



国际电气工程先进技术译丛

海底电力电缆 —— 设计、安装、 修复和环境影响

**Submarine Power Cables:
Design, Installation, Repair,
Environmental Aspects**

(德) Thomas Worzyk 著

应启良 徐晓峰 孙建生 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



海底电力电缆

——设计、安装、修复和环境影响

(德) Thomas Worzyk 著
应启良 徐晓峰 孙建生 译



机械工业出版社

本书为海底电力电缆的技术专著。书中系统地叙述了海底电力电缆的主要应用领域、品种及主要结构和组成元件；海底电力电缆的热性能设计、机械性能设计和电气性能设计方法，并介绍相关的国际电工委员会标准和国际大电网会议推荐规范；海底电力电缆的制造设备和工艺；海底电力电缆附件的主要结构、材料和制作工艺；海底电力电缆的各种试验；海底电力电缆的路由选择和海洋勘测、海底地貌探测；海底电力电缆的敷设安装和保护，并介绍世界最先进的非常专业化和高技术的电缆敷设船舶；海底电力电缆运行时发生损伤的原因和组织修复电缆的作业方法；海底电缆提高运行可靠性的主要措施及避免海底电缆受到极端环境条件的运行伤害的要求；海底电缆故障探测定位方法；海底电缆的环境影响以及其再生利用等。

本书主要供从事海底电力电缆及其附件研究开发和制造以及海底电力电缆路由勘测、线路设计、敷设安装、运行维护的专业人员阅读，以及海底电缆运行相关行政管理部门人员参阅。

Translation from the English language edition: "Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects" by Thomas Worzyk © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字 01-2010-4645 号

图书在版编目 (CIP) 数据

海底电力电缆：设计、安装、修复和环境影响/（德）沃泽克（Worzyk, T.）著；应启良，徐晓峰，孙建生译. —北京：机械工业出版社，2011.5

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects
ISBN 978-7-111-33950-2

I. ①海… II. ①沃…②应…③徐…④孙… III. ①海底—电力电缆 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 055069 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：付承桂

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：马精明 责任印制：杨 曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 2 插页 · 307 千字

000 1-3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-33950-2

定价：68.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

海底电力电缆技术被世界各国公认为是一项困难复杂的大型技术工程，无论是电缆的设计、制造、施工，均远远高于其他电缆产品。随着我国经济发展和新能源政策的推进，海底电力电缆市场得到了快速发展。我国海域辽阔，海岸线长，沿海岛屿的供电问题，需要采用海底电力电缆与大陆主电网相连，以及岛屿间连网。我国海南岛电网原为孤立的岛屿电网，于2009年建成线路长达31km的500kV海底电力电缆输电工程后，与我国南方电网主网相连，很大程度地提高了海南电网的运行可靠性，为海南岛屿经济发展提供了有力的电力保障。我国舟山群岛的岛屿间以及与浙江电网连网均需采用海底电力电缆。我国近海大陆架海底油田和天然气的开采，还有已经起步的海上风电场建设，也需使用相当数量的各种品种的海底电力电缆。我国在海底电力电缆的制造、敷设安装、运行维护方面已经达到一定规模，具有一定能力，但与世界先进水平相比尚有相当差距。在海底电力电缆技术上，国外比国内成熟。

世界海底电力电缆使用已超过100年。虽然海底电力电缆技术文献十分丰富，但多年来并无比较全面、实用的技术书籍。

《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》一书是迄今比较完整地阐述海底电力电缆相关技术的专著。当《电线电缆报》马汝亮主编热心告知机械工业出版社有意引进该书并准备组织翻译时，在机械工业出版社同意下，我们决定结合工作实践翻译此书。本书的翻译得到上海电缆研究所的热忱支持，在参与翻译的同仁们倾力合作、认真工作下得以完成。本译稿尚有夏俊峰、李春刚和李闯诸位工程师参与部分章节的翻译和电子版整理成稿等工作。第11章11.14节的诗作“深海电缆”，特请王晓旭女士翻译。一并致以衷心的感谢。

译 者

前言

海底电力电缆一直是海底通信电缆的近亲。通信电缆环绕地球，穿越大洋，形成巨大的网络，自 1850 年第一根跨英吉利海峡电缆敷设以来，它就吸引了公众的注意。尽管首次跨越大西洋通信电缆工程中的英雄们已在众多书籍中得到赞颂，但在小范围的专业领域之外，海底电力电缆技术的业绩很少被人重视。

