

DLXTDWHJY

电力系统的污秽绝缘

顾乐观 孙才新 编著



重庆大学出版社

样书

内 容 提 要

本书是根据国内外对污秽绝缘的研究文献和总结作者及重庆大学高电压绝缘与信息检测科研课题组长期从事有关污秽绝缘研究的科研成果及教学经验而写成的专著。着重论述污闪机理、试验方法、污秽绝缘子的电气强度与特征量、污秽绝缘选择方法和防污闪对策；同时就气压、覆冰、覆雪对污秽绝缘子电气强度的影响，污秽放电与沿面电场分布的关系进行了探讨。

本书可作为高等院校高电压技术及设备专业本科生和研究生的教材和教学参考书，以供从事电力系统运行、设计、科研以及高压电器制造方面的人员阅读。

电 力 系 统 的 污 秽 绝 缘

顾乐观 孙才新 编 著

责任编辑 贾肇武

重 庆 大 学 出 版 社 出 版

新 华 书 店 经 销

重庆大学出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：11.75 字数：293千

1990年5月第1版

1990年5月第1次印刷

印数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0304-X 定价：2.38元
TM·17

前 言

从有高压输电线路以来，污秽闪络就是威胁电力系统安全运行的主要因素之一。随着工农业生产的发展，电力系统的容量在不断增大，输电电压等级由高压向超高压和特高压迅速发展，电网的分布也愈来愈广，输电的方式也由单一的交流输电向交、直流联网输电发展；与此同时，日益加剧的空气污染致使电力系统的污闪事故频繁发生，由此而产生的停电损失就更加触目惊心。因此，污秽绝缘一直是电力科学工作者的一个非常重要的研究课题。

自1907年第一次发生污闪事故以来，相继有众多的研究者从污闪机理、特性及防污闪对策等不同角度进行了大量艰苦的试验研究。由于影响污闪的因素众多，虽然经人们半个多世纪坚持不懈的努力，已经取得了一定的进展，但至今对污秽放电的物理过程还不十分清楚，因而也就难于找到有效而完善的防污闪对策。

为了对“污秽绝缘”这个长期为人们关注而又必须深入探索的课题的研究，起到抛砖引玉和推波助浪的作用，作者总结了本人及重庆大学高电压绝缘与信息检测科研课题组长期从事有关污秽绝缘科研的成果和教学经验，特别是吸收了国内外同行的科研成果和运行、制造行业中工程师们丰富而卓有成效的防污闪对策和经验，撰写成专著出版。作者期待着同行们对污秽绝缘的研究取得更加深入而完善的进展，以便进一步对本书添加耳目一新的内容。

本书从1986年编印成讲义以来，相继作为本科生、研究生和运行部门研讨班的教材使用，国内不少学者和专家、工程师们提出了宝贵意见。这次正式出版，作者虽然在原讲义的基础上作了进一步修正和完善，但限于水平，书中难免仍有谬误，恳请读者指正。

本书可作为高等院校高电压技术及设备专业本科生和研究生的教材和教学参考书，也可供从事电力系统运行、设计、科研以及高压电器制造的人员阅读。

本书绪论、第二、六章由顾乐观撰写，第一、三、四、五、七章由孙才新撰写，由顾乐观对全书进行审阅。陈明英描绘插图并参与文稿的整理工作，张建辉、谢军、唐炬、舒立春、廖瑞金给予了通力协助，谨此致以谢忱。

作者于重庆大学

1988·10

绪 论

输电线路和变电站的外绝缘要求在大气过电压、内部过电压和长期运行电压下均能可靠运行。但沉积在绝缘子表面上的固体、液体和气体污秽微粒与雾、露、毛毛雨、融冰、融雪等恶劣气象条件的同时作用，将使绝缘子的电气强度大大降低，从而使得输电线路和变电站的外绝缘不仅可能在过电压的作用下发生闪络，更频繁的是在长期运行电压下发生污秽闪络，造成停电事故。随着工农业生产的迅速发展，污秽程度日益加剧，而输电电压等级的不断提高，电网的分布范围也愈来愈扩大。据统计，由于污秽而引起的绝缘闪络事故次数目前在电网总事故次数中已占第二位，仅次于雷害事故，而污闪事故造成的损失却是雷害事故的10倍。例如，甘肃省110~330kV送电线路31年（1985~1986年）以来发生大小事故448次，其中绝缘子串污闪事故134次，占总事故次数的29%，雷击闪络事故33次，占事故总次数的7.4%；110kV线路的污闪跳闸率平均为0.182次/百公里·年，220kV线路为0.402次/百公里·年，330kV线路为0.019次/百公里·年，总的污闪跳闸率为0.202次/百公里·年。据不完全统计，我国1969~1979年10年中发生污闪事故1483次，1979~1987年的8年中发生污闪1463次，而1986~1987年的2年间竟发生了577次，电量损失达4667万度。显然，随着空气污染的加剧，污闪事故有所增加，因污闪所造成的损失也相应增大。从电压等级来看，我国500kV线路已发生多次污闪，其中东北、华北9条500kV线路投入运行以来，污闪事故已占总事故次数的25%，华北、东北电网的500kV线路污闪跳闸率分别高达1.235次/百公里·年和1.0次/百公里·年。同时，污闪事故往往波及多条线路和多个变电站，造成大面积停电；例如1986年兰州电网的“3·16”污闪，导致14条线路41处发生污闪，5条线路9处架空地线断线，2条线路3处导线断线，全网开关跳闸106台次，5个220kV变电站和28个110kV变电站全部停电，1个220kV变电站部分停电，兰州电网与西北主网解列，电厂与系统解列2次。因此，污闪事故已成为电网安全运行的严重威胁。

