

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 雷电防护技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 雷电防护技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂,长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响,雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生,对电网的安全运行造成很大的危害。为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求,总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验,结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例,组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》,共分为四册,分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

本分册为《输电线路雷电防护技术》,主要包括雷电与雷电参数、输电线路雷击闪络与耐雷性能分析、国内外雷电防护技术现状、输电线路雷电防护措施、输电线路防雷实用技术案例。

本书可为输电线路科研、设计、运行维护提供技术参考,也可作为相关人员技术培训教材和大专院校教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路雷电防护技术 / 万启发主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.12

(特殊环境条件下输电线路实用技术丛书)

ISBN 978-7-5123-9990-7

I. ①输… II. ①万… III. ①输电线路—防雷 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 265034 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.25 印张 206 千字

印数 0001—1000 册 定价 118.00 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

《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》

编委会

主 编	万启发				
编 委	张国威	杜忠东	吕 军	赵永生	
	张 勤	律方成	蒋兴良	王黎明	
	周文俊	陆佳政	蔡 炜	王保山	
	王力农	陈家宏	陈 勇	刘云鹏	
	彭旭东	徐 涛	张广洲	余 波	
	宋金根	王建华	谷山强		

本 册 编 写 组

组 长	陈家宏	王保山			
组 员	谷山强	赵 淳	戴 敏	葛 栋	
	谭 进	冯万兴	万 帅	万 克	
	吴 彪	方玉河	王海涛	童雪芳	
	雷晓燕	李晓岚	楼 平	吕 军	

序

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂，长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响，雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生，对电网的安全运行造成很大的危害。我国电力科研、设计及运行单位对成灾机理及灾害防治进行了大量的研究工作，对维护线路安全运行起到良好作用。由于这些线路灾害难以根治，特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾是我国输电线路的重点工作之一。

为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求，总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验，结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例，组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》，共分为四册，分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

《输电线路雷电防护技术》主要包括雷电与雷电参数、输电线路雷电闪络与耐雷性能分析、输电线路雷电防护技术现状、特高压输电系统雷电特性、输电线路雷电防护措施、接地网的测量与防腐改造和雷电防护应用案例，并总结了国内外输电线路雷电防护理论研究成果及雷电防护方法。

《输电线路绝缘子防污闪技术》主要包括污闪的形成及危害、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施和防污闪治理及应用实例，并总结了国内外绝缘子污闪及防治研究进展及绝缘子防污闪方法。

《输电线路冰灾防治技术》主要包括输电线路覆冰危害、覆冰形成机理、覆冰监测、除冰/防冰技术措施、绝缘子覆冰试验及防冰闪措施、覆冰地区输电线路设计等，并总结了国内外输电线路覆冰理论研究成果及冰害防治方法。

《输电线路舞动防治技术》主要包括输电线路舞动及危害、输电线路舞动机理、输电线路舞动仿真与试验、输电线路舞动监测及分布图划分、输电线路防

舞装置、输电线路防舞设计与改造以及输电线路舞动灾害治理实例，并总结了国内外输电线路舞动机理与防治的研究进展及工程治理方法。

希望本套丛书的出版可以为相关领域专家学者、科研人员及大专院校师生提供有益的参考与帮助。

石序发

前言

近年来,随着电网的快速发展和强对流天气的增多,因雷击而引起的输电线路跳闸和变电设备损坏的事件频繁发生,对电网的安全稳定运行构成了极大的威胁。其中,变电站的雷击风险因为安装了有效的感应过电压和直击雷防护装置而大大降低;但输电线路绵延几百甚至上千千米,不同区段的雷电分布、地形及杆塔结构等都存在较大差异,这使得全线防雷性能参差不齐,往往存在明显的防雷薄弱点,因此雷击输电线路引起的跳闸是电网故障的主要来源。近年来,雷击造成线路两相闪络、同塔双回线路同时闪络、同一输电通道多回线路相继跳闸等严重故障明显增加。因此,有针对性地开展架空输电线路防雷设计、建设、运维、改造工作对保障电网安全稳定运行意义重大。为了满足广大电力行业专业人员对电网防雷技术知识的迫切需求,本书对我国电网企业多年来所开展的防雷工作进行了全面总结,其内容既重视应用理论,又强调工程实践,是一本直接面向输电线路专业技术人员的参考书。

