

500kV
SUBMARINE
POWER CABLE
PROJECT
CONSTRUCTION
& MANAGEMENT

500kV 海底电缆工程 建设与管理

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

500kV
SUBMARINE
POWER CABLE
PROJECT
CONSTRUCTION
& MANAGEMENT

500kV 海底电缆工程 建设与管理

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《500kV 海底电缆工程建设与管理》是我国第一部关于海底电缆工程建设的书籍,记载和传播工程建设实践经验,介绍工程实践创新成果,对发展海洋电力输送工程建设具有指导意义。

全书共分 11 章,内容由浅入深,既介绍了目前世界各国海底电缆工程发展概况,又系统地阐述了 500kV 海底电缆工程的施工、设计和管理,以及工程建设中的重要科技创新,还从技术攻关的角度,对超高压海底电缆工程建设的工程施工技术、海洋输电工程装备技术、超高压海底电缆制造技术等,提出了建设性意见。其中涉及 500kV 海底电缆工程关键技术研究、海底电缆工程规范化管理实践、海底电缆保护埋设(BPI)工程应用研究、海底电缆后续保护数值模拟研究、海底电缆工程建设综合风险分析等一批工程实践科技成果。这些通过工程建设实践检验,并转化为实际应用的科技成果,必然对今后的同类工程建设产生巨大影响。

本书可满足不同层次的技术人员需求,既有助于建设管理、施工、监理、调试、运行人员掌握海底电缆工程建设的特性,也可供关心海底电缆工程建设的相关人员查阅和参考。

图书在版编目(CIP)数据

500kV 海底电缆工程建设与管理/中国南方电网公司超高压输电公司组编. —北京:中国电力出版社,2015.9

ISBN 978-7-5123-8266-4

I. ①5… II. ①中… III. ①海底电缆-电缆敷设-工程施工
IV. ①TM757.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213697 号

审图号:GS(2015)2111 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 546 千字

定价 70.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

本书编委会

主 任 邓庆健
副主任 王裕霜 陈向东
委 员 张正祥 张胜慧 黄贤球 蚁泽沛 尚 涛
郑 伟 张海凤 肖 勇 郑望其 吴泽辉
陆 岩 蔡 上 肖 遥

编 写 组

主 编 王裕霜
副主编 陈向东
成 员 黄贤球 郑 伟 章耿勇 Michael Chang (挪威)
周 京 李廉益 王咏莉 张怿宁 韩 瑞
谢正都 刘 建 王小志 吴海凤 汪 洋
曹小拐 梅小卫 张 蔓 曾昭磊

序

近年来，随着国家基础设施投资规模的重点增长，我国输变电工程建设取得了举世瞩目的成就。一批规模宏大、技术先进、工艺复杂的输变电建设工程，成为推动电网建设和电力发展的重要动力，不仅促进了国民经济的发展，而且为电网技术创新、科技进步，以及超高压输变电设备实现国产化进程，提供了良好的机遇与平台。输变电工程建设技术创新是推动电力科技发展的基础，对技术创新的特点、现状和问题进行分析和总结，建立面向工程建设的技术创新、策划，实现跨行业科技创新课题研究，探讨输变电工程建设技术创新的机制，都具有特别重要的意义。

500kV 海底电缆工程，存在投资规模大、建设周期长、不确定因素多、经济风险和技术风险并存、国外施工管理模式融入等因素。同时，海底电缆工程具有公益性强、关注程度高、海洋工程施工技术复杂等特点。从目前公开发布的世界各国海底电缆工程建设文献来看，我国 500kV 海南联网海底电缆工程是在海床地质极其复杂状况下进行的工程地质建设条件最难、海底电缆敷设和保护工程项目种类最多、保护措施最完善的海底电缆输电工程建设项目。基于工程建设的这些特点，促使工程建设必须规范化管理，实现工程技术创新。本书在全面总结 500kV 海南联网海底电缆工程的基础上，依照国家、行业的相关工程建设管理法规、标准归纳并整理出 500kV 海底电缆建设的工程特点，为海底电缆工程规范化建设、技术创新积累经验，探索新的思路和方法，以实现工程建设管理的执行能力的不断提升。

