

第524次学术讨论会·中国桥梁技术发展战略



中国桥梁技术的现状与展望

张喜刚^{①②*}, 刘高^{①②}, 马军海^{①②}, 吴宏波^{①②}, 付佰勇^{①②}, 高原^{①②}

① 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;

② 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088

* 联系人, E-mail: zhangxigang@hpdi.com.cn

2015-08-10 收稿, 2015-09-02 修回, 2015-09-06 接受, 2015-10-16 网络版发表

国家高技术研究发展计划(2012AA112501)、交通运输重大科技专项(2011318494150, 2011318494160, 2011318494180)、交通运输部建设科技项目(2014318494020, 2015318J41270)和中国交建科技项目(2012-ZJKJ-5, 2013-ZJKJ-08, 2013-ZJKJ-11, 2014-ZJKJ-01)资助

摘要 桥梁是交通设施互联互通的关键节点和枢纽工程,是国民经济发展和社会生活安全的重要保障,在化解传统产业产能过剩、推动战略新兴产业和第三产业发展、促进产业融合升级、拉动经济增长等方面发挥着重要作用。改革开放30多年来,中国桥梁在学习引进国外先进桥梁技术的基础上,走自主建设和创新发展之路,实现了跨越式发展,取得了一批自主创新成果,推动了中国桥梁由大国向强国的迈进,但在核心技术、材料、软件、装备、标准规范等方面与发达国家相比还存在一定差距。桥梁建养和安全长寿的巨大需求,以及工业化、信息化、智能化的发展趋势,均要求站在更高起点上审视中国桥梁技术发展,面向国家战略需求,坚持问题导向和需求导向,提出未来中国桥梁技术发展方向和目标任务。本文总结了改革开放30多年来中国桥梁在建设技术、新结构与高性能材料、监测检测评估与管养技术、信息化技术、标准规范等方面取得的主要进展与不足,指出为了支撑国家重大发展战略、保障庞大桥梁安全长寿和实现桥梁强国梦,必须进一步提升中国桥梁技术创新水平,尽快实施以重点专项“智能桥梁(Intelligent Bridge)”为主题的“中国桥梁2025”科技计划,并通过组建“中国桥梁产业技术创新战略联盟”保障其顺利实施。

关键词 中国桥梁, 建设技术, 管养技术, 信息化技术, 标准规范, 智能桥梁, 科技计划

桥梁是跨越江河湖海、深沟峡谷等障碍的人工构筑物,是交通设施互联互通的关键节点和枢纽工程,是国民经济发展和社会生活安全的重要保障。桥梁产业的发展能有效化解钢铁、水泥、能源等传统产业的产能过剩,有力推动新材料、智能制造、高端装备、新一代信息技术、节能环保等战略性新兴产业和物流、运输、房地产等第三产业的蓬勃发展,在促进产业融合升级、拉动经济增长等方面发挥着重要作用。

改革开放以来的30多年是中国桥梁建设发展的黄金时期,在学习引进国外先进技术的基础上,我国坚持走自主建设和创新发展的道路,经历了20世纪

80年代的学习与追赶、90年代的跟踪与提高,当前正处于21世纪以来的创新与超越发展阶段^[1],建成了以苏通大桥、天兴洲大桥、卢浦大桥、杭州湾大桥等为代表的一大批结构新颖、技术复杂、设计施工难度高和科技含量高的特大型桥梁,并积极参与国际竞争,主持或参加建设了马来西亚槟城二桥、巴拿马运河三桥、塞尔维亚泽蒙-博尔察大桥、新奥克兰海湾桥等一批国际知名桥梁工程,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”、国际桥梁与结构工程协会(IABSE)“杰出结构工程奖”和

引用格式: 张喜刚, 刘高, 马军海, 等. 中国桥梁技术的现状与展望. 科学通报, 2016, 61: 415-425

Zhang X G, Liu G, Ma J H, et al. Status and prospect of technical development for bridges in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 415-425, doi: 10.1360/N972015-00912

“功绩奖”等多项著名国际大奖,赢得了国际桥梁界的尊重和认可,正在向桥梁强国迈进^[2-4].

截至2013年底,中国桥梁总数达86万座,已超越美国的61万座,居世界第一,预计2025年将突破100万座.未来桥梁建设将逐步向我国及欧亚的重要跨海通道、深山峡谷拓展,很多新的特殊问题和技术亟待解决.同时由于桥梁“老龄化”和服役条件恶化,大量桥梁病害问题突出,安全事故日益增多.目前我国危桥总数已达9.4万座(图1),占现有桥梁的1/9,且今后这一比例还会不断提高^[5].桥梁建养和安全长寿的巨大需求,以及工业化、信息化、智能化的发展趋势,均要求站在更高起点上审视中国桥梁技术发展,面向国家战略需求,坚持问题导向和需求导向,提出未来中国桥梁技术发展方向和目标任务.

1 中国桥梁30多年来的主要进展

以下主要从桥梁建设技术、新结构与高性能材料、监测检测评估与管养技术、信息化技术、标准规范5个方面,总结30多年来中国桥梁技术的主要进展.

1.1 桥梁建设技术

桥梁建设技术方面的进展主要体现在桥梁设计理论与方法、桥型与结构体系、施工技术及装备、防灾减灾技术等4个方面.

在桥梁设计理论与方法方面,从力学角度看,依托弹塑性力学等理论的发展逐步完成了由容许应力法到极限状态法的转变;在对不确定性的认识方面,结构可靠度理论推动了桥梁工程设计由定值法、半概率法到近似概率法的发展.此外,全寿命、耐久性、可持续发展等设计理念进一步推动了桥梁设计理论内涵与外延的发展.当前,着眼于全寿命周期的近似概率极限状态设计方法正成为主流,开始注重概念设计和基于性能设计方法的研究和应用^[6-8].

