

任晓毓, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电先导随机模式的建立与应用. 应用气象学报, 2011, 22(2): 194-202.

## 闪电先导随机模式的建立与应用

任晓毓<sup>1)\*</sup> 张义军<sup>1)</sup> 吕伟涛<sup>1)</sup> 陶善昌<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081) <sup>2)</sup>(中国科学技术大学, 合肥 230026)

### 摘 要

根据地闪先导发展特征, 建立了一个闪电先导的二维随机模式, 并模拟研究了下行先导与避雷针或地面的连接过程。模拟得到下行先导感应电荷的数量级为  $10^{-4}$  C/m; 下行先导出现明显的分叉, 且先导接近地面时分叉逐渐增多; 模拟的连接过程形态呈现多样性的特点; 建筑物上的避雷针在绝大多数情况下可以有效拦截闪电下行先导, 但避雷针正上方的下行先导并不是百分之百击中避雷针, 远离避雷针的下行先导仍有很大概率被避雷针拦截; 在下行先导与避雷针水平距离一定的条件下, 建筑物越宽越矮, 避雷针有效拦截闪电先导的概率就越小。

**关键词:** 先导; 连接过程; 随机放电模式

### 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<sup>[1-3]</sup>。尽管目前针对地闪连接过程有许多理论, 但对这一过程的认识仍然不很清楚。随着对闪电发生、发展的物理过程认识的不断深入及探测系统的发展<sup>[4]</sup>, 基于观测事实建立闪电先导模型, 模拟研究闪电先导的发展及其与地物的连接过程以及闪电防护问题已成为一种重要方法。目前有两种类型的先导发展-接地模型, 即物理模式和随机模式。Mazur 等<sup>[5]</sup>和 Beccera 等<sup>[6]</sup>先后建立了各自的闪电先导发展物理模式。文献[7]中, 也建立了一个闪电先导的物理模式, 选取电位梯度最大的方向为先导下一步的发展方向, 模拟得到梯级长度和感应电荷量均随着先导离地高度下降而增加, 并得出建筑物拐角也具有一定吸引半径的结论, 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。但是物理模式却不能够模拟再现闪电通道的分叉现象, 难以了解闪电接地过程的随机性特征。

由于闪电的发展具有随机性特点, 而且多有分

叉现象发生, 因此建立闪电随机模式对闪电特征以及连接过程的研究更加重要。随机放电模型最早是在人们研究电介质击穿现象时建立起来的<sup>[8-9]</sup>, 随之在多个领域获得广泛应用。棒-板电极放电的模拟研究是随机模式的直接应用, 贺恒鑫等<sup>[10]</sup>选择空间电位和电子雪崩形成时间为流注生长控制变量, 建立了正极性流注生长概率模型。林家齐等<sup>[11]</sup>考虑放电生长几率与局部电场的随机关系, 模拟出了针-平板电极系统的电场分布。这些所涉及的基本上属于实验室内的高压放电。近年来, 随机放电模型在云内闪电和云地闪电的模拟研究上取得了长足的进展, Mansell 等<sup>[12]</sup>基于随机放电模型, 建立了雷暴云起、放电模式, 并进行了云内闪电和云地闪电的模拟研究, 成功地再现了云内闪电双层、分叉通道现象。Tan 等<sup>[13]</sup>在积云起电模式模拟的背景电场中采用随机击穿放电参数化模型, 模拟了云内闪电放电通道的精细结构; Rioussset 等<sup>[14]</sup>考虑了每一个待发展连接的局部电场概率, 在假定的云电荷结构背景下模拟了云内闪电放电通道, 并估算了通道感应电荷量; Tao 等<sup>[15]</sup>则在随机模型中改进了云地闪电的处理方案, 模拟研究了云地闪电通道发展的精细结构和雷暴云电荷输送问题。上述模拟结果在闪电通道结构特征、扩展范围和感应电荷等方面获得了 VHF

2010-05-20 收到, 2010-11-24 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41075003, 40875003), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)200706022)

\* E-mail: renxy@cma.gov.cn

源定位、电场变化和照相等观测事实的一定支持,但没有考虑下行先导与地面突出尖端之间的相互作用问题,而这是雷电物理和防雷工程面临的一个基础性科学问题。最近,随机模型的建立及应用也已开始受到广泛关注,特别是在输电线路的雷电屏蔽研究中,He 等<sup>[16]</sup>考虑了发展概率与局部电场的随机关系,模拟了闪电先导与传输线的相互作用。但是,地面建筑物形状和几何特征千变万化,如何将随机放电模型应用于更多形态的地面复杂建筑物与云地闪电相互作用的模拟研究,是一个迫切而且重要的课题。另外,对模拟结果的观测检验更为缺乏。

