

# 不同环境条件下特高压直流线路绝缘子 长期积污特性研究

黄瑞平<sup>1</sup>, 田亮<sup>1</sup>, 刘世涛<sup>2</sup>, 李晓光<sup>3</sup>, 高嵩<sup>4</sup>, 卢明<sup>5</sup>, 颜子威<sup>6</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011; 3. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210029; 5. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 6. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:**以4类典型气候条件(极干旱、半干旱、半湿润、湿润)的特高压直流输电线路绝缘子为研究对象,开展了绝缘子自然积污试验,获得了不同环境条件下特高压直流绝缘子的积污特性,揭示了不同伞型、不同憎水性表面绝缘子的积污特性。结果表明:从极干旱地区至湿润地区,绝缘子的灰盐比和不均匀积污系数均下降,湿润地区外伞型绝缘子与钟罩型绝缘子的等值盐密比为0.82,极干旱和半干旱地区耐张串复合绝缘表面与亲水性表面绝缘子等值盐密比分别为1.64和1.85。研究成果可为我国不同环境地区特高压直流输电线路外绝缘差异化设计提供依据。

**关键词:**特高压直流;绝缘子;不同气象环境;积污特性

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)03-0060-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.03.010

## Study on Long-term Pollution Accumulation Characteristics of Insulators for UHV DC Lines Under Different Environmental Conditions

HUANG Ruiping<sup>1</sup>, TIAN Liang<sup>1</sup>, LIU Shitao<sup>2</sup>, LI Xiaoguang<sup>3</sup>, GAO Song<sup>4</sup>, LU Ming<sup>5</sup>, YAN Ziwei<sup>6</sup>  
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210029, China; 5. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 6. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Taking the UHV DC transmission line insulators under four typical climatic conditions such as extremely arid, semi-arid, semi humid, and humid as research objects, we conducted natural pollution accumulation tests on insulators. The pollution accumulation characteristics of UHV DC insulators under different environmental conditions were obtained, and the pollution accumulation characteristics of insulators with different umbrella types and hydrophobic surface were described. The results show that from the extremely arid region to humid region, both the ratio of ESDD to NSDD and uneven pollution coefficient of the insulators decrease. The ESDD ratio of bell-type insulator to outer umbrella insulator in humid area is 0.82, and the ESDD ratio of composite surface insu-

收稿日期:2020-02-23 修回日期:2020-04-09

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-17-009)

作者简介:黄瑞平(1984-),男(汉族),湖南浏阳人,教授级高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术;田亮(1989-),男(汉族),山西运城人,工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。

lator to hydrophilic surface insulator of tension string in extremely arid and semi-arid areas is 1.64 and 1.85, respectively. The research results can provide a reference for the differential design of external insulation for UHV DC transmission lines at different environmental areas.

**Key words:** UHV DC; insulators; different meteorological environment; pollution accumulation characteristics

## 0 引言

特高压直流工程作为远距离大容量的输电方式,承担区域电网甚至全球能源之间的电力互联,如果特高压线路发生污闪,将造成较大的经济损失和社会影响<sup>[1]</sup>。积污是绝缘子发生污闪的首要条件,是外绝缘设计与选型考虑的重点<sup>[2]</sup>。特高压直流线路跨越多个气候区,不同气候条件下绝缘子的积污情况差异较大,我国早期的特高压直流工程设计中因缺乏不同气候环境条件下的积污数据,关键的积污参数多参照交流工程选取,不能合理确定特高压直流工程的外绝缘配置。目前国内对±500 kV 直流线路的积污特性开展了较多研究<sup>[3-11]</sup>,但相关研究大多针对于南方湿润地区,而且积污年限较短。另外,相关研究表明随着电压等级的增大,绝缘子的积污水平及积污不均匀系数等特征量之间的差异较明显<sup>[12]</sup>,因此,±500 kV 直流线路的研究成果并不完全适用于相同气候环境下的特高压直流线路。目前国外亦缺少不同环境下的特高压直流工程积污数据。

为获得不同气象环境条件下特高压直流线路长期的积污特性,本研究通过开展4种气象环境下(极干旱、半干旱、半湿润、湿润)特高压直流输电线路绝缘子的长期自然积污试验,获得不同典型气象环境地区绝缘子的积污特性参数,针对不同因素对

绝缘子表面积污水平的影响进行对比分析,为合理确定不同环境地区特高压直流输电工程的外绝缘配置,提高工程的可靠性和经济性提供依据。

## 1 测量方案

### 1.1 测点选择

分别选取新疆(极干旱)、宁夏(半干旱)、河南(半湿润)和江苏(湿润)地区已投运的天中线、灵绍线、锦苏线和锡泰线等±800 kV 直流线路作为研究对象,制定了测量方案,如表1所示。测量方案遵循以下原则:①不同环境地区测点不少于3个,每个测点至少含两片(组)绝缘子;②绝缘子串型包括I串(包括测污试挂串)、V串、耐张串;③绝缘子材质包括瓷、玻璃、复合绝缘材料。

