

雷闪发生前空间电场的分析与研究

主要是从电场的角度分析雷闪的发生机理，并详细探讨地面为无限大均匀导体时，空间电场强度的计算方法，最后简述了影响空间电场的重要因素。

苗朋厚 吕 芳/解放军61517部队

0 引言

在防雷设计时，常采用滚球法。滚球法的理论根据是雷闪数学模型，计算公式为

$$h_r = 10I^{0.65}$$

式中， h_r 为雷闪的最后闪络距离或雷击距，在滚球法中称为滚球半径； I 为 h_r 对应的雷电流幅值。

这个模型认为，雷击闪电的发展初期是不确定的，直到先导头部电压足以击穿它与地面目标间的间隙时，也即先导与地面目标的距离等于击距时，才受到地面影响而开始定向^[1]。雷闪的本质是中间介质被强电场击穿后正负电荷在极端时间内（通常在几百微秒以内）发生的强烈中和反应。空间电场强度的大小对雷闪的发生起着决定作用。所以了解雷电发生前夕电场强度的空间分布，将有助于判断雷电的发生位置。另外，模型并没有考虑地面因素对雷闪的影响。实际上，在强电场作用下，地面物体也将产生上行先导，上行先导与下行先导的连接标志着雷击的开始，所以雷击通常发生在电场最强、电离程度最严重和最易产生上行先导的位置。

1 雷电的形成机理与特征

雷电是大气中带电云块之间或带电

云层与地面之间所发生的一种强烈的自然放电现象^[2]，在反应发生的过程中，通常产生强烈的闪电并伴随巨大的声音。

1.1 雷云的形成

目前解释雷云形成的主要理论是重力分离机制，也就是说云雾中的正负电荷是在重力的作用下进行大规模分离的，最终正电荷聚集在云块的上层，负电荷聚集在云块的下层。

炎热的夏天，地面热空气上升、高空冷空气下降，在这种剧烈的对流运动过程中，空气中的粒子受到雨粒子和云粒子的碰撞而发生电离。雨粒子为下降速度显著的水凝物颗粒，云粒子为下降较为缓慢的冰晶颗粒。电离后，负电荷附着在雨粒子上，正电荷附着在云粒子上。这样在地球重力和空气强烈对流的相互作用下，带有负电荷的雨粒子不断下降，带有正电荷的云粒子不断上升，最终形成距地5~10 km高度的云层主要聚集着正电荷，距地1~5 km高度的云层主要聚集着负电荷，它们的总量基本相等。另外，受地面电晕的作用，在云层的最底层，也堆积着少量的正电荷。

雷云中电荷的分布也是不均匀的，有的区域密集，有的区域稀疏，密集区域的电荷量大约有0.1~10 C，而一大块雷云同极性的总电荷可达数百库伦。

1.2 雷电发生的机理与类型

一般而言，天气晴朗时空中导电的离子很少。而在雷暴天气，空气的湿度高，对流迅速，空中导电离子增多。随着雷云中电荷的累积，空间电场逐渐



苗朋厚/高级工程师

关键词/Keywords

雷闪·
电场强度·
电荷密度·

增强,当超过电晕临界场强时,就会击穿附近的空气而形成导电的通道,即先导。不同云层的先导或云层与地面的先导相连接,就会发生闪电。

总体来说,按照出现的位置,闪电可分为云中闪电、云间闪电和云地闪电。云中闪电和云间闪电简称云闪,云地闪电简称地闪。由于云中电场强度远大于云层的外侧,所以发生云闪的概率远大于地闪,据不完全统计,云闪发生的概率为地闪的3倍左右。

虽然云间闪电发生的频率和强度都远大于云地闪电,但是对人类的危害主要是云地闪电。根据输送到地面的电荷极性和初始先导的传播方向,可将云地闪电分为四种类型:下行负闪、上行负闪、下行正地闪和上行正地闪^[3]。在全球所发生的云地闪电中,下行负闪占绝大多数,约为90%,下行正地闪较少,上行闪电就更少了。

2 地面为无限大平面导体时空间电场强度的计算

为了简化计算过程,首先假设大地表面是无限大平面导体,且表面电阻率是均匀的。既不考虑地面是山地还是河沟,也不考虑是否覆盖有建筑物。这样在计算时,可以把地面上感应出的电荷看作雷云中电荷的镜像电荷。

2.1 云间电场强度的计算

假设雷云中三层结构电荷构成一个无限大平行板电容器,如图1所示。

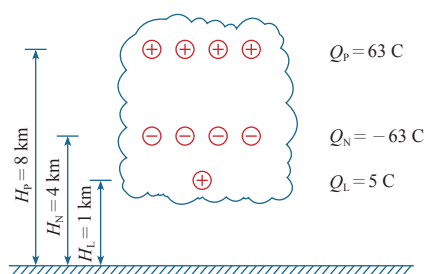


图1 雷云电荷三层结构模型

那么根据叠加原理,云内电场强度为 $E = 63/(2S\epsilon) + 63/(2S\epsilon) - 5/(2S\epsilon) = 121/(2S\epsilon)$,云层下侧的电场强度为 $E = 5/(2S\epsilon)$, S 为云层的面积。可见云

