

机器人与智能制造技术

丁 汉

华中科技大学

摘要：机器人与智能制造技术是制造业深入实施创新驱动发展战略的重要引擎，是我国由“制造大国”到“制造强国”跨越的必由之路，已成为制造学科前沿研究热点。针对国家战略行业和支柱产业的重大需求，本报告介绍了机器人与智能制造技术的研究进展，并对未来发展趋势进行了展望。

非常感谢大会组委会邀请，跟大家分享一下我在机器人与智能制造领域的一些体会。我的报告主要包括如下四个方面：首先介绍产业和技术背景；其次介绍“中国制造2025”一些主要内容，重点谈一谈机器人与智能制造技术；进而讨论这个技术如何对行业产生引领和质的变化；最后谈谈关于创新载体建设的一些体会。

我国制造业在国际上已经取得了非常重要的位置，但是我们的发展很不平衡，有些企业自动化水平很高，但有些企业的自动化水平却很低。我国制造业的人均生产力、创新能力、能源消耗等跟美国、德国等国际上先进水平相比，差距还很大。制造业的核心变化应该是怎样能够快速的响应市场，怎样能够在市场竞争中取得优势，所以制造业的迅猛变化对自动化科技和技术提出了很多的挑战。目前来讲，中国制造业面临的压力来自三个方面：一是产业转型升级的压力，第二个是劳动成本的上升，第三个问题是环境友好的要求越来越高，能源排放的压力越来越大。在这三重压力之下，中国制造业怎么能够发展，实现产业升级？这其实是面临的一个很大的挑战。

尤其是我们已经承诺在2020年我们碳排放比2015下降40%到45%，这个承诺将带来企业成本的增加，用工成本的增加，必须增加产品的附加值。因此，中国产业转型升级和附加值提升是摆在我们面前很重要的挑战。

我国对制造业是高度重视的。回顾中国制造业可以从1978年开始，1987年是起步阶段，成长阶段是1988年到1997年，民族制造业不断崛起，同时外资企业大举进入中国。1998年到2007年，中国制造业进入世界，中国制造闻名全球，Made in China很多地方能看到。然而，2008年开始，中国制造业面临着一个非常大的挑战，中国怎么由制造大国向制造强国转变是我们国家战略。中科院提出了2050年科技发展路线图，机械工程学会提出了中国机械工程技术路线图，发改委和工信部最近也设置了智能制造发展专项。值得一提的就是最近国务院正式发布了“中国制造2025规划”，这是作为一个国家性的战略，是使我们国家制造业升级以及走向制造强国的必然选择。因此，在今后一段时间内，中国制造业怎么样从中低端走向中高端，怎么样使附加值提升，怎么样

使技术能够真正在行业产生引领，应该是我国制造业面临的一个非常大的挑战。这里我将简单的概述一下“中国制造2025”的主要内容。

“中国制造2025”主要是根据中国国情，分三步走的战略：2025年怎样能够跻身到世界强国的行列，2035年怎样达到世界制造强国的中等水平，主要目标是建国100年的时候，中国的制造业能够跟国际的制造强国站在一个起跑线上，建成全球领先的技术体系和产业体系。这个目标是很宏伟的，但是面临的问题也是非常多的。当前目标是2025年，我们如何在创新能力及整体素质方面有大幅度的提升，怎么样把我们国家的制造业水平有大的提升。

“中国制造2025”主要包含有四大转变和一条主线。四大转变是指：一是由要素驱动向创新驱动转变，二是由低成本的竞争优势向质量效率的竞争优势转变，三就是由资源消耗大、污染物排放多的粗放制造向绿色制造转变，四是由生产型制造向服务型转变。一条主线实际上就是信息化与工业化深度融合。其中，制造业的数字化、网络化和智能化是一个主攻方向。五大工程，是指国家制造业创新中心建设工程、工业强基工程、绿色制造工程以及高端装备、创新工程，目前都在一步一步的往前推动。

