



国际电气工程先进技术译丛



IEEE

WILEY

弧闪故障危害与治理

Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation

[美] 杰伊·C. 达斯 (Jay C. Das) 著

王 宾 等译

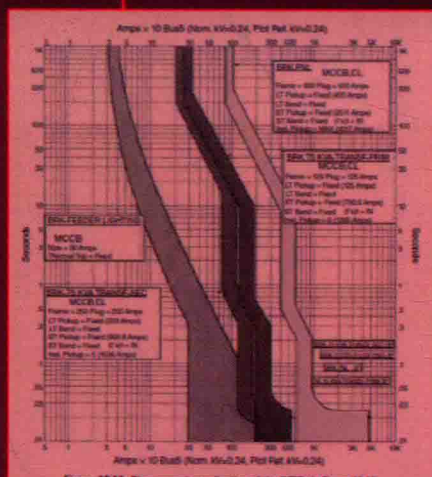


Figure 10.11 Time-current coordination of the OCBs in Figure 10.10



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

弧闪故障危害与治理

Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation

[美] 杰伊·C. 达斯 (Jay C. Das) 著

王 宾 等译



机械工业出版社

本书系统全面地介绍了弧闪故障分析及相关防治措施。书中第1章简要介绍了弧闪故障危害的基本常识之后,剩余章节可以分为两大部分。第一部分主要是从电力系统一次系统设计分析的层面展开,包括第2章至第6章,介绍了电力系统优化拓扑设计、合理的接地方式选择、准确或实用化的短路故障分析、ANSI/IEEE相关短路计算国际标准等内容;第二部分主要是从电力系统二次系统设计分析的层面展开,包括第7章至第15章,内容涉及继电保护基本原理、整定配合关键技术、弧闪检测继电器、互感器/断路器选型、相关通信协议及技术等内容。书中内容重点突出、前后关联紧密,在阐述基本原理的同时,给出了大量的案例分析。

本书适合电气工程师、咨询专家、电力系统管理员工和现场运维工程师等阅读。

Copyright © 2012 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation, ISBN: 978-1-118-16381-8, by Jay C. Das, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2013-7862号。

图书在版编目(CIP)数据

弧闪故障危害与治理/(美)杰伊·C. 达斯(Jay C. Das)著;王宾等译. —北京:机械工业出版社,2018.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation

ISBN 978-7-111-60674-1

I. ①弧… II. ①杰…②王… III. ①电力系统-短路事故-防治
IV. ①TM713

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第183806号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:闫洪庆 朱林 任鑫 付承桂

责任校对:刘志文 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·30印张·612千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60674-1

定价:150.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com



译者的话

电弧放电是自然界、电网故障中常见的一种能量瞬间释放现象。其冲击电流大，因此必须对放电现场的设备、人员提供完备的安全防护。

继电保护是电网安全的第一道防线，目前已经建立了较为完善的故障分析、检测与保护的系统方法。但是以往考虑的主要是金属性故障或经过渡电阻接地的简化故障形态，而对于电弧放电引起的弧闪故障关注度不足，主要原因是对电弧放电的暂态特性、非线性特征缺乏系统全面的认识，导致了近年来与弧闪故障相关事故、人身伤亡频繁发生。

弧闪故障的防护是一个系统工程，既涉及高压一次系统的优化设计、接地方式选择等关键问题，又需要密切配合二次保护系统的灵敏整定和可靠出口，涵盖高电压、电力系统、继电保护、通信技术等多门专业技术，对于初学者或现场工程师提出了较高要求。

译者自 2010 年在国家自然科学基金青年基金（51007045）的资助下，开始了配电线路弧光高阻接地故障检测相关技术的研究工作，后续在国家自然科学基金（51477084）项目的资助下，将弧光高阻故障分析从配电网拓展到了输电网，从线路故障检测拓展到了断路器健康状态监测，但是在研究过程中也遇到了电弧模型不统一、缺乏电弧解析表达等多种困难。

我非常高兴遇到了这本著作，其系统全面地介绍了弧闪危害的物理本质，并分别从一次系统规划设计、系统接地方式选择、弧闪短路故障分析、继电保护原理及整定、断路器选型、互感器特性分析、通信技术配合等方面总结了国际上在弧闪分析及治理领域的最新技术进展。惊喜之余，尝试翻译此书给国内的电力工作者，既是一个自我学习的过程，对自己的科研也是一种鞭策。

本书翻译起始于 2014 年在美国田纳西大学的访学过程中，田纳西河畔的 Sequayah 给我留下了非常难忘的回忆。非常抱歉，回国后事务繁多，翻译进程较为缓慢。

海军航空大学的王晶讲师翻译了第 12、13 章，清华大学电机系王宾副教授完成了其余章节的翻译和全文统稿工作。此外还要感谢清华大学电机系景柳铭博士后，硕士研究生陆元园、杨林、崔鑫，本科生杨闰卿等同学等参与的部分翻译和校对工作。