记载和传播工程建设实践经验，介绍工程实践创新成果，努力促进工程科技成果转化成为生产力，正是本书的目的所在。

宫 宇

中国南方电网公司超高压输电公司

2015 年 7 月

前言

1890年,英国敷设了世界上第一条天然橡胶绝缘海底电力电缆,这项工程的建设标志着电力输送工程技术,开始挑战跨越海洋输送电力。1954年,世界上第一根直流电缆成功在瑞典本土与哥特兰岛(Gotland)之间敷设,其长度为100km,电压等级为 $\pm 100\text{kV}$ 。随着世界各国高压电力领域的海底电缆制造技术发展,1973年瑞典本土与哥特兰岛(Gotland)又成功敷设了145kV交联聚乙烯电缆。当时,高压电力领域的海底电缆技术还是项新科技,工程具有里程碑意义的突破是使用XLPE交联聚乙烯材料生产制造海底电缆。1977年,挪威的克里斯蒂安桑(Kristiansand)与丹麦的特杰勒岛(Tjele)连接,长度为127km,电压等级为交流300kV。这项工程的建设,使得海底电缆成功跨越斯卡格拉克海峡,实现了两个国家之间的超高压区域电网互联。

21世纪伊始,在海底电缆输电工程项目建设中,一项项纪录被不断刷新。2008年投入商业运行的挪威—荷兰海底电缆输电工程,创造了目前世界上跨海输电距离最长的纪录,跨越海域的海底电缆长度为580km。目前正在建设中的挪威—德国斯比特尔海底电缆输电工程、挪威—德国下萨克森海底电缆输电工程,将在2015年投入商业运行,其跨越海域海底电缆长度为600km。美国新泽西州塞威尔—长岛莱维顿海底电缆输电工程,创造了海底电缆敷设于水深2600m的纪录。2002年7月,美国纽约长岛—新英格兰海底电缆工程实现了本土区域电网非同步互联。该项目采用ABB公司海底电缆柔性直流输电技术,其海底电缆长度为 $2\times 42\text{km}$,设计输送容量330MW,直流电压 $\pm 150\text{kV}$ 。工程的商业化运行,使得在海底电缆柔性直流输电技术上具有了突破性的意义。2014年12月,挪威Statnett电网公司和丹麦Energinet.dk电网公司,新建海底电缆输电工程投入运行,工程采用 $\pm 500\text{kV}$ 超高压轻型直流(HVDC Light)输电,这项工程创造了海底电缆输电工程直流电压等级的新纪录。

无疑,这些目前世界之最佳的海底电缆输电工程,将载入世界海底电缆输电工程发展辉煌的史册。据不完全统计,迄今为止世界各国110kV及以上海底电缆输电工程,已建设100余条,跨越全球21个海峡。

海底电缆输电工程建设是实现电网国际化互联,区域电网互联进程中跨海域联网重要的组成部分。近年来,随着国内外输变电技术的发展,在经济一体化、能源优化配置、减少环境影响等因素的推动下,跨海域输电技术、海底电缆制造技术、海底电缆工程建设技术不断向前发展。我国是一个拥有300多万平方公里海域的海洋大国,沿海域约有18000km的海岸线。广阔的海域海底蕴藏着丰富的石油和石油天然气资源,有着众多可供开发的近海岛屿。我国将实施的海洋经济战略,以开发近海石油、建设海上风电项目等能源产业链,将进一步带动沿海经

济的发展。沿海经济的开发将促进我国长距离、超高压海底电缆的工程建设。

我国超高压海底电缆输电工程,目前尚属一个新的输电工程建设领域。国内在浙江舟山群岛、广东南澳岛、万山群岛等一些沿海地区,近大陆岛屿与大陆之间,陆续建设了10kV、35kV、110kV、220kV各电压等级的海底电缆工程。使得近海岛屿供电状况得到良好的改善,同时也为发展超高压海底电缆输电工程积累了经验。但是,目前我国超高压海底电缆工程建设的设备、施工、管理,还处于初级水平。超高压海底电缆输电工程建设涉及的技术领域十分广泛,以输变电专业扩展涉及的专业有:超高压海底电缆制造及技术标准;海底电缆导体选择与绝缘防护制造;海底电缆散热、机械性能与敷设;海底电缆涡流振动与介电强度;海洋勘察与路由选择、海洋生物与气象、海床地质与土壤学;海洋工程管理与施工装备;工程检测与调试仪器;海洋环境与安全;海底电缆工程标准与运行维护;海底电缆的故障与修复;海事活动与监视等。因此,海底电缆输电工程的建设,是一个多专业领域的集合。这就需要在工程建设实践中,认真总结经验及教训,加快各领域的课题研究,提高国内电力工程技术、设备制造人员,对海底电缆工程建设的了解,使我国海底电缆输电工程建设提高到一个新的水平。

