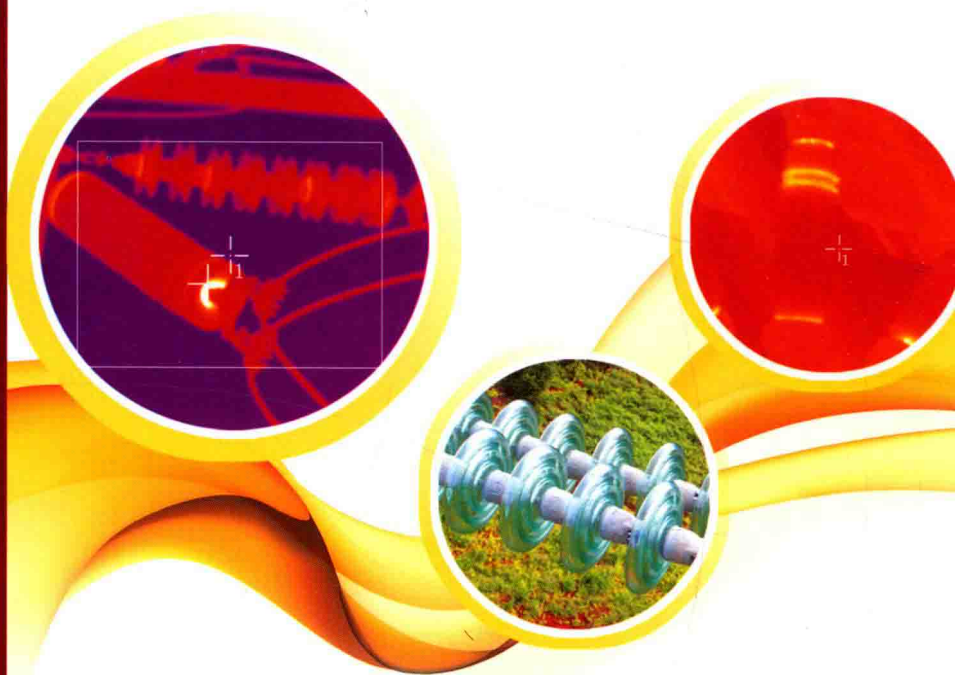


JUEYUANZI FANGWU SHAN
HONGWAI ZHENDUAN JISHU

绝缘子防污闪 红外诊断技术

◆ 胡红光 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

JUEYUANZI FANGWUSHAN HONGWAI ZHENDUAN JISHU

绝缘子防污闪 红外诊断技术

胡红光 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了悬式(复合)瓷绝缘子缺陷的红外诊断过程、方法、结果。通过红外作业流程及缺陷分析的介绍,了解污秽绝缘子的结构、环境与绝缘子表面放电热场缺陷的关系,掌握悬式(复合)瓷绝缘子缺陷标准和红外诊断技术要求。

本书可供从事悬式(复合)瓷绝缘子缺陷红外诊断工作的相关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

绝缘子防污闪红外诊断技术/胡红光编. —北京:中国电力出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5123-9524-4

I. ①绝… II. ①胡… III. ①复合绝缘子—防污闪—红外线检测 IV. ①TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 152367 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](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.25 印张 186 千字

印数 0001—1500 册 定价 78.00 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

序 言

国网河南省电力公司一贯重视电网十八项重大反事故措施的落实。特别是绝缘子防污闪工作，涉及设计标准、制造质量、运维环境、异常处理等多种因素，是反事故工作中的技术难题。濮阳供电公司从2005年始，持续开展绝缘子防污闪针对性运行监测。经过十年的不懈努力，总结出污秽绝缘子缺陷判据、状态检修方法、临界闪络状态的应急措施。此项技术能预判绝缘子缺陷发展，预测污秽绝缘子故障发展趋势及事故周期。这是突破传统的一种全新的红外技术监督方法，打开了电力科学研究界认识绝缘子污秽闪络的一扇窗口。

胡红光同志以输变电设备为研究对象，以变电站现场为试验课堂，常年坚持在雨雾天气对污秽绝缘子进行红外诊断，全面捕捉雨雾中污秽绝缘子放电现象，将散乱片段的感性认识，升华为篇章组合的理性认识，演变、固化为绝缘子防污闪的实用技巧，并用心编成《绝缘子防污闪红外诊断技术》的书稿。他用十年的时间，专注于绝缘子防污闪红外诊断这一件事情，从实践中探索出一条科学之路，这种精神、这种品格令人钦佩。

