

雷电

电力工业出版社

〔英〕 R. H. Golde

周诗健、孙雪群译 阮忠家校

雷电

上 卷

周 诗 健 孙 景 群 译 阮 忠 家 校

电 力 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书系由各国从事雷电研究工作的专家分别撰写而编成的，是一本能反映该学科最新成果而又比较全面的专著。全书分上、下两卷，上卷为“雷电物理学”，下卷为“防雷保护”。上卷共分十二章，从气象学和物理学的角度对有关雷电研究的各个方面：雷雨云、尖端放电、地闪、云闪、长火花、闪电光谱、雷电流、天电、雷、球状闪电、闪电频数以及它们的测量方法等作了详细阐述。

本书可供在气象、电力、通讯、航空和建筑等部门从事研究和实际工作的人员参考。

LIGHTNING

Volume 1 Physics of Lightning

Edited by R.H.GOLDE

ACADEMIC PRESS INC.(LONDON) LTD 1977

雷 电

上 卷

[英]R.H.GOLDE等著

周诗健 孙景群译 阮忠家校

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14.25印张 376千字

1982年5月第一版 1982年5月北京第一次印刷

印数 0001—4220册 定价 1.80元

书号 15036·4308

译者前言

雷电是自然界中极为壮观的声、光、电现象，不仅由于它那划破黑夜长空的耀目的闪电和令人震耳欲聋的霹雳声，更重要的则在于它给人类生活和生产活动带来很大影响。雷电引起的森林火灾可能启发了远古人类对火的发现和利用，雷电造成的有机化合物的合成可能在地球生命起源中占有一定地位。在现代生活中，雷电仍然对人畜的生命安全有所威胁，对航空、通讯、电力、建筑等国防和国民经济许多部门都有重大影响，因此雷电现象的物理机制及其防护问题一直为人们所关注。

对于雷电这一古老而又极其普遍的现象，国内至今尚无这方面的专著，国外完善的论著也不多，本书是有关这一学科的最新而又较为全面的一本书，由各国从事这方面研究的专家分别撰写，经Golde主编而成。每章一个专题，可以独立成篇。各章写法亦有所规定，均从简单回顾历史开始，着重介绍研究近况和主要结果，最后扼要提出存在问题并展望未来。本书无论对从事雷电研究的理论工作者，还是对从事雷电防护的实际工作者来说都会有较大的帮助和指导意义。

本书分上、下两卷，共26章，上卷为雷电物理学，下卷为防雷保护。上卷原有14章，鉴于第一、二章（“雷电史”、“富兰克林”）与雷电物理学关系不大，主要叙述早期雷电发展史的问题，所以删去这两章未译，将原第三章改编为第一章，其余各章序号均相应改动。译本第一章介绍产生雷电的母体——雷雨云，从气象学角度对雷电进行研究，叙述雷雨云的发生和发展、云中的电状况和各种起电机制。第二章介绍与雷电活动密切相关、在大气电学中极其重要的一种放电现象——尖端放电。第三章地闪、第四章云内闪电，主要从物理机制上介绍闪电结构和发展过

程。第五章长火花,介绍与闪电相似而在高压工程中极其重要的高电压击穿。第六章介绍用光谱学方法研究闪电的组成成分和物理特性的“闪电光谱学”。第七章介绍造成闪电危害的雷电流和其它一些闪电参数的研究。第八章介绍对通讯产生重大干扰的闪电天电和噪声以及它们的利用。第九章则从声学角度介绍闪电的声学现象——雷。第十章介绍一种罕见的闪电现象——球状闪电,它的结构和形成吸引了许多物理学家的注意,这里将叙述他们提出来的各种理论。第十一章介绍测量闪电电场、电流、闪电频数等参数的方法。第十二章从气候角度介绍闪电的发生频数,这对需要考虑闪电影响的某些工程设计极为有用。总之,上卷从各个角度比较全面地阐述了雷电物理学的研究。

由于雷电物理学中有很多问题至今仍未最后解决,众说纷纭,各章作者在撰写时难免着重强调自己的看法和研究结果,希望读者对此要加以注意。为便于单章阅读,我们加了一些从全书看起来似乎不必要的注释。本书第一、二、六、九、十、十一、十二章由周诗健同志译出,其余五章由孙景群同志译出,阮忠家同志译出序言并对全书作了校阅,最后又经马培民同志通阅并提出有益意见。由于本书涉及面很广,限于我们的水平,错误在所难免,希望广大读者批评指正,以便再版时修改。

