

港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷Ⅱ
▼

中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

科学出版社



港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷Ⅱ



中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在港珠澳大桥建设过程中,建设团队结合理论设计、思考、实践实施而编写的论文的集锦,本卷为沉管安装、沉管预制方面内容,合计106篇论文。

本书的出版可供从事桥梁道路工程设计、施工、测量、监测等专业人员参考,也可供高等院校交通工程、桥梁工程、道路工程等专业师生阅读。

审图号:GS(2018)5373号

图书在版编目(CIP)数据

港珠澳大桥岛隧工程论文集.卷II/中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部编.一北京:科学出版社,2019.1

ISBN 978-7-03-058952-1

I. ①港… II. ①中… III. ①跨海峡桥—桥梁工程—文集②水下隧道—隧道工程—文集 IV. ①U4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第221896号

责任编辑:郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对:王萌萌 樊雅琼
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1月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:46 1/2

字数:1 097 000

定价:268.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“港珠澳大桥岛隧工程论文集”编委会

主 任 林 鸣

副 主 任 刘 晓 东 尹 海 卿 刘 亚 平

编 审 委 员 (以 姓 氏 笔 画 排 序):

王 强 孔 令 磊 冯 颖 慧 刘 海 青

杨 绍 斌 吴 凤 亮 何 波 张 宝 兰

陈 伟 彬 陈 良 志 陈 林 林 巍

罗 冬 岳 远 征 周 光 强 孟 凡 利

赵 辉 高 潮 高 纪 兵 黄 维 民

宿 发 强 梁 桁 梁 杰 忠 屠 柳 青

董 政 谢 臣 伟 樊 建 华

序 言

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，是我国继三峡工程、青藏铁路、南水北调、西气东输、京沪高速铁路之后又一重大基础设施项目。其中，岛隧工程是大桥的控制性工程，包括一条长 6.7 km 的沉管隧道和两座各 10 万 m² 的外海人工岛，采用设计施工总承包模式，由中国交通建设股份有限公司联合体承建。

沉管工法是一项综合了水工工程、地下工程、隧道工程的复合性技术，实施难度和风险非常大，因而在隧道建设中应用不多。到目前为止，全世界建成的沉管隧道只有一百多条，主要集中在美国、日本、欧洲等发达国家及地区。中国的沉管隧道建设起步较晚，在 20 世纪 90 年代初才建设了第一条沉管隧道，截至 2010 年，全国也只在内河、江湖中修建过十多条沉管隧道，长度也是几百米级的。

深埋海底、长达 6.7 km 的外海沉管隧道，放眼全球，都是令人望而生畏的难题；岛隧工程结合、软土地基不均匀沉降控制、超大管节预制、外海条件管节浮运和沉放、深水深槽条件管节对接、结构与接头的水密、最终接头等技术难题都是具有世界级挑战性的。

七年建设征程，岛隧工程建设团队攻坚克难、创新实践，完成了 100 多项试验研究，申报并取得超过 400 项技术专利，开创了公路沉管隧道“最长、最大跨径、最大埋深、最大体量”四项世界纪录，取得了大直径深插钢圆筒快速成岛新技术、半刚性沉管新结构、整体式主动止水最终接头新方案、复合地基加组合基床隧道基础新形式等多项创新成果；攻克了曲线段沉管工厂法预制、外海沉管安装等多项新技术。这些创新成果是本项目一线科技人员聪明才智与实践探索的结晶。

2011~2017 年，4000 名岛隧建设者七年如一日，坚守七年、奉献七年，确保了港珠澳大桥主体工程顺利交工验收。现将项目建设过程中编写及发表的论文约 400 篇进行梳理汇总，形成了论文集共四卷，呈现给同行和专家学者，以供参考。由于水平有限，本书难免有错误、遗漏及理解偏颇之处，还望读者不吝赐教，以便鞭策我们不断探索和提升，全体编写人员对此深表感谢。