中国制造贯彻了五项方针，现在主要是一个创新驱动，怎么样以质量提升发展战略，最后走向生态文明的发展道路，最主要的核心还是一个结构优化，以及走人才引领的发展道路。中国制造业急需一些高端的人才，人才在这个里面是核心。规划还提到重点发展行业，明确提出了信息技术产业、高端数控和机器人产业、航空航天装备产业、海洋装备、先进轨道、节能与新能源汽车、电力装备、新材料、生物医药及高性能的医疗器械等产业。

“中国制造2025”和“德国工业4.0”还有一个比较大的差别，这个差别体现在我们的工业发

展很不均衡，我们很多技术需要进一步加强，尤其是我们的工业基础件、工艺知识数据库等都需要进一步的强化。最早的蒸汽机时代是一场工业革命，这缘于蒸汽机的发明。第二次工业革命是大批量流水线生产。第三次工业革命是以数控和机器人这样的信息技术为代表的自动化水平的提升，比较有代表性的技术包括：PLC、数控机床、机器人，整个产业发生了非常大的变化。第四次工业革命还有待于进一步的证实，但是至少大家已经感觉到有这样的一个趋势，就是定制化以及信息系统和物理系统的融合。现阶段，我们企业处在1.0、2.0、3.0、4.0的不同阶段，怎么样同步发展？怎么样能够全面突破，局部超越？是值得我们思考的问题。

下面我重点要剖析一下，在上述国家战略下，作为一个高校老师，怎样围绕国家大的方向做一点力所能及的研究工作。这里面我重点讲一下智能制造技术与应用。智能制造这个概念很大，很难给它一个严格的定义。在制造过程中物化人类的知识，通过人和机器合作，使装备进行感知、推理、决策和学习等活动。通过人与智能机器的合作扩大、延伸和部分替代人类专家在制造过程中的脑力活动，提高装备系统的适应性和自治性。一个重要的载体就是以机器人+数字制造+人工智能技术，将来的制造还会大量的引用人工智能和传感技术。在这个人工智能和传感技术不断发展的时代，智能制造将会不断的被推向一个新的阶段。智能制造主要由几个核心部分组成：第一个核心好比人的大脑，涉及到工艺知识与智能控制。很多高端装备需要大量的工艺知识，需要很多行之有效的智能控制算法改善它的性能。第二个是软件算法，即怎么样能够对装备进行自主的工艺编程。第三是人机交互界面，好比人的感官，是一个交互式的反馈系统以及加工过程中各种工况的识别与感知系统。最后是执行系统，就像人的四肢，由自动化的、智能化的功能

部件与人机交互系统构成整个智能制造大系统。所以，制造智能的范围很广，包括软件、硬件、决策、控制以及编程。智能制造发展离不开数字化制造技术，像CAD、CAE、CAPD、CMPB、M+P，都是智能制造的基础。在这个基础上怎么样利用网络进行组织以及重组，最后才能达到智能化。所以，对很多企业来说，如果连简单的工艺数据库都没有，不可能谈智能制造。为什么日本的制造技术搞的非常好，他们的企业非常重视工艺知识、工艺库的积累。因此，对于一个企业来讲，长期工艺知识的积累是非常重要的。

智能制造包括的内容非常广，从客户需求到产品开发到产品生产到产品服务，涵盖了产品设计、生产、物流和营销等产品全生命周期。因此，智能制造远远不是一个机械学科所能涵盖的，还包含信息、材料、力学、物理等多学科的支持。

智能制造包含几个比较重要的方向。第一个比较代表性的方向就是产品的智能化。产品的智能化会带来一场非常大的变化，包括现在看到的无人机以及小的直升飞机，以及无人驾驶汽车。在后面一段时间，五到十年，无人驾驶汽车可能都有一个很大的市场，这里面很多技术的突破，远远超出了我们的想象。当然这里面有一个关键的技术，包含对环境的感知、路径的规划、智能的识别、智力的决策等，关键技术涉及到工况识别、控制方法及策略、多功能感知、语音识别、信息融合等。所以，产品一旦有智能，对一个产业的影响很大，比如深圳大疆公司智能飞控产品，产值做到了几十个亿。将来发展的人机交互智能化对产品附加值的提升是非常有帮助的，比如个性化的定制与服务。

