

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.143

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中国公铁两用桥主桥结构体系分析与展望

孙建鹏, 周鹏, 刘银涛, 肇举, 李青宁, 高畅

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:中国公铁两用桥发展至今已有近 80 年的历史,从早期跨径小、结构受力简单的梁式体系发展到目前大跨径的拱式体系以及大跨径、超大跨径的斜拉、悬索体系等。通过收集中国已建和在建的以上 4 种结构体系的公铁两用桥相关资料,对中国 4 种结构体系的公铁两用桥主桥主梁结构、基础以及其他结构部分在结构设计、施工工艺、材料性能上的发展趋势进行了分析。分析发现:4 种结构体系公铁两用桥主桥主梁结构设计中的主桁形式、桥面系、联结系在结构上由繁至简、由离散拼装至整体栓焊;主桁桁式在力学特性上与各结构体系公铁两用桥主梁受力特点相辅相成,充分发挥了材料的性能和结构的受力特点,主梁施工工艺趋于系统化、高效化、经济化,其材料性能趋于优质化;基础的类型没有明显变化,但其施工方法实现了自我创新,材料性能趋于优质化;拱式体系公铁两用桥主桥主拱的结构设计趋于新型化,施工工艺趋于复杂化,在材料的选择上趋于科学和经济化;斜拉和悬索体系公铁两用桥除主梁和基础部分外,其他部分结构的设计趋于科学化,施工趋于经济化、智能化,材料性能趋于优质化。

关键词:公铁两用桥;结构体系;主桥;发展趋势

中图分类号:TU318;U443.3

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2020)02-0080-15

Development trend and analysis of main bridge about the rail-road bridge in China

Sun Jianpeng, Zhou Peng, Liu Yintao, Zhao Ju, Li Qingning, Gao Chang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The development of the Chinese rail-road bridge has been nearly 80 years old, from the early beam system with small span and simple structural force to the current arch system with large span, as well as the cable-stayed and suspended cable system with large span and super large span. This paper collects relevant information of the rail-road bridge of the four structural systems that have been built and under construction in China, analyzing the main beam structure and foundation of the main bridge of the four kinds of structural systems in China, and the development trend of structural design, construction

收稿日期:2019-05-30

基金项目:国家自然科学基金(51408453, 51508453);陕西省自然科学基金(2016JQ5075);高等学校博士学科点专项(20136120120022);陕西省教育厅科研计划(17JK0463)

作者简介:孙建鹏(1981-),男,副教授,博士,主要从事结构静力、动力及稳定性能研究, E-mail: sunjianpeng2001@163.com.

Received:2019-05-30

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51408453, 51508453); Fundamental Research Fund Project of Natural Science of Shaanxi Province (No. 2016JQ5075); Special Research Fund of Doctoral Programs of Higher Education (No. 20136120120022); Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education Project (No. 17JK0463)

Author brief: Sun Jianpeng (1981-), associate professor, PhD, main research interests: structural static, dynamic and stability studies, E-mail: sunjianpeng2001@163.com.

technology and material performance of different structural parts. Through analysis, the following conclusions are drawn: in terms of structure, the main raft form, bridge deck and joint system of the main girder of the four structural systems are from simple to simple, from discrete assembly to integral bolt welding; in terms of mechanical properties, the main truss and the main girder bridges of each structural system complement each other, this fully exerts the performance of the material and the stress characteristics of the structure, the main beam construction process tends to be systematic, efficient, and economical, and its material properties tend to be high quality; there is no significant change in the type of foundation, but its construction method has achieved self-innovation and the material performance tends to be high quality; the main arch of the arch-type system of the rail-road bridge tends to be new in design, and tends to be complicated in the construction process, and tends to be scientific and economical in the selection of materials; in addition to the main beam and the foundation part of the cable-stayed and suspension system, the design of other parts of the structure tends to be scientific, the construction tends to be economical and intelligent, and the material performance tends to be high quality.

Keywords: rail-road bridges; structural system; main bridge; development trend

公铁两用桥的发展最早始于欧洲,现存最早的公铁两用桥是位于法国的 Cize-Bolo-zon 高架桥^[1],建于 1875 年。中国的第一座公铁两用桥是位于哈尔滨的三棵树松花江桥,由日本铁道研究所设计、施工,建于 1934 年。中国自行设计、施工的第一座公铁两用桥——钱塘江大桥,建于 1937 年,标志着中国自行设计、自行建造公铁两用桥的开始。

中国公铁两用桥经历了新中国初期的缓慢发展和改革开放至今的快速发展两个阶段^[2-4]。第 1 阶段:从新中国成立至改革开放时期,中国公铁两用桥发展缓慢。在结构设计方面:桥梁结构体系以最简单的简支体系为主,主桥上部结构形式采用了强度大、刚度大、稳定性强的钢桁梁;下部结构主要由桩基础和实体墩组成,少许由沉井基础和实体墩组成;在施工方面,主梁主要采用杆件现场铆接、主桁以伸臂法施工,基础以钻孔管柱法施工;在建筑材料使用上,从最初的主桁结构材料需要向发达国家引进到自行制造,这主要与当时中国经济和桥梁技术的发展状况有关^[5-8]。第 2 阶段:从改革开放至今,中国经济的迅速发展带动了我国公铁两用桥梁建设的发展。在这一时期,中国公铁两用桥不仅从设计、施工工艺、材料性能及加工工艺上都实现自主创造、自我创新和突破,而且在结构设计、施工工艺技术水平上不断地创造世界奇迹,不断地突破世界桥梁历史上不可能完成的挑战。数十年累积的桥梁建造技术和经验,使中国公铁两用桥在结构体系上已经从小跨径的简支体系发展至大跨径的拱式体系、超大跨径的斜拉体系和悬索体系,同时,这 3 种体系的公铁两

用桥主跨径之最均在中国;大跨径的拱式体系、超大跨径的斜拉体系和悬索体系公铁两用桥在施工工艺难度和技术上均是史无前例的,中国实现了自行设计的创新和挑战^[9-19];从工厂的加工工艺、运输到现场吊装和安装的一系列过程更为系统、高效和经济。

笔者通过收集中国已建和在建的公铁两用桥相关资料,对中国 4 种结构体系的公铁两用桥主桥主梁结构、基础以及其他结构部分在结构设计、施工工艺、材料性能上的发展趋势进行分析,为以后中国公铁两用桥的建设提供借鉴。

1 中国公铁两用桥发展现状

中国的公铁两用桥主要分布在长江、黄河及一些内流河和沿海地区。中国典型的已建、在建公铁两用桥如表 1 所示。

图 1 是中国 4 种结构体系的公铁两用桥主桥跨径汇总图。从图 1 纵轴(主跨径)数据可以看出,中国公铁两用桥主跨径梁桥分布在 50~200 m 之间,拱桥分布在 200~600 m 之间,斜拉桥分布在 300~700 m 之间,而悬索桥分布在 1 000~1 400 m 之间。其中,拱式体系、斜拉体系公铁两用桥最大主跨径的世界纪录均在中国。从横轴(桥梁建成年份)数据分布情况可看出,在 1990 年以前,中国的公铁两用桥只有梁式体系;2000 年以后,拱式、斜拉、悬索体系开始出现并逐渐发展。从这两方面综合分析得出,中国公铁两用桥的发展与中国经济的发展息息相关,从新中国成立至改革开放初期,中国经济发展缓慢从而导致中国公铁两用桥的发展也相对缓慢;改革开放以后,中国经济的高速发展推动了中国公铁两用桥梁建设的快速发展。

