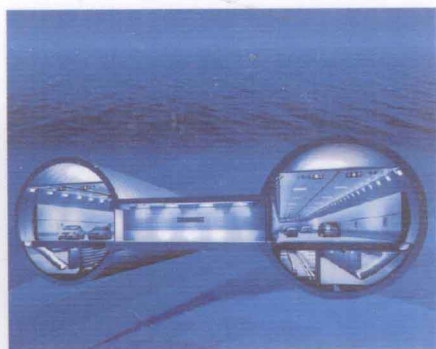




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



水下隧道

Underwater Tunnel

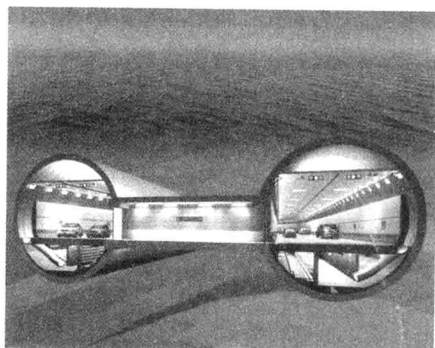
主编 • 何川 副主编 • 张志强 肖明清



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



水下隧道

主编 • 何川 副主编 • 张志强 肖明清

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内 容 简 介

本书按普通高等教育“十一五”国家级规划教材要求编写,共分为4篇10章。本书参考国内外相关文献,并结合新规范,全面介绍了水下隧道勘测与规划、设计原理与方法、施工技术和施工组织系统知识。本书理论与实践并重,各篇章相互衔接,每章均附有思考题。

本书主要作为普通高校土木工程专业地下工程方向本科生的教材,也可供地下工程及相关专业的研究生与工程技术人员参考。

本教材由何川主编,张志强、肖明清为副主编。全书由何川统稿。

图书在版编目(CIP)数据

水下隧道 / 何川主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2011.6
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5643-1230-5

I. ①水… II. ①何… III. ①水下隧道 - 高等学校 - 教材 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 128215 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水 下 隧 道

主 编 何 川

*

责任编辑 张 波

特邀编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 32

字数: 793 千字

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1230-5

定价: 58.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

第 1 章 绪论

我国水域面积辽阔,涵盖长江、黄河、珠江、淮河、海河等七大水系在内的内陆水域面积达 17.47 万 km^2 ,其中包括 5 000 余条流域面积超过 100 km^2 的河流,1 km^2 以上天然湖泊的总面积约 8 万 km^2 。除此之外,还有水域面积大于 0.5 万 km^2 的辽东湾、渤海湾、莱州湾、杭州湾、北部湾等海湾。宽广的水域在提供丰富水资源的同时,也对交通带来了天然分割,采用水下隧道方案跨越江河湖海已成为当前我国交通基础设施建设的一个重要选择。近年来,伴随着我国高速铁路、高速公路、城市地铁建设的迅猛发展,涌现了南京长江隧道、武汉长江隧道、上海崇明长江隧道、广深港客运专线狮子洋隧道、武广客运专线浏阳河隧道以及上海等多座城市地铁区间隧道等大量水下隧道工程,极大地改善了我国交通状况、推动了城市化进程。据不完全统计,我国在建及规划的水下隧道近 100 座,其中包括琼州海峡隧道、渤海湾隧道、台湾海峡隧道等世界级水下隧道工程,水下隧道建设在我国呈现方兴未艾之势。

然而,水下隧道的建设难度巨大,涉及矿山法、盾构法和沉管法等多种工法的诸多理论和技术问题,同时运营控制与维护管理同山岭隧道也有很大差别,有很多特殊问题需要解决。目前国内高校尚无系统的水下隧道教材,为了适应水下隧道的建设和管理需求,我们组织编写了这部“十一五”国家级规划教材,希望对我国水下隧道工程人才培养有所裨益和帮助。

本书是西南交通大学在水下隧道领域多年教学科研成果的提炼和总结,同时囊括了中铁第四勘察设计院集团有限公司为代表的国内外相关单位在水下隧道的工程实践,全书包括水下隧道概述、水下隧道设计与施工、水下隧道运营设施、水下隧道设计与施工实例四篇共 10 章内容。本书的特点是理论联系实际、系统性强,在引导学生掌握基础理论和技术知识的同时,注重强化学生解决实际工程技术问题的能力,并以工程实例的形式反映了国内外多座代表性水下隧道的状况。本书可作为普通高校土木工程专业地下工程方向本科生教材,也可作为研究生及相关工程技术人员的参考书。

本教材由何川主编，张志强、肖明清为副主编。

本教材编写的情况如下：第1章（何川、晏启祥），第2章（何川、汪波），第3章（何川、方勇、封坤），第4章（耿萍、晏启祥），第5章（张志强、王士民），第6章（曾艳华、郭瑞），第7章（张玉春、周济民），第8章（肖明清、薛光桥），第9章（肖明清、宁茂权），第10章（肖明清、唐翌、殷怀连）。

