

中国桥梁技术——

# 把天堑变通途

林 鸣

## 开卷知新

2018年10月23日,习近平总书记宣布港珠澳大桥正式开通。这座超大型跨海交通工程是我国基础设施建设领域的国家工程、国之重器,备受瞩目。大桥连接香港、珠海、澳门三地,集桥、岛、隧道于一体,在设计理念、建造技术、施工组织、管理模式等方面进行一系列创新,标志着我国隧岛桥设计施工管理水平走在了世界前列。

港珠澳大桥通车运营,是我国桥梁建设领域不断取得新成就的缩影。1957年9月25日,“万里长江第一桥”武汉长江大桥建成,在我国桥梁建筑史上揭开新的一页。截至2020年底,我国公路桥梁已达91.28万座、6628.55万延米;全球跨径排名前10位的悬索桥、斜拉桥中,我国分别占据6座和7座。得益于先进技术和工程管理方法大规模应用,功能不同、姿态各异的桥梁矗立在全国各地。今天,桥梁技术已经成为我国基础设施建设领域响当当的“王牌”。“一桥飞架南北,天堑变通途”正不断成为现实,推动经济发展,造福人民生活。

### 深埋沉管隧道技术,让大桥穿海底而过

桥梁是为跨越沟谷、水面或障碍物而修建的构筑物,一般由上部结构、下部结构、支座系统、附属设施等组成,可按用途、大小、结构、跨径等分为多种类型。就结构体系而言,桥梁可分为梁式桥、拱桥、悬索承重桥(悬索桥和斜拉桥)等。作为人类活动的基础设施,桥梁历史悠久。《诗经》中就有对古人在渭河上架设浮桥的描述。隋唐时期建造的赵州桥则是世界上现存跨度最大、保存最好的单孔坦弧敞肩石拱桥。从古代的独木桥、汀步桥、木制浮桥,到砖石结构古桥,再到钢桥、混凝土桥,建造技术日新月异,桥梁结构、规模、材料、用途、外观等各方面不断发展。

港珠澳大桥是当代桥梁技术的集大成者,创下多项世界纪录:全长55公里,是世界总体跨度最长的跨海大桥;海底隧道长6.7公里,是世界上最长的海底公路沉管隧道;海底隧道最深处位于海面以下46米,是世

界上埋进海床最深的沉管隧道;用钢量达到42万吨,相当于60座埃菲尔铁塔金属框架的重量,是世界上钢结构桥体最长的大桥,等等。

这些世界纪录的缔造无不以桥梁建造技术创新为驱动。其中,深埋沉管隧道技术最具代表性。与日常所见的桥梁有所不同,港珠澳大桥不只有“桥”,还有6.7公里长的深埋海底沉管隧道,这是整个工程难度最大的部分。港珠澳大桥主通航孔临近香港国际机场,如果采用桥梁方案,桥塔高度将超过200米,影响飞机起降,所以采用了沉管隧道方案。与此同时,这里还是珠江口出海主航道,为了长远发展,要按30万吨级通航标准预留,以保障船舶通行安全。这就需要沉管隧道埋入最深22米的海床之下,是一般沉管隧道深度的10倍。为此,我们实现了多项关键技术创新——

依托新技术打好“地基”,有效防止沉降。沉降是指在建筑物荷载作用下,地基土因受到压缩而发生竖向变形或下沉,这是沉管隧道的固有难题。“复合地基+组合基床”沉管隧道基础新技术,采用了“抛石夯实+碎石平整”的组合垫层设计方案。与之相配套的沉管基础施工质量检测监测系统、外海堆载预压监测系统、沉管隧道沉降变形监测系统,有效保证了基础施工质量。监测结果表明,抛石基床精度提高40%,碎石垫层精度提高20%,隧道平均沉降7.4厘米,均达到世界领先水平。