本书基于濮阳供电公司的实践，也丰富了河南省电力公司的安全生产成果。希望这本书的成果能够惠及河南电力乃至国家电网公司旗下的相关单位和电力技术人员；并通过中国电力出版社的文化技术平台，在全国电力安全领域不断发酵，持续产生安全与经济效益。

国网濮阳供电公司总经理



2015年12月6日

前 言

绝缘子与导电回路是电网运行的重要部件和安全运行的关键环节。绝缘子有两大类型，即瓷绝缘子和复合绝缘子。由于绝缘子运行过程受设计、制造、安装质量等不良因素制约，受环境污染、过电压等不良条件影响，在电网运行中不断发生事故，特别是雨雾天气污秽瓷（玻璃）绝缘子事故率较高。为了改变被动状态，少交事故学费，全国各地供电公司长期进行反事故技术攻关，各电力科研机构进行专项技术研究。国家电网公司十八项反事故措施，其中一项内容就是“防止绝缘子污闪事故”。电力系统长期沿用“盐密测定”“高压预防性试验”、人体感官的特殊巡视等方法识别绝缘子的运行状态。但人员巡视不能记录绝缘子的故障特征和温度数据；实验室的间接数据不能同步而真实地反映绝缘子故障状态。所以，针对绝缘子污闪事故开展有效的技术监督，一直存在基础性障碍。

红外、紫外技术对污秽绝缘子的技术监督效果良好。但是，该技术方法还未在全国电力系统广泛应用，还未将之提到反事故措施的议事日程。目前，DL/T 664—2008《带电设备红外诊断应用规范》设定的污秽绝缘子缺陷判据与实际状态相比显得不完整，甚至故障率高的污秽绝缘子缺陷判据还是一项空白。本书通过对绝缘子结构与特性的研究，采集了雨雾中室内、外污秽绝缘子的温差数据；并根据声、光、电等表面信息，分析故障机理，固化了各类绝缘子的缺陷判据，便于今后技术监督中掌握运用。

做好防污闪工作，理论基础很重要。本书用红外热像的视角来解释“汤逊理论”“流注理论”，解决了高电压技术有关定义抽象难于理解的问题，完成了红外诊断技术与高电压技术认知方面的接轨。作者曾出版《电力红外诊断技术作业与管理》《电力设备红外诊断技术与应用》，因篇幅所限，这两部书只是对绝缘子防污闪局部的描写。本书针对绝缘子防污闪，开展全方位、深层次的研究成果，涉及绝缘子材料与设计、安装与验收、运行监督与维护、故障应急处理等内容。本书所总结提炼的新方法、新数据、新成果，其技术亮点有三个：一是污秽绝缘子异常运行及缺陷的温差数据的界定与固化；二是污秽绝缘子表面微观物质结构的分析；三是采集污秽绝缘子雨雾天气的临界闪络最高温度值及制作事故绝缘子标

本。希望通过电力安全文化与技术的传播，起到抛砖引玉的作用，促进全国防污闪工作的全面、深入、持续开展，提高绝缘子的设计、制造、运维管理水平，提高电网运行的安全、经济效益；并逐步在中国电工学术界与工程技术界不断发酵、形成绝缘子管理创新的成果。

作者长期从事变电运维工作，深知防污闪在电力系统安全运行中的重要性，始终在思考如何做好该主题；坚持立足基层取数据，放眼全局学经验的进取精神，从而实现了防污闪工程的理论、技术、安全管理的融合创新。本书通过“电网污闪事故案例”和“电网防污闪预警案例”，说明绝缘子污闪事故的危害性和污闪事故的可预防性。采用“事故案例”来论证“新编缺陷判据”与基本观点的正确性，使每个篇章更具有说服力和实用价值。本书介绍了全新的污秽绝缘子技术监督方法，在红外热像的指导下，采用数码相机微距镜头与数码显微镜相机观察、记录绝缘子放电形成的微观物质，为今后建立绝缘子表面微观物质数据库建立了观察方法模板。

打造坚强电网，推新安全成果，做出优秀业绩，创作文化品牌是电网人的共同愿景。电力防污闪工程涉及高深理论、复杂技术、精确管理等领域，防污闪理论研究是中国电工界的重大课题，单靠一个人、一个单位的研究和执行能力是有限的。本书只是初步做了一些基础性、探索性的工作，并有望通过大家的共同努力，扩大战果，在理论与实际相结合方面引领国际水准。本书的成功出版，离不开国网河南省电力公司、濮阳供电公司领导和输变电岗位同事的大力支持，侯清国、张建坤总经理的关心与信任，湖南理工大学李景禄教授等专家的悉心指导，在此一并表示衷心感谢。