全书由何川统稿。

由于编者水平有限，书中难免有不妥及疏漏之处，恳请同行及教材使用者批评指正，以供再版时修正。

编 者

2011年3月

目 录

目 录

第 1 篇 水下隧道概述

第 1 章 绪 论	3
1.1 水下隧道的发展历史	3
1.2 水下隧道方案比选	9
1.3 水下隧道面临的技术问题	10
思考题	11
第 2 章 工程水文地质勘察与隧道选址	12
2.1 工程地质勘察	12
2.2 水文地质勘察及隧道内涌水量预测	16
2.3 水下隧道选址	24
思考题	28

第 2 篇 水下隧道设计与施工

第 3 章 盾构法水下隧道	31
3.1 概 述	31
3.2 盾构设备类型及其选型	36
3.3 盾构法水下隧道设计	60
3.4 盾构法水下隧道施工	92
思考题	114
第 4 章 沉管法水下隧道	115
4.1 概 述	115
4.2 沉管法水下隧道设计	120
4.3 沉管法水下隧道施工	150
4.4 管理、安全对策	167
思考题	172
第 5 章 矿山法水下隧道	173
5.1 概 述	173

5.2 矿山法水下隧道设计	179
5.3 矿山法水下隧道施工	241
思考题	276

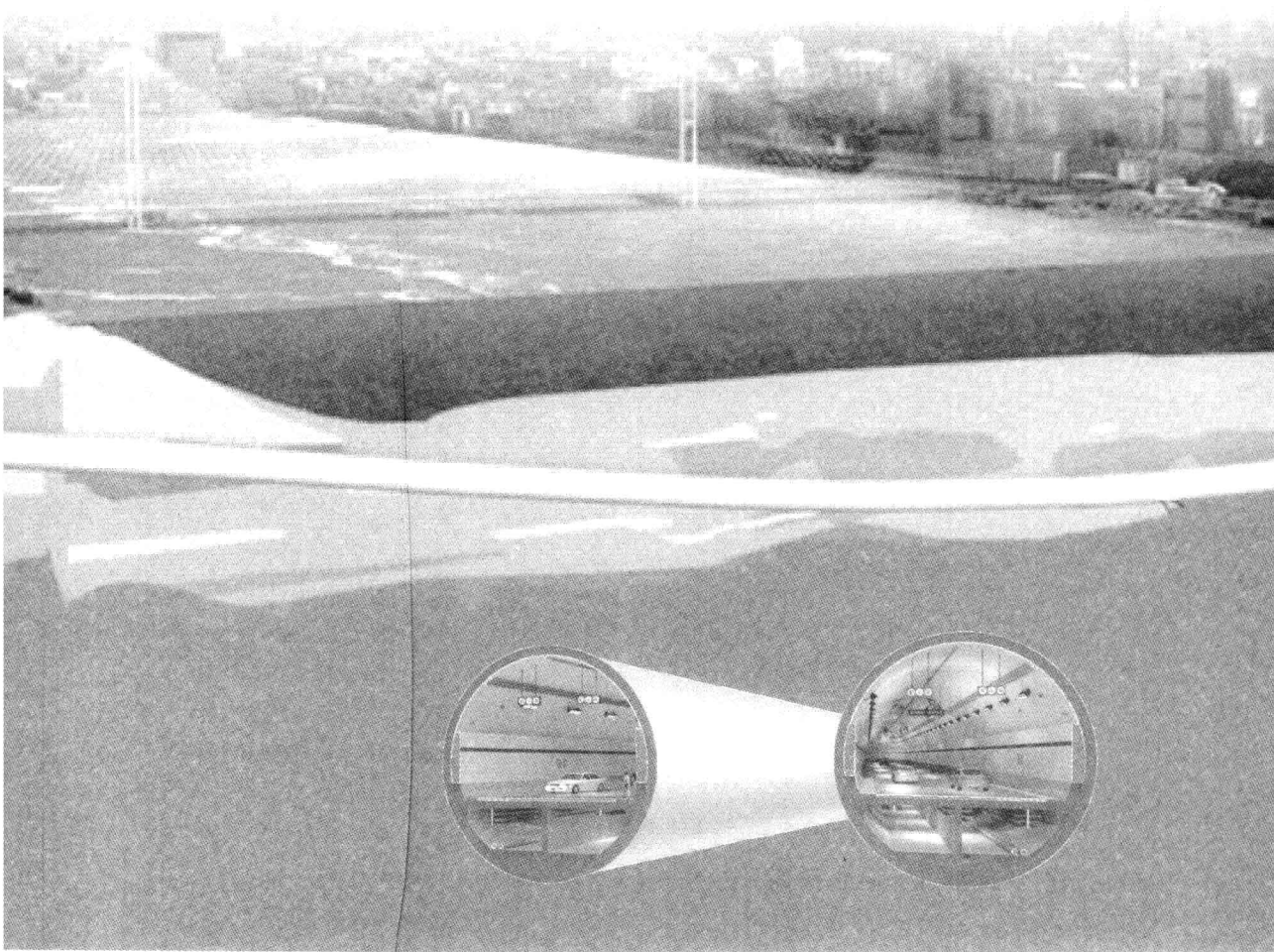
第3篇 水下隧道运营设施

第6章 水下隧道运营通风	279
6.1 概 述	279
6.2 隧道需风量计算	288
6.3 通风阻力及通风动力	293
6.4 运营通风方式及计算	302
6.5 火灾下的通风	316
6.6 通风网络及应用	318
6.7 通风附属工程	322
思考题	323
第7章 水下隧道运营消防、照明、供配电	325
7.1 水下隧道消防	325
7.2 水下隧道照明	336
7.3 水下隧道供配电	345
思考题	348

