

国内外跨海通道的比较及启示

刘良忠^{1,2}, 柳新华¹

1. 鲁东大学环渤海发展研究院, 烟台 264025
2. 鲁东大学商学院, 烟台 264025

摘要 在回顾世界跨海通道发展历程的基础上,总结了铁路轮渡、跨海大桥、海底隧道、桥隧组合等跨海工程形式的优缺点。分析了国内外代表性跨海工程的技术、投融资和运营模式等,展望了跨海工程的发展趋势,提出中国跨海工程建设应加强工程项目的前期调查、研究和设计,重大跨海工程由国家作为建设主体,前期研究开发经费由国家财政予以支持,对工程方案、投融资模式等结合工程所在地情况进行科学决策。

关键词 跨海工程;跨海大桥;海底隧道

人类从认识海洋开始,便有了海上航行,形成了灿烂的海洋文化和繁荣的海洋经济。现代经济社会的高速发展,对跨海交通运输不断提出更高的新要求。传统的海上运输已经无法满足经济社会发展的需要。科技的发展,世人将目光投向了海底和海面上空,利用海底建设海底隧道,利用海面上空建设跨海大桥,这就是跨海通道。为了突破海峡、海湾和海岛对交通的制约,建设跨海工程成为人类社会新的课题,跨海大桥、海底隧道、海底管道等前所未有的新的交通方式,逐渐展现在世人面前。而经济和社会的高速发展,特别是高新技术在海洋领域的广泛应用,为跨海工程的兴建又提供了必备的条件。截至目前,全世界已建、在建和拟建跨海通道已有100多条,遍布五大洲(图1)。特别是发达国家,更是走在了前列。日本、丹麦等国是世界上跨海桥隧工程最发达的国家,而挪威是世界上海底隧道最多的国家。目前跨海工程比较集中、技术比较成熟的国家主要有日本、丹

麦、挪威、英国、美国、中国、意大利等^[1-18]。

1 国内外跨海工程发展概况

目前,世界各国比较普遍的跨海工程方式主要有铁路轮渡、跨海大桥、海底隧道及桥隧组合等形式。

1.1 铁路轮渡

铁路轮渡是通过港口、码头、栈桥连接铁路和渡轮以达到实现水陆联运的一种跨海通道形式,在国内外均有大量工程,技术上已非常成熟。与海底隧道和跨海大桥相比,铁路轮渡显然要简单易行得多。虽然铁路轮渡仍以船只作为交通工具,但与传统的海运不同,其船只只是专用船舶,适合跨海航行,具有显著的特点和优势:1)不必像轮船运输那样在码头上倒装货物,避免了货物的破损、污染、丢失,节省了装卸费用;2)火车车厢直接上船,无需建设大规模的码头装卸设备,从而节省了建设资金;3)在港口的作业时间短,加速了车船周转和货物传送,可大大提高港口

的吞吐能力。因此,在海峡两岸建有铁路但没有海底隧道或跨海大桥,同时又需贯通的情况下,铁路轮渡仍不失为理想的水陆客货联运工具。铁路轮渡的主要缺点是通行时间较长、轮渡空间利用率低、受气候影响大等,其运营效率与安全性对货运来而言不如海运^[5,16]。

世界上最早的铁路轮渡出现在英国。1850年2月3日,英国在苏格兰的福思湾使用铁路轮渡,运输铁路货车。经过160多年的发展,铁路轮渡现已普及到20多个国家,并在70余条航线上运营,总长1.4万km,其中跨海轮渡航线50多条,其余为沿江或跨江、河、湖泊的航线。这些轮渡线中,欧洲占比重最大,为45%;北美及亚洲占30%;南太平洋地区占25%。航程超过100km的主要航线有34条,目前正在规划设计和准备开通的铁路轮渡线还有30多条。欧洲的跨海轮渡出现最早,发展也最快,尤其是波罗的海沿海国家,如丹麦、瑞典、德国等,铁路轮渡技术十分发达,这些轮渡线已形成欧洲铁路网的组

收稿日期:2016-04-04;修回日期:2016-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41171096);国家社会科学基金特别委托项目(07@ZH005);中国行政体制改革研究基金项目(2015CSOARJJKT016, 2015CSOARJJKT018)

作者简介:刘良忠,副教授,研究方向为战略管理、跨海通道,电子信箱:ytdx97@163.com

引用格式:刘良忠,柳新华.国内外跨海通道的比较及启示[J].科技导报,2016,34(21):16-26;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.21.002

