

105 大数据

25. 税务大数据计算关键技术及其应用

负责人:董博(郑庆华团队)

所在学院: 计算机科学与技术

一、项目简介

电子税务是实现依法治税国家意志,实现降低征税成本、提高征管效率、增强税法遵从度国家目标的技术支撑平台。税务大数据计算面临点多线长难验真、省际孤岛难共享、高维特征难建模、偷逃骗税难发现等难题。

结合国家金税工程需求,提出“纳税人利益关联网络(TPIN)”概念并攻克相关核心技术,包括电子税务数据真实性与一致性校验、税务大数据共享与指标并行计算、TPIN建模与生成、基于TPIN的偷逃骗税疑点发现,研制出国家税务大数据分析平台系列产品,已在国税总局和全国所有省级国、地税局部署,经济与社会效益显著。



二、技术成熟度

☒概念验证 ☐原理样机 ☐工程样机 ☒中试 ☒产业化

项目授权国家发明专利 35 项，在 IEEE TKDE, IEEE TFS, ICSE 等期刊或会议发表论文 62 篇。国税总局评价：“极大提高税收风险识别的自动化、智能化水平”。国家自然科学基金委成果简报：“及时识别了大量偷逃骗税行为，挽回了巨额税款，为提升国家税收征管的公平性、公正性和科学性提供了技术保障”。

先后为合作单位完成了超过百人次的技术培训，普及与推广了技术成果的技术应用，为我国税务技术人才的培养做出了贡献。

三、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☒面议

26. 知识森林 AR 交互系统

负责人:刘均

所在学院：计算机学院

一、项目简介

知识森林 AR 交互系统是国家重点研发计划项目“教育大数据分析挖掘技术及其智慧教育示范应用”（2018YFB1004500）支持下完成的成果。该工具把一门课程的知识按照层次化、主题化的形式组织成“树叶-树木-森林”形式，并支持 AR 交互。其中，树木对应一个知识点；例如，图 1 是“堆栈”的分面树。树叶对应知识点上的知识碎片。将不同的知识点树木按照认知关系连接起来，形成知识森林。例如，图 2 是“数据结构”课程的知识森林（局部）。知识森林能够在不同粒度上展示课程中知识点以及每个知识点中知识碎片，符合人类整体到局部的认知特点。

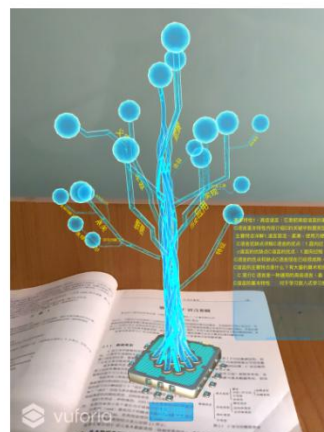
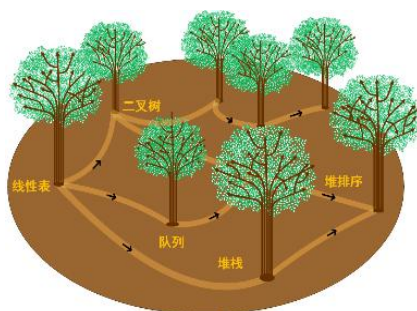
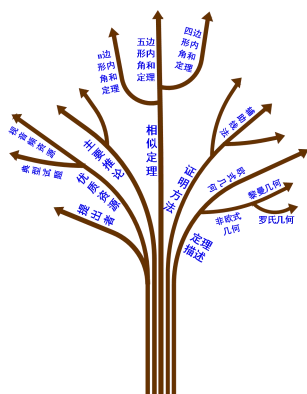


图1 “堆栈”分面树 图2 “数据结构”课程的知识森林(局部) 图3 是知识树AR交互场景

我们采用自然语言处理、图像识别等人工智能技术以及 AR/VR 技术突破了知识森林自动构建、可视化交互等难题, 研制了知识森林 AR 交互系统。图 3 是知识树的 AR 交互场景。

二、产品性能优势

- 1、支持文本、图像不同的模态知识碎片;

- 2、支持知识树自动生成与知识森林自动构建；
- 3、支持沙盘与知识树两种 AR 交互场景，并能相互切换。
- 4、支持认知路径自动规划，实现导航学习避免学习迷航问题。
- 5、

三、市场前景及应用

本成果在构建新型互联网智慧教育平台方面具有广阔的应用前景。此外，提出的知识森林作为一种教育知识图谱为在线教育中导学、推荐、答疑提供支撑，构建具有智能导学、精准推荐等特征的智慧教育平台。

四、技术成熟度

☒概念验证 ☐原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☒面议

106 通信网络

27. 室内定位技术

负责人: 廖学文

所在学院: 微电子学院

一、项目简介

人的大多数活动是在室内,对大型室内场馆或商业及工作场景存在室内定位的巨大需求,但因为室内缺乏卫星信号,需要采用新型的终端定位技术。

课题组利用智能手机上集成的 WiFi、惯导、加速度传感器、磁力计等多传感器,进行数据融合与挖掘,构建室内无线信号地图,将其与室内布局地图相结合,能够实现移动设备(人手持智能终端)、移动机器人设备在室内的定位、寻迹、跟踪算法,构建了无线信号采集、无线地图生成、众包数据库建立与更新、定位匹配算法、轨迹学习算法等一系列系统模块,并在西安交通大学多处教室、楼宇,百货商场与写字楼进行了实地测试,定位性能在自建指纹库下可达 1.5-3 米左右的精度,无专门采集的众包条件下达到 3-5 米精度,且能够绘制连续的用户运行轨迹。此外,还将该技术反向延伸到发射机定位,实现干扰源测定与无线安全。

将类似思路扩展到室外场景,结合射线跟踪算法、深度学习、强化学习算法,可以构建室外条件下的无线信号分布地图,通过对无线信号在特征空间的匹配,可在室外条件下实现对行人、车辆等的定位、轨迹跟踪与预测,与 GPS、北斗等卫星定位手段互为补充。通过前期在室内定位技术方面的研究,课题组已经建立起相应的数据采集平台软件、管理中心数据库、定位算法核心库等完整的室内定位软件平台。

二、产品性能优势

1. 室内条件下,实地终端实时定位与跟踪测试,定位精度达到 2 米以内。
2. 室外条件下,采用华为 5G 基站的通信链路的信道信息数据进行定位测试,定位精度可达 3.5 米左右。

三、市场前景及应用

1. 商场、机场、车站等人流密集场所：需要高效的人流监控和动线分析手段，以提高运营效率、挖掘商业潜力。

2. 工厂：需要实现智能仓储管理、生产过程追踪、自动货物搬运、自动对象加工，达到降本增效目的。

3. 矿井和高层建筑：需要在紧急状态下实时定位内部人员。

4. 医疗护理机构：需要实时定位护理对象，以提供最及时的医护服务。

5. 室内服务机器人、现场工业机器人、无人驾驶车辆：室内定位还是室内服务机器人、现场工业机器人和无人驾驶的必备技术，在一般服务业、军用无人侦查、电力及油气巡线、交通运输领域前景广阔。

四、技术成熟度

☒概念验证 ☒原理样机 ☒工程样机 ☒中试 ☒产业化

该技术已获得定位软件著作权 1 项，发表论文 5 篇，申请国家发明专利 12 项。

五、合作方式

☒联合研发 ☒技术入股 ☐转让 ☒授权（许可） ☒面议

智能制造装备及技术

201 先进成形技术与装备

28. 增材制造（3D 打印）技术

团队负责人：李涤尘

依托单位：快速制造国家工程研究中心

所在学院：机械工程学院

一、团队简介

西安交通大学自 1993 年开始增材制造（3D 打印）技术研究，是国内最早开展增材制造技术研究的单位之一。经过二十年的发展，西安交通大学形成了多种增材制造工艺和装备，建立了以快速制造系统为特色工程应用的研究队伍，产生了以卢秉恒院士为学术带头人的“增材制造”教育部创新团队。研究团队依托机械制造系统工程国家重点实验室（西安交通大学）开展基础研究，在高分子材料、金属、陶瓷、复合材料、智能材料的增材制造等方面取得进展，多项技术成果处于国内领先、国际先进水平。为推动 3D 打印技术的产业化，在 2000 年成立“教育部快速成形制造工程研究中心”（市场经营主体为陕西恒通智能机器有限公司），2007 年成立“快速制造国家工程研究中心”（市场经营主体为西安瑞特快速制造工程研究有限公司）。建立了一套支撑产品快速开发的快速制造系统，研制、生产和销售 16 个型号的激光快速成型设备、快速模具设备及三维检测设备。同时开展快速原型制作、快速模具制造以及逆向工程服务。产品在全国各院校、汽车、电器等企业销售应用十多年，客户近万家。近年协助政府和企业多个地区成功建立产学研结合的推广基地、快速成形制造服务制造中心。通过企业化运作，目前在全国已建立创新服务平台 20 多家，创新人才培养基地近 10 家，为 2000 多家企业提供新产品创新创意设计 & 快速制造服务。通过近二十年的技术研发与推广应用，设备用户遍布医疗、航空航天、汽车、军工、模具、电子电器、造船

