

文章编号:1672-058X(2009)02-0183-03

雷电与防雷减灾的电学原理研究

王代新, 江孟蜀

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘要: 选用简化模型, 应用静电边值问题于大气电学, 研究了导致云地间闪电发生的高强度电场的形成机制和电场结构, 得出了可比较的数量结果, 进而简明地阐释了防雷减灾措施中的电学原理。

关键词: 雷电雨; 地闪; 电场结构; 防雷减灾

中图分类号: O 44. 2

文献标识码: A

1 云-地放电导致地闪

关于雷电的成因, 目前比较一致的说法是: 空中不同温度的气团相遇后, 凝成水滴或冰晶, 形成积云。积云在运动中使正负电荷发生分离, 当分离后的电荷积累到足够数量时就成为带电云, 称雷雨云或积雨云。雷雨云是闪电发生的母体。雷雨云下部通常荷负电, 而上部荷正电。闪电按发生的部位可分云内放电, 云际放电和云地放电3种, 前两种统称为云闪, 第3种称为地闪。地闪对人类活动和生命安全有较大威胁, 故历来是研究的重点。云中正电荷对地的放电称为正闪电, 而云中负电荷对地的放电称为负闪电。多数云-地闪电为负闪电, 发生于荷负电的雷雨云的下部与大地之间。即当云的下部负电荷大量积累到一定值时, 局部电场强度超过大气的击穿场强, 出现空气介质的强电击穿, 发生导电, 负电荷由云流向地形成闪电。每次云地间闪电向地输送约20库的负电荷。

2 雷雨云与大地形成场强为 \vec{E}_0 的均匀场

由于地球是导体, 所以雷雨云下部的负电荷将在地面上产生感应正电荷。地闪实质就是云下部的负电荷经由被强电场击穿电离了的大气介质, 而流向地下的感应电荷。对云层底部的负电荷和地平面上的感生正电荷在大气中产生的电场, 拟以一大尺寸的平行板电容器的均匀电场 \vec{E}_0 予以粗略代替。该电容器上板荷云层底部负电荷, 下板荷相应的地面感应正电荷并接地, 均匀电场强度 \vec{E}_0 的方向由地面垂直向上, 指向云层, 如图1所示。

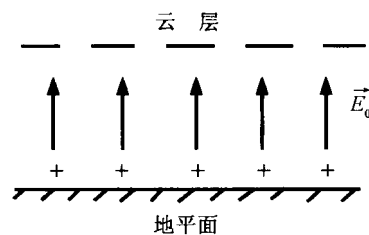


图1 雷雨云同地平面间的电场的简化模型

3 云-地凸出物间高强度电场的求解

但是, 在同一雷雨云下, 云-地放电却大多是发生在云与地面凸出物之间, 而不是发生在云与地平面之间。由于雷电发生的一个前提条件是高强度电场的存在, 因而, 在同一雷雨云母体下, 云-地平面之间与云-地凸出物之间的电场, 在强度上存在差异; 在同一雷雨云下, 当云-

收稿日期:2008-09-26; 修回日期:2008-12-05。

作者简介:王代新(1970-), 男, 重庆巴南区人, 实验师, 从事物理研究。

地平面之间的电场还不足以击穿大气形成云-地放电,云-地凸出物之间的电场却能击穿大气实现云-地之间的放电。那么,云-地凸出物之间的高强度电场是如何形成的?这两者的差别又究竟何在?拟以如图 1 所示的云-地平面间的原均匀电场 \vec{E}_0 为参照系,采用下述步骤求解这一问题。

第一,以导体半球代替地面凸出物;第二,将该导体半球移入云-地平面之间的原均匀电场 \vec{E}_0 ,并接地平放。将问题简化为:在充分大的导体地平面上半空间,原有一垂直地面向上的均匀电场 \vec{E}_0 ,现平放入一半径为 R 的导体半球并接地,求半球置入后的电场分布。这是最简单而且基本的静电场边值问题之一,现将其应用于雷电形成机制研究。