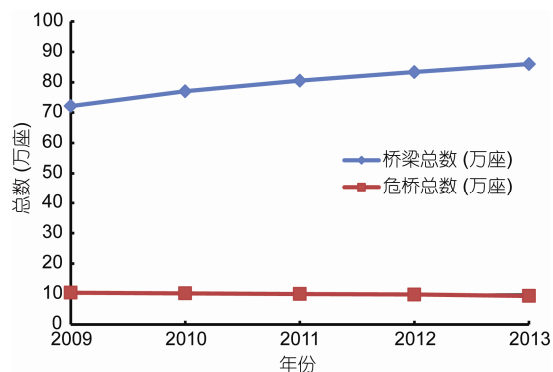


图1 (网络版彩色)近年来中国桥梁及危桥总数发展现状

Figure 1 (Color online) Recent development of the total number of all bridges and dangerous bridges in China

在桥型与结构体系方面,在学习借鉴国外先进技术的基础上,斜拉桥、悬索桥、拱桥和梁桥等主要桥型与结构体系不断创新和发展,半飘浮、全飘浮、液压缓冲、静力限位和动力阻尼组合等各种结构体系得到开发和应用^[9],在世界跨径排名前10名的斜拉桥、悬索桥、拱桥、梁桥4类主要桥梁中,中国均占了一大半,如表1所示^[10].此外,矮塔斜拉桥、自锚式悬索桥、协作体系桥等桥型也陆续进行了工程应用.

在桥梁基础、超高桥塔、主梁、拱肋、缆索等施工技术与装备方面取得了以下主要进展^[11-14].

在桥梁基础施工技术与装备方面,已掌握大直径钻孔桩、大直径钢管桩、PHC管桩、钢管复合桩、大型群桩基础、大型沉井基础、超深地连墙基础等施工技术,自主研发了包括打桩船、液压打桩锤、钻机、混凝土搅拌船、双轮铣槽机等在内的桥梁基础施工装备,其中打桩船能力($\phi 5$ m、桩长90 m、重450 t)已经超过了国外($\phi 2.5$ m、桩长80 m、重100 t).

在超高桥塔施工技术及装备方面,研发了混凝土桥塔液压爬模技术、混凝土超高泵送技术和钢桥塔预制吊装与高精度拼装施工技术,其中混凝土桥塔浇筑最大节段长度(6 m/节)、爬模施工效率(12天/节、

表1 中国桥梁在主要桥型的分布和代表性桥梁

Table 1 The distribution of major bridge types in China and representative bridges

桥型	世界桥数(座)	中国桥数(座)	前10中桥数(座)	代表性桥梁
斜拉桥(>400 m)	114	59	6	苏通大桥、天兴洲大桥、嘉绍大桥
悬索桥(>400 m)	110	34	5	江阴大桥、西堠门大桥、泰州大桥
拱桥(>300 m)	50	25	7	卢浦大桥、万县长江大桥、合江一桥
混凝土梁桥(>200 m)	64	38	5	石板坡大桥、苏通大桥辅桥、北盘江大桥

节高6 m)、塔顶倾斜度误差($\leq 1/42000$)、钢桥塔最大吊重提升速度(7.5 m/min)已达到了国际领先水平;自主研发了5200 t·m塔式起重机并实现了工程应用。

在主梁施工技术及装备方面,建立了钢箱梁数字化制造生产线,掌握了混凝土梁整孔预制架设技术、梁上运梁架设技术、短线匹配法预制拼装施工技术、钢箱梁整体吊装施工技术和使用缆载吊机、桥面吊机、顶推与滑模等主梁架设与施工技术,自主开发了浮吊、架桥机、桥面吊机、缆载吊机、大型龙门吊、滑模设备等关键装备,其中缆载吊机吊装能力(740 t/段)和转体施工技术(转体长度198 m,转体重量22400 t)达到了国际领先水平。

在拱肋施工技术及装备方面,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达到了445 m,远超过国外水平(210 m);劲性骨架外包混凝土浇筑技术采用三级连续真空辅助泵送法,使输送效率提升到30.8 m³/h;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;拱肋转体施工法方面,平转法的最大吨位提升到了16800 t,并开发了上提式竖转法;大节段吊装法的最大吊重达到了2800 t;并研发了大吨位缆索吊(最大吊重420 t,高度202 m)等施工装备,拱肋施工技术总体处于国际领先水平。

在缆索制造与架设技术及装备方面,研发了斜拉桥热挤聚乙烯防护拉索技术,攻克了热挤缆护套成型技术工艺,提出了软、硬组合三级牵引的超长斜拉索架设技术,并广泛应用于斜拉桥、拱桥等,掌握了PPWS和AS工法的主缆架设技术。

在施工控制技术方面,在传统变形——内力双控基础上,结合无应力状态控制理念提出了几何控制法,首创了一种用于解决桥梁分阶段施工的理论控制方法——分阶段成形无应力状态法^[15],并提出了多构件无应力几何形态设计制造安装全过程几何控制方法,大大提高了大跨径斜拉桥施工控制精度。目前正向集计算、分析、数据收集整理、指令发出、误差判断等功能为一体的施工控制集成系统发展,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。

通过对国外先进技术的消化、吸收和再创新,结合大量工程实践,在桥梁防灾减灾理论方法、实验平台能力及实验技术、防灾减灾控制技术与装备等方面

取得了积极进展,提出了桥梁三维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^[16]、基于寿命期与性能的桥梁抗震设计理论^[17]和多点平稳/非平稳随机抗震分析的虚拟激励法、基于性能的桥梁船撞设计方法,研发了数值波流水池模拟技术和自主知识产权分析软件^[18],初步形成了涵盖风、地震、船撞、波流、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从单因素灾变向多灾害耦合灾变方向发展,已开展了桥梁地震-动水、风-雨、风-浪-流等耦合作用的分析理论方法、试验模拟和观测技术研究,探索了桥梁多灾害耦合作用机理,研发了千米级多塔斜拉桥纵横向静动力结构体系,以及磁流变液阻尼器、纳米流体阻尼器、负刚度阻尼器、辅助索网及连接节点等控制装置。

