

廖义慧, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于闪电先导随机模式对不同连接形态的模拟. 应用气象学报, 2016, 27(3): 361-369.
doi:10.11898/1001-7313.20160311

基于闪电先导随机模式对不同连接形态的模拟

廖义慧¹⁾²⁾ 吕伟涛²⁾³⁾ 齐奇²⁾ 张荣²⁾ 张冬冬¹⁾
谭涌波^{1)2)3)*} 张义军²⁾³⁾

¹⁾(南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

³⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘 要

考虑到下行负极性地闪过程中大多上行正先导发展时不分叉的观测事实, 基于已有的闪电先导二维随机模式, 改变上行正先导的模拟方案, 使其发展时不产生分叉, 并对雷击高建筑物过程中下行先导与上行连接先导(upward connecting leader, UCL)之间头部-头部连接和头部-侧面连接(侧击)的两种形态进行模拟。以高度为 440 m 的建筑物为例, 通过改变下行先导始发点(高度为 1000 m)与高建筑物的水平距离, 模拟高建筑物上雷击过程中先导之间的连接过程, 结果表明: 当下行先导始发点与高建筑物的水平距离从 0 增加到 700 m 时, UCL 的长度呈持续增大趋势, UCL 受侧击的概率总体上呈先增大后减小的趋势(在距离为 500 m 时达到最大值 58%), 侧击时 UCL 连接点以上的部分占整个 UCL 长度的比例总体呈持续增大趋势(13%~49%)。

关键词: 高建筑物; 连接点; 接地点; 侧击

引 言

雷电是大气中常见的一种放电现象, 会造成严重灾害, 特别是随着电子设备的大量采用, 雷电对人类的生产生活的影响越来越大^[1-2]。Dwyer 等^[3]提出, 雷电连接过程是雷电物理研究领域仍未解决的十大问题之一, 正确认识先导发展以及连接过程对雷电防护系统的合理设计至关重要。

当下行先导和上行先导互相靠近时, 人们通常认为下行先导的头部会与上行连接先导的头部连接(即头部-头部连接)。然而, 研究人员最近有了新的发现。Lu 等^[4]分析了某次击中广州国际金融中心(高度为 440 m)的下行负极性地闪的高速摄像资料, 首次发现下行先导和上行连接先导(upward connecting leader, 简称 UCL)的连接点在 UCL 头

部以下的现象(即头部-侧面连接, 简称侧击), Gao 等^[5]在另一次闪电中也发现了类似情况。本文提到的侧击是下行先导与 UCL 之间的侧击, 不同于建筑物本身被雷电从侧面击中的现象^[6]。进一步分析^[7]表明: 在雷击高建筑物过程中, 先导侧击现象比头部-头部连接现象更加普遍。谭涌波等^[8]在地闪近地面形态特征的数值模拟中发现, 闪电空间形态的差异(随机性参数的差异)会带来闪电连接形态的差异, 如上行先导的尖端与下行先导的主支或尖端相连、上行先导的主支与下行先导的尖端相连等。但上述研究未涉及下行闪电与建筑物的水平距离对连接过程中先导之间的连接形态、下行先导击中 UCL 具体位置影响。

本文在已有的闪电先导二维随机模式基础上进行一些调整, 对高建筑物上先导的连接过程进行模拟, 重点分析连接过程中 UCL 特征。通过改变下行

2015-11-02 收到, 2016-02-22 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41475003, 51420105011), 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2014R015), 国家重点基础研究发展计划(2014CB441405)

* 通信作者, email: ybtan@ustc.edu

负极性梯级先导起始点到高建筑物中心的水平距离,对高建筑物上的闪电过程进行模拟,从模拟结果中统计不同位置产生 UCL 的概率、UCL 的平均长度、UCL 受侧击的概率、侧击时 UCL 连接点以上部分占整个 UCL 长度的比例等,并对高建筑物上 UCL 的特点以及 UCL 受侧击的特点进行探讨,以深化人们对闪电先导发展特征以及先导之间连接形态特征的认识。