第4篇 水下隧道设计与施工实例

第8章 盾构法水下隧道设计与施工实例	351
8.1 公路盾构法水下隧道工程实例	351
8.2 铁路盾构法水下隧道工程实例	377
8.3 城市轨道交通盾构法水下隧道工程实例	405
第9章 沉管法水下隧道设计与施工实例	414
9.1 公路沉管法水下隧道工程实例	414
9.2 铁路沉管法水下隧道工程实例	441
9.3 公铁合建沉管法水下隧道工程实例	457
第10章 矿山法水下隧道设计与施工实例	465
10.1 公路矿山法水下隧道工程实例	465
10.2 铁路矿山法水下隧道工程实例	488
参考文献	502
后 记	506

第 1 篇 水下隧道概述



第 1 章

绪 论

1.1 水下隧道的发展历史

江河湖海在为人类带来丰富水资源的同时,也导致了地理单元的天然分割。随着全球经济一体化水平的显著提高,区域经济单元之间的要素流动和资源整合越来越频繁,改善江河湖海导致的城市板块之间、城市之间、地区之间以及国际之间的水域交通阻隔问题已经迫在眉睫。公路、铁路和城市轨道交通面对江河湖海等水面分割时,可以采用轮渡、桥梁与水下隧道等方法实施跨越。轮渡自身存在交通运输量小、等候时间长、受气候影响大等特点,难以适应当代快节奏的交通运输模式,因此,跨越江河湖海的现代化交通方式一般选择桥梁或水下隧道方案。过去,受水下隧道设计施工技术水平的限制,遇水架桥成为跨越江河湖海的必然选择。如今,随着水下隧道建设技术的进步,水下隧道方案已经成为一种克服水域平面障碍的重要手段,加之水下隧道具有抵抗恶劣气候条件能力强、对地面环境影响小、不干扰航道交通、利于战备等诸多优点,水下隧道方案已越来越受到人们的重视。根据水道条件和地质条件的不同,水下隧道的建设有多种施工方法和相应的结构形式,但目前常采用的方法主要还是矿山法、沉管法和盾构法。一般而言,矿山法主要适用于整体性较好的中硬岩层,而盾构法主要适用于水下软土地层或围岩级别较差的岩层,沉管法的利用主要受控于水道和水流条件。

需要指出的是,尽管水下隧道在维护航道交通、保护水环境和沿岸生态平衡等方面相对桥梁具有明显的优势,但同样存在自己的劣势,如:通常情况下,水下隧道的工程造价高于桥梁;当水下隧道遭遇火灾、水灾、爆炸等突发事件时,损失高于桥梁;水下隧道运营期间所需要的通风照明、安全维护等运营费用通常也比桥梁高。因此,跨越江河湖海的方案选择是一项复杂的综合技术经济比选问题。

水下隧道的建造历史可追溯到 17 和 18 世纪,不同施工技术修建水下隧道的历史不尽相同,但一般从发达国家或者濒临大海的岛国开始发起。比如,英国、挪威、瑞典、日本等国水下隧道建设均具有悠久的历史,许多水下隧道建造关键技术正是在这些国家率先获得突破并引领了世界水下隧道的建设发展进程。下面简要回顾一下矿山法、沉管法和盾构法修建水下隧道的历史和现状。

矿山法是一种古老的隧道建造方法,伴随着炸药的发明不断获得发展并成为目前国内外重要的隧道修建方法之一,矿山法水下隧道如图 1-1 所示。自英国于 1826 年起在蒸汽机车牵引的铁路上开始修建长 770 m 的泰勒山单线隧道和长 2 474 m 的维多利亚双线隧道以来,

