

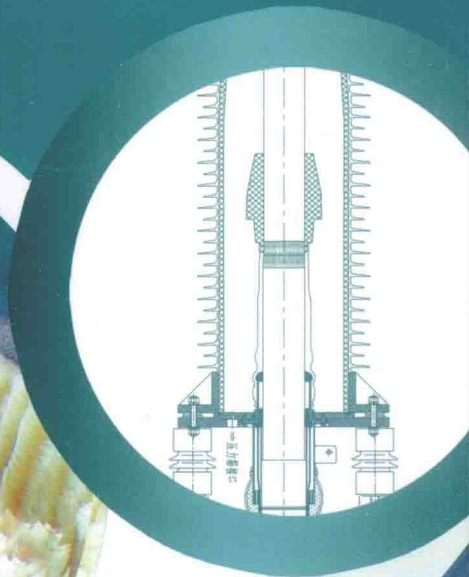
挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书

JIBAO JUEYUAN ZHILIU DIANLI DIANLAN JISHU YU YINGYONG CONGSHU

工程应用分册

主 编 郭小龙

副主编 杨晓东 谢荣坤



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书

JIBAO JUEYUAN ZHILIU DIANLI DIANLAN JISHU YU YINGYONG CONGSHU

工程应用分册

主 编 郭小龙

副主编 杨晓东 谢荣坤



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

高压直流电力电缆作为柔性直流输电的关键设备,在输电可靠性方面扮演了重要角色。随着挤包绝缘直流电力电缆的出现,它所具有的体积小、重量轻、可靠性高以及免维护等优点更加凸显。为满足我国电网发展的需要,提升高压直流电力电缆设计制造及工程应用水平,特编写了《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》。

本书为《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书 工程应用分册》,共分5章,主要内容包含陆地电缆的设计、海底电缆的设计、海洋勘测、电缆敷设施工、直流电缆线路的试验等。本书理论结合实际,实用性较强。

本书可供从事高压直流电缆及柔性直流输电相关科研、勘察设计、施工、试验等的工程技术人员使用,也可以作为高等院校相关专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书. 工程应用分册/郭小龙主编. —北京:中国电力出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5123-6704-3

I. ①挤… II. ①郭… III. ①直流电路-绝缘电缆-电缆敷设 IV. ①TM247②TM757

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 064336 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年10月第一版 2015年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 7.5印张 169千字

定价 45.00 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



《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》 工程应用分册

编 委 会

主 编 郭小龙

副 主 编 杨晓东 谢荣坤

参编人员 郑志源 余 欣 吕文胜 麦晓明

曾深明 张 飞 张 荣 梁爱武

林少鹏 苏峻亮 罗运松 徐 伟

王 燕 陈 冰 王婧倩 贾玉明

肖志军 黄寅茂 陈 峰

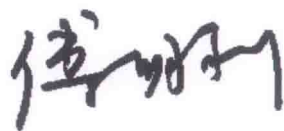
序 言

自 20 世纪 80 年代,塑料挤出绝缘(如交联聚乙烯)交流电力电缆技术得到了快速发展和广泛应用,到目前已有诸多 500kV 的交联聚乙烯绝缘交流电缆投入运行。然而在高压直流电缆中采用相同的绝缘材料时,其技术问题与挑战远远超过交流电缆的情况。

