

海洋桥梁工程施工技术及装备发展研究

张瑞霞

(中国中铁大桥局集团有限公司, 武汉 430050)

摘要: 随着全球经济一体化战略的实施, 海洋桥梁已成为各国基础设施重要的组成部分, 这条绚丽的蓝色纽带也将带动海洋经济的快速发展。目前, 已建成的海洋桥梁结构形式及施工装备还远不能满足桥梁向纵深海域发展的需要, 为储备高端关键技术, 迫切需要深入海洋桥梁施工技术及装备发展战略研究。在深水基础方面, 着重对沉井基础、设置基础及大直径钢桩基础的大型化、装配化及智能化提出研究方向; 在海洋桥梁的斜拉桥及悬索桥上部结构方面, 就主塔、主梁及索束的结构形式及施工方法重点研究大节段制造运输、自动调整对位安装、结构抗风措施等; 在智慧建造方面, 提出结合信息化平台及可视化装备进行综合应用性研究。

关键词: 海洋桥梁; 设置基础; 沉井; 大直径钢桩; 斜拉桥; 悬索桥; 智能化; 建筑信息模型技术

中图分类号: U44 **文献标识码:** A

Development of Construction Technology and Equipment for Marine Bridges

Zhang Ruixia

(China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: With the development of global economic integration, marine bridges have become an important infrastructure for many countries, and will contribute to the rapid development of marine economy. Given that structural types and construction equipment for current bridges can hardly satisfy the requirements for deep-sea bridges, in-depth strategic research on construction technology and equipment for marine bridges shall be conducted. In the aspect of deep-water foundations, research directions of large size, assembly, and intellectualization are proposed for open caisson foundations, assembly foundations, and large-diameter steel pile foundations. As for superstructures of cable-stayed bridges and suspension bridges, the focus of research should be large-segment manufacturing and transportation, automatic alignment for installation, and structural wind-resistance measures for main towers, main girders, and stay cables. In terms of smart construction, comprehensive applied research should be conducted combining an information platform and visualization equipment.

Keywords: marine bridges; assembly foundation; open caisson; large-diameter steel pile; cable-stayed bridge; suspension bridge; intelligent control; building information modeling technology

一、前言

随着全球经济一体化进程的加快, 连接陆地之

间、陆地与岛屿间的海湾和海峡大桥, 将成为交通设施中最重要的蓝色纽带。目前著名的海湾有墨西哥湾、孟加拉湾、波斯湾、几内亚湾、阿拉斯加湾、

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-05-21

通讯作者: 张瑞霞, 中国中铁大桥局集团有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为桥梁工程; E-mail: zruixia915@126.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

渤海湾、北部湾、缅因湾、旧金山湾等，另外，全世界海峡的数量更是超过了1万个。在海湾和海峡上修建桥梁，是人们千百年来梦想。目前，这些梦想有的已经变为现实，有的即将实现。目前，国内外已建海洋桥梁百余座，海洋桥梁建造技术取得了较大的进步；而规划中的墨西哥海峡大桥、白令海峡大桥、直布罗陀海峡大桥、琼州海峡大桥、中国台湾海峡大桥等海洋桥梁其规模、标准则更具有挑战性。

已建成的东海大桥、杭州湾大桥、港珠澳大桥等海洋桥梁，在给当地的交通带来便利的同时，也带动和促进了经济的发展和融合。海洋桥梁工程建设的蓬勃发展，也是我国综合国力增强、工业化水平提高、桥梁建造技术进步的有力见证。

