

高压电气设备防污闪 及带电清扫技术

喻华玉 徐文澄 沈刚 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

CEPP

责任编辑：张克让

ISBN 7-5083-4181-3



9 787508 341811 >

定价：20.00 元

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM852

2

高压电气设备防污闪 及带电清扫技术

喻华玉 徐文澄 沈刚 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书针对高压输变电设备防污闪专业的特点,就我国大气环境污染对输变电设备染污的影响,污闪防范措施机理、效果、经济技术综合比较,运行中复合绝缘子普遍存在的问题及解决对策,我国最新的高压、超高压带电清扫作业机具的结构、原理、使用维护方法,以及有关带电作业基础理论等方面内容进行阐述。全书共分五章,包括大气环境污染对输变电设备的影响、输变电设备污闪防范措施、复合绝缘子技术及应用、带电作业技术、高压带电清扫机具。

本书可作为高压输变电设备防污闪的工作人员、输变电设备运行维护人员、带电作业人员的技术培训教材,也可作为从事高压外绝缘工程技术人员、电气专业工程技术人员、设计人员以及高压绝缘专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高压电气设备防污闪及带电清扫技术/喻华玉,徐文澄,沈刚编著. —北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-4181-3

I. 高... II. ①喻... ②徐... ③沈... III. ①高压电器—污闪—污染防治 ②高压电器—带电作业
IV. ①TM85②TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第022933号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年6月第一版 2006年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 12.5印张 277千字

印数0001—3200册 定价20.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

输变电设备大面积污闪事故频发，严重危及电力生产的安全。究其根源，我国作为发展中国家，大气环境污染严重，使绝缘子表面染污随之加重。特别是在 20 世纪 80 年代以来，在我国广大的农业地区电网绝缘子污染加重，输变电设备外绝缘爬电比距与其表面污秽水平严重不相适应，使污闪跳闸和大面积污闪停电事故增多。大面积污闪事故是灾难性事故，给电力部门造成惨重损失，给国民经济带来严重的危害。为保障各行各业和社会的稳定、国民经济健康发展，降低输变电设备污闪跳闸事故率，杜绝大面积污闪停电事故是电力安全生产当务之急的首要问题。

目前，我国尚无一本系统地论述大气环境污染对输变电设备的影响，以及输变电设备防污闪技术的书籍。复合绝缘子在我国输电线路的防污工作中已显示出重要的作用，但大批量使用的复合绝缘子运行时间不足 10 年，运行经验欠缺，且 90% 的复合绝缘子用于中等污秽和重污秽地区，需要积极借鉴国外的运行经验和研究成果；而国外复合绝缘子大范围的用于污秽地区尚无足够成熟的经验。因此，必须认真总结我国复合绝缘子的运行经验。清扫是防止输变电设备污闪事故的有效措施。我国高压变电站有十几万座，设备清扫主要依靠“逢停必扫”的措施。每年安排高压设备清扫需花费巨大的人力、物力、财力和时间。停电倒闸操作、安全措施实施和停运时间的限制，给设备清扫质量以及系统的安全运行带来较多的问题，设备污闪隐患越来越严重的威胁着电力系统的安全运行。随着电压等级的升高，输变电设备带电清

扫作业势在必行，特别是对 500kV 电压等级输变电设备。但是，国内还没有一本详细介绍高压、超高压带电机械清扫机具的书籍。

本书作者从事高压外绝缘工作 30 余年，通过在高压输变电设备防污闪领域的工作实践，深感有必要将国内外发表的大量专题技术文献汇总整理，结合自己的工作经验、心得和发明的超高压、高压带电清扫机，将具有普遍性的、较成熟的、共同关心的技术内容和知识进行总结，使现有分散的经验系统化，编著一本输变电设备防污闪的技术参考书，供从事输变电设备防污闪的工程技术人员、带电作业人员以及从事高压绝缘、电气专业工程技术人员、运行维护人员了解和掌握输变电设备防污闪技术和先进的带电作业机具，为我国电力系统高压电气设备防污闪工作做贡献。

编者

2005.12

目 录

前言

第一章

大气环境污染对输变电设备染污的影响 1

- 第一节 防止电网污秽闪络事故对电力安全生产的意义 1
- 第二节 我国大气环境污染状况 4
- 第三节 大气环境污染对输变电设备的影响 24

第二章

输变电设备的防污闪 34

- 第一节 瓷、玻璃绝缘子的污秽机理 34
- 第二节 输变电设备的防污闪措施 40
- 第三节 防止大型设备瓷套及避雷器闪络的措施 97

第三章

复合绝缘子技术及应用 101

- 第一节 复合绝缘子发展概况 103
- 第二节 复合绝缘子的结构设计和材料 109
- 第三节 复合绝缘子表面场强分布 147
- 第四节 复合绝缘子的污秽耐受性能 157
- 第五节 复合绝缘子的机械性能 168
- 第六节 复合绝缘子的运行维护管理 185

