

沉管隧道设计施工手册 安装篇

中国交通建设股份有限公司

科学出版社



沉管隧道设计施工手册

安装篇

中国交通建设股份有限公司

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书参考国内外沉管隧道工程施工经验,分6章详细介绍沉管浮运安装的工艺、施工过程中出现的问题及相关实验研究等内容,并重点介绍了港珠澳大桥沉管隧道的案例,梳理了国外相关工程项目的案例。

本书可供高等院校道路工程、土木工程等专业师生,以及相关专业工程技术人员参考使用,可为今后类似的沉管隧道设计、施工工程提供参考和借鉴。

审图号:GS(2018)5377号

图书在版编目(CIP)数据

沉管隧道设计施工手册.安装篇/中国交通建设股份有限公司编.—北京:科学出版社,2019.2

ISBN 978-7-03-060318-0

I. ①沉… II. ①中… III. ①沉管隧道—隧道工程—设计—手册 ②沉管隧道—隧道施工—手册 IV. ①U459.9-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第298796号

责任编辑:郭勇斌 欧晓娟/责任校对:贾娜娜

责任印制:张克忠/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年2月第一次印刷 印张:29 1/2 插页:2

字数:678 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“沉管隧道设计施工手册”

编委会

署 名 中国交通建设股份有限公司
顾 问 冯正霖 徐 光 朱永灵

编辑委员会

主 任 刘起涛 陈奋健
副 主 任 陈 云 孙子宇 林 鸣 刘伯莹
编 委 (以姓氏笔画排序):

王世峰	王汝凯	王彰贵	毛元平
方 彦	卢永昌	史福生	吕卫清
朱利翔	刘建波	李一勇	李惠明
吴利科	吴维忠	张 鸿	张鸿文
陈绍章	林少敏	孟凡超	钟建驰
曹根祥	曹湘波	康学增	梁卓仁
梁德章	裴明山		

主 编 林 鸣
副 主 编 刘晓东 尹海卿 卢永昌
编审委员 (以姓氏笔画排序):

久保田	王 强	孔令磊	刘亚平
刘海青	关秋枫	孙 亮	花田幸生
苏长玺	李春初	杨 华	杨 威
杨永宏	杨绍斌	杨树生	吴凤亮
何 波	辛文杰	张 洪	张宝兰
陈 林	陈 鸿	陈 越	陈伟彬
罗 冬	周光强	孟凡利	赵 辉
钟辉虹	高 潮	高纪兵	郭旭理
黄凯彬	黄维民	梁 桁	梁杰忠
宿发强	屠柳青	董 政	韩西军
谢臣伟	翟世鸿	樊建华	黎亚洲

《安装篇》编辑组

组 长 宁进进 宿发强 岳远征
成 员 (以姓氏笔画排序):

马宗豪	王 伟	王 强	朱 岭
伍绍博	刘 洋	刘兆权	汤慧驰
李 进	李家林	张建军	尚乾坤
郑秀磊	彭晓鹏	魏红波	

序 言

沉管隧道工法是水下隧道建设的主要工法之一，其建设关键工序包括基础处理、管节预制、浮运、沉放对接、最终接头等。1910年建成的穿越美国密歇根州底特律（Detroit）河铁路隧道是世界上第一条沉管隧道，采用钢壳式沉管隧道技术，其后在北美洲陆续建造了几十条这种结构的沉管隧道。直至1942年建成的穿越荷兰鹿特丹马斯（Maas）河的公路沉管隧道，揭开了混凝土沉管隧道建设的序幕，也形成了沉管隧道两种主要结构型式，即钢壳式沉管和混凝土沉管隧道。后来，日本在这两种主要结构型式的基础上进行融合，形成了一种新的管节结构，即三明治式沉管结构，并得到了广泛的应用。

