

清华大学学术专著

Lightning Protection of Power Distribution Line

配电线路雷电防护

何金良 曾嵘 著

HE Jinliang ZENG Rong



清华大学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

清华大学学术专著

Lightning Protection of Power Distribution Line

配电线路雷电防护

何金良 曾嵘 著

HE Jinliang ZENG Rong



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在多年研究的基础上撰写的,内容包括:雷电参数、配电系统的雷电过电压、雷电感应过电压数值计算方法,配电线路雷电感应过电压的特征;从改善配电线路的雷电耐受绝缘特性、安装配电线路的导弧及熄弧装置、配电线路架空地线及避雷器、改善接地性能等方面改善配电线路的防雷性能;由 10kV 配电线路侵入建筑物内 220V 电源线的感应过电压及防护措施等。

本书可作为电力行业和其他相关行业的工程技术和设计人员的专业培训教材及工程参考用书,也可作为本科生“电力系统过电压”课程的补充教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

配电线路雷电防护/何金良,曾嵘 著.--北京:清华大学出版社,2013

(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-32689-2

I. 配… II. ①何… ②曾… III. ①配电线路—雷电过电压—过电压保护
IV. ①TM863

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 125862 号

责任编辑:黎 强

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:29.75 字 数:499 千字

版 次:2013 年 9 月第 1 版 印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价:135.00 元

产品编号:043523-01



作者简介



何金良 男, 1966年出生于湖南长沙。清华大学电机工程与应用电子技术系高电压与绝缘技术研究所所长、教授、博士生导师。美国电气电子工程师学会会士(IEEE Fellow)、英国工程技术学会会士(IET Fellow)。现为全国雷电防护标委会主任, 中国电机工程学会输电线路专委会副主任、电磁干扰专委会变电站电磁环境学组副主任、高压专委会过电压与绝缘配合学组副主任, 北京市电机工程学会高压专委会主任, 中国避雷器标委会委员, 中国气象学会雷电防护研究会常委; 国际电工委员会(IEC) TC81中国代表及6个工作组委员; IEEE电磁兼容学会SETcom委员会秘书长, IEEE磁学会会士提名委员会委员及北京分会主席, IEEE会士委员会的技术委员会委员; 国际大电网会议(CIGRE) 3个雷电防护工作组委员, WGC4.26工作组“超特高压交流和直流输电线路雷电绕击分析方法评估”召集人; 国际雷电防护会议(国际组织)科学委员会委员, 亚太雷电国际会议(国际组织)副主席。担任《雷电防护与标准化》主编, Journal of Lightning Research副主编, 以及IEEE Transactions on Power Delivery、Electric Power Systems Research、《高电压技术》等刊物编委。2009年作为大会联合主席主办亚洲防雷论坛; 作为大会主席, 主办2010年亚太电磁兼容国际会议和2011年亚太雷电国际会议; 将作为大会主席主办2014年雷电防护国际会议(ICLP2014)。

1988年毕业于武汉水利电力学院; 1991年获重庆大学硕士学位; 1994年获清华大学博士学位, 后留校任教。2001年晋升为教授, 2004年获得国家杰出青年科学基金, 2010年受聘为教育部长江学者特聘教授。2013年作为首席科学家, 获批国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“大容量直流电缆输电和管道输电关键基础研究”。

长期从事先进电能传输技术、雷电防护及电介质材料等领域的研究。研究成果获国家技术发明二等奖1项、省部级科技进步奖13项。2010年被IEEE电磁兼容学会授予技术成就奖；2012年被亚太电磁兼容国际会议（国际组织）授予亚太电磁兼容国际会议奖；2013年被日本电气设备学会（IEIEJ）授予第6届星野奖。

已发表学术论文400余篇，其中SCI收录150余篇；出版中英文著作6部，包括John Wiley & Sons和IEEE联合出版的英文专著《Methodology and Technology for Power System Grounding》。负责起草4项国家防雷标准，参与起草4项国际电工委员会（IEC）国际防雷标准。





