

Jiyu Shandian Dingwei Xitong de Leidian Huodong Guilü Fenxi  
jiqi  
Yingyong Yanjiu

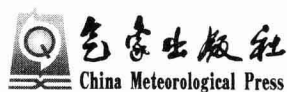
# 基于闪电定位系统的 雷电活动规律分析 及其应用研究

李家启 著

 气象出版社  
China Meteorological Press

# 基于闪电定位系统的雷电 活动规律分析及其应用研究

李家启 著



## 内 容 简 介

本书详细阐述了雷电流参数观测、雷电流活动规律及其雷电灾害风险评估中外研究进展,采用重庆地区闪电定位系统监测资料、人工观测雷暴资料以及雷电灾害资料,建立了雷电流幅值及其陡度的概率模式,分析了地闪频次与雷电日特征及其相互关系,研究了雷电参数随海拔高度、地理经纬度变化规律,提出了基于闪电定位资料的雷电参数和模式在风险评估中有效应用方法,建立了雷电灾害风险分类评估的模式。该书可供电力、建筑、应急、气象、地理和防灾减灾管理与技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于闪电定位系统的雷电活动规律分析及其应用研究/  
李家启著. — 北京:气象出版社,2012.11

ISBN 978-7-5029-5615-8

I. ①基… II. ①李… III. ①雷-活动-研究②闪电-活动-研究 IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 258840 号

## 基于闪电定位系统的雷电活动规律分析及其应用研究

李家启 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:张锐锐 吴晓鹏

责任技编:吴庭芳

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:240千字

版 次:2012年11月第1版

定 价:40.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68407948

E-mail: [qxcbs@cma.gov.cn](mailto:qxcbs@cma.gov.cn)

终 审:章澄昌

印 张:12

彩 插:4

印 次:2012年11月第1次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

# 前 言

雷电灾害是联合国“国际减灾十年”公布的最严重的十种自然灾害之一，被中国电工委员会称为“电子时代一大公害”。雷电灾害造成的损失仅次于干旱和洪涝灾害，一直是中外学者研究的重点和热点。由于测量技术的限制，早期的雷电活动研究主要基于各类安装于高塔上的雷电流测量仪和人工引雷，其优点是可直接获取所截获的雷电相关参数，如雷电流幅值、雷电流波形等，但无论是雷电流测量仪还是人工引雷，都仅能获取极其少量的雷电数据，较大区域的雷电活动数据一直难以获得，严重制约了区域雷电活动的研究。

20 世纪 70 年代，美国军方采用军用气象太阳同步轨道卫星 DMSP 携带的高分辨率扫描仪首次进行了卫星观测雷电的实验，是人类第一次尝试通过卫星全方位、大面积的监测雷电活动。1997 年美国发射了热带降雨探测任务卫星 TRMM，其可通过随星携带的闪电成像传感器日夜监测地球闪电情况，其视野达到  $600\text{ km}\times 600\text{ km}$ ，空间分辨率高达  $4\text{ km}$ ，至此大面积的雷电活动卫星监测正式步上正轨。采用卫星监测雷电活动情况，一个重要的优点就是，可以获得较大范围甚至全球的闪电活动情况，对全球的闪电活动时空变化研究有巨大推动作用，而其缺点也很突出，卫星监测并不能分辨地闪和云闪，而且其不能获得雷电流等重要的雷电活动参数，这在一定程度上限制了其研究应用。

近年来，雷电远程定位理论的成熟和定位系统的广泛布网，使地闪活动不间断、完整地监测成为可能。各地学者也基于雷电定位数据纷纷开展了针对各自国家或地区的雷电活动研究：Orville 利用美国雷电监测网

(NLDN) 统计分析了美国 1989—1998 年雷电活动情况, 得到了美国的平均闪电密度、闪电频次、年雷暴时数等雷电参数; Pinto 同样采用雷电定位系统, 研究了巴西雷电活动的时空分布情况; 韩国学者 Kuk 利用其半岛内 2004—2008 年雷电定位数据对韩国地闪分布、雷电流幅值等雷电活动参数进行了研究。此外, 爱沙尼亚、葡萄牙、加拿大等国学者也在近年开展了类似研究。