等行业。此外，还积极拓展国际市场，相关设备销售到印度、俄罗斯、肯尼亚等国家，成为具有国际竞争力的快速成形设备制造单位。2016 年工业与信息化部批准在西安成立国家增材制造创新中心，中心联合国内主要科研与产业化优势单位开展共性技术研究和产业化孵化作用。

西安交通大学在增材制造方面获得国家科技进步二等奖 1 项，国家技术发明二等奖 3 项，省部级一等奖 4 项，在增材制造领域获得发明专利 400 余项。

以下为本研究团队的近年来的研究成果。

二、团队项目

(1) 航空发动机空心涡轮叶片的型芯型壳一体化快速精铸技术

空心涡轮叶片是航空发动机、大型舰艇发动机、重型燃气轮机等核心关键部件，被誉为“皇冠上的明珠”，其制造技术是我国“两机”重大专项核心技术之一，因技术难度大、发展起步晚、国外封锁严等，成为制约航空发动机和燃气轮机提升的技术瓶颈。西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室将 3D 打印技术和成熟的精密铸造技术融合，发明了航空发动机高温合金叶片型芯型壳一体化的快速精铸技术。该技术可显著提升复杂叶片的制造能力、大幅缩短叶片制造的工艺路线、大幅降低制造对叶片设计的限制，对我国航空发动机制造体系和研制体系能力的提升具有重大的革新意义。目前，在国家项目支持下，研究团队已攻克了该技术的关键难题，形成了完备的技术体系，建成了小批量生产线，具备了服务于我国先进航空发动机创新设计的能力。

航空发动机空心涡轮叶片的快速精铸技术的技术原理如图 1 所示。以 CAD 数字数据直接驱动，利用光固化 3D 技术成形制造高精度复杂内腔的树脂原型，采用凝胶注模方法将陶瓷浆料一次贯注成型，冷冻干燥处理后，烧失树脂原型和烧结陶瓷，经过强化处理后，制备出芯壳一体化陶瓷铸型，在此铸型中浇铸金属，经凝固、脱芯等工序，即可得到高温合金叶片。

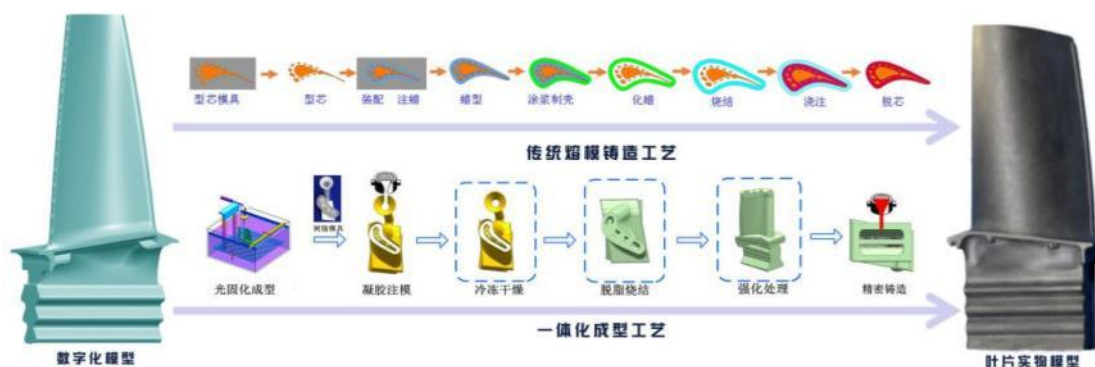


图 1-1 航空发动机高温合金叶片的快速精铸技术的技术原理

航空发动机涡轮合金叶片的型芯型壳快速精铸技术相比于传统熔模铸造和直接金属 3D 打印叶片的优势和先进性体现在：成品率高：型芯型壳一体化的原理性优势，精度高、性能好；利润率高：得益于 3D 打印和成品率较高，周期/成本曲线优异；需求匹配好：精度高、性能好、周期短、成本低。

该技术主要应用：服务于叶片的创新设计。致力于为叶片的创新设计提供全周期，全工况的解决方案；在叶片的论证，选型到最终定型中，可提供：PIV 冷态流动树脂模型，叶栅，等轴晶、定向晶乃至单晶叶片；服务于叶片的先进制造。先进冷却结构的一体化铸造成形：采用型芯/型壳一体化快速精铸技术，可实现双层壁冷型芯，气膜孔型芯的直接成型，缩短了加工周期。先进铸造技术：型芯/型壳一体化快速精铸模壳高温性能优异，满足定向晶/单晶航空发动机叶片先进铸造技术的使用要求，目前已实现航空发动机叶片定向凝固制造。

该技术还可以用于其它复杂结构零件的制造上，是 3D 打印与传统铸造技术的结合。

（2）野外环境 3D 打印维修保障系统

“野外环境 3D 打印维修保障系统”是针对野外环境条件装备应急抢修所研发的野外修复装备，系统包括零部件数据库软件、三维反求测量系统、金属激光 3D 打印系统及后处理模块等，其中零部件数据软件具备对零部件的上传、存储、下载、预览等功能，三维反求测量系统具备对破损零部件的扫描、反求、智能解算破损量等功能，金属激光 3D 打印系统具备对精度要求较高的小型零件进行精确修复和直接成形功能，后处理模块具备对修复完好的零部件进行机加工处理等功能。野外环境 3D 打印维修保障系统攻克了复杂零部件三维形貌快速扫描测量

及建模技术、野外环境下成形过程控形控性技术、缺损模型与待修零件坐标转换技术、系统集成技术等关键技术问题，系统集成扫描、反求、修复等功能为一体，具备野外环境条件下对受损装备进行快速修复的功能。

野外环境 3D 打印维修保障系统可用于野外装备应急抢修、远洋船伴随保障、偏远海岛及高山设备维护、工矿企业装备与模具修复日常维护等。研究成果参加“第二届军民融合发展高科技成果展览”。

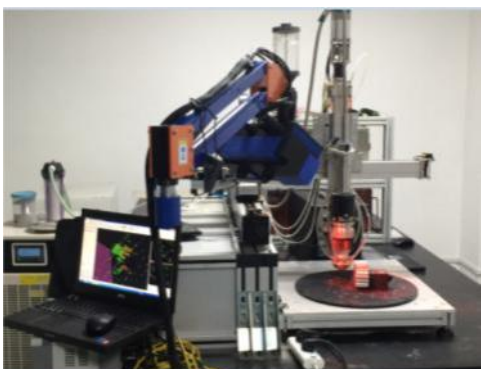


图 2-1 3D 打印维修样机

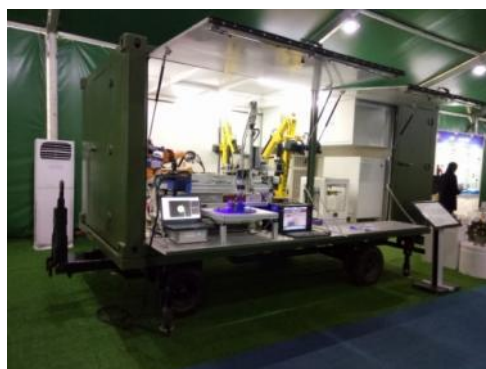


图 2-2 3D 打印系统运输方舱

(3) 高性能连续纤维增强复合材料 3D 打印工艺

本项目以连续纤维增强热塑性聚合物基高性能复合材料零件直接 3D 打印为目标，采用连续纤维与热塑性聚合物为原材料，利用复合浸渍-熔融沉积的 3D 打印工艺实现高性能复杂结构复合材料构件的低成本一体化快速制造，打印的复合材料零件的拉伸与弯曲强度分别达到 340MPa 与 390MPa，该技术既改进了传统 3D 打印零件强度不足的缺点推动了 3D 打印技术向工业化应用的进程，又克服了传统复合材料成型工艺成本高、周期长的技术瓶颈促进了复合材料在将来的进一步发展与应用，是一次具有革命性的创新与突破。该技术属于国内首创，获得多项自主知识产权，受到国内外越来越多机构的关注，在国内，本项目得到国家重点研发计划、国家自然科学基金、载人航天等项目的支持，开展关于工艺机理与装备等方面的研究，探索该工艺在航空航天领域的应用前景，在国外，分别与德国、俄罗斯等研究单位合作

在当今全球 3D 打印领域快速发展的形势下，复合材料 3D 打印具有巨大的发展前景，据 SmarTech 预测，至 2026 年全球用于 3D 打印的复合材料收入将超过 5 亿美元，未来十年内复合材料将成为 3D 打印最主要的市场机遇，目前该项技

术已经开发出了成熟的工业设备，形成了成熟的装备-材料-工艺体系，具备了商业化应用的条件，已经初步在复合材料轻质结构等方面得到应用，随着该技术的成熟，将来必将在航空航天、汽车交通甚至民用领域得到广泛的应用。