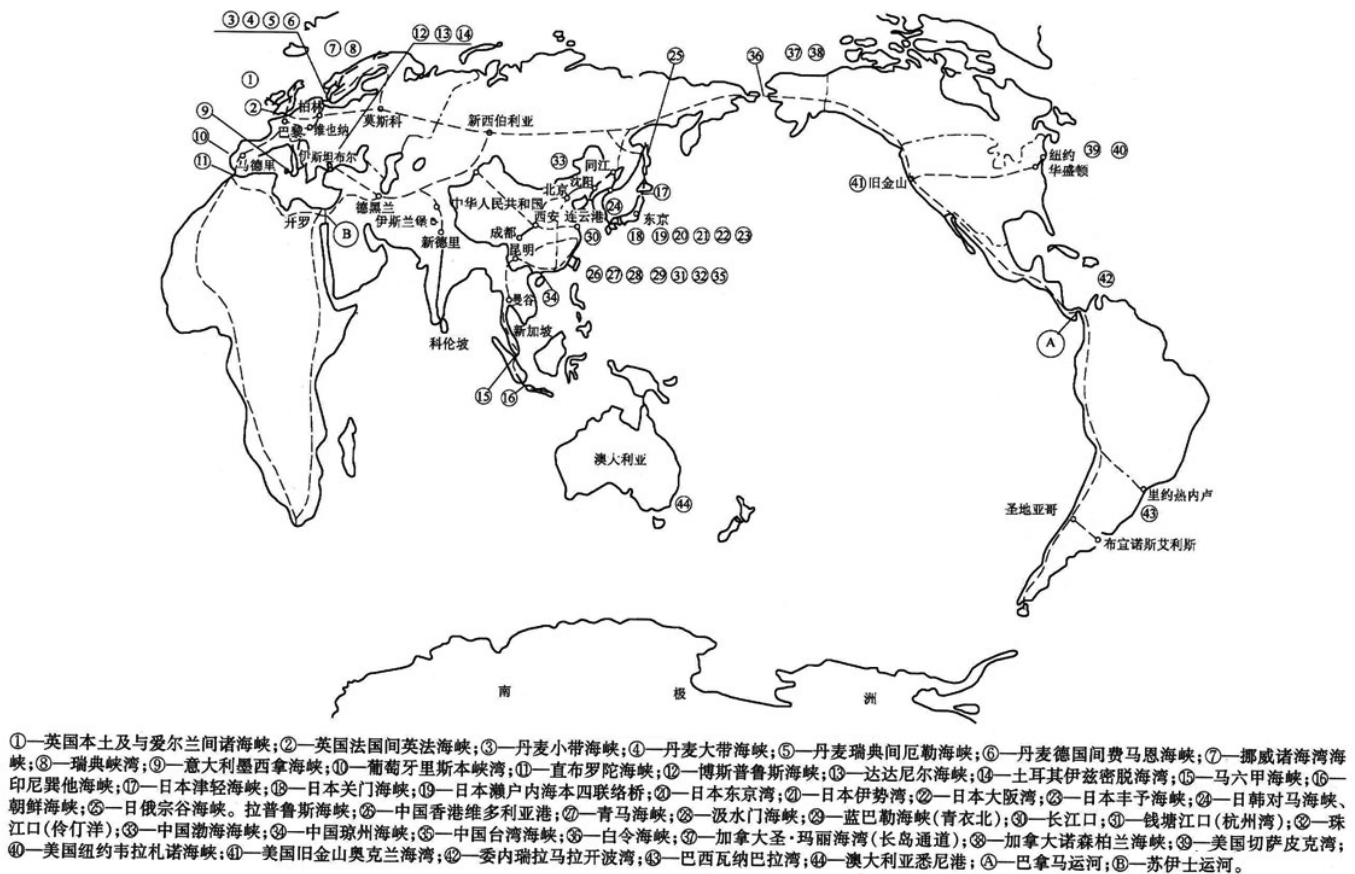


图1 世界跨海工程位置示意(唐寰澄,2004)

Fig. 1 Schematic map of sea-crossing projects in the world(Tang Huancheng, 2004)

成部分,是北欧国家与欧洲铁路联结的纽带。从国外铁路轮渡发展历程看,铁路轮渡很少发生意外,已经是一种技术成熟、安全可靠的运输方式。中国的琼州海峡和渤海海峡,也均实现了铁路轮渡运输,目前运营良好,取得了较好的经济效益和社会效益,其中跨越渤海海峡的烟台—大连铁路轮渡,是中国第一条、世界上第35条超过100 km的海上铁路轮渡。

1.2 跨海大桥

跨海大桥是利用现代架桥技术连接海峡、海湾、海岛等的一种跨海工程。它具有通过能力强、便捷快速、运输方式灵活、观赏价值高、运营费用低等优点。与隧道相比,桥梁的施工技术成熟,可以多点施工,建设周期较短;避免了长距离隧道的通风难题;乘车视野开阔,舒适性好;养护维修及防灾救灾方便;可跨越特殊不良地质地段等。缺

点是跨海大桥易受大风、大雾及恶劣天气的影响;大跨、高墩、深水桥梁施工困难;结构和强度要求较高,对抗风和抗震要求较高;对海洋及岛屿环境影响较大,且容易妨碍海上、空中通航,从战略战备效益来看,不如海底隧道^[5,16]。

史上有记载最早的跨海桥梁,出现在公元前500年,距今已有2500多年历史。当时在黑海海峡上曾修建过一座浮桥,波斯国王大流士一世通过该桥,在希腊雅典城东北的马拉松海湾登陆。1502年,著名艺术家达芬奇提出了一个大胆的设想,计划在伊斯坦布尔的金角湾兴建一座346 m的大桥,横跨波斯普鲁斯海峡。如果大桥真的建成,将是当时世界上最长的桥梁,也是第一座真正意义的跨海大桥,更是第一座横跨欧亚两大洲的大桥。目前,海峡上已建成三座跨海大桥,连接欧亚大陆,达芬奇的设想成为了现实。

世界上较早建成的跨海大桥,比较有名的有麦奈海峡大桥、布坦尼亚大桥等。1826年,麦奈海峡大桥建成,跨越英国的威尔士和安格莱塞岛,将海峡两岸连在了一起。1850年,英国又在麦奈海峡上建成全长460 m的布坦尼亚大桥,这是世界上第一座铁路梁桥。进入20世纪30年代,跨海大桥建设进入热潮。众多拥有海峡、海湾、海岛的发达国家和地区,在基本完成了本土交通建设的任务后,开始建设跨海桥梁。1937年,美国建成旧金山金门大桥,全长2737 m,主跨达1280 m,是最著名的跨海桥梁之一,被誉为近代桥梁工程的一项奇迹。作为岛国,20世纪60、70年代日本和丹麦也开始实施宏伟的跨海桥梁建设计划。

日本在20世纪40年代即开始进行跨海工程的建设。第二次世界大战后,由于经济迅速发展的需要,跨海工程建

设更是步入了快车道。1973年,日本建成主跨712 m的关门大桥,随后开始建设连接本州和四国的东、中、西3条线的本四联络线工程,其中2条为公铁两用线路,1条为汽车专用道路,公路线总长178.5 km,铁路线总长122.2 km,3条线路上共有25座大桥,其中的明石海峡大桥(悬索桥,1991 m)和多多罗大桥(斜拉桥,890 m)分别创造了当时世界悬索桥、斜拉桥的跨度纪录。20世纪末,日本已基本完成四大主岛的跨海工程建设,原来只能通过轮船往来的海上通路,从此变成了汽车和火车可以直达的陆路通道。1970年,丹麦建成主跨600 m的小贝尔特桥,随后也开始了大规模的跨海工程建设,将丹麦的几个主岛连在一起,其中连接西兰岛和菲因岛的大贝尔特桥,是世界第三的悬索桥,主跨1624 m。