1 模式简介和试验设计

1.1 模式简介

本文选用先导二维随机发展模式进行模拟。任晓毓等^[9]建立了二维随机模式,模拟发现下行先导梯级通道发展过程中具有明显的分叉现象,且下行先导距离地面越近,分叉现象越明显,这与实际观测结果相符^[10]。李丹等^[11]在此基础上模拟了风力发电机受雷击的情况,得出风力发电机叶片姿态与雷击概率的关系,与 Peesapati 等^[12]结果一致。由此可见,采用先导随机模式对雷击过程进行模拟是可行的。

在观测到的自然闪电连接过程中,上行先导分叉现象并不常见,因此,本研究在模式中将上行先导发展设定为不分叉。在确定先导下一步发展点时,上行先导和下行先导有所区别。在确定下行先导下一步发展点时,先计算下行先导所有已发展点邻近点的电场,如图 1 上半部分所示,实心圆为下行先导已发展点,空心圆为先导通道所有邻近格点,对每一个邻近格点均计算其电场强度,从中筛选出电场条件满足先导发展的点(线型较粗的空心圆),作为下行先导的下一步待发展点,然后计算每一个待发展点的概率,所有待发展点的概率合并构成一个 $[0,1]$ 的概率区间,最后由随机函数生成的随机数确定下行先导的下一步发展点^[13-17]。上行先导则只有上一步发展点的邻近格点才有可能成为下一步发展点,如图 1 空心三角形所示(实心三角形为上行先导已发展点),同样,先根据计算出的电场筛选出待发展点(线型较粗的空心三角形),再根据概率确定上行先导的下一步发展点。

模拟选择近地面 $1200\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的区域,令地面及高建筑物的电势为 0,下行先导从 $y=1000\text{ m}$ 的

高度向下始发,下行负极性梯级先导的电势为 -40 MV 。地面建筑物的高度取 440 m (广州国际金融中心的高度),宽取 60 m 。高建筑物的中心位置在地面水平方向 $x=800\text{ m}$ 处。空气上边界、下行先导、地面高建筑物以及地面满足 Dirichlet 边界条件,空气的侧边界满足 Neumann 边界条件,模拟区域内的空间电位均满足泊松方程。通过求解泊松方程得到模拟区域中各点的电位,进一步得到电场,从而判断先导的下一步发展点。下行先导和上行先导的速度比设置为 $4:1$ ^[18-19]。上行先导和下行先导的传播阈值为 216 kV/m ,上行先导的触发阈值为 216 kV/m ^[20]。通过判断下行先导所有点与上行先导所有点之间的电场确定是否满足先导之间最后一跳并连接的条件,先导连接的电场阈值为 500 kV/m ^[21-22]。

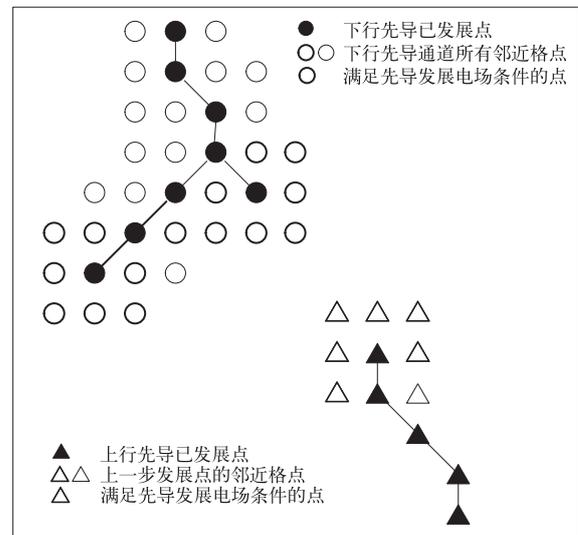


图 1 先导发展示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the development of the leader

1.2 试验设计

模拟区域的空间分辨率设为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,通过改变下行先导始发点与高建筑物的水平距离 d 分析高建筑物上先导连接过程的一些规律。如图 2 所示,高建筑物位于地面上 800 m 处,从其正上方开始,依次向左每间隔 100 m 为一种情况,共 8 种情况,每种情况模拟 400 次。着重统计各种情况下接地点的位置、连接点的位置以及与 UCL 长度相关的量。