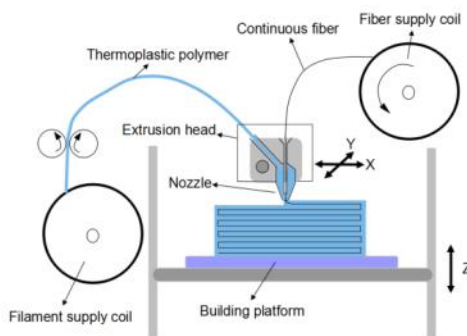


图 3-1 连续纤维增强复合材料 3D 打印成形机理



图 3-2 3D 打印设备



图 3-2 制作的复合材料零件

（4）陶瓷光固化面成形技术

研制了陶瓷光固化面成形 3D 打印技术包括自制设备与软件。该设备包涵基本光固化加工模块和多材料光固化加工模块，并有各自独立算法。基本光固化加工模块由运动系统的控制、运动系统与曝光系统的整合、掩膜视频信号与紫外光投影图案的整合等三个部分组成，解决了因不同材料光固化性能的差异引起的成形工艺参数的在线更改、运动加减速导致的曝光时间不稳定、多种投影图案在线调整等难点。多材料光固化加工模块可调用基本光固化加工模块，但以换槽和清洗、掩膜在线更换功能为主，解决复杂结构模型内部不同材料分层、同层内不同材料的分时成形的问题，为非均质结构和多种光敏材料的一体化成形提供了自动化控制平台。内置分离力测量系统和膜带式加工台，解决了底曝光固化过程中普遍存在的脱层困难的瓶颈问题，并有效地降低层间台阶效应和内部缺陷，提高陶瓷件的外层表面质量和内部结构精度。目前该技术不仅可完成氧化物陶瓷成形，

也可用于树脂、光敏水凝胶 3D 打印成形，具备通过多图案的连续层迭代制造多尺度梯度结构的复合材料支架。该技术可为制造高精度、大尺寸、高强度陶瓷零件提供技术基础。

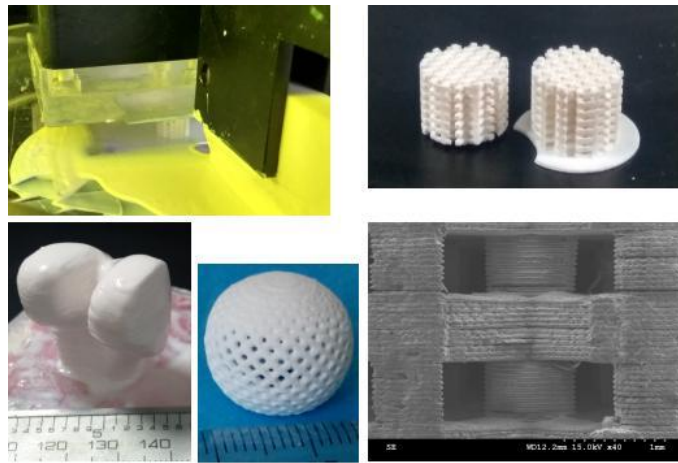


图 4-1 陶瓷光固化面成形自制设备

图 4-2 成形过程与陶瓷样件

(5) 个性化 PEEK 骨科植入物 3D 打印技术

对于肿瘤、创伤、疾病等原因造成的骨缺损或骨畸形患者，由于个体性差异大、病患程度不一等原因，传统规范化的医疗植入物经常无法满足要求。因此，本项目采用生物级聚醚醚酮（PEEK）材料作为原料，利用 3D 打印技术，快速定制个性化、高性能的骨科植入物，从而满足患者切身需求。相较于传统金属植入物材料而言，PEEK 作为一种半结晶高分子材料，具有质量轻，弹性模量接近原骨，减磨耐磨，生物相容性优异和物化稳定性好等优点，成为目前生物假体植入物的理想材料之一。然而，PEEK 材料是一种高熔点（343℃）、大冷却收缩率、半结晶的热塑性材料，采用传统加工方法，具有材料利用率低、成本高、难以直接成形复杂结构等问题。本项目团队研发了一种以控性冷沉积为核心技术的 3D 打印方法以及智能工艺，可以依据应用需求进行力学性能（如韧性、模量）的调控，实现了高性能聚醚醚酮骨科植入物低成本、高精度的控形控性快速制造。相关技术已经完成了世界首例 PEEK 肋骨临床应用，在国际、国内都处于领先地位。

骨科医疗器械行业属于国家重点扶持的鼓励类行业，《医疗器械科技产业“十二五”转向产业规划》等多项政策将骨修复材料、人工关节和脊柱等骨科植入物列为国家重点开发产品。根据多个调查机构的报告显示，骨科植入物市场，尤其是国内骨科植入物市场快速增长态势气势如虹，2015 年市场规模达 166 亿元人民币，超过日本成为全球第二大骨科市场；2012-2015 年复合增长率达 18%，预

计到 2019 年市场规模将超过 300 亿元。可以说，骨科植入物市场，尤其是国内



市场前景具有极大的发展潜力。而本项目所研发的 PEEK 个性化骨科植入物 3D 打印技术，是一种前沿的创新制造方法，将成为骨科植入物市场的新兴热门方向，具有极大的市场前景。

图 5-1 世界首例 3D 打印 PEEK 肋骨临床应用（2017 年 4 月） 图 5-2 PEEK 颅骨假体

（6）个性化 3D 打印医学假体设计软件系统（OrthoDesign）

针对目前 3D 打印制造个性化人工假体的设计缺乏力学分析依据和标准规范流程问题，该个性化 3D 打印医学假体设计软件系统，通过整合骨骼建模、假体宏观建模、骨骼/假体装配、优化分析、假体微观建模五个功能模块，实现定制化人工假体智能快速宏观外形设计、假体选型以及内部多孔结构设计。设计后的假体拥有个性化的宏观几何形貌和个性化的内部多孔结构，可直接应用与 3D 打印制造技术，该结构能够促进假体植入后骨长入能力，提高植入后远期假体稳定性。

内植物设计：提供面向常用内植物的关键几何参数设计方法，通过假体重要特征参数的尺寸缩放，实现假体快速建模；提供内植物模型库，允许用户通过选择不同型号的内植物进行服役性能分析，辅助术前选型规划；亦可通过 CT 图像重建的方式设计完全定制化的内植物。

假体服役性能分析与优化设计：软件集成了有限元分析模块，针对假体植入后服役性能进行生物力学分析开发了专用工具箱，简化传统假体有限元分析流程；在力学分析与优化中，以内植物植入后强度、早期稳定性和远期稳定性为核心优化准则，通过有限元方法对假体内部弹性模量进行优化，目的是提高假体的骨传导能力，促进假体植入后骨长入。

假体多孔设计：根据力学优化分析结果中梯度模量分布或用户需求自定义，通过对不同类型单元体进行阵列的方式，自动生成局部或整体多孔结构，便于3D打印个性化制造。

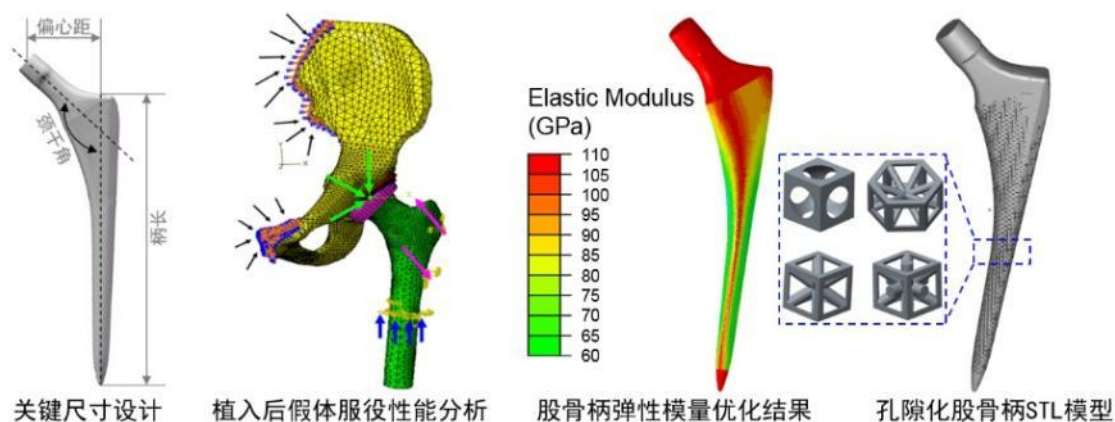


图 6-1. 个性化 3D 打印医学假体设计软件系统应用实例：人工髋关节股骨柄

软件可以应用于：人工假体快速敏捷设计平台，解决了医疗器械公司缺乏产品设计依据和送检产品选型的难题；人工假体服役性能便捷评价平台，在兼顾假体常规的安全性、稳定性、强度的基础上考虑了假体植入后骨长入性能的促进对假体植入后远期稳定性的影响。为医疗器械公司和医生开发出更长寿命假体提供优化平台。多孔假体模型的自动构建平台，模型可直接应用与 3D 打印制造系统，解决了目前最为严峻的医疗器械公司和医生对可 3D 打印制造的个性化多孔模型的需求。