500kV海南联网海底电缆输电工程,是我国第一个500kV超高压、大容量的跨海区域联网工程,输送容量600MW。工程为世界上电压等级最高、单根电缆最长、输电容量居世界第二的交流海底电缆工程项目,也是迄今我国电压等级最高、输送距离最远、输电容量最大、建设难度最大的跨海域电网互联海底电缆输电工程。本书的参编人员,作为500kV海南联网海底电缆工程的建设者,将工程建设的技术创新和管理过程,以及建设中解决问题的一些具体措施,总结汇集,形成《500kV海底电缆工程建设与管理》的初稿。

在汇集工程建设资料过程中,得到了Nexsans公司(挪威)、Tidway公司(荷兰)、武汉大学、海军工程大学、中国海洋大学、中南电力设计院等,大力的支持和帮助。没有各参建单位和科研院校的支持和帮助,《500kV海底电缆工程建设与管理》一书就不可能形成。

由于水平有限,本书的全体参编人员真诚希望读者批判吸取,希望书中内容对后续海底电缆工程建设、海底电缆制造、海洋工程装备的进步有所启迪。

编 者
2015年7月

目 录

序

前言

第一章 海底电缆工程综述	1
第一节 世界海底电缆工程概况	2
第二节 典型海底电缆工程简介	10
第三节 500kV 海底电缆工程建设概况	21
第二章 工程技术规范	25
第一节 海底电缆工程设计标准	26
第二节 海底电缆终端站技术要求	28
第三节 海底电缆制造技术参数	29
第四节 图纸及说明书要求	33
第五节 海底电缆试验要求	39
第六节 直流运行技术要求	43
第三章 工程路由勘察	47
第一节 海缆路由方案选择原则	48
第二节 路由区海洋功能区划及其他海事活动	54
第三节 海底电缆登陆点及环境	57
第四节 海底电缆工程地质勘察作业	58
第四章 工程建设本体设计	61
第一节 海底电缆截面与型式	62
第二节 海底电缆结构及特性	67
第三节 电缆载流量	73
第四节 电缆接地	76
第五节 电缆附件选择与配置	77
第六节 海底电缆的试验	79
第七节 海底光缆	82
第八节 海底电缆的施工和保护	94
第五章 工程管理	107
第一节 工程建设集成控制管理	108
第二节 工程建设控制管理	111
第三节 海底电缆工程管理进程	121
第四节 工程建设规范化管理	131
第五节 海底电缆抛石保护工程管理实践范例	138

第六章 工程建设监理	143
第一节 工程建设监理	145
第二节 海底电缆后续保护工程监理实施细则	172
第三节 海底电缆工程建设监理实践案例	197
第七章 海底电缆工程建设施工	207
第一节 施工的特点及难点	208
第二节 施工管理组织体系	220
第三节 施工安全文明管理	224
第四节 施工质量管理	233
第八章 海底电缆工程系统调试	237
第一节 海底电缆工程调试	238
第二节 工程调试及强制性条文的实施	242
第三节 海南联网工程调试验收及投运	246
第九章 工程建设综合风险分析	253
第一节 基于风险的海底电缆安全状况评估	254
第二节 海底电缆运行风险综合分析	260
第三节 海底电缆后续保护施工风险分析	266
第十章 工程技术创新	273
第一节 拖网承板与锚具穿入海床深度 (DNV)	274
第二节 海底电缆埋设深度的研究	276
第三节 海底电缆后续抛石保护数值模拟研究	288
第四节 海底电缆工程抛石稳定性研究	298
第五节 海底电缆埋设保护 <i>BPI</i> 指数应用研究	327
第十一章 工程验收与评价	333
第一节 海底电缆工程竣工验收办法	334
第二节 海南联网工程竣工验收与评价	346
附录 A 世界海底电缆输电工程	353
附录 B 典型海底电缆输电工程概况	361
附录 C 海底电缆技术参数	371
参考文献	378

A black and white photograph of an underwater scene. Sunlight rays penetrate the water from the surface, creating a dramatic effect. In the foreground, there is a coral reef with various types of coral and sea anemones. The background is dark and hazy, suggesting a deep underwater environment.