作者简介

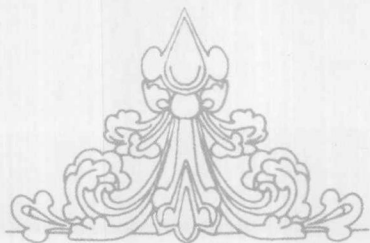


曾 焱 男，1971年出生于陕西旬阳。清华大学电机工程与应用电子技术系教授、博士生导师，电力系统国家重点实验室副主任。英国工程技术学会会士（IET Fellow），国际大电网会议（CIGRE）SC C3委员、WG C4.26秘书长，IEC TC 22 / WG 16委员，全国高压直流输电设备标准化技术委员会委员，中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会委员、电磁干扰专委会变电站电磁环境学组副主任委员、高压专委会高压测试技术及设备学组副主任委员，特高压工程技术（昆明）国家工程实验室技术委员会委员，高压电气国家工程实验室技术委员会委员。担任《高电压技术》编委会委员，负责并参与电力系统接地、雷电防护等多项国家标准的制定。

1995年毕业于清华大学电机工程与应用电子技术系；1999年获得博士学位并留校任教；2005年入选教育部“新世纪优秀人才计划”，2013年获得国家杰出青年科学基金。

长期从事交直流输电中的电磁暂态过程分析、长空气间隙放电机理及雷电防护、电力系统电磁环境与电磁兼容、光电集成瞬态电场测量、配电系统自动化及其管理系统等教学和研究工作。先后主持和参加国家自然科学基金重点项目、国家重大基础研究计划（“973”计划）项目、国家高技术计划（“863”计划）项目、国家“十一五”科技支撑计划项目、直流输电国产化与特高压输电项目等几十项科研课题的研究工作。

获北京青年科技奖1项，省部级科技成果一等奖1项、二等奖5项、三等奖多项。已发表学术论文300余篇，其中SCI收录80余篇；合作出版学术专著2部。



序

众所周知,配电网是供电企业连接用户的纽带,在整个供电系统中起着至关重要的作用。但是,配电网结构复杂,配电线路分布广,线路走廊地理条件错综复杂,与众多电力线路、通信线路纵横交叉跨越。随着我国城镇化建设的迅速发展,城镇辖区的配电线路走廊占地也越来越紧张。日益严重的空气污染、复杂的气候环境和雷电活动等对配电线路安全运行构成了很大威胁,城镇化建设又要求配电线路走廊尽可能少占用日益昂贵的土地。为了提高配电线路的安全可靠性和减少线路走廊占地,我国在城镇化建设过程中正在逐渐将10kV配电线路由传统的架空裸导线改造为架空绝缘导线。雷电是威胁配电线路,特别是绝缘导线配电线路安全可靠性的重要因素。何金良教授和曾嵘教授合著的《配电线路雷电防护》就是针对上述问题编写的,是一部可以指导10kV配电输电线路雷电防护设计、改造、运行的重要著作。

本书作者何金良教授长期从事电力系统雷电防护、接地技术和电磁环境技术等领域的研究,严谨治学,潜心基础理论研究,并注重理论联系实际,是雷电防护及接地技术领域著名的国际专家之一,2007年因其在电能传输系统的雷电防护及接地领域的突出成就而被评为IEEE会士。本书的共同作者曾嵘教授也是本领域的著名青年学者。本书是作者及其研究团队长期研究成果的总结,作者在本书中总结了与电力行业合作开展绝缘导线配电线路雷击断线机理及防护技术、紧凑化布置技术和断线机理及防护技术等方面的研究工作,从工程实际出发,着重阐明了配电线路,特别是绝缘导线配电线路雷电防护的基本概念、原理和设计、计算及分析方法,同时全面反映了国内外在10kV配电输电线路雷电防护领域的最新研究成果,是国内外第一本全面系统阐述配电线路雷电防护的理论及关键技术的重要文献,