(7) 关节软骨缺损修复 3D 打印技术

关节是人体的承载组织和运动器官。关节损伤是危害人体运动功能的多发疾病，直接影响人的运动、进而影响生活健康和生活质量。现有金属和惰性陶瓷的人工关节虽已在关节疾病后期的治疗上获得了广泛应用，但因磨损造成的松动而发生失效。临床医学对大面积骨/软骨缺损的再生修复有迫切需求。因此，如何在关节疾病早、中期进行治疗并形成活性关节再生是再生医学的发展的迫切需求、定制化大尺寸骨/软骨支架设计制造成为关节软骨缺损修复、关节组织工程发展面临的重大挑战。

该技术以大尺寸骨/软骨缺损为研究对象，针对关节体内力学和生物学环境需求，围绕多材料与宏微观骨/软骨支架设计制造和功能评价方法的需要，所开发的活性骨和软骨人造组织同步制造和体外评估方法，为发展具有良好力学和生物学功能的人工活性组织关节提供科学基础与工程实现方法。研发了大尺寸骨/

软骨支架的仿生结构设计方法。利用该方法，通过研究膝关节力学环境因素对植入物结构的相互作用关系，已发现了关节韧带、半月板、软骨与骨界面结合特征与步态的作用关系，并在此基础上，建立了面向羊膝关节半髌置换的大面积骨软骨支架的设计和手术方法。

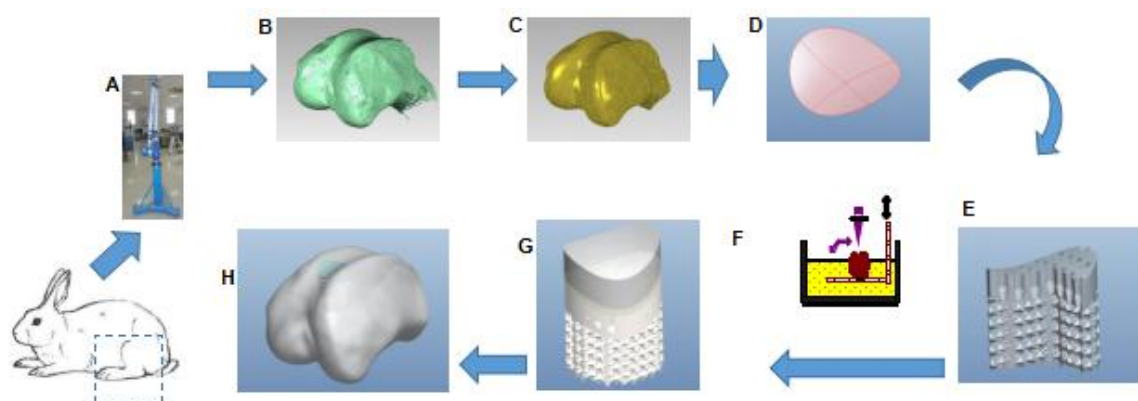
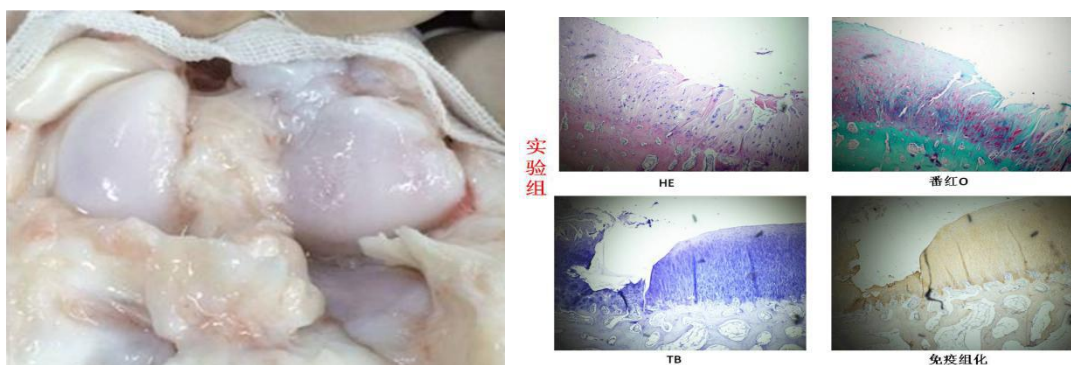


图 7-1 大尺寸骨/软骨支架的仿生结构设计方法

研发了多材料和多尺度结构支架精确光固化增材制造方法，已形成了大尺寸仿生支架制造的实验平台与设备。该设备以新体系光固化陶瓷浆料和打印方法为核心，建立了无分层结构的连续打印现象。目前该技术具有成形过程的缺陷自动控制策略，形成了 2 套完整的光固化陶瓷 3D 打印工艺方案与实验样机，可满足动物实验所需的大尺寸仿生支架（30mm×30mm×30mm）的快速制造和个性化结构复杂性与精度需求。

实现了同时满足骨软骨力学环境和生理环境的体外培养和评估系统，动物实验（兔、犬、羊）验证了骨软骨复合材料支架的设计制造的有效性。利用该技术，可对不同载荷等力学环境下自然关节组织的生存状态进行研究。已经初步证实力学条件对于自然关节组织的促进作用；初步建立并进行了羊股骨内侧髌大块骨软骨缺损模型动物实验及体内生物性能检测，发现通过仿生设计、生物陶瓷/水凝胶复合大块骨软骨修复体可以修复羊膝骨软骨缺损，修复性能良好。



羊股骨半髌缺损的新生软骨（左图为大体观察，右图为组织学染色）

图 7-2 关节软骨缺损修复实验

利用该技术通过研究多材料定制化大尺寸骨/软骨支架，系统进行了相关的设计，制造，评估及动物试验方面的基础、前沿研究，为临床应用提供理论基础。

（8）可降解个性化替代物 3D 打印与临床应用

本项目采用可降解材料进行 3D 打印，以乳房修复和气管软化病为应用开展了研究工程。

乳腺癌是影响全球妇女的第一大恶性肿瘤，传统的全切手术曾对女性患者造成了严重的身体和心理的双重伤害。随着保乳手术逐渐成为女性乳腺癌患者的一种标准术式，现有的硅胶假体和自体组织填充物很难满足乳腺完美重建的功能需求。针对该问题，本项目建立了柔性可降解软组织支架仿生设计与 3D 打印方法体系，和第四军医大学西京医院合作，实现了国际首例的个性化可降解柔性乳腺支架的临床试验，目前已完成 4 例，不仅可实现初期形态与力学性能匹配，后期还可通过患者乳腺组织再生与支架降解实现自体修复，从而为乳腺癌的保乳治疗提供了新途径。

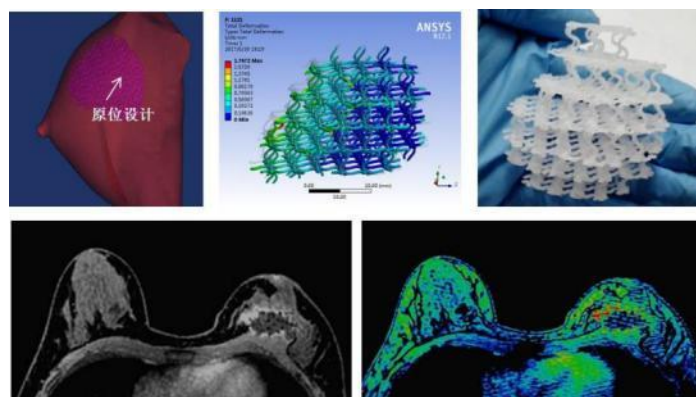


图 8-1 个性化可降解柔性乳腺支架的设计制造与临床应用

气管软化症是临床常见的气管疾病，其病情发展迅速、危及生命。对于较大长度（成人>6cm）的气管软化症，目前缺乏有效的治疗途径。针对该问题，和第四军医大学唐都医院胸腔外科、西京医院心血管外科以及郑州大学第一附属医院合作，利用建立的软组织支架仿生设计与3D打印方法体系，提出了基于可降解的气管外支架的气管悬吊手术方式，实现了国内首例临床试验，目前已完成临床试验研究4例（图2）。美国哈佛医学院儿童医院食管与气管中心主任RW. Jennings教授等对临床试验发表专题评论：“首次报道了3D打印气管外支架在二次气管软

化成人患者的应用，展现了可行有效且安全的初期疗效”。临床应用被CCTV7、CCTV10、新华社、人民日报等专题报道，产生了良好的社会影响。

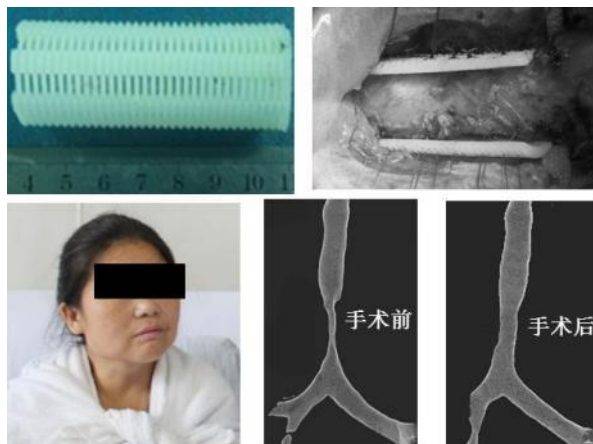


图 8-2 生物 3D 打印的气管外支架临床应用

（9）多喷头细胞 3D 打印技术

项目研究多细胞的在体 3D 打印技术，以研发血管肌肉等多组织的制备技术。本技术出以喷墨、挤压打印工艺为核心，开发多喷头生物 3D 打印设备，将水凝胶与细胞等活性物质根据凝胶交联特征配制生物墨水，用于人工血管/肌肉或皮肤等软组织支架的精确制造方法，为解决人工移植组织或器官的血管化和复杂结构支架制造瓶颈提供新的方案。