全书共分为五章,第一章介绍雷电与雷电参数,主要介绍雷电放电的基本过程,以及工程应用所关心的雷电参数;第二章是输电线路雷击闪络与耐雷性能分析,重点介绍了输电线路雷击过程以及由此引发的雷击闪络,阐述了输电线路耐雷性能分析方法,并结合我国发展特高压电网的实际,对交直流特高压输电系统雷电特性进行了总结;第三章主要介绍国内外雷电防护技术现状,主要从运行经验及规程、防雷性能评估方法和防雷措施设计原则三方面对国内外雷电防护技术现状进行了归纳总结;第四章介绍了输电线路雷电防护措施,对各类常用输电线路防雷措施的基本原理、国内外研究现状和使用注意事项进行

了阐述；第五章介绍了输电线路防雷实用技术案例，它们是我国近年来开展的输电线路防雷工作的具体展示。

输电线路一直是国内外电力系统防雷的重点关注对象。目前依托国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司运行的国家电网公司雷电监测与防护实验室和由国家电网公司 2010 年命名的首批科技攻关团队之一的电网雷击特性与预警技术科技攻关团队，长期围绕电力系统输电线路防雷开展了大量的科学研究和工程应用工作，逐步形成了以雷电监测技术和输电线路差异化防雷技术为手段、面向输电工程设计与运维的防雷工程实用化技术，该技术在我国电网获得了广泛应用。

本书在编写过程中得到了国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司的大力支持，在此深表感谢。

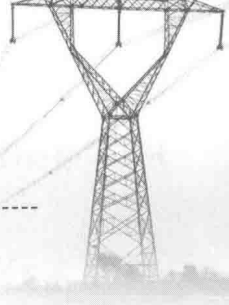
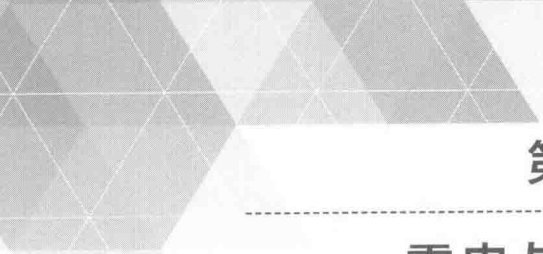
由于时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序 前言

第一章 雷电与雷电参数	1
第一节 雷电	1
第二节 雷电参数	5
第三节 雷电监测与参数统计	8
第二章 输电线路雷击闪络与耐雷性能分析	34
第一节 输电线路雷击闪络	34
第二节 特高压直流输电系统雷电特性	49
第三节 输电线路耐雷性能分析	54
第三章 国内外雷电防护技术现状	78
第一节 国外雷电防护技术现状	78
第二节 我国雷电防护技术现状	90
第三节 输电线路雷击风险差异化评估技术	96
第四章 输电线路雷电防护措施	102
第一节 一般防雷措施	102
第二节 避雷器	111
第三节 并联间隙	141
第四节 杆塔接地	148
第五章 输电线路防雷实用技术案例	166
第一节 220kV 蝶漠线防雷改造实例	166
第二节 500kV 三江一回雷击故障复现分析实例	172
第三节 特高压交流架空输电线路防雷保护实例	177
参考文献	181



第一章

雷电与雷电参数

雷电是大气中发生的剧烈放电现象。这一现象自古以来就为人们所关注，然而关于雷电的大部分科学知识是从 20 世纪以来所获得的。

电、磁、光、声测量技术的不断发展，卫星、雷达等探测手段不断被用于雷电观测，以及人工引雷试验的持续深入开展，都在丰富人们对于雷电物理过程的科学认识。特别是基于雷电电磁场探测的雷电定位系统和雷电流测量装置的发展，实现了对雷电放电参数的有效捕捉，对雷电规律的认识和相应的有针对性的雷电防护措施的提出具有重要意义。

本章首先介绍雷电放电的基本过程，以及工程应用上的雷电参数，然后介绍我国电网雷电定位系统及雷电流测量装置，最后在此基础上论述了基于雷电监测数据的雷电参数统计方法，并介绍了雷区分布图的绘制方法。