日本和丹麦的跨海桥梁建设,推动了世界跨海桥梁工程的热潮。20世纪世界桥梁建设最高水平和跨度纪录的几座大桥,多为跨海工程。中国的跨海桥梁工程,起始于20世纪90年代,目前已建、在建和拟建的著名跨海大桥有杭州湾跨海大桥、舟山连岛工程(5座跨海大桥,最大跨度1650 m)、东海大桥、青岛胶州湾海湾大桥、港珠澳跨海大桥以及香港的昂船洲大桥、青马大桥等。

1.3 海底隧道

海底隧道的优点是能够全天候运营,不受台风、暴雨、大雾等恶劣气候的影响;运营期间对海上的航运无影响;深埋于地下,海上洋流、黑潮等对隧道运营不造成影响;抗震性能较好,抵抗战争破坏能力强;不影响通道资源的利用;对海洋环境及岛屿环境影响小等。缺点是工程技术难度大(地质勘测、选线难度、长距离通风、防渗和防灾等问题都非常突出),建设周期长、耗资巨大,且建成后运营费用高,特别是运营风险较高,通风和灾害条件下的逃生疏散救援较为困难^[5,16]。

世界上海底隧道的工程设想最早可追溯到18世纪中叶提出的英法隧道。早在1751年,法国的地理、物理学家Nicola Demara就曾提议修建英吉利

海峡隧道。1802年,法国一位采矿工程师提出了第一个海峡隧道设计,并引起拿破仑的兴趣,但由于当时的技术条件限制,这一想法未能实现。此后近2个世纪中,有过27次开挖的筹划与尝试。直到20世纪80年代,兴建这一宏大工程的条件,才从政治、经济、技术等各方面臻于成熟。第一条建成的海底隧道出现在日本。20世纪40年代,日本在关门海峡成功修建了第一条海底隧道,从此本州和九州两个主岛连接在一起。此后,海底隧道成为世界各国跨海工程建设中一种新的交通方式。目前,全世界已建成海底隧道40多条,和跨海大桥类似,现有的海底隧道大多分布在发达国家,如挪威、日本、丹麦等国。无论是隧道的数量还是长度,这些国家均走在了世界前列。尤其是日本,不仅率先建成了世界上第一条海底隧道(关门隧道),而且拥有目前世界上最长的海底隧道(青函隧道)。北欧的挪威,由于境内拥有众多峡湾,所以也建设了大量的海底隧道,其中大多为公路隧道。著名的海底隧道工程有英吉利海峡隧道、日本青函隧道、东京湾海底公路隧道等。中国厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道已先后建成通车,港珠澳跨海大桥(桥隧组合工程)正在修建之中,大连湾海底隧道也已启动,而琼州海峡、渤海海峡、台湾海峡的海底隧道工程方案正处于研究论证之中。

1.4 桥隧组合

桥隧组合工程是针对桥梁、隧道工程的优缺点,对于跨海距离较远、工程地质条件、水文条件较复杂的海峡、海湾所采用的一种跨海通道形式。这种组合结构形式不但解决了由于隧道过长,施工和运营、通风、防渗和防灾等技术上的难题,而且解决了跨海桥梁妨碍航行、影响生态环境等缺点,且对于整个工程可以因地制宜,充分利用地形地貌和地势条件,分段实施,缩短建设周期,充分发挥了跨海桥梁、海底隧道各自的优点,有效规避了各自的缺点。对于长、大跨海工程,国际上大多采用桥隧组合方案,如东京湾横断公路工程、大贝尔特海峡通道、厄勒海峡跨海通

道、切萨皮克海湾桥隧工程等^[5,16]。

世界上第一座桥隧组合工程位于美国弗吉尼亚的汉普顿公路上。1964年,美国建成了切什彼克(Chesapeake Bay)桥隧系统,全长28 km,该工程在20世纪60年代创造了长度和工程规模的世界纪录,曾被称为当代的世界工程奇迹。丹麦是桥隧组合工程的代表性国家。为联通丹麦本国及丹麦与瑞典、丹麦与德国的交通网络,先后修建了丹麦大贝尔特海峡、厄勒海峡跨海通道,还计划修建一条长19 km的铁路隧道或是一条桥隧组合跨越丹麦与德国之间的费马恩海峡。在中国,已建成通车的上海崇明越江通道及在建的港珠澳跨海大桥、泉州湾跨海通道等,也均采用桥隧组合方式。论证规划中的渤海海峡跨海工程备选方案,南桥北隧也是其中的代表性方案。

2 国外著名跨海工程

跨海工程是经济社会发展的必然要求,也是一国综合国力的体现。目前世界上比较著名的跨海工程,大多位于发达国家和地区。其中代表性工程包括英法海峡隧道、日本青函海底隧道、丹麦大贝尔特桥隧工程等。

2.1 英法海峡隧道

1) 基本情况。该隧道是铁路隧道,连接英国和法国(图2)。1987年12月开工建设,1994年5月6日开通运营。由3条51 km长的平行隧洞组成(2条行车隧道用于通车,1条服务隧道用于逃生、救援),全长153 km,其中海底段隧洞长度3×38 km,年设计运输能力为3000万旅客,1500万t货物。隧道是火车专用隧道,运营“欧洲之星”(Euro Star)和“列舒特”(Le Shuttle)两种列车(图3~图6)。前者载人,通过隧道需20 min;后者载货及载车,通过隧道需时30 min。

2) 融资模式和运营模式。隧道采用BOT模式建设,是目前世界上规模最大的BOT项目,也是世界上规模最大的利用私人资本建设的工程项目。总投资约103亿英镑(约150亿美元,当年汇率),由欧洲隧道公司通过发行股