自制设备最大打印范围为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，可为裸鼠等小动物提供无菌、原位打印的手术条件。多喷头系统面向多种材料不同的成胶机理，提供了同轴喷头、喷雾喷头、单管喷头，可完成 $400 \sim 1200 \mu\text{m}$ 空心管凝胶和微丝凝胶的打印。利用多喷头运动结构和控制软件，实现多喷头间的协同工作，完成含多种材料的血管/肌肉复合组织的一体化打印。

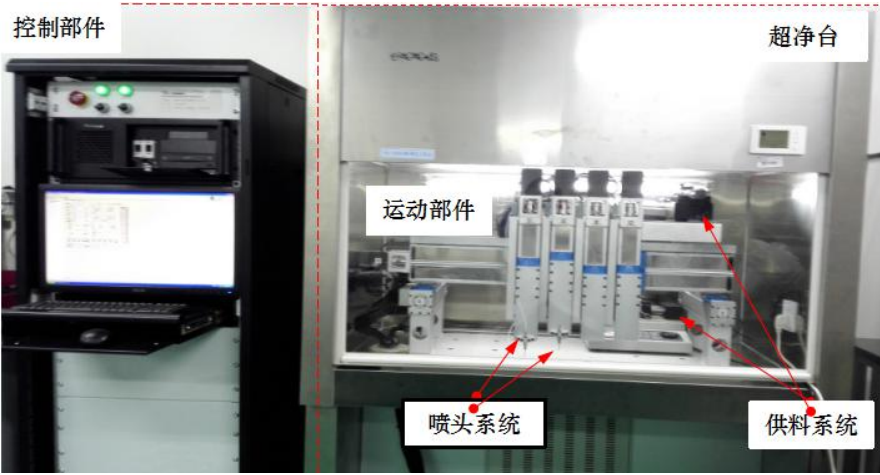


图 9-1 自制多喷头生物 3D 打印设备

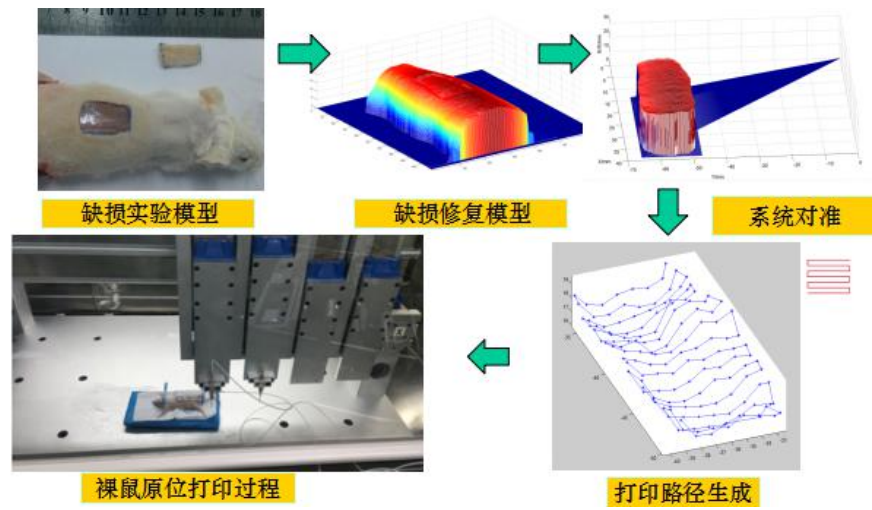


图 9-2 原位打印动物实验

三、技术成熟度

☐ 实验室阶段 ☒ 工程化阶段 ☐ 产业化阶段

四、合作方式

☐ 联合研发 ☐ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☐ 面议

29. 金属电弧喷涂快速制模技术

负责人：魏润强

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

金属电弧喷涂快速制模技术是一种基于电弧喷涂、快速原形、机器人控制和材料科学的模具制造工艺。它通过电弧喷涂工艺制造模具的金属型壳，通过材料累加原理制造出具有材料梯度、功能梯度结构的模具，是一种近净成形的模具制造技术。该技术可用于制作金属冲压模具、热压成型模具以及塑料模具等。目前已经在飞机、汽车、拖拉机、家电、塑料、制鞋等行业中成功应用，特别适用于为新产品开发、试制以及小批量生产提供快速、低成本模具的场合，属于极具发展潜力的一种模具制造新技术。

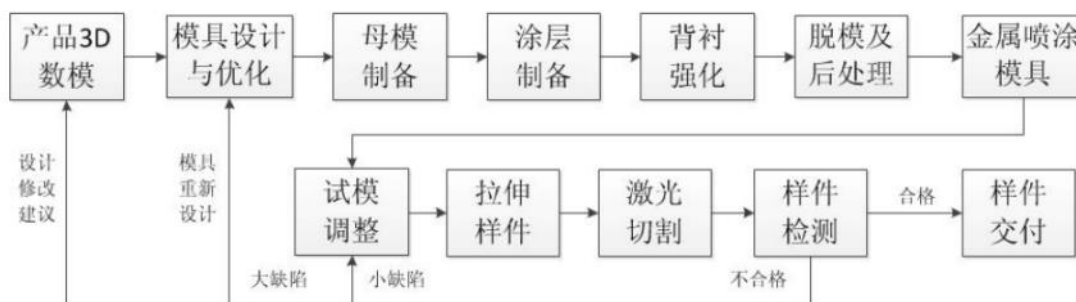


图1 金属喷涂快速制模工艺路线——反向喷涂

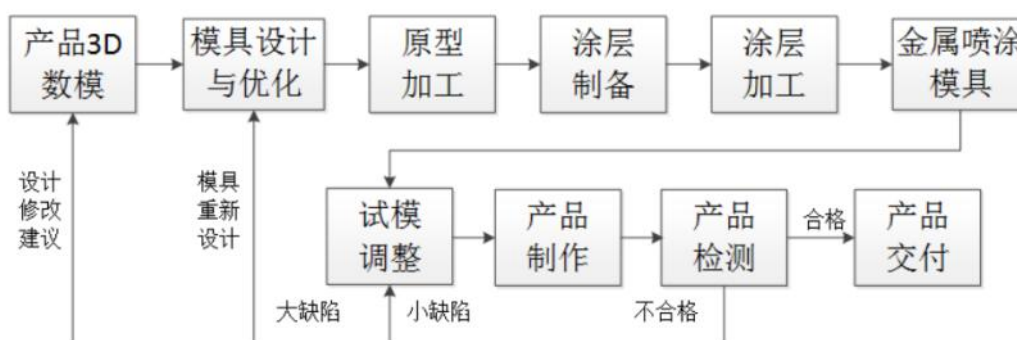


图2 金属喷涂快速制模工艺路线——正向喷涂

二、产品性能优势

(1) 制造周期

相当于数控加工制造相同零件模具时间的 1/3 至 1/10。

(2) 制造成本

制造费用与数控加工制造相同模具相比，成本最多可节省 35%以上。

（3）模具精度

模具最大尺寸变形范围不高于 0.1%，更高精度可通过 CNC 加工实现。

（4）模具寿命

锌铝合金模具表面硬度为 HV200。抗压强度 80MPa，一般冲压件可达到数百件，内饰件可达数千件。

三、市场前景及应用

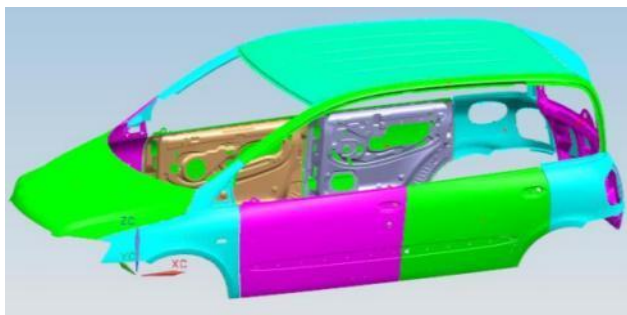
（1）钣金拉伸成型

轿车典型零件：四门两盖、车顶、底板、轮罩、翼子板等的内外板，一般来说，外形尺寸 $\geq 300\text{mm}$ ，厚度 $\leq 1.5\text{mm}$ 的薄板零件均可保证样车批量要求，厚度 $> 1.5\text{mm}$ 的薄板零件及高强板材料零件需根据产品成型特点具体确认产品批量。

（2）内饰成型

塑料加工中的反应注塑成型、吹塑成型、结构发泡及其它一些注塑工艺过程。

利用金属喷涂快速制模技术为波导汽车成功完成两个车型 AM08/AM06 两款三厢、两厢轿车）40 副样车试制模具；为长安汽车 CM5 车型提供样车样件快速制造；为一汽吉林制造中低熔点金属喷涂快速模具、高熔点金属喷涂快速模具；为上汽通用五菱汽车制造行李箱后端板总成零件。



