

沉管隧道设计施工手册

综合篇 Ⅲ

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

综合篇 Ⅲ

中国交通建设股份有限公司

科学出版社

北京

内 容 简 介

沉管隧道施工是风险高、难度大的工程项目之一，其中，沉管浮运、安装又是沉管隧道施工中风险最大、决定沉管隧道施工成败的关键工序。

本书全面系统介绍了沉管浮运、安装施工过程中的决策管理、施工监控管理及风险管理等内容。本书是在港珠澳大桥沉管隧道实践基础上，结合全球已建成的沉管隧道施工管理经验编写而成，尝试建立一套适用于大型沉管隧道的施工管理体系。

本书可供从事沉管隧道设计、施工、管理、工程监理、工程业主等工作的工程人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

沉管隧道设计施工手册. 综合篇. III/中国交通建设股份有限公司编. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061690-6

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 (2019) 第 117526 号

责任编辑: 郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 师艳茹 / 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 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 302 000

定价: 98.00 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

《综合篇》编辑组

组 长 高纪兵 李哈汀 刘可心
成益品 马宗豪

成 员 (以姓氏笔画排序):

于 健	冯颖慧	刘 馨	刘兆权
刘思国	孙阳阳	李 斌	李顺凯
李德辉	杨润来	肖利军	汪华文
宋江伟	张 超	张秀振	张怡戈
陈 琥	赵 辉	胡志远	胥新伟
莫日雄	高 潮	锁旭宏	焦运攀

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（Öresund）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波斯普鲁斯（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 施工管理体系	1
1.1 概述	1
1.2 施工管理涵盖的主要范围	2
1.3 施工管理体系	2
1.3.1 施工管理体系的组成	2
1.3.2 管理职能职责划分	4
1.3.3 决策管理体系及流程	5
1.3.4 决策机构	5
1.3.5 决策流程	5
1.3.6 施工指挥系统	7
1.3.7 风险管理	7
1.3.8 施工监控管理	7
2 沉管隧道施工监控管理	9
2.1 施工监控主要内容	9
2.2 施工监控管理组织架构	9
2.3 监控流程	10
2.4 基础施工监控	11
2.4.1 目的	11
2.4.2 一般监控内容	11
2.4.3 沉管隧道基础监控标准	12
2.4.4 一般监控要求	12
2.5 管节舾装监控	14
2.5.1 目的	14
2.5.2 管节舾装监控	15
2.5.3 一次舾装主要检查内容	15
2.5.4 一次舾装监控要求	15
2.5.5 管节水密性检查内容及要求	17
2.5.6 二次舾装主要检查内容及要求	17
2.5.7 二次舾装监控检查具体要求	18

2.6	管节结构及线形监控	19
2.6.1	管节结构及线形监控目的	19
2.6.2	管节结构及线形监控主要内容及方法	20
2.6.3	已安管节结构监控	21
2.6.4	待安管节结构及防水安全评估方法	23
2.6.5	待安管节平面线形监控	24
2.6.6	待安管节纵面线形监控	25
2.7	测量监控	26
2.7.1	控制网测量工作	26
2.7.2	端钢壳测量	26
2.7.3	导向系统(预埋件)	26
2.7.4	先铺法基床铺设测量监控	26
2.7.5	参数复核	27
2.7.6	管节一次、二次标定	27
2.7.7	贯通测量	27
2.7.8	测控系统调试	28
2.8	港珠澳大桥沉管隧道施工监控管理案例	28
2.8.1	概述	28
2.8.2	港珠澳大桥沉管隧道施工监控管理体系的建立	30
2.8.3	E18管节基础施工监控管理过程	34
2.8.4	E18管节舾装监控管理内容	42
2.8.5	管节结构及线形监控管理内容	48
2.8.6	管节测量监控管理内容	55
3	施工风险管理	63
3.1	风险管理的理念及原则	63
3.1.1	风险管理的理念	63
3.1.2	风险管理的原则	64
3.1.3	风险管理方针	64
3.1.4	风险管理目标	65
3.2	风险管理流程	65
3.3	港珠澳大桥沉管隧道的施工风险管理体系	65
3.3.1	风险管理组织架构	65
3.3.2	风险管理文件体系	66
3.3.3	风险管理流程	68
3.4	港珠澳大桥沉管隧道的施工风险管理活动	71

