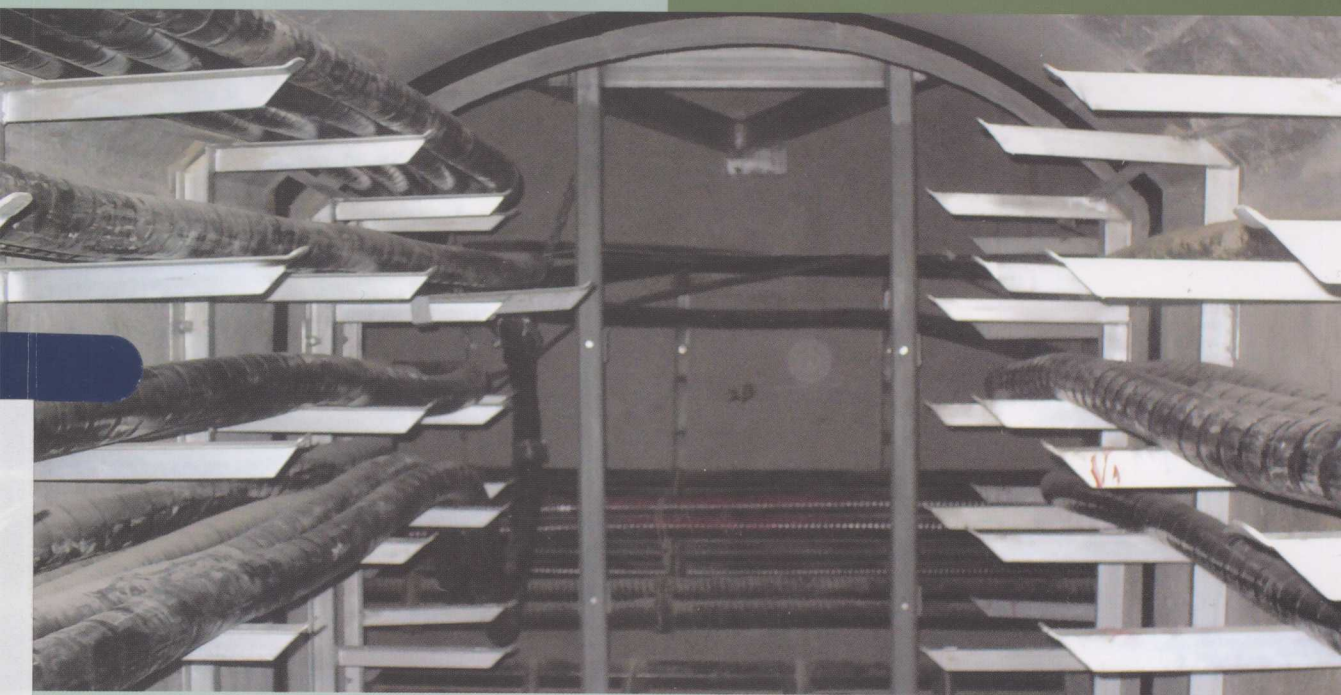


高压交联聚乙烯电缆线路

设计计算

张晓东 陈永进 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

013071093

TM247
10

高压交联聚乙烯电缆线路 设计计算

张晓东 陈永进 编著



北航

C1680212



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TM 247

10

0130170310

内 容 提 要

本书为使电力工程中高压交联聚乙烯电缆线路的设计安全适用、经济合理，且便于施工维护而编写的。本书依据 GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》和 DL/T 5221—2005《城市电力电缆线路设计技术》规定，对需要进行的基本计算及其方法进行比较系统的介绍。全书共 12 章，对高压单芯聚乙烯电缆的产品特点以及选型原则进行介绍，对电气试验标准方法进行了基本阐述；也介绍了电缆线路路径的选择原则、电缆线路的防火措施。

本书主要供电力系统和电力生产厂家技术人员学习使用，特别适用于电力设计部门中从事电力电缆线路设计的工程技术人员，也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

高压交联聚乙烯电缆线路设计计算 / 张晓东, 陈永进编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-5170-1219-1

I. ①高… II. ①张… ②陈… III. ①高压电缆—交联聚乙烯电缆—线路工程—设计计算 IV. ①TM247

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第202368号

书 名	高压交联聚乙烯电缆线路设计计算
作 者	张晓东 陈永进 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着城市化建设加快，输变电工程建设可利用的土地资源越来越紧张，高压架空输电线路路径由于占地较宽、面积较大，路径的取得越来越困难。电缆输电与架空输电线路相比在节省土地资源、美化环境、线路走廊容易取得等方面有着明显的优势。目前电缆输电线路发展迅速、规模也越来越大，因此，电缆输电必将成为城市重要的输电方式。

电缆线路设计技术性强，设计质量的好坏直接影响到工程的安全可靠运行、使用寿命和建成能否发挥效益的关键。目前有关高压交联聚乙烯电缆线路的设计和计算方面的书籍很少，缺少系统性介绍电缆工程设计方面的资料，很难全面满足工程设计人员的设计需求。本书是作者根据 DL/T 5221—2005《城市电力电缆线路设计技术规定》所要求的计算项目，结合自己近 20 年的设计经验编著而成。

本书写作过程中，承蒙广东韶关供电局陈永进大力支持，为本书的编写提供了大量资料，广东岭南电缆厂技术部刘和平部长、青岛汉缆陈佩云总工程师审阅本书第 1、2 章，长沙电缆附件厂郭长春总工程师审阅第 3 章，惠州电力设计院向光燕工程师审阅了第 5 章，并编写第 5 节，武汉大学江日洪红教授编写了第 5 章第 7 节，青岛汉缆陈佩云总工程师审阅本书第 7、9 章，广东惠州供电局试验所谢兵平编写了第 12 章。其他章节由陈永进审阅。