第一节 雷 电

一、雷电形成过程

雷电一般起始于对流发展旺盛的雷雨云中。雷雨云是电荷的载体，1974 年美国 William P. Winn 等人的探空结果表明，当雷雨云中局部电场场强超过一定限值时，就可能发生雷电放电。雷雨云的带电原因有几十种，但每一种理论都不能完全地解释所有的实际观测结果。比较典型的理论是假设以降水为基础的感应起电机制和非感应起电机制以及与降水无直接关系的对流起电机制。感应起电理论认为，在晴天大气电场下，电场方向自上而下，在垂直电场中下落的降水粒子被电场极化后，上部带负电荷，下部带正电荷。云中的小冰粒或小水滴在与这些较大的降水粒子相碰撞后，就获得了正电荷，然后会随着上升气流向上运动，从而发生电荷的转移过程，使得小冰粒或小水滴带正电荷、降水粒子带负电荷。图 1-1 给出了小水滴或小冰粒与极化的降水

粒子碰撞获得电荷的过程示意图。

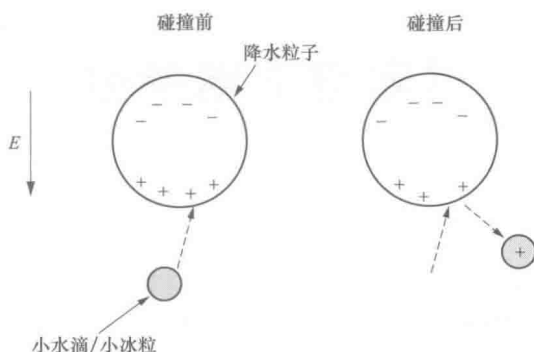


图 1-1 小水滴或小冰粒与极化的降水粒子碰撞获得电荷的过程示意图

带负电荷的较大的降水粒子由于具有较大的重量而下降，并加强了原来的电场。大、小粒子之间电荷交换的数量随电场的增强而增加，直至电场增强到水滴所携带最大电荷的极限值，或是重力被电场力所抵消，才使大颗粒停止下降。这样，就形成了雷雨云内部的主正电荷区和主负电荷区。同时，雷雨云下部因为有大量带负电荷的大雨滴或者大冰粒的存在而呈现负极性，它会在地面上感应出大量的正电荷，从而使大地呈现正极性。这样，在带有不同极性和不同数量电荷的雷雨云之间，或雷雨云与大地物体之间就形成了强大的电场，如图 1-2 所示。随着雷雨云的运动和发展，一旦空间电场强度超过大气游离放电的临界电场强度，就可能在雷雨云内部或者雷雨云与大地之间发生放电现象，此时的放电电流可达几十千安到数百千安，伴随着强大的电流会产生强烈的发光和发热，空气受热急速膨胀会产生轰隆声，这就是雷电的产生过程。

通常情况下，一半以上的雷电放电过程都发生在雷雨云内的主正、负电荷区之间，称为云内放电过程，云内放电与发生概率相对较低的云间闪电和云-空气放电一起被称为云闪；其余发生于云体内电荷中心与大地或地面物体之间的放电被称为云地闪电或地闪。对地面物体来说，由雷电造成的危害多数是地闪引起的，因此，对各个行业的雷电防护工程研究人员来说，了解并掌握地闪放电的过程和规律是十分重要的。