### 1.2 测量方法与数据处理

在2017-2019年对各测点采用上塔擦拭与落地水洗方式对绝缘子表面污秽进行取样,取样步骤和测量方法均按照Q/GDW 1152.2—2014<sup>[13]</sup>执行。运行经验表明,同一地区具有相同积污年限绝缘子的等值盐密、灰盐比以及不均匀积污系数均近似服从正态分布<sup>[14-16]</sup>,Grubbs 检验法适用于服从正态分布且数据量不大的总体<sup>[17]</sup>。基于此,本研究对处于某一环境地区,如半湿润环境下这种测量点数量相对较大但总体适中的地区采用Grubbs 准则对异常值进行剔除。

表1 取样方案  
Tab.1 Sampling plan

环境类型	地区	线路名称	编号	塔号	位置	积污期/年
极干旱	新疆哈密	±800 kV 天中线	A <sub>1</sub> 、A <sub>2</sub>	64 <sup>#</sup> 、218 <sup>#</sup>	极II、空挂	3~5
			A <sub>3</sub>	1 <sup>#</sup>	极I	3
			A <sub>4</sub> 、A <sub>5</sub>	65 <sup>#</sup> 、219 <sup>#</sup>	极II	3
半干旱	宁夏	±800 kV 天中线	B <sub>1</sub> ~B <sub>4</sub>	2612 <sup>#</sup> 、2730 <sup>#</sup> 、2603 <sup>#</sup> 、2702 <sup>#</sup>	极II	5
		±800 kV 灵绍线	B <sub>5</sub> 、B <sub>6</sub>	65 <sup>#</sup> 、85 <sup>#</sup>	极II	3
半湿润	河南	±800 kV 天中线	C <sub>1</sub> ~C <sub>8</sub>	4184 <sup>#</sup> 、4189 <sup>#</sup> 、4190 <sup>#</sup> 、4191 <sup>#</sup> 4115 <sup>#</sup> 、4116 <sup>#</sup> 、4117 <sup>#</sup> 、4119 <sup>#</sup>	极II、空挂	1~3
			C <sub>9</sub> ~C <sub>12</sub>	3934 <sup>#</sup> 、3935 <sup>#</sup> 、3937 <sup>#</sup> 、3938 <sup>#</sup>	极II	
			C <sub>13</sub> ~C <sub>14</sub>	3935 <sup>#</sup> 、4115 <sup>#</sup>	极II	3
湿润	江苏	±800 kV 锦苏线	D <sub>1</sub> ~D <sub>4</sub>	4204 <sup>#</sup> 、4205 <sup>#</sup> 、4206 <sup>#</sup> 、4208 <sup>#</sup>	空挂、极I、极II	3~5
		±800 kV 锡泰线	D <sub>5</sub> 、D <sub>6</sub>	2626 <sup>#</sup> 、2628 <sup>#</sup>	极I、极II	3、4

## 2 测量结果与分析

### 2.1 极干旱条件下绝缘子的积污特性

以±800 kV 天中线新疆段 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 污秽测点为研究对象,带电串与空挂串的积污测量结果如图 1 所示,极干旱地区带电串与空挂串的积污特征如表 2 所示。

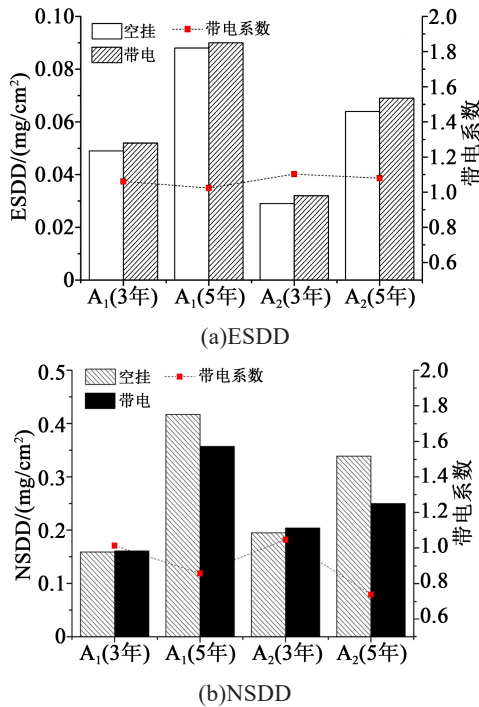


图1 极干旱地区绝缘子污秽测量结果

Fig.1 Pollution measurement results of insulator in extreme-arid area

表2 极干旱地区绝缘子的积污特征

Tab.2 The pollution accumulation characteristics of insulator in extreme-arid area