中国雷电监测系统研究起步于 20 世纪 90 年代, 截至 2012 年, 已建成了覆盖全中国大部分区域的雷电监测网。中国幅员辽阔, 地形和气候差异大, 研究不同地区的闪电活动特征, 不仅对于我们掌握和研究该地的雷电活动规律有积极意义, 还对防雷减灾工作有积极的指导作用。为较好地反映雷电活动规律, 雷电监测数据也多以 10 年为一个阶段。为此, 作者以重庆地区为例, 利用重庆地区闪电定位系统 (Lightning Location System, LLS) 监测资料 (1999—2008 年)、重庆市 34 个气象观测站雷暴日资料 (1951—2009 年) 以及雷电灾害 (1954—2008 年) 等相关资料, 采用 IEEE 和 DL/T620 推荐的雷电流幅值和雷电流波头陡度概率模式, 以及数理统计、(旋转) 经验正交函数、小波理论、对数正态分布等多种诊断与模拟方法做了如下研究工作: 一是对重庆地区雷电活动规律进行了研究, 建立基于三峡水库库区地貌的雷电流幅值概率密度模式和雷电流波头陡度概率模式, 得到了基于闪电密度、人工观测雷暴日和系统检测雷电日的各行政区域的雷电参数, 以及雷电参数随海拔高度、地理经纬度变化规律; 二是提出了基于闪电定位资料的雷电参数和模式在风险评估中有效应用方法, 建立了雷电灾害风险分类评估的模式: (1) 区域性风险评估与区划, 提出了分为与建筑物是否安装防雷装置无关的区域性风险评估和各类建筑都按照规范安装防雷装置的区域风险评估与区划方法; (2) 长跨度线路项目雷电风险评估, 提出了采用线路走廊法进行风险的分析与区划, 找到雷电的易闪段, 并通过对比分析安装防雷装置前后效果, 评估防雷减灾效益; (3) 建筑 (群) 雷电灾害风险评估, 建立了永久性建筑、临时性建筑和高耸建筑对周边影响的风险评估模式和方法, 对永久性建筑而言, 除按

照 IEC62305 提出评估内容外,提出了爆炸危险场所危害范围、雷电电磁脉冲影响区域、抗灾能力等方面的评估内容;对建筑施工和应急抢险救灾中使用的临时用房建立了雷电灾害风险评估的快速判别模式,为应急抢险指挥决策提供科学理论依据;对高耸建筑,建立了对其周边环境影响评估的方法和内容。

全书共分为八章,各章内容如下:

第一章阐述研究重庆地区闪电活动规律及其成因的目的和意义,并对国内外关于各种雷电参数测量及其分析的进展进行系统回顾,进而提出本书研究的问题,并对所要研究的内容进行简要介绍。第二章介绍闪电定位系统的定位原理与方法。第三章采用闪电定位系统的监测资料进行分析,建立正、负闪电电流幅值概率分布模式;对比分析 IEEE 和 DL/T620 雷电电流幅值累积概率分布模式优劣,建立符合重庆实际的雷电流幅值累积概率模式,为防雷工程设计施工提供参考。第四章采用闪电定位系统分析雷电流陡度频率分布特征及其理论累积概率模式。第五章分析重庆地区闪电频数时空分布特征,并对异常空间分布特征进行分析。第六章分析人工和系统观测雷电日,并分析基于闪电密度的重庆地区各区县行政区域的有效雷电参数(雷电日和闪电密度)。第七章探讨闪电活动特征与海拔高度、经度和纬度变化的关系,主要分析海拔高度、经度和纬度对闪电的密度、强度、正闪比例以及不同幅值闪电比例等的影响并建立相关模式。第八章将闪电定位资料统计分析得到的雷电参数和模式在风险评估中合理有效应用,并初步建立雷电灾害风险分类评估方法与模式。针对区域性风险评估与区划、长跨度线路项目和建筑(群)雷电灾害风险评估,探索雷电灾害风险评估的内容和方法,明确相应的评估思路,并建立相应的风险评估模式。

本书在编写过程中得到了重庆市防雷中心、重庆市电力科学研究院、南京信息工程大学应用气象学院、重庆市北碚区气象局、重庆大学电气工程学院等部门的大力支持,特别是中国气象科学研究院张义军研究员、董万胜研究员,南京信息工程大学申双和教授、重庆市气象局李良福教授级

高工、重庆大学廖瑞金教授、杨庆副教授等审阅全书，并提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。此外，本书引用的研究成果，除个别文献外，均列出了参考文献，在此谨向文献作者致以衷心感谢。

