

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.09.026

基于引雷空间理论的建筑物 接闪网格保护效率算法^①

孙蔡亮¹, 曾金全², 林永强¹, 肖稳安³

1. 福建省莆田市气象局, 福建 莆田 351100; 2. 福建省防雷中心, 福州 350001;
3. 南京信息工程大学 大气物理学院, 南京 210044

摘要: 介绍了一种基于引雷空间理论计算建筑物接闪网格的精确保护效率值的算法(引雷空间法), 并通过实际工程案例说明了该方法的应用过程. 通过比较分析得到, 引雷空间法比数理统计法具有更高的本地化与量化程度.

关键词: 引雷空间理论; 数值积分; 接闪网格保护效率

中图分类号: P427.32

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)09-0171-06

接闪器保护效率是雷电灾害区域划分、风险评估和防雷装置设计工作中非常重要的指标和参数之一, 我国闪电探测技术的迅速发展和观测资料的应用, 为该参数的获取提供了有力的数据支撑. 李家启^[1]、黄亚敏^[2]、王学良^[3]等利用数理统计方法分别对重庆和武汉等地区闪电定位资料中雷电流幅值进行回归分析, 将得到的雷电流幅值概率分布情况与文献[4]规定的三类防雷装置滚球半径对应的雷电流幅值进行比较来判定接闪器保护效率(简称数理统计法). 从数理统计法原理可知, 其量化程度只具体到建筑物防雷装置类别, 而对建筑物本身及接闪器布设情况缺乏描述, 因此对具体工程的指导意义相对有限. 本文在前者研究方法的基础上, 利用引雷空间理论将建筑物尺寸、接闪网格敷设高度、接闪网格尺寸同时引入接闪网格保护效率计算模型中, 并借助 Matlab 辅助计算软件的数值积分功能计算得到接闪网格保护效率的精确概率值, 有效提升了计算结果的量化和本地化程度.

1 引雷空间模型

1.1 雷击距

我国建筑物防雷采用电气几何模型(EGM)滚球法, 该模型的表达式为:

$$r = 10I^{0.65} \quad (1)$$

式中: r 为雷击距, 单位为 m. 这种模型表示雷击距只与雷电流幅值有关, 但实际情况是地面突出物体随着高度的增高会导致周围电场的畸变从而导致雷击距增大, 因此国外学者在 EGM 模型基础上提出了引入高度函数的改进模型, 本文采用 Petrov^[5] 雷击距修正公式:

$$\left. \begin{aligned} r_+ &= 1.08I^{\frac{2}{3}} \ln\left(\frac{h}{15} + 10\right) \\ r_- &= 0.8I^{\frac{2}{3}} (h + 15)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

① 收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013Y0021).

作者简介: 孙蔡亮(1984-), 男, 湖北宜昌人, 硕士, 工程师, 主要从事防雷与电磁兼容研究.

式中: r 为雷击距, 下标 +、- 分别表示正、负极性雷电流, 单位为 m; I 为雷电流幅值, 单位为 kA; h 为建筑物高度, 单位为 m. 为简化推导过程, 将(2)式表示为

$$r = kI^{\frac{2}{3}} f(h) \quad (3)$$

式中: $k_+ = 1.08$, $k_- = 0.8$, $f_+ = \ln\left(\frac{h}{15} + 10\right)$, $f_- = (h + 15)^{\frac{2}{3}}$.

1.2 雷电流幅值

目前主要通过闪电探测历史数据的统计方法得到雷电流幅值超过(或小于)某一数值的累积概率函数, 以此作为雷电流分布规律表达式. 我国电力行业规范 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定, 对于平均年雷暴日在 20 d 以上的地区, 用于工程防雷计算的雷电流幅值超过 I 的累积概率计算公式为

$$P_s = 10^{-I/88} \quad (4)$$

式中: I 为雷电流幅值, 单位为 kA, P_s 为超过 I 的雷电流幅值累积出现概率. 而对于雷电活动不频繁的少雷地区(年平均雷暴日在 20 d 以下), 所测得的雷电流幅值一般也较小, 其计算雷电流幅值的累积概率公式为

$$P_s = 10^{-I/44} \quad (5)$$

另一种形式是 2005 年国际 IEEE 组织推荐使用的雷电流幅值的累积概率表达式:

$$P_s = \frac{1}{1 + (I/31)^{2.6}} \quad (6)$$

式中: I 为雷电流幅值, 单位为 kA, P_s 为超过 I 的雷电流幅值累积出现概率.