图2 英吉利海峡隧道位置示意
Fig. 2 Schematic map of the Euro Tunnel



(a) 英国端



(b) 法国端

图3 英吉利海峡隧道进出口
Fig. 3 Entrance of the Euro Tunnel



(a) 英国端



(b) 法国端

图4 英吉利海峡隧道车场

Fig. 4 Marshalling station of the Euro Tunnel



(a) 英国端



(b) 法国端

图5 “欧洲之星”火车站

Fig. 5 Railway station of the Euro Tunnel



图6 “列舒特”列车

Fig. 6 Train of Le Shuttle

票、银行借贷等形式筹集得来。项目东道国为英、法两国政府，1984年英法两国政府签订了建设该隧道的协议。欧洲隧道公司(Euro Tunnel)中标获得了特许权,特许期55年,后延长到99年。该公司由英国的海峡隧道集团和法国的法兰西-曼彻公司联合组成。两国政府没有向公司提供支持贷款、最低经营收入担保和外汇利率担保等,但给予了项目较长时间的特许期、商务自主权和33年内不再建设横跨海峡的“二次联结设施”等优惠条件。

3) 建造技术。盾构法和隧道掘进机法(TBM法)。

2.2 日本青函海底隧道

1) 基本情况。青函隧道南起青森,北至函馆,是一条连结本州和北海道的海底铁路隧道(图7)。由3条隧道组成,其中2条主隧道,1条服务隧道。主隧道全长53.85 km,其中海底部分23.3 km,陆上部分本州一侧为13.6 km,北海道一侧为17 km。隧道位于海底100 m(海平面240 m)以下。1964年开工建设,1988年建成投入运营。是世界上第一条长距离的海底隧道,也是世界十大著名铁路隧道之一,至今仍然是世界已建最长的海底隧道(图8、图9)。

2) 融资模式和运营模式。青函隧道由日本政府出资建设,总投资约6890亿日元(约53.8亿美元),建设、运营、管理均为日本国家铁路公司。共计约1200万人参加了工程建设,其中有34人亡于工程事故。

与世界其他海底隧道不同的是,青函隧道还建有两座海底车站,即位于本州端起13 km处及41 km处的“龙飞海



图7 青函隧道位置示意

Fig. 7 Schematic map of the Aomori Hakodate Tunnel



图8 青函隧道出入口

Fig. 8 Entrance of the Aomori Hakodate Tunnel



图9 青函隧道车站

Fig. 9 Station of the Aomori Hakodate Tunnel

底站”及“吉冈海底站”。一旦发生危险,列车可迅速就近驶入海底车站避难,保证了隧道的安全运行。隧道自开通以来,没有发生过一起安全事故。

3) 建造技术:钻爆法。

2.3 丹麦大贝尔特桥隧工程

1) 基本情况。大贝尔特桥隧工程,又称大贝尔特大桥、大带大桥,因跨越大贝尔特海峡而得名(图10)。位于哥本哈根正西120 km处,将丹麦第一大城市首都哥本哈根所在的西兰岛和第三大城市欧登塞所在的菲因岛连接在一起,两岛海面距离18 km。桥隧全长17.5 km,是丹麦建筑史上最宏大的工程,也是世界最大的跨海桥隧工程之一。整个工程包括3个部分:东部海底隧道、西部桥梁和东部桥梁(图11、图12)。东部海底隧道连接西兰岛和大贝尔特海峡中的斯普罗(Sprogø)岛,总长8024 m。西部桥梁为连接菲因岛和斯普罗岛的上下两层公铁两用桥,长6611 m。东部桥梁连接西兰岛和斯普

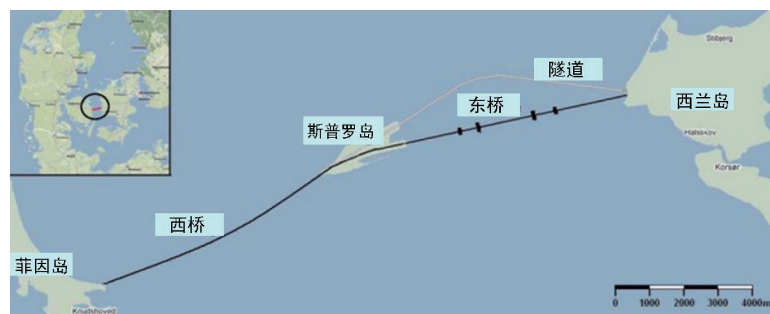


图10 大贝尔特桥隧工程位置示意

Fig. 10 Schematic map of the Great Belt Fixed Link



(a) 东桥

(b) 西桥

图11 大贝尔特桥隧工程

Fig. 11 Great Belt Fixed Link



图 12 大贝尔特桥隧收费站(东桥)

Fig. 12 Toll station of the Great Belt Fixed Link (the east bridge)

罗岛,长 6790 m。参加工程建设的公司来自丹麦、德国、法国、瑞士、英国、美国等国家。大贝尔特桥隧工程,不仅是世界著名桥梁,也是国际合作的典范。

2) 融资模式和运营模式。工程总造价 337 亿丹麦法郎(48 亿美元,1988 年汇率),是欧洲当时预算最高的桥梁工程。由于造价高,大贝尔特桥成为丹麦第一座收费公路桥。工程费用在国家担保下由民间集资,通过收取通行费返还,偿还期为 30 年。

3 国内著名跨海工程

新中国成立后,为了解决海岛、海湾、海峡的交通问题,跨海工程建设被提上了议事日程。随后,沿海各地陆续开始兴建各种各样的跨海通道。建国初期,为了改善一些海岛的交通,兴建了一些海堤式的陆岛通道工程。最早兴建的是厦门连陆工程——集美海堤(1956 年)。1974 年,日本成功修建了本州岛至九州岛的关门海底隧道。周恩来总理听到消息,指示国务院副总理万里组织研究修建琼州海峡海底铁路隧道的问题。这是共和国第一代领导人第一次明确提出在琼州海峡修建跨海隧道、跨海铁路,也是新中国第一次明确提出修建跨海工程的发展规划。改革开放以后,经济社会发展日新月异,跨海工程建设也日益加快。

国内跨海通道包括跨海大桥、海底隧道、铁路轮渡、海上大堤等形式,其中

主要是跨海大桥。目前,东部沿海各地均有已建成的跨海通道,还有一系列跨海工程正在建设或已列入规划。据不完全统计,目前已建、在建和拟建的跨海通道共有 100 余项。其中跨海大桥 70 余座,海底隧道 20 余条。已建跨海大桥主要分布在香港、澳门以及广东、福建、浙江等东南沿海发达地区。中国已建海底隧道有 5 条位于香港,1 条位于台湾高雄。