第四章

	带电作业技术基础	212
第一节	我国带电作业的发展史	212
第二节	电场中的电介质	215
第三节	带电作业的作业方式及基本原理	236
第四节	静电感应对人体的影响	248
第五节	带电作业的安全距离	273
第六节	带电作业用绝缘工具	289

第五章

	高压、超高压带电机械干式清扫作业机具	322
第一节	CZQ 系列叉车装配高压和超高压带电 自动清扫机	324
第二节	STQ-11 型手推车式高压带电自动清扫机	339
第三节	BRQ 系列便携式软轴连接高压带电清扫机	344
第四节	BRQ 系列组合式超高压带电清扫机	356
第五节	QBRQ 型轻便高压带电清扫机	367
第六节	TBRQ 型电气化铁路接触网带电清扫机	371
第七节	TQS 型强力停电清扫机	383
第八节	带电机械干清扫作业机具的使用规定	386
	参考文献	391

第一章

大气环境污染对 输变电设备染污的影响

第一节 防止电网污秽闪络事故对电力安全 生产的意义

电力安全生产的重要性是由电力生产的客观规律、生产特性及社会作用决定的。随着电力工业迅速发展、电力体制改革和市场化进程加快，电力安全生产的重要性更加突出。

电力工业是国民经济的基础产业，为各行各业提供电力，为人民的日常生活提供电力。供电中断，就会造成各行各业的生产停顿或瘫痪，严重者产生一系列次生事故，给社会和人民生活秩序带来混乱，影响各行各业和社会的稳定，甚至造成极坏的政治影响。电力安全生产关系到人民生命、财产的安全，关系到人民群众的切身利益，关系到国民经济健康发展。安全是电力生产的基础。安全生产为企业的物质文明建设提供了高层次的保证，没有安全生产，就没有企业的效益。

发电厂生产的电能经升压变电站、输电线路、降压变电站、配电线路送到用户，组成一个产、供、销统一的庞大的整体。电能不能大规模储存，电力的生产、输送、供应、使用是同时完成并随时处于平衡状态，任何一个环节发生事

故，都可能带来连锁反应，造成设备损坏或大面积停电。电能生产的内在特点需要安全生产。

“安全第一、预防为主”是我国电力生产的基本方针。

受大气环境污染影响，输变电设备外绝缘被不同程度的染污，在潮湿的气象条件下常常发生污秽闪络。输变电设备的污秽闪络和大面积污秽闪络事故严重危害电力安全生产。20世纪50~60年代我国输变电设备污秽闪络主要发生在沿海省份的少数工业城市，中、西部内陆地区的污秽闪络事故很少发生。据不完全统计，1950~1962年输电线路发生的污秽闪络事故，天津地区13次，东北地区53次，污秽闪络跳闸率分别为0.21、0.18次/(100km·年)，同期在全国35~220kV变电设备的污秽闪络事故125次之多。1971~1994年，全国35~500kV输电线路污秽闪络跳闸3542次，1971~1992年，全国35~500kV发电厂、变电站的污秽闪络跳闸分别为420、1348次。20世纪70~90年代输变电设备的污秽闪络事故发生发展性的变化：从20世纪70年代末开始，输变电设备的污秽闪络缓慢增加。进入20世纪80年代后半期开始污秽闪络跳闸率显著增加，各地区年平均污秽闪络跳闸率在0.2次/(100km·年)以上，有的甚至高达2.25次/(100km·年)；污秽闪络的地域也由原来的沿海省份的少数工业城市向中、西部内陆地区、农业地区扩展。特别是20世纪90年代以来灾难性的电网大面积污秽闪络事故在全国较大范围内频频发生，严重威胁电力系统的安全运行：

1990年2月，在全国较大范围内出现持续大雾天气，京津唐电网及河北省南网、河南省西部和北部电网、山西省晋中南地区、山东省电网等发生大面积污秽闪络停电，200条110~550kV线路和38座发电厂、变电站污秽闪络跳闸