本文从先导发展的随机过程考虑,建立了一个闪电先导的二维随机模式,模式考虑了上行先导的产生,旨在深入了解闪电接地过程的形态和特征以及建筑物避雷针的保护作用。

## 1 闪电随机模式的模拟方法

### 1.1 闪电随机模型的建立

选取地面上方 800 m×800 m 的范围为主要研究区域。考虑到计算机进行迭代计算所耗费的机时较多,因此将模拟区域离散为 80×80 个边长为 10 m 的正方形网格。

模式中定义下行先导为负先导,上行先导为正先导。边界条件定义为下行先导、建筑、避雷针和地面满足 Dirichle 边界条件,若二维场域边界上的电位  $\varphi=f$ ,  $f$  为定值,则这种边界条件称为 Dirichle 边界条件。空气边界满足 Neumann 边界条件,若二维场域边界上电位法向的导数值满足  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}=f$ ,  $f$  为定值,则这种边界条件称为 Neumann 边界条件。取避雷针长度为 10 m,避雷针位于建筑顶部的中间位置。为了考察建筑尺寸及下行先导与避雷针水平距离不同对连接过程的影响,将建筑的二维尺寸定义为 3 种不同的情况,分别为 40 m(宽)×30 m(高),40 m(宽)×60 m(高)和 80 m(宽)×30 m(高);将下行先导与避雷针的水平距离定义为 6 种不同的情况,分别为 0, 50, 100, 150, 200 m 和 250 m。

模拟区域的空间电位满足泊松方程,采用 Matlab 超松弛迭代算法求解电位分布。由于简单迭代

法的收敛速度较慢,因此采用超松弛的迭代算法,即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:

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

式(1)中,  $\omega$  为松弛因子的最佳值:

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

式(2)中,  $m, n$  分别为  $x, y$  方向的网格数。不同的  $\omega$  值,对应不同的收敛速度。选取恰当的  $\omega$  值将加快收敛速度。

模式中的背景电场定义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。模拟区域的合成电场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,这种影响远远大于背景电场的影响。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<sup>[17-18]</sup>;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<sup>[19]</sup>,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。模式中假定地面上方 800 m 范围内的背景电场随高度的增加而线性增加,下边界(地面)的电场为 10 kV/m,随着高度的增加电场以 0.1 kV/m 的增长系数增加。

模式中假定下行先导电位为恒定值 -40 MV。观测到下行先导的速度典型值为  $2 \times 10^5$  m/s<sup>[20]</sup>。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<sup>[21]</sup>,在这里取上行先导的速度为这两个值的算术平均值  $5 \times 10^4$  m/s,因此,先导速度比为 4:1(下行先导与上行先导的速度比),即在模拟中下行先导每发展 4 步,上行先导发展 1 步。

模拟中先导每发展 1 步,则发展 1 个格点。图 1 为先导发展示意图,其中黑色实心圆点为先导已发展点,黑色实心圆点周围 1 个格点范围内的空心圆点为先导待发展点,根据概率从所有待发展点中随机选取先导下一步的发展点。

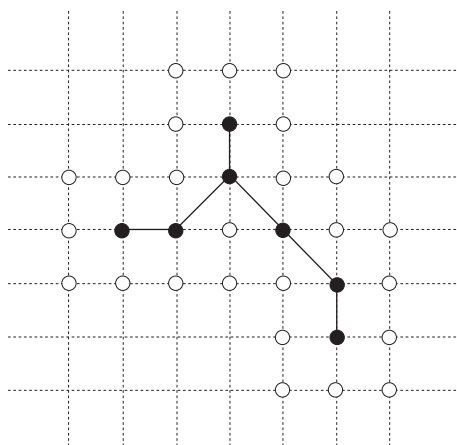


图1 先导发展示意图

Fig. 1 Schematic of leader propagation

## 1.2 先导通道发展的概率公式

先导通道发展的概率<sup>[8-9,14]</sup>:

$$p_i = \frac{|E_i - E_{th}^{\pm}|^{\eta}}{\sum_i |E_i - E_{th}^{\pm}|^{\eta}} \quad (3)$$

