



▲协作机器人一体化关节
◀大推力高精度直线电机

解锁智能装备的“心脏”与“大脑”

■本报见习记者 赵利利

1月6日，第十二届中国产学研合作创新大会在京举行，由中国科学院宁波材料技术与工程研究所牵头、海天塑机集团有限公司等公司参与申报的“面向智能制造装备的精密驱动与控制关键技术及产业化”项目获得2018中国产学研合作创新成果一等奖。

这一结果并不令人意外，此前，该项目成果已经获得多项省部级、全国行业科技奖及中国专利优秀奖。数字能更直观地反映项目取得的成果：从2011年1月1日立项以来，该项目共研发各类伺服电机及驱动器、运动控制系统、精密数控装备等新产品80余种，推广核心部件10万多套，数控装备2万多套。不仅如此，其授权的发明专利达31项，实用新型专利35项，发表学术论文51篇、专著4部。而体现在经济效益上，项目近三年新增产值达63.3亿元，利润达15.5亿元。

“高效”“高速”“精密”“关键核心技术”是项目团队负责人张弛面对《中国科学报》采访时提及最多的词汇。作为中国科学院宁波材料技术与工程研究所先进制造技术研究所的一名研究员，精密运动与先进机器人团队负责人，张弛坦言，其所做的事情其实就是瞄准智能制造的核心关键技术做工作。

核心部件技术与国外差距显著

谈及高端智能装备，相关领域业内人士就不能回避驱动装置和控制系统。在中国新材料产

业技术创新战略联盟递交的项目推荐书中这样描述驱动与控制系统的核心作用：精密驱动与控制系统是数控机床、机器人、精密注塑机、半导体制造设备等高端智能制造装备的关键核心部件。是实现精密加工、节能减排和高效生产的重要保证。

“驱动装置一般指电机系统，相当于人的心脏，为装备提供动力；而控制系统就相当于人的大脑，解决设备‘怎么走’‘走多准’‘走多快’的问题。”张弛告诉《中国科学报》，电机及其驱动控制系统是智能装备关键核心部件。

张弛表示，中国已成为世界第一大机床消费国、进口国和生产国，但90%的高档数控机床仍需进口，伺服电机、驱动器、数控系统水平与国外差距显著。

以机器人为例，2011年起，我国机器人销售年平均增长38.5%以上，但伺服电机、驱动器、控制器、传感器和精密减速器等核心部件技术依然远远落后于ABB、库卡、日本安川和发那科等公司，绝大部分需进口，这些部件成本占机器人系统总成本的75%。

作为数控机床、机器人、精密注塑机等智能制造装备的核心部件，张弛团队的项目围绕精密驱动与控制系统的核心技术取得了多项成果。

中国工程院院士薛群基在推荐专家意见中写到，该项目面向智能制造装备核心部件精密驱动与控制系统的核心技术开展产学研合作研究与产业化，建立了永磁直驱电机的高推力/力矩密度、低推力/力矩波动的设计理论与

方法，提出了一系列创新的伺服控制与振动抑制方法，解决了运动系统中高速与高精度的矛盾；提出了伺服电机精密冷却结构和高性能伺服驱动方法，提高了系统可靠性和动态响应能力；发明了高速重载磁悬浮门机、自由活塞式内燃直线发电机、全电动注塑机用伺服电机及驱动控制系统，技术成果达到国际领先水平。

“研制成功一系列伺服电机及驱动器、运动控制系统及数控装备，并在数控机床、注塑机、纺织机械等领域进行了产业化应用，取得了显著的经济和社会效益。”薛群基在推荐意见中肯定了该项目成果的社会转化能力。

研制出与西门子对标的直线电机

高推力密度低推力波动直线电机是成果之一，张弛告诉《中国科学报》，该成果揭示了永磁直线电机气隙磁密正弦化机理，建立了极间和齿顶漏磁解析模型，提出了考虑槽口影响并融入矢量控制的场路结合设计方法，发明了优化端部长、绕组及铁心齿的双层交叉精密冷却直线电机，提高了推力密度，降低了推力波动和温升。

“我们研制出了与西门子1FN3600对标的直线电机，在国内首台行程8米的复合加工中心得以应用，重复定位精度10微米。”张弛说。而这一直线电机技术也成功应用于国内首台效率37.4%的15千瓦内燃直线发电机。

高性能伺服旋转电机是项目组的另一重要成果。多年来，国产伺服电机及其驱动系统的效率、精度、动态响应等性能和国外差距显著，高端装备的伺服电机、驱动器、控制器大多依赖进口。我国与之相关的战略规划指出，亟须突破伺服电机、控制器、传感器与驱动器等关键零部件及系统集成设计制造等技术瓶颈，打破国际垄断，推动智能制造产业升级。

