整机

得到了批量应用，显著提高了零部件的加工一致性以及机床整机的制造精度，其中，整机的几何精度一致性经初步统计计算后达到 CMK1.33。目前，宝鸡忠诚机床股份有限公司已邀请具有国家检测资质的第三方机构，对整机制造一致性的几何精度 CMK 值进行统计分析，现已累计测量机床 60 余台（如图 9 所示）。

目前，宝鸡忠诚机床股份有限公司已对 8 台立式加工中心整机实施了综合误差补偿（如图 10 所示），其中一台在 2018 上海机床展览会中作为智能化立式加工中心而得到了展示。通过该项目的实施，宝鸡忠诚机床股份有限公司积累了经验，从而为实现数控车床等产品的综合误差补偿奠定了基础，目前，公司已在 3 台以上的车床上应用了这项综合误差补偿技术，使用效果良好。

结语

通过将“数控机床测量、分析与补偿技术”课题的成果——综合误差补偿技术批量应用于立式加工中心产品上，宝鸡忠诚机床股份有限公司大幅提升了立式加工中心整机的几何精度以及运行精度的稳定性，同时，还使该补偿技术扩展应用到数控车床等主导产品上，从而使这项综合误差补偿技术进一步得到了验证。

通过在立式加工中心上进行补偿研究测试可以看出，上述两种方法各有所长，机床精度都有不同程度的提升。通过功能应用和性能实测，也显现出了两种方式需要提升和改进之处。

FANUC 数控系统 + 补偿模块的优点是，热误差补偿功能全面，效果良好，但缺点是，没有几何误差补偿功能，综合成本较高，不利于市场推广。同时，补偿系统模块集成化、工业化水平还有待提升。

华中数控系统的补偿优点是，拥有热误差和几何误差补偿，综合补偿功能全面，几何误差补偿效果良好，且补偿功能内置，补偿控制性好，误差曲线光滑，补偿成本较低，但缺点是，热误差补偿功能弱，需要继续提升。

武汉重型机床集团有限公司

超重型数控单柱移动立式铣车床研制成功

“超重型数控单柱移动立式铣车床”是武汉重型机床集团有限公司（以下简称“武重”）承担的“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题。武重联合华工制造装备数字化国家工程中心有限公司、武汉华中数控股份有限公司及东莞华中科技大学制造工程研究院，历时 4 年 9 个月，通过重点攻关，研发出具有自主知识产权的 CKX53280 超重型数控单柱移动立式铣车床。

该机床满足了我国核电工业加工压力壳、堆心吊篮、蒸汽发生器和水轮机转轮体等关键零件对高精度、大规格、大承重、多轴联动和复合加工设备的需求，从而使我国在加工大型核电关键零件方面，拥有了自主知识产权的国产设备。

CKX53280 超重型数控单柱移动立式铣车床

该机床最大加工直径 28 m，最大加工高度 13 m，承载 800 t，工作台的径向跳动 0.015 mm，工作台任意分度精度 ±2″，加工规格世界之最，获“中国工业新纪录”称号。

围绕核电用户的要求，以及机床设计中需要解决的关键技术难点，课题团队开展了深入研究，包括：针对超大直径、高精度和超重承载的工作台特点，对 12.5 m 直径超大重载工作台的结构设计进行了优化，开发了铸造工艺优化技术、超大重载高精度工作台静压导轨的设计制造技术、静压油膜厚度的自动精确控制技术、*C* 轴分度多电机预载消隙传动技术等；针对刀架、车铣复合、高精度以及滑枕行程长、传动扭矩大、转速高、附件多和重量大等特点，开发了超长行程刀架的铣主轴传动设计技术、车铣复合刀架和附件的自动换刀技术、车铣复合刀架的有限元动态分析技术以及刀架进给双齿轮 - 齿条传动技术、车削进给系统技术等。

