



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
High Performance Structures: Building Structures and Materials—Review

关于中国桥梁技术发展的思考

周绪红^{a,*}, 张喜刚^{b,c}

^a School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

^b China Communications Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China

^c CCC Highway Bridges National Engineering Research Centre CO., Ltd., Beijing 100088, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 December 2018

Revised 3 January 2019

Accepted 17 January 2019

Available online

关键词

中国桥梁工程
第三代桥梁工程
智能桥梁
科技计划
施工技术
管养技术
信息技术

摘要

在桥梁工程史上,需求一直是发展的首要驱动力。改革开放以来,在巨大的建设需求驱动下,中国桥梁完成了从“跟随者”向“竞争者”再向“引领者”的转变,在三个主要阶段实现了量和质的飞跃。中国桥梁工程迎来了新的未来。作为中国交通基础设施的重要组成部分,桥梁工程产业在新时期面临着如何支撑新型交通方式建设的挑战。本文基于对存量需求、增量需求和管理需求的基本分析,总结了我国桥梁技术的现状。我们认为,中国桥梁工程产业必须满足三大突出要求——高效建造、有效管养、长效服役。基于信息技术的智能化技术为桥梁工程创新提供了新机遇。因此,桥梁工程的发展路径亟需被改变。本文提出以发展智能化为特征的“第三代桥梁工程”的构想,同时对智能化桥梁的定位、发展重点、发展规划进行了探讨,为中国桥梁工程产业核心竞争力的提升提供了方向。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

桥梁为扩大人类活动范围提供媒介,克服了地缘政治障碍。桥梁已成为人类扩大生存空间的重要渠道,极大地促进了社会发展。桥梁工程的功能价值、社会价值和文化价值与人类社会的政治、经济和文化活动密切相关。这些价值超越桥梁本身,将桥梁转变成拥有社会属性和文化属性的基础设施。现代桥梁是重要的社会资产,它已成为社会发展的缩影。

改革开放以来的40年是中国桥梁建设发展的黄金时期。在遵循技术发展的一般规律以及走“集成—发展—创新”之路的基础上,中国桥梁工程经历了三个阶段——20世纪80年代的学习与追赶、90年代的跟踪

与提高以及21世纪以来的创新与超越发展阶段。中国桥梁工程的发展已取得了实质性的飞跃[1],建成了以苏通长江公路大桥、天兴洲长江大桥、卢浦大桥等为代表的许多结构新颖、设计施工难度大并采用复杂高科技材料和工艺的特大型桥梁。而且,中国积极参与国际竞争,参建了马来西亚槟城二桥、巴拿马运河三桥和奥克兰新海湾大桥等许多国际知名桥梁工程。这些工程荣获了国际咨询工程师联合会(FIDIC)“百年重大土木工程项目杰出奖”、美国土木工程师学会(ASCE)“杰出土木工程成就奖”和国际桥梁与结构工程协会(IABSE)“杰出结构工程奖”等34项著名国际大奖。这些奖项标志着中国桥梁产业的快速发展,同时中国桥梁产业也赢得了国际桥梁界的尊重和认可。中国桥梁工程已逐渐走向世

* Corresponding author.

E-mail address: zhouxuhong@126.com (X. Zhou)

界舞台中心[2-5]。

然而，近年来国内外环境的不断发展与变化，使中国桥梁产业又站在了一个新的起点上，这给桥梁工程的发展提出了新的要求。中国桥梁工程产业在新时代面临的主要问题都与如何支撑“交通强国”的建设相关。这些问题包括桥梁工程如何才能支撑中国的重大国家战略？如何才能确保桥梁安全？如何才能实现桥梁强国梦？面临这些新的历史任务，我们必须立足中国桥梁工程技术的现状，以更开阔的视野审视中国桥梁技术前进的方向，抓住当前进一步发展的机遇，并以合理、科学的方法推动中国桥梁工程的发展。

2. 中国桥梁技术的现状

伴随着经济发展，中国的改革开放为中国桥梁工程的发展带来了前所未有的机遇，桥梁建设规模不断扩大。截至2017年年底，中国已建成的桥梁数量超过83万座。中国建成了许多有重大国际影响的世界著名桥梁工程，已获得了全世界对中国桥梁工程的认可。在世界排名前十的各类桥梁中，中国桥梁占据了一大半（表1）。中国桥梁产业取得的辉煌成就已获得社会的广泛认可。桥梁已成为中国基础设施建设中最重要的品牌之一，中国桥梁的国际认可度正在不断提升。

中国桥梁工程产业取得的这些成就要归功于其根据自身需求所做的大量技术研究。中国桥梁工程产业在以下四个方面取得了长足的进步——材料技术、勘察设计技术、施工技术和管养技术。

2.1. 关键技术成就

2.1.1. 材料技术

材料是桥梁工程的基础，因此，特大桥梁的发展是以材料技术的发展为基础的。到目前为止，中国已经实

现能在国内生产混凝土、钢材、电缆、复合材料和智能材料。其中某些材料的生产技术也处于世界领先水平[6-8]。

在混凝土方面，C50和C60在中国应用广泛。研究人员对纤维混凝土、轻质混凝土和超高性能混凝土进行了研究，这些材料在实践中也逐渐得到应用。同时研究人员也越来越重视通过提高混凝土材料性能来改善其结构性能。

中国钢材的发展经历了低碳、低合金、高强度和高性能阶段。目前，Q345和Q370钢材得到广泛应用，Q420钢材的应用正逐步展开。Q500钢材已研发成功，并被应用于沪通长江大桥和其他工程。700 MPa级钢材目前正处于研发阶段，环氧树脂涂层钢筋和不锈钢钢筋正逐步得到应用。

在缆索材料方面，1770 MPa钢丝和1860 MPa钢绞线已实现国产化并在工程中得到应用。2000 MPa钢丝（锌铝合金）也被研发成功并得到应用。

玻璃钢（FRP）等复合材料在桥梁修复、加固方面得到了应用，在缆索材料中的应用研究也已逐步展开。记忆合金、压电材料、光导纤维、自修复智能混凝土等新型智能材料在桥梁监测和加固工程中的研究和应用也已逐步开展。

2.1.2. 勘察设计技术

勘察设计技术是桥梁工程发展的先决条件。中国幅员辽阔，地质和地形条件多种多样。这促进了桥梁类型的多样化发展，并带动了勘察设计技术的发展。因此，中国桥梁工程已在勘察技术、设计理论与方法、桥型与结构体系、关键结构、防灾减灾技术和桥梁信息技术方面取得了很大进步。