首先在交流应用场合,电场分布由绝缘结构中各处的电容决定,而绝缘材料的电容率(介电常数)在电气工程应用中所处的温度和电场范围几乎是个常数。因此同轴电缆绝缘中的电场分布只是由电缆的几何结构和尺寸决定,出现内高外低的分布,且不受运行负荷和环境的影响。而在直流电缆绝缘中,电场分布取决于结构中的直流电阻分布,也即材料特定位置的电阻率,而绝缘材料的电阻率又是温度和所处场强的函数。在正常运行工况下,由于绝缘材料特定的导热率,在绝缘层中势必形成内高外低的温度分布,这一温度梯度通过材料电阻率影响直流电场分布。这种由温度梯度、电场分布到材料性能再到电场分布的多物理场耦合关系,使得直流电缆绝缘中的电场设计与选取变得异常复杂和困难。其次,伴随聚合物材料优良的绝缘性能而来的矛盾是在直流电压作用下材料中空间电荷的聚集与迁移。绝缘结构中的空间电荷将改变局部电场的分布,极端情况的电场增加可能引起材料局部的加速老化甚至击穿。由于材料中空间电荷的相对稳定特性,使塑料挤出绝缘直流电缆在运用到传统高压直流输电系统的极性反转运行工况时存在更大的风险。另外,相较于交流系统,人们对聚合物材料在直流电压下的绝缘特性、老化特性、绝缘缺陷的产生与发展直到绝缘失效机理研究十分欠缺,以至于目前在世界范围内依然缺少科学且有效的直流电缆试验考核与评价手段。而作为快速增长的电网资产以及考虑直流电缆未来将大量运用于海底输电和联网,如何保证安全可靠的敷设施工和现场试验,以避免未来巨大的运行维护与检修成

本，也是电网建设与运行管理者必须进行的技术准备。

针对上述塑料挤出绝缘高压直流电缆所面临的技术困难，国内外学术与工程应用界展开了将近 30 年持续且细致的研究，在空间电荷测量与评价、利用高纯净或纳米添加材料抑制空间电荷以及电缆制造工艺控制等技术领域取得了一系列突破性成果。意大利学者 Giovanni Mazzanti 和 Massimo Marzinotto 对上述研究成果进行了系统总结并在 2013 年编辑出版了首部有关挤出绝缘的高压直流电缆专著 *Extruded Cables for High Voltage Direct Current Transmission*。而在一年后的今天，我十分荣幸地被《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》的几位作者邀请阅读该三卷丛书的书稿，欣喜地注意到该书基于介绍国内近年来 $\pm 160\text{kV}$ 和 $\pm 200\text{kV}$ 交联聚乙烯绝缘高压直流电缆研发和柔性直流输电工程应用，系统论述了挤包绝缘高压直流电缆从材料基础性能、空间电荷测量与抑制、电缆本体及附件结构设计、制造工艺和试验直到最后工程应用中的敷设、施工等各环节的技术问题与研究成果。这部及时且内容丰富的中文丛书，可以作为从事高压直流输电技术、直流电缆生产和相关技术研究以及工程应用等研究人员与工程师的参考书籍。我也毫无疑问地相信该丛书将为提升我国高压挤出绝缘直流电缆的制造和工程应用水平发挥应有的作用。在此，我不仅要恭喜该部丛书的出版，更要感谢丛书编著者及时且卓有成效的工作。



中央“千人计划”专家
南方电网高级技术专家
2015 年 4 月

前言

柔性直流输电技术是一种与传统直流输电技术截然不同的新型直流输电技术,具有可控性强、对环境影响小、适合中小容量电力远距离输送等一系列优点,自20世纪90年代后期以来,全球范围内投入商业运行和在建的柔性直流输电工程有十多个,输电功率从几兆瓦至几百兆瓦不等。

目前柔性直流输电技术还不能有效控制直流侧故障电流,当发生直流侧故障时,必须跳开交流侧开关,从而会造成输电中断。因此,与常规直流输电系统相比,输电线路的可靠性显得更加重要。柔性直流输电可以采用架空线、电缆以及两者的组合作为输电线路,跨海输电大多使用电缆。不同输电方式下线路可能发生的故障也不尽相同。目前国内外投运的柔性直流输电工程大部分采用电缆输电,以降低雷击故障率,提高系统的可靠性。