两种雷电流幅值累积概率函数可以总结为两种一般表达式:

$$P_s = 10^{-I/a} \quad (7)$$

$$P_s = \frac{1}{1 + (I/b)^c} \quad (8)$$

式中: a, b, c 为常数, 可由地区雷电流幅值统计数据拟合得到. 而小于 I 的雷电流幅值累积出现概率表达式即:

$$P_l(I) = 1 - P_s(I) \quad (9)$$

式中: P_l 为小于 I 的雷电流幅值累积出现概率.

1.3 雷击距累积概率密度函数

根据(3)式得到雷电流的表达式:

$$I = \left(\frac{r}{kf(h)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

将(10)式带入(7)式或(8)式, 则可以得到雷击距的累积概率表达式 $P_s(r)$, 再根据式(9)式可求出小于 I 的雷击距累积概率函数 $P_l(r)$. 对 $P_l(r)$ 求 r 的一阶倒数, 可得雷击距累积概率密度函数公式:

$$q(r) = \frac{dP_l(r)}{dr} \quad (11)$$

2 接闪网格保护失效模型与接闪网格保护效率计算方法

规范^[4]规定接闪网格保护建构筑物模型是采用随机大小半径为 r (雷击距)的滚球滚遍整个屋面, 若滚球被接闪网格托起无法触及建筑本体, 则表示接闪网格能够防御雷击距为 r 的雷击, 若滚球触及建筑本体, 则表示接闪网格保护失效. 但这种方法只能判定接闪网格能够防护雷击雷电流的最小值, 却无法体现建筑物所在区域雷电分布规律和网格尺寸分布对实际保护效率的具体影响. 建立单个接闪网格保护失效模型,

计算出接闪网格的失效受雷面积 $A(r)$ 和引起接闪失效的雷击(距)变化范围 $(0, r_{\max})$, 然后在 $(0, r_{\max})$ 范围上对失效受雷面积 $A(r)$ 与雷击距概率密度函数 $q(r)$ 的乘积进行积分, 则可以计算出单个接闪网格保护失效年雷击次数 N_{fi} 即

$$N_{fi} = N_g \int_0^{r_{\max}} A(r) \cdot q(r) dr \quad (12)$$

设某单个接闪网格尺寸为 $L_i \times W_i$ (其中 L_i 为长度, W_i 为宽度, $L_i \geq W_i$, 单位为 m), 接闪网格支持卡高度为 p , 那么能绕过该接闪网格引起接闪失效的最大雷击距如图 1 所示, 其计算公式为

$$r_{\max}^2 = (r_{\max} - p)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2$$

$$r_{\max} = \frac{p}{2} + \frac{W_i^2}{8p} \quad (13)$$

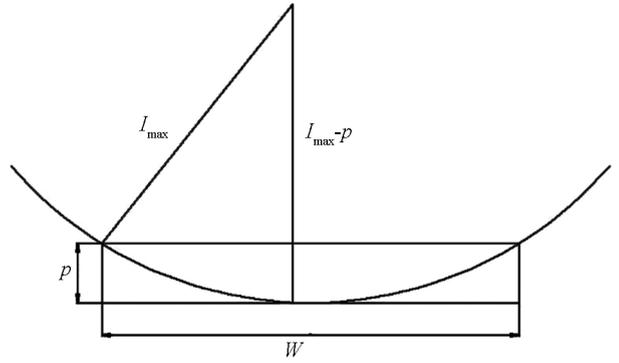


图 1 接闪网格失效最大雷击距

图 2 为雷击接闪网格失效的一般情况, 图中两边滚球与屋面接触点之间的部分 $L_i - d$ 或 $W_i - d$ 即为失效受雷面积的边长 ($d = 2\sqrt{p(2r - p)}$), 但当雷击距 $r \leq p/2$ 时, 接闪网格对屋面保护已完全失效, 即 $d = 0$ (图 3), 因此失效受雷面积为:

$$A(r) = \begin{cases} (L_i - d)(W_i - d), & \text{当 } p/2 < r < \frac{p}{2} + \frac{W_i^2}{8p} \\ L_i W_i, & \text{当 } 0 < r \leq p/2 \end{cases}$$