由于作者水平有限、时间仓促，本书难免有不足之处，敬请读者批评指正。



2012年5月28日

# 目 录

## 前 言

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 第一章 绪 论 .....                 | ( 1 )  |
| 1.1 研究的目的是和意义 .....           | ( 1 )  |
| 1.2 中外研究进展 .....              | ( 2 )  |
| 1.3 问题的提出与研究内容 .....          | ( 12 ) |
| 第二章 闪电定位系统的定位原理与方法 .....      | ( 15 ) |
| 2.1 闪电定位系统的定位方法 .....         | ( 15 ) |
| 2.2 闪电定位系统的定位原理 .....         | ( 18 ) |
| 2.3 闪电定位系统的作用 .....           | ( 21 ) |
| 第三章 雷电流幅值分布特征 .....           | ( 24 ) |
| 3.1 引言 .....                  | ( 24 ) |
| 3.2 数据来源和处理方法 .....           | ( 25 ) |
| 3.3 雷电流幅值概率模式 .....           | ( 27 ) |
| 3.4 雷电流幅值累积概率模式 .....         | ( 36 ) |
| 3.5 闪电定位资料质量控制中的小幅值地闪定义 ..... | ( 42 ) |
| 3.6 小结 .....                  | ( 48 ) |
| 第四章 雷电流波头陡度分布特征 .....         | ( 50 ) |
| 4.1 概述 .....                  | ( 50 ) |
| 4.2 资料来源与方法 .....             | ( 51 ) |
| 4.3 雷电流波头陡度统计分布特征 .....       | ( 52 ) |
| 4.4 雷电流幅值和陡度的相关性 .....        | ( 54 ) |
| 4.5 雷电流波头陡度分布 .....           | ( 54 ) |
| 4.6 小结 .....                  | ( 57 ) |
| 第五章 地闪频次分布特征 .....            | ( 59 ) |
| 5.1 概述 .....                  | ( 59 ) |
| 5.2 资料与方法 .....               | ( 59 ) |
| 5.3 地闪频次的时空分布特征 .....         | ( 61 ) |
| 5.4 结论 .....                  | ( 87 ) |

|      |                             |        |
|------|-----------------------------|--------|
| 第六章  | 雷电（暴）日特征及其有效性分析 .....       | （ 89 ） |
| 6.1  | 引言 .....                    | （ 89 ） |
| 6.2  | 资料来源和方法 .....               | （ 89 ） |
| 6.3  | 雷电日时空分布特征 .....             | （ 90 ） |
| 6.4  | 基于闪电密度的有效雷电日确定 .....        | （101）  |
| 6.5  | 小结 .....                    | （105）  |
| 第七章  | 雷电流参数随海拔高度、地理经纬度的变化规律 ..... | （107）  |
| 7.1  | 引言 .....                    | （107）  |
| 7.2  | 资料与方法 .....                 | （108）  |
| 7.3  | 雷电流参数随海拔高度变化规律 .....        | （108）  |
| 7.4  | 雷电流参数随地理纬度变化规律 .....        | （114）  |
| 7.5  | 雷电流参数随地理经度变化规律 .....        | （118）  |
| 7.6  | 小结 .....                    | （123）  |
| 第八章  | 在雷电灾害风险评估与区划中的应用 .....      | （125）  |
| 8.1  | 引言 .....                    | （125）  |
| 8.2  | 区域性评估与区划 .....              | （126）  |
| 8.3  | 长跨度线路项目风险评估 .....           | （139）  |
| 8.4  | 建筑物（群）风险评估 .....            | （149）  |
| 8.5  | 小结 .....                    | （169）  |
| 参考文献 | .....                       | （171）  |

# 第一章 绪 论

## 1.1 研究的目的是和意义

雷电是大气中十分壮观的超长距离放电过程,通常伴有强对流天气过程。它是一种常见的自然现象,根据全球闪电的卫星观测结果估计:全球每秒钟约有 46 次闪电发生,其中 85% 以上出现在陆地上。中国地处温带和亚热带地区,雷暴活动十分频繁,全中国有 21 个省会城市的年最多雷暴日超过 50 d,最多达到 134 d。