感谢我的爱人宋洁女士对我的宽容和支持，也非常欣慰王思博和王芃博两个小家伙的茁壮成长，你们是我一直前进的动力。

译者水平所限，对部分技术理解也不全面，翻译过程中难免出现差错，敬请读者指正。

王宾 于清华园

原 书 序

所有新兴技术都存在共性问题：技术安全保障技术的成熟度可能会落后于该技术的应用。对于始于 19 世纪末的现代社会工业、商业和居民供电而言，情况确实如此。虽然人们已经知道人体触电非常危险，但直到一个世纪之后，弧闪与电击之间的区别仍然没有得到人们足够的重视。现在人们开始知道了弧闪危害是电力系统中最具威胁和代价最高的电力伤害事件之一。在几分之一秒内发生剧烈的能量转移，瞬间将电能转换为热能、爆炸声能、光能、化学能和电磁能，从而对人体造成伤害。这种伤害包括复杂的生理、神经和心理伤害，非常难以治疗且康复成本高昂。伤害不仅影响到个人，还会延伸到家人、朋友和同事。弧闪还会严重破坏设备，中断正常供电，危害基础设施，造成严重的后果。但是弧闪的危害是可以被阻止的。

随着对弧闪危害认识的增加，越来越多的防治措施得到了应用，包括相关的安全工作制度管理以及合理地使用个人防护装备。这显著降低了人员受伤害的风险，但是这些解决方案还是存在明显的局限性。预先整定的防治措施效果很容易受到人为失误实时因素的影响，成功的概率受知识匮乏、环境误判以及措施失效等因素影响而降低。用于弧闪防治的个人防护装备目前仅限于防范热量和声音危害，并且仅能降低伤害的严重性，而无法完全保障当事人免受伤害。爆炸造成的冲击伤害以及有毒化学、高温气体对呼吸道的伤害也难以通过个人防护装备来防范。现在已经有了更全面的解决方案，可减少弧闪事故的发生概率，最大限度地减少能量传递、降低爆炸的概率。

目前对弧闪事故的研究和出版物已经出现了明显的学科交叉，融合了工程学科、自然科学、健康、安全、医学和法律学科等多学科。J. C. Das 已经开展了良好的体系研究，汇集了众多创新思想和实践理念，在弧闪分析和治理方面贡献了大量论著和使用案例分析，从而使得工程师、设备管理人员、专业安全人员以及操作和维护人员首次对于弧闪预防方法有了全面的参考依据。本书提供了一整套的分析工具，可用于设计、评估和改善现有的供电系统安全性。弧闪治理没有“特效武器”，但按照本书中介绍的方法和措施，改善现有的供电系统拓扑及性能，可有效地将弧闪危害降低至 $8\text{cal}^{\ominus}/\text{cm}^2$ 以下。本书的第 15 章也给出了直流系统弧闪治理的新颖思路。书中介绍的分析工具可以比较不同的系统设计方案并针对性选择设备，以降低弧闪危险，保障危险环境中工作的工人，自动降低安全风险。

$\ominus$ $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ ，后同。

我们目前仍处于弧闪治理研究之中。正在进行的基础研究将继续探索弧闪现象的复杂性。设备制造商将推出更多新产品,以消除或降低弧闪的发生,继电保护工程师将提供更快速的故障检测和隔离方法,可靠性工程师将帮助解决电气回路保护装置硬件、软件和设计中的隐形缺陷。装备研制工程师将通过系统设计事先预防弧闪危害的发生。大家共同来实现对工人安全的保护。本书给出了上述弧闪危害分析及治理的相关技术路线。为了未来不再出现下一个工人受到弧闪的威胁,需要我们进一步加快研究进展。

H. Landis “Lanny” Floyd

H. Landis “Lanny” Floyd 是杜邦公司首席电气安全技术顾问。他是 IEEE 会士和多项奖项的获得者,其中包括 2002 年 IEEE 电气安全技术开发和应用方向的 Richard Harold Kaufman 奖励以及 2004 年 IEEE 工程卓越奖,以表彰在弧闪分析和治理方面的贡献。他撰写了 70 多篇关于工作场所电气安全的相关论文。他是《IEEE Industry Applications Magazine》杂志的编辑,是国际公认的电力安全专家。

原 书 前 言

大量的文献报道表明了弧闪危害已经涉及所有行业的供电系统，特别是在 IEEE 工业应用协会石油和化学工业、工业和商业供电系统、造纸工业技术会议，以及 IAS 安全研讨会等多有报道。因此需要关注电气设备新技术、供电系统拓扑设计、弧闪分析及其治理等多方面取得的新进展，来保障电气工程师的人身安全。这种对新技术的需求推动了产品创新，对一线工程师的专业知识储备提出了新挑战，也驱动了电力系统拓扑结构设计和继电保护技术的创新和发展。但是目前的新技术介绍比较分散，缺少一本综合介绍该方向新进展的出版物。

