

# 地下输电

*Disceia Skudian*



# 地下输电

B·M·Weedy 著

黄咏才 李桂中 黄柏 译

华明 光铎 校

张宗鑫 游国权 卢延岳 审

(封面设计 杨时青)

广西电机工程学会

## 出 版 前 言

由于我国高压与超高压电力网不断地扩大与发展，高压输变电系统深入引进城镇或市区后而出现与城市建设、公共福利事业建设及旅游业建设的矛盾日益突出；又因高压与超高压交流输电线路和直流输电线路跨越电气化铁道、现代化高速或立体交叉公路、重要的通航河流与海峡，以及交、直流输变电系统的引进、引出及其系统间的联络线，都成为今后需要认真解决的实际问题。因此，为适应高压与超高压电力网和现代化城市建设等方面迅速发展的需要，本学会根据最新英文原版本组织有关工程师翻译“地下输电”这一科技读物，同时并特请科技、学术界权威人士审译，以奉献给广大从事电力工业建设的科技人员及其有关读者们参考使用。

“地下输电”的第一、二、三章系由黄咏才同志翻译，第四、五、六、七章由李桂中同志翻译，第八章由黄 柏同志翻译。华明同志校译了第一、二、三、八章，光铎同志校译了第四、五、六、七章。

因水平所限，经验不足，以及时间仓促，译文不当之处在所难免，望读者与各界的电机工程学会会员们提出宝贵意见与指正。为此，致以衷心感谢。

广西电机工程学会

一九八六年六月

## 序 言

鉴于反对架空线路的社会压力日益增加，使人们对进一步改善常规电缆、探索和开发新型地下线路引起了浓厚的兴趣。因此，在本书中，作者试图论述电缆系统设计与安装的理论基础，及其在实际工程中的应用。本书内容基本上是针对公用事业公司和顾问公司方面的读者，而不是针对制造厂家，所以在电缆制造方面未作详细介绍。为此，作者希望本书能成为输配电工程师们的一本具有实用价值的读物。

目前地下输电的远景还不很清楚。但近年来电力消耗增长率的下降，特别是在欧洲，很可能推迟了诸如超导电缆等大电力电缆的使用时间。但是，从长远观点看，随着石油和天然气的日益枯竭，电力的使用将必然日益增加，从而需要大量使用地下输电。

作者谨向供电部门和制造厂的朋友们致以谢意，感谢他们多年来一直鼓励我对地下输电的研究。

B. M. Weedy

1979年于南安普敦

# 目 录

## 出版前言

## 序 言

### 第一章 绪 论

- 第一节 简 史..... ( 2 )
- 第二节 常规电缆系统..... ( 3 )
- 第三节 安 装..... ( 7 )
- 第四节 芯线与外皮..... ( 10 )
- 第五节 接头与终端装置..... ( 14 )
- 第六节 电力系统中电缆的电气特性..... ( 15 )
- 第七节 架空线路..... ( 18 )
- 第八节 今后的发展..... ( 23 )
- 第九节 小 结..... ( 25 )

#### 参 考 文 献

### 第二章 高压绝缘

- 第一节 概 论..... ( 27 )
- 第二节 固体介质的击穿问题..... ( 27 )
- 第三节 液体击穿..... ( 28 )
- 第四节 气体击穿..... ( 28 )
- 第五节 油浸渍纸绝缘..... ( 29 )
- 第六节 合成绝缘..... ( 35 )
- 第七节 局部(电晕)放电..... ( 37 )
- 第八节 挤压绝缘中的树枝状击穿..... ( 40 )
- 第九节 同轴电缆中的应力..... ( 42 )
- 第十节 绝缘系统的寿命..... ( 44 )

#### 参 考 文 献

### 第三章 热特性与额定电流

- 第一节 温度与热流计算的基本概念..... ( 54 )
- 第二节 热 阻..... ( 56 )
- 第三节 土壤特性..... ( 58 )

第四节	散热方式	( 60 )
第五节	损 耗	( 61 )
第六节	额定稳态电流	( 63 )
第七节	瞬态运行条件下的温度计算	( 63 )
第八节	整装电缆的人工冷却	( 74 )
第九节	管装电缆的人工冷却	( 79 )
第十节	隧道电缆与竖井电缆	( 81 )
第十一节	附 件	( 85 )
第十二节	计算机的应用	( 86 )

### 参 考 文 献

## 第四章 常规交流电缆系统

第一节	高压充油(管装)系统	( 93 )
第二节	低压充油整装系统	( 95 )
第三节	挤压介质电缆	( 98 )
第四节	管装电缆系统与整装电缆系统比较	( 100 )
第五节	整装电缆的电气特性	( 100 )
第六节	管装充油电缆的电气参数	( 107 )
第七节	不平衡故障的瞬态反应	( 110 )
第八节	接头与终端装置	( 115 )
第九节	力	( 119 )
第十节	充油电缆的远景发展	( 122 )