表1 中国公铁两用桥汇总表
Table 1 Summary of rail-road bridges in China

序号	桥名	建成年	全长/m	主桥跨径/m及结构	线路+车道数	桥面布置	连接方式	主桁结构材料
1	钱塘江大桥	1937	1 453	16×65.84 简支钢桁梁+2×14.63 板梁	单线+2 车道	双层	铆接	铬合金钢炭钢
2	武汉长江大桥	1957	铁路:1 315 公路:1 670.4	9×128 连续钢桁梁	双线+6 车道(22.5)	双层	铆接	CT3 桥梁钢
3	兰州甘机厂黄河桥	1959		2×67 简支钢桁梁	单线	双层	铆接	炭钢
4	南京长江大桥	1968	铁路:6 772 公路:4 589	128+9×160 连续钢桁梁	双线+4 车道(19.5)	双层	铆接	16 锰桥梁钢
5	甘肃靖远公铁两用桥	1970	350.28	5×64 简支钢桁梁	单线+2 车道	单层	铆接	炭钢
6	湖北枝城长江大桥	1971	铁路:1 742.3 公路:1 744.8	5×128+4×160 铆接钢桁梁	双线+2 车道(6.45)	单层	铆接	炭钢
7	九江长江大桥	1994	铁路:7 576.09 公路:4 460.122	6×162 钢桁+(180+216+180) 钢桁梁 柔拱+2×216 钢桁	双线+4 车道(18)	双层	栓焊	15MnVNq 钢
8	香港青马大桥	1997	2 200	1377 吊桥	双线+6 车道	双层	栓焊	14MnNbq 钢
9	芜湖长江大桥	2000	铁路:10 520.96 公路:4 460.122	120+8×144 连续钢桁梁+(180+312+180) 矮塔斜拉桥+2×120 连续钢桁梁	双线+4 车道(21)	双层	栓焊	14MnNbq 钢
10	山东滨州黄河公铁两用桥	2006	2 652.9	120+3×180+120 连续钢桁梁	双线+4 车道	双层	栓焊	14MnNbq 钢
11	重庆朝天门大桥	2009	1 741	552 钢桁拱桥	双线+6 车道	双层	栓焊	Q345qD、 Q370qD、 Q420qD 钢
12	郑州黄河公铁两用桥	2009	9 176.6	5×120 连续钢桁组合梁+(120+5×168+120)矮塔钢桁组合梁斜拉桥	双线+6 车道	双层	栓焊	Q370qE 钢
13	武汉天兴洲长江大桥	2010	4 657.1	98+196+504+196+98 三索面钢桁斜拉桥	4 线+6 车道(27)	双层	栓焊	Q370qE 钢
14	黄冈公铁两用长江大桥	2015	4 008.2	81+243+567+243+81 钢桁斜拉桥	双线+4 车道	双层	栓焊	Q370qE 钢
15	铜陵公铁两用长江大桥	2015	6 032	90+240+630+240+90 钢桁斜拉桥	4 线+6 车道(35)	双层	栓焊	Q370qE 钢
16	湖北公安公铁两用长江大桥	2016	6 137.8	99+182+518+182+99 钢桁斜拉桥	双线+4 车道(25.2)	双层	栓焊	Q370qE 钢
17	山东石济客运专线黄河公铁两用大桥	2016	1 792	3×180 刚性加劲悬臂连续钢桁梁	4 线+6 车道	双层	栓焊	Q370qE 钢
18	松花江公铁两用桥	2016	1 267.9	2×94 简支组合拱桥+(96+2×144+96)连续钢桁梁+6×94 简支钢桁拱结构	双线+6 车道	双层	栓焊	Q370qE 钢
19	沪通公铁两用长江大桥	2017	11 072	142+462+1092+462+142 钢桁斜拉桥	4 线+6 车道	双层	栓焊	Q370qE、 Q420qE、 Q500qE 钢
20	宜宾金沙江公铁两用桥	2017	1 875	336 钢箱拱桥	4 线+6 车道	双层	焊接	Q370qE、 Q420qE 钢
21	三门峡黄河公铁两用桥	2018	5 663.75	84+9×108+84 钢桁组合梁	4 线+6 车道	双层	栓焊	Q370qE 钢

续表 1

序号	桥名	建成年	全长/m	主桥跨径/m 及结构	线路+车道数	桥面布置	连接方式	主桁结构材料
22	镇江五峰山公铁两用桥	在建	6 409	1 092 钢桁梁悬索	4 线+8 车道	双层	栓焊	Q370qE、Q420qE、Q500qE 钢
23	芜湖长江公铁两用大桥	在建	4 780	99.3 + 238 + 588 + 224 + 85.3 三索面钢桁斜拉桥	4 线+8 车道	双层	栓焊	Q370qE、Q420qE、Q500qE 钢
24	平潭海峡公铁两用桥	在建	14 399.1	(532+364+336) 双塔钢桁混合梁斜拉桥	双线+6 车道	双层	栓焊	Q370qD 钢

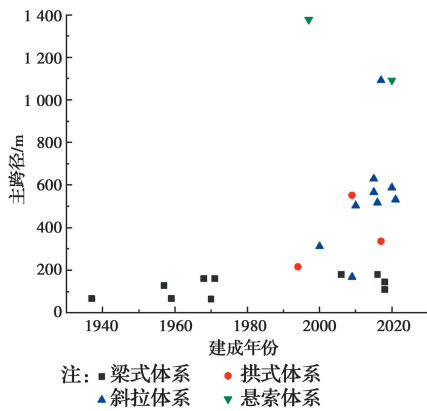


图 1 中国 4 种结构体系的公铁两用桥主桥跨径汇总表

Fig. 1 Summary of spans of main beam of rail-road bridges with four structural systems in China

2 4 种结构体系的公铁两用桥主桥发展趋势及分析

公铁两用桥主桥主要包括两部分,即上部结构和下部结构。中国已建和在建的公铁两用桥,从结构形式和受力特点两方面来看,4 种结构体系的主桥主梁及基础均有着相似之处。

2.1 主梁发展趋势及分析

中国已建和在建的 4 种结构体系公铁两用桥主梁的主桁架结构均采用了上弦杆与下弦杆平行的钢桁架结构,其各个组成部分如表 2 所示。

表 2 中国 4 种结构体系公铁两用桥主桥主梁设计汇总表

Table 2 Summary of main girder design of main beam of rail-road bridges with four structural systems in China

结构形式	主桁桁式	断面分布形式	桥面板	桥面系	节点形式	节点连接方式	联结系
梁式体系	带竖杆菱形桁式	双片平弦主桁	混凝土桥面板	纵横梁体系	节点处杆件拼装	铆接	纵向交叉平面联结系
	华伦桁式	三片平弦主桁	正交异性桥面板	密布横梁体系	整体节点	焊接	
	无竖杆三角形桁式						
拱式体系	带竖杆菱形桁式	双片平弦主桁	钢筋混凝土桥面板	纵横梁体系	整体节点	栓接	纵向交叉平面联结系
	“N”字形桁式	板梁	正交异性桥面板			焊接	无联结系
斜拉体系	“N”字形桁式	双片平弦直桁	混凝土桥面板	纵横梁体系	整体节点	栓接	纵向交叉平面联结系
	带竖杆三角形桁式	双片平弦斜桁	正交异性桥面板	密布横梁体系		焊接	无联结系
	无竖杆三角形桁式	三片平弦直桁	正交异性钢箱桥面				横向三角平面联结系
		三片平弦斜桁					
悬索体系		双片平弦主桁	混凝土桥面板	纵横梁体系	整体节点	栓接	纵向交叉平面联结系
	华伦桁式	横向三角平面联结系	三片平弦主桁	正交异性桥面板	密布横梁体系		焊接

2.1.1 主梁形式 图2、图3分别给出了4种结构体系公铁两用桥主梁的主桁桁式示意图和汇总图。如图2、图3所示,中国公铁两用桥主桥的主梁桁式主要采用了5种形式:华伦式、“N”字形、带竖杆菱形、无竖杆三角形和带竖杆三角形。从建成年份可以看出,改革开放之前,公铁两用桥的主梁桁式主要采用带竖杆菱形。这主要受当时桥梁设计与建造技术偏低、使用的材料性能较差等条件限制,需要通过增加上下桁片之间的腹杆数量和连接来保证桥梁结构的整体刚度和稳定性。改革开放以后,随着桥梁建造技术以及材料性能的提高,公铁两用桥主桥的主梁桁式经历了由繁到简,从杆件多、连接复杂的带竖杆菱形到杆件少、连接简单的无竖杆三角形和“N”字形的发展历程。

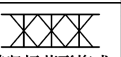
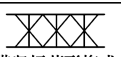
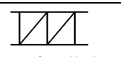
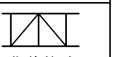
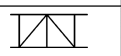
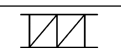

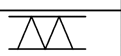
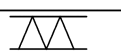
梁式体系	拱式体系	斜拉体系	悬索体系
 带竖杆菱形桁式	 带竖杆菱形桁式	 “N”字形桁式	 华伦式
 华伦式	 “N”字形桁式	 带竖杆三角形桁式	
 无竖杆三角形桁式		 无竖杆三角形桁式	

图2 4种结构体系公铁两用桥主桥主梁主桁桁式示意图

Fig.2 Schematic diagram of main girder truss of main beam of rail-road bridges with four structural systems