随着超高压直流输电的发展，污秽条件下的电气绝缘问题就显得更加突出。由于直流输电系统中的内过电压倍数较交流的为低，而绝缘子的污秽程度却比交流系统的严重，输电线路的绝缘水平几乎完全取决于系统长期工作电压下的绝缘子的污闪特性。同时，直流电压、直流电流没有过零点，一旦发生停电，比较难于自行熄灭。因此，如果对此问题不给予足够重视并采取有效的措施，势必会造成比交流系统更为严重的危害。

我国高海拔地区的水电资源约占全国的75%以上，而这些地区又是覆冰、覆雪的高寒地带。随着该地区大型水电的不断建立，必将有多条超高压交、直流输电线路将强大的电力送到内地各工业区，因此，正在建设和即将设计的高压及超高压输电线路必然要通过高海拔和高寒地带。随着工农业的日益发展，高海拔及高寒地区的空气污染也在逐渐加重。所以，气压、污秽、覆冰及覆雪对绝缘子电气强度的影响也是人们极为关注的问题。

由于污秽微粒的物理化学特性（主要是导电性和吸水性）、污秽层（包括覆冰、雪）的厚度及其分布、作用电压的大小以及污秽层受潮（包括冰、雪融化）的气象条件等都因时因地而变化，具有较大的随机性和分散性，这就使得实测和统计的工作量极为庞大，绝缘污染

和气象条件的模拟极为复杂，给试验研究工作带来较大的困难。

通常以放电特性作为绝缘子电气性能的基本特征。对于污染绝缘来说，表征其电气性能的是在一定污秽程度和湿润条件时各种形式电压作用下的闪络电压。它不仅与污秽物的特性和数量以及湿润的强度有关，而且还与绝缘表面的爬电距离和结构造形有关。世界各国大都分别采用绝缘子表面污物的等值附盐密度、污层电导率、单位面积上的污物重量以及通过绝缘子的泄漏电流等来表征各种类型污源的污秽程度，从而研究它们与污闪电压的关系，但是，直到目前为止，有关表征各种性质污源的污秽程度的特征量问题尚没有一致的意见。在输电线路和变电站的外绝缘设计中通常采用规定的爬电比距（亦称泄漏比距）或有效爬电比距（亦称有效泄漏比距）作为各级污秽地区绝缘选择的依据。

为了提高绝缘子的运行可靠性，在污秽地区常常采用人工清扫、水冲洗等净化绝缘子的方法；在绝缘子表面涂憎水性涂料、以及采用半导体釉绝缘子、合成绝缘子与无机材料构成一体的绝缘子等，以使绝缘子表面不易形成导电水膜；研制耐污型绝缘子，以增加爬电距离和从造形上抑制电弧的发展。在实际运行中，这些防污闪对策都在不同程度上取得了一定的效果，但从技术、经济乃至劳动力、劳动强度上来看，都还存在着一定的局限性。

目 录

前 言 绪 论

第一章 绝缘子的污染及表征运行状态的特征量..... (1)

1-1 空气的污染和水分的凝结现象..... (1)

1-2 沉积在绝缘子上的污秽类型..... (5)

1-3 表征污秽绝缘子运行状态的特征量..... (12)

参考文献..... (26)

第二章 绝缘子污染表面放电的机理..... (27)

2-1 污秽绝缘子沿面放电的发展过程..... (27)

2-2 局部电弧发展成为完全闪络的条件..... (29)

2-3 交、直流电压下的污闪条件分析..... (33)

2-4 在交流电压作用下污秽绝缘子的沿面电场分布与放电过程的关系..... (38)

2-5 在交流叠加冲击电压下污秽绝缘子的沿面电场
分布与放电过程的关系..... (47)

2-6 影响污秽绝缘子沿面闪络的因素..... (54)

参考文献..... (58)

第三章 污秽绝缘的试验方法..... (59)

3-1 自然污秽试验..... (59)

3-2 交流人工污秽试验..... (62)

3-3 直流人工污秽试验..... (67)

3-4 冲击波人工污秽试验..... (75)

3-5 自然污秽绝缘子的实验室试验..... (79)

参考文献..... (81)

第四章 污秽绝缘子的电气强度..... (82)

4-1 污秽绝缘子在交流电压下的电气特性..... (82)

4-2 污秽绝缘子在直流电压下的电气特性..... (89)

4-3 污秽绝缘子的操作冲击电气特性..... (98)

4-4 污秽绝缘子的雷电冲击电气特性..... (104)

参考文献..... (108)

第五章 高海拔和高寒地区污秽绝缘子的电气强度	(109)
5-1 高海拔地区污秽绝缘子的电气特性	(109)
5-2 覆冰绝缘子的电气特性	(118)
5-3 覆雪绝缘子的电气特性	(131)
参考文献	(135)
第六章 污秽地区输电线路和变电站外绝缘的选择	(136)
6-1 绝缘选择的原则和计算方法	(136)
6-2 影响绝缘选择的各种因素的统计分布	(140)
6-3 交流工作电压下的污秽绝缘闪络率	(143)
6-4 操作过电压和雷电过电压下的污秽绝缘闪络率	(146)
6-5 直流输电线路污秽绝缘的选择方法	(149)
6-6 高海拔和高寒地区污秽绝缘的选择方法	(151)
参考文献	(154)
第七章 绝缘子运行中的防污闪对策	(156)
7-1 加强绝缘	(156)
7-2 清扫和水冲洗	(160)
7-3 涂憎水性涂料	(165)
7-4 新材料耐污型绝缘子	(168)
参考文献	(176)

第一章 绝缘子的污染及表征运行状态的特征量

1-1 空气的污染和水分的凝结现象

如果空气受到污染,不仅对人体健康有直接危害,而且弥漫在大气中的污秽物沉积在运行中的绝缘子表面上将形成污秽层。一旦空气中的水分使污秽层受到湿润,表面污层的电导率增加,从而会大大降低绝缘子的绝缘特性。因此,空气的污染和水分的凝结是导致绝缘子的绝缘特性降低的直接因素。