最后，衷心感谢各级领导和同仁对港珠澳大桥岛隧工程的支持、关心与帮助！

中国交通建设股份有限公司联合体
港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

2018 年 11 月

目 录

序言

沉 管 安 装

沉管隧道临时辅助安装设施探讨	林 巍 (3)
港珠澳大桥岛隧工程沉管一次舾装安装工艺	唐永波 魏 杰 周建民 (16)
沉管管节舾装件安装及精度控制方法	王 伟 丁宇诚 宁进进 等 (22)
超大型沉管舾装施工风险管控	杨永宏 刘亚平 尹海卿 (29)
港珠澳大桥沉管隧道管节压载水系统	林 巍 (36)
沉管管节钢木结构压载水箱安装工艺及特点	陈 聪 李元庆 (48)
关于沉管隧道管节干舷计算及允许值的研究	林 巍 李 塔 吕勇刚 (54)
沉管干舷调整施工技术	唐 宋 唐 旭 刘 然 等 (63)
管顶人孔井、测量塔的受力变形数值模拟及控制	丁宇诚 宁进进 (69)
外海沉管浮运安装作业窗口管理及工艺计划研究	宁进进 岳远征 (75)
超大型沉管出坞施工及控制方法	宁进进 丁宇诚 (83)
港珠澳大桥岛隧工程浮运操作指挥系统开发	刘兆权 宁进进 孙阳阳 (88)
港珠澳大桥管节沉放驳制造技术	贾泽鑫 钟炳贵 (96)
大型沉管与沉放驳摩擦型连接受力分析	苏长玺 冯海暴 (100)
管节与安装船在浮运过程中连接的研究	华晓涛 何可耕 董美余 (106)
大型管节浮运关键技术分析	朱建国 伦灿章 (113)
超大型沉管拖航中拖轮的分工作用分析	宁进进 郑秀磊 孙 健 等 (119)
利用沉管系泊缆力推算沉管外海横拖时的水阻力系数	王 伟 宁进进 窦从越 (125)
拖轮螺旋桨尾流对沉管或沉箱浮运的影响	侯连青 宁进进 (130)
超大型沉管浮运的风险管控	宿发强 (136)
港珠澳大桥隧道管节沉放船锚泊系泊系统设计	王 博 汤 晶 胡 文 (142)
大型沉管安装工程用锚选型及锚系设计试验研究	苏长玺 冯海暴 (149)

新型多用途起锚艇的研发与建造赵 雨 孙 靓 (157)

超大型沉管管节拉合系统及控制方法 汤慧驰 岳远征 张建军 等 (165)

钢筋混凝土沉管管节与基床摩擦力的试验研究尚乾坤 王殿文 (171)

沉管隧道管节线形控制方法马宗豪 孙 健 管泽旭 (176)

沉管尾端钢封门保护罩安装施工技术宿发强 马宗豪 (182)

船行波对近距沉管隧道管节安装施工的影响分析曲俐俐 冯海暴 付大伟 (187)

强对流天气对超大型沉管浮运安装的影响及应急预案李 进 朱 岭 侯亚飞 等 (200)

珠江三角洲大径流对港珠澳大桥沉管隧道施工的影响宿发强 李 进 宁进进 等 (206)

沉管安装碎石回填质量控制张建军 尚乾坤 (211)

沉管隧道回填减载技术杨润来 靳 胜 李海平 (216)

长距离沉管隧道施工通风技术马宗豪 (220)

外海沉管隧道压载混凝土施工技术张 端 朱宝华 孙建强 (228)

外海沉管隧道人孔封堵技术朱宝华 张 端 杨润来 (234)

创新型注浆囊袋在沉管隧道不规则抗剪支撑体系中的应用陈伟彬 邹正周 王 蔚 (241)

港珠澳大桥沉管隧道最终接头吊装解析刘凌锋 林 巍 尹朝晖 等 (247)

沉管预制

沉管工厂化预制技术在港珠澳大桥工程中的应用翟世鸿 吴海波 杨秀礼 (263)

港珠澳大桥岛隧工程桂山沉管预制厂总平面设计孙英广 梁 桁 毛剑锋 (270)

大跨度自稳式横拉钢闸门的应用董 政 王晓东 刘远林 (275)

坞门大沉箱预制技术李惠明 梁杰忠 袁 立 (281)

坞门式沉箱模板设计及施工要点黄文慧 董 政 (291)

大体积钢混组合箱形浮坞门启闭施工工艺王晓东 陈 聪 (298)

用于大型浮式坞门的橡胶垫结构设计马 勇 黄丹苹 陈良志 (306)