1.2 桥梁新结构与高性能材料

近年来我国在桥梁新结构研究和应用方面取得了一些积极的进展^[19,20]。

在主梁结构方面,钢箱梁、钢桁梁、钢-混凝土叠合梁、钢-混凝土混合梁等结构形式不断创新并得到推广应用。首次在悬索桥上采用了分体式双箱断面钢箱梁;研发了三片主桁三索面的新型结构型式、设置复合连接件的钢格室混合梁结合部结构、“桥面开槽+气动翼板”组合的新型气动控制装置、钢桁梁与正交异性桥面板组合的主梁结构形式。

在桥塔结构方面,成功建设了300 m高的混凝土桥塔,提出了内置式钢锚箱、钢锚梁等钢混组合索塔锚固结构,发展和应用了钢桥塔和钢外壳与混凝土内壁组合的桥塔结构。

在拱肋结构方面,混凝土拱肋、钢箱拱肋、钢桁拱肋、钢管及劲性骨架组合拱肋等结构型式均得到广泛应用,并保持着各类型拱桥跨径的世界纪录。

在基础结构方面,建成了异形变截面哑铃型承台超大型群桩基础(131根长114 m/117 m,直径2.8/2.5 m钻孔桩基础),研发了直径达3.8~4.5 m的超大直径钻孔灌注桩基础、大型钢-混凝土组合沉井基础(长86.9 m×宽58.7 m×高115 m)、大型圆形地下连续墙锚碇基础围护结构(外径73 m、壁厚1.5 m、深61.5 m),提出了大直径钢管复合桩基础、沉井+管柱复合基础、“∞”字形地下连续墙基础等新型基础型式。

在缆索及锚固系统方面,研发了设计寿命50年

的高强耐久型平行钢丝拉索体系,以及高强耐久型平行钢绞线拉索;研发了悬索桥主缆“即时监测无黏结可更换式”预应力锚固系统、分布传力式锚固系统和可检查、可更换的“镀锌钢绞线+油脂”锚固系统。

我国在桥梁高性能材料的研发和应用方面也取得了明显进步^[21-23]。

在混凝土方面,C50、C60混凝土得到广泛应用,C80以上高强混凝土在局部部位开始使用,纤维混凝土、轻质混凝土等也得到了研究与应用,同时近年来越来越重视通过提高混凝土材料性能来改善结构性能;多功能混凝土添加剂的发展也为高性能混凝土的应用提供了支撑。

在钢材方面,目前我国Q345、Q370得到大量使用,Q420在桥梁上的应用已逐步展开,Q500已研发成功并开始应用,耐候钢、环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋等也逐步得到应用。

在缆索材料方面,1770 MPa钢丝、1860 MPa钢绞线已实现国产化并在工程中应用,1960 MPa钢丝(锌铝合金)也已研发成功并开展应用。

在复合材料方面,FRP等复合材料在桥梁修复、加固等方面得到了应用,在缆索方面的应用研究也已开展。在智能材料方面,记忆合金、压电材料、光导纤维、智能自修复混凝土等新型材料在桥梁监测检测和加固改造工程中已逐步开展研究和应用。

1.3 桥梁监测检测、评估与管养技术

伴随着桥梁建设的迅猛发展,我国的桥梁监测检测、评估与管养技术得到了快速发展^[24,25]。

在监测技术方面,厘米级实时动态差分式全球定位系统、全系列光纤光栅计等一系列传感器和监测产品得到广泛应用,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,形成了基于双环冗余光纤环网和工业以太网的分布式监测等技术,建成了不少长大桥梁健康监测系统,系统集成技术日臻成熟。

在检测技术方面,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、桥梁动静载试验检测等技术及缆索检查机器人、桥梁检查车等一系列检测装备,桥梁检测手段不断丰富,检测精度和效率得到有效提高。

在评估技术方面,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,

评定指标得到细化;提出了基于桥梁试验检测结果和结构检算的承载能力评定方法,提出了基于可靠性的桥梁承载能力评估、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。

在管养技术方面,碳纤维等复合材料、体外预应力加固等新方法和新工艺开始应用于桥梁维修加固工作中,拉(吊)索更换技术、主梁更换和加固技术等得到了较快发展,形成了较为完善的桥梁养护、维修与加固成套技术成果,建立了较为完善的桥梁养护、维修与加固技术体系。

1.4 桥梁信息化技术

信息化已上升到国家战略,通过信息化技术可以显著提高桥梁的生产效率、性能水平和建养一体化水平,推动桥梁智能化、工业化水平的提升。

桥梁软件的自主化程度和专业水平是评价一个国家桥梁技术水平的重要指标。30多年来我国在桥梁软件的研发和应用方面取得了一些积极进展,在主要功能、计算精度、计算分析效率等方面已接近国外软件水平(表2)^[26]。

桥梁信息化水平的提升将促进国家级桥梁建养一体化平台的建立,实现桥梁全生命周期内各项数据的管理和桥梁状态的实时评估并保障交通安全^[27]。BIM技术作为提高桥梁信息化水平的有效手段,已得到国家各层面的高度重视。交通运输部在“十三五”发展规划中将综合交通信息化作为未来研发重点,完成了《BIM技术在桥梁工程中的开发及应用调研》,正在开展BIM技术在桥梁工程的试点工作。中国铁路总公司和中国交通建设集团开始编制桥梁BIM标准、研发桥梁BIM应用软件、开展BIM工程应用和示范。BIM技术已在试点工程中应用于桥梁三维建模、碰撞检查、施工过程模拟、施工进度管理等。

1.5 桥梁标准规范

依托国内大规模桥梁工程建设,我国桥梁标准化工作得到了快速发展。目前,涵盖桥梁规划、设计、施工、管养等阶段的公路桥梁、铁路桥梁及市政桥梁的标准体系基本形成,除铁路桥梁标准规范仍采用容许应力法外,均已采用现阶段国际通行的以可靠度理论为基础的近似概率极限状态设计方法,公路桥梁标准率先完成了部分外文版的出版,在部分援