柔性直流电缆作为工程设计最重要的环节之一,其本体性能的优劣直接关系到系统的安全稳定运行。国内外已有较多交流海底电缆工程投运,其技术相对比较成熟。然而,交流与直流海底电缆有着较大的差异,如电场分布特性、击穿场强、绝缘材质的应用范围等,导致交流海底电缆选型的研究成果不能直接用于直流海底电缆。国内在直流海底电缆领域的研究工作起步相对较晚,且对于实际工程所需要的基础理论和关键技术研究相对较少。针对上述情况,广东电网有限责任公司组织广东省电力设计研究院、广东电网有限责任公司电力科学研究院及上海电缆研究所等单位开展了挤包绝缘直流电力电缆及其工程应用的相关研究工作,取得了一系列重要研究成果。目前,国家科学技术部863计划先进能源技术领域智能电网关键技术研发(一期)课题的示范工程——“大型风电场柔性直流输电接入技术与研究开发”示范工程落点在广东汕头南澳和澄海地区,是集大型风电场接入、柔性多端直流输电、直流海底电缆(以下简称“海缆”)等多项新技术于一体的开拓之作,已于2013年12月正式投运。

挤包绝缘直流电力电缆在我国的工程化应用，对于提高我国电网安全稳定水平，建立经济、环保、高效、先进的智能输配电系统有着重要意义。为满足我国电网发展的需要，实现坚强智能电网的目标，促进我国柔性直流电缆线路工程设计水平的提高，特组织编写了《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》，本书为工程应用分册。该分册总结了广东省电力设计研究院、广东电网有限责任公司电力科学研究院、上海三原电缆附件有限公司和国内相关单位的研究成果，汲取了国内外柔性直流输电的工程经验，对于推动柔性直流输电关键技术研究及工程建设具有重要参考意义。

本书在编写和出版过程中得到了广东电网有限责任公司、广东省电力设计研究院、广东电网有限责任公司电力科学研究院等单位的大力支持和帮助，在此深表感谢。由于编者水平和经验有限，书中难免有疏忽和错误之处，望读者批评指正。

编 者

2015年4月

目 录

序言

前言

第1章 陆地电缆的设计	1
1.1 电缆线路路径方案	1
1.2 电缆选型	2
1.3 金属护层冲击过电压	7
1.4 电缆附件的选择	9
1.5 敷设方式	15
1.6 接地方式	22
第2章 海底电缆的设计	23
2.1 海底电缆选型	23
2.2 海底电缆过电压保护及接地方式选择	25
2.3 海底电缆的路由选择	26
2.4 海底电缆损坏原因分析	32
2.5 海底电缆敷设保护方式选择	37
第3章 海洋勘测	44
3.1 勘察范围	44
3.2 陆域地形测绘要求	44
3.3 潮位观测	45
3.4 导航定位	46
3.5 单波束水深地形测量	46
3.6 多波束水深地形测量	47
3.7 侧扫声纳探测	49
3.8 地层剖面探测	49
3.9 磁法探测	50
3.10 底质采样	50

3.11	管线仪探测	51
3.12	岩土工程勘测	51
3.13	海洋水文气象资料收集与观测	54
第4章	电缆敷设施工	56
4.1	陆地电缆敷设施工	56
4.2	海底电缆敷设施工	66
4.3	电缆附件安装	78
第5章	直流电缆线路的试验	88
5.1	概述	88
5.2	例行和抽样试验	89
5.3	型式试验	92
5.4	预鉴定试验	100
5.5	船上交接试验	101
5.6	安装后试验	102
5.7	验收	103
5.8	预防性试验	108

1.1 电缆线路路径方案

1.1.1 概述

电缆线路路径方案应与城市总体规划相结合，应与各种管线和其他市政设施统一安排，且应征得城市规划部门同意；电缆线路路径方案应综合路径长度，施工、运行和维护方便等因素，统筹兼顾，做到技术可行、安全适用、环境友好、经济合理。