一、空气的污染

大气主要由多种气体混合组成,其中,还包含一些悬浮着的固体杂质和液体微粒。在大气中,除水汽、液体和固体杂质外的整个混合气体,称为干洁空气。

空气污染,是指分散在空气中的有害气体和颗粒物质累积到超过空气自净化过程所能降低的程度,在一定的持续时间内有害于生物及非生物的现象。

随着城市人口的集中和工农业的发展,全世界每年向大气排放污秽物的总量估计为6亿多吨,粉尘约占16%,二氧化硫占24%,一氧化碳占30%,其它占30%。表1-1、表1-2所列是几种主要的污秽物质及工业生产中危害较大的几种废气,表1-3为世界每年排放的污秽物总量。我国的城市能量消费水平均为6.4亿吨标准煤,仅次于美国和苏联而居世界第三位;农村消费烧去的柴草、农作物茎叶、牛粪等折合标准煤达3.1亿吨,居世界之首。因此,我

表1-1 几种主要的污秽物

污 秽 物	成 分
粉尘微粒	碳粒、飞灰、碳酸钙、氧化锌、二氧化铝等
硫化物	二氧化硫、三氧化硫、硫酸、硫化氢等
氮化物	一氧化氮、二氧化氮、硝酸、氨等
氧化物	臭氧、过氧化物、一氧化碳等
卤化物	氯、氟、氯化氢、氟化氢等
有机化合物	碳化氢、甲醛、有机酸、焦油、有机卤化物等

表1-2 几种危害较大的工业废气

废 气	来 源
粉尘废气	钢铁厂、有色金属冶炼厂、热电站、建材工业等
重金属废气	冶炼及各种原料生产过程
含硫废气	燃料燃烧、有色金属冶炼、石油炼厂、硫酸厂等
含氯废气	氯碱工厂、有机化合物的氯化反应过程
含氟废气	炼铝厂、磷矿石为原料的工厂等

表1-3

世界每年排放的污秽物总量

污 秽 物	污 源	排放量, 亿吨
煤 粉 尘	烧煤设备	1.00
二氧化硫	烧煤、烧油设备	1.46
一氧化碳	车辆、工厂设备燃烧不完全时	2.20
二氧化氮	车辆、工厂设备高温燃烧时	0.55
碳 化 氢	车辆、烧煤、烧油设备、石油、化工设备	0.88
硫 化 氢	化工设备	0.03
氨	工厂废气	0.04

国目前大气污染是比较严重的，每年由工业生产而排出的废气约为6亿米³/日，降尘量为100万吨/年，二氧化硫排出量为1500万吨/年。某些城市的大气污染情况统计表明：大气中的日平均污染浓度，北方城市的飘尘为0.24~0.195mg/m³，南方城市为0.19~0.095mg/m³；特别严重的城市的降尘月平均量可达30~70吨/公里²·月。

空气中的污秽物不仅包括上述工农业生产排出的污染物质，而且还有海水飞溅扬入大气后而被蒸发的盐粒，被风吹起的土壤微粒等。污秽物的分布随时间、地区和天气条件而变化。通常，空气中的污秽物城市多于乡村，冬季和春季多于夏季。图1-1(a)的实测结果表明，12月到翌年4月绝缘子的污染最严重。

大城市附近往往有大规模的工业设施，大量的工业和生活能源消耗，加之城区及工业区中污染源形式多样，数目众多，类型各异，因此，城市附近的污染浓度比乡村和山区大得多。由于城市的热岛效应，夜间容易造成较高的低空污染浓度，往往在早上日出前和下午日落后出现两个污染高峰，而这两个时间范围正好处于空气相对湿度（如降雾、结露等）较大的时间，对绝缘子的污闪有很大影响。图1-1(b)北京市冬季的污染浓度日变化曲线正好证明了两个高峰期的存在。

山区因地形复杂而使地面受热很不均匀，加上日照时间的变化，导致水平气温分布很不均匀。同时，在大量的背景流场的作用下，山区的风场比平原地区复杂得多。所以，山区的风类、风向、风速变化很不规则，其湍流强度一般都比平原为大，山区的空气污染就取决于

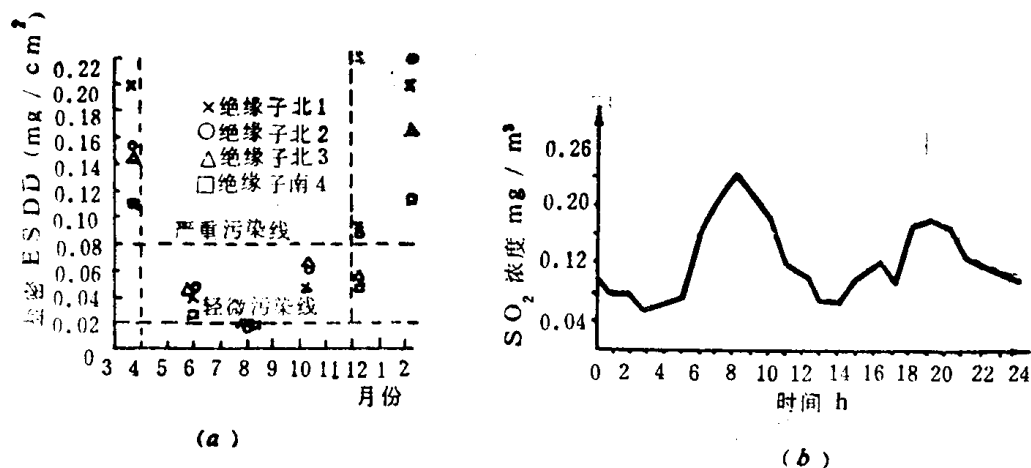


图1-1 空气污染浓度与季节、日变化关系
(a) 鞍山电厂220kV开关站; (b) 北京市冬季污染浓度日变化曲线

这些特殊的气象条件。根据地形条件及时间，山谷风引起的污染可分为：山谷中热力环流引起的漫烟；侧向封闭山谷引起的高浓度污染；山谷风转换期的污染；下坡风气层中的污染。由于山背后有空腔区和尾流区，气流越过山头时将产生过山流，因此，在山的上风侧的污染源，不仅对迎风坡的变电所造成高浓度的污染，而且烟流可能随风越过山头而被过山气流带到地面对输电线路或变电所外绝缘造成严重污染。在四周高、中间低凹形地区，如果周围没有一个明显而较宽的出口，在静风而有逆温时也很易造成高浓度的污染，实际上，现有的很多变电站、发电厂开关站等正好建于这种高浓度污染处。