第二个是装备的智能化。要目前还是比较困难的，目前装备大都停留在增加一些传感器，做一些算法，距离真正实现装备的智能化，还是有一定差距的，牵扯到非常复杂的系统工程。最近

一些企业做了一些智能工艺算法，但是真正在装备里面要把专家知识融进去，集成到感知、决策和执行系统中，还是有一定差距的。怎么样赋予装备在线学习和知识进化能力？让装备在用的过程中不断自我完善，越用越好用，就像人年纪越大经验就越丰富。所以大家不要忽略大数据以及学习的能力使装备的变化。将来，这种信息技术将会对制造业带来很大变革，尤其像智能装备，将来有可能会在我们的实际生活中会出现。智能装备下一个定义很难，但是至少它应该表现出几个特点。一是这个装备应该有自适应的功能，二是这个装备在用的过程中能够学习、能够自己提升，在用的过程中不会性能越来越差，它会保持这个性能。那么这里面牵扯到大量的传感和算法。第三，装备将来跟人的交互、共融更应该突出，就是不光是单一的装备，人和装备能够形成一个共融体，人发挥人的强项，装备发挥装备的强项，装备和人是相互共融。所以，装备的智能化，不论是在我们机械行业还是自动化行业，都是非常有挑战性的研究方向。

当然还有工厂的智能化，牵扯到很多软件，很多算法，是一个非常大的软件工程，国际上有很多大的公司在做工厂智能化。还有供应链的智能化。还有一个制造模式的变化，什么样的制造模式？包括一些电子商务平台、智能制造平台以及社交购物平台。因此，制造实际上包含的范围很广，从设计到制造到服务，从工艺到装备到车间到工厂到供应链到物流乃至整个系统。

数字化制造技术是智能制造的基础。智能制造最核心、最主要的支撑就是数字化制造，包含产品设计、虚拟技术以及驱动技术，包括过程的管理以及企业的协同。机器人是智能制造不可忽略的一个重要载体，不排除10年、15年以后，机器人大规模应用会改变整个制造业的格局。但是这个过程还需要一段积累，还有很多技术需要突破，但是不得不承认机器人在智能制造里面扮演

了非常重要的角色，其优点是操作性、柔性配置以及它的信息集成能力。跟机器人并驾齐驱的就是智能传感，高端制造需要精确传感。前一段时间我们在德国考察，看到德国很多制造现场都有很多在线测量仪器，传感器应用的非常普及，传感系统价格甚至超过了机器人本体的价格，所以大家不要忽略这个智能传感。但是对智能传感的研究还是以问题牵引，不能漫无目的，要有针对性。针对制造过程哪些环节把传感技术加进去，能够提升效率，能够提升精度，能够环境友好。

因为今天在座的有很多是致力于学术研究的青年学者，我想结合我自身的科研体会，简单介绍一下智能制造领域在学术层面有那些研究方向。智能制造有三个方向是可以做学术研究的。第一个学术方向是复杂曲面的多轴数控加工。举一个复杂曲面零件多轴加工的案例，这类零件一般用作航空、能源领域核心动力部件，大家知道这些曲面设计必须满足空气动力学性能的要求，因此其制造过程必须严格控制尺寸精度、表面质量及加工效率。复杂曲面加工首先涉及到空间刀位的几何路径规划，其次涉及到制造过程的测量评价及精度补偿，以实现高效高精加工；另外，加工过程是一个具有周期时滞特性的动力学系统，如何预测加工过程的稳定性、切削力，抑制颤振，减少刀具磨损，这里面有一系列有价值的技术值得深入研究。从事工程类项目研究，首先需要明确项目应用背景，在此基础上深挖它蕴涵的科学问题，等科学问题解决了再回归到工程本身，指导解决技术难题，最后与行业相结合，推进整个行业的技术进步，这是我们这一代科技工作者比较重要的一个使命。需要注意的是，做工程项目一定要结合国家重大需求，瞄准有挑战性的研究对象，围绕对象提出有挑战性的问题，找到理论和技术的结合点。

