



Research
Bridge Engineering—Review

中国大跨度高速铁路桥梁技术的发展与前景

秦顺全*, 高宗余

China Railway Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 July 2017

Accepted 17 November 2017

Available online 21 November 2017

关键词

高速铁路

大跨度桥梁

多功能组合桥梁

高性能材料

三索面空间结构

整体化工厂制造

摘要

中国高速铁路发展迅速, 建设了大量跨越大江大河和深山峡谷的大跨度桥梁, 已经建成的高铁桥梁最大跨度为 630 m, 正在建设中的沪通长江大桥和五峰山长江大桥跨度达 1092 m。为了解决大跨度桥梁载重大、结构刚度要求高带来的技术难题, 开发了系列多功能组合桥梁建造技术, 开展了三索面三主桁、斜主桁、板-桁架组合、钢-混凝土组合等新型结构的创新与实践, 对高性能材料研发和桥梁结构整体化制造及架设技术进行了探索。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the 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. 概述

中国幅员辽阔、人口众多, 铁路在国家交通运输体系中一直占主导地位。20世纪, 中国新建铁路桥梁设计运行速度一直不超过 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 1998年开工建设的秦沈客运专线基础设施的最高设计运行速度提高到 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 这是中国建设更高速铁路的第一次尝试。21世纪初, 以京沪高铁和武广客运专线开工建设为标志, 中国开始了大规模的高速铁路建设, 最高设计速度达到 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。到2016年年底, 高铁通车里程达22 000 km。

桥梁是高速铁路的重要组成部分。中国已建成的22 000 km高速铁路中, 桥梁总长度超过50%, 其中京沪高速铁路桥梁长度更是达到线路全长的85%以上, 这

些桥梁中大多采用跨度32 m的预应力混凝土简支箱梁。同时, 中国地理和气候具有多样性, 西部有干燥高原、巍巍高山、深大峡谷、湍急河流; 东南部濒临大海, 河流宽阔。要跨越宽阔水域和高山峡谷还必须建设大跨度桥梁。截至目前, 中国已建成和在建的跨度超过200 m的大跨度高铁桥梁已达60余座, 其中跨度超过1000 m的2座, 超过500 m的约10座。表1列举了有代表性的中国高速铁路大跨度桥梁。

桥梁通行高速铁路的先决条件是要保证高铁列车在桥梁上运行时的安全性和舒适性, 必须建立高速列车-桥梁耦合动力分析模型, 综合考虑桥梁结构、运行车辆、轨道等因素, 对桥梁结构进行动力设计和评价。从桥梁结构的角度来讲, 核心是要求桥梁具有更好的刚度, 以获得更好的轨道平顺性(见表2)。

* Corresponding author.

E-mail address: qinshq@cae.cn (S. Qin).

表1 中国部分大跨度高铁桥梁主要参数表

Name of bridge	Main span (m)	Design operation speed (km·h ⁻¹)	Bridge type	Function	Completion year
Tianxingzhou Yangtze River Bridge in Wuhan City	504	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	4R 6H	2009
Dashengguan Yangtze River Bridge in Nanjing City	2 × 336	300	Steel truss arch bridge	6R	2011
Jinan Yellow River Bridge on Beijing–Shanghai High-Speed Railway	3 × 168	350	Steel truss arch bridge	4R	2011
Zhengxin Yellow River Bridge on Beijing–Guangzhou High-Speed Railway	5 × 168	350	Steel truss girder cable-stayed bridge	2R 6H	2012
Huanggang Yangtze River Bridge on Wuhan–Huanggang High-Speed Railway	567	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	2R 4H	2014
Zhaoqing Xi River Bridge on Nanning–Guangzhou High-Speed Railway	450	250	Steel box arch bridge	2R	2014
Tongling Yangtze River Bridge on Hefei–Fuzhou High-Speed Railway	630	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	4R 6H	2015
Anqing Yangtze River Bridge on Nanjing–Anqing High-Speed Railway	580	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	4R	2015
Beipan River Bridge on Shanghai–Kunming High-Speed Railway	445	300	Reinforced-concrete arch bridge	2R	2016
Hutong Yangtze River Bridge	1092	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	4R 6H	Under construction
Wufengshan Yangtze River Bridge	1092	250	Steel truss girder suspension bridge	4R 8H	Under construction
Wuhu Yangtze River Bridge on Shangqiu–Hangzhou High-Speed Railway	588	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	4R 6H	Under construction
New Baishatuo Yangtze River Bridge in Chongqing City	432	250	Steel truss girder cable-stayed bridge	6R	Under construction
Yibin Jinsha River Bridge on Chengdu–Guiyang High-Speed Railway	336	250	Steel box arch bridge	4R 6H	Under construction
Yachi River Bridge on Chengdu–Guiyang High-Speed Railway	436	250	Steel truss arch bridge	2R	Under construction
Jiujiang Yangtze River Bridge on Hefei–Jiujiang High-Speed Railway	672	250	Steel box girder cable-stayed bridge	4R	Under design