供敷设电缆用的构筑物应按电网远景规划并预留适当裕度一次建成；供敷设电缆用的构筑物或直埋敷设的电缆不应平行敷设于其他管线的正上方或正下方；电缆跨越河流敷设应利用城市交通桥梁、交通隧道等公共设施，并应征得相关管理部门同意。

电缆线路路径方案应包括。

- (1) 各路径方案沿线地形、地质、水文、林区、主要河流、铁路、地铁、二级以上的公路、城镇规划、环境特点、特殊障碍物等。
- (2) 工作井的型式与分布情况。
- (3) 地质、水文资料来源。
- (4) 沿线协议情况。
- (5) 电缆线路特殊地段及采取的措施。
- (6) 各种技术方案的经济比较与论证结果。
- (7) 简要说明路径推荐方案。

1.1.2 路径方案的一般要求

电缆线路要根据供配电的需要，并充分考虑地面环境、土壤资料和地下各种设施的影响，以及安全运行节约投资、便于施工和维修等综合因素，确定经济合理的电缆线路走向。电缆线路路径方案的具体要求如下：

- (1) 节省投资，在满足安全的条件下尽量选择最短距离的路径。
- (2) 要结合远景规划选择电缆路径，尽量避开规划中需要施工的地方。
- (3) 电缆路径应尽量减少穿越各种管道、铁路和其他电力电缆的次数；在建筑物内，要尽量减少穿越墙壁和楼房地板的次数。
- (4) 为了保证电缆的安全运行不受环境因素的干扰，不能让电缆受到外机械力、化

学腐蚀、震动、地热等的影响。

(5) 道路的一侧设有排水沟、煤气管道、主送水管道、弱电线路时, 电力电缆应敷设在道路的另一侧。

(6) 电力电缆不应和输送甲、乙、丙类液体管道, 可燃气体管道, 热力管道敷设在同一管沟里。

电缆路径勘测确定后, 须经当地主管部门同意后, 方可进行施工。

以下处所应尽可能避免选作电缆路径:

- (1) 有沟渠、岩石、低洼存水的地方。
- (2) 有化学腐蚀性物质的土壤地带及有地中电流的地带。
- (3) 地下设施复杂(如有热力管道、水管道、煤气管道等)的地方。
- (4) 存放或制造易燃、易爆、化学腐蚀性物质等危险物品的地方。

1.1.3 气象条件与土壤特性

在选取电缆线路路径方案时需考虑的气象条件与土壤特性如下。

- (1) 气象台(站)的名称。
- (2) 路径所经地区的最高气温、最低气温、年平均气温、雷暴日数、风速、日照、土壤冻结厚度及覆冰厚度等。
- (3) 路径所经地区的地震烈度。
- (4) 路径所处环境温度和土壤特性。

1.2 电 缆 选 型

1.2.1 电缆型式的选择

目前, 国内外使用的高压直流电缆主要有 3 种: 自容式充油电缆(简称充油电缆)、不滴流浸渍纸绝缘电缆(简称不滴流电缆)和交联聚乙烯绝缘电缆(简称交联电缆, 英文缩写 XLPE)。下面从技术特性、经济性和等方面对这三种高压直流电缆进行比较。

1.2.1.1 技术特性

(1) 充油电缆。充油电缆采用低损耗牛皮纸作绝缘材料, 同时采用低黏度矿物油来浸渍电缆纸绝缘, 并在电缆内部设置油道与供油设备相连, 以保持电缆中的油压, 从而抑制了电缆绝缘内部气隙的产生。

充油电缆最大的优点是可靠性高。充油电缆在运行中发热时, 油体积增加, 一部分油被排出到电缆外部; 当电缆冷却时, 排出的油又自动送回电缆内部, 这样就防止了电缆内部气隙的产生。当电缆受到外力破坏而发生少量漏油时, 不必马上进行停电处理, 只需通过补油设备加入一些油, 即可使检测故障点和修理的工作适当延迟, 从而提高线路运行的可靠性。