表2 中国自主研发的桥梁辅助设计和分析软件

Table 2 Indigenous CAD and analysis softwares for bridge in China

软件类型	典型软件	软件特点
设计分析和施工控制软件	QJX、GQJS、PRBP、BINAS、 桥梁博士	功能: 以杆系单元为主, 具备结构总体计算分析、验算和施工控制等功能 精度与效率: 与国外软件相比, 误差在2%以内, 计算分析效率接近 应用: 在国内得到了广泛应用
桥梁空间效应分析软件	尚无市场认可的专用软件	功能: 关键构件空间应力分析、裂缝分析、疲劳分析等 应用: 主要采用Ansys, Abaqus等国外通用有限元软件
CAD辅助设计软件	方案设计师 桥梁大师	功能: 快速绘制斜弯桥、互通立交桥、常规中小桥梁等的二维设计图纸 应用: 与国内规范结合度好、与实际工程贴合度高, 占据了国内的主要市场
防灾减灾专业软件	数值风洞	功能: 结合研究成果, 理论先进 应用: 桥梁抗风、抗震、防船撞等

外工程中得到应用, 在保障桥梁质量安全、促进产业技术进步等方面发挥着重要作用。

2 存在问题和发展方向

中国桥梁技术虽取得了以上主要进展, 但与发达国家相比, 在创新设计理念、耐久性、高性能材料、软件、装备、标准规范、专业化人才队伍等方面还存在问题和不足, 一些基础理论研究和共性关键技术尚需突破, 施工精细化程度不高, 工业化、信息化和智能化水平还不高, 科技创新与成果转化能力不足, 产业化程度较低, 制约了中国桥梁向以安全、长寿、绿色、高效、智能为特征的可持续桥梁方向发展^[28]。

2.1 桥梁建设技术

桥梁建设技术及工业化、智能化、产业化水平有待进一步提升。

在基本理论与方法体系方面, 国外已开展200年使用寿命超级桥梁工程的基础研究工作, 我国全寿命设计理论方法、基于性能的设计理论方法和多灾害作用下防灾减灾理论方法的系统深化研究与应用仍需加强, 指标和规范体系有待完善与建立。

欧洲、日本、韩国等国都在开展主跨1200~1600 m双塔斜拉桥、主跨700 m以上多塔斜拉桥、主跨2700~3300 m悬索桥、主跨1400 m协作体系桥等大跨度桥梁的技术研究与探索应用。此外, 我国也在计划开展主跨700~1000 m拱桥的技术研究和探索。因此, 我国超大跨径桥梁的结构体系及合理结构型式的研究仍亟待加强, 以迎接未来复杂建设条件下建设超大跨度桥梁带来的技术挑战。

在施工技术方面, 中国桥梁施工技术工业化程度还较低。20世纪90年代加拿大诺森伯兰海峡大桥已

实现上下部全预制结构的工业化建造。美国正在进行系列化、标准化桥梁快速建设技术研究和推广应用。虽然我国近年来短线匹配、整孔架设等工业化技术逐步在特大型桥梁上应用, 但中小跨径桥梁大量现浇作业仍然存在, 工厂预制、现场装配的施工技术尚未形成标准化、系统化, 与建立全行业的工业化建造标准体系还有很大差距, 环境污染和能源浪费仍较普遍, 质量可靠性仍较低, 工业化程度亟待提升。

施工装备性能与可靠性亟待提高, 桥梁智能施工技术及装备亟待研发。尽管我国在打桩船、液压打桩锤、大型浮吊、大直径钻机、地连墙铣槽机、架桥机等大型装备方面均已实现了自主研发, 但这些装备的效率、吨位、可靠性、故障率等与国外装备还有一定差距, 部分装备存在寿命期较短、需频繁修理和更换等问题, 控制系统、液压系统、行走系统等关键核心部件须依赖进口。我国的自动化智能化施工技术研究和应用还处在起步阶段, 目前仅在钢箱梁机器人焊接、预应力智能张拉等方面有一些实践。

在防灾减灾技术方面, 灾变机理研究相对滞后、也不深入, 灾害作用参数的合理取值还存在不确定性, 需加强对多灾害作用的现场采集和原型观测, 从概率性可靠度视角出发创新桥梁防灾减灾理论方法。现有试验平台主要偏重单因素灾害和常规灾害作用模拟, 缺乏多灾害耦合、极端灾害作用的模拟试验能力和合适的试验技术, 同时试验设备系统比较分散, 需进一步整合以提高灾变试验模拟水平。此外, 还需加强数值模拟技术研究, 以逼真分析预测桥梁工程在各种自然和人为灾害下的抗灾能力及工程对环境的影响。现有技术成果主要为提供单一附加刚度或附加阻尼的被动控制装置, 对恶劣环境的自适应程度较弱, 可靠性、耐久性和产业化水平较低, 亟需发

展附加刚度和附加阻尼组合的各类新型结构体系,并结合智能化、信息化技术,研发具有半主动或主动控制功能、控制多灾害耦合作用的新一代桥梁防灾减灾智能控制技术和装备,实现产业化和全面推广应用。

2.2 桥梁新结构与高性能材料

我国桥梁的新结构和高性能材料研发及推广应用还不够,与发达国家相比还有一定差距。

在新结构方面,适用性强、便于推广的新结构开发有待加强。目前大多是根据具体工程需要,着眼于提升结构受力性能,在国外类似工程结构基础上进行局部改进和发展,但在提高结构耐久性、可维修性、方便更换和施工等方面还做得不够,缺乏综合性能优、经济性好、适用性广、可标准化并易于推广的结构型式。超深水设置基础和组合基础的研究与开发也较为滞后。同时,针对新结构在设计理论与方法、数值模拟与试验技术等方面的研究还有待深化和加强。此外,新结构的标准化与推广应用还不够。我国桥梁新结构的开发多源于具体工程,服务于特定对象,很少能形成产业化成果,且标准化程度较低,配套标准规范也相对滞后,大大影响了新结构的推广应用。