3.4.1 施工准备阶段的风险管理活动	72
3.4.2 施工过程中阶段风险管理活动	76
3.4.3 施工完成阶段风险管理活动	77
3.5 港珠澳大桥沉管隧道风险管理实施案例	78
3.5.1 E17 管节风险管理实施案例	78
3.5.2 E33 管节风险管理实施案例	83
3.5.3 最终接头风险管理实施案例	90
3.5.4 港珠澳大桥沉管隧道安装风险登记表	107
参考文献	108
附录 港珠澳大桥沉管隧道安装施工风险登记（试行）	109



1.1 概述

超长沉管隧道,顾名思义是指建设周期长且建设里程长的沉管隧道,其涉及多个专业、多个领域,是风险管理难度最高的工程项目之一,具有技术难度复杂、施工不可逆、风险极大的特性。另外,国内的超长沉管隧道施工技术在港珠澳大桥沉管隧道建设之前是一片空白,沉管隧道施工管理更无经验可循,复杂的外海环境、严苛的作业条件限制,核心装备、技术工艺挑战难度可想而知。据不完全统计,国内外已建的沉管隧道施工期间曾出现多起工程事故,暴露了沉管隧道建设过程中的巨大风险,外海超长沉管隧道更甚。如国内某隧道管节安装后意外起浮,国外某海底隧道水力压接过程中GINA橡胶止水带(以下简称CINA止水带)侧翻,某海底隧道浮运过程中端封门被撞击损坏后导致管节沉没等。超长意味着管节数量多、施工工期长,且一般会位于外海、海湾或海峡,沉管浮运安装期间,必将面临复杂海况、气象条件,专用船机设备高强度运转,通航安全,人员心理健康等问题,施工风险极大,稍有不慎将导致工程重大损失,甚至有失败的风险。

根据广泛调研,目前针对超长沉管隧道尚未建立一套完整的施工期全过程的监测监控管理体系。在沉管隧道建设施工期间,沉管在荷载、环境(潮汐、季节等)多种因素交叉作用下,沉降、管节接头差异变形、节段张开量等变化显著;压载水排空、压载混凝土浇筑、外部回填等施工会对沉管的沉降及线形产生较大影响;温度、潮汐会影响节段及管节张开量;临时舾装件的受力和止水性能对沉管隧道施工产生的影响,等等,这些影响可能引发沉管隧道结构及防水安全问题;在沉管基础施工中,每一个施工环节都可能影响沉管的沉降控制,从而影响沉管防水及后期运营安全。

如何提前判断、及时发现、妥善处理沉管隧道施工期间的基础、结构及防水风险点是影响沉管隧道施工过程安全性的另外一个难题。目前我国在建和拟建的大型跨海通道建设周期一般需4~6年,甚至更长,建设周期长进一步增加了施工风险管理的难度,已开展的结构监测工作,尚缺乏成熟可靠的量化管理体系。监控体系的重点在于如何合理利用监测结果,及时开展动态设计,通过完善的监控体系可以为后续施工提供更好的设计方案,并及时发现施工过程中存在的风险,最终必将推动沉管隧道领域的施工风险管理水平的提升。

沉管隧道的风险管理在国内发展尚不成熟,更多的是停留在理论层面上,没有可操作性的风险管理体系,其风险管理理念、管理原则、管理方法及具体的风险管理活

动都没有成熟可用的内容。随着我国众多跨海、跨江通道的建设,我国已进入沉管隧道的快速发展时期,建立一套完善的沉管隧道风险管理体系至关重要,这是保障工程顺利推进的基础。

因此,超长沉管隧道施工期间,若没有一套行之有效的施工管理体系,难以保证施工期全过程中不发生安全或质量事故,进而造成工程损失。本书依托全球已建成的沉管隧道施工管理经验,特别是刚刚建成通车的港珠澳大桥沉管隧道施工管理经验,尝试建立一套适用于超长沉管隧道的施工管理体系,以期为沉管隧道施工保驾护航。

