

气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 潜供电弧物理特性与抑制技术

李庆民 孙秋芹 张 黎 刘洪顺 丛浩熹 著



科学出版社

气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 潜供电弧物理特性与抑制技术

李庆民 孙秋芹 张 黎 刘洪顺 丛浩熹 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

潜供电弧是特高压输电面临的关键技术难题之一,本书针对潜供电弧的物理特性和抑制技术开展系统性的研究:建立潜供电弧低压模拟实验平台,分析潜供电弧的物理特性和形成机理;重点研究潜供电弧多场耦合动力学建模方法,并阐述运动物理机制;将图像处理技术引入潜供电弧的参数识别和诊断中,进行空间三维重构,并探讨潜供电弧放电过程中正负离子和电子的时空分布特性;从“路”的角度出发,介绍潜供电弧电磁暂态过程及其关键影响因素;考虑到现有方法的不足,提出一种新型的潜供电弧抑制措施;研究特高压混合无功补偿和安装限流器等复杂工况下的潜供电弧特性及重合闸策略;针对超长距离半波长输电潜供电弧问题进行探索。

本书可供高电压与绝缘技术、气体放电物理、电力系统及相关领域的研究生、科研工作者和工程技术人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

潜供电弧物理特性与抑制技术/李庆民等著. —北京:科学出版社,2018.6  
(气体放电与等离子体及其应用著作丛书)

ISBN 978-7-03-057591-3

I. ①潜… II. ①李… III. ①电弧-物理性质-研究 IV. ①O461.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 109548 号

责任编辑:牛宇锋 赵薇薇 / 责任校对:樊雅琼

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:268 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 《气体放电与等离子体及其应用著作丛书》编委会

顾 问 邱爱慈 李应红 王晓钢 孔刚玉

主 编 严 萍 丁立健

副主编 王新新 邵 涛

编 委 (按姓氏笔画排序)

于达仁 万京林 王文春 方 志

卢新培 任春生 刘大伟 刘克富

刘定新 李永东 李庆民 李兴文

吴 云 张远涛 张冠军 欧阳吉庭

罗振兵 罗海云 姚陈果 章 程

程 诚 曾 嵘 戴 栋

## 序 一

特高压输电线路发生单相接地故障后,故障相断路器跳闸,健全相将通过相间耦合对故障点提供能量,形成潜供电弧。潜供电弧的快速熄弧直接决定重合闸的成功率,影响输电线路的可靠运行。近年来,尽管作为全球能源互联网重要物理基础的特高压输电技术得到了飞跃式发展,但线路长度不断增加,运行工况日趋复杂,潜供电弧问题也变得越来越突出。国内外学者针对潜供电弧的产生机理、影响因素、熄灭和重燃机制等,开展了一些研究工作,但目前仍鲜见相关的系统性学术专著。

该书由李庆民教授团队撰写,汇集了近十年的最新研究成果,具有系统性、准确性和完整性。作者开展了大量的实验,同时提出了一些有价值的新理论和新方法。相信该书的出版对于从事相关研究的学者和工程技术人员有所裨益,并将推动相关领域的研究进展。

清华大学电机工程与应用电子技术系教授

徐国政

## 序 二

单相自动重合闸可提高电力系统稳定性和供电可靠性,在超/特高压电网中得到了广泛的应用,其成功与否在很大程度上取决于故障点潜供电弧能否及时熄灭。开展潜供电弧实验和仿真建模研究,基于潜供电弧的物理特性及与系统的电磁暂态交互作用机理,发展有效的抑制方法,完善单相重合闸策略,具有重要的理论意义和工程应用价值。相关研究人员亟需这么一本关于潜供电弧放电机理、研究方法和应用的学术专著。

作为国内一部论述潜供电弧的专著,该书详细阐述了潜供电弧的实验方法、动力学建模理论、等离子体数值模拟、电磁暂态特性、抑制措施等方面的最新研究成果,内容新颖、实用并具有启发性,为读者全面系统地了解相关问题奠定了基础。

相信该书的出版必将推动该领域研究和应用的发展,不仅给相关专业的科技工作者提供重要的学术参考用书,而且会让阅读该书的青年学生获益匪浅。

中国科学院电工研究所研究员

严萍

## 前 言

随着超/特高压电网的建设以及全球能源互联网的推进,我国电力工业取得了长足发展。超/特高压输电线路电压等级高、距离长、传输功率大、结构特殊,系统发生单相接地故障后,潜供电弧问题非常突出。若故障点电弧未能及时熄灭,将使断路器重合于弧光接地故障,导致重合失败,影响系统的稳定性和供电的可靠性。