In the Function column, R represents railway and H represents highway; e.g., 4R 6H represents a four-line railway and six-lane highway.

表2 轨道平顺性要求比较表

Item	Unit	Mainline railway (200 km·h ⁻¹)	High-speed railway (350 km·h ⁻¹)
Beam end slope (maximum)	× 10 ⁻³ rad	3	Ballast track: 2 Ballast-less track: 1
Track irregularity (maximum)	mm·(3 m) ⁻¹	3.0	1.5
Track super elevation time-variable rate (maximum)	mm·s ⁻¹	/	25
Longitudinal slope (maximum)	‰	6	20
Radius of railway track (vertical curve; minimum)	m	15 000	25 000
Radius of railway track (horizontal curve; minimum)	m	3 500	7 000

为实现高速列车在桥梁上运行的需求，必须对结构、材料、建造施工技术地开展系统研究。

2. 多功能合建桥梁技术

桥位也是一种资源。长江是中国的黄金水道，航运业发达，岸线资源十分宝贵。既要考虑建设桥梁对环境、

岸线和长江通航的影响，又要满足不断增长的铁路、公路和其他交通方式过江需求，将公路、铁路、市政道路和城市轨道交通等建设在同一座桥梁上，是工程师的最好选择。

2.1. 公铁两用桥

公路和铁路建设在同一座桥上。如沪通长江大桥通

行沪通铁路和通苏嘉城际铁路外，还承载无锡至南通高速公路[1]（图1）；武汉天兴洲长江大桥通行京广高铁和沪汉蓉铁路外，还承担武汉城市三环线交通功能[2,3]（图2）；五峰山长江大桥[4]（图3）、成贵铁路金沙江大桥也都是高铁和高等级公路的合建桥梁。

2.2. 多条铁路共用桥

同一座桥上通行两条或两条以上的铁路，如安庆长

江大桥通行南京至安庆城际铁路和阜阳至景德镇铁路共4线[5]，新白沙沱长江大桥通行渝黔客专、渝长客专和渝黔铁路共6线[6]，大胜关长江大桥（图4）通行京沪高铁、沪汉蓉客专和南京地铁共6线[7,8]。