1.2 施工管理涵盖的主要范围

沉管隧道施工主要包括基础施工、管节制作、舾装、沉管浮运、沉管安装、回填等主要工序,每一道都是关键工序,任何环节出现问题都可能导致沉管施工风险的增加,甚至失败,故需要建立一套成体系、成系统的施工管理体系,以对沉管隧道施工进行全过程管理控制。沉管浮运与安装是沉管隧道施工中风险最大,也是决定沉管隧道施工成败的关键工序中的关键,本书介绍的超长沉管隧道施工管理主要围绕沉管浮运与安装工序,同时,涵盖沉管隧道施工其他主要工序。

1.3 施工管理体系

沉管隧道由于其复杂性与高风险性,根据以往工程经验,一般建议采用设计-施工总承包模式,特别是超长沉管隧道,如未采用设计-施工总承包模式,也需要设计方充分参与沉管隧道施工过程。只有设计与施工的充分互动与联动,相互取长补短方能确保沉管隧道建设的顺利推进与建成。本书主要介绍设计-施工总承包模式下的沉管隧道施工管理,也可供其他模式下施工管理参考。同时,本书主要针对沉管隧道施工过程中特殊的施工管理内容进行介绍,而一般工程管理中的质量、安全、进度、成本等管理内容未进行叙述。

1.3.1 施工管理体系的组成

超长沉管隧道施工管理的核心是风险管理,其基础是施工监测监控,扁平高效的决策管理体系是根本,风险管理与施工监测监控又为决策管理提供支撑与保障。首先应建立一套涉及沉管安装全过程各工序的风险管理体系,对沉管安装全过程风险进行动态管理;其次应在沉管隧道监测的基础上建立监测监控体系,监测一般由施工单位或第三方承担,监控一般由设计单位承担,监控内容应至少包括隧道基础、舾装、测量监控、结构及线形4个方面;最后应成立涵盖业主、设计、监理、施工、海事部门、监测单位、监控单位(一般由设计单位负责)、气象预报单位、水文监测单位及相关协作单位的联合指挥部,明确各方职责与责任,在沉管安装过程共同决策,风险与责任共担,实现扁平化管理与决策(图1-1)。

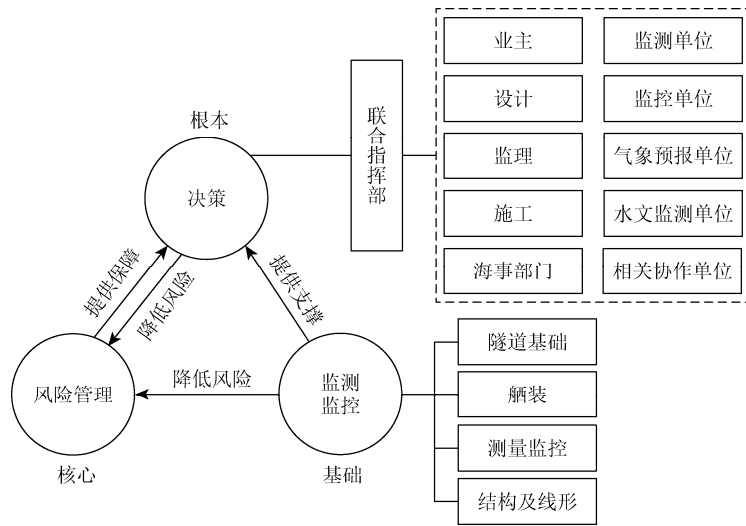


图 1-1 施工管理体系组成图

设计-施工总承包项目牵头单位一般应成立项目总经理部，下辖各相关职能部门及施工工区或项目分部，考虑沉管安装的专业性与综合性，需要设立专门的沉管安装总指挥部，用以协调与之相关的各单位并行使决策权。根据沉管安装的工序及现场管理需要，可以将现场进行分工，主要分为管内作业队、舾装作业队、测量作业队、潜水作业队、浮运作业队（含出坞）、沉放作业队、回填作业队、基础（基床）作业队（如涉及）等，具体施工管理组织机构见图 1-2。