在高性能材料方面,国外桥梁混凝土主要采用C60-C80,钢材多采用Q420及以上,强度高于我国,对耐久性、工作性、绿色环保和推广应用等尤为重视。2000年时日本的高性能钢已占桥梁用钢量的22%,美国2000年前后就批量生产并使用了HPS 485W和HPS 690W高性能钢材,国外很多桥梁采用1860 MPa及以上的高强度缆索。相比之下,我国桥梁用高性能材料的强度和性能亟待进一步提升,并形成通用的系列化产品、及时反映到标准规范中。很多高性能材料都是针对具体工程研发,未形成行业通用的系列产品,产业化水平偏低,制约了我国桥梁的进一步发展。此外,复合材料、智能材料等的研究和应用不够,亟待加强纤维复合材料、智能材料、纳米材料、生物材料等新一代建筑材料在桥梁工程中的研究和应用。

2.3 桥梁监测检测、评估与管养技术

随着桥龄的不断增大,更多更复杂的病害和问题会逐步暴露出来,影响桥梁及交通网络的安全和使用,而目前很多基础理论和技术问题还没有很好地解决,还无法满足近百万座桥梁的安全长寿需求。

在监测检测技术方面,无线传感测试技术、数据采集及通讯技术等还存在差距,仪器精度及稳定性还有待提高,高精度监测设备和隐蔽工程检测设备、非接触性检测设备等大多依赖进口,缺乏针对中小桥的快速检测技术与设备和针对大跨度缆索桥梁关键构件的无损检测技术与设备,结构内部缺陷快速检测与诊断前沿技术、关键检测技术和自主装备等远不能满足桥梁养护管理的需求。

在理论方法和评估技术方面,缺乏实用的基于桥梁结构状态和退化模型的长期性能预测、养护规划与决策等方面的理论与方法,桥梁长期性能、承载能力评估及耐久性评估诊断技术等尚需进一步研究突破。

在建管养一体化技术开发和平台建设方面,桥梁养护与维修加固技术多借鉴发达国家的经验,预防性养护技术研究缺乏系统性,基础数据积累和挖掘利用不够;缺乏专门针对国家级或区域级桥梁群的桥梁资产管理系统和智能化信息化技术的开发和应用,相应的管理体制、标准、管理平台系统等方面落后于发达国家;关键管养设备主要依赖进口,自主创新能力还有待提高。

2.4 桥梁信息化技术

我国桥梁信息化技术水平较低、国产核心软件匮乏,严重制约了桥梁向工业化、信息化、智能化方向发展。其中,我国桥梁信息化技术水平低主要表现为支撑软件系统性差,数据采集设备、方法和手段较落后,缺乏适用于桥梁工程的海量数据存储、分析、挖掘等技术。BIM技术在我国桥梁领域的应用刚刚起步,远低于国外的研究和应用水平,尚未搭建起桥梁BIM标准体系,主要以试点工程的局部应用为主,且侧重于方案设计、施工模拟等个别阶段,尚未应用于覆盖桥梁规划设计、建造和运营管理的全寿命周期,未充分实现BIM技术所具有的信息共享、减少能耗、降低成本、缩短工期和实现建养一体化的价值。国内软件大多采用杆系有限元,缺少采用空间板壳单元、实体单元等进行空间效应分析、裂缝分析、疲劳分析等功能。

2.5 桥梁标准规范

我国桥梁标准规范滞后于桥梁技术和产业的快速发展,与发达国家标准规范相比仍存在一定差距。

在基础理论方面,在现有理论体系框架下,亟待

研究解决材料统计特征、正常使用极限状态可靠指标、耐久性设计指标等指标参数缺失的问题,积极跟踪国际标准基础理论发展动态,开展桥梁全寿命设计方法、基于性能的设计方法等方面的进一步研究,为新一代桥梁标准规范理论体系的建立奠定基础。

在标准规范体系方面,当前以公路、铁路、市政划分的桥梁标准规范体系还不能完全适应“综合交通”的发展需求,亟需制定相应的标准体系,并建立国家、行业、地方、企业及团体标准“五位一体”的标准体系,为桥梁产业转型升级提供技术支撑。

同时,现有桥梁标准规范落后于桥梁技术和产业化的快速发展,亟需制修订适应绿色、信息化、智能化、工业化发展的桥梁标准规范,发挥其在推进桥梁产业发展中的基础性和战略引领性作用。此外,限于国家影响力和技术水平,中国桥梁标准的国际认可度还有待提高,对中国桥梁“走出去”的支撑性不足,亟需提升中国桥梁标准规范技术水平,加强外文版翻译出版和宣传工作,积极参与国际标准化活动,加大国际标准跟踪、评估和转化力度,推进优势、特色桥梁标准的国际化,创建中国桥梁标准品牌,以桥梁标准“走出去”带动中国桥梁技术、装备、服务“走出去”。

3 科技计划

21世纪以来新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,德国提出了以智能制造为主题的“工业4.0”战略,李克强总理提出了“互联网+”行动计划,将引发新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业融合创新的产业变革。当前,世界桥梁强国都在为适应新的科技革命和迎接桥梁建养新高潮进行准备,北欧正在筹划新欧亚大陆桥项目“新丝路”(The N.E.W. Corridor: The Northern East-West Freight Corridor);美国正在实施为期20年的“桥梁长期性能研究计划(LTBP, Long-Term Bridge Performance Program)”^[29];日本正在从国家层面实施桥梁检测机器人研发计划^[30];韩国正在实施“Super Bridge 200”计划(即为桥梁提供200年寿命期的先进技术)^[1]。这些都向我们发出警示:为了赶超世界桥梁强国,中国必须尽快规划桥梁科技发展战略、制订新的桥梁科技发展计划,全面提升中国桥梁技术创新能力和水平。

中国桥梁正处于创新与超越的发展阶段,未来10年,中国桥梁产业将步入创新驱动和转型升级的重要战略机遇期,面临3大历史任务:一是要支撑“一

带一路”、长江经济带、京津冀协同发展等国家经济发展战略和“中国制造2025”国家工业重大发展战略、“创新驱动发展”国家科技发展战略;二是要保障庞大已建和新建桥梁的安全长寿;三是要实现科技领先和人才领先的桥梁强国梦。为迎接上述三大任务与挑战,必须解决制约中国桥梁发展的主要问题和不足,进一步提升中国桥梁技术创新能力和水平,打造适应中国桥梁可持续发展的技术体系和产业链,尽快实施以重点专项“智能桥梁”(图2)为主题的“中国桥梁2025”科技计划,并通过组建“中国桥梁产业技术创新战略联盟”保障其顺利实施。

