

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 绝缘子防污闪技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 绝缘子防污闪技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂，长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响，雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生，对电网的安全运行造成很大的危害。为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求，总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验，结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例，组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》，共分为四册，分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

本分册为《输电线路绝缘子防污闪技术》，主要包括污闪的危害及形成、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施以及防污闪治理及应用实例。

本书可为输电线路科研、设计、运行维护提供技术参考，也可作为相关人员技术培训教材和大专院校教学参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

输电线路绝缘子防污闪技术 / 万启发主编. —北京：中国电力出版社，2016.12

（特殊环境条件下输电线路实用技术丛书）

ISBN 978-7-5123-9449-0

I. ①输… II. ①万… III. ①输电线路—绝缘子—防污闪 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 130656 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>）

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.25 印张 206 千字

印数 0001—1000 册 定价 118.00 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

《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》

编委会

主 编	万启发				
编 委	张国威	杜忠东	吕 军	赵永生	
	张 勤	律方成	蒋兴良	王黎明	
	周文俊	陆佳政	蔡 炜	王保山	
	王力农	陈家宏	陈 勇	刘云鹏	
	彭旭东	徐 涛	张广洲	余 波	
	宋金根	王建华	谷山强		

本 册 编 写 组

组 长	蔡 炜	徐 涛		
组 员	万小东	刘 琴	许佐明	南 敬
	胡 伟	霍 锋	谢 梁	谢雄杰
	王黎明	孟 刚	楼 平	马少石

序

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂，长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响，雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生，对电网的安全运行造成很大的危害。我国电力科研、设计及运行单位对成灾机理及灾害防治进行了大量的研究工作，对维护线路安全运行起到良好作用。由于这些线路灾害难以根治，特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾是我国输电线路的重点工作之一。

为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求，总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验，结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例，组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》，共分为四册，分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

《输电线路雷电防护技术》主要包括雷电与雷电参数、输电线路雷电闪络与耐雷性能分析、输电线路雷电防护技术现状、特高压输电系统雷电特性、输电线路雷电防护措施、接地网的测量与防腐改造和雷电防护应用案例，并总结了国内外输电线路雷电防护理论研究成果及雷电防护方法。

《输电线路绝缘子防污闪技术》主要包括污闪的形成及危害、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施和防污闪治理及应用实例，并总结了国内外绝缘子污闪及防治研究进展及绝缘子防污闪方法。

《输电线路冰灾防治技术》主要包括输电线路覆冰危害、覆冰形成机理、覆冰监测、除冰/防冰技术措施、绝缘子覆冰试验及防冰闪措施、覆冰地区输电线路设计等，并总结了国内外输电线路覆冰理论研究成果及冰害防治方法。

《输电线路舞动防治技术》主要包括输电线路舞动及危害、输电线路舞动机理、输电线路舞动仿真与试验、输电线路舞动监测及分布图划分、输电线路防

舞装置、输电线路防舞设计与改造以及输电线路舞动灾害治理实例，并总结了国内外输电线路舞动机理与防治的研究进展及工程治理方法。

希望本套丛书的出版可以为相关领域专家学者、科研人员及大专院校师生提供有益的参考与帮助。

万厚发

前 言

污闪指绝缘子受到工业污秽或自然污秽等污染后，在潮湿天气（雾、露、“毛毛”雨或覆雪）条件下，若绝缘配置不足，则有可能在运行电压下发生闪络的现象。污闪事故的发生，轻则造成区域性突发停电，重则导致电网大面积电力中断。电力工业是国民经济的基础，电力供应中断可能造成各行各业的生产停顿或瘫痪，给社会生产造成重大经济损失，给人民生活秩序带来严重混乱。我国c级污秽以上的地区占国土面积的三分之二左右，环境污染的现状不可能在短期内得到根本的解决，这就决定了输电线路绝缘子的运行环境较为严酷，防治污闪的工作任重道远。虽然防污闪技术在不断进步，部分技术在实际运行得到了应用，积累了一些经验，但尚不够完善；随着我国输电电压等级的提高，污闪形成的原因、影响因素和防范措施等许多问题和技术还需要进一步的研究与明确，这对保障电网安全稳定运行意义重大。

本书包括污闪的危害及形成、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施和防污闪治理及应用实例七个方面。

