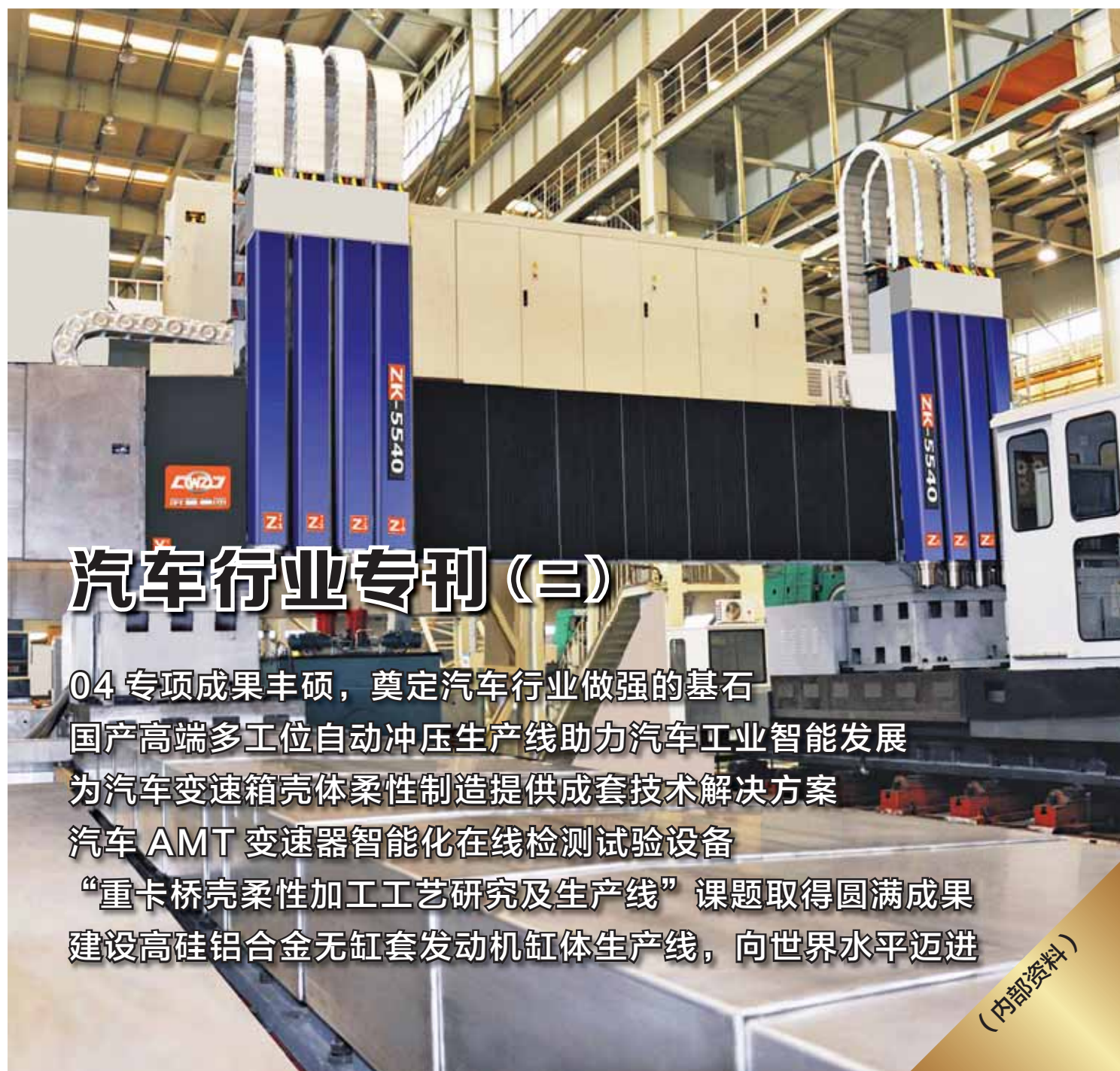


国家科技重大专项

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 2 期（总第 23 期）



汽车行业专刊（三）

04 专项成果丰硕，奠定汽车行业做强的基石

国产高端多工位自动冲压生产线助力汽车工业智能发展

为汽车变速箱壳体柔性制造提供成套技术解决方案

汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备

“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”课题取得圆满成果

建设高硅铝合金无缸套发动机缸体生产线，向世界水平迈进

（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，共同打造一個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1000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3000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3000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 2 期（内部资料）

领导题词

领导题词 3

汽车行业专刊（二）

总论

04 专项成果丰硕，奠定汽车行业做强的基石 7

冲压生产线

国产高端多工位自动冲压生产线助力汽车工业智能发展 14

金属切削生产线

为汽车变速箱壳体柔性制造提供成套技术解决方案 17

刀具技术

汽车发动机配套精密高效刀具的研制 21

在线检测技术

汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备 25

重卡桥壳生产线

“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”课题取得圆满成果 28

发动机生产技术

建设高硅铝合金无缸套发动机缸体生产线，向世界水平迈进 33

涂装生产技术

为涂装生产实现自动化、智能化、数字化和信息化奠定基础 37

成果及应用

用于超临界核电半速转子加工的超重型数控卧式镗车床 43

经验交流

基于国产数控系统的七轴五联动大型车铣复合加工中心的验证与提升 46

汽车行业专刊（二）

“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。



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

04 专项成果丰硕，奠定汽车行业做强的基石

文 / 04 专项数控机床主机专家 韩镭

“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”）紧密围绕国家重大工程 and 行业发展需求，经过 9 年的实施（2009 ~ 2017 年），专项产品的设计、制造与应用能力显著增强，数控机床专项成果在替代进口方面取得了成效，经济和社会效益显著。

截止到 2017 年，04 专项共立项安排了近 600 项课题，其中，作为 04 专项重点服务的领域之一，针对汽车零部件制造共安排了近 100 项课题，研发出了冲压、焊接和涂装等成套设备，以及高速精密加工中心、车铣和车磨复合加工中心等产品，这些课题成果在汽车企业的生产制造中发挥了重要作用。

汽车制造用设备现状及解决途径

改革开放以来，我国汽车制造水平不断提高，汽车产量逐年增加，已连续 3 年超过 2800 万辆，居世界第一。因此，中国是汽车产量大国已成为不争的事实。但细究我国汽车制造企业生产中使用的机床设备，尤其是乘用车零部件生产线上的机床设备，大部分为进口产品，充分说明了我国虽为汽车产量大国，却并未做强。机床行业发展与汽车行业需求的脱节，是国产机床未能进入汽车

行业主要生产线的主要原因，这严重阻碍了我国汽车工业的发展，同时也抑制了我国机床行业的进步。

为推动国产机床进入汽车制造的主要生产线，使之成为汽车企业使用的主体设备，04 专项归纳总结了汽车行业使用进口设备的不同原因，并对此安排了相关课题进行重点攻关，具体包括以下 3 类：

1. 生产中需要依靠的进口设备，如：大吨位数控液压机床、伺服压力机、大吨位压铸机、曲轴磨床及硬切机床和刀具等。
2. 近几年汽车行业采用新技术的零部件加工设备，如：燃油喷射系统、自动变速器关键零件的加工技术及设备、涨断连杆加工技术及装备，以及装配凸轮轴的加工技术及装备。
3. 生产线的成组、成套技术及装备，如：



高强钢汽车零部件生产线（东莞豪斯特公司）

缸体、缸盖生产线，齿轮生产线，精锻齿轮加工技术及设备。

立项及完成情况

自 2009 年 04 专项立项以来，涉及汽车行业的课题近 100 项，有的课题还在执行中，有的课题已完成并通过了验收，这些课题成果在实际生产中发挥了作用。通过这些课题项目的实施，机床企业和汽车企业均获益匪浅，其中，有些设备不仅在国内得到应用，还远销国外。

1. 车身覆盖件生产技术及设备

汽车车身覆盖件（尤其是轿车车身）的生产设备一直是国内的短板，主要设备均为进口。因此，04 专项从一开始就对此类设备高度重视，组织国内的主要冲压机床企业，如济南第二机床厂有限公司、齐齐哈尔第一机床厂、齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司、合肥锻压机床厂和天津锻压机床厂，联合汽车企业，如一汽集团、上海通用汽车有限公司、安徽江淮汽车集团股份有限公司、广州汽车集团股份有限公司和奇瑞汽车股份有限公司，以及机械科学研究总院集团有限公司、燕山大学、哈尔滨工业大学和西安交通大学等，组成了联合项目组。经过几年的努力，研制出了大吨位（42 000 kN、64 000 kN）数控液压机床、伺服压力机（20 000 kN）及配套的上、下料设备，并组成了整条生产线用在实际生产中。例如，由济南第二机床厂有限公司牵头、在烟台上海通用大岳车身厂研制的“车身全自动冲压生产线”，实现了全自动冲压轿车车身覆盖件的生产，覆盖了开卷、上料、冲压及更换模



数字化机械伺服压机（修水县）

具等全套工序，生产节拍 15 s/件，自动更换模具时间 280 s。

现在，我国自行设计、制造的车身覆盖件冲压生产线，已有 90 多条进入到汽车企业。济南第二机床厂有限公司设计、制造的冲压生产线，已有 9 条出口到美国福特汽车车身厂。

2. 大吨位压铸机

多年来，汽车行业使用的铝合金大型铸件一直依靠进口大吨位压铸机生产。为突破这一瓶颈，04 专项组织了苏州三基铸造装备股份有限公司、一汽集团、西安交通大学和清华大学等，开展了“3 500 t 精密卧式实时控制压铸机及成套设备”的研制。

该课题于 2015 年完成并通过了验收。课题研制的 3 500 t 压铸机已在一汽集团铸造分厂投入使用。现在，一汽集团制造的重型卡车 J6 上使用的离合器壳体铸件，就是



北京第二机床厂有限公司为江苏万力机械股份有限公司提供的发动机曲轴自动化生产线



北京第二机床厂有限公司为上海拖拉机内燃机有限公司提供的发动机曲轴自动化生产线

用此设备生产的。

3. 发动机关键件的生产设备

(1) 曲轴磨床。曲轴连杆颈磨削用磨床是曲轴生产的关键设备，各国汽车企业生产曲轴用的磨床主要来自英国的兰蒂斯公司或德国的勇克公司。针对这项难题，04 专项组织了北京第二机床厂有限公司、上海机床厂有限公司、清华大学、天津大学、西安交通大学和上海交通大学等，开展了“曲轴切线跟踪磨床”的研制。该课题于 2013 年完成并进行了验收，研制出的机床在性能上完全符合使用要求，有些指标还超过了进口设备。目前，该课题成果已成功应用于浙江太阳股份有限公司、上海通用发动机公司以及四川内江金鸿曲轴有限公司。

(2) 柴油发动机用高压燃油喷射供油系

统制造技术。随着电子技术在汽车控制管理中的应用，目前，柴油发动机的燃油供油系统已淘汰了机械控制式的高压油泵、油嘴喷油系统，采用了“电控高压共轨喷油系统”。这套系统的生产技术，一直由德国博世公司、日本电装公司主宰。为突破这一瓶颈，04 专项组织了中国一汽无锡油泵油嘴研究所、无锡机床股份有限公司、北京第二机床厂有限公司、四川普什宁江机床有限公司、江西杰克机床有限公司以及西安交通大学、北京工研精机股份有限公司、苏州电加工机床研究所、机械发展科技股份有限公司、无锡宏申油泵油嘴设备有限公司和上海丰禾精密机械有限公司等，对“电控共轨柴油喷射系统制造技术与关键设备的研发与应用”课题展开了联合攻关。经过努力，研制出了 12 台新型设备，由这些设备生产的柴油喷射系统，已成功地应用到军车上。该课题一期于 2015 年通过了验收。随后，立即启动了二期课题，目标是再研制 3 种新型设备，并实现一期的 12 种设备与二期的 3 种设备与国外设备的并线生产。

(3) 变截面椭圆活塞的生产技术。为提高发动机的燃油效率，国外的汽油发动机普遍采用了变截面椭圆活塞。由于没有制造这种活塞的机床，国内生产此类活塞主要依靠进口机床。为此，04 专项组织了长沙一派数控股份有限公司和湖南大学等单位，对变截面椭圆活塞生产用数控车床进行攻关。2014 年，课题组研制出生产这种活塞的数控车床 (ECK2150A) 并通过了验收。在此基础上，04 专项又组织了山东双港活塞股份有限公司、大连机床集团有限责任公司、长沙一派

数控股份有限公司以及西安交通大学、武汉华中数控股份有限公司和大连高金科技发展有限公司等，开展了“高档活塞规模制造加工线的研制”工作。目前，该课题已成功研制出5条生产线，年产500万只活塞供汽车发动机企业使用，得到了业界的广泛好评。项目完成时将再建5条生产线，年产能可达1000万只活塞。



活塞生产线（山东双港活塞公司）



活塞生产线（山东双港活塞公司）上的数控活塞车床（长沙一派制造）

(4) 装配式凸轮轴加工技术。为提高发动机的燃油经济性，降低发动机的制造成本，目前的发动机制造，已改变了传统的整体式凸轮轴生产方式，而是采用装配式凸轮轴的生产技术。针对这一新的制造技术及生产方式，04专项组织了北京内燃机零件公司、北京粉末新材料公司、吉林大学、北京第二机床厂有限公司和中国科学院力学研究所等单位，开展了“装配式凸轮轴精密高效自动化生产成套技术与装备的开发及研制”课题研究，成功地研制出了凸轮桃片的材料配方及压制工艺、桃片的加工工艺、中空凸轮轴的加工工艺，以及桃片装配工艺和检测方法，并成功用于生产。

(5) 汽油机连杆裂解式加工技术的研制。随着制造技术的发展，为了提高发动机的安装精度与可靠性，国外在发动机连杆大端与曲轴连接部分采用了裂解式加工方法。为跟踪这项技术，04专项组织了北京内燃机零件公司、沈阳机床成套设备有限责任公司、吉林大学、北京北一法康生产线有限公司以及北京广宇大成数控机床有限公司，宁夏银川大河数控机床有限公司、北京东方精益机械有限公司和四川天虎工具有限责任公司等单位，开展了“汽油发动机裂解式连杆加工技术与成套装备研制及产业化应用”的课题研制。该课题于2016年完成并通过验收。目前，北京内燃机零件公司已将课题成果应用在自身的实际生产中。

(6) 汽油发动机燃油喷射系统关键零件的生产技术。现在，汽油发动机已普遍淘汰了自然吸气方式，而广泛采用了燃油喷射方式。针对这项技术，04专项组织了东风楚

凯(武汉)汽车零部件有限公司、上海机床厂有限公司、武汉华中数控股份有限公司、深圳华数机器人有限公司以及上海莱必泰数控机床股份有限公司、襄阳华中科技大学先进制造工程研究院等单位,围绕汽油发动机燃油喷射系统燃油泵的制造,开展了生产工艺及装备的研制。项目完成时,课题牵头单位将具备年产80万套燃油泵的生产能力。

(7) 缸体、缸盖加工用设备及成线技术。缸体、缸盖是发动机的关键零件,加工工序多,加工面多而复杂,加工精度要求高。为此,04专项组织了机床企业、汽车企业和大学等开展联合攻关。