惠州电力设计院的向光燕、蔡建龙、巫剑光、周启波、伍伟建对本书的写作内容和深度提出许多宝贵意见，也是为了回答他们的提问编著成此书。同时，云南红河电气设备有限公司、昆明银溪电器设备有限公司、昆明地平电力工程设计有限公司资助本书的出版，在此一并致谢！

由于作者水平所限，书中错漏和谬误之处在所难免。请读者批评指正！

作者

2013 年 8 月

于春成

目 录

前言

第 1 章 交联聚乙烯电力电缆	1
1.1 电力电缆分类	1
1.2 交联聚乙烯电缆的特性	2
1.3 交联聚乙烯电缆制造工艺	2
1.4 电缆性能监测主要试验项目	5
第 2 章 电力电缆本体的选择	12
2.1 电力电缆绝缘水平的选择	12
2.2 高压电力电缆结构	13
2.3 高压电力电缆产品简介	18
2.4 电力电缆导体及结构选择	21
第 3 章 电缆附件的结构原理及其选择	24
3.1 概述	24
3.2 电缆接头及终端结构原理	24
3.3 电缆附件的基本要求及特点	27
3.4 电缆附件的选用	37
第 4 章 电缆的载流量计算	40
4.1 电缆的正常容许载流量计算	40
4.2 电缆允许短时间过载电流计算	44
4.3 电气化道路电缆芯线截面的选择	46
第 5 章 电缆线路金属护套的感应电压计算	50
5.1 电缆金属护套的连接与接地的作用和方式	50
5.2 正常运行情况下电缆金属护套感应电压的计算	55
5.3 电力电缆的参数计算	60
5.4 电力系统零序电流计算	67
5.5 单芯电缆工频短路情况下金属护套感应电压的计算	72
5.6 大气过电压情况下金属护套感应电压的计算	81
5.7 电缆线路的冲击特性长度	84
第 6 章 电缆护层保护器的选型、安装和金属护套接地	88
6.1 单芯电缆护层保护器的作用和特性	88

6.2	电缆护层保护器的技术要求及其设计	89
6.3	保护器的安装与连接	91
6.4	流经保护器的冲击电流计算	92
第7章	交联聚乙烯电力电缆金属护套的计算	94
7.1	交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面计算	94
7.2	电缆导体及金属套 3s 短路热稳定校验	95
第8章	电缆线路的路径选择	99
8.1	概述	99
8.2	电缆路径方案的内容和一般要求	99
8.3	电缆的敷设方式	100
8.4	电缆线路路基	107
第9章	水底电力电缆(海缆)的敷设	108
9.1	水底电力电缆(海缆)路径的选择及其敷设方式	108
9.2	水底电力电缆(海缆)的结构选择	111
9.3	水底电力电缆的种类和应用范围	115
9.4	水底电力电缆的载流能力和电力传输限制	117
9.5	水底电力电缆订货长度	118
第10章	电缆的敷设计算	119
10.1	电缆工井设计	119
10.2	电缆排管设计	122
10.3	隧道、电缆沟敷设设计	130
10.4	桥梁敷设设计	135
10.5	垂直敷设	138
第11章	电缆火灾威胁的对策	142
11.1	消除电缆本身和外界火源引起电缆着火的措施	142
11.2	防止电缆着火蔓延的措施	143
11.3	限制火灾蔓延的措施	146
11.4	电缆火灾的灭火措施	150
第12章	电缆的交接和预防性试验	151
12.1	电缆试验概述	151
12.2	交接试验项目	151
附录A	电缆线路、变压器和母线波阻抗的测量	164
A.1	试验方法	164
A.2	实际测量结果	165

附录 B 某厂家电缆产品说明和数据	167
附录 C 全国各地区代表性城市八月份平均低温 (资料性附录)	176
参考文献	178
36	1.1
39	1.2
40	1.3
38	1.4
89	1.5
88	1.6
99	1.7
001	1.8
001	1.9
001	1.10
801	1.11
001	1.12
111	1.13
611	1.14
511	1.15
211	1.16
111	1.17
611	1.18
331	1.19
281	1.20
281	1.21
131	1.22
141	1.23
341	1.24
841	1.25
841	1.26
181	1.27
181	1.28
181	1.29
181	1.30
181	1.31
181	1.32
181	1.33
181	1.34
181	1.35
181	1.36
181	1.37
181	1.38
181	1.39
181	1.40
181	1.41
181	1.42
181	1.43
181	1.44
181	1.45
181	1.46
181	1.47
181	1.48
181	1.49
181	1.50
181	1.51
181	1.52
181	1.53
181	1.54
181	1.55
181	1.56
181	1.57
181	1.58
181	1.59
181	1.60
181	1.61
181	1.62
181	1.63
181	1.64
181	1.65
181	1.66
181	1.67
181	1.68
181	1.69
181	1.70
181	1.71
181	1.72
181	1.73
181	1.74
181	1.75
181	1.76
181	1.77
181	1.78
181	1.79
181	1.80
181	1.81
181	1.82
181	1.83
181	1.84
181	1.85
181	1.86
181	1.87
181	1.88
181	1.89
181	1.90
181	1.91
181	1.92
181	1.93
181	1.94
181	1.95
181	1.96
181	1.97
181	1.98
181	1.99
181	2.00

