

从“逆向模仿”迈入“自主正向设计”

国产高端数控机床的突破之路

谭建荣

院士讲科普
大国重器

工业母机是支撑现代制造业的“国之重器”，其技术水平标定着工业体系的发展高度。作为工业母机的重要组成部分，我国国产高端数控机床正从“逆向模仿”迈入“自主正向设计”的新阶段。

本期“院士讲科普”，中国工程院院士谭建荣将深入解读国产高端数控机床的战略价值，拆解“正向设计”的技术内核，展望人工智能赋能的产业变革图景。让我们近距离观察国产高端机床的创新突破之路，感知中国制造向高质量发展迈进的强劲脉动。

——编者

什么是工业母机？

工业母机，是制造工业设备的“母亲机器”。没有机床，小到手机，大至飞机等都无法被造出来。现实中，机床可以生产出新的更高性能的机床，完成工业体系的自我迭代。作为工业母机的重要组成部分，近年来，国产高端数控机床得到长足发展。

今年4月21日，在第十四届中国数控机床展览会期间，“工业母机正向设计平台”在上海首发。

该平台的发布，不仅填补了相关技术空白，也标志着国产高端数控机床研发正式从“逆向模仿”迈入“自主正向设计”新阶段。浙江大学团队研发的高档数控机床整机方案“正向设计”技术体系，是其中的重要组成部分。

与世界领先水平有差距

小到毫米级的精密芯片基座、复杂光学镜片，大到飞机引擎叶片、航母核心构件……各类机械设备几乎都离不开机床的加工，其中数控机床被称作工业母机，是国家战略层面的基础制造装备。一个国家的数控机床的技术水平，与其航空航天、高铁船舶、核电设施等领域的发展上限息息相关。

目前，我国机床产业已形成比较完整的产业体系，与世界领先水平的差距正在快速缩小，并已成为全球数控机床第一大产销国，2025年行业规模以上企业营收1万多亿元，同年我国机床出口在全球市场上的份额首次跃升至世界第一。

但也要看到，在设计生产高端机床产品方面，我国仍与世界领先水平存在一定差距，“高端不足”的状况仍未得到根本扭转。以高端数控机床为例，这类机床具有高性能、高可靠、智能化等特征，快移速度可达60—200米/分钟，加工定位精度1微米。而超精密加工机床更是要求达到亚微米级乃至纳米级。

在相当长的一段时间里，我国高端数控机床采用了逆向设计思路——由产品实物反推设计。虽然用这种方法开发的数控机床能模仿高端数控机床的外观、结构和尺寸等，却始终“形似而神不似”，在性能上逊色不少。就拿精度与稳定性来说，我国高端数控机床在超高精度加工、复杂曲面五轴联动、长时间连续加工的精度稳定性等方面，与国际顶尖水平相比还存在着差距，难以完全满足航空航天、精密医疗器械等领域极端工况需求。

有望打破国外技术壁垒

而高端数控机床的核心部件方面，如高精度数控系统、高转速电主轴、精密滚珠丝杠、直线导轨等，我国自主化率还不够高。

究其原因，在于低端产品在设计过程中“知其然而不知其所以然”，也在于缺乏把握机床产品设计过程“本质内涵”的能力。为此，浙江大学团队提出了一套高端数控机床“正向设计”技术体系。

何为“正向设计”技术体系？

工业母机的设计主要包括几何特征提取、工艺需求分析、运动方案设计、整机布局构型设计等关键技术。这套技术体系是以复杂零件加工的需求为设计起点，系统性地

寻找范式变革的突破口

当前，以人工智能为代表的新一代信息技术正深刻影响千行百业，机床行业也不例外。高端数控机床正朝着高性能、智能化、复合化、高可靠、绿色化的方向发展。

高端数控机床的数字孪生及虚拟调试技术、基于空间智能的机床生成式智能设计技术等领域如果能实现有效突破，将为我国高端数控机床自主设计创新提供重要支撑。

比如，融合数据驱动技术，通过数字孪生框架提升高端机床设计性能，能够有效突破传统设计方法的局限性。推动人工智能赋能的高端数控机床智能设计，通过虚实机床的半实物仿真虚拟调试技术，对刀尖点与工件表面偏差进行高保真调试优化，减少物理样机试制，从而实现高端数控机床的智能设计优化。

人工智能大模型技术引发了全球性的产业变革，基于空间智能的机床生成式智能设计技术，是未来10年产业发展的迫切需求，也是国际科技和产业竞争的焦点。

在机床设计中，工件几何、加工工艺、机床空间结构与其动态性能之间的复杂耦合关系与隐含规律，尚未被清晰揭示和量化表达。结合先进的生成式设计模型，攻克基于空间智能多模态大模型的高端机床生成式智能设计关键技术，是实现高端机床设计范式根本变革的关键突破口。