公铁两用桥和多条铁路共用桥可更好地利用大跨桥梁所必须的结构宽度和刚度，同时，与分别建设多座单一通道桥梁相比，可节省大量工程材料，从而显著节约工程总投资。

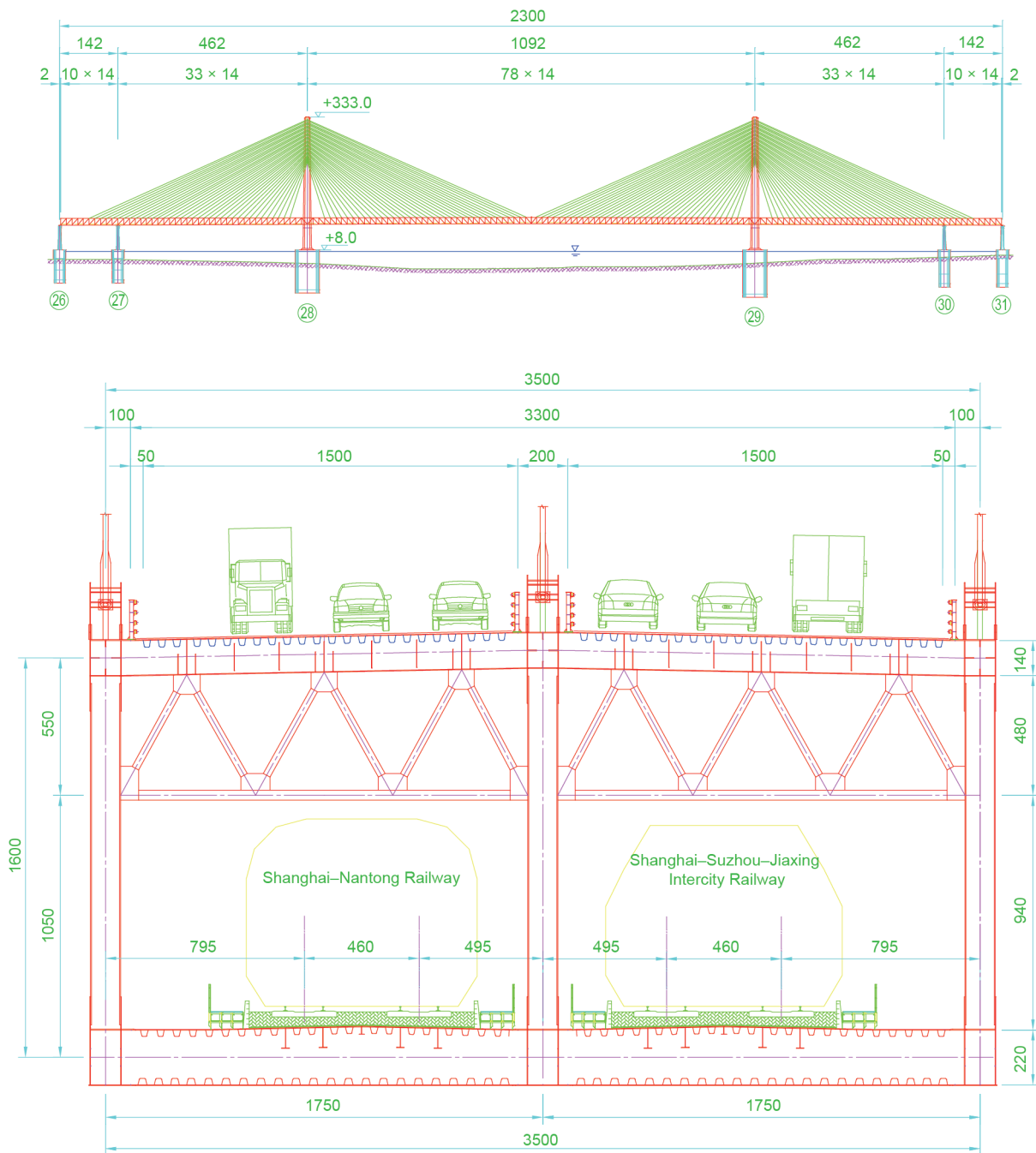


图1. 沪通长江大桥（单位：m）。



图2. 武汉天兴洲长江大桥。(a) 三索面；(b) 横截面（单位：m）；(c) 建成桥梁。



图3. 五峰山长江大桥。

3. 复杂空间结构

3.1. 三索面三主桁结构

中国客货共线铁路使用中-活载，用荷载集度为 $80 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 的匀布荷载模拟车辆，5个集中力模拟牵引机车，每个 220 kN ，间距 1.5 m ，重载铁路的荷载更大。高速铁路使用的ZK荷载，其荷载集度也有 $64 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。可见，一条单线铁路的活载集度即相当于一组6~8车道的公路。

所以铁路桥梁所承载的活载非常大，使得结构内力巨大。

近年建设的钢桁梁公铁两用桥，通常是上层为6~8车道的高速公路，铁路通常为4线铁路甚至6线铁路，桥梁的宽度较大，其横截面变形成为影响高速铁路运营速度的一个难题。变形是由于结构的柔性产生的，减小变形的唯一途径就是提高刚度，在材料种类确定后，提高刚度的途径有两个：一是加大梁的截面；二是减小梁的跨度。