海洋桥梁建造的难度，取决于桥梁结构本身，更取决于桥梁所处的海洋环境。再加上海洋桥梁规模宏大、结构庞大、构造复杂，这些都会给桥梁建造带来诸多困难，而复杂多变的海洋环境，则是桥梁建造所面临的巨大难题。如深水、坚硬的裸岩海床、深厚软弱地基、台风、雷暴、洋流及波浪等。该课题研究目的在于以海洋桥梁结构物为对象，以海洋复杂地形地质、水文气象等为背景，着眼于未来海洋桥梁，以收集和梳理海洋桥梁建设环境为基础，从海洋地质勘测、海洋桥梁建造技术、海洋桥梁建造装备的现状和发展方向出发，研究海洋桥梁工程建造关键技术及装备发展，藉以准确把握、尽快攻克我国海洋桥梁建造领域的瓶颈技术、关键装备，为我国的经济建设、社会发展和海洋战略实现贡献力量。

二、国内外海洋桥梁施工现状及发展趋势

（一）国内海洋桥梁施工技术现状及发展趋势

我国现代跨海大桥从20世纪80年代修建厦门大桥开始，先后修建海洋桥梁54座，目前正在修建的有8座，拟建的跨海大桥有10座，其中已建和在建的千米级桥梁6座。

从首座跨海大桥采用大直径嵌岩桩开始，海洋桥梁主墩基础基本是钻孔桩独领风骚，2005年建成的东海大桥是我国第一座真正意义上的外海桥梁，它全长32.5 km，其中主桥墩基础为桩径2.5 m，桩长110 m的钻孔桩，通过对高桩平台分析，为了减

少水上平台搭建时间，充分发挥临时结构的各自优势，主墩采用了蜂窝式钢浮箱+导管架生产区平台的组合式施工方法；主梁为钢箱+混凝土顶板的结合梁，在预制场完成钢梁制作及顶板混凝土的浇筑后由运输船拖至墩位，其中主塔附近节段主梁由1000 t浮吊安装，其余节段及合龙段均由400 t桥面吊机安装。辅通航孔桩基采用海上平台施工，4孔连续梁采用挂监法节段浇注。非通航孔浅水区基础采用长栈桥配支栈桥施工钻孔桩，连续梁采用造桥机整孔浇注；深海区非通航孔桥长20 km，基础为斜钢管群桩，由打桩船施打，承台采用预制混凝土套筒施工，墩身、60 m及70 m混凝土主梁采用梁场制造，60 m主梁由2500 t“大力”号浮吊安装，70 m主梁由2500 t“小天鹅”号运架一体船安装 [1]。

杭州湾跨海大桥设南、北两个航道，通航孔南航道桥主塔基础采用38根直径2.8 m钻孔灌注桩，桩长125 m，创国内跨海大桥超长钻孔灌注桩桩基础施工新纪录；港珠澳大桥3座通航孔桥（九洲航道桥、江海直达船航道桥、青州航道桥）桩基均为2.5 m钢管复合桩+2.2 m钻孔桩。平潭公铁两用海峡大桥三座通航孔桥梁分别采用主跨532 m、364 m、366 m钢桁混合梁斜拉桥结构。该桥通航孔桥主墩分别采用直径 $\phi 4.5$ m和直径 $\phi 4.0$ m钻孔桩基础。上述桥梁的上部结构均采用了大节段或整孔梁安装的方法。

我国海上吊装设备发展较为迅速 [2]，海上起重船臂架主要是中心定点及固定臂架两种模式，其中中心定点起重船最大起重量为3600 t，臂架式起重量为4000 t。目前国内最大的海上起重船为“振华30”号，固定吊重为12000 t，回转吊重为7000 t。

在桩工机械中，最大的动力头钻机为KTY5000，最大钻孔直径为5 m。

（二）国外海洋桥梁施工技术现状及发展趋势

国外海洋桥梁从20世纪初美国金门大桥开始，已建、在建和规划中的跨海大桥共有73座，其中已建55座，在建5座，拟建13座。

早期的美国跨海大桥，多采用气压沉箱基础。1936年建成的美国旧金山奥克兰大桥在水深32 m、覆盖层厚54.7 m的条件下，采用60 m×28 m浮运沉井，在定位后射水、吸泥下沉，基础入土深度达73.28 m。