一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂、同济大学、大连机床集团有限责任公司、大连理工大学和大连新宇理工科技开发有限公司等单位,联合完成了“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。该课题完成了6L柴油机缸体、缸盖生产线的设计、建造和施工,并通过验收,实现了国产机床与进口机床对缸体、缸盖的同线生产。

营口华润有色金属制造有限公司、大连机床集团华根机械有限公司、吉林大学、宁



高硅铝合金缸体加工生产线(华润有色金属公司)

夏银川大河数控机床有限公司以及武汉华中数控股份有限公司、株洲钻石切削刀具股份有限公司和一汽集团等单位,共同开展了“高硅铝合金缸体”加工技术的研制。经过努力,完成了铝合金缸体加工生产线的设计、建造施工和生产调试。该生产线所用设备均为国产,现已投入实际生产。

4. 变速器零件的生产制造项目

(1) 无级变速器(CVT)普遍应用在轿车上,替代手动变速器。锥盘是无级变速器中依靠摩擦传递扭矩、实现变速的重要零件,其材质要求耐磨、有韧性,加工精度要求高。该零件的关键加工工序要求在热处理后采用硬车加磨削,但是,国内没有这种机床。为此,04专项组织了北京工研精机股份有限公司和北京航空航天大学,联合开展了“高速、精密数控车磨复合加工机床”的研制工作。该课题于2017年完成并通过验收,研制的“车磨复合加工机床”被湖南江麓容大



高硅铝合金缸体加工生产线(华润有色金属公司)

车辆传动股份有限公司用于 CVT 变速器锥盘的生产。

(2) 双离合变速器 (DCT) 是另一种不同结构的汽车自动变速器。为开发出双离合变速器 (DCT) 零件的制造技术与装备, 04 专项组织了东风活塞轴瓦有限公司和沈阳机床股份有限公司, 针对变速器中换挡毂的加工技术和设备展开了研制, 目前该课题正在执行中。

5. 轿车变速器用齿轮加工生产线

齿轮是变速器的关键重要零件, 其加工量大、难度高。为此, 04 专项组织了重庆兰黛动力传动机械股份有限公司、重庆机床(集团)有限责任公司和重庆大学, 联合开展了“轿车变速器齿轮加工生产线”的研制。该课题于 2017 年完成并通过验收, 攻克了齿轮干切技术难题。课题完成时, 已在重庆兰黛动力传动机械股份有限公司建成了 8 条齿轮生产线, 齿轮加工精度达到 6 级, 年产变速器齿轮 15 万套。

6. 精锻齿轮技术

少切削、无切削是现代加工追求的目标, 齿轮齿部加工是机加工的难点, 直接锻造出齿部是各国关注的一项重要工艺。为此, 04 专项组织了华中科技大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学和江苏太平洋精锻科技股份有限公司、江苏飞船股份有限公司等单位, 开展了“黑色金属和铝合金/温锻精密成形技术”的研制。课题研究了 20CrMo 钢变速器半轴齿轮闭塞冷锻工艺, 多层箱式加热炉

20CrMoTi 钢变速器结合齿轮中空成形工艺, 20CrMo 钢大模数大直径变速器行星齿轮和 S55C 钢 BJ 型温冷复合成形工艺, 20CrMo 钢变速器输入轴 5 工位冷挤压工艺, 以及模具和 16 000 kN 数控精锻液压机。课题成果在江苏太平洋精锻科技股份有限公司和江苏飞船股份有限公司的实际生产中发挥了重要作用, 锻造出的行星齿轮齿面精度达到 7 级, 无需再加工即可直接作为下一步工序的工艺基准, 以加工内孔。所生产出的零件受到了大众汽车公司、丰田汽车公司和通用汽车公司的欢迎。2017 年, 江苏太平洋精锻科技股份有限公司在天津滨海新区建成了一个新工厂, 为汽车企业生产配套零件。

7. 刀具

刀具是汽车零件加工中影响质量的最直接的耗材之一, 且消耗量大, 因此在汽车零部件加工中占有重要的地位。为提高汽车零部件加工用刀具的品质, 04 专项组织了成都工具研究所有限公司、株洲钻石切削刀具股份有限公司、上海工具厂有限公司、厦门金鹭特种合金有限公司以及上海交通大学、江苏大学、山东大学、湖南大学、神龙汽车有限公司、奇瑞汽车股份有限公司、潍柴动力股份有限公司和



多层箱式加热炉

上海汽车集团股份有限公司等单位，开展了对发动机总成零件加工用刀具的研制开发工作。其中，成都工具研究所有限公司牵头研制的曲轴车拉刀盘用刀片（过去一直依靠进口），已成功替代进口应用于神龙汽车有限公司发动机分厂的实际生产中。以前用进口刀片加工一个曲轴的成本是 38.48 元，现在采用国产刀片的加工成本只有 8.76 元。

8. 材料

轻量化是现代汽车设计、制造追求的目标之一。汽车用材料要轻，强度要好。材料不同，加工技术与设备也不同。为此，04 专项组织了机械科学研究院、哈尔滨工业大学、西安交通大学、华中科技大学、北京工业大学以及一汽集团、福田汽车股份有限公司、长城汽车股份有限公司和中国汽车工程研究院股份有限公司、东莞豪斯特热冲压技术有限公司等，开展了汽车用高强钢的研制及铝合金覆盖件的制造。

机械科学研究院研制的高强钢制造工艺及设备，成功地加工出了高强钢零件，如一汽奥迪汽车的电瓶支架和北汽福田出口汽车的侧门内梁。

中国汽车工程研究院股份有限公司、东莞豪斯特热冲压技术有限公司和华中科技大学研制的高强钢加工工艺及设备，解决了冲压模具制造、工件的快速加热（炉温控制）以及自动上下料的程序控制等问题，加工出的零件强度可达 1 000 Mpa，从而为汽车企业提供了满意的高强钢零件。

汽车制造技术的发展

我国的机床制造业、成形设备制造业布局全面，制造能力较强，且一直瞄准世界先进水平，因此，目标明确的课题项目，一经努力就一定能够实现。

汽车制造业是机床成形设备的大用户。汽车生产是大批量的生产，生产节奏快，质量高，成本低，精益的生产方式对制造设备提出了更高的要求。对此，国外机床企业抓住了前 50 年的发展机遇。现在，我国作为汽车产量大国，为机床行业提供了广阔的市场和发展的良好时机。因此，加强机床行业与汽车制造业的交流与合作，对于机床企业抓住机遇、在汽车大市场中占据更大的市场份额至关重要。

为更好地服务于汽车行业，济南二机床集团有限公司成立了冲压工艺实验室，专门研究冲压零件的冲压工艺以及上、下料机械手的动作程序等。

上海交通大学、西安交通大学、四川普什宁江机床有限公司、武汉华中数控股份有限公司、山东博特精工股份有限公司、智邦科技股份有限公司等联合上海通用汽车有限公司和上汽通用五菱汽车股份有限公司，成立了“轿车动力总成关键零件国产加工设备与工艺集成验证平台”项目组，并在上海临港建立了研发基地。

机床行业的发展是汽车行业做大做强的重要基石。

齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司

国产高端多工位自动冲压生产线助力汽车工业智能发展

文 / 傅岩

研制自主知识产权的高端多工位自动冲压生产线的必要性

随着我国汽车工业的快速发展，国内各大汽车制造企业牢牢把握发展契机，加大基础产能建设，建造新的生产基地，购置新的全自动冲压生产线，以提高自动化生产能力，响应国家节能降耗、推进绿色工业化进程的号召。与此同时，随着国内汽车消费水平的不断提高，车身覆盖件的造型日益复杂化，从而要求不断优化钣金冲压成形工艺，提高金属成形设备的技术水平。另一方面，新能源汽车的快速发展，以及新车型的不断升级换代，也推动了钣金成形从单一的大批量冲压生产向多品种、小批量的生产方式转型，适合多品种、小批量生产的高速、高效冲压设备正日益受到市场的青睐。

目前，广为国际知名汽车企业首选的全自动高效多工位冲压生产线，适用于钣金件和结构件的冲压生产，包括纵梁在内的重型结构件，均可在大吨位的多工位压力机上成形。整条生产线采取全封闭自动化的生产方式，有效地缩短了换模、调模时间，提高了冲压工序的适应性和实用性。

因此，作为汽车工业的重要装备之一，

多工位全自动冲压生产线代表了当前国际冲压装备制造业的最高水平，符合汽车行业向智能工厂方向发展的要求，与其他冲压方式相比，具有自动、高效、复合化以及制件质量高且稳定等众多优势，是目前国内外汽车厂商及汽车零部件配套商优选的设备。但是，长期以来，由于国外进口设备技术复杂，价格高昂，制造调试周期长，限制了多工位自动冲压生产线在国内汽车行业的应用。据估算，到2020年，我国汽车保有量将超过2亿辆，这意味着未来几年，汽车行业将需要大量价格适中的高性能多工位压力机。因此，研制具有自主知识产权的多工位自动冲压生产线势在必行。

TDL-4 3200 型、TDL-4 2500 型多工位自动冲压生产线研制成功

2009年，国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项提出了“开发汽车行业需要的关键高精密数控机床与基础装备”的要求。借此东风，中国通用技术（集团）控股有限责任公司子公司——齐齐哈尔二机床（集团）有限责任公司（以下简称“齐二机床”）牵头承担了“大型多工位压力机



2014年，TDL-4 3200型、TDL-4 2500型多工位自动冲压生产线在广东福迪汽车有限公司的现场演示

自动化线”课题，联合哈尔滨工业大学和燕山大学共同完成了课题研制任务。2014年，课题研制的TDL-4 3200型、TDL-4 2500型多工位自动冲压生产线在广东福迪汽车有限公司召开现场演示会，在同行业中起到了良好的示范作用。

其中，TDL-4 2500型多工位自动冲压生产线主要用于汽车薄板冲压零件的全自动高效加工，包括板料拆垛系统、上料系统、板料喷油系统、多工位压力机主机以及高速电子三坐标传送系统和下料系统等，可代替由4~6台压力机组成的冲压生产线。压力机主机台面尺寸7500mm×2600mm，冲压节拍最高可达25次/min，可实现2500t的满负荷运行。该生产线工作台面大，冲压范围广，功能齐全，集成了数控、通信、传感、液压与气动以及机构分析与优化等高端技术，如：压力机多连杆杆系参数化设计技术、矢量控制伺服运动代替机械凸轮传动技术、送料与压机同步控制技术、送料过程故障监测技术、自动对接技术、重载高速液压与润滑技术、重载机械失效分析技术、抗

偏载能力设计分析技术、数控液压垫应用技术，以及在线清洗、涂油应用技术，自动上下料装置、自动化传送装置和多工位单元集成技术及重型设备制造技术等。

2500t多工位自动冲压生产线自在广东福迪汽车有限公司

成功投产以来，一直用于汽车覆盖件的冲压生产，尤其满足了中小型部件的大批量连续加工，生产节拍最高达25次/min，日平均冲次在20000件左右，零件抽检合格率98%以上，总体上达到国际先进、国内领先水平，带来了较好的经济效益和社会效益，满足了我国汽车行业对高档次冲压装备的迫切需求。



TDL-4 2500型多工位自动冲压生产线



伺服三坐标传送系统

目前该课题已通过验收。

与此同时，齐二机床世界首创的多功能全自动冲压设备——TDL-4 3200 型多工位压力机自动冲压生产线也成功投入使用。该机配备板料输送和纵梁输送双物料传送系统，能够加工单双料片、单双工件、薄厚板料和中小件大梁板料等各种物料。其主机台面尺寸 7 500 mm × 2 600 mm (左右 × 前后)，生产节拍高，冲压车身覆盖件最高可达 25 次/min，冲压大梁件最高可达 10 次/min。

广东福迪汽车有限公司董事长叶青评价说：“3 200 t 和 2 500 t 多工位压力机生产线项

目的成功研制，对于推动国内汽车制造业的可持续发展，提高国内多工位压力机产品的整体技术水平具有重要的现实意义。”作为齐二机床的长期合作伙伴，广东福迪汽车有限公司早于 2003 年就向齐二机床购买了 2 台 1 000 t 的冲压生产线和 2 台 800 t 的机械压力机，加上目前的多工位压力机生产线，令该公司的生产装备达到了国际先进技术水平，集制造经验与成本优势于一体。



生产线下料工序



TDL-4 3200 型多工位自动冲压生产线



自动化系统人机交互操作

随着齐二机床多工位自动冲压生产线投入市场并成功应用，已为用户持续创造了可观的经济效益，市场反响良好。2017 年，北京博萨汽车配件有限公司向齐二机床订购了一条 2 500 t 的多工位生产线和一条 800 t 的自动化落料生产线，除此之外，冲压行业市场的其他合作意向也源源不断。

齐二机床多工位自动冲压生产线的研制成功，标志着齐二机床作为中国通用技术集团的制造板块，已跻身于世界大型重载数控冲压自动化设备设计制造水平的前列，具备了参与国际竞争的實力，为改变大重型冲压设备的国内外市场格局，从而为我国汽车工业的发展提供具有世界先进水平的装备提供了保障。

四川普什宁江机床有限公司

为汽车变速箱壳体柔性制造提供成套技术解决方案

文 / 刘雁

汽车行业已成为机床产业的消费主体，尤其对高效、高性能的数控机床和柔性生产线有着大量的需求。在机床消费总量中，汽车行业的消费量约占 40%。而在机床采购总额中，进口机床的采购额约占 80%。近年来，随着卧式加工中心可靠性和稳定性的提高，以及随着汽车制造业日益从单一的大批量生产转向多品种、变批量的生产，由卧式加工中心组成的柔性生产线或柔性制造系统已在发动机缸体缸盖、变速箱壳体的生产中得到

了广泛应用。因此，为汽车行业提供成套的装备和技术解决方案，一直是国内机床企业追求的目标。

四川普什宁江机床有限公司（以下简称“普什宁江”）为某齿轮传动公司提供的变速箱壳体柔性生产线（如图 1 所示），就是国产精密卧式加工中心批量进入汽车行业的典型案例。该项目一次性采用了 27 台普什宁江的卧式加工中心，这些设备全部为“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（以