瞄准这一目标，张弛介绍说，其团队提出了力矩电机齿槽转矩/磁阻力最小化、磁路优化设计方法，构建了基于数值解析的多参数优化策略，提出了通过改变电枢及磁极参数、磁导调制等降低力矩波动的方法。这些努力使得项目组研制的定子齿槽分离和HALBACH永磁转子的力矩电机，转矩密度优于美国科尔摩根电机近30%，具有结构简单、易加工等优点的注塑机用风冷伺服电机组合壳体，在同体积下，绕组温升降低34%，同温升下，过载能力提高22%。

同时，张弛表示，高速高精伺服驱动控制作为项目成果的重要组成部分，提出了运动系统模态自动辨识与动力学精确建模方法，探明了直驱进给系统振动产生机理及误差来源，发明了能精确测量位移的低成本双读头测量系统，解决了直径超过0.5米的转台圆形光栅或磁栅成本高昂、拼接光栅或磁栅尺位移测量不准确的难题。

此外，高速重载磁悬浮门机采用国际首创的磁悬浮与直线电机直接驱动一体化设计，发明了运行速度世界最快(1.8米/秒)、载重1吨的磁悬浮直驱门机，解决了门机在大行程、重载情况下的启动慢、磨损大、寿命短等问题；注塑机双向伺服驱动控制提出了双向伺服电机复合驱动及速度同步控制方法，解决了大型电动注塑机采用单台电机带来的系统惯量大、输出扭矩低、动态响应慢等问题。

实现下一代人机协作功能

以这些成果为基础，高性能电机和控制系统在工业领域和科研方面得到广泛应用。电机是先进机器人的核心动力装置，张弛对《中国科学报》介绍了基于高性能电机和控制系统的机器人一体化柔顺关节。

张弛表示，一体化集成设计的驱动关节是新一代机器人系统的核心驱动控制单元，直接决定着整机的运动学性能和动力学行为，是新一代机器人的研发重点。

张弛团队一体化集成设计的驱动关节则结合了高功率高转矩密度力矩电机设计、高精度高响应伺服驱动控制器、一体化关节系统集成。他提供的数据显示，这一设计实现了带载情况下一体化关节的柔顺运动控制，定位误差小于0.003度，电机力控精度可达0.06牛米。

有了高功率密度力矩电机、高性能驱动器、主动方向脚轮等技术加持，张弛科研团队研发了基于解耦式主动脚轮的全向移动单元，国内第一台具有完全自主知识产权，使用自主研发伺服电机、驱动器、控制系统的全向移动机器人因此诞生。

张弛表示，利用全向移动平台，搭载轻量化柔顺操作臂，可实现下一代全新的人机协作功能，为制造服务和社会服务提供技术支撑。

智造论坛

制造业转型升级的主战场是企业

吕铁

从产业角度，我认为推进中国制造转型升级应该把着力点放在生产力的提升上。经过过去40年的高速发展，中国制造已经完成了对发达国家规模的追赶，进入了人均制造业增加值追赶的新阶段，这个过程应该说难度更大，面临的问题更多。

现在讲制造业转型升级，不同领域的人可以从不同的角度做很多阐述。回到中国制造业的发展现状，规模追赶完成了，人均追赶是下一阶段的主要任务，对此，提升生产力非常重要。中国现在在生产力水平相比美国、德国、日本、韩国这些制造强国还有很大差距。要支撑中国制造业持续、高质量的发展，还要提升各种要素的生产力水平，不管是劳动生产率还是资本生产率，或者综合来看，全要素生产率是非常关键的。

转型升级的主战场实际上是企业。作为市场主体的企业，应该着重通过低成本扩张来提升市场占有率，要转向提高资本的收益率、投资回报率等效益指标。转型升级是一个长期的过程，需要大量的投入，而且投入有不确定性。

从政府的角度看，应该更有效地运用政府手中有限的资源集中用于政府最应该做的、最能够做好的事情，也就是说要更好而不是更多地发挥政府的作用。过去三四十年来，中国制造业发展很快，政府确实发挥了很好的作用，但是，如果进一步分析，可能围绕政府出台的产业政策效果到底怎么样有很多争议。