### 参 考 文 献

## 第五章 直流输电电缆

第一节	概 论	( 129 )
第二节	稳定运行时的电应力分布	( 131 )
第三节	瞬态运行的电应力分布	( 133 )
第四节	电应力计算	( 133 )
第五节	击穿参数与试验要求	( 137 )
第六节	电缆及其附件类型	( 139 )
第七节	水底电缆	( 141 )
第八节	漏泄电流	( 143 )
第九节	小 结	( 143 )

### 参 考 文 献

## 第六章 压缩气体绝缘电缆

第一节	概 论	( 147 )
第二节	击穿特性	( 148 )
第三节	SF <sub>6</sub> 电缆可定位器设计与击穿	( 154 )
第四节	三芯电缆	( 155 )
第五节	电应力的确定	( 157 )
第六节	安装与温度问题	( 159 )
第七节	额定电流计算	( 161 )
第八节	其它气体	( 164 )
第九节	设计与经济问题	( 164 )

### 参 考 文 献

## 第七章 低温电缆

第一节	概 论	( 168 )
第二节	超导体	( 169 )
第三节	绝热—低温封皮	( 172 )
第四节	致冷系统与冷却系统	( 173 )
第五节	介 质	( 175 )
第六节	超导电缆设计	( 179 )
第七节	建议采用的超导电缆	( 180 )
第八节	电阻(低温电阻)电缆	( 184 )
第九节	故障电流	( 185 )
第十节	终端装置	( 186 )
第十一节	低于环境温度的其它冷却剂	( 186 )
第十二节	小 结	( 187 )

### 参 考 文 献

## 第八章 成 本

第一节	概 论	( 192 )
第二节	损 耗	( 193 )
第三节	美国的方案比较	( 193 )
第四节	英国与德国线路比较	( 196 )
第五节	高压直流电缆	( 199 )
第六节	非常规系统	( 199 )
第七节	今后的发展	( 200 )

### 参 考 文 献

附录一	标准与规范	( 203 )
附录二	符号一览	( 204 )

# 第一章 绪 论

经验表明，地下输电线路的基建费用，与其电压等级有关，为同容量架空线路的几倍。但是这些比较是在一些特定线路，特定环境的基础上进行的，应该持以某种谨慎态度对待。地下输电线路基建费用昂贵，有一个原因是不难理解的，就是架空线路的绝缘主要是空气，它是一种极为廉价的商品。相反，地下电缆则必须采用人造连续绝缘。

在地下电缆中，对装有高压芯线的绝缘外皮要求尽可能的薄，其理由是显而易见的。这意味着要求高水平的制造工艺，从而使价格昂贵。此外，地下电缆的安装敷设费用也是很高的。这自然导致各方面几乎都反对常规地下线路。芯线中所产生的热量，都得按绝缘和土壤顺序所组成的途经散射，而绝缘材料与土壤却都有很高的热阻。同时，常规绝缘材料若因损耗所造成的最高温度超过某一数值时，其有效的使用寿命就变得很短，很不经济。这就要求限制容许损耗，从而要求限制电流。相反，架空线路却能十分有效地直接散热到空气中。

地下电缆的生产技术，必要保证以下几点：

- 1、有最经济的良好绝缘，使用这种绝缘的电缆能用电缆卷筒，或电缆盘运输，即具有可行的曲率半径。

- 2、有适当的载流能力，这取决于安装技术和传热特性。

- 3、有各种设计方案。这些方案尽管与同容量的架空线路相比仍然较贵，但对于能在各种环境下从事安装的公司来说，却有足够的吸引力，而且在必须采用地下电缆的市区，还可以降低费用。

其实，单回路架空线路在乡村的进展，特别是对电气工程师及其有关人员，具有一定的吸引力。但是随着多回线路的出现，而且更敏感的是，当人们一见到大量线路从四面八方汇集于大型变电站时便产生一种厌恶、恐怖情绪，这种吸引力也就马上消失了。或许认为这是一个涉及到个人的问题，但是有人提出——这似乎有点无聊——在“未来的地下时代”，输电线路的铁塔将成为多余的，会象目前英国和其他地方的一些古代风车一样，由文物保护单位作为珍贵文物加以搜集和保存。然而公众，特别是市郊群众，现在非常强烈的、有组织的反对这种难看的架空线路，以致成为建设输电线路应具备的条件中的一个主要因素。目前，地下电缆主要是用于城市和市郊，以及跨越水域，机场和公路下面等有特殊要求的地方，长度一般不长。在英国，已出现相当大量的地下线路，在一些大城市的周围，都存在着主要输电电压的地下环形线路，从此由低压电缆（在伦敦为66千伏）馈入市区。