针对超/特高压输电线路潜供电弧的物理机制和动态演化过程开展探索与创新研究,进一步提出经济、有效的潜供电弧抑制方法,具有重要的理论意义和工程应用价值。本书作者及其研究团队经过十多年的努力,针对长输电线路潜供电弧的基础理论和关键技术问题开展了系统的科学研究,取得了一系列的创新成果。本书是作者在该领域研究成果的系统性总结。

全书共 10 章,由华北电力大学的李庆民、丛浩熹,湖南大学的孙秋芹,山东大学的张黎、刘洪顺共同撰写完成。第 1 章:绪论,主要介绍潜供电弧的形成机理与关键问题,由李庆民负责撰写。第 2 章:潜供电弧物理模拟实验研究,详细介绍潜供电弧模拟实验方案及平台设计,研究潜供电弧的燃弧特性、运动特性及熄灭重燃等物理特征,由孙秋芹负责撰写。第 3 章:潜供电弧多物理场耦合动力学与起始位置随机性建模,主要介绍潜供电弧多场耦合动力学建模方法,由丛浩熹负责撰写。第 4 章:潜供电弧运动物理机制研究,在潜供电弧动力学模型基础上研究潜供电弧长度变化、弧根跳跃等典型运动特征,由丛浩熹负责撰写。第 5 章:潜供电弧等离子体数值模拟,研究潜供电弧放电过程中电弧等离子体微观参量,由李庆民负责撰写。第 6 章:潜供电弧图像识别与三维重构,详细介绍潜供电弧图像形态参数提取方法和三维重构理论,由孙秋芹负责撰写。第 7 章:潜供电弧电磁暂态特性,研究潜供电流暂态特性和潜供电弧恢复电压暂态特性,由张黎负责撰写。第 8 章:潜供电弧抑制措施研究,主要介绍潜供电弧新型抑制技术及其与电力系统的交互作用,由刘洪顺、孙秋芹负责撰写。第 9 章:复杂工况下的潜供电弧问题,主要介绍特高压混合无功补偿和安装限流器两种工况下的潜供电弧特性及重合闸策略,由张黎负责撰写。第 10 章:特高压半波长输电线路的潜供电弧特性,研究半波长输电线路潜供电弧燃弧特征与电磁暂态特性,由刘洪顺、李庆民负责撰写。全书由李庆民、孙秋芹负责统稿和审定。

本书研究内容得到了国家自然科学基金项目(51277061、51507058、51507095)、国家电网公司重大科技项目(B11-10-023)等的资助,作者在此表示衷心的感谢。作者还要向为本书出版做出贡献的同事和被参阅过的文献作者表示诚

挚的感谢!