在勘察技术领域，遥感、全球定位系统、地理信息系统等现代空间信息技术可被用来获取地质解释地图、

表1 排名前十的各类桥梁

| Bridge name | Main span (m) | Country | Date of construction |
|---------------------------------------|---------------|---------|----------------------|
| Cable-stayed bridge | | | |
| Rusky Island Bridge | 1104 | Russia | 2012 |
| Shanghai-Nantong Yangtze River Bridge | 1092 | China | Under construction |
| Su Tong Yangtze River Highway Bridge | 1088 | China | 2008 |
| Stonecutters Bridge | 1018 | China | 2009 |
| Wuhan Qingshan Yangtze River Bridge | 938 | China | 2019 |
| Edong Yangtze River Bridge | 926 | China | 2010 |
| Jiayu Yangtze River Highway Bridge | 920 | China | Under construction |

(续表)

| Bridge name | Main span (m) | Country | Date of construction |
|--|---------------|-----------|----------------------|
| Tatara Bridge | 890 | Japan | 1999 |
| Normandy Bridge | 856 | France | 1995 |
| Chizhou Yangtze River Bridge | 828 | China | Under construction |
| Suspension bridge | | | |
| Akashi Kaikyo Bridge | 1991 | Japan | 1998 |
| Liuhe Link Shuangyumen Bridge | 1756 | China | Under construction |
| Yangsigang Yangtze River Bridge | 1700 | China | Under construction |
| Humen Second Bridge Nizhou Waterway Bridge | 1688 | China | 2019 |
| Shenzhong Link Linding Sea Bridge | 1666 | China | Under construction |
| Xihoumen Bridge | 1650 | China | 2009 |
| Great Belt Bridge | 1624 | Denmark | 1998 |
| Izmit Bridge | 1550 | Turkey | 2016 |
| Gwangyang Bridge | 1545 | Korea | 2012 |
| Runyang Bridge | 1490 | China | 2005 |
| Arch bridge | | | |
| Chaotianmen Yangtze River Bridge | 552 | China | 2009 |
| Lupu Bridge | 550 | China | 2003 |
| Hejiang Yangtze River Bridge | 530 | China | 2013 |
| Zigui Yangtze River Bridge | 519 | China | Under construction |
| New River Gorge Bridge | 518 | America | 1977 |
| Bayonne Bridge | 504 | America | 1931 |
| Sydney Harbour Bridge | 503 | Australia | 1932 |
| Wushan Yangtze River Bridge | 492 | China | 2004 |
| Chenab Bridge | 480 | India | 2010 |
| Mingzhou Bridge | 450 | China | 2011 |
| Girder bridge | | | |
| Shibanpo Yangtze River Bridge | 330 | China | 2006 |
| Stolmasundet Bridge | 301 | Norway | 1998 |
| Raftsundet Bridge | 298 | Norway | 1998 |
| The first Beipan River Bridge | 290 | China | 2013 |
| Sandsfjord Bridge | 290 | Norway | 2015 |
| Paraguay River Bridge | 270 | Paraguay | 1979 |
| Humen Bridge Auxiliary Channel Bridge | 270 | China | 1997 |
| Su Tong Bridge Auxiliary Channel Bridge | 268 | China | 2008 |
| Red River Bridge | 265 | China | 2002 |
| Ningde Xiabaishi Bridge | 260 | China | 2003 |
| Sea-crossing long bridge | | | |
| Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge | 50 | China | 2018 |
| Hangzhou Bay Bridge | 36 | China | 2008 |
| Jiaozhou Bay Bridge | 35.4 | China | 2011 |
| East Sea Bridge | 32.5 | China | 2005 |
| King Fahd Causeway | 25 | Bahrain | 1986 |
| Zhoushan Continental Island Project | 25 | China | 2009 |
| Shenzhen-Zhongshan Bridge | 24 | China | Under construction |
| Chesapeake Bay Bridge | 19.7 | America | 1964 |
| Great Belt Bridge | 17.5 | Denmark | 1997 |
| Oresund Bridge | 16 | Denmark | 2000 |

正射影像地图、数字高程模型 (DEM)、点云数据等。无人机摄影技术的使用在勘察领域取得很大进展。无人机摄影技术为设计提供了准确的地质判读数据, 为土方量和工程量的准确计算提供支持, 并为智能选线和三维 (3D) 设计提供基础数据平台。

同样, 桥梁的设计理论也在逐步完善, 正在从容许应力设计法向基于性能的设计方法发展。决策方法也变得更加可靠, 因为它从基于经验的判断方式转变为基于概率和经验相结合的判断方式。目前中国桥梁工程产业已建立集经验、概率和风险评估为一体的决策方法。设计概念已逐渐完善, 已从可靠性设计向寿命周期设计转变。而且, 以可持续发展理论为基础的可持续设计目前正处于发展初期。设计理论与方法的进步极大地促进了中国桥梁技术的国际认可度[9-11]。

在桥型和结构体系方面, 中国工程师已掌握各类桥梁设计方法, 并不断创新和发展结构体系与关键结构。同时, 在四大桥梁类型 (梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索

桥) 的基础上, 研发了适用于当地条件的技术。其中包括各种创新桥型, 比如具有静力限位和动力阻尼的斜拉桥[12]结构体系、分体式钢箱梁悬索桥、空心连续钢桥和钢管混凝土拱桥 (图1)。基于这些成就, 中国工程师研发了矮塔斜拉桥、斜拉拱桥和斜拉悬索组合桥等新桥型。这些成就一起构成了以梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥为主体的现代桥型和结构体系。

桥塔、主梁、缆索、拱肋和基础等桥梁关键结构构件正在被不断地研发和创新[13,14]。研究人员掌握了高度在300 m以上的混凝土桥塔、钢塔和钢-混凝土组合桥塔等结构的设计技术, 并提出了内置式钢锚箱和同向回转拉索等新型锚固结构。主梁的结构形式已实现创新与突破: 分体式钢箱梁首次被成功应用于悬索桥, 同时, 研究人员正在研发三主桁钢桁梁。此外, 钢-混凝土组合梁和混合梁的设计技术也越来越成熟。缆索和锚固系统的强度、寿命和智能化水平已稳步提高, 研究人员已研发出设计寿命为50年的高强度耐久型的平行钢丝拉