在这个问题上,因有一个边界为半球面,故选用球坐标系,并选用半球心为原点,极轴 Z 为原有均匀场 \vec{E}_0 的方向,垂直于导体地面向上,如图 2 所示。

由于在所考察的区域内不存在自由体电荷,自由电荷只出现在区域的边界上(以面电荷形式),则在此区域内的电势所满足的方程为拉普拉斯方程。又由于场具有轴对称性质,即电势 φ 只是 r 和 θ 的函数,与方位角 Φ 无关,故电势 φ 满足拉普拉斯方程的解为:

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(a_n r^n + \frac{b_n}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos\theta) \quad (1)$$

在选以原点为电势参考点时,原均匀电场 \vec{E}_0 的电势为 $\varphi_0 = -E_0 r \cos\theta$ 。在移入导体半球后,由于 \vec{E}_0 对导体的静电感应作用,接地导体表面出现感应电荷,使原均匀的电场 φ_0 发生畸变。但由于半球大小有限,其上的感应电荷有限,故其上感应电荷对原均匀电场的结构的影响有限,仅限于邻近导体半球的局部区域,在远离导体半球即 $r \rightarrow \infty$ 处,电场仍将保持原均匀状态,仍为原均匀场 $\varphi_0 = -E_0 r \cos\theta$ 。于是得出两个边界条件是:

(I) 在远离半球即 $r \rightarrow \infty$ 处, $\varphi = -E_0 r \cos\theta$ 。

(II) 因已选原点为电势参考点,而地与接地导体半球面均和原点同电势,故导体半球面即 $r=R$ 处, $\varphi = 0$ 。

由边界条件(I)即可定出 $a_1 = -E_0, a_n = 0 (n \neq 1)$, 由边界条件(II)得:

$$-E_0 R P_1(\cos\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{b_n}{R^{n+1}} P_n(\cos\theta) = 0$$

它要求所有各个 $P_n(\cos\theta)$ 的系数都为 0, 即:

$$-E_0 R + \frac{b_1}{R^2} = 0, b_n = 0 (n \neq 1)$$

所以

$$b_1 = E_0 R^3$$

最后得到半球外的电势:

$$\varphi = -E_0 r \cos\theta + \frac{E_0 R^3 \cos\theta}{r^2} \quad (2)$$

半球外电场的 r 分量和 θ 分量各为:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \left(1 + \frac{2R^3}{r^3}\right) E_0 \cos\theta \\ E_\theta &= -\frac{\partial\varphi}{r\partial\theta} = -\left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right) E_0 \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于矢径 \vec{r} 垂直于半球面,球面上感生电荷的面密度为:

$$\sigma = -\epsilon_0 \left. \frac{\partial\varphi}{\partial r} \right|_{r=R} = 3\epsilon_0 E_0 \cos\theta \quad (4)$$

由式(2)、式(3)、式(4),可得结果:

第一,如式(2)所示,云-地凸出物之间的场由两项迭加而成,其中第一项 $-E_0 r \cos\theta$ 是由原均匀场 \vec{E}_0 产生的势,第二项 $\frac{2E_0 R^3 \cos\theta}{r^2}$ 是由式(4)的感应面电荷产生的势。