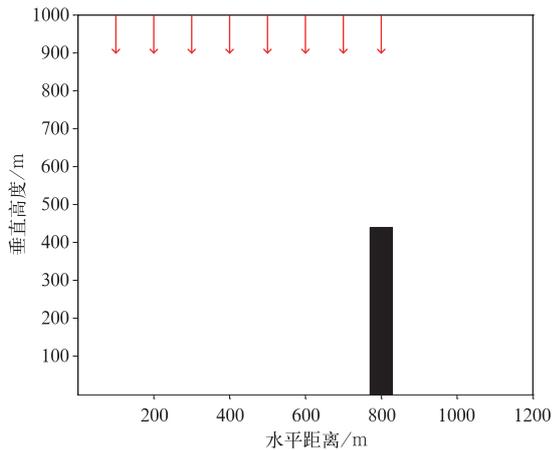


图 2 建筑物与下行先导始发点位置的选取
Fig. 2 The building and the selection of initiation positions for the downward leader

2 模拟结果

2.1 接地点位置

图 3 给出了接地点分别在高建筑物顶面、高建

筑物侧面、地面的情况。情形 1, 2, 3 为接地点在高建筑物顶面的情况, 情形 1 为下行先导与 UCL 的头部连接, 情形 2 为下行先导与 UCL 的侧面连接, 情形 3 为高建筑物顶面同时有多个上行先导、下行先导与其中之一连接。情形 4 为接地点在高建筑物侧面的情况, 下行先导与 UCL 头部连接, 同时高建筑物侧面以及顶面存在多个上行未连接先导, 这与 Lu 等^[23]、张义军等^[24]观测到的广州高建筑物上自然下行闪电的高速摄像资料的情况相似。情形 5 为下行先导直接与建筑物的侧面连接, 同时也有上行未连接先导存在的情况。情形 6 为接地点在地面的情况。模拟结果中呈现的接地点的多样性与谭涌波等^[8]模拟结果相似, 接地点的位置具有不确定性。本文通过改变下行先导始发点与高建筑物的水平距离, 分析不同位置受雷击的一些规律, 表 1 给出了 d 不同的情况下, 接地点分别在高建筑物顶面、高建筑物侧面、地面的概率。