四、技术成熟度

●概念验证 ●原理样机 ●工程样机 ⚙中试 ●产业化

五、合作方式

●联合研发 ●技术入股 ●转让 ●授权（许可） ⚙面议

30. 美刻思源盲文刻印系统

团队负责人：李兵

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

在本项目中，拟针对上述问题，本项目拟进行本土化的盲文刻印生态链建设布局，其中硬件方向，即为盲文刻印机设备的全国产业化研发，其研发不仅包括针对于机构(B2B)的工业级，商业级设备，还包括目前尚未面试的，针对个人(B2C)的家用级设备。

而软件及服务方向，除了针对中文盲文优化的自动化排版系统外，也将打造针对于视障人士的云端共享平台，通过优质资源的提供，不但能够促进刻印机本身的销量提升，还能提升客户粘性，实现企业的持续造血。最终也让特殊群体也能享受到科技进步所带来的便利。

通过本项目的实施，不但能够快速占领超 1500 亿元的空白市场，还能够通过提高特殊群体的受教育程度，完成全国共同富裕的伟大梦想，同时具有极高的经济价值与社会价值。

本项目技术提供方为西安交通大学李兵，教授，博士生导师。蒋庄德院士团队核心成员。“中华人民共和国成立 70 周年”纪念章获得者。中国机械工程学会高级会员，“国家教指委机械工程协作组”成员，入选教育部新世纪人才计划。英国伯明翰大学 Honorary Research Fellow。机械制造系统工程国家重点实验室、微纳制造与测试技术国际合作联合实验室固定研究成员。

长期从事精密超精密加工与测试技术及装备制造等方面的研究，在数字化精密测量与超精密加工技术与装备的工程科技领域开展了创新性研究，发表论文百余篇，拥有专利 80 余项。

主持“04 专项”、“国家重点研发计划”、“国家自然科学基金”等多项国家级项目。研究成果获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技奖 5 项。近年来，与东方电气集团有限公司、秦川机床工具集团股份公司等国内制造业龙头企业开展多次合作，协助解决了企业内部的数十项技术难题。

二、产品性能优势

在硬件部分，团队以往研究经验，引入了 CNC 精密加工装备的设计理念，对产品结构进行了全面革新，实现了以下功能：

1. 通过并行协同控制，在降低刻印噪音的基础上（由 80dB 减少至 60dB）的基础上，进一步提升了该设备的刻印效率（从 140cps 增加至 190cps 以上）。
2. 通过自研的纸张识别模块，实现了纸张厚度与刻印冲力的自动匹配，并创新性的，在保证满足盲文存留时间标准的基础上，实现了普通 80g A4 纸张的盲文刻印，将刻印耗材成本降低至了原有的 1/20；
3. 通过联动控制，实现了盲文图章线条的连续刻画，在提升触觉分辨率，大幅提升图像刻印效率的基础上，提升了纸质盲文书籍的信息容量及触觉交互性。

软件部分：

1. 对于盲文转译模块，团队采用深度学习智能化编译算法，替代了传统的字符库遍历搜索，在提升转译效率的基础上，针对汉语特有的多音字、近义字等的特征识别，大幅度降低了汉盲转译的错误率。
2. 团队基于云端物联网技术，对刻印机智能化生态链进行了布局，并着手搭建盲文线上共享平台，对于该平台，不但可以通过提供优质资源，提升客户粘性，实现企业的持续造血，还可以通过开放个人文字资源分享功能，提升用户的积极性，从而进一步提升刻印机的销量与使用率，更快速地占领市场。

在前期，团队基于研发成果，已申请相关专利 2 项，授权专利 1 项。

三、市场前景及应用

目前我国视障人士群体规模约为 2000 万，由于盲文刻印设备在我国的稀缺以及普及不足，导致了可供该群体阅读的纸本书籍资源严重匮乏，使得该群体的教育资源体量受到了极大程度的影响，进而导致其受教育程度的低下。

盲文刻印机是用于将盲文“打印”在纸张上的专用设备。与普通人的日常所使用的打印机结构功能相似，它与电脑终端相连，利用专用的编译软件将文字转换成盲文字符，并通过盲文刻印机实现在纸张上的盲文刻印。



a. 普通打印机

b. 盲文刻印机

图 1 打印机与刻印机

盲文刻印机作为一种辅助盲人的设备，属于残疾人服务业，也可以作为特殊打印设备应用于文创制品等印刷出版产业。同时，盲文刻印机不仅包含其硬件结构，而且需要配合专用的编译和排版软件，以及针对视障群体的专业服务培训。故其既具有依赖上游元件供应的制造业特性，也具有强调用户体验和自主创新的计算机业特性，以及针对特殊群体的服务业特性。

目前，国外已有较为成熟的同类设备，但由于该设备研发技术门槛较高，市场未受重视等原因，导致了国内的相关设备严重依赖进口，进而造成了盲文刻印机设备单价高昂，耗材量大价高，和中文盲文兼容性差等国内市场现状。

目前我国已有 8000 多家视障人士服务机构及 2000 多万名视障人士，巨大的市场空间，也为盲文刻印市场带来了前所未有的发展潜力。由于国外相关设备生产公司对国内市场的重视程度不足，加之已形成相关技术垄断，价格过高，造成了国内刻印机保有量小，机构量与刻印机购置量完全不匹配等原因。而现在国内政府及相关已认识到了这一问题，近年来，中央及地方对残障人士补贴力度逐渐增强。本项目可借助这一利好为起步点，通过辅助器具补贴政策，激励市场，增加用户数量。并基于课题组常年于浸淫于机械行业的研发经验，引入工业领域先进技术，推翻传统刻印机结构。通过自主研发，打破国外产品的常年垄断，已价格优势迅速占领国内市场。最终发掘庞大用户群体的需求，刺激市场消费。

课题组对盲文刻印设备市场进行了细分，对于小型、工业级和家用型盲文刻印机，其市场分别如下

① 小型盲文刻印机

预计售价：4 万元；目标客户：公共图书馆及特殊教育学校（5328 家）；预计总市场超过 6.4 亿元。

② 工业级盲文刻印机

预计售价：40 万元；目标客户：按特殊教育学校及出版社（5336 家）；预计总市场超过 60 亿元。

③ 家用型盲文刻印机

预计售价：0.7 万元；目标客户：家用级，面向视障人士本身（数量达 2000 万以上，且全世界无同类产品），参考视障人士数量，市场超过 1400 亿元。

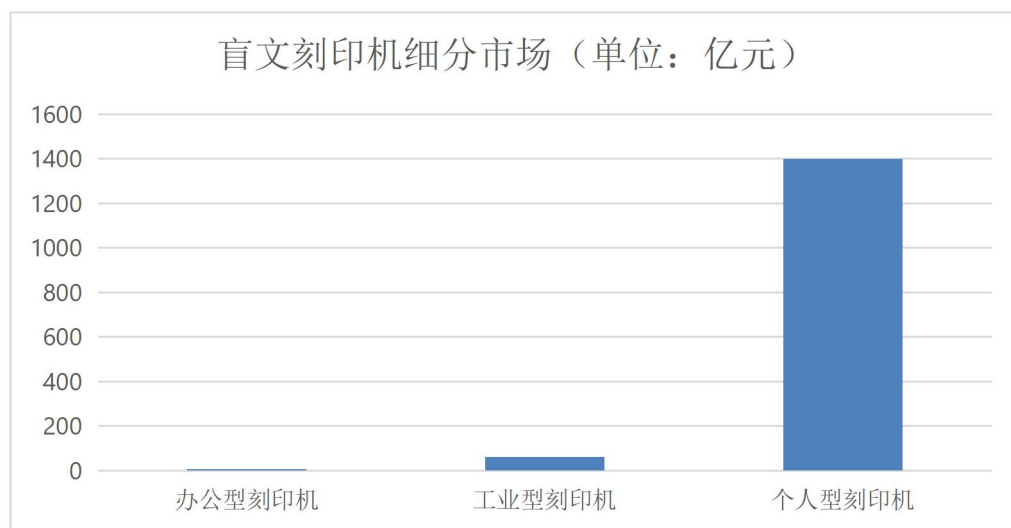


图 2 盲文刻印机细分市场

四、技术成熟度

☒ 概念验证 ☒ 原理样机 ☐ 工程样机 ☒ 中试 ☒ 产业化

目前技术成熟度六级，已实现功能样机平稳运行，各项功能试验合格。

五、合作方式

☒ 联合研发 ☒ 技术入股 ☐ 转让 ☒ 授权（许可） ☒ 面议

31. 高效陶瓷面曝光成型技术与装备

负责人： 连芩

所在学院： 机械工程学院

一、 项目简介

现阶段陶瓷复杂结构成型技术已成为高性能陶瓷行业瓶颈问题，目前市场上常用的是利用模具或数控加工技术成型结构。传统的利用模具将陶瓷浆料成形为素坯的方法存在技师手工操作多，影响成形精度的工艺因素多等问题，而且还需要数控加工和渗透加工进一步提高成型精度和力学性能，造成制作成本高、制造周期长，无法满足单件小批制件的加工需求。