1049次，造成电量损失31360MWh。

1991年年底，浙东及上海地区2条500kV、4条220kV线路污秽闪络停电。

1992年1月，四川省成都市青白江地区7条220kV、10条110kV线路污秽闪络停电；同期，江苏省徐州地区6条220kV线路污秽闪络停电。

1993年2月，山西省晋东南多条220kV线路发生污秽闪络跳闸事故；3月新疆乌鲁木齐电网在大雾中发生大面积污秽闪络停电事故，系统损失41.6%的负荷。

1994年2月，广东省珠江三角洲地区8条220kV线路污秽闪络停电；11月山西省中部电网6条110~550kV线路污秽闪络。

1995年，全国110kV及以上电压等级的线路污秽闪络事故9次，跳闸85次；变电站污秽闪络事故13次，跳闸22次。

1996年2月，福建省莆田、泉州地区13条110、220kV线路及1座220kV变电站污秽闪络停电；12月华东、华中6省1市10条500kV、37条220kV线路污秽闪络停电。

1997年2月，京津唐、山东省、陕西省、新疆等电网发生较大范围污秽闪络事故，其中500、330、220kV线路51条，16座发电厂、变电站发生污秽闪络停电。

1998年年底至1999年初，山东省电网11条110~550kV线路和2座220kV变电站污秽闪络停电。

1999年3月，京津唐电网10条110~500kV线路覆冰污秽闪络停电。

2000年12月，陕西省2条330kV线路及1座330kV发电厂升压站污秽闪络停电。

2001年2月，北方出现历史上罕见的持续大雾天气，辽中电网、河北省南部电网、京津唐电网、河南省北部电网、山东省烟威电网等相继发生大面积污秽闪络事故，共计23条66~500kV线路、34座变电站跳闸972次。

2002年1月，湖南省常德地区受大雾影响，500kV五岗线、葛岗线和岗云线先后发生污秽闪络事故。

2003年2月，担负“西电东送”重要通道的500kV阳淮线中阳东Ⅱ线、Ⅲ线相继发生绝缘子覆冰污秽闪络事故。

输变电设备频发大面积污秽闪络停电事故，严重危及电力生产的安全。大面积污秽闪络停电事故是灾难性事故，给电力企业造成惨重损失，给国民经济带来重大危害。为保障各行各业和社会的稳定，国民经济健康发展，降低输变电设备污秽闪络跳闸事故率，杜绝大面积污秽闪络停电事故是电力安全生产的当务之急。

第二节 我国大气环境污染状况

一、我国能源消耗和工业废气排放状况

大气环境污染与工业发展密切相关，主要来自能源消耗和废气的排放：①现代化污染，即工厂、汽车大量使用矿物燃料排放的二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）、铅、臭氧的污染和对地区酸化的影响；②贫困污染，包括低耗燃烧、森林破坏等造成的空气污染；③室温气体的排放，尤其是二氧化碳（ CO_2 ）排放引起全球气候的变暖。对于电力发展，最关心的是前两者的污染，统称为地区环境污染。据国际能源署 IEA 预计，尽管城市环境污染综合整治，采用除尘、脱硫等技术，但 SO_2 、 CO_2 排放量仍然很大，至 2030 年预计

CO₂ 排放量将达 381.6Mt, 比 2000 年增加 68.6%。环境问题已引起全世界的高度关注。

我国随着国民经济的发展已成为世界上能源消费大国。据统计, 解放初期我国能源消费总量仅为 5411 万 t, 1980 年增长到 60275 万 t, 1994 年能源消费总量达 12.3 亿 t, 为建国初期能源消费总量的 23 倍, 居美国、前苏联之后, 位居世界第三位。至 2001 年我国能源消费总量为 1950 年的 46 倍, SO₂、CO₂ 排放量分别居世界第一位和第二位, 为 SO₂、CO₂ 排放量增长最快的国家, 并成为世界第三大酸雨地区。

