

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 3 期（总第 24 期）



汽车行业专刊（三）

发挥国家级科研院所优势，引领汽车制造技术与装备创新发展
实施国家科技重大专项，冲压装备比肩国际一流
汽车变速箱壳体柔性加工生产线的过程能力研究
为国产发动机生产装备开发应用技术体系，开展应用验证

（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和管理、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 3 期（内部资料）

领导题词

领导题词 3

动态信息

“国产中高档数控转塔刀架系列产品开发及批量应用示范”课题通过验收 6

汽车行业专刊（一）

总论

发挥国家级科研院所优势，引领汽车制造技术与装备创新发展.. 8

冲压生产线

实施国家科技重大专项，冲压装备比肩国际一流 12

变速箱生产技术

汽车变速箱壳体柔性加工生产线的过程能力研究 17

发动机生产技术

为国产发动机生产装备开发应用技术体系，开展应用验证 20

成果及应用

基于国产数控系统控制的五坐标联动大型铣车复合加工中心的应用验证 30

大尺寸三维多层曲面高功率高精度激光焊接技术与装备的研究 40

经验交流

基于国产数控系统的六轴双模式五坐标联动加工中心的应用验证 45

汽车行业专刊（三）

“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。



“国产中高档数控转塔刀架系列产品开发及批量应用示范”课题通过验收

2018年6月25日，由宝鸡忠诚机床股份有限公司牵头承担的“国产中高档数控转塔刀架系列产品开发及批量应用示范”课题，在用户现场——四川德恩精工科技股份有限公司通过了验收。中国机床工具工业协会郭长城副理事长担任验收专家组组长。课题责任单位——宝鸡忠诚机床股份有限公司及参与单位——烟台环球机床附件集团有限公司、重庆大学等分别作了汇报，四川德恩精工科技股份有限公司介绍了产品应用和试验验证情况。

本课题对数控刀架的制造一致性技术、刀架与主机的适应性、数控刀架的试验技术、数控刀架的故障消除技术和主机故障消除技术等展开了研究，测试、试验了系列数控刀架及伺服动力刀架，并在实际工况下对比试验了国内刀架与国外刀架，在此基础上，改进完善了系列数控刀架及伺服动力刀架系列产品的功能与性能，提高了质量稳定性，形成了结构成熟、功能可靠的系列化转塔刀架产品，实现了国产数控转塔刀架在国产中高档数控车床上的批量配套应用。

本课题研发并形成了AK系列数控转塔刀架和AK系列伺服动力刀架两大系列刀架产品，研发形成的系列数控刀架，已在1375台中高档数控车床上得到批量示范应用。经用户批量应用的反馈结果表明，本课题产品在性能、可靠性等方面已接近进口产品，降低了用户对数控车床的采购成本，提高了用户的经济效益，在国产机床和国产功能部件方面起到了良好的示范作用。

通过本课题的实施，刀架厂家完善了产品的功能与性能，开发设计了具有高精度、高可靠性的数控刀架系列产品，解决了装备制造业功能部件的短板问题，为中高档数控机床提供了高速、高精、高可靠性的转塔刀架，满足了数控机床工作母机关键配套零部件的国产化要求，降低了国产数控机床的制造成本，促进了国产中高档数控机床的市场应用。同时，主机企业通过开展刀架与主机适应性技术研究，实现了刀架与主机的配套应用，并在重点典型用户处进行了加工示范，从而与用户建立了紧密的合作关系，对机床主机、刀架进行了全方位的验证，为后续改进获取了运行故障记录数据。通过对机床、刀架的批量应用，在用户处获得了良好的口碑，对树立机床、刀架的品牌起到了宣传示范作用。

本课题的成功实施，不仅可以为我国航空航天、汽车等行业提供中、高档数控机床，满足相关零部件高速、高效、高精的批量化生产需求，而且提高了国产数控转塔刀架的装机率和市场占有率。此外，培养、造就了一批高水平研发人才，推动了研发团队的建设，提升了企业的创新能力和制造能力，为企业掌握高精核心技术、开发高附加值产品、增强技术实力、满足市场需求以及实现可持续健康发展创造了条件。

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

机械科学研究总院集团有限公司

发挥国家级科研院所优势，引领汽车制造技术与装备创新发展

近年来，机械科学研究总院集团有限公司（以下简称“机械总院集团”）各单位牵头承担了“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”）中面向汽车行业的9项课题，参加了10项课题任务研究。

由机械总院集团各单位牵头的课题中，超高强钢热冲压及点焊连接技术研究、高强钢板冷冲压成形技术研究、铝合金覆盖件快速超塑性成形技术、复杂零件精冲技术、汽车AMT变速器智能化在线检测试验设备、精密塑性成形技术与装备创新能力平台等8项课题均已通过任务验收，相关成果已投入实际应用，取得了显著的经济和社会效益。

在参加的10项课题任务中，数控大型多工位压力机、10 000 kN精冲压力机、大型伺服闭式四点压力机和汽车车身大型智能冲压生产线等已完成技术攻关，并通过了任

务验收。

截至2018年5月，机械总院集团各单位联合中国一汽集团公司、长城汽车股份有限公司、北汽福田汽车股份有限公司、上海交通大学和湖南大学等80余所高校、企业和科研院所等，在铸造、冲压、塑性成形和试验检测等多个技术领域为相关主机开发和应用提供了重要支撑，充分发挥了“产、学、研、用”的协同创新优势，带动了广泛的创新活动及专项成果在汽车行业的推广应用。

主要成果及应用推广情况

自2009年起，机械总院集团各单位通过承担04专项任务，为汽车行业提供了大量的关键技术与装备支撑，取得了显著的经济和社会效益。主要成果如下：

在冲压工艺与装备方面，机械总院集团参与了04专项数控大型多工位压力机、汽



高强钢热冲压中试生产线

车车身大型智能冲压生产线、轿车覆盖件伺服及机械压力机混合冲压生产线的研制开发，为国产汽车大型覆盖件冲压生产线立足国内提供了关键技术支撑。通过参与研制10 000 kN精冲压力机，突破了精冲压力机滑块导向、模具保护和封闭高度调节等关键技术，达到国内领先水平，并在多台精冲压力机中获得实际应用。

机械总院集团牵头承担的“高强钢板冷冲压成形技术研究”任务，突破了高强钢冷冲压工艺、冷冲压模具型面设计、回弹预防及精度控制等关键技术，解决了高强钢板冷冲压零件回弹严重和模具寿命短两大难题，开发的B立柱加强板等零部件实现了装车应用。牵头承担的“超高强钢热冲压及点焊连接技术研究”任务，解决了超高强钢热冲压工艺、成形与淬火一体化模具设计制造、激光电焊连接等关键技术，成功研制出车门防撞梁、前保险杠等汽车零部件，轻量化及碰撞安全性能显著提高。

机科发展科技股份有限公司牵头开发的1 ~ 2 kg复杂零件的冷锻模具和6 ~ 10 mm中厚复杂零件的精冲模具，解决了冷锻与精冲模具高精度、高寿命难题，为变速器复杂

零件冷锻/精冲自主生产提供了支撑，整体达到国内领先水平。北京机电研究所有限公司通过参与“C级轿车覆盖件整体侧围、翼子板和新型环保材料内饰件冲压成形模具开发”，研发了新型环保内饰件模具技术，实现了内饰件生产的多工序集成组合，大幅缩短了生产流程，有效提高了生产效率，降低了生产成本，增强了产品竞争力。

在发动机关键零部件制造方面，机械总院集团自主研制的数字化无模铸造成形装备，有效解决了大功率发动机缸体缸盖等复杂铸件研制周期长、成本高和成形精度低等技术难题，为大型发动机的快速研制与生产提供了关键装备保障。

在共性技术方面，北京机电研究所有限公司首次提出基于“变形极限”和“变形耦合”的铝合金热冲压+超塑气胀复合成形技术，充分发挥了热冲压工艺的快速性和超塑气胀工艺的优良成形性等优势，减小了板材变薄的不均匀性，成功开发出铝合金引擎盖并装车应用。与传统超塑性气胀成形相比，成形时间缩短了64%。

机械总院集团牵头承担的“铝合金车身零部件典型成形工艺及关键装备技术研究”



铝合金引擎盖部件



课题，突破了铝板材冷温冲压成形、铝板材柔性化充液成形、型材挤压-弯曲-淬火一体化成形、多功能一体化压/挤铸造成形等4种“高效、精密、短流程”铝车身典型成形工艺与装备关键技术，为实现铝合金车身零部件的高精度、高可靠性、高效率 and 低缺陷制造提供了关键技术与装备支撑。

机械总院集团联合上海交通大学、华中科技大学和中国一汽集团公司等单位共同建设了精密塑性成形技术与装备创新能力平台，建立了超高强钢成形、冷温热精锻和管类件内压成形等8个实验室，形成了涵盖汽车零部件体积成形、回转成形、板材成形关键技术与装备支撑能力，为一汽、北汽福田和上海保捷等100余家零部件制造、汽车制造以及汽车装备制造企业提供了相关的技术。

在试验与检测装备方面，北京机械工业自动化研究所有限公司研制开发了“汽车AMT变速器智能化在线检测试验设备”，具有智能化在线检测试验功能，可对多品种的MT和AMT自动变速器进行性能、可靠性和



铝合金底板 (6016, 热冲压)



挤压弯曲成形设备与零件



共轨喷油器检测设备、总成性能试验台

振动、噪声等进行分析诊断，设备关键技术指标、整机运行可靠性和精度稳定性达到国外同类产品先进水平。

机科发展科技股份有限公司自主研制了共轨喷油器关键性能及关键调整件几何精度自动检测系统，解决了共轨喷油器总成性能自动检测技术与关键调整件几何精度控制技术瓶颈，达到国际先进水平。

课题实施对机械总院集团带来的影响

机械总院集团通过积极承担04专项任务，成为了引领汽车行业基础制造共性技术及工程化应用创新的优势单位，同时也极大地推动了集团加强科研条件建设，加速技术创新并促进科研成果的转化，主要体现在以下几个方面：

1. 以承担04专项任务为纽带，逐步搭建了面向汽车行业的“产、学、研、用”技术创新体系

通过承担04专项任务，机械总院集团与中国一汽集团公司、长城汽车股份有限公司和上海交通大学等多家企业、高校和科研院所一起，开展了联合技术创新和成果转化合作，逐步形成了以企业需求为牵引，“产、学、研、用”相结合的技术创新模式，使集

团面向汽车行业的技术创新体系不断丰富和完善，对行业的支撑和带动能力显著增强。

2. 开发了一批具有国际先进性的科研成果，形成了面向汽车行业的持续技术支撑能力

机械总院集团与多家单位联合承担了多项 04 专项任务，在冲压、铸造、塑性成形、智能化试验与检测等方面聚焦汽车行业发展需求，通过自主研发，形成了一批具有国际先进性的科研成果。例如，专项支持开发的数字化无模铸造成形装备，达到国际先进水平，获得授权发明专利 37 项（美国、日本等国际发明专利 19 项），在 160 多家单位推广应用，并获得 2017 年度国家技术发明二等奖。同时，通过专项支持，建立了面向汽车领域的精密塑性成形技术与装备创新能力平台，成为解决汽车行业先进成形制造技术与装备瓶颈的技术创新载体，为促进汽车行业和集团的发展提供了持续的技术支撑。

3. 通过承担 04 专项技术前瞻性任务，培育了集团创新发展的新动能

通过 04 专项的支持，机械总院集团围绕汽车轻量化材料（高强钢、轻合金和复合材料）开展了系列技术攻关，部分成果已进入产业化放大阶段，社会和经济效益显著，为集团发展注入了新的动力。例如，高强钢热冲压成套技术、铝合金车身零部件制造技术与装备已具备产业化放大能力，可直接服务于汽车制造。集团自主研发的复合材料先进成形技术，为国内主流汽车厂装车应用 10 余种、40 余万件复合材料零部件，年间接经济效益超过 10 亿元。

存在的差距

在 04 专项的支持下，机械总院集团研制开发了一批汽车行业急需的关键技术与装备，取得了显著的社会和经济效益。但随着汽车行业向智能化、轻量化方向发展，大量的新技术、新装备需求与日剧增，现有成果整体上与国外相比仍有较大差距，具体如下：

1. 已有装备的智能化水平亟待提升。专项所支持的冲压、铸造和锻造等技术及其装备，多数仍处于机械化、自动化阶段，在制造效率、柔性化和智能化等方面与国外相比差距很大，急需在现有基础上提升数字化、智能化水平，满足汽车行业对智能化装备的需求。

2. 汽车轻量化急需的关键技术与装备仍有很大差距。汽车轻量化已成为汽车工业发展的重要趋势，轻量化材料的规模化应用将对传统制造工艺与装备带来很大挑战，虽然 04 专项前期已在高强钢、铝合金和复合材料等多个方向布局实施了相关任务，但多数仍处于研制开发阶段，距离汽车批量化制造所需要的技术与装备仍有很大差距，有待进一步的技术攻关和产业化放大。

3. 支撑汽车领域技术创新的服务平台尚未真正形成。虽然 04 专项所支持的创新平台对促进汽车行业创新发展提供了很好的支撑，但还不能完全依靠自身投入解决技术创新以及提升完善条件等问题，使平台尚未真正形成可持续的发展能力，难以满足汽车行业快速发展对新技术、新装备的需求，急需加强能力提升，实现新技术与新装备的突破。

济南二机床集团

实施国家科技重大专项，冲压装备比肩国际一流

济南二机床集团是国内机床行业的领军企业，国内规模最大的重型锻压设备和金属切削机床制造基地。自 2009 年以来，济南二机床集团牵头承担了 11 项“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，覆盖金属成形、金属切削、功能部件和创新平台等多个领域，目前已有 9 项课题通过了验收。

在服务汽车行业的冲压装备领域，济南二机床集团先后承担了“大型快速高效数控全自动冲压生产线”、“数控大型多工位压力机”、“大型伺服压力机”、“大型精密复合冲压成形机床创新能力平台建设”、“汽车车身大型智能冲压生产线”和“大型全伺服冲压生产线示范工程”等多项课题，这些课题成果均为汽车行业急需的关键高端冲压装备，打破了发达国家的技術垄断，为中国汽车工业的迅猛发展提供了重要的装备支撑。

04 专项课题实施情况

1. “大型快速高效数控全自动冲压生产线”课题

该课题的实施，是以上海通用东岳汽车有限公司 42 000 kN 双臂送料冲压生产线为依托，由 1 台 LS4-1800B 闭式四点多连杆压力机、3 台 J39-800C 闭式四点压力机以及双臂快速送料系统组成，可每分钟生产 15 件汽车大型覆盖件，首次采用同步控制连续运行生产模式，整线换模时间仅为 3 min，在当时是代表世界最先进水平的高速自动化冲压生产线。



上汽通用烟台东岳项目双臂送料全自动快速冲压生产线



出口美国的 5 000 t 重型多工位压力机

该课题于 2011 年 5 月通过验收，并入选“04 专项十大标志性工程”。该课题成果的研制成功，代表了我国大型快速柔性冲压技术的重大突破，对打破国外产品在高端市场的垄断局面、提升中国汽车工业装备自主化水平，具有里程碑式的重要意义。

2. “数控大型多工位压力机”课题

济南二机床集团是国内最早掌握大型多工位压力机技术、最早将产品推向国内外市场的企业。实施课题前，济南二机床集团研制的第一代 2 000 t、2 500 t 和 5 000 t 大型多工位压力机就已先后出口到美国、墨西哥和澳大利亚。2009 年，济南二机床集团承担了“大型多工位压力机”课题，在总结前期开发制造经验的基础上，研发了两台 25 000 kN 大型多工位压力机及其配套设备，完成了多连杆参数化设计、抗偏载高强度齿轮传动机构设计和实体建模受力分析等 12 项关键技术的研究与验证，实现了冲压件的高速、高精度和全自动生产，生产效率提高了 3 ~ 4 倍，节能 50% 以上，节省生产面积 40% 以上。该课题于 2011 年 5 月通过验收。

3. “大型伺服压力机”课题

2014 年 6 月 5 日，济南二机床集团承担的“大型伺服压力机”课题在大连通过验收和鉴定。依托为奇瑞汽车股份有限公司大连工厂提供的国内首台 25 000 kN 大型伺服压力机，该课题在主传动系统动力学分析、伺服驱动及控制系统设计、伺服运动曲线仿真模拟优化、数控模垫开发设计、设备故障自诊断及远程监控等关键技术方面取得了重大进展，为满足汽车高强度钢板、铝合金板等新材料的成形加工提供了技术保障。该课题是在济南二机床集团掌握单双臂快速送料冲压技术、大型多工位压力机技术的基础上，在冲压技术领域的又一新突破，实现了国内汽车冲压技术与国际最新技术的全面接轨和同步发展。

4. “大型精密复合冲压成形机床创新能力平台建设”课题

该课题通过建立大型精密复合冲压成形机床主机功能和冲压自动化系统试验平台、冲压装备分析与仿真工程平台以及控制系统软件开发技术平台，开发了以快速冲压生产线、

大型多工位压力机和伺服传动压力机为代表的大型冲压成形机床产业所需的关键功能部件技术，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，实现了冲压成形机床的结构升级，全面提升了冲压装备制造行业整体水平及国际竞争力。2015年12月4日，课题在济南二机床集团通过验收。