对于空气中的流光放电,取 $\eta=1$ <sup>[22]</sup>。 $E_i$ 为每一个待发展连接 $i$ 的电场。 $E_{th}^{\pm} = \pm 216 \text{ kV/m}$ ,其中, $E_{th}^{+}$ 和 $E_{th}^{-}$ 分别为正、负先导传播开始的电场。

取 $\eta=1$ ,上面的概率公式可以转换为

$$p_i(E) = \begin{cases} \frac{1}{F} (|E_i| - |E_{th}^{\pm}|), & |E_i| > |E_{th}^{\pm}|; \\ 0, & |E_i| \leq |E_{th}^{\pm}|. \end{cases} \quad (4)$$

其中, $F = \sum_i (|E_i| - |E_{th}^{\pm}|)$ 。

利用转换后的概率公式,可以计算出每一个待发展点的发展概率,依照概率大小随机选取先导下一步的发展方向。

## 2 模式验证及初步模拟结果

### 2.1 模式验证

图2为一次模拟的模拟结果,模拟了下行先导发展并与避雷针产生的上行先导相连接的情况。图中红色圆点为下行先导发展点,绿色圆点为上行先导发展点。

从图2可以看出:④图中下行先导的发展出现了明显的分叉现象,且随着下行先导向地面的发展,接近地面时分叉明显增多。通过对自然负地闪的观测,发现超过90%的负地闪首次回击前下行梯级先导具有明显的多级分叉现象。且随着先导的向下发展,接近地面时分叉逐渐增多<sup>[23]</sup>。图2中的模拟结

果与实际观测结果相符合。⑤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<sup>[24]</sup>的研究结果一致。图2对应的先导发展过程中下行先导的感应电荷如图3所示,从图3可以看出,随着下行先导的发展,下行先导通道的感应电荷逐渐增加。余晔等<sup>[25]</sup>模拟得到先导通道平均感应电荷线密度约为 $0.08 \times 10^{-3} \sim 0.34 \times 10^{-3} \text{ C/m}$ ,郑栋等<sup>[26]</sup>利用人工触发闪电产生的地面电场测量并结合模式计算,得到直窜先导通道中的电荷线密度约为 $0.049 \times 10^{-3} \sim 0.13 \times 10^{-3} \text{ C/m}$ 。从图3可以得到,下行先导的感应电荷的数量级为 $10^{-4} \text{ C/m}$ ,与前人的结果类似。这里给出的只是800 m高度以下的先导通道感应电荷密度分布的估计值,如何与观测反演的先导通道电荷密度进行比对并改进先导感应电荷密度的计算方

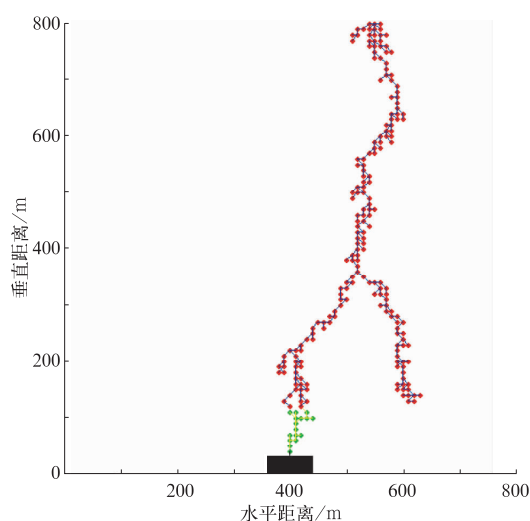


图2 一次模拟的模拟结果

Fig. 2 Simulation results for one simulation

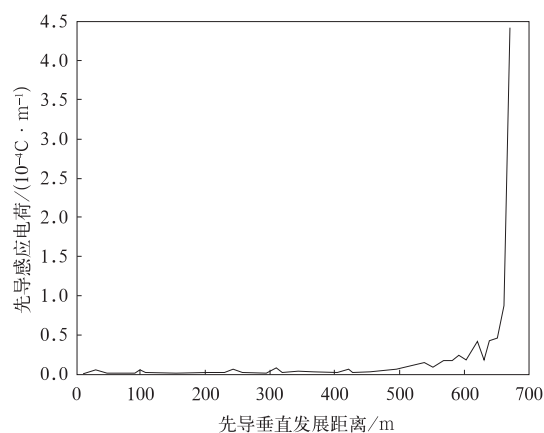


图3 下行先导感应电荷的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of induced charge of downward leader