通过百年的沉管隧道设计与施工技术积累，沉管技术在深水、复杂水流和复杂地质条件下的设计施工技术不断进步并渐趋成熟，已经能够跨越更深和更宽阔的河口、海峡水道。其中几大标志性沉管隧道工程包括：首座混凝土沉管隧道工程马斯隧道，工厂法预制的厄勒（Øresund）海峡沉管隧道，干坞内移动模架全断面水平浇筑节段的釜山—巨济沉管隧道，目前最深的海底沉管隧道博斯普鲁斯（Bosphorus）海峡沉管隧道，目前世界最长、埋深及体量最大的港珠澳大桥公路沉管隧道。

港珠澳大桥东连香港，西接珠海、澳门，是集桥、岛、隧为一体的超大型跨海通道。由中国交通建设股份有限公司联合体承建的岛隧工程是大桥的控制性工程，是目前世界上综合难度最大的沉管隧道之一。本手册主要由中国交通建设股份有限公司依托港珠澳大桥岛隧工程项目的建设经验，并结合世界上其他沉管隧道的建设经验，在多家设计、施工单位及同行的支持和共同努力下汇编完成。

编者收集和研究了世界典型沉管隧道相关资料，根据参与港珠澳大桥沉管隧道的规划、调研、选型、建设等全过程的设计施工经验，并对当今世界上的主要沉管隧道设计施工技术进行了系统的梳理、总结与概括，最终编写完成了本手册。由于目前世界上还没有沉管隧道行业系统性的应用手册公开发表，编写过程中汇集了世界各地典型沉管隧道工程的资料，有较多资料并未正式发表，作者姓名不详，在此向为本手册作出指导、提供资料的同行和专家及未知姓名的作者们致以崇高的敬意，感谢他们为沉管隧道设计施工手册的系统性、完整性做出的巨大的贡献。

本手册具体分为设计篇、基础篇、预制（制造）篇、安装篇及综合篇，汇集了国内外类似沉管隧道工程的规划、科研、勘察设计、试验及施工等资料，其目的在于为世界沉管隧道行业梳理一套有关沉管隧道勘察设计、基础、制造、安装及综合系统性的工具书。本手册主要对沉管隧道设计、施工原理及具体工艺方法要点进行了阐述，并列举了大量典型工程案例，以提供思路及借鉴，希望读者能从中得到启发及参考。由于时间紧，作者水平有限，难免有不足、不妥和理解有误之处，敬请专家和读者批评指正。

编 者

2018年12月

目 录

序言

1 概述	1
1.1 综述	1
1.2 管节浮运方法介绍	2
1.2.1 主要浮运方法	2
1.2.2 基础资料收集	4
1.2.3 一般要求	5
1.2.4 浮运线路选择	5
1.2.5 拖轮拖航方式	6
1.2.6 安全要求	7
1.2.7 航运安全要求	9
1.3 管节沉放方法介绍	10
1.3.1 通用管节沉放方法	10
1.3.2 基础资料收集	13
1.3.3 一般要求	14
1.3.4 沉放前试验	14
1.3.5 技术要求	15
1.3.6 允许偏差	19
1.3.7 沉放对接方式的选用要求	20
1.4 浮运安装施工工艺简介	20
1.4.1 先铺法基床浮运安装施工流程	22
1.4.2 后铺法基床浮运安装施工流程	23
2 浮运安装关键参数及相关系统确定	24
2.1 概述	24
2.2 沉管安装限制条件及作业窗口	25
2.2.1 作业水动力分析	25
2.2.2 沉管浮运控制参数研究	34
2.2.3 沉管系泊控制参数	57
2.2.4 沉管沉放控制参数	67
2.3 沉放驳	68
2.3.1 沉放驳设计参数	68
2.3.2 沉放力学参数	70