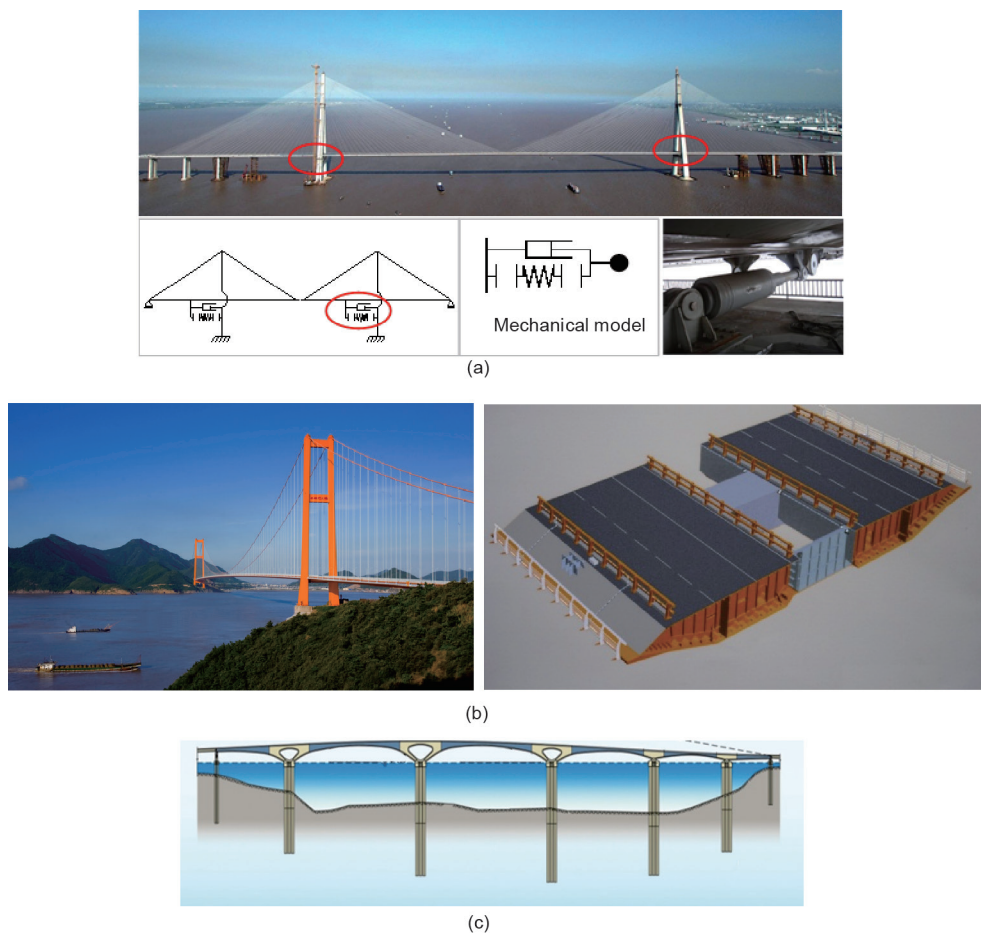


图1. 创新桥型。(a) 静力限位与动力阻尼组合结构体系 (苏通长江大桥); (b) 分体式钢箱梁悬索桥 (西垭门大桥); (c) 刚构桥 (中国-马尔代夫友谊桥)。

索体系、分布传力锚固系统和悬索桥主缆“即时监测无黏结可更换式”预应力锚固系统。混凝土拱肋、钢箱拱肋、钢桁拱肋和劲性骨架钢管拱肋均得到广泛应用，使得各类型拱桥跨度突破了世界纪录。在基础结构方面，研究人员已研发出了异形变截面超大型哑铃型承台群桩基础、超大直径钻孔灌注桩基础、大型钢-混凝土组合沉井基础、大型圆形地下连续墙围护结构锚碇基础、沉井加管柱的复合基础以及“∞”字形地下连续墙基础等新型基础形式的关键设计技术。

防灾减灾的理论方法、实验和控制技术均已得到发展。研究人员所提出的方法包括桥梁3D颤振分析的状态空间法和全模态分析法、斜风作用下抖振分析法、风振概率性评价方法[15]、基于桥梁寿命周期和性能的抗震设计理论[16]、多点平稳/非平稳随机地震响应分析的虚拟激励法以及基于性能的船撞桥设计方法。研究人员还研发了波流数值水池模拟技术和具有自主知识产权的桥梁分析软件[17]。利用这些方法，研究人员初步制定了涵盖风、地震、船舶碰撞、波浪流、车辆等作用的桥梁防灾减灾技术体系，保障了桥梁的功能实现和安全。目前，中国桥梁防灾减灾技术研究正在从单因素灾变向多灾害耦合灾变方向发展。

在桥梁信息技术领域，与桥梁分析软件相关的研发和应用取得了重大进展，在主要功能、计算精度、计算与分析效率等方面已接近国外软件水平（表2）[18]。建筑信息模型（BIM）技术作为提高桥梁信息化水平的有效手段，已得到国家各个层面的高度重视，并且在试点工程中已被应用于桥梁的正向设计、碰撞检查、施工过程模拟和施工进度管理。同时，研究人员通过将BIM技

术与虚拟现实/增强现实（VR/AR）技术相结合，将其用于方案优化和选择。另外，集成建模与分析技术、基于BIM的管理平台的建设也已取得突破。

2.1.3. 施工技术

中国拥有不同施工条件下各类型桥梁的施工控制技术，随着自动化水平、生产效率和质量稳定性的不断提升，行业施工技术正发展迅速。桥梁建设中使用的主要施工装备大多数由中国制造。自动化水平和装备生产能力也有显著提高[19–22]。

在超高桥塔施工技术及装备方面，研究人员研发了混凝土桥塔液压爬模技术、混凝土超高泵送技术、预制构件吊装技术与钢桥塔高精度拼装施工技术。混凝土桥塔浇筑最大节段长度（每节长6 m、高6 m）、爬模施工效率（每节12 d）、塔顶倾斜度误差（ $\leq 1/42000$ ）、钢桥塔最大吊重提升速度（ $7.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ）已达到了国际领先水平。中国自主研发的5200 t塔式起重机已在实际工程中得到应用。

在主梁施工技术及装备方面，研究人员研发了钢箱梁数字化制造生产线、混凝土箱梁整孔预制与架设技术、梁上运梁与架设技术、短线匹配法预制拼装施工技术、钢箱梁整体吊装施工技术以及与缆载吊机、桥面吊机、顶推法和滑模法相结合的主梁架设与施工技术。研究人员还自主研发了浮式起重机、架桥机、桥面吊机、缆载吊机、大型龙门式起重机、滑模设备等关键装备。其中缆载吊机的吊装能力（900 t）和其转体施工技术（转体长度为198 m，转体重量为22 400 t）均达到了国际领先水平。

表2 中国自主研发的计算机辅助设计（CAD）和桥梁分析软件

| Type | Typical software | Features |
|--|---|---|
| Design analysis and construction control | QJX, GQJS, PRBP, BINAS, Dr. Bridge | Functions: mainly for tie bar elements; structures' overall calculation, analysis, checking calculation, and construction control, etc. Accuracy and efficiency: compared with foreign software, the error is within 2%, and the efficiency of calculation and analysis is similar. Application: widely used in China. |
| Analysis of bridge spatial effects | There is no market-recognized special software. | Function: spatial stress analysis, crack analysis, fatigue analysis, etc. of key components. Application: other general finite-element software used in foreign countries, such as Ansys, Abaqus. |
| CAD-aided design | Bridge Designer BridgeMaster | Function: rapid drawing of two-dimensional (2D) design drawings of skew curve bridges, interchanges, conventional medium and small bridges, etc. Application: good compatibility with domestic norms and a high degree integration with actual projects; substantial market share in China. |
| Professional disaster prevention and reduction | Numerical Wind Tunnel | Function: reference including research achievement, advanced in terms of theory. Application: wind resistance, earthquake resistance, ship collision prevention, etc. for bridges. |

