

涂山山,张科杰,史雅静,等.对滚球法计算雷击防护范围的改进[J].暴雨灾害,2010,29(1):85-88

对滚球法计算雷击防护范围的改进

涂山山^{1,2},张科杰¹,史雅静¹,马春波²,敖发良²

(1.湖北省防雷中心,武汉 430074;2.桂林电子科技大学信息与通信学院,桂林 541004)

摘要:基于最少时间最大概率原理,定量分析当雷暴云在高层建筑物附近移动时落雷点以及落雷区域的概率分布,提出临界高度(Z_c)、临界半径(ρ_c)以及概率系数(E_{i0})的概念。在此基础上,给出高概率落雷区域划分指标,即: $E_{i0} > 1$ 的区域为危险区域, $E_{i0} < 1$ 的区域为安全区域, $E_{i0} = 1$ 的区域为临界区域。同时,从滚球法计算雷电保护范围的局限性出发,基于概率理论定量给出一个计算雷电保护范围的数学模型。

关键词:滚球法;雷电防护范围;落雷区域;概率系数

中图分类号:P427.32 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2010)01-0085-04

1 引言

雷击保护范围的研究一直是雷电防护研究中的重要课题。20 世纪 70 年代以来,随着现代探测技术装备不断发展,使更深入地观测与研究雷暴内部电结构及其与动力场、微观场之间的关系成为可能。如 Mansell E R 等^[1]对雷暴发生时电荷运动过程进行了微观研究,并在文献[2]、[3]中建立了数字化雷暴模型; Tessendorf S A 等^[4]利用雷达和卫星遥感等技术,也对雷暴进行了微观观测。在国内,郭凤霞等^[5]通过数值模拟方法,分析了不同空间电荷结构;谭涌波^[6]对闪电放电过程中电荷与电位分布的相互关系进行了建模;张义军等^[7]还系统研究了“雷暴电学”。这些工作为定量分析落雷区域,研究雷击保护范围奠定了科学基础。

本文基于 R Briet 对最少时间最大概率原理的研究^[8-9],定量分析在雷暴云移动过程中落雷点分布情况,提出概率系数(E_{i0})这一重要参数,重点研究落雷区域划分,并通过临界高度(Z_c)这一概念,指出建筑物高度与遭受雷击概率之间的关系。在此基础上,建立更科学的雷电保护范围计算数学模型,弥补传统滚球法在实际操作中的不足,并论证在特定情况下两者可以达到统一,为雷电闪落区域研究及防雷设计施工与检测工作提供科学依据。

2 最少时间最大概率原理在闪电过程中的应用

2.1 原理简述

假设在系统中,观测到的所有可能结果的总次数为 N ,而某一结果所观测的发生次数为 $n(n < N)$,其中 n

与完成该结果所用时间 t 成反比。具体说,假设 t_k 为实现结果 k 这一过程的时间, T 为持续观测时间,那么可预期有 n_k 个结果 k 出现(假设产生结果 k 的过程连续不断发生),则有

$$n_k = T \cdot (1/t_k) = T \cdot f_k \quad (1)$$

其中完成该过程的时间倒数 f_k 为结果 k 的脉冲重复频率或重复率。此外,若有 m 个不同结果,那么所有结果出现的总次数 N 即为 m 个 n_k 的总和,即

$$N = \sum_{k=1}^m n_k = T \cdot \sum_{k=1}^m (1/t_k) \quad (2)$$

若设在观测中出现结果 k 的概率为 P_k ,即出现结果 k 的次数与所有可能出现结果总次数的比值为

$$P_k = \frac{n_k}{N} = \frac{T \cdot (1/t_k)}{T \cdot \sum_{k=1}^m (1/t_k)} = \frac{1/t_k}{\sum_{k=1}^m (1/t_k)} \quad (3)$$