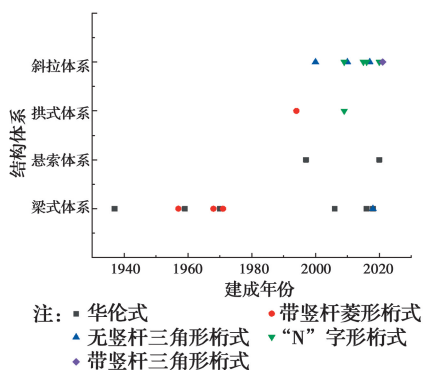


图3 4种结构体系公铁两用桥主桥主梁主桁桁式汇总图

Fig.3 Summary diagram of main girder truss of main beam of rail-road bridges with four structural systems

从力学特性上来看,4种结构体系公铁两用桥主桥主梁的受力特点不同,其主桁桁式结构的受力特点也有所不同。在竖向荷载作用下,梁式体系公铁两用桥主桥的主梁支座处所受的剪力较大而跨中所受的弯矩较大;华伦式竖杆主要承担主桁所受的竖向剪力,同时,在竖向荷载作用下,分担了斜腹杆

在竖向所受的分力,斜腹杆的对称布置不仅可平衡主桁节点处所受到的水平力,而且可提高主桁的整体刚度和稳定性。带竖杆菱形桁式中的竖杆与华伦式中的竖杆受力特点相似,斜腹杆与竖杆连接形成的菱形结构,可将主桁所受的竖向力均匀分配给各个腹杆,同时,可增加主桁的整体刚度和稳定性,斜腹杆杆件长度较小,减小了受压斜腹杆屈曲的可能性。在改革开放以前,中国梁式体系的公铁两用桥主桥主梁桁式采用了带竖杆菱形桁式。改革开放至今,主要采用了华伦式。在竖向荷载作用下,悬索体系公铁两用桥主桥的主梁主桁与吊杆连接处的腹杆所拉力大。华伦式中的竖杆可抵消主桁所受的拉力,同时,充分发挥了钢材抗拉强度大的特点,斜腹杆不仅可分担主桁竖向所受的拉力,而且可增加主桁得整体刚度和稳定性。因此,华伦式也适用于悬索体系公铁两用桥。在竖向荷载作用下,拱式体系公铁两用桥主桥的主梁主桁的受力特点与悬索体系的主桁受力特点相似。“N”字形桁式的竖杆与华伦式的竖杆受力特点近似,斜腹杆未对称布置,所以,在视觉通透性上,“N”字形要优于华伦式,适用于大跨径拱式体系公铁两用桥主桥的主梁桁式;在竖向荷载作用下,斜拉体系公铁两用桥主桥的主梁斜拉索与主桁连接节点处的腹杆受拉,在斜拉索的作用下,弦杆受到沿纵桥向的轴向力。“N”字形斜腹杆未对称布置,在斜拉索的作用下,主桁避免了受压斜腹杆的产生,所以,“N”字形适用于斜拉体系公铁两用桥主桥的主梁桁式。

综上所述,4种结构体系公铁两用桥主桥主梁桁式的采用,不仅与中国桥梁建造技术息息相关,而且与各结构体系主梁受力特点相关。

2.1.2 主梁断面形式 图4、图5分别给出了4种结构体系公铁两用桥主梁的横断面示意图和汇总图。

如图4、图5所示,公铁两用桥主桥的主梁横断面主要采用双片、三片主桁桁架结构。梁式和拱式体系公铁两用桥主桥的主梁横断面主要采用双片平弦直桁。斜拉体系和悬索体系公铁两用桥主桥的主梁横断面主要采用三桁片平弦直桁、斜桁、直桁+斜桁等形式。梁式和拱式体系公铁两用桥主桥的跨度较小,在相同的车道分布条件下,主梁的宽跨比较斜拉和悬索体系公铁两用桥主桥主梁的宽跨比大,主梁的横向刚度也较大。所以,梁式和拱式体系公铁

两用桥主桥的主梁断面形式可以采用双桁片主桁架结构。斜拉和悬索体系公铁两用桥主桥的跨度较大、车道数也较多。在斜拉体系公铁两用桥中,主梁断面形式不仅要满足主梁的横向刚度和竖向变位要求,而且需要抵抗有索区主桁所受由斜拉索作用引起的轴向力。因此,斜拉和悬索体系公铁两用桥主桥的主梁断面形式主要采用三桁片主桁结构,或者桥面系采用截面抵抗距较大的钢箱截面。但是,主梁桁片的数量和布置形式还需要根据线路规划的交通量、施工难度、钢材用量等多方面综合考虑,这样才能体现公铁两用桥建造过程中的安全性和经济性。

从建成年份可以看出,2000 年以前,公铁两用桥主桥的桥面系均采用纵横梁体系,2000 年至今,公铁两用桥主桥的桥面系近 90%采用密布横梁体系。

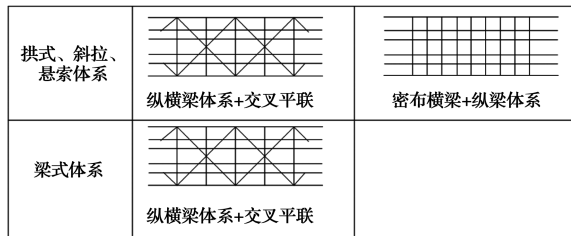


图 6 4 种结构体系公铁两用桥主桥桥面系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of main bridge deck system of rail-road bridges with four structural systems

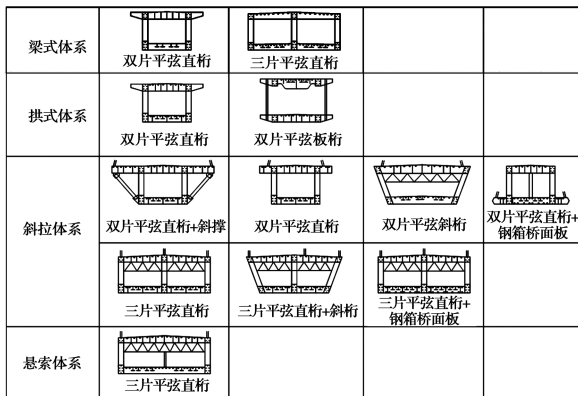


图 4 4 种结构体系公铁两用桥主桥主梁横断面示意图

Fig. 4 Cross-sectional schematic diagram of main girder of rail-road bridges with four structural systems

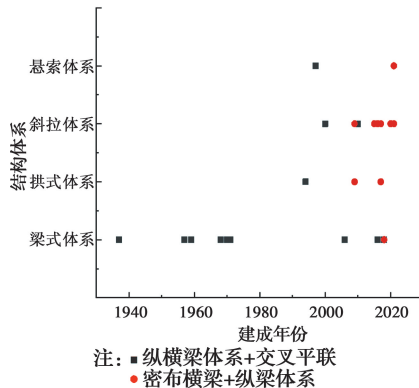


图 7 4 种结构体系公铁两用桥主桥桥面系汇总表

Fig. 7 Summary of main girder deck system of rail-road bridges with four structural systems

纵横梁体系可提高主梁横桥向刚度,但是纵横梁与联结系之间连接复杂,导致结构局部受力复杂、施工复杂和施工周期长等缺陷。密布横梁体系具有施工快、增大主梁横向刚度和减小主梁竖向变位等特点,同时,在中国交通快速发展背景下,中国公铁两用桥也需要满足快速建造模式。此时,密布横梁体系的优点完全适用于当下中国公铁两用桥的建设^[20-23],可逐渐取代纵横梁体系。

2.1.4 桥面板 公铁两用桥主桥的桥面板主要采用混凝土桥面板和正交异性钢桥面板这两种类型。桥面板类型的选择是根据主桥的载重要求、跨径大小、主梁整体刚度和稳定性等因素来确定,其中,已建和在建的 4 种结构体系公铁两用桥主桥的公路和铁路桥面板分布情况如图 8 所示。

由图 8 可以看出,公铁两用桥主桥的桥面板主要采用了混凝土桥面板和正交异性钢桥面板两大类。梁式体系公铁两用桥主桥的公路桥面板主要采用混凝土桥面板,铁路桥面板主要采用混凝土桥面

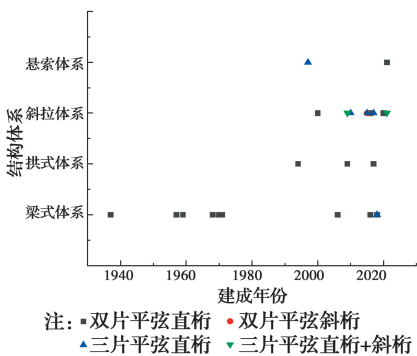


图 5 中国四种结构体系公铁两用桥主桥主梁横断面形式汇总表

Fig. 5 Summary of main girder cross section forms of rail-road bridges with four structural systems