测点	灰盐比		不均匀积污系数	
	3年	5年	3年	5年
A <sub>1</sub> (空挂)	3.24	4.73	7.49	12.3
A <sub>1</sub> (带电)	3.09	3.95	6.16	7.1
A <sub>2</sub> (空挂)	6.72	5.26	5.71	24.8
A <sub>2</sub> (带电)	6.38	5.03	4.3	16.9
平均值	4.85	4.74	7.12	14.1

#### (1) 带电系数

带电系数是指同种污秽条件下,同型式绝缘子带电所测等值盐密(ESDD)、等值灰密(NSDD)与同期非带电所测 ESDD、NSDD 值之比,一般为 1.1~1.5。通常情况下,ESDD 和 NSDD 的带电系数有差异时,以等值盐密的带电系数为主。由图 1 可知,各测点悬挂的带电串绝缘子等值盐密值均稍高于空

挂串绝缘子,绝缘子带电与否对灰密的影响未体现出显著的规律。由图 1(a)可知,极干旱地区绝缘子的带电系数分散性小,为 1.02~1.10,平均值为 1.06。

#### (2) 灰盐比

灰盐比是指绝缘子等值盐密(ESDD)与等值灰密(NSDD)之比。由表 2 可见,本次测量的两测点空挂串绝缘子的灰盐比稍高于带电串,A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 两测点的绝缘子经过 3 年与 5 年积污期后其灰盐比差异较小,极干旱地区绝缘子的灰盐比平均值为 4.8。

#### (3) 不均匀积污系数

不均匀积污系数是指绝缘子下表面与上表面等值盐密之比。绝缘子上、下表面的污秽分布情况如图 2 所示,图中下标 T、B 分别代表绝缘子的上、下表面。表 2 给出了两测点绝缘子的不均匀积污系

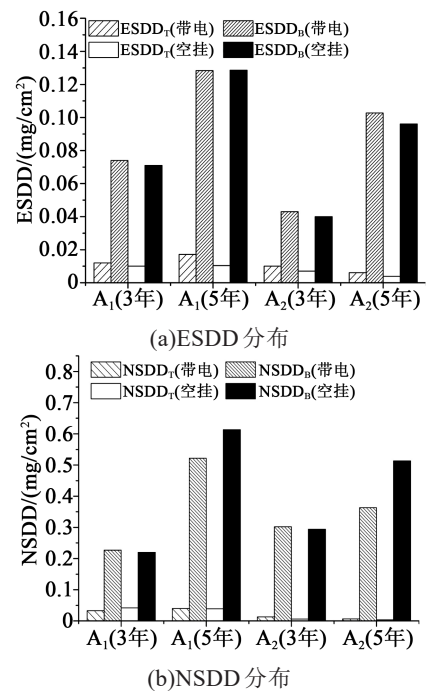


图2 极干旱地区绝缘子上下表面污秽分布

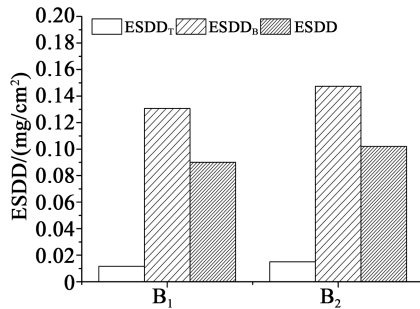
Fig.2 Pollution distribution on upper and bottom surface of insulator in extreme-arid area

数,可以看出极干旱地区绝缘子积污 5 年期的不均匀积污系数要远大于积污 3 年期的,前者的平均值约为后者的 2 倍,说明上、下表面污秽分布差异随积污年限的增加而显著增大。以绝缘子 5 年积污期的污秽测量值为依据,该地区的均匀积污系数为 7.1~24.8,平均值为 14.1。

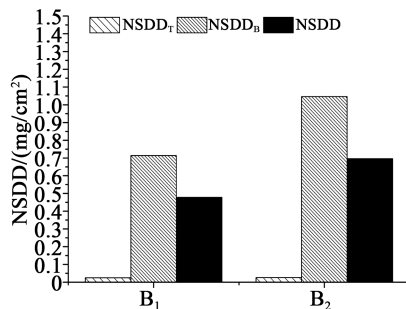
经查证,在 2018 年和 2019 年秋季测污前,哈密地区夏季均为暴雨天气,雨水的冲刷极易导致上表面污秽的流失,因为测试串布置为直线悬垂串,雨水冲刷对下表面积污的影响较小,导致极干旱地区所测不均匀积污系数较大。