地闪放电通道发展的实际拍摄照片如图 1-3 所示。地闪的放电通道暴露于云体之外，易于光学观测。因此，目前对地闪放电过程已经有了相对较系统的研究。

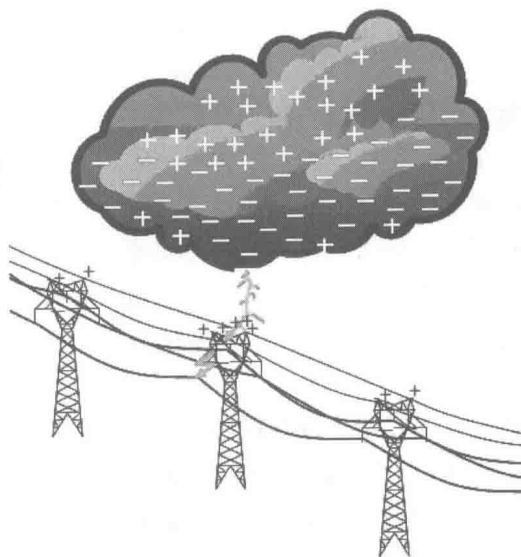


图 1-2 雷雨云内部和雷雨云与地面物体电场分布示意图

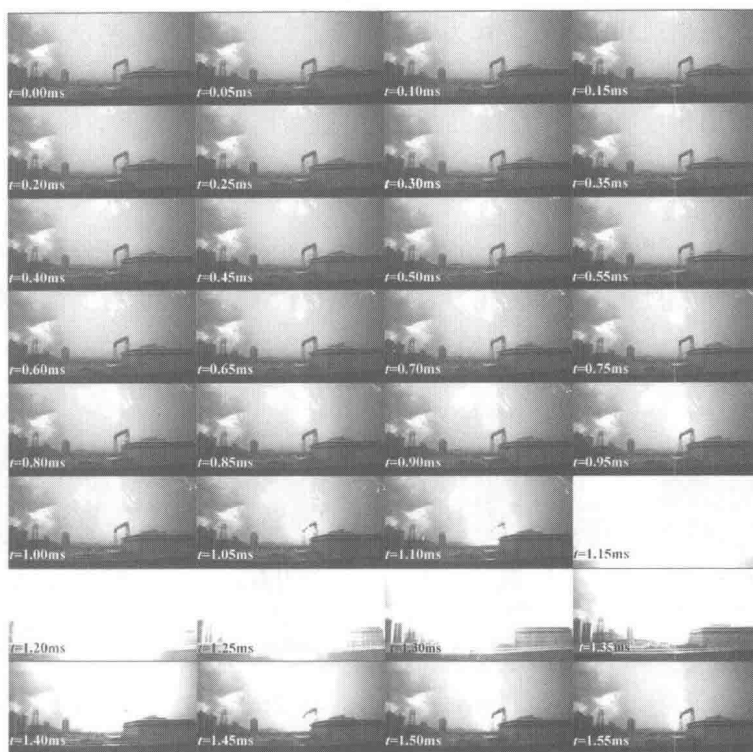


图 1-3 地闪放电通道发展的实际拍摄照片

二、地闪类型

通常情况下，将地闪回击电流方向定义为向下为正、向上为负，并分别称为正地闪和负地闪。另外，根据先导发展方向的不同，地闪的先导也可分为下行先导和上行先导。对于普通地面物体，主要是云中先导向下发展，把大电流带到地面物体上；对于高耸地面物体，例如高层建筑或山尖，容易产生上行先导，引发上行闪电。鉴于上述考虑，1978年瑞士 K. Berger 等人按照先导所转移电荷的极性、运动方向和有无回击过程将地闪分为四种，如图 1-4 所示。

1. 下行负雷

这是最常见的闪电，多发生在没有特高建筑物的开阔地带，下行先导带负电，而后发生回击，称为下行负雷，如图 1-4 (a) 所示。图中 i 表示先导发展方向， r 表示回击方向。这种类型的地闪是最常见的地闪，约占全部地闪的 90%。

2. 上行负雷

常发生于特高建筑物，其雷电开始阶段与“向上正先导—连续正放电”相同，但是之后出现回击过程，称为上行负雷，如图 1-4 (b) 所示。

3. 下行正雷

这类闪电比较罕见，下行先导带正电，之后出现回击过程，称为下行正雷，如图 1-4 (c) 所示。

4. 上行正雷

开始阶段与“向上负先导—连续负放电”相同，当先导过程向上发展到一定高度后会引发极其强烈的回击，其雷电流幅值非常大，称为上行正雷，如图 1-4 (d) 所示。

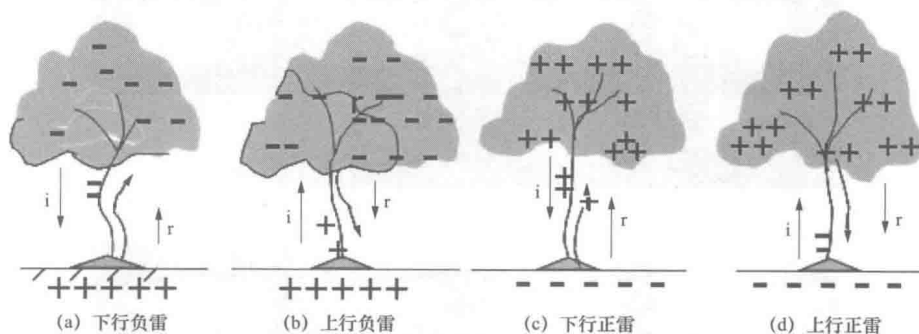


图 1-4 地闪的四种类型

依据雷电形成机理和实测数据,可以将地闪的特点归纳如下:

(1) 雷云下部荷负电荷,距离地面较近,对地放电相对容易,负地闪发生概率较高。

(2) 雷云上部荷正电荷,距离地面较远,对地放电相对困难,正地闪发生概率明显低于负地闪。

(3) 正地闪由于具有更长时间的连续电流过程,所以一般转移电荷量比负地闪多。因此,正地闪产生的电流明显大于负地闪。

第二节 雷 电 参 数

雷电放电涉及气象、地形、地质等许多自然因素,有很大的随机性,因而表征雷电特性的诸参数也带有统计的性质。许多国家都选择典型地区地点建立雷电观测站,并在输电线路和变电站中附设观测装置,进行长期的系统雷电观测,将观测所得数据进行统计分析,为防雷保护的设计研究提供依据。现将主要雷电特性参数分述如下。

一、雷电流的波形和极性

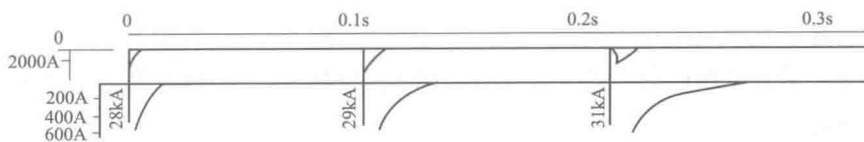
雷电流直接测量结果表明,雷电流是单极性的脉冲波,图 1-5 (a) 是一个包含 3 次实验室重复冲击放电的记录;图 1-5 (b) 是几个下行负地闪首次回击的雷电流实测波形;图 1-5 (c) 是根据以上几十个记录计算得出的平均雷电流波形。从图 1-5 (b) 中可以看出许多雷电流波形都在峰值附近出现明显的双峰,波尾部分也有较小的隆起。

根据国内外的实测统计,75%~90%的雷电流是负极性的,因此电气设备的防雷保护和绝缘配合通常都取负极性的雷电冲击波进行研究分析。

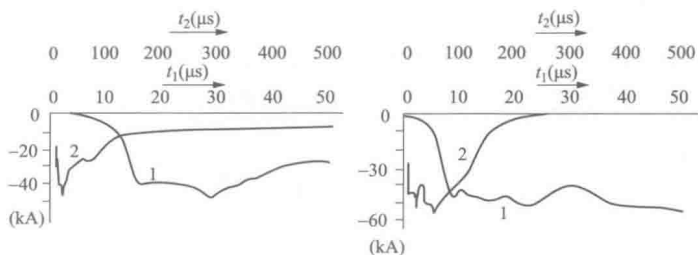
二、雷电流的参数

对于具有脉冲波形的雷电流,可以用幅值、波头和波长三个主要参数来表征。幅值是指脉冲电流所达到的最高值;波头是指脉冲电流上升到峰值的时间;波长是指脉冲电流的持续时间。

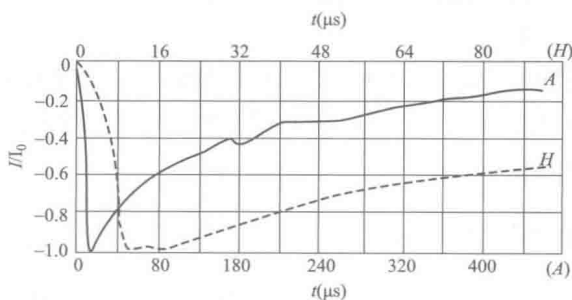
幅值和波头又决定了雷电流随时间上升的变化率,称为雷电流的陡度。雷电流的陡度对过电压有直接影响,也是常用的一个重要参数。



(a)冲击放电记录



(b)几个下行负地闪首次回击的雷电流实测波形



(c)平均雷电流波形

图 1-5 雷电流的实测波形

A —完整记录的波形； H —放大的波前沿； I/I_0 —以电流最大值作为基值的比值

1. 雷电流幅值的概率分布

雷电流幅值的概率分布计算公式为

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (1-1)$$

式中： I 为雷电流幅值，kA； P 为幅值不小于 I 的雷电流概率。

例如幅值不小于 50kA 的雷电流，计算可得概率为 33%。

式(1-1)适用于我国大部分地区。对于雷电活动很弱的少雷地区(年平均雷电活动 20 日以下)，例如陕南以外的西北地区及内蒙古自治区的部分地区，雷电流幅值概率的计算公式为

$$\lg P = -\frac{I}{44} \quad (1-2)$$

2. 雷电流的波头和波长

虽然雷电流幅值随各国的自然条件不同而差别很大,但是各国测得的雷电流波形却基本一致。据统计,波头长度大多在 $1\sim 5\mu\text{s}$ 范围内,平均为 $2\sim 2.5\mu\text{s}$ 。我国在防雷保护设计中建议采用 $2.6\mu\text{s}$ 的波头长度。