5. “汽车车身大型智能冲压生产线”课题

该课题研制了具有完全自主知识产权，适合于钢板、铝合金板和激光拼焊板冲压成形的52 500 kN汽车车身大型智能冲压生产线，突破了钢铝混合智能化连续不间断拆垛、智能化板料视觉对中、整线全自动智能换模、远程诊断监控智能和一键恢复等多项关键共性技术。通过开发，解决了汽车车身板材覆盖件大型成线冲压装备智能化、绿色化，以及批量生产的可靠性、适用性和一致性问题，满足了汽车产业结构升级的迫切需求。2015年12月5日，该课题在上汽通用汽车

有限公司武汉分公司通过验收。

实施 04 专项取得的重要成果

1. 引领企业主导产品技术水平取得重大突破。通过实施 04 专项课题，济南二机床集团形成了“汽车车身大型快速高效全自动冲压生产线”、“大型伺服压力机”、“数控大型多工位压力机”等汽车车身冲压自动生产线优势产品。其中，“汽车车身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，首次应用双臂送料系统并采用同步控制连续运行生产模式，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，是代表世界最先进水平、自动化程度和生产效率最高的冲压生产线。

2. 在基础研究方面取得重大进展。通过实施 04 专项课题，加快了新技术的研发，每年的技术研发投入占销售收入的 6% 以上。发挥了国家级企业技术中心的优势，推进了国家重点实验室的建设，实现了产品核心技



济南二机床为福特汽车美国底特律工厂提供的 4 条大型智能高速冲压生产线



为奇瑞汽车提供的大型单臂快速冲压生产线

术与国际水平的同步发展。先后攻克了 330 多项关键技术，获得国家专利 176 项，制定国家与行业标准 23 项；荣获国家科技进步二等奖 2 项，省市科技进步奖 55 项。课题成果获得国家科技进步二等奖、中国工业大奖表彰奖、山东省科技进步一等奖和中国机械工业科学技术一等奖。课题研发团队被科技部评为“十一五”国家科技计划执行优秀团队。高端产品比重从 30% 提升到 60% 以上。

3. 加大了技改投入，形成国际同行业最强的装备和制造实力。通过实施一系列重点技改项目，推进了焊接自动化、加工自动化等智能制造装备的应用，完善了生产结构，提高了生产能力，形成了具有国际先进水平的专业化制造和检测把关体系，达到压力机制造行业世界领先水平。同时，借助实施中德工业 4.0 智能制造示范项目和工信部智能制造新模式应用等国家项目，加快推进了数字化工厂的建设。

4. 促进了产品结构的调整，JIER 品牌国际知名度大幅度提升。04 专项的实施，极大地促进了济南二机床集团的产品结构调整。依托自主知识产权的高端技术，济南二机床集团不断提升了项目管理水平，能够向国内外用户提供总承包交钥匙工程。2009 年以来，累计承接了近百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 72.4% 以上，国际市场占有率 42%，彻底摆脱了国产汽车高档冲压设备主要依赖进口的局面。

智能冲压生产线全面进入欧、美、日等发达国家市场。特别是为福特汽车公司位于美国本土的 4 个工厂交付了 9 条大型冲压生产线，产品的技术和质量水平获得了用户的高度评价。2017 年，济南二机床集团又斩获日产北美、日产九州项目合同，首次赢得了日系汽车公司的国外订单，尤其进入日本本

土，意义重大。此外，济南二机床集团还夺得了法国标致雪铁龙的大型冲压线订单，实现了对欧洲市场的突破，为进一步拓展欧洲市场打下了基础。同时，级进模冲压生产线出口到阿根廷，实现了对南美市场的新突破。依托国家“一带一路”战略的实施，济南二机床集团携手国内企业走出去，还赢得了



为上汽通用汽车武汉工厂提供的大型全伺服冲压生产线

土耳其、印度和罗马尼亚等市场的订单。至此，济南二机床集团的国际影响力显著攀升，目前已成为世界公认的最高水平冲压装备制造商之一，树立了中国装备制造的新形象。

实施 04 专项的经验

在承担 04 专项的过程中，济南二机床集团多次受到各级领导的高度评价。工信部领导评价说“济南二机床是实施国家重大专项最好的企业，没有之一”；机床协会领导评价说“济南二机床显示了中国汽车装备的实力，可以和世界一流企业产品相媲美，是中国汽车装备赶超世界水平的典范”。

具体而言，济南二机床集团实施 04 专项课题的经验可以概括为以下几个方面：

1. 注重与用户合作。用户需求代表着国际市场的最新要求，是技术创新的根本出发点。济南二机床集团在课题研发过程中，积极开展产、学、研、用的合作，尤其注重与用户的合作，目前已拥有长效合作单位 20 余家。

2. 重大专项管理制度化、规范化。高层

领导担任课题负责人，细化并落实阶段性计划，加强过程的协调和控制，加强专项的日常管理，健全管理制度，以制度保障项目的顺利实施。

3. 不断完善创新激励机制和人才培养机制。设立技术进步奖、管理创新奖、技术革新奖和合理化建议等一系列内部奖励评审制度；健全各类人才发展通道，设置主任（副主任）工程师等专业技术职务；加强复合型人才培养，以项目锻炼人才，通过一系列高端项目实施，锻炼、培养了一批技术理念先进、实际应用能力强和国际沟通能力突出的优秀人才队伍，为课题成果的快速产业化提供了充分的人力资源保障。

4. 加大技改投入，保证硬件能力。10 年来，济南二机床集团投入 15 亿元自有资金进行技术改造，在用于技术试验、购置项目研究急需的设备仪器以及完善实验研究基础设施的同时，新建了铸造公司、冲压设备自动化实验室、热处理中心、精密加工车间和超重型机床制造车间等，制造实力达到压力机行业世界领先水平。

重庆大学机械传动国家重点实验室
綦江齿轮传动有限公司

汽车变速箱壳体柔性加工生产线的过程能力研究

文 / 冉琰 刘玉鑫 张根保 陈思静 赵小兵

随着汽车产销量的增加，尤其是新能源汽车产销量的猛增，车用变速器的种类和产销量呈上升趋势，质量要求也日益提高，导致对现有的变速箱壳体加工生产线的要求越来越高。

变速箱壳体是汽车变速箱的关键零件之一，其制造工序多且工艺繁杂，是典型的复杂箱体类零件。这类零件以孔位特征为主，包含螺纹孔、支撑孔、油孔以及精度要求较高的轴承孔。此外，还有重要的基础面等特征。因此，在加工过程中，需要同时控制多个质量特性，质量控制难度较大。

在变速箱壳体质量形成的全过程中，柔性加工生产线的过程能力起着至关重要的作用，直接影响着产品的质量。为此，在“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项的支持下，通过“綦江中重型车用变速器壳体柔性加工生产线示范应用”课题的实施，对汽车变速箱壳体柔性加工生产线（柔性制造系统 FMS）的过程能力展开了研究。

FMS 过程能力的基本概念

过程能力是指过程的加工水平满足要求的能力，以衡量过程加工的内在一致性。这

里的要求包含国际标准、国家标准、行业标准和客户要求等。因此，过程能力常被用于反映过程满足客户期许的能力。若过程能够很好地满足客户需求，就认为过程是有能力的；反之，则意味着过程能力不足。这是对过程能力的整体抽象性的概括。在实际工作中，为了对过程能力进行观察、测量、分析或比较，过程能力需要更加明确的定义，通常使用的可量化指标为过程能力指数。

柔性制造系统（FMS）是由统一的信息控制系统、物料储运系统和一组数字控制加工设备组成，是能适应加工对象变换的自动化机械制造系统。FMS 的工艺基础是成组技术，它按照成组的加工对象确定工艺过程，选择相适应的数控加工设备和工件、工具等



壳体零件柔性加工生产线

物料的储运系统，并由计算机进行控制，因此能自动调整并实现一定范围内多种工件的成批高效生产，并能及时改变产品以满足市场需求。

FMS 过程能力是指在一组特定的数控加工设备、控制系统和工件、工具等物料储运系统下，采用不同的工艺技术路线，加工各种不同的产品对象，得到的多个质量特性满足要求的能力。为了更有效地控制 FMS 加工过程，需要对 FMS 的过程能力进行量化，也就需要对过程能力指数的计算方法进行研究。

FMS 过程能力指数的计算方法

过程能力评估是指通过计算过程能力指数（工序能力指数）并参照相关标准评估工序保证质量的能力。对过程能力指数的研究，已从传统的单变量过程能力指数研究延伸到多变量过程能力指数研究。

1. 传统单变量过程能力指数

JoscpH.Juran 于 20 世纪 70 年代提出了过程能力比，过程能力比的数值用过程波动与规格相比来表示。Kane 将过程能力比的倒数定义为过程能力指数 C_p ，即 $C_p = \text{规格} / \text{过程波动}$ 。 C_p 值越大，过程能力就越强。 C_p 使用的前提是过程分布中心与规格中心重合，但实际上并非如此。因此，Kane 又提出了考虑过程分布中心偏移的过程能力指数 C_{pk} 。虽然 C_{pk} 考虑了过程分布中心对规格中心的偏移，但忽略了过程分布中心与目标值的偏移。基于此，日本的田口玄一提出了 C_{pm} ，CHOI 提出了 C_{pmk} 。 C_p 、 C_{pk} 、 C_{pm} 和 C_{pmk} 定义简单且容易被理解，是最经典、应用最广泛的过程能力评价指数，也被称为“基本过程能力

指数”或“传统过程能力指数”。

2. 多变量过程能力指数

在产品愈加复杂的情况下，其质量特性往往不止一个。如何控制产品的多个质量特性，这引起了广泛的研究。自 20 世纪 30 年代 Hotelling 开始，就引入了多元统计过程控制技术，用于解决多质量特性控制问题。Chan 等在深入研究单变量过程能力指数的基础上，对其扩展并提出了多变量过程能力指数 MC_{pm} ，随后又在 Boyles 研究的基于合格品率的单变量过程能力指数 S_{pk} 基础上，提出了基于合格品率的多变量过程能力指数 MS_{pk} 。Tamm 等根据传统过程能力指数定义，将多变量过程能力指数定义为“椭球规格与体积之比”。Wang 等将单变量过程能力指数进行几何平均，得到多变量过程能力指数。朱慧明等引入差异系数法对单变量过程能力指数加权平均，得到多变量过程能力指数。陈涛等利用因子分析法计算多变量过程能力指数。马义中等利用主成分分析法降低质量特性维数，简化了多变量过程能力指数的计算。

总的来说，目前多变量过程能力指数的计算方法主要有 3 种：

(1) 以合格率推导多质量特性的工序能力指数。Wierda 提出了使用不合格率来计算多元过程能力指数。该方法的前提假设是过程服从多维正态分布。Bothe 基于相互独立的多元质量特性，提出了类似的方法，只是使用各质量特性的不合格率来计算总的不合格率。Chen, Pearn and Lin 把一元的 S_{pk} 推广到了多元。

(2) 由单质量特性工序能力指数定义拓展，构造区域比的多质量特性工序能力指数。

(3) 通过降维思路, 将多质量特性降低为少数几个或一个被赋予新含义的质量特性, 在此基础上计算新质量特性的工序能力指数。

陈涛和马义中分别利用主成分分析法和因子分析法计算多变量工序能力指数。主成分分析法与因子分析法原理相似, 通过统计分析, 提取出若干个新变量, 新变量是原多元变量的线性组合且相互独立, 新变量的个数由累计方差贡献率或因子载荷确定。主成分分析和因子分析法建立的新变量独立, 当变量个数较多且各变量之间关系复杂时, 此方法可以解决变量相关性问题的, 但新变量实际含义往往难以解释。

然而, 各过程能力指数计算方法都有不同的适用条件, 多质量特性过程能力指数的计算还没有公认的实用方法。同时, 通过研究发现, 上述过程能力指数计算方法对于FMS来说存在局限性, 主要表现为:

(1) 计算多变量能力指数时, 要求样本服从多元正态分布。如果过程不服从多元正态分布, 需要求得多元质量特性的联合概率密度, 显然, 这不易得到。

(2) 计算过程中需要已知工件的混合概率和选择不同工艺路线的概率, 但在实际生产过程中, 工件和工艺路线的选择都会随着不同的生产需要发生改变, 所以很难确定工件的混合概率以及选择不同工艺路线的概率。

(3) 上述方法多用于单工序多质量特性的过程能力评估问题, 对于FMS, 部分学者考虑了柔性生产线所有工序的所有质量特性, 通过算术平均的方法得到柔性生产线的过程能力指数, 但这种方法可能会使关键质量特性实际工序能力情况被掩盖, 有可能做出错

误的决策。

针对上述问题, 课题组作了一些探索:

(1) 当过程不服从多元正态分布时, 可以对非正态分布进行转换、曲线族拟和, 或使用当量化法、分位数法等方法, 把非正态分布转化为正态分布或近似正态分布。

(2) 在确定混合概率和选择不同工艺路线的概率时, 可以通过模糊评价法结合实际的生产情况和产品趋势, 来计算混合概率并选择不同工艺路线的概率。

(3) 在提取了关键质量特性的基础上, 对柔性生产线综合过程能力指数进行计算。

目前, 这些探索还不够深入, 还需继续开展研究。

FMS 过程能力评估流程

过程能力评估流程可以分为准备阶段、验证阶段以及分析阶段。准备阶段是过程能力分析的基础, 主要工作包括: 选择分析对象、实施工序作业标准化以及收集数据。验证阶段是过程能力评估得以有效进行的保障, 主要工作是: 分析对象的正态性检验和受控检验, 计算过程能力指数的前提是, 过程特性服从正态分布并处于稳定受控状态, 只有满足这两个条件, 才能进行下一步工作。分析阶段的工作是: 通过计算过程能力指数来评价过程能力等级, 识别薄弱工序, 进而从5M1E 6个方面, 综合考虑改进措施, 以提高过程能力。

总之, 验证阶段是过程能力分析的技术支持。过程能力评估是循环改进的过程。当过程能力不足或严重不足时, 应重复准备、验证以及分析过程, 直到通过改进达到指定的工序能力等级。

上汽通用五菱汽车股份有限公司

为国产发动机生产装备开发应用技术体系，开展应用验证

2012年，上汽通用五菱汽车股份有限公司（以下简称“上汽通用五菱”）作为子课题单位，参与了国家科技支撑计划——汽车发动机制造精度控制的“两微米”工程课题，目标是：通过引进和自主开发微米级形貌测量技术，研究发动机制造精度与使用性能影响建模的核心基础理论，攻克发动机批量制造性能一致性控制和制造过程加工精度差异化控制两大技术难题，为优化高效率、低成本的发动机制造生产线上的加工装备配置提供指导，以形成汽车发动机精密制造“两微米”技术体系和方法，并开展应用验证。该课题截止时间是2014年12月31日。

2014年，作为课题责任单位，上汽通用五菱联合两所高校、两家国内机床厂、一家国内数控系统研发企业和一家国内功能部件制造企业，共同承担了“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“汽油发动机缸体、缸盖加工应用验证平台”课题，目标是：开发适用于汽车行业汽油发动机缸体、缸盖加工的样机；掌握国产加工中心在汽油发动机缸体、缸盖生产线应用的核心技术与批量制造技术，为国产加工中心在汽车发动机缸体、缸盖加工生产线中的批量应用

奠定基础；对该项目生产线所采用的国产数控机床和数控系统的功能、性能和可靠性进行全面验证和考核；通过应用验证，改进并提高国产数控机床和数控系统的性能，形成系列化定型产品。该课题截止时间是2018年12月31日。

2017年，作为子课题单位，上汽通用五菱参与了04专项的“轿车动力总成关键零件国产加工装备与工艺集成验证平台”课题，目标是：突破轿车动力总成关键零件国产加工装备用户与主机对接的瓶颈，形成机床性能测试验证与持续改进的平台服务能力，支撑国产装备在汽车制造企业生产线上的成组示范应用。该课题截止时间是2019年12月31日。

汽车发动机制造精度控制的“两微米”工程研究

通过建立先进检测平台，组建产、学、研合作团队，课题组系统研究了发动机的制造工艺，在挖掘设备和工艺能力、解决前沿制造问题等方面有所突破，形成了一系列两微米工程关键技术和方法。围绕相关企业的发动机精密制造和运行性能，建立了含产品设计、试制、批量生产和反馈在内的全过程

两微米精度控制技术体系，通过应用，令主要企业在发动机制造精度的控制技术上达到国际先进水平。

“汽油发动机缸体、缸盖加工应用验证平台”课题研究

上汽通用五菱在应用汽车发动机缸体、缸盖柔性生产线的同时，对国产高档数控机床、数控系统和关键功能部件的可靠性、稳定性进行了验证，对汽油发动机缸体、缸盖单元的应用验证试验方法、应用验证平台的设计及信息集成控制技术进行了研究，并对应用验证平台的多品种快速换型混线生产技术进行了研究和验证。同时，开发了汽车发动机缸体、缸盖高效加工工艺和车间管理系统，目前正在开发相关的配套功能部件。研究内容主要包括：

1. 国产数控机床在汽油发动机缸体、缸盖加工中的应用验证；
2. 国产数控机床和数控系统的精度保持性；
3. 汽油发动机缸体、缸盖单元应用验证平台的信息集成控制技术；
4. 数控机床运行可靠性测试、评估与分析技术；
5. 汽车发动机缸体、缸盖高效加工工艺；
6. 多品种快速换型混线生产技术；
7. 汽油发动机缸体、缸盖加工精度优化技术；
8. 面向发动机缸体、缸盖制造的数控系统专用技术；
9. 面向发动机缸体、缸盖的数控机床专用技术。