航空发动机被誉为现代制造业皇冠上的明珠，叶盘叶片是其核心动力部件，也是适用多轴

加工最典型的复杂曲面零件。近年来，在国家973项目持续支持下，我们团队围绕航空发动机整体叶盘、叶片等研究对象，在复杂曲面加工方向开展了一系列工作：在几何路径规划方面，采用包络成形方法，我们提出了复杂曲面的空间扫掠方法，将效率较低的点接触加工方式提升到线接触加工方式，加工效率能够提高3到4倍。针对侧刃铣削自由曲面不可避免的几何误差，提出了实际曲面和包络面之间的偏差调整刀具轨迹的算法，解决了自由曲面线接触加工的原理性误差控制的难题。将来的制造业，不能仅仅是技能型的，一定要走向科学，要可建模、可计算、可实验、可反馈。第二个工作是加工过程的稳定性预报，其目的在于指导工艺参数的优选，确保成型的表面精度。铣削加工可表示为周期时滞的动力系统，如何判别其稳定性是加工动力学的一大难题。我们建立了基于积分格式的铣削加工动态稳定性判别方法，提出了动态响应计算和灵敏度分析的全离散法，实现了加工稳定性和动态误差快速、准确的同步预报。现在国内做加工动力学研究的越来越少了，偏向控制的较多，实际上两者是分不开的。大连理工大学钟万勰院士非常强调动力学，他提出了精细积分方法，在工程上具有很大的实用价值，真正好用的理论在工程和学术界的影响力是很大的。第三个工作是测量，通过一些算法分析测量数据，对制造过程进行检测、监测和评价。测量在闭环加工中是极其重要的。测量、加工一体化是解决零件加工误差的重要手段，在位测量与反馈加工可以很好的控制零件精度。以美国通用电气公司导向叶片（OGV）工艺开发为例，OGV叶片长600mm，大幅面的减重槽平均1.5mm厚，有200多项尺寸要求，加工过程极易发生振动及切削变形，而且变形量并不稳定，传统工艺无法满足量产。一个企业组织技术人才攻坚了两年仍然不能完全突破，后来通过与我们技术团队合作，最终攻克了OGV叶片的加工工

艺。我们采用路径优化、在线测量以及自适应加工的解决方案，通过实时测量形变量，并依据变形量分配最佳切削余量及调整路径，解决了变形量不一致的问题，而且将OGV叶片型面加工时间由12小时减少至2.5小时，助推企业获得GE公司的叶片加工订单。航空制造代表着制造业的最高水准，制造质量影响因素非常多，我们目前仅实现了静叶片的高效高精加工，除此还有压气机动叶片、涡轮端的高温合金叶片。高温合金叶片成本在航空发动机总成本的比例非常高，这些零件的制造与材料科学、材料技术研究紧密相关。有观点认为：航空发动机最核心的基础是材料，制造只是一个保障，事实上航空智能制造需要的是多学科融合，是一个系统的方法。

第二学术方向是机器人加工。机器人在工业领域最早应用于码垛、喷漆等对操作精度无要求或要求相对较低的场合，后来逐渐应用于焊接、装配等中等精度要求场合。可以预见，不久的将来，机器人将逐渐应用到高精度的加工制造场合，尤其是难加工复杂曲面金属材料零件的加工，这将会对机器人系统带来“智能化”革命。以机器人磨抛加工为例，为保证曲面加工的轮廓精度要求，需要基于视觉的在线形位测量；为保证磨抛结果符合设计要求，需要融合工艺知识的迭代规划与控制算法。当融合了人类技能、经验乃至智慧，以及多源传感信息之后，机器人系统将具备知化学习能力，在深度学习中成为能工巧匠型智慧机器人系统。我们团队在上世纪八十年代就开展了针对喷漆应用的机器人离线编程系统，该工作获得1995年国家科技进步三等奖，后来我们将机器人系统应用于焊接。近年来，我们团队针对航空发动机、燃气轮机、风电和船舰螺旋桨叶片的磨削加工开展了机器人磨抛工艺与装备的研发工作。