由于作者水平有限,难免存在疏漏与不足之处,敬请读者予以批评指正。

作 者

2017 年 8 月于华北电力大学

# 目 录

序一

序二

前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 研究背景与意义            | 1  |
| 1.1.1 单相重合闸的应用和意义      | 1  |
| 1.1.2 潜供电弧的形成机理        | 2  |
| 1.2 潜供电弧的研究现状与关键问题     | 4  |
| 1.2.1 潜供电弧的物理实验        | 4  |
| 1.2.2 潜供电弧的数学建模        | 8  |
| 1.2.3 潜供电弧的图像识别与重构     | 10 |
| 1.2.4 潜供电弧与电力系统的交互作用   | 11 |
| 1.2.5 潜供电弧的抑制技术        | 12 |
| 1.2.6 新型工况下的潜供电弧问题     | 18 |
| 1.2.7 特高压半波长输电线路潜供电弧问题 | 19 |
| 1.3 本书主要内容             | 19 |
| 第 2 章 潜供电弧物理模拟实验研究     | 23 |
| 2.1 实验设计               | 23 |
| 2.1.1 总体设计思路           | 23 |
| 2.1.2 实验回路拓扑           | 23 |
| 2.1.3 实验回路参数           | 23 |
| 2.1.4 实验设备规格           | 24 |
| 2.2 实验结果               | 26 |
| 2.2.1 潜供电弧燃弧时间         | 26 |
| 2.2.2 谐波特性             | 29 |
| 2.2.3 电弧伏安特性           | 31 |
| 2.2.4 电弧运动特性           | 31 |
| 2.2.5 潜供电弧间歇性不规则运动及其影响 | 36 |
| 2.2.6 潜供电弧熄灭特性         | 40 |
| 2.3 本章小结               | 42 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第3章 潜供电弧多物理场耦合动力学与起始位置随机性建模</b> | 44 |
| 3.1 潜供电弧多物理场耦合动力学模型                | 44 |
| 3.1.1 弧柱模型                         | 44 |
| 3.1.2 弧根模型                         | 48 |
| 3.1.3 电流元选取与仿真流程                   | 50 |
| 3.1.4 潜供电弧多物理场耦合动力学模型实验验证          | 51 |
| 3.2 潜供电弧起始位置随机性模型                  | 55 |
| 3.2.1 短路电弧通道电导率计算                  | 55 |
| 3.2.2 潜供电弧起始发展方向                   | 59 |
| 3.2.3 仿真流程与仿真结果                    | 60 |
| 3.2.4 潜供电弧起始位置随机性模型实验验证            | 62 |
| 3.3 本章小结                           | 64 |
| <b>第4章 潜供电弧运动物理机制研究</b>            | 65 |
| 4.1 弧根跳跃物理机制模拟                     | 65 |
| 4.2 潜供电弧长度动态变化特性                   | 68 |
| 4.3 多物理场耦合应力对潜供电弧运动特性的影响           | 70 |
| 4.3.1 潜供电流对运动特性的影响                 | 70 |
| 4.3.2 热浮力对运动特性的影响                  | 71 |
| 4.3.3 风力作用下的运动特性与燃弧时间              | 72 |
| 4.3.4 多物理场耦合应力对运动特性的影响机制           | 74 |
| 4.4 不同导线方向下潜供电弧运动特性                | 76 |
| 4.5 不同起弧位置下潜供电弧运动特性                | 78 |
| 4.6 本章小结                           | 80 |
| <b>第5章 潜供电弧等离子体数值模拟</b>            | 81 |
| 5.1 潜供电弧放电等离子体数学模型                 | 81 |
| 5.1.1 系数型偏微分方程和漂移-扩散模型             | 81 |
| 5.1.2 潜供电弧放电过程简化模型                 | 83 |
| 5.1.3 基于泊松方程的电场数学模型                | 84 |
| 5.2 潜供电弧放电过程数值仿真                   | 84 |
| 5.2.1 模型定义和网格剖分                    | 84 |
| 5.2.2 模型参数设置                       | 85 |
| 5.3 仿真结果分析                         | 87 |
| 5.3.1 空间电场分布特性                     | 87 |
| 5.3.2 带电粒子分布特性                     | 89 |
| 5.4 本章小结                           | 94 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 6 章 潜供电弧图像识别与三维重构 .....       | 95  |
| 6.1 潜供电弧的图像识别 .....             | 95  |
| 6.1.1 图像采集原理 .....              | 95  |
| 6.1.2 图像处理算法 .....              | 96  |
| 6.1.3 实验结果分析 .....              | 99  |
| 6.1.4 潜供电弧图像特征参数识别 .....        | 103 |
| 6.2 潜供电弧三维重构 .....              | 107 |
| 6.2.1 双目立体视觉重构原理 .....          | 108 |
| 6.2.2 三维重构流程 .....              | 109 |
| 6.3 本章小结 .....                  | 113 |
| 第 7 章 潜供电弧电磁暂态特性 .....          | 114 |
| 7.1 潜供电流暂态特性 .....              | 114 |
| 7.1.1 潜供电流暂态计算模型 .....          | 114 |
| 7.1.2 潜供电流暂态过程 .....            | 117 |
| 7.1.3 潜供电流暂态过程影响因素 .....        | 118 |
| 7.1.4 自由分量的衰减与振荡特性 .....        | 122 |
| 7.2 零休阶段恢复电压特性 .....            | 126 |
| 7.2.1 恢复电压上升率计算模型 .....         | 126 |
| 7.2.2 单相接地故障电路模型 .....          | 127 |
| 7.2.3 恢复电压上升率影响因素 .....         | 130 |
| 7.3 本章小结 .....                  | 137 |
| 第 8 章 潜供电弧抑制措施研究 .....          | 138 |
| 8.1 面向潜供电弧抑制的并联电抗器参数综合优化 .....  | 138 |
| 8.1.1 同塔多回线路的电磁耦合模型 .....       | 139 |
| 8.1.2 基于潜供电弧抑制的并联电抗器参数优化 .....  | 142 |
| 8.1.3 基于谐振过电压抑制的并联电抗器参数优化 ..... | 146 |
| 8.2 基于均压电容的新型潜供电弧抑制措施 .....     | 149 |
| 8.2.1 双断口断路器拓扑 .....            | 149 |
| 8.2.2 考虑双断口断路器均压电容的线路模型 .....   | 150 |
| 8.2.3 仿真计算 .....                | 155 |
| 8.2.4 基于扩展均压电容的新型潜供电弧抑制措施 ..... | 161 |
| 8.2.5 影响因素分析 .....              | 163 |
| 8.2.6 均压电容运行技术指标 .....          | 166 |
| 8.3 本章小结 .....                  | 166 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| <b>第 9 章 复杂工况下的潜供电弧问题</b> .....        | 168 |
| 9.1 安装混合无功补偿特高压输电线路潜供电弧特性与重合闸策略 ...    | 168 |
| 9.1.1 混合无功补偿关键元件及结构组成 .....            | 169 |
| 9.1.2 混合无功补偿对潜供电弧影响仿真分析 .....          | 170 |
| 9.1.3 混合无功补偿对潜供电弧低频振荡影响机理 .....        | 172 |
| 9.1.4 影响潜供电弧特性的因素 .....                | 173 |
| 9.1.5 混合无功补偿中旁路断路器与主断路器单相重合闸配合策略 ..... | 177 |
| 9.2 安装故障限流器的输电线路潜供电弧特性与重合闸策略 .....     | 178 |
| 9.2.1 氧化锌避雷器式故障限流器简介 .....             | 179 |
| 9.2.2 超高压输电系统分析模型 .....                | 179 |
| 9.2.3 旁路断路器断开时间对潜供电流的影响 .....          | 180 |
| 9.2.4 潜供电流低频分量的产生机理分析 .....            | 182 |
| 9.2.5 含限流器的线路单相重合闸操作 .....             | 184 |
| 9.3 本章小结 .....                         | 187 |
| <b>第 10 章 特高压半波长输电线路的潜供电弧特性</b> .....  | 189 |
| 10.1 半波长输电线路潜供电流和恢复电压 .....            | 189 |
| 10.2 半波长输电线路潜供电流和恢复电压仿真研究 .....        | 191 |
| 10.2.1 传输功率对潜供电流和恢复电压的影响 .....         | 191 |
| 10.2.2 调谐方式对潜供电流和恢复电压的影响 .....         | 194 |
| 10.2.3 线路长度对潜供电流和恢复电压的影响 .....         | 197 |
| 10.3 潜供电弧抑制措施与单相自动重合闸 .....            | 198 |
| 10.3.1 快速接地开关的分布配置 .....               | 198 |
| 10.3.2 半波长输电潜供电弧燃弧时间与单相重合闸 .....       | 203 |
| 10.4 本章小结 .....                        | 204 |
| <b>参考文献</b> .....                      | 206 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