“工厂法”预制技术和半刚性沉管结构保障隧道安全,提高施工效率。港珠澳大桥海底隧道共33节沉管,标准管节重约8万吨,同时还要抵抗压力做到不漏水。这些沉管需先在陆上制成,再埋入海中相互连通。“工厂法”预制技术创新开发沉管生产流水线、大型自动化液压模板、混凝土全断面浇筑及控制、8万吨沉管顶推等成套技术,实现超大型混凝土构件的工业化制造。传统的刚性和柔性沉管结构均不适于深埋:国际上沉管隧道埋深一般在3米左右,而港珠澳大桥沉管隧道最大埋深要达到22米。于是,团队创新研发半刚性沉管结构形式,开发出适合于沉管结构的永久预应力体系,发明了基于材料断裂力学特性的“记忆接头”。半刚性沉管结构受到国际同行的高度认可,成为与刚性管节、柔性管节并列的第三种结构,为沉管隧道结构提供了新选择。

沉管隧道合龙方式实现重大突破。合龙是桥梁、堤、坝等从两端施工的工程在中

间接合的过程。港珠澳大桥合龙段位于第二十九节沉管与第三十节沉管中间,传统工法需要潜水员水下安装模板,再在模板里面浇筑混凝土,需大量潜水作业,不仅风险大,而且耗时约半年之久。通过3年多研究攻关,我们发明了具有折叠结构和主动止水可逆操作功能的合龙新方法,攻克了结构体系、止水与折叠构造、合龙口形态控制等关键技术。采用工厂化生产、海上装配化安装的方法,只用1天便完成合龙,合龙精度达2.6毫米。

### 智能建造让桥梁建设更科学更高效

以深埋沉管隧道为代表的诸多新技术,不仅在港珠澳大桥建设过程中发挥重要作用,还为我国桥梁建造乃至基础工程建设提供强有力支撑。其中,智能建造技术尤为关键。

智能建造是指在建造过程中充分利用智能技术,通过应用智能化系统提高建造过程智能化水平,达到安全建造的目的,提高建筑性价比和可靠性。智能建造能够提升建设者的感知能力、预测能力、控制能力和作业能力,让工程环境做到可知可控,实现对工程建设过程中工作状态、施工环境等信息的收集、处理、分析,实现对大型装备的精确控制。

物联网、云计算、数据管理分析系统是智能建造的关键技术。物联网通过射频识别、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,将物品与互联网连接起来,实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。依靠物联网独特的传感技术和感知能力,建设者可以运用卫星定位系统、声呐、芯片探测器等传感设备,将混凝土等原材料、大型设备、作业人员等与互联网连接,构成人与物的信息交互网络。云计算技术则将大量分布式独立计算机组建成统一管理的云系统。多个硬件设备可以协同工作,按照资源需求对硬件能力进行分配,实现多种传统计算技术无法实现的功能。建设过程中,这一技术帮助建设者构建起前方监测系统与后方超级计算机互联的云计算平台,实时分析处理海量气象、水文等数据信息,复杂数据信息处理能力大大提高。由此,建设者可以实时了解现场情况,并对建设过程进行分析以及远程控制。

作为一把“万能钥匙”,智能建造可以根据工程需求“量身定制”。以港珠澳大桥岛隧工程为例,这一工程需要智能建造技术解决测控难题、保障作业条件、提供一体化作业平台。比如,通过应用精密测控仪器、升级改造既有测控技术与设备,解决传统测控手段精度控制水平较低、稳定性不强、易受外界干扰等问题。港珠澳大桥沉管管节安装过程中,通过利用我国航天航空领域设备的位移控制技术,研发外海深水环境下沉管姿态监测系统,实时监测对接过程中超大质量管节的低频率、小振幅运动状态,以确保管节安全、精准地着床。此外,利用管节首端的无线声呐测控系统及尾端的测控系统,实现对管节对接相对定位及绝对定位的测控,确保高精度管节对接。与之相似,保障作业条件要用到大数据分析、一体化作业平台需要智能装配,等等。