法,还有待今后进一步研究。

2.2 初步模拟结果

① 模拟的连接过程形态呈现多样性。

根据下行先导距离避雷针水平距离的不同,将模拟分为 6 种不同的情况,分别为 0,50,100,150,200 m 和 250 m。根据建筑物尺寸不同,又将模拟

分为 3 种不同情况,分别为 40 m×30 m, 40 m×60 m和 80 m×30 m。每一种情况都进行 100 次模拟,共进行 1800 次模拟。这里根据上行先导的产生位置和下行先导的接地情况,将模拟结果分为 16 种不同情况,每种情况说明如表 1 所示。

表 1 先导二维随机模式 16 种模拟结果的说明

Table 1 Description of 16 simulation results of 2D random lightning leader model

| 序号    | 产生上行先导的位置 |      |    | 下行先导的连接位置  |             |           |    |      |
|-------|-----------|------|----|------------|-------------|-----------|----|------|
|       | 避雷针       | 建筑表面 | 地面 | 避雷针产生的上行先导 | 建筑表面产生的上行先导 | 地面产生的上行先导 | 地面 | 建筑表面 |
| 情况 1  | √         |      |    | √          |             |           |    |      |
| 情况 2  |           |      | √  |            |             | √         |    |      |
| 情况 3  | √         |      | √  | √          |             |           |    |      |
| 情况 4  | √         |      | √  |            |             | √         |    |      |
| 情况 5  | √         |      | √  |            |             |           | √  |      |
| 情况 6  | √         | √    |    | √          |             |           |    |      |
| 情况 7  | √         | √    |    |            | √           |           |    |      |
| 情况 8  | √         | √    |    |            |             |           |    | √    |
| 情况 9  |           | √    | √  |            | √           |           |    |      |
| 情况 10 |           | √    | √  |            |             | √         |    |      |
| 情况 11 |           | √    | √  |            |             |           | √  |      |
| 情况 12 | √         | √    | √  | √          |             |           |    |      |
| 情况 13 | √         | √    | √  |            | √           |           |    |      |
| 情况 14 | √         | √    | √  |            |             | √         |    |      |
| 情况 15 | √         | √    | √  |            |             |           | √  |      |
| 情况 16 | √         | √    | √  |            |             |           |    | √    |

图 4 为表 1 中的 16 种情况对应的模拟结果图。其中红色圆点为下行先导发展点,绿色圆点为上行先导发展点。

从图 4 中可以看出连接过程呈现出了多样性的特点: ①这 16 种情况均产生了分叉现象,且在下行先导接近地面时,分叉明显增多。②下行先导除了可以与上行先导连接外,还可以与未产生上行先导的建筑和地面连接。在模式中,下行先导最终的连接位置是根据概率公式随机选取的。在对高建筑物或高塔的观测中,常常观测到没有与下行先导相连接的上行先导,这是由于当建筑物或地面与下行先导之间的电位梯度比上行先导与下行先导之间的电位梯度大时,建筑物或地面与下行先导连接的概率就大。情况 5, 11, 15 中下行先导与地面连接;情况 8,16 中下行先导与建筑连接。在高建筑物或高塔上常常观测到没有与下行先导相连接的上行先导<sup>[27]</sup>。③地面多处产生上行先导,而下行先导,只与其中之一连接,甚至与

未产生上行先导的地面连接。情况 4, 10, 14 中地面多处产生了上行先导,但下行先导只与其中之一连接。这与实际观测结果是一致的,图 5 是利用高速摄像在广东地区观测记录的 1 次地闪过程。由图 5 可见,在该次闪电接地点附近的建筑物上产生了多个上行的连接先导。④下行先导不一定与上行先导的尖端连接,而是与某一分枝或中部某一点连接。Lü 等<sup>[28]</sup>利用高速摄像也发现上行先导产生了两个分枝,下行先导与上行先导的一个分枝连接。⑤避雷针可能未产生上行先导。情况 2,9,10,11 中避雷针均无上行先导的产生。

② 避雷针正上方的下行先导不是百分之百击中避雷针。

表 2 为先导二维随机模式的 16 种模拟结果的次数统计表。首先根据下行先导与避雷针水平距离的不同,将模拟分为 6 种情况。接下来根据建筑尺寸的不同将每种情况再分为 3 种不同的情况。

