

编者按：

世界最长跨海大桥港珠澳大桥、世界最大跨径悬索桥张靖皋长江大桥、世界最大跨径斜拉桥常泰长江大桥、世界首座建在珊瑚礁上的跨海大桥中马友谊大桥……

说起造桥，位于武汉的中交第二航务工程局有限公司（以下简称中交二航局）无疑是一颗耀眼的明星。一个身居中国内陆腹地的企业，何以创造中国乃至世界桥梁建造史上的多个第一，成为“中国建桥梦之队”？

10 月底，《中国科学报》记者走进中交二航局进行深入采访，发现了这家企业的制胜秘诀——高度重视科技创新，大力弘扬“争科技领先，创管理一流”企业精神，以项目建设现场为“实验室”，以解决施工中的重难点问题为牵引，以科技创新为突破口，几十年如一日持续擦亮“中国桥品牌”。

“你们想打造一个怎样的‘中国桥品牌’？”

“以科技创新驱动的具有‘绿色、质量、安全、韧性’优势的中国桥！”中交二航局首席专家张鸿果断地给出答案。

这个答案的背后，不仅是张鸿从事桥梁工程事业几十年的矢志追求，更是中交二航局建设者以科技创新驱动智能制造的生动实践。

不久前，由中交二航局牵头的中交集团首个“揭榜挂帅”科技攻关项目“桥梁工业化智能建造关键技术研究产业化研究（一期）”成功通过预验收。该项目包含超高混凝土桥塔工业化智能建造装备、智慧缆索、钢筋云工厂、节段梁四大核心技术突破，在此基础上，中交二航局还探索出了一条自动化、数字化、工业化、智能化实现路径，打造了一个以系统性科技创新赋能桥梁智造的生动样板。

搭建“竖向移动工厂”

2021 年 6 月，深中大桥东主塔成功封顶，标志着中交二航局牵头研制的“超高混凝土桥塔工业化智能建造装备”完成了问世以来的首项重大任务。这套装备包括世界首套一体化智能筑塔机和钢筋部品智能生产线两部分，它们共同搭建了混凝土桥塔的“竖向移动工厂”。

桥塔是主缆的支撑，堪称桥梁的脊梁。在传统桥塔施工中，工人需要在上百米乃至数百米的高空绑扎钢筋、支立模板、浇筑混凝土，不仅安全风险高，质量波动大，工期也难以控制。以钢筋绑扎为例，传统施工中其耗时占桥塔总工期的 60% 以上。

“混凝土和钢筋是土木工程所需要的两大基础材料。钢筋是骨骼，混凝土是血液肌肉，两者组合支撑起了完整的一个。”中交二航局副总工程师田唯打了一个生动的比方。

他介绍：“我们将桥塔高空现场施工打造为一个竖向移动工厂——具有

安全稳固特性的筑塔机，然后将施工全过程的人、机、料等要素在这个类工厂环境中进行全方位实时监测和集中控制。这个工厂融合了装备化、自动化、信息化和智能化技术，形成一个体系化的超高混凝土桥塔，逐步实现超高混凝土桥塔工业化智能建造，进而实现少人化和无人化。”

中交二航局自主研发的世界首套一体化智能筑塔机，集百吨级低位爬升、钢筋快速安装、混凝土自动布料振捣、智能养护及应急避险等功能于一体，实现了多种桥塔构型的柔性施工。

“传统桥塔施工效率约为每天 0.6 米，而使用智能筑塔机后提升至每天 1.2 米。养护周期也从常规的不足 7 天延长至 14 天以上。”田唯介绍。

目前，这套装备已在深中大桥、常泰长江大桥、燕矶长江大桥等数十个超级工程中推广应用，并完成多次迭代升级。数据显示，这一技术使桥塔建造效率提升 60%，塔上作业人员减少 70%，实现了复杂海况下桥塔的高效精准建造。

“就像无人驾驶系统的应用，如果没有司机来具体操作运用，光有一套领先的技术构想也不行。一项桥梁建造技术要好用、好推广，绝不能仅凭几个人的突发奇想，必须在施工应用中不断发现待改进的地方，不断优化提升性能。”田唯总结道。

为桥梁植入“感知神经”