在缆索制造与架设技术及装备方面,研究人员研发了斜拉桥热挤聚乙烯防护拉索技术和热挤缆索护套成型技术;研发了软-硬组合与三级牵引的超长斜拉索架设技术,并将其广泛应用于斜拉桥和拱桥;掌握了使用预制平行钢丝索股(PPWS)法的主缆架设技术。

在拱肋施工技术及装备方面,研究人员研发了斜拉扣挂悬拼悬浇、劲性骨架、钢筋混凝土拱桥转体及钢拱桥大节段提升等施工技术。其中采用劲性骨架施工法建设的沪昆铁路北盘江特大桥主跨跨径达到了445 m,桥梁跨度远超国外水平(210 m)[23]。劲性骨架拱肋外包混凝土浇筑技术采用了真空辅助三级连续泵送工艺,使输送效率提升到 $30.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。采用斜拉扣挂悬拼架设法建设的朝天门大桥主跨跨径达到了552 m。在拱肋转体施工法方面,平转法的最大吨位被提升至17 300 t,研究人员还提出了上提式竖转法。大节段吊装法的最大吊重达到了2800 t。同时研究人员研发了大吨位缆索起重机(最大吊重为420 t,最大高度为202 m)等施工装备。此外,拱肋施工技术在行业中的应用也越来越普遍。

在桥梁基础施工技术与装备方面,研发成功的技术包括大直径钻孔桩、大直径钢管桩、预应力高强混凝土(PHC)管桩、钢管复合桩、大型群桩基础、大型沉井基础、超深地下连续墙基础等施工技术。自主研发的装备包括打桩船、液压打桩锤、钻机、混凝土搅拌船、双轮铣槽机等在内的桥梁施工装备。其中打桩船能力(ϕ 为7 m,桩长100 m以上、重600 t)已经超过了国外水平(ϕ 为2.5m,桩长80 m、重100 t)[24]。

在桥梁架设技术方面,工业化施工技术在快速发展,自动化水平也在不断提高。在结构构件安装方面,预制桩基整体打桩、承台和墩体预拼装、预制钢桥塔整体吊装已实现。对于主梁,所有作业均采用了大规模预制和安装技术,包括混凝土箱梁小节段预制和拼装、桁架梁大节段预制和吊装、水道上钢箱梁超大节段整体架设以及采用架桥机进行预制混凝土主梁架设。从上部结构到下部结构都采用了自动化安装。此外,为了改造和升级老桥梁,研究人员研发了促进大型桥梁节段快速修理和更换的技术,从而尽量减少施工对繁忙交通的干扰。

在施工控制技术方面,在传统的“变形-内力”双控基础上,研究人员结合无应力状态控制理念提出了几何控制法,同时研发了一种用于解决桥梁分段施工的理论控制方法——分阶段成形无应力状态法[25]。此外,研究人员还提出了一种设计、制造和无应力构件安装全

过程的几何控制方法。这大大提高了大跨径斜拉桥施工控制精度。目前研究人员正在研发一种集计算、分析、数据收集、指令发出、误差判断等功能为一体的施工控制系统。基于网络的桥梁智能化信息化施工控制技术正成为研究热点。

2.1.4. 管养技术

伴随着桥梁建设的迅猛发展,中国在桥梁管养、监测、检测和评估技术方面取得了很大进步[26,27]。

在管养方面,建立了以预防性养护为主、以纠正性养护为辅的两级方法。

在监测技术领域,厘米级实时动态差分式全球定位系统、全系列光纤光栅测量仪等一系列传感器和监测产品得到广泛应用。研究人员还研发了微秒级时钟同步振动信号调理器、百赫兹级高速扫描光纤解调仪等一系列信号采集设备,制定了基于双环冗余光纤环网和工业以太网的监测技术。数百座桥梁已安装了结构安全监测系统。系统集成技术日臻成熟。

在检测技术方面,研究人员研发了桥梁混凝土无损检测、钢结构桥梁疲劳裂纹探测、水下桩基础检测、高清摄像损伤识别、桥梁静载试验等检测技术以及缆索检测机器人、桥梁检测车等一系列检测装备。检测装备越来越专业化和智能化,检测技术的重心已从破坏性检测向无损检测方向转移。

在评估技术方面,研究人员提出了采用分层综合评定与五类单项控制指标相结合的桥梁技术状况评定方法,评定指标得到进一步细化;提出了以桥梁试验结果和结构验算得出的承载力结果为基础的评定方法;提出了基于桥梁承载力评估、耐久性评估及适用性评估的综合评估方法。评估结果的可靠性和全面性进一步提高。

在加固技术方面,碳纤维复合材料和体外预应力加固等新方法和新工艺已被应用于桥梁维修加固工作中。缆(吊)索更换技术、主梁更换和加固技术均得到快速发展。同时,研究人员还自主研发了新型涂层和阴极保护联合防护技术。较为完善的桥梁养护、维修与加固技术体系被建立,使得对桥梁的保护由被动保护转变为主动保护。

在信息管养方面,信息化决策支持系统被建立,以便于桥梁资产的养护和管理。目前,桥梁施工人员仅使用一个识别码,便可对各种施工文件、监测设备、监测数据、养护数据和桥梁施工与管理过程中的其他信息进行管理,同时可以将其用于协助决策,从而确保信息管

理的独特性、可视化、自动化和可控性。

2.2. 存在的问题

自改革开放40年来,中国在桥梁工程方面取得了辉煌成就。然而,与发达国家相比,中国桥梁工程在四个关键领域还存在一些问题和不足。一些基础理论研究和共性关键技术尚需突破。而且,施工精细化程度不高,工业化、信息化和智能化水平有待进一步提高,科技创新与成果转化能力不足,产业化程度较低。这些问题进一步影响了中国桥梁产业的长期发展,具体情况如下[4,28]:

(1) 材料技术。在先进材料的研发和应用方面,中国仍然在追赶西方国家。高性能混凝土材料的研究仍处于初级阶段(即模仿国外的产品),且高性能钢材的力学性能指标也低于国外水平。与西方国家相比,在钢材的焊接性、强度、板材厚度和耐候性方面都存在较大差距。而且,基于高性能、大型FRP和形状记忆合金(SMA)的产品仍需要进口。