本书结合我国防污闪技术近年来最新进展和研究成果，重点介绍了污秽测量与等级划分方法、污秽绝缘污闪特性的一般规律、污秽地区绝缘子配置方法、防污闪技术措施与应用。本书内容既重视应用理论性成果，更强调实践检验及应用实效；同时直接面向工程实用技术，为输电线路专业人员解决现场问题提供帮助，也为工程技术人员研究提供参考。

输电线路一直是国内外电力系统防污闪的重点关注内容。目前依托在中国

电力科学研究院的国家电网公司重点实验室“高电压交流外绝缘电气特性实验室”和由国家电网公司 2010 年命名的首批科技攻关团队之一的“特殊条件下输变电设备绝缘技术科技攻关团队”，长期围绕电力系统防污闪开展了大量的科研课题研究和技术咨询服务工作，并编制了相关的国家、电力行业行业标准，并在工程设计和运行维护中获得了应用。本书的出版正是该团队共同工作和积累的结果。

本书在编写过程中得到中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、国网湖北省电力公司、中南电力设计院等单位的大力支持，重庆大学蒋兴良教授、武汉大学王力农教授、华北电力大学刘云鹏教授为书稿的编写及修改提出了许多宝贵意见，南敬、刘琴等为本书稿搜集了大量资料，在此一并致以衷心的感谢，是他们使本书编写工作得以顺利开展并使本书顺利面世。

由于时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第一章 污闪的危害及形成	1
第一节 污闪的危害	1
第二节 污闪的形成及影响因素	7
第三节 我国污闪事故的分布特点	14
第四节 防污闪技术的发展历程	18
第二章 污闪机理及模型	24
第一节 污闪过程简介	24
第二节 绝缘子表面污秽的形成	26
第三节 污层的润湿	33
第四节 污秽放电的产生和发展	36
第五节 污闪放电模型	43
第三章 污秽等级与污区分布图	47
第一节 污秽等级的划分标准	47
第二节 污秽度的测量	51
第三节 污秽等级的评估	58
第四节 污区分布图	63
第四章 污秽绝缘子试验与污闪特性	69
第一节 人工污秽试验	69
第二节 自然污秽试验	82
第三节 绝缘子污闪特性	88

第五章 污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置	97
第一节 绝缘子选择和尺寸确定的方法	97
第二节 污秽条件下绝缘子的选择	102
第三节 污秽绝缘配置方法	113
第四节 高海拔地区污秽外绝缘配置	119
第六章 防污闪技术措施	125
第一节 基本措施	125
第二节 复合绝缘子	136
第三节 防污闪涂料	148
第四节 防污闪技术的综合运用	151
第七章 防污闪治理及应用实例	155
第一节 防污闪运行管理	155
第二节 防污闪措施运用示例	167
附录 A ESDD 和 NSDD 的测量	173
附录 B 憎水性测量方法及判断准则	178
参考文献	181

第一章

污闪的危害及形成

绝缘子是架空输电线路的重要组成部分，其作用是使导线和杆塔在电气上保持绝缘，同时承担杆塔与导线在机械上的连接。户外绝缘子会受到工业污秽或自然界盐碱、飞尘等污染。在干燥情况下，绝缘子表面污层对闪络电压没有太大影响，但在“毛毛”雨、雾、露、雪等高湿度天气条件下，绝缘子表面污层被湿润，表面电导增加，绝缘性能急剧下降，甚至有可能在工作电压下发生闪络，这就是污闪。污闪对供电可靠性危害极大，是电力系统安全运行的主要威胁之一。输电线路绝缘子发生污闪导致线路跳闸时，重合闸的成功率低，甚至可能导致大面积停电。因此研究污闪形成的原因、影响因素、分布特点及防范措施对防止输线路污闪事故发生，提高供电可靠性意义重大。

第一节 污闪的危害

一、污闪事故类型

污闪事故与输电线路运行环境密切相关，污闪的外在因素大致可分为以下几类。

(1) 雾霾引起的闪络。雾霾是大气污染物 PM_{2.5} 被提出后才引起人们格外注意的天气现象，其对输变电设备的影响也引起了电力系统的担心。雾是指大量微小水滴浮游空中，水平能见度小于 1.0km 的天气现象；霾是大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中，水平能见度小于 10.0km，造成空气普遍浑浊的天气现象。工业、交通、生活废气、烟尘及扬尘（细微颗粒）排入低空大气形成霾，成为雾的凝结核，由于雾中含污秽物浓度高，增加了雾水的电导率。通常雾天气过程常伴有霾影响，并可相互转化，难以区分，故用“雾霾天气”来描述，成为城市群及周边区域的气象灾害。其对电力系统的影响在于：一方面霾天气导致绝缘子表面积污的增加；另一方面雾霾导致的湿沉降造成绝缘子污闪

