

上接第6版

工善其事，研制系列智能装备支撑高质量建设

理论取得突破后，还需要付诸实践。深中通道海底隧道标准管节26节，长165米、宽46米、高10.6米（非标准管节长123.8米，宽46米至55米），每节用钢量约1万吨至1.1万吨，浇筑2.9万方混凝土后约重8万吨。每一节标准管节钢壳，焊接的长度超过280公里，如果仍然采用传统的人工焊接方式，不可能达到平均一个月出厂一节钢壳的效能。因此，自动化、智能化生产成为必然选择。“为实现巨型沉管高效高质量建造，我们项目建设团队以‘智能制造’破题，在国内首次建设巨型钢结构智能制造‘四线一系统’，实现沉管钢壳智能焊接、智能涂装，焊接一次合格率达99%。”宋神友介绍，要实现智能焊接，需要制作精密的焊接地图，机器人按照这个地图进行焊接，就能极大提升工效。在此基础上，依托BIM平台进行设计校正，极大提升了块体制造、对接的精度。深中通道GK01标项目部负责人邓凯说：“依托BIM平台，我们现在不需要将块体运输到现场实体拼接后才能校正，在系统上就能进行精校，极大减少了返回车间修正的概率。”

同时，建设团队采用“产学

研用”四位一体的方式，组织多方经过3年多的平行研究，成功研发了高稳健自流平自密实混凝土、混凝土智能浇筑机器人以及控制系统、新型检测装备，智能机器人能自动行走、自主寻孔、自动控制浇筑速度，将单个管节预制周期缩短至29天，一次填充密实度合格率高于99.95%。“对比国外同类工程，我们的混凝土浇筑工效至少要提高10倍，浇筑的质量也达到了世界领先水平。”宋神友说。

将29000立方米（相当于12个标准游泳池容量）自密实混凝土浇筑进2255个独立的密闭仓格，不是一件容易的事。这些混凝土无法振捣，只能依靠自身的高流动性进行填充，究竟填充的质量如何？会不会有超过设计值的脱空？要怎样才能知道40毫米厚的钢板后的混凝土质量如何？这些需要检测，检测的能力决定了改进的能力和确保质量的能力。为此，项目团队又研发了全新的中子法+冲击影像法检测设备，像一台家用吸尘器大小的机器，从钢壳上方推过，就能快速实现100%准确的检测。

光造好管节还不够，要把这些“巨无霸”安全运送到远在

50公里开外的隧道，并使它们首尾相接、严丝合缝，确保“滴水不漏”，挑战前所未有。为此，项目建设团队又研发了世界首艘沉管浮运安装一体船，以及管节深水智能化安装控制平台等装备。沉管浮运安装一体船自带动力，可以实现横向漂移，并且具备了DP-1循迹航行能力，只要输入坐标，它就能携带沉管抵达目的地，极大减少了护航船队船只数量要求，并且安全性更高。当前，一体船是世界上安装能力最强、沉放精度最高、施工作业最高效、性能最先进的海底隧道沉管施工专用船舶，相比传统管节浮运安装方式，大幅减少了浮运航道的疏浚量，更加环保、经济。

自2020年6月17日完成首节沉管安装，至2023年6月11日海底隧道合龙，前后历时三年，深中通道海底隧道圆满收官。深中通道项目建设指挥长陈伟乐说：“建设期间，我们建设团队创下连续7节、累计17节沉管实现近乎零偏差的毫米级安装世界纪录，将世界同类沉管隧道对接的厘米级标准，提升到了中国的毫米级。我们已经系统性革新了世界沉管隧道建造工艺。”

管好用好，为粤港澳大湾区融合发展注入澎湃动力

工程建得好，还要管好用好。深中通道海底隧道深埋海底，最深处将近在海底40米。隧道的运维面临着海水腐蚀、火灾风险等诸多挑战，如何保证它安全运营百年？

“我们高度重视钢壳沉管的防腐，除了钢板预留更多的腐蚀厚度、喷涂多层玻璃鳞片漆外，还专门研制了全新的牺牲阳极，极大提升了整个结构在海水中的抗腐蚀能力。”陈伟乐说。

结构物要使用更长久，离不开日常的严格管理与维护。广东省公路建设有限公司深中通道管理中心主任范传斌表示，自2024年6月30日建成通车以来，团队锚定“管好用好，确保安全、顺畅、舒适、智慧运行”的工作目标，以智慧管养保安全、促顺畅、添舒适，持续提升结构安全智慧监测、应急管