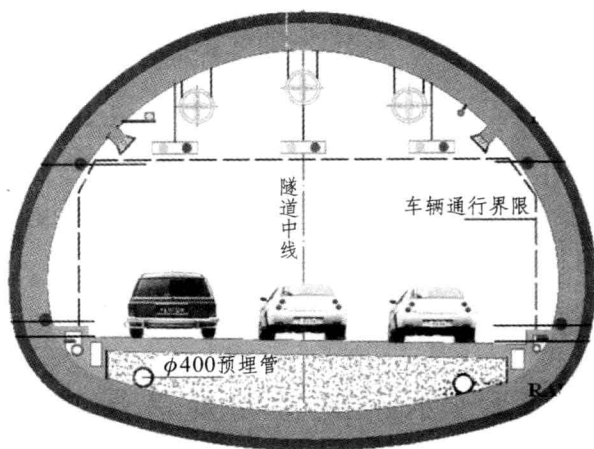


图 1-1 矿山法水下隧道

英、美、法等国相继采用矿山法修建了大量铁路山岭隧道，但采用矿山法修建水下隧道的技术相对比较落后。在过去 35 年里，挪威利用矿山法修建了 40 余条海底隧道，其中 24 条是公路隧道，其他的主要是为近海石油工业服务的管道和电缆通道。瑞典等国家采用挪威海底隧道技术也修建了近 10 条海底隧道。日本在 1974 年采用矿山法建成了新关门双线隧道，该隧道长 18 675 m，位于日本山阳新干线新下关站至小仓站之间，贯穿分隔本州岛与九州岛的关门海峡。日本青函隧道连接本州和北海道，由 3 条隧道组成，除主隧道外，还有 2 条辅助坑道，该隧道 1971 年开建，1985 年方才贯通，主隧道全长 53.85 km，其中海底部分 23.3 km，为当今世界最长的海底铁路隧道。21 世纪初期，我国采用矿山法也修建了数座具有世界水平的水下隧道工程，典型的有 2005 年开工建设的厦门东通道海底隧道和武广铁路客运专线浏阳河隧道，以及 2007 年开工建设的青岛胶州湾海底隧道。厦门东通道海底隧道连接厦门市本岛和翔安区陆地，采用三孔形式修建，隧道全长约 5 950 m，跨越海域总长 4 200 m，主洞采用双向六车道断面，是我国大陆第一座采用钻爆法修建的大断面水下隧道。青岛胶州湾海底隧道横穿胶州湾口，连接青岛市区和黄岛开发区，线路总长 7 800 m，穿越海域段长约 3 950 m。武广铁路客运专线浏阳河隧道全长 10 300 m，单孔双线，是我国目前开工建设线路最长、技术标准最高、投资最多的铁路隧道。

1910 年，美国建成底特律水底铁路隧道宣告了沉管隧道技术的诞生。之后，荷兰于 1942 年建成了鹿特丹马斯河隧道，该隧道是世界上首次采用矩形钢筋混凝土管段建成的沉管隧道。1959 年，加拿大成功采用水力压接法建成迪斯岛沉管隧道。水力压接等沉管隧道关键技术的突破使得沉管法很快被世界各国普遍采用，如美国建设了 Fort McHenry 隧道、荷兰建设了 Drecht 隧道等。目前世界上建造沉管隧道最多的国家主要是美国、荷兰和日本。据统计，现在全世界已拥有约 150 座沉管隧道，其中，美国旧金山海湾快速交通隧道全长 5 825 m，是世界上最长的沉管隧道之一。20 世纪 90 年代以来，为满足城市交通迅猛发展的需要，我国也相继建设了多条沉管隧道，如 1993 年建成了第一条由我国自行设计施工的珠江沉管隧道，1995 年又顺利建成了全长 1 019 m 的浙江宁波甬江沉管隧道，2003 年建成了规模亚洲最大、世界第二的全长 2 km 的上海外环越江沉管隧道，并在施工中采用了卫星定位系统和三维测控技术，这标志着我国的沉管隧道施工技术已达到世界先进水平，如图 1-2 所示。

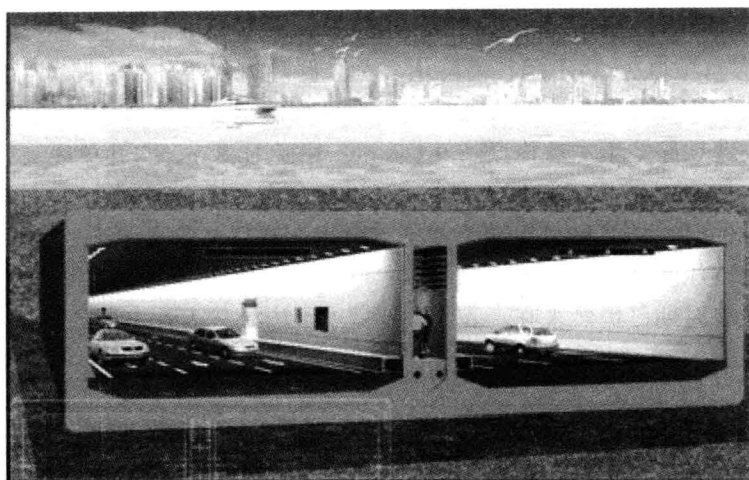


图 1-2 沉管法水下隧道

18 世纪 40 年代英国首次采用盾构法修建了穿越伦敦泰晤士河的水下人行隧道，标志着水下盾构隧道的诞生，近年，盾构隧道技术在水下隧道建造工程中获得了迅猛的发展，如图 1-3。其中最具代表性的水下盾构隧道工程有 1993 年竣工的外径 8.4 m 的英法海峡隧道，1996 年竣工的外径 13.9 m 的日本东京湾横断公路隧道，2003 年建设的外径 13.8 m 的德国易北河第四隧道，2004 年建设的外径 14.5 m 的荷兰绿色心脏隧道等。我国水下盾构隧道修建技术起步较晚，但发展态势良好。1966 年和 1984 年，上海市分别修建了外径 10.22 m 的打浦路越江隧道和外径 11.30 m 的延安东路越江隧道，由此开始了我国大型水下隧道建设的历史。20 世纪 90 年代，上海市又先后修建了外径均为 11.0 m 的延安东南沿线隧道、大连路隧道、复兴东路隧道等 3 条越江隧道，近年又完成了外径 11.36 m 的翔殷路和外径 14.5 m 的上中路两条越江隧道，而位于长江上游的重庆也在 2005 年完成了外径 6.32 m 的排水工程越江隧道。近年来，一大批大型跨江海水下隧道的建设，把我国水下隧道的建设规模和建造技术推到了新的高度。跨江方面，建设有南京长江公路隧道（全长 3 385 m，外径 14.5 m，双向六车道），武汉长江公路隧道（全长 3 270 m，外径 11.0 m，双向四车道），杭州庆春路公路水底隧道（全长 3 060 m，双向