内地的海底隧道建设发展较晚,目前建成的有 2 条,分别是厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道。在跨海大桥中,比较有代表性的包括杭州湾跨海大桥、青岛胶州湾跨海大桥、东海大桥、舟山大陆连岛工程等。

3.1 国内知名跨海大桥

在 70 多座跨海大桥中,据不完全统计,已建 35 座,在建、拟建 37 座。

从技术类型上看,以梁式桥居多,与国外跨海工程有很大不同。其原因是,国内现代桥梁科技与发达国家相比相对落后。斜拉桥和悬索桥技术的出现较晚,20 世纪 90 年代之后才开始在国内应用,但发展却很快,海口世纪大桥(2003 年)、杭州湾大桥(2008 年)等即是斜拉桥的代表作,而虎门大桥(1997 年)、海沧大桥(1999 年)等则是悬索桥的代表作。未来将要兴建的跨海大桥,也将更多地采用这两种技术类型。

从交通类型上看,公铁两用桥有 5 座,其他均为公路桥,说明当前跨海桥梁仍以衔接公路交通为主。

从地区分布来看,现有的跨海大桥多数在东南沿海发达地区。如香港、澳门以及广东、福建、浙江等地。这些地区,由于海峡、海湾、海岛较多,因此需要建设的跨海桥梁相应的也较多。发达的经济水平,使得其有能力、有条件进行大规模跨海桥梁的建设。而海南、广西等省区,在这方面则略显不足,尽

管对跨海通道的需求非常迫切,但欠发达的经济水平明显制约了其跨海桥梁的建设。随着沿海地区经济和社会发展的需要,未来一段时间内,跨海大桥建设将进入一个新的高潮,一系列跨海桥梁将飞架在海湾、海峡或海岛之上。

从桥梁长度来看,多数跨海大桥在 1500~5000 m 之间。目前国内跨海大桥以跨越港湾或连接海岛居多。近年来,超过 10 km 的长距离大桥开始增多,已建成的跨海大桥中,最长的是青岛海湾大桥,全长 36.48 km,是目前中国也是世界上第一长距离跨海大桥,同时也是世界第二长桥。此外,杭州湾大桥全长 36 km,是世界第三跨海大桥。未来将要建设的琼州海峡大桥和在建的港珠澳大桥等,也均为超过 20 km 的长距离大桥。

3.1.1 青岛胶州湾跨海大桥

1) 基本情况。青岛海湾大桥是中国自行设计、施工、建造的特大跨海大桥。是国家高速公路网 G22 青兰高速公路的起点段,山东省“五纵四横一环”公路网框架的组成部分,青岛市规划的胶州湾东西两岸跨海通道“一路、一桥、一隧”中的“一桥”。大桥起自青岛主城区海尔路,经红岛到黄岛,全长 36.48 km,超过杭州湾跨海大桥和美国切萨皮克跨海大桥,是当今世界上最长的跨海大桥,也是世界第二长桥(图 13、图 14)。2005 年 6 月 30 日正式开工,2011 年 6 月 30 日建成通车,上榜当年吉尼斯世界纪录和美国《福布斯》杂志,荣膺“全球最棒桥梁”荣誉称号。

2) 融资模式和运营模式。项目总投资 90.82 亿元,采用特许经营方式。是中国目前国有独资单一企业投资最大规模的交通基础设施项目。项目经营期 25 年,经营期满项目的所有权和经营权将全部转移给青岛市政府。

3.1.2 东海大桥

东海大桥起始于上海浦东新区芦潮港,北与沪芦高速公路相连,南跨杭州湾北部海域,直达浙江嵊泗县小洋山岛,是上海国际航运中心深水港工程的组成部分,被上海市政府列为“一号工程”(图 15)。上海 6000 多 km² 的土地



图 13 青岛胶州湾跨海大桥位置示意
Fig. 13 Schematic map of the Jiaozhou Bay Bridge



图 14 青岛胶州湾跨海大桥实景
Fig. 14 Jiaozhou Bay Bridge

上,已有的桥梁,主要是依长江、黄浦江、苏州河而建,而东海大桥是第一座外海大桥,也是中国第一座真正意义上的外海大桥。大桥总长 32.5 km,包括 2.3 km 的陆上段、海堤至大乌龟岛之间约 25.5 km 的海上段、大乌龟至小洋山岛之间约 3.5 km 的港桥连接段。2002 年 6 月 26 日正式开工建设,2005 年 5 月 25 日实现贯通。大桥宽 31.5 km,分上、下行双幅桥面,双向 6 车道。最大主通航孔,离海面净高达 40 m,相当于 10 层楼高,可满足万吨级货轮的通航要求(图 16)。大桥两侧 1000 m 以外沿

线,建有海上风电场,这是中国也是亚洲的第一个海上风电场。

3.1.3 杭州湾跨海大桥

浙江省经济发达,海湾、海峡、海岛众多,跨海桥梁建设远远走在全国的前列,仅杭州湾周边就有多座大桥,共同构筑成一个发达的环杭州湾桥梁网络。目前已建成的知名跨海工程有杭州湾跨海大桥、舟山群岛连岛工程等。

杭州湾跨海大桥是国道主干线沈(阳)海(口)线跨越杭州湾的便捷通道。大桥北起嘉兴市海盐郑家埭,跨越宽阔的杭州湾海域后止于宁波市慈溪

水路湾(图 17)。全长 36 km,比连接巴林与沙特的法赫德国王大桥还长 11 km,曾是世界上最长的跨海大桥,目前是继青岛胶州湾大桥之后世界第二长的跨海桥梁(图 18)。大桥 2003 年 11 月 14 日开工,2008 年 5 月 1 日正式通车,大桥和两岸连接线总投资约 160 亿元。按双向 6 车道高速公路设计,设计时速 100 km/h,设计使用年限 100 年。