### 1.1.1 单相重合闸的应用和意义

随着经济的不断发展,电力需求迅速增加,这为我国电网的发展带来了新的机遇,同时也提出了新的挑战。主要问题体现在<sup>[1,2]</sup>:①我国一次能源远离负荷中心,大容量长距离输电势在必行,现有的 500kV 输电线路输送能力有限,不能满足未来长远发展的需求;②基于 500kV 网架的联网系统,区域交换能力不足,无法满足资源进一步优化配置的需求;③土地资源日趋紧缺,提高单位长度输电走廊的输电容量具有重要的经济与社会意义;④我国电力负荷分布严重不均,华北、华东地区 500kV 电网短路电流超标现象非常严重,对系统的安全可靠运行非常不利;⑤长链式网架结构动态稳定问题突出;等等。

国家电网有限公司(简称国家电网)结合我国电网发展的现状以及未来发展的趋势,提出了建设 1000kV 特高压骨干网架的战略构想,通过技术创新从根本上解决上述各项问题。特高压输电线路的造价与传输容量比明显优越于 500kV,更适合于长距离、大容量的电力输送和功率交换要求,具有更大的经济性与远期适应性。特高压电网的建设与实施将实现资源的优化配置,对于保障国家能源安全和电力可靠性具有重要意义。