2.2 半干旱条件下绝缘子的积污特性

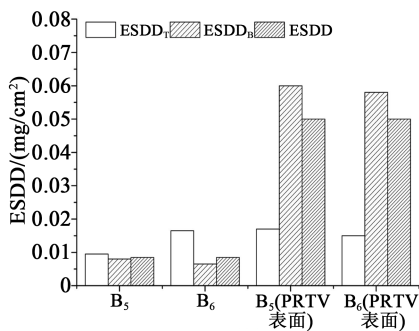
半干旱地区绝缘子的污秽测量结果如图3所示,灵绍线B<sub>5</sub>、B<sub>6</sub>测点绝缘子串由4片三伞型瓷绝缘子组成,第3片绝缘子上涂覆有RTV涂料。



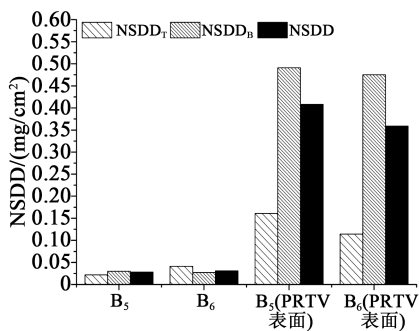
(a)天中线测点ESDD分布



(b)天中线测点NSDD分布



(c)灵绍线测点ESDD分布



(d)灵绍线测点NSDD分布

图3 半干旱地区绝缘子的污秽测量结果

Fig.3 Pollution measurement results of insulator in semi-arid area

由图3可知,天中线两测点绝缘子的等值盐密和灰密差异较小,灵绍线复合绝缘表面三伞绝缘子的污秽度远高于同串上的瓷表面三伞绝缘子,前者等值盐密和灰密的平均值分别为0.048 mg/cm<sup>2</sup>、0.383 mg/cm<sup>2</sup>,分别为后者的5.4和13倍。半干旱地区绝缘子的积污特性参数如表3所示。

表3 半干旱地区绝缘子的积污特征

Tab.3 Pollution accumulation characteristics of insulator in semi-arid area

测点	绝缘子类型	灰盐比	不均匀积污系数
B <sub>1</sub>	钟罩型瓷	5.3	11.2
B <sub>2</sub>	钟罩型瓷	6.8	9.8
B <sub>5</sub>	三伞型瓷	3.3	0.84
	三伞型瓷(涂RTV)	8.16	3.5
B <sub>6</sub>	三伞型瓷	3.6	0.4
	三伞型瓷(涂RTV)	7.2	3.9

(1)灰盐比

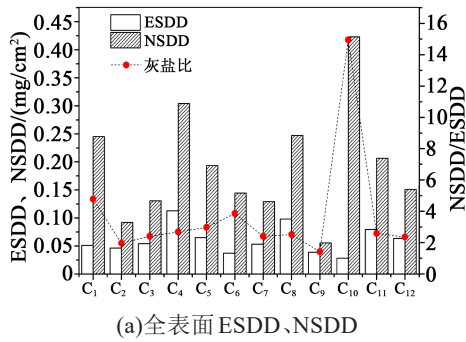
从表3可以看出,半干旱地区天中线钟罩型瓷绝缘子的灰盐比平均值为6.05。对于灵绍线测点,同串上涂有RTV的三伞型瓷绝缘子灰盐比明显高于未喷涂RTV的绝缘子,两者比值约为2.2,这是因为涂有RTV涂料的瓷绝缘子具有高表面粘附能与摩擦力,更容易满足颗粒物的沉积条件<sup>[18-19]</sup>。综上所述,半干旱地区钟罩型瓷绝缘子的灰盐比平均值为6.05,三伞型瓷绝缘子的灰盐比平均值为3.45。

(2)不均匀积污系数

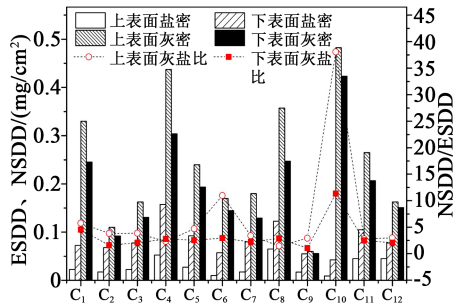
由表3可知,B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>两测点钟罩型绝缘子的不均匀积污系数值分别为11.2和9.8,平均值为10.5。B<sub>5</sub>、B<sub>6</sub>两测点三伞型瓷绝缘子的等值盐密上、下表面分布较钟罩型更为均匀,其不均匀积污系数值小于1。此外,涂覆RTV涂料的绝缘子不均匀积污系数值要显著高于未涂覆RTV涂料的绝缘子,平均值为3.7,由图3可以看出两者积污的差异主要体现在绝缘子下表面。