具有重要的学术价值和工程应用意义。相信本书的出版将推动我国配电系统的建设,提高绝缘导线配电线路的雷电防护能力,推动配电线路雷电防护技术的创新与提升。

中国工程院院士,重庆大学电气工程学院教授



2011年5月

前 言

信息化社会对电力供应可靠性的要求不断提高。传统的裸导线配电线路在城市电网中已不合适。风吹、结冰脱落、积雪或是鸟类干扰都可能导致导线摆动或碰撞,引起相间或对地短路;裸导线配电线路与城市绿化的树木之间矛盾突出,在大风和暴雨中,倒落的树木也会引起导线损坏或引发短路事故。从空间角度看,采用裸导线的配电系统要求有大的相间距离和宽阔的走廊,这在目前我国城市用地日益紧张的趋势下其发展将受到制约。相比之下,配电线路绝缘化具有明显的优点。一是供电的可靠性和安全性大幅度提高。配电网采用绝缘导线可大大减少因碰线或接地引起的短路故障,绝缘层的存在使得导线断线落地后的安全性得到保证。二是缩短相间距离,减少占用空间,这可带来两方面的直接效益,即缓解用地紧张的局面和降低线路投资。三是与电力电缆线路比较,能够降低线路建设或改造投资,避免道路开挖,施工简单和建设周期短。如采用紧凑型架设方式,则这一优越性更为明显。可见绝缘导线确实解决了裸导线所不能解决的走廊和安全问题。目前,我国很多城市正逐渐将 10kV 架空裸导线配电线路改造成架空绝缘导线配电线路。

雷电极易导致配电网的闪络甚至断线,造成供电网络的破坏,这将直接影响配电网供电的可靠性。在配电线路愈来愈多地采用绝缘导线的趋势下,断线作为绝缘导线的固有问题将成为电力可靠供应的巨大隐患。一旦断线,将引起长时间的供电中断。另一方面,断了的导线可能带电,容易引起人员触电或燃烧事故。这种断线及燃烧事故会严重影响配电系统的安全运行,给国民经济和人民生活带来不便,甚至导致巨大的经济损失。因此,目前迫切需要开展绝缘导线的断线机理及其防护技术的研究。

1998 年以来,清华大学先后与北京供电局、山东电力集团公司、中国电力科学研究院、广州供电公司等合作,开展了配电线路的雷电感应过电压数值计算方法、绝缘导线配电线路的雷击断线机理及防护技术、绝缘导线配电线路紧凑化布置技术及污闪断线机理及防护技术等方面的研究工作。这些

研究工作得到了北京供电局王以京、陈光华,淄博供电局咸日常,山东电力集团公司孙为民,国家电网公司陈维江等先生的帮助。清华大学的吴维韩教授、高玉明教授、陈水明教授,研究生王顺超、王希、王绍安、傅芳伟、刘荣等的研究作为本书的编写提供了很好的素材,吴维韩教授还提出了很多修改意见;中国电力科学院的杜澍春先生提供了一些技术资料。重庆大学电气工程学院的孙才新院士早在2011年就审阅了全书初稿,提出了许多改进意见,并为本书欣然作序。在编写过程中,我们不仅参阅了国内外众多同行的研究成果,包括北京供电局陈光华编写的《中压架空绝缘线路防雷问题》及中国电力科学研究院的研究报告,还尽可能论述了架空配电线路雷电防护的最新研究进展。我们谨对上述合作机构和提供帮助的各位学者、研究生,对研究报告的撰写者和参考文献作者一并表示衷心的感谢!这些文献的查证难免有疏漏,敬请谅解。

本书内容划分为10章,第1章介绍相关的雷电参数;第2章计算架空配电线路的雷电过电压;第3章论述架空配电线路的雷电感应过电压计算方法;第4章说明架空配电线路的雷电过电压特性;第5章介绍配电线路雷击故障与防护措施;第6章讨论配电线路的雷电耐受绝缘特性;第7章阐明配电线路的导弧及熄弧装置;第8章分析配电线路的架空地线及避雷器保护;第9章介绍配电线路杆塔接地;第10章讨论建筑物内220V电源线感应过电压及防护。全书由何金良统筹并主持,由何金良和曾嵘共同编写完成。