当海风吹到陆地时，它的前沿为一冷暖气团的海风锋面，入侵的较冷的海风在下面，陆上的暖空气在上面。因此，峰面上形成弱逆温层，从而阻挡了陆地上污秽物的向上扩散；当海岸地带受到海风控制时，因海洋和陆地的粗糙度差别很大，很容易形成从海岸开始向内陆发展的内部边界层，此次生边界层内的湍流程度比海面上的风湍流程度大得多，很容易使陆上的烟尘形成持续的闭型扩散。由此可见，海陆风对沿海地区的空气污染不仅包括盐雾，而且导致陆地污源附近的低空污染浓度增大。然而沿海地区工业又比内地发达，工业污秽的闭型扩散与盐雾的共同作用是造成电力系统外绝缘污闪事故的一个重要因素。

乡村地带的风随高度的变化在近地面较大，虽然白天污秽的扩散与城市差别不大，而夜间的扩散速率很小，清晨又因逆温破坏而易于形成封闭型或熏烟型污染。因此，乡村地区如果有工农业生产形成的地点型污秽，在夜间、特别是清晨最易降尘，此时又正好是雾、露等的形成和发展期。显然，即使比较清洁的乡村地带，架空线路也可能发生污闪事故。

从上述可知，不同地区的空气污染有着不同的特点，污秽的沉降与气象、气候、地形等多种因素有关，架空线路和变电站的设计以及污秽绝缘的监视应充分考虑这些因素。

二、水分的凝结

大气从海洋、湖泊、河流以及潮湿土壤的蒸发中所获得的水分因自身的分子扩散和

气流的传递而散布于大气之中。在一定的条件下，水汽发生凝结而产生雾、露、霜、毛毛雨、雪、冰等是对污秽绝缘子极为不利的气象条件。

通常把含有水蒸气的混合气体称为湿气体，并且常用相对湿度来表示湿气体中的水蒸气含量。由于蒸发凝结、湍流混合等影响湿度变化的因子随年月和日变化，因此接近地面的气层中的湿度也就随之而变化。相对湿度的日变化主要决定于气温。当气温较高时，虽然蒸发加快而使水汽压增大一些，但因饱和水汽压增大得更多，结果相对湿度反而减小；反之，当温度降低时，相对湿度则增大。因此，相对湿度的日变化有一个最高值和最低值，如图1-2所示，它们分别出现在清晨和午后；相对湿度的年变化一般是夏季小，冬季大^[1-1]。但在某些季风盛行的地区，相对湿度反而是夏季大，冬季小。

空气中的水汽凝结可以发生在空中，形成云、雾；也可以发生在地表面，形成露、霜、雾凇和雨淞等。

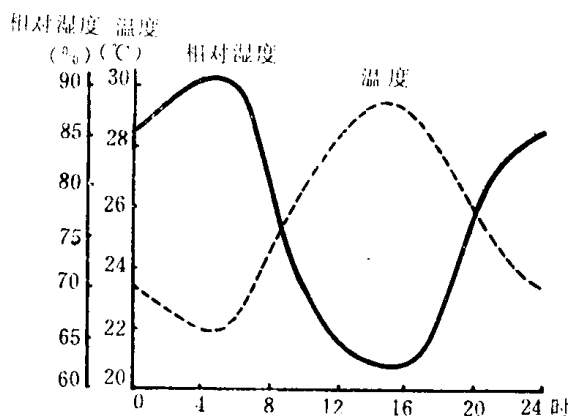


图1-2 相对湿度的日变化

在傍晚或夜间,地面或地物由于辐射冷却,使贴近地表面的空气层也随之降温,一旦温度降到露点以下时,在地面或地物的表面就会有水汽的凝结。如果此时的露点温度在 0°C 以上,就呈现微小的水滴称为露;如果露点温度在 0°C 以下,则水汽直接在地面或地物上凝华成白色的冰晶,称为霜。露和霜的形成条件是晴朗微风的夜晚。露的降水量很少,在温带地区夜间露的降水量约相当于 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 的降水层,多露之夜可有相当于 3mm 的降水量,平均约 1mm 左右。

雾是悬浮于接近地面空气中的大量水滴或冰晶所形成的一种使水平能见度小于 1km 的物理现象。对于能见度在 $1\sim 10\text{km}$ 范围内的雾又称为轻雾。形成雾的基本条件是近地面空气中水汽充沛,当地气层中的水汽压大于其饱和水汽压时,水汽即凝结或凝华成雾。一般在相对湿度小于 100% 时形成。常见的雾可分为辐射雾和平流雾两大类。当空气中有充足的水汽、天气晴朗少云、风力为 $1\sim 3\text{m/s}$ 、大气层结稳定时,由地面辐射冷却而使地气层变冷而形成辐射雾。辐射雾的高度在 $2\sim 100\text{m}$ 之间,常出现在秋天的黄昏、夜晚或早晨日出之前;在日出前后,浓度达最大。辐射雾在盆地最常见,特别是在盆地的城市及其附近,这里烟粒、尘埃多,更易形成浓雾,例如重庆冬季无云的夜晚或早晨,雾日几乎占 80% ,有时终日不散连续数天之久^[1-2]。当温差较大、暖湿空气的湿度大、风速为 $2\sim 7\text{m/s}$ 、层结较稳定时,暖湿空气经冷的下垫面而逐渐冷却形成平流雾。平流雾的范围和厚度比辐射雾大,在海洋上四季皆可出现。由于只有在季风盛行时平流雾才能到达陆上,因此,我国沿海以春夏为多雾季节。此外,陆地上还有平流辐射雾、蒸发雾、上坡雾、峰面雾、盐雾等。