图 4a 为各接地点接地概率随 d 变化的趋势图。由表 1 和图 4a 可知, $d \leq 300$ m 时, 下行先导距离建

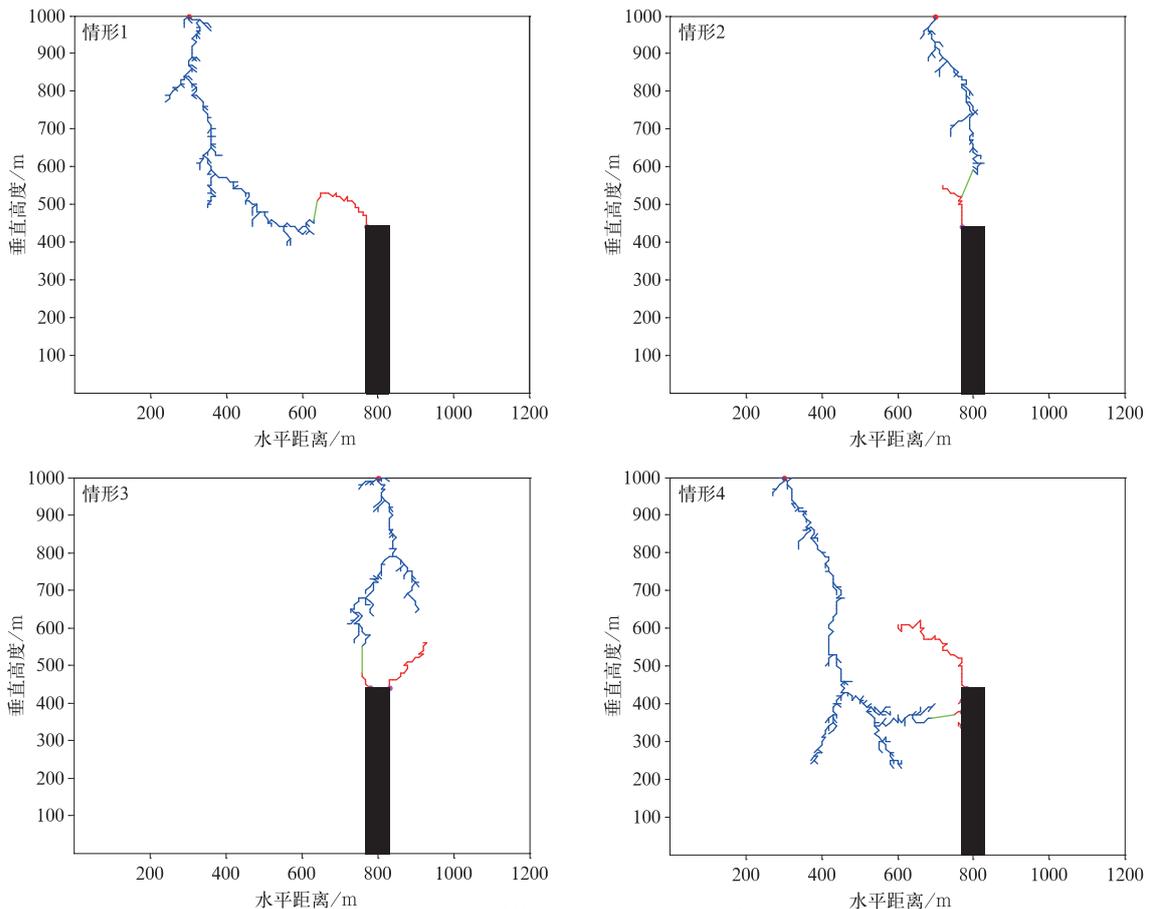
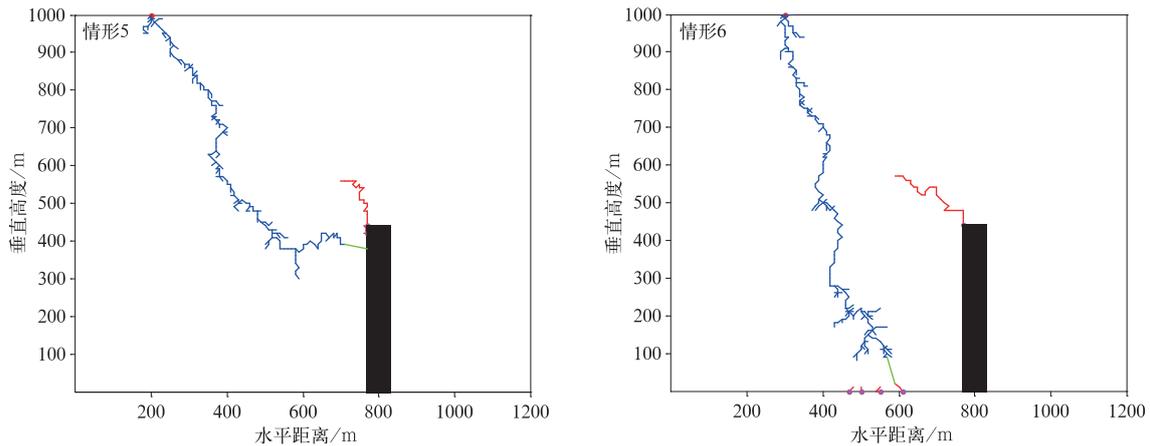


图 3 不同接地点的不同连接形态

Fig. 3 Different connection behavior at different grounding points



续图 3

表 1 不同位置的接地概率

Table 1 Grounding probability at different locations

d/m	地面/%	高建筑物侧面/%	高建筑物顶面/%
0	0	0	100
100	0	0	100
200	0	1	99
300	0	4	96
400	4	23	74
500	25	34	41
600	54	31	15
700	84	14	2