至于雷电流的波长,实测表明在 $20\sim 100\mu\text{s}$ 范围之内,平均约为 $50\mu\text{s}$,大于 $50\mu\text{s}$ 的仅占 $18\%\sim 30\%$ 。

根据以上分析,在防雷保护计算中,雷电流的波形可以采用 $2.6/50\mu\text{s}$ 的波形。

3. 雷电流的陡度

由于雷电流的波头长度变化范围不大,所以雷电流的陡度和幅值必然密切相关。我国采用 $2.6\mu\text{s}$ 的固定波头长度,即认为雷电流的平均陡度 $\bar{a}$ 与幅值线性相关

$$\bar{a} = \frac{I}{2.6} (\text{kA}/\mu\text{s}) \quad (1-3)$$

即幅值较大的雷电流同时也具有较大的陡度。

雷电流的各项主要参数——幅值、波头、波长和陡度的实测数据具有很大的分散性。许多研究者发表过各种结果,虽然基本规律大体相近,但其具体数值却有差异。其原因一方面在于雷电放电本身的随机性受自然条件多种因素的影响;另一方面在于测量条件和技术水平的不同。我国幅员辽阔,各地自然条件千差万别,雷电观测工作的基础还比较薄弱,有待于进一步加强。

三、雷电日、地闪密度

为了表征不同地区雷电活动的频繁程度,通常采用年平均雷电日作为计量单位。雷电日是指该地区一年四季中有雷电放电的天数,一天中只要听到一次以上雷声就算一个雷电日。由于不同年份的雷电日数变化较大,所以采用多年平均值——年平均雷电日。

我国各地年平均雷电日数的多少与所处的纬度及距离海洋的远近有关。北回归线(北纬 23.5°)以南,平均雷电日数一般在 80 以上;广东的雷州半岛和海南岛雷电活动频繁而强烈,雷电日高达 $100\sim 133$;北纬 23.5° 至长江以南大部分地区雷电日在 $40\sim 80$ 之间;长江以北大部分地区,包括华北、东北地区,雷电日多在 $20\sim 40$ 之间;西北地区雷电日数多在 20 以下。根据雷电活动的频度和雷害的严重程度,我国把年平均雷电日数超过 90 的地区称为强雷区,超过

40 的地区称为多雷区,不足 15 的地区称为少雷区,以便防雷设计时因地制宜。

雷电日的统计,并没有区分雷云之间的放电和雷云对地的放电。实际上云间放电远多于云地放电。雷电日数越多,云间放电的比重越大。云间放电与云地放电之比,在温带约为 1.5~3.0,在热带约为 3~6。对防雷保护设计研究更有实际意义的,还是云地放电的年平均次数。

雷云对地放电的频繁程度,由地面落雷密度 γ 来表示。 γ 是指每个雷电日每平方千米地面上的平均落雷次数。实际上, γ 值与年平均雷电日数 T_d 有关。一般, T_d 较大的地区,其 γ 值也较大。

关于地闪密度 N_g 与雷电日数 T_d 的关系,DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐采用国际大电网会议(CIGRE)1980 年提出的以下关系式

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (1-4)$$

式中: N_g 为每年每平方千米地面的落雷次数; T_d 为雷电日数。

由此可以推得

$$\gamma = 0.023 T_d^{0.3} \quad (1-5)$$

根据式(1-5),对 $T_d=40$ 的地区,取 $\gamma=0.07$ 。

第三节 雷电监测与参数统计

一、雷电定位系统

雷电定位技术是 20 世纪 70 年代末期由美国科学家提出并实现的,经过近 30 年的不断发展,目前已有 40 多个国家建立了雷电定位系统,用于电力、石油化工、煤炭、轨道交通、航天航空、保险理赔等行业。

雷电定位系统(lightning location system, LLS)是一套全自动、大面积、高精度的实时雷电监测系统,能实时遥测并显示地闪的时间、位置、雷电流峰值、极性和回击次数等参数。雷电定位系统是近 20 年来在雷电工程技术领域应用最广泛的雷电监测技术手段。

(一) 雷电定位系统的原理

1. 雷电定位系统的结构

LLS 的组成如图 1-6 所示,它主要由探测站、数据处理及系统控制中心(简称中心站)、用户系统三部分构成。此外,通信系统是组成 LLS 的重要支撑环