3.1.4 舟山大陆连岛工程

舟山大陆连岛工程又称舟山跨海大桥,是国家高速公路网杭州湾地区环线高速公路联络线,起于舟山本岛,途经里钓、富翅、册子、金塘 4 岛,跨越 5 个水道和灰鳖洋,至宁波镇海登陆,与宁波绕城高速公路和杭州湾大桥相连接(图 19)。该工程跨 4 座岛屿,翻 9 个涵洞,穿 2 个隧道,全长 48 km,总投资 130 亿元,由岑港大桥、响礁门大桥、桃夭门大桥、西堠门大桥、金塘大桥 5 座跨海大桥及接线公路组成,是中国也是世界上规模最大的岛陆联络工程(图 20)。



图 15 东海大桥位置示意
Fig. 15 Schematic map of the East Sea Bridge



图 16 东海大桥实景
Fig. 16 East Sea Bridge



图 17 杭州湾跨海大桥位置示意
Fig. 17 Schematic map of the Hangzhou Bay Bridge



图 18 杭州湾跨海大桥实景
Fig. 18 Hangzhou Bay Bridge



图 19 舟山大陆连岛工程线路示意
Fig. 19 Schematic map of the Zhoushan Mainland-Islands Links



图 20 舟山大陆连岛工程实景(金塘大桥)
Fig. 20 Zhoushan Mainland-Islands Links (Jintang Bridge)

3.1.5 港珠澳跨海大桥

港珠澳跨海大桥连接香港、珠海与澳门三地,号称“中国第一桥”,已于2009年12月动工,预计2016—2017年建成通车。按照总体方案,港珠澳大桥主体工程耗资约327亿元、整体工程估计逾700亿元,由中央以及粤港澳三地政府共同出资兴建。建成后将成为世界第一长跨海桥隧工程,能从根本上解决阻碍港珠澳三地合作交流的瓶颈,成为深化港珠澳合作、促进港澳地区稳定的世纪金桥,也将成为中国“一国两制”成功实践的里程碑。

大桥全长49.968 km,其中主体工程海中桥隧长达35.578 km。6.6 km长的海底隧道,用钢量相当于11个“鸟巢”,施工难度世界第一。大桥设计使用寿命长达120年,可以抗击8级地震、16级台风及30万t巨轮撞击,人工岛可抗300年一遇洪潮。

大桥整体方案为“香港石散石湾—珠海拱北/澳门明珠”桥隧组合方案,从香港到澳门/珠海,工程依次为:大桥+人工岛+隧道+人工岛+大桥+人工岛+“Y”大桥。从整座大桥的外貌将以离岸人工岛、主跨斜拉桥为最突出标志,整体呈“Y”形外观。

3.2 国内著名海底隧道

国内海底隧道的建设发展较晚,现有的海底隧道主要位于香港和台湾地区。20世纪70年代开始,香港拥有海底隧道。其中,1972年建成的港九中线海底隧道是香港也是中国最早的海

底隧道。此外,香港还在1989年建成了港九东线隧道,1997年建成了西线隧道。三条海底隧道,越过维多利亚海峡,把港岛与九龙半岛连接在一起。中国台湾在1984年也建成了长1060 m的高雄海底隧道。

据不完全统计,到目前中国有20余条海底隧道,其中已建8条、在建2条、拟建10余条。

从建造方法上看,已建海底隧道主要采用沉管法。如香港已建成的5条隧道均采用沉管法。因为已经建成的这些隧道,长度均很短,最长的也只有2 km左右(港九东线隧道)。从长远来看,参照国外发达国家海底隧道的发展趋势,盾构法的发展空间更大一些。

从交通类型上看,以公路隧道为主。20余条隧道中有12条是公路隧道,3条是铁路隧道,公铁两用隧道只有1条(港九东线隧道)。

从地区分布来看,香港是国内拥有海底隧道最多的地区。已建成的8条隧道中,有5条位于香港,1条位于台湾高雄,另外两条分别是厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道。在10余条拟建的隧道中,除了澳门的3条、香港的1条距离较短外,其他均为穿越海峡(渤海海峡、台湾海峡、琼州海峡)和海湾(胶州湾、大连湾)的长距离隧道。而这几条拟建的海底隧道,同时也是中国沿海大通道远景规划中的一部分,是构筑东部沿海各省区之间陆路通道的关键环节。这些隧道建成后,将形成一条

北起黑龙江、南至海南岛,火车和汽车可以直达的大通道。

3.2.1 青岛胶州湾海底隧道

该隧道连接青岛市区和薛家岛,全长7870 m,为特长城市海底隧道,其中跨越海域段约3950 m。由左右2条正线隧道+中间1条服务隧道+团岛端进出匝道隧道所组成,双向6车道,设计时速80 km/h,是一条以满足客运交通为主的城市快速路隧道(图21)。2007年开工,2011年6月通车。是中国自行设计、建造的第二条大型海底隧道,采用钻爆法施工。项目总投资32.98亿元,由企业融资、建设和运营,经营期25年。

3.2.2 厦门翔安隧道

该隧道连接厦门本岛和翔安区,兼具公路和城市道路双重功能。隧道两端为厦门岛东部的五通码头和同安刘五店,2005年9月开工建设,2010年4月26日开通运营。总投资32.8亿元,全长8695 m,其中海底隧道长6050 m,跨越海域宽约4200 m,设计行车速度80 km/h。设计采用三孔隧道方案,两侧为行车主洞各设置3车道,中孔为服务隧道(图22)。隧道最深处位于海平面下约70 m,最大纵坡3%。左、右线隧道各设通风竖井1座,隧道全线共设12处行人横通道和5处行车横通道,横通道间距为300 m。隧道采用钻爆法暗挖方案修建,由中国完全自主设计、施工,对中国隧道建设技术的进步和发展,缩小与世界先进水平的差距,具有里程碑式的作用。



图21 青岛胶州湾海底隧道实景

Fig. 21 Subsea tunnel in Qingdao Jiaozhou Bay



图22 厦门翔安海底隧道实景

Fig. 22 Xiang'an subsea tunnel in Xiamen

4 结论与建议

自 19 世纪海底隧道、跨海大桥等相继出现,到现在不过 150 多年。人类不断地发挥自己的才智,技术不断的突破创新,跨越了一个又一个海峡,建起了公路铁路直达的通途。今天放眼全球,跨海通道已经遍布五大洲的许多国家和地区,成为人类通行必不可少的途径。跨海工程改变了人类的交通,也改变了经济社会的发展,已经和正在显示其巨大的作用。在政治、经济、社会、文化、科技、军事等多个方面,均具有重要的影响和意义。