本书填补了该空白。弧闪危害计算涉及多个方面，包括短路计算、继电保护、差动继电器、电弧检测继电器、继电器整定配合、系统接地方式、抗弧闪设备、电流互感器等，本书都以通俗易懂的语言、大量案例分析、实际工程应用和丰富的参考文献等多方面多角度进行了阐述，也给出了目前的弧闪分析和治理新技术，例如瞬时性保护动作整定、故障限流装置、区域联锁和设备性能改进等。第 13 章重点介绍了变压器低压侧保护，介绍了利用变压器等效阻抗来降低弧闪危害的方法。讨论了对 IEEE 1584 标准中所给出方法的不同观点以及对安全文化和职业素养等方面的新进展。书中也介绍了一种考虑直流衰减分量短路电流计算的弧闪危害分析方法，相关成果笔者最先发表在了《IEEE Transaction on Industry Application》期刊上的。

IEEE 1584 标准没有涵盖直流系统中的弧闪危害分析，第 15 章补充了该部分相关内容，并给出了具体应用分析。第 16 章中讨论了在大型工业供电系统中基于以太网和 IEC 61850 通信协议的实时控制、诊断和数据访问等新技术。

本书的阅读对象是电气工程师、咨询专家、电力系统管理员工和现场运维工程师等。书中有些部分需要读者具备本科及以上的电力系统专业知识。随着近年来对弧闪危害的日益关注，期望本书能得到读者的广泛欢迎。