自动化钢筋加工生产线在港珠澳大桥沉管预制中的运用杨绍斌 张 洪 (313)

沉管钢筋笼全断面整体置换法董 政 黄文慧 (320)

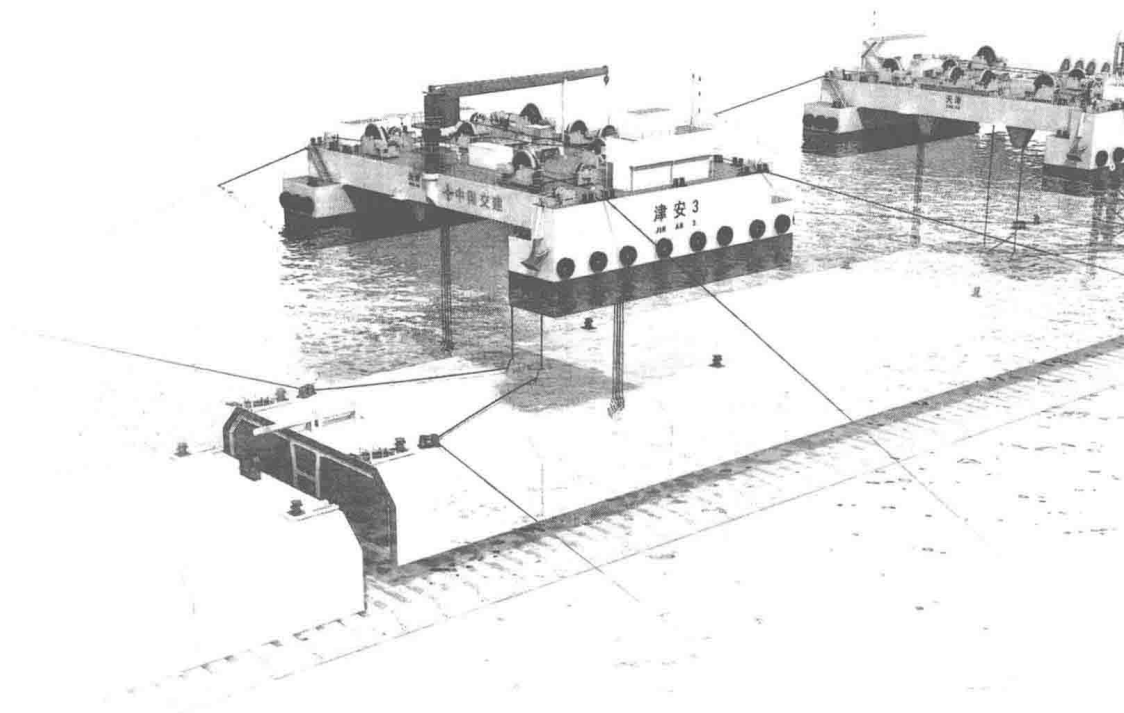
工厂法预制沉管钢筋笼变形控制冯 伟 戴书学 李凯凯 (327)

劲性骨架在大跨度混凝土构件中的应用陈刚强 董 政 (334)