突破的技术瓶颈及取得的成果

1. 开发了发动机关键制造特征的微米级形貌测量装备，以及压缩比在线四缸自动化测量设备等，缸体、缸盖和曲轴关键特征尺寸检测精度达 2 微米，测量方式从离线、单点转变为在线、扫描，检测效率满足了生产节拍要求，达到了国际领先水平。

2. 开发了多源误差耦合的发动机冷试数据处理分析软件，支持大量冷试数据的在线处理分析，达到国际领先水平。

3. 开发了加工工艺与工序优化技术，开展了加工工艺参数试验和仿真对比的研究。包括：分析了后端面铣削闷车问题，对比了两种毛坯的性能；分析了精铣缸体顶面轮廓度超差问题，验证了仿真变形规律；分析了粗镗缸孔振纹问题，开展了仿真分析并优化了参数；设计了缸体、缸盖批量加工过程工序能力测试方案；研究了加工质量 - 成本多目标优化方法；在缸体缸盖多工序加工余量与精度协调控制方法的理论研究上取得了新的进展；完成了切削刀具的选择与优化以及切削参数的前期研究工作。

4. 构建了国产数控系统、功能部件和整机的可靠性综合试验平台，对国产数控系统和关键功能部件进行了全面的性能测试及可靠性试验与分析，并根据考核指标要求，对试验样机进行了综合测试与评价。具体包括：完成了数控系统可靠性的测试与验证；开发了数控机床运行可靠性的测试、评估与分析技术；开展了部分关键功能部件的国产化应用验证，通过对国产功能部件进行可靠性试验对比，探索出国产功能部件的选用方法，对其在实际组线机床中的寿命、故障点和维

修进行了统计分析,形成了可靠性评估方法;完成了 HF270 系列大功率高速精密电主轴的技术报告。

5. 完成了加工刀具监控系统及应用的验证。具体包括:完成了介质无关 UHF RFID 抗金属标签的设计与研发;完成了小型化 RFID 抗金属标签的设计与研发;完成了基于 RFID 技术的刀具状态在线检测与管理系统的开发;完成了 RFID 读写器和华中数控系统的集成开发;完成了基于 RFID 技术和大连华根数控加工中心的集成应用验证;完成了 RFID 技术在刀具寿命参数传递系统的开发和验证;完成了刀具实时在线监测系统的研发;完成了 RFID 读写器对刀仪端的集成;完成了刀具寿命监测和传递系统的开发验证。目前正在大连华根的 CNC 加工中心上做 RFID 刀具寿命预警和刀补参数传递集成验证。

6. 开发了数控机床运行可靠性测试、评估与分析技术,对加工过程监控系统进行了

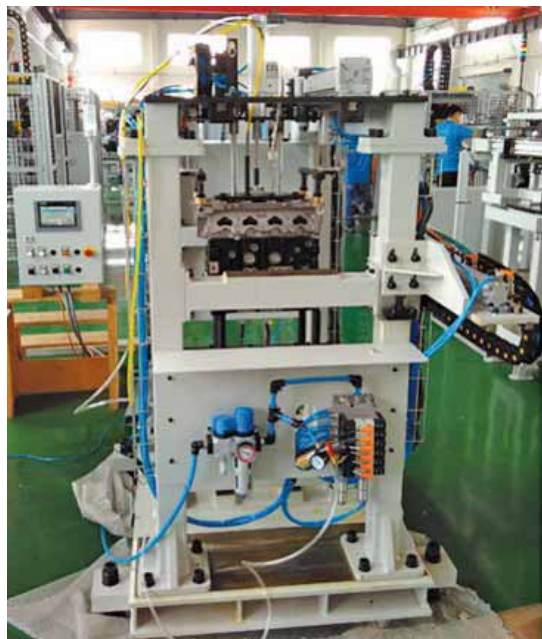


图1 压缩比自动测量

应用验证;研发了混线生产管理系统并进行了应用验证,开展了产品整机设计制造及技术研发和试验研究工作。上述研究均取得了理论上的突破。具体包括:研究了关键部件的失效形式和原理,设计并验证了机床状态监测传感网,开发了信息集成装置和转接模块;完成了缸体、缸盖加工工序关键质量控制特征的设计;初步建立了物流系统、网络系统等模型;开发出基于网络的高速加工的插补、速度平滑技术;开发了缸体、缸盖加工刀具的快换定位装置。

应用情况

1. 压缩比在线四缸自动化测量装备

压缩比在线四缸自动化测量装备可在线对发动机四缸的压缩比进行自动测量,测量节拍 40 s/台,测量精度偏差 0.4%,重复精度约 0.5 ml ($\pm 3\sigma$),填补了国内空白。如图 1 所示。

2. 燃烧室容积激光扫描测量系统

缸盖燃烧室是发动机燃烧室的重要组成部分,其容积的波动是影响压缩比波动的首要因素。数据显示,B12D 发动机缸盖的容积波动较大,且缸间差异化明显。进一步研



图2 缸盖特征示意图



图3 燃烧室容积激光扫描测量系统

究发现,影响缸盖燃烧室容积的因素很多,包括模具、铝液成分、浇注温度和机械加工等。如图2所示,研究对象为B12D缸盖。

燃烧室容积激光扫描测量系统的激光扫描设备采用光学非接触式三维测量方法,与传统的接触式测量方法相比,本身不需要接触被测物体,且受被测物体表面形状的限制小,对被测物的干扰小,因此测量精度较高。此外,该设备通过对缸盖燃烧室一次扫描,可实现对燃烧室容积的实时测量,测量速度快。如图3所示。

3. 发动机轴类零件几何特征精密检测技术

针对发动机轴类零件关键几何特征的工程检测要求,研究了基于CCD影像测量的轴类零件几何特征尺寸及形状精度检测技术,据此研制出发动机轴类零件精密视觉检测系统,并结合实际工程应用,为发动机制造的质量、工艺改进提供了技术支持。采用三维平移及一维旋转组合方式,构成了四轴精密机械系统结构。按照轴类零件关键尺寸精密检测的路径优化策略,驱动光学精密成像系统至关键特征检测最佳位置,实现了关



图4 发动机轴类零件精密检测设备

键特征图像的精确获取。如图4所示。

4. 发动机冷测试数据统计分析软件

通过对发动机进行冷测试,可以尽早发现产品制造中出现的一系列问题,且试验成本低,无需采用点火方式,减少了环境污染。发动机冷测试软件具备以下功能:

(1) 数据的导入和导出:实现冷试检测数据导入软件数据库的功能;实现在各类不同筛选条件及需求下的数据一键导出功能。

(2) 趋势分析、趋势对比分析:实现规定筛选条件下的某项参数的趋势分析功能;实现不同筛选条件下(时间、测试站等)的数据趋势对比分析功能。

(3) 概率分布统计:根据设定的不同组数进行概率分布统计。

(4) 压缩比计算:根据输入的参数,计算压缩比。

(5) 相关分析:依据发动机冷测试数据多元相关分析模型,针对选定的特征参数,计算尾部相关系数等指标。

(6) 不同控制图综合分析:依据各类控制图综合利用的规则,通过不同控制图的关联分析,挖掘更丰富的隐含信息。

5. 缸体后端面与底面的垂直度分析和控制

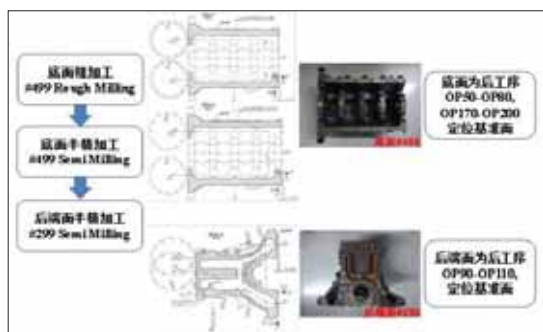


图5 缸体后端面与底面的形貌、加工流程和走刀路径

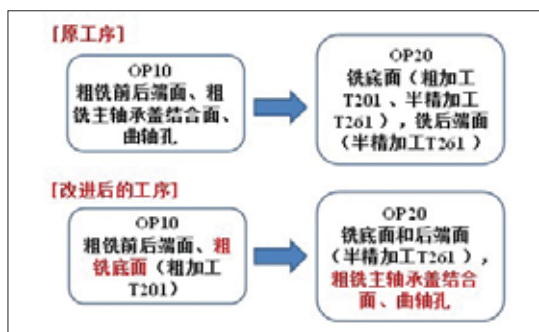


图6 工艺优化

在柔性生产线上加工 SGMW 缸体，生产节拍为 170 s。在该生产线上，用于 OP20 工序的机床为德国 EX-CELL-O 公司的 XS321 卧式加工中心。目前，该工序的工艺流程为：底面粗加工、底面半精加工和后端面半精加工，属粗加工与半精加工一体的工序，其中，缸体后端面作为后续工序 OP90 ~ OP110 的定位基准面，底面作为后续工序 OP50 ~ OP80 和 OP170 ~ OP200 的定位基准面。因此，保证 OP20 工序缸体后端面与底面垂直度误差符合加工精度要求至关重要。缸体后端面与底面的形貌、加工流程及走刀路径如图 5 所示。

由于缸体生产线 OP20 工序的粗加工与半精加工在同一工序中，因而易于累积加工变形。另外，刀具随加工件数的增多而磨损，导致铣削力增大，造成铣削变形。因此，缸体后端面与底面的加工变形会变大，影响后端面与底面的垂直度，引起超差。为此，从工艺系统和工艺过程两方面着手，对发动机缸体加工过程中后端面与底面的垂直度误差进行了分析，结果发现，粗加工铣削变形和半精加工铣削变形、装夹定位变形以及刀具磨损是造成垂直度超差的主要原因。

工序分离试验及数据分析结果证明了发

动机缸体后端面与底面垂直度误差是由粗加工铣削变形和半精加工铣削变形累积效应造成的，其中，刀具磨损造成加工过程中铣削力和铣削热变大，更加剧了粗加工和半精加工的铣削变形。通过工序分离试验的分析与验证，从工艺角度考虑，提出了粗加工与半精加工工序分离的工艺方案，如图 6 所示。此方案不仅有效地解决了发动机缸体加工过程中铣削力变形对加工精度的不利影响，而且平衡了缸体加工工序的负荷。从生产成本考虑，提高了刀具的使用寿命，降低了发动机缸体加工成本。

6. 发动机缸体缸盖结合面泄漏控制

通过对缸体、缸盖简化模型进行有限元泄漏分析，初步判断出缸体、缸盖结合面在装配后（螺栓扭矩作用下）的应力分布情况，据此判断出可能产生泄漏的区域。图 7 所示为装配体的简化模型。

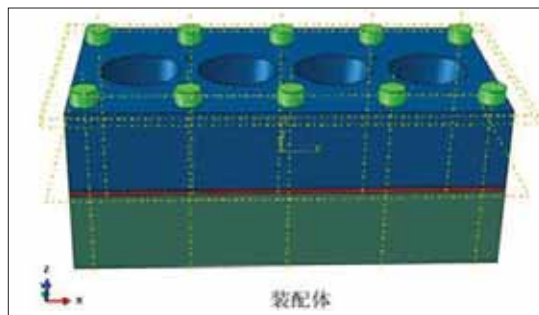


图7 装配体的简化模型

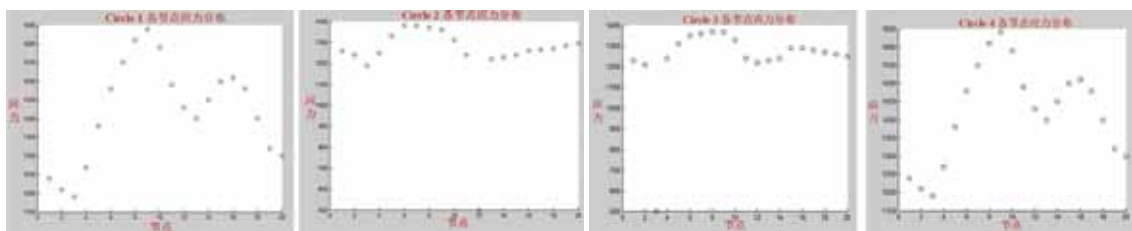


图 8 垫片对应各缸筒圆周节点应力分布

如图 8 所示，在 circle2、circle3 处的节点应力小于 circle1、circle4 处的应力，这是由于螺栓的拧紧顺序不同，导致在螺栓间弹性的作用下，后拧紧的螺栓会造成先前拧紧的螺栓预紧力部分丧失。因此，考虑对螺栓的拧紧顺序进行优化，以使垫片上的应力分布较为均匀。

7. 加工过程监控系统及应用验证

开发通用数据采集平台，将通过对计算机技术与测量技术的综合应用，满足产品模块化、无线化和网络化的发展需求。此平台实现了对多种物理量信号的采集，将最新采集的数据暂存于本地，定期通过移动运营商 4G 网络传输到监控中心备份。最终，获得数控机床运转状态的大数据，用于数控机床大数据分析，为机床的设计、维护以及加工工艺的改进提供指导。同时，以此平台为基础，开发加工过程监控系统和机床状态监控系统。图 9 所示为该平台组成架构。

针对车铣复合机床搭建的测控传感网硬件平台包括：数据采集模块、中间转化模块和数控系统 I/O 模块。其中，工控机、PCLD-8710、DH5856-9 ICP 适调器以及 TMS 转换模块等均安置在车铣复合机床的电柜箱中，加速度、温度和电流传感器分别安装在机床各零部件上。开发软件环境与软件架构本系统时，选用实时操作系统 WinCE

6.0，开发环境为 EVC 4.0（与 VC++ 6.0 接近），界面部分采用 MFC 提供的接口（C++ 语言），数据处理采用标准 C 编写。软件总体结构由 4 大模块构成，分别为系统参数、监控状态显示、诊断分析以及系统管理。图 10 所示为数控系统智能测控模块平台的软硬件实物。

8. 智能制造车间 RFID 应用系统验证

图 11 所示的介质无关 UHF RFID 抗金属标签。为了消除工业现场的复杂应用环境对 UHF RFID 标签性能的影响，在标签设计方面，研究了使用环境对 RFID 标签天线性能



图 9 通用数据采集平台组成



图 10 数控系统智能测控模块平台

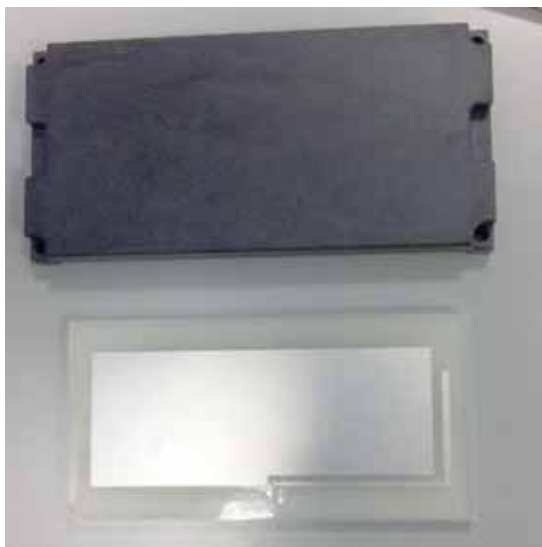


图 11 介质无关 UHF RFID 抗金属标签外形图

能的影响机理。在传统的微带天线基础上，提出了全新的馈电方法。同时，通过有限元分析方法、全波分析方法，对电子标签的结构参数进行了仿真试验。基于上述基础，对天线标签进行原型打样，开展电性能测试、机械测试和电磁测试等工作。

图 12 所示的小型化 RFID 抗金属标签，在标签设计上采用了电小环形天线，通过实数编码遗传算法，对天线的阻抗匹配网络进行了优化。同时，通过有限元分析方法、全波分析方法，对电子标签的结构参数进行了仿真试验。在此基础上，对天线标签进行原型打样，开展电性能测试、机械测试和电磁测试等工作。

远距离的介质无关 UHF RFID 抗金属标签可以适用于任何工况，主要应用在工业现场物流、车辆管理和出入库管理系统，有效地提高了车间物流效率及车辆使用率，使得生产效率及物流效率显著提高。

小型化 UHF RFID 抗金属标签可以覆盖所有的 RFID 频段，应用在工件或者产品的

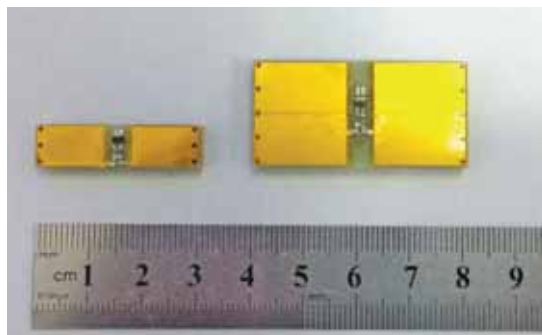


图 12 小型化 RFID 抗金属标签外形图

全生命周期管理中。在制造过程中，产品的生产数据、质检结果以及后期的维护数据同步存储在 RFID 标签中，用于提高柔性生产线的鲁棒性以及减少装配线中的误操作。

9. 基于 RFID 技术的刀具状态在线检测与管理系统开发

由于各类机床的开放程度不同，为使刀具寿命采集模块能覆盖尽可能多种类的机床系统，未选择与机床直接通信的方式读取刀具使用情况，而是通过 RFID 读写器读取当前正在工作的刀具，再结合机床运行状态采集模块采集到的机床主轴开始转动和停止转动的时间段，来计算刀具每次的加工时长，统计刀具寿命数据。图 13 为开发的刀具在线监测管理系统。