J. C. Das

目 录

译者的话

原书序

原书前言

第1章 弧闪故障危害分析 1

1.1 电弧描述 2

1.1.1 电弧热源 2

1.1.2 开关柜中的弧闪现象 2

1.2 弧闪危害与人身安全 3

1.3 时间运动特性分析 4

1.4 弧闪危害 4

1.5 弧光爆炸 5

1.6 电击危害 8

1.6.1 人体电阻 10

1.7 火灾 12

1.8 弧闪危害分析 13

1.8.1 Ralph Lee 和 NFPA 方程 14

1.8.2 IEEE 1584 标准方程 15

1.9 个人防护装备 18

1.10 弧闪危害边界 20

1.10.1 工作距离 21

1.10.2 有关弧闪的标记数据 21

1.11 弧闪最大持续时间与弧闪
边界 22

1.11.1 开关柜门闭合状态下的弧闪
危害 23

1.12 内部弧闪故障的原因 24

1.13 弧闪危害的计算步骤 24

1.13.1 NFPA 表 130.7(C)(15)
(a) 25

1.14 计算举例 27

1.15 降低弧闪危害 30

复习题 31

参考文献 31

第2章 有效设计实现弧闪危害 防治 34

2.1 电气标准与技术规范 35

2.2 通过有效设计提高防护水平 36

2.3 现存规范、规则与标准的
局限性 37

2.4 电气危害 37

2.5 正在变化的安全性理念 40

2.6 关键安保供电系统风险分析 41

2.6.1 现有系统 41

2.6.2 新设备 41

2.7 可靠性分析 42

2.7.1 可靠性评价数据 43

2.7.2 评价方法 44

2.7.3 可靠性和安全性 44

2.8 维护和操作 45

2.8.1 维护策略 45

2.8.2 以可靠性为中心的维护
(RCM) 46

2.9 安全完整性等级和安全装备
系统 46

复习题 47

参考文献 48

第3章 IEEE 1584 标准中有关弧闪 计算的规定 51

3.1 弧闪电流变化特性 51

3.2 电极间隙长度 52

3.3 弧闪能量的变化特性 54

3.4 IEEE 方程中的不足之处 55

3.5 Lee 的电弧模型 56

3.6 IEEE 实验模型的建立 58

3.7 电弧烧伤危害 59

3.8 绝缘挡板的作用 62

3.8.1 无挡板的情况 62

3.8.2 有挡板的情况 63

3.9 弧闪试验模型 64

3.10 其他备选方程 66

3.11 后续试验与研究方向 67

3.12 基于 IEEE 1584 标准的 PPE 计算

效力	67	5.4 旋转电机模型	113
复习题	68	5.5 计算方法	114
参考文献	68	5.5.1 简化方法 $X/R \leq 17$	114
第4章 弧闪危害及系统接地	70	5.5.2 简化方法 $X/R > 17$	114
4.1 系统和设备接地	70	5.5.3 针对交、直流衰减分量调整的 E/Z方法	114
4.1.1 直接接地系统	70	5.6 网络简化	117
4.2 低阻接地系统	74	5.7 计算过程	117
4.3 高阻接地系统	74	5.7.1 分析计算过程	118
4.3.1 故障检测、报警及隔离	76	5.8 电容器和静态变流器的短路电流 贡献	119
4.4 不接地系统	80	5.9 典型计算机计算结果	120
4.5 经电抗接地系统	80	5.9.1 首个周期或暂态容量 计算	121
4.6 谐振接地系统	81	5.9.2 开断容量计算	122
4.7 三角形接地系统	81	5.9.3 低压断路器开断容量 计算	122
4.8 避雷器	82	5.10 计算案例	123
4.9 人造中性点	82	5.10.1 短路容量计算	127
4.10 多点接地系统	85	5.10.2 K 额定容量 15kV 断 路器	130
4.10.1 不同接地系统的比较	85	5.10.3 4.16kV 断路器和电动机起 动器	132
4.11 直接接地系统的弧闪危害 分析	87	5.10.4 变压器主开关及熔断 开关	134
4.12 直接接地系统的保护与配合	88	5.10.5 低压断路器	134
4.12.1 自熄灭接地故障	91	5.11 30 周期的短路电流	136
4.12.2 低压直接接地系统保护配合 的改进	93	5.12 不对称性短路电流	137
4.13 经低阻接地中压系统的接地故障 保护配合	96	5.12.1 单相接地故障	137
4.13.1 远方跳闸	99	5.12.2 两相接地故障	139
4.13.2 工业用母线直联发电机的接地 故障保护	99	5.12.3 相间短路故障	141
4.13.3 方向接地故障继电器	103	5.13 计算方法	145
4.14 对接地电阻器的监测	104	5.13.1 单相接地故障	145
4.15 接地系统的选择	105	5.13.2 两相短路故障	145
复习题	106	5.13.3 两相接地故障	146
参考文献	107	复习题	148
第5章 基于 ANSI/IEEE 标准的 弧闪短路计算	109	参考文献	149
5.1 计算类型	109	第6章 弧闪中衰减短路电流 计算	150
5.1.1 短路计算	109	6.1 无源元件的短路	150
5.1.2 弧闪计算中的短路电流 计算	110	6.2 无交流衰减的系统	152
5.2 高压断路器的标准结构	110	6.3 同步电机电抗	153
5.3 低压电动机	113		

6.3.1 漏电抗	153	7.5.3 绝缘壳式断路器	189
6.3.2 次暂态电抗	154	7.5.4 低压功率型断路器	191
6.3.3 暂态电抗	154	7.5.5 LVPCB 可编程断路器的短时 分段特性	192
6.3.4 同步电抗	154	7.6 低压断路器的短路容量	194
6.3.5 交轴电抗	154	7.6.1 单相开断容量	196
6.3.6 负序电抗	154	7.6.2 短时容量	197
6.3.7 零序电抗	155	7.7 串联容量	197
6.4 电抗的饱和	155	7.8 熔断器	199
6.5 同步电机的时间常数	155	7.8.1 限流型熔断器	199
6.5.1 开路时间常数	155	7.8.2 低压熔断器	201
6.5.2 次暂态短路时间常数	155	7.8.3 高压熔断器	201
6.5.3 暂态短路时间常数	155	7.8.4 电子式熔断器	202
6.5.4 电枢时间常数	155	7.8.5 开断容量	203
6.6 终端短路时的同步电机特性	155	7.9 合理应用熔断器降低弧闪危害	204
6.6.1 故障时的等效电路	156	7.9.1 低压电动机起动器	204
6.6.2 故障衰减曲线	159	7.9.2 中压电动机起动器	204
6.7 同步电动机和调相机的短路 故障	162	7.9.3 低压开关柜	205
6.8 异步电动机的短路故障	163	7.10 导体保护	209
6.9 使用衰减短路电流进行弧闪 计算的新算法	165	7.10.1 导体的载流能力	210
6.9.1 可用的商业计算软件	166	7.10.2 导体终端	211
6.9.2 多短路电源的输出能量 累加	166	7.10.3 考虑电压跌落	211
6.9.3 对比计算	167	7.10.4 考虑短路的情况	211
复习题	170	7.10.5 导体的过电流保护	213
参考文献	171	7.11 电动机保护	213
第7章 继电保护	172	7.11.1 电动机热限制曲线配合	215
7.1 考虑弧闪的保护配合	172	7.12 发电机保护 51V	222
7.2 继电器分类	175	7.12.1 考虑弧闪情况	224
7.3 保护系统的设计标准	175	复习题	225
7.3.1 选择性	176	参考文献	225
7.3.2 快速性	176	第8章 单元保护系统	227
7.3.3 可靠性	176	8.1 保护区重叠	228
7.3.4 后备保护	176	8.2 用于减少弧闪的差动系统的 重要性	231
7.4 过电流保护	177	8.3 母线差动保护方案	232
7.4.1 过电流继电器	177	8.3.1 电流差动保护	232
7.4.2 多功能过电流继电器	180	8.3.2 不完全差动保护方案	233
7.4.3 IEC 曲线	181	8.3.3 比率制动差动继电器	233
7.5 低压断路器	186	8.4 高阻差动继电器	236
7.5.1 塑壳断路器	186	8.4.1 区内故障灵敏度	238
7.5.2 限流型 MCCB	186	8.4.2 微机型多功能高阻继 电器	239