充油电缆具有安装不便、易燃、不环保等缺点。由于充油电缆本体任何时候都不

能离开压力箱和油管等设施,这就大大增加了施工的难度和复杂性,因此对施工人员的专业要求较高,且安装工期比交联电缆要长。充油电缆使用的绝缘油是可燃液体,闪点低(一般低黏度的油闪点在 140°C 以下),易着火。电缆具有延燃性,一旦由于外部原因或电缆头爆炸起火,可能会酿成严重的火灾,这类事故在国内外都发生多次。充油电缆油道与供油设备相连并保持一定油压,一旦发生漏油,将对周边环境造成污染。

充油电缆迄今已有 70 多年的运行历史,目前世界上已建成的交流超高压跨海联网工程中,如加拿大本土至温哥华岛 500kV 交流海底电缆工程、欧洲西班牙—摩洛哥 400kV 跨海联网工程,均采用该种形式的电缆。充油电缆在制造上和使用上都有一套比较成熟的技术和经验。

(2) 不滴流电缆。不滴流电缆的绝缘层是以一定宽度的电缆绝缘纸螺旋状地绕包在线芯上,经过真空干燥处理后用浸渍剂浸渍而成。不滴流电缆所用的浸渍剂在工作温度范围内不流动,呈塑性固体状,而在浸渍温度下黏度降低,保证充分浸渍。

不滴流电缆具有敷设方便、敷设长度和高差不受限制等优点。与充油电缆相比,不滴流电缆结构简单,安装维护方便。不滴流电缆在运行过程中不依靠供油设备,因此其不受路由长度的限制,目前最长的工程路由为 580km;且由于采用不滴流的浸渍剂,敷设高差也不再受限制。

不滴流电缆也有一些不足之处。由于绝缘纸与浸渍剂热膨胀系数相差较大,在制造和运行过程中因温度的变化会产生气隙,而气隙是破坏电缆绝缘的主要原因之一。电缆反复弯曲后,绝缘性能会下降。受工作原理的影响,不滴流电缆运行温度比充油电缆低。因此,对于相同的线芯截面,不滴流电缆载流量比充油电缆和交联电缆低。同充油电缆一样,不滴流电缆有油液泄露、易燃的风险。

浸渍纸绝缘电缆用于高压直流输电领域已有 100 多年的历史,目前主要用于直流高电压等级的大功率传输,最高适用于 $\pm 500\text{kV}$ 电压等级的。我国高压直流电缆已有近 60 年的生产历史,但生产不滴流油浸纸绝缘电缆的历史较短。

(3) 交联聚乙烯电缆。交联聚乙烯电缆是固态绝缘的代表产品,聚乙烯树脂本身是一种常温下电性能极优的绝缘材料。用辐照或化学方法对其进行交联处理,从而改善材料在高温下的电性能和机械性能。由于交联聚乙烯电缆绝缘中的空间电荷效应使得交流 XLPE 绝缘电缆不能直接用于直流线路,因此需要对绝缘材料采用抑制空间电荷分布的措施。目前,国际上普遍在交联绝缘材料中添加极性 or 导电无机填料来降低空间电荷。

交联聚乙烯电缆具有电气性能优越、耐热性和机械性能良好、敷设安装方便、环保、绝缘性能良好等优点。交联聚乙烯树脂作为电缆的绝缘介质,具有十分优越的电性能,在理论上其性能指标优于充油电缆,如表 1-1 所示。聚乙烯树脂经交联工艺处理后,其耐热性和机械性能大大提高。交联电缆的正常工作温度比充油电缆高,在同一导体截面时,其载流量比充油电缆高。由于交联电缆是干式绝缘结构的,因此给线路施工带来很大的方便,接头和终端头的安装比较容易,部分接头和终端头已预制成型附件,安装时间可缩短。交联电缆的线路高差不受限制,适用于振动场所,与 GIS 连接时不存在油混入气体的问题。交联电缆不存在绝缘油泄漏的问题,不会对周边环境造成影响,反复弯