雷电因其强大电流、炙热的高温、强烈的电磁辐射以及猛烈的冲击波等物理效应而能够在瞬间产生巨大的破坏作用,造成雷电灾害。雷击常常导致人员伤亡,还可能导致建筑物、供配电系统、通信设备、民用电器的损坏,引起森林火灾,仓储、炼油厂、油田等燃烧甚至爆炸,造成重大经济损失和不良的社会影响。例如 1989 年 8 月 12 日,山东省黄岛油库一个油罐遭雷击起火,并引爆了附近四个油罐,燃烧 103 h 才得以扑灭,造成 19 人死亡,78 人受伤,烧毁原油 3.6 万 t,整个油库毁坏殆尽,直接和间接经济损失超过 1 亿元;2009 年 8 月 4 日,河北省石家庄市腾飞玛钢铸造有限公司遭受雷击,导致在建厂房发生坍塌事故;2010 年 4 月 13 日,上海的地标性建筑之一,高 467.9 m 的东方明珠塔顶发射天线遭遇雷击,引起天线外罩起火燃烧,后被及时扑灭。所以,对中国各个部门的安全生产而言,雷电灾害是不容忽视的一种严重威胁。随着人类社会生活和生产活动的日益现代化,大量电子、电器和通信设备的普及与应用,雷击灾害事故呈现逐年上升、损失逐年增加的态势。目前,计算机系统已经成为信息资源的重要载体和资料库,各行各业对计算机信息系统的依赖程度越来越高,但是,雷电电磁脉冲对计算机系统的稳定性、可靠性和安全性形成严重威胁。如某数据中心,集全体技术人员历时三年的研究成果和宝贵数据也因一次雷灾而化为乌有。航空航天是汇集了人类最新高科技的尖端领域,液氢燃料的加注、火箭发射升空都不能有雷电发生。雷电除对航天飞行器、发射塔等造成直接破坏外,还可能引爆火箭发射装置,使火箭自行升空,或使发射过程中的火箭爆炸,如 1987 年 3 月 26 日美国国家宇航局在卡纳维拉尔基地利用大力神/半人马座火箭发射海

军通信卫星时,雷击导致星箭俱毁,损失高达1亿美元。正因为雷击灾害对人民生命财产和社会各部门、各行业的危害程度如此之大、范围之广,联合国有关部门将其列为“最严重的十种自然灾害之一”,被中国电工委员会称为“电子时代的一大公害”。

重庆市地处四川盆地东南部,东北部紧靠大巴山脉与陕西省接壤,东邻巫山—武陵山系与湖北、湖南两省相接,南靠大娄山脉与贵州省交界,西部和北部与四川省一脉相连,受副热带和中纬度天气系统的交替影响,局地性天气特征十分明显,中小尺度天气系统活动频繁,生消迅速,强度剧烈,常伴随地闪发生。随着重庆城市的快速发展,雷电灾害对城市安全、社会经济可持续发展的影响和威胁日趋严重,每年给重庆地区造成至少上亿元的经济损失和数十人伤亡,如2005年4月21日,重庆市东溪化工有限责任公司因乳化炸药生产厂房遭受雷击,导致约1.8 t乳化炸药的基质发生爆炸,造成12人死亡、7人失踪和13人受伤;2007年4月1日,重庆忠垫高速公路施工现场因雷击造成5死5伤;同年5月23日,重庆市开县兴业村小学教学楼遭受雷击,导致7名学生死亡,44人受伤。因此,防雷减灾工作显得极其迫切和重要。重庆市人民政府及相关部门都对防雷减灾工作给予了高度的重视,对防雷工作的开展提供了很好的客观条件,但防雷减灾工作必须建立在掌握当地雷电活动规律和合理防雷减灾规划的基础上。为了有效地开展雷电灾害防御工作,特别是为了解决城市规划、项目选址及功能分区布局等问题,本书拟采用闪电定位系统(Lightning Location System,LLS)监测资料(1999—2008年)、雷暴日观测资料(1951—2009年)和雷电灾害资料(1999—2008年),从时间、空间上分析重庆的雷电活动规律,进行雷电灾害风险评估与区划研究。

## 1.2 中外研究进展

雷电参数是客观反映雷电活动规律的重要指标,对防雷工程设计和雷电物理研究都具有十分重要的意义。IEC61312提出的雷电参数有雷电日、地面落雷密度、雷电流幅值概率分布、雷电流陡度概率分布、雷击电荷量概率分布、单位能量概率分布。中外学者在这些方面做了大量卓有成效的研究工作。