8.5 低阻电流差动继电器	239	10.6 配合需要注意的基本事项	281
8.5.1 电流互感器饱和	241	10.6.1 时间-电流曲线在拐点处 的整定	283
8.5.2 与高阻继电器的比较	243	10.7 瞬时性整定配合	283
8.6 电磁式变压器差动继电器	243	10.7.1 两个串联限流熔断器的选择 性配合	284
8.6.1 谐波制动	246	10.7.2 不限流断路器下游限流熔断器 的选择性	284
8.7 微机型变压器差动继电器	246	10.7.3 串联限流装置的选择性	290
8.7.1 电流互感器接线方式和相位 补偿	247	10.8 NEC 对选择性的要求	292
8.7.2 电流互感器动态电流比 校正	249	10.8.1 具备完全选择性的系统	292
8.7.3 变压器励磁电流安全性	250	10.8.2 设备容量及跳闸装置的 选择	294
8.8 导引线保护	251	10.9 能量边界曲线	298
8.9 现代线路电流差动保护	253	10.10 妥协配合的艺术	303
8.9.1 α 平面	253	复习题	309
8.9.2 改进的电流差动特性	255	参考文献	309
8.10 利用差动继电器降低弧闪危害 示例	256	第11章 变压器保护	310
复习题	259	11.1 NEC 的相关规定	310
参考文献	259	11.2 考虑弧闪的影响	311
第9章 弧闪故障检测继电器	260	11.3 与变压器相连的其他系统部件	312
9.1 动作机理	260	11.3.1 母线负荷自动切换	316
9.2 光照强度	261	11.4 故障电流承受能力	316
9.3 光敏传感器类型	262	11.4.1 类别 I	317
9.4 其他的硬件部件	266	11.4.2 类别 II	317
9.5 选择性跳闸	267	11.4.3 类型 III 和 IV	319
9.6 电流元件的监控	268	11.4.4 变压器预期生命周期内的 故障情况	320
9.7 应用检测	270	11.4.5 干式变压器	320
9.7.1 中压系统	270	11.5 故障穿越电流曲线分析	322
9.7.2 低压断路器	270	11.5.1 考虑穿越故障电流曲线的 保护	324
9.7.3 传感器自检	270	11.6 变压器高压侧熔断器保护	324
9.8 计算算例	271	11.6.1 熔断特性的变化	324
9.9 低压系统的 ARC Vault™ 保护	272	11.6.2 断相和铁磁谐振	324
9.9.1 检测系统	274	11.6.3 熔断器保护的其他注意 事项	325
复习题	276	11.7 用于变压器高压侧保护的过电流 继电器	327
参考文献	277	11.8 产品上市要求	329
第10章 过电流保护配合	278	11.9 变压器绕组联结方式的影响	332
10.1 相关标准和技术要求	278	11.10 接地保护要求	333
10.2 保护定值配合所需要的数据	279		
10.3 微机保护定值配合	280		
10.4 初步分析	280		
10.5 时限配合	280		
10.5.1 继电器动作延时值	281		

11.11 穿越故障保护	333	12.10 应用实例	367
11.11.1 高压侧熔断器保护	333	12.11 适用于低电阻接地中压系统的 电流互感器	369
11.11.2 高压侧继电器保护	334	12.12 未来的发展方向	369
11.12 变压器整组保护	334	复习题	371
11.13 减少弧闪的实用化研究	335	参考文献	372
11.13.1 系统拓扑结构	335	第13章 耐电弧设备	373
11.13.2 整定配合研究和观察	337	13.1 耐电弧设备中的弧闪危害 计算	373
11.13.3 弧闪计算：高危害风险类别 (HRC) 等级	339	13.1.1 电弧故障的发生概率	373
11.13.4 配备低压侧主断路器减少 危害风险等级	340	13.2 IEEE 技术导则规定	374
11.13.5 低压跳闸编程器的维护模 式切换	343	13.3 规定的类型	375
11.13.6 配置低压侧继电器	346	13.3.1 类型1	375
复习题	347	13.3.2 类型2	375
参考文献	348	13.3.3 下标B	375
第12章 电流互感器	349	13.3.4 下标C	375
12.1 电流互感器精度分类	349	13.3.5 下标D	376
12.1.1 测量用电流互感器精度	349	13.4 IEC 规定的类型	376
12.1.2 保护用电流互感器精度	350	13.5 耐电弧水平	377
12.1.3 保护用X级电流互感器	351	13.5.1 持续时间水平	377
12.1.4 保护用T级电流互感器	351	13.5.2 设备可承受参数水平	377
12.2 电流互感器的结构特征	352	13.5.3 连接电缆的影响	380
12.3 二次侧额定端电压	353	13.6 基于IEEE技术导则的试验	380
12.3.1 饱和电压	353	13.6.1 原则1	381
12.3.2 饱和系数	353	13.6.2 原则2	381
12.4 电流互感器电流比及相位 误差	354	13.6.3 原则3	381
12.5 电流互感器电流比及C级 精度的相互关系	356	13.6.4 原则4	381
12.6 仪用互感器的极性	358	13.6.5 原则5	381
12.7 应用注意事项	359	13.6.6 维护要求	382
12.7.1 电流互感器电流比选择	359	13.7 压力释放	382
12.7.2 绘制电流互感器接线图	360	13.8 排气和通风系统	384
12.7.3 电流互感器的负载	360	13.8.1 排放到周围区域	384
12.7.4 短路电流及不对称性	360	13.8.2 通风系统	385
12.7.5 计算稳态性能	361	13.9 电缆接口	387
12.7.6 计算稳态误差	361	复习题	387
12.8 电流互感器的串、并联	364	参考文献	388
12.9 电流互感器的暂态性能	365	第14章 最近的趋势和创新	389
12.9.1 电流互感器饱和计算	366	14.1 弧闪危害的统计数据	389
12.9.2 剩磁效应	367	14.2 选择性区域联锁	390
		14.2.1 低压ZSI系统	391
		14.2.2 中压系统中的区域联锁	396
		14.3 微机型低压开关	398