在丹麦，其悠久的建桥历史也可以折射出世

界桥梁的发展过程。1935年丹麦小海带桥在水深达30 m的条件下,采用 $43.5\text{ m} \times 22\text{ m}$ 的钢筋混凝土沉箱,穿透了细密均匀坚硬的不透水深层黏土,基础深度达39 m。1998年建成跨度1624 m的大海带桥主塔墩基础采用了重32 000 t的设置基础。2000年建成连接丹麦与瑞典的厄勒海峡大桥[3],主塔墩设置基础长 $37\text{ m} \times 35\text{ m}$ 、高22.5 m,自重20 000 t。51个引桥墩的设置基础,采用整体预制和现场拼装的方案。

日本1970年建成的岐阜县大桥和新木曾川桥,采用了无人挖掘系统开挖沉箱,分别将21.5 m和18 m的沉箱下沉就位。1970—2000年,日本所建桥梁很大比例采用了沉箱基础。如日本备赞濑户大桥锚墩采用的沉箱基础[4],最大尺寸为 $75\text{ m} \times 59\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。世界最大跨度的明石海峡大桥采用了圆形的设置基础[5],其直径达80 m,高79 m,可谓是前所未有的庞然大物。日本桥梁基础中也有采用钟形基础,锁口钢管桩基础和多柱式基础等,可谓种类繁多,对各种基础形式都有所涉及和发展。

在海上起重设备方面,国外船舶吊装能力主要集中在1500~3000 t。世界上最大自行式浮吊“天鹅”或“长颈天鹅”由C形双体船与巨大的立体钢构架组成,总体尺寸为 $94\text{ m} \times 72\text{ m} \times 102\text{ m}$ (高),额定吊重7000 t,是为丹麦大贝尔特桥专门打造的[6]。在修建厄勒海峡大桥时,由于主桥梁长与重量分别达190 m与8200 t,所以将“长颈天鹅”号在法国邓克尔克改造成最大提升高度为76 m(原为50 m),最大起重量为8700 t。

在桩工机械方面,主要有钻机、打桩船和打桩设备。旋转钻机最大钻孔直径为4.4 m,属日本MD440大口径钻机,旋挖钻机的典型代表为

BAUER BG38,最大钻孔直径为3.0 m。打桩设备以荷兰和德国为主,德国MHU3500S液压锤最大打击能量达3500 kJ。

三、海洋桥梁施工关键技术及发展研究

(一) 海洋深水基础建造技术及发展研究

1. 设置基础

海洋桥梁设置基础具有体积重量大、基础面积大、承载力高、刚度大、抗船撞、抗震能力强的优点,特别适用于地质条件复杂的深水环境。芜湖公铁二桥3号主塔为设置钢沉井的圆端形结构(见图1),基底尺寸为 $65\text{ m} \times 35\text{ m}$,钢沉井高19.5 m。底节钢沉井采用气囊法下河,利用拖轮浮运到墩位。系泊锚碇对底节沉井初步定位,再接高沉井和围堰并注水下沉至设计高程。沉井外侧壁与爆破开挖的基坑壁之间抛填碎石进行堵漏。爆破时采用斜向梅花形布孔的微差起爆技术,以达到块度均匀的效果,前期使用贝型抓斗清渣效率很低,后改用2台重型多瓣式抓斗同时作业,提高了出渣效率。

随着海洋桥梁向大跨、深水及重载发展,设置基础平面尺寸可能达到 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的规模,重量可达十几万吨,这样对施工设备的要求将会更高,因此,必须从选择制造加工场地、研发重型装备(起吊、安装、浮运等)和特殊装备(深水地下挖掘、整平等)的技术可行性和可靠性出发,深入研究水下工程无人化施工和智能化装备,经过分析重点研究以下技术。