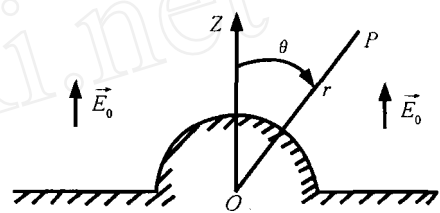


图 2 原均匀场 \vec{E}_0 中平放入导体半球并接地

第二,由式(2)、式(3)所表示的这一新的总电场,有别于原均匀场 E_0 的是在导体半球表面即 $r = R$ 的局域内,与感应面电荷密度 $\sigma = 3\varepsilon_0 E_0 \cos\theta$ 相应,场强 $E = 3_0 E_0 \cos\theta$, 方向与导体表面垂直。关键是在 $r = R$ 、 $\theta = 0$ 的半球顶部局域,场强达到最大值,高达 $E = E_{\max} = 3E_0$ (与半径无关),即在 $r = R$ 、 $\theta = 0$ 的顶部局域处,场强由未平移入半球时的原 E_0 ,增高为原 E_0 的3倍,并与球的半径无关,适用于高矮大小半径不同的导体半球。也就是说,与同一雷雨云下的云-地平面间的原场强 E_0 相比较,地凸出物顶部的场强增强为原 E_0 的3倍, $E = E_{\max} = 3E_0$ 。

4 地闪常发生于云-地凸出物之间的电学原理解释

正是这一与半径无关、高达3倍的数量结果,使人类得以首次从定性走向具有可比性的定量,经由数量的比较来回答为什么大多数地闪是发生于云-地凸出物之间,而不是发生于云-地平面之间的问题。云地间闪电形成的核心是雷雨云的形成以及云中的高强度电场的起电机。雷雨云是雷电产生的母体,而雷电发生的一个前提条件是云中要有一个等于或大于空气介质的击穿场强 E_{br} 的电场强度。干燥空气的击穿场强 $E_{br} \approx 3 \times 10^6$ V/m,充斥雾状水滴的潮湿空气的击穿场强 $E_{br} \approx 1 \times 10^6$ V/m,只要云中某些局域的电场强度 $E \geq E_{br}$,带电水滴间就出现空气介质的强电击穿,被电离化的空气即发生导电,形成闪电。这已被普遍认为是地闪的结构。现在已知云-地凸出物之间的凸出物顶部局域的场强 $E = 3E_0$,即当云下部负电荷积累到一定程度,使云地平面间的场强 E_0 还未达到 E_{br} ,而仅仅是 $E_0 = 1/3 E_{br}$ 时,同一雷雨下的地凸出物顶部的场强却能高达 $E = 3E_0 = 3 \times 1/3 E_{br} = E_{br}$,从而足以使大气发生电离击穿形成地闪。这样,定量地阐释了云-地闪电为什么常常大多数发生于云-地凸出物之间,而不是云-地平面之间。据此,可进而对中央气象局所颁发的人身防雷措施,例如“雷电发生时,不要在田间劳动,不要在空旷地方活动(踢球、奔跑、行走等)”的这项人身防雷措施,提供如下解释:设雷雨云-地平面间的电场强度为 E_0 ,由于人体本身和地球均为良导体,在雷雨云下部负电荷的静电感应下,空旷地面上的人的头部,将出现密集的 $\sigma = \sigma_{\max} = 3\varepsilon_0 E_0$ 的正感应电荷,同时相应出现最高的电场强度 $E = E_{\max} = 3E_0$,当该电场强度 $E \geq$ 大气击穿场强 E_{br} 时,大气被击穿、电离,云下部负电荷即通过电离化了的大气,通过人体流向地下的感应正电荷入地,造成人被雷击身亡。

参考文献:

- [1] 赵九章. 高空大气物理学 [M]. 北京:科学出版社,1964
- [2] 周季骥. 高等大气物理学 [M]. 北京:气象出版社,1991
- [3] 周诗健. 雷电 [M]. 北京:电力工业出版社,1993
- [4] 曹昌祺. 电动力学 [M]. 北京:人民教育出版社,1982

Electricity principle of thunder and lightning and preventing them for decreasing disaster

WANG Dai - xin, JIANG Meng - shu

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: This simplified models and static electricity marginal value are applied in atmospheric electricity, high intensifying electric field between cloud and earth and electric field structure which lead to lightning are studied. Quantitative results, which are comparable, are arrived at and this paper expounds electricity principle for preventing thunder and lightning for decreasing disaster.

Key words: thunder and lightning and rain; lightning; electric field structure; preventing thunder and lightning for decreasing disaster

责任编辑:田 静