由式(3)可知,概率 P_k 与观测时间 T 无关,其观测时间应取“较长的持续时间”,这一持续时间是相对的,且是建立在获取尽可能完整的结果群过程上。如作为某个慢动作过程,为获取某一结果群,“较长的持续时间”可能是数小时、数天或数年;而对于那种大量频繁发生的事件群,“较长的持续时间”可能只是 1 s。

2.2 原理应用

闪电是大气中的一种放电现象,是全体带电粒子从闪电源到泄流源的一个转移过程。每个带电粒子的转移时间为转移距离与其速度的比值,并非所有粒子都有相同速度,但绝大多数粒子的运动速度服从某种分布模型,并可得到其平均速度^[7]。为找出绝大多数粒子的运行途径,设法将闪电微观运动过程建立在最少

收稿日期:2009-09-21;定稿日期:2010-03-10

基金项目:国家自然科学基金(60862001)、广西信息与通讯技术重点实验室基金(10908)、广西教育厅基金(200808MS004)共同资助

作者简介:涂山山,男,1983年生,硕士研究生,主要从事信息技术与安全研究。E-mail: tuss008@sina.com

时间最大概率原理上。即：将放电过程中粒子运行时间作为完成整个系统的时间，它是由每一阶段运行路程除以该阶段所有粒子平均速度的总和。

在研究闪电的观测时间时，根据费马原理，闪电过程符合最少时间最大概率原理，且通常以毫秒作为时间单位。假设闪电源端存放着 1 库伦电荷，整个放电过程视为一个系统过程，若放电电流为 1 kA，即 6.25×10^{18} 个带电粒子在千分之一秒内完成整个传导过程。

3 雷暴过程中落雷点分布的定量分析

当闪电击穿空气时，绝大多数带电粒子的运行通道将遵循最少时间原理，也就是最大概率通道。另外还有低概率通道，就是在人造闪电或自然界闪电中见到的分支。这些分支电流遵循同样的电路分布法则欧姆定理。图 1 是当雷电闪落在接闪装置时的示意图。

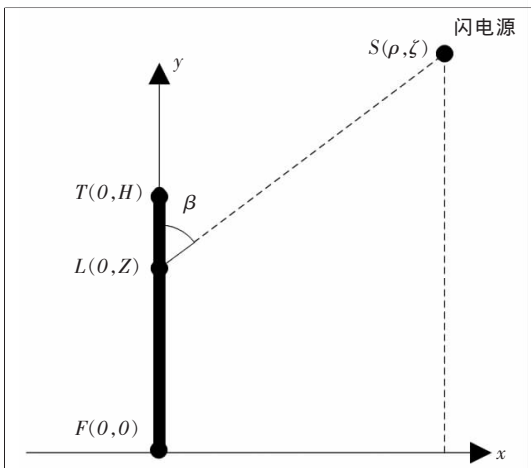


图 1 雷电闪落在垂直接闪装置上的示意图

图 1 中，定义原点 F 、接闪装置顶点 T 、落雷点 L 以及闪电源 S 构建平面示意图，即 $F(0,0), T(0,H), L(0,Z), S(\rho,\zeta)$ ，则 S 到 L 的距离为 $a = \sqrt{\rho^2 + (\zeta - Z)^2}$ 。闪电在空气中的平均传播速度设为 u_0 ，在整个金属体内的平均传播速度为 u_r 。则 S 直接落雷到地面的时间为 $t_0 = (\zeta/u_0)$ ，而从 S 途径 L 到 F 的时间为 $t_r = [a + (u_0/u_r)Z]/u_0$ 。根据极限原理，当存在角度 $\beta[\cos\beta = (u_0/u_r)]$ 时，可得到最少传播时间 $t_{r,\min}$ ：

$$t_{r,\min} = \left(\frac{1}{u_0}\right) \left(\frac{(\zeta - Z)}{\cos\beta} + Z \cdot \cos\beta\right) \quad (4)$$