1981年12月于北京

编 著 者 序(摘译)

“电力工程师已经意识到物理学家和气象学家各自进行的许多闪电现象的研究。然而，研究一下这些极为广泛的有关文献就会发现，把不同作者和用不同的研究方法所得的资料联系起来，或者把这些研究结果变成使电力工程师可用来解决面临问题的条件，有关这些方面的尝试却做得极少，由此推论，为了免受雷击的破坏作用而研究雷电防护的措施，究竟该是谁的任务呢。”这是写在1941年发表的（本人是合作者）关于《闪电放电》的一篇论文上的一段话。在此35年期间，研究人员对其它学科所取得的成果已给予较大的注意，可是闪电放电问题多方面的复杂性，使得任何个人要通晓所有积累的成果并完全领会它们的意义几乎是不可能的。

经常引用的 Martin Uman 一书，就是一部关于近代闪电物理学的极好的论著。我们现在这本由多位作者撰写的书，主要是出于对目前关于闪电及其防护的所有重要知识的全面了解的需要。此外，我深切地感到一些人去世所造成的损失，这些人可以称他们为进入现代记录技术的第一代闪电科学家：人们立刻会想到如C.T.R.Wilson, Sir George Simpson, Sir Basil Schonland, K.B.Mc Eachron, I.S.Stekolnikov, C.L.Fortescue, D.J.Malan等人的名字。然而，幸运的是，跨越那一代的科学家中有少数几位仍然健在。我满怀信心地希望，他们的经验将对正在把研究规模扩大到愈来愈专门化的放电研究的年青一代有所裨益。

原先，本书打算把物理学家、工程师以及气象学家、史学家和其他研究工作者所得到的成果都介绍出来。考虑到涉及面太广，本书不能以专论来安排。变通的办法是约请一些知名学者作

撰稿人，从早期研究工作的简要回顾入手，以他们自己的明确观点，对现代的闪电知识作出明确的评论。而他们的观点，在多数情况下，是以个人的毕生经验和思想为基础的。

几乎没有一章是完全独立的，作为编者，我面临的主要问题是防止重复。采用的原则是对于最直接属于该章的内容留在这一章内讨论，而在其它章节中的相同论述则用相互参照的备注来代替。不同撰稿人的结论和意见偶而不一致的地方亦被保留，以作相互参照之用。在这方面，请允许我照例说明一下，作为编者，我对各位撰稿人的观点并不负责。

有关各章的文献是如此庞大，故要求撰稿人在引用参考文献时限制在能对早期发表的论文提供来源的近代论文。即使如此，参考文献的总量仍有数千之巨。

本书是为那些对闪电研究进行认真学习的人而写的，不论这些人在他们自己领域内是初学者还是专家。它将证明对从事于自然界、实验室或大气电学中的放电现象进行研究工作的物理学家；对有关供电系统、电信、建筑物、飞机和采矿等防雷保护的工程师；对气象学家；对建筑师和医务工作者都是有意义的。

为了使本书更为有用和便于阅读，通常在一些出版物上出现的有关放电现象的难懂和混乱的术语，以及特别是关于闪电放电的术语已尽可能地得到统一，采用的术语已作了明确的定义。

在可预见的未来一段时间内不大可能再写出像目前这样一本有抱负的专著了。那么今后的闪电研究又将立足何处呢？涉及防雷保护的实际问题可以说大体上已得到解决。架空线不再会每遭一次雷击，就使供电中断；电信干扰能减小到可容许的电平；地面或地下的普通建筑物和极易受损的设备可以妥善地得到保护；过去飞机制造商和飞机驾驶员遇到的大部份困难已被克服；预测雷击可能性的报警系统已被改善，虽然破坏性的森林火灾尚不能防止，但对有关因素的了解已取得显著的进展。