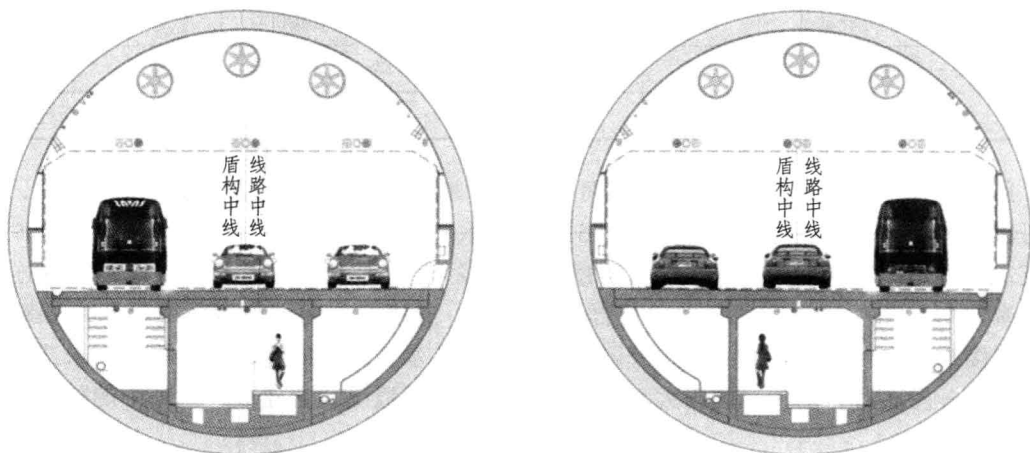


图 1-3 盾构法水下隧道

四车道),上海崇明越江隧道(盾构区间长6 975 m,外径15.0 m),钱江隧道(全长4 250 m,外径15 m,双向六车道)。以上跨江海隧道多为公路隧道,服务于铁路(特别是高速铁路)、城市地铁与轻轨、市政交通工程等交通设施的跨江海隧道也越来越多,如广深港铁路客运专线珠江狮子洋高速铁路隧道(盾构段长9 340 m,外径10.8 m,双孔单线),沪通铁路越黄浦江隧道(全长8 500 m,盾构区间长4 970 m),上海浦东铁路黄浦江水底隧道(全长9 450 m,盾构区间长5 880 m),沪杭磁悬浮铁路耀华支路越江隧道,广州地铁1号线珠江水底隧道,上海地铁4号线越江隧道,武汉地铁穿越汉水和长江的水底隧道等,我国大型跨江海水下盾构隧道的高速发展时期已悄然来临。表1-1列举了国内外代表性水下隧道工程的情况。

表 1-1 国内外代表性水下隧道工程

序号	隧道名称	长度/km	洞数/车道	用 途	建成时间	地点	施工方法
1	英法海峡隧道	49.5	双洞单线	铁 路	1993 年	英法	盾构法
2	东京湾海底隧道	9.1	双洞四车道	公 路	1996 年	日本	盾构法
3	斯多贝尔特海峡隧道	7.3	双洞单线	铁 路	1996 年	丹麦	盾构法
4	绿色心脏隧道	8.5	单洞双线	高 铁	2005 年	荷兰	盾构法
5	武汉长江隧道	3.6	双洞四车道	公 路	2008 年	中国	盾构法
6	南京长江隧道	3.92	双洞六车道	公 路	2010 年	中国	盾构法
7	上海崇明长江隧道	8.95	双洞六车道	公 路	2009 年	中国	盾构法
8	狮子洋隧道	10.8	双洞单线	高 铁	2010 年	中国	盾构法
9	青函海底隧道	53.9	单洞双线	铁 路	1988 年	日本	矿山法
10	新关门隧道	18.7	单洞双线	铁 路	1975 年	日本	矿山法
11	厦门翔安海底隧道	6.0	双洞六车道	公 路	2010 年	中国	矿山法
12	青岛胶州湾海底隧道	7.8	双洞六车道	公 路	2010 年	中国	矿山法
13	浏阳河隧道	10.115	单洞双线	高 铁	2009 年	中国	矿山法
14	旧金山海湾地铁隧道	5.825	双线	地 铁	1972 年	美国	沉管法
15	厄勒海峡隧道	4.06	两车道+双线	公路/铁路	2000 年	丹麦	沉管法
16	釜山—巨济海底隧道	3.7	四车道	公 路	2010 年	韩国	沉管法
17	上海外环黄浦江隧道	2.88	八车道	公 路	2003 年	中国	沉管法