2.3.3	设计工况及工作条件	71
2.3.4	沉放驳试验	71
2.3.5	沉放船舶结构及系统	73
2.3.6	作业时的工况	78
2.3.7	沉管沉放装备	81
2.4	沉放系统	84
2.4.1	压载水系统	84
2.4.2	沉管对接导向系统	96
2.4.3	数控沉管拉合系统	99
2.4.4	水力压接系统	102
2.4.5	精调系统	108
2.4.6	测控系统	141
2.4.7	脱开系统	149
3	港珠澳大桥沉管浮运安装工艺	156
3.1	概述	156
3.1.1	施工自然条件	157
3.1.2	施工流程	159
3.2	决策指挥系统	161
3.2.1	决策机构	161
3.2.2	决策流程	162
3.2.3	现场指挥系统	162
3.3	浮运安装保障系统	164
3.3.1	浮运安装作业窗口管理	164
3.3.2	泥沙预报预警系统	173
3.3.3	水上安全保障系统	181
3.3.4	沉管安装风险管理系统	185
3.4	二次舾装	187
3.4.1	简介	187
3.4.2	沉管安装关键系统	188
3.4.3	安装船进坞	198
3.4.4	二次舾装作业及施工准备	200
3.4.5	试运行	204
3.5	浮运	205
3.5.1	简介	205
3.5.2	出坞	205
3.5.3	拖航	209
3.5.4	系泊	219
3.6	安装	222

3.6.1	施工流程	222
3.6.2	沉放准备	222
3.6.3	沉放	225
3.6.4	对接	228
3.6.5	贯通测量	229
3.6.6	精调	229
3.6.7	沉放时测量	231
3.6.8	岛头段管节安装	232
3.6.9	曲线段管节安装	233
3.6.10	管节锁定	234
3.6.11	舾装件拆除	235
3.7	回填	235
3.7.1	概况	235
3.7.2	深水溜管回填船	236
3.7.3	锁定回填	237
3.7.4	一般回填	239
3.7.5	护面层回填	240
3.8	最终接头吊装	240
3.8.1	常用最终接头施工方法	241
3.8.2	概述	249
3.8.3	最终接头尺寸	251
3.8.4	安装限制条件	252
3.8.5	二次舾装	254
3.8.6	吊装作业	260
4	浮运安装施工案例	271
4.1	川崎港海底沉管隧道	271
4.1.1	施工条件	271
4.1.2	二次舾装	277
4.1.3	拖航	284
4.1.4	沉放	285
4.1.5	精确调位	303
4.1.6	封闭人孔及拆除舾装件	306
4.2	东京湾临海公路沉管隧道	306
4.2.1	工程目的	306
4.2.2	项目概况	308
4.2.3	二次舾装	308
4.2.4	拖航	319
4.2.5	沉放对接	322

4.3	厄勒海峡沉管隧道	335
4.3.1	当地条件	335
4.3.2	海流预报系统	337
4.3.3	管节浮运	345
4.3.4	锚固系统	347
4.3.5	沉放	349
4.3.6	最终接头	351
4.4	那霸港临港公路沉管隧道	353
4.4.1	舾装	353
4.4.2	拖航及系泊作业	354
4.4.3	沉放对接	357
4.5	新若户公路沉管隧道	359
4.5.1	施工流程	359
4.5.2	浮运安装确认	359
4.5.3	拖航作业	360
4.5.4	综合沉放调试	360
4.5.5	沉放作业	360
4.5.6	方向调整	360
4.5.7	拉合	362
4.6	韩国釜山—巨济沉管隧道	362
4.6.1	概况	362
4.6.2	隧道特点	364
4.6.3	海洋环境	365
4.6.4	压载水系统	366
4.6.5	出坞浮运	367
4.6.6	系泊	368
4.6.7	沉放对接	369
4.7	博斯普鲁斯海峡沉管隧道	374
4.7.1	项目概况	374
4.7.2	压载水系统	375
4.7.3	锚泊系统	376
4.7.4	流速预报模型	376
5	管节浮运安装中出现的问题	378
5.1	日本多摩川沉管隧道	379
5.2	宁波常洪沉管隧道	379
5.2.1	管节出现上浮现象	379
5.2.2	水下截桩不到位导致 E4 管节无法沉放	379
5.3	上海外环隧道	379