第 1 章 交联聚乙烯电力电缆

1.1 电力电缆分类

电力电缆的基本结构主要由三部分组成：一是导电线芯，用于传输电能；二是绝缘层，其作用是承受电压、限制电场，保证导电线芯电气上与外界隔离；三是电缆护层，其作用是保护电缆绝缘层在敷设和运行过程中免受机械损伤和各种环境因数，如水、日光、生物、火灾等的破坏，使其保持长期稳定的电气性能。

1.1.1 按电压等级分类

- (1) 低压电力电缆 (1kV)。
- (2) 中压电力电缆 (3~35kV)。
- (3) 高压电力电缆 (60~330kV)。

1.1.2 按导电线芯数分类

电力电缆导电线芯有单芯、二芯、三芯、四芯电缆等。

- (1) 单芯电缆多用于传输三相交流电和直流电，高压电力电缆 (60~330kV) 多用单芯电缆。
- (2) 三芯电缆主要用于三相交流电网，中压电力电缆 (3~35kV) 多用三芯电缆。
- (3) 四芯电缆多用于中性点接地的三相四线制系统的低压配电线路，低压电力电缆 (1kV) 多用四芯、二芯电缆。

1.1.3 按绝缘材料分类

电缆绝缘是在导体外层起着电绝缘作用的构件。即保证传输的电流只沿着导体行进而不流向外面、导体上具有的电位 (对周围物体形成的电位差，即电压) 能被隔绝。因此绝缘 (层) 是保证导体正常传输功能，又确保外界物体和人身安全的重要构件。承受长期工作电压及各种瞬间过电压作用，因此具有长期稳定性能的绝缘是保证整个电缆完成输电任务的最重要部分。电缆技术的进步主要由绝缘技术的进步所决定。从生产到运行，绝大部分试验测量项目都是针对监测各种绝缘性能为目的。根据电缆绝缘材料分类，主要有三大类。

(1) 油纸绝缘电力电缆。用纸带缠绕在导体上经过真空干燥后，浸渍矿物油作为绝缘层，并在其上再挤包金属套的电力电缆。油浸纸绝缘电缆电性能非常稳定，20 世纪 50 年代以前，用作电压等级 35kV 及以下的电力电缆线路，而有的油浸纸绝缘电缆运行了 70 年，仍在使用的。它是最广泛使用的电缆，在 1~330kV 各种电压等级中都被采用。

(2) 橡皮绝缘电力电缆。由于橡皮富有弹性，性能稳定，具有较好的电气、力学、化

学性能，多用于电压等级 6kV 及以下的电缆线路。

(3) 塑料绝缘电力电缆。由于石油工业的发展，开发了较多的电性能良好的聚合材料，用它挤压在导体上作为电缆的绝缘，这种电缆不存在油浸纸绝缘电缆的油渍等缺点，而且制造工艺简单，已经逐步取代油浸纸绝缘电缆。按复合材料的不同，挤包绝缘电缆又可分为聚氯乙烯电缆、聚乙烯电缆、乙丙橡胶电缆和交联聚乙烯电缆。多用于电压等级 6kV 及以上乃至 110~220kV 的电缆线路。随着科技的发展，交联聚乙烯电缆因其优越的绝缘性能正日益广泛应用于高压输电线路中。

1.2 交联聚乙烯电缆的特性

交联聚乙烯电缆是采用交联聚乙烯 (XLPE) 作为主绝缘的电缆。聚乙烯 (PE) 是乙烯的共聚物，分子结构呈直链状 (线型结构)，属热塑性材料，在高温高压下容易产生流动，所以耐热性、耐老化性和机械性能较差。交联聚乙烯 (XLPE) 是由聚乙烯 (PE) 加交联剂，经交联反应而生成的。绝缘料采用过氧化二异丙苯 (DCP) 作交联剂，半导体料采用热分解温度较高的过氧化己烷 (DMDBH) 作交联剂。交联剂在高温高压下产生游离基，进而夺取聚乙烯分子中的活泼氢，使聚乙烯分子间产生碳碳 (C-C) 交联反应，这样聚乙烯分子就形成了三维网状结构。交联聚乙烯 (XLPE) 具有网状分子结构，属热固性绝缘材料，在高温高压下不会产生分子的流动，从而改善了材料的物理机械性能。其主要优点如下：

(1) 优良的电气性能：耐电强度高 (长期工频击穿强度 20~35 MV/m，冲击击穿强度 40~70 MV/m)，损耗小 (工频时 $\tan\delta=0.0002\sim0.001$)，介电常数小 (2.3~2.5)。空气的工频击穿强度为 1.7~2.1 MV/m，也是局部放电起始场强。

(2) 耐热性能好 (连续工作温度 90℃)，因而载流量较大。

(3) 不受落差限制，因而对于超高压长距离输电非常有利。

但它也有明显的缺点：

(1) 耐局部放电性能差，受杂质、气隙及水分的影响很大，在这些缺陷处易产生局部电场集中，发生局部放电，造成不可恢复的永久性损坏。

(2) 热膨胀系数大，热机械力效应严重。

所以，交联电缆的生产特别强调纯净，尤其是高压、超高压电缆的质量更是由材料的纯净度决定的。对于交联电缆附件，除了结构设计正确合理外，最重要的问题也是清洁问题 (特别是电缆与附件配套安装时的环境洁净度、温湿度等)，尤其是附件所涉及绝缘界面往往是电场易畸变的地方，一旦有杂质、气隙等，其绝缘性能会显著下降。