在常规的两主桁的中间增加一个桁架组成三片主桁的桁架结构，形成横向布置的两个净空框格，将4线铁路两个一组分别置于一个框格内。采用三片主桁后，相当于截面横向从简支梁变成了连续结构，受力更加合理，变形减小，提高了轨道的平顺性。对应地，斜拉索也设计成三个索面，这种三索面三主桁结构首先应用于武汉天兴洲长江大桥[9]（图2），此后，推广应用于铜陵大桥、沪通大桥、安庆铁路大桥等斜拉桥和大胜关大桥的钢桁拱等工程。

为实现这样的空间结构，中铁大桥勘测设计院集团

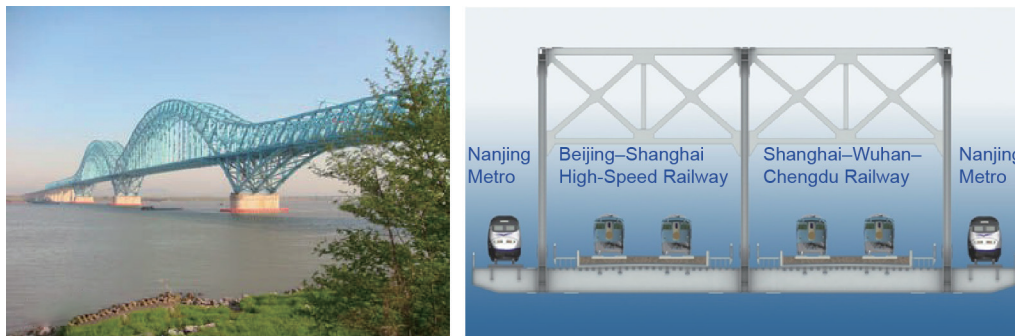


图4. 大胜关长江大桥。

有限公司研发了专用的桥梁设计软件，可进行中-活载、ZK荷载、公路荷载等多种活载加载，并能进行公路铁路双层加载。

3.2. 斜主桁结构

京广高铁郑新公铁两用黄河大桥上层通行6车道高速公路，下层通行双线京广高速铁路[10,11]（图5）。上层公路路面宽度大，下层铁路路面宽度小，针对这种情况，将钢桁梁设计成倒梯形结构。斜主桁钢桁梁结构可以显著节省钢材用量，武汉至黄冈城际铁路黄冈公铁两用长江大桥[12]也采用了这种结构形式。

4. 组合结构

中国高速铁路大跨度桥梁采用的组合结构大致有三种情形。其一为板桁组合结构，即钢桁梁的桥面板结构与桁架共同受力。早期的钢桁梁结构，公路桥面为纵横梁上搁置小块预制的公路桥面板，它们只负责将公路荷载传递给主桁节点，桥面结构不参与主桁受力，桥面板的作用未能充分发挥。其二为钢-混凝土组合结构，钢桁梁桥面采用正交异性钢板与混凝土板混合桥面。公路桥面采用混凝土结构，可以从根本上避免钢桥面带来的疲劳寿命和铺装寿命普遍存在的问题。

近年来，随着高铁桥梁的跨度越来越大，提高桥梁的刚度成为一个重要设计目标，使桥面板与主桁结合共同受力，形成板-桁组合结构是提高桥梁刚度的最为有效、最经济的途径。天兴洲公铁两用长江大桥的设计中即采用了这样的板-桁组合结构（图6），主桥斜拉桥中跨及部分边跨共756 m区段采用公路面正交异性钢板与主桁架结合共同受力，两侧各168 m区段采用公路面混凝土桥面板与主桁架结合共同受力的组合结构。后续建设的黄冈公铁两用长江大桥[12]、铜陵公铁两用长江大桥[13]等项目中，不仅公路桥面板与主桁结合，而且铁

路桥面板也与主桁结合，公路桥面板和铁路桥面板分别与桁梁的上下弦杆共同组成桁架梁的上下弦截面，共同承担结构的总体受力，极大增加了主梁结构的刚度，对高铁列车的运行十分有利。

郑新公铁两用黄河大桥的上层公路路面采用分块预制的钢筋混凝土结构，并且通过剪力钉与钢主桁的上弦结合形成共同受力的组合结构[14]（图5）。此外，沪通大桥、平潭海峡公铁大桥的多孔80~112 m简支钢桁梁的上层公路路面和下层铁路路面均采用了钢筋混凝土结构，形成了双层钢-混凝土组合结构。