列举的实际成就给人的印象是深刻的。大多数基础资料应归功于物理学家的的工作，然而物理学家和气象学家所撰写的各章都

清楚地强调了关于闪电、长电火花和雷雨云这些有待解决的问题。老一辈的研究工作者乐于把这些问题解决留给有才干的年青一代。

还有一些尚处于摇篮时期的、没有系统研究而又争论不休的课题如：球状闪电、云的催化和云电荷的选择放电（比如说，用激光射束进行）就是典型的例子。如果这些课题的讨论被略去了，本书将是不完善的。我深以为憾的是，未能物色到一位作者阐述闪电对大气化学成分的影响，但至少有人提到了生命前合成的这个引人入胜的问题。

正是无巧不成书，本书手稿是在美国成立二百周年纪念日只有几天的日子里送往出版社去的。独立宣言的签字人之一就是本杰明·富兰克林。富兰克林是一位卓越务实的人物，他在1761年9月20日的一封信中写道：“不能用于实践的哲学有什么意义呢？”[I.B.Cohen(1941)“本杰明·富兰克林的实验”，马萨诸塞州哈佛大学坎布里奇出版社，第386页]，在1749年（同书第219页）写的一篇文章中他指出：“认识自然界执行自然规律的方式，对我们来说从来不是很重要的；如果我们能够认识规律本身的话，这就足够了。”富兰克林是第一个建立控制闪电放电某些规律的人。我真挚地希望，本书在阐述自然界是如何执行她的规律的知识方面也具有某些重要性。

R.H.Golde

1977年5月

目 录

译者前言

编著者序(摘译)

第一章 雷雨云	C. B. Moore B. Vonnegut	1
1. 引言		1
2. 雷暴的发生		2
3. 雷雨云的发展		4
3-1 对流		4
3-2 降水		12
3-3 起电		19
4. 雷雨云周围的电状况		22
4-1 导电性		22
4-2 尖端放电电流		26
4-3 降水输送的电荷		28
4-4 雷雨云中的电荷分布		29
4-5 产生闪电所需要的电场强度		33
5. 云的起电机制		34
5-1 降水支配的过程		34
5-2 对流起电机制		36
5-3 基于接触电位差的起电假说		37
5-4 对满意的云起电假说的要求		38
6. 雷雨云的人工影响		39
7. 小结		41
第二章 尖端放电	J. Latham和I. M. Stromberg	42
1. 引言		42
2. 尖端放电机制		43
3. 人造尖端的放电		44

4.地面的尖端放电	46
5.洋面上的电晕放电	52
6.雷雨云中的电晕放电	55
第三章 地闪	K. Berger 60
1.早期的研究	60
1-1 磁钢棒测量法	60
1-2 雷电电流特性记录仪	60
1-3 脉冲电压记录仪	61
1-4 阴极射线示波器	61
2.远距离记录闪电	61
2-1 概论	61
2-2 闪电的时间特征	68
3.闪电类型	73
3-1 定义	73
3-2 闪电类型的说明	73
4.闪电研究结果和记录站	77
4-1 雷电流记录仪	77
4-2 帝国大厦	78
4-3 圣萨尔瓦托山	79
4-4 其它记录站	97
5.地闪的物理图象	106
5-1 雷雨云中的电荷分布	106
5-2 尖端放电	107
5-3 从电晕到先导电弧的转化	108
5-4 梯级先导	112
5-5 先导至回击的转化	113
5-6 第一回击	117
5-7 多闪击闪电	120
5-8 随后闪击	121
5-9 云中正电荷的放电	122
5-10 闪击电位和闪电能量	123
6.展望	125

第四章 云内闪电M. Brook T. Ogawa 127

1. 引言	127
1-1 概况	127
1-2 研究方法	128
2. 电场和电荷的分布	129
2-1 电场观测	129
2-2 简化的电荷分布所形成的电场	131
3. 电场变化	132
3-1 观测资料	132
3-2 云闪模式	134
3-3 电荷高度	134
3-4 电荷变化和电矩变化	136
4. 云闪的初始流光	142
4-1 电场变化曲线的分类	142
4-2 初始流光	143
4-3 多站观测	149
4-4 倾斜流光	150
5. K 变化	154
5-1 观测	154
5-2 K 变化的特性曲线	155
6. 照相分析	156
7. 云闪的辐射	158
8. 小结与结论	162