### 1.2.1 雷电流幅值测量与研究进展

雷电流幅值是一个极其重要的雷电参数,其测量方法包括磁钢棒法、磁

带法、人工引雷法和闪电定位法等。Kohlrausch(1888)最早对雷电流幅值进行估算,他发现要熔化金属导体,须要 30 kA 的电流,持续 2 ms。Pockels(1897)提出了极为重要的雷电流幅值的测量方法——磁钢棒法,随后磁钢棒成为测量雷电流幅值的主要工具。Norinder(1925)首先采用高速阴极射线示波器记录了输电线路的雷电过电压,根据示波器或雷电流特性记录仪的电流读数,便可获得单个闪击的雷电流幅值。Newman 等(1967)完成了人类首次人工引雷,他采用的是火箭拖导线方法。Krider(1980)采用了磁定向地闪定位系统,其后 Casper 等(1991)又采用了工作在低频段的时差法定位系统,经过 20 多年发展,两种系统合二为一形成地闪定位网,为探测闪电参数提供了有效的手段和途径。1993 年中国第一套闪电定位系统在安徽电网投入工程应用以来,中国电网已建立 29 个省域雷电监测网,国家电网公司于 2006 年已建成覆盖 20 个省域的雷电监测网,气象部门也建立覆盖全国的雷电监测网。

雷电流幅值概率是表征雷电活动频度,计算雷击闪落率的重要参数。雷电流幅值概率分布一直是中外防雷界非常重视的雷电活动参数之一,在绕击和反击防雷计算中占据十分重要的位置,中外使用的雷电流幅值分布模式不同。Popolansky(1972)根据欧洲、澳洲和美国观测结果(磁钢棒法,共 624 组数据),分析了大于 2 kA 的电流,发现累积概率分布模式采用正态分布最为理想,该观点得到当时包括 Berger(1975)等的广泛认可。此后的研究者根据对不同地区的观测提出了不同的中值电流和对数标准偏差,其中 Eriksson 和 Anderson(1980)的观测结果被广泛采用。Anderson 根据 Berger 等获得的 80 个负极性首次回击实测数据(进行过校正),首次给出了雷击电流大于某一电流  $I_P$  的累积概率的近似模式,即

$$P_C(> I_P) = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{I_P}{31} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

式中,  $I_P$  为雷电流幅值,且  $I_P \in (2 \text{ kA}, 200 \text{ kA})$ ,  $P_C$  为雷电流幅值大于  $I_P$  的累积概率。负极性后续雷击电流的中值为 12.3 kA,其对数值的标准差为 0.5296。大于某一电流幅值  $I_{Pd}$  的累积概率可近似由以下模式得到:

$$P_C(> I_P) = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{I_P}{12} \right)^{2.7} \right] \quad (1.2)$$

模式(1.1)和(1.2)被 IEEE 工作组和 CIGRE 所推荐。IEEE 工作组于 2005 年对全球雷电参数研究进行回顾和总结,仍然推荐 Anderson 依据 Berger 等的实测数据提出的雷电流幅值的概率分布的近似对数正态分布模式。日本为了监测雷电流参数,1994—1997 年在 60 个 1000 kV 降压至 500 kV 运行的双回路输电线路杆塔塔顶安装 215 m 长的引雷针,研究出自

己的雷电流幅值分布模式特征。

中国防雷计算中主要采用规程法对雷电流幅值概率进行计算,采用的是对数模式。在近 30 多年中对雷电流幅值分布模式进行过 3 次修改(见表 1.1),目前使用的是电力行业规程《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T620—1997)中推荐的模式  $\lg P_I = -I/88$ ,是孙萍(2000)对浙江省西部 220 kV 新安江—杭州输电线路 I 回路在 27 a 中用磁钢棒实测到的全部雷击数据(716 组,负极性闪电)作了数据统计分析得出的。

表 1.1 中国雷电流幅值累积概率分布历次修订汇总

| 修订年份 | 雷电流幅值累积概率分布        | 依 据                                    |
|------|--------------------|----------------------------------------|
| 1959 | $\lg P_I = -I/60$  | 沿用前苏联公式                                |
| 1979 | $\lg P_I = -I/108$ | 基于中国各地 1205 个磁钢棒记录数据                   |
| 1997 | $\lg P_I = -I/88$  | 新一杭线 20 多年实测结果。采用 97 个雷击塔顶负极性雷电流幅值数据回归 |

注:表 1.1 中,  $I$  为雷电流幅值,单位:kA;  $P_I$  为雷电流幅值  $> I$  的概率。

1.2.2 雷电流陡度测量与研究进展

雷电灾害事故的发生,特别是雷电电磁辐射引起的雷电灾害,与雷电流幅值、雷电流最大陡度密切相关。某些雷电灾害事故是由高幅值、低陡度的雷电流引发;另一些雷电灾害事故却是由低幅值、高陡度雷电流引发。在防雷保护与雷电特性的基础性研究中,雷电流最大陡度有着重要的意义。最新资料统计表明,电力系统事故中 50% 与雷击有关,而在雷击事故中 50% 与雷电流最大陡度有关。