因水平及条件所限，不当之处，敬请专家、学者等交流指教。

编 者

目 录

序言
前言

▼ 绪 论	1
▼ 第一章 高电压理论与绝缘子污闪原理	8
第一节 电场微观放电特性与绝缘子放电机理	8
第二节 电气设备外绝缘的沿面放电	15
第三节 绝缘子缺陷的识别原理及闪络周期	23
▼ 第二章 输变电绝缘子的运行与维护	30
第一节 绝缘子的作用和分类及运行特点	30
第二节 瓷（玻璃）绝缘子的结构及运行特点	33
第三节 复合绝缘子的结构及运行特点	35
第四节 RTV 防污闪涂料原理、特性	38
第五节 电网绝缘子的运行监督	41
第六节 电网绝缘子的运行维护	52
▼ 第三章 污秽绝缘子的红外诊断方法	61
第一节 污秽绝缘子红外诊断的原理及要领	61
第二节 红外热像仪的操作要领	64
第三节 污秽绝缘子红外热像的信息收集	70
第四节 数码摄影与红外热像的配合	74
第五节 高压试验与红外热像联合诊断	78
▼ 第四章 污秽绝缘子红外诊断缺陷判据与闭环管理	85
第一节 污秽绝缘子红外诊断的温差缺陷判据	85
第二节 温差缺陷判据的红外诊断认定方法	91
第三节 污秽绝缘子缺陷的闭环管理	103

第五章	绝缘子防污闪实例大数据分析	107
第一节	绝缘子污秽闪络案例分析	108
	绝缘子污闪事故案例 1 500kV 隔离开关支柱瓷绝缘子	
	污秽闪络的红外诊断	108
	绝缘子污闪事故案例 2 35kV 电压互感器复合绝缘子	
	污秽闪络的红外诊断	114
	绝缘子污闪事故案例 3 110kV 穿墙套管瓷绝缘子	
	污秽闪络的红外诊断	119
	绝缘子污闪事故案例 4 110kV 线路悬式复合绝缘子	
	污秽闪络的红外诊断	123
第二节	瓷绝缘子防污闪预警案例分析	130
	绝缘子防污闪预警案例 5 110kV 母线悬式瓷绝缘子	
	污秽放电红外诊断预警	130
	绝缘子防污闪预警案例 6 220kV 断路器瓷绝缘子	
	污秽放电红外诊断预警	134
	绝缘子防污闪预警案例 7 110kV (瓷体) 避雷器	
	污秽放电七次红外诊断预警	137
第三节	瓷绝缘子防污闪技术措施案例	141
	瓷绝缘子防污闪技术措施案例 8 110kV 新、老瓷绝缘子的	
	红外热区初值数据采集	141
	绝缘子防污闪监督措施案例 9 采用数码显微镜对	
	绝缘子表面污秽物微观组织的研究	146
参考文献		153

一、诊断的作用与历史回顾

绝缘子是电力设备外绝缘的有效支撑，绝缘子污闪是电力设备外绝缘污秽闪络的简称。污闪事故的危害性较大，而且绝缘子异常运行状态的隐蔽性和突发性难以控制，绝缘子污闪事故一直制约着各运行单位的安全管理水准和安全运行指标，是电力系统安全生产及管理的难题。

“污秽绝缘子红外诊断”，是通过对雨雾中污秽绝缘子表面发热“红外热区”的识别、局部发热“温差”的计算，结合雨雾中放电声音、光电效果的特性测量，从而能够在早期发现绝缘子故障的方法，包括对存在严重缺陷的绝缘子各类电弧放电状态的分析判断过程。

电网运行的各类绝缘子承担整个电网运行的对地绝缘功能，绝缘子与相关的导体组合形成庞大的电网。绝缘子一旦投入运行，就需要长时期、全天候经受各类污秽环境、恶劣天气、内外部过电压等不良因素的考验，而绝缘子在雨雾天气的污秽闪络是常见的、危害程度较大的电网事故。因此需要红外诊断技术指导状态检修，实现对绝缘子运行缺陷的快速定位，及时发出故障预警，及时处理绝缘子异常运行，将绝缘子设备事故消灭在萌芽状态。

俗话说：三折肱而成良医。回顾中国电力系统绝缘子防污闪的历史，有助于研究绝缘子污闪的规律，痛定思痛会增加研究的动力；我国电力系统防污闪已有 50 年的历史，各年代绝缘子防污闪技术措施的特点如下。

20 世纪 50 年代，电网规模较小，在我国沿海等工业相对发达地区开始出现污闪事故，主要是工厂烟尘使绝缘子受到严重的污染，常见的是 35kV 及以下系统，由于外绝缘水平选择偏低，使得污闪跳闸频发，采用的防污闪措施主要是停电清扫。