5.3.1 E3 管节就位后因基槽回淤上浮	379
5.3.2 E2 管节沉放过程中出现浅点及设备故障	379
5.3.3 最终接头钢模板水下安装困难	380
5.4 韩国釜山—巨济沉管隧道	380
5.5 厄勒海峡沉管隧道	380
5.5.1 概述	380
5.5.2 事故	380
5.5.3 第二天	381
5.5.4 立即行动	382
5.5.5 再利用标准	384
5.5.6 现场恢复操作	386
5.5.7 业主的观点与行动	387
5.5.8 结论	389
5.6 港珠澳大桥沉管隧道	389
5.6.1 E15 管节回淤	389
5.6.2 回淤情况	389
5.6.3 回淤原因分析	391
5.6.4 主要应对措施	392
5.6.5 两次回坞作业	399
5.6.6 E20 船管异常晃动	403
6 港珠澳大桥沉管隧道相关实验研究	408
6.1 浮运系泊演练	408
6.1.1 演练目的	408
6.1.2 演练情况	408
6.2 锚抓力试验	411
6.2.1 锚泊系统大抓力锚选型分析	412
6.2.2 锚抓力试验区域、材料和关键工序控制	415
6.2.3 锚抓力与起锚力试验结果	417
6.2.4 沉管系泊沉放工程用锚分析	419
6.3 碎石基床摩擦力试验	419
6.3.1 研究内容	419
6.3.2 试验方法、设备与摩擦系数的确定	420
6.4 管节与基床摩擦力试验	430
6.4.1 技术要求	431
6.4.2 研究内容	431
6.4.3 试验方法、设备与摩擦系数的确定	431
6.4.4 设备率定	431
6.4.5 碎石基床、淤泥碎石基床、砂基床铺设	431

6.4.6	水平加载设备安装及加水	433
6.4.7	模型称重、竖向加载	435
6.4.8	水平加载测读数	435
6.4.9	顶推位置布置、竖向沉降及水平位移观测	436
6.4.10	试验结论	438
6.5	沉管管节浮运沉放物模试验	441
6.5.1	试验研究内容	441
6.5.2	拖曳试验	441
6.5.3	沉放过程试验	441
6.5.4	试验要求	442
6.5.5	试验设计	443
6.5.6	锚链及缆索的试验模拟	444
6.5.7	模型设计	445
6.5.8	试验方案	451
参考文献		456
彩图		



1.1 综述

沉管隧道（immersed tunnel）的研究应用历史久远，最早可追溯到 1810 年在伦敦进行的沉管隧道应用试验，随着沉管隧道关键技术的突破和发展，目前国内外用于穿越江、河、海的水底隧道已经超过百条，沉管隧道技术亦被各国普遍采用。

我国沉管隧道技术起步较晚，20 世纪 60 年代初，曾在上海开展过沉管隧道技术的研究，并于 1976 年在上海金山石化工程首次应用沉管法建成了第一座排污水下隧道，后来香港地区、台湾地区又建成了沉管隧道。1973 年广州建成道路、铁路共用的珠江隧道后，同期宁波建成了甬江水底隧道、常洪沉管隧道等，近年来国内迎来了沉管隧道的飞速发展期，已经竣工的大型沉管隧道包括港珠澳大桥沉管隧道和红谷隧道，后续又出现了一批如大连湾海底隧道、深中通道海底沉管隧道等待建项目，其平面布置图如图 1-1、图 1-2 所示。