14.3.1	微机型开关柜	398
14.3.2	考虑电动机的短路贡献 ...	399
14.3.3	电源侧故障	401
14.3.4	降低弧闪危害	402
14.4	低压电动机控制中心	402
14.4.1	期望的 MCC 设计特点	403
14.4.2	最新的设计改进	403
14.4.3	高短路电流耐受 MCC	409
14.5	维护模式开关	409
14.6	红外线窗口和观察镜	410
14.7	故障限流器	413
14.8	局部放电检测	417
14.8.1	在线式与离线式检测	418
14.8.2	故障点检查方法	418
14.8.3	电流信号分析: 旋转机械 部件	419
14.8.4	介质损耗角上升	420
	复习题	421
	参考文献	422

第 15 章 直流系统弧闪危害
计算

15.1	直流系统短路电流计算	424
15.2	直流短路电流源	425
15.3	IEC 计算过程	427
15.4	铅酸蓄电池短路	428
15.5	直流电动机和发电机短路	433
15.6	整流器的短路电流	436
15.7	电容器短路	439
15.8	总短路电流	440

15.9	直流断路器和熔断器	441
15.9.1	直流断路器	441
15.9.2	直流熔断器	443
15.10	直流系统中的电弧	443
15.11	直流系统中弧闪能量的计算 公式	448
15.12	半导体设备保护	450
15.12.1	可控变流器	451
	复习题	452
	参考文献	453

第 16 章 以太网及 IEC 61850 通信的
应用

16.1	IEC 61850 协议	455
16.2	现代化 IED	456
16.3	变电站网络结构	457
16.4	IEC 61850 通信结构	457
16.5	逻辑节点	458
16.6	以太网连接	460
16.7	网络介质	462
16.7.1	屏蔽或非屏蔽铜质双 绞线	462
16.7.2	光纤	463
16.8	通信网络拓扑	464
16.8.1	GOOSE 优先信息	466
16.8.2	技术经济性分析	466
16.9	弧闪继电器的应用及通信	466
	复习题	468
	参考文献	468

第 1 章 弧闪故障危害分析

美国工业供电系统早期设计主要遵循常规设计标准，比如 ANSI/IEEE、NEC、OSHA、UL、NESC 等，一般不考虑弧闪故障危害。但弧闪危害直接威胁着现场工程师的安全，现有的工业供电系统设计理念有了明显的转变，从供电系统设计、装备、保护等多个方面实施技术创新来限制弧闪危害。目前，已经出现了大批关于弧闪故障危害分析、计算以及治理的技术文献，比如参考文献 [1-8] 描述了弧闪现象并介绍了弧闪故障的计算方法，IEEE 1584^[9]（见第 3 章）也给出了关于弧闪危害计算方法的部分意见和建议。

弧闪故障分析及治理已经成为了供电系统规划、设计及继电保护应用中非常重要的一个方面。“注重安全性的系统设计”已经成为了目前的新研究热点（见第 2 章）。

在过去的十年中，不同形式的弧闪危害显著增加。弧闪是指电气设备中以电弧形式表现出的突发性能量汇集快速释放^[10]，包括以强光、发热、声音以及电气设备附件中铜、钢、铝等材料汽化闪爆等能量释放形式，这种弧闪导致的强声以及压力波非常像封闭空间内的爆炸形态。导体间绝缘破坏易引发弧闪故障，绝缘破坏主要是由于老化、外皮磨损、树枝摩擦等自然因素以及不合理操作等人为因素引起的。介质的绝缘性存在着分布不均匀性，在热加工过程中，还存在着绝缘薄弱点。由异物导致的绝缘下降过程中，放电将从某个薄弱点开始，经过一段时间的放大，逐步发展成变为树枝状放电路径，这也是“树枝放电”名称的来源（见图 1.1）。在树枝放电发展过程中，介质的绝缘电阻将显著降低，并最终被电压击穿发生故障。在交

