

雷击建筑物的先导连接过程模拟^{* 1}

任晓毓¹⁾ 张义军¹⁾ 吕伟涛¹⁾ 陶善昌²⁾ 德庆措姆³⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081) ²⁾(中国科技大学,合肥 230026)

³⁾(西藏自治区那曲地区气象局,那曲 852000)

摘 要

为了研究闪电先导与地物的相互作用,该文建立了一个闪电先导的二维模式以模拟雷击建筑物的先导连接过程。模拟得到梯级长度在 13.8~51.5 m 的范围内,下行先导的感应电荷为 $0.03 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ C/m,梯级长度和感应电荷量均随着先导离地高度的下降而增加,模拟结果与观测值相吻合。下行先导最后一跳之前的转向并不明显,但最后一跳,下行先导向避雷针产生的上行先导偏转一定角度。模式模拟了下行先导与 40 m 宽度的建筑之间的相互作用和连接过程,得到建筑物拐角也具有一定的吸引半径,避雷针和拐角之间存在竞争关系。因此,在雷电防护设计中需要考虑拐角等复杂结构尖端对闪电的吸引作用,简单地采用理想情况(如地面孤立高耸尖端)下避雷针的吸引半径等参数进行复杂建筑物的防雷设计会存在问题和隐患。

关键词: 先导;连接过程;吸引半径

引 言

闪电是发生于大气中的一种长距离放电现象,常常引起各种严重的灾害,特别是电子设备的大量采用,雷电灾害越来越严重,影响也越来越大^[1-3]。实践证明采用合理的雷电防护措施可以有效减少雷电灾害。目前在雷电的直接防护设计中,主要利用避雷针或避雷带作为接闪装置,利用滚球法计算避雷针的保护范围,但在雷电防护设计中仍存在很多技术问题需要深入研究。随着对闪电发生及发展物理过程认识的不断深入,基于观测事实建立闪电先导模型,通过闪电先导的发展及其与地物的连接过程,研究闪电防护问题已成为一种重要的方法。特别是电力系统,很多人对先导模式进行了研究,提出了不同的输电线路雷电屏蔽仿真模型,以解决输电线路屏蔽失效问题、绕击和侧击等问题^[4-5]。Mazur 等也通过先导模式的建立,研究了多普勒天气雷达的雷电防护问题,模拟结果显示先导电位是影响先导和雷达周围的避雷针相互作用的主要因素^[6-7]。在这方面的研究中,最主要的是闪电先导模式的合理建立。闪电先导模式包括下行先导发展模式 and 由地面尖端产生的上行先导的发展模式。在先导模式

的研究中,Petrov 等^[8]提出了电场强度的临界范围(CRFD)标准,用于判断正、负先导是否可以持续发展。Goelian 等^[9]在假设电晕区内的电场为恒定值的前提下,提出了长间隙中正先导传播的物理模式。Bedja 等^[10]提出了一种轴对称的先导模式,模拟结果显示增加避雷针的高度或是减小避雷针的半径均可增加产生上行先导时下行先导的高度。Becerra 等^[11-12]提出了一种上行先导的物理模式,模拟从任何接地建筑产生的上行先导的传播。模式中采用最优化的电荷模拟方法计算电晕区的电荷,并用电位分布代替电场,极大地减小了计算误差。这些先导模式的建立和发展为闪电先导发展物理过程以及闪电防护研究都起到了非常重要的作用。

本文从先导发展的物理过程考虑,建立了一个闪电先导的二维模式,模式既考虑了先导每一步的发展,又考虑了上行先导的产生,旨在了解建筑几何尺寸对连接过程的影响。

1 先导连接过程的模拟方法

1.1 正负先导相互连接的模型

闪电发生于云内局部强电场区域,并逐步演变

* 国家自然科学基金项目(40605004,40875003)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)200706022)共同资助。
2009-12-17 收到,2010-03-12 收到再改稿。

成可以在低电场区域中持续传输的先导。梯级先导是地闪放电的始发阶段,当梯级先导头部接近地面时,地面的突出物体上会产生上行先导,二者相连接的过程即为连接过程。

本文建立的二维闪电先导模式主要以地面上方 200 m×200 m 范围内的近地面为主要研究区域。图 1 是模式结构示意图,模式中将研究区域离散为 2000×2000 个边长为 0.1 m 的正方形网格。下行先导为负先导,上行先导为正先导。下行先导、建筑、避雷针和地面满足 Dirichlet 边界条件,空气边界满足 Neumann 边界条件。下行先导与避雷针之间的水平距离为 d 。空间电位满足泊松方程,采用 Matlab 超松弛迭代算法求解。