对于雷电流最大陡度的测量,尤其是能进行雷电流最大陡度普测的测量方法,各国雷电科研工作者都投入许多精力,取得了一些成果。中国对雷电流陡度的测量起步于 20 世纪 60 年代,先后采用磁钢式雷电流陡度仪、磁带法和人工引雷等方法测量。

在雷电流陡度研究领域,中国孙萍等于 1963 年利用数学方法,对美国 Mccann 和瑞士 Berger 利用示波器测得的 62 组雷电流第一峰值的陡度  $\alpha$  与幅值  $I$  的关系数据,按相关系数计算式算出相关系数  $r=0.60$ ,从而得出  $I$  与  $\alpha$  紧密相关,即  $\alpha$  随  $I$  的增大而增大的结论。几年后原苏联也用相关分析法分析了巴库地区的 224 组数据,得出相关系数  $r=0.64$ ,与前一结论基本相同,2007 年用改进型磁钢式雷电流陡度仪于 1983—1987 年在浙江省共实测得雷击塔顶 20 个陡度数据,雷击档内向两边分流的入塔电流 98 个陡度

值,分析得到雷电流陡度与其幅值的相关系数分别为 0.51 与 0.75,并根据《DL/T620—1997》中雷电流幅值累积概率分布模式推导得出浙江电网雷电流陡度的累积概率模式。1990 年 Florida 和 1991 年 Alabamade 在触发闪电的电流分析中,也报道了电流峰值与 10%~90%平均陡度的线性相关系数达到 0.71,而与 30%~90%平均陡度的线性相关系数达到 0.74。王巨丰等(2007)采用记录品质较好的金属磁带作磁卡的磁层,对雷电流幅值、最大陡度进行了实地测量,并对测量数据进行了深入的研究,进而提出桂林地区雷电流最大陡度的频率分布模式,为电力系统的防雷研究提供了很好的手段和真实的数据。关于雷电流幅值与陡度的相关性国内外分歧比较大,有人提出幅值与陡度无关,也有人提出最大陡度与幅值的相关系数第一次闪击为 0.38(70 个样品),随后闪击为 0.56,第一次闪击相关性不如随后闪击,随后闪击陡度比第一次大,最大陡度 50%的值为 50 kA/ $\mu$ s 的观点。

1.2.3 闪电频数的观测与研究进展

地闪发生频数是确定闪电对地上或地下建筑物和设备危害的最重要的参数。识别和记录单个闪电的方法中,最简单的方法就是目测法和照相法。Salanave 和 Brook 使用窄带干涉滤光片和适当胶片,对白天闪电也采用照相法;而 Hagenguth 使用立体照相装置方法、Mackerras 使用雷达记录和闻雷计时来估计闪电距离。Pierce 发明的闪电计数器可以有选择性地反映地闪;而 Prentice 设计了使用最为广泛的 CIGER 计数器;Horner 设计出能反映云闪和地闪的间歇计数器。

各国由目测法和照相法取得的资料列于表 1.2 中,而由记录仪器(包括闪电计数器在内)取得的闪电频数资料列于表 1.3 中。这些表中,甚至对同一国家的估计值也有差异,这些差异可能是由于观测方法的误差以及观测期限短所造成的。表 1.4 给出的是根据输电线路运行情况研究而得出的资料,这些研究工作是在几年观测时间内做的,能很好地反映闪电活动的年变化。Prentice 在澳大利亚对闪电计数器导出的地闪密度比输电线路防护研究中使用的地闪密度值一半还小。

表 1.2 地闪的发生频数(目测法和照相法)

| 国家   | 地区年雷暴日 | 观测情况 |        | 地闪密度<br>(次/(km <sup>2</sup> ·a)) | 参考文献            |
|------|--------|------|--------|----------------------------------|-----------------|
|      |        | 年数   | 半径(km) |                                  |                 |
| 澳大利亚 | 30     | 10   | 20     | 1.1                              | Mackerras(1976) |
| 东德   | 21     | 11   | —      | 0.8                              | Fritsch(1943)   |