机器人磨抛，首先需要解决复杂曲面、薄壁边缘的三维视觉测量与重构，其次是高分辨率、

高灵敏度和线性度、高带宽力控制，最后是实现宽行加工的运动规划与控制算法。目前，我国所有航空、燃气轮机和风电叶片仍然采用人工磨抛，不仅效率低、一致性差，而且磨抛过程产生的粉尘易对工人健康造成极大危害。以航空发动机叶片磨抛为例，该叶片进出气边圆角半径在R0.1-3mm之间变化，且通常由若干样条曲线二阶光顺连接，局部刃口呈“鱼嘴”形状，异常锋利。人工之所以可以磨抛这类零件，是因为可以反复自我学习，利用敏锐的手感和精细的抓持力来保证加工精度，这种手感和抓持力是难以利用机械精密模拟的。因此，航空发动机叶片进排气边圆角的机器人自动磨抛被认为是世界性难题。为了解决这些问题，需要对磨抛工艺机理进行系统研究，研究磨削深度、砂轮半径、磨粒大小等对磨削力/热的影响，建立机器人磨抛工艺模型，在此基础上建立机器人关节空间与磨抛用量之间的关系。此外，还需要实现叶片进排气边叶缘弧面的精确测量，以及在线的余量计算和路径补偿。受制于叶片薄壁悬伸叶缘的高柔性特征以及在线测量设备难以达到亚微米级精度，截止目前国际上少有自动化高精度进排气边磨抛加工设备。

机器人磨抛的关键技术还包括手眼标定、点云匹配与视觉定位、误差检测与补偿、离线编程、软件开发等。在视觉测量中，需要对测量设备与机器人末端的相对位置进行标定，以实现机器人工作空间的三维建模。目前，机器人手眼标定通常采用的手段包括有激光传感、CCD视觉等。借助于三维轮廓测量设备，通过接触式或者非接触式方法实现对零件的三维扫描与重构。依据零件原始CAD模型，将其与测量点云进行匹配来计算加工余量。进而逆向推导接触力、驻留时间、进给速度、砂轮转速等工艺参数，实现加工误差的检测与补偿。如何实现宽幅大区域亚微米级非接触式测量仍是测量领域关注的突出问题，

由此衍生的测量误差判定与补偿机制，则直接影响磨削效率与精度。

离线编程尽管是机器人通用技术，但对于叶片磨抛尤其是叶缘磨抛仍然存在技术盲点。叶片进排气边的渐变小圆角半径特征和非统一的轮廓度公差要求，决定了叶片变接触力磨削加工的工艺特点。而目前商用的CAM软件不具备六轴磨抛刀路轨迹生成功能，而传统的五轴刀路规划不需要接触力规划。因此，机器人磨抛离线编程一方面需要对叶片型面与进排气边进行六轴磨抛刀路编程，另一方面也需要对磨削参考力轨迹进行规划。除此之外，机器人离线编程还需要解决多解唯一性问题和轨迹平顺性问题。

机器人加工软件是反映机器人加工智能特征的关键。不同于数控机床，机器人刚度低、精度差，而且其动态性能具有臂形依赖特性。为此，机器人加工需要在多体动力学和加工动力学研究的基础上，对控制器以及工艺参数选择进行优化。此外，机器人带宽低、易振动，需要光顺的刀路轨迹和进给速度。因此，机器人加工软件需要集成动力学建模与分析、轨迹生成、后置处理与加工仿真等模块，不仅需要实现操作友好化，而且要在根源上保证和提高机器人加工精度。

第三个研究方向是铣削过程的主动控制。铣削过程中，当铣削速度太快或者切深过大时，极易发生颤振，造成加工表面粗糙，无法满足工艺要求。常用的方法是“扬汤止沸”式的被动控制，即：降低速度或切深以换取铣削的稳定性，但这样做会大大降低铣削效率。如何同时做到“高效率”且“无颤振”的铣削呢？这就是我们一直致力于研制的“釜底抽薪”式的主动控制器。通过激光位移传感器等在线测量振动信号，并通过内嵌在主轴里的电磁轴承、压电陶瓷等驱动器改变铣削主轴整体的阻尼和刚度，从而有效抑制颤振的产生。这样的“主动控制”赋予了铣削主轴一定的智能，使其对颤振信号顺应，你进