在一些主要电力系统的远景发展中，可能在远距大城市的一些巨型机组或大型电厂（1000万千瓦以上）集中发电，结果为满足环保要求，需要采用大容量地下电缆，由发电厂连接到一定距离的架空输电系统。相反，在城市及市郊，则将从主要的架空输电系统用地下电缆供电。地下线路的最终输电容量可达500~1000万千瓦，输电距离可达80公里（50英里）或80公里以上。很可能大型发电厂最终由直流联络线连接（为避免发生稳定问题和其它问题），联络线长度可达数百公里，输电容量可达数百万千瓦。



将来特高压架空线路的环境问题是众所周知的，完全有可能由于线路走廊或现有走廊通行权的限制，不得不使用先进地下线路。在具有许多卫星城的大城市里，由于其它公用设施，例如供气和供水的容量也必然增加，人行道下面用于地下电缆的空间在不断减少，整个大城市的电力输送将日益出现问题。这个问题的严重程度可以由下列事实看出：目前纽约市的装机容量大约为2000万千瓦。虽然在70年代电力增长率有所下降，但从长远来看，由于石油和天然气的短缺，可能使电力大幅度增长。在北美由于气温高时广泛使用空调，一直引起输电负荷高峰，各种不利事件都可能同时出现。

本书的目的，是讨论地下线路大容量输电的有关技术问题。除第五章讨论直流输电外，其余各章均讨论交流输电问题（除非另有说明）。对于常规系统，即经过考验证明在工业上有用的系统也给予适当注意。此外，对新型电缆，例如压缩气体绝缘电缆和低温电缆也都进行了讨论。

## 第一节 简 史<sup>(1)</sup>

绝缘线第一次用于电报可追溯到十九世纪上半叶。十九世纪80年代，美国的爱迪生和伦敦的法拉第差不多同时把地下输电绝缘线首先用于电力照明系统。当时，电缆是刚性的，由缠绕黄麻绝缘的铜棒组成。这种刚性系统，虽有一定的可靠性，但由于需要大量接头和叠合，问题很多。并且这种刚性系统的导线，不能盘绕在线盘上。

随后，法拉第决定采用新的绝缘方式——用地腊浸渍纸绝缘（地腊是一种制造蜡的副产品）。于是在这种电缆中，出现了现代纸带形式。法拉第的10千伏电缆，系由两个同心的黄铜管（芯线）组成，相互间用浸渍纸绝缘，管径分别为20.7毫米和49.5毫米。为了满足通讯当局的要求，法拉第被迫在电缆外管（外皮）上又缠绕了几层浸渍纸，然后装入铁管。这条线路长达7.5英里，敷设了4条电缆，共计7000个接头。在运行42年之后，只有相当少数几个接头发生过故障；以及由于需要提高电路电流只更换了一条电缆。继刚性电缆之后，绞线软电缆得到迅速发展，1898年绝缘的最大电应力达2.1千伏/毫米（单相电缆）。当时研究出许多绝缘材料，包括纸、棉花、马来橡胶、硫化沥青和橡胶等，并都付诸使用。1897年在布法罗（纽约）安装了11千伏硫化橡胶绝缘电缆，1900年在圣保罗和明尼阿波利斯安装了25千伏硫化橡胶绝缘电缆。1935年在10千伏（单相电路）上使用了真空干燥的油浸渍纸和热油浸渍纸绝缘电缆。

美国早期电缆常敷设在管道内，因为美国立法规定只允许一个管理机构在市区开挖沟道。在这种情况下，使用了单芯橡胶绝缘电缆，因为这种电缆的柔性比纸-油型电缆大。这种情况一直影响到今天。目前美国采用单芯合成橡胶绝缘电缆，比英国采用能直接埋在沟道内的纸-油型绝缘电缆要广泛得多。

在低压方面，使用了油浸渍（整体浸渍）纸绝缘电缆（实心型）。这种电缆往往在一层外皮（护套）内装有三根芯线，这三根芯线都是多股绞合线，分别绝缘，然后一道捻成螺旋状。绝缘芯线周围和绝缘芯线之间的空隙均填塞纸或黄麻，以形成圆形表面，然后再用一层

绝缘层缠包。这种电缆的外皮可用钢线铠装，因为后者只产生小量感应涡流，而采用单根芯线时，电缆损耗严重，增加阻抗。这种电缆叫做“钢带”式铠装电缆（参见图1.1）。但三芯电缆在纸绝缘层表面的切线方向常产生大的电应力，而这个方向的绝缘强度最弱。为克服这一缺点，常在每根芯线上缠绕一层敷金属纸层，把三芯电缆在电气上变为三根单芯电缆，后者的电应力方向完全是径向的。这种结构是霍斯塔特（Hochstadter）设计的，叫做H型电缆。当系统电压增大到33千伏以上时，这种实心油浸纸绝缘电缆的各个部分因在荷载周期内发生热量导致不同程度的伸缩，使绝缘层产生空隙（小气穴），故易遭受击穿。这些空隙中的电应力很大，可产生局部放电，形成高温，使绝缘纸烧焦，最终甚至完全击穿。