采用 RFID 刀具管理系统后，可实时采



图 13 刀具在线监测管理系统

集加工中心的刀具使用寿命，并在刀具寿命结束前给出报警，从而将产品的加工质量提高了 5% 以上。

采用刀具管理系统进行车间刀具管理，将刀具和使用者进行有效关联，同时，通过刀具管理软件，有效管理刀具库存并统计刀具的使用情况，令管理者对刀具的整体使用情况一目了然，有效降低了刀具成本达 5% 以上。

10. 数控机床运行可靠性评估与分析系统

基于多序列加权 HMM 的可靠性评估模型，在不考虑维修及性能调整的情况下，数控机床的性能数据随时间的变化呈单调劣化变化，因此，数控机床的健康状态变迁及转移概率如图 14 所示。

某型号汽油发动机缸体、缸盖生产线上的数控机床主轴结构如图 15 所示，该机床主要用于镗曲轴孔和铰销孔。根据机床运行手册、现场调研及故障树分析，建立了主轴的性能指标向量：近端端面跳动、远端端面跳动和拉刀力。刀具夹紧装置处的力为拉刀力，主轴上面夹紧刀具加工工件一侧的跳动为远端端面跳动，另外一侧的跳动为近端端面跳动。

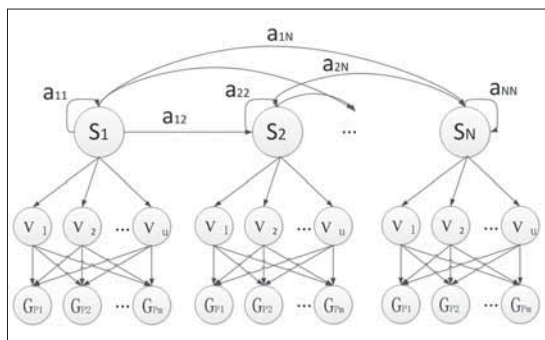


图 14 数控机床的状态变迁关系

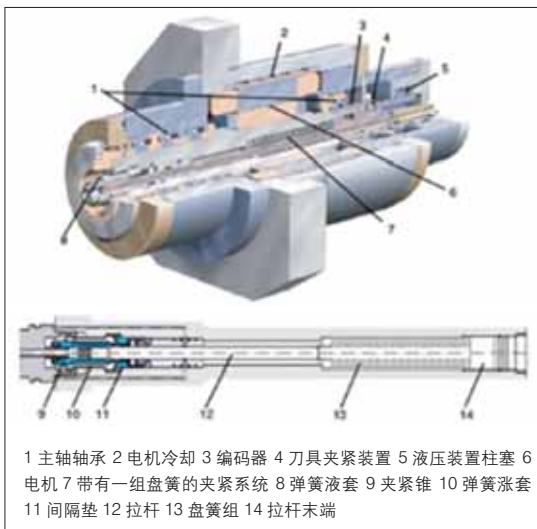


图 15 主轴组成部件图

采取离线点检方式进行日常监测，通过对点检结果进行故障概率分析，与 HMM 模型计算结果基本吻合，且 HMM 模型计算结果趋于保守，由此验证了本模型的正确性。

基于隐马尔科夫模型的数控机床可靠性评估系统，收集分析机床关键性能指标的运行数据，从这些数据中挖掘出机床运行状态等重要信息，使得可靠性评估建立在可靠性数据基础之上。为了对现场数据进行妥善分析、处理和保存，更方便准确地计算出状态概率变化关系，迫切需要建立一套适应数控机床发展的可靠性评估系统（如图 16、17 所示），进而为后续维修决策等提供依据。

11. 丝杠磨损监测平台搭建

通过前期的理论研究，有针对性地搭建



图 16 点检系统起始页截图

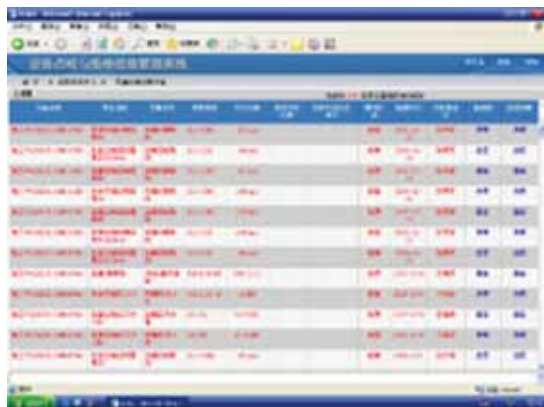


图 17 主轴定量结果诊断评估截图



图 18 监测平台的搭建

了监测平台，如图 18 所示。

基于电流信号监测分析，对 B12 型发动机缸盖加工状态下的数据进行电流信号分析，对提取出的快进电流信号进行功率谱分析。从图 19 可以得出，滚珠丝杠的条件可以分为初期磨损阶段、正常磨损阶段、加速磨损阶段和严重磨损阶段。在严重磨损阶段，滚珠丝杠的工作状态不能满足加工要求，导致工件质量稳定性差。加速磨损期，其特征值的上升趋势较陡，且时间跨度较短。在滚珠丝杠不能满足工件质量要求的情况下，更换一个新的滚珠丝杠，特征值从 6×10^{-3} 降到 0.1×10^{-3} 。

12. 混线生产管理系统的研发及应用验证

对多品种快速换型混线生产的制造执行系统（MES）进行了优化和改进，使之在生产建模上对生产变更有更好的适应性。更

新后的系统已经部署在江淮纳威司达发动机厂，目前生产反馈良好，运行稳定。此次升级包括：工厂建模、生产计划管理、生产执行管理、生产执行跟踪、生产监控 PMC、质量管理、关键零部件管理、物流管理和仓库库存管理等功能模块。

实施专项课题带来的社会效益

汽车发动机整机制造精度对于发动机的使用性能（燃油经济性、可靠性等）具有至关重要的影响。发动机制造生产线具有自动化程度高、批量大、工艺流程长和加工参数多等特点，制造过程中材料、加工、装配和检测等各类宏微观误差高度耦合，整机精度控制极为困难。在低碳经济、节能减排和绿色制造的巨大压力下，国外汽车公司加快了发动机制造技术的革新步伐，制造精度控制能力正向微米级发展，导致对传统设计、加工、检测和控制技术的巨大冲击。

汽车发动机精密制造技术体系不仅是我国汽车发动机制造企业迫切需要解决的共性基础问题，也是我国装备制造企业高度关注的应用瓶颈问题。上述课题所开发的技术方法、测试设备和分析软件可以直接应用于汽车发动机制造企业，为企业提高产品质量、降低开发成本和提升自主开发能力提供了帮

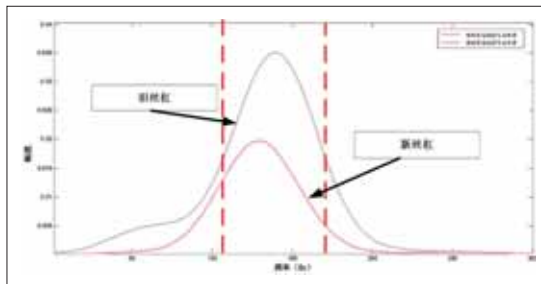


图 19 加工过程中快进阶段电流信号的功率谱图

助，对促进我国汽车发动机产业的升级、转变增长方式以及实现节能减排都具有重要的意义。

通过对机床技术、工艺技术、敏捷柔性生产线单元控制技术、高效高精度智能化在线自动监测技术以及国产数控系统的研究和集成应用，形成了整体解决方案能力，支撑了发动机的自主化制造，实现了国产高速加工中心在汽车发动机缸体、缸盖生产线中的批量应用。

通过对 04 专项资助研发的机床的功能、性能、可靠性及数字化制造或共性技术进行集成性批量应用、验证和考核，在实践中不断积累了经验，为提升国产机床的性能、加工稳定性与精度保持性提供了第一手数据。

通过实施验证平台，充分发挥了缸体、缸盖专业企业为众多主机厂配套服务的作用，进一步扩大了验证平台的影响力，为推广使用 04 专项支持的国产高速高精数控机床树立了典范，为中国发动机行业和其他制造业大量使用国产数控机床树立了信心，从而改变了长期以来发动机零部件加工机床完全依靠进口的局面。

这些课题的研究内容对于促进我国中西部汽车产业的发展有着重要的影响，研究成果不仅可以满足汽车发动机行业的需求，还可以推广至汽车、航空、船舶和微电子等其他国民经济重要领域。

存在的问题

通过 04 专项课题的研发，攻克了微米级几何形貌测量、精度与性能匹配、高效精密加工、冷热试多源数据融合等技术。但是，汽车发动机制造精度不是单元制造精度的简单累加，无限提升单元制造精度，不仅受制于新技术风险和投资成本，且未见得显著改进产品使用性能。因此，科学合理的制造精度控制体系，才是提高发动机的性能稳定性、缩短研制周期、降低制造成本的重要手段，也是国际汽车公司高度重视和保密的核心技术。长期以来，我国汽车发动机行业由于缺乏研制经验和有效的研究方法，尚未能够准确、系统地掌握制造精度与产品性能之间的相互影响关系，导致制造工艺的自主开发、生产装备的集成、制造质量的控制等核心技术与国际同行相比存在较大的差距。

另一方面，国内数控机床企业对满足汽车高精密零部件生产所需的设备标准尚不十分熟悉，设计、制造经验欠缺，在同步设计过程中，需要汽车制造企业给予更多的技术支持。另外，国产数控机床的制造还需要使用进口零部件，如主轴的定转子以及 A 轴、B 轴转台等。这些零部件的采购周期较长，价格较高，导致国内机床企业在成本预算和交货周期上难以满足汽车制造企业的要求，不足以与国外知名品牌相抗衡。

湖北三江航天红阳机电有限公司
秦川机床工具集团股份公司
武汉华中数控股份有限公司
华中科技大学
上海交通大学
株洲钻石切削刀具股份有限公司
湖北航天技术研究院计量测试技术研究所

基于国产数控系统控制的五坐标联动大型铣车复合加工中心的应用验证

文 / 王华侨 张守明 宋豫娟 李慧 明先承 杨进东 张颖 付忠奎 罗海涛 刘亚峰 严元颖 董维新 周应昌 龙兴元 陈吉红 郑武 杨舟 蔡亮 杨建中 陈娜 刘国庆 黄锋 李湘坚 肖星雨 高宏

大型五坐标联动龙门铣车复合玻璃钢加工中心的研制开发及示范应用，涵盖了数控机床设计、五轴复合摆头、回转工作台铣车复合双驱、数控系统多坐标联动控制优化以及铣车复合机床加工应用、切削加工工艺、自动编程处理及仿真、精度控制与评估、质量保证等覆盖整个数控加工过程的关键技术。通过实施“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题“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），攻克了如下技术难点：数控系统与主机和功能部件的适应性、功能强化和可靠性评价，航天复杂产品在加工过程中的定位基准、加工效率、变形控制和在线检测等。

五坐标铣车复合总体结构

1. 铣车复合机床总体结构

国产大型铣车复合机床采用定柱动梁式龙门结构（如图 1 所示），主轴头沿横梁水平移动（ X 轴），工作台前后移动（ Y 轴），横梁沿龙门立柱上下运动（ Z 轴），摆动主轴头绕 B 轴 45° 旋转。回转工作台（ C 轴）在车削时提供主切削力、铣削时实现数控旋转分度，可完成 X 、 Y 、 Z 、 B 和 C 轴五轴联动控制与加工。机床配华中数控 HNC-848C 系统、液压系统及整齐美观的全封闭防护罩、自动换

刀装置和吸尘除尘系统。图 2 所示为裸机总体构造。

为满足加工新型复合材料的要求，对机械部件进行了二次防尘保护，并配吸尘除尘系统，有效解决了加工过程中的环境污染。机床具有间隙补偿、螺距补偿、刀具补偿、直线插补、圆弧插补和自动报警显示等功能，一次装夹可实现车、铣、钻和镗等多工序的复合加工，不仅减少了装夹次数，缩短了辅助时间，还提高了加工效率、定位精度和加工精度，满足了航空航天、核工业、船舶和印刷等行业加工复杂形状的曲面零件和异型零件的需求。

2. 铣车复合机床机械特点

图 3 所示为大型龙门玻璃钢复合材料铣车复合加工中心的复合立 - 卧式转换运动状态。机床配国产华中数控系统 HNC848，采用高精密光栅尺、圆钢栅尺，

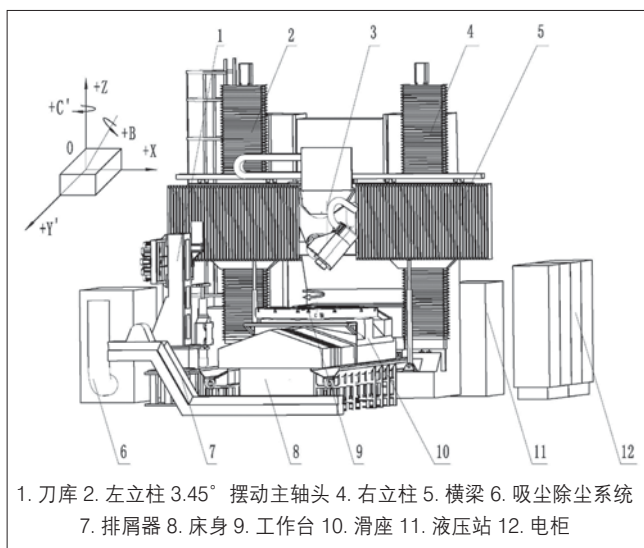


图 1 机床结构简图



图 2 主机外型

全闭环位置反馈控制。床身、立柱、横梁、滑座、旋转工作台和主轴箱等主要基础件及关键结构件均为铸造结构，确保了机床的高刚度和精度稳定性。 X 、 Y 和 Z 直线轴均采用高精度直线导轨支承，由伺服电机带动高精度滚珠丝杆移动。直线导轨和滚珠丝杠采用双层防护，可避免加工中的粉尘污染。



图 3 铣车复合立 - 卧式转换运动状态

铣车复合旋转工作台,由交叉滚子轴承支承,由双电机带动变速齿轮箱驱动其旋转,车削时提供主切削力,铣削时实现数控旋转分度。主轴系统采用45°回转的B轴摆动头,可实现立、卧转换,安装车刀和旋转刀具后,具备车、铣复合功能。主轴配HSK A100高速铣削刀柄及CAPTO车削刀柄,转速可达10 000 r/min。机床左侧的链式自动换刀装置装有40把刀具,换刀时间低于5 s。

机床配有平行于床身的两个螺旋排屑器和一个链板式排屑器,可以将铁屑方便地排入积屑箱。自动润滑系统定量地对各轴及其他运动副进行自动润滑,带报警提示,可保证机床稳定工作。大功率吸尘除尘系统有效解决了复合材料加工中的粉末收集与处理问题。

针对新型复合材料零件的加工特点,如切削转速高、粉尘大等,对机床采用了全封闭设计,对导轨采用了双层防护,对刀库、头库采用了防护罩,对电气系统采用了单独的防护措施,以此提高了机床主体、电气及电气系统的防护等级,避免受到冷却液和液压油的污染。

该大型铣车复合加工中心填补了国内空白,其规格和技术参数见表1。

核心功能部件系统解决方案

1. 铣车复合双驱转台

铣车复合双驱转台,采用双电机驱动,通过双速换挡齿轮箱驱动工作台回转。转台在车削工作时,电机以主从模式控制,两个电机的功率叠加,可实现大扭矩切削,为车削主轴提供主切削力;在铣削工作时,两个电机可以转换为电气预载模式,可使数控旋转的C轴消除反向间隙,实现数控旋转分度。用于支

表1 铣车复合机床规格参数

项目规格	技术参数	项目规格	技术参数
X/Y/Z轴行程	3 050 mm,2 500 mm,1 600 mm	工作台最大输出扭矩	40 233 Nm
立柱间距	2 300 mm	工作台分度速度(C轴)	0~5 r/min
X/Y/Z轴快移速度	15 m/min,12 m/min,8 m/min	B轴转动范围	-30~180°,立式0°,卧式180°
最大车削直径	φ 2 500 mm	转动速度	5 r/min
加工最大工件高度	1 600 mm	刀柄形式	HSK A100
主轴转速	12 000 r/min	换刀形式	立式
功率	20 kW	刀库形式	链式
扭矩	201 Nm	刀位数	40把
主轴锥孔	HSK A100	X/Y/Z轴定位精度	0.015/1 000 mm
工作台直径	φ 2 000 mm	B/C轴定位精度	8 "
最大载重	10 000 kg	X/Y/Z轴重复精度	0.01 mm
工作台转速(车削)	5~150 r/min	B/C轴重复精度	5 "
车削主电机功率	37×2 kW	数控系统	华中数控 HNC848

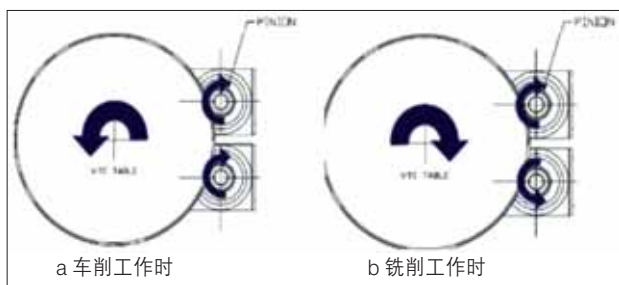


图4 双驱转台驱动运动示意图

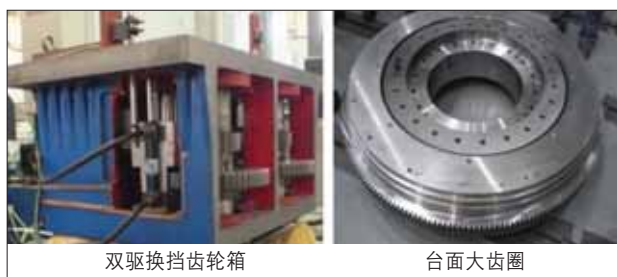


图5 双驱转台实物结构图

承转台的交叉滚子轴承承载大,可承受高倾覆力矩,保证了工作台的径向和轴向刚度。工作台旋转中心装有高精度反馈装置,可对台面(C轴)进行位置反馈,对车削主轴进行速度反馈,有效地保证了加工工件的分度精度和车削精度。图4和图5所示为双驱转台运动示范及实物。