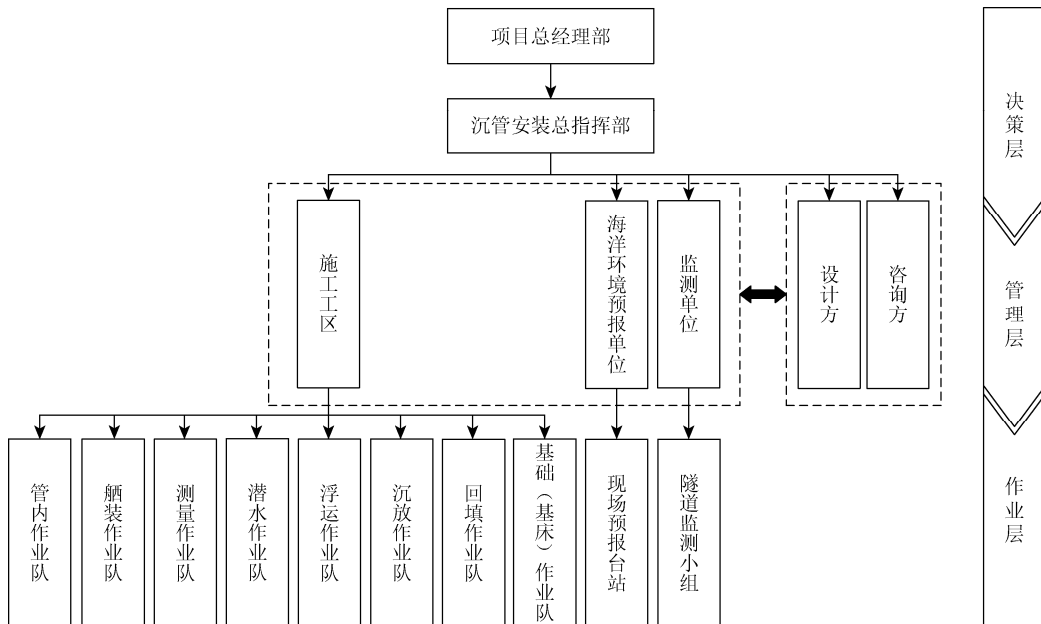


图 1-2 沉管安装施工管理组织机构图

1.3.2 管理职能职责划分

项目总经理部统一协调各施工工区或项目分部界面划分和施工资源的投入，负责组建沉管安装总指挥部，进行沉管安装的总体决策。施工工区或项目分部下属的作业队负责进行沉管安装的具体实施工作，一般按照工序可分为舾装作业队、浮运作业队、沉放作业队、回填作业队、管内作业队、基础（基床）作业队、潜水作业队、测量作业队等，其具体负责的工作如下。

1. 舾装作业队

舾装作业队负责管节舾装和安装后管内舾装件拆除工作，以及坞内横移、系泊工作。

2. 浮运作业队

浮运作业队由工区或分部管理人员、技术人员和专业拖轮公司共同组建，负责管节出坞、浮运和系泊工作。

3. 沉放作业队

沉放作业队由工区或分部管理人员、技术人员和各专用系统厂家服务保障人员组成，负责管节沉放和对接工作。

4. 回填作业队

回填作业队由工区或分部管理，负责管外锁定、一般回填工作。

5. 管内作业队

管内作业队负责管内临时通风、供水、供电作业，以及管内压载混凝土、结构混凝土和隧道内饰等工作。

6. 基础（基床）作业队

基础（基床）作业队由工区或分部管理，负责隧道基础（基床）相关施工作业。

7. 潜水作业队

潜水作业队由工区或分部管理人员、技术人员和专业潜水公司共同组建，负责配合舾装和管外舾装件拆除、安装过程的水下检查等工作。

8. 测量作业队

测量作业队负责整个沉管隧道工程包括沉管安装作业的控制测量，以及关键工序的复核、校验和验收测量工作。

1.3.3 决策管理体系及流程

沉管体量庞大,安装操作风险巨大。为了在最大控制范围和安全范围内进行所有操作,根据沉管所处位置的不同,在沉管从预制厂(干坞)制造、舾装、出坞、浮运到最终安装完成的每一个步骤都需要进行施工决策,总体施工决策步骤如图 1-3 所示。