钢筋笼顶推系统研究与分析	唐三波	刘远林	(338)
装配式绑扎平台在曲线段沉管顶板钢筋绑扎中的改造技术	朱成	唐艳	张宇航 (345)
沉管钢筋笼劲性骨架制作与安装精度控制	张宇航	申昌洲	(351)
工厂法预制沉管钢筋笼施工技术与优化	李凯凯	冯伟	(356)
摩擦焊在港珠澳大桥沉管预制中的应用	戴书学	李阳	(362)
沉管预制钢筋质量通病治理	陈刚强	柳志刚	(370)
预制沉管大型预埋件精确安装技术	李凯凯	李誉文	冯伟 (374)
沉管交通工程预埋设施安装精度控制	陈聪	申昌洲	朱成 (381)
大型沉管端钢壳施工工艺比选	张文森	黄文慧	(387)
沉管管节端钢壳制造及安装工艺	向剑	刘经国	苏怀平 (394)
港珠澳大桥沉管预制端钢壳测量技术	邹正周	胡志远	季拥军 (399)
港珠澳大桥岛隧工程沉管预制模板施工工艺	张洪	范非凡	刘然 (405)
沉管预制侧模承载力分析	董洪静	胡少文	陈伟龙 (412)
曲线段沉管预制模板应用研究	黄文慧	董洪静	胡汉卿 (417)
消除大型沉管节段接头错台工艺措施	陈伟龙	董洪静	胡汉卿 (425)
沉管预制混凝土施工工艺比选	李惠明	梁杰忠	董政 (433)
工厂法预制沉管混凝土施工与优化	范非凡	范充	王李 (444)
工厂法沉管预制混凝土泵送施工技术	李阳	杨红	(450)
大体积混凝土入模温度控制研究	杨绍斌	苏怀平	张洪 (459)
港珠澳大桥沉管隧道预制混凝土控温设备选择研究	杨秀礼	邵曼华	(465)
提高超大型沉管节段预制成品尺寸合格率	陈伟龙	董洪静	胡汉卿 (473)
工厂法预制沉管控裂技术	刘然	王李	范非凡 (480)
港珠澳大桥超大断面隧道混凝土裂缝控制技术	刘可心	吴柯	刘豪雨 (486)
超深埋海底沉管隧道接头防水技术	陈伟龙	董洪静	胡汉卿 (493)
预制沉管接头注浆施工技术与质量控制	冯伟	杨红	李凯凯 (500)
深埋沉管防水体系施工技术	黄涛	戴书学	李誉文 (507)
港珠澳大桥全断面浇筑沉管裂缝控制技术	李超	王胜年	王迎飞等 (515)
聚脲防水涂层在大型沉管工程中的应用	陈聪	徐轶凡	(523)
港珠澳大桥长寿命海工高性能混凝土配制	李超	王胜年	范志宏等 (529)
海洋环境长寿命高性能混凝土的研究	刘行	李超	范志宏 (541)

全断面浇筑沉管低热低收缩高性能混凝土配制及优选	李 超 王迎飞 张宝兰 等 (548)
利用足尺模型试验进行沉管全断面浇筑混凝土施工性能研究	王迎飞 李 超 张宝兰 等 (558)
港珠澳大桥预制沉管混凝土密度控制技术试验研究	李 超 刘昌义 张宝兰 等 (567)
超大型沉管顶推技术	陈伟彬 刘远林 李海峰 (576)
超大型沉管顶推姿态监控技术	邹正周 季拥军 缪永丰 (584)
沉管顶推施工的保障措施	李海峰 刘远林 (589)
大型预制构件顶推方案选型	彭晓鹏 李 阳 李海峰 (597)
港珠澳大桥岛隧工程沉管预制顶推技术	杨 红 王 李 刘 然 (604)
节段式预制沉管顶推系统比选与优化	戴书学 游 川 (612)
沉管顶推施工摩擦系数控制分析	周 林 陈刚强 (618)
大型沉管顶推滑板选型与优化	王 李 刘 然 范卓凡 (623)
减少沉管顶推轴线和里程偏差方法研究	赵国臻 (628)
港珠澳大桥岛隧工程沉管预制预应力施工技术	黄 涛 杨 红 游 川 (635)
大型节段式沉管预应力管道埋设施工技术	张天阳 朱 成 唐 艳 (643)
节段式沉管预应力孔道压浆施工技术	唐 旭 杨 毅 (648)
提高超长沉管预应力管道压浆密实度工艺措施	梁杰忠 陈刚强 李 翔 (653)
沉管预应力混凝土孔道压浆试验研究	陈刚强 黄海斌 (657)
大型 GINA 止水带安装工艺	刘远林 王晓东 徐轶凡 (665)
管节接头 OMEGA 止水带安装工艺	周建民 唐永波 魏 杰 (670)
大型沉管隧道端封门安装工艺及其优化	黄文慧 张文森 黄跃龙 (676)
超大型沉管预制构件质量管理	梁杰忠 陈刚强 (684)
超大型沉管预制厂设备管理要点	王晓东 赵国臻 (688)
高压柴油发电机组在港珠澳大桥施工中的应用及风险分析	刘 超 邓 敏 李 阳 (694)
进口混凝土振捣棒性能对比试验研究	李誉文 苏怀平 冯茂园 (700)
超大型沉管管节横移施工工艺	陈伟彬 刘荣岗 戴双全 (704)
运用“点一线一面一体”探究支撑体系及转换的应用	高纪兵 王晓东 (712)
海底隧道预制清水混凝土小型构件技术的运用及研究	杨永宏 (720)
小型复杂预制构件清水混凝土配合比试验研究	李 超 张宝兰 胡文刚 等 (726)