然而，海底电力电缆有其自身的特性和特点。电缆设计技术在过去几十年中已不断发展。制造与安装技术的进步，实现了 20 年前认为是不可能的工程项目。在系统长度、水深、传输容量或海底电力电缆运行的收益等方面，新的业绩纪录每隔几年就被刷新。由于上述进展，使更多的海底电力电缆工程在经济上可行，甚至可能。当已知的应用项目已在大规模地进行，新的海底电力电缆应用也不断出现。

海底电力电缆引起了众多业界的关注。10 年前，只有电力公司的工程师和海缆敷设船员对海底电力电缆感兴趣。或许一些渔民在渔具被缠住的时候会发出恶语。现今，在新应用的激发下，海底电力电缆引起大集团的关注。石油和天然气公司的工程师对其感兴趣已有一段时间。日益增多的近海活动，以及更多的从岸上向海上作业平台供电的需求，促使他们进入这一领域。特别是近海风电的快速发展，使海底电力电缆得到除电力公司之外新的部门的关注。由于海缆成本占到项目成本的 40%，且海缆的安装对项目工期具有实质影响，因而投资者和项目开发商需要这方面的知识，以分析近海风电场的技术和经济的可行性。能源交易中的巨大商业机会触动了输电系统运营商和能源交易商的好奇心，他们希望了解海底输电线路带来的机会和局限。随着批准的海缆应用项目不断涌现，监管机构和行政当局也愈来愈多地介入海底电力电缆项目。环境团体和机构现在也必须处理海底电力电缆问题，因为它们有时安装在敏感的区域。令人满意的是，来自各个层次的越来越多的学生也关注起海底输电，因为他们在学习可再生能源的可能性。甚至连法律工作者也对这些电缆产生了职业兴趣。

当我收到新听众的许多问题的时候，产生了写这本书的想法。这也表明了存在全面介绍这一技术领域的需求。对于那些想深入了解这一问题的人们，也并不能容易地找到相关信息。许多有关设计和安装的必需信息十分稀缺。多数有关电缆的教科书主要介绍陆上电缆，仅留出很少的篇幅讨论海底电力电缆，有时将其放入杂项的章节中。其他电缆教科书则内容完全陈旧，忽略了制造和安装的最新技术水平。

在成书的过程中，我必须面对一些困难。通过对已公开报告和同行间讨论的评估，可以明确的是，分享经验的意愿锐减。直到 20 世纪 90 年代，期刊论文中有关

海底电力电缆运行的信息还十分开放，但有关近期工程的报告仅描述为“总结了经验教训”。每当出现投资者关系、季度报告和保险相关事件的时候，很少有电缆运营商愿意公开有关技术分析、存在问题和处理的报告。然而，投资者、电网运营商、制造商和安装施工方等全体将会从真诚的对话中受益。

本书旨在传递有关海底电力电缆的设计、制造和安装的基本知识。1903年，电缆工程师 C. Baur 博士在其电缆著作的序言中写到，“与电力电缆相关的知识量如此巨大，没有哪一个人能全面理解它”。这对海底电力电缆来说甚至更为确切。我必须谦恭地承认，得益于众多同仁的帮助，我只能掌握和汇编该领域中的一部分知识。对于那些希望进一步深入了解的读者，所列的参考文献或许有所帮助。

我要感谢那些在本书编写过程中提供帮助的人。在本书的显著位置处我要借此机会，特别感谢我的妻子的极大耐心和儿子们的有益见解。

致 谢

我要感谢编写过程中提供帮助的众多朋友和公司。值此我要深深地谢谢他们。

尽管本书的编纂基于我个人的努力，但我的雇主瑞典 ABB 公司提供了文献准许和复印。我的同事们与我分享了大量宝贵的知识和经验，为本书做出了贡献。Peter Sunnegardh、Anders Gustafsson 和 Johan Karlstrand 为本书提出了宝贵的意见。其他电缆制造商向我提供了深层的信息。我要感谢意大利 Prysmian 公司、德国 Norddeutsche Seekabelwerke NSW 公司和丹麦 NKT 电缆公司的慷慨帮助。

挪威 Statnett 电力公司、美国长岛电力局和瑞典 Baltic 电缆工程部门贡献了电缆运行经验等信息。感谢 HT Suen、John Savio 和 Jan Brewitz 的通力合作。本书的完成离不开某些个人的参与，他们提供了插图、知识、轶事、良好建议等。感谢 Lars Aksel Solberg 和 Janne Strand 提供的好故事；Bill Burns 提供的背景信息；Walter Paul 和 Jaeyoung (Jay) Lee 提供的趣事。