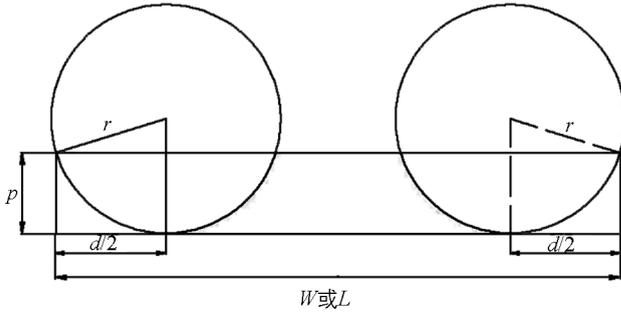


图 2 雷击接闪网格失效的一般情况

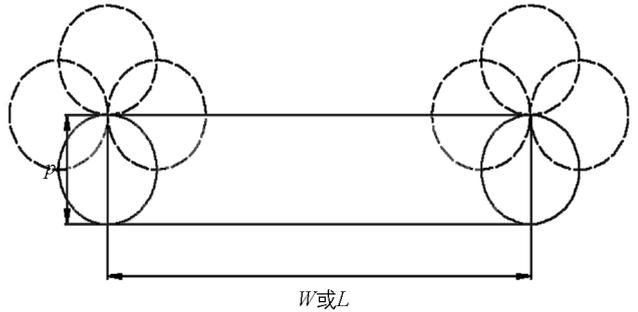


图 3 当 $r \leq p/2$ 时雷击接闪网格失效的情况

综合图 2 和图 3 两种情况, 将(12)式中对 r 的积分分为 $\left[0, \frac{p}{2}\right]$ 和 $\left[\frac{p}{2}, \frac{p}{2} + \frac{W_i^2}{8p}\right]$ 两个区间, 因此(12)式可改写为:

$$N_{fi} = N_g \left[\int_0^{p/2} L_i W_i q(r) dr + \int_{p/2}^{p/2 + \frac{W_i^2}{8p}} (L_i - d)(W_i - d) q(r) dr \right] \quad (14)$$

$$d = 2\sqrt{p(2r - p)}$$

建筑物屋面整体接闪网格保护失效年雷击次数应为所有单个接闪网格保护失效年雷击次数之和, 即:

$$N_f = \sum_{i=1}^k N_{fi} \quad (15)$$

式中 k 为建筑物屋面网格数量. 考虑地区雷电流正负极性占比不同, 根据文献[6]中加权方法处理, 得到建筑物接闪网格最终计算公式:

$$N_f = \mu_+ N_{f+} + \mu_- N_{f-} \quad (16)$$

式中: μ_+, μ_- 分别为正、负极性地闪发生次数占总地闪次数的比例; N_{f+}, N_{f-} 分别为正负雷电极性下计算的接闪网格保护失效年雷击次数。

接闪网格保护失效年雷击次数与建筑物年雷击次数的比值即接闪网格保护失效概率, 用 1 减去该值即求出建筑物接闪网格保护效率, 具体公式为

$$P = 1 - \frac{N_f}{N} = 1 - \frac{N_g \left[\int_0^{\frac{p}{2}} L_i W_i q(r) dr + \int_{\frac{p}{2}}^{r_{\max}} (L_i - d)(W_i - d) q(r) dr \right]}{k N_g A_e} \quad (17)$$

式中: N 为建筑物年预计雷击次数, 单位为次 / (km² · a); A_e 为与建筑物截收相同雷击次数的等效面积, 单位为 m²; 康春华等人^[7] 对基于引雷空间模型和规范^[4] 中公式 A.0.1 两种方法所计算建筑物年雷击次数的结果比较发现两者具有较高的吻合度, 因此本文为简化计算直接利用规范中的经验公式计算建筑物年雷击次数。