另外一种组合结构是钢桁-混凝土组合拱桥。成贵铁路鸭池河大桥是跨度436 m的中承式拱桥（图7），采用钢桁拱骨架，拱脚部分包覆混凝土，拱顶部分区段拱肋上翼缘填筑混凝土[15]。

5. 高性能材料

5.1. 高性能桥梁钢

随着桥梁跨度越来越大，特别是多功能合建桥梁的建设，结构内力越来越大，大胜关大桥为主跨 2×336 m的钢桁拱桥，通行6线铁路，最大杆力达到150 MN；沪通长江大桥通行4线铁路6车道高速公路，主航道桥为主跨1092 m的斜拉桥，主梁最大压力达750 MN，迫切需要研发更高强度的桥梁用钢。

为此，先后成功研发了Q420q和Q500q桥梁钢。Q420q首先在大胜关大桥中获得应用[16]，Q500桥梁钢已在沪通大桥中应用[17]。

为保持结构的合理刚度和尺寸，在同一座大桥的主梁不同区段采用不同强度等级钢材。大胜关大桥受力较大的拱肋杆件采用Q420钢，其余部位采用Q370钢[18]；沪通大桥主梁靠近主塔和辅助墩附近的压力较大，采用Q500钢，压力稍小的区段采用Q420钢，压力较小的区段采用Q370钢[19]。