Lydia Stark 和 Stephen Wigginton 帮助我改进了书写语言。感谢德国 Keryx Translations 公司 Jochen U. Frankl 完成了挑战性的任务，将我的原文转换为易读的英文。

其他众多公司提供了急需的图片。来自全球的商业和非商业海洋组织在改进本书过程中起到了决定性作用。相关组织如下：芬兰 ABB 公司；瑞典 ABB 公司；瑞典 Baltic 电缆工程公司；瑞典北欧化工公司；英国 IHC 工程商业公司；英国国际电缆保护委员会；法国 LD Travocean 公司；美国长岛电力局；美国内务部矿产管理服务部门；新西兰国家水和大气研究公司；丹麦 NKT 电缆公司；德国 NSW 公司；英国海洋电力和脐带电缆公司；意大利 Prysmian 公司；挪威 Statnett 电力公司；英国海底通信论坛；英国 Trelleborg 公司；美国 Woods Hole 海洋科学研究所。

缩略语汇总

3C	Three-Core Cable	三芯电缆
1C	Single-Core Cable	单芯电缆
AHT	Anchor Handling Tug	锚操作拖船
AIS	Automatic Identification System	自动识别系统
CDVC	Cable Depending Voltage Control	电缆电压依赖控制
Cigré	Conseil International Des Grands Réseaux Électriques	国际大电网会议
CLPS	Cable Load Prediction System	电缆负载预测系统
DTS	a) Distributed Temperature Measurement System b) Desktop Study	分布式温度测量系统 地理地质初步调查
EIA	Environmental Impact Assessment	环境影响评价
GIL	Gas Insulated (Transmission) Line	气体绝缘 (输电) 线路
GIS	Gas Insulated Switchgear	气体绝缘开关
IEC	International Electrical Committee	国际电工委员会
LCA	Life Cycle Assessment	寿命周期评价
LIWL	Lightning Impulse Withstand Level	雷电冲击耐受水平
LPOF	Low Pressure Oil Filled	低压充油
MBR	Minimum Bending Radius	最小弯曲半径
MI	Mass-Impregnated	粘性浸渍纸绝缘
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	光时域反射仪
OWP	Offshore Wind Park	近海风电场
PD	Partial Discharge	局部放电
PLGR	Pre-Lay Grapnel Run	预拉锚运行
ROV	Remote Operated Vehicle	水下机器人
RTTR	Real Time Thermal Rating	实时热性额定值
SC	Single-Core Cable	单芯电缆
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	监视控制与数据采集 (系统)
SCFF	Self-Contained Fluid Filled	自容式充液
SCOF	Self-Contained Oil Filled	自容式充油
SIWL	Switching Impulse Withstand Level	操作冲击耐受水平
STRI	Swedish Transmission Research Institute	瑞典输电研究所

TD Touch Down 触地

TDR Time Domain Reflectometry 时域反射仪

TSO Transmission System Operator 输电系统运营商

VIV Vortex Induced Vibration 涡致振动

VMS Vessel Monitoring System 船舶监控系统

WTG Wind Turbine Generator 风力发电机

XLPE Cross-Linked Polyethylene 交联聚乙烯

目 录

译者的话

前言

致谢

缩略语汇总

第1章 海底电力电缆的应用	1
1.1 岛屿供电	1
1.2 独立电网连接	2
1.3 近海风电场	3
1.4 海上石油平台供电	4
1.5 跨越江河海峡短程输电	5
1.6 海底电力电缆的其他应用	5
参考文献	6
第2章 海底电力电缆及其设计元件	7
2.1 导体	7
2.1.1 实心导体	8
2.1.2 圆单线绞合导体	8
2.1.3 型线导体	9
2.1.4 用于充油电缆的空心导体	9
2.1.5 分割导体	10
2.1.6 导体电阻	11
2.1.7 导体阻水	12
2.1.8 超导导体	12
2.2 绝缘系统	12
2.2.1 聚乙烯	13
2.2.2 交联聚乙烯	13
2.2.3 导体屏蔽和绝缘屏蔽	14
2.2.4 老化和潮湿对交联聚乙烯绝缘的影响	15
2.2.5 交联聚乙烯绝缘的应用	16
2.2.6 挤包高压直流电缆	17
2.2.7 其他挤包绝缘系统	17
2.2.8 用于交流或直流的纸绝缘充油电缆	17
2.2.9 用于高压直流的粘性浸渍纸绝缘	19