我们希望本书尽可能全面反映配电线路雷电防护领域的研究成果,但由于我们的水平有限,文字表达能力又有欠缺,书中的论述难免挂一漏万,诚望各位读者悉心提出宝贵的建议和批评,并将这些意见及时告知我们。

作 者

2013年1月

目 录

第 1 章 雷电特性及参数	1
1.1 雷电科学发展历史	1
1.1.1 中国古代对雷电的认识.....	1
1.1.2 欧美雷电科学的建立.....	2
1.2 雷电放电现象	2
1.2.1 雷电放电过程.....	2
1.2.2 雷电分类.....	9
1.2.3 多重雷电放电	12
1.2.4 雷击选择性及雷击定位	13
1.3 雷电放电模型.....	14
1.3.1 雷电放电过程模型	14
1.3.2 雷电放电的等值电路模型	14
1.4 雷电参数.....	17
1.4.1 雷电参数研究手段	17
1.4.2 雷电日和雷电小时	20
1.4.3 地面落雷密度	22
1.4.4 雷电流的幅值、波头、波长和陡度	25
1.4.5 雷电流的波形	29
1.5 雷电主放电电流模型.....	35
1.5.1 雷电主放电模型	35
1.5.2 MTL 模型	36
1.5.3 MULS 模型	37
1.5.4 MTL 模型与 MULS 模型比较	38
1.6 雷电放电产生的电磁场	38
1.6.1 雷电放电的电磁场	38
1.6.2 雷电电磁场计算	39

1.7 雷电先导简化模型	42
参考文献	44
第2章 雷击架空配电线路的途径及分析方法	48
2.1 雷电导致配电线路闪络的途径	48
2.2 雷电直击配电线路	51
2.2.1 杆塔高度对雷电直击线路的影响	51
2.2.2 周围建筑物和树对直击雷的屏蔽	51
2.2.3 直击雷作用下的耐雷水平	53
2.3 雷电绕击配电线路的分析	54
2.3.1 电气几何模型	55
2.3.2 改进几何模型	57
2.3.3 雷击配电线路的先导发展模型	58
2.4 雷电感应过电压形成机理	63
2.4.1 雷电感应过电压机理的发展过程	63
2.4.2 雷电感应过电压的静电感应和电磁感应分量	64
2.5 感应过电压的简化计算	66
2.5.1 感应过电压的简化计算	66
2.5.2 感应过电压的系数	69
2.5.3 IEEE 推荐的配电线路感应电压计算方法	70
参考文献	72
第3章 雷电感应过电压的数值计算	75
3.1 感应过电压的计算模型	75
3.1.1 雷电电磁场对传输线耦合的计算模型	75
3.1.2 场线耦合的 Taylor 方法	76
3.1.3 Agrawal 方法	81
3.1.4 Rachidi 方法	82
3.1.5 Rusck 模型	83
3.1.6 Chowdhuri-Gross 模型	84
3.2 理想导体平面上单根导体传输线	85
3.3 有限导电地面上的传输线电磁耦合方程	86
3.4 基于时域有限差分法的配电线路感应过电压的数值计算	90