2006 年 8 月,特高压交流试验示范工程通过国家核准;2009 年 1 月 6 日,晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程一期通过验收并投入试运行;2011 年 12 月 16 日,经过扩建后的特高压试验示范工程正式投入商业运行,成为我国南北方向的一条重要能源输送通道,进一步提高了华北和华中两大电网之间的电力资源优化配置能力,同时标志着我国电网实现了历史性的跨越<sup>[3]</sup>。当前,特高压电网建设在我国处于起步阶段,加快研究、进一步完善特高压输电技术,具有重要的学术价值与工程意义。

对于超/特高压输电线路,由于线间距离大,输电线路的故障以单相接地故障为主,其发生数量占总故障的 90%,且绝大部分为瞬时性故障。表 1.1 给出了 IEEE 统计的 500kV 输电线路故障类型统计数据<sup>[4]</sup>。

表 1.1 500kV 输电线路故障类型统计数据

| 故障类型   | 百分比/% |
|--------|-------|
| 单相接地故障 | 93    |
| 相间故障   | 4     |
| 两相接地故障 | 2     |
| 三相故障   | 1     |
| 总计     | 100   |

根据超/特高压输电线路的具体工况及其故障类型的特点,采用单相重合闸具有重要意义<sup>[4-10]</sup>。

(1) 提高系统的稳定性。采用单相重合闸的输电线路,故障时由于切除的只是故障相而不是三相,故障期间送端和受端并没有完全失去联系,可大大加强两个系统之间的联系,避免系统的解列;发生故障的输电线路,允许单相开断的时间比三相分闸时间要长 3~4 倍,单相自动重合闸相比三相自动重合闸具有更大的动稳定极限;当采用单相重合闸时,输电线路可进一步增加线路的传输容量,提高线路的输送能力。

(2) 提高供电的可靠性。单侧电源供电的线路发生单相故障而切除故障相时,其他两相仍继续供电,避免了供电的中断,提高了供电的可靠性;特别是当由单侧电源单回线路向重要负荷供电时,单相重合闸的优越性更加显著。

(3) 减小操作过电压水平。单相重合闸操作过电压水平比三相重合闸操作过电压水平平均低约 30%,针对超/特高压等级输电线路,采用单相重合闸,降低电网的操作过电压水平会带来显著的经济效益。

(4) 减小对轴系的冲击。单相重合闸可减小对大容量轴系的冲击,特别是降低对大型热电厂的轴扭振度。

(5) 简化系统的操作。由于单相故障只需断路器跳一相,其他两相不跳,减少了断路器的操作次数,延长了检修周期;采用单相重合闸,不存在同期问题;单相重合闸间接减少了并网的次数等。

### 1.1.2 潜供电弧的形成机理

采用单相重合闸的输电线路,当线路发生故障,故障相切除后,非故障相通过静电耦合与电磁耦合向故障相供电,在故障点形成的电流称为潜供电流,形成的弧光放电称为潜供电弧,潜供电弧熄灭后,弧道两端形成的电压称为恢复电压<sup>[4]</sup>。

潜供电流与恢复电压是反映潜供电弧特性的两个重要参量。潜供电流中含有静电感应分量和电磁感应分量<sup>[4,11,12]</sup>。其中,由非故障相电压通过相间电容产生的感应分量称为静电感应分量  $I_{sc}$ ,如图 1.1 所示,其值由式(1-1)确定,其中  $C_m$  是

相间电容;由非故障相电流经相间互感在故障相形成的感应分量称为电磁感应分量  $I_{sm}$ ,如图 1.2 所示。

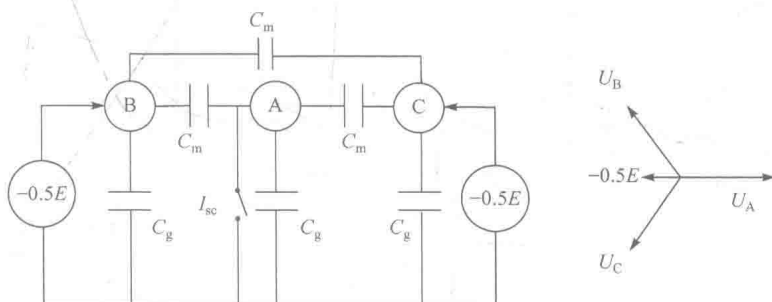


图 1.1 静电耦合电路

$$I_{sc} = -0.5E \times \frac{1}{\frac{1}{-j\omega 2C_m}} = Ej\omega C_m \quad (1-1)$$