图 1 客户生产现场的变速箱壳体柔性生产线



图2 变速箱壳体典型零件类型

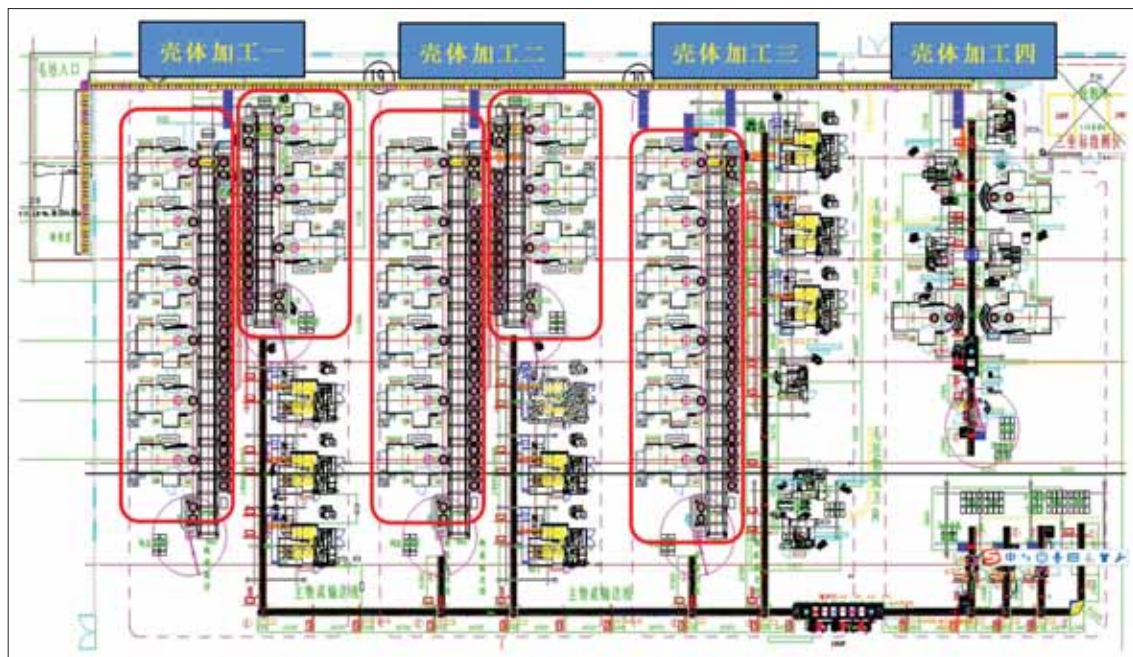


图3 变速箱壳体柔性制造系统平面布局

下简称“04 专项”)课题“精密卧式加工中心”的研究成果。27 台精密卧式加工中心以 5 条柔性制造系统的形式提供给用户,用于汽车变速器壳体的柔性生产。每一条柔性制造系统均由多台精密卧式加工中心、物流贮运系统和总控系统组成,实现了物流、加工及辅助设备的一体化集成,能够确保在一定的时间内,实现机床的零停机,从而满足了用户对高效加工的要求。由于是多台机床(一般为 3 ~ 6 台)的集成,使得机床、刀具、清洗和检测等资源得到了最大程度的共享利用。在总控控制下,该柔性制造系统可以实

现多种零件的混流加工,并能够在长时间无人看管的情况下连续运行。

该项目的成功实施,标志着 04 专项课题的研究成果——中高档数控机床开始走向产业化,从而在推进国产高档数控机床的技术进步,满足国内重点行业用户的需求,以有效抑制进口依赖而发挥了积极的示范效应。

变速箱壳体柔性制造系统的组成和设备概览

普什宁江的变速箱壳体柔性制造系统采

取多品种混流柔性生产方式，主要用于加工箱式壳体、桶式壳体、前壳和后壳等共 10 个品种的产品（如图 2 所示），加工的壳体材质涉及铸铁和铝合金，具有年产 20 万件变速器壳体的生产能力。

如图 3 所示，普什宁江的变速箱壳体柔性制造系统由壳体加工一线、二线和三线组成。整条生产线以自动化的物流输送设备为纽带，按照科学合理的物流流向和生产工艺路线排列，贯通串联所有的加工设备，形成了自动化的物流系统。

该变速箱壳体柔性制造系统的机械加工设备由 5 套 FMS 柔性制造系统（集成 27 台精密卧式加工中心）、6 台立式加工中心、一条总物流输送线、4 台清洗机、4 台试漏机和 13 台检测平台等辅助设备组成。

以 THM6363A 精密卧式加工中心为主体的加工单元，具有如下特点：

1. 设备采用优化的结构和配置，精度高、可靠性好；
2. 全部机床配置高速 ATC、高速 APC 系统；
3. 机床直线轴快移速度 45 m/min；
4. X、Y 和 Z 轴的定位精度 ≤ 0.008 mm，重复定位精度 ≤ 0.004 mm；
5. 转台 B 轴定位精度 $\leq 6''$ ，重复定位精度 $\leq 3''$ ；
6. 设备可靠性指标 MTBF 为 1 500 h；
7. 工作台交换重复定位精度 ≤ 0.005 mm；
8. 部分机床配置高速电主轴；
9. 设备具有高速以太网通信、数据服务器、PROFIBUS 现场总线控制、远程监控和

诊断功能。

自动物流储运系统的主要特点是：

1. 全自动物流小车 RGV 具有优越传输性能，以及较高的运动精度和位置精度；
2. 全自动物流小车 RGV 的 X、Y 和 Z 轴采用 CNC 控制和数字化驱动；
3. 全自动物流小车 RGV 的最快搬运速度达 70 m/min；
4. 全自动物流小车 RGV 的搬运重量高达 1 200 kg；
5. 物流系统配置 48/24 库位的零件立体库；
6. 每线配置 4 套上下料站，可根据生产需要快速调整物流方向；
7. 零件更换时间 ≤ 2 min。

多种类型零件的混流加工工艺

普什宁江的变速箱壳体柔性生产线的加工节拍见表所示。实现这样的加工节拍，其难点及创新点主要体现在：

1. 采用柔性制造系统 FMS，实现零件的多品种、多工序和变批量的混流加工，需要安排好多种工艺路线和工序。
2. 采用工件智能感知识别技术，智能

表 变速箱壳体柔性生产线加工节拍

序号	生产线	零件名称	班产量	生产节拍
1	柔性 1 线	变速器壳体	41 件	4.12 min/ 件
2		变速器壳体	27 件	
3		变速器壳体	31 件	
4	柔性 2 线	变速器壳体	29 件	3.92 min/ 件
5		变速器壳体	34 件	
6		变速器后壳	41 件	
7	柔性 3 线	变速器前壳	27 件	5.67 min/ 件
8		变速器后壳	45 件	
		合计：	275 件	1.484 min/ 件

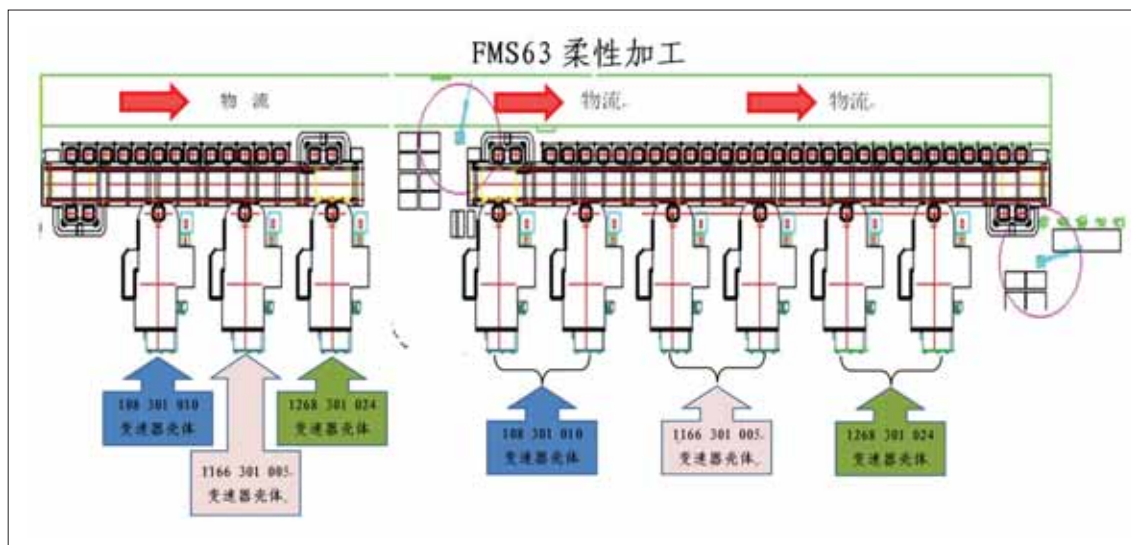


图4 普什宁江开发的多种类型零件的混流加工工艺

RGV 小车控制，FMS 全智能化监控、感知和执行等多种自动化物流形式的集成应用。

3. 通过在线检测，对加工零件进行主动测量，确保零件的加工质量和加工效率。

4. 依托对 FMS 总控系统软件的开发，开展了智能调度技术的研究，实现了计划管理、加工工艺流程编排、FMS 资源管理、实时仿真和人机交互、智能物流搬运和缓冲、物流搬运系统接口、加工设备接口以及 FMS 运行统计、故障诊断和运行履历、设备物流系统的维护和调试、物流手动运行等功能。

通过项目的实施，普什宁江为用户建成了 10 个品种、年产 20 万件客车、卡车变速器壳体的柔性制造系统。该变速器壳体柔性制造系统所有的加工设备均为数控机床，输送小车采用 NC 系统控制，关键设备数字化率 100%，生产节拍 $\leq 1.484 \text{ min/件}$ ，生产

效率提高了 38.5% 以上，能耗降低了 53%，生产人员减少了 66.93%，实现了多品种零件、多种工艺的变批量混流加工（如图 4 所示）。

通过在汽车变速箱制造企业的生产现场进行验证和示范应用，普什宁江有效地解决了箱体类零件的产品工艺设计问题，满足了精密加工的要求，形成了可供推广的智能制造关键技术，且这项技术无需任何调整，就能实现品种的更换，在确保高效、可靠加工，从而保证零件加工精度一致性的同时，还充分体现了少人化、柔性化和智能化的特点，为用户快速响应市场需求提供了技术保障。

通过该项目的实施，普什宁江为进入高端汽车市场，从而为汽车关键零件的加工提供可靠的装备技术而积累了大量的工艺经验和设备开发经验。

株洲钻石切削刀具股份有限公司

汽车发动机配套精密高效刀具的研制

长期以来，我国汽车发动机配套精密高效刀具技术薄弱，直接影响了作为我国经济增长支柱的汽车行业的发展。为响应国家战略需求，提升加工效率，降低汽车制造业的总体成本，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，株洲钻石切削刀具股份有限公司牵头，联合奇瑞汽车股份有限公司、神龙汽车有限公司、哈尔滨量具刀具集团有限责任公司、芜湖瑞利工具有限责任公司以及山东大学、湖南大学和华东理工大学一起，共同承担了“汽车发动机配套精密高效刀具”课题任务。该课题执行期从2012年1月至2014年12月。2017年4月25日，课题顺利通过了任务终验收。

通过对汽车发动机的主要零部件——缸体、缸盖、曲轴、连杆和凸轮轴等的制造工艺及配套刀具进行研究，课题突破了汽车发动机高效、精密和复合可转位刀具及超硬刀具的结构、材料及涂层等相关核心技术，形成了汽车发动机配套刀具的批量制造能力，解决了汽车发动机关键零部件加工过程的稳定性及可靠性等关键技术难题，建立了汽车发动机刀具专用数据库，最终形成了具有自主知识产权的汽车发动机刀具配套解决方

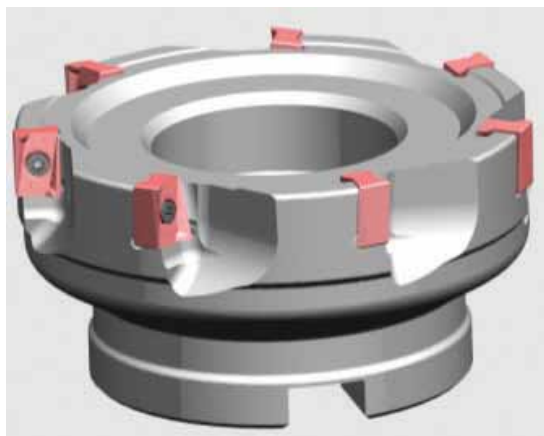


面铣系列刀具

案，打破了国外刀具商在以汽车发动机为代表的高端产品市场领域的垄断地位。

为确保课题研究工作圆满完成，课题组建了一个由47人组成的汽车刀具专职研发团队，含专职刀具开发设计人员16人，专职刀具材质开发人员16人，专职刀具制造工艺研发人员8人，专职刀具应用技术研究人员7人，形成了一支高素质的汽车刀具专业研究队伍。

为更高效、更合理地实现项目目标，课



方肩铣刀具

课题研究任务被分成 12 个工作模块分别予以推进，包括：汽车发动机整体工艺方案及配套刀具方案研究、专用刀具材料的研究和开发、曲轴高效复合刀具的开发、精密抗振孔镗削刀具的研究与开发、长径比大于 20 的深孔钻头的研制、面铣刀具的研制，以及整体硬质合金非标刀具的研制、超硬刀具的开发、非标专用刀具制造线及工艺技术研究、制造精密工具系统研制、汽车刀具切削稳定性研究及切削机理研究、典型零件切削数据库的开发。这 12 个模块的研究，贯穿了整个项目研发的全过程，从刀具材料的研发、刀具结构的设计、刀具生产工艺的优化、刀具使用的配套，直到切削数据库的建立，全面覆盖了汽车发动机精密高效加工的各个方面。

“汽车发动机配套精密高效刀具”课题开发项目经过 3 年的探索，突破了 30 项关键技术，其中，在精加工面铣刀具方面突破的关键技术包括：修光刃技术、产品磨削工艺与结构匹配技术、刃口处理技术、精密调节技术和精加工应用技术等，形成了具有自主知识产权的核心技术和产品。

通过课题的实施，株洲钻石切削刀具股份有限公司自主开发了曲轴加工复合铣刀、曲轴孔加工镗刀、30 倍径深孔麻花钻、高速铣削刀盘和精加工面铣刀盘等高难度的刀具共 300 余种，并开发了 3 种材料涂层，形成了 69 个系列的产品，从而为突破汽车发动机主要零部件——缸体、缸盖、曲轴、连杆和凸轮轴等的制造工艺而提供了刀具配套保障。

随着这些具有自主知识产权的汽车发动机刀具配套解决方案的开发成功，使得国产刀具在国内市场的占有率提高到了 30% 以上。目前，该课题开发的刀具，已在奇瑞汽车股份有限公司和神龙汽车有限公司形成整线配套，并在东风康明斯发动机有限公司、广西玉柴机器股份有限公司和长城汽车股份有限公司实现了横向推广应用。其中，为课题用户单位的 3 条典型发动机生产线提供的 9 套刀具配套方案，达到了 90% 以上的配套率，各项技术指标均满足了客户现场要求，部分产品达到或超过了国际先进刀企的水平。

目前，株洲钻石切削刀具股份有限公司已形成了“为汽车发动机及其零部件制造批量供应配套刀具”的生产能力，3 年累计新增销售额 3.5 亿元。同时，累计帮助课题用户单位降低发动机刀具消耗成本达 1800 多万元，提升了客户的整体