第一章

海底电缆工程综述

电网互联是实现能源优化配置,提高电网运营经济安全和供电可靠性的必然结果。海底电缆工程建设是实现跨海域电网互联的重要措施。

我国是海洋大国,沿海大陆架海底蕴藏着丰富的海底油田和石油天然气,具有经济开发价值的岛屿有 5000 多个,将海岛电网与大陆电网连接,无疑是走向海洋经济的基础。海岛间以及与大陆电网连接的建设,不可避免地涉及海洋电力输送工程技术、海底电缆工程技术、海洋工程装备技术、海底电缆制造技术的水平。

世界各国公认海底电缆工程是最复杂、最艰难的大型工程。从海洋工程地质勘查、环境探测、海洋物理调查的设计,以及制造、安装,都涉及复杂的海洋工程技术。几十年来,我国电网建设在海底电缆工程与海岛电网联网建设中,近距离小型规模供电已取得一些可喜的发展。近大陆的一些海岛初步实现与大陆电网的互联。随着远距离的海上风电开发建设、海洋石油开发、对远离大陆的主权海岛的建设,超长距离、超高压、大容量输电的海底电缆工程建设将更趋重要。2009 年,南方电网主网与海南电网联网工程投入运行,这项工程的建设是我国目前建设的最长距离、最高电压等级的海底电缆输电工程,标志着海南电网与南方电网的互联,同时结束了海南电网大机小网的孤网历史,其建设意义重大。

目前,我国在超高压海底电缆制造、敷设、海缆保护等领域技术尚未成熟。因此,我国的超高压长距离海底电缆工程建设,以及超高压海底电缆制造,仍然需要依靠国外承包工程建设。

第一节 世界海底电缆工程概况

一、世界海底电缆工程综述

世界各地海底电缆地理位置及相关说明见附录 A。

(一) 欧洲电网

欧洲电网主要由欧洲大陆电网及欧洲输电联盟(UCTE)、北欧电网及北欧输电协会(NORDEL)组成。欧洲电网所覆盖的国家国土面积普遍较小,工业高度发达,用电负荷密度大,电网结构密集。因而,欧洲各国电网迫切需要实施电能结构的优化配置,以实现电源结构的互补和电量交换。截至 2012 年底,欧洲地区是世界上,海底电缆工程建设项目发展最多、建设规模最大的区域,海缆总长度约为 10183km,设计交换容量约为

22 116MW。

（二）北欧地区

北欧电网发电量结构组成不均衡，例如：挪威总装机容量中，水电占 95.73%，而丹麦则是以火电为主。北欧各国电网通过海底电缆工程联网，基本实现了能源优化配置、降低发电成本、减少备用容量目的，获得了联网运行的经济效益。20 世纪 90 年代以来，北欧电网互联的海底电缆工程项目主要有：挪威—丹麦、丹麦—瑞典、丹麦—德国、芬兰—瑞典 1、2 期，瑞典—波兰、挪威—荷兰等。工程均采用直流 $\pm 400 \sim \pm 500$ kV 联网，海缆总长度约 2140km，设计容量 5670MW。海底电缆跨越的海域有：波罗的海、斯卡克拉克海峡、卡特加特海峡、波的尼亚湾和北海。2008 年 9 月，挪威—荷兰直流 ± 450 kV 海底电缆工程投入商业运行，该工程海底电缆跨越北海长度 580km，海底电缆路由最大水深 410m。

（三）波罗的海沿岸地区

波罗的海沿岸地区电网，由北欧输电协会成员国组成。发电量构成：水电 54%、核电 21.8%、火电 21.7%、风电 7.4%。各国已实现通过海底电缆输电进行电量交换。海底电缆输电工程项目主要有：瑞典—德国、芬兰—爱沙尼亚 1、2 期、丹麦本土—西兰岛、瑞典—立陶宛。工程均采用直流 $\pm 300 \sim \pm 450$ kV 联网，海底电缆总长度约为 958km，设计容量 2900MW。海底电缆跨越波罗的海、芬兰湾、大贝尔特海峡。正在建设中的瑞典—立陶宛海底电缆输电工程，设计输送容量 700MW，采用直流电压 ± 500 kV 联网，海底电缆跨越波罗的海长度为 400km，工程将于 2015 年投入商业运行。