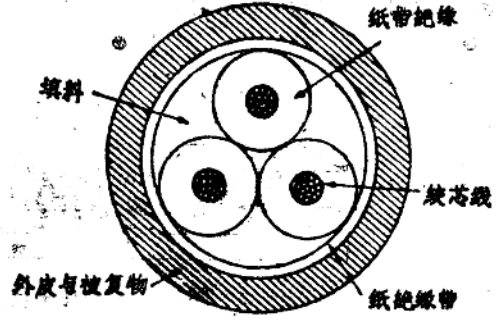


图1.1 三芯铠装电缆

## 第二节 常规电缆系统

电缆自然应配合输电系统，承受网络功率和各种电压等级。电网在某一电压时可能扩大，以适应负荷需要量的增长，但完全可能因短路水平较大，又没有恰当电厂来解决而最终受到限制。因此，在原来电网上扩大相应的电网，就必须采用新的电压。采用较高电压的另一因素，是线路走廊的获得日益困难。若某一线路（或电缆）的电压越高，则输送的功率就越大，所需的回路就越少（参见第一章第七节）。

在英国，干线的电压通常为400千伏，有些则为275千伏。近年来132千伏电网作为配电网，在某些国家大概叫做“次”输电网。对于电缆，有时采用66千伏，特别是伦敦电网采用66千伏。在欧洲大陆大多数干线的电压为400千伏或220千伏，其次为225或245千伏、145千伏和72.5千伏。北美最高输电电压为765千伏，以下依次为500千伏、345千伏、230千伏和138千伏。

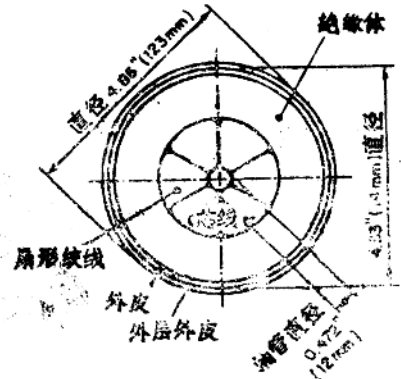


图1.2 低压充油整装电缆断面  
(铜芯面积为2000平方毫米)

上节所述的整体浸渍电缆方面的难点已被压力充油电缆所克服。1926年意大利

伊曼纽利 (Emanuelli) (2) 采用了整装低压充油 (LPOF) 电缆, 这种电缆至今仍广泛使用, 在图1.2上示有这种型式的275千伏电缆剖面, 图1.3则为其直通接头。

在充油电缆中, 芯线中央的空心部分充以绝缘油, 由沿线路的供油油槽维持其油压。当电缆负载而发热时, 电缆中的绝缘油就排入油槽, 反之亦然, 从而避免产生空隙。在压气电缆中, 处于外皮内部压缩介质的氮气压力常保持到几个大气压力不变, 所以能防止空隙形成。

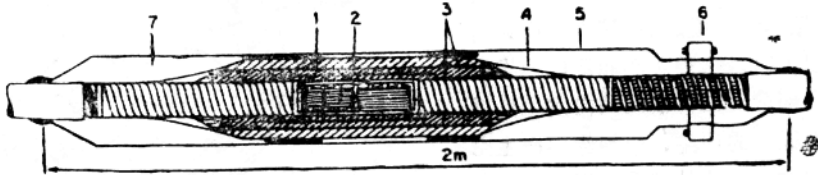


图1.3 275千伏整装充油电缆的直通接头

- (1) 套圈 (2) 应力控制电极 (3) 环氧树脂铸件  
 (4) 纸绝缘 (5) 铜套管 (6) 交叉屏蔽接地绝缘子  
 (7) 绝缘油

在美国, 纸/油绝缘芯线安装在充满绝缘油的硬管中, 不需要在芯线中设置油管。在美国为了直埋整装LPOF电缆而把电缆沟打开一段时间有困难, 导致了管装充油电缆的应用。这种电缆中的三根纸带绝缘芯线, 是由沿途每隔一定距离设置的进入孔牵入原已埋好的管道中的(断面见图1.4和图1.5)。在芯线敷设好了以后, 在管道中充以绝缘油, 充油压力维持在1.38兆牛/平方米(200磅/平方英寸)。这种电缆就叫做高压充油管装电缆(HPOF), 目前在美国和其它地方广泛使用。管道长度通常为20米(60英尺), 采用垫环在现场焊接。安装时, 要十分小心, 以防止水分进入管道; 白天收工时, 管道应加密封, 充以干燥气体。装有绝缘芯线的电缆盘在工厂发货时也应加密封。管装电缆必须在旱季进行, 做电缆头时要求精确、清洁, 严格遵守温度和湿度规定。