我国幅员面积宽广,江河湖海水域面积较大,如图1-4所示。在未来10至30年内,我国计划建造包含台湾海峡跨海工程在内的5条跨海水下隧道工程和近百座水下隧道,这5条世界级水下隧道工程包括大连到烟台的渤海湾跨海隧道,上海到宁波的杭州湾隧道,连接香港、澳门与广州、深圳和珠海的伶仃洋跨海隧道,连接广东和海南两省的琼州海峡跨海隧道,连接福建和台湾的台湾海峡跨海隧道。可以说,水下隧道的建设在我国方兴未艾,发展势头良好,发展潜力巨大。国内大型水下隧道工程建设概况(含建成及规划中的隧道)如表1-2所示。

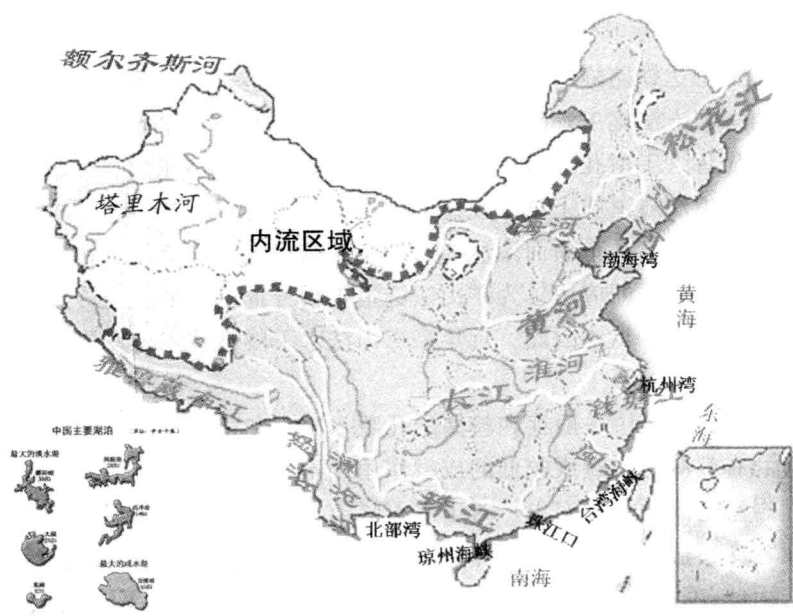


图 1-4 我国主要江、河、湖、海示意图

表 1-2 国内大型水下隧道工程建设概况表（含建成及规划中的隧道）

城 市	大型水下隧道工程
上 海	打浦路隧道、上海崇明长江隧道、延安东路隧道、外滩观光隧道、黄浦江观光隧道、大连路隧道、复兴东路隧道、翔殷路隧道、上中路隧道、西藏南路隧道、军工路隧道、长江西路隧道、庆宁寺越江隧道、新建路隧道、人民路隧道、龙耀路隧道、公平路隧道、临潼路隧道、青草沙输水隧道
南 京	玄武湖隧道、南京长江隧道、南京纬三路隧道、地铁越长江隧道（2 座）
杭 州	杭州西湖隧道、杭州庆春路隧道、杭州钱江隧道
宁 波	甬江隧道、常洪隧道
广 州	珠江隧道、狮子洋海底铁路隧道、洲头咀隧道
深 圳	深圳—珠海过江隧道
武 汉	武汉长江隧道、武汉地铁 2 号线过江隧道、武汉汉阳二次越江隧道
南 昌	青山湖隧道
厦 门	翔安海底隧道
青 岛	胶州湾海底隧道
大 连	大连湾海底隧道、大连至烟台跨海铁路隧道
哈 尔 滨	松花江越江隧道
海 口	琼州海峡隧道
香 港	香港海底隧道、东区海底隧道、西区海底隧道、香港第四条过海隧道、香港—深圳海底隧道、港珠澳海底通道
高 雄	高雄港过港隧道

19 世纪全球采用矿山法共建成长度超过 5 km 的铁路隧道 11 座,有 3 座超过 10 km,其中最长的为瑞士的圣哥达铁路隧道,长 14 998 m。在 19 世纪 60 年代以前,修建的隧道都用人工凿孔和黑火药爆破方法施工。1861 年修建穿越阿尔卑斯山脉的仙尼斯峰铁路隧道时,首次应用风动凿岩机代替人工凿孔。1867 年修建美国胡萨克铁路隧道时,开始采用硝化甘油炸药代替黑火药,使矿山法隧道施工技术及速度得到进一步发展。20 世纪 60 年代以来,随着隧道机械化施工水平的提高,全断面液压凿岩台车和其他大型施工机具相继投入隧道施工,而喷锚技术的发展和奥法的应用也为矿山法隧道工程开辟了新的途径。然而,水下隧道相对于山岭隧道具有独自的特点,因此,近年来矿山法水下隧道技术的发展围绕这些特点进行了大量更新。