(续表)

| 国家 | 地区年<br>雷暴日 | 观测情况 |        | 地闪密度<br>(次/(km <sup>2</sup> ·a)) | 参考文献            |
|----|------------|------|--------|----------------------------------|-----------------|
|    |            | 年数   | 半径(km) |                                  |                 |
| 南非 | 55         | —    | —      | 7.7                              | Schonland(1964) |
| 瑞士 | 51         | 10   | 2.5    | 4                                | Berger(1967)    |
| 英国 | 12         | 17   | 0.03   | 2.3                              | Golde(1945)     |
| 英国 | —          | 9    | 2      | 0.1                              | Ashmore(1945)   |
| 美国 | 33         | 2    | 4.8    | 1.4                              | Hagenguth(1947) |
| 美国 | 11~40      | 9~19 | 30     | 0.4~2.3                          | Fuquay(私人通信)    |
| 苏联 | 20         | 7    | 5.0    | 2.8                              | Kuliev(1968)    |
| 西德 | 19         | 20   | —      | 0.7                              | Walter(1933)    |

表 1.3 地闪的发生频数(根据观测仪器记录)

| 国家   | 地区年<br>雷暴日 | 方法   | 观测情况 |        | 地闪密度<br>(次/(km <sup>2</sup> ·a)) | 参考文献                    |
|------|------------|------|------|--------|----------------------------------|-------------------------|
|      |            |      | 年数   | 半径(km) |                                  |                         |
| 澳大利亚 | 5~107      | 计数器  | 3~5  | 30     | 0.2~3.9                          | Prentice(1974)          |
| 加拿大  | 26         | 计数器  | 5    | 19     | 1                                | Ellis 和 Linck(1958)     |
| 中非   | 79         | 计数器  | 6    | 30     | 3.4                              | Jenner(私人通信)            |
| 芬兰   | 17         | 计数器  | 14   | 17     | 1.5                              | Laitinen(私人通信)          |
| 挪威   | 8          | 计数器  | 4    | 12.5   | 0.4                              | Muller-Hillebrand(1965) |
| 新加坡  | 171        | 计数器  | —    | 30     | 12                               | Horner(私人通信)            |
| 南非   | 73         | 计数器  | 7    | 36     | 6.5                              | Anderson(1975)          |
| 瑞典   | 13         | 计数器  | 5    | 12.5   | 0.9                              | Muller-Hillebrand(1965) |
| 泰国   | 100        | 计数器  | —    | —      | 9                                | Pierce(1968)            |
| 英国   | 14         | 尖端放电 | 3    | 4      | 1.8                              | Whipple 和 Scrase(1936)  |
| 英国   | 17         | 电场变化 | 11   | 4      | 0.6                              | Wormell(1939)           |
| 英国   | 16         | 计数器  | —    | 30     | 1.0                              | Horner(私人通信)            |
| 英国   | 16         | 计数器  | 4    | 30     | 0.5                              | Stringfellow(1974)      |
| 美国   | 30         | 电场变化 | 2    | 16     | 3.3                              | Trueblood 和 Sunde(1949) |
| 美国   | 50         | 电场变化 | 2    | 16     | 7.2                              | Trueblood 和 Sunde(1949) |
| 西德   | 15~25      | 计数器  | 3    | 17.5   | 1~4.7                            | VDE(1968a)              |
| 西德   | 23~35      | 计数器  | 3    | 17.5   | 3~5.5                            | VDE(1968b)              |

表 1.4 地闪的发生频数(根据电力输电线路的研究)

| 国家     | 地区年雷暴日 | 年数  | 地闪密度<br>(次/(km <sup>2</sup> ·a)) | 参考文献             |
|--------|--------|-----|----------------------------------|------------------|
| 捷克斯洛伐克 | 30     | 6   | 6.3                              | Popolansky(1960) |
| 日本     | 30     | —   | 4                                | Owa(1964)        |
| 荷兰     | 30     | —   | 4~6                              | Provoost(1970)   |
| 瑞典     | 10     | —   | 1.3                              | Lundholm(1957)   |
| 英国     | —      | 10  | 0.5                              | Forrest(1945)    |
| 英国     | —      | 5   | 2                                | Davis(1963)      |
| 美国     | 39~62  | 7~8 | 7.4~12.1                         | Golde(1945)      |
| 美国     | 30     | 5   | 6.2                              | Griscom(1965)    |
| 美国     | 30     | —   | 5.3                              | Young(1963)      |
| 西德     | 20~24  | 4~8 | 2.3~6.2                          | Baatz(1951)      |