高速面铣刀具



曲轴孔加工刀具

竞争力。

在课题研发过程中，株洲钻石切削刀具股份有限公司多次组织了较大规模的技术交流研讨会和成果发布会，在倡导并组织成立“汽车发动机精密高效刀具技术企业联盟”方面发挥了积极的推动作用，逐步形成了“以刀具生产企业为龙头，联合上游原料企业、下游用户企业以及高等院校和科研机构等作为主体”的产、学、研、用相结合的刀具研发平台。该刀具研发平台的建成，为顺利完成课题任务指标提供了有力的保障。例如，山东大学开展的抗振机理研究，为株洲钻石切削刀具股份有限公司开发减振刀具提供了帮助；华东理工大学在曲轴加工工艺和相关理论方面的深入研究，为株洲钻石切削刀具股份有限公司开发曲轴复合铣刀提供了有效支撑；哈尔滨量具刃具集团有限责任公司为株洲钻石切削刀具股份有限公司提供了近 300 件精密工具系统，为工具系统国产化作出了积极贡献。目前，该刀具研发平台已发展成为国内最大的汽车发动机高效切削刀具及超硬刀具的研发平台之一。

该研发平台通过对课题合作单位设备能力的充分利用，采取设备集中与分散式布置相结合的方式，分别建成了：汽车发动机非标刀体制造子线、汽车发动机专用刀片制造

子线、汽车发动机整体硬质合金铣刀制造子线和汽车发动机超硬刀具制造子线，开展了汽车行业专用工具系统的研究，初步建立了汽车行业专用数据库，对行业数据进行了系统管理和应用，并可简单推理，从而具备了试制所有汽车发动机刀具系列产品类别（刀体、刀片以及超硬和整体硬质合金刀具）的能力。

在对汽车发动机加工工艺进行分析研究，从而开发设计出汽车发动机加工用非标专用刀具的基础上，课题组成员还开发了夹具量仪以及针对所有汽车发动机刀具系列的编程系统构架，制订了检验标准，研究了工装、检测技术、热处理工艺，以及批量化制造技术和批量化转产技术，在此基础上，开发出缸体开档面加工组合刀具、缸体止推面加工组合刀具以及曲轴孔油槽加工组合刀具等共计 21 个系列的非标刀具。

目前，“汽车发动机配套精密高效刀具”



大长径比深孔加工刀具

课题已拥有专利 78 项，授权 39 项，其中，发明专利 50 项，授权 12 项；形成软件著作权一项，制定技术规范或标准 35 项（如数控刀片牌号成品性能要求、CBN 标准刀片刃口检查标准等）；发表高水平论文 27 篇，其中 13 篇是 SCI 英文论文。

总之，通过实施“汽车发动机配套精密高效刀具”课题，提升了我国汽车刀具行业的自主创新能力，提高了国产刀具在汽车关键零部件加工中的应用率，改变了国产刀具发

展与国产高档数控机床发展不平衡的现状，扭转了国产刀具不能为国家支柱产业提供有效支撑的落后局面，打破了国外技术壁垒，大幅节省了汽车制造企业的成本，为推动我国汽车发动机行业的技术进步，同时也为航空航天、能源和装备等其他行业的发展提供可靠的刀具解决方案奠定了基础。

通过开展“汽车发动机配套精密高效刀具”课题研究，株洲钻石切削刀具股份有限公司在为汽车发动机制造行业提供配套的精密



孔加工刀具

密高效刀具方面取得了突破性的进展，为响应 04 专项提出的“攻克功能部件的核心关键技术”而发挥了积极的推动作用。但尽管如此，目前仍存在问题，主要包括：

1. 在汽车发动机生产线的引进过程中，由于进口刀具占据了绝对的主导地位，导致国产刀具替代进口存在很大的障碍。

2. 标准化基础薄弱，国家和企业标准的总体水平偏低，制定周期长，很难适应当前快速变化的新要求。

3. 与进口刀具相比，国产的高端刀具，在材料、成型、磨削、刃口和涂层等方面仍存在较大差距，导致在高端市场的占比差强人意。

以“汽车发动机配套精密高效刀具”课题成果为契机，株洲钻石切削刀具股份有限公司将加大标准开发和技术评价体系的研究力度，继续开展精密刀具的研发和技术配套，不断开拓创新，争取在各个精密加工领域都实现突破。

北京机械工业自动化研究所有限公司

汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备

文 / 朱晓民

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,北京机械工业自动化研究所有限公司牵头,联合北京工业大学一起,开展了“汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备”的研制工作。该课题自主创新研制的汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备,用于汽车 MT 和 AMT 自动变速器总成以及 AMT 液压速选器装配后下线前的交检试验,是汽车变速器生产不可或缺的关键设备。课题涉及到机械、电控、测量、液压和智能化故障诊断、汽车变速器试验技术等多个学科和专业领域的技术,设备技术要求高,研制难度大,此前一直依赖进口。

通过对多品种 MT 和 AMT 自动汽车变

速器在线试验工艺、智能化试验设备及其配套装置的全方位攻关,课题组研制出了适应多品种 MT 和 AMT 自动变速器的汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备,包括汽车 MT 和 AMT 变速器总成在线检测试验设备以及 AMT 液压速选器部件试验设备,不仅性能和可靠性高,而且具有智能分析诊断功能。同时,课题组还开发了设计、制造和综合性能检测等全套技术,形成了批量生产能力,满足了我国汽车工业领域的急需。

本课题自主研发了汽车变速器智能化在线检测试验设备相关技术,包括:系列产品的设计与制造、试验装备的动态特性分析、变速器总成和速选器的试验工艺,以及交流伺服电封闭的高精度驱动、加载,精密控制



AMT 液压速选器部件试验设备



汽车 AMT 变速器总成智能化在线检测试验设备



利用课题成果研发的 CVT 智能化在线检测试验设备

和测量，设备降噪，基于振动分析的变速器故障分析诊断，自动化和智能化试验，由 MT 试验向 AMT 以及其他自动变速器试验的功能扩展等技术。全面掌握了汽车 AMT 变速器智能化在线检测试验设备主机与辅助系统的自主研发设计及制造技术，并得到实际生产应用验证，摆脱了国内在汽车自动变速器试验设备方面受制于人的状况。

本课题获得了发明专利 2 项、实用新型专利 2 项和软件著作权 2 项，发表了研究论文 15 篇（3 篇 EI 收录），培养了 10 余名业务骨干和研究生，研究生学位论文《AMT 试验台自动换挡控制系统研究》被评为机械科学研究总院优秀学位论文。

本课题在总体设计方案、试验功能、设备结构、驱动加载方式以及控制和测量系统、



利用课题成果研发的 MT 和电动车变速器智能化在线检测试验设备

AMT 液压速选器部件试验、设备智能化等方面实现了多项创新，设备的功能、性能指标、整机运行可靠性和精度稳定性以及自动化、柔性化、智能化程度等都非常高，达到国际领先水平。

本课题研制的设备通过了国家机床质量监督检测中心和江西省计量测试研究院的性能检验，课题全面达到了相关“04 专项”课题任务书的要求，顺利通过了 04 专项办组织的技术终验收。

目前，课题成果已转化为多种变速器（包括 MT、AMT 以及电动车变速器等）试验设备产品，广泛应用到格特拉克和奇瑞等十几家用户企业中。仅面向格特拉克，就先后销售了 18 台套变速器总成在线检测试验设备。

利用该课题成果，还开发了汽车无级自动变速器（CVT）试验设备，成功应用于北汽动力和湖南江麓容大公司，保证了用户的产品生产能力和质量，提高了其市场竞争力，

因而受到一致好评，经济效益和社会效益都非常显著。

通过课题的实施，还在北京机械工业自动化研究所有限公司形成了汽车变速器智能化在线检测试验设备产业化制造示范基地。同时，在格特拉克（江西）传动有限公司形成了汽车 MT 和 AMT 以及电动车变速器总成在线检测试验设备示范应用基地。该公司为德资控股，变速器的年生产能力达到 100 万台以上，行业影响力非常大。

本课题研究开发的汽车变速器智能化在线检测试验设备是各汽车变速器制造厂家急需的质量控制手段，设备价格只有欧洲进口设备的 $1/3 \sim 1/2$ ，能够为汽车变速器生产厂家节省大量设备投资，市场前景非常好。因此，本课题成果对保障我国变速器产品的质量和产量、提高我国汽车制造装备的水平，以及促进我国汽车工业及其装备制造领域的技术进步和发展都具有积极的作用。

中国重型汽车集团有限公司

“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”课题取得圆满成功

课题目标及概况

“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”）“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”课题，起止时间为 2014 年 1 月至 2017 年 12 月，目前已基本完成任务书工作，预计 2018 年 6 月完成验收相关工作。

为推进 04 专项主机类产品的产业化，本课题在前期研究成果基础上，围绕重卡桥壳领域关键件加工对成套装备提出的低成本、柔性化制造要求，以实施重卡驱动桥壳柔性化生产、满足加工精度要求以及提高生产效率为目标，研究了重卡桥壳加工集成柔性化工艺、关键装备、物流系统及成线工艺适应性技术，研制出重卡桥壳柔性化生产的关键成套装备。采用国产成套装备替代进口，

降低了成本，为汽车加工装备的自主化制造提供了支撑，促进了产业结构的调整和升级。

本课题主要针对国产高档数控机床的现状，结合重卡桥壳加工工艺特点，通过对 04 专项支持的数控机床、共性技术等成果开展实际工程应用，发现并解决了国产高档数控机床在实际应用中存在的问题，完善了机床功能，提高了机床的精度和可靠性以及工件的加工质量和加工效率。以共性技术研究成果为支撑，实现了多类国产高档数控机床在重卡桥壳生产线中的应用。根据应用过程中存在的问题，提出了国产高档数控机床的优化设计方案，为国产机床的后续开发提供了经验借鉴，提高了国产高档数控机床的研发水平和产业化水平。

“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”



数控切削中心集群



卧式加工中心集群

重卡桥壳生产线

课题的实施，基于开放式数控系统平台，通过开发面向重卡桥壳柔性加工的专用机床的控制技术和关键工艺，并投入实际应用，有效地完善了国产数控系统的功能和技术，扩大了系统覆盖机床的种类，提高了市场占有率。与此同时，在加工重卡桥壳部件的国产高端装备中使用国产滚珠丝杠等功能部件，提高了国产功能部件的性能及可靠性。

近年来，中国重型汽车集团有限公司先后引进了网络智能化重卡桥壳自动加工线、重卡减壳自动加工线及主减速器壳FMS生产线等6条进口设备加工生产线，整合了复合加工技术、智能识别技术和机器人技术等多项前沿技术成果，实现了对世界最先进加工理念的集成，令重卡桥壳工艺的先进性、设备的加工精度均处于国内外同行业先进水平。而柔性化的主减速器装配线和桥总成装配线则实现了对多品种车桥的装配和质量控制。

重卡桥壳柔性加工生产线运用了先进的关节机器人自动上下料系统、工件在夹具中的自动准确定位系统、工装到位检测系统以及工件品种识别、在线诊断、关键尺寸在线

检测、刀具寿命管理、破损检测、加工管理、柔性加工、复合加工等多项先进技术，创新性地优化并开发出重型卡车桥壳加工工艺，首次实现了国产大型双工位卧式加工中心对重卡桥壳的柔性加工，为国内外同行业提供了借鉴。通过上述研究，掌握了国产机床开放、集成应用体系，增强了技术人员的研发和创新能力，为提高国产高端装备的制造能力、进一步验证重卡桥壳柔性加工工艺的适用性而提供了技术和人员保障。

课题研究工作

“重卡桥壳柔性加工工艺研究及生产线”课题由中国重型汽车集团有限公司牵头，沈阳机床成套设备有限责任公司、山东大学、齐鲁工业大学、沈阳高精数控智能技术股份有限公司和陕西汉江机床有限公司共同参与，强强联合，保证了课题的顺利实施。

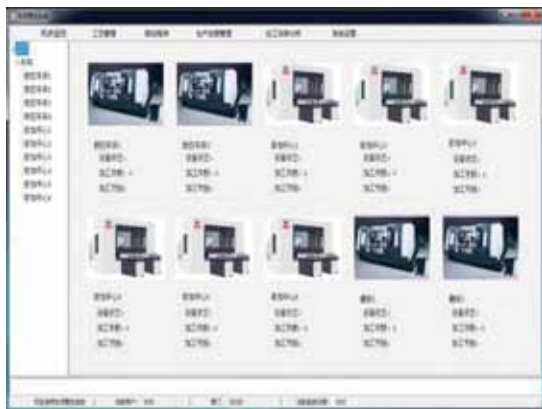
课题组成员在对重卡桥壳加工领域国内外现状进行调研的基础上，开展了桥壳柔性加工工艺的研究，优化并建立了重卡桥壳柔性化工艺流程。通过对比国内重卡桥壳生产基地加工桥壳基本工艺水平和现状，提出了课题工艺的优化方向，并形成了一套由卧式



滚珠丝杠副部分实物



国产数控系统应用



车间管控系统主界面

加工中心、车削中心和数控端面外圆磨床为关键设备的重卡桥壳柔性生产线工艺，令生产线实现了2个品种（或规格）以上的共线生产和机器人的自动上下料。

根据重卡桥壳柔性加工需求，结合国产装备特点，主要开展了以下研究工作：

1. 重卡桥壳柔性加工生产线的工艺技术研究、优化提升；
2. 国产关键机床装备的设计制造技术研究及精密卧式加工中心、车削加工中心成线工艺适应性关键技术研究；
3. 重卡桥壳柔性加工用国产关键功能部件、定制化数控系统的研究与应用验证；
4. 重卡桥壳加工自动化物流、调度及监控系统的研发；
5. 重卡桥壳检测系统的研制与应用。

课题主要对典型重卡桥壳加工工艺进行了分析，对工艺方案进行了优化。基于优化的重卡桥壳加工工艺：分析并提出了生产线对设备的需求，设计了重卡桥壳柔性生产线所需的工装夹具，使其满足了2个以上典型重卡桥壳品种的共线生产需要；分析了重卡桥壳柔性生产线对刀具的需求，选择了所需刀具，并对进口及国产刀具进行了对比应用；



数字化车间电子屏应用

完成了生产线的组线，构建了基于AGV小车和关节机器人的物流系统，通过对国产设备及其配套设施的现场应用，验证了国产机床在实际应用中的效果，完成了相关技术指标和经济指标。

取得的成果

1. 建成了一条由卧式加工中心、车削中心、数控端面外圆磨床和辅助物流设备组成的重卡桥壳生产线，满足了2个以上品种（或规格）的共线生产需求，其中，采用前期04专项成果（或技术）的设备大于6台。

2. 关键加工设备指标达到考核要求，其中，双工位高精度卧式加工中心的X、Y、Z定位精度 $\leq 0.009\text{ mm}$ ，重复定位精度 $\leq 0.006\text{ mm}$ ；转台B定位精度 $\leq 8''$ ，重复定位精度 $\leq 5''$ ；主轴端部径向跳动 $\leq 0.003\text{ mm}$ ，工作台交换重复定位精度 $\pm 0.005\text{ mm}$ ；设备MTBF $\geq 1\,500\text{ h}$ 。

3. 产品精度指标达到考核要求：桥壳最大外形尺寸 $2\,050\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 650\text{ mm}$ ，主要内孔精度 $\leq \text{IT}6$ ，孔位置精度 $\leq 0.10\text{ mm}$ ；两法兰端面对公共轴线基准的端面跳动 $\leq 0.05\text{ mm}$ ；主要技术参数Cmk