2.3 半湿润条件下绝缘子的积污特性

半湿润地区±800 kV天中线河南段12个测点分别位于郑州市(C<sub>1</sub>~C<sub>4</sub>)、新乡市(C<sub>5</sub>~C<sub>8</sub>)、焦作市(C<sub>9</sub>~C<sub>12</sub>)。各测点采集的带电绝缘子积污测试数据见图4,其中位于郑州与新乡两地的8个测点同时具备不带电(3片串)试验串挂点,取3片绝缘子的盐灰密平均值作为该测点不带电串的分析数据,并与带电串测量结果进行对比分析,结果如图5所示。



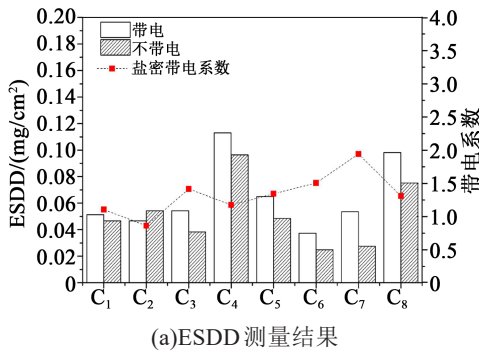
(a)全表面ESDD、NSDD



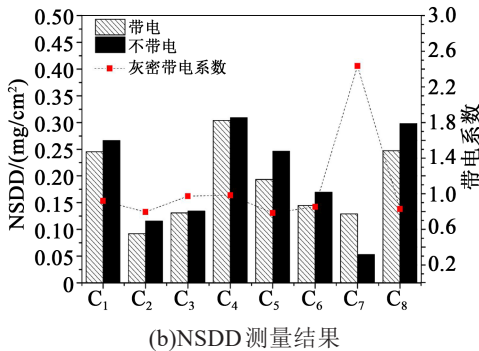
(b)上、下表面ESDD、NSDD

图4 半湿润地区绝缘子污秽测量结果

Fig.4 Pollution measurement results of insulator in semi-humid area



(a)ESDD测量结果



(b)NSDD测量结果

图5 半湿润地区带电与不带电绝缘子积污对比

Fig.5 Comparison of contamination accumulation between charged and uncharged insulator in semi-humid area

(1)带电系数

由图5可知，半湿润地区带电积污绝缘子的等

值盐密除C<sub>2</sub>异常外均大于不带电绝缘子，带电系数为0.86~1.94，剔除异常值后，平均值为1.39。

(2)灰盐比

由图4可见，除C<sub>10</sub>测点绝缘子的灰盐比数值异常外，其余测点绝缘子的灰盐比分散性不大，统计得到全部带电测点绝缘子的灰盐比如表4所示。由表4可知，绝缘子上表面灰盐比普遍比下表面灰盐比大，与文献[14]中哈郑线河南段绝缘子灰盐比的测量结果一致，剔除C<sub>10</sub>异常点后，±800 kV天中线河南段灰盐比范围集中在1.43~4.78，平均值为2.73。

表4 半湿润地区带电绝缘子积污数值统计

Tab.4 Statistics of pollution accumulation on the surface of charged insulator in semi-humid area

统计量	灰盐比(T)	灰盐比(B)	灰盐比	不均匀积污系数
最大值	11.00	4.50	4.78	5.26
最小值	1.50	1.09	1.43	1.85
平均值	4.12	2.49	2.73	2.94

(3)不均匀积污系数

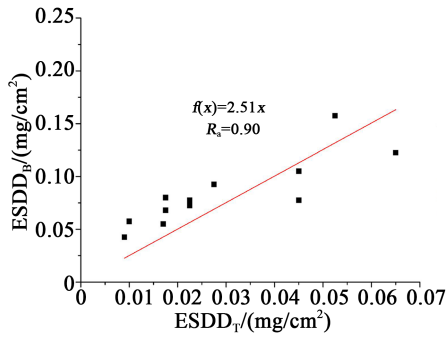
半湿润地区测试绝缘子串挂点数量相对于其他气候区较多，将12个带电测点绝缘子的数据进行拟合，考虑到刚开始积污时，绝缘子上、下表面污秽值均为0，以函数 $f(x)=ax$ 对所有散点进行拟合，结果如图6所示。从图6可以看出，绝缘子上、下表面的等值盐密拟合曲线斜率为2.51，NSDD拟合曲线斜率为1.88，综上，半湿润地区不均匀积污系数为2.51。