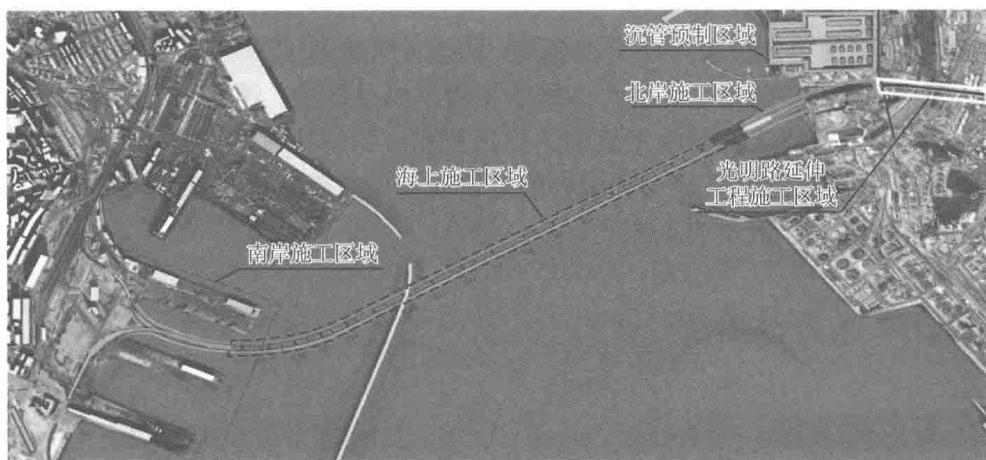


图 1-1 大连湾海底隧道建设工程总平面布置图

沉管隧道的施工，可以说是巧妙地运用水的浮力、压力、重量等作用而设计的施工工法，是由若干预制的管节分别浮运到现场一个接一个地沉放安装，在水下利用水压差将其相互连接并正确定位在已经开挖的水下基槽内，之后辅以相关工程施工使这些管节组合为连接水体两端陆上交通的隧道型交通运输载体。沉管隧道建造中的预制、浮运、安装等工法与传统的建造隧道的盾构法、明挖法、矿山法有较为明显的区别。

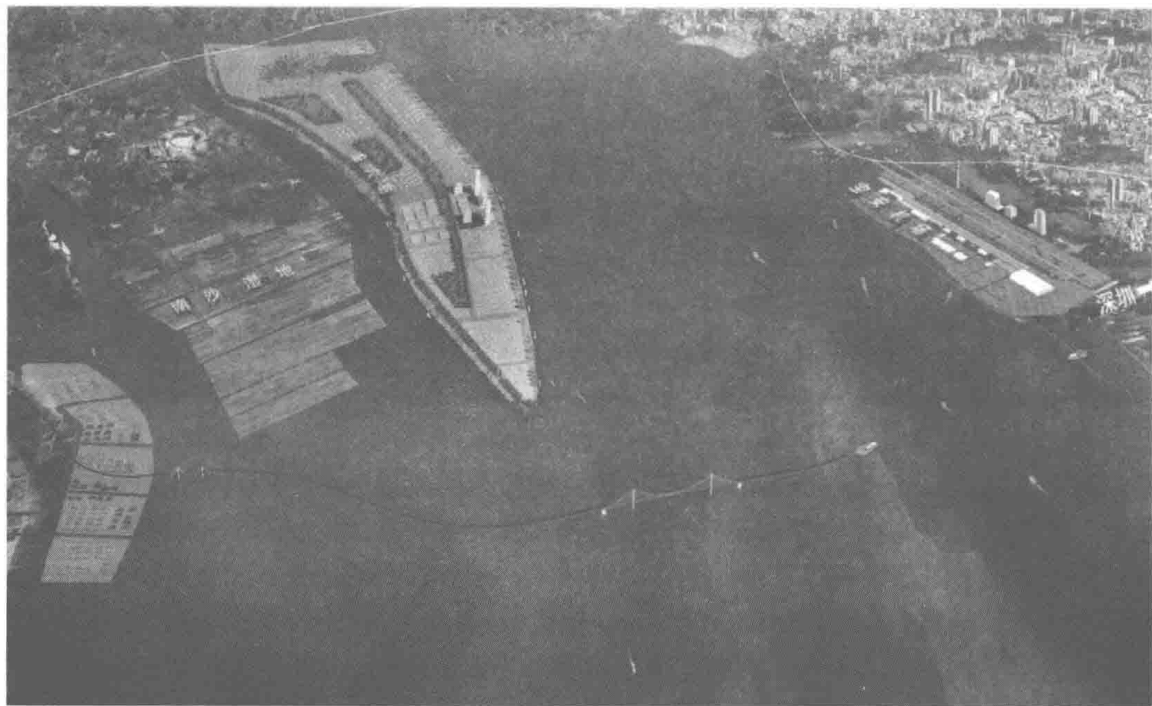


图 1-2 深中通道海底沉管隧道总平面布置图

沉管的浮运安装是隧道施工的最后一道工序，也是技术里面“最神秘”和风险最高的工序。沉管的浮运安装是一个连续、不间断的施工过程，包括舾装、出坞、浮运、沉放、对接，可以说是环环相扣且几乎是“不可逆”的作业过程。