3 接闪网格保护效率计算实例

3.1 基于引雷空间理论法

以福建省莆田市某建筑防雷工程设计为例, 该建筑按第三类防雷建筑物, 钢筋混凝土框架结构, 高度 $h = 23$ m, 周围建构物高度与其相对接近, 其屋面接闪网格设置见图 4, 接闪带、网支持卡高度为 $p = 0.1$ m, 由此可得

$$d = 2\sqrt{0.1(2r - 0.1)}$$

结合文献^[8] 对莆田市闪电定位数据分析得出的结论, 可获得以下数据:

$$\mu_+ = 3.59\% \quad \mu_- = 96.41\%$$

$$P_{s+} = \frac{1}{1 + (I/49.5)^{4.842}}$$

$$P_{s-} = \frac{1}{1 + (I/34.64)^{3.297}}$$

因此根据(9)式和(10)式, 得到 $P_l(r)$ 表达式:

$$\left. \begin{aligned} P_{l+}(r) &= 1 - \frac{1}{1 + (r/130.98)^{7.26}} \\ P_{l-}(r) &= 1 - \frac{1}{1 + (r/67.34)^{12.45}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将(18)式代入(11)式可以求出雷击距累积概率密度函数公式 $q(r)$ 表达式, 但由于结果较为复杂, 因此不具体列出。

对于网格 ①, $L_1 = 9.2$ m, $W_1 = 8.9$ m, 根据(13)式计算得到:

$$r_{\max} = \frac{p}{2} + \frac{W_i^2}{8p} = 99.06$$

$$N_{f1+} = N_g \left[\int_0^{\frac{p}{2}} L_1 W_1 q_+(r) dr + \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2} + \frac{W_1^2}{8p}} (L_1 - d)(W_1 - d) q_+(r) dr \right] =$$

$$N_g \left[\int_0^{0.05} 81.88 q_+(r) dr + \int_{0.05}^{99.06} (9.2 - 2\sqrt{0.1(2r - 0.1)}) (8.9 - 2\sqrt{0.1(2r - 0.1)}) q_+(r) dr \right] \approx$$

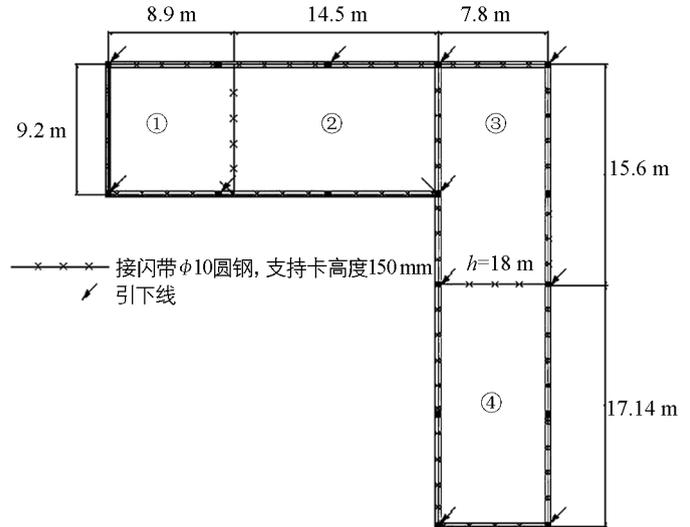


图 4 屋面接闪网格平面图

$$N_g \int_{0.05}^{99.06} (9.2 - 2\sqrt{0.1(2r - 0.1)}) (8.9 - 2\sqrt{0.1(2r - 0.1)}) q_+(r) dr = 0.0999 N_g \quad (19)$$

由于(19)式中前后两部分被积函数在各自积分区间上定积分无法使用解析的方法求出其原函数,因此采用被积函数的插值多项式予以替代,即数值积分方法,可利用 Matlab 软件的数值积分函数求得结果;结果显示 $q_+(r)$ 在区间(0, 0.05)上积分结果数量级远小于后半部分,因此可以忽略不计。

参照上述方法,可计算负极性雷电流和其余网格相应失效雷击次数(表1)。

表1 网格失效年雷击次数

网格 /m	N_{f+}	N_{f-}
① 9.2×8.9	$0.0999 N_g$	$3.1333 N_g$
② 14.5×9.2	$0.7382 N_g$	$16.3148 N_g$
③ 15.6×7.8	$0.0845 N_g$	$4.4026 N_g$
④ 17.1×7.8	$0.0990 N_g$	$5.1646 N_g$
N_f	$1.0216 N_g$	$29.0153 N_g$

依据(16)式,可获得该建筑屋面网格失效年雷击次数:

$$N_f = \mu_+ N_{f+} + \mu_- N_{f-} = (3.59\% \times 1.0216 + 96.41\% \times 29.0153) N_g = 28.0103 N_g$$