沉管安装



沉管隧道临时辅助安装设施探讨*

林 巍

(中交公路规划设计院有限公司, 北京)

摘 要: 沉管隧道施工涉及预制、浮运、沉放、水下对接等多道工序, 需要一系列临时辅助安装设施。本文基于国内外沉管隧道临时辅助安装设施的调研成果, 并结合港珠澳大桥项目沉管隧道设计与施工经验, 围绕沉管管节的施工需求及目标, 系统划分了沉管隧道临时辅助安装设施的类型, 分析比较了不同辅助安装设施的特性和注意事项。研究表明, 沉管隧道临时辅助安装设施方案的研究内容复杂, 涉及众多专业, 因此应基于施工实际需求, 将问题进行分解和分类并综合考虑设施的特点与能力, 权宜工程各方因素, 从而最终获得整体较优的项目方案。

关键词: 沉管隧道; 临时辅助安装设施; 舾装件; 沉管安装

0 引 言

沉管法^[1]被定义为在干坞内或大型驳船上先预制管节, 再浮运到指定位置下沉对接固定, 建成过江隧道或水下构筑物的施工方法。其结构形式包括钢壳结构和钢筋混凝土结构。在浮运路线长、航道水浅或缺乏干坞场地的情况下, 通常选择使用造价高昂的钢壳管节, 在驳船上预制部分结构、以较小的吃水深度运输至沉放现场再浇筑余下的混凝土来降低干舷高度, 准备后续的沉放作业——早期欧美修建的沉管隧道受到技术限制也多为钢壳结构^[2]。近些年修建的沉管隧道一般为钢筋混凝土结构。

与钻爆法、围堰明挖法等其他水下隧道建设工法比较, 沉管法的最显著特点是, 沉管隧道不但要预制, 而且要经由浮运、沉放、水下对接等多道工序进行安装。因此, 管节结构上设置必要的辅助设施显得尤为重要。

本文以施工需求为主线对辅助安装设施进行分类表述和讨论, 基于各部分的功能, 讨论和研究各部分辅助安装设置的特点与关系。沉管隧道管节的典型安装施工工序如图 1 所示。随着安装工序的逐步开展, 相继会对管节的防水、操控、压重、定位测量和线型控制这五方面提出要求。

* 本文曾刊登于《现代隧道技术》2015 年第 5 期。

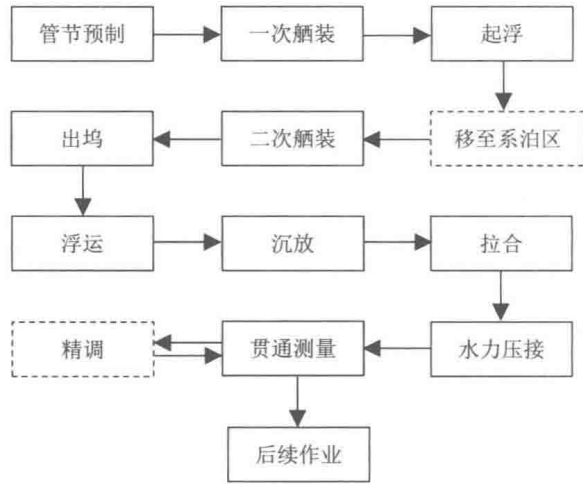


图1 沉管隧道管节典型安装施工工序

1 防 水

1.1 管节起浮至沉放期间的防水——端封门

从管节起浮直到安装完成，为了获得足够的浮力和保持管内的干燥，管节必须处于密封的状态。管节两端的临时封门起到了密封防水的作用。

港珠澳大桥沉管隧道端封门形式如图2所示，主要构件包括钢面板、H型钢、预埋牛腿等构件。浮运沉放期间钢面板和H型钢承受的水压力通过预埋牛腿传递给管节预埋件。由于港珠澳大桥沉管管节数量多，考虑重复使用端封门。即管节沉放后将拆除的端封门通过隧道内由洞口运出，并转运至沉管管节预制场，安装下一次舾装阶段的管节。