(1) 对船坞尺寸(至少 $150\text{ m} \times 200\text{ m}$)、吊装设备性能(需跨度150 m以上,吊高150 m的大型

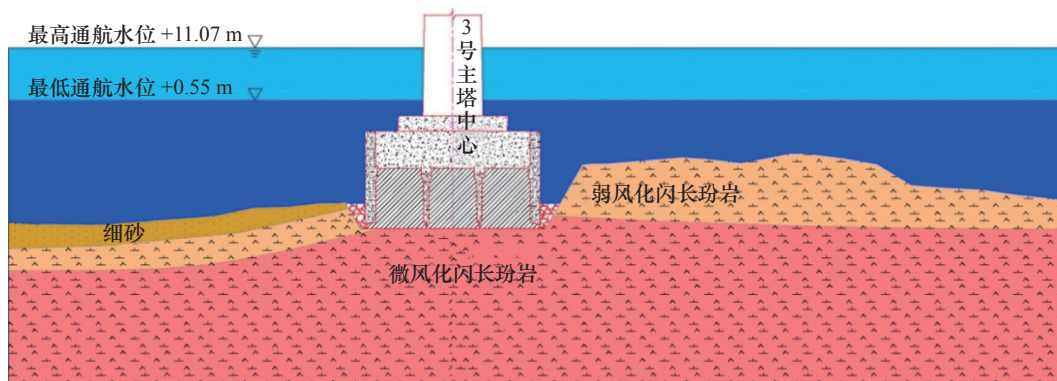


图1 芜湖公铁二桥3号墩

龙门吊机，吊重 2000 t 以上以满足分节吊装接高需要)、船坞地基承载力等要求较高，同时整体下水出坞措施应专项研究。

(2) 研究助浮措施减少基础吃水深度，从而降低拖运力，首选对无底多隔舱的结构物在浮运中的水流阻力计算方法做模拟及验证分析。针对海洋区域风大、浪高、流急等复杂海况，对远距离浮运过程中的稳定性进行研究。

(3) 波浪力对设置基础及定位结构产生的影响，目前的理论还不完善，应进行模拟、分析及试验性的专项研究。

(4) 墩位处精确定位锚泊力较大，着床后的基础处理是难点，应对锚碇形式、着床控制、基底处理等进行进一步研究。

2. 沉井基础

沪通长江大桥主塔墩 28 号、29 号墩沉井基础钢沉井高分别为 50 m 和 56 m，考虑刃脚混凝土灌注和定位加固后结构重达 15 000 t 和 17 000 t，是目前世界上截面尺寸最大、高度最高的沉井基础。28 号、29 号主墩水深分别为 20 m 和 30 m，沉井最大锚泊力分别为 6940 kN 和 9600 kN，施工采用了大直径钢管桩锚碇新方案。

沉井的制造及运输采用“船坞内整体制造、整体出坞浮运”的方法。钢沉井在工厂内分节加工制造，在厂内船坞内（长 580 m，宽 190 m，深 13.5 m）完成沉井整体拼装。钢沉井采取助浮措施浮运出坞（见图 2），利用拖轮浮运到桥位进行定位。底节沉井着床稳定后现场分步接高混凝土节段（见图 3）。

海上桥梁沉井基础尺寸一般比较庞大，如采用整体预制（混凝土沉井），目前的机械设备都不可能直接吊装。如采用先钢沉井后灌注砼的方法，其后续水上混凝土施工方量巨大，动用的大型水上砼船较多，施工周期长，作业风险大；如采用分段施工，接缝的安装设计是工程中要面临的重大技术挑战，且此技术还尚未有较成熟完善的方法，需开展专项课题做进一步研究，因此结合海上施工环境应提前研究以下技术。

(1) 沉井制造、浮运技术。一般大型沉井在桥位附近制造，以减少远距离浮运的风险。沉井井壁建议采用预制拼装，由大型浮吊分块吊装后现浇湿接缝，目前，需研究船坞的功能及建造技术、井壁



图 2 钢沉井出坞浮运



图 3 上部混凝土沉井接高

预制及连接技术。

(2) 目前沉井下沉主要以水力吸泥机和空气吸泥机为主，成本较低。目前沉井施工时在减少沉井侧面摩阻力等方面做了诸多有益的尝试，但在沉井主动下沉技术和远程控制等方面，还需投入专门力量进行深入研究。