曲后，不会像油浸纸绝缘电缆一样产生绝缘性能下降。

表 1-1 充油电缆与交联电缆性能比较

电缆 型式	电气性能			热性能			机械性能			
	介电 常数 ϵ	损耗 因数 $\tan\delta$ (%)	绝缘性能	允许温度 (°C)			绝缘热阻 $K \times m/W$	线膨胀 系数 $1/^\circ C$	弹性 模量	伸缩节 处的抵 抗能力
				正常	短时	短路				
充油 电缆	3.4~3.7	0.25~0.4	绝缘性 能稳定	85	95	160	5	16.5×10^{-6}	大	大
交联 电缆	2.3	0.08 以下	受工艺 影响大	90	105	250	3.5	20×10^{-6}	小	小

交联聚乙烯作为一种绝缘介质，虽然在理论上具有十分优越的电气性能，但作为制成品的电缆，其性能受工艺过程的影响很大。从材料生产、处理到绝缘层（包括屏蔽层）挤塑的整个生产过程中，绝缘层内部难免出现杂质、水分和微孔，影响电缆的绝缘性能。由于交联直流电缆的开发及使用时间还不长，因此其挂网运行经验还不足。

但是，随着直流交联聚乙烯电缆的发展，特别是国外先进的电缆生产企业通过在交联绝缘料中添加极性或导电无机填料，解决了交联直流电缆的空间电荷问题，使交联直流电缆在长距离直流输电工程中后来居上，现在已占有相当大的份额，尤其是在柔性直流输电工程中。表 1-2 所示为交联聚乙烯电缆在直流输电工程中的应用案例。

表 1-2 交联聚乙烯电缆在直流输电工程中的应用案例

序号	工程名称	电压等级 (kV)	线路长度 (km)	输送功率 (MW)	制造企业	投运时间
1	康涅狄格—纽约长岛跨海电缆工程	±150（双极）	40	330	ABB	2002.7
2	澳大利亚 Murray Link 直流输电工程	±150（双极）	180	220	ABB	2002.8
3	爱沙尼亚—芬兰	±150（双极）	74	350	ABB	2006
4	美国旧金山海底电缆项目	±200（双极）	85	—	普睿斯曼	2009
5	德国 BorWin1 海上风电场输电工程	±150（双极）	203	400	ABB	2009
6	日本北海道—本州海底电缆项目	±250（双极）	43	—	住友	2012
7	爱尔兰东西联网系统直流输电工程	200（单极）	250	500	ABB	2012
8	德国 Dolwin1 直流工程	±320（双极）	165	800	ABB	2013
9	挪威—丹麦 Skagerrak 4 直流输电工程	500（单极）	240	700	ABB	2014
10	欧洲北海—BorWin2 电缆项目	±300（双极）	400	800	普睿斯曼	
11	欧洲北海—HelWin1 电缆项目	±250（双极）	261	576	普睿斯曼	
12	欧洲北海—SylWin1 电缆项目	±320（双极）	409	864	普睿斯曼	
13	法国贝克萨（Baixas）—西班牙桑塔龙盖亚（Santa Llogaia）陆上电缆项目	±320（双极）	256	—	普睿斯曼	

（4）充油电缆、不滴流电缆及交联电缆优缺点如表 1-3 所示。

表 1-3 三种电缆优缺点对比表

电缆型式 \ 优缺点	优点	缺点
充油电缆	(1) 可靠性高； (2) 运行经验丰富	(1) 敷设安装不便； (2) 设有供油系统，运行维护不便，且运行维护费用高； (3) 发生漏油事故后维修困难，易污染海洋环境
不滴流电缆	(1) 敷设安装方便； (2) 敷设长度和高差不受限制	(1) 绝缘材料中气隙的产生不可避免； (2) 绝缘性能受弯曲次数影响； (3) 导体允许运行温度低，相同输送容量下的导体截面要增加； (4) 绝缘油有泄漏、易燃的风险
交联电缆	(1) 电气性能优越； (2) 耐热性和机械性能良好； (3) 环保； (4) 敷设安装方便； (5) 绝缘性能不受弯曲次数影响	(1) 挂网运行经验不足； (2) 性能受制造工艺影响较大