2. 主轴铣头45°复合摆动

如图6所示,绕45°回转的B轴摆动主轴头,在-30~180°的范围内摆动,0°时为立式,180°时为卧式,可实现主轴立、卧转换。B轴采用力矩电机直接驱动,以恒力距输出动力,采用全闭环位置反馈,具有扭矩大、承载能力强和动态响应快的特点。自动锁紧机构在断电时能自动锁紧。采用的电主轴结构具有车、铣复合功能,即可安装车刀,也可安装旋转刀具,实现车削、铣削复合加工。主轴配带的车削自动锁紧机构可保证车削刚性。车削刀具与铣削刀具可在刀库上自动交换,提高了加工效率。图7所示为配备的车铣主轴功率扭矩曲线图,既可实现大扭矩低速切削,还可实现铝合金、复合材料的高速切削。

3. 高效除尘系统及防护

粉尘从除尘器进风口进入,烟尘进入预处理装置,大颗粒的粉尘和火花

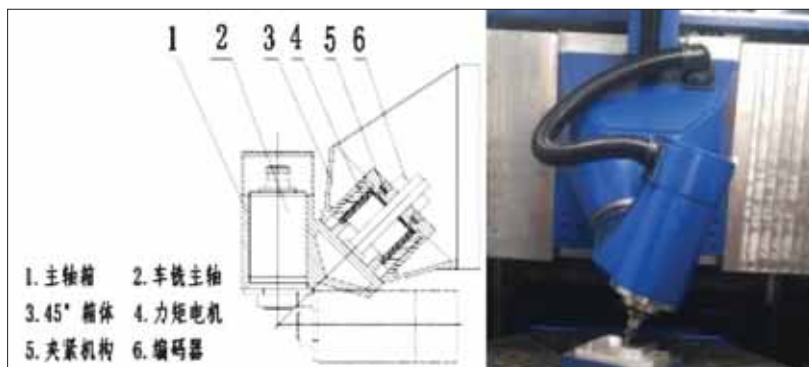


图6 45°摆动主轴头结构示意图

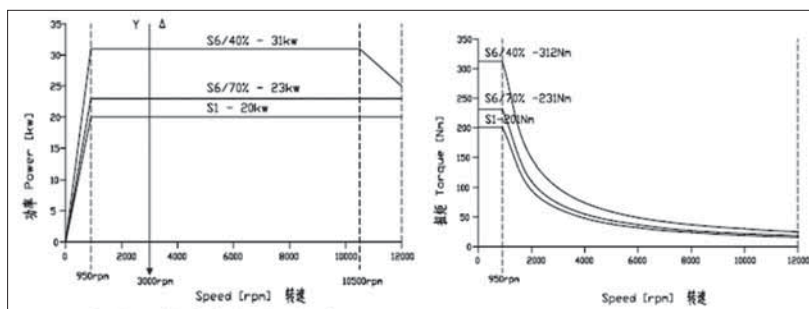


图7 车铣主轴功率扭矩曲线图

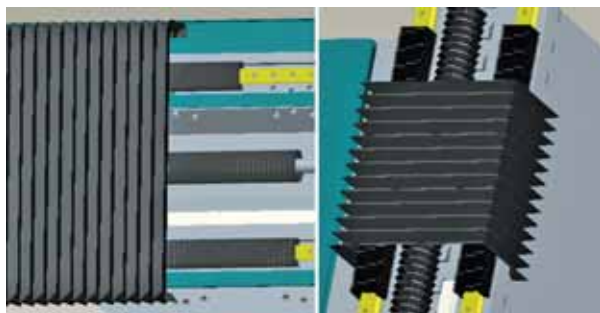


图 8 导轨密封防护结构

被分离直接落入集尘盒，较细的粉尘进入除尘器过滤段。粉尘气体均匀地流入过滤器，吸附在滤筒外表面，在负压作用下，过滤后的洁净气体进入滤筒内，再经出风口进入大气。图 8 所示为采取的导轨防护措施，以规避粉尘污染。

华中数控系统配套解决方案

图 9 所示为大型五坐标龙门玻璃钢加工中心配备的华中 8 型 HNC848 高档数控系统的框架构成，它不仅具有 8 轴联动控制功能，还支持 8 通道，最小分辨率 $0.001\ \mu\text{m}$ ，插补时间 $0.125\ \text{ms}$ ，G 代码前瞻段数可达 2 000 段。

华中数控 HNC848 系统与五坐标机床的配套，需根据航天复杂结构件的特点和实际加工要求，开展基于零件工艺性和机床性能的研究，通过对机床定位精度、运动精度、功能可靠性和精度保持性等进行分析与测试来进行研发，包括：基于机床机构参数的加工精度与控制模块开发，高档数控系统与六轴龙门玻璃钢加工中心双模式五坐标联动匹配性、适应性的技术研究，以及基于六轴双模式五坐标联动后处理模块的开发等。

对机床定位精度和运动精度的分析与测试，依据复合材料航天结构件的工艺需求，有选择性地对各运动部位在数控装置控制下所能达到的直线（X、Y 和 Z）运动定位精度和重复定位精度、回转定位精度（A、B 和 C）和回转重复定位精度、各轴的机械动态特性等进行控制保障。对功能可靠性和精度保持性的分析与测试，有选择性地开展了空运转试验、主轴和进给轴加载试验、实际切削试验、空运转加速试验、安全试验、进给轴和旋转轴的精度保持性试验以及主轴回转精度保持性试验等。

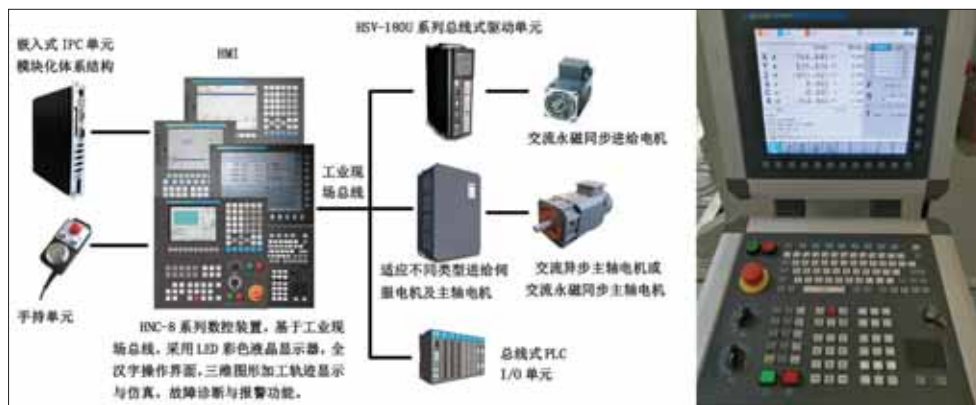


图 9 华中 8 型数控装置

在数控加工过程中,由于各种误差因素的存在,使得加工过程始终偏离给定的进程,造成加工误差。通常,基于经验和反复试验的方法制定的加工工艺,虽然可以保证零件的加工精度,但周期长,成本高。若在加工前准确预测零件的加工精度,则可替代试切环节,缩短生产周期,降低成本,指导工艺方案的优化,并能预测结果,对加工误差进行补偿,提高零件的加工精度。具体过程为:制订数控系统与大型五坐标龙门玻璃钢加工中心的配套验证方案,确定配套设施需要验证的数据和参数,明确数控系统理想的运行状况。根据所确定的验证标准及现有大型五坐标龙门玻璃钢加工中心来拟定配套方案,确定配套所需的设备列表,针对该方案,明确配套所需验证的参数及测试流程。对所拟定的方案进行修改、论证、验证和完善。

五坐标机床标准件加工检测

1. 国家标准三坐标立式与卧式综合测试

针对五坐标机床需同时具备立式和卧式两种加工状态,以及需要按照标准的三轴国家标准试件进行加工,增加了2处 3° 斜角以检测斜度精度,增加了4处圆孔以检测孔的位置度,圆孔中增加了台阶孔以检测两孔的同轴度。经加工检测,产品合格,如图10所示。

2. 五轴国际标准 NASA 及 S 件加工测试

图11所示为五轴联动侧刃加工国际标准五坐标 NASA 件,图12所示为五轴联动侧刃加工中国国际标准五坐标 S 件。经多次反复试验加工,产品表面质量合格,精度达到国家标准和国际标准要求。

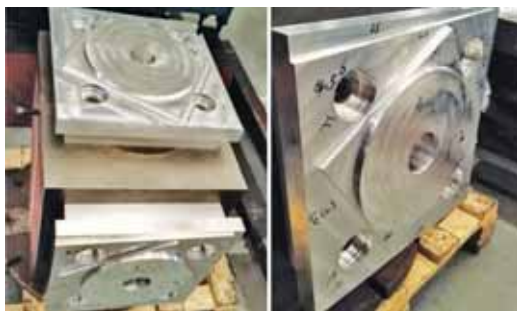


图10 立卧转换三坐标联动标准件试验切削件



图11 国际标准五坐标 NASA 件试验切削

金字塔型件考核项目及指标

图13所示为五轴铣削加工的某金字塔型件,该加工综合考核了五轴端铣、五轴侧铣、五轴钻孔、五轴镗孔和五轴攻丝等综合反应五坐标机床的整体性能指标。

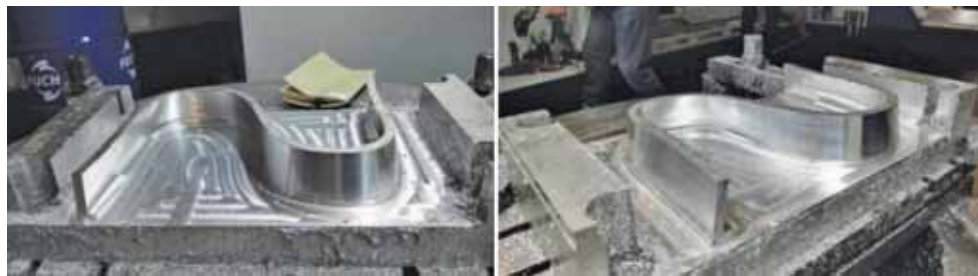


图12 中国国际标准五坐标 S 件侧刃切削测试

采用不同类型的五轴机床,分别对铝合金、不锈钢、钛合金和高温合金等进行高速切削和强力切削,以考核五坐标机床及其配套的刀具所能达到的不同加工效果,以进行综合验证,考核指标见表2。

金字塔型件适合用五坐标机床及具备五轴联动

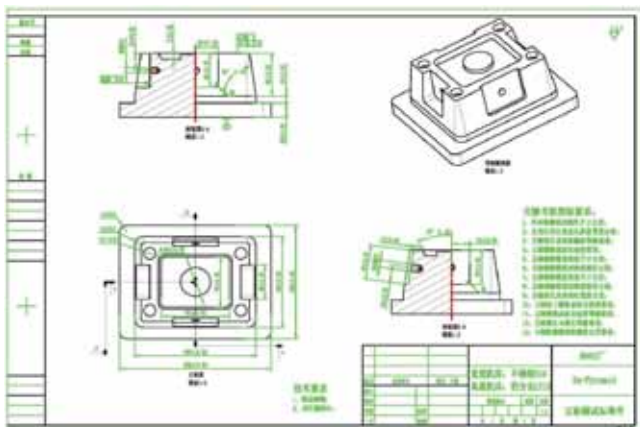


图 13 五坐标机床加工精度综合测试金字塔型件

加工的铣车复合、车铣复合加工中心进行加工,以测试含双摆头式五坐标、双转台摇篮式五坐标、摆头+转台联合式五坐标、立式铣车复合/车铣复合加工中心、卧式铣车复合/车铣复合加工中心等具备五轴联动的铣削、镗削类高档数控切削机床的综合性能指标,具体为:

1. 加工材料:五坐标高速切削机床加工 AL-Si 系铝合金材料,五坐标重载强力切削机床加工合金钢(硬度 HRC28-32)或奥氏体不锈钢,加工尺寸 220 mm×180 mm×100 mm。
2. 刀具:采用 $\phi 8$ 、 $\phi 16$ 立铣刀进行端铣、侧铣、螺旋铣削,采用 M8、M10 丝锥进行刚性攻丝。
3. 工装:采用高精密虎钳来装夹工件。
4. 程序:在高档 CAM 软件中分别编制三轴粗铣、三轴精铣(圆柱台)、五轴端铣(外型面、直方槽和斜方槽)、五轴侧铣(内锥台)、五轴螺旋铣(螺纹底孔、位置精度检测孔)和五轴刚性攻丝等加工程序。
5. 仿真:在专用仿真软件或 CAM 软件中建立基于五轴联动的三维机床运动学仿真模型,配置与机床配套的数控系统。
6. 试切:对金字塔型件进行三轴联动加工及五轴联动切削。

表 2 金字塔型件考核项目

No	考核项目	No	考核项目
1	外形轮廓度的线性尺寸公差	7	五轴轮廓铣削轮廓度公差
2	孔的孔径公差及孔距位置度公差	8	五轴铣孔与镗孔等级要求
3	五轴侧铣表面光洁度	9	五轴加工端铣表面光洁度
4	五轴侧铣锥度角度尺寸公差	10	五轴端铣锥度角度尺寸公差
5	五轴侧铣锥度对称度形位公差	11	五轴端铣锥面对称度形位公差
6	五轴钻孔攻丝的螺纹等级要求	12	五轴钻孔攻丝的位置度公差

7. 检测:对加工后的产品相关特征进行几何公差、位置公差、表面光洁度和表面光顺度的检测。

8. 判定:依据检测结果,对机床进行综合评判,考核指标要求见表3。

表 3 金字塔型件考核指标要求 (单位 mm)

No	加工特征	几何公差与位置公差
1	总体外形	200 ± 0.025 、 160 ± 0.025 、 70 ± 0.05 、 20 ± 0.025 、4-R10
2	侧方槽	120 ± 0.05 、 48 ± 0.025 、 48 ± 0.025 、2-R5、对称度 0.05、平行度 0.05
3	斜方槽	60 ± 0.025 、 48 ± 0.025 、 $8 \pm 0.05^\circ$ 、5、2-R5、对称度 0.05
4	中部圆台	$\phi 40 \pm 0.025$ 、 8 ± 0.025
5	四方孔	$4-\phi 16 \pm 0.025$ 、 8 ± 0.025 、 120 ± 0.025 、 80 ± 0.025
6	斜锥槽	$4-23 \pm 0.05^\circ$ 、 90 ± 0.025 、 70 ± 0.025 、R5、
7	外锥槽	$4-82 \pm 0.05^\circ$ 、160、128、 60 ± 0.05 、4-R12, 底部一条线
8	螺纹孔	2-M8H7、深度 10、2-M10H7、深度 10、 $2-82 \pm 0.05^\circ$ 、位置度 $6-24 \pm 0.025$ 、 $2-30 \pm 0.025$ 、同轴度 0.05
9	其他要求	表面光洁度要求 3.2; 锥面光滑连续且不允许有凹坑、啃伤等

金字塔型件五坐标加工测试

1. 五轴三联动粗加工

正式加工塔型件前, 分别完成机床三维模型运动仿真构建及后处理程序开发、机床运动模拟仿真。粗加工使用 XD20R0 铣刀, 在风冷冷却条件下, 留 0.4 mm 余量, 对 2A12 铝块进行粗加工, 如图 14 和图 15 所示, 满足了粗加工无过切的要求。五轴三联动铣削粗加工, 包括: 在立式和卧式两种状态下, 对 $\phi 16$ mm 的销孔进行 4 处铣削、镗削, 在侧壁槽上钻 4 个 $\phi 8.5$ mm 的底孔, 并刚性攻丝 M10 $\times$ 1.5 mm, 经检测, 加工合格, 如图 16 所示。

2. 五轴底刃加工斜面

使用 XD10R0 加工, 基本满足要求, 但平面上有小凹痕, 深度接近 0.01mm, 后续还需优化, 如图 17~19 所示。

3. 五轴侧刃加工斜面

如图 20 和图 21 所示, 使用 XD10R0 侧刃半精加工金字塔外形塔身, 光洁度基本满足要求, 但在圆角拐角处有纵向凹陷, 深度 0.02~0.04 mm。对曲面进