20 世纪 60~70 年代，随着 110kV 和 220kV 系统相继投入运行，污闪事故逐步向全国各电网发展。我国线路外绝缘主要采用小爬距的标准型（XP 型）瓷绝缘子，少量钢化玻璃绝缘子。在开展停电清扫的同时，开始调整线路的爬距，更换新型防污绝缘子，使用硅油、地蜡等作为防污闪措施。

20 世纪 80 年代，500kV 设备大量投入运行，是我国电网发展史上污闪最频

繁、最严重的时期。“一年一清扫”成为抑制污闪事故廉价的技术措施。变电站因更换设备不便，使用硅油、地蜡作为防污措施，防污闪效果显著，但有效期过短，仅为3~6个月，且黏附污秽严重，清洗困难。清华大学与武汉水利电力大学研发并在电力系统推广复合绝缘子，在线路上试用。同时，常温硫化硅橡胶防污闪涂料（RTV）也被引入我国电力系统。

20世纪90年代，跨地区、跨省市的大面积污闪开始出现，复合绝缘子大批量用于线路。使用RTV涂料，由于担心其耐环境老化性，仅将其作为变电设备的补救性、临时性防污闪措施。

21世纪以来，我国电力系统普遍提高电网的基本外绝缘水平。复合绝缘子已在各电压等级的输电线路广泛使用。开始采用红外热像监督绝缘子的运行状态，喷涂RTV涂料的措施，取得了良好的防污闪效果。

二、典型事故

1989年12月~1990年2月，大雾天气。某地区电网共发生污闪跳闸319次，其中，发、变电站12座，闪络33次（有5次发生在电厂升压站）；输电线路71条，闪络286条次，包括220千伏线路22条（占总数54条的40.7%），闪络124条次，110千伏线路49条（占总数226条的21.6%），闪络162次。先后使220kV变电站6站次、110kV变电站45站次全站失压。污闪中有11处绝缘子掉串，造成某地大面积污秽闪络事故。事故的主要原因是，20世纪因为经济、技术相对落后，中国电网配置的瓷绝缘子防污闪能力较差，所以，雨雾天气难于克服存在的技术差距。

2001年1月、2月，华北大部地区和东北辽宁相继几次出现雪雨交加、大雾迷漫的天气。污闪首先由河南电网发生并逐渐北移，经河北电网、京津唐电网直至辽宁南部和中部。此次污闪总计66~500kV线路238条、变电站34座，跳闸972次。其中500kV线路故障塔30基，闪络绝缘子35串（组）；220kV线路故障塔293基，闪络绝缘子332串（组）；66~110kV线路故障塔110基，闪络绝缘子137串（组）。500kV变电站3座，闪络设备18台；220kV变电站15座，闪络设备37台；110kV变电站16座，闪络设备26台。

每次绝缘子污秽闪络事故，看起来只是一个不良事件，但纵观绝缘子污闪历史与绝缘子污闪过程，应当将绝缘子防污闪作为一项系统工程，从多方面、多角度、多层次开展绝缘子缺陷诊断和维护工作。达到运行监测到位，缺陷信息传递的流程快捷，原因分析、技术防范、状态检修等各项措施落实。但完成防污闪构想并付诸实施，是一个需要理论支持、物质保障、技术到位、人员配合的庞大的反事故工程。

错误和挫折教训了我们，让我们更加珍惜安全局面。系列绝缘子污闪事故让中国电力系统不断交纳昂贵的学费，促使各级管理人员、技术人员不断思考对策，寻找绝缘子安全稳定运行的方法。痛定思痛的同时，又产生强大的技术创新驱动力。现代特高压电网、智能电网的可靠性要求高，电网的设备质量、管理技术显著提高，同时复合绝缘子和 RTV 防污闪涂料的广泛应用，抑制了大面积绝缘子污闪事故的发生。但局部的污闪事故仍然存在，有效的技术监督仍然是热门话题。

“污闪事故的损失和教训是最好的警示，红外诊断技术监督是最好的预防措施”。为了研究重大反事故课题，本书从宏观、局部、微观不同层面进行观察取证，将室内外设备瓷绝缘子，复合绝缘子、RTV 防污闪涂料的作用统一考虑，进行章节要素的逻辑编排、文字管理。将一个简单而严肃的反事故课题，演变为有着丰富内容的电力科技书籍，用于指导中国电力系统防污闪工作。各章节内容理论与实战技术密切配合，图谱与文字密切配合，融会贯通，以便技术人员工作实际中掌握要点，理解选读。