3.4.1	时域有限差分法基本原理	90
3.4.2	平行多导线时域方程的 FDTD 算法	92
3.4.3	含频变参数多导体传输线的 FDTD 算法	93
3.5	有损土壤阻抗的时域处理	97
3.5.1	复深度法的土壤运算阻抗	97
3.5.2	Pade 逼近	98
3.5.3	土壤阻抗的时域表示	99
3.5.4	考虑有损土壤时的 FDTD 迭代公式	100
3.6	集中元件支路模型	101
3.6.1	绝缘子支路的时域有限差分计算	101
3.6.2	亚网格技术	103
3.6.3	非线性元件支路的时域有限差分计算	105
3.6.4	柱上变压器的 FDTD 解决方案	105
3.7	模拟试验及计算结果的验证	107
3.7.1	雷电感应过电压缩比模型实验	108
3.7.2	雷电感应过电压真型实验	109
3.7.3	计算结果的验证	116
3.7.4	各种感应过电压模型计算结果的比较	118
	参考文献	120
第 4 章	架空配电线路的雷电过电压特性	125
4.1	导线表面电晕对感应过电压的影响	125
4.2	大地电导率对感应过电压的影响	129
4.2.1	大地电导率对单根无限长导线感应过电压的影响	129
4.2.2	大地电导率对有限长导线感应过电压的影响	130
4.2.3	大地电导率对沿线感应过电压分布的影响	133
4.3	雷击点与配电线路的距离对感应过电压的影响	135
4.3.1	雷电点与配电线路的距离对感应过电压的影响	135
4.3.2	感应过电压波形特征	137
4.3.3	不同雷击点产生的最大感应过电压幅值分布	138
4.3.4	不同雷击点位置产生的最大感应过电压幅值 及概率	139
4.4	雷电流波形参数对感应过电压的影响	142

4.4.1	雷电流回波速度的影响	142
4.4.2	雷电流波前时间的影响	142
4.4.3	雷电流幅值的影响	145
4.5	杆塔结构参数对感应过电压的影响	147
4.5.1	杆塔高度对感应过电压的影响	147
4.5.2	单导线和多导线模型对感应过电压的影响	148
4.5.3	配电线路长度对感应过电压的影响	149
4.5.4	配电线路相对于雷击点的方位对感应过电压的影响	151
4.6	10kV 配电线路的雷击感应闪络率	151
4.6.1	产生一定感应过电压的临界雷电流	151
4.6.2	产生某一感应过电压的雷电流概率分布	153
4.6.3	感应过电压出现的概率	155
4.6.4	基于统计方法得到的感应过电压出现的概率	158
4.6.5	雷电感应过电压导致的闪络概率	160
4.6.6	基于统计方法得到的雷击闪络概率	163
	参考文献	164
第 5 章	配电线路雷击故障与防护措施	167
5.1	配电导线的绝缘化	167
5.2	绝缘导线配电线路雷击断线事故及机理	169
5.2.1	绝缘导线配电线路雷击断线事故	169
5.2.2	配电线路雷击断线机理	171
5.3	单相断线时的电弧电流	176
5.4	配电线路雷击断线的防护	179
5.4.1	配电线路雷击断线防护措施分类	179
5.4.2	各种防护方案的性能比较	180
	参考文献	182
第 6 章	改善配电线路的雷电耐受绝缘特性	184
6.1	配电线路的绝缘特性	184
6.1.1	影响配电线路绝缘特性的因素	184
6.1.2	组合串联绝缘的临界冲击闪络电压	184

6.1.3	配电线路部件对整体绝缘性能的影响	187
6.1.4	木杆的冲击特性	189
6.2	绝缘导线配电线路的绝缘特性	190
6.2.1	绝缘层缺陷对污闪特性的影响	190
6.2.2	绝缘导线配电线路的雷电过电压水平	192
6.2.3	绝缘导线的电弧熔断特性	195
6.2.4	树枝搭接对绝缘导线的影响	195
6.3	改进配电线路的绝缘性能	197
6.3.1	绝缘导线的改进	197
6.3.2	局部加强绝缘	199
6.3.3	提高线路绝缘强度	201
6.4	改进绝缘子性能	202
6.4.1	瓷绝缘子设计应考虑的因素	202
6.4.2	不同瓷绝缘子的性能比较	204
6.4.3	复合支柱绝缘子	207
6.5	绝缘横担及绝缘杆塔	209
6.5.1	复合横担绝缘子	210
6.5.2	绝缘杆塔材料	212
6.5.3	绝缘塔头及绝缘杆塔	214
6.6	分级绝缘系统	217
6.6.1	概述	217
6.6.2	雷电防护效果	219
6.7	高绝缘性能的绝缘支架	221
6.7.1	三角形绝缘支架支撑的紧凑型布置配电线路	221
6.7.2	复合绝缘支架的优点	223
6.7.3	复合绝缘支架的相间距离及布置间距	223
6.7.4	复合绝缘支架结构设计	226
6.7.5	复合绝缘支架支撑的配电线路的防雷性能	228
	参考文献	231
	第7章 配电线路的导弧及熄弧装置	235
7.1	导弧绝缘子	235
7.1.1	导弧瓷绝缘子	235