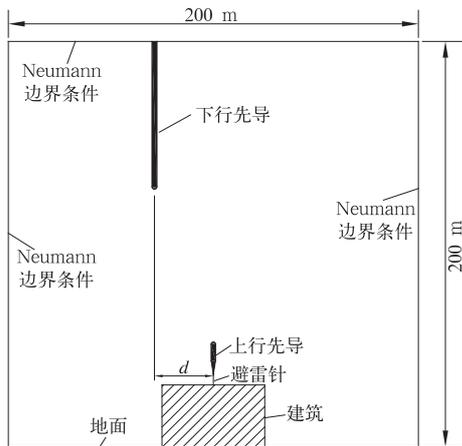


图 1 模式结构示意图

Fig. 1 Sketch of model structure

由于简单迭代法的收敛速度较慢,因此本文采用超松弛迭代算法计算电位分布。在计算每一个网格点时,将前一时间步长计算得到的邻近点电位代入计算,使收敛速度加快。

电位的迭代公式为

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = \varphi_{i,j}^n + \frac{\omega}{4} (\varphi_{i,j+1}^n + \varphi_{i,j-1}^n + \varphi_{i-1,j}^{n+1} + \varphi_{i+1,j}^{n+1} - 4\varphi_{i,j}^n). \quad (1)$$

式(1)中, ω 为松弛因子的最佳值,

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \left[\frac{\cos(\pi/m) + \cos(\pi/n)}{2} \right]}}. \quad (2)$$

式(2)中, m, n 为 x, y 方向的网格数。不同的 ω 值,有不同的收敛速度。选取恰当的值将加快收敛速度。随着先导梯级的发展,模拟域内电场分布不断更新,这是耗费机时的主要原因。

本文假定地面上方 200 m 范围内的背景电场为一恒定值 10 kV/m,这里的背景电场主要表征雷暴云中分布的空间电荷在其下方近地面附近产生的影响;由于模拟区域相对于雷暴云的空间尺度很小,而相对于先导直径又很大,在模式中背景电场的假设表示为:上边界具有恒定电位,侧边界具有恒定电位梯度,地面电位为零的边界条件。另外,计算得到的模拟区域的合成电场是在背景电场的基础上,叠加了闪电先导产生的电场。由于先导电位达到 10 MV 以上以及地面尖端显著的电场增强效应,对于先导连接过程而言,这两种影响远远大于背景电场的影响。虽然实际电场探空结果表明,雷暴云下电场强度随着高度增加而增强^[13-14],但通过对背景电场对梯级长度的影响分析表明这一影响很小,这可能是目前关于先导连接过程模拟中多采用恒定背景电场近似假设的原因。

本文假设下行先导的形状为圆柱形,其头部为半球形。梯级先导通道是由一个携带纵向电流的核(直径为厘米量级)和核外包围的半径为几米的电晕鞘组成^[15]。Odim 等指出先导电荷主要分布在直径为 1~10 m 的先导通道中^[16]。目前仍然缺乏先导直径与先导电位之间确切关系的观测结论。从检验模式和考察建筑物几何特征对下行先导连接过程影响考虑,本文只着重选择分析下行先导直径为 1 m 的个例,对不同先导直径参数的模拟试验表明:改变个例中先导直径参数并不会影响模式的计算结果。尽管先导电位在先导传播过程中不断变化,通常越接近地面,先导电位是减小的^[17],但最后 200 m 可以假设其为常数,Mazur 等^[6]在模拟中也采用了类似的假定。本文假设下行先导的电位为恒定值 -40 MV。

在国内外的研究中都没有对上行先导几何特征的相关描述。本文假设上行先导的形状为圆柱形,其中第一步为圆锥形,其头部为半球形,先导直径为 1 m。

当满足发展条件时,上行先导开始发展。可以产生上行先导的范围包括建筑表面、避雷针和地面。观测到梯级先导的速度典型值为 2×10^5 m/s^[18]。上行先导开始阶段的速度为 10^4 m/s,之后加速到 10^5 m/s^[7],本文取其平均,取上行先导的速度为 5×10^4 m/s。由于先导速度比为 4:1(下行先导与上行先导的速度比),因此上行先导长度取下行先导长度的四分之一。Mazur 等的模拟也采用相同方法^[6]。