本项目提供一种应用于陶瓷零件的光固化增材制造设备与工艺技术，包括数字光处理(DLP)装置、浆料存储与转换装置、打印台承载装置、在线检测装置和PLC控制装置。陶瓷面曝光成型技术突破了现有陶瓷零件以模具和数控加工成型的技术瓶颈，在常温下工作，可直接一次性固化成型复杂结构，成型速度快；成型精度可达微米级，成型零件变形小，便于实现精细结构；成型后零件的密度与应力均匀性好，大大提高了陶瓷复杂结构件的打印质量和烧制后的力学稳定性；而且设备结构和工艺更加简单，成本低；特别适合于硬脆性陶瓷的复杂结构成型，应用场景为航天航空、国防军事的高精密陶瓷零件、齿科与骨科的陶瓷义齿或假体，是未来小型复杂结构高性能陶瓷行业制造技术的主要趋势。目前，该项技术已经获得国家重点研发项目支持、多项发明专利授权，并在多家合作单位得到实际应用。

二、 产品性能优势

该项目使用基于数字光处理(DLP)的光固化原型技术，实现陶瓷零件的快速复杂结构成型，可解决目前高性能陶瓷行业及其相关生物医疗器械中存在的一些问题：

- (一) 大幅缩减制造成本。传统陶瓷素坯的结构成型方法需要多种设备，例如模具及制造模具设备、浇注与固化装备、昂贵的数控加工设备，并且通常放

置在不同的车间。陶瓷面曝光成型设备将陶瓷素坯成型加工集中在一台设备上完成，大幅缩减工艺流程与加工周期；且陶瓷设备长度、高度都在 1-2 米左右，加工空间小，设备成本和制造成本低。

- (二) 大幅提升成型效率与质量。传统制造方法中，需要利用陶瓷粉制备的浆料或标准结构坯体，分别利用模具或数控加工成型复杂结构，再经过烧制完成功能件。此时，不仅模具和标准结构素坯会增加加工周期和质量调控难度，而且材料损耗率甚至高达 90% 以上。而陶瓷面曝光成型技术直接利用陶瓷粉制备陶瓷浆料，利用浆料成型素坯，且浆料使用率近 100%。
- (三) 陶瓷面曝光成型技术具有成型速度快、零件变形小，便于实现精细结构；同时由于陶瓷密度与应力均匀性好，大大提高了陶瓷复杂结构件的打印质量和烧制后的力学稳定性。
- (四) 陶瓷面曝光成型技术对开发新型功能陶瓷浆料的促进作用极大。因面曝光波长仅影响陶瓷浆料中的聚合物等材料，不影响陶瓷成分，因此该技术非常适合在功能陶瓷的多行业应用开发。

三、 市场前景及应用

(一) 项目现状

1. 陶瓷面成形技术与设备现状

研制完成了基于氧阻原理的陶瓷面成形系统，完成 1 台样机，制订企业标准 2 项。提出了具有氧阻效应的增材制造陶瓷浆料的制备方法，开发了 1 种氧化铝基增材制造陶瓷浆料。建立了 1 套陶瓷面成形工艺及其成型精度评估方法。

2. 定制化全瓷骨骼应用现状

氧阻工艺陶瓷素坯内外结构完整，内部无断层情况，最大截面积比基本工艺下扩大了 5 倍以上。开发了 1 种钙磷基骨陶瓷增材制造浆料，建立了一套大尺寸骨骼的陶瓷面成型工艺。

3. 定制化牙齿修复体应用现状

提出了定制化牙齿修复体的三段式辅助支撑设计方法开发了 1 种氧化锆基义齿增材制造陶瓷浆料，建立了量化打印-烧结的工艺模型缩放比例公式，形

成了烧结陶瓷件的结构收缩控制方法，适用于义齿结构件的定制化制造需求。建立了 1 套基于面成形和烧制技术的氧化锆牙冠桥工艺模型方法与制造工艺方法。

（二）项目应用

目前本项目所研发的复杂型面陶瓷制件、专用的陶瓷浆料、高效率陶瓷面成形技术与设备等技術主要应用于全瓷骨（大关节骨软骨缺损修复）制造与全瓷牙制造。同时也可以广泛应用于军工、工业制造、建筑、运输、考古和教育等领域。可见，陶瓷在许多行业中的应用是十分具有意义的，增材制造陶瓷正在迅速取代传统的陶瓷零件。目前市面上广泛应用着增材制造陶瓷：

1. 航天

陶瓷的尺寸稳定性和低密度使其成为火箭和卫星以轴承、密封和热屏蔽的形式送入太空的理想材料。

2. 航空

同样的特性在地球大气中同样有帮助，陶瓷具有很高的抗磨损和耐热性能，因此可以在各种飞机部件中找到它，包括装甲、电绝缘和燃料喷嘴。

3. 汽车

陶瓷的硬度和韧性在汽车制造领域特别有用。从火花塞，刹车，传感器和过滤器等等。

4. 能量

发电和配电系统要求很高而且很关键，陶瓷有助于这些系统的可靠性。它的耐磨性、电绝缘性和刚性的力学性能使它能够在恶劣的发电厂环境中生存下来。

5. 化学和医药

合成化学品和药物需要涉及快速温度变化、压力和腐蚀的过程，定制陶瓷可以比工业中使用的特种机械金属更耐用。

6. 医学

陶瓷是一种重量轻、耐用、生物相容性好的材料，是医疗行业重要的材料，可用于种植体，手术工具和导轨，以及诊断设备。

其中，医学领域的应用是本项目市场应用发展的重点。中国已成为全球口腔业和人工关节发展速度最快的国家，可以了解到中国是全球口腔义齿生产大国，而且对义齿需求正处于快速增长期。因此本项目所研发的定制化牙齿修复体的制

造与设备具备了显著的市场需求。同时，因为陶瓷增材制造技术本身是一个极具潜力及高回报的高新产业技术，由此可见它将会成为推动临床医疗行业的发展的一股重要力量。

由此可见，作为一个被十分看好的新兴市场，其市场空间正在不断增大，而由于该市场极高的技术壁垒与进入条件，在未来的一段时间内，将出现供不应求的情况，市场空间充足，市场机会充裕。因此，根据本公司核心技术的水平，可以很容易进入到骨科植入物市场中，而且由于该市场的技术壁垒等，可以快速占有足够的市场份额，在取得相关产品的医疗器械注册证之前，本公司可以优先利用技术与案例优势，抢占市场制高点，增大品牌影响力，进行相应的市场布局，当取得注册证之后，本公司可以在短时间内垄断相关市场，获取最大化利益。在注册期间，本公司将会利用自身的技术优势与特点，去占有有一定增材制造高端工业市场，获取可观利润。