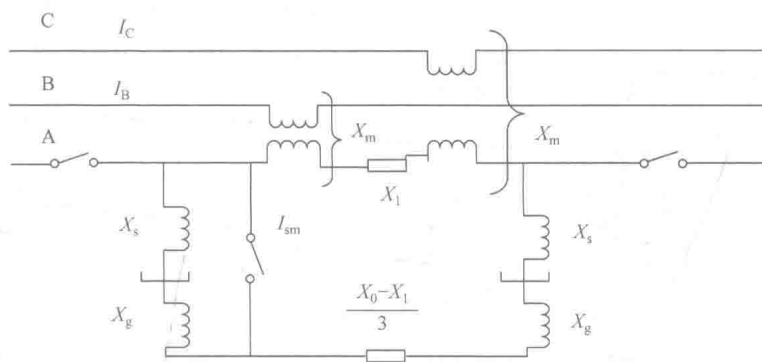


图 1.2 电磁耦合电路

图 1.2 中,  $X_m$  为线路互感,  $X_s$ 、 $X_g$  分别对应并联电抗器小电抗和中性点小电抗,  $X_0$ 、 $X_1$  为线路零序感抗和正序感抗。

潜供电弧电流与弧道恢复电压中,静电感应分量占了绝大部分,它与线路的结构以及长度有关,与故障点的位置几乎无关,其值主要取决于输电线路的相间电容与线路电压等级。电磁感应分量所占比重较小,它主要取决于线路传输容量、线路结构参数以及故障点位置,其值与线路零序阻抗有很大联系。当故障点在线路中点时,电磁感应分量近似有最小值<sup>[4-6]</sup>。

发生单相接地故障的输电线路,潜供电弧若不能及时熄灭,将使断路器重合于弧光接地故障,造成重合闸失败。超/特高压输电线路较长,运行电压高,潜供电弧的熄灭是一个技术难题。针对超/特高压工程建设遇到的问题,开展潜供电弧发生

机理的实验模拟和仿真建模研究,结合潜供电弧伏安特性的强烈非线性与随机性特征,发展有效的熄灭技术与抑制方法,完善单相重合闸技术,具有重要的理论意义和应用价值。

## 1.2 潜供电弧的研究现状与关键问题

近几十年来,针对常规输电线路潜供电弧的产生机理、影响因素、熄灭和重燃机制等,国内外学者采用物理实验、数学建模和仿真等手段开展了大量研究工作,多集中于超高压电网<sup>[4,7,8]</sup>。

潜供电弧的动态物理过程与很多因素密切相关,集中体现为两大类,即确定性因素与非确定性因素。确定性因素主要包括线路长度、电压等级、并联电抗器位置及其补偿度(或快速接地开关)、杆塔结构等;非确定性因素主要包括故障位置、短路电弧电流及其持续时间、风速大小与方向、弧道恢复电压等<sup>[13]</sup>。其中,线路长度、电压等级等因素通过影响潜供电流值、恢复电压及其上升率的大小从电气上间接影响潜供电弧的物理特性;而风速大小与方向、短路电弧电流等因素通过作用于弧道而直接影响潜供电弧的发展与重燃特征。潜供电弧的研究现状与关键问题分述如下。

### 1.2.1 潜供电弧的物理实验

#### 1. 潜供电弧的现场实验

国内外针对超高压输电线路的潜供电弧,进行了大量的现场实验,获得了很多现场数据<sup>[14-18]</sup>。随着线路电压等级的提高,针对特高压输电线路的潜供电弧现场实验也在进行。具有典型意义的现场实验如下所述。

巴西 CEPEL 高电压实验室在 500kV 线路实验段进行了潜供电弧的现场实验。实验线路共包括三个杆塔结构,分为两段。通过人工引弧,模拟产生潜供电弧并进行监测。在这次测试中,短路电弧电流持续 1s,频率为 60Hz,实验的潜供电弧电流(有效值)分别为 60A、100A、150A、200A<sup>[14,15]</sup>。该实验进一步验证了潜供电弧的非线性特征,通过实验测量得到潜供电弧的各次谐波含量,并研究了长间隙潜供电弧的运动轨迹与熄灭特性,相关实验数据可用作比较和分析低压模拟实验的等价性与有效性。