研究发现,上行先导是下行先导步长的一部分,依赖于先导速度比^[7]。

1.2 先导稳定持续传播的条件

先导是否可以持续发展,模式采用电场强度的临界范围(CRFI)标准进行判断。

根据 CRFI 标准,从避雷针或是其他接地建筑产生流光必须达到临界长度 L_s ,在流光长度 L_s 内电场必须超过临界值 E_s 。每单位长度电荷的最小值为 $20 \mu\text{C}/\text{m}$,流光临界长度为 0.7 m 。正先导和负先导持续发展需要满足的最小电场分别为 $500 \text{ kV}/\text{m}$ 和 $1 \text{ MV}/\text{m}$ ^[19]。

如果下行先导头部周围 0.7 m 范围内(即 7 个格点范围内)的电场超过 $1 \text{ MV}/\text{m}$,则下行先导可以持续发展;如果上行先导头部周围 0.7 m 范围内的电场超过 $500 \text{ kV}/\text{m}$,则上行先导可以持续发展。如果不满足 CRFI 标准,则先导停止发展。

1.3 先导梯级长度和传播方向的计算

下行先导头部周围的电位分布决定了梯级长度,负电晕区内的恒定电场为 $750 \text{ kV}/\text{m}$ ^[6]。本文计算梯级长度的方法如图 2 所示,在先导头部沿着先导的发展方向画出周围电位分布的曲线,从先导头部画一条斜率为 $750 \text{ kV}/\text{m}$ 的直线与周围电位分布曲线相交于 A 点,先导头部点到交点之间的水平距离(即交点的横坐标长度)则为下一步的梯级长度。

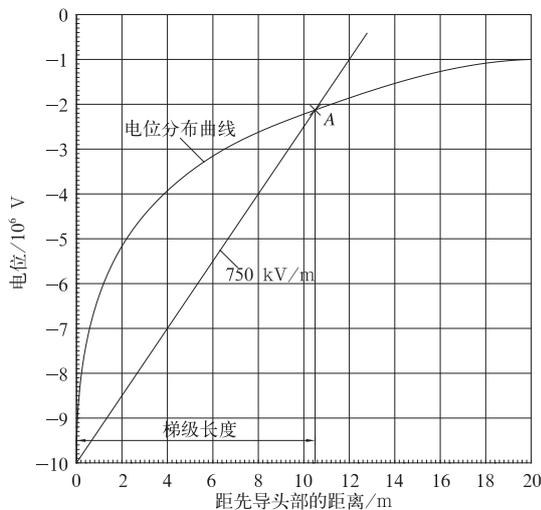


图 2 梯级长度的计算示意图

Fig. 2 Calculation of the length of stepped leader

确定先导下一步的发展方向对于模拟连接过程具有重要作用。本文计算下行先导和上行先导下一步发展方向的方法相同,选取先导头部到一定距离

上电位梯度最大的方向为先导下一步的发展方向。以下行先导的计算为例(如图 3 所示),以计算出的下行先导下一步的梯级长度(AB 的长度)为半径,以下行先导头部(点 A)为圆心画圆。求出先导头部(点 A)到圆上任一点的电位梯度,取最大值的那一点(这里假设为点 C)即为下行先导下一步的发展点,则 AC 与 AB 的夹角(角 α)为下行先导下一步的转角。

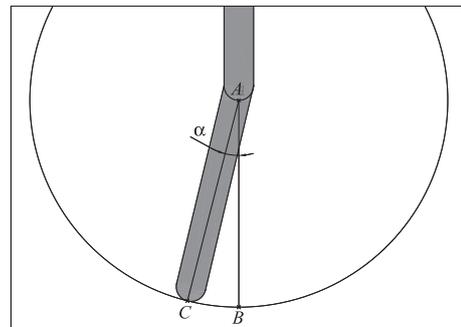


图 3 下行先导下一步发展方向的计算示意图

Fig. 3 Direction of the next step of downward leader

1.4 先导感应电荷量的计算

下行先导通道面电荷密度 σ 的求解公式^[20]为

$$\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\sigma. \quad (3)$$

式(3)中, ϵ 为介电常数,取值为 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F}/\text{m}$ 。 $\partial \varphi / \partial n$ 为先导表面的电位梯度。