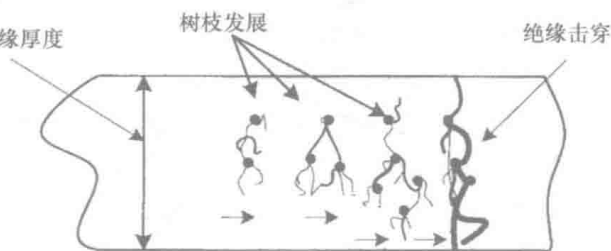


图 1.1 非自愈绝缘体中的树枝放电现象及最终导致的绝缘击穿

联聚乙烯（XLPE）介质绝缘击穿过程中树枝放电现象特别突出，其中表层破坏一般是由磨损、不光滑、污浊以及潮湿等因素造成的，比如潮湿环境下的污浊绝缘子，导致了导体与大地之间电弧的形成。尽管在线监测以及局放检测等诊断手段逐步得到了应用，但是故障以及绝缘击穿的发生具有明显的随机性，严重威胁着近距离接触带电设备的人员安全。其中，电弧温度可达到 35000°F（约 19427℃），约等于太阳表面温度的 4 倍，会引发严重的烧伤事故。

1.1 电弧描述

电弧过程特指电流击穿空气介质进行传播的过程。其诱发一般是由某些导体材料的电流闪络或传导造成的。电弧电流传播回路包括电离后的空气以及电弧末端材料的汽化物，这些汽化物的电阻较固体材质的电阻更高。根据电弧长度以及系统电压的不同，电弧两端将产生电压降。电弧电流回路本质上是阻性的，功率因数为1。在大型固体或绞合状导体上，电压降数量级约为 $0.016 \sim 0.033 \text{ V/cm}$ ，这个值比电弧电压低很多，在开放空间中单位电弧长度上电压降数量级约为 $5 \sim 10 \text{ V/cm}$ （见第3章）。对于低压电路，电弧电压占整个回路电压的主要部分。对于高压电路，在系统限制故障电流大小之前，电弧电压占整个回路电压的比例更高。电弧电压与电源电压降数值上呈正交性关系。高压系统中电弧长度更大，能够快速导通导体与大地之间的绝缘间隙。

在某些情况下，相比高压系统，低压系统中会产生更高能量的电弧故障。

对于三相金属性短路，电弧电阻为零，没有电弧产生，也不会带来弧闪故障危害。因此有时候，发生短路故障时，可以通过闭合某个开关或断路器快速导通三相，使单相接地故障转变为三相金属性短路故障，然后依靠继电保护快速动作切除故障。这种方法虽然可以避免弧闪危害，但将导致产生较大的短路电动力损害设备，因此，并不推荐应用。

1.1.1 电弧热源

电弧被认为是一种高强度的热源，在电弧的两端（金属导体端）温度很高，相关报告称可达约 20000 K （ 35000° F ）。甚至，某些特殊类型的电弧能够达到 50000 K （大约 90000° F ）。地球上唯一比此温度还高的热源是激光，可以达到 100000 K 。电弧的中间部分（等离子体部分），温度大约为 13000 K 。

对于金属性三相短路故障，没有电弧发生，产生的热量非常少。但如果故障点存在电阻，高温将足以熔化和汽化金属触点，从而产生电弧。电弧长度越长，电弧两端的电压也就越大。因此，尽量地使用低电压等级，降低电弧端电压数值，进一步减少电弧电流数值。

人体只能在非常窄的温度范围内存活，接近血液的正常温度，大约为 97.9° F 。研究表明皮肤温度上升到约 44° C （ 110° F ），人体的温度平衡将在大约6h内被破坏，导致细胞死亡；当温度达到约 70° C （ 158° F ），只需要1s，就将损坏整个人体细胞组织。

1.1.2 开关柜中的弧闪现象

开关柜中电弧的行程可以由如下四个阶段来描述清楚：

阶段 1：压缩过程。能量释放导致触点周边空气加热，通过对流和辐射加热开关柜中剩余的空气。

阶段 2：膨胀过程。开关柜中某一部分可能会由于加热的空气膨胀而被吹开形成一个热空气逃逸的缺口。在此过程中，热空气导致的压力达到最大值，随后产生热空气逃逸的缺口，并随着热空气的逃逸而压力降低，电弧产生。

阶段 3：喷射过程。电弧持续发展，并随着热空气以基本固定的过压力强制喷射而出。

阶段 4：热过程。空气释放之后，开关中的温度接近电弧温度，并将一直持续到电弧熄灭。金属及绝缘材料将经历腐蚀并可能熔化，膨胀数倍，并会伴随产生有毒气体以及金属溶液进射等。