水下隧道周围岩裂隙中一般存在较高的孔隙水压力和很高的渗透压力,饱水软化作用会降低隧道围岩的有效应力,造成较低的成拱作用并影响地层的稳定性,尤其在通过断层破碎带时,洞室围岩稳定问题更加突出。对于水下隧道,隧道上部覆盖水体较深且宽度较大,如琼州海峡水面宽度超过 20 km,渤海海峡的水面宽度超过 40 km,台湾海峡的水面宽度更是达到 120 km,因此,通过水体进行地质勘察比在地面的地质勘测更困难,准确性相对较低,遭遇未预见的不良地质情况的风险增大。由于水下隧道工程建设区域被水面分割为孤立的两部分,或陆路绕行距离遥远,控制测量,特别是水准测量难度大,加上隧道工程需从两端洞口独头掘进施工,因此控制测量的误差要求高。水下隧道施工的最大的风险是突然坍塌与涌水,特别是断层破碎带的涌水,如果处理不当可造成整个隧道的淹没,后期处理费用相对较高。由于水下隧道一般采用堵水限排方案,复合式衬砌长期受较大的水土压力作用,且地下水一般对混凝土以及钢筋等具有腐蚀性,因而需采取可靠的措施确保保护结构的承载能力与长期可靠性。水下隧道施工过程中一般需要长距离独头掘进,对施工期间的运输和通风提出了更高的要求。针对上述特点,水下矿山法隧道近年重点发展了预加固技术和快速掘进与支护技术、长距离施工通风和营运通风技术、深水勘探技术,并在信息化施工和更加准确的超前地质预报技术的开发和利用上获得了大量突破。

沉管隧道技术自问世以来,从英国人最初的试验,到美国人建成实际的沉管隧道,再到荷兰人进行新的创新,使沉管隧道技术获得了不断的发展。1959 年,加拿大成功开发了沉管隧道水力压接法,荷兰于 20 世纪 60 年代发明了吉那止水带,之后日本在此基础上又进行了新的研发,大大提高了沉管隧道的防水能力。沉管隧道基础处理技术方面,丹麦于 20 世纪 40 年代发明了喷砂法,瑞典于 60 年代首先采用灌囊法,荷兰在 70 年代发明了压砂法,日本在 70 年代推出压注混凝土法和压浆法,这些方法对于保障沉管隧道的稳定、限制其纵向不均匀变形发挥了重要作用。除此之外,日本在沉管隧道抗震技术方面也开展了大量研究,并编写了沉管隧道抗震设计规范。这些技术上的重大革新,对沉管隧道的发展和应用具有重要意义。

近几十年来建成的多座大型水下盾构隧道工程,同样极大地丰富和发展了水下盾构隧道修建技术。对水下盾构隧道,其技术发展主要集中在:高水头下大断面开挖的工作面稳定性;高水头下盾构装备止水的可靠性;一次性长距离掘进,刀具的可维护性和可更换性;联络横通道和竖井等附属结构的冻结施工技术;水下盾构隧道的施工风险评估技术等。

1.2 水下隧道方案比选

矿山法、沉管法和盾构法在水下隧道施工中各有优缺点，水下隧道工程究竟采用何种施工方案和施工方法需根据工程规模、工程条件和环境要求进行仔细的比选后方可确定。

采用矿山法建设水下隧道是目前世界上较为成熟的方法之一，应用该方法最多的国家是挪威，已建成 24 座。矿山法水下隧道最具代表性的工程是青函水底隧道，我国多座水下隧道也采用了矿山法施工。矿山法水下隧道通常具有以下优点：采用矿山法施工水下隧道，一般要求隧道大部分地段应位于岩石地层之中，特别是对于水底部分更是如此，因此与地形因素关联性不大。由于矿山法设计施工经验较为成熟，其基本能适应不同的地质条件和不同的断面形状。矿山法隧道方案由于埋置深度大，能较好地抵御各种自然及战争灾害，在地震及战争时期具备较强的生命力。由于我国劳动力充足，矿山法隧道的劳动力成本较低。矿山法隧道也存在很多缺点：由于隧道埋置较深，隧道长度偏长。为了降低矿山法修建水下隧道施工过程中的风险，减少辅助施工工程的费用，一般要求隧道位于岩石地层中且洞顶具有一定的岩石保护层厚度，这不可避免地增大了矿山法隧道的建设长度。尽管矿山法对各种地质情况的适应性较好，但如果围岩节理裂隙发育、断层破碎带较多时，各种辅助施工处治措施的费用会急剧增加，同时施工风险也较高，矿山法隧道施工风险对地质的变化非常敏感。由于水下隧道工程地质勘察准确性相对较差，必须依赖系统的超前地质预报，否则将影响施工安全，酿成安全事故。对于跨海峡隧道，更大的长度、海域中高水压断层破碎带对矿山法施工更是一个非常巨大的挑战。