将求得的面电荷密度取平均,可以得到下行先导每单位长度的线电荷密度。

1.5 建筑物尖端吸引半径和最后一跳距离的估计

雷电防护设计中,由于滚球法(Rolling Sphere Method)没有考虑建筑高度或是几何尺寸改变对电场的影响,也没有考虑先导始发的标准,因此收集体积法(Collection Volume Method)被提了出来。吸引半径是收集体积法最重要的输出参量,与建筑的形状和尺寸有关。所谓吸引半径是指给定的下行先导电荷收集体积的截面半径^[21]。收集体积法如图 4 所示,其中由先导电荷决定的闪击距离表面和由下行先导与上行先导的速度比决定的边界所决定的区域为收集体积。图 4 中 R_a 为吸引半径, d_s 为闪击距离。在 R_a 范围内的闪电可以被避雷针有效拦截。根据模拟结果得到不同尺寸建筑的吸引半径,可以将其应用于实际的雷电防护设计中。

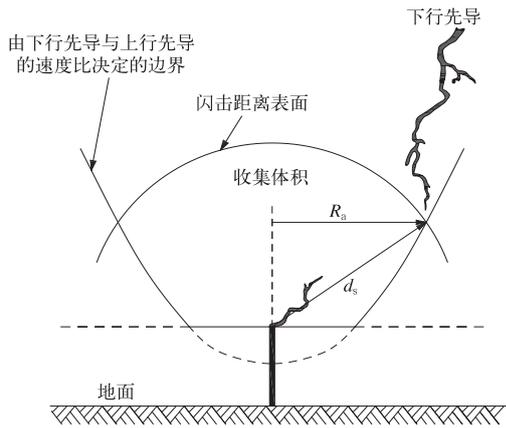


图 4 收集体积法示意图

Fig. 4 Collection Volume Method

模式中定义吸引半径为下行先导的初始轴线与地面连接点(如避雷针、建筑物拐角)之间的水平距离;定义最后一跳的距离为发生连接前一步下行先导头部与连接点之间的距离。

2 模式验证及初步模拟结果

2.1 模式验证

模式模拟了下行先导与宽度为 40 m 的建筑之间的相互作用。以下行先导与避雷针的水平距离为 5 m 的模拟结果为例,图 5 表示了下行先导与避雷针相互连接过程最后 5 步的情况,模拟得到了空间电位分布,1~5 分别为最后 5 步每一步的模拟结

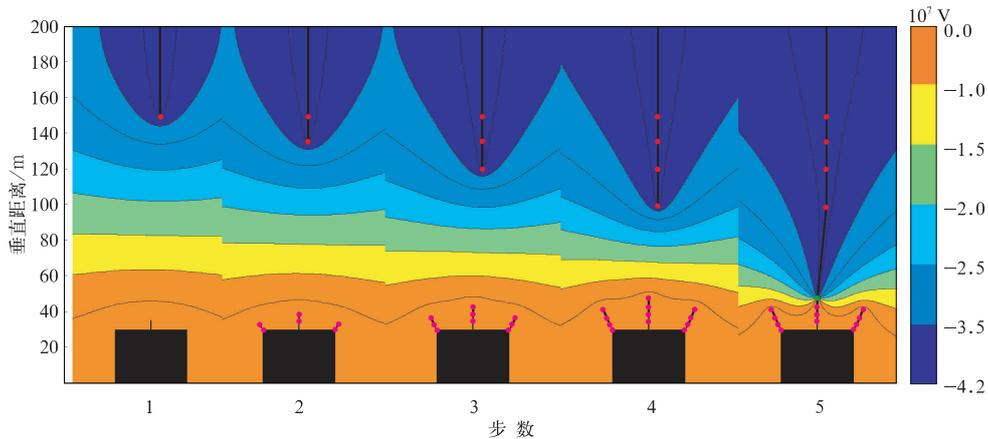


图 5 下行先导的发展模拟得到的空间电位分布

Fig. 5 Distribution of space potential obtained from simulation of a negative leader progression

果。图 5 中红色圆点为每一步的下行先导头部点,粉色圆点为每一步的上行先导头部点,绿色圆点为连接点。

从图 5 可以看出:先导电位恒定的条件下,随着下行先导向地面的持续发展,梯级的长度增加。这一结果与 Mazur 等的模拟结果^[6]和实验室中对负梯级先导的观测结果^[22]相吻合。图中从下行先导完成第 2 步发展后,建筑的拐角和避雷针处均开始产生了上行先导。最终下行先导与避雷针产生的上行先导连接,最后一跳的长度为 51.5 m。梯级长度和上行先导长度如表 1 所示。