利用文献[1]计算建筑物截收相同雷击次数的等效面积 A_e 。过程不作详细描述,直接利用公式法或 Autocad 作图法均可算出 $A_e = 17379.72 m^2$,因此可根据(17)式计算雷击建筑物接闪网格保护效率为:

$$P = 1 - \frac{28.0103}{17379.72} = 99.84\%$$

3.2 数理统计法

按文献[3]规定第二类防雷建筑物滚球半径为45 m,根据(1)式可以计算出第二类防雷建筑物对应拦截的最小雷电流幅值为10.1 kA,也就是说雷电流幅值小于10.1 kA时认为接闪网格失效,那么采用数理统计法计算网格保护效率:

$$P' = \mu_+ (1 - P_{s+}(10.1)) + \mu_- (1 - P_{s-}(10.1)) = 98.37\%$$

4 本文方法改进之处

第3节同时用数理统计法和引雷空间法对工程案例进行了接闪网格保护效率计算,通过比较得到,引雷空间法在数理统计法充分利用闪电定位资料优点的基础上作出了如下改进:

1) 模型参数本地化程度高。相比数理统计法,引雷空间数学模型引入了建筑物高度、网格尺寸、网格敷设高度、网格数量等参数,较好地体现了不同工程间参数差异性对网格保护效率的影响。

2) 计算过程量化程度高。文献[3]中提到“雷电流幅值小于上述幅值时,接闪器保护范围内被保护物体,有可能遭受直击雷的危害”,所指的“可能”即本文第2节图2中展示的满足上述条件时闪电同时具有被网格拦截成功和失败的可能性,但因其模型受量化程度局限,在实际计算时忽略了被网格拦截成功(小概率)的情况,因此采用引雷空间法得到的计算结果更为精确。

5 结束语

本文以引雷空间理论为基础,将接闪网格拦截雷击失效的过程模型化,对雷击距累积概率密度函数进行空间积分以获得接闪网格保护失效年雷击次数,进而计算雷击建筑物接闪网格的保护效率,并以莆田某建筑为例详细介绍该方法的应用过程。结果显示,基于引雷空间理论对雷击距累积概率密度函数的空间积分方法定量化程度高于数理统计法,而且本文建立网格接闪模型将建筑物尺寸、接闪网格尺寸,闪电定位数据等参数均加以利用,在雷电灾害风险评估和防雷设计本地化上有较大进步。

参考文献:

- [1] 李家启. 建筑物雷电综合防护效率分析与评估 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(3): 172-176.
- [2] 黄亚敏, 张静哲, 李家启, 等. 重庆市北碚区雷电气候特征及防护效率分析 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 39(11): 176-180.
- [3] 王学良, 刘学春, 史雅静. 武汉地区云地闪电特征及防护效率研究 [J]. 气象科技, 2010, 38(6): 805-809.
- [4] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50057-2010 建筑物防雷设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [5] PETROV N I, WATERS R T. Determination of the Striking Distance of Lightning to Earthed Structures [J]. ProcRoy, LodA, 1995, 450(1): 589-601.
- [6] 魏 明. 雷电电磁脉冲及其防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 30-32.
- [7] 康春华, 张小青, 陈 校. 方形建筑物年雷击率预测 [J]. 电气应用, 2006, 25(6): 111-113.
- [8] 孙蔡亮, 王万宣, 王益鑫. 基于 ADTD 闪电定位系统的莆田市雷电特征分析与应用 [J]. 海峡科学, 2014(4): 7-9.

Algorithm of Protection Efficiency of Lightning Grids Based on Collection Volume Theory

SUN Cai-liang¹, ZENG Jin-quan²,
LIN Yong-qiang¹, XIAO Wen-an³

1. Putian Meteorological Bureau, Putian Fujian 351100, China;

2. Fujian Lightning Protection Center, Fuzhou 350001, China;

3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: An algorithm based on collection volume method(CVM), which is for calculating the accurate protection efficiency of lightning grids, is proposed in this paper, and the application process of the method is illustrated with an actual project case. By analysis, the collection volume method is proved to have a higher localization and quantization degree than the mathematical-statistic method.

Key words: collection volume method(CVM); numerical integration; protection efficiency of lightning grids

责任编辑 潘春燕