内电场强度远大于云地之间的电场强度,这就是云闪发生的概率远大于地闪的主要原因。

2.2 云地间电场强度的计算

由于云中电荷的分布很不均匀,为了便于计算,可把电荷密集的区域等效成点电荷,而忽略电荷稀疏的区域。另外假设中上两层每层有9个点电荷,且间距为1 km,每个电荷容量均假设为7 C。最底层的正电荷等效成一个点电荷,电荷为5 C。这样雷云中的电荷就抽象成了19个点电荷,如图2所示。

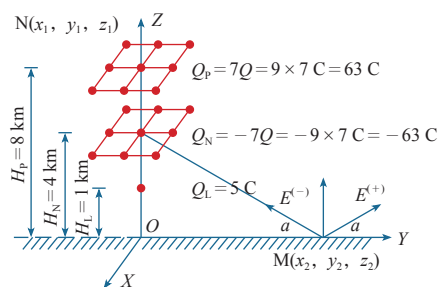


图2 雷云点电荷结构模型

根据镜像法,雷云在地面上感应的电荷可由19个与雷云中电荷相异的镜像电荷代替。由于雷云电荷与镜像电荷关于地表面对称,它们产生的电场大小相等,并且水平分量相互抵消,垂直分量相互叠加。

根据点电荷电场的计算公式得

$$|E^{(+)}| = |E^{(-)}| = \sum \frac{Q}{4\pi\epsilon[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]}$$

则中层9个负电荷在M点的电场强度为

$$|E^{(+)}| = \sum \frac{Q|z_1 - z_2|}{2\pi\epsilon[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{3/2}}$$

同理也可求出,上层9个正电荷与底层1个正电荷在M点的电场强度 $|E_p|$ 、 $|E_l|$ 。

则M点处的总电场强度 $E = |E_p| + |E_l| - |E_N|$,电场方向为垂直地面向上。

式中,点N(x_1, y_1, z_1)表示雷云中所有点电荷的坐标;点M(x_2, y_2, z_2)表示计算位置的坐标,显然点N均为已知,点M(0, y_2 , 0)中仅 y_2 未知,所以 $|E|$ 为 y_2 的函数。同时,根据假设的模型可推断出,地面电场强度的分布是以原点O为中

心，呈圆形的等强梯度线。经过计算，Y轴上的电场强度分布如图3所示。

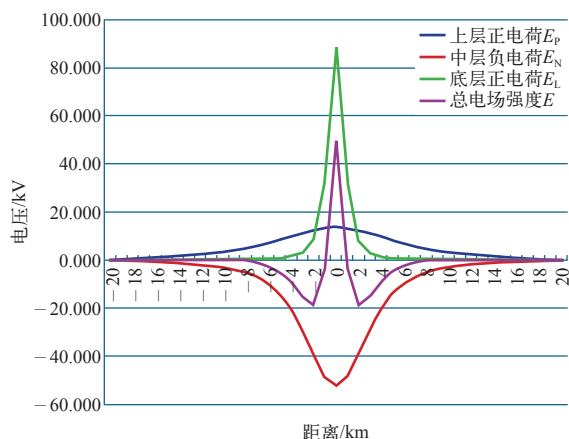


图3 地面电场强度分布图

由图3可知，地面大部分区域，中层负电荷作用的电场分量都占据主导，所处总电场成负电场属性。从远处各电场分量均逐渐增强，当至离中心2~3 km处，总电场强度达到最大。接着由于底层正电荷的作用急剧增加，总电场强度发生反转，底层正电荷场强分量开始占主导，在雷云正下方，正电场强度达到峰值。

由于电场强度越大，空气发生电离的可能性越高，发生雷击的概率也越高，所以雷击概率最大的位置是距雷云约2~3 km处，或是在雷云的正下方。

另外，由于负电荷聚集在下方较重的雨粒子上，初始阶段雷电主要向大地释放的是负电荷。经过多次雷电后，雷云中负电荷容量显著降低，附着在云粒子上的正电荷占主导，由于正电荷的位置较高，空中电场可能会更强，若发生下行正地闪，则会更加强烈。

3 地面上影响空间电场的关键因素

3.1 土壤电阻率对电场强度的影响

地表土壤电阻率与被感应的电荷量之间有着密切的关系。假设云地间为平行板电容器，电场强度 E 恒定，地面电阻率为 ρ 。在很短的一段时间 t ，雷云从A地飘动到B地，地面产生的电流密度为： $J=$