纵观世界交通科技发展历史,汽车、火车、轮船、飞机以及相应的公路、铁路、海上和空中航线,是其中最重要的 4 个里程碑。而跨海通道则是继这 4 个里程碑之后,人类交通史上又一次划时代的壮举。跨海工程的兴起,打破了传统的“海上行船、陆上行车”的思维定势,开创了一个“汽车、火车直接跨越海洋”的新纪元,世界交通发展和工程科技历程从此翻开了新的一页。

经济社会和工程科技的发展,为跨海工程的不断拓展空间,而人类社会日益增长的发展需求,又对跨海工程的建设不断提出新的要求。从国内外跨海工程技术来看,未来跨海工程的建设,将进入一个新的时代。

4.1 跨海通道工程技术发展趋势

1) 在规模上,跨海工程将逐渐向长距离发展。不管是跨海大桥还是海底隧道,跨越的海峡将越来越长,穿越的海域将越来越宽,连接的海岛将越来越多。海峡不再是地区之间、国家之间、洲际之间难以逾越的天堑,而是成为连接五大洲、各国各地的纽带。

2) 在范围上,未来的跨海工程将越来越多地跨越国界、地区界,从一个国家发展到国家与国家或地区与地区。一条条跨海通道就像一道道彩虹,将不同的国家和地区连接在一起。

3) 在分布上,跨海通道将不再仅局限于欧美、日本等发达国家和地区,而是将向发展中甚至不发达国家拓展,遍布世界各地,凡有海峡、海湾、海岛的地方,都有可能出现跨海工程。特别是

拉丁美洲和大洋洲,在未来许多跨海工程有望修建在一些岛国之间,将这些岛国连接起来。

4) 在形式上,将有更多新的跨海工程不断地展现在世人面前,除了跨海大桥和跨海隧道将保持快速发展外,人工岛、海上机场、海底管道等,在未来也有望迎来一个发展的黄金时期。人类的生存空间将从陆地向海上甚至海底拓展,“海上城市”、“海上机场”、“海上公园”、“海底村庄”等有可能应运而生。而科学家也大胆预测,到 21 世纪末,人类将有 1/10 的人口从陆地移居海洋城市。

5) 在桥梁技术上,大跨度桥梁将向更长、更大、更深水的方向发展,海上全桥 GPS 控制测量定位更加准确,桥梁抗风抗灾能力逐步增强,大型构件吊装及安装技术水平日益精深,大型深水基础工程施工技术水平显著提高,在发展过程中更加注重新材料的开发和应用,更加重视桥梁美学及环境保护,重视人与自然的和谐可持续发展。

6) 在海底隧道技术上,钻爆法对各类岩石地层的适应形逐渐增强,已攻克超前地质勘探、超前深孔帷幕注浆、穿越海底风化深槽和断层破碎带等关键技术;大型掘进机修建大断面隧道技术、海底长距离掘进技术发展迅速;在海中修建人工岛增加通风竖井,通风和防灾救援技术日趋提高,而公路隧道也正在克服通风和防灾救援的困难,长、大公路隧道将日趋增多。

4.2 对中国跨海工程建设的建议

中国海岸线长达 18000 km,在东部沿海地区从北往南依次分布着渤海海峡、台湾海峡、琼州海峡等,此外还有众多的海湾、海岛、海峡等,均受到交通制约。东部沿海地区经济社会的发展,对跨海工程建设不断提出新的需求。党的“十八大”提出了“海洋强国”战略,作为“海洋强国”战略的重要载体,跨海工程建设迎来新的机遇。借鉴国内外跨海工程建设的经验和做法,对中国未来一个时期的跨海工程建设,提出若干建议:

1) 加强工程项目的前期调查、研

究和设计。目前国内外已有的重大跨海工程,从提出设想到最终建成都经历了长时间的前期工作。其中英吉利海峡隧道从拿破仑时代算起长达近 200 年,丹麦大贝尔特桥隧工程持续近 150 年,日本青函隧道也历经 80 余年。国内的港珠澳大桥等工程,前期研究也都在 30 年以上。与陆域工程相比,大型跨海工程涉及到多学科、多领域,其研究、论证、建设和运营也往往涉及到多部门、多区域,时间和空间跨度均难以想象,因此需要有专门的调查研究机构,全面展开工程的前期调查和研究,针对工程方案、区域经济社会发展、生态环境影响、工程项目风险等重点领域、关键技术开展研发和评价,为国家决策和工程规划建设提供参考依据。

2) 重大跨海工程宜由国家作为建设主体,尽量缩短实际建设时间。与漫长的前期研究相比,已有的工程项目纳入国家决策后,项目进展均明显加快,并在较短的时间内建成运营,其中:英吉利海峡隧道建设仅用了 7 年,丹麦大贝尔特桥隧工程用了 9 年,日本青函隧道用时 24 年,国内的杭州湾大桥历时 5 年,而港珠澳大桥预计用 7 年建成。重大跨海工程关系到国计民生,适宜由政府决策并积极推动,这样能够更好地发挥其作用,并通过工程建设推动科技创新和技术进步,加速区域经济社会的发展。

3) 前期研究开发经费,由国家财政予以支持。国内外几项重大跨海工程,项目最早设想均是由民间提出,发展到一定阶段,上升为国家战略。前期研究论证等,均由所在国、所在地政府设立专项经费,用于调查、研究、勘察、设计等。中国未来将要建设的重大跨海工程,建议也由政府成立专门机构,组织、协调和管理项目研究开发。设立专项经费,支持工程项目的调查、研究、规划、设计和规划等,保证工程研究论证的顺利进行。

4) 工程方案、投融资模式等,结合工程所在地的情况进行科学决策。国内外的重大跨海工程,有桥梁方案、有隧道方案,还有桥隧结合方案,投融资

模式有民间模式、国家模式等。不同的方案、模式,均是紧密结合工程所在国、所在地的政治、经济、社会、地理、环境等各种情况,对各种方案进行比选、论证,做出最合理的决策,从而保证了不同的工程方案、不同的投融资模式,最终均取得成功。中国将要建