创新设计引领“中国智造”。未来，我们团队将进一步思考如何将龙门加工中心创新设计经验推广至整个机床行业，创立具有自主知识产权的中国机床品牌，驱动我国制造业向高质量发展，为推动中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变继续贡献力量。

（作者为中国工程院院士、浙江大学求是特聘教授，本报记者窦瀚洋采访整理）

▲不同加工工况下的机床整机力流线特性分析。

▲高架桥式龙门加工中心。

▲五轴机床加工国际S试件曲线时的加工误差变化。

▲▲五轴联动数控机床整机布局构型设计。

以上图片均为浙江大学高端数控机床数字化设计课题组提供

日唠『科』

近来，“一颗小行星价值数万亿美元”等话题屡屡引发关注。如果未来人类真的在太空建起第一座矿山，会最先开采什么？答案或许出人意料：很可能不是昂贵的金属，而是水、氧，甚至是土壤。

谈到太空矿产，人们通常想到的是：地球资源越来越紧张，于是人类飞向月球或小行星开采矿产，再把资源运回地球。这种设想并非完全没有道理。月球表面部分岩石含有钛、铁，也检测到稀土，不少小行星则含铁、镍和铂族金属等。然而，从“有资源”到“能开采”，再到“值得运回地球”，仍隔着很长的距离。

判断一种资源是否值得开发，要综合考虑矿体规模、品位、赋存状态、开采方式、能源消耗、加工难度以及运输成本等。尤其在太空，开采和运输成本往往决定了一切。既然如此，为什么还要去太空采矿？其实，人类真正需要的，未必是把资源带回地球，而是让资源留在太空发挥作用。

今天，人类开展月球探测和深空探测，几乎所有物资都来自地球：宇航员饮用的水、呼吸所需的氧气，火箭燃料，科研设备……如果只是“打卡式”登陆月球，这种方式尚可维持；但如果要建立长期运行的月球科研站，并以月球作为继续探索火星和深空的基地，仅依靠地球不断补给，将越来越困难。因此，各国航天机构近年来越来越关注一个概念：就地资源利用。

所谓“就地资源利用”，就是尽可能利用月球、火星或小行星当地已有的资源，生产人类所需要的产品，而不是什么都从地球运过去。在这种逻辑下，资源价值的标准发生了变化。在地球，一吨水没有太大经济价值；但在月球，一吨水可能比黄金更加珍贵。同样，月壤也不只是普通的尘土。月壤中含有丰富的硅、铁、铝、钛以及与这些元素结合的氧。未来，人们有望利用加热、电解等方法提取月壤中的氧气和金属，并利用剩余材料铺设道路、建设着陆场，甚至作为三维打印建筑材料。

当然，实现这一目标并不容易。月球表面的高真空、剧烈温差、强辐射和低重力环境，都会给资源勘探、开采和加工带来巨大挑战。月球极区究竟储存了多少水冰？如何高效提取氧气？怎样利用月壤制造建筑材料？这些问题仍需要长期研究。当前太空资源研究最重要的任务，并不是急于给月球上的矿产标价，而是绘制更加精确的资源地图。近年来，中国嫦娥工程不断取得突破，带回了珍贵的月球样品，为认识月球物质组成、资源分布和形成历史提供了重要依据。未来，随着国际月球科研站等重大工程逐步推进，对月球资源的科学认识将成为深空探测的重要基础。

从石器时代到青铜时代，再到工业时代，人类不断发现新的资源，也重新定义“矿”的含义。今天，当探索的边界从地球延伸到月球和火星，这个古老的概念也正在发生变化。从“地球补给”走向“就地取材”，看似只是采矿地点的变化，实际上意味着人类探索宇宙方式的一次深刻变革。

（作者为北京大学地球与空间科学学院副教授）

太空的第一座矿山，会挖什么

李扬

物质量子比特间纠缠距离大幅提升

本报合肥电（记者田先进）记者从中国科学技术大学获悉：该校潘建伟、包小辉、张强等科研人员与济南量子技术研究院、中国科学院上海微系统与信息技术研究所等单位合作，成功实现两个冷原子量子存储器间跨越420公里光纤的量子纠缠，并在230公里以上距离突破无中继量子纠缠分发的理论极限。这一成果大幅提升了物质量子比特间的纠缠距离，为城际尺度量子网络构建奠定了基础。

量子存储器间的远距离纠缠是构建量子互联网的技术基础，有望应用于基于量子中继的远程量子通信、分布式量子计算、分布式量子传感等方向。拓展量子存储器间纠缠距离的关键在于提升纠缠成功率。为此，研究团队多年来持续开展基于单光子干涉的纠缠连接研究，解决了长光纤相位锁定、独立激光器远程相位同步、高效率低噪声量子频率转换等技术难题。为进一步将纠缠距离提升至几百公里，还需继续降低信道传输损耗，并提升单光子相位锁定的长期稳定性。