电压的降低。

雾霾多是由火电厂、水泥厂、化工厂、冷却水塔等排出的气体、液体和固体污物的混合物造成的。工业越集中的地区大气污染就越严重，气象条件就越恶劣，如北京地区年平均有雾日数为 150 日，上海市区的工业降尘量已是 $30\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ ，重庆地区的降尘量为 $131.9\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ ，成都地区在冬季污闪季节中大雾、浓雾、“毛毛”雨连续不断。

在大气污染较轻的地区，工业污秽因风向和大气的传输作用，酸性下降，空气中轻飘的离子飘浮到清洁区的大气层中，一旦有雾形成时，则使雾的酸度增大。当运行中的清洁绝缘子表面被酸雾饱和湿润时，因酸雾的导电性能随 pH 值的减小而增大，可使清洁绝缘子的电气强度下降。此外在沿海岸线附近的绝缘子还会受到海边盐雾的侵蚀，盐雾具有较强的导电性，也会使得绝缘子绝缘能力在短时间内急剧下降。

(2) 凝露导致的闪络。露水使绝缘子表面污秽层中的导电性物质电导增加，绝缘电阻下降。在正常工作电压下泄漏电流上升，泄漏电流的热效应使绝缘子表面局部烘干，干燥区表面电阻增大，绝缘子表面的电压分布随之改变，干燥区所分担的电压剧增，当电压超过击穿电压时，该处就发生局部沿面放电，形成泄漏电流的脉冲；若绝缘子串中所有绝缘子的干燥区均被击穿，就形成大的泄漏电流的脉冲，由于这些脉冲电流时间很短，并不会造成绝缘子串的沿面闪络；当空气湿度较大时，润湿、烘干、击穿会间隙性交替出现。

(3) 覆冰雪导致的闪络。表面覆盖冰雪对绝缘子来说是一种特殊形式的污秽。绝缘子（串）覆冰过多或被冰凌桥接，绝缘子串爬距大大减少，引起绝缘子串电气性能降低，发生闪络。一般来说，绝缘子冰闪多在气温间歇或持续升高的融冰期发生。在融冰过程中，空气及绝缘子表面污秽中存在电解质增大了冰水的电导率，引起绝缘子串电压分布及单片绝缘子表面电压分布不均匀，从而降低覆冰绝缘子串的闪络电压。覆雪的绝缘子串在雪融化过程中其耐受电压降低，特别当绝缘子串上存在污秽物、又遇到融化的雪水时，其耐受电压降低程度更加严重。如果在积污量较大的期间，正好遇到较大的降雪过程，且气温在 0°C 左右，造成大面积融雪污闪的可能性极大。

(4) 鸟害导致的闪络。鸟粪闪络是一种突发性事件，闪络前没有任何征兆，闪络时也极少为人所见，只能事后以鸟粪痕迹作为判断。鸟粪下落的瞬间畸变了绝缘子周围的电场分布，鸟粪通道与绝缘子高压端之间发生了空气间隙击穿而导致闪络。当闪络产生的电弧将鸟驱赶飞走后，鸟粪落地，绝缘子周围电场

分布又恢复正常。此时重合闸动作，线路再带电时均能正常供电，从闪络机理再次说明了鸟粪闪络重合闸动作成功率高的原因。通过对鸟粪闪络的研究表明，鸟粪闪络的发展过程可以分为3个阶段。

第一阶段，鸟粪通道的形成和伸长。鸟粪排出后，以自由落体的方式下落，形成一段细长的下落体。

第二阶段，绝缘子周围电场发生严重畸变。具有一定导电性的鸟粪通道的介入使绝缘子周围的电场分布发生严重畸变，鸟粪通道的前端与绝缘子高压端之间的空气间隙电场强度大大增加。绝缘子承受的大部分电压都加在了这一段空气间隙上。

第三阶段，空气间隙击穿，完成闪络。当鸟粪通道的前端越来越接近绝缘子高压端时，它们之间的空气间隙承受不了所加的电压，间隙被击穿，形成局部电弧。当鸟粪的电导率超过一定值时，局部电弧最终导致绝缘子闪络。