输电线路的冰害主要是指雾凇和雨凇。雾凇常覆盖在导线和绝缘子迎风面上,呈白色疏松的微小冰晶或冰粒。晶状雾凇是由过冷却雾滴蒸发后,再由水汽凝华而成,它往往在有雾、微风或静稳以及温度低于 -15°C 时出现,其晶体与霜类似、结构松散、稍有震动就会脱落。粒状雾凇往往在风速较大、气温在 $-2\sim -7^{\circ}\text{C}$ 时出现,它是由过冷却的雾滴被风吹碰到冷的物体表面迅速冻结而成的,因此,结构紧密。雨凇是透明的或毛玻璃状的紧密冰层,它主要是过冷却的雨滴降到低于 0°C 的物体上冻结而成的,因此,雨凇薄而存在的时间不长。当环境温度升高时,雾凇和雨凇逐渐融化,绝缘子表面的污秽物可以得到较充分的溶解,有可能造成绝缘子串发生污闪或产生强烈的局部电弧。

从云中降到地面上的液体或固态水统称为降水。常见的降水形式有雨、雪、霰、冰雹等。由液态水滴所组成的水成云内,如果具备了云滴增大为雨滴的条件,并使雨滴具有一定的下降速度,这时降落下来的就是雨或毛毛雨;由冰晶组成的冰成云、水滴(主要是过冷却水滴)和冰晶共同组成的混合云中降下的冰晶或雪花,下落到 0°C 以上的大气层内,融化以后也成为雨滴下落而多为毛毛雨。在混合云中,由于冰水共存使冰晶不断凝华增大而成为雪花。当云下气温低于 0°C 时,雪花可以一直落到地面形成降雪;如果云下气温高于 0°C 时,则可能出现雨夹雪。一般说来,波状云降小雨,并时降时停、具有间歇性;层云只能降小雨、雪和霰。我国华南地区每年 $2\sim 4$ 月出现连续低温阴雨,长江中下游 $5\sim 7$ 月为梅雨期,重庆的梅雨季节在 $10\sim 11$ 月左右。在降水形式中,对电力系统污秽绝缘影响最大的是毛毛雨或融雪。

在空气水分的凝结现象中,雾、露、毛毛雨、霜以及雾凇、雨凇和雪、雨夹雪是导致绝缘子污闪的气象条件。同时,从绝缘子污层受潮的充分条件来看,空气的相对湿度增大,污层就越易受潮而达到饱和湿润,以致发生污闪。通过对兰州电网送电线路 $1964\sim 1981$ 年60次污

闪的气象调查表明：当相对湿度在80%以上时，闪络33次，占55%；在60~80%时，污闪16次，占26.7%；在40~60%时，闪络8次，占13.3%；在40%以下时，闪络3次，仅占5%。同时，对兰州电网送电线路38次污闪时的日降雨量统计表明：日降雨量小于0.05mm时，闪络15次，占39.5%；在0.05~2mm时，闪络13次，占34.2%；在2~5mm时，闪络6次，占15.8%；在大于5mm时，闪络4次，占10.5%。这说明气候条件使空气相对湿度越大，污闪机率也越大；但雨量越大，闪络的机率越小，以致最后达到冲洗绝缘子的效果。我们对重庆、咸阳、武功、陇西、包头等地发生的18次污闪气象条件统计表明(1-1)，大雾时闪络10次，占55.6%；小雨时闪络4次，占22.2%；雾加雨时闪络2次，占11.1%；溶雪和雨时各闪络1次，分别占5.5%；特别是雾城重庆，4次污闪都发生在雾日。西北330kV线路到1968年为止，两次污闪也都发生在雾日。由此可见，对绝缘安全运行威胁最大的是雾和毛毛雨。

综上所述，空气的污染是客观存在的，但绝缘子表面的污染程度却随季节、地点而变化，一般是冬春季节，特别是早晨和傍晚既是降尘的高峰期，又是相对湿度大，形成雾、露、多雨和雪的时间，因此，冬、春季节和早晨、傍晚是污闪概率最大的时间。我们对某电网110~330kV送电线路从1955~1986年的128次污闪事故统计计算结果是^[1-1]：1~3月份占32.8%，9~12月份占28.1%；傍晚6~9点占28.9%；早上6~8点占21.9%。当然，由于污闪过程具有随机性，因此，污闪概率与气象条件和降尘时间的关系也具有很大的随机性。

1-2 沉积在绝缘子上的污秽类型

随着城市人口的集中和工业的发展，乡镇企业和交通运输业的兴旺，以及生态环境所产生的污染，由于空气的水平运动可将某一地区的污秽输送到另一地区。于是，弥漫在空气中的污染物日积月累地沉积在运行中的绝缘子表面上，形成了污秽层。绝缘子的污秽物通常包含有可溶的导电性物质和不可溶的吸水性物质，前者在遭受湿润、溶解后将使绝缘子表面污层的电导急剧增加，而后者却能保持水分并起促进污层电导增大的作用。按照污源特征可将绝缘子的污秽分为工业型污秽和自然型污秽两大类。