四、 技术成熟度

●概念验证 □原理样机 □工程样机 ●中试 ⚙产业化

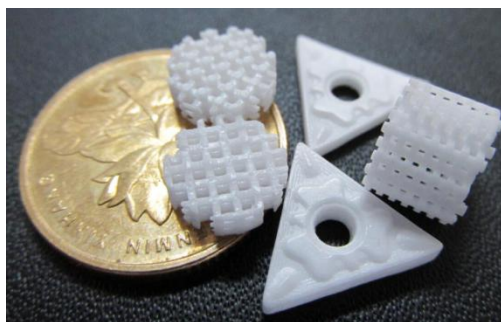
五、 合作方式

●联合研发 ●技术入股 □转让 ●授权（许可） ⚙面议

附图



(a)多件陶瓷刀具

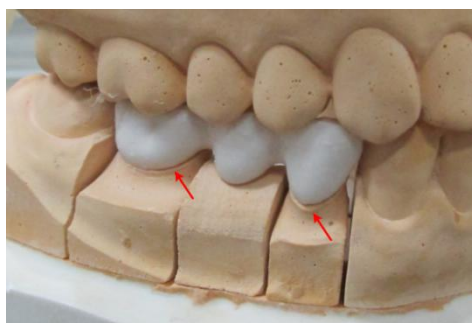


(b)刀具与多孔结构

多件复杂结构件的高效打印

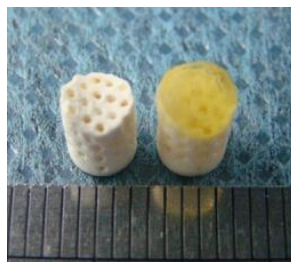


(a) 自然色义齿



(b) 氧化锆陶瓷牙冠桥

生物应用(1) - 陶瓷基义齿



(a)大块骨支架 **(b) 骨软骨支架** **(c) 24 周与 52 周修复效果**



(d)大块植入 **(e)术后即刻直立行走** **(f)24 周后步态测试正常**

生物应用(2) -可降解陶瓷基骨支架

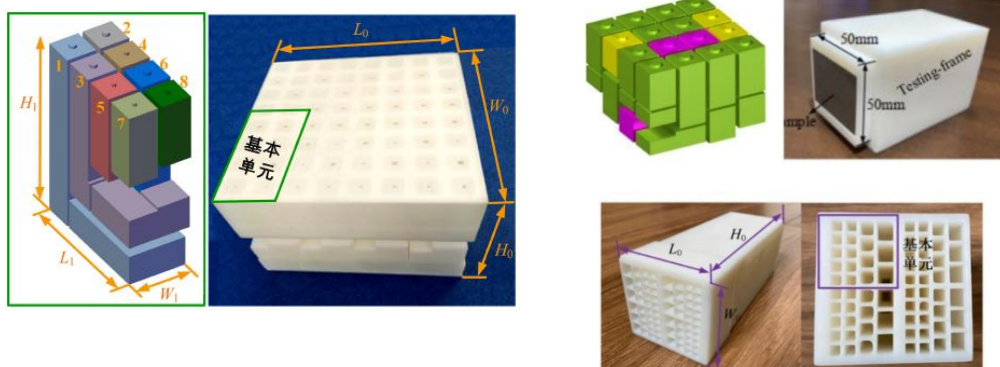
32. 小尺寸大宽带吸声超结构技术

负责人：吴九汇、刘崇锐

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

本项目是一种小尺寸大宽带吸声超结构技术，首次提出超结构虹吸效应，结合多腔共振机理，突破了共振吸声系数与吸声面积间的矛盾限制，解决了小尺寸低频大宽带吸声难题，获得了各种频段吸声系数高达 95% 的小尺寸低频大宽带吸声超结构。本项技术的优势：1) 低频吸声效果好，与国内外现有材料体系相比，可将 100Hz-4000Hz 吸声系数由 40% 以下提升至 90%; 2) 结构尺寸更小，是其它同等效果产品的 1/2 到 1/3 左右，工程应用潜力大；3) 组分材料灵活，可根据应用环境的不同选择不同的加工材料。



二、关键技术

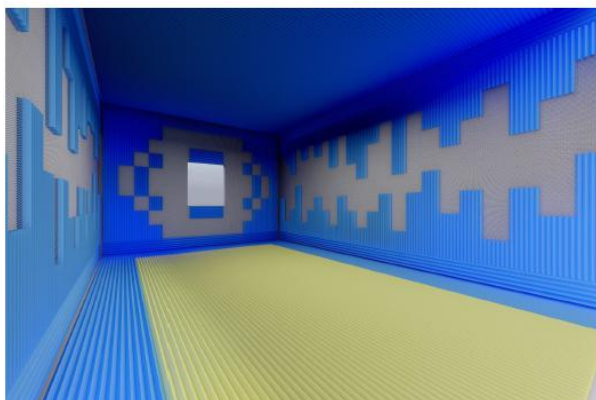
本项目的关键技术有两个：

1. 超结构虹吸效应吸声技术

为了实现宽带吸声，需要采用多个单元并联的方式增加峰值数量。在宽带结构中，只有某一个单元将全部的入射能量吸收掉，才能实现相应频率处的完美吸声，这就要求所有的入射能量全部要流向该单元，这就是我们提出的声学虹吸效应机理。因此如何最大程度上发挥声学虹吸效应的作用，优化结构参数，是本项目的第一个关键技术。

2. 超结构多阶共振吸声技术

单元数量受限的基础上,通过一定的措施激发结构的高阶模态,可以使单元在几乎保持低频峰值不变的情况,在高频处获得多个峰值,进一步拓宽吸声频带,这就是我们提出的多阶共振吸声机理。因此,如何在结构内部进行高阶模态设计,是本项目的另一个关键技术。



三、应用市场

随着环保意识的加强及相关法律法规的不断出台,我国的噪声治理行业规模正快速增长,市场规模从 2014 年的 210 亿增长到 2020 年的 550 亿左右,年复合增长率高达 14%左右。未来五年市场规模将持续增长,预计 2025 年左右达到 1000 亿左右。

另一方面,在这么大的市场规模中,由于低频噪声处理难度大,其控制需求所占比例增长更快,在民居、交通、工厂及飞机、舰船等重大装备上都极为迫切。而目前本技术在该领域具有非常大的优势,国内外行业内暂无对标的技术,因此具备非常大的市场发挥空间。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☒原理样机 ☐工程样机 ☐中试 ☐产业化

五、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☐授权(许可) ☒面议

33. 铁路道岔固定螺栓智能检测技术与装置

负责人：曾亮

所在学院：机械工程学院

一、项目简介

本项目提供一种铁路道岔固定螺栓智能检测装置，包括数字处理集成电路、超声相控阵探头、相控阵超声智能分析软件和便携式超声成像仪器。采用超声成像技术作为检测平台，通过定制型超声检测工艺开发以及定制型软件为支撑，完成铁路道岔固定螺栓的智能检测。该装置通过相控阵探头发射超声波，再由数字处理集成电路对回波信号进行处理，之后通过定制相控阵超声智能分析软件，实现道岔固定螺栓免拆卸状态（折断、裂纹）的检查分析，并且能够实时在线判断螺栓状态；另外，通过设计便携式超声成像仪器，可以实现智能检测分析、数据存储、维修数据、检测报告等功能。该检测分析装置可以提高道岔螺栓状态的检测效率，减轻工人的劳动强度，保证列车的安全运行，特别适合铁路道岔固定螺栓的智能检测，符合未来轨道交通行业的发展趋势。



a) 铁路道岔



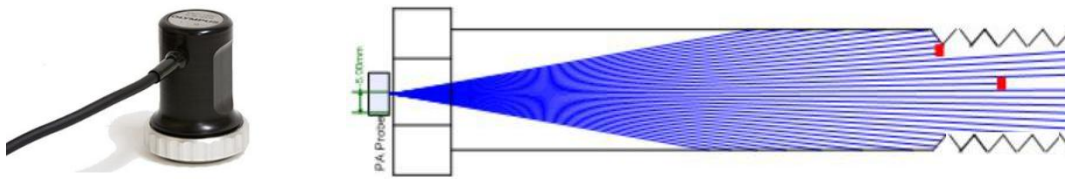
b) 道岔固定螺栓

图 1. 铁路道岔及其固定螺栓

二、关键技术

该项目使用超声相控阵技术，实现铁路道岔固定螺栓的智能检测，可解决目前铁路道岔固定螺栓故障检测中存在的一些问题：

（一）发展适合于螺栓检测的超声相控阵成像技术。与现有单晶探头超声检测技术相比，超声相控技术利用电子控制方式实现波束偏转，可进行连续电子“面”扫描，探头的布局保证各自的声束扫描角度范围之间存在重叠区域（其超声相控探头如图 2a 所示），实现检测区域的快速高效、全覆盖检测，图 2b；另外，超声相控技术可以控制声束在待检区域内连续变焦，使得在整个检测区域内都可以保持几乎一致的扫描精度，且可以在待测区域内不同位置实现聚焦，缺陷处的回波能量更强，检测灵敏度更高，更易于发现缺陷。



a) 超声相控阵探头 b) 探头放置螺栓端面发射的扇形波束

图 2. 相控阵探头及其发射扇形波束

（二）实现直观显示检测结果。与现有检测系统相比，相控阵超声智能分析软件可以实现道岔固定螺栓免拆卸状态（折断、裂纹）检测分析、在线实时判断螺栓状态。另外，可以生成二维或三维直观图像，使得缺陷判别更加便捷，对于检测人员的技术水平和经验要求低。

（三）定制开发便携式超声成像仪器。提供螺栓智能检测分析、数据存储、维修数据、检测报告等功能。与传统的定期维修模式相比，该螺栓智能检测装置符合大数据时代对于设备的预测性维护要求，通过收集海量数据并进行分析，及时发现并预防螺栓可能存在的安全隐患，让铁路道岔保持正常稳定工作，这不仅能提高运维效率，还能减少系统的维修费用。

三、应用市场

截至 2020 年，我国铁路运营里程已达到 14.6 万公里，共设立 18 个铁路局。仅以西安铁路局为例，其下辖高铁车站共使用近 800 组道岔，平均每个道岔使用 5 台转辙机，每台转辙机包含 4 个固定螺栓，根据现有检修规程，固定螺栓每 10 天外观敲击检查一次，每两年拆卸检查一次，检修耗时严重且代价高昂。铁路道岔固定螺栓的智能检测分析装置属于专用仪器，涉及数据存储、智能检测分析、检测报告生成等功能。装置价格低廉，功能强大，可以满足铁路道岔固定螺栓的

运维需求。该项目产业化后，可以填补国内市场空白，适合面向国内铁路推广，具有广阔的应用和推广前景。

此外，该装置还可以推广至风电领域，用于风电场高强螺栓的运维。以华能集团为例，其目前拥有风机约 1.2 万台，每半年需检测一次高强螺栓力矩。若开展在役风电机组高强螺栓力矩检测技术服务，每台风机螺栓力矩检测费用 0.9 万（每台风机高强螺栓约 900 颗×10 元/颗力矩检测费），螺栓力矩检测费用约 1.08 亿。

四、技术成熟度

☐概念验证 ☒原理样机 ☐工程样机 ☐中试 ☐产业化

五、合作方式

☐联合研发 ☐技术入股 ☐转让 ☐授权（许可） ☒面议