沉管法修建水下隧道也是重要的可选方法，该方法具有如下的优点：因管段为预制，混凝土施工质量高，易于做好防水措施，容易保证隧道施工质量；管段较长，接缝较少，漏水机会大为减少，采用水力压接法可大大减小接缝漏水的可能性；工程造价较低，因隧道顶部覆盖层厚度较小，隧道长度可缩短很多，工程总价大为降低；在隧道现场的施工期短，因预制管段（包括修筑临时干坞）等大量工作均不在现场进行；适应水深范围较大，因大多作业在水上操作，水下作业极少，故几乎不受水深限制；断面形状、大小可自由选择，断面空间可充分利用。但沉管法隧道也具有如下缺点：由于基槽开挖范围较大，对水域生态环境影响较大；大水深、大跨度条件下结构设计较为困难；当基础软硬变化频繁时，基础处理及结构抗震都存在一定难度。沉管法由于受江湖河海水文环境等的影响较大，主要在水流流速较低，河床平坦且变化不大，可满足通航要求等条件下采用，从我国的河床形态和水流形态的实际情况来看，在大型跨江海隧道的修建中采用的机会较少。

盾构法是当今国内外水下隧道的主要施工方法，盾构法施工水下隧道具有以下优点：盾构法施工速率为常规矿山法的 3 至 10 倍。盾构是一种集机电、液压、传感、信息技术于一体的隧道施工成套设备，可以实现连续掘进，能同时完成破岩、出渣、支护等作业，实现了工厂化预制、机械化施工，掘进速度较快，效率较高。盾构采用滚刀进行破岩，避免了爆破作业，成洞周边岩层不会受爆破震动破坏，洞壁完整光滑，超挖量小。由于不采取爆破技术，隧道工程的施工环境较好。由于围岩遭受的扰动较小，在盾壳的保护下难以发生松弛、掉块、崩塌等危险，施工相对比较安全。盾构法施工可改善作业人员的洞内劳动条件，减轻体力劳动，其施工质量能够得到充分保证。由于盾构法施工速度快，施工用人少，大大缩短了工期，

极大地提高了经济效益和社会效益；同时由于超挖量小，节省了大量衬砌费用。与此同时，由于盾构施工不用爆破和汽车运输与出渣，施工现场环境污染小。但盾构法施工水下隧道同时具有如下缺点：地质适应性较差，盾构对隧道的地层性质变化极为敏感，不同类型的盾构适用的地层不同，如土层、软岩、硬岩等应分别采用不同类型的盾构。在盾构施工过程中，当遇到困难地层，如软弱地层、断层破碎带、硬岩、涌水、围岩变形、剥落与坍塌等时，需借助矿山法实施脱困。盾构不适宜中短距离隧道的施工，由于盾构体积庞大，运输移动较困难，施工准备和辅助施工的配套系统较复杂，加工制造工期较长，对于短隧道和中等长度的隧道很难发挥其优越性。断面适应性较差，一般地说，盾构隧道施工成型的断面一般为圆形，且较适宜断面直径在 3 m 至 12 m 之间的水下隧道；对直径在 12 m 至 15 m 的水下隧道，应根据围岩情况和掘进长度、外界条件等因素综合比较后方可决定；对于直径大于 15 m 的岩质隧道，目前还未制造出相应的盾构设备。由于跨越海峡的海底隧道一般较长，并且不可避免地穿越饱水不良地层，因此宜优先考虑盾构法。

1.3 水下隧道面临的技术问题

目前，水下隧道的建设存在诸多难点，如：水下地质勘察的难度高、投入大，漏勘与情况失真的风险程度增大。饱和岩体强度软化，其有效应力降低，使围岩稳定条件恶化。高渗透性岩体施工开挖所引发涌/突水（泥）的可能性较大，且多数与水体有直接水力联系，达到较高精度的施工探水和治水等均较为困难。水上施工竖井布设难度高，数量少，致使单口掘进的长度加大，施工技术难度增加。全水压衬砌与限压、限裂衬砌结构的设计要求高。受海水或者江水长期浸泡、腐蚀，高性能、高抗渗衬砌混凝土配制工艺与结构的安全性、可靠性和耐久性要求严格。长大水下隧道的运营通风、防灾救援和交通监控需有周密设计与技术保障措施。水下隧道是一项高风险的地下工程，存在较高的风险源，而同时缺乏系统的风险评估方法，为水下隧道施工风险管理带来很大的困难。上述这些难点正是今后水下隧道建设中应重点解决的技术问题。

（1）控制测量技术。从目前的技术水平来看，在跨海控制测量中，平面控制测量通过运用 GPS 技术一般可达到测量要求，但是宽阔水域高程的控制测量采用常规水准、精密水准、三角高程、GPS 高程等任何一种方法都不能满足大区域的跨海水准测量要求。今后应重点研究集成控制测量技术，目标是通过集成运用精密水准测量、三角高程测量、GPS 高程测量、海平面潮汐测量等多种方法确定出测区精化水准面模型。

（2）综合地质勘察技术。修建水下隧道时，在深水 and 厚覆盖层下有计划地钻探到隧道深度比较困难，有时根本是不可能的。采用其他的地质勘探方法（如物探、地面抽样勘探和深海测量法等）目前都难以给出隧道线路上详细的地质剖面，因此今后应发展集物探和钻探等相结合的综合地质勘察技术以提高工程地质的勘察质量。

（3）超前地质预报技术。由于地质勘探资料的不足，水下隧道施工中，需通过各种地质超前预报技术预报前方的地质情况，以便指导设计和施工，并及时调整隧道设计施工方案。其