截至目前，已使用的沉放方法有很多种，这些方法适用于不同的自然条件、航道条件、沉管本身的规模及设备条件，可以大体概括为起重船吊沉法、浮箱吊沉法、扛吊法、骑吊法和拉沉法，本书介绍了沉管施工面临的问题及相应的解决方法，并以日本的 4 条隧道、韩国的 1 条隧道、欧洲的 2 条隧道和国内的港珠澳大桥沉管隧道为例，分别讲述不同时期、不同吊沉设备的沉管浮运安装工艺。

1.2 管节浮运方法介绍

1.2.1 主要浮运方法

管节浮运的方法主要有绞移拖航、半潜驳船拖航及拖轮拖航等。

绞移拖航适用于拖航距离较近、轴线干坞施工方案。由于管节绞移的距离较短，通常采用陆上卷扬机、管顶卷扬机系统配合进行浮运，必要时需要锚艇或拖轮进行辅助姿态控制。

半潜驳船拖航适用于管节长度、体量不太大的沉管，并考虑预制场位置远离隧址，采用半潜驳船拖航需要充分考虑船舶上下船的时间及安装驳上管的时机。如果采用没有动力的半潜驳船进行拖航，同样需要拖轮进行拖航，如图 1-3 所示。



图 1-3 半潜驳船拖航

拖轮拖航适用于预制场与沉管隧道之间水路畅通,而且水深条件基本满足沉管浮运要求的情况。目前世界上的超大型混凝土构件的浮运中,特别是沉管管节浮运几乎都是采用4~5艘全回转大马力拖轮吊拖的方式,如上海外环隧道管节浮运采用4艘拖轮吊拖,如图1-4所示;广州仑头—生物岛沉管隧道和红谷隧道管节浮运也考虑过5艘拖轮吊拖的浮运方式,如图1-5、图1-6所示。