如今,桥梁在人们生活中已不仅仅是交通设施。除了实现人类翻山、越江、跨海的梦想,有的桥梁还成为当地独特的风景线。桥梁承载着更舒适快捷的体验需求和更高的审美需求。未来,随着新材料、悬浮技术、漂浮技术、深水建造技术等不断创新突破,现代浮桥和悬浮隧道将成为沿海城市拓展发展空间的新载体,漂浮城市和漂浮机场也有机会从梦想变为现实。

展望未来,我国桥梁领域的科研人员和建设者们将继续秉持逢山开路、遇水架桥的奋斗精神,架起更多体现我国综合国力和自主创新能力的“圆梦桥”,打造民族复兴道路上更亮丽的风景。

(作者为中国工程院院士、中国交通建设集团有限公司首席科学家)

压题照片为港珠澳大桥全景。  
中国交通建设集团有限公司供图  
制图:赵德汝

#### 推荐读物:

- 《磨剑十二年——港珠澳大桥岛隧工程建设纪实》:白巧鲜著;人民交通出版社出版。
- 《中国桥梁建设新进展》:丁大钧编著;东南大学出版社出版。
- 《世界桥梁趣谈》:唐景澄著;北京出版社出版。

从“粮食生产根本在耕地,命脉在水利,出路在科技,动力在政策”等关键点一个一个切入,本书展现新中国粮食之路的艰辛与辉煌、光荣与梦想。

## 「中国饭碗」的故事

# 值得用一生去讲述

陈启文

习近平总书记指出,我国是人口众多的大国,解决好吃饭问题,始终是治国理政的头等大事。必须实施以我为主、立足国内、确保产能、适度进口、科技支撑的国家粮食安全战略。要依靠自己保口粮,集中国内资源保重点,做到谷物基本自给、口粮绝对安全,把饭碗牢牢端在自己手上。

我是一个农家子弟,上世纪60年代出生于洞庭湖和长江中游交汇处的一片冲积平原,祖祖辈辈在田里耕作。我在乡下生活了17年,这让我从小就本能地懂得稼穡之艰辛。2009年,为追溯新中国60年粮食之路,我采写了长篇报告文学《共和国粮食报告》。时隔10年,出版社又邀我撰写一部以“中国饭碗”为主题、全景式展现新中国成立70年来粮食之路的长篇报告文学。

为区别于《共和国粮食报告》,这部《中国饭碗》将重点放在改革开放以来的40余年,尤其是最近10年。如今,在国家粮食安全战略指引下,我国粮食生产能力不断增强,国家粮食安全保障更加有力,中国特色粮食安全之路越走越稳健、越走越宽广。本书从“粮食生产根本在耕地,命脉在水利,出路在科技,动力在政策”等关键点一个一个切入:透过小岗村的变迁,折射一个国家的命运;从北大荒开垦之初的刀耕火种、人拉肩扛,到使用大型机械,再到如今的精准数字农业、智慧农业、“无人农场”,展现新中国粮食之路的艰辛与辉煌、光荣与梦想;在“藏粮于技”方面,以袁隆平为代表的科学家给农业现代化插上科技的翅膀,尤其为水稻、小麦、玉米、大豆等主粮培育出了大量具有自主知识产权并居于世界领先水平优良品种,从源头上保障国家粮食安全;在“藏粮于地”方面,一方面牢牢守住18亿亩耕地红线,建设高标准农田,一方面创新体制机制,提高粮食生产组织化程度,推动农村承包土地所有权、承包权、经营权“三权分置”有序实施,培育新型经营主体和服务主体,发展土地流转和服务引领型规模经营,促进小规模、分散经营向适度规模、主体多元转变,把小农户引入现代农业发展轨道;从粮食储备角度来看,中国粮食储备能力、安全储备能力显著增强,仓储现代化水平明显提高,筑起了中国粮食的安全岛链。这些关键点,只有一个一个抓落实、抓到位,才能在高基点上实现粮食生产新突破,才能确保中国人把饭碗牢牢端在自己手上。