以重点专项“智能桥梁”为主题的“中国桥梁2025”科技计划是中国桥梁未来10年的顶层科技发展规划。其中,按照加强顶层设计、注重全产业链一体化实施的原则,重点专项主要由“桥梁智能设计建造技术及装备”、“桥梁智能管养技术及装备”和“桥梁智能建养一体化技术及平台”3个项目群组成,并按照基础前沿、共性关键技术、系统集成及产业化示范布局16个项目,针对桥梁设计、施工、管养、材料、装备、软件等全产业链,实现互联网、物联网、大数据与云计算等新一代信息技术和桥梁建养技术深度融合,打造以工业化、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,提升桥梁建养技术水平和产业化能力。同时,为了解决现有科技体系中低层次重复、资源分散分隔、没有形成全产业链、成果转化不足和多产业领域合作等问题,按照国家新的科技体系对于“产学研用”协同创新和国家科技计划全产业链一体化实施的要求,拟整合桥梁及相关领域的优势资源,按照“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,形成基础理论研究团队、共性关键技术研发团队和产业化示范基地,组建中国桥梁产业技术创新战略联盟(组建方案见图3),协同有序地推进科技计划的组织实施,并申请成为国家产业技术创新战略联盟。

4 总结

中国桥梁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特大型桥梁,培养了一批桥梁领军人物和中青年技术专家,在世界上荣获了许多大奖,赢得了国际桥梁界的尊重和认可,为未来发展成为世界桥梁强国奠定了坚实的基础。

