

聚焦共性关键技术 推进行业技术进步

——走进机械工业精密磨削技术重点实验室

Focus on Common Key Technologies to Promote Industry Technological Progress

[编者按] 机械工业精密磨削技术重点实验室由上海理工大学与上海机床厂有限公司共建,自2010年挂牌以来,面向高端装备制造产业,聚焦精密制造核心关键技术领域,通过打造国际合作的技术交流平台与国内龙头企业合作的技术应用平台,建设具有国际水平的精密制造应用技术研究创新基地,推动我国数控装备行业的创新发展。

研究方向及成果

实验室围绕精密/超精密数控磨削的关键共性技术,在磨削机理及磨削工艺、磨削过程检测与控制、磨削过程热误差测量与补偿、精密数控机床设计等研究方向,开展相关关键技术的研究与应用工作。实验室由上海理工大学2000m²的数控技术研究基地与上海机床厂有限公司1000m²的实验研究基地组成,包括精密磨削工艺技术实验室、精密机床热误差研究实验室、德国雄克智能夹具联合实验室、机床力学性能测试与分析实验室、机床远程维保技术实验室,形成数控机床优化设计研究平台、机床热设计技术研究平台、精密机床力学性能测量与分析研究平台以及磨削工艺研究平台。实验室拥有世界一流的产品设计软件以及国内外先进的试验装置和精密测量仪器百余套,并自主研发了20余个试验台,包括直线电机性能试验台、高速滚珠丝杆性能试验台、机床床身加载试验台、伺服电机加载试验台、机

床热误差研究试验台、机床力学性能研究试验台等。实验室的目标是:建设一个具有国内领先水平的精密数控磨削技术研究实验室,并使其成为高精度数控磨床的开发研究基地。

自创立以来,实验室先后承担了10余项“数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题的研究工作,先后研发了多台具有国内领先水平的精密数控机床产品,包括世界上最大的顶磨型数控轧辊磨床,满足了我国船舶制造对大型钢板轧制的需要,解决了重大装备的制造问题。针对磨削加工中广泛需要的外圆、内圆与端面磨削,开发了精密、复合、数控磨床,应用于航空发动机转子涡轮轴的精密加工,是航空发动机行业不可或缺的关键设备。所研发的超精密大尺寸光学玻璃平面磨床,填补了我国缺少超精密大尺寸光学玻璃平面磨床的技术空白,满足“激光核聚变”等相关产业对大口径平面光学玻璃超精密加工的需要。此外,经过国家科技重大专项课题的研究与上海市科委重点研究项目的技术攻关,突破

了精密数控机床设计、制造与加工工艺若干关键技术,形成了数控机床整机动态特性测试技术、数控机床热设计、可视化精密加工工艺优化技术、基于虚拟样机的数控机床设计技术、精密机床关键功能部件设计与制造技术等具有国际先进水平的关键共性技术。研究成果先后获得上海市科技进步一等奖与中国机械工业科技进步一等奖。

发展定位及思路

实验室面向高端装备制造产业,聚焦精密制造核心关键技术领域,开展精密制造研究基地建设、学科队伍建设和精密制造核心关键技术研究,打造具有国际水平的精密制造应用技术研究创新平台和精密制造人才高地,通过人才培养、科技服务引领和推动我国数控装备行业的创新发展。

为了建设具有国际水平的精密数控装备研究平台,并使研发成果能够推动我国数控装备行业的技术进步,实验室提出了两个平台的建设策略,一是与国外知名大学建设联合研

究基地平台；二是与国内知名企业建设联合实验室，从而形成具有世界先进水平的数控装备研究基地与技术应用示范基地。

在与国外大学合作方面，与德国斯图加特大学机床研究所建立了近 20 年密切的合作关系，自 2004 年以来双方教授每年互有往来，该研究所所长 Uwe Heisel 被聘为上海理工大学荣誉教授。自 2008 年以来双方在国内与德国共同举办了 5 次中德先进制造技术论坛，并共同开展了数控机床热误差 ISO 标准修订的合作项目研究。自 2012 年以来与英国利物浦约翰摩尔大学先进制造技术研究实验室建立了合作关系，上海理工大学先后选派多名教师与博士生赴英国共同开展微结构表面磨削、高速磨削技术等精密磨削技术的研究工作。2018 年以来与英国考文垂大学在大数据技术方面建立了合作关系，双方签署了两校间博士生双学位培养的协议。2019 年与西门子(中国)股份有限公司签署了共建“USST-SIEMENS 智能制造数控装备数字化技术应用示范中心”的合作协议，其目标是为机床行业提供数字化智能制造技术解决方案，为人才培养提供机床数字化工程技术支撑。