(3) 需开展水下挖掘装备、水下智能检测机器人在海洋深水环境中的应用研究。

3. 大直径钢桩基础

对于覆盖层较厚的海上桥梁，采用大直径钢桩是桥梁基础的重要发展结构形式之一。钢桩插打主要有两种方式：固定导向架+冲击锤插打（见图 4），打桩船插打（见图 5）。

固定导向架插打钢桩具有以下优点：①施工精度较高，一般通过多层导向调整使钢桩倾斜度的偏差小于 1/100，平面偏差在 50 mm 以内；②降低施工装备的配置参数，对于长桩，在无法整节施工时，可分段安装。其缺点主要表现在：①施工效率低，钢结构用量大，导向架安装耗费时间长；②在超水深条件下其适应性大大降低。

打桩船插打钢桩 [7] 的优点包括：①效率高，打桩船插打钢桩其效率一般是固定式导向架的 3 倍



图4 固定导向架插打钢桩



图5 打桩船插打钢桩

以上, 钢桩的调整也相对较快; ②水深对桩基施工影响相对较小; ③对海洋环境的适应性更好。而其缺点包括: ①对打桩船性能及技术参数要求高, 其自身稳定性也是重要的制约因素; ②施工费用相对较高, 机械装备较为先进, 造价不菲; ③单个墩位钢桩数量较多时, 其桩位方向变化较大, 其施工的便利性较差。针对深水海洋桥梁, 大直径钢桩的应用还需深入研究以下技术。

(1) 开展深水海洋桥梁大直径钢桩的应用试验研究, 选择钢桩的合理结构形式。深入开展海洋钢桩防腐措施及防腐工艺研究。

(2) 提高大功率液压冲击锤的研发力度, 开展打桩船快速化装备的应用研究。

(3) 开展钢斜桩桩内取土、桩底压浆等装备及工艺研究。

(二) 海洋桥梁上部结构建造技术及发展研究

1. 大跨度斜拉桥

大跨度斜拉桥是海洋桥梁的常用结构形式。其

上部结构关键技术主要包括主塔、主梁及斜拉索的施工。

目前, 混凝土主塔的爬模施工技术已经比较成熟, 今后需研究模板结构一体化的施工技术。对于钢混结合的主塔结构, 需研究钢混拼缝形式、连接方式、传力模式等。在快速化施工技术方面, 研制自动化程度及施工精度高的施工机具, 研究预制和现浇结合的施工新技术。

对于钢塔结构, 应重点关注焊、栓还是栓焊组合设计选择研究。钢塔的快速化施工技术 [8], 主要有大型塔吊分节段施工技术 (见图 6), 大型浮吊分节段或者整节段竖转施工技术 (见图 7)。

海上大跨度斜拉桥主梁有钢桁梁、钢箱梁及混合梁等结构形式。主梁一般采用钢桁梁, 且多为双主桁或三主桁断面形式。钢梁架设方法基本有散拼、桁片吊装、节段吊装和整孔吊装几种。随着现代工业装备及科学技术的发展, 钢梁制造和架设工艺得到了巨大进步, 目前正在修建的沪通长江大桥采用双节段吊装法 (见图 8), 平潭铁路跨海大桥采用整孔安装技术 (见图 9)。

钢梁架设所用的海上船舶在工作时, 风、浪、流等对其干扰严重, 因此船舶定位是一项需要解决的难题, 这时应结合各专业技术手段, 通过计算机控制自身推力器, 保持船舶的航向和精准定位 [9]。