第一章高电压理论与绝缘子污闪原理，重点阐述防污闪的理论基础。作者结合多年采集红外热像数据所发现的污秽绝缘子缺陷特点，对绝缘子沿面放电现象的条件、过程、结果进行剖析，建立了绝缘子污闪的红外图解物理模型；成为铺垫全书知识面的认知事故规律的理论基础，帮助读者由浅入深地学习理解高电压理论。

第二章输变电绝缘子的运行与维护，说明了各类绝缘子的作用、结构、易发生的问题、运行特点、维护重点。绝缘子的运行维护是保证安全的基础性工作，也是开展绝缘子技术监督工作的载体。此项工作全面开展与落实，对绝缘子防污闪具有决定性作用。

第三章详细描写了污秽绝缘子的红外诊断方法，针对基层单位对污秽绝缘子识别方法掌握不足的现状，建立了与之相适应的红外诊断标准和判别缺陷的方法；包括掌握红外热像仪、数码相机、数码显微镜相机的摄影技巧，以便及时摄取高质量的影像数据。识别绝缘子缺陷的红外诊断工作，急需在全国电力基层单位全面进行，以促进防污闪工作的有效开展。

第四章污秽绝缘子红外诊断缺陷判据与闭环管理，该问题是本书的难点与重点。为了做好做实该章有关内容，体现出建立新编缺陷判断数据的必要性和正确性，作者长年坚持雨、雾天气深入变电站采集污秽绝缘子放电的红外数据，并在全国电力系统多方采集绝缘子故障运行资料。比如：红外诊断中发现了雨雾中红外热区色彩、局部电弧大小、温差值的状态数据与对应关系，发现和确定了室内、外污秽绝缘子临界闪络状态的最高“温差”值。所以，各章节有足够数据和污闪事件的材料证明，可以对 DL/T 664—2008《带电设备红外诊断应用规范》有关绝

缘子缺陷标准的数据进行修正、充实。结合实际对污秽绝缘子的监督方法,进行完善、细化,从而为绝缘子状态检修提供有效的缺陷数据。

第五章绝缘子防污闪实例大数据分析,从大量事故及异常运行的案例中,选择了有代表性的典型案例,如:隔离开关支柱瓷绝缘子污秽闪络,复合绝缘子污秽闪络,线路悬式复合绝缘子污秽闪络,穿墙套管瓷绝缘子污秽闪络,(瓷体)避雷器污秽放电。首次开展了110kV新瓷绝缘子的红外热区初值的提取、老瓷绝缘子带电水清洗的红外诊断效果验证,数码显微镜对绝缘子表面污秽物微观组织的研究,这些功课的完成,补充了新时期绝缘子防污闪课件的关键内容。本章通过故障分析及案例警示,佐证本书新制订的污秽绝缘子缺陷判据的实战性,并采用第一~四章所得结论和使用的方法,全面总结前四章对绝缘子红外诊断实战中所产生的指导性效果。

全书根据污闪事故发生的结果,从诊断过程展示、原因分析、理论应用、防范措施等方面进行阐述,证明本书所述内容与数据的真实可靠性,达到观赏画面的鲜活,实际应用价值成分的厚重可靠。

三、绝缘子失效的集约管理

绝缘子运行过程失效的技术诊断及集约管理是一项复杂而充满挑战的工作,需要全面的异常运行数据,良好的领导决策系统、标准化的状态检修体系。防止绝缘子运行失效的措施为六项,见图0-1绝缘子失效的诊断及集约管理矩阵图。图中体现了技术与管理因素的有机组合,其中领导决策、专家引领及检修维护是关键步骤;运维检修部的指令发布与效果检查,技术监督工作室的状态评估与监测预警,运行人员的巡视检查与缺陷报告是基础工作。经过供电公司领导指挥、运维检修部运作、技术监督工作室行动、红外专家指导、运行人员巡视、检修人员精心维护六个程序的良好运作,逐步形成了绝缘子防污闪工程的运作系统。绝缘子防污闪工程运作的最终成果是形成智能数据中心库,为今后全面、系统、规范开展绝缘子防污闪工作提供数据、事件、方案等智能支撑。要求将省、市电网运行的各区域污秽绝缘子,缺陷事件的发现、处理、原因分析等各要素形成技术结论,按照时间顺序分类保存于智能数据中心库,作为反事故措施的基础数据,指导电力系统防污闪工作。

能够在恶劣天气及时发现污秽绝缘子缺陷,并进行各级别预警,是识别绝缘子失效和集约管理的关键一环。智能数据中心应根据客观数据条件,坚持原则,进行准确预警,智能数据中心预警原则如下:

(1) 思维原则。用正向思维、反向思维模式分析故障原因,辩证看问题。根据发生的绝缘子污秽闪络的个别现象,推理并触及电力系统普遍存在的问题;根据污秽绝缘子最高温差值,预测故障的后续发展方向,推理并触及周围相邻输变

电设备的闪络事故周期。

(2) 实施原则。达到准确性、及时性、全面性的要求。准确性（关键点的见证），完成异常运行绝缘子的温度数据处理，图像特征分析；及时性（雨雾时开展工作），对特征量与温差数据反映的状态进行诊断并得出结论；全面性（输变电设备监督），根据存在的缺陷类别，发布蓝、黄、橙、红等级状态预警。

(3) 决策原则。预防为主，先期维护。建立基础信息库，建立风险管理流程，根据本地区绝缘子缺陷清单和状态检修的预后调查，做出本地区绝缘子运行维护的局部和系统管理的宏观决策。

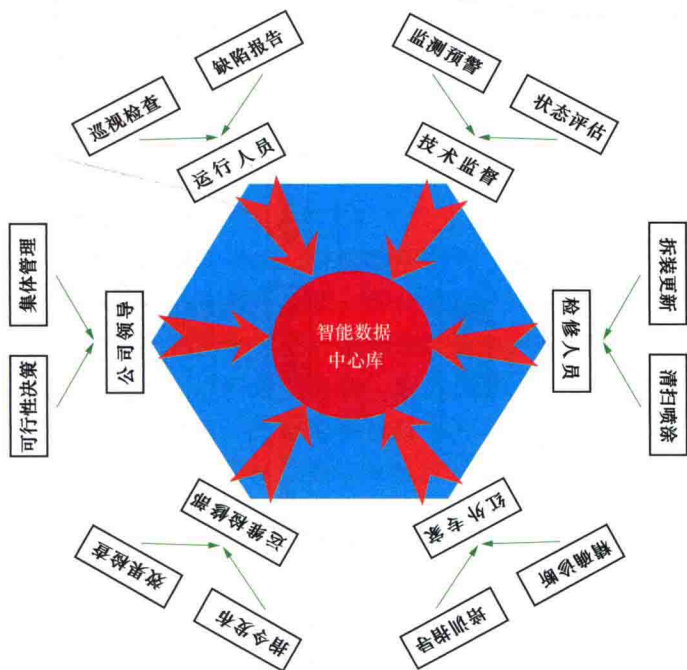


图 0-1 绝缘子失效的诊断及集约管理矩阵图

四、绝缘子红外诊断与维护系统

绝缘子的失效诊断及集约管理，应依据红外监督数据、缺陷的针对性修复方法、运行维护成果总结，建立绝缘子红外诊断与维护系统，使绝缘子防污闪的反事故措施实现标准化、规范化，见图 0-2 绝缘子红外诊断与维护系统框架图。图 0-2 展示了绝缘子运行、技术监督、缺陷诊断、运行维护的流程。第一模块的绝缘子异常信号收集系统与第三模块的绝缘子异常信号维护系统较容易理解与执行。第二模块的绝缘子异常信号诊断系统相对复杂，数据的筛选交叉多变，失效机理