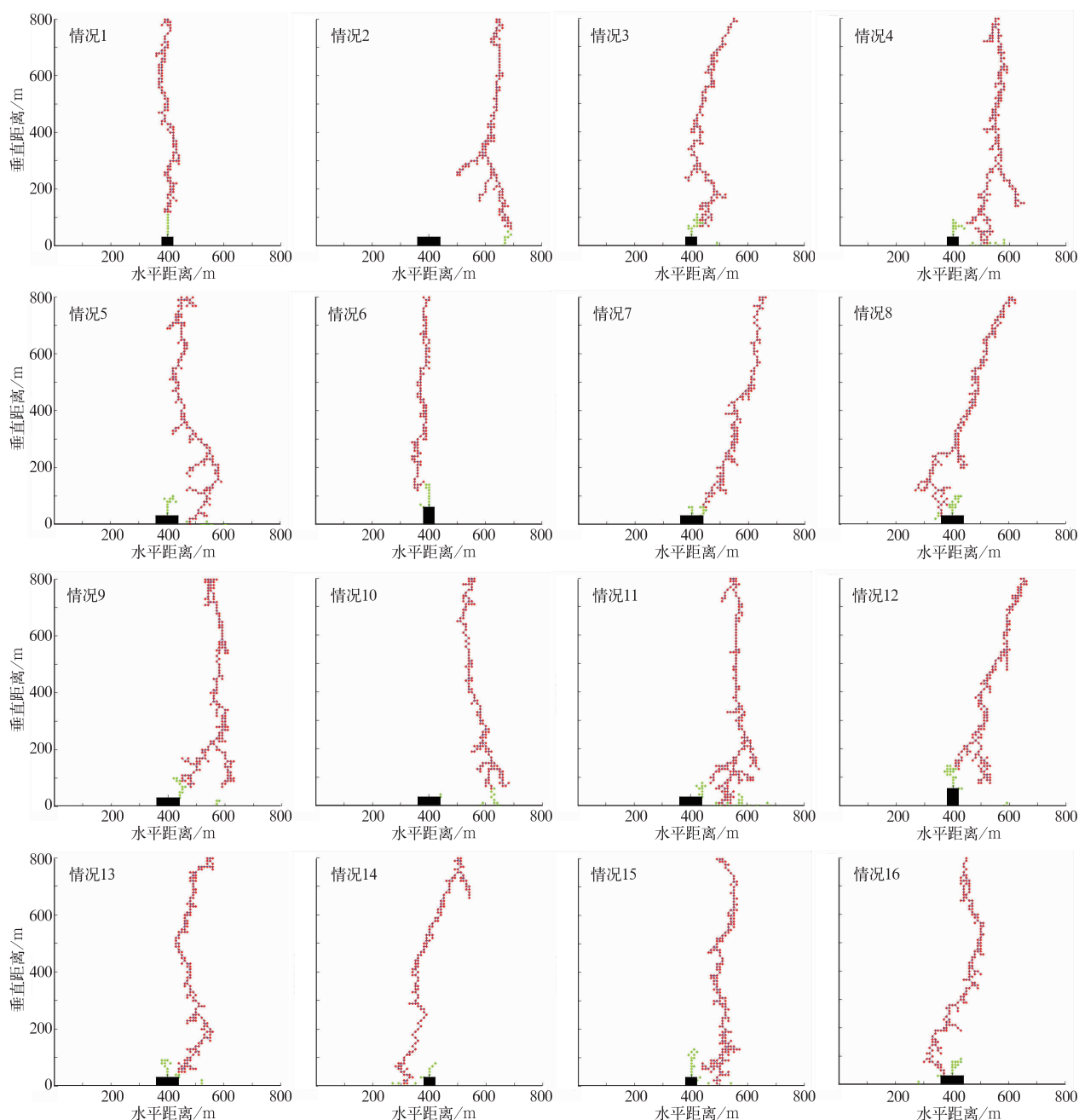


图4 先导二维随机模式16种不同情况的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of 16 different conditions of 2D random lightning leader model

从表2中可以看出,情况1,3,6,12的连接位置为避雷针产生的上行先导,这4种情况下避雷针有效地保护了建筑,定义其为类型一。情况7,8,9,13,16的连接位置为建筑表面或建筑表面产生的上行先导,定义其为类型二。情况2,4,5,10,11,14,15的连接位置为地面或地面产生的上行先导,定义其为类型三(表3)。