为进一步判断雷电是事先闪落在接闪装置上还是直接闪落到地面，在此引入基于式(3)的概率系数 E_{r0} 。这里， E_{r0} 是指落雷在接闪装置的概率 P_r 与直接落雷到地面的概率 P_0 的比值。 E_{r0} 可表示为：

$$E_{r0} = \frac{P_r}{P_0} = \frac{t_0}{t_{r,\min}} \quad (5)$$

根据费马原理，闪电将沿着最短运行时间的路径传播，同时可认为该路径上发生落雷的概率最大。因此，当 $E_{r0} > 1$ 时，雷电闪落在接闪装置上；当 $E_{r0} < 1$ 时，雷电直接闪落在地上；当 $E_{r0} = 1$ 时，雷电将同时闪落在接闪装置以及地面上。这就可解释自然界中闪电同时击中多个目标的现象。

当 $E_{r0} = 1$ 时，令式(4)等于 t_0 ，解得临界高度 Z_r 的表达式为：

$$Z_r = \frac{\zeta}{1 + \cos\beta} \quad (6)$$

此时， Z_r 表示接闪装置上落雷点的最低高度，再通过临界高度可求得临界半径 ρ_r 的表达式为：

$$\rho_r = Z_r \cdot \sin\beta \quad (7)$$

ρ_r 表示闪落在接闪装置上的闪电源与接闪装置之间的最大水平距离。因此，通过式(6)、(7)，可给出雷暴云运动时的落雷分布(图 2)。

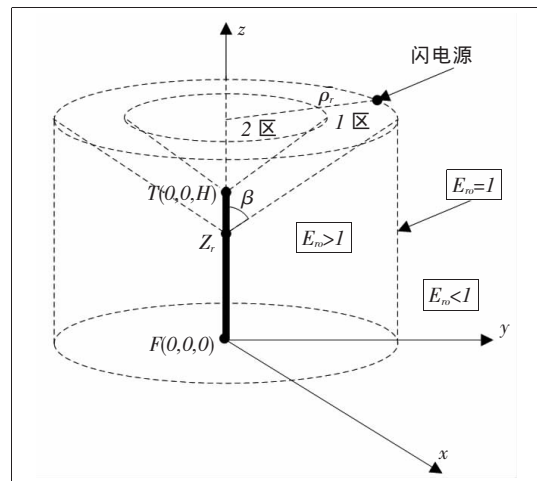


图 2 雷暴云经过时落雷点的分布图

从图 2 中可见，当雷暴云位于临界半径以外时，将直接落雷到地面；而当位于临界半径上时，闪落将出现两个等强度的分支，一条分支直接到其正下方地面，而另一条则闪落在接闪装置的临界高度 Z_r 上，而此时雷暴云开始进入“1 区”。当雷暴云继续向接闪装置靠近时，落雷点逐渐向临界高度上方偏移，直至达到顶点高度 H ，此时雷暴云进入“2 区”。同理，当雷暴云经过顶点上方继续漂移，离开“2 区”后，落雷点会向下偏移，直至达到境界高度 Z_r ，最后直接落雷在地面上。

对于建筑物，将较大概率遭受雷击的区域称为危险区域。因此建立 3 类雷电区域：1)若该区域中 $E_{r0} > 1$ ，则称其为危险区域；2)若该区域中 $E_{r0} < 1$ ，则称其为安全区域；3)当 $E_{r0} = 1$ 时，则定义为两类区域的分界线，即临界区域。

通过该定理推导出的落雷点分布情况，并根据监

测雷暴云的运动轨迹,就能预测发生落雷的最大概率点。需要指出的是,雷击作为概率事件,并不是在雷击范围内最高建筑物就更易遭受雷击。在雷暴云移动过程中,当进入 1 区时,只要超过临界高度 Z_r 的建筑物,遭受雷击的概率都较高,其概率大小与速率比(u_0/u_r)有关。同时,建筑物在高于临界高度的区域,其遭受到侧击雷的概率相对较高。