机床在线检测系统应用

值 ≥ 1.67 。

4. 生产线年产能 ≥ 4 万件，设备开动率 $\geq 75\%$ 。

5. 在大于 20% 的设备上采用国产数控系统进行对比验证，国产功能部件及刀具的配套率大于 30%。

6. 通过生产线的实际使用验证，促进了 04 专项主机类产品的产业化，实现了国产中高档数控机床在重卡企业的应用。

7. 通过解决相关技术难题，开发面向重卡桥壳柔性加工的专用数控系统，并在汽车关键结构件生产线上形成应用示范，推动了国产专用型数控系统在汽车制造等 04 专项重点领域的配套应用。

课题管理及人才队伍建设

在课题实施过程中，中国重型汽车集团有限公司定期组织召开信息交流会，通报项目进展情况。同时，建立了专门的微信群，方便课题组成员随时了解情况，提出需要协同解决的问题，以凝聚力量，联合攻关。

通过课题的实施，培养、锻炼了一支重卡桥壳生产线及相关设备的研发队伍，包括工艺设计和施工、数控程序设计、设备维护、

号	值	号	值
00548	511.56589554	00560	111.019438955
00549	0.0000	00561	600.0000
00550	0.0130	00562	10.0000
00551	0.43350296000	00563	600.0000
00552	510.539504692	00564	0.0000
00553	0.0000	00565	2.0000
00554	-105.31400096	00566	0.0000
00555	621.341006086	00567	0.0000
00556	-655.3350	00568	0.0000
00557	0.43350296000	00569	0.0000
00558	511.50096558	00570	11.0000
00559	-104.986052245	00571	0.0000

用户宏程序实时测量数据

项目管理和生产组织管理等方面的高、中和初级人才，为重卡桥壳柔性加工线的设计和应用提供了人才保证。

经济和社会效益

本课题研发的国产数控机床已在中国重型汽车集团济南桥箱有限公司桥壳加工部成功组线并应用。在此过程中，对两台数控车削中心和两台数控车床的加工能力进行了考核，验证了其在加工重卡桥壳时的回转稳定性和可靠性。此外，6 台大回转直径双交换工作台卧式加工中心首次在国内实现了重卡桥壳的加工，并与关节机器人自动上下料系统成功组成了重卡桥壳柔性加工自动化集成生产线。

本课题解决了传统工艺工序分散、相关成品尺寸精度低及生产线占地面积大等问题，首次实现了重卡桥壳加工集成化工艺在国产成套加工装备上的实施应用，为国产大型零部件成套加工设备在国内重卡行业的推广应用树立了典范。

在课题实施过程中，培养了一批具备理论和实践能力的研发人员，提升了相关人员的创新意识和能力，为今后的技术创新打下

了坚实的基础。课题研究的大回转直径双交换工作台卧式加工中心，打破了欧、美、日等发达国家在此成品领域的垄断地位，提升了自主品牌的市场竞争力。此外，课题总结的重卡桥壳大型零部件柔性加工工艺，也为国内汽车行业带来了借鉴。

本课题研发的重卡桥壳柔性加工生产线，具备年产4万件桥壳的生产能力，2017年加工桥壳25 000余件，新增产值3 465万元，净利润500余万元。

存在的问题及建议

1. 进一步加强国产数控机床核心技术的研发。我国是数控机床的制造和应用大国，但不是强国，因此，仍需加强数字化设计与制造、测试评价及可靠性技术等方面的创新和突破。同时，还要彻底解决五大核心技术问题，即：机电耦合系统优化技术、柔性制造集成技术、伺服驱动技术、先进数控技术和复合加工技术。根据国产数控机床在中国重型汽车集团有限公司的应用情况，机床运

行的可靠性尚待提高，设备的开动率是确保自动化生产线正常运行的关键指标。要满足现场大批量生产可靠性技术要求，依然任重道远，需要不断加大研发力度，才能确保国产数控机床具备核心竞争力。

2. 加强课题技术成果的共享交流。课题通过成功建成一条重卡桥壳柔性生产线，实现了国产双工位卧式加工中心在重卡桥壳生产线上的首次应用，并成功组建了一条机器人上下料系统，提高了生产线的自动化及智能化水平，满足了多品种加工需求，而且工艺简洁、集成度高、柔性强。使用3种不同规格的设备，即可实现不少于2个桥壳品种的共线生产。课题首次实现了桥壳加工集成化工艺以及桥壳柔性化多品种加工工艺在国产成套加工装备上的应用，具有自主知识产权，现已申请3项专利、5项行业标准。为推动上述技术成果在国产装备以及在同行业中的广泛应用，希望工信部、04专项实施管理办公室积极搭建技术交流平台，实现资源共享。

营口华润有色金属制造有限公司

建设高硅铝合金无缸套发动机缸体生产线，向世界水平迈进

2015 年，营口华润有色金属制造有限公司（以下简称“营口华润”）牵头，联合大连华根机械有限公司、吉林大学、宁夏银川大河数控机床有限公司、武汉华中数控股份有限公司、株洲钻石切削刀具股份有限公司和中国第一汽车股份有限公司（以下简称“一汽”），共同申报了“高硅铝合金无缸套发动机缸体关键制造技术和装备研究及示范应用”课题。课题实施时间为 2015 年 1 月～2017 年 12 月。

截止到 2017 年 12 月 31 日，课题按计划完成了预定任务，形成了 4 项关键技术，申报了 6 项发明专利（已授权 3 项），发布了 12 项技术规范和标准，撰写、上报了 7 份科技文献、20 份研究报告，发表论文 3 篇，培养博士 2 人、硕士 3 人，建立起了 60 人的研发队伍。2018 年 4 月 25 日，课题通过验收。

背景及意义

为实现“到 2020 年乘用车平均燃料消耗量降至 5.0 L/100 km”的目标，近年来，用铝合金替代传统铸铁用于发动机缸体制造已成为一大发展趋势。但是，由此带来的问题是，缸筒表面的耐磨性明显降低，而采用

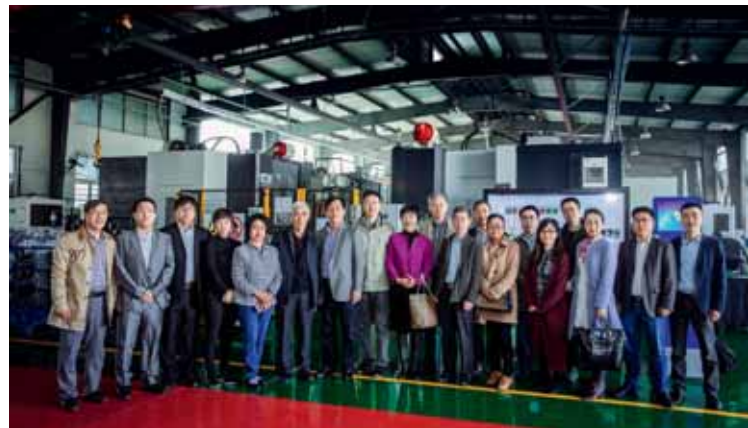
铸铁作为缸套嵌入铝合金缸体内，虽然提高了耐磨性，却增加了重量，降低了热导率，而且由于两种材料热膨胀系数不同，易引发潜在失效问题。因此，寻找替代铸铁但又能增强缸孔表面耐磨性的材料或工艺，就成为现阶段汽车制造亟待解决的难题之一。

经过近 8 年的研究，营口华润开发出了过共晶高硅铝合金材料。这种过共晶高硅铝合金具有较好的耐磨性、耐热性、传热性、抗疲劳性和较低的摩擦系数，是制造铝合金缸体的理想材料，用其制成的缸体无需添加铸铁缸套，因而有助于减轻发动机重量，降低汽车能耗和排放，而且其铸造成本与铸铁缸体相当，并减少了加工成本。

与普通铸铝缸体相比，这种高硅铝合金无缸套缸体可使发动机单机重量降低 10%；与铸铁缸体相比，可使发动机单机重量降低



04 专项专家组领导现场指导



验收会现场合影

45% 以上。另外，由于铝的传热系数（130 W/m-K）是铸铁传热系数（46 W/m-K）的近 3 倍，因而良好的传热有利于发动机快速暖机，缩短发动机冷启动暖机时间，从而减少摩擦损失。不仅如此，在高硅铝合金中分布均匀、细小的众多初晶硅硬质颗粒，在摩擦开始时起耐磨和支撑的作用，而软的铝基体在摩擦磨损后会产生凹坑，具有储油、润滑的作用，可有效降低摩擦损耗。

基于以上三大优势，令本课题研制的高硅铝合金无缸套缸体与传统发动机缸体相比，油耗可降低约 2% ~ 5%，目前已在一汽得到了验证，并应用于红旗新车型的发动机中。

通过本课题的实施，不仅对“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”）支持的冷、热加工装备进行了示范应用，验证并提升了这些装备的性能，而且还填补了我国高硅铝合金无缸套缸体冷、热加工生产线空白，使我国具备了此类缸体的批量生产能力，这对于提升我国冷、热加工装备和工艺的技术水平，推动我国汽车产业向轻量化方向发展具有重大意义。

目标和任务

本课题的目标是，针对我国目前具有自主知识产权的高硅铝合金无缸套缸体加工要求，应用 04 专项前期支持的课题所取得的阶段性成果，以高效高精加工中心、高精度数控珩磨设备为主体，开发适合多品种、变批量高硅铝合金无缸套缸体加工生产线，并投入示范应用。以此，突破高硅铝合金无缸套缸体高效高精镗铣加工技术、精密珩磨技术等共性技术，掌握高硅铝合金无缸套缸体加工技术，形成生产线集成能力，填补国内高硅铝合金无缸套缸体加工生产线空白。通过批量生产示范应用，提高国产数控装备的可靠性和性能稳定性，增强用户使用国产高档数控机床的信心，促进国产数控装备在汽车发动机关键零部件加工领域的广泛应用。

为此，课题的主要任务和要求是：

1. 建设一条高硅铝合金无缸套缸体加工生产线，以实现多品种、变批量生产，生产节拍 ≤ 180 s，生产能力 ≥ 10 万台/年。
2. 配套设备含 20 台以上卧式加工中心，要求缸体生产线关键工序能力指数 CPK 值 ≥ 1.67 。
3. 对国产数控系统以及丝杠、导轨、转台、刀库和主轴等 5 类功能部件中的至少两类功能部件进行应用验证，国产数控系统的配套比例不低于 50%，国产功能部件的配套比例不低于 50%。
4. 每一台（套）机床、数控系统和功能部件在交付用户使用前，分别在机床、系统和部件的制造企业处进行 2 000 h 以上、10 000 h 以上和 10 000 h（刀库 100 万次）以上的模拟实际工况的运行试验，并编写试

验报告。

5. 机床 MTBF 达到 1 500 h 以上。

6. 课题牵头单位对投入实际使用的机床、数控系统和功能部件的运行故障予以记录，并形成故障统计和分析报告。

7. 满足用户使用要求，设备在用户处实际应用一年以上。

8. 申请 5 项以上发明专利，形成 10 项以上设备制造与应用的技术规范或标准，并在生产中实际应用。

9. 课题牵头单位建立起不少于 10 人的专职研发团队。

主要研究工作

本课题自 2015 年 1 月开始实施，主要完成了以下研究工作：

1. 国产数控机床在高硅铝合金无缸套发动机缸体生产自动线上应用的工艺规划研究

通过工艺规划，实现了国产数控机床在汽车发动机缸体生产线上的批量应用，研究内容包括：高硅铝合金无缸套发动机缸体加工工艺方法；生产线的工艺规划及流程设计，对加工设备提出基本要求；针对生产线中的

不同工序，选型并配置适合的加工设备。

2. 高硅铝合金发动机无缸套缸体生产线加工工艺研究

解决了缸体生产线加工工艺中，加工基准的选择和应用，刀具及切削参数的选择、管理和应用，夹具的研究与应用，物流控制与管理等技术难题。形成的核心技术包括：

(1) 高硅铝合金无缸套发动机缸体加工技术，包括：加工工艺路线、工艺方法和加工质量控制、加工工艺参数的优化、工艺装备和生产线布局设计等；

(2) 高硅铝合金无缸套发动机缸体切削性能及切削工艺，涉及：零件分析、加工工艺和工艺路线；

(3) 柔性夹具结构技术，即夹具的标准化、模块化、柔性化和防差错技术；

(4) 夹具多通道夹压技术；

(5) 夹具与机床、物流、刀具和零件的适应性技术；

(6) 针对发动机缸体关键零部件的结构特点，建立了相应的刀具切削性能评价体系；

(7) 开展了缸体超硬材料加工的刀具示范应用，开发了高速高效切削参数库；



高硅铝合金无缸套发动机缸体加工生产线全景图

(8) 针对缸体超硬材料的加工, 改进了刀具的切削性能;

(9) 快速换刀技术;

(10) 物流方式、物流系统的适应性及物流系统的总体设计;

(11) 物流自动识别技术;

(12) 防碰撞技术;

(13) 托盘快速交换技术。

3. 可靠性技术在生产线上的研究与应用

通过对珩磨网纹理论进行研究, 对网纹参数进行优选, 研究并应用了珩磨夹具、珩磨工艺参数及检验方法, 掌握了缸孔平台网纹珩磨工艺技术, 为发动机减磨和降低油耗提供了支持。

主要技术成果

1. 建成了一条全部由国产数控机床组成的高硅铝合金无缸套发动机缸体加工生产线, 含卧式加工中心 20 台、立式加工中心 8 台、双工位珩磨机 1 台、清洗机 2 台以及浸渗机、螺纹拧紧机、密封试验机、缸体自动综合测量仪、打标机和涂油机等共计 39 台国产设备。整条生产线完全采用机器人自动上下料, 可实现无人操作以及多品种、变批量的生产, 生产能力 10 万台/年以上, 加工水平可与进口机床组线的缸体生产线相媲美, 但成本明显降低, 仅为进口生产线的 50% 左右。

2. 课题研制的具有自主知识产权的高硅铝合金无缸套发动机缸体, 各项技术指标达到国外同类产品水平, 在国内处于领先水平。

3. 在营口华润建成了一个示范应用基地, 对 04 专项支持的高档数控机床和共性

技术成果进行了应用验证。

创新基地建设

本课题在实施过程中非常注重关键核心技术的研究和产品的推广应用, 建立了相应的创新平台和产业化基地。比如, 作为营口华润的专利产品, 高硅铝合金无缸套发动机缸体具有完全的自主知识产权, 是未来发动机的一项新技术, 可实现发动机的减重、节能; 所建成的国内独一无二的高硅铝合金无缸套发动机缸体生产基地, 具备了从技术开发、工艺设计、毛坯铸造、机械加工直至缸体成品的综合技术能力。在此工艺平台上, 还可应用相应的加工技术, 对更多品种的缸体进行加工, 与此同时, 还促进了缸体铸造能力的提升。

企业创新能力和市场知名度显著提升

通过课题的实施, 极大地提升了课题责任单位及参与单位的技术创新能力, 增强了企业产品的市场认可度, 提升了企业的知名度和市场竞争力。由于培养了一批具有创新能力的高素质人才, 为企业的技术创新带来了后劲。