桥梁缆索既承受较大重力，又长期暴露 in 风吹日晒之下，使用寿命往往比较有限。如何延长桥梁缆索的寿命，如何以传感手段检测不同桥梁缆索的内部情况，是桥梁建设绕不开的一个难点。

国内外技术人员曾试图将直径约 0.25 毫米的光纤植入 3000 多米长的主缆中，实现对缆索数据的掌握，但大家发现其难度堪比“在钢筋丛林中穿引发丝”。在以往的多次试验中，光纤在索股架设中频频断裂。

这一难题难道真的无解？桥梁缆

把『中国桥』造出了花，这群人，

向科技创新要生产力

走进江苏常泰长江大桥、湖北燕矶长江大桥、武汉双柳长江大桥等十多个项目现场，笔者看到的是自动化、数字化、工业化、智能化的作业场景，处处彰显着科技创新的活力。

走进中交二航局，笔者与多名技术负责人深入访谈，发现这家企业上上下下都充盈着一股子“争科技领先，创管理一流”的精气神。数千名科技人员想的是同一件事：如何以科技创新发展新质生产力，提高生产的品质和效率。

不论是建造装备、智慧缆索，还是钢筋云工厂、节段梁，在中交二航局，核心技术的突破都不是为创新而创新，而是呼应施工中的难点、堵点、痛点问题，寻求解决之策。说到底，都是“生产一线的创新需要”点的问题。

需要新技术，发明新技术；需要新设备，研发新设备；需要新工艺，创新新工艺。这样的科技创新，高度契合生产力的迫切需要，无缝对接生产方式的转型升级，带来的是生产效率的不断提高，是支撑企业竞争力不断提升的新质生产力。

在全球经济面临诸多不确定性，制造业遭受市场冲击的背景下，中交二航局展现出更为强劲、坚韧的应对能力，一个不容忽视的原因就是高度重视科技创新，并且形成了科技创新持续赋能生产需要的鲜明导向。这样的导向下，科技创新与生产力之间亲密无间，不存在“最后一公里”的问题，极大提高了转化效率。

数据显示，当前，我国企业在技术研发、成果转化中的主导作用不断凸显，研发投入占比超过 77%。2024 年，524 家中国大陆企业进入全球工业研发投入 2000 强。作为创新主体，企业直截了当地“向科技创新要生产力”，激发的是更多契合生产力发展需要的创新。这样的创新越来越多，科技创新就不愧为“第一生产力”。

同时也要看到，重视科技创新不是“唯科技创新”。一方面，科技创新是手段，应该服务新质生产力发展需要，而非孤芳自赏。“揭榜挂帅”等模式的优势就在于从新质生产力发展需要出发，冲着提升效率去；另一方面，科技创新要转化为新质生产力，必须依靠制度、资源、文化等多方面的协同，是一个企业治理的系统性工程，不能陷入“技术决定论”的认知误区。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展的第十五个五年规划的建议》将“加快高水平科技自立自强，引领发展新质生产力”作为战略任务进行专章部署。在制造业、制造业生产实践中，如何有效提高科技创新向新质生产力转化的品质和效率，中交二航局的科技创新实践带来了一些启示。

▼燕矶长江大桥。



深中大桥。



▲双柳长江大桥。



▲常泰长江大桥。

索的管护难道真的只能采取传统的人工巡检，纯粹靠经验判断？

中交二航局特种工程技术分公司高级助理王蔚思考许久。转机出现在一个凌晨的灵光一闪：“既然光纤和钢丝‘水火不容’，何不‘以刚护柔’，给光纤穿上金属‘铠甲’？”随后，团队兵分两路，测试了上百种材料，最终创新出“微米级封装”工艺——用高强度合金包裹光纤，误差控制在 0.01 毫米内。

“有些药很难吃，但把它装在胶囊里，吞下去就会容易很多。光纤的封装保护也是一样。给脆弱的它穿上一件坚固的外套，一切就都迎刃而解了。”王蔚风趣地解释道，“原先钢丝硬，容易把光纤搞坏，它俩是冲突的关系。而现在它俩变成了一家人，是合作的关系，就能过到一起去了。”