4 概率法雷电保护范围模型的建立

在 IEC 62305-1^[10]中提出一种利用滚球法计算防雷保护范围的模型,这一传统模型至今仍在防雷科技业务与服务中被广泛使用^[11-13]。本文基于概率法,对该传统计算模型作如下改进。

令 $t_r=t_o$, 可得到临界时的方程式:

$$(u_0/u_r) \cdot Z + \sqrt{\rho^2 + (\zeta - Z)^2} = \zeta \quad (8)$$

根据防雷设计施工实际,速率比(u_0/u_r)往往会出出现小于 1 的情况。因此,可得到分界面为椭圆曲线的旋转曲面,即提出如下数学模型:

$$\left(\frac{\zeta - Z_r}{Z_r}\right)^2 + \left(\frac{\rho - \rho_r}{\rho_r}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

其中 Z_r, ρ_r 可通过式(6)、(7)计算得到。

在高导电性的接闪装置中,速率比(u_0/u_r)将会很小,而在超导体的情况下,其趋近于 0,即 $\cos\beta=0, \sin\beta=1$,那么可得到 $Z_r=\rho_r$,这时滚球法传统计算模型与本文数学模型等价。然而,绝大多数实际情况中,建筑物的整个接闪装置存在较大电阻,速率比(u_0/u_r)往往不等于 0,甚至接近于 1,滚球法传统计算模型就不能准确反映实际的防雷保护范围(图 3)。如今,在防雷设计施工以及检测工作中,这是一个易被忽视的问题。因此,根据式(9),就可推导出更为精确的雷电防护范围。图 3 所反映的概率法计算的雷击防护范围要小于滚球法计算的防护范围。

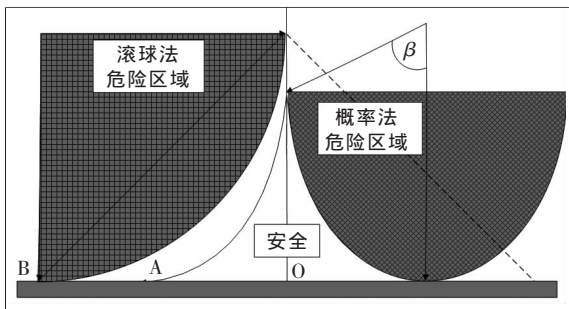


图 3 滚球法与概率法计算保护范围的对比

以铜质结构的接闪装置为例,因电磁波在铜中传播的速度约为光速的 2/3,故取 $u_r=2 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, u_0=1.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,若闪电源高度为 60 m,根据公式(6)、(7)可求得 $\rho_r=59.96 \text{ m}$,OA 与 OB 之间的间距约为 4 cm

(图 3),上述两种计算模型的结果十分接近,其原因在于铜的导电率很小。若以铝铁合金材料的接闪装置为例,由于该合金的电阻率为铜的 100 倍以上, u_r 取到 $1.55 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其结果为 $\rho_r=54.48 \text{ m}$,地面最远安全距离两种接闪装置相差 5 m 之多。

5 小结

本文基于最少时间最大概率原理,定量分析了当雷暴云在高层建筑物附近移动时,落雷点以及落雷区域的概率分布,提出了临界高度、临界半径以及概率系数等重要概念,并指出高概率落雷区域的划分。即:

- 1)若该区域中概率系数 $E_{t0}>1$,则称其为危险区域;
- 2)若该区域中 $E_{t0}<1$,则称其为安全区域;
- 3)当 $E_{t0}=1$ 时,则为临界区域。

同时,本文指出在防雷工程设计施工与检测实践中通常使用的滚球法计算雷击保护范围的局限性,并基于概率理论定量给出计算雷电保护范围的数学模型,并指出特定情况下两者可以达到统一。

为了证明概率法计算雷击保护范围的可信度和实用性,理应给出若干个应用实例加以具体分析与检验,但本文的研究重点在基于概率理论推导克服滚球法局限性的雷电保护范围定量计算模型,两种计算方法在理论上的优劣是显而易见的,至于它们在防雷设计施工与检测实践中是否也具有与理论上一样的优劣表现,还有待于在今后的研究中开展专题试验,也可由各级防雷专业技术人员通过在实践中对其对比使用来检验判断。