第五章 长火花T. E. Allibone 165

1. 引言	165
2. 单极性雷电冲击电压和操作冲击电压的击穿	166
2-1 击穿特性概述	166
2-2 在雷电冲击电压条件下, 棒-板、棒-棒和球-板 间隙的击穿	167
2-3 在操作冲击波条件下的击穿	171
2-4 输电线周围的窗隙击穿	178
2-5 分别加压的两相导线之间的击穿	179

2-6 空气密度和湿度的影响	180
2-7 时延、标准偏差和耐压	181
3. 交流电压和直流电压下的击穿	182
4. 火花形成的物理机制	184
4-1 先导放电和主放电机制	184
4-2 正先导放电	191
4-3 棒-板间隙的负极性放电	203
4-4 球-板放电	207
5. 有待进一步研究的课题	208
第六章 闪电光谱学	R. E. Orville 210
1. 历史	210
2. 实验方法和定性结果	212
2-1 狭缝光谱仪	212
2-2 无狭缝光谱仪	213
2-3 用光电探测器的光谱仪	220
2-4 校准方法	223
3. 定量分析	223
3-1 引言	223
3-2 理论	224
3-3 回击分辨的光谱学结果	228
4. 今后的实验	234
第七章 雷电流及有关参量	R. H. Golde 235
1. 历史概况	235
1-1 概论	235
1-2 早期的估算	236
2. 雷电流的时间分辨	238
3. 电流幅值	240
3-1 引言	240
3-2 向下放电	240
3-3 向上放电	249
4. 电流波形	250
4-1 向下放电	250

4-2 向上放电	261
5. 有关参量	262
5-1 电荷	262
5-2 电矩	267
5-3 作用积分和能量	268
6. 各参量间的关系	269
7. 展望	270
第八章 天电和无线电噪声.....E. T. Pierce	272
1. 定义和引言	272
2. 闪电引起的天电	273
2-1 概述	273
3. 闪电引起的天电——源效应	274
3-1 概述	274
3-2 频率低于300千赫的信号	279
3-3 频率高于300千赫的信号	284
4. 闪电引起的天电——传播效应	286
4-1 频率低于300千赫时的传播	286
4-2 频率高于300千赫时的传播	289
4-3 小结	289
5. 远雷暴的定位	291
5-1 引言	291
5-2 多站系统	291
5-3 单站法	293
5-4 小结	294
6. 无线电噪声及特殊问题	295
6-1 无线电噪声——概况	295
6-2 啸声	298
6-3 卫星探测	299
6-4 舒曼 (Schuman) 共振	300
6-5 特殊的噪声源	302
6-6 电磁脉冲	302
第九章 雷.....R. D. Hill	304

1. 引言	304
2. 实验方法和观测结果	305
2-1 1960年以前的方法	305
2-2 1960年以后的方法	306
2-3 最近的方法和结果	307
3. 雷的理论	312
3-1 一般概念	312
3-2 成雷的闪电通道理论	312
3-3 雷的产生	314
4. 次声	321
4-1 观测	321
4-2 产生次声的理论	322
5. 与雷有关的其它课题	324
第十章 球状闪电	S. Singer 325
1. 性质	325
2. 理论	328
3. 对球状闪电持怀疑的论点	330
3-1 概况	330
3-2 摄影证据	331
3-3 光幻视	333
3-4 球状闪电与其它大气现象的关系	335
4. 球状闪电理论的近代研究	336
4-1 概况	336
4-2 Kapitsa的射频理论	338
4-3 等离子体的性质	340
4-4 核反应理论	341
4-5 各方面的特性	344
4-6 相干辐射的理论	345
4-7 由地闪形成球状闪电	346
5. 展望	350
第十一章 测量技术	R. B. Anderson 351
1. 引言	351