（四）欧洲大陆地区

欧洲大陆电网及欧洲输电联盟，包括 24 个国家和地区的 29 个电网运营商，供电人口约 5 亿。各成员国交换电量约 3041 亿 kWh。欧洲大陆电网的海底电缆输电工程，主要由 VCTE 成员国之间跨海联网，并跨越北海与北欧电网互联。其中主要海底电缆工程项目有：英国—法国（通过 8 回直流 ± 270 kV 互联）、英国—荷兰、爱尔兰—英国、挪威—德国等联网工程。海底电缆跨越英吉利海峡、北海、爱尔兰海。挪威至德国下萨克森的海底电缆输电工程，已完成可行性研究和设计，进入工程实质性的海底电缆制造阶段，工程将于 2015 年投入运行。挪威至德国斯比尔特的海底电缆输电工程，采用高压直流输电（HVDC）联网，计划将于 2016~2018 年投入运行。这两项工程设计容量均为 1400MW。海底电缆均跨越北海 600km，海底电缆路由最大水深 410m。

（五）地中海沿岸地区

欧洲大陆地中海沿岸地区，海底电缆输电工程建设项目有：意大利—法国、意大利—希腊、意大利本土—撒丁岛、西班牙本土—马略卡岛的电网互联。工程均采用直流

±250~±500kV 联网,设计输送容量 2100MW,海底电缆跨越伊特鲁利亚海、亚得里亚海、巴利阿里海峡。意大利本土—撒丁岛海底电缆工程为 2 回直流电压±500kV,采用背靠背型式互联,输送容量 1000MW,海底电缆跨越伊特鲁利亚海长度为 420km,海底电缆路由最大水深 1600m。

(六) 欧洲与北非地区

欧洲与北非地区,海底电缆工程建设项目有:西班牙—摩洛哥 1、2 期,埃及—约旦 1 期,西班牙—阿尔及利亚,意大利—阿尔及利亚,意大利—突尼斯电网互联。其中,西班牙—阿尔及利亚联网工程,采用直流电压±400kV 联网,其他工程均采用交流电压 400~500kV 联网。海底电缆跨越直布罗陀海峡、红海阿尔斯湾、地中海。2011 年投入运行的意大利—突尼斯联网工程,采用交流电压 500kV,设计输送容量 600MW。海底电缆跨越地中海长度为 200km,海底电缆路由最大水深 670m。

(七) 海湾阿拉伯地区

海湾阿拉伯地区的电网互联,以海湾合作委员会(GCC)成员国组成。海湾合作委员会互联电网管理局(GCCIA),由 7 个国家电网互联。海底电缆工程建设项目有:正在建设的沙特阿拉伯—埃及海底电缆输电工程 1 期。该工程将于 2012 年投入运行,2 期工程已进入实质性的海缆制造阶段,预计 2015 年投入运行。工程均采用直流电压±400~±500kV 联网。设计容量 1500MW。海缆跨越红海曼德海峡,海底电缆路由最大水深 230m。

(八) 亚洲地区

亚洲地区电网,未形成各国之间以海底电缆输电工程互联。但各国本土向岛屿供电、本土电网区域互联、陆地向石油钻探平台供电等海底电缆输电工程发展趋势较快。海底电缆工程建设项目有:日本本土北海道—本州,韩国本土南海郡—济州岛、菲律宾本土华特岛—吕宋岛、日本本土—四国、中国本土广东—海南、中国台湾陆地—澎湖列岛。亚洲地区各国海底电缆工程设计输送容量为 4640MW。海缆跨越津轻海峡、济州海峡、圣贝纳迪诺海峡、纪伊海峡、琼州海峡、台湾海峡。日本本土—四国联网工程,以 4 回直流电压±500kV 背靠背方式联网,设计输送容量 2800MW。中国本土广东—海南联网工程采用交流 500kV 联网,设计输送容量 600MW,均属亚洲海底电缆输电工程首创项目。

(九) 北美地区

北美联合电网,由美国东部、西部电网和德克萨斯电网、加拿大魁北克电网组成。北美联合电网与墨西哥电网互联。美国本土东部、西部电网通过直流背靠背联网运行。美国东部电网与加拿大魁北克电网互联。北美联合电网各区域,跨海域联网工程均为国家本土区域电网的互联。其中,加拿大本土与温哥华岛,以 2 回交流电压 525kV 联网。美国本土