由表 1-3 可见，充油电缆虽具有可靠性高、运行经验丰富的优点，但运行维护不便、易污染海洋环境，一旦发生漏油，将对周边海域生态环境造成较大影响。不滴流电缆绝缘性能受弯曲次数影响，相同导体截面载流量小，存在漏油的风险。交联电缆具有电气性能好、机械强度高、安装敷设和运行维护方便及环保等优点，且随着交联直流电缆的发展，特别是解决了交联直流电缆空间电荷的问题之后，交联直流电缆在长距离直流输电工程中后来居上，现在已占有相当大的份额。需特别指出的是，目前国际上柔性直流输电工程均采用交联电缆。

1.2.1.2 经济性

三种电缆的技术特点比较如表 1-4 所示。

表 1-4 三种电缆的技术特点比较

电缆类型	交联电缆	充油电缆	不滴流电缆
导体最高温度/（℃）	70	80	55
导体截面面积/mm ²	500	500	1000
电缆附属电压控制系统（Cable Depending Voltage Control, CDVC）系统	不需要	不需要	需要
油泵站	需要	不需要	不需要

由表 1-4 可见，三种电缆的导体长期运行温度有所差异，因此导体截面也有所差别，不滴流电缆的截面是交联电缆和充油电缆截面的 2 倍。因此不滴流电缆的用铜量也是交联电缆和充油电缆的 2 倍，采购成本也相应增加。对于不滴流电缆，如果电压值保持不变的情况下，电流值下降，使导体温度迅速下降，油浸纸中的绝缘油会收缩并产生微孔，从而可能导致电缆发生击穿现象。因此，不滴流电缆需要安装额外的设备，如电缆附属电压控制系统。

充油电缆与交联电缆导体截面大致相同，交联电缆绝缘料需进口，因此交联电缆价格稍贵。但充油电缆需设置供油系统，每相电缆配 4 个油箱，两相共配 8 个油箱，4 个备用油箱，供油系统费用共计约 100 万元。考虑了供油系统费用后，两者价格大致相当。

综上所述，采用不滴流电缆投资最高，充油电缆和交联电缆的投资大致相当。

1.2.2 电缆截面的选择

1.2.2.1 选择原则

直流电缆导体截面的选择是工程设计中的重点。电缆在运行时，当通过的长期负载电流达到稳态后，电缆各部分结构中产生的损耗热量向周围媒质散发，由于热阻的存在，这些部分的温度升高。当温度升高到电缆最高允许长期工作温度时，该负荷电流称为电缆的长期容许电流。电缆的长期容许电流是选择电缆截面的依据，如果电缆的长期容许电流大于或等于电缆的长期工作电流，则所选电缆截面满足系统输送容量的要求。

1.2.2.2 电缆载流量的计算方法

对于直流电缆，由于不存在交变电磁场，绝缘损耗可忽略，金属护套上不会产生损耗，其损耗主要是线芯的电阻损耗。因此，直流陆地电缆额定载流量计算公式：

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta_c}{R' \cdot (T_1 + T_2 + T_3)} \right\}^{0.5} \quad (1-1)$$

式中 I ——导体中流过的电流 (A)；

$\Delta\theta_c$ —— $\Delta\theta_c = \theta_c - \theta_0$ ，高于环境温度的导体温升 (°C)；

θ_c ——导体工作温度 (°C)；

θ_0 ——环境温度 (°C)；

R' ——最高工作温度下导体的直流电阻 (Ω/m)；

T_1 ——一根导体和金属套之间单位长度热阻 ($\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$)；