图 1.3(a)为巴西超高压实验线路段上,潜供电弧的引弧装置布置图<sup>[14]</sup>。绝缘子串两端安装了一套挂钩,铜线安装在绝缘子串两端的挂钩上引燃短路电流。图 1.3(b)为潜供电弧的燃烧轨迹。

俄罗斯的 1150kV 特高压输电线路,线路长度为 500km,线路首端安装并联电

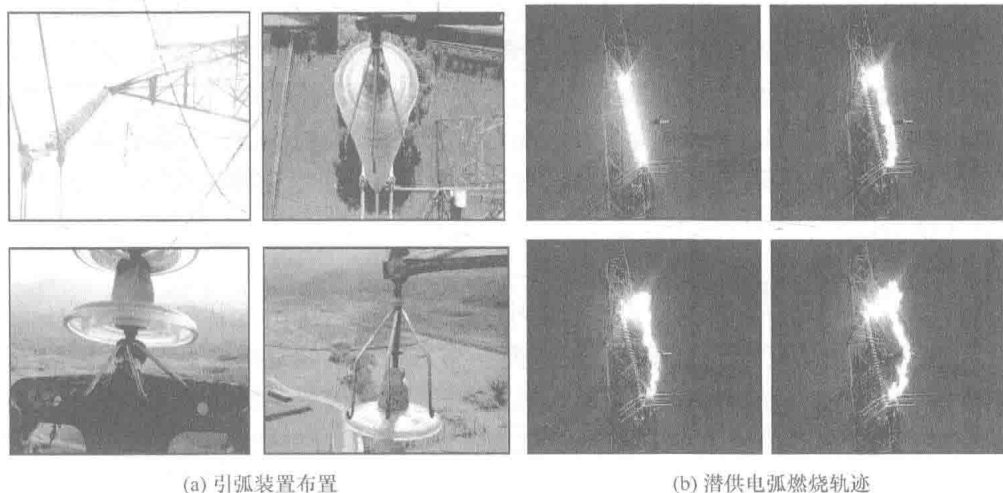


图 1.3 潜供电弧现场实验

抗器  $3 \times 300 \text{Mvar}$ , 线路末端安装并联电抗器  $2 \times (3 \times 300) \text{Mvar}$ 。潜供电弧实验过程中, 在线路末端 C 相最后一基杆塔的绝缘子串两端串接一直径为  $0.5 \text{mm}$  的铜线<sup>[16]</sup>。线路末端断路器始终断开, 当线路首端断路器合闸时, 绝缘子串两端的铜线迅速燃烧引燃短路电流, 即模拟产生短路电弧。此时保护识别线路故障, 信号发送到首端, 打开故障相断路器。其他两相依旧运行, 潜供电弧在短路电弧通过的弧道中产生, 记录并获取了相关电压、电流数据。实测的燃弧时间约为  $0.30 \text{s}$ <sup>[17,18]</sup>。

我国特高压交流试验示范工程长南线的南阳站进行了人工 C 相瞬时接地实验<sup>[10]</sup>。引弧线长度为  $11 \text{m}$ , 故障后  $40 \text{ms}$  左右南阳站  $1000 \text{kV}$  断路器分闸, 故障后约  $75 \text{ms}$  长治站保护跳开  $1000 \text{kV}$  断路器, 直至  $1 \text{s}$  后两侧断路器单相重合成功。实验时的风速约为  $1.2 \text{m/s}$ , 北风, 实测的燃弧时间为  $110 \text{ms}$ 。该实验中微风在短时间内对长达  $11 \text{m}$  的开放电弧的影响较小, 电弧呈现为直线形状。短路电弧的弧道粗, 亮度大, 潜供电弧的弧道细, 亮度小, 如图 1.4 所示。

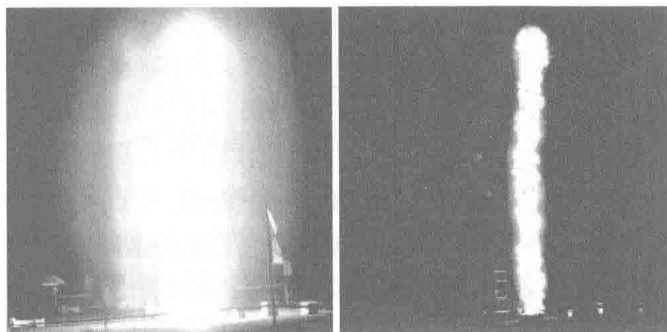


图 1.4 特高压交流试验示范工程潜供电弧现场实验