一、工业型污秽

工业型污秽是在工业生产过程中产生的污染物质，大多数是由工厂烟囱排出的气相、液相和固相污物。各种工业污秽不仅物理化学性质极不相同，而且成分复杂，浓度和固体微粒的大小也不一样。工业污秽在城市和近郊以及工业集中的地区特别严重，包括化工厂、冶炼厂及火电厂的排烟，水泥厂、煤矿或煤场的粉尘，循环水冷却水塔或喷水池的水雾等。比如：上海市区的工业降尘已达每平方公里每日平均约1t，在某些工厂区近旁高达3t，郊县的田野也达0.7t左右；而该地区的220kV输电线路有30%以上的走廊穿插于烟囱林立、空气混浊、污源性质极其复杂的工厂近旁；北京地区的平均降烟日数为150天，已达国际相对卫生标准的3倍；兰州市的局部地区气体中氯气含量达 $7.93\text{mg}/\text{m}^3$ ，雪水电导率达 $6.24\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ ，绝缘子串的等值盐密最大达 $1.45\text{mg}/\text{cm}^2$ 。从我国东北地区和美国南部沿海地区的污闪事故的统计结果（见表1-4、1-5）可以看到^[1-2,1-3]，在各类工业污秽中，化工污秽的影响最严重，其次是水泥、冶金等污秽。我国1977~1982年110~220kV输电线路污闪跳闸326次，

表1-4

东北地区污闪跳闸与污秽性质的关系

污 秽 性 质	化 工	水 泥	冶 金	采 矿	盐 尘	煤 烟	工 业 综 合	一 般 地 区	合 计
污闪串数	67	40	29	22	34	63	9	58	322
占总串数百分比%	20.8	12.44	9	6.82	10.54	19.6	2.8	18	100
该类污区绝缘子串占总串数百分比%	1.37	1.08	1.03	1.08	3.34	7.05	3.05	82	100
每100串中污闪串数	2.84	2.16	1.64	1.18	0.59	0.52	0.17	0.04	

表1-5

美国南部沿海地区污闪时污秽物、天气和大气条件的类型

污 秽 物 类 型	雾	露	毛毛雨 或轻雾	冰	雨	无风	大风	湿雪	好天气	总计
海 盐	14	11	22	1	12	3	12	3		78
水 泥	12	10	16	2	11	4	1	4		60
化 肥	7	5	8		1	1		4		26
飞 尘	11	6	19	1	6	3	1	3	1	51
路 盐	8	2	6		4	2		6		28
钾 盐	3		3							6
冷 却 塔	2	2	2		2					8
化学制品	9	5	7	1	1			1	1	25
石 膏	2	1	2		2			2		9
混合污秽	32	19	37		13	1		1		103
石 灰 石	2	1	2		4		2	2		13
磷酸盐和硫酸盐	4	1	4		3					12
油 漆	1		1			1			1	4
造 纸 厂	2	2	4		2			1		11
奶 粉	1	1	1			1				4
酸性废气	2		3							5
鸟 粪	2	2	3		1	2			2	12
制锌工业	2	1	2		1			1		7
碳	5	4	5			4	3	3		24
肥 皂	2	2	1			1				6
炼 钢 厂	6	5	3	2	2			1		19
碳化物残渣	2	1	1	1		1		1		7

续表

污 秽 物 类 型	雾	露	毛毛雨 或轻雾	冰	雨	无风	大风	湿雪	好天气	总计
硫	3	2	2							7
铜和镍盐	2	2	2			2		1		9
木 纤 维	1	1	1		1			1		5
推土机引起的灰尘	2	1	1					1		5
制 铝 厂	2	2	1		1					6
制碱厂(钠厂)	1		1							2
活性垃圾堆	1	1	1							3
碎 石 机	3	3	5		1					14
总 计	146	93	166	8	68	26	19	37	4	
占天气的%	25.75	16.4	29.3	1.4	12	4.58	3.36	6.52	0.71	

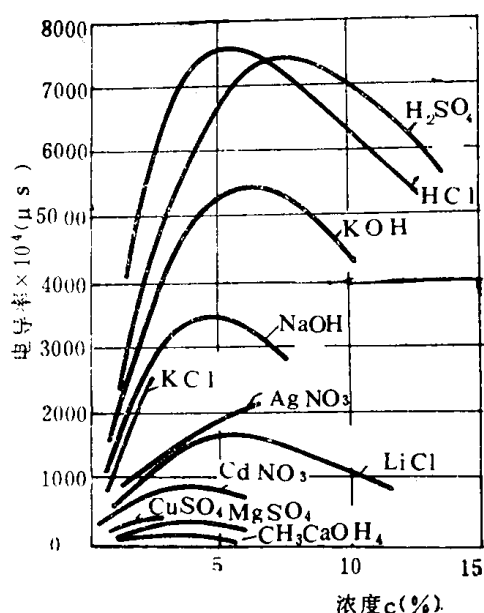


图1-3 电解水溶液的电导率与浓度的关系

其中有1/3是由明显工业污染源引起的事 故。下面讨论几种常见工业型污秽的特性。

1. 化工污秽

这种污秽是由开采化工原料和制造化工产品的工矿企业在生产过程中或由烟囱排出的废气、脏物以及化工原料粉尘沉积在绝缘子表面上而形成的。化工污秽的主要成分是各种酸、碱、盐类。不管其成分如何复杂多变,各种化工污秽中都含有能导电的电解质。由于电解质在潮湿污层中溶解后使绝缘子污秽层的导电能力急剧增大,因而容易引起污闪事故。从图1-3所示的一些常见电解质水溶液的电导率与浓度的关系曲线可知;当浓度较小时,电导率随浓度的增大而增加;当浓度增大到一定值后,电导率

却随浓度增加反而下降;强酸和强碱的电导率在不同浓度下都比其它电解质高。因此,含有强电解质的化工污秽比含有弱电解质的化工污秽更容易引起绝缘子发生污闪。

城市附近因热岛效应等原因导致云多、降水量多,化工污秽中的 SO_2 和 NO_x 等电离气体在一系列复杂化学反应之下形成硫酸和硝酸。通过成雨过程和冲刷过程形成酸雨,也会使绝缘子表面的导电性显著增加。