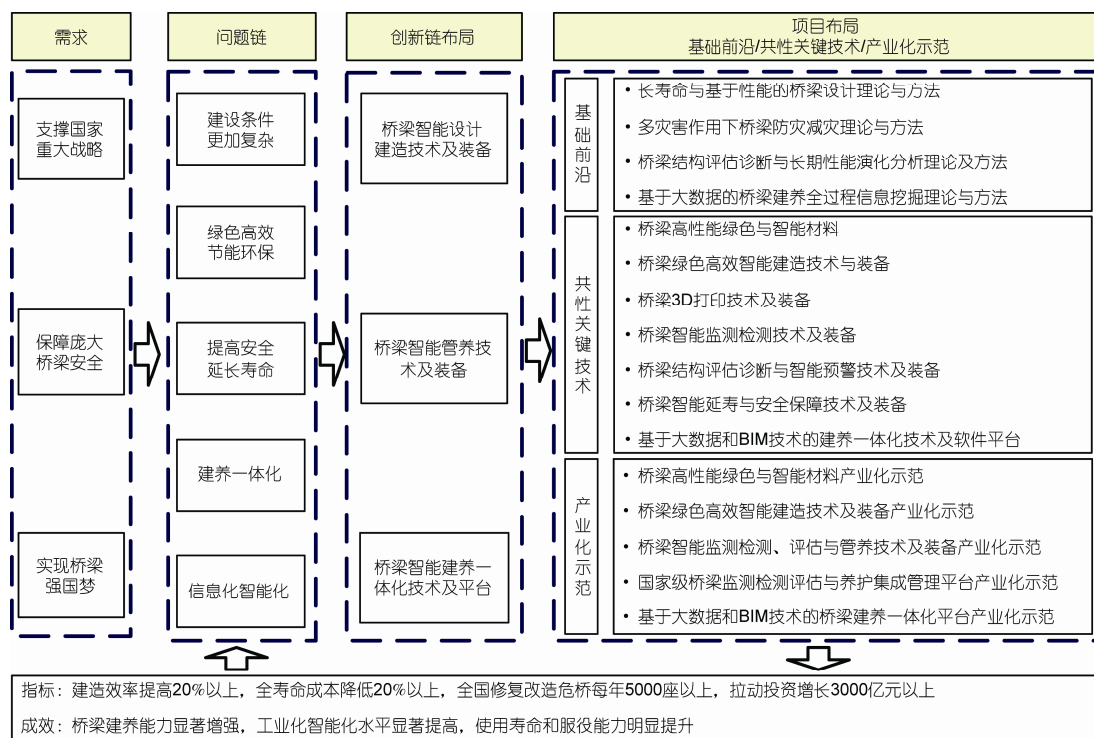


图2 (网络版彩色)“智能桥梁”重点专项方案
Figure 2 (Color online) Scheme of Intelligent Bridge

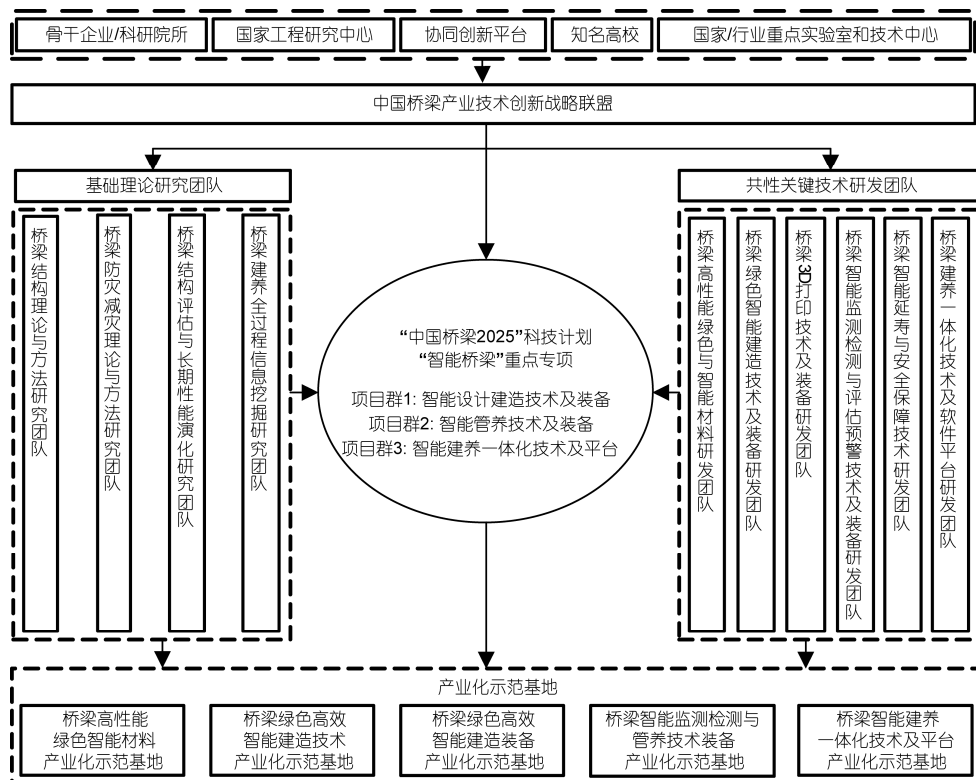


图3 中国桥梁产业技术创新战略联盟组建方案
Figure 3 Construction scheme of China Bridge Industry Technology Innovation Strategic Alliance

但与发达国家相比,在创新设计理念、耐久性、高性能材料、软件、装备、标准规范、专业化人才队伍等方面还存在问题和不足,一些基础理论研究和共性关键技术尚需突破,施工精细化程度不高、耐久性问题突出,工业化、信息化和智能化水平还不高,科技创新与成果转化能力不足,产业化程度较低,制约了中国桥梁向以安全、长寿、绿色、高效、智能为特征的可持续桥梁方向发展。

未来10年,中国桥梁产业将步入创新驱动和转型升级的重要战略机遇期,为完成支撑国家重大发展战略、保障庞大桥梁安全长寿和实现桥梁强国梦三

大历史任务,必须解决制约中国桥梁发展的主要问题和不足,进一步提升中国桥梁技术创新能力和水平,打造适应中国桥梁可持续发展的技术体系和产业链。未来中国桥梁技术应坚持可持续发展方向,重点集中于建设新技术、新结构与高性能材料、监测检测评估与管养技术、信息化技术、标准规范等主要方面,尽快实施以重点专项“智能桥梁”为主题的“中国桥梁2025”科技计划,并组建中国桥梁产业技术创新战略联盟进行组织实施,推动我国桥梁技术的快速健康发展,更好地支撑国家重大发展战略、保障庞大桥梁安全长寿,争取早日实现桥梁强国梦。

致谢 在本文的编写过程中,项海帆、郑皆连、周福霖、周绪红、秦顺全、王景全、杨永斌、缪昌文、聂建国9位院士和交通运输部冯正霖提出了宝贵意见,并与凤懋润教授级高工和李守善、车宇琳、邵长宇、高宗余、包琦玮、徐恭义6位设计大师、李惠教授、石雪飞教授等数十位专家进行了深入的讨论,交通运输部科技司和香山科学会议组委会相关领导也给予了大力支持,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Xiang H F, Pan H X, Zhang S C, et al. Conspectus of Bridge History in China (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2009 [项海帆, 潘洪萱, 张圣城, 等. 中国桥梁史纲. 上海: 同济大学出版社, 2009]
- 2 Xiang H F. Conceptual Design of Bridges (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2011 [项海帆. 桥梁概念设计. 北京: 人民交通出版社, 2011]
- 3 Xiang H F. Lofty Aspiration: Proceeding of Hai-fan Xiang (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2014 [项海帆. 壮心集——项海帆论文集(2000~2014). 上海: 同济大学出版社, 2014]
- 4 Bridge and Structural Engineering Branch of China Highway and Transportation Society (BSEB). Innovation Oriented Contemporary Chinese Bridges (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2009 [中国公路学会桥梁和结构工程分会. 面向创新的中国现代桥梁. 北京: 人民交通出版社, 2009]
- 5 Zhang X G, Liu G, Ma J H, et al. Design Concept and Approach on Sustainable Development of Bridge Engineering. In: Chen A R, Frangopol D M, Ruan X, eds. Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension. London: CRC Press, 2014
- 6 Zhang X G, Chen A R. Kilometer-scale Cable-stayed Bridge—Structural System, Performance and Design (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2010 [张喜刚, 陈艾荣. 千米级斜拉桥——结构体系、性能与设计. 北京: 人民交通出版社, 2010]
- 7 Meng F C, Xu G P, Liu G, et al. The Approach and Its Application of Bridge Life Cycle Design (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2012 [孟凡超, 徐国平, 刘高, 等. 桥梁工程全寿命设计方法及工程实践. 北京: 人民交通出版社, 2012]
- 8 Ma J H, Chen A R, He J. General framework for bridge life cycle design. Front Archit Civil Eng China, 2009, 3: 50–56
- 9 Zhang X G, Chen A R. Sutong Bridge—Design and Structural Performance (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2010 [张喜刚, 陈艾荣. 苏通大桥设计与结构性能. 北京: 人民交通出版社, 2010]
- 10 Fen M R. Overfly: Exploration and Thinking of Traffic Construction (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2008 [凤懋润. 跨越-交通建设的探索与思考. 北京: 人民交通出版社, 2008]
- 11 Fang Q H, Gao Z Y, Li J W. Development course and prospect of steel railway bridges in China (in Chinese). J Archit Civil Eng, 2008, 25: 1–5 [方秦汉, 高宗余, 李加武. 中国铁路钢桥的发展历程及展望. 建筑科学与工程学报, 2008, 25: 1–5]
- 12 Qin S Q. Long span bridges on high speed railway lines (in Chinese). J Railway Eng Soc, 2008(Suppl): 53–61 [秦顺全. 高速铁路大跨度桥梁. 铁道工程学报, 2008(增刊): 53–61]
- 13 Zhang H, Zhang Y T, You X P. New construction technique and prospect of long span highway bridges (in Chinese). In: Proceeding of the 20th National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communication Press, 2012. 455–470 [张鸿, 张永涛, 游新鹏. 大跨度公路桥梁建造新技术与展望. 见: 第二十届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2012. 455–470]