设的跨海工程,也要因地制宜、因时制宜,充分考虑到国情、区情,对不同的工程方案进行全面比选,最终确定最适合最经济最合理的方案。

最后值得指出的是,目前中国已进入世界桥梁和隧道大国行列,桥梁、隧道工程的规模、投资等均居世界前

列。无论是跨海桥梁、海底隧道,还是桥隧结合,中国均已具备工程的研究、设计、规划和建设能力。世界跨海工程技术发展日新月异,中国在工程的设计、规划和建设过程中,应该在主要依靠国内力量的同时,吸收国外成熟的技术和经验,学习、消化和利用。

参考文献(References)

- [1] 陈宝春, 刘织. 世界海底隧道工程概况与台湾海峡通道构想[J]. 福州大学学报, 2000, 28(4): 51-55.
Chen Baochun, Liu Zhi. Development of underwater tunnel engineering in the world and the visualization of Taiwan Strait Tunnel[J]. Journal of Fuzhou University, 2000, 28(4): 51-55.
- [2] 方明山. 20世纪桥梁工程发展历程回顾及展望[J]. 桥梁建设, 1999(1): 58-60.
Fang Mingshan. Review and prospect of bridge engineering development in twentieth century[J]. Bridge Construction, 1999(1): 58-60.
- [3] 郭陕云. 关于我国海底隧道建设若干工程技术问题的思考[J]. 隧道建设, 2007, 27(3): 1-5.
Guo Xiayun. Comments on some engineering and technology issues related to building sub-sea tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(3):1-5.
- [4] 渤海海峡跨海通道研究课题组. 渤海海峡跨海通道研究[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Research topic group of Bohai Strait cross sea channel. Study on the cross sea channel of Bohai Strait[M]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [5] 刘良忠, 柳新华. 渤海海峡跨海通道建设与蓝色经济发展[M]. 北京: 经济科学出版社, 2012.
Liu Liangzhong, Liu Xinhua. The construction of Bohai Strait cross sea channel and the development of blue economy[M]. Beijing: Economic Science Press, 2012.
- [6] 刘良忠, 柳新华. 海洋强国战略与跨海通道建设[M]. 北京: 经济科学出版社, 2013.
Liu Liangzhong, Liu Xinhua. Strategy of marine power and construction of cross sea channel[M]. Beijing: Economic Science Press, 2013.
- [7] 柳新华, 刘良忠. 渤海海峡跨海通道对环渤海经济发展及振兴东北老工业基地的影响研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2009.
Liu Xinhua, Liu Liangzhong. Study on the influence of the Bohai Strait cross sea channel on the economic development of Bohai and the revitalization of old industrial base in Northeast China[M]. Beijing: Economic Science Press, 2009.
- [8] 柳新华, 刘良忠, 侯鲜明. 国内外跨海通道发展百年回顾与前瞻[J]. 科技导报, 2006, 24(11): 78-89.
Liu Xinhua, Liu Liangzhong, Hou Xianming. Retrospect and prospect of the development of cross sea channel at home and abroad[J]. Science and Technology Review, 2006, 24(11): 78-89.
- [9] 吕忠达. 杭州湾跨海大桥关键技术研究与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Lv Zhongda. Key technology research and practice of Hangzhou Bay Cross Sea Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [10] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的高榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513-1521.
Sun Jun. Discussion on some key technologies in the design and construction of subsea tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1513-1521.
- [11] 宋克志, 王梦恕. 烟大渤海海峡隧道的可行性研究探讨[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 1-8.
Song Kezhi, Wang Mengshu. Feasibility study on Bohai Channel tunnel connecting Yantai and Dalian[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(6): 1-8.
- [12] 唐寰澄. 世界著名海峡交通工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
Tang Huancheng. World famous Strait traffic engineering [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2004
- [13] 项海帆. 21世纪世界桥梁工程的展望[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 1-6.
Xiang Haifan. Prospect of world's bridge projects in 21st century[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 1-6.
- [14] 王梦恕. 蓬勃发展的中国水下隧道[R]. 北京: 北京交通大学, 2005.
Wang Mengshu. Vigorous development of China's underwater tunnel [R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005
- [15] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2161-2172.
Wang Mengshu. Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel: Discussion on construction scheme of taiwan strait undersea railway tunnel[J]. Chinese Journal Of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2161-2172.
- [16] 魏礼群, 柳新华. 世界跨海通道比较研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2005.
Wei Liqun, Liu Xinhua. Comparative study on the world cross sea channel [M]. Beijing: Social Science Literature Press, 2005.
- [17] 魏礼群, 柳新华, 戴桂英, 等. 渤海海峡跨海通道研究[M]. 2版. 北京: 经济科学出版社, 2009.
Wei Liqun, Liu Xinhua, Dai Guiying, et al. Study on the cross sea channel of the Bohai Strait [M]. 2nd ed. Beijing: Economic Science Press, 2009.
- [18] 魏礼群, 柳新华, 刘良忠, 等. 渤海海峡跨海通道若干重大问题研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2007.
Wei Liqun, Liu Xinhua, Liu Liangzhong, et al. Research on several major issues of Bohai Strait trans sea crossing[M]. Beijing: Economic Science Press, 2007.

Comparison of representative sea-crossing projects in China and the world and its enlightenment

LIU Liangzhong^{1,2}, LIU Xinhua¹

1. Development Research Institute of Pan Bohai Sea, Ludong University, Yantai 264025, China

2. School of Business, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract A review of the development of world sea-crossing projects is presented, which sums up the merits and drawbacks of railway ferry, sea crossing bridge, subsea tunnel, and bridge and tunnel combination. First construction technologies, financing and operation patterns of the representative projects at home and abroad are compared. Then, the future development trends are proposed. At last, some suggestions for China are put forward, including strengthening pre-project research and design, government responsibility for construction of key projects, pre-project funding by national finance, and building plans, investment and financing schemes under scientific decision-making combined with project location situation.

Keywords sea-crossing project; sea-crossing bridge; subsea tunnel

(责任编辑 刘志远)