2.1.3 桥面系 图 6、图 7 分别给出了 4 种结构体系公铁两用桥主桥的桥面系示意图和汇总表。

如图 6、图 7 所示,公铁两用桥主桥的桥面系主要采用了纵横梁体系、密布横梁体系两大类。梁式体系公铁两用桥主桥的桥面系主要采用纵横梁体系,拱式、斜拉和悬索体系主要采用密布横梁体系。

板或正交异性钢桥面板。拱式体系、斜拉体系和悬索体系公铁两用桥主桥的公路和铁路桥面板均主要采用正交异性钢桥面板。从建成年份可以看出,在2000年以前,公铁两用桥主桥的公路桥面板主要以混凝土桥面为主,铁路桥面以明桥面和混凝土桥面板为主,这与当时公铁两用桥的交通量小、载重要求低的特点有关,其中,公路主要是以国道为主,铁路主要是以单线或双线铁路为主^[24-26]。2000年至今,随着中国经济的高速发展、交通量和载重要求的激增,4种结构体系的公铁两用桥主桥的跨径和桥面宽度也随之增大。为满足主桥主梁整体刚度和稳定性的设计要求,桥面板采用了自重更轻,强度更大的正交异性钢桥面板。

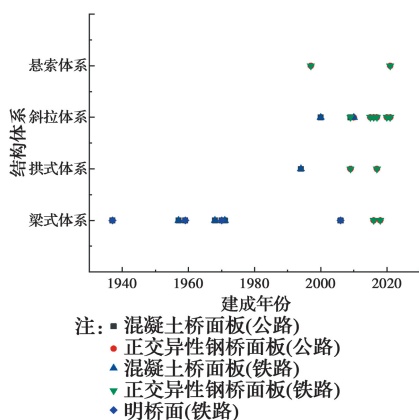


图8 4种结构体系公铁两用桥主桥桥面板汇总图

Fig. 8 Summary of main girder deck of rail-road bridges with four structural systems

综上所述,公铁两用桥主桥桥面板发展从自重较大、强度较低、耐久性差的混凝土桥面板趋于自重轻、强度更大、稳定性好的正交异性钢桥面板和高强合金钢桥面板。但是,正交异性钢桥面板有着抗疲劳性差、抗腐蚀性差等缺点,尤其是抗疲劳性差这一问题,是当下桥梁建设中一直未能解决的问题^[27-34],导致桥面板的寿命周期只有十几年、甚至几年。因此,钢桥面板的疲劳问题将是公铁两用桥主桥未来发展需要重视和解决的关键问题。

2.1.5 主桁节点 改革开放以前,中国公铁两用桥主桥主桁节点是采用铆钉将主桁弦杆与腹杆在现场拼装而成的节点。20世纪90年代初期,整体节点首次运用到中国钢桁桥当中,整体节点是采用焊接方式将弦杆与节点板焊接成整体结构的节点^[35-37],整体节点可在工厂组件拼装,方便运输,不仅减少了杆件在施工现场拼装的工程量,而且缩短了施工周期。所以,从20世纪90年代初至今,中国公铁两用

桥主桥的主桁节点一直采用整体节点。

2.1.6 主桁结构连接形式 图9~图11分别给出了钢桁杆件典型的连接形式。从图9~图11可以看出,公铁两用桥主桥主梁的弦杆与弦杆、弦杆与腹杆、弦杆与横梁以及弦杆与联结系之间主要采用铆接、栓焊和全焊的连接方式^[38-39]。在改革开放以前,中国公铁两用桥主桥主梁的弦杆与弦杆、弦杆与腹杆、弦杆与横梁以及弦杆与联结系之间主要采用铆接的连接方式,改革开放至今,主要采用栓焊和全焊的连接方式。九江长江大桥建设中采用栓焊的连接方式之后,公铁两用桥主桥主梁各组成部分之间的连接方式不再采用铆接。因为铆接与栓焊、全焊相比,栓焊和全焊不仅可提高主梁局部杆件之间受力的整体性和主梁的整体受力性能,而且可缩短主梁架设施工的工期、降低现场拼装的危险性。但焊缝也存在局部应力集中和疲劳的问题,这是当下和未来公铁两用桥主桥主梁设计与施工需要重视的问题。

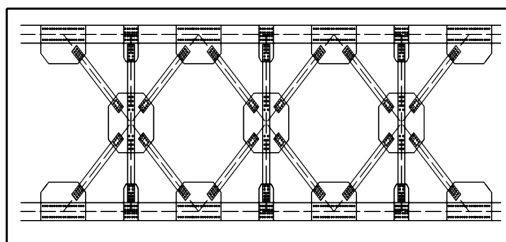


图9 钢桁杆件铆接示意图

Fig. 9 Schematic diagram of riveting of steel truss

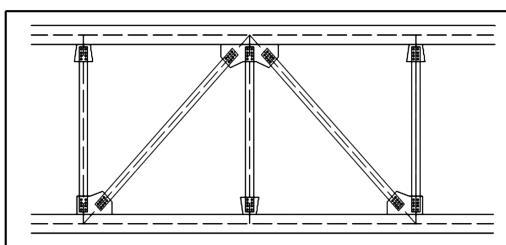


图10 钢桁杆件栓焊连接示意图

Fig. 10 Schematic diagram of bolt-welded connection of steel truss

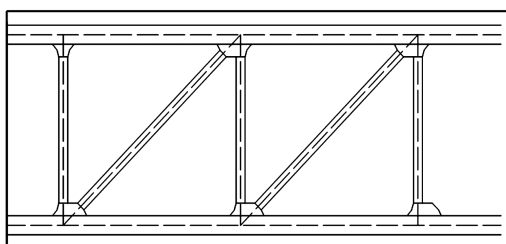


图11 钢桁杆件全焊接示意图

Fig. 11 Schematic diagram of full welding of steel truss

2.1.7 主梁架设方法 公铁两用桥主桥主梁的架设施工方法不仅与主桥结构体系、主桁结构形式和主桥跨径大小等有关,而且与建造时的施工条件、施工环境和经济环境等因素有关。在改革开放以前,中国公铁两用桥主桥的主梁主要采用简支和连续的钢桁梁结构形式,跨径偏小、桥面高程小,所以,主梁架设施工主要采用伸臂施工法、平衡悬臂架设施工法和临时墩架设施的施工方法。改革开放至今,中国公铁两用桥主桥的建设主要采用大跨径的拱式体系以及超大跨径的斜拉和悬索体系,不再采用梁式体系。在建的三门峡黄河公铁两用桥主梁架设施工是中国首次在梁式体系公铁两用桥中采用顶推施工法^[40],主要利用主桁结构是长联大跨的特点。拱式体系公铁两用桥主桥主梁的架设方法与拱桥结构形式和受力特点相联系,在主拱结构施工完成之后,主梁的架设以主拱为依托进行节段吊装;斜拉体系公铁两用桥主桥主梁的架设均采用对称悬臂吊装的施工方法,将主塔作为平衡施工平台,斜拉索控制主梁下挠;悬索体系公铁两用桥主桥主梁的架设方法与悬索桥结构受力特点相关,采用以主缆为施工平台,从主桥跨中向桥塔两侧对称吊装完成的施工方法^[41-43]。

综上所述,由于主桁结构杆件现场拼装的复杂性、施工设备和施工技术经验的缺乏、材料性能偏低和建造资金不足等因素,早期公铁两用桥主桥主梁架设施的施工周期长、施工危险性高、施工难度大。随着经济的迅速发展、桥梁建造技术的提升和材料性能的优化,公铁两用桥主桥主梁的主桁结构杆件连接可在工厂加工完成,然后将小节段主桁结构运输至安装位置,根据主桥结构体系的受力特点,再进行吊装完成。整个流程趋于系统化、高效化和经济化。

2.1.8 主梁结构材料 公铁两用桥主桥主梁结构材料主要是钢材,最早采用铬合金钢、碳钢和进口的 CT3 桥梁钢,后来自行制造 16Mn 钢、15MnVNq 钢、14MnNbq 钢和 Q345~Q500qE 钢等不同材质的桥梁用钢^[44-46]。

随着公铁两用桥主桥跨度的增加、交通量的激增和桥梁载重要求的提高,在需要满足主梁竖向变位、整体刚度和整体稳定性的设计要求下,主梁作为主桥的主要承重结构,不仅需要采用承载能力强的结构形式,而且其材料性能也需要提高和优化。因此,可通过加工钢材、添加有利微量元素以及合金元