- 14 Zheng J L. Development and technical advance of arch bridges in China (in Chinese). In: Proceeding of Hubei Province Highway Science and Technology Innovation Forum. Beijing: China Communication Press, 2006. 16–20 [郑皆连. 我国拱桥发展及技术进步. 见: 湖北省公路科技创新高层论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006. 16–20]
- 15 Qin S Q. Bridge Construction Control (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2007 [秦顺全. 桥梁施工控制. 北京: 人民交通出版社, 2007]
- 16 Ge Y J, Xiang H F. Recent development of bridge aerodynamics in China. J Wind Eng Industr Aerodyn, 2008, 96: 736–768
- 17 Li J Z, Guan Z G. Performance-based seismic design for bridges (in Chinese). Eng Mech, 2011, 28(Suppl): 24–30 [李建中, 管仲国. 基于性能桥梁抗震设计理论发展. 工程力学, 2011, 28(增刊): 24–30]
- 18 Liu G, Liu T C, Guo A X, et al. Dynamic elastic response testing method of bridge structure under wind-wave-current action. In: Proceeding of the 25th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference. Hawaii, USA, June 21–26, 2015
- 19 Nie J G. Steel-Concrete Composite Bridges (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2011 [聂建国. 钢混凝土组合结构桥梁. 北京: 人民交通出版社, 2011]
- 20 Zhang X G, Liu Y Q. Cable-tower Composite Anchorage (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2010 [张喜刚, 刘玉擎. 组合索塔锚固结构. 北京: 人民交通出版社, 2010]
- 21 Miao C W, Liu J Z, Tian Q. Concrete crack and control (in Chinese). Eng Sci, 2013, 4: 30–35 [缪昌文, 刘建忠, 田倩. 混凝土的裂缝与控制. 中国工程科学, 2013, 4: 30–35]
- 22 Lü Z T. Application of high performance FRP and innovations of structure engineering (in Chinese). J Archit Civil Eng, 2005, 22: 1–5 [吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新. 建筑科学与工程学报, 2005, 22: 1–5]
- 23 Li H, Ou J P. Smart concrete and structures (in Chinese). Eng Mech, 2007, 24(Suppl): 45–61 [李惠, 欧进萍. 智能混凝土与结构. 工程力学, 2007, 24(增刊): 45–61]
- 24 Sun L M, Sun Z, Dan D H, et al. Research and application of health monitoring system for large span bridges in China (in Chinese). In: Proceeding of the 17th National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communications Press, 2006. 663–670 [孙利民, 孙智, 谈丹辉, 等. 我国大跨度桥梁结构健康监测系統研究与应用现状. 见: 第十七届全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006. 663–670]
- 25 Zhang J Q. Status and development of inspection and assessment technology of bridge's load-bearing capacity in China (in Chinese). J Highway Transp Res Dev, 2006, 23: 15–17 [张劲泉. 我国公路桥梁承载能力检测评定技术的现状与发展. 公路交通科技, 2006, 23: 15–17]
- 26 Lü J M. Development and prospect of bridge structure analysis technique (in Chinese). J Highway Transp Res Dev, 2008, 25: 17–20 [吕建鸣. 桥梁结构分析技术的发展与展望. 公路交通科技, 2008, 25: 17–20]
- 27 Zhang J P. Research and application of BIM technology (in Chinese). Constr Technol, 2011, 2: 15–18 [张建平. BIM 技术的研究与应用. 施工技术, 2011, 2: 15–18]
- 28 Feng Z L. Bridge construction development should have a new pursuit (in Chinese). China Bridge Culture Forum, 2014. 12 [冯正霖. 桥梁建设发展应有新追求. 中国桥梁文化论坛, 2014. 12]
- 29 Brown M C, Hammer M L, Hooks J M. Long term bridge performance program: Identifying long term bridge performance data priorities. In: Griffis L, Helwig T, Waggoner M, et al., eds. Structures Congress, 2009: Don't Mess with Structural Engineers-Expanding Our Role. ASCE, 2009. 431–438
- 30 Mahmoud K M. Recent Developments in Bridge Engineering. Netherlands: CRC Press, 2003

Status and prospect of technical development for bridges in China

ZHANG XiGang^{1,2}, LIU Gao^{1,2}, MA JunHai^{1,2}, WU HongBo^{1,2}, FU BaiYong^{1,2} & GAO Yuan^{1,2}

¹CCCC Highway Consultants CO., LTD., Beijing 100088, China;

²CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre CO., Ltd., Beijing 100088, China

As the key node and pivotal project of interoperability of traffic facilities, bridge is an important guarantee for the development of national economy and social safety. Bridge construction plays an important role in resolving production capacity surplus of traditional industries, promoting the development of new strategic industries and the third industry, boosting the integration and upgrading of industries, and stimulating economic growth. In the past 30 years, by learning and introducing international advanced technology and self-innovation, Chinese bridges have achieved a leapfrog and made a number of independent innovation to drive Chinese bridges from massive quantity to quality development. However, comparing with the developed countries, China still falls behind in many aspects, including key technologies, materials, softwares, equipments, standardization and specification, etc. The huge demand of bridge construction, maintenance, and safety, as well as the trend of industrialization, informatization and intelligentization require us to examine the technological development of Chinese bridges from a higher starting point and put forward the future technological development direction, target and task of Chinese bridges aiming at national strategic, which needs with the principle of problem-oriented and demand-oriented. This paper summarizes the main achievements and shortages of Chinese bridges in five respects: construction technology, new structure and high performance materials, monitoring-inspection-assessment and maintenance technology, information technology, standard and specification and points out that, in order to support major national development strategy and assure the safety and longevity of huge amount of bridges as well as realize the dream of being a world bridge power, we must further improve the level of technological innovation for Chinese bridges through implementing the science and technology plan “China Bridge 2025” with the theme of momentous project named as “Intelligent Bridge” as soon as possible, which is ensured through the form of China Bridge Industry Technology Innovation Strategic Alliance.

Chinese bridges, construction technology, maintenance technology, information technology, standard and specification, Intelligent Bridge, science and technology plan

doi: 10.1360/N972015-00912