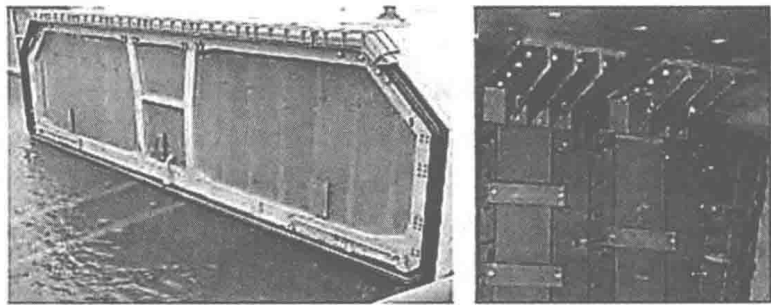


图2 港珠澳大桥沉管隧道端封门外侧（左）与内侧（右）

钢结构焊接端封门是沉管端封门的一种主要形式。我国第一条汽车、地铁车辆共用的沉管隧道——1993年通车的广州珠江隧道采用沉管法施工，将水下部分的管节在干坞内逐段预制并用钢板密封隧道管节的两端，然后打开干坞闸门进水使其自然浮起。国外

项目如 2013 年通车的博斯普鲁斯海峡沉管隧道也采用该形式。根据调研，一般的端封门在钢结构加工厂加工完毕后，运送至现场组装，由于体积大，有时需分块加工运输至现场后再焊接组装。为了降低焊接部位的漏水风险，采用真空气密检漏和彩色溶剂探伤等方式来确保焊接的质量。

其他型式的端封门如临时混凝土端封门，施工成本较低，但相比钢端封门管内的拆除作业时间较长，且在封闭的隧道内产生较多的废气，对管内施工通风的要求较高。

1.2 管节对接之后的防水——GINA 止水带

从管节起浮开始，直到管节浮运至沉放地点，与前一节管节对接之前，管节两端面的防水都由端封门承担。对接之后，新安管节的首端面与已安管节的尾端面的水密由端封门防水转换为 GINA 止水带（图 3）。

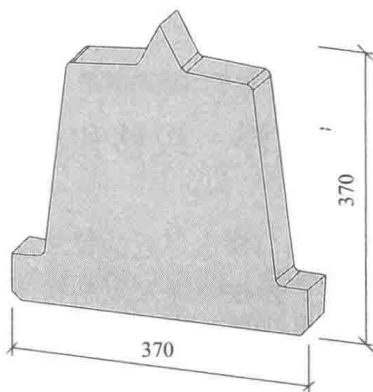


图 3 港珠澳大桥沉管隧道 GINA 止水带断面^[3]（单位：mm）

GINA 止水带通常分为鼻尖和本体两部分，如图 4 所示，其工作原理是：

1) 拉合千斤顶将新安管节拉至已安管节，直到新安管节端面的一圈 GINA 止水带的鼻尖压紧在已安管节的端钢壳的表面。两个管节端面围成一圈封闭的空间，下文简称为结合腔。

2) 保持 GINA 止水带鼻尖压缩，操作预设的阀门将结合腔的水排入管内，管内的空气进入结合腔，使气压平衡。GINA 止水带在尾端水压力的作用下进一步压缩，完成水力压接。

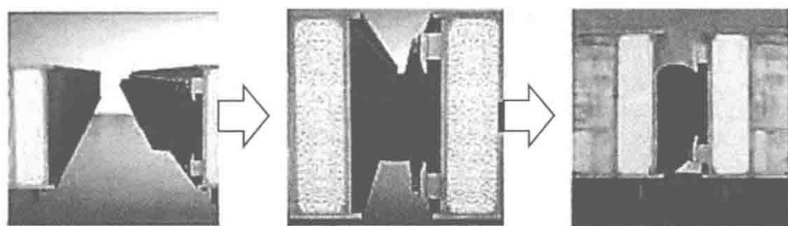


图 4 GINA 止水带拉合、鼻尖压缩和本体压缩示意

GINA 止水带在一次舾装期间直接吊装并通过螺栓或夹具固定在管节的端钢壳上。由于 GINA 止水带的橡胶材质损坏后难以修补,通常先完成封门安装管节端面的所有作业,最后再安装 GINA 止水带,以减小安装受损的风险。