我国能源结构以矿物能源——煤炭为主, 2001 年能源总消费量中煤炭消耗量占 87.5% 左右。这与世界工业发达国家以石油、天然气为主要能源, 煤炭消耗仅占 15% ~ 37% 的能源结构有明显差异。等量煤的发热量一般仅为燃油的 1/2, 而燃煤的灰分、含硫量、含氮量均比石油、天然气高, 燃煤造成的大气污染远比燃油严重。虽然我国环境保护事业的发展和对城市环境综合整治, 使部分地区的环境质量有所改善和控制, 但是, 相应的污染治理配套措施增加不多。我国工业废气排放量逐年增加。全世界每年向大气排放废气 6 亿多 t, 其中粉尘占 16%、SO₂ 占 24%、CO 占 30%。我国 1994 年全国废气排放量(不包含乡镇工业)11.4 万亿 m³ (标), 烟尘排放量 1414 万 t (其中工业烟尘排放量 807 万 t), 工业粉尘排放量 583 万 t, SO₂ 排放量 1825 万 t, 见表 1-1。由表可见 SO₂ 和工业粉尘排放量占全世界排放量的 10%, SO₂ 排放量较 20 世纪 80 年代后期增加。2002 年全国废气排放量中 SO₂ 排放量 1927 万 t, 仅比 2001 年减少 1.1%。其中工业 SO₂ 排放量 1562 万 t, 占 SO₂ 总排放量的 81.1%; 烟尘排放量 1013 万 t, 比 2001 年减少 5.4%。随着改革开放, 我

国的经济和工业在相当长的一个时期内仍将持续快速发展，大气环境污染将是我国今后面临的严峻问题。

表 1-1 1983 ~ 1994 年我国工业废气排放量

项 目	单 位	1983 年	1985 年	1987 年	1990 年	1994 年
废气排放量	亿 m ³ (标)	63166	73971	77275	85000	114000
SO ₂	万 t	1200	1303	1412	1495	1825
烟尘	万 t	1353	1323	1445	1324	1414
工业粉尘	万 t	1092	1282	1004	781	583

我国电力、冶炼、建材、化工等 4 个高能耗行业的能源耗用量占全国工业能源耗费总量的 67%。工业布局取决于原材料、燃料的产地，利用各地资源优势和高能耗行业向内地转移，形成我国城市和工业布局的极不平衡，以及各地区能源耗费的显著差别。工业能源耗费最多的是东北、华北、华东沿海地区，其中以辽宁省最多，其次山东、四川、河北、江苏、山西、河南、黑龙江等八省的能源耗费占全国总量的 49%，其他中部和西部地区的能源耗费分别仅占 33% 和 18%。工业布局的不平衡造成我国工业废气排放的极不均匀，1994 年辽宁省的工业废气排放量为 9507 亿 m³ (标) / 年，占全国总量的 8.4%，居第一位；山东、河北、江苏、广东、四川等省的次之；海南、青海、西藏的废气排放量最少。

二、我国城市大气环境污染状况

煤炭是我国的主要能源，城乡大气污染均属煤烟型工业污染。20 世纪 60 年代我国城市建设缺乏总体规划，在大、中城市新建的十几万座工厂未能采取防治污染措施，使城市环境急剧恶化。随着工业的快速发展，排放到大气中的污染物日益增多。虽然国家从规划到生产各环节都加强环境保护

和城市环境综合治理, 1990 年燃料废气消烟除尘率从 1985 年的 55% 提高到 74%。然而相应的污染治理配套措施的能力却增加不多, 对 SO_2 控制的手段和能力十分有限, 大多数工业锅炉和北方城市冬季取暖燃煤, 都是以直接燃烧方式利用。燃烧方式粗糙, 废气排放量大, 形成局部地区的大气污染严重; 高耗能工业企业 (如火力发电、冶炼、化工、建材等) 的高烟囱排放的扩散造成大环境污染的加重, SO_2 排放量仍然呈逐年上升趋势, 使城市环境急剧恶化。我国城市大气仍是以尘和 SO_2 为主的煤烟型污染, 大气污染状况已成为世界上少数几个最严重的国家之一。

1. 城市大气污染物分析

原电力工业部九五攻关科研课题《大气环境污染对输变电设备抗污秽闪络能力的影响》(简称课题《影响》) 对不同地区大气污染物、输电线路绝缘子表面污秽物、绝缘子所处地区的地表土进行连续 3 年的同步试样采集, 进行元素浓度谱分析, 然后运用受体模式 (包括因子分析法和富集元素分析) 判别大气污染物和输电线路绝缘子表面污秽物的来源, 并计算污染源的相对贡献率。表 1-2 是各监测点绝缘子表面相对地表土的富集元素, 表 1-3 为绝缘子测点对应的地表土对地壳的富集元素, 表 1-4 为运用因子分析法分析不同污染源对输电线路绝缘子表面污秽的贡献率。

表 1-2 不同监测点绝缘子表面污秽相对地表土的富集因子

监测点		污秽物的富集元素									
		S	Se	As	Sb	Pb	Br	W	Zn	Cr	Ca
北京地区	衙门口	285.0	12.8	11.1	12.9	4.0	1.0	10.9	6.7	6.1	2.3
	草桥	191.0	13.2	9.8	11.3	12.6	1.5	24.3	5.1	5.7	3.2
	魏善庄	217.0	10.8	2.6	3.4	<2.0	1.0	11.7	7.4	8.5	4.9