纽黑文—长岛、美国本土塞尔维尔—莱维顿（美国海王星工程）、美国本土弗朗西斯科至匹兹堡。正在建设中的加拿大温哥华维多利亚岛至美国安吉利斯、加拿大蒙特利尔至美国纽约岛，均采用电压 $\pm 230 \sim \pm 550 \text{ kV}$ 联网。北美联合电网海底电缆输电工程共有 14 个，分别跨越佐治亚海峡、马拉斯皮纳海峡、长岛海峡、大西洋、胡安·德富卡海峡、张伯伦湖与哈德孙河。设计输送容量 5762MW。海缆长度 1718km。其中美国海王星工程采用直流电压 $\pm 500 \text{ kV}$ 联网，海缆路由最大水深 2600m。

（十）澳洲地区

澳洲地区海底电缆输电工程，均为国家本土区域电网互联。其中，新西兰本土南岛与北岛电网互联工程、澳大利亚本土与塔斯马尼亚岛联网工程，均采用直流电压 $\pm 250 \text{ kV} \sim \pm 400 \text{ kV}$ 联网，设计输送容量 1700MW。海底电缆跨越库克海峡、巴斯海峡。新西兰本土北岛黑瓦兹与南岛班摩尔联网工程，采用直流输电技术联网，输送容量 500MW。

二、海底电缆工程建设特性

（一）海底电缆工程建设的环境特性

海底电缆工程建设，要面对海洋环境的复杂多变。如工程要承受台风（飓风）、波浪、潮汐、海流、冰凌等的强烈作用，在浅海水域还要承受复杂地形以及岸滩演变、泥沙运动的影响。温度、地震、辐射、电磁、腐蚀、生物，以及附着生物等海洋环境因素，可能对海底电缆工程建设产生颠覆性影响。因此，工程建设者进行海底电缆敷设和保护外力分析时，要考虑各种动力因素的随机特性及变化规律。在海底电缆保护计算中考虑动态问题；在基础设计中考虑周期性的荷载作用和土壤的不定性；在海底电缆制造材料选择上考虑经济耐用等都是十分必要的。同时对工程建设安全程度的严格论证和检验是必不可少的。

（二）海底电缆工程建设水文影响

海底电缆工程建设有关的水文影响，包括海水运动（波浪、潮汐、海流、海啸、风暴潮等）、海水物理性质（温度、盐度、密度等）以及其他水文现象（泥沙运动、冰凌等）。它们的变化规律和计算模型方法等，都是工程建设的影响因素，为规划与设计工程本体、研究工程运行后条件的影响提供基础数据。

海底电缆工程水文研究的范围，目前主要在海岸带和近海。浅海区域的海洋水文条件十分复杂，工程建设困难很大。其中海底电缆浅滩保护、防浪掩护、泥沙淤积等，成为建设中需要解决的技术问题。例如，潮汐引起的海面周期性升降幅度一般为几米，最大达十几米；风暴引起的海浪最高可达 5~6m；海啸引起的异常增水值可达 10m 以上，甚至几十米。在确定海底电缆终端站设计高程时必须予以考虑。通过现场观测和理论分析，研究潮汐、风暴潮、海啸的变化规律，可获取平均海平面与深度基准面的最高潮位、平均大潮高潮位、平均大潮低潮位、最低潮位等各种特征潮位，风暴增减水值以及海啸的壅水高度

和周期等积累资料。这些资料将对海底电缆工程建设产生影响,也是工程设计的基本参数。

目前,我国对潮汐理论和计算方法的研究已较完善,能根据一年的潮汐观测记录,用调和分析法确定工程设计所需的潮汐要素。但是关于风暴潮,特别是海啸的理论研究,目前还不成熟,风暴增减水值和海啸要素值需根据长期实测资料,用经验统计方法来确定。

(三) 海底电缆工程施工的海浪影响

波浪环境影响是海底电缆工程建设突出的动力因素,造成海底电缆工程施工很大荷载影响。因此,施工期必须首先确定波浪要素及其尺度。通过波浪理论研究建立波要素(波高、波长、波速、波周期)和水深之间的内在联系,揭示波浪质点运动、压力变化、能量传递等基本规律。通过风浪资料的统计分析,建立波要素与风要素(风速、风时、风区)之间的关系,揭示风浪的统计特征,研究风浪的推算方法。研究波浪传入近岸浅水区内的变化,波浪折射、破碎、绕射、反射的机制,探求波浪变形后波要素变化的计算方法。在进行科学研究和海底电缆工程设计时,采用某种特征波要素,如有效波高、平均波周期或其他特征波要素作为依据。