素等措施,实现钢材材质的优化;也可通过加大钢板的厚度来提高结构的整体刚度和承载能力。但如果钢板厚度增加,屈服强度将减小,导致桥梁自重的增加与主桁承载能力的增加不成正比,因此,这一措施不具有经济性;也可将以上两种措施相结合,在改善钢材材质的同时,适当地增加钢板的厚度,这样不仅提升了钢材的性能,而且还节省了材料。除了提高钢材的强度外,主梁结构用钢还应具备抗冲击韧性强、抗腐蚀性强和可焊性等性能。

综上所述,随着公铁两用桥主桥趋于跨度更大、载荷要求更高的发展之势,其主梁结构的材料性能也需要不断提高和优化,这样才能充分发挥材料性能和节省材料。

2.2 基础发展趋势及分析

已建和在建公铁两用桥主要分布在沿江、沿河和沿海地区,其主桥的基础均分布在有江水、河水和海水的区域,这给基础类型的选择和施工都带来很大的困难,尤其对承载能力要求高的公铁两用桥来说,基础的建设尤为重要,也更加困难。表 3 对 4 种结构体系公铁两用桥主桥基础进行了汇总,并将汇总数据绘于图 12。

表 3 4 种结构体系公铁两用桥主桥基础汇总表

Table 3 Summary of foundations of main beam of rail-road bridges with four structural systems

结构体系	类型	施工方法	施工平台
梁式体系	管柱基础	管柱钻孔法	钢围堰
	沉井基础	钻孔灌注法	
	沉箱混凝土基础	水下浇筑混凝土法	
	混凝土扩大基础		
拱式体系	桩基础	钻孔灌注法	钢围堰、筑岛
	桩基础	钻孔灌注法	
斜拉体系	沉井基础	分节沉井下沉法	钢围堰
	桩基础	钻孔灌注法	钢围堰

从表 3 和图 12 可以看出,4 种结构体系公铁两用桥主桥的基础主要采用了 5 种基础类型:桩基础、管柱基础、混凝土扩大基础、沉井基础和沉箱混凝土基础。其中,梁式体系公铁两用桥主桥所采用的基础类型较多,拱式、斜拉和悬索体系公铁两用桥主桥的基础主要以桩基础为主。梁式体系公铁两用桥主桥的跨度小,上部结构荷载较小,所以,可以采用适用于浅水区域的桥梁基础类型,如管柱基础、沉井基

基础和混凝土扩大基础。拱式、斜拉和悬索体系公铁两用桥主桥的跨度大,上部结构荷载大,所以,需要采用刚度大、承载能力强和嵌入岩层能力强的桩基础,才能更好地保证桥梁上部结构在荷载作用下的稳定。斜拉体系公铁两用桥主桥也采用沉井基础,沉井基础具有刚度大、承载能力大的特点,但其体积大,嵌入坚硬程度较大的岩层较困难。可对于一些较厚的软弱岩层来说,沉井基础比桩基础更为适合,因为桩基础与软弱层之间的阻力小,减小了桩基础的竖向承载能力。

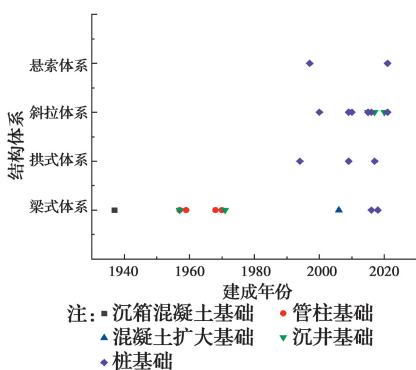


图 12 4 种结构体系公铁两用桥主桥基础汇总图

Fig. 12 Summary of foundations of main beam of rail-road bridges with four structural systems

改革开放以前,中国公铁两用桥主桥基础施工困难,除了施工设备差、施工技术偏低的自身因素外,还与中国经济萧条、施工环境恶劣以及国外专家不给予技术支持的外界因素有关。在这个时期,尽管基础施工困难重重,中国的专家们还是通过自行设计和自行施工,创造了史无前例的施工方法,为后来的公铁两用桥基础施工提供了实际的经验和方法。武汉长江大桥基础施工中,在世界桥梁建筑史上首次采用了气压沉箱掘泥打桩的基础施工方法,南京长江大桥基础施工中采用了中国首创的大型管柱钻孔法,九江长江大桥基础施工中采用了钢壁双围堰钻孔施工方法^[47-51]。从改革开放至今,中国公铁两用桥主桥基础施工方法更为系统化和先进化,从基础位置的地质勘察和施工场地与周围环境的前期工作协调,到基础类型的选择和确定施工方案,再到搭建施工平台和开始基础施工,到最后完成基础施工的整个过程趋于系统化,施工技术和施工设备趋于先进化。公铁两用桥基础的材料均采用强度大、耐腐蚀性强的钢筋混凝土。

综上所述,公铁两用桥主桥基础的发展在早期面临的挑战是前所未有的,但也创造了史无前例的

成功案例,不仅推动了公铁两用桥的发展,而且将中国桥梁基础的建造技术推向世界先进水平。

2.3 其他结构部分的发展趋势及分析

4 种结构体系公铁两用桥主桥除了主梁和基础两部分以外,其他结构部分在结构设计、施工工艺和材料性能等方面也发生了变化。

2.3.1 梁式体系公铁两用桥桥墩发展趋势 在相同荷载条件下,梁式体系公铁两用桥主桥在竖向、顺桥向所受的静动荷载比单独的公路桥和单独的铁路桥大。所以,已建和在建的梁式体系公铁两用桥桥墩均采用了实体结构。桥墩的施工方法没有发生明显变化,但桥墩所采用的结构形式和建筑材料却有所变化。武汉长江大桥主桥桥墩采用钢筋混凝土加外包砖体的结构,建筑材料采用了钢筋、混凝土和沙砖。三门峡黄河公铁两用大桥桥墩采用门式实体钢筋混凝土结构,建筑材料采用钢筋和混凝土。

2.3.2 拱式体系公铁两用桥拱肋发展趋势 拱式体系公铁两用桥主要承重结构是拱肋,由于公铁两用桥静动荷载大,对于拱肋刚度、承载能力要求更高,因此,拱式体系公铁两用桥拱肋采用自重更轻、强度更大的钢结构。随着主桥跨径的增大,拱式体系公铁两用桥主拱的结构形式从早期的柔性拱(图 13)发展到了结构刚度更大、承载能力更强的钢桁架拱(图 14)、钢箱截面拱(图 15)。拱肋的施工工艺和材料性能也发生了变化。



图 13 钢桁梁柔性拱公铁两用桥

Fig. 13 Flexible arch of rail-road bridges with steel truss beam

九江长江大桥(图 13)是中国首座拱式体系公铁两用桥,采用刚性钢桁梁+柔性钢拱的结构形式^[52]。结构设计方面,钢桁梁是主桥主要承担荷载作用的结构,钢拱肋是辅助承担荷载作用和增大钢桁梁跨度的结构。虽然钢拱不是主要承担荷载作用的结构,但增大了桥跨径,为中国大跨度拱式体系公铁两用桥提供了有益的经验和技术。施工方面,首先采用悬臂拼装法从两岸向主桥跨中架设刚性连续

钢桁梁至合龙,之后再拼装钢拱肋和安装吊杆^[53]。架设完成后的刚性钢桁梁不仅为架设拼装拱肋提供了施工平台,而且减小了钢拱在安装过程中所产生的附加内力和变形,这一施工技术为此后建造的拱式体系公铁两用桥的施工提供了实质性的技术和经验。



图 14 钢桁梁钢桁拱公铁两用桥

Fig. 14 Steel truss girder and steel truss arch of rail-road bridges



图 15 钢桥面钢箱拱公铁两用桥

Fig. 15 Steel box arch of rail-road bridges with steel deck

重庆朝天门长江大桥主桥(图 14)是目前世界第一跨径和首次采用钢桁架拱结构的拱式体系公铁两用桥。结构设计方面,主拱采用刚度大、结构复杂、受力复杂的变高度钢桁架形式,上下弦杆的几何线型采用不同函数的二次抛物线,主跨上弦与边跨上弦呈反向曲线,这样的设计使得主跨与边跨连接处杆件的受力更小、更合理,主拱引起的水平推力由上下弦杆平衡^[54-55],上下弦杆之间的腹杆均按照无应力状态控制法设计;施工方面,首先施工主桁架拱,然后再吊装主梁和安装吊杆。主拱架设首先是设置临时墩,搭设边跨钢桁架至主跨支墩后,再采用悬臂吊装施工法将主拱节段吊装至跨中合龙。为了控制主拱桁架的内力和减小最大悬臂端的挠度^[56-57],主拱悬臂安装过程中,在最大悬臂端设置了斜拉扣索。主拱材料方面,主桁结构采用了 Q345qD、Q370qD、Q420qD 等 3 种不同材质的桥梁钢,使主桁各个部位杆件内的力更加均匀。