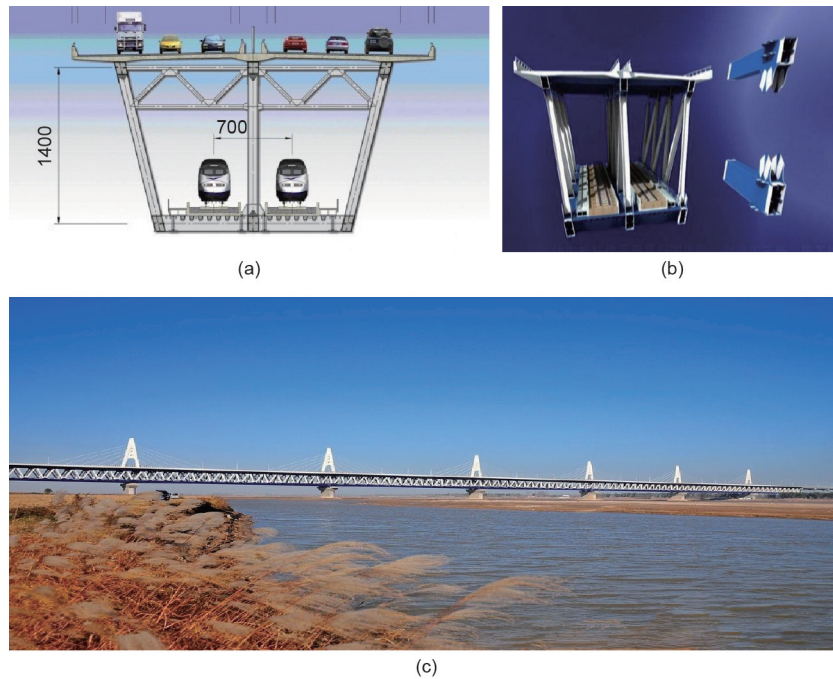


图5. 郑新公铁两用黄河大桥。(a) 主桁架梁的横截面 (单位: mm); (b) 主桁架梁草图; (c) 建成桥梁。

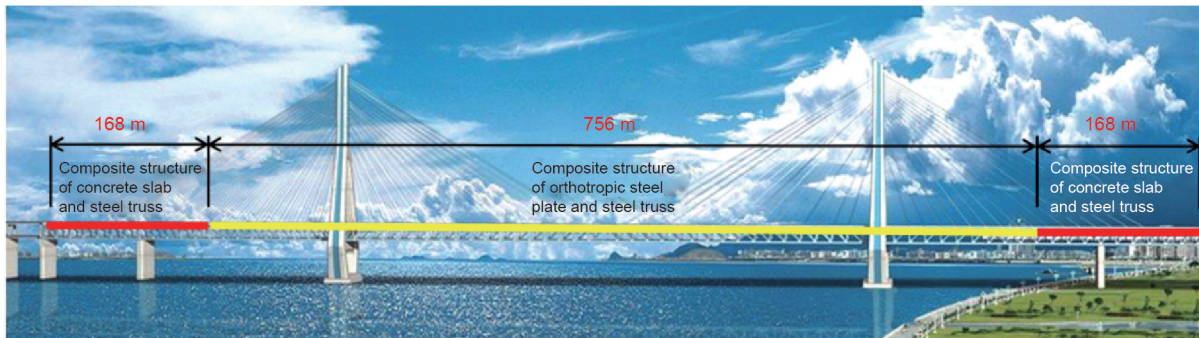


图6. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥复合结构。



图7. 成贵铁路鸭池河大桥。

采用高强度材料可减轻结构自重、减少材料用量, 从而减少对资源和能源的消耗。

5.2. 高性能斜拉索

高强度高耐久性拉索体系也在高铁桥梁中获得开发

应用。和桥梁钢发展道路一样, 桥梁用斜拉索钢丝的强度也走过了一条从1570 MPa、1670 MPa、1770 MPa到1860 MPa不断提高的道路, 在建的沪通长江大桥斜拉索研发了强度为2000 MPa的钢丝, 并采用锌铝镀层以进一步提高其耐久性[19]。2015年建成通车的铜陵公铁两用大桥是一座钢桁梁斜拉桥, 主跨630 m, 通行4线铁路和6车道高速公路, 是世界上已建成的最大跨度公铁两用斜拉桥, 其斜拉索采用平行钢绞线拉索体系, 钢绞线拉索内每根绞线基本相互独立, 可有效防止风雨振的产生[20]。

6. 钢桁梁整体化工厂制造

传统上, 钢桁梁的制造、架设均是以一根一根杆件为单位进行的, 这样的模式需要的施工机械设备简单,

但有大量的高空工作，对工程质量、工人作业安全都具有较大的风险。

天兴洲公铁两用长江大桥首次采用了整节段架设新技术[21]，即将钢桁梁一个节间的所有主桁杆件、横联杆件、铁路面纵横梁、公路桥面板均在工厂连接好，形成一个重650 t的整节段[图8 (a)]后运输、安装，显著减少了高空作业量。铜陵公铁两用长江大桥首次采用了全焊接桁片单元技术[22]，即以钢桁梁的每两个节间为一组，将所有构件分为若干个制造单元，每个制造单元在工厂全部采用焊接工艺制造，如每片主桁的两根（两个节间）上弦杆、两根下弦杆、两根竖杆、两根斜杆在工厂全部采用焊接连接在一起，形成桁片后运输、安装[图8 (b)]。沪通长江大桥则将钢桁梁每两个节间的所有三片主桁、公路和铁路桥面、横向连接结构全部在工厂全焊接，形成重达2000 t的整体后运输安装[23]。平潭海峡公铁大桥的80 m和88 m两种跨度的钢桁梁则更进一步，整孔在工厂全部焊接成整体后运输安装[24]。

7. 大跨度高铁桥梁的技术发展与展望

7.1. 多塔缆索承重桥梁技术

我国诸多河流（如长江）、海峡水域宽阔、航运繁忙，作为桥梁工程师必须保证桥梁建设与维护黄金水道的协调可持续发展。多塔缆索承重桥梁可提供连续多孔大跨，将上行、下行航道分孔布置，具有显著的经济优势[25]。

就承载公路荷载的桥梁而言，中国在多孔大跨缆索承重桥梁建造技术方面已有进展。多塔斜拉桥已建成多座，早期的公路桥有宜昌夷陵长江大桥[26]、洞庭湖大桥[27]等，近年来陆续建成了武汉二七长江大桥[28]、济南建邦黄河大桥[29]、嘉绍大桥[30]等。多塔悬索桥技术也有所突破，率先在世界上建成了3座千米级的大跨