T_2 ——电缆外护层单位长度热阻 ($\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$)；

T_3 ——电缆表面和周围介质之间单位长度热阻 ($\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$)。

1.2.3 金属护套的选择

高压电缆的金属护套主要有铅套、皱纹铝套、皱纹铜套和铝塑综合护套。铅护套的优点是：①密封性能好，可以防止水分或者潮气进入电缆绝缘；②熔点低，可以在较低温度下挤压到电缆绝缘外层；③耐腐蚀性较好；弯曲性能较好。其缺点是机械强度低、抗蠕变性差，不适合在振动或压力较大的情况下使用，另外铅的密度大，直流电阻率高，允许通过的短路电流小。铝护套的优点是机械强度高、直流电阻小、允许通过的短路电流大，由于铝的密度小，因此电缆的重量明显小于铅护套；但是与铅护套相比，铝护套的缺点是电缆外径大、装盘长度短、耐腐蚀性差、不易弯曲。铝塑综合护套电缆除外径小和重量略轻于皱纹铝套电缆外，没有其他优点，缺点是密封性差。另外，由于铝塑敷设层与外护套之间的摩擦系数较小，电缆在敷设过程中容易起皱，甚至会产生破裂，因

此铝塑综合护套电缆不适合直埋或应用在湿度较大的环境。皱纹铜套电缆与铅套电缆相比重量轻,允许短路电流大,与皱纹铝套电缆相比耐腐蚀性较好,但造价较高,一般不采用铜套电缆。综上所述,直流陆地电缆一般采用皱纹铝套,但在腐蚀严重的海边区域常采用铅护套。

1.2.4 非金属外护套的选择

电缆的外护层材料主要有聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)两种。按其密度和分子结构不同,聚乙烯(PE)又分为线型低密度聚乙烯(LLDPE)、低密度聚乙烯(LDPE)、中密度聚乙烯(MDPE)和高密度聚乙烯(HDPE)。LLDPE和LDPE可以用于较轻的通信电缆,若用于高压电缆,在敷设时容易受到机械损伤。PVC是一种极性材料,该材料的绝缘电阻较低,而PE材料是非极性材料,该材料的绝缘电阻远高于PVC。而PVC外护层的主要优点是具有阻燃性能,较适合明敷于电缆隧道中;PE外护层的机械、电气和防水性能均优于PVC,但阻燃性能不佳,适合于直埋、浅沟、穿管敷设。根据PE系列的机械性能比较:LLDPE<LDPE<MDPE<HDPE。

考虑防蚁措施,目前陆地电缆的外护套普遍添加防蚁护层,采用双层护套结构,其中内层护套采用高密度聚乙烯材料,外层护套采用“退灭虫(Termigon)”或“退敌虫”防蚁护套。

1.3 金属护层冲击过电压

金属护层冲击电压的计算方法主要有波阻抗耦合法和电容耦合法,下面就这两种算法分别进行论述。

1.3.1 波阻抗耦合法

GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》提供了计算金属护层冲击电压的波阻抗耦合法,该方法通过架空线路波阻抗、海底电缆导体与金属护层之间波阻抗和金属护层与大地之间波阻抗的耦合作用,计算金属护层产生冲击电压。规范中分两种接地方式计算金属护层冲击电压。

(1) 金属护层首侧接地、尾侧开路。冲击电压的最大值出现在开路端,其峰值 U_s 可按下式进行计算。

$$U_s = 2E \frac{RZ_{se}/(R + Z_{se})}{Z_o + Z_c + [DZ_{se}/(R + Z_{se})]} \quad (1-2)$$

式中 E ——雷电过电压侵入波幅值, kV;

Z_o ——架空线波阻抗(Ω),一般为400~600 Ω ;

Z_c ——电缆导体与金属护层之间的波阻抗, Ω ;

Z_{se} ——电缆金属护层与海水(大地)之间的波阻抗, Ω ;