宜宾金沙江公铁两用大桥主桥(图 15)是中国

首座上层铁路、下层公路的拱式公铁两用桥,打破了传统的上公下铁的建造形式。结构设计方面:主拱采用了刚度更大、抗扭刚度更大的箱形截面和有水平推力体系^[58],为了平衡主拱在拱脚处所产生的水平推力,主墩采用了体积更大、强度更大的混凝土结构。主梁不再是钢桁梁的结构形式,两桥面独立存在,两层桥面的间距达到 32 m,上下桥面之间采用一般形式吊杆,主拱与上层桥面之间采用截面更大、强度更大的加强吊杆,代替钢桁梁中腹杆的作用,这样不仅满足了上层高速铁路桥面的整体刚度和稳定性,而且满足了双层桥面之间的整体受力和整体稳定性。施工方面,首先节段拼装主拱结构,然后吊装上层桥面和安装上层加强吊杆,最后吊装下层公路桥面和安装两层桥面之间的普通吊杆。材料性能方面,由于桥面所承载荷不同,主拱的吊杆采用了两种材质,体现了材料性能运用的科学和经济。

综上所述,3 座拱式体系公铁两用桥的主桥各采用了不同的结构形式,施工工艺和材料性能也有所不同。因此,拱式体系公铁两用桥主桥在结构设计、施工工艺和材料性能等方面上均实现了创新和突破,为未来拱式体系公铁两用桥的建造提供有利的借鉴意义。

2.3.3 斜拉体系公铁两用桥桥塔和拉索发展趋势

桥塔是斜拉体系公铁两用桥的主要承重结构,拉索起着传力及平衡桥塔两侧主梁轴向力的作用。拉索主要采用预应力钢绞线材料。其中,已建和在建的斜拉体系公铁两用桥桥塔主要采用钢筋混凝土结构,其结构类型主要有:“H”型、倒“Y”型、钻石型。桥塔类型的选择与主桁桁片多少和斜拉索索面数量有关,其中,双桁片主桁、双索面斜拉索所对应的桥塔类型为“H”型,三桁片主桁、三索面斜拉索所对应的是倒“Y”、钻石型。因为拉索、桥塔和主梁三者受力条件下能达到一个平衡状态,桥塔的施工从满堂支架法施工发展至采用移动支架法,减少了施工设备、提高了施工效率。黄冈公铁两用长江大桥主桥桥塔采用“H”型钢筋混凝土结构,斜拉索采用双索面对称布置的结构形式。沪通长江大桥主跨跨径为 1 092 m,是中国首座主跨径超千米的斜拉体系公铁两用桥,其主桥桥塔采用倒“Y”型钢筋混凝土结构,斜拉索采用了三索面对称布置的结构形式。

2.3.4 悬索体系公铁两用桥主缆、桥塔和锚碇发展趋势 主缆是悬索体系公铁两用桥主要承重和传力

的结构,主梁所受荷载经吊杆传至主缆,主缆通过桥塔将竖向荷载分给桥塔,水平力由主缆传至锚碇。公铁两用悬索桥主缆是将多股高强钢绞线拧成一束钢缆。在建的中国公铁两用悬索桥五峰山长江大桥是世界最大载重公铁两用悬索桥,其主缆直径也是世界公铁两用悬索桥之最,达到了 $1.3\text{ m}^{[59-60]}$ 。桥塔是公铁两用悬索桥的主要承重结构之一,主要承担主梁荷载的竖向分力,采用抗压强度大和带有横梁的门式钢筋混凝土结构。横梁采用预应力混凝土结构,提高桥塔横向的刚度,增强桥塔纵向抵抗风荷载的能力。除了锚固主缆的作用以外,锚碇主要抵抗主缆所承受的主梁荷载水平分力,采用重力式钢筋混凝土结构,其基础采用扩大基础和沉井基础。

主缆采用智能化施工,利用自动牵引机将单股钢绞线按照主缆设计线型依次从一侧桥塔塔顶牵引至另一侧桥塔塔顶,直至将所有钢绞线牵引到位后,再用紧固设备将所有的钢绞线夹紧,同时安装吊杆;主塔施工方法与斜拉体系公铁两用桥主塔的施工方法相似;锚碇是大体积混凝土结构,采用分层或分段浇筑法施工。

3 结论

中国公铁两用桥主桥从跨径小、结构受力简单的梁式体系发展到目前大跨径的拱式体系,以及大跨径、超大跨径的斜拉、悬索体系等。4种结构体系主桥的主梁和基础结构以及其他结构部分在结构设计、施工工艺、材料性能优化等方面均实现了创新和突破。

1)在结构主梁设计上,4种结构体系公铁两用桥主桥的主梁结构形式由繁至简,主桁杆件连接方式由离散拼装至整体栓焊,主桁桁式在力学特性上与各结构体系公铁两用桥的受力特点相辅相成,充分发挥了材料性能和结构受力特点。由于上下桥面宽度差异较大,主梁横断面采用不同结构形式来满足主梁上下桥面的整体刚度和整体稳定性。在施工工艺上,从所有主桁架杆件现场拼装,发展至在工厂进行节段整体栓焊,运输到现场节段吊装完成。主梁架设施工的整个过程趋于系统化、高效化和经济化。在材料性能上,公铁两用桥主梁的材料性能趋于优质化,从强度小、材质差和可焊性差优化至强度大、材质优和可焊性好。

2)基础在结构类型上发展变化不大。随着主桥上部结构荷载作用的增大、桥址地质环境的恶劣,基础施工从探索性施工发展至自主创新。材料的性能从强度低、抗腐蚀性差的木材优化至强度大、抗腐蚀性强和耐久性好的高性能钢筋混凝土。

3)中国拱式体系公铁两用桥主桥在跨径上刷新了世界纪录,主拱的结构设计趋于新型化,施工工艺趋于复杂化,材料性能趋于科学和经济化。

4)斜拉体系和悬索体系除主梁和基础两结构部分,其他部分结构的设计趋于科学化,施工趋于经济化、智能化,材料性能趋于优质化。

中国已建和在建公铁两用桥主桥在结构设计、施工工艺和材料性能等方面均实现了创新和突破。但在快速的交通运营模式下,对于沿海地区城市与城市之间、内陆城市与城市之间、平原与高原地区的交通建设和经济发展来说,公铁两用桥的建设起着关键性作用。面对以上种种困难,中国打破了不可能在长江和黄河上建设公铁两用桥的格局,公铁两用桥的建设将充分利用目前先进的桥梁技术,并向着更新、更优、更经济和更具有挑战的方向发展,不断地创新和突破公铁两用桥建造的可能性。

参考文献:

- [1] 刘钊,肖汝诚. 欧洲的公铁两用桥发展现状[C]//中国土木工程学会第二十一届全国桥梁学术会议论文集, 2014: 220-227.
LIU Z, XIAO R C. Current development status of public-rail dual-purpose bridges in Europe [C] // China Society of Civil Engineering, the 21st National Bridge Academic Conference, 2014: 220-227. (in Chinese)
- [2] 魏兰英. 中国公铁两用桥[J]. 桥梁建设, 1988(3): 81.
WEI L Y. China's highway and railway of dual-use bridge [J]. Bridge Construction, 1988(3): 81. (in Chinese)
- [3] 许兆军,侯文葳,张玉玲. 公铁两用桥在我国的应用前景[J]. 铁道建筑, 2000(12): 16-19.
XU Z J, HOU W W, ZHANG Y L. Application prospect of dual-purpose bridge between railway and highway in China [J]. Railway Engineering, 2000(12): 16-19. (in Chinese)
- [4] 雷俊卿,黄祖慰,桂成中,等. 公铁两用大桥现状与可持续发展趋势分析[J]. 钢结构, 2016, 31(11): 1-4, 37.
LEI J Q, HUANG Z W, GUI C Z, et al. Analysis of