低压充油(LPOF)整装电缆应在厂内全部完工, 并加以密封, 充油之后才进行运输, 油压约为1个大气压。

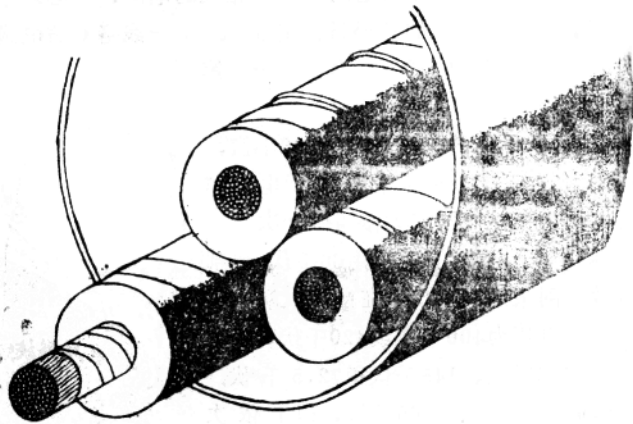


图1.4 高压充油管装电缆透视图

今后防止穴隙形成的方法是使用惰性气体，例如氮，它能对纸质介质施加压力。其基本形式有两种。

(1) 外压气电缆，其中气体用薄膜与油浸渍介质隔离，一般铅皮电缆采用聚乙烯薄膜。电缆装入压力容器内，这种容器既可以是钢管，也可以用金属加固的铅皮组成。

(2) 内压气电缆。在这种电缆中，气体是装入铅皮内，与介质接触，因而可抑制离子化。

这两类电缆的气体(氮)额定压力为1.38兆帕(200磅/平方英寸)，最大压力为1.725兆帕(250磅/平方英寸)，芯线的最高温度为85℃，最大应力为11千伏/毫米(280伏/密耳)。上述电缆均已用于275千伏系统。

在欧洲，广泛应用低压充油(LPOF)系统，主要采用三条独立的整装电缆。

有时在132千伏及132千伏以下系统中，三条绝缘芯线使用一个护套。这种电缆都埋入电缆沟内，电缆周围回填特定土壤，然后再用当地土壤回填。目前使用的LPOF电缆，其最大电压为500千伏<sup>(6)</sup>。在大容量电缆中，结合水冷可增加额定电流。在英国，地下输电线路(主要为LPOF电缆)长度所占比例示于图1.6。

在美国，管装电缆实际已代替整装充油电缆，这一点从图1.7可以看出。1964年在纽约市敷设了第一条345千伏管装电缆，长达24公里。这种高压充油(HPOF)电缆的优点是绝缘芯线较长，例如138千伏时一般长约800—1000米，345千伏时，长600米。这种电缆可以盘绕在线盘上。

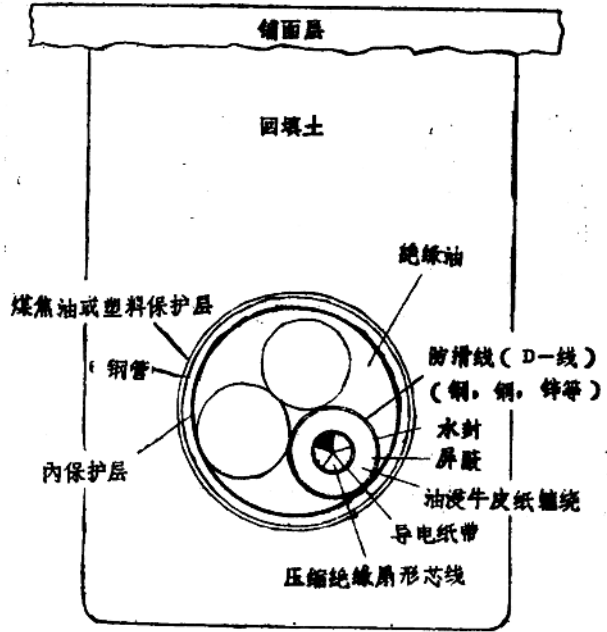


图1.5 敷设在电缆沟内的管装电缆剖面

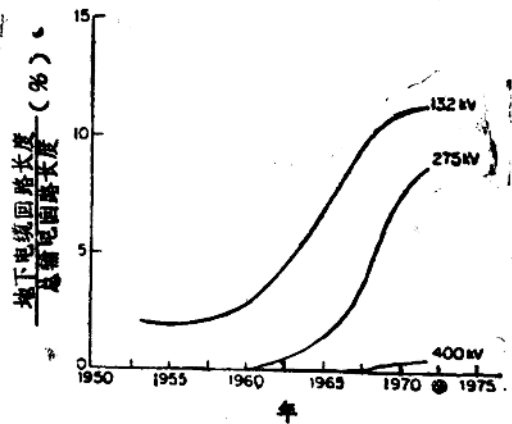


图1.6 英国输电线路长度百分比

另一种电缆采用聚乙烯固体挤压绝缘，但在电压较低的输电线路（138千伏）使用不多。它的优点是连接简单，装卸容易，不要求昂贵的附件。在图1.8上示有美国采用这种绝缘时电压等级不断提高的情况。遗憾的是，绝缘问题的进展不如电压等级提高得快。其困难在于绝缘体挤压时造成穴蚀，同时还夹带外来物质，易于击穿。目前为把电压提高到230千伏及230千伏以上，正在加紧进行研究。