1.3 交联聚乙烯电缆制造工艺

1.3.1 交联方法的分类

(1) 物理交联。高能载体为电子辐射、 γ 射线。

(2) 化学交联。过氧化物交联, 交联介质为饱和蒸汽 SCP, 热辐射 PCR、CDCC, 熔盐 LCM, 硅油 FZCV、MCP, 长承模 MDCV。

(3) 硅烷交联。生产方式: 一步法 Monosil、二步法 Sioplase。

1.3.2 交联生产线的布置方式

交联生产线的布置方式有卧式、半悬链式、悬链式和立式。立式在大截面电缆生产中具有较多优点, 故被广泛采用。

1.3.3 立式交联生产线的组成及其优点

1. 交联生产线主要组成

交联生产线主要由挤出机、交联和冷却系统、牵引和收放线装置、辅助系统和控制系统等组成。广东岭南公司交联设备配置了在线应力松弛系统、德国 SIKORA 在线偏心、厚度(冷、热端)自动检测控制系统、SIKORA 绝缘杂质在线检测系统(CSS2)、全密封 100 级加料净化系统、导体预热器、PSU 计算机工艺支持系统及 NCC 工艺计算软件, 是高压交联电缆的理想生产方式。

2. 立式交联生产线的优点

(1) 采用立式布置, 这种方式特别适用 110kV 及以上大截面电缆的生产, 电缆绝缘体圆整度好, 不易偏心(避免了高压、超高压交联电缆在生产过程中由于自垂而导致的绝缘偏芯问题)。在线控制采用了德国 SIKORA 在线冷、热端偏心监控技术, 严格控制了高压电缆的绝缘偏心度, 改善了电缆由于偏心造成的电场畸变。

(2) 采用三层共挤双流道挤出机头, 胶料在机头内流动畅通, 压力均匀, 不会形成死角, 保证了绝缘挤出厚度均匀, 绝缘无焦烧, 内、外半导体屏蔽层与绝缘层紧密结合, 界面凸起尺寸和数量应符合世界上最为严格的 AEIC CS7 美国电缆标准规定。

(3) 该生产线可实现全干法和半干法两种不同的生产工艺, 对 110kV 和 220kV 交联电缆采用全干法交联工艺, 10~35kV 交联电缆根据情况可采用全干法交联工艺, 也可半干法交联工艺。这样就有效地保证了绝缘中微孔和水分的含量。该生产线还配备了导体预热器, 用以除去导体中的潮气、消除绝缘挤出时产生的内应力和提高交联生产速度, 能取得良好的生产效率和经济效益。

(4) 采用了 100 级全密封真空吸料(半导体屏蔽加料装置, 并配有半导体材料干燥装置)及重力下料净化系统(绝缘加料装置)和 1000 级主操作间净化系统, 使材料不与环境空气相接触, 且避免了真空吸料时料粒与金属管壁摩擦产生的污染, 保证了材料的纯净度。在绝缘净化室内还配有尘埃粒子计数器, 根据生产情况随时打印、显示有关净化参数。

(5) 采用了在线应力松弛技术, 即在电缆经过冷却定型后, 给电缆一个再加温过程, 使绝缘材料的分子结构能自由伸展排列, 达到消除绝缘分子内应力的目的。

(6) 采用双盘收放线装置和导体储线设备, 实现了大批量连续生产, 既能保证电缆质量, 又能减少废品, 降低原材料和能源消耗。

1.3.4 交联工艺

工艺流程: 挤出成型—交联—冷却定型。

(1) 挤出成型：全密封重力下料、大长径比屏障型螺杆、双流道三层共挤机头、精确地挤出温度系统。

(2) 交联及冷却定型：NCC 工艺计算软件、进口的优质交联材料、高纯度氮气干式交联和干式冷却。

1.3.5 影响交联电缆产品质量的主要因素

绝缘中半导体屏蔽层与绝缘层的突起、绝缘层的杂质、微孔和水分是影响交联电缆质量的主要因素，是水树、电树生成和游离放电的根源，是导致电缆击穿的主要原因。

1. 影响产品质量的控制

(1) 界面质量的控制：应采用三层共挤工艺，双流道挤出机头，胶料在机头内流动畅通，压力均匀，不会形成死角，从而保证了绝缘挤出厚度均匀，绝缘无焦烧，内、外半导体屏蔽层与绝缘层紧密结合，界面凸起尺寸和数量应符合世界上最为严格的 AEIC CS7 美国电缆标准规定。达到防止 1+2 挤出机内屏蔽表面氧化、灰尘粘附、擦伤等弊端，保证内、外半导体层和绝缘之间紧密结合和界面平整，提高电缆的冲击水平的目的。

(2) 绝缘中杂质的控制：对 110kV 及以上高压电缆应采用进口超净绝缘料（如北欧化工和美国联碳化工超净料）和高洁净净化室，在挤出过程中还须对绝缘材料进行超细滤网过滤。绝缘、屏蔽加料净化室的净化等级为 100 级，主操作室的净化等级为 1000 级，绝缘、屏蔽储料室的净化等级为 10000 级。为防止真空吸料时料粒与金属管壁摩擦产生的污染，在生产 110kV 及以上电缆时可采用绝缘料自重加料系统，以满足高压电缆生产的外部条件。

(3) 电缆绝缘层同心度的控制：采用立式生产线（VCV），可解决因自重而出现的偏心问题，并可配备冷、热端（如：EX—Ray8000）测偏系统，该系统可与工艺支持系统 PSU 进行数字传输，生产过程中程序控制器 PLC 将根据测偏系统测得的结果迅速反馈给挤出机来校正螺杆转速，以保证各层厚度及同心度，即可随时对绝缘层、内、外屏蔽层厚度进行自动控制，对各层同心度进行在线时检测。通过采取此同心度控制方式，110kV 和 220kV 交联电缆的偏心度能严格控制在 5% 以内，比国标规定的 12% 和电力行业规定的 8% 都小得多。