有一点政府做得很好，对制造业的发展促进很大，就是政府通过大量的投入，把基础设施的网络建起来了，比如高速公路、高速铁路等，大大降低了制造业发展的物流成本。

今后促进制造业的转型升级，政府应该在环境的打造上发力。也即，政府应该提供一个供需基本平衡、知识产权保护，以及优质低价、避免劣币驱逐良币的环境。

(作者系中国社会科学院工业经济研究所研究员，本报见习记者赵利利据其在2019中国智造论坛上的发言整理)

匠人匠心

张永红：专注坚守 精益求精

■本报见习记者 赵利利

2015年开始参与纳米真空互联实验站(Nano-X)的调研、规划和建设时，在没有任何可借鉴资料、很多技术指标都无法确定的条件下，中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究员张永红引用先进的定制化管理模式，攻坚克难，用了不到一年时间完成了纳米真空互联模拟实验装置的研制并顺利运行。至今提及这件事情，张永红都难掩自豪之情。

扎实的起步工作为纳米真空互联管道的设计、运行，样品的中转、过渡，传输实现网格划分、定位提供了大量的实验数据，为下一步的工程进展奠定了坚实的基础，可以说真正实现了从无到有、从“0”到“1”的突破。如果说这其中有什么诀窍可言，张永红更愿意将其归结为8个字：专注坚守、精益求精。在他看来，这8个字很好地诠释了科学家该有的“工匠精神”。

不是主角

大科学装置是指通过较大规模投入和工程建设来完成，建成后通过长期的稳定运行和持续的科学技术活动，实现重要科学技术目标的大型设施。其科学技术目标必须面向科学技术前沿，为国家经济建设、国家安全和经济社会发展做出战略性、基础性和前瞻性贡献。与大科学装置的“大”相对应的是其支撑管理人才的“小”——提供幕后辅助工作，没法发论文。

面对《中国科学报》的采访，张永红倒并不是在乎论文带来的“名”。

“能解决设备的关键问题，让科研人员的想法付诸实践也是非常非常有价值的事情。”张永红告诉《中国科学报》，“某种程度上，我们国家‘卡脖子’的问题不在某一技术或技术人才，而在于关键设备。”

纳米真空互联实验站就是这样的关键设备。让张永红及团队成员为之不懈努力的这一关键设备，实际上是世界首个按国家重大科技基础设施标准在建的集材料生长、器件加工、测试分析于一体的纳米领域大科学装置。

通过超高真空管道把各功能设备相互连接，纳米真空互联实验站相当于在地球表面



能解决设备的关键问题，让科研人员的想法付诸实践是非常非常有价值的事情。某种程度上，我们国家“卡脖子”的问题不在某一技术或技术人才，而在于关键设备。

兴趣是动力

2017年，张永红率先成功搭建完成了纳米真空互联管道示范线。该线是纳米真空互联管道与传输系统的功能和极限技术指标工程化的验证装置，实现了从模拟装置到工程化的跨越，是继纳米真空互联模拟实验装置后又一个工程上的里程碑式的重大进展，为设备对接提供了先决条件，为整个一期工程的完成奠定了坚实的基础。

“能干想干的事儿，自然就乐在其中。”张永红告诉《中国科学报》，专注坚守的前提是要对所做的事情有极大的兴趣，这样才会有成就感，也更精益求精。

纳米加工平台现已发展成为国际先进、国内具有巨大影响力的微纳加工和自研水平双一流的公共服务平台，先后被批准为“中国科学院纳米器件平台”和“中国科学院级公共技术服务中心”，这离不开张永红及其团队对工作投入的巨大热情和技术细节的“执着”。

在张永红和其所带领的团队不懈努力之下，目前纳米真空互联实验站一期管道与传输系统所有的建设工作已经完成，包括4套进样室、6套过渡室、27套传输室和4套中转过渡室等单元模块的装配。真空管道全长91米，各项技术指标满足或优于设计要求，设计方案合理，系统运行稳定，管道与传输系统满足真空互联系统的使用要求。

纵览

中央级大型科研仪器设备购置出新规

本报讯 近日，财政部和科技部发布联合通知，依据《国务院关于国家重大科研基础设施和大型科研仪器向社会开放的意见》，正式出台《中央级新购大型科研仪器设备重复购置管理办法》(下称《办法》)。此举旨在规范中央级新购大型科研仪器设备重复购置工作，减少重复浪费，促进资源共享，提高财政资金的使用效益。