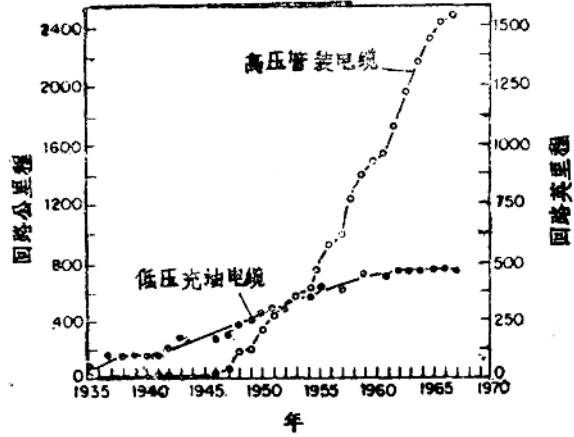


图1.7 美国（69~345千伏）地下输电电缆

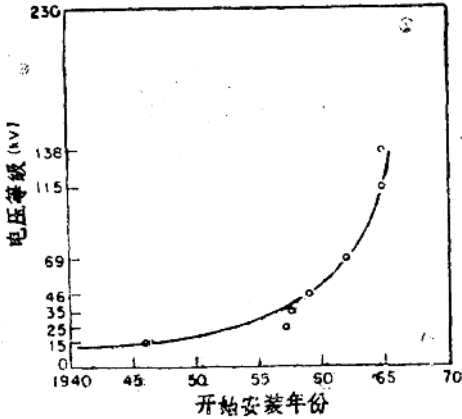


图1.8 各种电压等级的聚乙烯绝缘电力电缆首次敷设日期

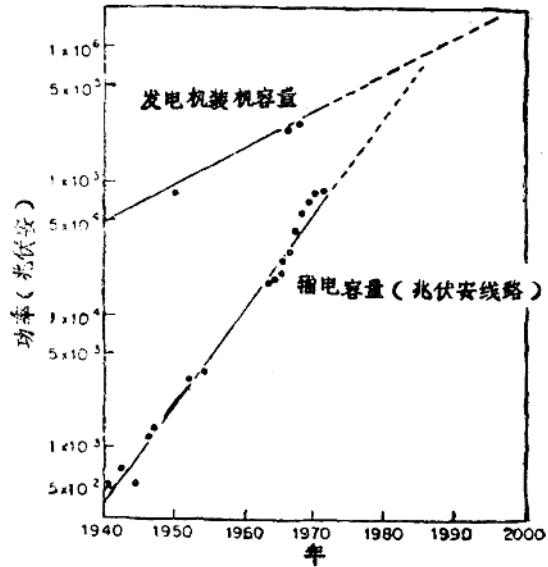


图1.9 西半球地下输电线路（兆伏安×线路数）及发电容量各年对比图<sup>(8)</sup>

虽然整体浸渍（非排泄）实心纸/油绝缘电缆，因在穴蚀中有局部放电（电晕）活动，受很大限制，但仍然广泛用于配电网和充油电缆安装运行都有困难的水下联络线。当前这些水下联络线均采用直流，以减少电晕活动。在编写本书时，在英国本土上已敷设了一条直流电缆，采用LPOF系统，电压为±266千伏。地下输电线路在西半球的发展状况示于图1.9、1.10、及1.11。应当指出，图中所引用的数字均根据1973年的统计资料，并不反映1974年开始的需求量下降后的情况。