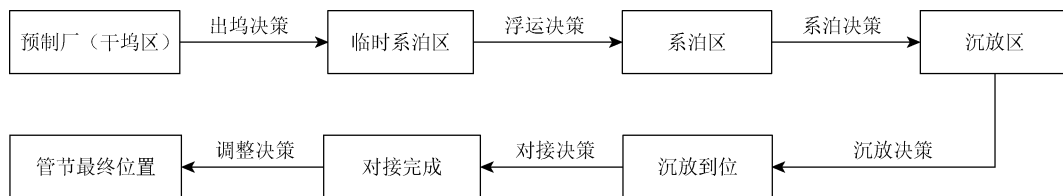


图 1-3 总体施工决策步骤

1.3.4 决策机构

为了保障沉管浮运安装的正常进行,需要协调各有关单位组建沉管安装总指挥部,同时形成一套完整的扁平化沉管安装决策执行体系。沉管安装决策机构组成见图 1-4。

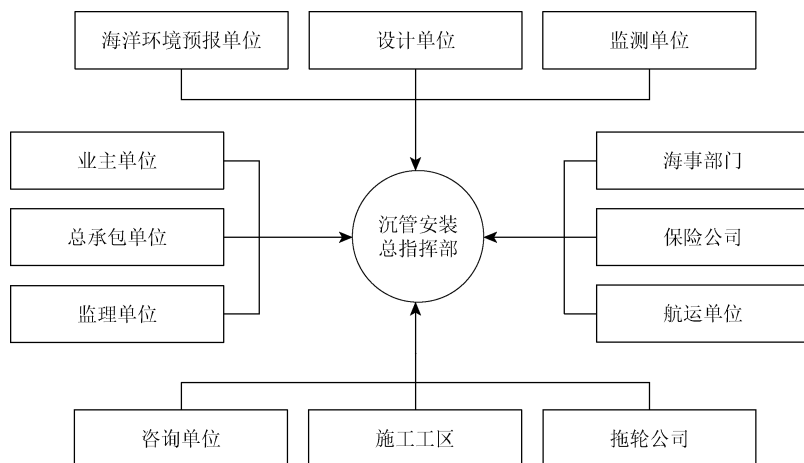


图 1-4 沉管安装决策机构组成

1.3.5 决策流程

针对超长沉管隧道沉管浮运、安装施工应建立一套扁平化的决策程序,对各个阶段进行执行/不执行(Go/No Go)的决策,包括管节出坞、浮运至安装点、管节系泊、沉放、轴线调整作业等,具体决策流程见图 1-5。在开始进行每项作业前召开决策会议,以

决定是否执行此项任务。举行决策会议的主要目的是检查所有的前期准备工作是否都已到位，是否已经为下一步操作做好了准备。决策会议中，执行/不执行决定主要需要考虑以下因素。

- ①施工风险是否可控，各处置预案是否准备就绪；
- ②监测监控情况；
- ③航运主管部门的审批和批准；
- ④气象、水文作业窗口预报结果的报告；
- ⑤管节舾装、结构及防水等方面所有设计审核工作；
- ⑥填写校核确认清单和工序交接单；
- ⑦重要检查项目清单和专家团队检查确认；
- ⑧碎石基床（先铺法）的验收和全面检查（包括回淤情况）；
- ⑨航道全面检查（碍航物清理和助航设施）等。

1.3.6 施工指挥系统

沉管浮运、沉放作业施工指挥系统见图 1-6。

1.3.7 风险管理

沉管隧道施工涉及专业多、工艺复杂，且具备不可逆性，因此为确保沉管施工的安全与质量，风险管理必须成为整个施工管理的核心。在风险管理中应坚持“全员、全过程、动态和实用”的管理理念。后续章节将重点介绍风险管理，在此不赘述。

1.3.8 施工监控管理

沉管隧道建设施工期间，沉管在荷载、环境（潮汐、季节等）多种因素交叉作用下，沉降、管节接头差异变形、节段张开量（节段式）等变化显著；压载水排空、压载混凝土浇筑、外部回填等施工会对沉管的沉降及线形产生较大影响；温度、潮汐会影响管节张开量；临时舾装件的受力和止水性能会对沉管隧道施工产生影响等，这些影响可能引发沉管隧道结构及防水安全问题。每个沉管结构又包括接头及诸多的临时舾装件，所有构件均是沉管隧道安全的重要因素，是一个庞大的、有机的体系，因此，为确保沉管隧道施工期安全，针对沉管隧道施工期需建立一套全过程完整的监测监控体系，保障工程施工的顺利推进，为结构安全、防水可靠等决策提供科学依据。后续章节将重点介绍施工监控管理，在此不赘述。