E/ρ ，地面上面积 S 上累积的负荷为 $q=JSt=Est/\rho$ 。可见，地面累积的电荷量与土壤电阻率成反比，与面积成正比。

因此，当地面土壤电阻率不均匀时，电阻率高的区域，累积的电荷量少，电阻率低的区域，累积的电荷量多。于是电阻率低的区域的电场强度将会显著大于电阻率高的区域的电场强度。由于电场强度越大的地方越容易使空气发生电离，形成先导，所以仅从电阻率角度考虑，雷击将优先发生在电阻率较低，或者比较容易聚集电荷的位置，如河岸边、钢筋混凝土建筑物屋面等。

3.2 物体高度对电场强度的影响

根据点电荷场强公式，空中电场强度与测量点至电荷的距离成反比，所以物体越高电场强度越大。另外当导体表面有电荷堆积时，电荷密度也与导体的形状有关。在凹陷部位电荷密度接近零，在平缓部位电荷密度较小，而在凸出区域电荷密度较大。根据静电场理论，电荷密度大的地方，电场强度也越大。所以凸出地面的物体易遭受雷击。如山峰、树木和建筑物等。

地面上的建筑物一般都是几十米，有的达上百米，且都是钢筋混凝土结构，容易堆积电荷，其附近电场比其他区域强烈得多，非常容易遭受雷击，所以在防雷设计时应重点考虑。

3.3 尖端物体的放电效应

根据导体带电荷原理，物体表面曲率越大，电荷密度越大，其附近电场也会越强。而对尖端物体，其电场将会非常强，导致附近的空气被电离，从而通过气体向外放电，这就是尖端物体的放电效应。尖端放电是电晕放电的一种。当雷云经过尖端物体时，地面的感应电荷不断堆积到尖端物体的顶端，发生尖端放电效应。它不停地将尖端附近的感应电荷释放掉，从而起到保护作用。如果雷云中电荷非常多，形成非常强的空间电场，则物体尖端就会发生强烈的放电效应，在其上空形成一个或多个上行先导。一旦雷云的下行先导与上行先导的连接，就演变成火花放电。云层中的电荷以强大脉
(下转第53页)

- Harmonics-causes, effects, measurements and analysis [J]. IEEE Transactions on IA, 1990, 26 (6): 1034-1402.
- [3] Mahesh G, Ganesan R, et al. Effects of power harmonics and its control techniques [C]. Proceedings of International Conference on Electromagnetic Information and Compatibility, 1999: 400-405.
- [4] 王葵, 李建超, 蒋丽, 等. 谐波电流对低压配电网的影响分析 [J]. 继电器, 2008, 36 (7): 24-28.
- [5] Larico H R E, Barbi I. Three-phase push-pull DC-DC converter: analysis, design and experimentation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (12): 4629-4636.
- [6] 吕强, 徐晔, 王金全, 等. 低压配电系统零序谐波电流特性研究 [J]. 建筑电气, 2013, 32 (4): 56-62.
- [7] Emanuel A E. On the assessment of harmonic pollution [J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1995, 10 (3): 1693-1698.
- [8] 王彬. 基于磁通补偿原理的零序滤波器的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [9] 徐绍麟. 城市电网10kV低阻接地系统中接地变压器零序保护接线方案 [J]. 继电器, 2003, 31 (9): 35-39.
- [10] 谢龙汉, 耿煜, 邱婉. ANSYS电磁场分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [11] 冯静. 基于ANSYS的漏感变压器仿真计算 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (6): 181-184.
- [12] 张倩, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS12.0电磁学有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- (收稿日期: 2017-07-08) **EA**

(上接第20页)

冲电流的形式沿着先导、尖端物体迅速向大地泄放。这就是避雷针的防雷原理。

4 结束语

由于地表面的复杂多样性, 空间电场在分布上并不是均匀的, 特别是在地面附近。位置较高、电阻率较低的物体容易堆积电荷, 也会产生较强的电场。因此在防雷设计时, 雷闪数学模型并不是唯一的参照依据, 还要考虑保护对象本身的属性, 以及其周边地质环境。当位于山区时, 要注意周边山丘的高度与地面土壤电阻率对雷闪的影响; 当位于空旷平原时, 物体本身的属性也会增加被雷击的可能, 这时要更加重视其防雷安全措施。

参考文献

- [1] 中国机械工业联合会. GB 50057—2010建筑物防雷设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册 [M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] Vladimir A Rakov, Martin A Uman. 雷电 [M]. 张云峰, 吴建兰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 刘丙江. 实用接地技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 牛中奇, 朱满座, 等. 电磁场理论基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [6] 周希朗. 电磁场理论与微波技术基础 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2010.

(收稿日期: 2017-08-10) **EA**