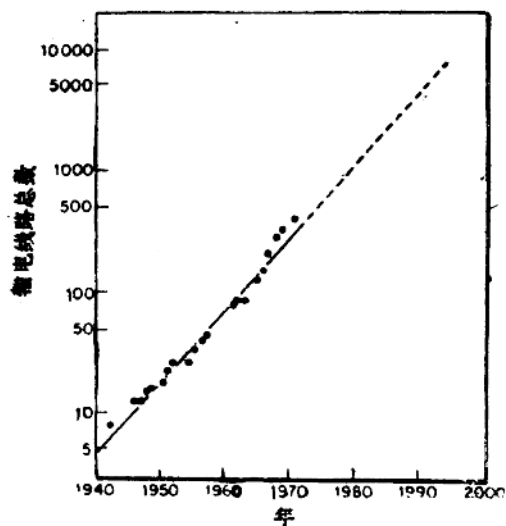


图1.10 西半球地下输电线路总数(47—345千伏)<sup>(8)</sup>

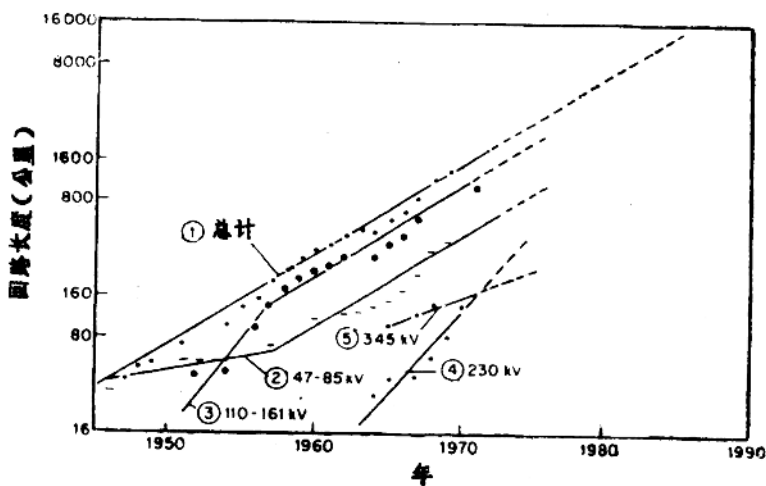


图1.11 西半球地下输电线路累计长度<sup>(3)</sup>

### 第三节 安 装

虽然本节的目的,不是详细探讨土木工程方面的问题,但是因为土建费用在电缆工程中具有重要意义,所以这里将简要地叙述一下。目前地下电缆的敷设方法很多,例如明挖法,挖沟法,开槽法,水平钻孔法,顶管法和开挖隧道等<sup>(3)(6)</sup>。明挖电缆沟的尺寸取决于电缆

类型和回路数目。例如常规的管装电缆（115千伏到345千伏）的沟宽要求0.5到1米以上，深约1米。一般明挖电缆沟的费用与土方开挖量有关。在城市，如果清理现有设施困难，则问题就很复杂。

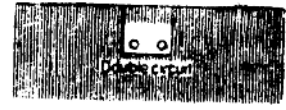
城市电缆沟的挖掘（采用机械开挖），一般采用反铲机，挖掘机，或挖掘平整机。前两种机械一次可开挖宽度1米，后一种机械一次可开挖2米（6英尺）宽。日最大进尺，城市为25米，市郊为60—100米。挖掘机最好是用于障碍物很少的地段，但通常要求在沟道两侧地面有几英尺空地。电缆沟的一般断面示于图1.12。

在城市，特别是北美城市，广泛使用地下管道。无论LPOF整装电缆，还是挤压绝缘整装电缆都可以牵入管道。使用管道时，可使要打开一定时间的电缆沟的长度最小，因为在管道之上的道路等等在电缆开始安装以前就应恢复正常。管道一般采用瓦管、纤维管、石棉管、水泥管、混凝土管或塑料管，目前以聚乙烯塑料管使用最为普遍。沟底到电缆的最小距离一般为150毫米，电缆上的复土厚度约为1米。

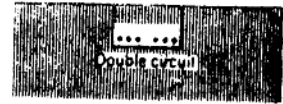
小直径电缆隧道（例如1米以下），一般用于公路和铁路下面或其它特殊情况。大直径隧道则用于跨越河流或港湾。后者安装费用很贵，除非结合交通或其它设施。有时电缆线路不长时，也可以安装在地面以上例如桥梁等结构物上，或者安装在公司所有的土地上。

河港，海湾等水下跨越通常是必不可少的，而且长度往往相当长，例如长达3公里。电缆敷设在河（海）底，或者敷设在随挖随填的水底沟道内。在电缆牵引入管道以前，对HPOF管装电缆要求配重，以便减少管道浮力。在安装好的管道内芯线能牵入的最大连续长度约为2000米。在图1.13和图1.14上示有用LPOF电缆作水下联络线的断面和布置情况。

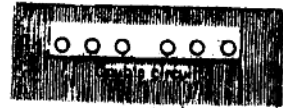
为了便于电缆安装和电缆连接，要求沿下输电线路路径每隔一定距离设置各种拱顶地下室，进入孔，或电缆连接室。进入孔由混凝土或钢筋混凝土建成，必须能支承人孔以上土壤和交通车辆等的压力。一般尺寸，高2米，内宽达2米，长达10米。图1.15为进入孔透视图。管装系统的主要安装部件示于图1.16。安装方法对环境的影响在参考文献9中有详细叙述。



(a)



(b)



(c)

图1.12 地下双回路一般电缆安装形式

(a)HPOF管装电缆(b)挤压和LPOF整装直埋电缆(c)压气绝缘电缆

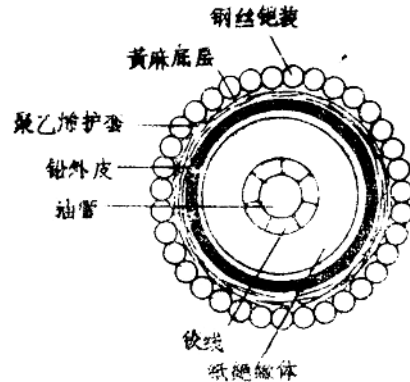


图1.13 长岛海峡水下联络线的电缆剖面

(应用138千伏、300兆伏安、60赫LPOF整装电缆)