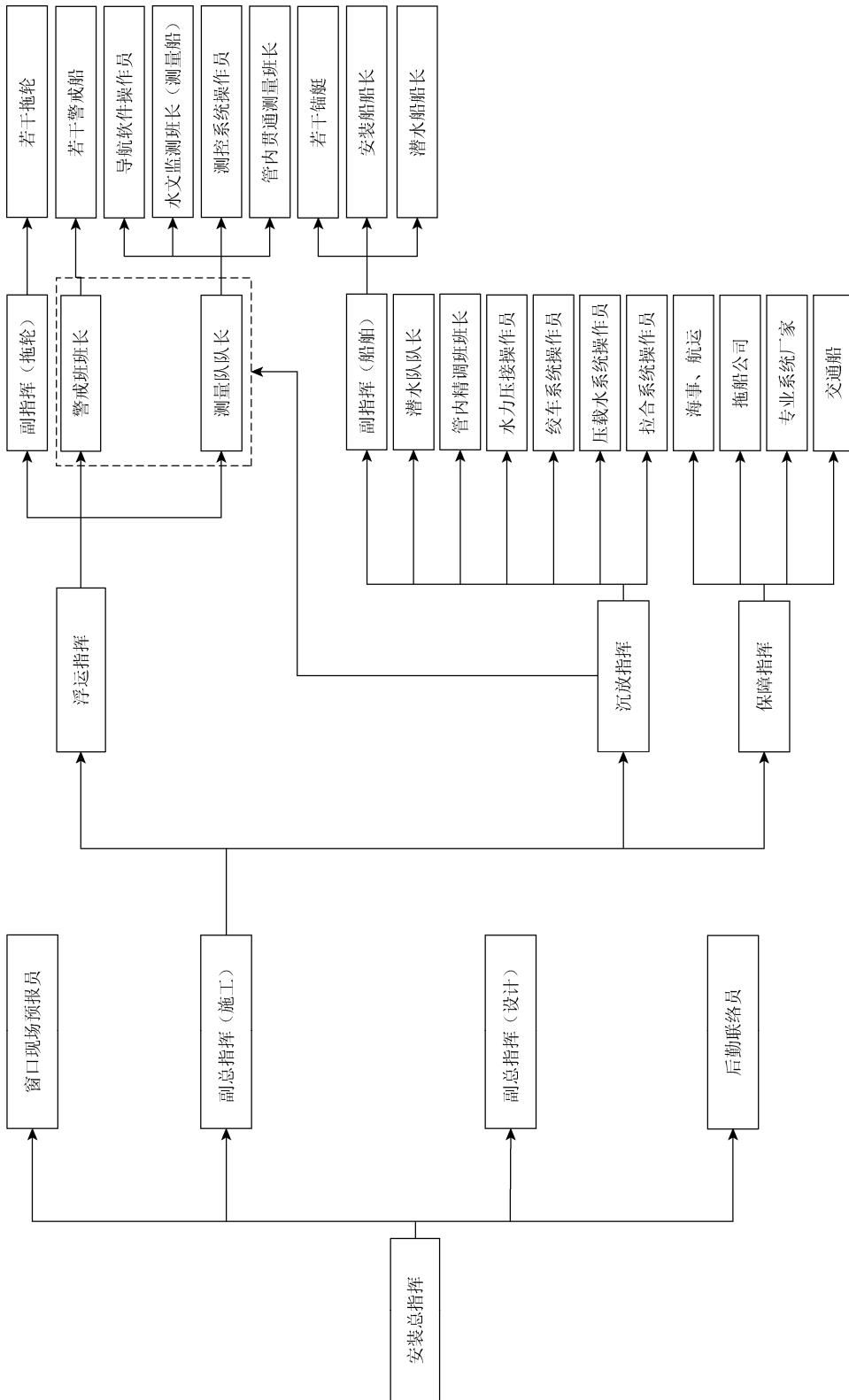


图 1-6 沉管浮运、沉放作业施工指挥系统图