图 1.2 给出了上述的四个阶段。

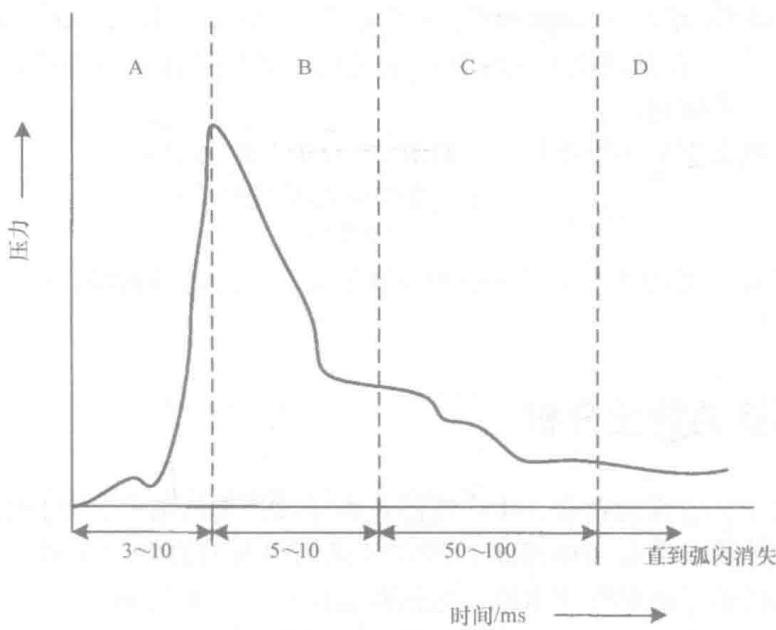


图 1.2 开关柜中弧闪形成的压力及释放过程

A—压缩过程，压力上升 B—膨胀过程，压力释放

C—喷射过程，气体耗尽 D—热过程，压力不变（具体数值不考虑）

1.2 弧闪危害与人身安全

自从 1879 年，托马斯·爱迪生发现了白炽灯照明原理之后，弧闪现象在电力和电子工业中时常出现，已经导致了多人伤亡。尽管有关电力安全的相关案例可追溯到 1888 年，但是直到 1982 年 Ralph Lee^[11]才首次利用短路电流解释了弧闪与人体烧伤的关联关系，量化给出了弧闪的潜在灼伤危害。这篇文章被认为是开放空间

弧闪危害分析的先驱之作，其给出的可治愈的人体灼伤门槛值 $1.2\text{cal}^{\ominus}/\text{cm}^2$ ，直到现在还用于定义弧闪危害性边界。Lee 在 1987 年发表了第二篇文章“Pressure Developed from Arcs”^[12]。

之后，重要的相关文献还有 Douguty 等人发表的两篇论文^[13,14]，以及 Jones 等人在 2000 年发表的文章^[15]。IEEE 1584 技术标准被认为在弧闪故障分析上有明显的技术突破。之前在 NEPA 70E 中采用的技术基本上是基于理论分析或者来自有限的现场测试数据。而目前的最新技术研究主要基于实际现场中不同设备元件的弧闪或者开关柜中电弧等典型故障。然而也有部分研究人员质疑 IEEE 1584 标准中相关理论的有效性，比如 Stokes 和 Sweeting 在“Electrical Arc Burn Hazards”^[5]中质疑 Lee 的模型以及 IEEE 1584 标准中有关电弧燃烧的方程以及测试方案。

但是，来自现场的弧闪事故防范统计数据表明，根据 IEEE 1584 标准计算得到的参数，设计制造个人防护装备（PPE）完全可以避免电弧的伤害，具体参见第 3 章。此外，Wilkins 等人在 2008 年发表了文章“Effect of Insulating Barriers in Arc Flash Testing”^[16]，在其测试中绝缘杆终端采用了竖状导体。具体的详细及讨论将在第 3 章中进一步探讨。

可记录的伤害事故年度指标——TRIR 的 OSHA 定义如下：

$$\text{TRIR} = \frac{\text{可治愈的烧伤和事故的总数}}{200000\text{h}} \tag{1.1}$$

大多数保险公司认可上述指标中的参数定义，因为这些被统计的事故都会产生相关的治疗费用。

1.3 时间运动特性分析

对于连续工艺过程的企业，生产线停止将导致严重的损失、较长的停工期以及重启过程。因此设备需要带电维护，潜在的弧闪事故对现场工人的安全产生了威胁。已有文献报道了多起伤害事故，包括致命性烧伤。如果都能在失电状态下进行设备维护，将不会发生短路，也就不会产生弧闪危险。

时间/运动特性研究表明，人类在感知、判断以及远离危险的反应时间因人而异。典型时间大约为 0.4s。也就是说，当某个人发现危险并开始移动离开的最短时间大约要 24 个工频周期。本书后续分析将证明，0.4s 的反应时间对于现场工程师躲避危险而言太长了，无法有效地防护危害。

1.4 弧闪危害

除了热烧伤之外，电弧现象还可能造成如下危害：

[⊖] 1cal = 4.1868J，后同。