参考文献:

- [1] Mansell E R, D R MacGorman, C L Ziegler. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. J Geophys Res, 2005, 110: D1201.
- [2] Mansell R, MacGorman R, Ziegler L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D9):1-14.
- [3] Mansell E R. Electrification and lightning in simulated supercell and non supercell thunderstorm [D]. Doctor of philosophy Dissertation, university of Oklahoma, Norman, 2000:211.
- [4] Tessendorf S A. Lightning and radar observations of two storms observed during STEPS [J]. Preprints 22nd Conference on Aevere local storms, Hyannis, MA. Amer Meteor Soc. 2004: 1-69.
- [5] 郭凤霞,张义军,都秀书,等.雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究[J].高原气象,2003,22 (3):268-274.
- [6] 谭涌波.闪电放电与雷暴云电荷、电位分布互相关系的数值模拟[D].中国科学技术大学,2006.
- [7] 张义军,言穆弘,孙安平,等.雷暴电学[M].北京:气象出版社,2009:98-384.
- [8] R Briët. Verification of the Least Time and Maximum Probability Theory of Lightning Propagation and Theory of Lightning Protection

- [J]. ITEM, 2000: 841-844.
- [9] R Briët. Lightning Myths and Misconceptions [J]. 2000 Department of Defense Electromagnetic Environments Effect (E3) Program Review, 2000(4): 11-14.
- [10] EN, Protection against lightning--Part 1: General principles (IEC 62305-1:2006)[S]. German version EN 62305-1, 2006:1-66.
- [11] 王卫华. 避雷针高度变化及其保护范围的确定[J]. 湖北气象, 2001(4): 31-32.
- [12] 卢友发, 刘翠芝. 建筑物顶避雷针滚球基准面的选取[J]. 河南气象, 2006, 29(1): 65.
- [13] 施广全, 王振会. 雷击灾害风险评估中等效截收面积计算方法研究[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 47-50.

Improvement of Calculating Lightning Protection Range by Rolling Sphere Method

TU Shan-shan^{1,2}, ZHANG Ke-jie¹, SHI Ya-jing¹, MA Chun-bo², AO Fa-liang²

(1. Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074; 2. Information and Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

Abstract: According to the maximum probability theory, the probability distribution of lightning point and region is quantitatively analyzed when the thunderstorm is moving near the high-rise buildings. The concepts of Critical height (Z_c), Critical range (ρ_c) and Probability effectiveness coefficient (E_{i0}) are advanced. On this basis the indexes of high probability lightning region are given: the area in where $E_{i0} > 1$ is dangerous; the area in where $E_{i0} < 1$ is safe and the area in where $E_{i0} = 1$ is critical. Simultaneously, a mathematical model of calculating lightning protection range is put forward based on the probability theory considering the limitation of Rolling Sphere Method.

Key words: Rolling sphere method; Lightning protection range; Lightning region; Probability coefficient

(上接第 75 页)

Study on the Early Warning System for Rainstorm Waterlogging in Wuhan City and its Simulated Results

ZHANG Ping-ping, WANG Li, ZHANG Ning

(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the geography information system for drainage network, a simulation model for waterlogging in Wuhan City was established on the basis of two-dimensional unsteady flow theory and the technique of nonstructural and irregular meshes. The surface water flow, open channel water flow and river flow in the city are the main objects to be simulated. Combined with the fine rainfall forecast operation and post-processing system of waterlogging display, an early warning and forecast system for rainstorm waterlogging was built. The system was tested in the rainstorm waterlogging process in Wuhan City in May 2008. The forecast accuracy of the max waterlogging area exceeds 70%, and the errors of the most waterlogging depth are within 20cm, which show that the simulated results mentioned above are better.

Key words: Rainstorm waterlogging in city; Simulation model; Early warning system; Wuhan city