(四) 海底电缆制造的技术水平

2012年,中国电缆制造规模超过美国成为全球第一电缆制造大国,海底光缆的制造能力居世界第一。通常,同时具备海底光缆和电力电缆生产能力的制造企业通过技术改造和整合,制造海底电力电缆是不困难的。但是,对于高电压等级,如220kV、500kV,单根长度较长(如数十千米长度)的海底电力电缆制造,受到工厂接头制造技术以及真空干燥、浸油等设备规模限制,至使我国高电压、超长距离的海底电缆的制造能力和我国走向海洋的经济战略发展需求存在较大差距。由于海底电缆制造设备投入大、风险高、资金回收周期较长,加之海底电缆生产上游绝缘材料仍依赖进口,产业政策缺乏扶持和导向等因素,国内电缆制造企业对超高电压、长距离海底电缆生产能力未见突破。相当一部分高端产品,如500kV超高压电力电缆、超高压大长度海底交流(AC)、直流(DC)电力电缆从设备的安全可靠方面考量,仍然依赖进口。

1. 国内外海底电缆生产现状

海底电缆的绝缘种类主要分为浸渍纸包绝缘电缆、充油式电缆、挤压式电缆(XLPE——交联聚乙烯绝缘与EPR——乙丙橡胶绝缘)。海底电缆绝缘种类式样,如图1-1所示。浸渍纸包绝缘电缆受水深与敷设落差及使用电压等级限制,仅仅用于10kV等级的电能输送,较高电压等级的海底电缆基本采用自溶式充油电缆,如浙江的舟山群岛间的电力联网,广东的南澳35kV、110kV、220kV等交流电力联网工程,珠海的许多110kV等级的都采用国产的充油电缆。20世纪80年代广州珠江口敷设的220kV海底电缆也是采用自溶式充油电缆这种形式。XLPE绝缘的海底电缆近年来也有一些跨海域联网工程中被采用。

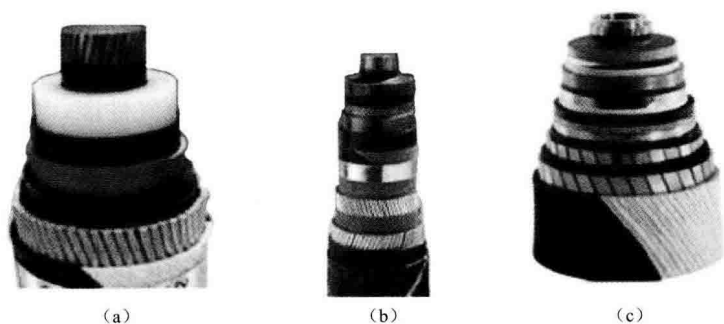


图 1-1 三种绝缘材料的海底电缆式样

(a) XLPE 绝缘海底电缆；(b) 浸渍纸包绝缘海底电缆；(c) 充油式海底电缆

海底电缆按电能输送方式可分为：交流输送与直流输送，国外一些大型的电缆企业，如意大利普瑞斯曼、日本藤仓电缆、日本古河株式会社、日本住友电工、法国耐克森、韩国 LS、美国通用电缆等，都具有连续生产超高压、大截面 DC 海底电缆的能力，并拥有海底电缆软接头技术，同时可提供安装敷设一体化的成套解决工程方案。我国的海底电缆目前处于起步阶段，国内具有超高压海底电缆生产能力的企业有：（新）远东电缆有限公司、中天科技电缆集团、宁波东方电缆有限公司、青岛汉缆有限公司、沈阳古河电缆厂（日本古河实际控制）、上海藤仓电缆厂（日本藤仓控股）、宝胜普瑞斯曼超高压电缆有限公司（宝胜控股）等企业。

2. 关于海底电缆输送形式的选择

关于海底电缆输送，采用交流与直流的选择，普遍认为采用直流损耗小，可传输更多的电力。AC、DC 海底电缆与敷设距离的关系，具体研究国内未见报道。意大利电缆公司普瑞斯曼于 2011 年 10 月，在纽约召开的北欧化工能源基础设施研讨会上，给出了 AC、DC 海底电缆与敷设距离的关系，如图 1-2 所示。

