

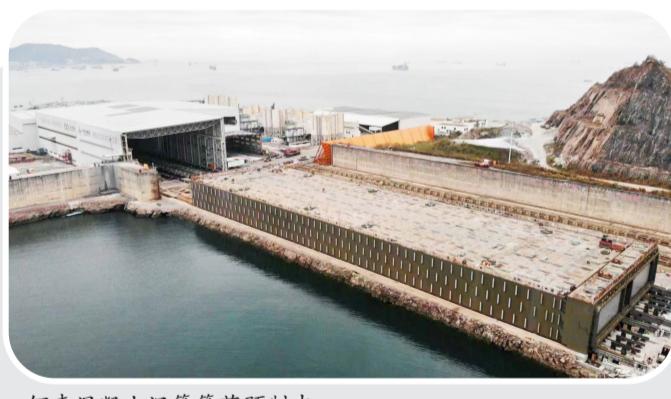
上接第6版



建设中的海底隧道和建成后的海底隧道



自密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

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,焊接一次合格率高达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

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?要怎么样才能知道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和系统,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,要将这些“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”,挑战前所未有的。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。