我退，你退我进。因此，内嵌主动控制器的主轴被称为智能主轴。铣削过程动力学的难点在于周期性激励矩阵与时滞信号的耦合，传统的线性时滞控制理论难以奏效。我们另辟蹊径，用傅里叶级数描述周期性矩阵，用傅德级数近似时滞信号，设计了控制器内模。通过不断的在线迭代学习，精确的逼近了铣削过程的复杂动力学特性，据此设计了输出调节非线性主动控制算法。较之现有的被动控制方法，将同一转速下的稳定切深在理论上提高了五倍。后续还需大量的实验来验证和提升。为了能真正在铣削加工过程中获取更大的稳定区域，我们研制了磁悬浮主轴主动控制平台。磁悬浮的好处在于高带宽，而且可同时作为传感器和驱动器使用。当颤振发生时，磁悬浮线圈很快就可以测量出来，并反馈给自身，从而立即激发出反方向的力来抵消颤振。为了进一步消除残余的振动，设计了多个机械手臂携带音圈电机，根据加工过程情况，在工件的不同位置进行协同减振。相关研究已在薄壁件加工的颤振抑制中取得了阶段性的成果，发表在IEEE/ASME TMECH、IJMTM等本领域权威期刊上。针对多点夹持铣削过程存在的不规则动态形变，借助稀疏贝叶斯学习，利用残缺的小样本数据进行短期形变预测和补偿，进而设计了带形变补偿的颤振抑制器。后期，我们还打算引入压缩感知、深度学习等新兴机器智能方法，深入挖掘制造数据中的相关性和因果性，揭示更多的制造机理和规律。尽管主动控制技术在铣削过程中成熟应用还有很长的路要走，但可以看到它是智能制造未来方向之一，有着广阔的应用前景。

以上就是我结合我们团队的科研经历和体会，简单的把“复杂曲面五轴数控加工”、“机器人加工”和“加工过程的主动控制”这三个智能制造的学术问题，给大家做了介绍。智能制造一个新的的发展方向是机器人加工。最近，国家自然科学基金委组织论证机器人重大研究计划，

我们拟提出如何面向复杂零件智能制造构建能工巧匠型加工机器人系统开展基础研究，应该是未来5到10年制造领域一个重要的发展方向，涉及机器人结构、材料、驱动、传感等多学科技术的创新。比如：未来的工业机器人可能是变结构、变刚度、可折叠的，驱动也不仅仅是用电机，可能利用整个材料本体来实现高密度驱动。因此，面向制造领域应用的能工巧匠机器人将是未来机器人一个重点。

接下来我将进一步介绍机器人能否在加工制造领域进行应用。1993年去德国斯图加特大学做洪堡学者时，大学旁边有个佛朗霍夫研究所，当时这样的研究所全德国大概只有二十几个，目前已经发展到68个。每一个所重点关注一项技术，进行持续的、长期的研究，力求做到极致，把一个大型技术从成熟度4、5、6级，做到7、8、9级，最后直接在企业应用。某种程度上讲，佛朗霍夫模式也是德国制造业全球领先的关键因素之一，这对我很有启发和触动。数字化智能化制造是华中科技大学一个优势研究方向，在国家973项目持续支持下，我们进行了长达十余年的研究，从基础理论研究到关键技术突破，但真正能做到在世界范围内技术引领并在企业推广应用还是很困难的。因为参与项目的研究生毕业后就离开了学校，而企业加工任务非常繁重，是无暇研究具体的技术细节，而细节差千分之一这个技术都是没有用的技术，因为不好用企业就不会去用，你只有做到极致，才能使行业进步。因此需要把技术成熟度做到企业能够完全好用的水平，需要进行大量繁琐的反复性研究。然而这些反复性工作高校老师没有精力做，而企业又没有时间和做。此外，高性能加工制造涉及到复杂的动力学和控制技术，而很多企业是没有这个能力研究的。因为我们国家从事这方面研究的博士生毕业后大部分留在高校或者研究所。我曾经工作过的德国斯图加特力学所，他们的毕业的博士生绝大部分%都