由于鸟类大多在清晨排便，此时不仅是鸟类的高活跃期，同时又是气温较低、湿度较大的时段，是最可能由鸟害引发接地故障的时段。事实上，在鸟害引起的线路接地故障中，由鸟粪短接空气间隙造成的故障约占全部故障的90%左右。

二、污闪事故的统计

随着我国工、农业的快速发展，大气污染日趋严重。降尘量增加，酸性湿沉降频发，运行中的绝缘子表面污秽集聚随之加剧。输电线路污闪跳闸率居高不下，已经远远超过了重要输电线路可以接受的污闪跳闸率和事故率，严重威胁了电力系统的安全稳定运行。据不完全统计，自20世纪70年代以来我国出现了多次污闪事故，具体情况见表1-1。

表 1-1 1974~2006 年全国重大污闪事故简况

时 间	地 点	气象条件	事 故
1974 年 2 月	沈阳、抚顺	大雾	44~220kV 线路跳闸/停电 7 条、变电站跳闸/停电 41 座
1976 年 2 月	上海闸北电厂及北部	雾	220kV 线路跳闸/停电 4 条，110kV 线路跳闸/停电 3 条，110~220kV 变电站全部停电
1977 年 1 月至 1977 年 2 月	淄博、昌邑、烟台和惠民	大雾	35~220kV 线路跳闸/停电 63 条、变电站跳闸/停电 105 座
1980 年 3 月	徐州	雾	110kV 变电站跳闸/停电 4 座，35kV 变电站跳闸/停电 7 座
1985 年 2 月	河北	大雾	220kV 变电站跳闸/停电 10 座 36 次，110kV 变电站跳闸/停电 15 座 47 次，35kV 变电站跳闸/停电 2 座 5 次

续表

时 间	地 点	气象条件	事 故
1986 年 3 月	兰州	雨夹雪	220kV 变电站跳闸/停电 54 座, 110kV 变电站跳闸/停电 28 座, 35~220kV 线路跳闸/停电 24 条
1987 年 1 月	天津	大雾	220kV 线路跳闸/停电 1 条, 110kV 线路跳闸/停电 14 条
1987 年 1 月 至 2 月	河北	大雾	220kV 线路跳闸/停电 3 条, 110kV 线路跳闸/停电 4 条, 35kV 线路跳闸/停电 1 条
1987 年 1 月 至 2 月	陕西 关中	雨夹雪	35~330kV 线路跳闸/停电 57 条, 变电站跳闸/停电 54 座
1987 年 12 月	辽西	雾	500kV 线路跳闸/停电 2 条, 220kV 线路跳闸/停电 5 条
1989 年 1 月	唐山市	雾	220kV 线路跳闸/停电 3 条, 110kV 线路跳闸/停电 2 条, 35kV 线路跳闸/停电 1 条
1989 年至 1990 年初	华东、华北、 河南、山东	雾	京津唐 10~500kV、河北 220kV、晋中南 110~220kV 线路 50 条线路掉闸、25 条线路跳闸 145 次
1996 年末至 1997 年初	华东、华中、 西北、华北、 山东	雾	500kV 线路跳闸/停电 15 条, 330kV 线路跳闸/停电 2 条, 220kV 线路跳闸/停电 51 条, 500kV 变电站跳闸/停电 1 座, 330kV 变电站跳闸/停电 1 座, 同时 26 串绝缘子断串
2001 年初	河南、华北、 辽宁	雨夹雪 大雾	66~500kV 线路跳闸/停电 238 条, 66~500kV 变电站跳闸/停电 34 座 972 次
2004 年 2 月	上海、浙江 和江苏	大雾	6 条 500kV 线路多次污闪跳闸
2005 年 1 月	广东	雾	12 条 500kV 线路跳闸 56 次, 4 条线路停电
2006 年 2 月	河南	雾	多条 110、220、500kV 线路跳闸

由表 1-1 可以发现污闪通常有两大特点。

(1) 多点同时, 即在雾、小雨等潮湿天气条件下会同时发生在多条线路的多基杆塔和变电站多个设备上。

首先, 绝缘子是输电线路使用量最大的器件, 一个大、中型变电站, 绝缘子大约有几百串乃至上千串。输电线路的绝缘子串是并联运行的, 任何一串绝缘子出现问题都会造成输电线路故障, 甚至较长时间的停电; 其次在污闪事故发生点周围几十甚至上百平方千米的范围内, 大气的污染几乎是相近的, 雾、露、“毛毛”雨或覆雪等潮湿气象条件也几乎是相同的, 一旦一处污闪跳闸, 则表明整个地区几乎相同的几百串或上千串绝缘子个体均处于临界污闪跳闸的边