(2) 勘察设计。中国在基础理论、前瞻性研究、智能化技术以及具有自主知识产权的软件等方面的研究和应用落后于西方国家。

(3) 施工。中国的施工技术产业化程度不高且施工设备的性能和可靠性亟待提高。智能化施工技术和设备也有待开发。施工质量的稳定性也亟待提高。

(4) 养护与管理。从养护与管理的角度看,监测和检测技术与装备、结构状态评估理论与方法、养护与维修加固技术、智能化技术发展等方面仍然相对不发达。

首先,桥梁工程师在设计、制造、施工、管理和养护方面仍面临缺乏核心技术与装备的现实。缺乏核心技术与装备就限制了中国桥梁工程的进一步发展,对中国桥梁工程产业的竞争力构成风险。目前,我们除了承认当前在关键技术上的差距,还应该认识到中国在创新体系建设、观念引领、机制建设和技术应用方面存在的一系列根深蒂固的问题,具体如下:

(1) 创新体系。创新体系建设存在两个薄弱环节——能力建设不足和战略领导能力不足。现有桥梁的建设和养护技术优势不足以支撑中国向世界领先的桥梁制造行列迈进。

(2) 观念引领。中国既缺乏坚定的科研意志,又缺乏脚踏实地的态度。目前的观念存在两个极端——要么为了避免风险而完全不去创新,要么纯粹为了创新而创新。

(3) 机制建设。阻碍中国建设创新机制的两个问题是创新平台的同质化和研究的重复性。同时,科研成果共享机制的建设比较缺乏且科研资源浪费严重。

(4) 技术应用。精细化程度不高和规模化水平不足是影响创新技术应用的两个问题。新技术的产业转化水平较低,使得开发者难以盈利并限制了产业的持续发展。

上述问题限制了中国桥梁工程产业核心技术的发展,同时也进一步加重了目前中国桥梁工程产业缺乏核心技术这一现状。为此,我们必须继续研究桥梁建设特点,抓住新一轮产业革命和发展的机遇,实施科技攻关的长远战略规划,创新体制机制,从根本上提高桥梁建设的创新发展能力。

3. 桥梁工程发展的机遇与挑战

历史表明,需求是桥梁工程发展的第一动力。近年来,国内外需求的变化(其中包括新需求的提出)让中国桥梁工程的发展站在了新的起点上。

第一个变化是增量需求变化。随着“一带一路”、长江经济带和京津冀协同发展等一系列国家发展战略的提出,桥梁建设需求依然旺盛。然而,未来桥梁建设将逐渐向中国及欧亚大陆的重要跨海通道、深山峡谷拓展。这一转变将使得施工条件变得更加复杂,桥梁跨度和结构规模也变得更大。而且,我们必须转变之前只考虑单一灾害的观点,要同时考虑多种灾害。在确保桥梁使用寿命和性能的基础上,未来桥梁工程将更加注重质量安全、经济耐用、环保和节能。许多新问题和新技术都亟待解决。

第二个变化是存量需求变化。截至2017年年底,中国公路桥梁总数达83.25万座,居世界第一。以目前中国桥梁3%的年增加率计算,预计到2025年中国公路桥梁总数将超过100万座。同时,由于桥梁“老龄化”和服役条件恶化,大量桥梁病害问题将会越来越突出,安全事故也会日益增多。目前,中国危桥总数约为7万座(图2),占中国现有桥梁总数的1/12,且今后这一比例仍会维持在较高水平。我国老旧桥梁的修复工作对桥梁养护技术提出了新的要求。

第三个变化是管理需求变化。中国社会发展正从高速发展向高质量发展转变。因此,桥梁工程发展的主要理念已从“能建”(can be built)向“能建并能管理好”(can be built and managed well)转变,这对施工质量和管

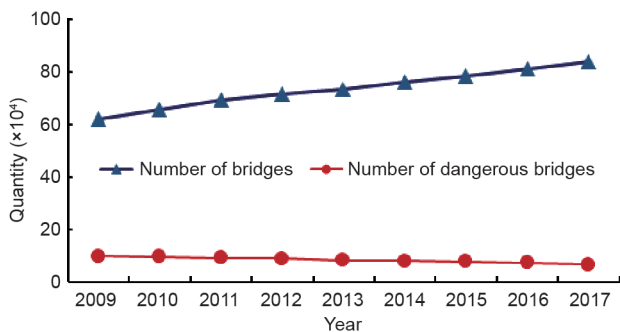


图2. 近年来中国桥梁总数（蓝色）及危桥总数（红色）发展现状。

质量提出了更高要求。此时，桥梁工程的发展必须以质量改革、效率改革、动力改革为指导，中国桥梁的建设效率和工程质量必须通过技术创新来提高。

总之，未来中国桥梁工程产业必须要解决如何满足国内对施工技术、养护技术、科学决策的需求，还要解决如何满足质量改进、快速建立和创新的管理需求。如何高效建造、有效管养、长效服役的问题就概括了当今中国桥梁发展面临的三大挑战。中国桥梁产业的长期生存和健康发展需要对整个产业链进行改革。

目前，新一轮科技革命和产业转型正在兴起，全球科技创新呈现出智能化、信息化的新发展趋势。新一代信息技术正在改变人类的生活方式，并给传统产业带来了革命性的变化。桥梁建设和养护技术是材料、设备制造、信息、节能和环保等产业发展的重要载体。因此，在新科技革命和产业转型的浪潮中，我们应抓住时代的机遇，实现桥梁建设和养护技术与新一代信息技术的全面融合，促进桥梁产业的全面转型升级，从而促进“第三代桥梁工程”的发展。

“第三代桥梁工程”的主要发展方向为“智能桥梁”（intelligent bridge）。“智能桥梁”的发展战略与国家战略定位和产业痛点高度契合，代表了桥梁工程的发展方向。向社会展示解决现实问题的能力将有力地支撑中国实现“桥梁强国”的目标。

4. 桥梁工程的发展战略

4.1. “智能桥梁”的定义

目前，“智能桥梁”无确切的定义。顾名思义，“智能桥梁”的核心是桥梁建设和养护技术的智能化。因此，“智能桥梁”宜包含三个基本要素：

(1) 桥梁建设和养护技术。这是“智能桥梁”的前提，因为智能化技术必须坚持先进的桥梁技术，才能满

足桥梁工程的实际需求。若建设和养护技术不发达，则桥梁工程中的智能化技术就会像无本之木。

(2) 信息技术。信息化是智能化的基础，建立具有规模庞大、自上而下、有组织的信息网络体系需要智能化。因此，桥梁的智能化离不开信息通道的支持。科学统一的信息体系可以为“智能桥梁”提供可靠的数据支持，为桥梁的智能化奠定基础。

(3) 智能化技术。这是解决桥梁建设和养护问题的现代人工智能化技术。智能化技术将促进桥梁智能化的实现并促进桥梁技术范围的进一步扩大。

因此，与传统桥梁相比，“智能桥梁”具有三个基本特征——产业化、信息化和智能化。其中，产业化为桥梁建设和养护提供了完整的产业体系，实现了桥梁设计、建造和管养全过程的管理标准化；信息化为桥梁建设和养护全过程构建信息通道，实现了桥梁全寿命期的信息标准化和数字化；智能化为桥梁建设和养护全过程建立智能决策系统，从而减少对人力的依赖并实现无人值守的桥梁建设和养护模式。