VIII 海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响

2.2.10 充气海底电缆	21
2.2.11 其他绝缘系统	21
2.3 阻水护套	22
2.3.1 铅套	23
2.3.2 铝套	24
2.3.3 铜套	24
2.3.4 聚合物护套	25
2.4 铠装	25
2.4.1 防腐	28
2.5 外被层	30
2.6 三芯电缆	30
2.6.1 单芯和三芯海缆间的选择	32
2.7 两芯电缆	33
2.8 同轴电缆	34
2.9 光纤复合海底电力电缆	35
2.10 五种常用电缆类型	36
参考文献	38
第3章 设计	40
3.1 热性设计	40
3.1.1 单芯高压直流电缆	40
3.1.2 交流电缆	45
3.1.3 热性设计的其他因素	49
3.1.4 2K 准则	56
3.1.5 热性设计的经济性	58
3.2 机械性能设计	61
3.2.1 敷设过程的张力	61
3.2.2 国际大电网会议 (CIGRE) 推荐试验规范	63
3.2.3 导体和铠装之间的机械应力分布	64
3.2.4 其他的力及影响	66
3.2.5 涡致振动	68
3.3 电气设计	70
3.3.1 电气强度的概念	70
3.3.2 威布尔 (Weibull) 分布	71
3.3.3 交流电缆的绝缘设计	73
3.3.4 直流电缆的绝缘设计	76
3.3.5 粘性浸渍纸绝缘电缆的绝缘设计	77
3.3.6 冲击电场强度	79
3.3.7 可用性和可靠性	80

参考文献	80
第4章 附件	82
4.1 海底电缆接头	82
4.1.1 工厂接头	82
4.1.2 近海安装接头	84
4.1.3 各种不同的接头设计	88
4.1.4 海滩接头	90
4.2 电缆终端	91
4.2.1 岸上交流电缆终端	91
4.2.2 岸上直流终端	91
4.2.3 近海电缆终端	92
4.3 其他附件	93
4.3.1 J-管	93
4.3.2 锚固装置	93
4.3.3 弯曲保护	94
4.3.4 海底电缆固定装置	95
参考文献	95
第5章 制造和试验	96
5.1 制造	96
5.1.1 导体	96
5.1.2 交联聚乙烯绝缘电缆	97
5.1.3 纸绝缘电缆	98
5.1.4 屏蔽	100
5.1.5 成缆	101
5.1.6 铠装	102
5.1.7 海底电力电缆的储存	104
5.2 试验	105
5.2.1 研究性试验	105
5.2.2 型式试验	106
5.2.3 例行试验	112
5.2.4 工厂验收试验 (FAT)	113
5.2.5 安装后试验	114
5.2.6 非电气试验	115
参考文献	116
第6章 海洋勘测	117
6.1 海洋勘测范围	118
6.2 测深	119
6.3 海底下层测绘	121

6.4	目测检验	122
6.5	土壤取样	122
6.6	土壤温度和海水温度	123
	参考文献	123
第7章	海底电力电缆安装和保护	125
7.1	安装	125
7.1.1	电缆敷设船	125
7.1.2	其他船舶	134
7.1.3	登陆和物流	135
7.1.4	海底电力电缆敷设	136
7.1.5	海底电缆登陆	139
7.1.6	海底电缆接头	142
7.1.7	天气	146
7.1.8	组织	151
7.2	海底电力电缆的保护	152
7.2.1	选择合适的电缆路由	153
7.2.2	设计合适的电缆铠装	155
7.2.3	外部保护	156
7.2.4	安装后保护	161
7.3	附录: 悬链线	162
	参考文献	164
第8章	损伤和修复	166
8.1	损伤	166
8.1.1	受损原因	166
8.1.2	损伤的统计分布	167
8.1.3	渔具造成的损伤	167
8.1.4	锚造成的损伤	168
8.1.5	敷设过程中的损伤	171
8.1.6	其他损伤	172
8.1.7	自发性损伤	173
8.1.8	接头故障	174
8.2	修复	174
8.2.1	备用电缆	174
8.2.2	修理船	175
8.2.3	修复团队	175
8.2.4	修复作业	176
8.3	故障定位	177
8.3.1	时域反射 (TDR)	177