通过课题的实施, 令营口华润从一家名不见经传的民营企业发展成为发动机行业中具有一定市场知名度的企业, 技术创新能力和市场竞争能力显著提高。以高硅铝合金无缸套发动机缸体关键制造技术为研发和制造平台, 营口华润有信心用 2 ~ 3 年的时间令缸体产能达到 40 ~ 50 万台, 现已开始规划新的发展思路。

江苏长虹智能装备股份有限公司

为涂装生产实现自动化、智能化、数字化和信息化奠定基础

“乘用车车身环保柔性涂装生产线”课题研发

2014年1月~2017年12月,江苏长虹智能装备股份有限公司承担了“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“乘用车车身环保柔性涂装生产线”课题,目标是:

1. 开发国际首创的汽车混联喷涂机器人和集调式三维仿真、运行管理和自动控制等功能于一体的汽车喷涂机器人开放式控制系统,解决传统汽车涂装生产线喷涂质量差、涂料利用率低、自动化程度低、耗能高和污染重等难题。

2. 开发大型乘用车PVC及中、面涂生产线使用的滑撬输送系统和前处理用新型输送机,对输送系统中的驱动滚道、升降设备、横向转移机、堆垛机和卸垛机等进行优化设计,使之满足不同品种、不同工艺功能的涂装柔性生产要求。

3. 集成反渗透水处理、热能回收等技术,实现涂装生产的清洁化和节能环保。

4. 研究以太网及总线控制技术,使得涂装生产线能够适应同类涂料以及不同涂料涂装工艺流程的要求、关键工序不同工艺参数之间的模糊适配,以满足涂装产品的全线智能识别与跟踪、基于网络平台的数字化集

散控制、涂装产品质量的智能化过程控制与记录等要求。

为此,主要开展了以下研究及应用工作:

1. 喷涂机器人

(1) 构型综合及优化设计。基于喷涂工艺及传统喷涂机器人的功能,提出了具有自主知识产权的混联喷涂机器人构型,并考虑机器人的防爆及输调漆系统要求,设计了喷涂机器人的总体布局方案。根据喷涂机器人的应用需求,研究了性能评价方法,给出了相应的评价指标,并进一步根据评价指标,总结出一套相应的优化设计方法。

(2) 动态特性分析及精度保证。动力学特性直接影响机构动态特性乃至加工精度,对机器人进行动力学特性分析,是保证整机特性的关键。因此,要求建立动力学模型并分析相应的动态特性。机器人的喷涂效果与机器人的精度有关,为此,需要研究机器人的精度,具体包括:精度分析、精度综合、标定和软件补偿。

(3) 喷涂机器人控制技术。控制技术是喷涂机器人的关键技术,喷涂控制过程中,需要考虑输调漆系统、机器人的防爆等问题,研究喷涂机器人的喷涂工艺及仿真系统、轨迹规划、示教及编程等。机器人喷涂系统由



喷涂机器人

喷涂机器人、输送链同步跟踪系统、工件检测启动装置、系统总控制柜、自动洗枪机和气动控制柜等构成，所以还需要研究机器人喷涂系统的综合控制技术。对此，原创性地提出了喷涂机器人构型设计，完成了机器人图样设计、动力学分析和样机试制等工作，打破了国外喷涂机器人在国内涂装生产线上处于垄断的行业壁垒。

2. 新型涂装输送机

(1) 电泳涂装工艺分析及构型创新。汽车电泳涂装工艺分析是开展本课题的前提和基础。电泳工艺包括：前处理、脱脂、水洗、表调、磷化、水洗、纯水洗、电泳和超滤水洗等 10 多道前处理电泳工序。汽车电泳涂装工艺与汽车白车身输送设备——输送机的结构和性能密切相关，必须研究电泳工艺对输送机的结构及运动性能的要求。构型创新是新型输送机构设计的首要环节，也是输送机创新的根本，其目的是，在给定条件下，寻求最优的总体机构结构布局。为了克服现有汽车涂装输送机的缺点，本课题拟提出一种汽车电泳涂装专用物流输送系统，新机构将满足涂装工艺要求，实现车身摆动，且结构简单。

(2) 物流机械系统的控制。控制是物流输送系统运动的必要环节，要求基于电泳涂装工艺对输送机的运动精度要求，确定控制系统的控制策略，规划系统软硬件结构体系，研究涂装过程中输送机械系统的控制方案以及整线各新型输送机之间的协调控制技术。为此，提出了新型涂装输送机的构型设计，完成了输送机图样设计及样机制造，并将其应用到生产线中。

3. 滑橇系统的优化

传统的滑橇输送系统噪声大、故障率高，尤其在高温烘干炉中运行时，由于没有很好的润滑办法，导致故障率更高。因此，需要研究驱动滚道、升降设备、横向转移机、堆垛机和卸垛机等滑橇输送系统基本单元的工作原理和机制，寻找新型替换材料以及新型传动方法，降低设备运行的故障率和噪声。基于此，研发了乘用车 PVC 及中、面涂生产线使用的滑橇输送系统。该输送系统适应性强、便于储存积放和多元体组合，功能结构紧凑，运行稳定性强，故障率少，降低了生产噪声。

4. 反渗透水处理及热能回收系统的研制

通常，底漆电泳需大量电导率低于 $5\mu\text{s/cm}$ 的去离子水，因此，需要研究反渗透应用工艺，开发反渗透水处理系统，以提高水的处理率。传统的热能回收系统存在废气处理及排放不达标、循环空气洁净度不达标、成套设备成本高、能源浪费严重等缺点以及火源点较多等安全隐患，为此，需要研究烘干室供热技术及热能回收方法，开发新型热能回收系统，解决废气处理及排放不达

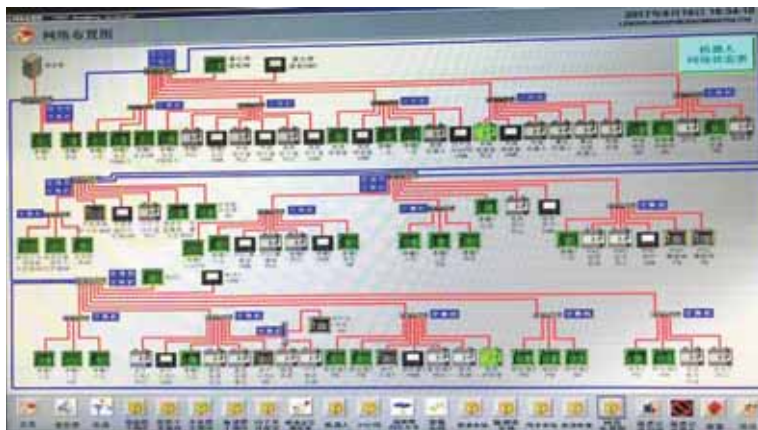
标、循环空气洁净度差等问题。

5. 喷涂生产线控制技术研制

(1) 智能化控制技术及工艺组合模块化技术。利用试验涂装生产线的中试结果、长期积累的涂装生产线设计、制造经验以及汽车涂装的产品质量跟踪资料，建立模块

化的涂装工艺结构模型、重点工序工艺参数控制模型、关键质量指标检测与控制模型、生产线运行动态管理模型、智能化集散实时控制模型以及各种标准参数数据库和涂装技术智能化控制系统，实现对生产工艺和运输过程的智能化和自动化控制。

(2) 车身识别技术。研究喷涂生产线上



以太网控制总图

的车身识别技术，令一条生产线可以对不同的车型进行喷涂，提高喷涂生产线的柔性；研究工艺参数自动控制、工件自动识别与控制、数字化管理技术；研究采用先进的传感技术，分布式地连接现场各处的传感器，使自动化设备及传感器模块达到智能互联，确保整个涂装生产流程之间的信息交互以及整个系统的顺畅工作与操作的安全性。

(3) 生产线控制技术。研究现场总线和以太网技术方案，使生产线能适应同类涂料以及不同涂料的涂装工艺流程要求，实现涂装产品的全线监控；研究基于网络平台的数字化集散控制，实现涂装产品质量的智能化过程控制与记录，构建生产管理信息系统，从而建立中高档涂装工艺参数智能化管理控制系统；开发能够协调、控制涂料的输送、换色和清洗，显示和选择工件程序号，以及计数等功能，实现与机器人通信、喷涂线故障报警和急停等控制功能；研究 PROFIBUS 总线方式，开发 PLC 与机器人通信方案，以对机器人喷涂进行控制，从而实现中、面



反渗透水处理系统



热能回收系统



机器人优化三维建模

漆涂装智能化生产。

“柔性涂装智能化车间研发与产业化”项目研制

2016年4月，江苏长虹智能装备股份有限公司承担了江苏省科技成果转化项目“柔性涂装智能化车间研发与产业化”，该项目将于2019年3月结束，其目标是：

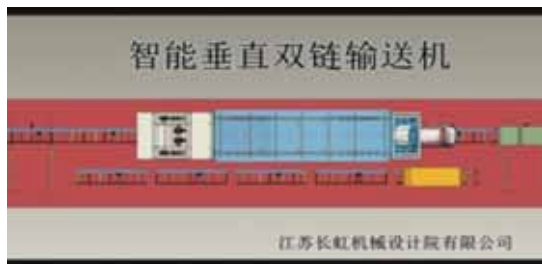
1. 研制并优化涂装关键数字化生产装备；
2. 研制并优化涂装车间柔性自动输送系统；
3. 研制涂装车间数字化节能环保系统；
5. 研制涂装车间关键生产过程监控系统；
5. 优化涂装车间智能控制系统。

对此，主要开展了以下研究和开发工作：

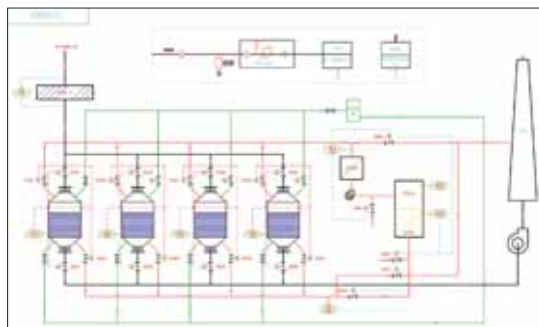
1. 优化了喷涂机器人，完成了图样设计及样机制造；

2. 提高了垂直双链输送机的柔性化水平，完成了图样设计及样机制造。该垂直双链输送机的应用，令涂装生产线的年产量从传统的大约8万辆提高到15~20万辆。

3. 采用数字化节能环保系统，设计了活性炭吸附脱附系统并制造了样机。通常，传统生产线在喷漆过程中产生的废气不经处理



垂直双链输送机展示图



活性炭吸附脱附系统原理图



活性炭吸附脱附系统样机

就通过烟囱直排，严重污染了环境，而该环保设备利用活性炭吸附有机颗粒物，使喷漆室的废气经吸附后达标排放。此外，利用活性炭在高温下可使有机物脱落的特性，研制了活性炭脱附系统，将活性炭吸附的有机物集中送到催化燃烧室处理，使有机物在高温催化燃烧下分解成水和 CO_2 ，从而有效解决了环境污染问题。

4. 在对涂装车间生产过程开展相关调研和需求分析的基础上，设计并制造了关键生产过程（前处理电泳工序）的监控系统。

5. 实现了涂装车间智能化控制系统的模块化设计，完成了样机制造。

目前，上述研究成果已陆续应用到生产线中，应用效果良好。

整体研发能力不断提高

早于2006年，江苏长虹智能装备股份

有限公司就成立了首家民营设计院。2014年，通过引进 windchill、pro/e 三维设计软件并建立电气实验室，实现了对所有柔性涂装智能化车间方案的三维化设计和实验室模拟，从而最大程度地提高了产品质量，减少了项目投资，缩短了建设周期。随着设计能力和资质的不断提升，该民营设计院于2017年在业内首家获得了机械设计甲级资质。

在 04 专项课题实施期内，江苏长虹智能装备股份有限公司被认定为国家级守合同重信用企业、国家级企业技术中心，并建立了国家级博士后科研工作站，课题研发团队被评为江苏省科技创新团队，公司科研实力和竞争力明显增强。与此同时，“长虹”商标被认定为中国驰名商标，长虹牌汽车涂装生产线被认定为江苏省名牌产品。

加强工程服务，积极拓展新业务

在上述课题成果基础上，江苏长虹智能装备股份有限公司积极拓展业务，为客户提供涂装智能化车间总集成、总承包服务，主要包括：

1. 涂装关键数字化生产装备、涂装车间自动柔性输送装备、涂装车间数字化节能环保装备等硬件设备的订制、安装和售后服务；
2. IMES 设计服务，以实现生产进度管理、物料管理、设备管理、质量管理和智能生产调度等综合生产管理功能；
3. ANDON 系统服务，以实现涂装关键工艺参数的自动控制，及涂装关键生产信息的显示、查询、统计和报警等。

通过提供上述总集成、总承包的全套服

务，江苏长虹智能装备股份有限公司致力于帮助汽车企业实现涂装生产的柔性化、数字化和智能化，以缩短生产周期，提高产品质量并降低能耗和生产成本。

为此，江苏长虹智能装备股份有限公司建立了工程指挥部，专业负责柔性涂装智能化车间方案的实施和安装。通过建立项目实施过程控制系统，及时发现工程建设中出现的问题，并为客户监督项目进展提供了方便。客户可以提出修改意见，公司设计人员据此提出修改方案并存入数据库，从而实现了柔性涂装智能化车间方案的持续优化。

另一方面，专业的加工服务公司专门负责工程安装的对接，与全国多地的专业安装公司建立了合作关系。在浙江，设立了技改工程部，为众泰汽车、金华华科、金华双泰、宁海知豆和浙江中车等提供专业的生产线技术改造及安装服务；在重庆，下属分公司为重庆众泰、成都银隆客车和中恒天汽车等提供专业的配件加工服务。通过上述“点面结合”的加工服务模式，为客户节约了成本，最大程度地提高了生产线的使用率，实现了资源集约化目标，提升了盈利空间。

存在的差距

目前，国内汽车行业涂装车间已基本实现了关键装备和系统的基础自动化，但与国际先进水平相比，在涂装数字化车间关键技术和系统研发方面存在较大的差距。由于自主研发能力薄弱，因此，涂装车间的关键装备和系统，如车身喷涂智能机器人、柔性自动输送系统、废气处理及热能回收利用系统等，主要还依赖进口。此外，涂装车间

的关键装备、系统和生产过程仍未在整体上实现数字化和信息化，影响涂装企业综合生产指标的关键工艺参数设定等仍未实现智能化，主要还依赖于人工经验，从而严重制约了我国涂装车间的涂装效率、质量、能耗和成本等综合生产指标的改善及企业经济效益和综合竞争力的提高。随着自动控制、人工智能、通信、计算机和机械制造等技术的飞速发展，提升涂装车间的自动化、数字化、信息化和智能化水平，已成为实现涂装柔性生产、提高涂装车间综合生产指标的关键途