从表3可以看出,当下行先导与避雷针的水平

距离为0时,有4次下行先导与地面或地面产生的上行先导连接,有3次下行先导与建筑或建筑产生的上行先导连接,下行先导并不是百分之百与避雷针产生的上行先导连接。

③ 远离避雷针的下行先导仍有很大概率被避雷针拦截。

如表3所示,当下行先导与避雷针的水平距离为250 m时,针对3种不同尺寸的建筑,仍有超过半

数的情况下行先导与避雷针产生的上行先导连接,由模拟结果可以看出,建筑物和避雷针对地闪接地行为的影响范围要远远大于按照常规滚球法预测的保护范围。

④ 绝大多数情况下避雷针可以有效拦截闪电先导。

从表 3 中可以看出,类型一(即下行先导与避雷针产生的上行先导连接)的情况共有 1645 次,占总模拟次数的91.4%。类型二(即下行先导与建筑或建筑产生的上行先导连接)的情况共有 28 次,占总模拟次数的 1.6%。由此可知,在绝大多数情况下,避雷针可以有效地保护建筑物免于雷击,在存在避雷针的情况下,闪电先导击中建筑的概率很小。

⑤ 在下行先导与避雷针水平距离一定的条件下,建筑物越宽越矮,避雷针有效拦截闪电先导的概率就越小。

从表 3 中可以看出,下行先导与避雷针水平距离 0,50,100,150,200 m 和 250 m 6 种情况均呈现



图 5 2009 年 8 月 24 日 19:08:04(北京时)  
广州市 1 次地闪高速摄像记录  
Fig. 5 High-speed video recording of  
CG lightning at 19:08:04 24 August  
2009 in Guangzhou

表 2 先导二维随机模式 16 种模拟结果的次数统计表  
Table 2 Numbers of 16 simulation results of 2D random lightning leader model

| 下行先导与<br>避雷针<br>水平距离/m | 建筑尺寸<br>(宽×高) | 情况<br>1 | 情况<br>2 | 情况<br>3 | 情况<br>4 | 情况<br>5 | 情况<br>6 | 情况<br>7 | 情况<br>8 | 情况<br>9 | 情况<br>10 | 情况<br>11 | 情况<br>12 | 情况<br>13 | 情况<br>14 | 情况<br>15 | 情况<br>16 |
|------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0                      | 40 m×30 m     | 76      | 0       | 17      | 2       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 2        | 1        | 1        | 1        |
|                        | 40 m×60 m     | 90      | 0       | 3       | 2       | 1       | 2       | 1       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 80 m×30 m     | 65      | 0       | 8       | 8       | 1       | 8       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 5        | 2        | 2        | 0        | 1        |
| 50                     | 40 m×30 m     | 76      | 0       | 12      | 7       | 1       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        |
|                        | 40 m×60 m     | 92      | 0       | 3       | 3       | 0       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 80 m×30 m     | 68      | 0       | 12      | 6       | 2       | 6       | 0       | 1       | 0       | 0        | 0        | 3        | 0        | 1        | 0        | 1        |
| 100                    | 40 m×30 m     | 81      | 0       | 11      | 3       | 1       | 0       | 1       | 0       | 0       | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0        |
|                        | 40 m×60 m     | 97      | 0       | 3       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 80 m×30 m     | 69      | 0       | 10      | 5       | 3       | 6       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 5        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 150                    | 40 m×30 m     | 73      | 0       | 21      | 3       | 2       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 40 m×60 m     | 90      | 0       | 7       | 0       | 0       | 2       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 80 m×30 m     | 73      | 0       | 10      | 6       | 0       | 4       | 0       | 0       | 1       | 1        | 1        | 2        | 2        | 0        | 0        | 0        |
| 200                    | 40 m×30 m     | 68      | 0       | 22      | 7       | 2       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        |
|                        | 40 m×60 m     | 91      | 0       | 4       | 3       | 0       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        |
|                        | 80 m×30 m     | 62      | 0       | 15      | 3       | 3       | 6       | 1       | 1       | 0       | 2        | 0        | 5        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 250                    | 40 m×30 m     | 56      | 2       | 25      | 13      | 2       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 0        | 0        |
|                        | 40 m×60 m     | 75      | 0       | 14      | 7       | 1       | 1       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 1        |
|                        | 80 m×30 m     | 46      | 1       | 14      | 11      | 1       | 4       | 1       | 0       | 2       | 7        | 0        | 8        | 3        | 2        | 0        | 0        |
| 总 计                    |               | 1348    | 3       | 211     | 89      | 20      | 43      | 4       | 2       | 3       | 10       | 1        | 33       | 14       | 12       | 2        | 5        |