观测发现梯级长度的范围为 3~200 m,其典型值为 50 m^[18]。本文模拟得到的梯级长度在 13.8~51.5 m 的范围内,与观测结果基本一致。

模拟得出下行先导通道的电荷在先导由云到地的发展过程中是逐渐增加的,与 Alessandro 等^[21]的

表 1 梯级长度与上行先导长度对照表

Table 1 Comparison table of the length of stepped leader and upward leader

发展步骤	梯级长度/m	上行先导长度/m
1	13.8	3.5
2	15.9	4.0
3	20.8	5.2
4	51.5	0

研究结果一致。图 5 对应的先导发展过程中下行先导的感应电荷如图 6 所示,下行先导的感应电荷为 $0.03 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ C/m,且随着下行先导的发展,下行先导通道的感应电荷是逐渐增加的。余晔等^[23]模拟得到先导通道平均感应电荷线密度约为 $0.08 \times 10^{-3} \sim 0.34 \times 10^{-3}$ C/m,Heckman 等^[24]的模拟结果为 0.3×10^{-4} C/m。本文的结果与这些研究结果是一致的。

图5中直到最后一跳的前一步,下行先进行进方向才开始朝着建筑物上连接点偏转。最后一跳之前,下行先导转向并不明显;最后一跳,下行先导向

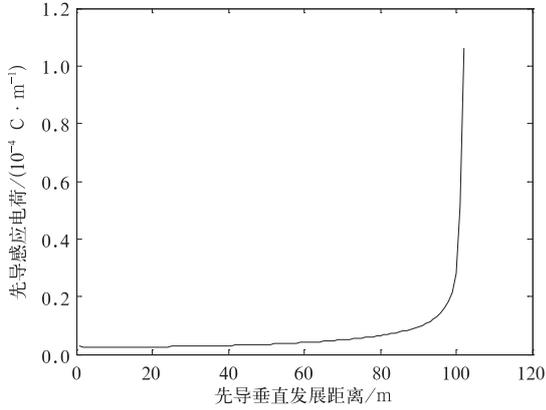


图6 下行先导感应电荷的模拟结果
Fig.6 Simulation results of induced charge of downward leader

着避雷针产生的上行先导偏转 5.6° 。此外,经过平移建筑进行多次模拟,下行先导的转向只发生在最后两步,这与 Mazur 等^[7]得到的结论是一致的。

2.2 建筑物影响的初步模拟结果

为了考察建筑物的几何特征对下行先导接地过程的影响,本文进行了理想情况(建筑物宽度无限宽)和建筑宽度为 40 m 两种情况的模拟比较,模拟得到空间电位分布,避雷针高度同为 5 m。图 7a 为理想情况下行先导与避雷针相互连接过程最后 5 步的模拟结果,可以看出避雷针的吸引半径超过 40 m,即对于 40 m 范围内的闪电先导避雷针均可有效拦截。图 7b 为建筑宽度为 40 m 下行先导与建筑物相互作用并发生连接最后 6 步的模拟结果。图 7 中避雷针与下行先导的初始轴线之间的水平距离为 30 m,按照理想情况的模拟结果,下行先导显然位于避雷针 40 m 的保护范围内,但此时下行先导击