显然，“智能桥梁”的发展需要以两个主要方面的发展做指导。第一个方面是技术链，即信息智能化技术与桥梁理论、材料、装备和软件等基本技术的融合。通过在各种技术环节与现代智能信息技术建立接口，可以为智能化技术和桥梁技术创造深度融合的条件。第二个方面是产业链：在产业链的组织管理和协调发展范围内，有必要建立面向“智能桥梁”的制度机制，从而营造良好的发展环境，使智能化技术能够贯穿于桥梁产业并进一步推动技术链的智能化发展。

总之，“智能桥梁”是在桥梁产业链充分发展的基础上，利用现代信息技术构建建设和养护全过程信息通道，进一步融合人工智能等智能化技术所形成的新一代桥梁技术。通过智能设计、智能建造、智能管养，实现桥梁工程的安全、高效、长寿、环保目标。

4.2. “智能桥梁”的发展重心

“智能桥梁”技术是在桥梁建设和养护技术充分发展的基础上，融合大数据、云计算、物联网、虚拟现实和人工智能等先进技术所形成的新一代桥梁建设和养护技术。“智能桥梁”技术能够实现桥梁工程全寿命周期的风险感知、快速响应和智能管理。而且，在包括勘察、设计、制造、施工、运营和养护在内的整个桥梁工程寿命周期内，“智能桥梁”技术能够从根本上促进科技创新、管理模式创新和企业间协同管理创新。“智能桥梁”

以智能化技术为起点，因此，“智能桥梁”的建造将促进基础桥梁研究、信息监管、智能决策和寿命期信息共享技术的发展，以及促进人员培训、技术交流和产业化示范。

“智能桥梁”的发展涉及各种维度。“智能桥梁”不是简单的“智能化技术+传统桥梁建设和养护技术”，而是涉及在智能化技术指导下重组产业结构。需要桥梁、材料、设备和信息等领域多个产业群协同发展，推动合作领域、合作模式和合作机制的变革。

目前，共享和协同已成为一种发展趋势，这一趋势已逐渐形成一种社会共识，并成为解决以往问题和新需求的一种方式。“共享”概念可作为“智能桥梁”发展中多产业创新资源整合的共同价值基础。因此，共享有助于解决现有科技体系中的低水平重复、资源分散、产业链未完全成形、成果转化不足和多产业合作困难等产业痛点。为促进“智能桥梁”和桥梁产业的可持续发展，我们必须构建以协同和共享为基础的一种新型的“桥梁生态”(bridge ecology)模式。这需要从技术、平台、机制三个方面入手：

(1) 从产业化、信息化、智能化等方面来发展桥梁建设和养护技术；

(2) 建立国家级全产业链科技发展和产业化平台；

(3) 探索“智能桥梁”多产业协同的创新模式。

按照上述方式，我们就可以实现需求共享、资源共享和成果共享，可以实现产业协同创新，并可以构建起一种以产业链创新、平台创新、生态创新为特征的桥梁创新体系。

4.3. “智能桥梁”的发展建议

为实现桥梁智能化，我们可以在培育阶段、实施阶段和产业化阶段采用三步战略。此战略将有助于“智能桥梁”科技计划的实施，可显著提高桥梁的产业化、信息化和智能化水平。正如下面三个小节所述，在桥梁建设和养护技术发展、平台构建、创新机制建设中，我们需要开展如下工作。

4.3.1. 运用“智能桥梁”重点研发计划

鉴于中国桥梁产业在设计、制造、建造、管养等关键技术和设备方面缺乏核心技术，所以我们亟需科学的解决方案。通过系统的顶层设计，我们可以突破目前影响桥梁建设和养护技术装备的关键共性和产业化问题。

以“智能桥梁”为主题的“中国桥梁2025”科技计

划是中国桥梁工程未来10~20年的顶层科技发展规划。按照加强顶层设计、注重全产业链一体化实施的原则，该科技计划以需求为出发点，涵盖桥梁设计、施工、管养、材料、装备和软件等全产业链。该科技计划包括“桥梁智能化设计建造技术及装备”“桥梁智能化管养技术及装备”和“桥梁智能化建设和养护一体化技术及平台”三个项目。而且，按照基础前沿、共性关键技术、系统集成及产业化示范布局29个项目(图3)。通过桥梁建设和养护技术与互联网、物联网、大数据和云计算等新一代信息技术的深度融合，研究将侧重于桥梁智能化设计建造技术及装备、智能化管养技术及装备、智能化建设和养护一体化技术及平台。此外，我们应加强建设相应的研究基地和团队，打造以产业化、信息化、智能化和绿色建造为特征的桥梁全产业链创新体系，提升桥梁建设和养护技术水平和产业化能力。

目前，“智能桥梁”已被列为中国交通建设集团的专项技术项目，是中国交通建设集团首先开展的研究项目，这决定了中国未来“智能桥梁”重点项目研究工作的技术路线，夯实了研究基础。同时，按照国家科技研究新政策，中国交通建设集团正在积极发展一种以企业自主投资为主、政府支持为辅的新项目模式。

4.3.2. 搭建“智能桥梁”研究与实现平台

以往突出的问题包括科技创新要素相对孤立、创新平台水平相对较低、创新体系不完善、创新成果转化渠道不畅。因此，中国亟需有效整合资源，搭建国家级科技创新平台，并解决当前的产业发展难题。

为此，国家发展和改革委员会、交通运输部和中国交通建设集团共同搭建了“公路长大桥建设国家工程研究中心”(以下简称“中心”)这一高端平台。这是国内公路桥梁产业唯一的国家级桥梁技术与产业化平台。该中心的主要任务是围绕国家重点工程和行业需求，推动符合桥梁深水基础、长大桥梁结构体系与关键结构、桥梁高效装配、长大桥结构安全监测与检测和风险评估这四大发展方向的业务发展，参与技术标准制定，促进国际合作与交流，向相关企业提供技术咨询服务，以及提升我国桥梁建造产业的核心竞争力和创新能力。

目前，该中心已开始运营。根据国家对技术创新平台的相关要求，中心将被定位为技术创新和成果转化平台，专注于共性产业关键技术开发和成果转化应用，充分发挥科技进步在产业中的带动作用，并成为“智能桥