- the present situation and sustainable development trend of the highway-railway dual-purpose bridge [J]. Steel Structure, 2016, 31(11): 1-4, 37. (in Chinese)
- [5] 南京长江大桥工程概况[J]. 桥梁建设, 1971(6): 43-44.
General situation of Nanjing Yangtze River Bridge project [J]. Bridge construction, 1971(6): 43-44. (in Chinese)
- [6] 赵兴亚. 滨州黄河公铁两用大桥主桥上部结构设计[J]. 桥梁建设, 2010(2): 52-54, 72.
ZHAO X Y. Superstructure design of main bridge of Binzhou Yellow River Railway and Highway Bridge [J]. Bridge Construction, 2010(2): 52-54, 72. (in Chinese)
- [7] 薛宪政. 滨北线松花江公铁两用桥主桥设计[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 74-78, 96.
XUE X Z. Design of the main bridge of Songhua River Road-Rail Dual-purpose Bridge on Binbei Line [J]. High-speed Railway Technology, 2016, 7(3): 74-78, 96. (in Chinese)
- [8] 赵新宇. 石济客专济南黄河公铁两用桥主桥钢桁梁架设方案研究[J]. 铁道建筑, 2016(8): 10-13.
ZHAO X Y. Study on erection scheme of steel truss girder of Jinan Yellow River Railway Bridge [J]. Railway Engineering, 2016(8): 10-13. (in Chinese)
- [9] 陈进昌, 方京, 孟庆标. 芜湖长江大桥正桥上部结构设计[J]. 桥梁建设, 2001(2): 26-30.
CHEN J H, FANG J, MENG Q B. Superstructure design of the main bridge of Wuhu Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2001(2): 26-30. (in Chinese)
- [10] 李明华, 高宗余. 武汉天兴洲公铁两用长江大桥正桥的设计[J]. 中国铁路, 2006(3): 38-41.
LI M H, GAO Z Y. Design of the main bridge of Wuhan Tianxingzhou Yangtze River Railway Bridge [J]. China Railway, 2006(3): 38-41. (in Chinese)
- [11] 郭子俊, 肖海珠, 徐伟. 郑州黄河公铁两用桥主桥钢梁结构设计[J]. 铁道标准设计, 2010(9): 58-61.
GUO Z J, XIAO H ZH, XU W. Design of steelgirder structure of the main bridge of Zhengzhou Yellow River Railway Bridge [J]. Railway Standard Design, 2010(9): 58-61. (in Chinese)
- [12] 高宗余. 沪通长江大桥主桥技术特点[J]. 桥梁建设, 2014, 44(2): 1-5.
GAO Z Y. Technical characteristics of the main bridge of Hutong Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(2): 1-5. (in Chinese)
- [13] 孙英杰, 徐伟. 平潭海峡公铁两用大桥双层结合全焊钢桁梁设计[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 1-5.
SUN Y J, XU W. Design of double-deck welded steel truss girder for Pingtan Strait Railway and Highway Bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 1-5. (in Chinese)
- [14] 徐伟, 郑清刚, 彭振华. 沪通长江大桥主航道桥主梁结构设计[J]. 桥梁建设, 2015, 45(6): 47-52.
XU W, ZHENG QG, PENG Z H. Design of main girder structure of Hutong Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 47-52. (in Chinese)
- [15] 文坡, 杨光武, 徐伟. 黄冈公铁两用长江大桥主桥钢梁设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 1-6.
WEN P, YANG G W, XU W. Design of steel girder for the main bridge of Huanggang Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 1-6. (in Chinese)
- [16] 张强. 铜陵公铁两用长江大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 7-12.
ZHANG Q. Design of the main bridge of Tongling Yangtze River Bridge for railway and public use [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 7-12. (in Chinese)
- [17] 张晓勇, 王东晖, 易伦雄. 公安长江公铁两用大桥主桥钢梁设计[J]. 中国铁路, 2015(3): 61-65.
ZHANG X Y, WANG D H, YI L X. Design of main bridge steel girder of Yangtze River Gonggan railway bridge [J]. China Railway, 2015(3): 61-65. (in Chinese)
- [18] 邹敏勇, 易伦雄, 吴国强. 商合杭铁路芜湖长江公铁大桥主桥钢梁设计[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 65-70.
ZOU M Y, YI L X, WU G Q. Design of steel girder for the main bridge of Wuhu Changjiang River rail-cum-road bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou Railway [J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 65-70. (in Chinese)
- [19] 段雪炜, 徐伟. 重庆朝天门长江大桥主桥设计与技术特点[J]. 桥梁建设, 2010, 40(2): 37-40.
DUAN X W, XU W. Design and technical characteristics of the main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. Bridge Construction, 2010, 40(2): 37-40. (in Chinese)
- [20] 张敏, 叶梅新, 张晔芝. 密布横梁正交异性板整体桥面受力行为[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 28-34.
ZHANG M, YE M X, ZHANG Y Z. Integral deck

- behavior of densely crossed orthotropic slab [J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 28-34. (in Chinese)
- [21] 陈佳,叶梅新,周德. 下承式密布横梁体系钢-混组合桥受力状态研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 775-783.
- CHEN J, YE M X, ZHOU D. Research on stress state of through densely distributed steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010, 41 (2): 775-783. (in Chinese)
- [22] 李耀东,周珂,段玉振,等. 钢桥纵横梁体系对板式无砟轨道结构受力影响分析[J]. 铁道建筑, 2012(8): 133-136.
- LI Y D, ZHOU K, DUAN Y Z, et al. Effect of longitudinal and transverse beam system of steel bridge on the stress of slab ballastless track structure [J]. Railway Engineering, 2012(8): 133-136. (in Chinese)
- [23] 李小珍,张景峰,肖林,等. 铁路密布横梁体系整体钢桥面静力行为的试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 95-102.
- LI X Z, ZHANG J F, XIAO L, et al. Experimental study on static behavior of integral steel deck of railway densely distribute beam system [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (6): 95-102. (in Chinese)
- [24] 刘海燕,陈开利. 预制混凝土桥面板与钢梁的连接新方法[J]. 国外桥梁, 1999(2): 58-63, 77.
- LIU H Y, CHEN K L. New method of connection between prefabricated concrete deck and steel beam [J]. Foreign Bridges, 1999(2): 58-63, 77. (in Chinese)
- [25] 乐小刚. 混凝土桥面板对公路铁路两用桁梁斜拉桥受力影响[J]. 中国市政工程, 2008(6): 31-33, 88.
- LE X G. Effect of concrete bridge deck on stress of highway-railway dual-purpose truss-girder cable-stayed bridge [J]. China Municipal Engineering, 2008(6): 31-33, 88. (in Chinese)
- [26] 徐军,陈忠延. 正交异性钢桥面板的结构分析[J]. 同济大学学报, 1999, 27(2): 45-49.
- XU J, CHEN Z Y. Structural analysis of orthotropic steel deck [J]. Journal of Tongji University, 1999, 27 (2): 45-49. (in Chinese)
- [27] MALJAARS J, VAN DOOREN F, KOLSTEIN H. Fatigue assessment for deck plates in orthotropic bridge decks [J]. Steel Construction, 2012, 5(2): 93-100.
- [28] 陈斌,邵旭东,曹君辉. 正交异性钢桥面疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.
- CHEN B, SHAO X D, CAO JH. Study of fatigue cracking for orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (12): 170-174. (in Chinese)
- [29] PIJPER R, PAHLAVAN P, PAULISSEN J, et al. Structural health monitoring for fatigue life prediction of orthotropic bridge decks [C] // Proceedings 3rd orthotropic bridge conference, Sacramento, 2013: 432-445.
- [30] HONG S N, PARK J G, PARK S K, et al. Analysis of the fatigue stress on welded joints of the U-rib in an orthotropic steel deck [J]. Advanced Materials Research, 2014, 891/892: 1694-1698.
- [31] 赵岩荆,杨宁,蒋玲. 正交异性钢桥面铺装层疲劳开裂试验的改进研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2015, 13(4): 61-67.
- ZHAO Y J, YANG N, JIANG L. Improvement of fatigue cracking test for orthotropic steel bridge desk surfacing [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2015, 13(4): 61-67. (in Chinese)
- [32] YANG M Y, JI B H, YUAN Z, et al. Fatigue behavior and strength evaluation of vertical stiffener welded joint in orthotropic steel decks [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 70: 222-236.
- [33] 王占飞,程浩波,程志彬,等. 桥面铺装对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 257-266.
- WANG Z F, CHENG H B, CHENG Z B, et al. Influence of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2018, 34 (2): 257-266. (in Chinese)
- [34] 叶梅新,张晔芝. 负弯矩作用下钢-混凝土结合梁性能研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(5): 41-47.
- YE M X, ZHANG Y Z. Performance of steel-concrete composite beams under negative bending moment [J]. China Railway Science, 2001, 22 (5): 41-47. (in Chinese)
- [35] 林荫岳,邵克华. 我国桥梁钢和整体节点钢桁梁新技术[J]. 城市道桥与防洪, 1994(2): 25-29.
- LIN Y Y, SHAO K H. New technology of bridge steel and integral joint steel truss beam in China [J]. Urban Road Bridge and Flood Control, 1994(2): 25-29. (in Chinese)