2.4 湿润条件下绝缘子的积污特性

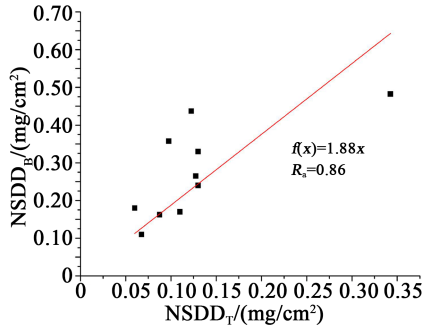
湿润地区±800 kV锦苏线有3个测点D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>，每个测点均悬挂有3串试验绝缘子串，分别于极I、极II导线下方及与导线等高的塔身处，各试验绝缘子串均具备2~5年的积污测量值。湿润地区各带电测点绝缘子盐密、灰密测量值如图7所示，湿润地区的积污特性如表5所示。

(1)带电系数

由图7(a)中带电串与空挂串绝缘子表面等值盐密的比值(图中带电数据均取两极的平均值)可知，D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>测点的带电系数分别为1.48、1.75、3.48。此外，也可以看出在同一杆塔上不同极性电压下绝缘子表面等值盐密的差异远小于灰密，可知灰密受



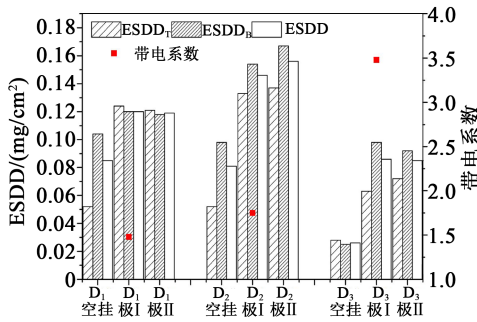
(a)上、下表面ESDD线性关系



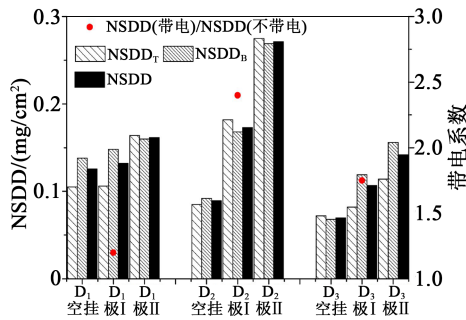
(b)上、下表面NSDD线性关系

图6 绝缘子上、下表面污秽分布规律

Fig.6 The law of pollution distribution on upper and bottom surface of insulator



(a)上、下表面ESDD分布



(b)上、下表面NSDD分布

图7 湿润地区绝缘子上、下表面污秽分布

Fig.7 Pollution distribution on upper and bottom surface of insulator in humid area

直流电压极性因素的影响较大。

(2)灰盐比

表5 湿润地区绝缘子积污特征  
Tab.5 Pollution accumulation characteristics in humid area

测点	绝缘子类型	位置	灰盐比	不均匀积污系数
D <sub>1</sub>	三伞瓷绝缘子	空挂	1.48	2.00
		极I	1.10	0.97
		极II	1.35	0.98
		空挂	1.11	1.89
D <sub>2</sub>	钟罩瓷绝缘子	极I	1.19	1.16
		极II	1.74	1.22
		空挂	2.70	0.89
		D <sub>3</sub>	复合绝缘子	极I
		极II	1.66	1.28

由表5知,湿润环境条件下不同伞型瓷绝缘子的灰盐比差异较小,三伞型瓷绝缘子的灰盐比平均值为1.31,钟罩型瓷绝缘子的灰盐比平均值为1.35,复合绝缘子的灰盐比平均值为1.87。

(3)不均匀积污系数

由表5可见,三伞型绝缘子的不均匀积污系数平均值为0.98,带电串钟罩型绝缘子的不均匀积污系数平均值为1.19,带电串复合绝缘子的不均匀积污系数平均值为1.42,同时也可看出电压极性对各测点绝缘子上、下表面的积污均匀性无明显影响。

2.5 不同环境条件下绝缘子的积污差异

综上所述,不同环境地区积污特征量如表6所示,其中不均匀积污系数以钟罩型绝缘子为参照。综合测量结果及上述分析可知,特高压直流线路绝缘子的积污特征参数在不同的降雨气象环境下有很大差异,从极干旱地区至湿润地区,绝缘子表面灰盐比、不均匀积污系数均下降。宁夏与新疆地区灰盐比相近,由于两地以戈壁、沙漠环境居多,年降水量少,多沙尘天气,灰盐比要显著高于半湿润与湿润地区。从不均匀积污系数来看,±800 kV天中线上的极干旱与半干旱地区测点的不均匀积污系数为半湿润地区测点的5~10倍以上,说明西北地区长期以来的气象条件,如大风、扬沙等恶劣天气对绝缘子上、下表面污秽分布的影响可能要大于雨水的清洗作用。