表 3 先导二维随机模式 3 种类型模拟结果的次数统计表  
Table 3 Numbers of three type simulation results of 2D random lightning leader model

| 下行先导与避<br>雷针水平距离/m | 建筑尺寸<br>(宽×高) | 类型一                   | 类型二                     | 类型三                     |
|--------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
|                    |               | (连接位置:避雷针<br>产生的上行先导) | (连接位置:建筑或<br>建筑产生的上行先导) | (连接位置:地面或地面<br>产生的上行先导) |
| 0                  | 40 m×30 m     | 93                    | 3                       | 4                       |
|                    | 40 m×60 m     | 95                    | 2                       | 3                       |
|                    | 80 m×30 m     | 86                    | 3                       | 11                      |

续表 3

| 下行先导与避雷针水平距离/m | 建筑尺寸<br>(宽×高) | 类型一<br>(连接位置:避雷针产生的上行先导) | 类型二<br>(连接位置:建筑或建筑产生的上行先导) | 类型三<br>(连接位置:地面或地面产生的上行先导) |
|----------------|---------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 50             | 40 m×30 m     | 90                       | 1                          | 9                          |
|                | 40 m×60 m     | 96                       | 1                          | 3                          |
|                | 80 m×30 m     | 89                       | 2                          | 9                          |
| 100            | 40 m×30 m     | 93                       | 1                          | 6                          |
|                | 40 m×60 m     | 100                      | 0                          | 0                          |
|                | 80 m×30 m     | 90                       | 1                          | 9                          |
| 150            | 40 m×30 m     | 95                       | 0                          | 5                          |
|                | 40 m×60 m     | 99                       | 1                          | 0                          |
|                | 80 m×30 m     | 89                       | 3                          | 8                          |
| 200            | 40 m×30 m     | 90                       | 0                          | 10                         |
|                | 40 m×60 m     | 97                       | 0                          | 3                          |
|                | 80 m×30 m     | 88                       | 3                          | 9                          |
| 250            | 40 m×30 m     | 82                       | 0                          | 18                         |
|                | 40 m×60 m     | 91                       | 1                          | 8                          |
|                | 80 m×30 m     | 82                       | 6                          | 22                         |
| 总计             |               | 1645                     | 28                         | 137                        |

出上述特点。

### 3 结论与讨论

通过闪电先导二维随机模型的建立及其模拟结果,得到以下结论:

1) 模拟得到下行先导感应电荷的数量级为  $10^{-4}$  C/m。下行先导出现明显的分叉,且先导接近地面时分叉逐渐增多。

2) 模拟的连接过程形态呈现多样性的特点。下行先导除了可以与上行先导连接外,还可以与未产生上行先导的建筑和地面连接。地面多处产生上行先导而下行先导只与其中之一连接,甚至与未产生上行先导的地面连接。下行先导不一定与上行先导的尖端连接,而是与某一分枝或中部某一点连接。避雷针可能未产生上行先导。

3) 避雷针正上方的下行先导不是百分之百击中避雷针,而有发生侧击或击中附近地面的可能性。

4) 远离避雷针的下行先导仍有很大概率被避雷针拦截,建筑物和避雷针对地闪接地行为的影响范围要远远大于按照常规滚球法预测的保护范围。

5) 绝大多数情况下避雷针可以有效拦截闪电先导。

6) 在下行先导与避雷针水平距离一定的条件下,建筑物越宽越矮,避雷针有效拦截闪电先导的概率就越小。

以上的模拟结果只是实现了有限的空间范围内

先导二维随机模式的模拟,还需在更大的空间范围内对先导三维随机模式的模拟结果进行初步分析和讨论,以了解避雷针在三维空间放电的行为特点以及其对建筑物的保护作用。同时,本文假定了背景电场随着高度的增加电场以  $0.1$  kV/m 的增长系数线性增加,这是一种理想条件下的假定,下一步的工作中将考虑实际情况,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;另外,也需要通过大量的自然闪电和人工引雷观测进一步检验模拟结果的合理性。

### 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] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 2006, 17(5): 611-620.
- [5] Mazur V, Ruhnke L H, Bondiou-Clegric 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.
- [6] 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.
- [7] 任晓毓,张义军,吕伟涛,等. 雷击建筑物的先导连接过程模拟. 应用气象学报, 2010, 21(4): 450-457.