2022 年 5 月，首根 3000 米智慧索股诞生，其体内贯穿一根温度传感光纤，测试显示温度误差不超过 1 摄氏度，湿度误差在 5% 以内。

技术突破永无止境。2023 年，团队将技术移植到武汉双柳长江大桥时，发现湿度监测数据延迟达 4 小时。“就像病人大出血后才收到体检报告。”张鸿当场提出要求，“湿度监测必须迭代！”

经过上百次模拟计算和激光开孔试验，中交二航局团队研发出“激光开孔 + 拉拔成形”技术，将湿度响应时间从 4 小时缩至 30 分钟，精度达 ± 2%。随后，该团队又攻克了温度、湿度和应变同步监测的难题，让钢铁拥有了“嗅觉”“触觉”和“体感”。

2025 年初，武汉双柳长江大桥施工现场，随着最后一根索股精准牵引到位，世界首批集温度、湿度和应变监测于一体的“三合一”智慧索股架设完成。在线监测系统显示，大桥 2000 多米主缆的实时状态一目了然。

“技术已经比较成熟了，现在我们面临的是产业化背景下的效率问题。就好比你在家里炒一盘菜，无所谓做得快不快，尝起来好吃就行。但你要开餐馆，就不是炒一盘菜这么简单了，厨师、炉子、原料等一堆东西都必须高效率协调好，否则别人一下子点十盘菜，你就供应不上了。”王蔚告诉《中国科学报》，当前智慧缆索技术面临着产业化、标准化，以及产品质量和供货效率的问题，所有这些都需要一套完善高效的体制机制来支撑——这是他和团队正在努力攻克的问题。

钢筋车间的“数字和工业化革命”

什么是钢筋工业化建造模式？在采访现场，中交武汉港湾工程设计研究院有限公司副总经理程茂林用生动翔实的描述进行了一场“科普”。

“传统的钢筋绑扎需要二三十个人同时作业，劳动力需求非常大。工人在塔顶露天作业，风吹雨淋、冬冷夏热。这样的环境下，施工品质受人工影响比较大，生产出来的产品质量往往不稳定。”程茂林介绍。

如何改变传统作业方式，朝着新质生产力和智能建造的方向迈进？中交二航局技术人员苦苦探索，终于找到答案——以“装配化设计、工厂化制作、快速化安装、智能化控制”为理念，打造桥塔装配式钢筋部品工业化建造技术。

在钢筋加工厂通过首台套生产线进行钢筋网片工业化生产，在塔下平台进行钢筋部品组拼，最后整体吊装至塔上快速安装，辅以施工全过程的质量控制，达到安全、高效、优质的工程建设目标。

中交二航局依托深中大桥、常泰长江大桥等国家重点工程，研发钢筋部品工业化智能建造体系，针对超高混凝土桥塔装配式钢筋设计方法、工业化建造技术、新型装备和精度控制技术进行了系统研究和自主创新。

技术团队提出适于工业化建造的钢筋部品装配化设计，研发了基于弧形网片弯折的桥塔钢筋部品成型方法及装备，研究了钢筋部品工业化建造全流程精度控制体系。该技术与装备在 6 个重大工程成功应用，减少塔顶作业人员 60%，塔柱钢筋高空作业时间缩短至 1 天，比传统工艺节省 70%。

走进中交二航局张靖皋长江大桥钢筋车间，一道独特的风景线格外引人注目，每捆钢筋都佩戴着“数字身份证”，每张生产单据都镶嵌着智能二维码。

“这是‘钢筋云工厂’智慧系统的一部分，工人只需要扫一下二维码，从原料入库到成品出库，80% 的工序都可以在指尖完成，生产效率实现质的飞跃。数字化技术就像给工厂植入了神经，让钢筋的生产管理实现从经验管控到数据驱动的跃升。”程茂林介绍。

节段梁预制走上“高速流水线”

20 世纪 60 年代，节段梁技术在国际上横空出世，而这项技术在国内的首次大规模应用，则起始于 2003 年中交二航局承建的苏通大桥项目。

“那时候我国内地的工艺比较落后，几乎没有人会做节段梁，大家对模板系统、控制系统架设装备以及预制工艺等都不了解，是首席专家带队去香港考察，把预制构件的工业化生产理念和工艺引进来。”中交二航局技术中心专业总工程师王敏依然清晰地记得当时张鸿是怎样力排众议，怎样在投标中和其他企业竞争，最终拿下这一技术路线的。