韦布望远镜在银河系中心黑洞附近发现水和尘埃

据新华社电（记者罗毓）欧洲航天局11日在官网发布公报说，一个国际天文学家团队通过分析美国詹姆斯·韦布空间望远镜2025年的观测数据发现，在银河系中心超大质量黑洞附近一颗处于演化晚期的恒星周围存在水和富氧尘埃。这一发现表明，即使处于强烈辐射环境中，演化晚期的恒星仍可持续向周围空间释放形成恒星和行星所需的物质。

研究团队此次重点观测的是恒星IRS 3。研究人员利用韦布空间望远镜的中红外仪器分析了IRS 3发出的红外光，发现富氧尘埃的明显特征，并首次在该恒星周围的包层中明确探测到水。研究结果显示，即使处于超大质量黑洞附近的严酷环境中，IRS 3这样处于演化晚期的恒星仍能产生尘埃及其他物质，而这些物质对于形成未来新一代恒星和行星具有重要意义。

相关研究论文已发表在国际学术杂志《天文和天体物理学》上。

美欧宇航员太空行走完成部分更换通信天线工作

据新华社电（记者谭晶晶、罗毓）美国航空航天局18日表示，国际空间站两名宇航员当天完成历时6个多小时的太空行走任务，旨在为空间站更换地空通信天线。由于作业耗时长超预期，替换天线在此次太空行走中未被安装。

两名出舱宇航员分别为美国航空航天局的阿尼尔·梅农和欧洲航天局的索菲·阿德诺。据介绍，梅农和阿德诺拆除了一副发生故障的地空通信天线，并将其长期固定在国际空间站桁架结构上。由于断开电缆和松开螺栓所需时间超出预期，宇航员未能按原计划安装替换天线。相关安装工作预计将在下一次太空行走中完成，目前计划于本月25日进行。

本版责编：智春丽 陈圆圆 银燕 版式设计：张芳曼

日探一线

“点火！”海南商业航天发射场测发大厅内，口令响起。不远处的发射工位上，长征系列运载火箭正向太空进发。

火箭发射的“名场面”背后，整齐排列的气舱、纵横交织的管道，在一次次“呼吸”间为火箭加注供气。每一次腾飞，都离不开对稀有资源的精打细算。

“这里面存的都是‘黄金气体’，每次发射都离不开它。”来到氢气源系统前，文昌航天发射保障有限公司副总经理何艳介绍，性质稳定、不与火箭燃料反应的氦气是“清洁工”

海南商业航天发射场推动工业气体节约高效利用

“黄金气体”这样省下来

本报记者 董泽扬

与“调节器”。发射前，氦气要先在管路里“跑”一趟，清除杂质和空气。此外，在火箭加注液氢、液氧时，要用氦气稳定推进剂贮箱的压力，避免贮箱塌陷。

因此，氦气在火箭发射过程中不可或缺，更是名副其实的“黄金气体”。在我国，氦气对外依存度高，价格昂贵。

“商业航天特别关注成本，每一分钱都要花在刀刃上。”何艳说。

“换了种方案，就省了将近150万元。”氢气源系统负责人符靖林对“换”氦气的场景印象深刻。厂家运来的储气罐等设备容腔充满氦气，要投入使用，就得置换成高纯度的氦气。

氦气怎么“换”？一开始很简单，氦气往哪里充，氮气往外跑，反复循环吹除，直到里面全是氦气。这种方案风险小，但氦气消耗也高，算下来要花180余万元。

如何更节省？在化工行业已有应用的抽空置换法进入团队视野。“先排氮气，再抽真空，降低到一定压力后，再往里面充入氦气。”符靖林介绍，初步计算，这一方法能节省25%以上的氦气。

新方法也有风险，把握速度很重要。如果抽真空太快，罐内气压太低，气罐会被“压扁”；此外，氦气充得太快，会将气体“挤”进抽真空机，造成损坏。“我们定了闹钟，10分钟看一次设备状态。”符靖林和同

事两班倒，16个氦气储气罐、2台气瓶车不间断运行。

置换工作结束后，对气腔取样化验的数据显示，新方法节约氦气1.36万基准立方，置换实际成本不到40万元。

节约氦气，不仅在“起点”，更在发射日常。发射前，结合不同火箭型号的历史用气量，用高压、中压、低压等级气瓶适配不同需求；发射后，借助阀门和膜压机，将原本会跑掉的氦气回收至储气罐。

“黄金气体”的节能账，还能再往前算。气体供应离发射场更近，成本也能降得更低。“我们的工厂距离发射塔架只有几公里，生产、储存、充装、运输全链条都能打配合。”海南九丰特种气体有限公司相关负责人杨春介绍，企业能就近提供液氢、高纯液态甲烷、氦气、液氧、液氮等，未来还将适配发射场特殊燃料、特殊气体的新需求。

在商业航天这一未来产业，节能增效是“进行时”。“我们将进一步推动创新集成，服务产业发展的需要。”何艳说。