各个接头 GINA 止水带压缩量必须保证低压力下的水密性并足以克服应力松弛、施工误差和位移容许误差^[4]。

当浮运的路线很长,偶然出现的漂浮物可能损坏 GINA 止水带时,还需在管节端部安装 GINA 止水带保护罩。保护罩可在一次舾装或二次舾装期间安装,在管节沉放之前拆除。

2 操 控

从管节起浮到沉放着床,管节的操控大体可分为坞内起浮、绞移和出坞、浮运、沉放对接、拉合这几个阶段。

2.1 起浮、绞移和出坞

坞内起浮时,为防止管节的晃动而撞击邻近的管节或建筑物,通常在管节顶面的两端对称设置 4 个系缆柱,通过连接、操控缆绳来限制管节起浮时的自由漂移。

当管节需要在坞内移动时,仍利用连接在系缆柱上的缆绳来操控管节。有时管节中部也需要系缆柱来进一步加强横向控制。港珠澳大桥管节坞内绞移方案如图 5 所示,靠右侧已起浮管节四个角部及中部的系缆柱由钢丝绳并接至周边岸上的卷扬机,通过在卷扬机控制室内对卷扬机进行操作,控制并限制管节的横向和纵向的平面移动来避免碰撞,并逐渐将管节绞移至目标位置。

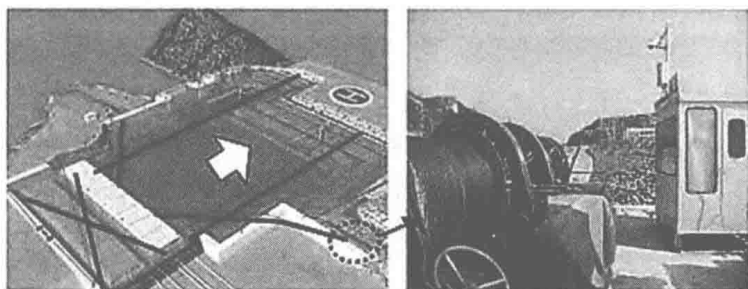


图 5 港珠澳大桥沉管隧道管节坞内绞移方案示意

2.2 浮 运

系缆柱在沉管管节浮运过程中作为拖轮拖带受力点,辅助进行浮运拖带的整个过程,

图 6 为港珠澳大桥沉管浮运期间主拖轮拖曳管节的系缆柱。系缆柱的承载力通常由拖运阶段控制，影响因素包括管节断面尺寸、水流阻力、波浪影响及拖轮的功率等。不同项目根据自身建设条件和水文环境的不同，系缆柱的能力选择也不一样。在缺少经验的地区有时需要进行物模试验模拟拖运工况，测试对系缆柱的拖曳力。

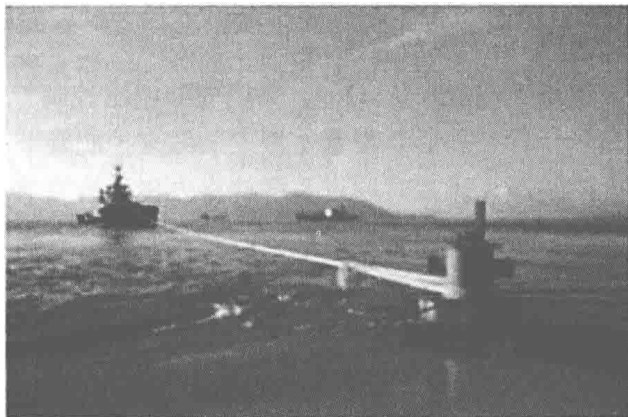


图 6 拖轮拖曳沉管管节的系缆柱

2.3 沉放对接

沉管管节的沉放安装是最关键的施工阶段，需要的管节舾装件种类与布置根据项目特点不同和配套的设施不同均有所差异，其主要有 2 类^[5]。

(1) 控制系统在测量塔上的安放方法

如图 7 所示，管节的平面操控通过塔顶的绞车连接管顶面的若干导向滑轮实现，导向滑轮与管节上的预埋件栓接；管节的吊力由事先吊放在管顶上的两个浮箱承担，浮箱与管节通过竖向吊缆连接，因而管节上需相应设置吊耳及预埋件。安放作业开始之前安装，用完后直接拆除或在水下潜水拆除并周转。