传统节段梁预制采用短线匹配法，

所有工序在同一位置完成，工人扎堆作业。张鸿四处奔波，在研究车间流水线的时候迸发灵感：“为什么不让节段梁预制走上‘高速流水线’？”

他带领技术人员深入研究，将节段梁预制的各道工序合理分解，依靠先进的工艺和装备形成流水线的生产方式，最终在中交二航局芜湖梁场建成国内首个节段梁流水线预制车间。

常泰长江大桥项目是长江经济带综合立体交通走廊的重要组成部分，对建造工期及质量提出了很高的要求。为提升 3000 余幅引桥节段梁的制造工效和质量，芜湖梁场凭借工业化流水线承担了攻坚制造任务，一幅工业化智能建造的画卷徐徐展开。

“流水线到这里怎么慢下来了？”王敏在现场发现，测量调位工序成为制约整条生产线效率的瓶颈。

受隧道工程中全站仪自动扫点测量的启发，技术团队决定采用自动化、智能化手段破解这一难题。他们在所有测点位置布置棱镜，由电脑控制全站仪自动扫描，省去了工人反复架设棱镜的时间。

“现在只要把小棱镜放在指定位置，点击开始键，全站仪就自动扫点测量，并快速输出测量数据。”王敏介绍。

经过中交二航局技术团队的努力，如今测量调位工序已经变成节段梁预制流水线上最快的工序——整个系统将测量、数据分析、液压操作有机结合，作业工人减少一半，调位时间从 120 分钟缩短到 10 分钟左右。凭借技术带来的效率提升，常泰长江大桥节段梁预制工作较预定时间提前 2 个月完成。

据悉，中交二航局大力发展节段预制拼装技术，积极承接国内外节段梁项目，市场占有率达六成，并于 2012 年获得国家科学技术进步奖二等奖，2022 年主编交通运输部规范——《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》，在业内处于领先地位。

“打造‘中国桥品牌’是中交二航局责无旁贷的时代使命，以科技创新‘把中国桥造出花来’是二航人交出的应有答卷。实现桥梁工业化智能建造不是创新的终点，而是攀登更高山峰的新起点。”张鸿表示。

他告诉《中国科学报》：“在‘争科技领先，创管理一流’企业精神的引领下，未来，中交二航局技术团队必将进一步把智能建造先进技术推广到水工、隧道等交通领域，不断在市场推广中迭代完善，不断为中国建造注入科技的元素。”

（本版文字由本报记者李思辉，实习生侯婧怡，通讯员隋业辉、周璇、罗红梅、周洁、骆钊、石章平、邹诗卉撰写。图片由中交二航局提供）

自主研发『两船一塔』，中交二航局掌握三大神器

除“二航长青”轮打桩船外，中交二航局还拥有国内同类型起重船中技术最先进、起重量最大的“二航卓越”起重船。“二航卓越”船长 165 米，型宽 52 米，甲板面积超过 20 个标准篮球场的面积。这个“大力士”，一举将国内双臂架变幅式起重船的最大起重量提高到了 5500 吨，钩头起升高度可达 120 米，相当于“能将 4000 辆小汽车一举提升到 40 层楼的高度”。

作为国内最大双臂架变幅式起重船，“二航卓越”船堪称跨海建桥“巨匠”。它在杭州湾跨海铁路大桥、厦金大桥（厦门段）等重大工程中发挥了“定海神器”的作用。

此外，中交二航局还与中联重科集团联合研发了全球最大移动平衡塔式起重机，其额定起重力矩为 20000 吨·米，最大起重重量达 720 吨，最大起升高度 400 米，相当于可一次将 500 辆小轿车起吊至 130 层楼的高度。该产品融合大量创新科研成果与多项发明专利，涵盖数十项关键技术、十余项世界首创技术，是名副其实的大国重器。

据了解，“二航长青”打桩船、“二航卓越”起重船以及全球最大移动平衡塔式起重机并称为中交二航局“两船一塔”。它们彰显了我国建造企业的雄厚实力，以及令人称道的自主研发能力。