续表

监测点		污秽物的富集元素									
		S	Se	As	Sb	Pb	Br	W	Zn	Cr	Ca
西安地区	北郊	261.0	21.4	4.5	4.1	<2.0	2.0	5.9	10.3	13.0	3.9
	西郊	626.0	5.9	4.3	4.1	3.0	1.1	19.4	10.4	12.4	2.9
	东八里村	369.0	3.7	2.1	4.2	3.7	0.8	14.7	8.9	8.7	1.4
	马王村	535.0	—	3.1	11.4	3.4	0.8	44.7	6.0	5.3	1.7
锦州地区	王花牛	283.0	3.1	3.3	<2.0	2.5	0.8	27.1	7.4	14.2	2.2
	高桥	705.0	8.9	5.9	5.7	4.1	0.7	15.2	5.4	5.2	2.0
	南山	130.0	8.2	5.8	8.5	2.5	1.9	15.2	4.2	3.3	3.1
平顶山地区	姚平线	82.3	5.3	2.1	4.4	<2.0	3.4	35.1	10.4	10.8	14.5
	姚宝	90.4	5.7	2.4	5.2	<2.0	5.0	43.5	14.0	13.6	15.8
	舞昆	55.8	5.6	4.2	8.1	<2.0	5.2	39.5	7.5	9.1	15.8
黄石地区	汀祖	27.4	<2.0	5.1	5.5	<2.0	3.2	14.5	7.8	9.0	10.6
	桃花	38.4	5.6	3.2	24.1	<2.0	4.2	24.4	13.2	17.3	15.7
	马叫	157.0	14.0	6.1	10.5	<2.0	2.0	18.7	9.4	7.4	10.4
	南丰	89.2	<2.0	8.4	22.1	3.1	2.5	39.4	30.2	16.7	12.7

表 1-3 绝缘子测点对应的地表土对地壳的富集因子

监测点		地表土相对地壳的富集元素				
		S	Se	As	Sb	Pb
北京地区	衙门口	1.0	10.9	6.7	6.1	2.3
	草桥	1.5	24.3	5.1	5.7	3.2
	魏善庄	1.0	11.7	7.4	8.5	4.9
西安地区	北郊	2.0	5.9	10.3	13.0	3.9
	西郊	1.1	19.4	10.4	12.4	2.9
	东八里村	0.8	14.7	8.9	8.7	1.4
	马王村	0.8	44.7	6.0	5.3	1.7

续表

监测点		地表土相对地壳的富集元素				
		S	Se	As	Sb	Pb
锦州地区	王花牛	0.8	27.1	7.4	14.2	2.2
	高桥	0.7	15.2	5.4	5.2	2.0
	南山	1.9	15.2	4.2	3.3	3.1
平顶山地区	姚平线	3.4	35.1	10.4	10.8	14.5
	姚宝	5.0	43.5	14.0	13.6	15.8
	舞昆	5.2	39.5	7.5	9.1	15.8
黄石地区	汀祖	3.2	14.5	7.8	9.0	10.6
	桃花	4.2	24.4	13.2	17.3	15.7
	马叫	2.0	18.7	9.4	7.4	10.4
	南丰	2.5	39.4	30.2	16.7	12.7

表 1-4 污染源对输电线路绝缘子表面污秽的贡献率

监测点		污染源的类型 (%)						
		土壤	煤烟	冶金	建筑材料	车辆尾气	硫酸盐	海盐
北京地区	清河	32.7	24.3	11.1	9.3	12.9	9.7	
	衙门口	27.5	23.6	13.7	13.9	10.2	11.2	
	草桥	29.5	31.3	9.0	9.9	10.6	9.7	
	魏善庄	31.4	19.9	9.9	15.3	12.3	11.2	
西安地区	北郊	49.0	18.4	12.4	14.4	5.8 (尾气、化工)		
	西郊	36.0	26.0	15.2	9.1	13.7 (尾气、化工)		
	东八里村	40.7	24.9	9.0	15.0	10.3 (尾气、化工)		
	马王村	39.5	24.0	15.1	11.6	9.8 (尾气、化工)		
锦州地区	王花牛	37.2	34.6	7.8		4.3		16.0
	高桥	36.4	30.9	8.0		12.9		11.7
	南山	36.5	29.6	12.2		10.2		11.5