缘。因此污闪事故时会出现多条线路多处绝缘子污闪跳闸。

(2) 持续时间长, 重合闸不易成功且易造成电网永久性接地事故。一个地区雾、露、“毛毛”雨或覆雪等潮湿气象条件通常持续几个小时至几天, 虽然在潮湿条件下绝缘子表面污秽会出现部分流失, 但污秽流失也需要较长时间, 因此绝缘子表面绝缘强度的恢复需要较长时间。此外, 重合闸动作还会造成电网的振荡, 出现操作过电压, 由于诱发污闪的条件(气温、湿度、雾、雨雪与污秽层等)未消除, 介质绝缘强度尚未恢复, 因此在重合闸或强送合闸的瞬间, 污闪处的电弧可能重燃, 或促使别处再出现污闪, 所以污闪事故中的自动重合闸装置(或强送)成功率极低。此外污闪出现的强烈电弧还可能导致绝缘子损坏, 以造成电网永久性接地故障。

输变电设备污闪事故, 尤其是大面积污闪严重威胁电网运行安全, 是电力系统重点防范的主要事故形态。自 20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 我国多次发生大面积污闪, 部分电网因污闪引发系统稳定问题而导致电网事故。2005~2010 年 110kV 及以上输电线路污闪跳闸及故障停运情况统计见表 1-2。

表 1-2 2005~2010 年 110kV 及以上输电线路污闪跳闸及故障停运情况统计

年 份	跳闸次数	跳闸率 [次/(100km·年)]	故障停运次数	故障停运率
2005 年	74	0.018	14	0.003
2006 年	91	0.023	37	0.009
2007 年	108	0.025	34	0.008
2008 年	41	0.008	7	0.001
2009 年	39	0.008	10	0.002
2010 年	20	0.003	1	0.0002

2005 年, 220kV 及以上线路发生污闪跳闸 58 次, 其中 500kV 线路 1 次、330kV 线路 5 次、220kV 线路 30 次、±500kV 直流 22 次。

2006 年, 220kV 及以上线路发生污闪跳闸 41 次, 其中 500kV 线路 9 次、330kV 线路 3 次、220kV 线路 29 次。

2007 年, 220kV 及以上线路发生污闪跳闸 65 次, 其中 500kV 线路 10 次、330kV 线路 5 次、220kV 线路 26 次、±500kV 线路 24 次。

2008 年, 220kV 及以上输电线路发生污闪跳闸 32 次, 其中 500kV 线路 2 次、330kV 线路 14 次、220kV 线路 16 次。

2009 年，因污闪造成 66kV 及以上输电线路跳闸 49 次，分布情况如图 1-1 所示。总的来看，220kV 输电线路污闪跳闸次数占有所有电压等级输电线路污闪跳闸次数将近 70%。