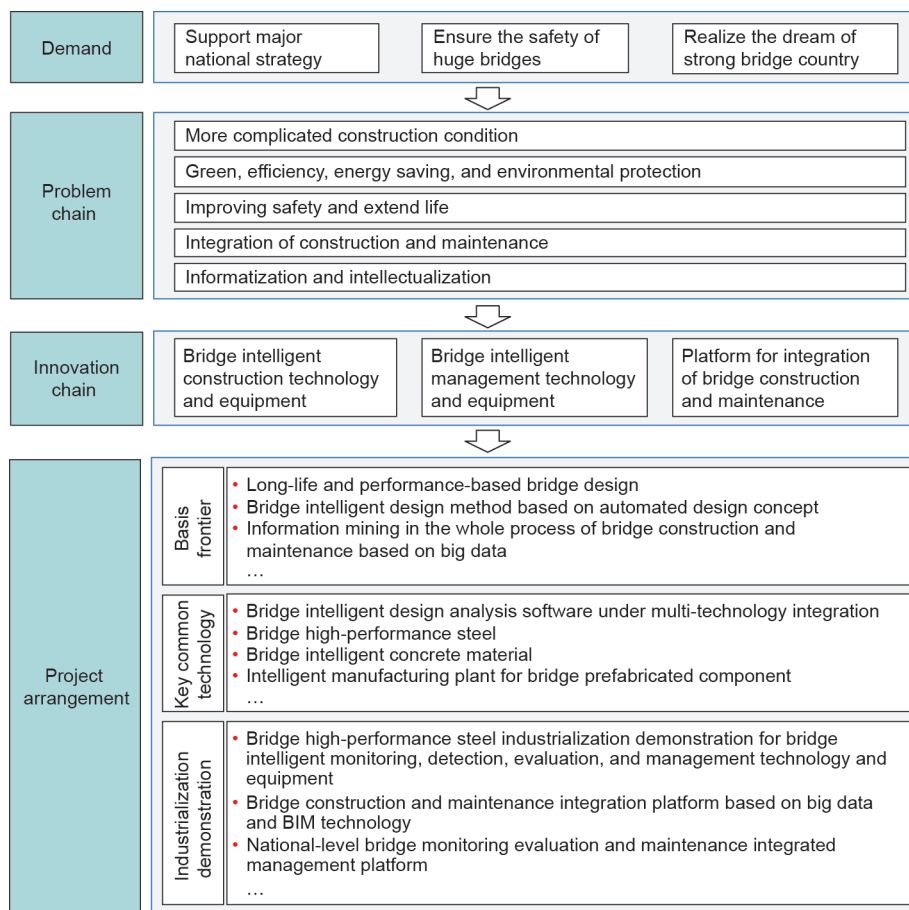


图3. “智能桥梁”重点专项方案。

梁”重点研发计划的实施平台、产业化转型平台和人才培养平台。

4.3.3. 建立新型桥梁产业协同创新机制

鉴于中国桥梁建设和养护领域存在的科技成果转化渠道不畅、“产学研用”市场化机制与合作机制不完善、成果转化二次投资不足、“智能桥梁”科技创新的外部创新资源需整合等问题，我们有必要建立桥梁产业协同创新机制。

如上所述，按照共享与协同发展理念、“产学研用”相结合以及“资源共享、优势互补、联合开发、协同共赢”的原则，我们有必要对重点企业、知名高校、科研院所以及桥梁和相关领域的国家和行业重点实验室与技术中心等优势资源进行整合。此外，我们有必要建立“长大桥梁建设和养护一体化协同创新平台”，并组建“桥梁产业技术创新战略联盟”（图4）以获取更高层次的产业内外创新资源。协同创新机制以创新发展的内在需求和相关方的共同利益为基础，遵循市场经济规律，通过

具有法律约束力的合同对各成员形成有效的行为约束和利益保护。同时，协同创新机制在产学研之间建立起一种持续和稳定的合作关系。这样，协同创新机制将重塑桥梁产业的创新生态。

在未来一段时间，桥梁协同创新机制将主要由两个主体构成——面向产业内部资源创新的“长大桥梁建设和养护一体化协同创新平台”和以面向产业内外资源创新的“智能桥梁”为指导的“桥梁产业技术创新战略联盟”。为组织和实现未来“智能桥梁”的发展，中国已围绕桥梁智能化发展开展了多项重大科研和工程项目研究。

5. 总结

改革开放40多年来，中国桥梁工程已走出了一条自主建设和创新发展的成功道路，取得了一批自主创新成果，建成了一大批具有国际影响力的桥梁。而且，中国培养了一批桥梁工程领军人物和技术专家，在世界上荣