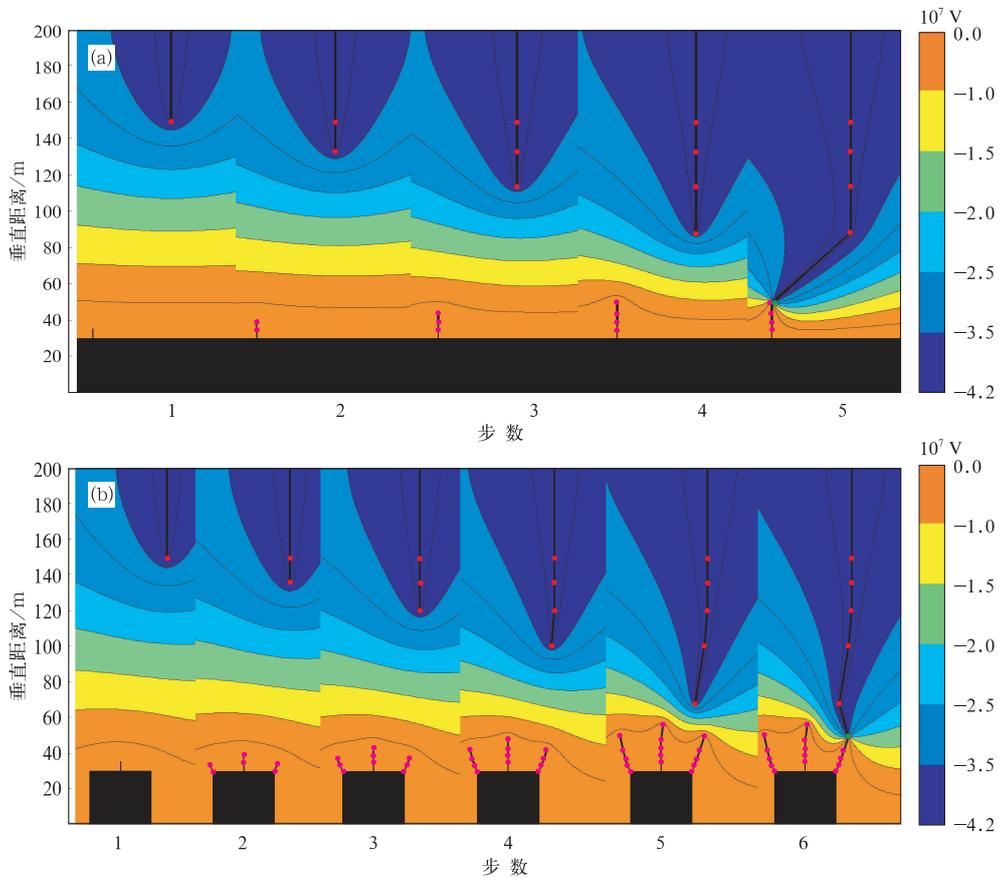


图7 不同情况下空间电位分布的模拟结果示意图
(a) 理想情况的模拟结果, (b) 建筑宽 40 m 的模拟结果
Fig.7 Simulation results of distribution of space potential in different conditions
(a) simulation results for perfect condition,
(b) simulation results for the width of the structure is 40 meters

中屋面拐角。这是由于当建筑具有一定宽度时,避雷针顶端和拐角都存在电场畸变,在模拟中均产生了上行先导,使得其附近电位梯度增大,避雷针和拐角之间存在竞争关系,在一定条件下拐角遭受雷击的可能性更大,是易遭受雷击的部位。类似的雷击建筑物拐角的情况在实际生活中多有发生^[25-26],也确实证明建筑物的拐角容易遭受雷击。模拟得到建筑宽度为 40 m 时避雷针的保护范围比理想情况下的要小。在复杂建筑物的实际雷电防护设计中,不可以简单地采用理想情况(即无限大地面上孤立避雷针)下的闪击距离或吸引半径数据进行设计,需要考虑建筑物几何结构的影响。

3 结论与讨论

本文通过建立一个闪电先导的二维模式,对不同情况进行模拟,得到以下结论:

1) 模拟得到梯级长度在 13.8~51.5 m 的范围内,下行先导的感应电荷为 $0.03 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ C/m,梯级长度和感应电荷量均随着先导离地高度的下降而增加。

2) 利用二维精细分辨率模式模拟了下行先导与 40 m 宽度建筑之间的相互作用和连接过程,结果表明:从下行先进行进至离地大约 150 m 高度起,建筑的拐角和避雷针等多处开始产生上行先导,下行先导与避雷针尖端发生连接;最后一跳之前,下行先导转向并不明显;最后一跳下行先导向着避雷针产生的上行先导偏转一定角度。

3) 由模拟得到的雷击避雷针和建筑物拐角的情况可以看出,拐角也具有一定的吸引半径,避雷针和拐角之间存在竞争关系。在雷电防护设计中需要考虑拐角等复杂结构的尖端对闪电的吸引作用,简单地采用理想情况(如地面孤立高耸尖端)下避雷针的吸引半径等参数进行复杂建筑物的防雷设计是存在问题和隐患的。

本文只初步考虑了建筑宽度对吸引半径的影响,尚未细致分析建筑物和避雷针的高度对吸引半径的影响,也还需要开展复杂三维结构建筑物的闪电连接过程的模拟试验,这些是下一步工作的目标。此外,本文假定背景电场为恒定值 10 kV/m,这是一种理想条件下的假定。郗秀书等的模拟结果表

明:雷暴云下电场强度随着高度增加而增强^[27],并指出产生于地面的电晕离子所致空间电荷密度是空中电场与地面电场存在差异的原因之一。今后的工作将考虑实际情况,同时考虑空间电荷层对先导接地过程的影响进行模拟试验。