(4) 绝缘层微孔和水分含量的控制：采用全干法交联工艺和材料干燥系统，大大降低了绝缘中微孔和水分的含量。采用干法交联生产的电缆，其绝缘水分含量在 100ppm 以下。

(5) 电缆内应力的控制：造成电缆内应力的根源是由于冷却导致电缆绝缘表面首先固化，而内部仍处于较高温度并且膨胀，当内部冷却固化并趋向导体收缩时，外层先固化的那部分却阻止这种收缩，其结果是受牵拉的表面形成了电缆绝缘的径向拉力，该拉力减小了内半导体层与导体之间的压力，从而减小了它们之间的摩擦力。为减小绝缘的内应力，应用了 ROL 在线应力松弛技术，即电缆在经过冷却定型后，使电缆有一个再加热的过程。试验证明通使用 ROL 在线松弛系统，减小了因机械内应力而产生的树枝和绝缘回缩现象，使得电缆的接头和终端安装更便利，提高了电缆的击穿电压，缩短了除气时间，延长了电缆使用寿命。

(6) 导体预热器：提高生产线速度，除去导体潮气，因导体温度接近挤出温度，机头

中材料的流动性好，同时减小绝缘内应力的产生。

2. 交联电缆的树枝

交联电缆的树主要有电树、水树、电化学树。

(1) 电树是在局部高电场作用下，某些缺陷在绝缘层中呈现树枝状伸展，最终导致绝缘击穿的现象，其特点是树枝放电是从材料不连续点或界面引发出来的，树枝管连续，内空而有水分，管壁上有交联聚乙烯因放电而分解产生碳粒痕迹，分枝少而清晰。

(2) 水树是在有水分和电场共存的状态下形成的树枝状物。水树可分成从导体屏蔽层上产生的内导水树、从绝缘屏蔽层上产生外导水树、从绝缘层中空隙产生的蝴蝶结状水树。它的特点是引发树枝的空隙中有水分，引发电场较低。树枝管有的大体不连续，内聚凝有水分，主干树枝较粗，分枝多而且密集。

(3) 电化学树是在空隙中渗进其他化学溶液，与导体材料起化学反应，其生成物在电场作用下蔓延伸入绝缘层形成的树枝状物。这种树枝呈棕褐色，在较低电场下即可产生。

3. 水树与电缆特性的关系

水树的产生将直接影响电缆性能。

(1) 电缆绝缘的 $\tan\delta$ 随水树长度的增加而增大。

(2) $\tan\delta$ 还随水树数量增加而增大，并且其数据是较分散的，这种分散性取决于水树发生部位的水量差、水树长度上的误差及电缆屏蔽层等因素。

(3) 电缆的交流击穿场强随着水树长度增加而明显下降。

(4) 水树还可导致绝缘电阻的下降。

1.4 电缆性能监测主要试验项目

1.4.1 试验类型及目的

为了对电力电缆的性能质量进行监测，从研究、设计及生产，到安装以及投入运行后，都制定了相应的检测项目，主要有如下几类试验。

1. 电缆出厂前由制造部门完成的试验

(1) 型式试验：主要目的是为了确定电缆产品的设计是否满足预期的使用要求。一般是一次性的，即试验后不再重复，而且多为破坏性的，它是全性能的，包括电气性能、机构物理性能及各种特定要求的性能等。

(2) 抽样试验：主要目的是验证生产过程中产品的关键性能是否符合设计要求。一般是定期定量（一般为10%）进行试验，也多为破坏性的。

(3) 例行试验：也称为出厂试验，主要目的是检验每个产品是否存在偶然因素造成的缺陷。全部产品电缆均必须进行，均为非破坏性试验。

2. 电缆出厂后由使用部门完成的试验

(1) 交接试验：主要目的是检查电缆及附件敷设安装是否存在偶然缺陷。在电缆线路安装完成后进行，有时在安装过程中也进行，属于非破坏性的试验。

(2) 预防性试验：对运行中电缆线路定期进行检测，以监测电缆线路性能是否发生了无法保证可靠运行的变化，以避免突发故障造成各种损失。属于非破坏性试验。

以上两类试验统称为安装后的试验。

1.4.2 交联电缆绝缘电缆的试验项目及标准要求

1. 交联电缆最重要的性能参数

从检查交联电缆成品质量角度来看,最重要的性能参数有如下两类:

- (1) 电性能方面:直流电阻;局部放电量;耐电强度。
- (2) 非电性能方面:结构尺寸检查;微孔杂质检查;交联度(热延伸试验);内应力性能(热收缩试验);护层绝缘电阻。

上述项目对于了解和验收一批电缆的质量很有意义,其中电性能为出厂试验项目,每根电缆都必须进试。非电性能项目为抽样试验或型式试验的部分项目,取成品的短样进行制片测试。

2. 交联电缆产品标准技术要求的新内容及趋势

我国标准化工作的基本原则是采用 IEC 标准。最近各个电压等级的交联电缆的 IEC 标准都已出版了最新版本(IEC 60502—2005、IEC 60840—2011、IEC 62067—2011),从其修改的主要内容可以看出,对交联电缆产品的技术要求的新趋势有以下几个方面:

- (1) 更加注重交联电缆产品(电缆本体及其附件)出厂前的质量水平,而且更加注重其长期性能(30 年以上的安全运行寿命),即所谓的“遗忘工程(Forget it)”。