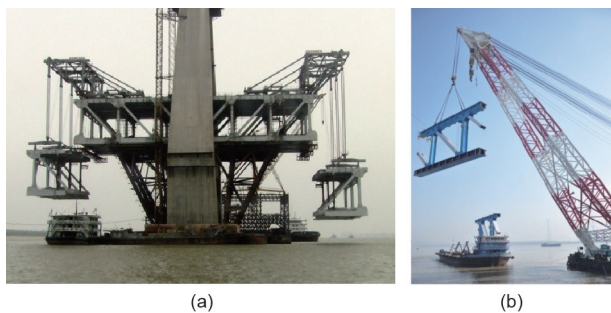


图8. 钢桁梁的整体制造和安装。(a) 天兴洲公铁两用长江大桥主桁架梁全段安装；(b) 铜陵公铁两用长江大桥全焊接桁架平面构件组装。

度三塔悬索桥，即泰州长江大桥[31]（跨度 2×1080 m）、马鞍山长江大桥[32]（跨度 2×1080 m）和武汉鹦鹉洲长江大桥[33]（跨度 2×850 m），目前正在建设的还有采用钢桁梁双层桥面的温州瓯江北口大桥[34]（跨度 2×800 m）。铁路桥方面，蒙华铁路洞庭湖大桥采用了主跨 2×408 m的三塔斜拉桥。相信通过这些工程的建设不断的技术积累，为未来琼州海峡通道（图9）、渤海湾通道建设桥梁方案采用更大跨度的公铁两用多塔斜拉桥和多塔悬索桥储备了技术，打下了坚实的基础。

7.2. 基础工程的工厂化、大型化预制

如前所述，大跨度铁路桥梁的上部结构在工厂化、预制化技术上已积累了丰富的经验，另一方面，大型深水基础工程的工厂化建造技术也取得了一定的成果，商合杭铁路芜湖公铁两用长江大桥和大连星海湾大桥均采用了设置基础，芜湖公铁桥采用的是岩石地基上的预制钢壳设置基础，星海湾大桥采用的是沙土地基上的预制混凝土沉箱基础。未来需要以建设跨海峡大桥为目标，研究适应百米水深、深厚覆盖层条件下的新的基础结构、施工装备及相关施工技术。

7.3. 材料科学的支撑

要建造更大跨度的桥梁必然需要材料科学的进步和支撑，不断提高钢和混凝土等传统建桥材料的性能是一个方向，但就现有的科学技术水平而言，要大幅度提高钢材的强度似有难度。另一方面，由于大跨度桥梁恒载重量占总荷载重量的80%以上，减轻结构的自身重量应该是一个主要努力方向。纤维复合材料可能是最好的选择。