7.1.2	导弧复合绝缘子	237
7.1.3	带穿刺结构的导弧绝缘子	240
7.1.4	配电线路的引弧角	240
7.2	防导线熔断装置及线夹	242
7.2.1	防导线熔断装置	242
7.2.2	防导线熔断线夹	243
7.2.3	防导线熔断装置的耐电弧性能	245
7.3	穿刺型导弧金具	245
7.3.1	概述	245
7.3.2	穿刺型导弧金具的技术性能	250
7.4	导弧绝缘子及导弧金具的导弧能力	251
7.4.1	导弧能力的分析	251
7.4.2	导弧绝缘子的导弧能力	253
7.4.3	穿刺型导弧金具的导弧能力	258
7.5	长闪络路径熄弧装置	260
7.5.1	熄弧装置的工作原理	260
7.5.2	熄弧装置的试验结果	261
7.5.3	关于建弧率的分析	266
7.5.4	长闪络路径熄弧装置的应用	268
7.5.5	具有半导体芯的长闪络路径熄弧装置	269
7.5.6	多腔串联熄弧装置	271
	参考文献	274
第8章	配电线路的架空地线及避雷器保护	276
8.1	配电线路的架空地线保护	276
8.1.1	架空地线的屏蔽作用	277
8.1.2	保护角	278
8.1.3	绝缘要求	279
8.1.4	接地效应和绝缘水平	279
8.1.5	架空地线和避雷器	280
8.2	配电线路的避雷器保护	281
8.2.1	概述	281
8.2.2	配电避雷器主要结构	282

8.2.3	日本配电线路避雷器技术的发展·····	284
8.3	带串联放电间隙的避雷器·····	287
8.3.1	带串联放电间隙避雷器的结构及动作原理·····	287
8.3.2	限压元件的性能·····	289
8.3.3	带环形放电间隙避雷器的特性·····	300
8.3.4	带环形放电间隙避雷器的设计与性能·····	303
8.3.5	中国开发的10kV带环形串联间隙的避雷器·····	314
8.3.6	带穿刺型放电间隙的避雷器·····	316
8.3.7	10kV带外间隙的内置避雷器的柱式绝缘子·····	319
8.4	配电线路避雷器的应用效果分析·····	321
8.4.1	感应过电压波形特性·····	321
8.4.2	安装避雷器后的感应过电压概率和闪络特性·····	325
8.5	避雷器安装中应考虑的问题·····	328
8.5.1	避雷器引线长度·····	328
8.5.2	配电避雷器的安装密度·····	328
8.5.3	避雷器的安装间距·····	330
8.5.4	顶相避雷器保护·····	332
8.5.5	避雷器耐受雷电直击线路的能力·····	333
8.6	配电线路避雷器的实际应用·····	333
8.6.1	配电避雷器的作用·····	333
8.6.2	避雷器的保护效果·····	334
8.6.3	同时安装避雷器和架空地线的防雷效果·····	335
8.6.4	架空地线对避雷器故障率的影响·····	338
8.7	新型配电线路设计·····	339
8.7.1	基本原理·····	340
8.7.2	新线路概念的实用设计·····	341
	参考文献·····	342
第9章 配电线路杆塔接地 ·····		346
9.1	对配电线路杆塔接地装置的要求·····	346
9.1.1	概述·····	346
9.1.2	杆塔接地装置接地电阻的季节系数·····	348
9.2	配电线路杆塔接地装置的结构·····	349