我国的兰州、抚顺、沈阳、上海、重庆、成都等地区电网的污闪事故都与化工污秽有关。例如,对成都青白江地区化工厂附近运行的绝缘子测试表明,即使在下过大雨被冲洗的情况下,其等值盐密也达 $0.65\text{mg}/\text{cm}^2$;兰州地区在有害化工气体的影响下,等值盐密测量值平均为 $0.306\text{mg}/\text{cm}^2$;佳木斯化工区,等值盐密大于 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ 。这里应当指出,在化工污秽中,以天然气为原料的化工厂烟囱排出的炭黑污秽不易溶于水,实测得到的等值盐密并不高,但

污秽中含有各种金属氧化物和硫化物，很容易造成绝缘子污闪。例如四川维尼纶厂附近的220kV变电站因炭黑污秽而发生过几次污闪事故^[1-4]。

2. 水泥污秽

众所周知，水泥是一种重要的建筑材料。它的主要成分是硅酸钙（ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ）和铝酸钙（ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ）、铝铁酸钙（ $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）。水泥污秽虽是一种较难溶解的弱电解质，但易于吸潮，然后结壳。在生产、运输和建筑工地上扬起的水泥粉尘降落在运行中的绝缘子表面上，因雨洗效果小，清扫又十分困难，附着于绝缘子表面的沉积量将与日俱增，同时，在绝缘子上的附着密度是上表面小，下表面大，每年的附着总密度可高达 $40\text{mg}/\text{cm}^2$ 以上。

在以水泥污秽为主、兼有其它强电解质污秽的情况下，水泥对绝缘子表面上的污秽起保水作用，促使污秽层中的强电解质充分溶解，电导率增大，从而导致绝缘子的污闪电压大为降低。比如重庆南坪变电站地处重庆水泥厂附近，污染源位于南坪山坡下，变电站位于气流的回流区和过山气流的下沉气流中，水泥飘尘抬升不高，很快落到变电站区域，加之南坪地区上风侧的机械、化工等污染源对迎风侧的变电站造成高浓度污染，因此，该变电站曾多次发生污闪事故^[1-4]。

3. 冶金污秽

冶金类污秽的种类繁多，主要有炼钢厂、铝厂及其它有色金属冶炼厂烟囱所排出的污秽物。由于对这种金属粉尘污秽往往未引起足够重视，美国的中西部工业区、苏联的克拉斯诺雅尔斯克地区、我国的鞍山和重庆钢铁企业附近的变电站、线路都不止一次发生过严重的污闪事故。

钢铁企业的金属粉尘沉积在绝缘子表面上，在其受潮后与烟囱排出的高浓度黄烟（主要含 SO_2 ）起化学反应，生成 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ，使绝缘子的污秽层呈橙黄色。如果被污染的绝缘子受到循环水冷却塔或喷水池等的水雾湿润，其污层的导电性能将显著增大。从表1-6可以看到，金属粉尘与水塔水滴溶合后，污秽中的亚硫酸根显著增加，可高达无水滴溶合时的4.5倍。这说明硫酸处理后的循环水中有大量硫酸根离子、以及重碳酸根离子、钙、镁、钠离子，因此，钢铁的金属粉尘与水雾共存将加剧绝缘子的污染程度。除此之外，水塔水雾中的碳酸钙、碳酸镁和硅酸盐与金属粉尘的碳酸钙和硅酸盐附着在绝缘子表面上形成灰白色污垢，给定期清扫绝缘子造成了麻烦。

表1-6 鞍山钢铁企业地区发电厂的变电站内绝缘子的污秽组分

污 秽 试 样	灼碱	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	NaO	TiO_2	SO_3^{2-}
户外受水塔水滴影响的金属粉尘污秽(%)	8.00	23.02	4.00	46.99	8.58	1.38	0.82	0.35	0.23	3.88
不受水塔水滴影响的金属粉尘污秽(%)	13.40	25.04	5.35	43.72	7.98	1.28	0.83	0.38	0.39	0.86

与钢铁厂一样，炼铝厂的用电量大，因而厂区附近的高压架空线路和配电装置甚多。由于炼铝厂附近空气中含有大量的铝钒土、二氧化硅、氟的化合物和含碳物质。所以，运行中的绝缘子污染很严重，一般在紧邻厂区的绝缘子的污层电导率可达 $30\mu\text{s}$ 以上，污秽的月平均沉积密度约为 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 。由于这种以氧化铝、碳、氟化氢、固态氟、含硫化合物为主的污秽属于强电解质，应当特别注意采取有效的防污闪措施。

凡是冶金型污秽一般都属于强电解质，对电力系统的外绝缘均有严重威胁。

4. 煤烟污秽

煤和煤气是人类生活和生产中使用最广的燃料，其燃烧生成的大气污染物有 CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_2 、烟黑和飞灰。煤中的硫化铁（ FeSO_2 ）和有机硫、硫酸盐为0.5~5.0%，我国的煤含硫量高于2%，尤其是南方的煤高达5~6%以上。这些矿物质在燃烧后以飞灰的形式排到大气中。火电厂往往采用劣质煤作燃料，其含灰量为16~34%；烟灰的主要成分是 SiO_2 ，其次是 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 以及其它金属氧化物，含盐量约为4%；烟气中以 SO_2 为主，它与含有金属氧化物的烟灰相结合，在粉尘表面被氧化为 SO_3 ，一旦遇水蒸汽则生成硫酸。由此可见，煤烟污秽属于强电解质，它是火电厂地区外绝缘污闪的重要污染源。我国对111个火电厂的污闪事故统计（表1-7）表明其污闪事故是较为频繁的。

表1-7 全国火电厂污闪事故的统计

地 区		华 东	东 北	华 北	西 北	中 南	西 南
有水塔的电厂	总厂数（个）	14	10	17	12	9	1
	发生过污闪的厂数（个）	7	8	14	6	6	1
	污闪事故次数（次）	13	9	36	15	25	2
	平均污闪事故率（次/百厂·年）	9.8	9.0	21.1	12.5	27.7	20
无水塔的电厂	总厂数（个）	18	7	5	3	8	7
	发生过污闪的厂数（个）	8	1	2	0	1	8
	污闪事故次数（次）	18	2	1	0	10	14
	平均污闪事故率（次/百厂·年）	10	2.85	2.0	0	12.5	20