2020年,我奔赴洞庭湖平原、江汉平原、鄱阳湖平原、江淮平原、黄淮海平原等中国商品粮基地,进行了两个多月的田野调查。从辽阔的东北平原到广袤的华北平原,从中原到江南,我沿途看见长势喜人的麦子和沉甸甸的稻穗,无不给人以丰收的喜悦。这一年疫情和自然灾害没有造成粮食减产,而是迎来硕果累累的丰年;中国粮食产量再创新高,实现了“十七连丰”。就在我伏案修改这部书稿之际,各地又频频传来丰收的喜讯,中国粮食产量创下“十八连丰”的佳绩。

一个报告文学写作者,应该像追求真理一样追求真相,真诚而庄重地对待每一次写作。这部书的写作虽然已经完成,但中国粮食、“中国饭碗”的故事,值得我用一生去讲述。



著:《中国饭碗》:陈启文  
著:黑龙江教育出版社出版。

## 新书架



《公共经济理论创新与国家治理现代化》:齐钟印等著;新华出版社出版。  
本书着眼于为国家治理现代化提供理论服务,对现行公共经济理论体系进行了系统性创新,并就优化国家治理体制机制提出一系列建设性见解。



《深海探秘——换一个角度看地球》:张松著;上海辞书出版社出版。  
本书向读者讲述深海探索的科学内容,展现海洋学家在科研一线艰苦又有意思的生活。

## 由表及里认识三星堆

段 渝

2021年3月,中华书局约我写一本科学系统反映长江上游古代文明研究成果的大众普及读物。经仔细考虑,我决定从解读三星堆入手,通过三星堆物质文化分析古蜀文明特点,阐释三星堆与中原乃至域外文明的关系。

《发现三星堆》一书沿着三条线索展开。一是沿着古代文明演进的脉络,从制度的物化表现、运作机制以及城市文明等方面,阐述三星堆文化所代表的古蜀文明的演进道路、机制和特色;二是对三星堆与夏商文明乃至域外欧亚古文明进行比较研究,着重从城市文明起源与功能、黄金制品艺术与文化内涵、青铜文化艺术形式等方面加以阐述;三是以世界古文明之间的互动交流为切入点,以出土文物为线索,阐释三星堆文明的世界意义。

三星堆文明如此辉煌且特色独具,对它的阐释不能仅仅停留在物质文化层面。三星堆宏阔的古城、灿烂的青铜制品群、瑰丽的艺术及其承载的盛大的礼仪规制等,蕴涵着供后人“解码”的钥匙;黄金制品、玉器、海贝、象牙,无不是古蜀文明制度和精神的物化表现。通过对三星堆

出土文物的分析,可以深刻揭示三星堆古蜀王国的制度文明特征。本书就从金杖、雕像、神树等入手,分析探讨三星堆等级制体系、基本资源占有模式、再分配系统运作机制等问题。

三星堆与中原及周邻地区文化的关系、三星堆与域外文化的关系,是学术界和社会公众关注的话题,也是本书探讨的重点。前者有助于我们认识中华文明多元一体格局的特点,后者有助于我们认识中华文明的开放性。从物质文化上看,三星堆文化虽然具有非常独特鲜明的个性,但中原文化对它的影响也非常明显,许多陶器、玉器和青铜礼器本身就模仿中原文化。比如,三星堆出土的陶器、陶器、玉牙璋等,其形制源于二里头文化,三星堆青铜器上的一些纹饰也借鉴自中原。三星堆出土的各式带翅青铜龙,尽管在形态和意象等方面与中原其他地区出土的有所不同,但有关龙的观念和造型等表明三星堆龙综合采纳了华夏龙的形态特征,充分证明古蜀同样是“龙的传人”。在阐释三星堆与域外文化关系时,本书以青铜雕像、黄金面罩、金杖、丝

绸的传播等为实例,分析古蜀与域外文化的互动。可以说,三星堆文化之所以结出如此独特而灿烂的文明硕果,重要原因在于它对中原文化以及域外多种文明的借鉴吸收,因此其文明得以大放异彩。这充分展现中华文明多元一体格局的发展过程和中华文化兼容并包的博大胸怀。



《发现三星堆》:段渝著;中华书局出版。