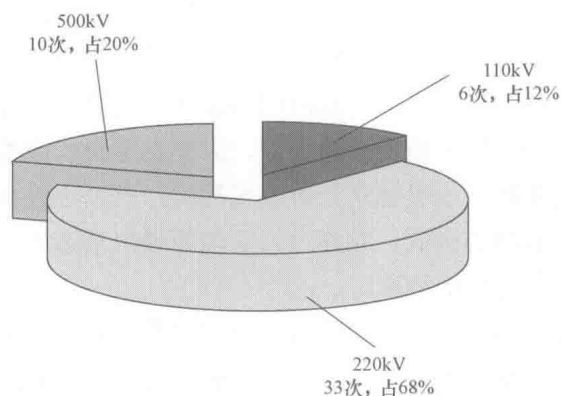


图 1-1 2009 年各电压等级输电线路因污闪引起跳闸次数分布图

2010 年因污闪引起跳闸 20 次，分布情况如图 1-2 所示。

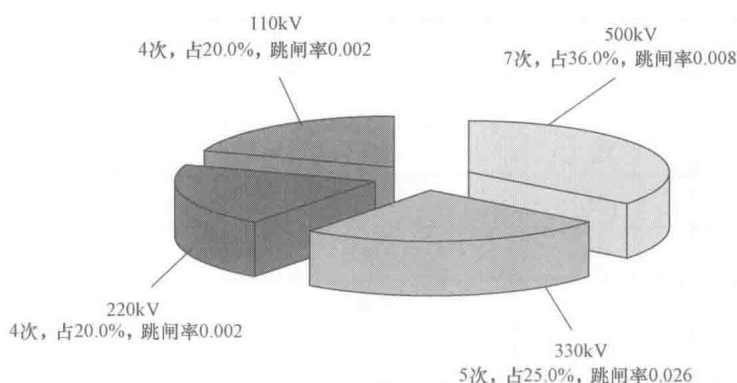


图 1-2 2010 年各电压等级输电线路因污闪引起跳闸次数分布

由近几年的污闪事故统计可以看到，随着对污闪工作的重视及绝缘配置的完善，污闪事故整体呈下降趋势。

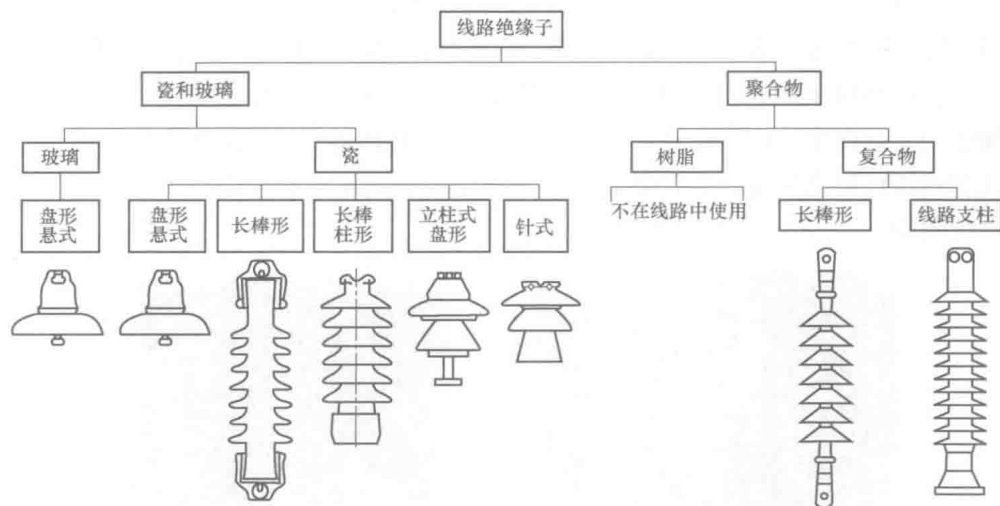
近年来，历史上污闪多发地区强化了线路污闪技术运用和管理，污闪跳闸和故障停运次数逐年减少。但受气候环境变化的影响，出现突发恶劣气象条件的可能性增加，因此历史上污闪发生较少的地区也应提高警惕，重视线路防污闪工作，防止大面积污闪事故发生。

第二节 污闪的形成及影响因素

一、输电线路绝缘子及其应用

绝缘子通常是由绝缘体与一个或多个附属固定部件组成。传统的绝缘体是由瓷或钢化玻璃制造，但是随着聚合物绝缘子的发展，绝缘体也可以是由塑料高强纤维棒及其表面覆盖的橡胶组成，外层橡胶主要是提供必要的爬电距离并能保护纤维棒免受大气环境影响。

通常依据制造绝缘体的材料来给绝缘子命名，绝缘子材料一般有玻璃、瓷绝缘子或聚合物，其中，聚合物绝缘子又可分为树脂绝缘子和复合材料绝缘子。依据 IEC 的定义，所有输电线路聚合物绝缘子都可以被列为复合材料绝缘子，当用来描述这种绝缘子时，工业用语中的复合绝缘子、聚合物绝缘子、非无机材料绝缘子是可以相互替换的。本书统一使用术语“复合绝缘子”。树脂绝缘子不在输电线路中使用，后面的章节不予讨论，各种常用类型绝缘子的结构形式如图 1-3 所示。



依据内绝缘击穿的可能性可将绝缘子分为两类（见图 1-4）。对于“A”类绝缘子，最短内部绝缘击穿距离至少为外部干弧距离的 $1/2$ ，这些绝缘子被认为是只会外绝缘击穿的。对于“B”类绝缘子，最短内部绝缘击穿距离小于外