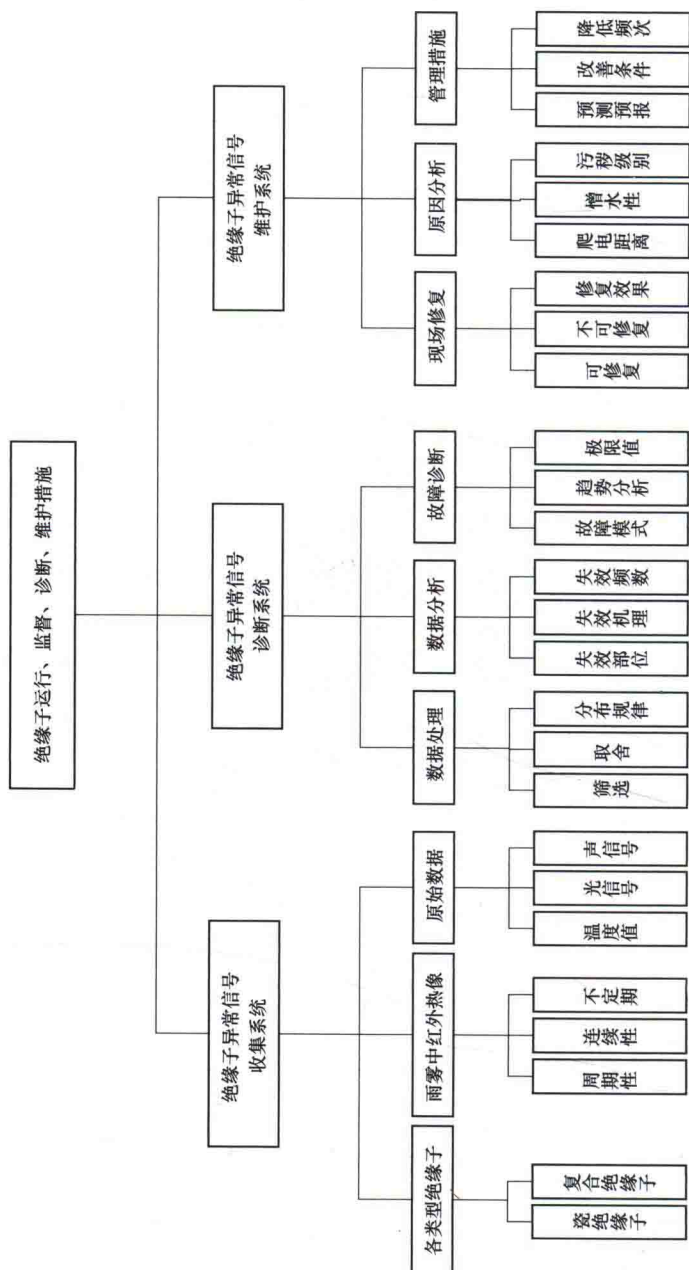


图 0-2 绝缘子红外诊断及维护系统框架图

与趋势分析较难掌握；并且以往中国电力行业绝缘子的红外技术监督数据不完整，缺陷判断标准不健全，需要进一步完善；所以，绝缘子异常信号诊断系统是该工程图的核心内容。

绝缘子红外诊断及运行维护系统分为三部分：①绝缘子异常信号收集系统，对雨雾中变电站污秽绝缘子的红外热像识别、温度数据采集；②绝缘子异常信号诊断系统，进行温差数据计算、分析，得出正常或异常的红外诊断结论；③绝缘子异常信号维护系统，根据现场绝缘子准确的运行数据，进行污秽绝缘子缺陷的现场修复、原因分析，从而健全、完善绝缘子管理措施。绝缘子异常信号的收集、诊断、维护系统功能如下：

(1) 绝缘子异常信号收集系统，分为绝缘子类别、雨雾中红外热像、原始数据三项内容。采用电压致热型设备所采用的图像特征判断法，判断污秽绝缘子局部热区的类别及状况；使用红外热像仪、数码相机、望远镜、目视观察识别污秽绝缘子的异常状态，使高处污秽绝缘子的图像清晰，表面发热温度值损失小，计算的温差数据准确。

(2) 绝缘子异常信号诊断系统，分为数据处理、数据分析、故障诊断三项内容。通过筛选异常信息，总结运行规律，固化室内、外污秽绝缘子异常及故障状态的温差数据，制订出缺陷定性标准。依靠现场采集的数据进行综合分析，为现场运行的缺陷绝缘子定性，进行趋势分析，临界闪络的极限温度预警，防止恶劣天气绝缘子污闪事故发生蔓延。完成消除故障的预防性功能后，再分析各类绝缘子污秽状态典型缺陷原因，探索出依据红外热像评估绝缘子运行状态的方法。

(3) 绝缘子异常信号维护系统，分为现场修复、原因分析、管理措施三项内容。根据本单位经济实力、技术条件，采取针对性强、效果好的方法，消除绝缘子的运行隐患。以高电压理论为基础，设备型号及说明书为参考，以污秽绝缘子表面温度数据为依据，针对关键性因素进行原因查找、分析。

污秽绝缘子闪络放电是一种暂态的故障现象，如果采取“头疼治头，脚疼治脚”的简单思维模式和处置方法，只做局部检修处理，只是完成了维护工作的一部分任务；重要的是要以理论的视角，标准化管理方法，系统地看待发生的污闪事故，并针对事故引起的严重后果和不良影响，向电力系统发出警戒预报；防止下次在该地区发生同样的事故，防止电力系统所有运行单元发生同类事故。促使电力设备制造厂家、高中层管理者、电力科学研究者、基层技术人员提高认识、改进工作方法，提升工作质量，提高管理水平。



第一章

高电压理论与绝缘子污闪原理

第一节 电场微观放电特性与绝缘子放电机理

一、气体放电理论

在自然界中，气体放电是一种普遍的自然现象，比如大气层中的闪电和极光；在日常生活中，荧光灯、钠灯等是利用气体放电原理制成的电光源电器。电力系统的气体放电涉及绝缘子运行的重要领域和广大范围。