径之一。为此，涂装行业亟需在提高涂装关键生产装备和系统的柔性化、数字化和智能化水平的基础上，构建涂装车间关键生产过程监控系统、关键工序智能运行优化系统，以及以智能优化调度和质量管控为核心的智能制造执行系统，并将上述相关系统与涂装企业 ERP、PLM/PDM 等系统进行有效集成，从而实现涂装车间关键装备、系统和生产过程的数字化、柔性化和智能化，显著改善综合生产指标，提高企业的经济效益和综合竞争力。



用于超临界核电半速转子加工的超重型数控卧式镗车床

武汉重型机床集团有限公司

用于超临界核电半速转子加工的超重型数控卧式镗车床

“用于超临界核电半速转子加工的超重型数控卧式镗车床”是武汉重型机床集团有限公司承担的“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”）课题，课题成果——超重型高档数控卧式镗车复合机床，是迄今为止此类机床中世界上规格最大、承重最大的设备，在国内也属首台首套，主要用于超临界核电半速转子、巨型船舶（航母）舵轴及驱动轴、超大功率汽轮机转子、水轮发电机主轴和大电机主轴等超大、超重型轴套类零件的加工。

巨型舰船异形舵杆和驱动轴、核电转子、超大功率汽轮机转子以及大型轧机支撑辊等高精度复杂零件，是我国重要基础战略产业的关键核心部件。长期以来，由于我国缺乏相应的加工装备，导致此类零件主要依赖进口。而在国外，加工此类零件主要采用卧车、深孔钻床和落地铣镗床等多台重型机床，不仅加工效率低，精度难以保障，而且设备购置成本高。因此，研制具有自主知识产权的集车、铣、磨、深孔钻和大直径深孔镗功能于一体的重型机床，对于打破国外技术垄断，大幅提升我国基础战略产业的国产化装备水平具有极为重大的现实意义。



主轴装配现场



超长镗杆镗孔

在 04 专项的支持下, 武汉重型机床集团有限公司围绕此类零部件对大承载、高精度和多功能复合加工的迫切需求, 开展了核心技术的研究, 取得了一系列创新成果:

1. 针对超长、超重工件的高精度加工难题, 开发了具有静压托的主轴静压支撑技术, 发明了一种变频恒流静压轴承的液压控制系统, 满足了重型机床大承载和高精度的要求; 提出了主轴箱静压系统的理论判据, 使机床在主轴空载状态下即可对承载能力和运行可靠性进行验证, 有效地保证了机床主轴空载调试、重载加工时的精度一致性, 从根本上改变了之前只能用实物验证的难题。最终, 使机床达到了额定承载 500 t (国外最大 400 t)、主轴径向跳动 0.006 mm (国外 0.008 mm) 的世界领先水平。

2. 采用拓扑优化方法, 设计开发了超重型主轴箱; 采用立式造型、三浇口有序浇注和分层冷却技术, 攻克了主轴箱体尺寸大 ($4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$)、结构复杂和壁厚不均匀的铸造难题; 开发出重型偏心主轴箱高精度轴承孔加工技术, 使跨距为 3 280 mm 的两主轴孔同轴度达到 0.01 mm; 采用多点跟踪测位技术, 实现了重型卧车主轴的水平装配。

3. 发明了镗杆横移三支撑同步装置, 解决了大直径直孔、台阶孔、锥孔和波形孔等深孔高精度加工的难题; 开发了八边形四导轨镗杆支撑技术, 攻克了传统圆形镗杆 ($\phi 900\text{ mm} \times 16\,000\text{ mm}$) 易变形、导轨面易磨损的世界难题, 确保了大直径深孔的加工精度。最大镗孔直径达到 3 500 mm, 镗孔深度 8 000 mm,

圆度 0.02 mm。

基于上述成果，形成了两顶尖承重达 500 t 的超重型高精度多功能复合数控机床设计方案，开发出了集车、铣、磨、大直径深孔镗、小直径深孔钻及深孔珩磨等多种功能为一体的机床，实现了重型复杂轴类零件在一台机床上一次装夹完成全部工序的加工，取得了装备设计制造、巨型船舶异形舵杆和核电重型转子加工工艺的重大突破。

该机床的研制成功，使我国成为世界上首个能实现核电重型转子等高精度复杂零件一次装夹完成全部加工工序的国家，标志着我国在重型机床研制方面已处于世界领先水平，极大地提升了我国在重型机床领域的市场地位，为我国装备制造、能源、冶金、远洋和国防建设奠定了坚实的基础。

该课题成果被工信部评为 2011 年度国家“十一五”十大标志性重大装备，入选 2012 年度中国国防科技工业十大新闻，并被中国工业报授予 2012 年度“中国工业新纪录”。此外，还荣获了 2014 年中国机械工业科学技术一等奖、湖北省科技进步一等奖，以及 2016 年“十二五”机械工业重大科技成果奖。

截止到目前，武汉重型机床集团有限公司已先后为 16 家用户提供了系列重型多功能复合数控机床 42 台，其中出口 2 台。该课题获授权发明专利 2 项、实用新型专利 5 项，发表论文 2 篇。

湖北三江航天红阳机电有限公司
秦川机床工具集团股份有限公司
武汉华中数控股份有限公司
华中科技大学

基于国产数控系统的七轴五联动大型车铣复合加工中心的验证与提升

文 / 王华侨 张颖 张守明 李慧 付忠奎 赵华军 周应昌 李云霞 董维新 郑武 杨舟 蔡亮 杨建中

在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，湖北三江航天红阳机电有限公司、秦川机床工具集团股份有限公司、武汉华中数控股份有限公司和华中科技大学等几家单位，围绕“高档数控装备及工艺在导弹大型整体舱段集成制造中的示范应用”课题（编号 2015ZX04002202）展开了研究。大型立式七轴五坐标联动龙门车铣复合高速加工中心的研制与示范应用，涵盖了数控机床设计、数控摆头、车铣复合双驱回转工作台、多坐标联动控制优化、车铣复合机床加工应用技术、切削加工工艺、自动编程后置处理及仿真、精度控制与评估等整个数控机床加工过程的关键技术内容，需攻克的技术难点主要包括：数控车铣双驱转台功能切换控制、大型数控转台的精密驱动与控制、数控单摆高速铣头的精度稳定性与可靠性、数控单摆铣头联合大型数控转台五坐标联动动态切削的稳定性、数控系统与车铣复合主机及刀库等功能部件的适应性与可靠性控制。

装备主机总体结构

1. 装备主机结构工艺特点



图 1 大型立式龙门车铣复合加工中心结构总图



图2 华中数控系统 HNC848 及车铣复合主机

如图1所示,VTM260大型立式龙门车铣复合加工中心是秦川机床工具集团股份有限公司自主研发的高档数控装备,其L5/T5系列分别用于铝合金高速切削及钛合金高效切削。该高端装备的开发,借鉴了德国先进的设计及制造技术,以VTM180为蓝本,拓展了机床的规格系列,并对机床整体结构进行了优化,使得该机床结构紧凑、刚性好且加工适用性强。该机床拥有不同工种(车、镗、铣、钻和攻)工序的复合加工功能,可一次装夹完成各种金属件及合金件的加工,包括平面、内外圆柱面、台阶、回转曲面和螺纹的车削,以及多坐标联动控制的铣削、镗削、钻孔和攻丝等,是石油、冶金、风电、水电、煤炭、航空航天、船舶、机车车辆以及军工、汽车、机床、工程机械和重型机械等行业不可缺少的高档数控加工装备。

2. 装备主机核心技术参数

如图2所示,该大型立式龙门车铣复合加工中心配备武汉华中数控股份有限公司的HNC848数控系统,具备七轴五联动车铣复合加工功能,能完成各

表1 大型立式龙门车铣 VTM260-L5 复合技术规格参数

项目	参数	项目	参数
工作台直径	2 600 mm	X 轴行程	3 000 mm
最大车削直径	3 500 mm	X 轴快进速度	12 000 mm/min
最大车削工作高度	2 000 mm	Y 轴直线行程	2 000 mm
最小车、镗直径	400 mm	Y 轴快进速度(台面移动)	12 000 mm/min
工作台承载能力	20 000 kg	Z 轴快进速度	12 000 mm/min
工作台转速	1 ~ 150 r/min(车削时)	Z 轴行程	1 600 mm
车削主电机功率	90 kW	X/Y/Z 轴定位精度	0.015/1 000 mm
主轴锥孔	HSK A63	X/Y/Z 轴重复定位精度	0.007/1 000 mm
滑枕截面	≤ 360 mm × 360 mm ;	横梁升降行程范围(W)	1 500 mm
工作台最大输出扭矩	34 000 Nm	横梁升降速度	300 mm/min
工作台回转速度(C 轴)	0 ~ 5 r/min(铣削)	C 轴旋转角度	0 ~ 360°
主轴电机功率(连续)	37 kW	B 轴行程	-95° ~ 95°
主轴最高转速	15 000 r/min	B/C 轴重复定位精度	0.002°
主轴最大输出扭矩	940 Nm	B/C 轴定位精度	0.003°
最大切削力	50 000 N	刀库刀位	30

种复杂平面、曲面零件的高效率、高质量加工,最大车削直径 2 000 mm,最小加工高度 1 600 mm,主轴伸进最小镗孔直径 400 mm。铣削主轴滑枕采用八边型结构,截面小于 360 mm × 360 mm, X、Y 和 Z 3 个线性轴的行程分别为 3 000 mm、2 000 mm 和 1 000 mm。回转工作台具备联动控制及分度功能,主轴头和拐角头可自动更换。机床的主要规格参数见表 1。

3. 主机技术创新

针对铝合金材料零件的加工要求及切削速度高的特点,采用 KESSLER 电主轴实现了 15 000 r/min 的高转速铣削加工。

如图 3 所示为机床的核心功能部件。通过车铣双驱转台、主轴滑枕双驱以及用于加工铝合金及钛合金材料的机械摆动头等方面的技术突破,再加上针对机床导轨和丝杆的防护技术创新,形成了 3 个系列的产品,进而在某系列型号的大型整体舱段数控加工中得到示范应用。围绕大型整体舱段中钛合金、铝合金和复合材料这 3 种材料的不同加工要求,对国产车铣复合加工中心进行了适应性改进,在以下几个方面实现了突破和创新。

(1) 主轴滑枕双驱改进。主轴滑枕是车铣复合加工中心的关键部件,直接影响车、铣削加工的精度。试验时,主轴滑枕驱动采用双驱动,导轨采用滚滑复合导轨,铣削主轴采用直驱。改进后,主轴滑枕性能明显改善。创新的八边型主轴滑枕截面尺寸为 360 mm × 360 mm,其独特优势在于,能够实现舱体内型面的精密车铣和五坐标联动舱体内型铣削。

(2) 车铣双驱转台改进。车铣复合加工中心台面作为 C 轴时,传动刚性弱,严重影响了机床的加工精度和联动精度。对原来的传动机构进行改进,是将原来的车、铣功能这两个独立的驱动单元改为采用大、小两个电机双驱的结构,并对原 C 轴齿轮箱进行优化,从而提高了传动刚性,进而提高了台面精度。直径 2 600 mm 的数控转台,其最大车削转速 150 r/min,最大铣削转速 5 r/min。

(3) 高速高效切削单摆铣头。针对钛合金材料零件尺寸大、曲面复杂、结

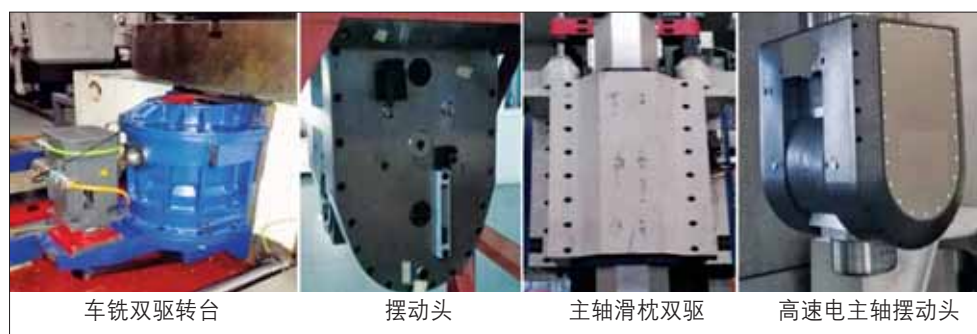


图 3 大型立式车铣复合主机核心功能部件



图4 国产高速刀柄精密链式刀库

构特征多、夹具复杂以及扭矩大等特点,成功地研制出钛合金机械式摆动头及铝合金材料加工用高速电主轴摆动头。由于铝合金材料要求使用合金刀具,切削线速度要求达到 $400 \sim 600 \text{ m/min}$,所以机床主轴必须具备较高的切削速度。同时,由于铝合金材料的加工切削力小,为满足加工要求,改为高速电主轴摆动头,并进行了试验验证。结果,在铝合金铣削电主轴转速达 $15\,000 \text{ r/min}$ 、钛合金高效切削机械主轴刀柄转速达 $3\,000 \text{ r/min}$ 的情况下,实现了 $1\,200 \text{ Nm}$ 的大扭矩切削。

4. 高速刀柄精密链式刀库

针对铝合金及钛合金的车铣复合加工,分别配备了 HSK A63 和 BT50 主轴刀柄,如图4所示,链式精密高速刀库存有40把刀,满刀最大直径 110 mm ,最大刀具重量 15 kg ,采用三相减速电机进行换刀控制。通过对刀库的受力关系和结构参数进行理论研究,并对自动换刀装置的误差及加工工艺进行分析,给出了结构参数对传动误差的影响。此外,还对自动换刀装置核心零件弧面凸轮的工艺展开了理论研究。在刀库的性能检测、可靠性试验和刀库控制系统验证方面,通过搭建试验台,开发了满足试验要求的控制系统,开展了性能测试和可靠性试验研究。

对采集到的数据和误差数据进行处理时,反映出刀柄在翻转后的瞬间,其水平方向的位移在不断减小。完成40次测试后,在水平方向检测到的位移误差在 $-0.04 \sim 0.05 \text{ mm}$ 之间,处在刀库设计允许的范围之内。同时,在完成第30次测量后,刀柄的测量误差趋于稳定,重复定位精度相对于前29次的测量数据较高。经多次试验,推测出刀柄翻转的重复定位精度可能与机械手换刀的速度、刀库运行过程中气泵输出的气压以及刀具的重量等有关。