目前,对于交联电缆来说,一旦投入运行后,不仅监测方法上存在不足,而且出现故障时,大多数为高阻和闪络性故障,故障探测难度也比油纸电缆大得多。因此,使用高质量的电缆产品是确保交联电缆运行可靠,并达到预期的使用寿命的最根本的途径。国外发达国家对电缆的质量要求,用了非常形象的语言“遗忘工程(Forget it)”来表达,意思是说,电缆一旦投入运行后,就不用再管,且能可靠运行并达到预期的使用寿命。要实现这一点,唯一的途径是使用高质量的电缆产品。为此,新的 IEC 60502—2005、IEC 60840—2011、IEC 62067—2011 标准及相应的国家标准修订稿(待出版)已将交联电缆的有关试验指标做了进一步的提高,体现在以下方面:

1) 局部放电性能指标更加严格(每根电缆都必须进行出厂试验):

a. 中低压电缆:出厂试验中,在 $1.73U_0$ 下,局部放电量不大于 10pC ;型式试验中,由原来的 $1.73U_0$,局部放电量不大于 10pC ,改为 $1.73U_0$,应无任何由被试的电缆产生的超过声明试验灵敏度的可检测到的放电(试验灵敏度应为 5pC 或更优)。

b. 110kV 高压电缆:出厂试验中,仍为 $1.5U_0$,局部放电量不大于 10pC ;型式试验中,仍为 $1.5U_0$,局部放电量不大于 5pC 。

c. 220kV 超高压电缆:出厂试验中,规定为 $1.5U_0$,在 5pC 或更低背景噪声的灵敏度下无可分辨的局部放电;型式试验中,规定为 $1.5U_0$,在 5pC 或更低背景噪声的灵敏度下无可分辨的局部放电。

一些先进国家如德国、瑞士的局部放电试验指标达到 $2U_0$ 下 5pC ,美国的局部放电试验指标达到 $3U_0$ 下 5pC 、 $4U_0$ 下 10pC 等。

据日本的研究报道,从理论上说,含微孔尺寸达 $400\mu\text{m}$ 的中低压电缆, $1.5U_0$ 下的局部放电量为 3pC , $2U_0$ 下的局部放电量为 4.6pC 。如果按原标准 $1.5U_0$ 下局部放电量为 20pC 的出厂试验指标考核,就可能将含尺寸达 $700\mu\text{m}$ 微孔的电缆作为合格品出厂。因

此,上述局部放电性能指标的改变及新规定,与其说是对电缆绝缘品质的要求,不如说是对检测系统的要求。这一局部放电量检测指标水平,也只是保证交联电缆的品质的最基本的要求。为保证交联电缆的长期性能(30年以上的安全运行寿命),在这一局部放电量检测指标水平下,应无可分辨的局部放电。实际上,对于品质好的交联绝缘电缆来说,在 $1.5U_0$ 甚至 $2.5U_0$ 时,在上述灵敏度下均无可分辨的局部放电。通常所给出的试验数据,往往是测试系统的背景噪声水平。当然,品质差的电缆,局部放电量往往很大,一般达到数十pC甚至更大。关键问题是如何提高局部放电检测系统的灵敏度,以及如何准确判断所测局部放电信号的性质,即是电缆试品本身的放电,还是检测系统中其他部位的放电。可以说,要制造出满意的交联绝缘电缆产品,除了先进可靠的生产线外(这是最根本的要求),先进可靠的检测设备是最重要的保证。

2) 耐压试验指标也更加严格:

a. 中低压电缆:出厂试验中,由原来的 $2.5U_0$ 改为 $3.5U_0$ 。型式试验中,由原来的 $3U_0$ 、4h改为 $4U_0$ 、4h。

b. 超高压电缆:出厂试验中,工频耐压试验采用延长时间来提高要求;抽样试验中,增加了雷电冲击试验;型式试验中,仍保留了传统的试验项目;但最重要的是,为了考核超高压电缆系统长期性能,专门增加了一个定义为预鉴定试验(Proqualification test)的项目,即通常所说的高场强热循环试验,其主要内容是:在1年内,连续施加1.7倍额定运行电压,同时对电缆线路进行至少8h加热和至少16h冷却的循环,加热时使导体温度达到运行温度 $90\sim 95^\circ\text{C}$ 至少2h,共至少进行180个循环。1年的高场强热循环试验结束后,对整个试验电缆线路,或从试验电缆线路上取有效长度不少于30m的电缆,进行雷电冲击耐压试验。最后对全部试品进行检查,应无潮气侵入、无泄漏、无腐蚀等。上述试验全部通过后,才算预鉴定试验合格,认为才能安全地投入商业运行。

3) 绝缘微孔杂质及半导体屏蔽微孔及突起的检测更加严格:

对绝缘微孔杂质及半导体屏蔽微孔及突起的检测,虽然IEC标准未要求,但我国参照美国AEIC标准作为型式试验项目列入了国家标准,而美国和日本等先进国家的标准还将这些检测项目列作出厂试验项目。新版的AEIC标准及相应的国家标准修订稿,对绝缘微孔杂质及半导体屏蔽微孔及突起的尺寸要求又提高了,其中如110kV级的电缆,原来要求应无大于 $76\mu\text{m}$ 的微孔,提高为无大于 $50\mu\text{m}$ 的微孔,其他指标也都相应提高,这里不一一列举。由此可见,绝缘微孔杂质及半导体屏蔽微孔及突起,对于交联电缆绝缘的重要程度。实际上,交联电缆产品(电缆本体及其附件)的质量水平特别是其长期性能,本质上是由绝缘材料及其生产成电缆成品后的绝缘内微孔杂质及半导体屏蔽微孔及突起的尺寸决定的。根据日本的有关试验研究报告,对于220kV的交联电缆,当微孔尺寸大于 $10\mu\text{m}$ 时,工频击穿电压开始下降,当微孔杂质尺寸大于 $100\mu\text{m}$ 时,工频击穿电压下降了一半以上;半导体层表面的突起,对工频击穿电压下降的影响要大得多。