图 14 塔型件粗加工过程



图 15 塔型件粗加工完成后



图 16 镗铣 4 处 $\phi 16$ mm 光孔和 M10 $\times$ 1.5 mm 刚性攻丝

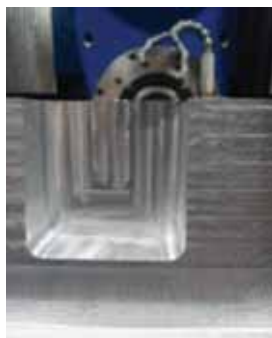


图 17 铣削倾斜面上的
50×50 方槽



图 18 底刃加工 4 处斜面

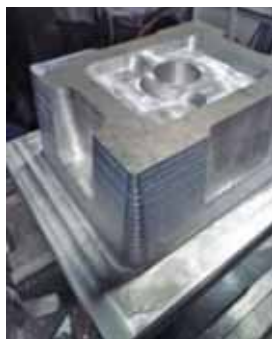


图 19 底刃精加工后 4 处
斜面槽口

行离散化后，重新编制程序，并进行精加工，结果满足了光顺性要求。

4. DMU125P 五轴联动对比切削

为验证上述五轴联动侧刃和底刃的加工质量，选用了进口高档机床 DMU125P 进行金字塔件及 NASA 件的铣削对比试验，如图 22 所示。选用 DMU125P 的原因，是因为该设备结构采用了工作台旋转 C 轴，机床头为 45° 倾斜 B 轴，其结构运动方式与本铣车复合加工中心基本相同，运动插补合成原理一样。对比测试表明，采用国产华中数控系统控制的大型铣车复合加工中心达到了国外高档机床的同等技术水平。

小结

本课题完成了大型五坐标龙门铣车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、国产高速复合摆头主轴 HSK A100 刀柄系统的高速动态性能，以及大型铣车复合数控双驱动转台在车削和五坐标联动下的高速动态响应性、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，完成了对大型五坐标龙门铣车复合玻璃钢加工中心的可靠性检测与应用验证。

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创新亮点较多，包括：

1. 采用固定式龙门横梁双驱 + 铣车复合旋转工作



图 20 侧刃粗加工 4 处斜面中



图 21 侧刃精加工 4 处斜面结果





图 22 DMUI25P 对金字塔件及 NASA 件的铣削效果

台整体结构,通过双电机驱动横梁上下移动,令横梁在 8 m/min 的高速升降时具备了平稳性和精确性,有利于减小加工过程中的刀具振颤,规避了单电机驱动及切削运动中的不平稳性。

2. 采用 X、Y 和 Z 3 个线性轴 + 主轴复合摆头 + 旋转工作台五坐标配置模式,通过 12 000 r/min 的 HSK A100 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,同时,利用回转工作台的高速车削功能,可以方便地车削舱体外型面及端面。

3. 采用国产华中数控系统 HNC848 控制,全部配套国产伺服驱动电机,X、Y 和 Z 3 个线性轴速度分别达到 15 m/min、12 m/min 和 8 m/min,复合摆头转速达到 5 r/min,回转工作台实现了 5 r/min 的铣削和 150 r/min 的车削控制。凭借 RTCP 五轴刀心编程控制,以及基于 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 HSKA100 主轴刀柄,通过 20 kW 的主轴电机及 201 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强力切削。

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五轴联动,利用 150 r/min 高速旋转工作台,通过配置 CAPTO 刀柄,同时实现了大型零件的车削加工。

6. 主机系统配全封闭石墨吸尘装置和导轨防护装置,可吸收切削过程中的石墨、玻璃钢粉尘等,保护环境的同时,避免了机床导轨磨损,保护了机床控制系统,确保了电气安全。

大族激光科技产业集团有限公司

大尺寸三维多层曲面高功率高精度激光焊接技术与装备的研究

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，大族激光科技产业集团股份有限公司承担了“大尺寸三维多层曲面高功率高精度激光焊接技术与装备”课题，该课题的总体目标是，针对大型夹层筒状与箱体结构合金构件的激光深熔对接焊、角焊和搭接焊等制造需求，重点研究激光自熔焊、填丝焊及焊缝跟踪工艺技术，研发三维五轴数控焊接机床、三维大幅空间曲面工装夹具以及开展数控软件集成控制系统的应用，确保焊接质量，控制好整体变形，以此掌握核心工艺技术，实现在三维大幅空间曲面上的高性能、高精度和高功率激光焊接的示范应用。

开展的研究工作

结合上述目标，在课题实施过程中，主要开展了如下研究工作：

1. 整机精度和动态性能（动、静刚度）优化研究

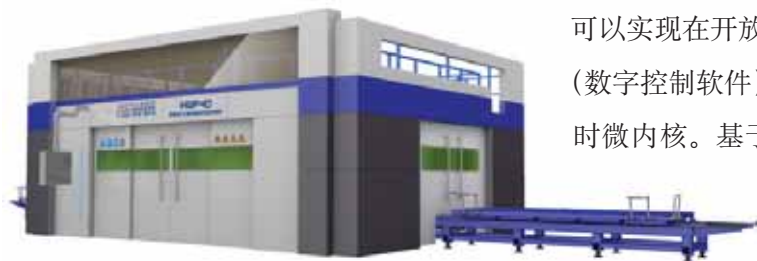
与其他激光加工设备相比，高架龙门三维激光焊接机床具有加工幅面大、负载重、速度快和精度高的特点。为满足该机床的加工性能要求，在对机床的动态性能进行分析的基础上，主要从机床结构的动 / 静刚性、抗振性、稳定性以及传动结构的几何精度、传动精度和定位精度等方面，进行了优化研究。

2. 基于 RTCP 的五轴联动控制应用技术研究

开发了具备 RTCP(TCP) 功能（旋转刀具中心点编程）的多轴联动数控系统，使五轴加工的刀具具有长度补偿功能，无需编程即能实现个性化界面设计，

界面设计源代码完全开源。同时，可以实现在开放式 SOFT - CNC（数字控制软件）系统平台上的实时微内核。基于工艺专家数据库

的控制系统的实现，使得最终用户的繁杂



高架龙门三维五轴激光焊接系统

工艺数据,能够被无缝集成到数控系统中。

具体的研究内容包括:

(1) 五轴联动 CNC 硬件应用平台的研制;

(2) 五轴联动 CNC 软件应用技术的研



高架龙门大幅面高精度三维五轴联动光纤激光机床

(3) 多轴联动 CNC 控制相关的可靠稳定应用研究;

(4) 焊缝轨迹示教录返编程技术应用研究;

(5) 自诊断、报警、功能检测、急停、故障内容显示及功率在线调试研究;

(6) 激光焊接领域数控解决方案包的在线集成实现与验证。

3. 三维光纤激光焊接头的研制

研究了适用于 6 000 W 的高功率光纤激光三维焊接头,具体包括:

(1) 防缠绕功能,双摆轴机构,配合机床实现三维曲线轨迹;

(2) 实现双摆轴高精度运转,两轴定位精度 $\pm 0.015^\circ$, 重复定位精度 $\pm 0.005^\circ$;

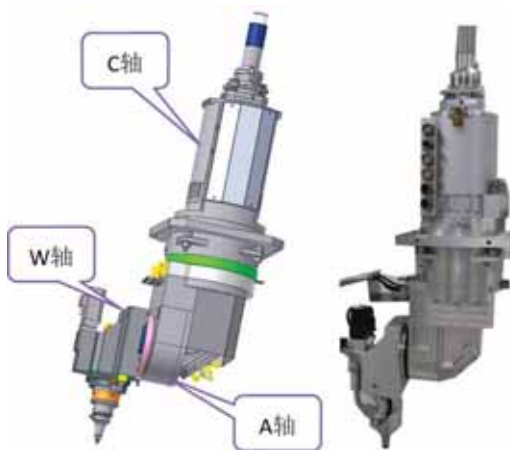
(3) 多重动密封技术,确保水、气、电在机构旋转运动时不产生泄露,产品运行安全,具备良好的可靠性;

(4) 温度控制系统研究,结构散热系统设计。激光加工对热非常敏感,三维焊接头结构紧凑,涉及的热源较多,因此,需要通过散热设计,控制热影响区的温度,进而稳定加工质量。

4. 模拟件设计制造与激光焊接

研究内容包括:

(1) 总结提炼典型大尺寸多层高精度构件焊接需求,设计、制造大型不锈钢材料夹层筒体模拟件,模拟产品焊接需求和工况,并结合生产需要以及预先研究所期望的各项方案需求,针对主机及焊接装夹系统提出恰当的技术指标,针对模拟件提出焊后精度检测指标以及提出结构性能试验项目指标。



高功率 (6KW) 光纤激光三维焊接头

(2) 设计制造大尺寸夹层筒状和箱体模拟件,进行模拟件光纤激光焊接,并针对焊成的模拟件,设



高架龙门三维五轴机床，主要用于航空航天三维覆盖件的切割

计、制造气密试验工装。焊后，对模拟件进行整体尺寸（直线度、圆柱度）检测，通过探伤考察焊缝质量的一致性，通过整体气密试验考察结构气密性，同时对零件精度进行检测，以测试模拟件的尺寸精度和焊缝可靠性

5. 激光焊缝跟踪系统的开发

研究内容包括：

- (1) 开发由传感器、控制系统与执行机构组成的激光焊缝跟踪系统；
- (2) 开发先进的图像处理方法；
- (3) 设计快速稳定的焊缝跟踪控制方法（如 PID 控制算法），引入误差预测，采用闭环控制，提高系统稳定性和抗干扰性；
- (4) 设计友好的人机操作界面；
- (5) 开发三维结构件的激光焊接实时焊缝跟踪。

6. 曲面型面修正、曲面定位、曲面与曲型型材拼接、曲面分段激光拼焊装配工艺优化与工装定位方法研究

根据模拟件需求，初步设计多种备选焊接及装夹方案，采用专业的焊接仿真计算软件，对各种方案进行模拟计算，以“控制焊接变形、减小应力集中”的效果为依据，考察各种方案的实施情况，研究、设计并制造相应的用于曲面型面修正、曲面定位、曲面与曲型型材拼接、曲面分段激光拼焊装配等工作的高精度焊接定位装夹工装夹具。

7. 高功率光纤激光三维焊接工艺数据库的建立

制备不锈钢不同工况的对接、搭接和角接的同种材料及异种材料试验接头，进行试板焊接和焊缝内部质量及各项性能测试，通过对上述工艺和设备的研究结果进行综合应用，来检验数据的有效性和结构的可靠性；通过多家联调、现场焊接及焊后检验，从使用需求出发，修正数据库的框架设计，并系统采集焊接工艺数据，纳入数据库管理。

8. 设备的可靠性与评价体系

在利用设备焊接正式产品的过程中，对焊机的各功能机构进行可靠性摸底试验，结合可靠性摸底试验情况，分析影响使用的薄弱环节，提出解决方案并加以实施。措施落实后，设计可靠性试验方案，开展可靠性试验，对出现的问题进行归零处理，并采取纠正措施。通过对焊机的各功能机构进行 FMEA 分析，确定薄弱环节，并对产品可靠性进行系统评价，形成设备的可靠性评价体系。

取得的技术突破与成果

通过开展上述研究工作，取得了如下进展：

1. 对高架龙门大尺寸面三维激光焊接机床进行了动态设计优化，提高了整机精度；
2. 实现了基于 RTCP 的多通道五轴联动控制技术的应用；
3. 优化了三维高功率光纤激光焊接接头结构；
4. 开发了激光焊缝跟踪系统；
5. 了解并掌握了大尺寸夹层筒状构件和箱体光纤激光焊接的变形规律和变形控制；
6. 建立了高功率光纤激光精密对接焊、角焊、搭接自熔焊、填丝焊和复合焊的专家数据库；
7. 掌握了激光复合焊技术；
8. 实现了对光纤激光焊接熔深与焊接质量的控制；
9. 实现了五轴控制系统与控制软件的开发和应用。

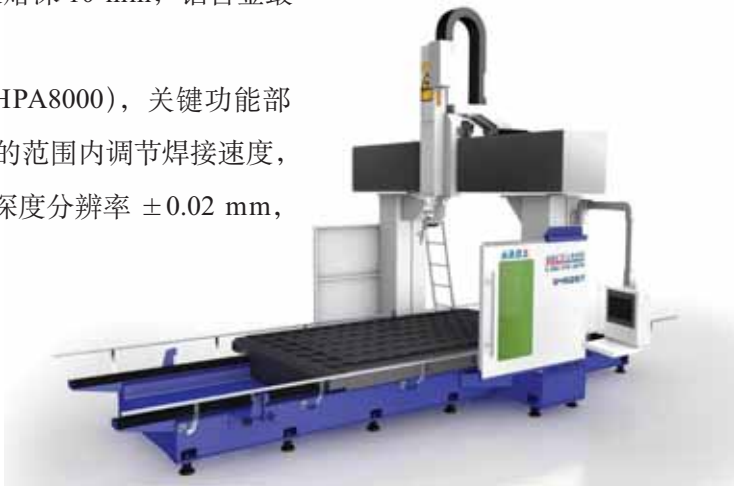
在此基础上，开发出了三维五轴数控焊接机床和三维大幅面构件工装夹具成套装备，技术指标实现了： X 、 Y 、 Z 轴行程分别为 4 000 mm、2 000 mm 和 2 000 mm；三维焊接头： A 轴旋转角度 $\pm 360^\circ$ ， B 轴旋转角度 $\pm 135^\circ$ ， A 轴定位精度 $\pm 0.007^\circ$ ， B 轴定位精度 $\pm 1.013^\circ$ ，重复定位精度 ± 0.005 ；搭载焊缝跟踪系统：视场深度 35 mm，视场宽度 25 mm。利用五轴坐标转换功能，计算补偿聚焦实际控制点的旋转运动，实现了焊接头中心的附加移动。

所开发的三维五轴数控焊接机床和三维大幅面构件工装夹具成套装备，可焊接的不锈钢材料夹层筒状构件，最大规格为 $15\text{ m} \times \phi 1.5\text{ m}$ ，最大厚度 10 mm；可焊接的铝合金箱体构件，最大规格 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ，最大厚度 5 mm。激光深熔对接焊、角焊和搭接焊时，不锈钢最大熔深 10 mm，铝合金最大熔深 5 mm。

整套装备，采用国产数控系统（大族彼岸 HPA8000），关键功能部件的应用比例达到 73.33%，可在 $0.8 \sim 2.5\text{ m/min}$ 的范围内调节焊接速度，且焊缝跟踪可以实现：横向分辨率 $\pm 0.05\text{ mm}$ ，深度分辨率 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，焊缝成形良好，焊接变形控制在 3 mm 以内。

经济效益和社会效益

随着三维五轴数控焊接机床和三维大幅面构件工装夹具成套装备的开发成功，形成了年





热成型三维五轴激光切割机，可以实现高强度钢三维件的曲面柔性加工

产大幅三维高功率高精度激光加工成套装备 10 台 / 套的市场规模，直接产值达到 11 100.2 万元。其中，自主研发的 HPA8000 数控系统及其光纤激光焊接专家数据库，形成 100 台 / 套的市场规模，产值达到 570 万元；自主研发的 A/B 双摆三维光纤激光焊接头关键功能部件，可以实现批量销售与应用，形成了 100 台 / 套的年市场规模，产值达到 650 万元。

此外，该课题成果还产生了大约 3.44 亿元的间接经济效益，打破了进口产品在关键技术领域的垄断局面。

通过课题实施，形成了 11 项技术标准，获得了 16 项发明专利和 2 项软件著作权，发表论文 12 篇、科技报告 2 篇。在此过程中，培养高、中级技术人员和技术工人 43 人、硕士研究生 10 人、博士研究生 3 人和博士后 1 人。

推广应用情况

伴随着高端数控五轴联动激光加工装备的国产化，本课题研发的激光焊接工艺参数，现已优化应用于航天航空、能源、汽车和机械工业等领域，如北京特种机械研究所、北京卫星制造厂和沈阳飞机工业（集团）有限公司等。与此同时，大族激光科技产业集团股份有限公司还在不断完善工艺参数，加强示范应用，并积极寻求与汽车制造企业的合作，实现课题成果的进一步推广应用。

湖北三江航天红阳机电有限公司
 济南二机床集团有限公司
 武汉华中数控股份有限公司
 华中科技大学
 株洲钻石切削刀具股份有限公司
 湖北航天技术研究院计量测试技术研究所

基于国产数控系统的六轴双模式五坐标联动加工中心的应用验证

文 / 王华侨 明先承 张守明 韩红亮 杨进东 冯四伟 翟永卉 赵华军 张颖 任立伟 贾会述 刘卫红
 王磊 赵玉林 包鹏超 郑武 尹乐 蔡亮 杨建中 陈吉红 黄锋 李湘坚 肖星雨 高宏

航天产品的技术发展,离不开国产高档数控装备和先进制造技术的支撑。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,通过实施“国产高档数控装备在异形复合材料结构件制造的示范应用”课题(编号2016ZX04002001),令专项支持开发的六轴双模式五坐标龙门玻璃钢加工中心在航天型号复杂产品的高速切削加工中得到了示范应用,为航天重点用户提供了成套技术解决方案。通过应用验证,提高了国产高档数控机床的加工适应性、精度保持性和可靠性,以及国产高档数控机床、数控系统、功能部件和共性技术在航天领域的应用水平,这对于提高航天领域的整体制造能力、实现航天装备产品集成制造的自主可控意义重大。

通过课题的实施,完成了大型五坐标龙门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、自制双摆角数控万能铣头的性能和精度,以及大型数控转台五坐标联动的高速动态响应性、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;完成了对大型五坐标龙门玻璃钢加工中心的可靠性检测与验证;完成了对国产六轴双模式五坐标联动数控系统高端功能的验证和应用。

大型龙门六轴双模式五坐标联动玻璃钢加工装备的研制开发和示范应用,涵盖了数控机床设计、数控系统优化、机床应用、切削加工工艺、自动编程、后置

处理、精度控制与评估、质量保证等覆盖整个数控加工过程的关键技术,攻克的技术难点包括:数控系统与主机、功能部件之间的适应性,功能强化及可靠性评价,航天复杂产品加工过程中的定位基准协调、加工效率、变形控制和在线检测等。