图9. 琼州海峡跨海大桥设计方案。

Compliance with ethics guidelines

Shunquan Qin and Zongyu Gao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Gao ZY. Technical characteristics of main bridge of Hutong Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2014(2):1–5. Chinese.
- [2] Qin SQ, Gao ZY, Pan DF. Research of key techniques for Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2007(1):1–4. Chinese.
- [3] Gao ZY. Overall design of Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2007(1):5–9. Chinese.
- [4] Tang HQ, Xu GY, Liu HS. Feasibility analysis of applying of suspension bridge type to railway bridges. *Bridge Constr* 2017(2):13–8. Chinese.
- [5] Xiao HZ, Xu W, Gao ZY. Design of Anqing Changjiang River Railway Bridge. *Bridge Constr* 2009(5):6–8. Chinese.
- [6] Wang ZP, Du P. A study on the co-action between floor system and main truss of six-line railways steel truss girder cable-stayed bridge. *Eng Technol Res* 2017(2):14–7. Chinese.
- [7] Gao ZY, Yi LX, Xiao HZ. Dashengguan Bridge—The largest span steel arch bridge for high-speed railway. *Struct Eng Intern* 2010;20(3):299–300.
- [8] Yi LX. Design and study of long span steel truss arch bridge of Dashengguan Changjiang River Bridge in Nanjing. *Bridge Constr* 2009(5):1–5. Chinese.
- [9] Xu W. Design of steel girder of main bridge of Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2008(1):4–7. Chinese.
- [10] Gao ZY. Zhengzhou Yellow River Road-cum-Railway Bridge, China. *Stahlbau* 2012;81(2):151–5.
- [11] Xiao HZ, Gao ZY. Structural design on main part of Yellow River Rail-Road Bridge in Zhengzhou. *Railway Invest Survey* 2007(S1):30–4. Chinese.
- [12] Li WH, Yang GW, Wei X. Design of steel truss girder cable-stayed bridge of 567m main span of Huanggang Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2013(2):10–5. Chinese.
- [13] Wan TB, Zhang Q. Key techniques for design of main bridge of Tongling Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2014(1):1–5. Chinese.
- [14] Gao ZY. Technical innovations of Zhengzhou Huanghe River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2010(5):3–6. Chinese.
- [15] Wang YW. Construction techniques for erection of arch rib of main bridge of Guizhou Yachi River Bridge on Chengdu-Guiyang Railway. *Bridge Constr* 2017;47(1):104–8. Chinese.
- [16] Mei DP, Yi LX. Criterion of mechanical behavior of welded joints of Q420qE high strength structural steel. *Bridge Constr* 2010(5):20–3. Chinese.
- [17] Yi LX, Gao ZY, Chen WX. Development and application of high-performance structural steel for Hutong Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2015(6):36–40. Chinese.
- [18] Xiao HZ, Yi LX. Design of superstructure of main bridge of Nanjing Dashengguan Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2010(1):1–4. Chinese.
- [19] Gao ZY, Mei XY, Xu W, Zhang YF. Overall design of Hutong Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2015(6):1–6. Chinese.
- [20] Li W, Zhang Q. Study of anchoring parameters design for stay cable of Tongling Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *World Bridges* 2013(6):67–71. Chinese.
- [21] Yang JH, Hu HB. Assembling techniques for full blocks of steel truss girder of Wuhan Tianxingzhou Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2008(6):5–7. Chinese.
- [22] Yan HB, Zheng ZY, Huang XY. Manufacturing techniques for all-welded units of steel girder of Tongling Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2014(1):6–10. Chinese.
- [23] Guan Y, Chen T, Tang Y, Song HF. Techniques for segmental assembling of main ship channel of Hutong Changjiang River Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2016(6):13–7. Chinese.
- [24] Sun YJ, Xu W. Design of composite double decks and fully welded steel truss girder of Pingtan Strait Rail-cum-Road Bridge. *Bridge Constr* 2016(1):1–5. Chinese.
- [25] Gao ZY. Cable-supported bridges with multiple towers. Beijing: China Railway Publishing House; 2016. Chinese.
- [26] Shao CY. Study for structural system and performance of 3-pylon cable-stayed Yiling Changjiang River Bridge. In: *Proceedings of the 9th National Conference on Structural Engineering*; 2000 Sep 16–20; Chengdu, China. Beijing: Engineering Mechanics Press; 2000. p. 272–7. Chinese.
- [27] Hu JH. Project design of Dongting Lake Bridge. *Hunan Commun Sci Technol* 1998;24(1):24–9. Chinese.
- [28] Chen W, Zhang DP. Research of structural system schemes for Wuhan Erqi Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2011(1):1–4. Chinese.
- [29] Wei J, Wang BB. Jinan Jianbang Yellow River Main Bridge design. *Energy Conserv Environ Protect Transport* 2015(3):88–91. Chinese.
- [30] Zhang XG, Wang RG, Lin DJ, Wu WS. Structural system design of multiple towers cable stayed Jiashao Bridge. *Highway* 2013(7):286–9. Chinese.
- [31] Yang J. Technical ideas of conceptual design of three-tower suspension bridge for main bridge of Taizhou Changjiang River Highway Bridge. *Bridge Constr* 2007(3):33–5. Chinese.
- [32] Yang GW, Xu HG, Zhang Q. Study of key techniques for three-tower suspension bridge of Maanshan Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2010(5):7–11. Chinese.
- [33] Wang ZB, Yang J, Zhou P. Study of steel and concrete composite girder suspension bridge scheme for Yingwuzhou Changjiang River Bridge. *Bridge Constr* 2010(4):52–6. Chinese.
- [34] Gao ZY, Shi FH. Key techniques of design of main bridge of Oujiang River North Estuary Bridge in Wenzhou. *Bridge Constr* 2017(1):1–5. Chinese.