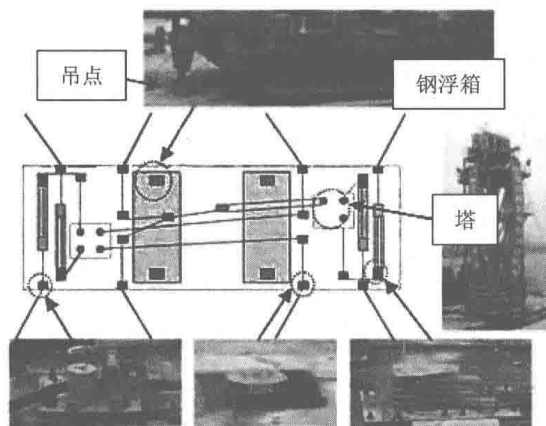


图 7 广州洲头咀隧道管节沉放施工

该方法除了管节的竖向移动需要通过浮箱上的绞车完成，其他所有的测量和平面控制都集中在塔顶，工艺相对成熟且经济，适用于水深较浅的一般沉管隧道。但是对于沉放水深大、水流急的沉管隧道项目，由于管节处于漂浮状态，当固定在管节顶面的测量塔的高度、重量和刚度超出了可接受的范围，将无法采用该方案。建设当地缺少足够大的吊车将钢塔和浮箱吊放至管节顶面时，该方案也无法实施。

(2) 控制系统在安装船上的安放方法

港珠澳大桥沉管隧道最大沉放水深 43 m，采用安装船法控制管节的姿态。顶面相关的舾装件布置如图 8 所示，管节前后各设置 2 根安装缆来控制管节的平移，安装缆一端连接锚，一端连接船上的绞车，操控时通过系缆柱将力传递给管节。吊缆连接管节的吊耳和安装船，使安装船将自身的浮力传递给管节。安装船自身也配置系泊索用于绞移，但不需增加管节的舾装件与预埋件。

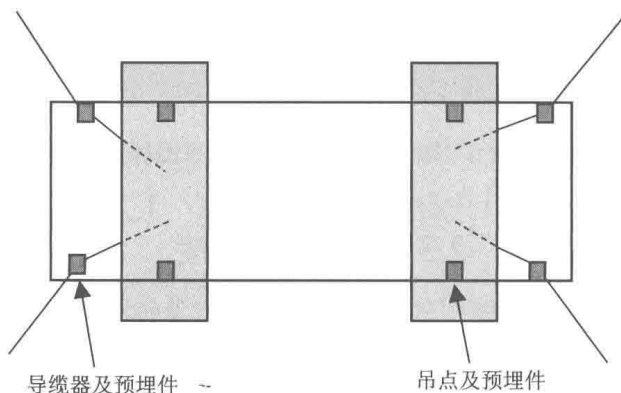


图 8 港珠澳大桥管节操控辅助舾装件平面布置示意
(安装船自身系泊索未表示)

管节沉放时，首先利用竖向吊缆与安装缆控制待安管节的空间姿态并逐渐接近已安管节，该阶段利用沉放定位测量系统确定管节的空间位置；再利用管顶临时安装设施的导向功能来实现进一步对接（图 9）。

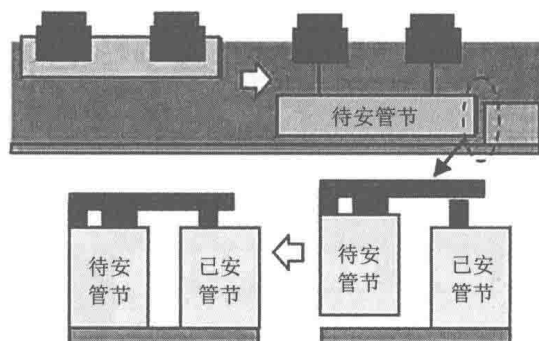


图 9 安装船法沉放工序示意

布置管顶的测量（控制）塔、导向滑轮、系缆柱等位置时，需注意管节操控的便利性和安全性，逐步审阅管节沉放操控过程，以便预先发现并排除作业时可能的缆绳与设