机床总体结构

1. 总体结构

如图 1 所示,机床采用高架式龙门结构,固定式工作台中间镶嵌旋转工作台,横梁沿左、右床身导轨水平纵向移动(X 轴)。横梁上配有溜板,铣头滑枕既可随铣头溜板沿横梁导轨水平横向移动(Y 轴),也可沿溜板导轨垂直升降(Z 轴)。双摆角数控万能铣头的主轴随铣头摆动体在垂直面内绕 X 轴摆动(A 轴),双摆角数控万能铣头的主轴随铣头叉形体在水平面内绕 Z 轴回转(C 轴)。配备 $\phi 2\,000\text{ mm}$ 数控分度转台和链式刀库。采用华中五轴数控系统 HNC-848,整机可实现五轴联动。

整机大件采用铸铁件加钢板焊接件的最优组合,工作台、床身为树脂砂造型、高强度优质铸铁件,横梁、溜板和滑枕为钢板焊接件, X 、 Y 和 Z 轴均采用重载精密滚柱直线导轨,全闭环位置反馈。在 SIEMENS 交流伺服电机直联减速箱降速后,通过驱动滚珠丝杠螺母副,实现了各轴的直线运动。三轴的直线导轨和 Y 、 Z 轴的滚珠丝杠均采用南京工艺装备制造有限公司的国产功能部件,数控分度转台采用济南二机床集团有限公司的自制产品。主机系统开发流程如图 2 所示。



图 1 大型六轴双模式五坐标联动加工中心

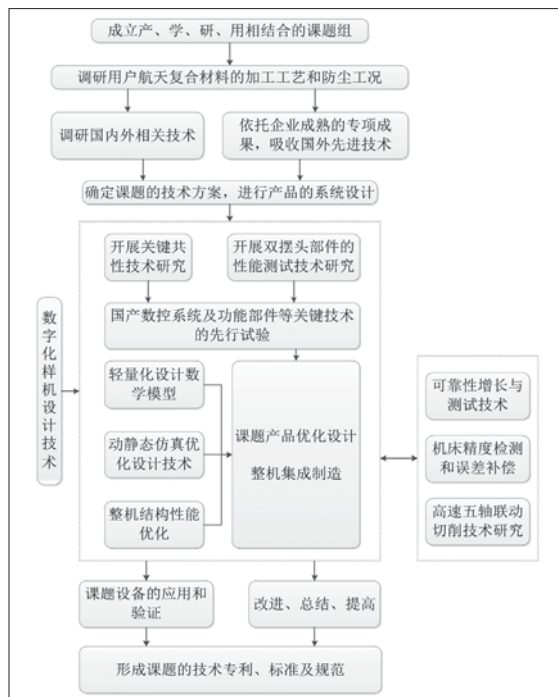


图 2 主机总体研发工作流程

2. 机床主要技术规格参数

大型六轴双模式五坐标联动龙门玻璃钢加工中心带电器防爆除尘装置以及玻璃钢石墨除尘装置,可兼顾部分金属干切削,具备六轴双模式五坐标联动加工功能,主要技术规格参数见表1。其中, X 、 Y 和 Z 轴的行程分别大于或等于3 500 mm、2 500 mm和1 500 mm, C 轴 $\pm 360^\circ$ 连续转动, A 轴 -110° 和 $\geq 110^\circ$ 连续转动,工作台回转直径 $\geq \phi 2\,000$ mm,线性轴定位精度 ≤ 0.012 mm、重复定位精度 ≤ 0.008 mm,快移速度 ≥ 15 m/min,主轴最高转速 $\geq 12\,000$ r/min。

3. 核心功能部件

表2为3种不同驱动方式的典型AC摆头性能对比,力矩电机直驱双摆头参数可以满足航天复杂结构件的加工要求。

为提升双摆角数控万能铣头的性能,开展了如下研究:双摆角数控万能铣头的先期技术性能和精度的提升;双摆角数控万能铣头的相关检测测试技术和规范;双摆角数控万能铣头在用户现场的可靠性测试和增长技术研究。

双摆角数控AC摆头为济南二机床集团有限公司自主研制的高档功能部件,是2009年04专项课题(编号2009ZX04011-013)成果。其主体方案采用了A/C双摆

表1 六轴双模式五坐标龙门机床参数

机床基本配置	参数	机床基本配置	参数
工作台尺寸(宽×长)	2 500 mm×4 000 mm	A 轴锁紧力矩	3 000 Nm
立柱内侧间距离	3 600 mm	C 轴驱动力矩	1 000 Nm
主轴端面至工作台面距离	300~1 800 mm	C 轴锁紧力矩	3 000 Nm
$X/Y/Z$ 轴行程	3 500 mm/2 500 mm/1 500 mm	电主轴功率(S1/S6-40%)	40/52 kW
$X/Y/Z$ 轴工作进给速度	15 000 mm/min	电主轴扭矩(S1/S6-40%)	73.8/96.1 Nm
$X/Y/Z$ 轴快速移动速度	15 000 mm/min	电主轴转速	10~18 000 r/min
滑枕截面尺寸	550 mm×550 mm	电主轴锥孔	HSK—A100
整体式滑枕五轴头尺寸	800 mm×525 mm×2 500 mm	A 轴摆角	$\pm 110^\circ$
机床外形尺寸(长×宽×高)	10 000 mm×6 800 mm×6 100 mm	C 轴行程	$\pm nx360$ (n 为整数)
双摆角数控万能铣头配置	力矩电机直驱控制	A 轴进给速度	0~60 r/min
A 轴驱动力矩	1 000 Nm	C 轴进给速度	0~60 r/min

表2 3种不同驱动方式的典型AC摆头性能对比

项目	机械主轴式双摆头	电主轴式机械驱动双摆头	电主轴式力矩电机驱动双摆头
技术特点	大扭矩加工	高速加工	
铸铁、铸钢、钛合金	粗加工、精加工	精加工	
铝、复合材料	强力切削粗加工	粗加工、精加工	
叉形体截面尺寸	较大	较小	较大
A/C 轴进给速度	5 r/min	10 r/min	60 r/min
A/C 轴定位精度	10"	7"	6"
应用行业	航空航天、船舶、能源	航空航天、轨道交通、模具	



图3 力矩电机直驱双摆角AC铣头

角铣头与滑枕一体化的结构， C 轴传动部分安装在滑枕内部，主运动由电主轴单元实现。铣头的 A 、 C 轴采用德国IDAM力矩电机直接驱动技术，可通过液压夹紧装置而被锁定在任意位置。HEIDENHAIN高精度角度编码器实现了 A 、 C 轴的全闭环位置反馈。铣头的 A 轴摆动体内装有大功率高速电主轴，功率52 kW，最高转速18 000 r/min。图3所示为力矩电机驱动的AC摆头结构原理及实物。

华中数控系统配套解决方案

1. 国产数控系统五坐标配套解决方案

图4所示为华中8型HNC848高档数控系统框架构成，它不仅具有8轴联动的控制功能，而且支持8通道。系统的最小分辨率为 $0.001\ \mu\text{m}$ ，插补时间为 $0.125\ \text{ms}$ ， G 代码前瞻段数可达2 000段。大型五坐标龙门玻璃钢加工中心配套的华中数控系统方案见表3。

华中数控HNC848系统与五坐标机床配套，需根据航天复杂结构件的特点和实际加工要求，通过对机床定位精度、运动精度、功能可靠性和精度保持性等进行分析与测试，开展基于零件工艺性和机床性能的研究，包括：开发基于机床机构参数的加工精度与控制模块，研究高档数控系统与六轴龙门玻璃钢加工中心的双模式五坐标联动匹配性的适应性技术，以及开发基于六轴双模式五坐标联动的

后处理模块等。

对机床定位精度与运动精度的分析和测试，需要依据复合材料航天结构件的工艺要求，有选择性地对各运动部位在数控装置控制下的运动所能达到的直线运动定位精度(X 、 Y 、 Z)和重复定位精度、回转



图4 华中8型数控装置

表 3 华中数控系统配套五坐标龙门加工中心方案

No	功能	数量	No	功能	数量
1	五坐标龙门加工中心总线数控装置 HNC848	1	17	A 轴驱动器 (全套插头) 带西门子力矩电机	1
2	MCP 键盘线	1	18	主轴驱动器 (全套插头) 带进口异步主轴	1
3	数控系统 UPS 电源	1	19	X/Y 轴电抗器	2
4	数控装置电源电缆 10 m	1	20	Z/刀库轴电抗器	1
5	1000 系列总线 I/O 单元底板模块	1	21	A/C 轴电抗器	2
6	以太网通信版	1	22	主轴电机电抗器	1
7	输入模块 (16 点 / 块) PNP 型	4	23	X/Y/A 轴制动电阻 铝壳	5
8	输出模块 (16 点 / 块) PNP 型	4	24	Z/C 轴制动电阻 铝壳 并联	4
9	总线电缆 10 m	2	25	刀库制动电阻 铝壳	1
10	X/Y 轴伺服电机 扭矩 27 Nm 3 000 r/min	4	26	主轴制动电阻 铝壳 并联	4
11	Z 轴伺服电机 扭矩 33 Nm 3 000 r/min 抱闸	1	27	X/Y 轴电机动力线 2.5 mm ² 10 m	4
12	刀库轴伺服电机 扭矩 15 Nm 3 000 r/min	1	28	X/Y 轴电机指令线 10 m	4
13	X/Y 轴驱动器 (全套插头)	4	29	刀库轴电机动力线 1.5 mm ² 10 m	1
14	Z 轴驱动器 (全套插头)	1	30	Z 轴电机动力线 4.0 mm ² 10 m 含抱闸	1
15	刀库驱动器 (全套插头)	1	31	刀库/Z 轴电机指令线 10 m	2
16	C 轴驱动器 (全套插头) 带西门子力矩电机	1	32	手摇操作盒 (6 轴)	1

定位精度 (A、B、C) 和回转重复定位精度、各轴机械动态特性等进行控制保障。在功能可靠性和精度保持性的分析与试验方面, 需要有选择性地开展空运转试验、主轴和进给轴加载试验、实际切削试验、空运转加速试验、安全试验、进给轴和旋转轴的精度保持性测试、主轴回转精度保持性测试等。

2. 华中数控系统技术创新成果应用

数控加工过程中, 由于各种误差因素的存在, 使得加工过程始终偏离给定进程, 造成加工误差。通常, 基于经验和反复试验的方法制定加工工艺, 可以保证零件的加工精度, 但周期长, 成本高。若在加工前准确预测零件的加工精度, 则可替代试切环节, 缩短生产周期, 降低成本, 并指导工艺方案的优化。通过预测结果而对加工误差进行补偿, 可以提高零件的加工精度。如图 5 所示, 具体过程是: 制订数控系统与大型五坐标龙门玻璃钢加工中心的配套验证方案, 确定配套设施需要验证的数据和参数, 明确数控系统的理想运行状况。根据所确定的验证标准及现有的大型五坐标龙门玻璃钢加工中心来拟定配套方案, 确定配套所需的设备列表, 针对该方案明确配套所需验证的参数及测试流程, 对拟定的方案进行修改、论证、验证和完善。在多轴控制多坐标联动、多通道复杂加工技术方面取得的创新成果包括:

(1) 高同步 NCUC2.0 现场总线, 支持高速高精、多轴和多通道技术。在同步性方面, 采用新型全自动式漂移补偿和偏移补偿来提高同步初始化效率。冗余处理: 封装时间戳, 支持周期和非周期通信, 安全的数据重发和检测机制。控制通道 8 个、

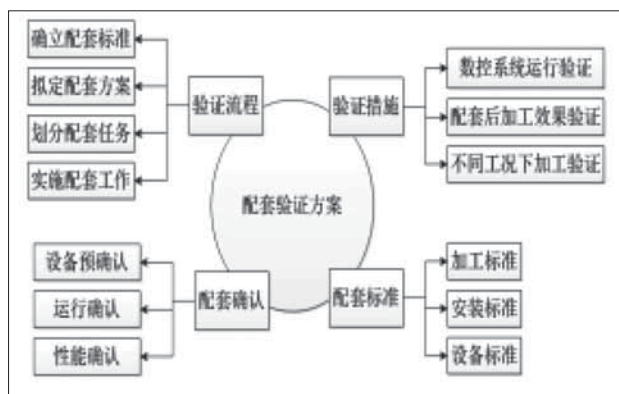


图 5 数控系统工况配套方案框架



图 6 数控系统多通道系统测试

最多控制轴数 6 个。NCUC2.0 的时钟同步精度达到 12 纳秒，时钟同步初始化效率达到 85 帧。相对于 EtherCAT 模式的时钟同步精度为 38 纳秒，时钟同步初始化效率为 7850 帧，具有较大的优势。如图 6 所示。

(2) 研发了五轴联动控制技术（如图 7 所示）：功能全面覆盖国外高档数控系统的五轴功能，采用统一的多轴运动学模型，满足了多种结构的五轴机床控制要求，如五轴联动 RTCP、五轴大圆插补、五轴定向加工、五轴机床结构误差测量和补偿、直线轴和旋转轴动态特性匹配等。

(3) 模块化、全数字伺服装置软硬件平台，由高性能 DSP、FPGA 和 IGBT 组成，电源模块和驱动模块独立控制。应用层与算法层不依赖于硬件平台，实现了软件跨平台，满足了伺服电机、直线电机、主轴 / 电主轴电机和力矩电机的控制。图 8 和图 9 分别为伺服驱动控制平台和多种电机统一控制模型。

(4) 实现了对多品种规格系列化进给伺服和主轴伺服驱动产品的应用，应用的系列化伺服电机功率范围 30 W~250 kW，最高转速 30 000 r/min。

五坐标机床标准件加工检测

1. 国家标准三坐标立式与卧式综合测试



图 7 五轴联动控制技术数学模型

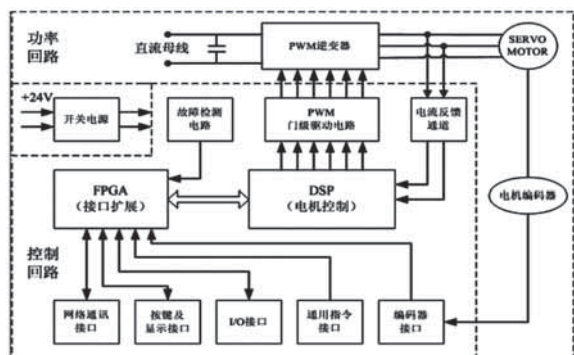


图 8 伺服驱动控制平台

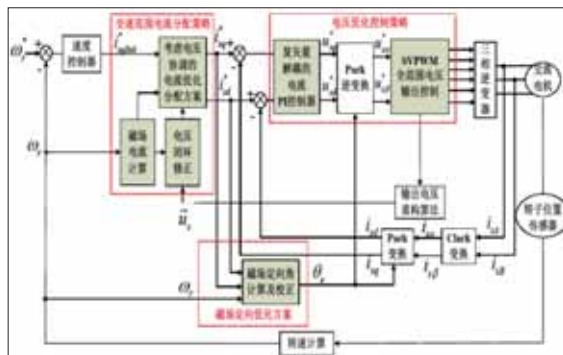


图9 多种电机的统一控制

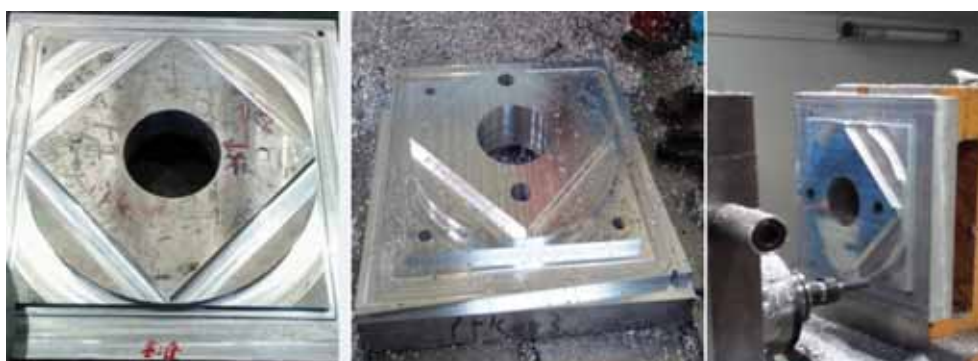


图 10 国家标准件测试

针对五坐标机床需同时实现立式和卧式两种加工状态,以及需要按照标准对三轴国标测试件进行加工,增加了2处 3° 斜角加工,以检测斜度精度;增加了4处圆孔加工,以检测孔的位置;增加了圆孔中的台阶孔加工,以检测两孔的同轴度。经加工及检测,产品合格,如图10所示。



图 11 NASA 件测试

2. 五轴国际标准 NASA 及 S 件加工测试

五轴联动侧刃加工如图 11 所示的国际标准 NASA 件及图 12 所示的新型五轴联动测试标准 S 件，产品综合质量检测合格。同时，对某模具进行了加工检测，达到国外高档数控机床的同等加工水准，如图 13 所示。

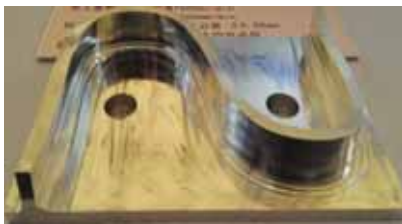


图 12 S 件侧刃加工测试

五坐标金字塔形件测试

1. 五坐标编程后处理

(1) 后置处理配置。五坐标龙门玻璃钢加工中心机床结构如图 14 所示: X 轴横梁沿



图 13 模具加工应用

固定立柱床身导轨纵向运动, Y 轴滑铣头溜板沿横梁导轨往复运动, Z 轴滑枕式铣头沿溜板导轨垂直运动, 双摆角数控万能铣头分别为 C 和 A 轴, 底座固定在地基上, 回转工作台 B 轴(先期设置为 B 轴, 后由于与钢丝攻丝功能冲突, 则将 B 轴改为 U 轴)位于底座工作台中部。通过 UG 自带的前置处理构造器, 配置此机床后置处理, 其中, 限制 C 为 $-360^{\circ} \sim 360^{\circ}$, A 轴 $-110^{\circ} \sim 110^{\circ}$, 若 AC 轴超程, 后置处理限制允许重新进出刀。