8.3.2 电桥测量法	179
8.3.3 精细定位法	180
8.3.4 光时域反射测量技术	181
8.3.5 其他方法	182
8.4 修复实例	183
参考文献	186
第9章 运行和维护：可靠性	187
9.1 海底电缆的运行	187
9.1.1 所有类型海底电力电缆的常用措施	187
9.1.2 仪器仪表	188
9.1.3 粘性浸渍纸绝缘电缆和交联聚乙烯绝缘电缆	189
9.1.4 低油压充油、自容式充油和自容式充液电缆	189
9.1.5 电缆终端	189
9.2 海底电力电缆的可靠性	190
9.2.1 国际大电网会议的研究	190
9.2.2 大型高压直流电缆工程的故障统计	191
9.2.3 可靠性术语的定义	192
9.2.4 一些海底电力电缆的可靠性	192
参考文献	195
第10章 环境问题	196
10.1 环境评估	196
10.2 电缆损耗的影响	197
10.3 电缆设计的相关环境问题	198
10.3.1 导体材料	198
10.3.2 其他电缆材料的选择	199
10.4 电缆安装的环境问题	201
10.5 海底电力电缆运行对环境的影响	203
10.5.1 热的影响	203
10.5.2 2K 准则	204
10.5.3 电磁影响	205
10.5.4 化学影响	210
10.6 海底电力电缆的再生利用	210
参考文献	211
第11章 轶事	213
11.1 S/S Castalia 的浮动医院	213
11.2 连接英国 Lydd 和法国 Boulogne 的高压直流电缆	214
11.3 领航员	214
11.4 S 向成缆和成圈方向	215

XII 海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响

11.5	可以吃的绝缘	216
11.6	弹球机	216
11.7	邮票	217
11.8	不寻常的电缆船	218
11.9	蛀船虫	219
11.10	德国士兵战争时寻找一个电缆故障	219
11.11	甚至更多损害	220
11.12	电缆圈	220
11.13	电缆船海礁	221
11.14	诗歌	222
11.14.1	Florence Kimball Russel 夫人的旅程	222
	参考文献	224
第 12 章	常用表	225
12.1	电缆绝缘材料的介质特性	225
12.2	铅合金	225
12.3	非米制导体尺寸: kcmil	226
12.4	非米制线规	227
12.5	海水中金属及其合金的电化学序	228
12.6	各国海底土壤分级	229
12.7	非米制单位	230
12.8	海潮术语	230
	参考文献	231
附录	主要海底电力电缆工程中文名称	232

第 1 章 海底电力电缆的应用

海底电力电缆的使用已超过百年，在近几十年得到广泛的应用。早期海底电力电缆用于向孤立的近海设备供电，如灯塔、医疗船等。随后，向近岸的海岛供电成为海底电力电缆的主要应用。为了获得更好的稳定性和能源利用，20 世纪 60 年代出现了独立电网的连接。现今，近海设备间的连接问题又重新成为研究热点。石油和天然气生产装置需要岸上的电能，近海风电场（Offshore Wind Park, OWP）也需要将其宝贵的绿色电能送至岸上电网。

1.1 岛屿供电

靠近大陆的海岛可采用海底电力电缆连接至大陆电网。通常采用中压交流电缆（ $\leq 52\text{kV}$ ），每根电缆的输送容量为 $10 \sim 30\text{MW}$ 。海底电力电缆替代了岛上低效的发电形式，如柴油发电机。这些电缆的最大经济长度为 $10 \sim 30\text{km}$ 。为了应对增长的海岛电力需求，外加的电缆常常敷设在不同的路由上，以减少风险并增强海岛上电力的可用性。即使某根电缆发生故障，海岛供电仍能通过其他电缆得到保证。在德国北部，自 1944 年开始，北 Frisian 群岛就通过 20kV 的海底电缆连接至大陆电网^[1]。其他海岛，诸如加拿大温哥华岛（Vancouver Island）和美国纽约长岛（Long Island），拥有大量人口和大量电力需求，需要许多超高压海底电力电缆线路（见图 1-1）。

由于交流电缆的损耗随着传输距离的增大而显著增加，向远距离海岛供电较为困难。距大陆 50km 以上的海岛长期没有与大陆实现电力连接。德国 Heligoland 的旅游岛到 2009 年才与大陆实现电力连接。瑞典的哥特兰岛（Gotland）距瑞典大陆约 100 km ，曾长期依赖低效的柴油发电。直到 1954 年，第一根高压直流海底电缆安装，它才与大陆电网实现连接。运河岛屿 Jersey 岛和 Guernsey 岛在 1987 年和 2000 年先后两次与法国大陆电力连接。意大利的西西里岛（Sicily）和撒丁岛（Sardinia）也是用海底电力电缆连接至大陆。