2.6 外伞型与钟罩型绝缘子积污对比

选取江苏地区±800 kV锦苏线和锡泰线开展不

表6 不同环境地区输电线路绝缘子积污特性

Tab.6 Comparison of pollution accumulation characteristic of insulator in different environment area

环境类型	地区	灰盐比	不均匀积污系数
极干旱	新疆哈密	4.8	14.1
半干旱	宁夏	4.7	10.5
半湿润	河南	2.7	2.5
湿润	江苏	1.5	1.2

同伞型绝缘子积污特性差异研究,测量结果如表7

表7 外伞型和钟罩型绝缘子等值盐密测量值

Tab.7 ESDD of outer-shed and bell-shaped insulator

外伞型绝缘子 ESDD/(mg/cm <sup>2</sup> )		钟罩型绝缘子 ESDD/(mg/cm <sup>2</sup> )		测试时间 /年	外伞型 ESDD/钟罩型 ESDD		
测点位置	ESDD	测点位置	ESDD				
D <sub>1</sub>	极 I	0.114	D <sub>2</sub>	极 I	0.139	2017	0.82
	极 II	0.121		极 II	0.147		0.82
D <sub>1</sub>	极 I	0.105	D <sub>2</sub>	极 I	0.131	2018	0.80
	极 II	0.12		极 II	0.148		0.81
D <sub>5</sub>	极 I	0.123	D <sub>5</sub>	极 I	0.131	2018	0.94
D <sub>6</sub>	极 I	0.119	D <sub>6</sub>	极 I	0.146		0.82
D <sub>1</sub>	极 I	0.108	D <sub>2</sub>	极 I	0.139	2019	0.78
	极 II	0.120		极 II	0.144		0.83
D <sub>5</sub>	极 I	0.119	D <sub>5</sub>	极 I	0.146	2019	0.82
D <sub>6</sub>	极 I	0.126	D <sub>6</sub>	极 I	0.159		0.79

## 2.7 复合绝缘与亲水性表面绝缘子积污对比

选取±800 kV 天中线和±800 kV 灵绍线开展复合绝缘表面与亲水性表面绝缘子的积污差异研究,表8给出了复合绝缘表面与亲水性表面绝缘子等值盐密比测量结果。由表8可知,相同环境下亲水性表面绝缘子的等值盐密均小于复合绝缘表面绝缘子的等值盐密,极干旱环境 A<sub>3</sub>、A<sub>4</sub>测点耐张串复合绝缘表面绝缘子与亲水性表面(玻璃)绝缘子的等值盐密比分别为2.23和1.05,平均值为1.64。半干旱环境 B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>测点复合绝缘表面绝缘子与亲水性表面绝缘子的等值盐密比分别为1.82和1.88,平均值为1.85,±800 kV 灵绍线 B<sub>5</sub>、B<sub>6</sub>测点复合绝缘表面绝

所示。由表7可知,相同环境条件下外伞型绝缘子的等值盐密均小于钟罩型绝缘子,且上、下表面污秽分布较钟罩型绝缘子更为均匀。±800 kV 锦苏线三伞型与钟罩型绝缘子等值盐密比为0.78~0.83,平均值为0.81,±800 kV 锡泰线三伞型与钟罩型绝缘子等值盐密比为0.79~0.94,平均值为0.84。此外通过计算得到湿润地区带电三伞型与钟罩型绝缘子的等值盐密比平均值为0.82,与文献[8]中湿润地区±500 kV 高肇、葛南直流外伞型与钟罩型绝缘子积污比0.78(高肇直流)、0.7(葛南直流)差异较小。

缘子与亲水性表面(玻璃)绝缘子的等值盐密比平均值为5.33,表明耐张串上不同材质绝缘子之间盐密比差异较小,而悬垂串复合绝缘表面绝缘子与亲水性表面绝缘子的等值盐密比要显著大于耐张串。国内学者开展过 ±500 kV 线路复合绝缘与亲水性表面绝缘子积污对比研究<sup>[20-21]</sup>,因测试环境不同,各研究获得的复合绝缘表面绝缘子与亲水性表面绝缘子的等值盐密比有一定差异,但结果均表明相同环境条件下,复合绝缘表面绝缘子比亲水性表面绝缘子积污严重。造成这种差异的原因是复合绝缘表面比较粗糙,污秽物易附着在表面,雨水冲刷作用较弱;而亲水性表面十分光滑,不易附着污秽物。