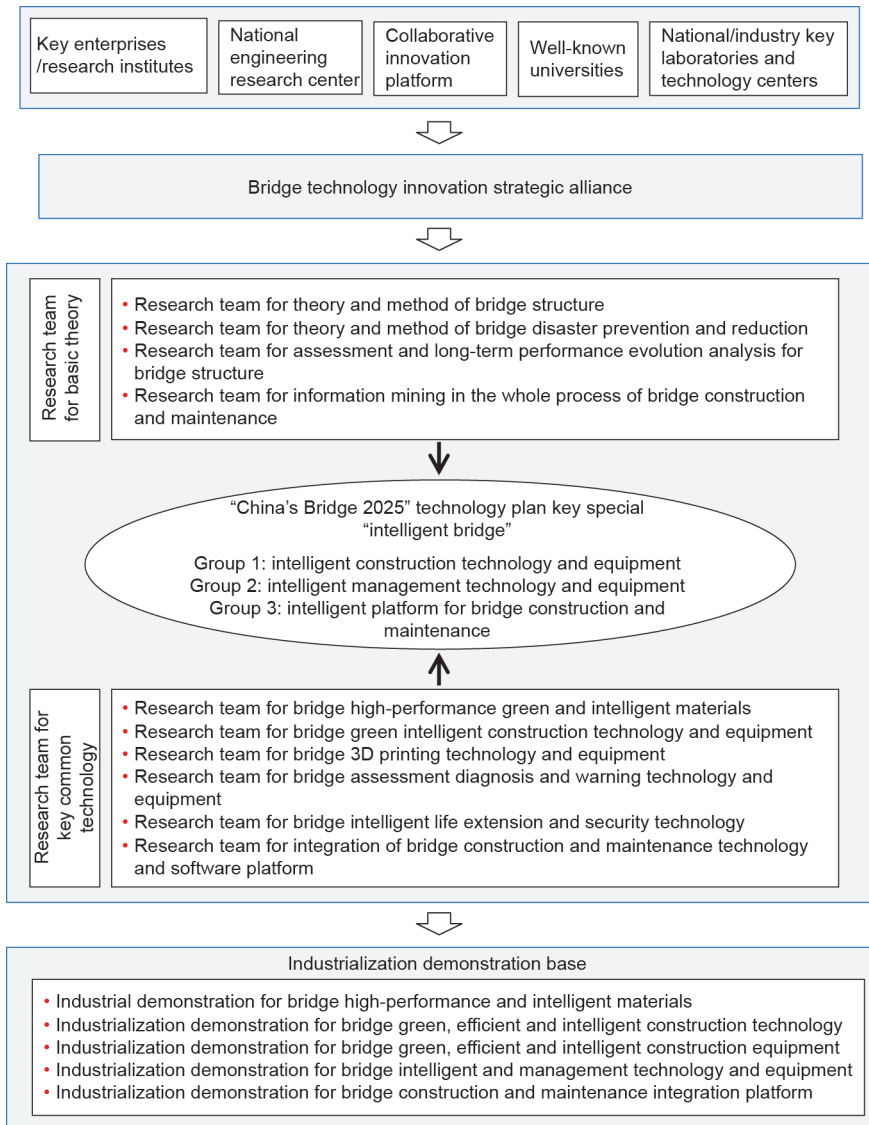


图4. 中国桥梁产业技术创新战略联盟组建方案。

获了许多大奖，赢得了国际桥梁界的尊重和认可。这些成就为中国未来发展成为世界桥梁强国奠定了坚实的基础。然而，与发达国家相比，中国桥梁产业仍有一些问题要克服。中国桥梁产业在设计、制造、施工和养护等关键技术及装备相关领域缺乏核心技术，面临一系列深层次的制度机制问题。

中国桥梁工程目前面临巨大的战略机遇、政策相关机遇和技术机遇，在未来10~20年，中国桥梁工程产业将步入创新、转型和升级的重要战略机遇期。为完成支撑国家重大发展战略、确保大型桥梁的安全和使用寿命以及实现桥梁强国梦的三大历史任务，中国桥梁工程产业必须抓住这些机遇，并进行科学规划，以实施“智能桥梁”科技计划并组建“桥梁产业技术创新战略联盟”。

这样，中国将引领智能化技术、产业化体系和专业化桥梁工程平台的一体化发展，将中国桥梁工程升级为以“智能桥梁”为特征的“第三代桥梁工程”。这一转变标志着桥梁产业发展的一次飞跃。

Compliance with ethics guidelines

Xuhong Zhou and Xigang Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Xiang H, Pan H, Zhang S, Fan L. [Conspectus of bridge history in China]. Shanghai: Tongji University Press; 2009. Chinese.

- [2] Xiang H, Xiao R, Xu L, Shi X, Ge Y, Wei H, et al. [Bridge concept design]. Beijing: China Communications Press; 2011. Chinese.
- [3] Xiang H. [Zhuang Xinji—Xiang Haifan's proceedings (2000–2014)]. Shanghai: Tongji University Press; 2014. Chinese.
- [4] Zhang X, Liu G, Ma J, Wu H, Fu B, Gao Y. Status and prospects of technical development for bridges in China. *Chin Sci Bull* 2016;21:415–25.
- [5] China Highway Society Bridge and Structural Engineering Branch. [Chinese modern bridge for innovation]. Beijing: China Communications Press; 2009. Chinese.
- [6] Miao C, Liu J, Tian Q. [Crack and crack control of concrete]. *China Eng Sci* 2013;15(4):30–5. Chinese.
- [7] Lu Z. Application of high performance FRP and innovations of structure engineering. *J Archit Civ Eng* 2005;22(1):1–5. Chinese.
- [8] Li H, Ou J. [Intelligent concrete and structure]. In: Proceedings of the 16th National Conference on Structural Engineering; 2007 Oct 19; Taiyuan, China. Beijing: Engineering Mechanics Press; 2007. p. 368–72. Chinese.
- [9] Zhang X, Chen A. [Kilometer-grade cable-stayed bridge—structural system, performance and design]. Beijing: China Communications Press; 2010. Chinese.
- [10] Meng F, Xu G, Liu G, Ma J. [Life cycle design method and engineering practice of bridge engineering]. Beijing: China Communications Press; 2012. Chinese.
- [11] Ma J, Chen A, He J. General framework for bridge life cycle design. *Front Archit Civ Eng China* 2009;3(1):50–6. Chinese.
- [12] Zhang X, Chen A. [Design and structural performance of Sutong Bridge]. Beijing: China Communications Press; 2010. Chinese.
- [13] Nie J. [Steel-concrete composite bridge]. Beijing: China Communications Press; 2011. Chinese.
- [14] Zhang X, Liu Y. [Composite cable tower anchoring structure]. Beijing: China Communications Press; 2010. Chinese.
- [15] Ge Y, Xiang H. Recent development of bridge aerodynamics in China. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2008;96(6–7):736–68.
- [16] Li J, Guan Z. Performance-based seismic design for bridges. *Eng Mech* 2011;28(Z2):24–30. Chinese.
- [17] Liu G, Liu TC, Guo AX, Chen SY, Bai XD. Dynamic elastic response testing method of bridge structure under wind-wave-current action. In: Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference; 2015 Jun 21–26; Kona, HI, USA. Cupertino: International Society of Offshore and Polar Engineers; 2015.
- [18] Editorial Department of Chinese Highway. [Development of bridge structure analysis program and software]. *Chin Highw* 2004;(5):9–11.
- [19] Fang Q, Gao Z, Li J. Development course and prospect of steel railway bridges in China. *J Archit Civ Eng* 2008;25(4):1–5. Chinese.
- [20] Qin S. Long span bridges on high speed railway lines. *J Railw Eng* 2008;(51):53–61. Chinese.
- [21] Zhang H, Zhang Y, You X. [New technology and prospects for large-span highway bridge construction]. In: Proceedings of the 20th National Bridge Conference; 2012 May 1; Wuhan, China. Beijing: China Communications Press; 2012. p. 455–70. Chinese.
- [22] Zheng J. [Development and technology progress of arch bridges in China]. In: Proceedings of Hubei Provincial Highway Technology Innovation Forum; 2006 Jan 1; Wuhan, China. Hubei: Hubei Association for Science & Technology; 2006. Chinese.
- [23] Yang CL. [Research on construction stability of combination construction method of stiff skeleton with cantilever casting of long-span RC arch bridge] [dissertation]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University; 2014. Chinese.
- [24] Xue W. [120m steel pile of main bridge of Padma Bridge inserted directly into river] [Internet]. [cited 2018 Aug 22]. Available from: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1609505814858285453&wfr=spider&for=pc>. Chinese.
- [25] Qin S. [Bridge construction control]. Beijing: China Communications Press; 2007. Chinese.
- [26] Sun L, Sun Z, Dan D, Zhang Q, Yu G. [Research and application status of health monitoring system for large-span bridge structure in China]. In: Proceedings of the 17th National Bridge Conference; 2006 May 9; Chongqing, China; 2006. Beijing: China Communications Press; 2006. p. 663–70. Chinese.
- [27] Zhang J. [Status and development of inspection and assessment technology of bridge's load-bearing capacity in China]. *Transp. Word* 2014;(6),295–6. Chinese.
- [28] Feng Z. [New pursuit for the development of bridge construction] [presentation]. In: China Bridge Culture Forum; 2014 Dec 19–21; Jiangyin, China; 2014. Chinese.