4) 敷设安装后的试验更加强交流耐压试验。

国内外均已达成共识,对于交联电缆线路,敷设安装后的试验,应优先采用交流试验方法,尽量避免采用从油纸绝缘电缆试验方法套用过来的直流耐压试验。但考虑到实际操作性,对于新敷设安装后的中低压交联电缆,仍然保留了直流耐压试验,而预防性试验已

取消。

对于高压电缆，将原来的“直流方法，交流方法”的选择顺序，改为“交流方法，直流方法”的顺序，即强调优先采用交流试验方法。

对于超高压电缆，只允许采用交流试验方法，即20~300Hz的交流电压，根据实际情况在 $1.1\sim 1.7U_0$ 选择。另外，还增加了一项选择，如果供需双方达成协议，可以采用电缆附件的安装质量保证程序和外护层直流耐压试验代替主绝缘的交流耐压试验，从这个意义上可以看出，电缆及其附件的生产及敷设安装过程的工作质量，是保证电缆线路获得高品质及长期可靠运行的根本保证。这时的试验，只能起到相对次要作用，对粗大缺陷才能检查出来，而无法了解其较小缺陷，更不能保证和改变电缆线路的长期可靠运行性能。

(2) 注重电缆系统(Cable system)质量水平。

电缆本体只是电缆线路的一部分，电缆附件是电缆线路必不可少的组成部分，没有附件则电缆是无法工作的。完成输电任务的是由电缆及附件组成的电缆线路整体。由于交联电缆的热机械性能和内应力性能特点，在电缆本体及其附件的部件制造及敷设安装中，特别要注意它们之间的配合，因此新的标准，特别是超高压电缆，强调了电缆线路整体的试验，除了型式试验要求外，新增加的预鉴定试验正是这一要求的具体体现。

1.4.3 敷设后及运行中电缆线路性能监测主要试验项目

实际上，对于出厂时的例行试验、安装后的交接试验及运行中的预防性试验，其选取原则是一致的。首先是非破坏的，即对良好绝缘不应造成损坏；其次有效性，对存在的缺陷灵敏地检测出；最后必须可行性，操作方便、技术经济合理。目前出厂试验项目主要是导体直流电阻、交流耐压，对交联电缆还有局部放电试验。在工厂完成这些试验是符合上述原则的。但对于安装后及运行中的电缆线路来说，上述项目由于各种原因而不能简单照搬。

针对具体电缆的特性，选择合理的试验项目，现将1997年实施的新的《电气设备预防性试验规程》有关电缆试验的内容简单介绍。

1. 交联电缆的试验项目及标准要求

交联电缆的试验项目主要包括直流电阻，绝缘电阻，直流耐压（泄露电流），护层绝缘电阻的测量。

目前交联电缆的使用数量成倍增长，而安装后及运行中的交联电缆线路的试验监测方法仍是国内外未能解决的技术课题。目前，国际电工委员会IEC推荐的安装后交联电缆线路的试验方法是：对于新安装的电缆线路，进行交流耐压试验， $1.73U_0$ ，5min或 U_0 ，24h，或进行直流耐压试验， $4U_0$ （高压电缆为 $3U_0$ ），15min。我国交接试验标准GB 50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》也规定直流耐压 $4U_0$ ，15min。

实际上，实际经验和理论分析已表明，直流耐压试验对交联电缆会造成累积损伤效应，这是因为交联聚乙烯绝缘的绝缘电阻非常高，在进行直流耐压时，在杂质或缺陷处易于积累空间电荷而又不易泄露掉，当电缆试验中发生击穿或在试验完成后放电过程中（未经大电阻放电时），空间电荷瞬间释放，会形成很强的冲击电流，对绝缘造成新的不可恢复性损坏。且每次试验都会累积损伤，造成电缆过早击穿。同时，交联电缆泄露电流往往

小于 $1\mu\text{A}$ ，现场测试不容易测准，不如油纸电缆那样有效。因此，1996 年颁布的电气设备预防性试验规程，原则上已取消了直流耐压试验，只是在新作终端或接头后才作，其目的是为了检验终端或接头的制作质量，相当于交接试验，试验电压也是参照 IEC 60502 及 IEC 60840 标准的原则，规定为 $4.2U_0$ 或 $3U_0$ 。而且对泄露电流也不考虑不平衡系数。泄露电流仍然作为一种参考指标，不作为是否投入运行的判据。

国内外的趋势是以开发交流试验方法为主。目前，为了弥补运行中交联电缆缺乏有效监测方法上的不足，新的 IEC 60502 已将交联电缆的试验标准提高了，以提高电缆产品在今后运行中的可靠性。其中，出厂试验中局部放电指标由原来的 $1.5U_0$ ， 20pC ，改为 $1.73U_0$ ， 10pC ；交流耐压试验由原来的 $2.5U_0$ 改为 $3.5U_0$ 。可见，对于使用交联电缆来说，选择高质量的产品是至关重要的，否则一旦投入运行后，不仅监测方法上存在不足，而且出现故障时，大多数为高阻和闪络性故障，故障探测难度也比油纸电缆大得多。

目前，为了满足现场大量交联电缆运行性能监测的需要，新的预防性试验规程中增加一些新的项目。其出发点是考虑到当前交联电缆损坏多数为外力破坏，绝缘老化还为时过早，如果能监测电缆的护套及屏蔽层无故障损坏，则应该认为电缆的主绝缘也未受到破坏。因此新的项目都是检测主绝缘以外部分的性能的。