(2) 后置处理测试。如图 15 所示, 后置处理配置过程经过了反复几次修改测试, 最初的加工策略为螺旋方式, 因而配置了 C 轴, 按照短路径设置了 C 从 0° 到 360° ; 后发现, 因机床结构的限制, 不能无限旋转 C 轴, 因此作了修改, C 轴按上述情况限制为 $\pm 360^{\circ}$ 。其缺点是, 选择加工策略时, 机床要提前限制, 通过往复或单向加工方式编写数控程序。若采用螺旋方式编写程序, 会在加工过程中出现抬刀(主要是限制 C 轴旋转, 在 $\pm 360^{\circ}$ 内加工), 存在较大的危险性。程序语句从 N307 到 N310 出现抬刀后, C 轴回到不超程角度再入刀的情况。

(3) Vericut 仿真模型配置。在 Vericut 环境中, 按照华中数控系统对机床控制器进行配置, 同时还借鉴了七轴五联动车铣复合加工中心的控制系统, 过程如下: 因原车铣复合为转头和转台联动, 现为双转头联动, 为实现欧拉角样式定义, 为欧拉角命令中的控制系统配置文件 C 轴 *-1, 可以实现钻孔攻丝等加工; 定义欧拉角后, 通过 G53.1 或 G53.2 功能, 令刀具垂直于加工面, 因此, 对此命令做了

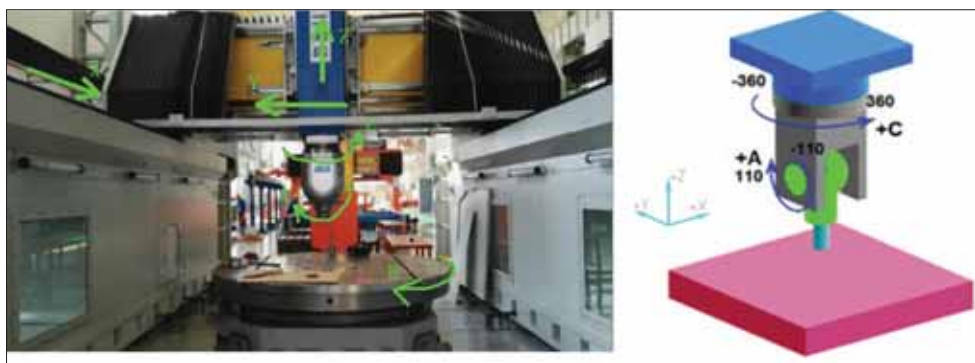


图 14 五坐标机床运动配置图

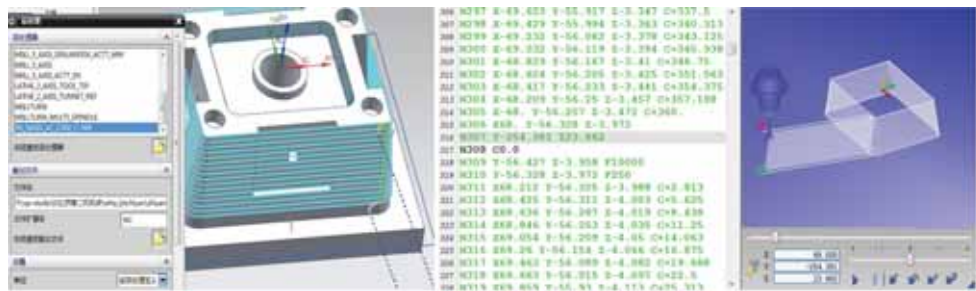


图 15 后处理 RTCP 数控程序测试

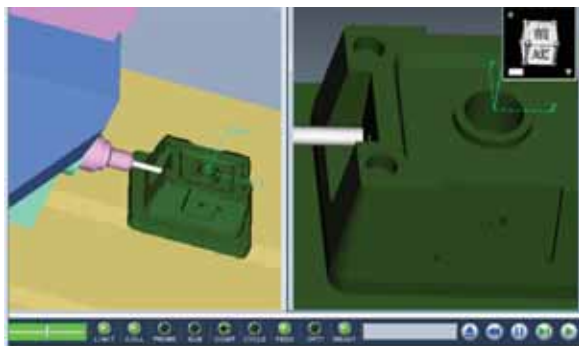


图 16 含有刀具半径补偿的欧拉角定义加工槽

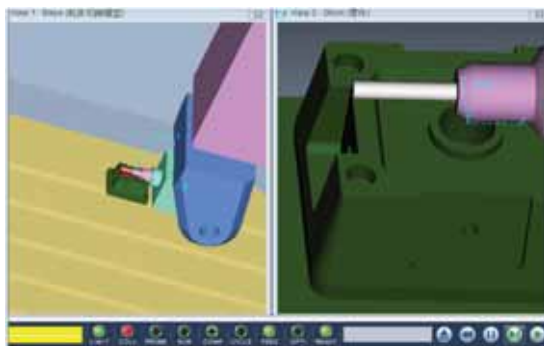


图 17 刀轴方向错误 (即 C 轴转向不正确)

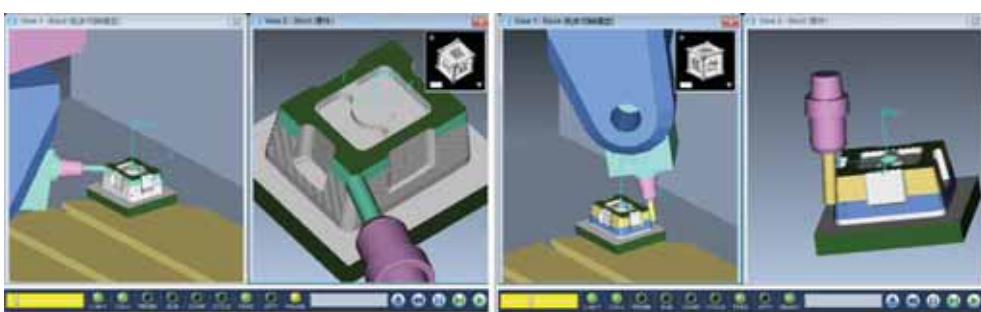


图 18 Vericut 模拟仿真粗加工

修改;将此 C 轴旋转的值 #100122* 设置为 -1,使其达到使用要求,如图 16 所示;若不修改,则在加工槽时(如图 17 所示),主轴方向反向,不符合加工要求。

(4) 为防止转头超程,特把 AC 轴的行程按照机床行程 $U(-361^{\circ}, +361^{\circ})$ 、 $X(-1750, +1750)$ 、 $Y(-1250, +1250)$ 、 $Z(0, +1500)$ 、 $A(-110^{\circ}, +100^{\circ})$ 和 $C(-360^{\circ}, +360^{\circ})$ 进行限制。

2. 金字塔轨迹编程设计

(1) X 、 Y 、 Z 线性轴 + AC 双摆头五轴测试(如图 18~ 图 20 所示)。通过金字塔型件生成数控程序,验证 UGNX 后置处理和 Vericut 中的配置,具体的加工顺序为:RTCP 方式使用 XD20R0 粗加工塔形件,侧壁留 0.4 mm 余量;XD20R0 五轴底刃加工斜面,留 0.2 mm 余量,看底刃加工效果;XD20R0 五轴侧刃精加工斜面到尺寸;XD10R0 侧刃精加工上面的斜面;侧面和顶部槽,使用 XD10R0 侧壁留 0.2 mm 五轴 RTCP 方式粗加工;其他特征如孔系,通过欧拉角方式精加工到位,ZTD8.5 钻 X 正方向 M10 的底孔 D8.5。

(2) X 、 Y 、 Z 线性轴 + A 摆头 + B 轴旋转工作台加工过程。因机床工作台 B 轴还作为与 C 轴平行的轴,结构

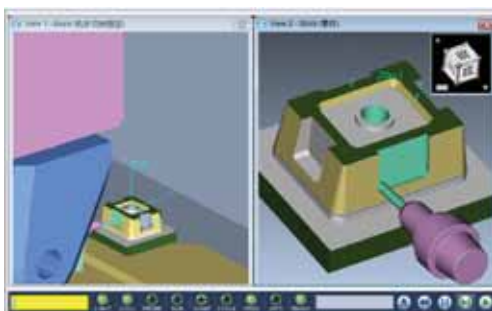


图 19 XD20R0 底刃精加工斜面

类似菲迪亚 FIDIA KR214 的 U 轴功能, 将 B 轴做分度使用, 可以在加工超大型零件时, 如有超程, 让零件旋转到合适的位置再加工。此功能的简单验证如下: 开始加工塔形件时, 随意摆放在工作台上, 没有与工

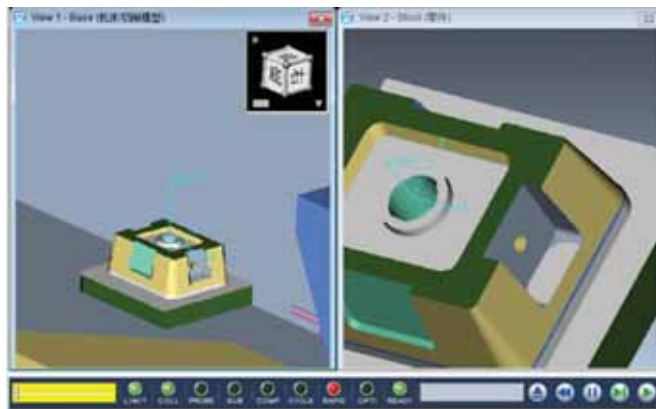


图 20 XD20R0 侧刃精加工斜面

作台同心。查看机床坐标, 了解到塔形件在工作台上的位置, 按此点在 UGNX 上建立与工作台同心的编程坐标系。通过工作台同心方式, 编写数控程序, 分别在 $B0^\circ$ 、 $B-90^\circ$ 和 $B-135^\circ$ 上使用 AC 轴 RTCP 功能, 加工同一个面, 以验证此功能。工件坐标系中心与机床工作台回转中心的偏移距离为 ($X-588.285$ $Y+36.055$), 首先在 VERICUT 中模拟验证 $B-135^\circ$ 时, RTCP 方式加工的倾斜面, 然后分别在 $B0^\circ$ 和 $B-90^\circ$ 时加工同一个面, 均符合仿真, 没有出现切现象。

3. 金字塔型件切削测试

(1) 机床功能性验证测试。通过加工塔形试切件, 观察华中数控系统及机床的整体运行情况。为测试机床是否能够按照数控程序进行加工, 利用几个简单程序对机床进行了测试: 首先设置机床的各轴行程、正负方向; 验证机床是否能够按照 C 轴最短路径加工产品, 结果显示不能, 需在程序中对 C 轴旋转角度进行限制; 测试欧拉角方式是否能够正常运行, 编制基于欧拉角算法的数控程序进行验证, 结果显示无法实现, 经调试, 在运行五轴程序时, 需在运行程序前增加 $G43.3$ 命令; 对程序进行修改后, 机床动作满足要求; 测试 $G53.3$ L 法相退刀命令, 机床动作满足要求; 测试刚性攻丝过程时, 机床无法实现刚性攻丝动作, 需为旋转工作台轴系统配置一个通道。

(2) 金字塔形件五轴端铣和侧铣。在粗加工外形轮廓时, 未出现异常; 半精加工底刃时, 未出现异常, 产品光洁度较好, 两刀接刀痕可以忽略, 同一刀拐角



图 21 底刃端铣测试



图 22 侧刃铣削测试

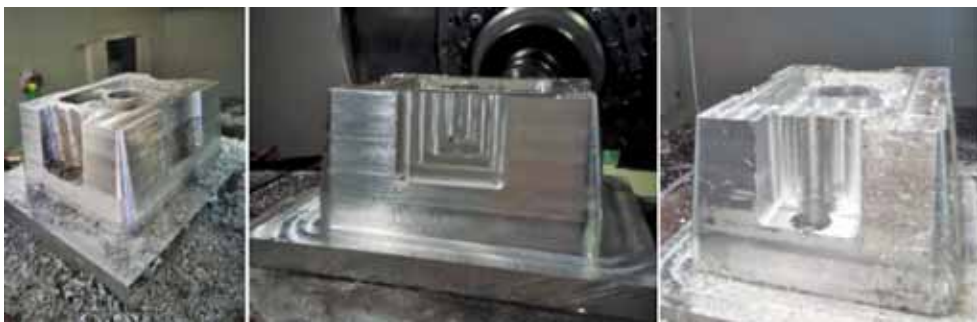


图 23 五轴欧拉角定位铣削

位置光洁度较好。拐角处由于给定的步距问题，两刀接刀位置存在阶梯状台阶，半精加工后如图 21 所示。侧刃精加工过程中未出现异常，整体光洁度较好，两刀接刀痕及拐角位置均满足要求，如图 22 所示。精加工 Y 负方向及 X 负方向的槽侧壁，采用五轴欧拉角定位铣削模式，产品光洁度均满足要求，如图 23 所示。

(3) 五轴钻孔攻丝和镗孔加工。 Y 负方向欧拉角钻孔 $\phi 8.5$ 及刚性攻丝 M10 孔，在钻孔过程中未出现问题。在模拟刚性攻丝过程中，由于华中数控系统参数设置问题，整个机床动作无法实现，后对现场参数进行调整，将原来的工作台旋转轴 B 轴设置成 U 轴，并在程序语言中加入了特定语句，刚性攻丝模拟动作无误。加工 M10 螺纹后，采用 M10 螺钉进行装配，装配无误，如图 24 所示。刚性攻丝程序需加入特定语句，在后处理软件中进行集成，实现后续生成的程序不再需要手动添加此类特定语句。

精镗孔过程无误。由于镗刀刀片规格和刀杆不匹配，安装后刀片不处于刀杆中心，偏差较大，无法加工实物，因此验证了程序运行的整个动作，依据加工经验，整个过程中进刀、退刀均符合要求。

(4) 基于转台联动的五轴铣削加工综合测试。如图 25 所示，验证通过工作台同心方式编写数控程序对零件的加工情况，现抽取 U 轴旋转 135° 来进行简单模拟，整个加工过程未出现异常。由于产品已完成精加工，机床在进行面加工时，无切屑产生。

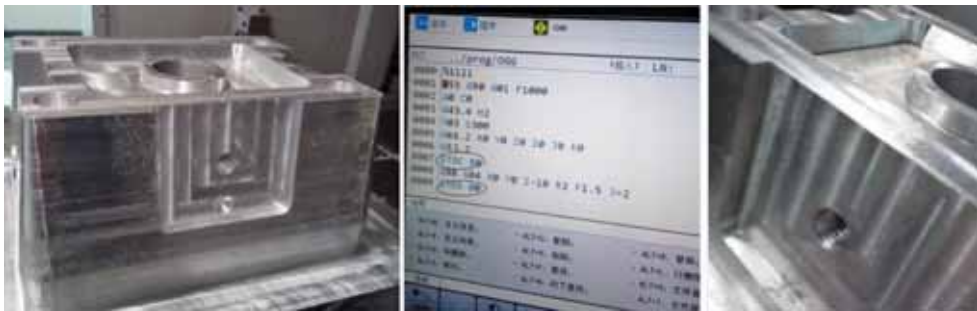


图 24 基于欧拉角的五轴钻孔攻丝测试



图 25 回转工作台联动系统综合测试

小结

对基于国产华中数控系统控制的大型龙门六轴双模式五坐标联动玻璃钢加工中心进行的示范应用,创新亮点较多,具体为:

1. 采用高架式龙门移动+固定工作台镶嵌旋转工作台整体结构,通过双电机驱动,确保了龙门在高速移动(15 m/min)下的平稳性和精确性,有利于减小加工过程中的刀具振颤,规避了工作台移动时的大功率驱动及切削运动过程中的不平稳性。

2. 采用 X、Y、Z 3 个线性轴+主轴 AC 摆头+旋转工作台配置模式,实现了六轴系统控制双模式五坐标联动加工。通过 XYZAC1(摆头)、XYZAC2(转台)双模式五坐标联动加工功能,在有限的空间行程范围内,不但可以实现矩形毛坯的五坐标加工,还可以利用回转工作台进行舱体类零件的加工,有效地拓宽了加工对象。利用回转工作台的回转分度特性,方便地实现了舱体内型面的五轴联动加工。

3. 通过采用国产华中数控系统 HNC848 配套国产伺服驱动电机、RTCP 五轴刀心编程控制以及对双模式五坐标联动后处理的开发(双模式五轴联动自行切换),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 HSKA100 主轴刀柄,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强力切削。

5. 大力矩驱动和锁紧高速精密旋转工作台,可实现 60 r/min 的高速旋转。除联合 A 摆头单独实现五轴联动外,还可以配合 AC 摆头五坐标联动实现分度分区加工。利用高速旋转工作台,通过配置 CAPTO 刀柄,可以实现大型零件的车削加工。

6. 主机系统配备全封闭石墨吸尘装置和导轨防护装置,可吸收切削过程中的石墨、玻璃钢粉尘等,因而有利于加工环境的改善和对机床的保护。

“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/