《办法》规定，大型科研仪器设备是指中央财政资金购置的单价(套)价格在200万元人民币及以上，用于科学研究、技术开发及其他科技活动的科研仪器设备。

进行重复购置时，将主要从学科相关性、必要性、合理性等维度对新购大型科研仪器设备进行评议。当出现以下情况之一时，则不建议购置：(一)申购单位及本地区现存同类仪器设备较多且功能可以满足当前研究需要，可以通过共享支撑当前研究(一般按照现有共享仪器设备利用小时不足1200小时来判断)；(二)申购仪器设备与本项目的研究方向不符；(三)对申购仪器设备刻意拆分、打包或未使用规范名称；(四)申购单位缺乏合适的专职/兼职实验管理人员、仪器设备操作人员。(赵利利)

总投资超20亿元重大科技基础设施项目可行性报告获批

本报讯 近日，浙江大学牵头建设的国家重大科技基础设施——超重力离心模拟与实验装置(CHIEF)项目可行性研究报告获国家发展和改革委员会批复。

根据《国家发展改革委关于超重力离心模拟与实验装置国家重大科技基础设施项目可行性研究报告的批复》(发改高技〔2018〕1751号)，CHIEF项目主要建设超重力离心机主机、超重力实验舱、超重力实验保障系统及配套设施工程。其中，超重力实验舱包括边坡与高坝、岩土地震工程、深海工程、深地工程与环境、地质工程、材料制备等6个超重力实验舱，具体建设极端气候与环境模拟装置、超重力单向振动台、高压高温实验装置、高通量制备熔铸炉等18台机载装置，总投资超过20亿元。

CHIEF主要验收指标包括超重力离心机主机最大容量1900g·t(重力加速度·吨)，离心加速度达1300g，最大负载32吨；边坡与高坝实验舱最大降雨强度300毫米/小时，温度-10~30摄氏度；岩土地震工程实验舱最大振动加速度20g，最大有效负载3吨；深海工程实验舱开采井压强5兆帕等。其中，超重力离心机容量世界最大，18台机载装置中6台国际首创，12台技术指标国际领先。

CHIEF建设地点位于杭州市余杭区未来科技城，建筑面积34560平方米，建设周期5年。项目建成后将为重大基础设施建设、深地深海资源开发、高性能材料研发等提供基础条件支撑。(赵广立)

国产超声切削装备应用于航空航天领域

本报讯 在国家“863”计划先进制造领域支持下，我国弱刚度复合材料高质高效加工技术取得突破，国产超声切削装备成功应用于我国航空航天领域。近期，科技部高技术中心组织验收专家组对“863”计划“弱刚度复合材料超声切削关键技术及装备”课题进行了技术验收。

超声切削技术采用高频振动刀具加工材料，具有切削力小、加工质量和加工效率高的优点，尤其适合弱刚度材料的加工。在国家“863”计划的重点支持下，由江西昌河航空工业有限公司牵头，联合大连理工大学、陕西秦川机床等优势单位，合作开展技术攻关，成功研制了国内首台蜂窝芯超声切削专用装备，开发了蜂窝芯超声切削专用系列化刀具和超声切削工艺数据库，形成了具有自主知识产权的超声切削技术体系。

航空航天领域先进复合材料的应用及其加工水平是国家综合实力和科技水平的体现。该研究成果的成功应用标志着我国已掌握了蜂窝芯超声切削技术，对促进我国先进制造技术的发展、推动蜂窝芯构件在航空航天领域的应用具有重要意义。(赵广立)

冷冻电镜进入全原子动力学分析阶段

本报讯 近日，北京大学物理学院人工微结构及介观物理国家重点实验室、前沿交叉学科研究院定量生物学中心毛有东课题组在《自然》杂志上发表论文表明，他们通过冷冻电子显微技术和机器学习技术的结合，解析了人源蛋白酶26S在降解底物过程中的七种中间态构象的高分辨(2.8埃—3.6埃)精细原子结构，局部分辨率最高达到2.5埃。

毛有东在接受采访时表示，这标志着冷冻电镜的发展开始进入全原子动力学分析的渐阶段。

论文的共同第一作者、中国科学院化学所研究员董原表示，论文解决了一系列长期悬而未决的重要科学问题，如三磷酸腺苷酶马达如何将化学能转化为机械能，进而实现了底物解折叠的协同动力学机制。

论文的共同第一作者、课题组博士生张书文说，这些研究结果为几十年来对蛋白酶功能的提供了宝贵的第一手原子结构和动力学信息，对于理解生物体内蛋白质的降解过程和一系列负责物质运输的三磷酸腺苷酶马达分子的一般工作原理具有极为重要的科学意义。(赵利利)

本期图片除署名外均来自网络，稿费事宜请与编辑联系。E-mail: glzhao@stimes.cn