在与国内知名企业合作方面，除了与上海机床厂有限公司共建该实验室外，还与我国数控装备龙头企业沈阳机床集团合作建设了沈阳机床-上海理工大学联合研究院以及 i5 智能机床联合实验室。通过这些校企合作平台，双方在基于动态特性的数控机床设计、精密加工工艺技术、数控机床状态检测等方面开展了卓有成效的研究工作，完成了我国第一台完全基于动态特性设计理论与结构优化设计理论计算的数控机床设计与制造。建立了数控机床力学性能数字孪生模型，实现了基于数字化虚拟样机的数控机床结构优化设计技术，并采用该技术开发了立式加工

中心。基于这些理论研究成果，2020 年与秦川机床集团有限公司合作共同研发了我国首台具有 2g 加速度的五轴高速数控机床。

核心技术

针对影响我国机床行业技术发展的共性关键核心技术，实验室在多项国家与上海市重大重点项目支持下，形成了精密数控机床产品研发与应用的若干关键技术。

(1) 数控机床整机动态特性测试与分析技术。

动态特性决定了机床切削的能力、机床切削的精度，是影响机床性能最为重要的特性。在加工状态下获得机床整机动力学测试结果，是建立机床数字化虚拟样机、评价机床各主要部件动态性能、发现设计缺陷、结构设计优化和机床性能监测的前提。然而传统试验方法对机床这样的复杂系统难以实现整机加工状态的动力学特性测试和分析。实验室提出了贝叶斯理论和运行模态分析相结合的模态参数识别技术，开发了数控机床动态特性测试与分析软件。该技术的优势在于无需人工激励，在工作状态下实现机床整机动态特性的测量和识别，并通过引入信噪比指标对试验结果的可靠性进行评价。所发明的数控机床整机动态特性测试与分析技术，已应用于 30 余台机床整机的性能检测，为沈阳机床集团 i5 系列立式加工中心的结构优化设计、上海机床厂有限公司精密磨床的优化设计以及秦川机床集团有限公司的精密齿轮磨齿机等机床的设计提供了技术支持，成为高性能机床设计必不可少的技术手段。

(2) 基于动态特性分析的数控机床设计方法。

刚度不足所引起的主要部件变形与切削振动是严重影响数控机床加工精度的主要因素之一。保证加工精度，从机床结构设计来看，就是要在保证机床最大切削能力所产生的切削力条

件下，使机床各主要部件的刚度满足切削要求，同时使其振动固有频率避开不同切削参数激励的频率。目前我国机床行业普遍采用的静态与经验设计方法无法解决这些问题，导致机床振动成为国产机床普遍存在的一个问题。数控机床的加工性能主要取决于其动态特性，实验室提出的基于动态特性分析的数控机床设计方法有效解决了数控机床刚性不足以及切削振动的问题，对于提高加工效率和加工精度具有重要的作用。

数控机床整机的动态特性主要取决于各部件的动态特性、重心分布以及结合面接触刚度参数的综合作用。针对基于动态特性的数控机床设计问题，实验室分别解决了各部件结合面接触刚度参数测量技术、机床各部件重心的分布优化问题以及基于机床结合面接触刚度测量数据库的虚拟样机建模技术三个核心技术，形成了基于虚拟样机平台的数控机床设计技术，解决了机床主要部件动态特性设计指标确定、数控机床主要部件重心优化分布等技术难题，并保证了精密数控机床切削过程的稳定性。

(3) 可视化精密磨削工艺参数优化技术。

影响磨削过程的参数众多，而且参数之间呈现很强的非线性和动态不稳定性，磨削加工结果与磨削工艺参数(砂轮转速、工件进给速度、磨削深度与磨削进给量等)之间同样存在着非线性关系。实验室通过对磨削机理的研究，揭示各种磨削过程、磨削现象的本质，综合运用声发射传感器、功率传感器、振动传感器、位移传感器等对机床、砂轮等状态检测，形成了可视化精密磨削工艺参数优化技术，该技术可有效解决磨削精度与效率、磨削颤振、磨削烧伤、砂轮钝化、磨削加工表面质量等磨削工艺难题，积累了近 200 台数控机床的工艺测试分析经验，为 40 余家企业的高精度加工提供了有效解决方法。(采访 逸飞)