去了大公司。这么多年，我们经常思考，必须有一个政、产、学、研、用合作平台，留下一批学生把这个技术碉堡攻下来。因此，我们华中科技大学在无锡成立了一个研究院，在政府和学校支持下，集中了一支产学研队伍专攻数字化智能化制造技术，将整个学校在数字化智能化制造领域分散的理论和技术成果整合起来做成一个系统的解决方案。目前，我们已在机器人智能加工领域取得了一定应用成效。近两年我走访了很多制造企业，很多企业，包括一些大型的制造企业，有些企业的工艺水平还是很低的，很多企业买了五轴机床却按三轴机床在用。再举一个例子，大型风电叶片一般超过50米长，我在一家大型风电叶片制造企业看到，现场十几个工人在手工打磨，环境非常恶劣，工人全副武装就看到两个眼睛露在外面。这让我感觉很震撼。在这样的工业技术下，如果我们的机器人技术不搞上去，整个国家的工业很难有自己的成就感。对于这种大型叶片的打磨，完全可以采用机器人来打磨，为提高效率，可以采用多台机器人协作方式工作。后来我们和企业合作开发了多机器人打磨系统，现在已经开始试用了。但真正把这项技术做到实际应用还是很难的，需要进行大量的磨抛实验，高校可以先做一些理论、方法和算法研究，包括三维重构、主动柔顺控制、机器人加工工艺和机理等。机器人用于加工有一个优点，就是可以配置灵活，动态调整。我在德国看到采用多机器人协作加工空客大型结构件，整个制造车间吊装了多台机器人在有条不紊的同时工作，这里面的算法还是很复杂的。因为每个机器人本身是一个动力学系统，而加工过程也是一个动力学系统，如何协调这两个动力学系统并实现高效高精度加工，这里面有很多理论问题。

中国有着灿烂的文明历史，发明了造纸术、木牛流马、浑天仪、地动仪。这些发明在很大程度上归功于我们祖先有一批能工巧匠的经验传

承。中国科技发展到今天，我们的航天技术、两弹一星技术等已经占领了科技的制高点，未来的制造技术也应该有过去的经验传承。作为工程科学的研究人员，在进行基础理论研究的同时，千万不要忘记国家的重大需求，当然我们每个人的研究工作也可能只是解决这个重大需求很小的一部分。同时一定要应用驱动，尽可能与从事制造的企业紧密合作，把学问做在车间里。只有这样，我们的基础研究才有生命力，才能很好的支

撑我国高端制造业的发展。未来的制造技术，一方面将由高精度制造向高性能制造转变，涉及很多物理层面工作的研究。另一方面，将从数字化制造逐渐走向智能化制造，需要信息技术、软件技术、传感技术等多学科技术的突破。因此，未来的制造技术一定是机械、信息、材料、力学、物理等多学科技术的紧密结合，并且通过这种多学科交叉，实现制造业向智能化的跨越发展。谢谢各位老师和同学！

作者简介

丁汉 1963年8月生，机械电子工程专家，华中科技大学教授、博士生导师。1989获华中科技大学工学博士学位。1993年受德国洪堡基金会资助赴德国斯图加特大学进行客座研究，1997年获国家杰出青年基金资助，2001年受聘为教育部长江学者特聘教授，2005年和2011年两任“973”项目首席科学家。2013年当选为中国科学院院士。现任华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室主任。主要研究方向：数字化制造技术、机器人技术。研究成果在航天、能源等领域得到应用，获国家自然科学二等奖1项，国家科技进步二等奖2项、三等奖1项。



丁汉教授先后担任IEEE自动化科学和工程汇刊Associate Editor (2003-2007) 和Editor (2011-), IEEE/ASME机电一体化汇刊的Technical Editor (2010-2014), IEEE Robotics and Automation Letters的Senior Editor (2015-)。作为大会共同主席，主办了在中国上海召开的IEEE国际机器人和自动化大会 (2011)。