绝缘材料又称电介质，其形态可分为气体电介质、液体电介质和固体电介质。

正常状态下，空气不导电，但受各种宇宙射线的作用，空气中含有少量的带电质点，故无法构成导电通道。如果对空气间隙外加某一临界电压时，气隙中的电流会突然剧增，同时出现明显的发光、发热现象。空气间隙会突然失去绝缘性能而变成导电通道，这种现象称为气体放电。气体放电存在两种形式：击穿与闪络。击穿是指纯气隙的放电，闪络是指沿着固体表面的气体放电。电气设备的外部绝缘和架空线路的绝缘是电力工程研究的重点对象。

1. 气体带电质点游离的基本形式

气体中带电质点是通过游离产生的。按照外界能量来源的不同，游离分为以下几种形式：

(1) 碰撞游离。在电场的作用下，带电质点（自由电子）沿电场方向不断得到加速并积累动能。当具有的动能积累到一定数值，带电质点与气体原子因碰撞而引起的游离称为碰撞游离。在气体放电过程中，碰撞游离主要是自由电子与气体原子或分子相撞而引起的，自由电子在碰撞游离中起着极其重要的作用。

(2) 光游离。在电场的作用下，自由电子与气体原子碰撞后，光子把能量传给原子或分子。这种由于光辐射引起原子或分子游离的现象称为光游离。由光游离产生的自由电子称为光电子，光电子的能量越大，游离能力就越强。在气体放电过程中，当处于激励状态的原子回到常态，都以光子的形式放出多余的能量，成为产生光游离的因素。

(3) 热游离。气体在热状态下引起的游离过程称为热游离。常温下，气体质

点的热运动所具有的平均动能远低于气体的游离能,因此不可能产生热游离。但在高温下的气体,例如发生电弧放电时,弧柱的温度可高达数千摄氏度,这时气体质点的动能就足以导致气体分子或原子碰撞时产生热游离。此外,高温气体的热辐射也能导致气体分子或原子产生光游离。故热游离实质上并不是另外一种独立的游离形式,而是在热状态下产生碰撞游离和光游离的综合。

2. 气体去游离的基本形式

当气体中发生放电时,除了有不产生带电质点的游离过程外,同时还存在一个相反的过程,即去游离过程,它将使带电质点从游离区消失,或者削弱产生游离的作用。气体去游离的基本形式如下:

(1) 漂移。带电质点在电场作用下作定向运动,消失于电极而形成回路电流,从而减少了气体中的带电质点这种现象称为漂移。由于电子的漂移速度比离子快得多,故放电电流主要是电子漂移运动的结果。电流的大小取决于带电质点的浓度及其在电场方向的平均速度。

(2) 扩散。气体中带电质点的扩散是由热运动造成的,气体的压力越高或温度越低,扩散过程也就越弱。

(3) 复合。气体中异号电荷的粒子相遇时,有可能发生电荷的传递而相互中和,从而使气体中的带电质点减少。异号电荷的浓度越大,复合的过程也越快速、越强烈,故强烈的游离区也是强烈的复合区。带电质点的复合过程中会发生光辐射,这种光辐射在一定条件下又会导致其他气体分子游离,从而使气体放电呈现出跳跃式的发展。

(4) 吸附效应。绝大多数的电子与气体原子或分子碰撞时,可能发生碰撞游离而产生电子和正离子,使得气体中自由电子的数量大增。但是,有些电子和气体原子或分子碰撞时,非但没有游离出新电子,碰撞电子反而被气体分子吸附而形成了负离子,这种现象称为吸附效应。吸附效应能有效地减少气体中自由电子的数量,从而对碰撞游离中最活跃的电子起到强烈的束缚作用,大大抑制了放电的发展,因此也将吸附效应看作是一种去游离的因素。

3. 气体放电理论的应用

气体中的游离与去游离在电场的发展过程将决定气体的击穿和绝缘状态。当游离因素大于去游离因素时,最终导致气体击穿;相反,当去游离因素大于游离因素时,最终使气体放电过程消失并恢复为绝缘状态。气体原子的激发和电离产生过程描述如下:通过施加能量而激发后,形成了光子和自由电子的加速运动过程,显著作用是促进了放电发展,见图 1-1。

运行绝缘子随着运行时间的推移存在劣化、污秽现象,这样绝缘子串上的分布电压曲线将发生变化。局部劣化、污秽绝缘子承受的分布电压升高,局部产生