Aiya 发现闪电发生率的日变化特征为:最大雷电活动时间为当地 14 时到次日 04 时的任何一个小时;Macherras 根据在布里斯班对亚热带雷暴是年观测研究:做出最大雷电活动时间发生在 09—20 时。冬季,时间要提前;夏季,时间要延后。闪电活动的年变化取决于气候的特征。因此,在温带气候中,最大雷电活动时间发生在仲夏,而冬季只偶尔有雷电活动。在亚热带气候中,最大雷电活动时间出现在仲夏,而冬季雷电活动可忽略不计。张敏生等利用地闪定位仪探测了中国东北地区与北京地区的雷电活动,将两地闪电频次日变化,正、负闪强度日变化,正负闪强度概率分布等做了比较,并发现差异很大;李霞等利用苏州地区 2002—2004 年闪电定位系统监测资料,分析了该地区地闪的月变化、日变化、强度、闪电密度等特征;张敏峰等利用地闪定向仪和时间到达法,分析了广东地区地闪雷电流强度、回击数的气候概率分布特征以及雷电参数的日变化及其空间分布的气候规律;刘方兴等利用 1998—2000 年山东地区闪电定位系统获取的闪电资料,从闪电的日变化、强度、密度和极性等方面研究了山东地区的雷电分布特征;陈绿文和张义军等利用 2007—2008 年广州从化人工触发闪电的近距离光电观测数据,分析了广东电网闪电定位系统对人工触发闪电事件及其回击过程的探测效率和探测精度。

### 1.2.4 闪电密度与雷暴日关系研究进展

国际上采用的描述闪电发生的参数是雷暴日,即测站闻雷的日数,用  $T$

表示。且不论外界噪声的干扰所造成闻雷的困难,就雷暴日作为比较世界各地雷电活动的基础而言,也是有局限性的。闻雷意味着至少发生一次闪电,但对可闻区内产生成千次闪电的持续一整天的一系列雷暴也使用同样的术语。况且,这种雷暴日的度量不能区别对闪电资料的实际应用很有必要的闪电类型,因此,寻求另一种能代替雷暴日这种表示方法的重要性日渐增长,显然,这就是闪电密度。闪电密度就是描述单位面积上和单位时间内发生闪电的数量。

国际上, Golde 分析得到地闪密度和年雷暴日之间存在线性关系。Brooks 认为,这种线性关系可应用到温带和热带气候区,但在热带气候区用较小的比例因子。Muller-Hillebrand 根据闪电计数器的观测研究,对这种比例因子和线性关系进行了质疑。20 世纪 70 年代, Nishino、Noggle 和 Proctor 等科学家开始采用高频、甚高频、低频技术的天线定位系统测量闪电位置, Shindo 和 Yokoyama 对日本 1992—1995 年雷电定位数据分析发现,雷击次数与雷电日关系随季节的变化而变化,难以用简单公式来表达。许多研究工作者通过大量研究得到了雷暴日和闪电密度的关系(见表 1.5)。其中, Pierce 提出关系式为:

$$N_m = (aT_m + a^2 T_m^4)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

式中,  $a=3 \times 10^{-2}$ 。而 Maxwell 提出关系式

$$N_m = 0.06 T_m^{1.5} \quad (1.4)$$

两式中,  $m$  均表示月份。Buset 和 Price 在内华达的实验研究支持这些关系式。Cianos 和 Pierce 对雷暴日总闪电密度之间的对应关系,具有普遍指导意义。

表 1.5 闪电密度和年雷暴日之间的经验关系式

| 国家(或地区) | 地闪密度(次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ))                   | 参考文献                      |
|---------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 印度      | $0.1 T$                                                    | Aiya(1968)                |
| 罗得西亚    | $0.14 T$                                                   | Anderson 和 Jenner(1954)   |
| 瑞典      | $0.004 T^2$                                                | Muller-Hillebrand(1964)   |
| 英国      | $aT^b = (2.6 \pm 0.2) \times 10^{-3}$<br>$b = 1.9 \pm 0.1$ | Stringfellow(1974)        |
| 美国(北部)  | $0.11 T$                                                   | Horn 和 Ramsey(1951)       |
| 美国(南部)  | $0.17 T$                                                   | Horn 和 Ramsey(1951)       |
| 美国      | $0.1 T$                                                    | Anderson(1968)            |
| 美国      | $0.15 T$                                                   | Brown Whitehead(1969)     |
| 苏联      | $0.036 T^{1.5}; 0.1 T^{1.3}$                               | Kolokolov 和 Pavlova(1972) |