理智能监控、机电设备智慧管养、保畅系统智慧运行，将工作重心集中在管好、用好深中通道上。“通车一年多来，智能预警系统监测显示工程设施健康状况良好，所有指标均在设计标准范围之内。接下来，我们将进一步利用人工智能大模型等数据化手段，提升系统监测预警水平与能力。”

在深中通道海底隧道内，安装有各类传感器，能够主动、快速发现事故。目前，深中通道海底隧道应急管理系统已录入700多个模型，基本覆盖了当前可能发生的紧急事件状态，为监控员一键启动消防、应急系统奠定了坚实基础。如发生火灾，可以在路网调度中心远程一键开启隧道顶部的高压细水雾、泡沫水喷雾灭火系统，同时自动向消防、交警报警。通行中，车辆一旦有停车、车窗抛

物等异常行为，深中通道的异常事件监测系统会同步感知和自动预警，通知路政等人员赶赴现场处理。

此外，设备在线检测系统、轨道智能巡检机器人、机电工程师日常开展海底隧道的检查、设备监测、防火监测等运维工作，及时发现并处理潜在隐患，确保隧道的安全和稳定。

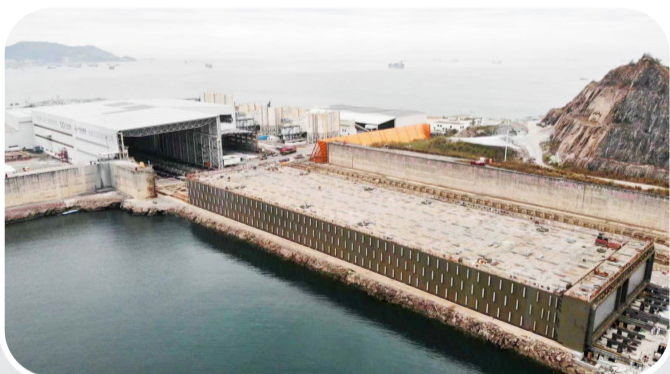
作为粤港澳大湾区的核心交通枢纽，通车以来，深中通道累计车流量已超4800万车次，4次刷新日车流量纪录，最高日车流量为2025年5月1日当天的18.16万车次。开通以来车流量呈逐步提升状态，2025年日均车流量已超过9.2万车次，极大提升了珠江口东西两岸的交通效率，在改写交通格局的同时，正在塑造新的经济版图，为粤港澳大湾区融合发展注入更加强劲的动力。



建设中的海底隧道和建成后的海底隧道



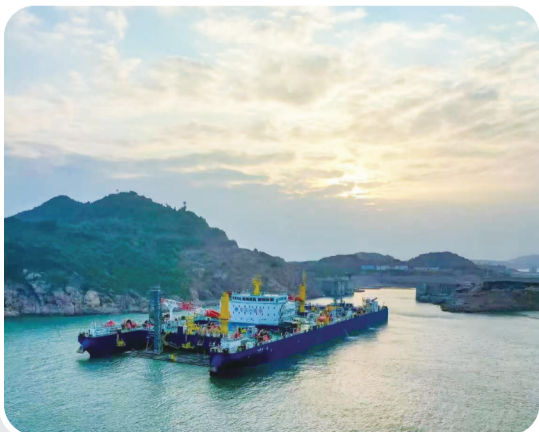
自密实混凝土智能浇筑机器人作业



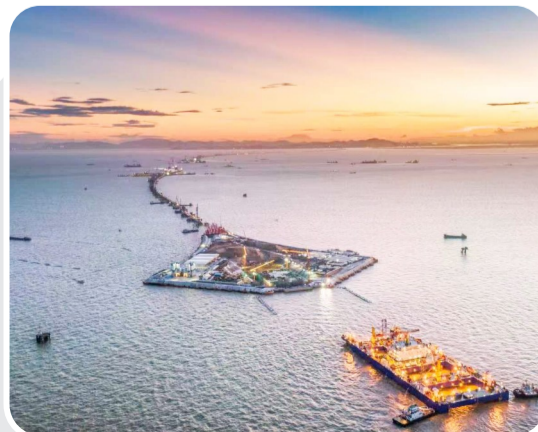
钢壳混凝土沉管管节预制中



钢壳管节智能制造生产线



世界首制沉管浮运安装一体船



2020年6月17日，深中通道海底隧道首节沉管浮运安装

文图来源：深中通道管理中心