- [8] Wiesmann H J, Zeller H R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. *J Appl Phys*, 1986, 60(5): 1770-1773.
- [9] Femia N, Niemeyer L, Tucci V. Fractal characteristics of electrical discharges: Experiments and simulation. *J Phys D Appl Phys*, 1993, 24(6): 615-622.
- [10] 贺恒鑫, 何俊佳, 钱冠军, 等. 棒-板长间隙正极性流注生长概率模型及应用. 高电压技术, 2008, 34(10): 2047-2053.
- [11] 林家齐, 雷宇, 雷清泉. 电介质中放电图形的计算机模拟. 电工技术学报, 1997, 12(2): 53-56.
- [12] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2002, 107(D9): ACL2-1-12.
- [13] Tan Yongbo, Tao Shanchang, Zhu Baoyou. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. *Geophys Res Lett*, 2006, 33 (L09809): 1-4.
- [14] Rioussset J A, Pasko V P, Krehbiel P R, et al. Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations. *J Geophys Res*, 2007, 112(D15203): 1-17.
- [15] 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.
- [16] He Jinliang, Zhang Xuwei, Dong Lin, et al. Fractal model of lightning channel for simulating lightning strikes to transmission lines. *Science in China (Series E)*, 2009, 52(11): 3135-3141.
- [17] 郅秀书, 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.
- [18] 郅秀书, 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.
- [19] 郅秀书, 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.
- [20] 王道洪, 郅秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 58-66.
- [21] Mazur V, Rhunke L H. Evaluation of the Lightning Protection System at the WSR-88D Radar Sites. National Oceanic and Atmospheric Administration Final Report, 2001: 1-53.
- [22] Popov N A. Spatial structure of the branching streamer channel in a corona discharge. *Plasma Physics Reports*, 2002, 28 (7): 615-622.
- [23] 张义军, 吕伟涛, 郑栋, 等. 负地闪先导-回击过程的光学观测和分析. 高电压技术, 2008, 34(10): 2022-2029.
- [24] 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.
- [25] 余晔, 郅秀书. 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.
- [26] 郑栋, 张义军, 吕伟涛, 等. 先导-回击模型与人工触发闪电特征参数计算. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 151-157.
- [27] McEachron K B. Lightning to Empire state building. *J Franklin Inst*, 1939, 227: 175-203.
- [28] Lü Weitao, Zhang Yang, Chen Luwen, et al. Attachment Processes of Two Natural Downward Lightning Flashes Striking on High Structures. Proceedings of 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2010.

## Establishment and Application of Random Lightning Leader Model

Ren Xiaoyu<sup>1)</sup> Zhang Yijun<sup>1)</sup> Lü Weitao<sup>1)</sup> Tao Shanchang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>2)</sup> (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

### Abstract

Lightning occurred in the atmosphere 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. According to characteristics of CG lightning, a model of random lightning leader is established. The connection process of lightning leader is simulated. The 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 probability, and final connection location of downward leader is chosen randomly by the probability formula.

The induced charge of downward leader increases with the propagation of downward leader. Simulation results of a random model show that the induced charge of downward leader is about  $10^{-4}$  C/m. With the development of the downward leader, the branch of downward leader increases. There are diversiform forms in connection process. Downward leader can connect with structure or ground which do not produce upward leader besides upward leader. Downward leader can connect with one of the upward leaders on the ground, and even connect with the ground which does not produce upward leader. Downward leader does not always connect with the tip of upward leader, and it can connect with one branch or middle of the upward leader. Lightning rod may do not produce upward leader and the downward leader above doesn't always connect with the lightning rod, sometimes it connects with structure and ground. The downward leader far away from lightning rod can also connect with the lightning rod. In most conditions, lightning rod can protect the structure from lightning. With fixed distances from downward leader and lightning rod, wider and lower structure is less likely protected by lightning rod.

These simulation results are achieved with two-dimensional random lightning leader model within the range of limited space. More simulation and analysis are needed for three-dimensional random lightning leader model within larger spatial extent to find out the behavior characteristics of lightning rod and investigate the protection of lightning rod to buildings. A large number of natural lightning and triggered lightning observations are also needed to further check the reasonableness of the simulation results.

**Key words:** leader; connection process; random discharge model