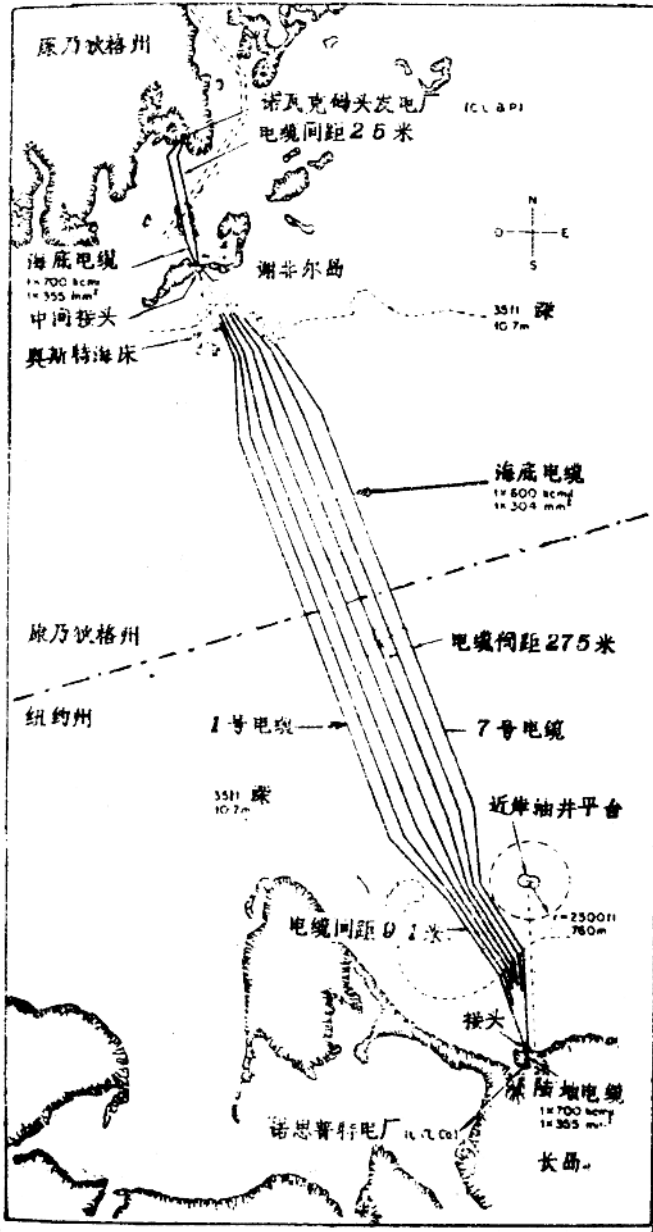


图1.14 长岛海峡138千伏水下联络线

(共7条电缆, 其中一条为备用线)



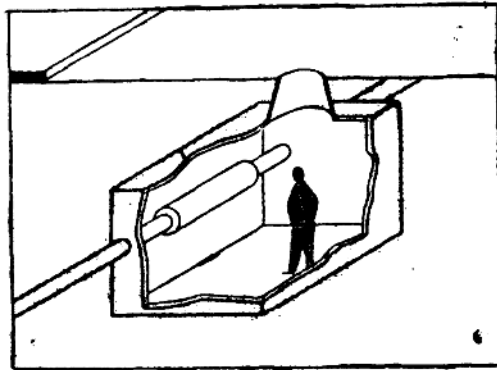


图1.15 管装电缆用的进入孔透视图

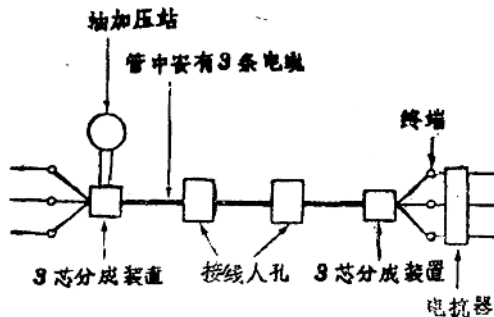


图1.16 HPOF管装充油系统主要部件

## 第四节 芯线与外皮

### 芯 线

各种芯线材料及其特性列于表1.1。乍看起来，钠芯线固然有许多可取之处，但目前普遍应用的仍是铜芯线与铝芯线。大型铜芯线有很多优点。在图1.17上对各种电缆芯线（芯线

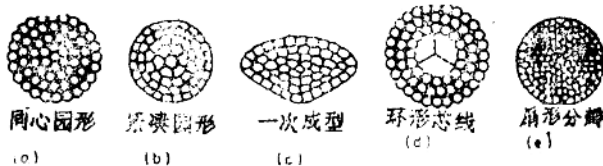


图1.17 电缆电线形状与规格比较

有效面积为507平方毫米。(a), (b), (e)用于单芯电缆；(a), (c)用于三芯电缆，(d), (e)用于大电流情况（集肤效应较小），(e)各股彼此绝缘。