斜拉桥的拉索锚固定于塔、梁上, 施工时有放索、牵引、安装等过程, 工序较多, 特别是随着桥跨加大, 安装拉索时要具有较大的起吊设备,



图6 塔吊安装钢塔节段



图7 浮吊安装钢塔节段



图8 沪通长江大桥双节段钢梁架设

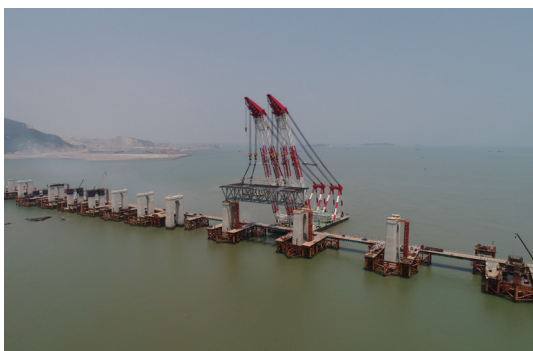


图9 平潭铁路跨海大桥 80 m 钢桁梁整孔

同时牵引力增大，牵引距离增长，所需设备也较多。因此，研究智能型的斜拉索安装技术是海洋桥梁的发展需求。

2. 大跨度悬索桥

大跨度悬索桥是海洋桥梁的主要结构形式，其中钢塔钢梁是未来发展的重点。

在马鞍山公路大桥、鸚鵡洲长江大桥、杨泗港长江大桥中墩钢塔均采用 D5200 型塔吊安装。钢塔施工方法一般有以下几种：整体竖转法是将钢塔在

工厂预制拼装成整体，然后运输至现场，利用起吊设备或转向系统将主塔整体翻转到位；爬升式吊机架设法，是指吊机依附于塔柱侧壁自动爬升，逐段架设塔柱节段，日本本四联络线的下津井濑户大桥、南北备赞濑户大桥都采用这种方式，其最大额定起重量达 130 t；自动升降式塔吊架设法，利用主塔强度，将塔吊和主塔临时固结，有效缩短了塔吊自身高度，提高了塔吊垂直运输距离，节省了大量的机具设备和人力，日本明石海峡大桥塔身采用 160 t 自动升降式塔吊安装；浮吊大节段架设法，由浮吊直接安装，但对吊重及吊高有一定的局限。

悬索桥加劲梁一般采用桁梁截面形式，按吊杆间距分节。安装时一般采用架梁吊机桁片架设、缆载吊机、浮吊三种方式。桁片架设时（见图 10），架梁吊机和运梁小车相结合使用，采用组拼桁片，极大限度地节省施工场地，但施工速度慢，受风影响较大。缆载吊机法，占用航道的影晌较小，是悬索桥主梁常用的架设方法（见图 11），目前，最大吊装重量已达 1000 t。浮吊安装法，配合船只较多，特别是对浮吊的技术参数要求高，设备一般较大。经过梳理，悬索桥主梁安装应对加劲梁运输定位、大型吊装设备、施工对主梁结构影响控制等方面进行深入研究。

悬索桥主缆一般采用猫道施工。猫道的功能作为索股牵引、索股调整、主缆紧固、索夹及吊索安装、钢箱梁吊装、主缆缠丝防护等施工平台。现阶段猫道施工应对先导索的架设及抗风稳定减振措施开展专门的设计和研发。

主缆牵引最早采用空中编缆法（AS），目前预制束股法（PPWS）是最常用的方式。由于 PPWS 法的索盘较重，因此场内运输需采用较大的起重设备才能实现。因此，海洋环境下的主索存放索场地的构建及其相关影响性分析、主缆防腐技术是需要重点研究的内容。

（三）智能化信息平台技术

研究智能化施工技术是现代桥梁智慧建造的重要手段。通过智能工装集中、施工监测监控、标准化施工等融合，建筑信息模型（BIM）可用来事前结合工期计划虚拟推演施工方案，验证方案实施可行性，优化施工顺序和资源配置，确保方案安全、合理、经济。施工中将主体及施工结构用 BIM 建