参考文献

- [1] 张义军,周秀骥. 雷电研究的回顾和进展. 应用气象学报, 2006,17(6):829-834.
- [2] 马明,吕伟涛,张义军,等. 1997—2006 年我国雷电灾情特征. 应用气象学报,2008,19(4):393-400.
- [3] 郭虎,熊亚军. 北京市雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划. 应用气象学报,2008,19(1):35-40.
- [4] 许高峰,顾乐观,司马文霞. 输电线路雷电屏蔽仿真模型. 重庆大学学报(自然科学版),2001,24(2):76-80.
- [5] 詹花茂,林福昌,王晓瑜,等. 输电线路雷电屏蔽若干问题及雷击仿真模型. 华中理工大学学报,2000,28(6):53-55.
- [6] Mazur V, Ruhnke L H, Bondiou-Clergerie A, et al. Computer simulation of a downward negative stepped leader and its interaction with a ground structure. *J Geophys Res*, 2000,105 (D17):22361-22369.
- [7] Mazur Vladislav, Ruhnke Lothar H. Evaluation of the Lightning Protection System at the WSR-88D Radar Sites. National Oceanic and Atmospheric Administration Final Report,2001:1-53.
- [8] Petrov N I, Waters R T. Determination of the striking distance of lightning to earthed structures. *Mathematical and Physical Sciences*, 1995,450:589-601.
- [9] Goelian N, Lalande P, Bondiou-Clergerie A, et al. A simplified model for the simulation of positive spark development in long air gaps. *J Phys D: Appl Phys*, 1997, 30:2441-2452.
- [10] Bedja Abderrahim, Philippe Auriol, Francois Buret, et al. Simulation of the Corona Discharge at the Tip of the Lightning Rod Under Low and Fast Variations of the External Electric Field. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 2005:1-4.
- [11] Becerra Marley, Cooray Vernon. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(2): 897-908.
- [12] Becerra Marley, Cooray Vernon. A self-consistent upward leader propagation model. *J Phys D: Applied Phys*, 2006, 39: 3708-3715.
- [13] 郗秀书,刘欣生,余晔,等. 地面电晕离子对空中引雷始发过程的影响. 高原气象,1998,17(1):84-94.
- [14] 郗秀书,言穆弘. 雷暴下近地面电特性及其对人工引雷的影响. 高原气象,1996,15(3):293-302.
- [15] Vladimir A Rakov, Martin A Uman. *Lightning: Physics and*

- Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003; 131-135.
- [16] Odim Mendes Jr, Margarete Oliveira Domingues. Lightning path simulation based on the stepped leader: Electrical conductivity effects. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67: 1287-1297.
- [17] Vladislav Mazur, Lothar H Ruhnke. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. *J Geophys Res*, 1998, 103(D18): 23299-23308.
- [18] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷. 上海: 上海交通大学出版社, 2000; 58-66.
- [19] Alessandro F D. The use of 'Field Intensification Factors' in calculations for lightning protection of structures. *Journal of Electrostatics*, 2003, 58: 17-43.
- [20] Tao Shanchang, Tan Yongbo, Zhu Baoyou, et al. Fine-resolution simulation of cloud-to-ground lightning and thundercloud charge transfer. *Atmospheric Research*, 2009, 91: 360-370.
- [21] Alessandro F D, Gumley J R. A "Collection Volume Method" for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning. *Journal of Electrostatics*, 2001, 50: 279-302.
- [22] Bacchiega G L, Gazzani A, Bernardi M, et al. Theoretical Modeling of the Laboratory Negative Stepped Leader. 1994 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Mannheim, Germany, 1994; 1-10.
- [23] 余晔, 郗秀书. 地闪先导通道中电荷分布的数值模拟. 自然科学进展, 2001, 11(7): 710-714.
- [24] Heckman S J, Williams E R. Corona envelopes and lightning currents. *J Geophys Res*, 1989, 94(D11): 13287-13294.
- [25] 郝孝智, 贾志强, 吴正怀, 等. 一次雷击楼顶女儿墙拐角的反思. 山西气象, 2008, (3): 21-26.
- [26] 蔡海元, 闫丽媛, 刘桂芳. 由某建筑物雷电灾害得出的启示 // 第六届中国国际防雷论坛论文摘编. 2007: 436-437.
- [27] 郗秀书, Soula S, Chauzy S. 雷暴下地面自然尖端电晕放电离子时空演化的数值模拟. 地球物理学报, 1996, 39(增刊): 43-51.