2. 电场	351
2-1 测量原理	351
2-2 静电电场强度的测量	352
3. 电场变化	362
3-1 静电场变化	362
3-2 电磁场变化	365
4. 雷电流的波形	369
5. 闪电密度	371
5-1 天电	371
5-2 闪电计数器	372
6. 结论	375
第十二章 闪电频数.....S.A. Prentice	376
1. 引言	376
2. 闪电的空间和时间分布	377
2-1 概述	377
2-2 测定闪电发生的方法	380
2-3 闪电发生的资料	383
2-4 讨论	388
3. 闪电发生率和其它参数之间的关系	390
3-1 概述	390
3-2 闪电发生率和雷暴的统计分析	391
3-3 闪电发生率和纬度	393
3-4 闪电发生率和降水	393
3-5 讨论	395
4. 云闪与地闪之比	396
4-1 概述	396
4-2 基本要素	396
4-3 各种估计的比值	397
4-4 经验关系式	397
4-5 讨论	398
5. 物体高度和地形对地闪的影响	398
6. 认识不足的地方	401
参考文献	403

第一章 雷 雨 云

C.B. Moore

(新墨西哥矿业技术学院，)
(美国新墨西哥州索科劳市)

B. Vonnegut

(纽约州立大学奥尔巴)
(尼分校，美国纽约州)

1. 引 言

闻雷是气象学家将风暴分类为雷雨云或雷暴的必要条件。这一独特而强烈的声学现象再没有其它的自然来源，因而鸣雷就必然有闪电存在。这些雷暴必定由强对流积雨云构成，并往往伴有强烈的阵风和降雨，有时伴有冰雹或降雪。雷雨云常常是大气不稳定的结果，当地表附近的暖、湿空气上升从而置换高空的较稠密的空气时，雷雨云就发展。上升置换过程常常使大气水汽凝结而形成可见的小水滴云。这时，与水汽相变有关的热能使上升置换过程加速：水汽凝结释放的汽化热将增强上升气流，而凝结水的蒸发冷却将有助于驱动下沉气流，这些下沉气流可以置换某些云下上升的气流。

实际上，雷雨云是一部以水汽作为热传递原动力的大型大气热机。大气热机的输出是雷暴产生的垂直和水平气流的机械功、对形成闪电放电的自由电荷所作的电功、以及雨或雹之类的凝结物由云底流出和小冰晶由云顶流出。此外，雷雨云增加了大气的局地稳定度、进行了水平动量的垂直输送。据信，它还维持了大气相对于地球的电位。白天期间，高层风由卷状云顶中吹走的雪晶将很多入射太阳辐射反射回宇宙空间，因此减少了太阳对地表的加热，同时也抑制了其它雷雨云的发展。

雷雨云中产生这些活动的作用过程，是复杂多变而又了解很差的。由于雷雨云是富有湍流的危险的庞然大物，它的内部难以

深入，因而关于雷雨云内各种状况的资料也难以取得。本章编入我们已知的一些认识并对有关悬而未决问题的一些猜想进行讨论。

2. 雷暴的发生

根据气候观测资料、卫星观测资料以及电学观测资料的估计表明，在任一时刻，全球表面上连续发展着大约1,000个雷暴。虽然雷暴活动主要出现在较低纬度，但有时在两极地区也能观测到。根据雷暴对流起源所预期的分布，与雷暴的全球分布相符合。在垂直对流活动处于极大值的地方和时间即可找到雷暴活动的最大频数，对流活动大多数由辐射过程所控制：太阳加热使与其垂直的表面上每天约以1千瓦/米²的热流入量而增温，但对流层上层却由于水分子和气溶胶粒子的向外热辐射而不断冷却。当地球表面转到太阳照射时，新的雷暴在这一地区形成，于是，雷暴发展的波动每天总是向西移动。

雷暴通常发生在温暖的海岸上，日出之后因为陆地被太阳辐射加热，因而产生由海洋吹向内陆的海风。类似地，因为山脉的加热在山谷之前，因而它们时常有助于在不稳定大气中产生对流。在全世界许多地方，雷暴也发生在山区。

当冷空气遇到较暖、较湿的空气时，前者向下滑动，后者向上抬升，从而产生强对流活动。除了气团对流（有时叠加在其上）而外，发展旺盛的雷暴也沿着暖空气在前的活跃冷锋和飚线产生。虽然大多数雷暴在春季和夏季的中午前后发展（见12.2-3-3和13.3）^①，此时对流位势常为最大并有足够的水汽，但作为锋面活动的结果，在中纬度一年四季都能观测到雷暴。进而言

① 本书以这种方式表示章节，圆点前是章数，圆点后是节数，如13.3表示第十三章第三节，下同。——译者