数控加工仿真开发验证

1. 机床运动学仿真配置

VTMD260/L5 为动梁定柱龙门式车铣复合加工中心,其运动学构成如图5

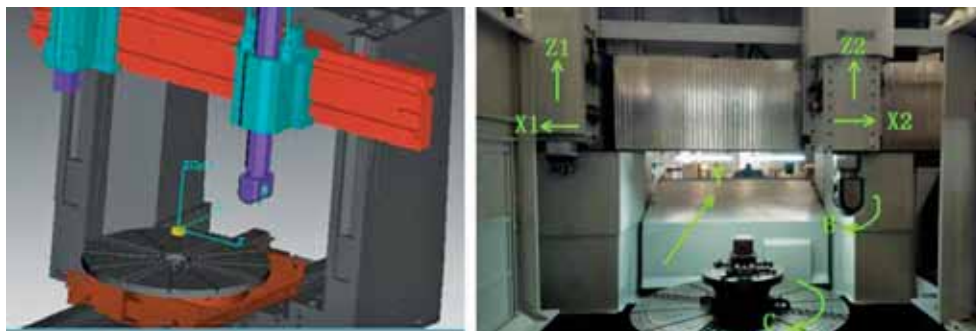


图5 大型立式车铣复合机床 VTM260-L5 运动学构成

所示:车削主轴箱沿横梁水平移动 ($X1$ 轴),铣削主轴箱沿横梁水平移动 ($X2$ 轴),摆动头固定于铣削主轴下方,绕 Y 轴旋转 (B 轴),工作台沿床身前后移动 (Y 轴);车削滑枕在主轴箱内上下移动 ($Z1$ 轴),铣削滑枕在主轴箱内上下移动 ($Z2$ 轴);回转工作台 (C 轴) 在车削工作时提供主切削力,在铣削工作时可实现数控旋转分度;横梁沿龙门立柱上下运动 (W 轴);采用的华中 CNC-HNC-848C 全数字数控系统具有 X 、 Y 、 Z 、 B 、 C 五轴联动的数控控制和插补运算功能,能够保证在整个加工区域内实现车削、镗削、钻削及铣削加工。

为确保机床加工出合格的产品,需要在前期开发对应此数控系统的后置处理。同时,由于加工的零件普遍具有大型、复杂、贵重和周期长等特点,为防止因程序修改等误操作或坐标系位置不合适而导致的零件损坏,需要配置 vericut 仿真机床。vericut 仿真机床完全模拟机床的运动结构关系,可以检查所有的机床部件,如主轴头、旋转工作台、主轴、刀柄、夹具和切削刀具等,以及其他由用户配置的机床附件之间的碰撞和临界碰撞。用户可以在零件四周设置一个临界碰撞区域,检测四周的临界碰撞状态和超行程错误,从而降低产品加工失误的风险,提高编程质量。对此,主要做了3方面的工作:基于UG的后置处理配置、ERICUT 机床仿真的构建以及机床实际产品的加工验证。

通过开展立式车铣复合加工中心专用后处理、车铣复合加工仿真等研究,分析了车削与铣削 NC 指令的特点,提出了车铣复合后置处理方案,在 UGNX 等平台上开发了立式车铣复合后置处理器。构建 Vericut 仿真机床一般有两种方法:一是利用自带的简单建模工具建立机床模型;二是采用其他 CAD 软件,先建好机床模型,再导入到 Vericut 中。目前采用的是第二种方式,即利用 UG,将建立好的机床模型文件导出 STL 格式,再导入到 VT 中建立机床。

2. 后处理程序验证及仿真

后置处理只是为了查看是否生成程序,尚没有通过机床的实际加工。现在,通过生成程序而在机床上进行实际加工应用。为保证数控程序控制的加工安全

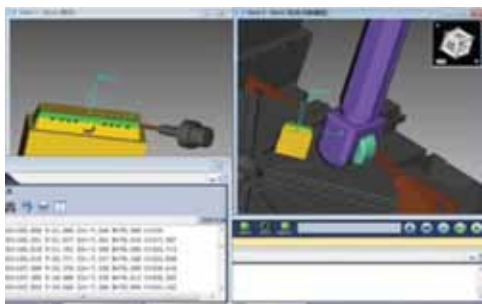


图6 五轴联动底刃加工锥方台

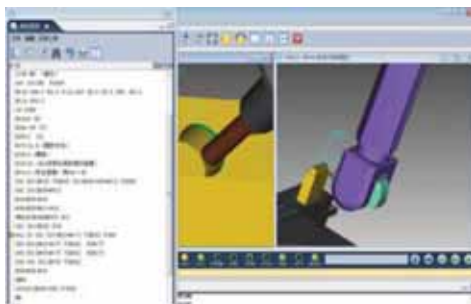


图7 基于欧拉角方式3+2联动铣孔

性,试加工时,先将刀长补偿抬高一点,空试加工,观察机床的运动情况,再慢慢减少刀具长度或半径补偿,直到补偿值为理论尺寸后,加工出零件,然后测量具体尺寸。若符合设计尺寸,则验证后置处理可以使用。图6所示为采用XD10R0直齿铣刀底刃对方形锥台进行的五轴联动加工,图7所示为采用3+2模式、通过欧拉角定义方式铣削 $\phi 25$ 孔的同时,验证G68.2及华中数控系统的宏程序功能。

功能性切削加工验证

对铝合金车铣复合加工进行的多项功能测试包括S件/NASA件的切削和五轴钻孔攻丝切削,结果表明,五轴侧铣光洁度较好,五轴钻孔攻丝螺纹检测合格。此外,还完成了一个典型舱段的外形面五轴端铣加工。目前暴露的问题是,五轴端面铣削空间曲面时,表面光洁度较差,有刀痕,C轴有漂移。采用西门子电机进行测试后,上述缺陷依旧无法消除。分析原因,主要是机床摩擦力较大、伺服电机功率可能不足,目前正在予以解决。

1. 标准件车削及立卧式铣削功能验证

如图8所示,针对两种不同的构件,进行数控立式车削的标准件试切,结果,加工产品的光洁度和尺寸精度均满足国标要求。如图9所示,在进行三轴铣削标准件测试时,在立式和卧式两种不同状态下完成了铣削-镗孔-攻丝等,结果,尺寸精度和形位精度均满足公差要求,无明显的接刀痕,加工合格。



图8 数控立式车削标准件测试



图9 立卧转换铣削三轴联动测试



图 10 五轴联动侧刃铣削机床动态性能测试

2. 机床加工 NASA 及 S 件动态特性验证

(1) 车铣复合加工 NASA 及 S 件动态。为验证机床的动态性能，分别对国际标准的 NASA 件和 S 件进行五轴联动侧刃加工，加工后，零件侧面局部存在鱼波纹和肯伤缺陷。五轴侧刃加工锥度直纹面时，在圆弧拐角处有肯伤，如图 10 所示。

(2) 进口 DMU125P 对比切削测试。如图 11 所示，针对五轴联动侧刃和底刃加工在 VTM260-L5 上存在的问题，使用 DMU125P 设备分别加工了上述两个试件，结果加工质量较好。选用 DMU125P 设备进行对比切削测试，是因为其结构采用的是工作台旋转 C 轴、机床头为 45 度倾斜 B 轴。通过对两种设备的切削结果进行对比，基本可以判定，在 VTM260-L5 上出现的问题不是编程或模型构造导致的，因此，需要继续优化 VTM260-L5 机床的参数。

3. 五坐标孔系加工功能测试

(1) 欧拉角定义 3+2 模式钻孔与攻丝。采用 $\phi 8.5$ 钻头，基于欧拉角定义 3+2 控制模式下进行孔系加工，如图 12 所示。加工孔系全部合格后，同模式下进行螺孔攻丝，采用 M10X1.5 丝锥加工 M10 螺纹，塞规验证合格。



图 11 DMU125P 加工金字塔型件及 NASA 件对比测试



图 12 五轴孔系加工测试及其宏程序

(2) 欧拉角定义 3+2 模式铣孔与镗孔。采用 XD10R0 铣刀进行 $\phi 24.8$ 的底孔加工。如图 12d 所示的铣孔加工宏程序，加工检测合格。同模式下通过欧拉角方式加工，采用镗削方式加工 $\phi 25$ 销孔，镗孔加工经光面塞规检验合格。

改进后的切削验证及舱体加工

1. 国家标准三轴铣削加工测试

针对前期加工出现的问题，对机械部分及数控系统进行优化后，并对加工基准、数控程序进行优化，重新加工后的三轴立式和卧式切削实物如图 13 所示。经过检测，尺寸合格率达到 95%，两处出现垂直度超差。经分析，是由温差及 Y 轴零位一段时间后导致的机床漂移所致。

2. 国际标准 NASA 件加工测试

结合五轴机床国际标准试切 NASA 件标准要求，开展了五轴侧铣综合测试。如图 14 所示，通过对数控系统插补周期、加工刀具、数控程序、加工的进给量和主轴转速等进行优化摸索，加工出的试切件满足了要求。但从摸索情况看，机床在不同进给速率和不同转速下加工出的产品，外表面光洁度存在差异；与国外高档数控系统如 Heidenhain ITNC640 或 FIDIA C40 相比，国产数控系统对机床的高速动态特性控制还存在一定的差距，不能适时进行切削过程中的动态

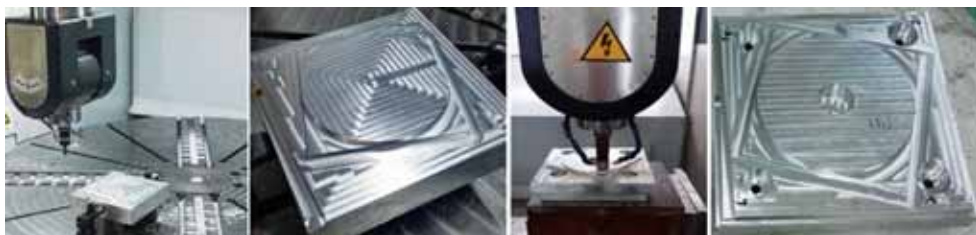


图 13 三轴联动立式铣削国家标准件

匹配。

3. 国际标准 S 件加工测试

如图 15 所示, 使用 XD10R0 加工国际最新的 S 标准件, 五轴侧刃加工效果、加工精度均比第一次有所提高, 基本满足了使用要求, 但在平面上还有小的凹痕, 深入分析表明, 这是由于机床在闭环状态下增益调不上, 需要改善机械摩擦力。

4. 公司标准金字塔型件加工测试

针对五轴机床采用铣刀进行底刃和侧刃高效切削、五轴孔系加工等综合要求, 设计了专用的金字塔标准件进行综合测试, 如图 16 所示。其侧刃加工精度有较大的提高, 基本满足工程产品需求。但是在采用五轴底刃进行外型面铣削、尤其是变锥 R 圆锥曲面铣削时, 发现将工件定位在转台中心时, 其效果比将工件定位在远离工作台中心时要好。分析原因, 远离工作台中心时, 五轴插补拟合是基于大 R 圆弧拟合小圆弧二次圆锥曲面的机理, 存在运动学上的拟合误差问题。通过将小圆弧二次圆锥曲面进行曲面离散化, 并将工件定位在最合理的转台中心位置, 保证了机械坐标与工件坐标的重合, 减少了拟合带来的误差, 使底刃切削精度和表面光洁度均有所提高。实际上, 国外进口机床及数控系统均存在同类的问题。因此, 提高表面插补拟合精度, 经曲面离散化后再进行高精密插补编程是基本条件之一。



图 14 五轴国际标准 NASA 件切削测试终验收



图 15 五轴国际标准 S 件切削测试终验收



图 16 金字塔型件五轴综合测试切削终验收



图 17 大型立式车铣复合加工异型舱体效果图

5. 异形舱体五轴宽行高效加工

针对某异形舱体的外型面、窗口和孔系等特征加工要求，对该车铣复合机床进行相关的工艺切削加工验证。通过底刃五轴铣削，利用宽行加工方法，提高了外形曲面的粗加工效率；采用后球头刀进行精加工，加工效果如图 17 所示，表面光洁度达到使用要求。同时，对舱体上的窗口底面和轮廓进行粗、精加工，检测合格。通过对该舱体的全部特征进行加工验证，基本满足要求，同时，后置处理及 Vericut 仿真也满足使用要求。

小结

本课题完成了大型龙门七轴五联动立式车铣复合加工中心整机的设计与制造，提升了整机在高速加工下的动态响应性和精度稳定性，提升了国产高速摆头主轴 HSK A63 刀柄系统的高速动态性能，提升了大型车铣复合数控双驱转台在车削和五坐标联动的高速动态响应特性与精度可靠性和稳定性，规避了反向间隙及零位漂移等精度丢失问题，完成了与进口西门子数控系统车铣复合功能的对比应用验证。

通过对基于国产华中数控系统控制的大型五坐标联动铣车复合龙门玻璃钢加工中心进行应用示范研究，取得了诸多进展，包括：力矩电机直驱式摆动高速铣头及其测试技术、大型车铣复合数控双驱转台高速车削旋转及精密铣削数字控制，以及采用国产数控系统进行五坐标联动铣车复合加工控制的应用对比验证等。

3 种不同结构形式的大型车铣复合加工中心的技术先进性表现在：设计了两类不同结构形式的大型车铣复合加工中心主机，配备了适应 3 种不同材料切削的国产铣削主轴头及配套的铣削刀柄和车削复合刀柄，通过横梁双驱，确保了大型车铣复合的主轴系统的稳定性；大、小电机涡轮蜗杆双驱的旋转工作台，适应高速旋转车削及五轴精密铣削双功能需求；采用国产华中数控系统实现七轴五联动数字控制，令该国产高档数控装备有效地满足了航天异形舱体五轴铣削（内外型面）+ 立式车削（端面、外圆、内孔）的复合高效加工要求。

总体而言，可以归纳为以下几个方面的成效：

1. 采用固定式龙门横梁双驱 + 铣车复合旋转工作台整体结构, 通过双电机驱动横梁上下移动, 实现了横梁 8 m/min 高速升降的平稳性和精确性, 有利于减小加工过程中的刀具震颤, 规避单电机驱动及切削运动过程中的不平稳性。

2. 系统采用 X、Y、Z 3 个线性轴 + 主轴复合摆头 + 旋转工作台的五坐标配置模式, 通过 12 000 r/min 的 HSK A63 主轴刀柄配置 CAPTO 车削刀柄共用一个刀库, 实现了五坐标联动铣车复合加工。除了可以实现箱体类零件的五面体立卧转换加工外, 还可以利用回转工作台进行舱体类零件的五轴联动加工。利用回转工作台的高速车削功能, 可以方便地实现舱体外型面及端面的车削加工。

3. 采用国产华中数控系统 HNC848 控制, 并全部配套国产的伺服驱动电机, X、Y、Z 3 个线性轴的速度分别达到 15 m/min、12 m/min 和 8 m/min, 复合摆头转速 5 r/min, 回转工作台实现了 5 r/min 的铣削和 150 r/min 的车削。此外, 还采用了 RTCP 五轴刀心编程控制、基于 UGNX 模式的五坐标联动铣削 + 立式端面车削 + 卧式外圆车削的车铣复合自行切换, 实现了国产机床的安全自主可控。

4. 采用力矩电机直接驱动 AC 主轴摆头, 配备 HSKA63 主轴刀柄, 通过 20 kW 的主轴电机及 37 Nm 的恒扭矩切削, 既可以实现铝合金、复合材料的高速精密切削, 也可以实现不锈钢、钛合金和高温合金等难加工材料的精密切削。

5. 大力矩驱动和锁紧高速精密旋转工作台, 可实现 5 r/min 的精密铣削和 150 r/min 的高速旋转车削。基于 5 r/min 的精密回转工作控制联合主轴复合摆头, 实现了五轴联动; 利用 150 r/min 的高速旋转工作台, 通过配置 CAPTO 刀柄, 实现了大型零件的车削加工。

“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/