- [36] 陈淮,李杰,李谊修.连续钢桁梁施工阶段整体节点局部应力分析[J].桥梁建设,2011,41(5):21-25,58.
CHEN H, LI J, LI Y X. Local stress analysis of integral joints during construction of continuous steel truss beams [J]. Bridge Construction, 2011, 41(5): 21-25, 58. (in Chinese)
- [37] 蔡汝一,安永日,田楚灵.整体桁架节点腹杆及高强度螺栓连接受力特性分析[J].公路交通技术,2017,33(3):32-36.
CAI R Y, AN Y R, TIAN C L. Stress characteristics analysis of web joints and high-strength bolted connections of integral truss [J]. Highway Traffic Technology, 2017, 33(3): 32-36. (in Chinese)
- [38] 鄢怀斌,郑自元,黄行裕.铜陵公铁两用长江大桥钢桁梁全焊桁片制造技术[J].桥梁建设,2014,44(1):6-10.
YAN H B, ZHENG Z Y, HUANG X Y. Manufacturing techniques of all-welded truss units of steel girders of Tongling Changjiang River Rail-Cum-Road Bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1): 6-10. (in Chinese)
- [39] 康晋,段雪炜,徐伟.平潭海峡公铁两用大桥主桥整节段全焊钢桁梁设计[J].桥梁建设,2015,45(5):1-6.
KANG J, DUAN X W, XU W. Design of full block and all-welded steel truss girder of main bridge of Pingtan straits rail-cum-road bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 1-6. (in Chinese)
- [40] 中国铁路总公司.蒙华铁路三门峡黄河公铁两用大桥首段梁顶推成功[J].铁路采购与物流,2017,12(6):67.
China Railway. The first section of the Sanmenxia Yellow River Railway Bridge on Menghua Railway was successfully jacked [J]. Railway Procurement and Logistics, 2017, 12(6): 67. (in Chinese)
- [41] 方秦汉.九江长江大桥正桥钢梁安装[J].铁道工程学报,1992(1):127-132.
FANG Q H. Installation of steel girders of the main bridge of Jiujiang Yangtze River Bridge [J]. Journal of Railway Engineering, 1992(1): 127-132. (in Chinese)
- [42] 滕小平.山东滨州黄河公铁两用大桥钢梁架设[J].中国公路,2012(22):111-113.
TENG X P. Steel girder erection of Binzhou Yellow River Railway Bridge [J]. China Highway, 2012(22): 111-113. (in Chinese)
- [43] 邹敏勇,易伦雄,吴国强.商合杭铁路芜湖长江公铁大桥主桥钢梁设计[J].桥梁建设,2019,49(1):65-70.
ZOU M Y, YIL X, WU G Q. Steel girder design of Wuhu Yangtze River Railway Bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou Railway [J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 65-70. (in Chinese)
- [44] 潘际炎,乌通儒.九江长江大桥钢梁 15MnVNq 钢优化研究[J].桥梁建设,1989(4):66-72.
PAN J Y, WU T R. Study on optimization of steel beam 15MnVNq for Jiujiang Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 1989(4):66-72. (in Chinese)
- [45] 方万,沈龙庆.新材料大直径高强度螺栓在九江长江大桥的应用[J].铁道工程学报,1992(1):133-139.
FANG W, SHEN L Q. Application of new material large diameter high strength bolts in Jiujiang Yangtze River Bridge [J]. Journal of Railway Engineering, 1992(1): 133-139. (in Chinese)
- [46] 方秦汉.长江上的 4 座公路铁路两用桥[J].铁道科学与工程学报,2004(1):10-13.
FANG Q H. Four road-railway bridges on the Yangtze River [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004(1): 10-13. (in Chinese)
- [47] 南京长江大桥工程简介三钢沉井围堰管柱基础[J].桥梁建设,1972(2):37-44.
Brief Introduction of Nanjing Yangtze River Bridge Project [J]. Construction of Bridge, 1972(2): 37-44. (in Chinese)
- [48] 邱琼海.铜陵公铁两用长江大桥深水特大型沉井基础施工技术[J].铁道标准设计,2013(4):51-55.
QIU Q H. Construction technology of deep-water super-large caisson foundation for Tongling Yangtze River Bridge [J]. Railway Standard Design, 2013(4): 51-55. (in Chinese)
- [49] 徐力,高宗余,梅新咏.沪通长江大桥公铁合建斜拉桥桥塔基础设计[J].桥梁建设,2015,45(3):7-12.
XU L, GAO Z Y, MEI X Y. Design of pylon foundations for rail-cum-road cable-stayed bridge of Hutong Changjiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(3): 7-12. (in Chinese)
- [50] 刘翠云,代皓.宜宾金沙江公铁两用桥主墩基础施工技术[J].桥梁建设,2016,46(2):97-102.
LIU C Y, DAI H. Construction technology of main pier foundation of Yibin Jinsha River dual-purpose bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 97-102. (in Chinese)
- [51] 刘爱林.芜湖长江公铁大桥设置式沉井基础施工关键技术[J].桥梁建设,2017,47(6):7-11.

- LIU A L. Key technologies of set-up caisson foundation construction for Wuhu Yangtze River Railway Bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47 (6): 7-11. (in Chinese)
- [52] 李瀛沧. 九江长江大桥正桥钢梁设计简介[J]. 桥梁建设, 1993(1): 3-6.
- LI Y C. Brief introduction of steel girder design for main bridge of Jiujiang Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 1993(1): 3-6. (in Chinese)
- [53] 方京. 九江长江大桥 216 m 梁及三大拱的安装与合拢设计[J]. 桥梁建设, 1993(1): 12-18.
- FANG J. Installation and closure design of 216 m beam and three arches of Jiujiang Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 1993(1): 12-18. (in Chinese)
- [54] 孟乙民, 唐国兵, 包雪巍. 重庆朝天门长江大桥工程设计创新要点[J]. 水运工程, 2011(3): 21-25.
- MENG Y M, TANGG B, BAO X W. Design innovation points of Chaotianmen Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. Waterway Engineering, 2011 (3): 21-25. (in Chinese)
- [55] 邓新安. 重庆朝天门长江大桥建造中的技术创新[J]. 中国港湾建设, 2008(5): 1-4.
- DENG X A. Technological innovation in the construction of Chaotianmen Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. China Harbour Construction, 2008(5): 1-4. (in Chinese)
- [56] 付宇文, 黎卓勤. 重庆朝天门长江大桥主桥钢桁架拱肋安装施工方案[J]. 交通标准化, 2008(4): 183-187.
- FU Y W, LI Z Q. Installation and construction scheme of steel truss arch rib of main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. Traffic Standardization, 2008(4): 183-187. (in Chinese)
- [57] 成宇海, 黄鑫, 张保德. 重庆朝天门长江大桥钢拱座整体节点制造研究[J]. 世界桥梁, 2008(2): 19-22.
- CHENG Y H, HUANG X, ZHANG B D. Research on manufacturing of integral steel arch joint of Chaotianmen Yangtze River Bridge in Chongqing [J]. World Bridge, 2008(2): 19-22. (in Chinese)
- [58] 宜宾将建全国首座“公路在下、铁路在上”公铁两用大桥[J]. 城市道桥与防洪, 2014(1): 46.
- Yibin will build the first national highway-railway dual-purpose bridge [J]. Urban road-bridge and flood control, 2014(1): 46. (in Chinese)
- [59] 田永强, 黄旺明. 五峰山长江大桥主缆静载试验顺利完成[J]. 世界桥梁, 2018, 46(4): 97.
- TIAN Y Q, HUANG W M. Wufengshan Yangtze River Bridge main cable static load test were successfully completed [J]. World Bridge, 2018, 46 (4): 97. (in Chinese)
- [60] 镇江五峰山长江大桥主缆架设完成[J]. 城市道桥与防洪, 2019(7): 69.
- The main cables of the Wufengshan Yangtze River Bridge in Zhenjiang have been erected [J]. Urban Road Bridge and Flood Control, 2019(7): 69. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)