该课题获得授权发明专利 2 项，制定国家标准 2 项。到目前为止，CKX53280 超重型数控单柱移动立式铣车床已为用户加工百余件大型零件，如积石峡顶盖、石落度基础板、电站转子支架、底环、底座和矿山滚筒等。自投入使用以来，设备运行状况良好，各项性能指标均满足了用户的生产要求，极大地提高了用户的加工效率及产品质量，使用户的业务范围扩展到多个国家，创造了巨大的经济效益。近 5 年来，该机床同系列的产品已售出 12 台，新增销售额 2 亿。

CKX53280 超重型数控单柱移动立式铣车床的研制成功，打破了发达国家在战略性核心加工装备方面对我国的垄断和技术封锁，为我国核电、水电行业加工大型关键零部件、从而突破千万千瓦发电容量提供了装备保障，同时还为国家节约了大量外汇，取得了巨大的社会效益。

磨削

为加工传动轴而精确订制磨削解决方案

汽车行业的持续发展，正在迅速改变生产技术，即便像磨削传动轴外圆这样的成熟工艺也同样如此。随着这类部件几何尺寸的日益复杂化，对最终加工的精度要求也越来越高。为此，机床企业依靠机械工程而研发出了针对轴类件的个性化磨削解决方案，甚至还可以将其整合到整条生产线中，埃马克集团的磨削专家们就是这样做的，比如，埃马克的 HG 208 卧式外圆磨床，可以根据不同的加工任务进行调整，并集成到埃马克的生产线中。

在许多机床上，实现高度柔性化的磨削是难以想象的，电机驱动轴、复杂的凸轮轴或曲轴，以及传动轴等都需要细节上截然不同的解决方案。这些不同的解决方案，取决于是执行单一磨削工序、多个平行磨削工序还是内、外磨削组合工序。此外，根据部件和磨削工艺，用户还需要额外的工艺技术模块，比如在线测量装置、用于 CBN 和刚玉砂轮的修整单元，以及自动化的动平衡单元

凭借广泛的工艺模块，埃马克 HG 208 卧式外圆磨床为客户提供各种订制的磨削解决方案

等。为了满足这些截然不同的要求，埃马克对 HG 208 卧式外圆磨床进行了研发。该公司为客户提供了各种工艺技术模块，以便客户可以方便地将这些模块集成到标准机床上。比如，为 HG 208 卧式外圆磨床配备一个或两个十字滑台，每一个十字滑台都可以安装不同的内外磨削主轴。或者，通过使用 B 轴或中心驱动，来为客户特定的应用程序提供最佳的解决方案。

以 CVT 变速器为例，可以说明这种高度灵活的方案是如何影响并推动汽车行业的发展的。在现代混合动力驱动系统中，CVT 变速器得到了越来越多的应用，它将内燃机和电动机的驱动力有效地结合在一起。然而，生产 CVT 变速器的中央传动轴却对磨削工艺带来了挑战：一方面，工件控制轮表面需要通过倾斜角度精确加工；另一方面，轴向轨道滚珠槽也必须加工。为避免二次装卡错误并确保加工精度，埃马克实现了这两道工序的一次装卡加工。为加工凹槽，机床配备了可修整的陶瓷 CBN 砂轮，适合的修整系统使得球道质量保持在最佳水平。为了加工主轴上的锥形表面（以及其他轴上的类似表面），埃马克还扩展了 HG 模块化系统，在此使用直径达 750 mm 的刚玉砂轮。

为适应不同的部件条件，埃马克不断地调整机床的可用模块，以为客户提供最佳的配置。一个用于外部加工的大型刚玉砂轮和一个用于凹槽加工的小型 CBN 砂轮，分别被安装在两个带独立修整系统的滑台上，从而确保了质量和最佳的生产节拍。

埃马克还在构建整体化生产解决方案方面拥有丰富的经验，能够为汽车行业开发完整的生产线。比如，在 EMAG VTC 系列的立式车削中心上完成传动轴的预加工，然后在 HG 系列的磨床上完成精加工。

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施管理办公室
《高档数控机床与基础制造装备》编辑部

地址：北京市西城区白云路 1 号 11 层（100045）
电话：010-63326090-98 转 389、283 或 280
传真：010-63326099
E-mail ：skjc@vogel.com.cn
网站专题 / 电子刊：www.vogel.com.cn/skjc/