由独立电网供电的海岛有时连接至大陆或邻近岛屿，以增强供电的可用性。海底电力电缆具有备用电厂的功能，以供本地机组停电时的应急电力。

某些国家如挪威、菲律宾、日本等由于自身的地理特点，具有在众多岛屿间安装海底电力电缆的长期传统。

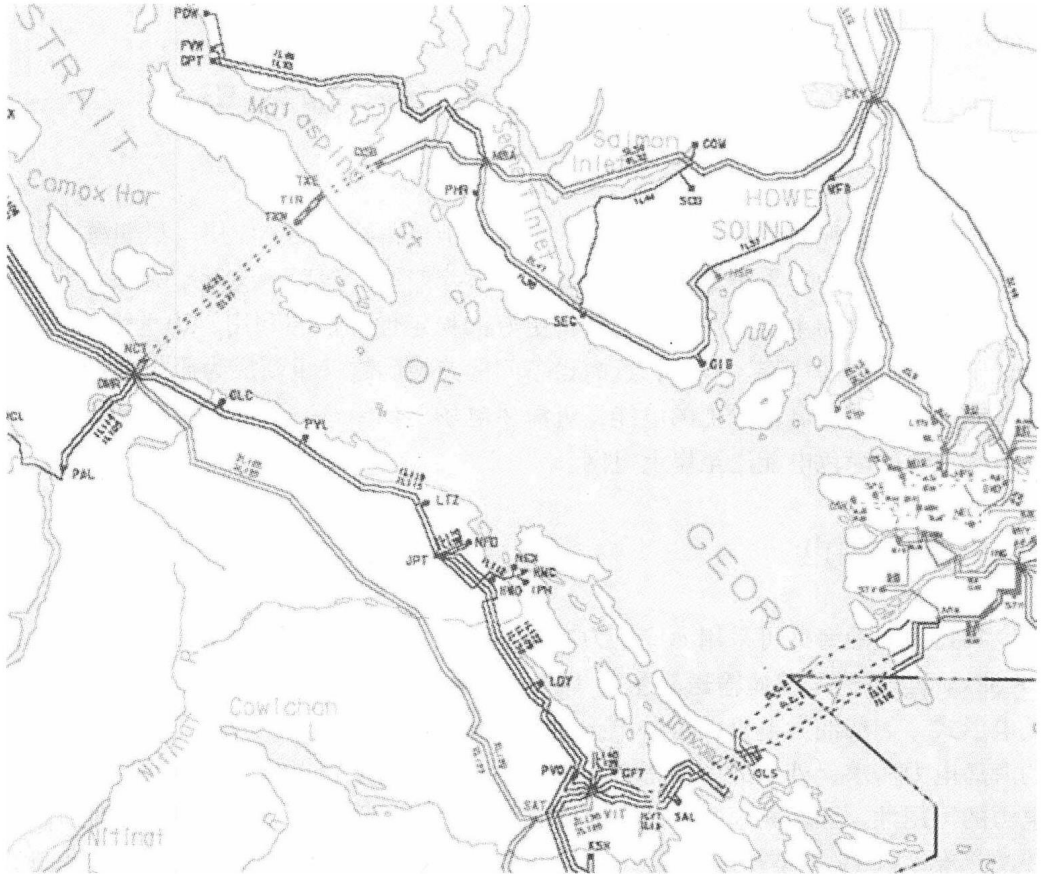


图 1-1 向加拿大温哥华岛供电的海底电力电缆。最初海岛（左下方）采用 138kV 系统（右下方）连接至大陆（右上方）。随着电力需求的增大，则必须敷设更多的电缆系统，包括交流和直流输电^[2]

1.2 独立电网连接

随着大容量海底电缆的出现，众多电网采用不同的技术实现了互连。海底电缆连接了不同国家的电网（例如英国—法国、瑞典—德国、丹麦—瑞典、摩洛哥—西班牙、希腊—意大利）。利用高压直流技术，可以对采用不同频率控制的地区互连（如丹麦的 Store 地带、瑞典—德国、挪威—荷兰）。在提到的工程中，互连两端的电网频率均为 50Hz，但频率控制方式不同，使其成为异步电网。各国电网的内部互连成为欧盟的首要目标。

独立电网的连接有不同的目的和目标：

- 由于处在不同的时区，或因不同的用电习惯，互连国家或电网的峰值负荷出现在一天的不同时刻。采用海底电缆输电，就有可能共享发电容量，满足电能需求。