从表1-7的统计结果可以看到，有冷却水塔的电厂污闪率比无冷却水塔电厂的污闪率要高得多。这是因为冷水塔排出的热空气遇到冷空气凝结成水蒸汽、经冷水塔空气流带走的水滴在水塔周围形成飘滴，它们下降到绝缘子上使烟灰污秽得以充分湿润；电厂循环水经加酸处理后含有大量的酸根离子和其它金属离子，从而使水滴的电导率增加。所以，冷却水塔的水雾对污闪有直接关系。对鞍山、阜新、重庆发电厂水塔水雾的分析结果为：全固1245mg/L，溶固1214mg/L，硬度H13.87PM（毫克当量/升），碱度A1.92PM（毫克当量/每升） Ca^{++} 228mg/L， Mg^{++} 29.18mg/L， Na^+ 18.3mg/L， Fe^{++} 5.36mg/L， Cu^{++} 0.013mg/L， SiO_3 -392mg/L， HCO_3^- 115.9mg/L， Cl^- 13mg/L， SO_4^- 649.1mg/L。同时应当指出，水雾除使煤烟灰湿润之外，随着天气的变化，使烟灰湿润的水分蒸发后在绝缘子表面上留下盐分，当受潮后又变成导电离子，将使烟灰污秽的电导率进一步增大^[1-5]。

上述几种典型的工业污秽大多在城区和城郊、以及工矿附近比较严重，属于“地点污秽”。自然污秽虽不如工业污秽严重，但具有普遍性，而且多属于“地区污秽”。特别是工业污秽与自然污秽共存的“混合污秽”危害更大。

二、自然型污秽

自然型污秽是在自然条件下产生的污秽，可分为尘土污秽、盐碱污秽，海水盐雾和鸟粪

污秽。

1. 尘土污秽

这种自然污秽的主要成分是从地面扬起的尘土，以及农作物施加的化肥和农药等。当刮风或运输车辆行驶和农业耕作时，从地面扬起的尘土污秽不断沉积在绝缘子表面上，也会引起污闪事故。比如，1985年2月河北南部六个地区、约5.3万平方公里范围内遭受连续五天大雾的“袭击”，使输电线路污闪跳闸19次共88次，其中71.87%均发生在自然型尘土污秽的农田地区。

在尘土污秽地区，绝缘子的污染程度主要取决于土壤的性质，特别是土壤的含盐量、可溶性与生成电解质的能力；风对土壤的侵蚀以及尘土在绝缘子表面上的粘附能力。实际上，在大多数尘土污秽地区中，从地面扬起的尘土中含有的导电物质并不多（黄土约含5%），主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，几乎不含盐类等强电解质，而且溶解度也较小。日本的试验结果表明，尘土染污绝缘子的等值盐密大约超过 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 以后，其污闪电压就显示出饱和特性。在森林和沼泽地区，不仅土壤中含有的可溶性导电物质很少，而且地面又常被草皮所覆盖。因此，这类地区绝缘子的污染程度并不严重。例如，我国秦岭以南的陕南地区，山峦起伏，自然植被好，森林繁茂，高压输电线曾在十二年的运行中都没有发生污闪事故。在广大的田野地区，随着化学肥料和农药的大量使用，乡镇企业的发展和运输工具的剧增，将导致土壤中可溶性导电物质的含量相继增大。我国黄河中、上游的黄土高原和沙漠地带以及云贵高原部分地区，有大面积的开垦地没有草皮覆盖，也会出现类似的污染情况。例如，我国陕西关中地区，110kV及以上的线路在12年运行中，7年有污闪事故，污闪事故率大于0.1次/百公里·年的有五年，占总运行年的41.7%；1987年1月西安地区及附近在气候突变的条件下，电网送电线路和变电站30多处发生污闪，事故波及55个变电站；1987年2月，在有浓雾、小雨或雪的情况下，关中电网又多次发生污闪事故。

一般说来，森林区和农业区的共同特点是污秽量不大，污层与绝缘子表面不易粘结，污秽沿表面分布也不均匀，大部分污秽分布在绝缘子的下表面上，很容易除去；绝缘子表面的污秽密度不大于 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ ，污层表面电导率小于 $1.0\mu\text{S}$ 。由于农业区土壤的可溶性导电物质平均含盐量达0.3~1.5%，则绝缘子的污秽密度可达 $1.0\text{mg}/\text{cm}^2$ ，污层表面电导率为 $1.0 \sim 5.0\mu\text{S}$ 。

2. 盐碱污秽

在盐碱地区，不仅尘埃中含有大量能溶于水而生成电解质的微粒，而且大多数盐碱地区还存在含有可溶矿物质的水域。根据土壤盐渍化的程度可分为四类：弱、中、强、很强含盐土壤，其可溶于水的盐的计算含量分别为 $<0.5\%$ 、 $0.5 \sim 1.5\%$ 、 $1.5 \sim 3.0\%$ 、 $>3.0\%$ 。土壤中易溶于水而生成离子的盐份量，以及在风力作用下能从土壤表面扬起的微粒，风自盐湖水库表面吹起含导电物质的水珠蒸发后在空气中留下的可游离物质等，最易造成绝缘子严重污染。因此，属于盐碱地区的沙漠和半沙漠地带是属于重污秽区。

这类地区绝缘子污秽的特点是：因风雨的净化作用，上表面的积污要比下表面小好几倍，而下表面有棱的绝缘子污染特别严重。因此，盐碱地区绝缘子的染污是不均匀的，绝缘子的空气动力特性不起作用，采用双伞无棱的防污型绝缘子是最合理的。同时，污秽中的可溶成分达20~30%，其中电导率接近NaCl的物质约为50%，有时竟达100%，污层表面的电导率可达 $50\mu\text{S}$ 。应当特别指出的是，盐碱地区绝缘子污秽中的含盐量常比土壤中的含盐量高