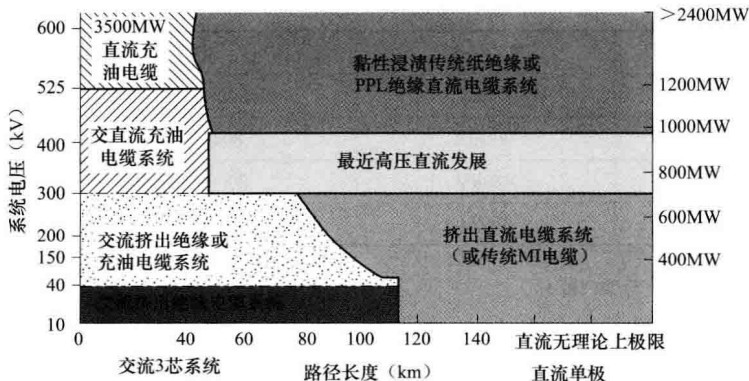


图 1-2 AC、DC 海底电缆与敷设长度之间的关系

当海底电缆敷设长度超过 120km 时，普瑞斯曼的选择是采用 DC 电缆，而当海底电缆敷设长度不足 110km 时，普瑞斯曼认为采用 AC 电缆则是较好的选择。

DC 与 AC 电缆最本质的差别是绝缘材料性能（机械与电气性能，如抑制空间电荷积

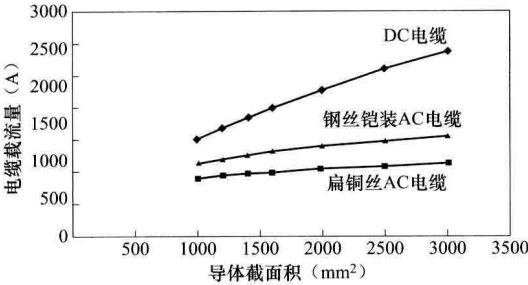


图 1-3 XLPE 绝缘 500kV 海底电缆载流量比较

聚等)，相对于 AC 电缆来说，DC 电缆的制造长度更长，具有脱气时间更长的性能。XLPE 绝缘电缆洁净度要求更高，具有更好的焦烧性能，可连续生产制造更长的时间。以 XLPE 绝缘 500kV 海底电缆为例，AC 与 DC 电缆载流量比较，如图 1-3 所示。

如图 1-3 所示，横坐标是导体的标称截面积，纵坐标是导体载流量。象限

内三条线自上而下，分别是 DC 电缆、钢丝铠装 AC 电缆、扁铜丝 AC 电缆，由图可见，500kV 电缆的截面超过 1000mm² 时，DC 电缆在载流量上的优势很明显。

目前国际上所有的电缆制造商所生产的高压、超高压 XLPE 绝缘海底电缆的电缆料（包括导体屏蔽、绝缘屏蔽、绝缘料）几乎均来自北欧化工和陶氏化学两家公司。

3. 单芯与三芯光纤复合海底电缆简介

目前，单芯与三芯光纤复合海底电缆，应用最广的是 800mm² 及以下采用圆形紧压绞合铜导体，1000mm² 及以上采用分割导体结构（5 分割或 6 分割）XLPE 屏蔽、绝缘等，光纤分布一般放置于填充层或钢丝铠装中。

目前海底电缆制造业公认，单芯与三芯海底电缆优先采用钢丝铠装，原因有多种，比如海底电缆敷设时会施加较强的机械作用力，需要很好的抗拉性能等。至于同一工程中单芯与三芯电缆选择问题，国内电缆企业结合导体、金属屏蔽、铠装等损耗，做了比较分析，详见表 1-1。

表 1-1 220kV 单芯与三芯海缆对比分析

型号	单 位	三 相	单 相
参数	220kV	3×800mm ²	1×800mm ²
每相导体损耗	W/mA	804	866
每相载流量	220kV	20.5	23.1
每相护套和铠装损耗	W/m	14.1	7.3

4. 海底电缆的生产与敷设

海底电缆的生产需选取性能极好的绝缘材料，还需相关设备与便捷的运输渠道，如图 1-4 所示。生产海缆的设备有：双头或多头在线退火大拉机、120 盘（或更多）630 钢丝铠装机、150 压铅机、3×4500 或 3×10000 及以上立式成缆机、200kV 或 500kV 悬链或立塔交联机；一般生产海底电缆必须靠近江河航道，以便运输方便。其所需运输设备