表8 复合绝缘与亲水性表面绝缘子积污对比

Tab.8 Comparison of pollution accumulation between different surface insulators

环境类型	测点	串型	复合绝缘表面 ESDD/(mg/cm <sup>2</sup> )	亲水性表面 ESDD/(mg/cm <sup>2</sup> )
极干旱	A <sub>3</sub>	耐张串	0.029	0.013
	A <sub>4</sub>	耐张串	0.021	0.020
	B <sub>3</sub>	耐张串	0.020	0.011
半干旱	B <sub>4</sub>	耐张串	0.017	0.009
	B <sub>5</sub>	悬垂串	0.049	0.009
	B <sub>6</sub>	悬垂串	0.047	0.009

### 3 结论

(1)特高压直流线路的积污特征参数在不同气象环境下有较大差异,从极干旱地区至湿润地区,灰盐比、不均匀积污系数均下降,4种气候环境条件下的灰盐比依次为4.8、4.7、2.7、1.5,不均匀积污系数分别为14.1、10.5、2.5、1.2。因此不同气候条件下特高压直流工程的外绝缘设计条件应进行差异化选择。

(2)外伞型绝缘子的积污量较钟罩型绝缘子轻,相同工况下,湿润地区三伞型与钟罩型绝缘子的等值盐密比平均值为0.82。

(3)相同工况下,耐张串上复合绝缘表面绝缘子的积污量大于亲水性表面绝缘子,极干旱与半干旱地区的等值盐密比平均值分别为1.64、1.85,半干旱地区悬垂串上两者等值盐密比为5.33,显著大于耐张串。

### 参考文献:

[1] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.  
[2] WANG Jianguo, WANG Kang, ZHOU Mi, et al. The natural contamination of XP-70 insulators in Shenzhen, China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(1):

349-358.

[3] 电力行业高压直流输电技术标准化技术委员会.高压直流架空送电线路技术导则:DL/T 436—2005[S].北京:中国电力出版社,2005.  
[4] 宿志一,刘燕生.我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J].电网技术,2004,28(10):13-17.  
[5] 王彬,梁曦东,赵铁博,等.交直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J].高电压技术,2009,35(9):2322-2328.  
[6] 王黎明,王耿耿,黄睿,等.降雨对绝缘子表面污秽的清洗作用[J].电网技术,2015,35(6):1703-1708.  
[7] 律方成,秦春旭,郭文义,等.高海拔地区±800kV特高压直流输电系统绝缘子带电自然积污特性[J].高电压技术,2013,39(3):513-519.  
[8] 高海峰,樊灵孟,李庆峰,等.±500kV高海拔直流线路绝缘子积污特性对比分析[J].高电压技术,2010,36(3):672-676.  
[9] 巢亚锋,黄福勇,王成,等.±500kV输电线路运行复合瓷绝缘子带电自然积污特性研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2015年学术年会.西安,2015.  
[10] 吕玉坤,赵伟萍,庞广陆,等.典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J].电工技术学报,2018,33(1):209-216.  
[11] 孙继星,徐跃,胡学永,等.高速气流环境中电气化铁路绝缘子表面积污分布特性[J].高电压技术,2014,40(1):95-102.  
[12] 卢明,刘泽辉,向玲,等.不同电压等级下绝缘子积污特性研究[J].电瓷避雷器,2020(1):186-191.  
[13] 国家电网公司科技部.电力系统污区分级与外绝缘选择标准:第2部分 直流系统:Q/GDW 1152.2—2014[S].2014.  
[14] 卢明,李瑶琴,李黎,等.哈郑特高压直流负极性线路上U70BL型绝缘子自然积污规律[J].高电压技术,2016,42(2):557-563.  
[15] 毕晓田,任昂,沈庆河,等.±660kV银东线绝缘子串的自然积污特性研究[J].绝缘材料,2015,48(10):45-54.  
[16] 田亮.±1100kV特高压直流输电线路污秽分区及绝缘配置研究[D].北京:北京交通大学,2014.  
[17] 何平.剔除测量数据中异常值的若干方法[J].航空计测技术,1995,15(1):19-22.  
[18] 蒋兴良,舒立春,孙才新.电力系统污秽与覆冰绝缘[M].北京:中国电力出版社,2009.  
[19] 律方成,刘宏伟,汪佛池,等.高速气流条件下污秽颗粒在复合绝缘子表面的沉积判据[J].电工技术学报,2017,32(1):206-213.  
[20] 钱进,柯磊,张东辉,等.±500kV直流输电线路自然积污规律分析研究[J].电瓷避雷器,2015(4):25-31.  
[21] 梁存艳,梁曦东.国外直流合成绝缘子运行及自然污秽试验[J].高电压技术,1999,23(9):50-53.