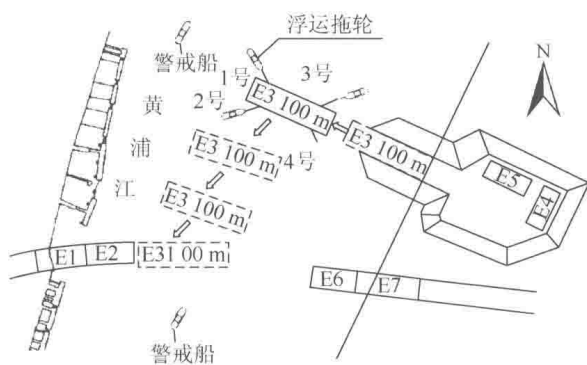


图 1-4 上海外环隧道管节浮运方式

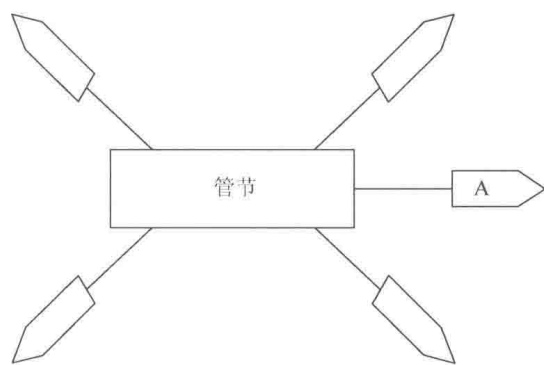


图 1-5 广州仑头—生物岛沉管隧道管节浮运方式

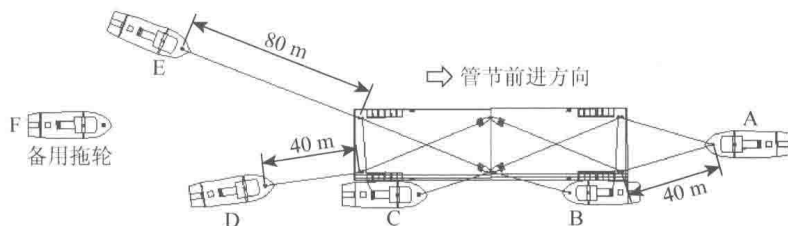


图 1-6 红谷隧道管节拖轮编队方式

对于施工难度更大的有限航区、海况复杂的外海沉管隧道,4艘拖轮的拖航方式存在一定的安全风险,从降低施工风险和提高沉管姿态控制方面考虑,港珠澳大桥沉管隧道工程采用吊拖+绑拖的8艘拖轮的组合拖带方式,如图1-7所示。



图 1-7 港珠澳大桥沉管隧道工程管节拖航

1.2.2 基础资料收集

为了保证管节浮运可以顺利、安全地进行,应提前1~3年进行以下几方面的资料收集。

1.2.2.1 气象资料收集

- ①风向、风力、风速(包括平均风速、最大风速);
- ②温度、湿度;
- ③雾、台风、季风。

1.2.2.2 水文资料收集

①内河工程:应收集当地历史最高水位、最低水位,推算百年一遇、二百年一遇洪水,最高潮位、最低潮位。

②受潮汐影响河段及外海工程:收集潮汐类型、潮汐特征值、潮汐预报表等。潮汐特征值包括最高潮位、最低潮位、平均大潮高潮位、平均大潮低潮位、平均小潮高潮位和平均潮位。

③测流工作主要包括测量流速、流向及波浪的波高、周期、波向和持续时间,并统计分析不同方向、不同级别波浪出现的频率和持续时间。

1.2.3 一般要求

管节浮运前,必须进行管节的水密性检查。根据预制场的不同方式在不同区域进行检查,一般在干坞内进行。

管节进行浮运之前的准备工作包括以下几点。

- ①检查端封门及管节的水密性,如果发现漏水,必须及时修补或采取相应的补救措施;
- ②管节起浮期间,通过调整压载水箱的水量或管顶压载混凝土的重量调整管节的干舷,并保证干舷满足设计要求;
- ③检查浮运线路/航道水域上的浮标情况,并采用单波束或多波束对航道进行扫测,及时清除碍航物;
- ④近期的天气情况,是否受到台风、季风的影响,天气水文气象复杂时,应根据天气预报和作业窗口限制条件确定合适的作业时间。

1.2.4 浮运线路选择

由于管节的浮力是依靠自身排水能力提供,在不采用其他助浮措施的情况下,干舷高度一般为 150~250 mm,其抗浮能力富余不变,如果在浮运过程中遇上超过设计考虑的意外工况时,可能因轻微的差错造成严重的损失。因此必须清楚了解浮运线路的水上情况,选择最为合适的浮运线路降低浮运过程中的风险。

1.2.4.1 管节浮运线路

- ①管节从干坞起浮拖运到管节最终沉放位置的路线;
- ②管节从干坞起浮拖运到管节临时存放系泊位置的路线;
- ③管节浮运过程中,如遇到恶劣天气需将管节临时拖运到避风区系泊位置的路线。

1.2.4.2 评估及分析管节浮运线路可能发生风险的考虑因素

- ①水运的线路:运河、湖等内陆水运,海上水运;
- ②阻碍物:水下阻碍物、滑管线、桥墩、水闸、航标;
- ③航行方面:水上交通、临时封航或航道转换;
- ④水力学方面:水文、潮汐、波浪、水密度;
- ⑤气象方面:风、雾、暴雨、台风、飓风、强对流;
- ⑥避风区:恶劣天气时的避风及临时系泊处;
- ⑦拖运方面:拖运速度、拖运操纵性、拖运宽度、清障船舶、海事局领航;
- ⑧结构性容量:浮运管节时所承受载重;
- ⑨环境方面:避免开挖管节浮运水路;
- ⑩其他方面:承包商对管节浮运及其突发事件的检验、应急预案。