新增加的主要内容有：

(1) 测量外护套及内衬层气的绝缘电阻，测量值如果低于 $0.5\text{M}\Omega/\text{km}$ ，则可能有破坏进水的可能。

(2) 这时再测量铜屏蔽与铠装钢带间是否出现电极电位来判断电缆是否已进了水。因为地下水是一种电解质铜，与镀锌钢带在有水的情况下会形成原电池，产生约 1V 的电极电位。也可用万用表轮换测量铠装对地或铠装对铜屏蔽层的绝缘电阻，因为如果有原电池的存在，则会使正反两次测得的绝缘电阻值有较大差别，也能说明电缆是否破损进水。外护套破坏不一定要立即修理，但内初层破损进水后，水分直接与电缆芯接触并可能会腐蚀铜屏蔽层，一般应尽快检修。

(3) 新规程还规定，为了完成上述这些新检测项目，同时也为便于今后开展各种在线检测取信号，新的交联电缆附件安装制作时，应将电缆的铜屏蔽和铠装的接地分别引出，在接地点再固定在一起而且应能分别打开，以满足所要求的各项检测的需要。

(4) 测量导体和铜屏蔽层的直流电阻，并监测两者之比值。若发现比值变大或变小，可分别说明铜屏蔽层可能因进潮而受到腐蚀，或主导体接头有接触不良的问题。

1.4.4 国内外开展的交联电缆线路性能新试验

归纳起来，目前国内外开展的新的交联电缆线路绝缘性能试验技术主要有两个发展方向，一是较传统的停电检测方法，这些方法对交接试验更为可行，对运行中的电缆也可进行检测；另外一个发展方向是不停电检测方法，特别是状态监测技术。

1. 停电检测

停电检测主要有：

(1) 交流（或工频）谐振试验（IEC 标准推荐 $20\sim 300\text{Hz}$ ）。

(2) 超低频（ 0.1Hz ）耐压试验（有正弦波及余弦方波等方法）。

(3) 振荡波冲击电压试验。

从非破坏性、有效性及可行性方面来分析,只要选择合适的耐压电压值,都可以做到对良好的绝缘不造成损坏。关键是在选择的电压值下,是否能有效地检测出电缆的缺陷部分,如果耐压通过,等效的工频耐受电压或寿命是多少等问题,最后是试验设备是否可行、经济。

(1) 由于工频谐振耐压试验是直接检测电缆线路实际所承受同类型的工作电压的性能,其等效性是不言而喻的。能否检测出电缆缺陷,实际上与缺陷在工频下发展特性有关,能耐受较高工频电压的缺陷,在较低电压下应能按寿命曲线预测其大概的残余寿命。如果能加上检测一些定量参数,如局部放电、介损等,该方法就是较好的方法,其不足是设备容量仍然较大、笨重,但如果能制造出组合型便于搬运的形式,仍是一种较好的选择。

(2) 据报道,超低频(0.1Hz)耐压法,特别是加上可以同时测量相应的介损参数后,使该方法具有一定的吸引力。国外主要是德国采用较多,而且在VPS标准02981/1已有建议。国内宝钢和广州也有使用经验报道,认为其主要优点是设备容量较小,适当的电压值(如 $3U_0$)对电缆是无损的,可对电缆进行老化分析和绝缘状态诊断。当然,0.1Hz与50Hz仍存在一个等效性问题,这需要积累一定的实测数据后才能得到更好的等效关系。

(3) 振荡波冲击电压法,也是国际大电网推荐过的方法之一,在针板试样上试验结果表明其特点是能有效地检测缺陷,和50Hz试验结果一致,设备简单便宜,没有电压限制。但也存在着多少次振荡冲击及电压多高才能与50Hz耐压等效问题,也需要实测数据积累问题。

总之,非工频交流试验方法,在国内使用的还不多,还需要摸索经验积累数据,而工频交流耐压法(谐振法)已在国内一些地方采用,特别是高压、超高压电缆更是采用工频交流耐压。二滩水电站500kV聚乙烯电缆验收试验就是由武汉高压研究所进行的工频谐振耐压试验完成。实际上,从IEC国际标准的趋势看也是采用交流试验法,至少优先选择交流试验法。

2. 在线检测

现阶段国内外已开展一些在线检测方法,特别是状态监测技术。虽然都还不很成熟,需要积累大量的数据,但是未来的发展趋势。目前报道较多的是在线直流分量检测、迭加法测绝缘电阻、在线测 $\tan\delta$ 、低频迭加法测损耗、在线局部放电检测等。

(1) 直流分量法。

研究表明,当运行中的电缆绝缘被施加工频电压时,如果绝缘中有水树枝(潮气浸入绝缘层后,在电场作用下,绝缘中形成树状物的现象),在交流的负半周下,树枝放电向绝缘中注入负电荷;而在正半周下,正电荷的注入仅仅中和了一部分负电荷,以致绝缘中仍保留有负电荷。这样,在长时间交流工作电压的正负半周的反复作用下,水树枝的前端所积聚的负电荷将逐渐向对方漂移,有点类似整流作用。由于“整流作用”,流过电缆接地线的充电电流(交流)含水量有微量的直流成分。检测出这种直流成分即可进行水树劣化诊断。交流击穿电压与直流分量之间存在相关关系。直流分量愈大,交流击穿电压往往愈低。直流分量的在线监测回路包括保护装置、低通滤波装置、微电流测试仪和记录仪。

直流分量法是一种新方法,虽然测量仪器较为简单,操作简便,但还存在一系列问