图 10 架梁吊机桁片安装

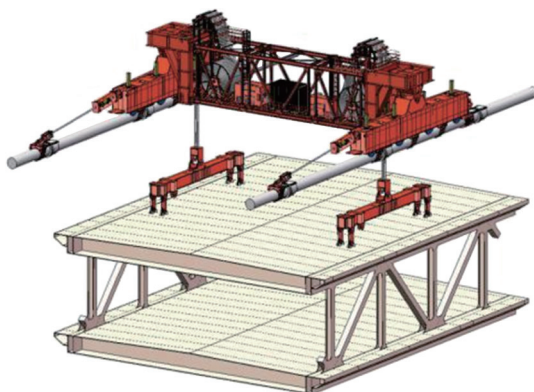


图 11 缆载吊机安装加劲梁示意图

模，在实景模型上布置项目驻地、桥位施工区、生产车间等作业场面，形象直观地展现项目整体部署，在办公区就可实时监控监测现场操作安全和施工质量。

四、结语

近 20 年来，我国海洋桥梁建造取得了举世瞩目的伟大成就。但在更加复杂和恶劣的海洋环境下，我国海上桥梁的建造技术和相关装备还将面临更多新挑战，为提高海上桥梁施工效率，保证施工安全和质量，未来海洋桥梁建造将在大直径钢桩、沉井沉箱、设置基础、大节段或整孔钢梁等施工大型化和装配化的方向发展，同时伴随

着智能建造将会迎来海洋桥梁工程施工技术发展的新时代。

参考文献

- [1] 林一宁, 陈爱萍. 跨海大桥的预制构件法施工 [J]. 世界桥梁, 2002 (4): 12-16.
Ling Y N, Chen A P. Construction of the precast members of the cross-sea bridge [J]. World Bridges, 2002 (4): 12-16.
- [2] 张昊, 王辉, 何宁. 海洋工程大型起重设备及其关键技术研究 [J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 130-139.
Zhang H, Wang H, He N. Analysis of the key technology of the offshore engineering lift system and the crane [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(4): 130-139.
- [3] 左明福. 厄勒海峡大桥的设计与施工 [J]. 中国港湾建设, 2001 (1): 5-9.
Zuo M F. Design and construction of Oresund Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2001 (1): 5-9.
- [4] 翟世鸿, 杨炎华, 张照霞. 桥梁深水主墩基础的现状与发展趋势探讨 [J]. 中外公路, 2007, 27(6): 116-119.
Zhai S H, Yang Y H, Zhang Z X. Discussion on present situation and development trend of bridge deep water main pier foundation [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(6): 116-119.
- [5] 杨运泽, 黄淑珍. 明石海峡大桥大直径钢沉箱基础的施工 [J]. 中国港湾建设, 1991 (3): 45-51.
Yang Y Z, Huang S Z. Construction of large diameter steel caisson foundation of Mingshi Strait Bridge [J]. China Harbour Engineering, 1991 (3): 45-51.
- [6] 张国宁. 从大贝尔特海峡大桥、厄勒海峡大桥到费马恩海峡大桥的跨越 [J]. 中外公路, 2016, 36(1): 130-135.
Zhang G N. Progress from the Great Belt Strait Bridge, the Oresund Strait Bridge to the Ferman Strait Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(1): 130-135.
- [7] 王永东, 杨胜龙. 全旋转打桩船“海力801”超长超重钢管桩沉桩技术 [J]. 中国港湾建设, 2011 (2): 42-46.
Wang Y D, Yang S L. Study on ultra-long and overweight steel pipe pile driving technology of fully rotating pile driving vessel “Haili 801” [J]. China Harbour Engineering, 2011 (2): 42-46.
- [8] 王辉, 方兴, 白玲, 等. 斜拉桥和悬索桥钢塔的架设 [J]. 铁道建筑, 2007 (7): 4-6.
Wang H, Fang X, Bai L, et al. Erection of steel towers of cable-stayed bridges and suspension bridges [J]. Railway Engineering, 2007 (7): 4-6.
- [9] 郭健. 跨海大桥建设的主要技术现状与面临的挑战 [J]. 桥梁建设, 2010 (6): 67-69.
Guo J. Current principal technique status and challenges to be confronted in construction of sea-crossing bridges [J]. Bridge Construction, 2010 (6): 67-69.