Simulation of Lightning Leaders and Connection Process with Structures

Ren Xiaoyu¹⁾ Zhang Yijun¹⁾ Lü Weitao¹⁾ Tao Shanchang²⁾ Deqing Cuomu³⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

³⁾ (Naqu Meteorological Bureau of Tibet Autonomous Region, Naqu 852000)

Abstract

Lightning is a kind of long-distance discharge phenomenon, and it often causes a variety of disasters which become more serious by the extensive use of electronic devices particularly. With deep understanding on physical processes of lightning occurrence and development, lightning leader model is established based on observational facts to study development of lightning leader and its interaction with structures and provide reference for lightning protection. In order to study the interaction of lightning leaders and structures, the connection process of leaders is simulated. A 2-dimension model of lightning leader is developed by simulating ambient potential distribution using an over relaxation method. In the model, the direction of next leader step depends on the position of a maximum potential gradient. Attractive radius in the model is defined by horizontal distance between initial axis of downward leader and connection point (such as lightning rod, the corner of building). The distance of final jump is defined by the distance between the tip of downward leader before final jump and connection point. Simulation results show that the length of stepped leader ranges from 13.8 m to 51.5 m. The induced charge of downward leader is about $0.03 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-4}$ C/m. The length of stepped leader and the induced charge of downward leader increase with the propagation of downward leader. These simulated results are consistent with the observation. Before the final jump, the turning of downward leader is not obvious. In the final jump, downward leader turns some direction towards the upward leader initiated from lightning rod. Simulation results are accord-

ant with the previous simulation results.

The interaction and connection process between downward leader and a structure with a width of 40 meters are simulated using this model. The corner of structure has some attractive radius and can compete with lightning rod on structure. In the design of lightning protection, attractive effect of corner to lightning leader can't be neglected. The design of lightning protection based on attractive radius of lightning rod under perfect conditions (such as isolated tip on the ground) is problematic and risky.

Key words: leader process; connection process; attractive radius

《应用气象学报》征稿简则

《应用气象学报》(双月刊)是大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊,主要刊登反映新理论与新技术在大气科学中的应用,以及大气科学理论与实践相结合,应用于各个有关领域的研究论文、业务系统和研究简报;国内外大气科学与应用气象科学发展中的新动态与新问题的探讨与评论;国内外重要学术会议或研究、业务活动的报道;气象书刊评介。

投稿要求和注意事项:

1. 论点明确、文字精炼。摘要请按文摘四要素(目的、方法、结果、结论)撰写,列出 3~8 个关键词,作者姓名请附汉语拼音,所在单位请附中、英文全名、地名、邮编。要求中文摘要为 200~400 字,英文摘要为 500 个单词左右(并请附对应的中文译文)。

2. 插图请插入文中适当位置,要求准确、清晰、美观。图中物理量、单位请勿遗漏,中、英文图题及说明写在插图下面。表格请采用三线表形式,并列出中、英文表题,文字须端正和清晰。

3. 参考文献请择主要的列入,并请按文中引用顺序标号。期刊书写格式:作者. 文章题目. 刊名,年,卷(期):起止页. 专著书写格式:作者. 书名. 译编者. 出版地:出版社,出版年:起止页。

4. 计量单位请按《中华人民共和国法定计量单位》列出,已废止的单位请换算成法定计量单位。

5. 科技术语和名词请使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。外国人名和地名,除常用者外请注原文。

6. 网上投稿(<http://qk.cams.cma.gov.cn>)请同时寄送全体作者签名的《承诺书》(请网上自行下载)。稿件自收到之日起,将在 6 个月内决定刊用与否,来稿一经刊登,酌情收取版面费,并酌付稿酬,请自留底稿,不登者恕不退还。

7. 寄交最后审定稿时,请在 A4 幅面的纸上用 5 号字隔行单面打印稿件,连同电子版一并交编辑部。稿件中的数字及符号必须清楚无误,易混淆的外文字母、符号,用铅笔标注文种、大、小写、正、斜体、黑、白体,公式中的上、下标。

8. 本刊已加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。本刊所付稿酬包含光盘稿酬和刊物内容上网服务报酬。凡向本刊投稿的作者(除事先声明外),本刊视为同意将其稿件纳入此两种版本进行交流。

欢迎投稿。投稿请登录 qk.cams.cma.gov.cn。

地址:中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部,邮政编码:100081;电话:(010)68407086,68408638;网址:qk.cams.cma.gov.cn; E-mail:yyqxzb@cams.cma.gov.cn, yyqxzb@163.com。