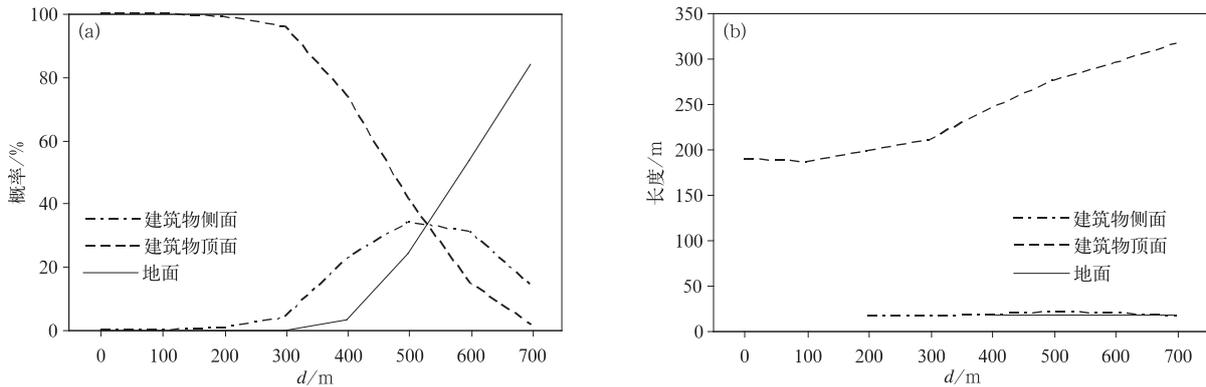


图 4 不同位置接地概率随 d 变化(a)与 UCL 平均长度随 d 变化(b)

Fig. 4 Changes of grounding probability at different locations with d (a) and changes of the average length of UCL with d (b)

筑物较近,更容易在高建筑物顶面诱发上行先导,接地点在建筑物顶面的概率达到 96% 以上。随着下行先导起始点与建筑物的水平距离逐渐增大,闪电击中高建筑物顶面的概率逐渐减小。 $d \geq 200$ m 时,模拟出了高建筑物侧面被闪电击中的情况,该情况发生的概率随 d 的增加先增大($d=500$ m 时达到最

大值)后减小。地面被击中的情况 $d \geq 400$ m 时才模拟到,其概率随 d 的增大迅速增大。综合来看,当 d 为 500 m 左右时,3 个位置的接地概率相当。上述模拟结果主要受闪电下行先导、上行先导以及建筑物附近的电场综合影响。

2.2 不同接地点 UCL 的长度

表2为不同 d 各接地点UCL的长度范围及代数平均值。地面和高建筑物侧面UCL长度的波动范围较小,为几十米左右,随着 d 的增大,UCL长度的最小值不变,最大值在总体上呈增大趋势。高建筑物顶面UCL长度的波动范围较大,上下波动超过400 m,随着 d 的增大,UCL长度的最小值呈增大趋势,而最大值在 $d \leq 500$ m时,呈增大趋势, $d=500$ m时,达到最大值,之后略微减小。不考虑 d ,建筑物顶面UCL长度总范围是44~569 m,Gao等^[5]观测到的6次负地闪中高建筑物上UCL的长

度基本在该范围内。由表2和图4b可知,地面和高建筑物侧面UCL的平均长度均较短,且相差不大,约为16~21 m,而高建筑物顶面的UCL的平均长度总体上随着 d 的增大而增大。由于高建筑物顶面的UCL受侧击的情况较普遍,因此,本文所指的UCL受侧击仅指接地点在高建筑物顶面的情况。为了研究连接点在UCL侧面与UCL长度是否有关,表3给出了两种连接形态下UCL平均长度,由表3可知,UCL受侧击情况下,UCL长度均比相同条件下连接点在UCL头部的情况偏长10~40 m。

表2 各位置起始UCL的长度范围

Table 2 The length of UCL initiating from different locations

d/m	地面		建筑物侧面		建筑物顶面	
	范围/m	平均值/m	范围/m	平均值/m	范围/m	平均值/m
0					44~400	189
100					58~376	187
200			10~24	16	118~428	198
300			24~30	16	134~464	211
400	10~38	18	10~44	18	104~516	245
500	10~58	19	10~64	21	142~569	276
600	10~68	18	10~77	20	157~519	296
700	10~72	18	10~58	16	197~494	317

表3 高建筑物顶面起始的UCL长度范围

Table 3 The length of UCL initiating from the top of the tall structure

d/m	头部连接的UCL		受侧击的UCL	
	范围/m	平均值/m	范围/m	平均值/m
0	44~288	183	74~400	199
100	58~356	179	118~376	198
200	128~428	191	118~390	207
300	134~373	190	134~464	229
400	104~516	239	132~436	251
500	148~508	265	142~569	285
600	157~490	285	187~519	306
700	197~494	307	188~450	320

2.3 高建筑物UCL受侧击情况

从不同 d 的模拟结果中,各取1张UCL受侧击的图,如图5所示(只讨论接地点在高建筑物顶面的UCL的情况),表4给出了详细的模拟结果。

由表4可知,随着水平距离 d 的增加,接地点在建筑物顶面的次数减少,UCL受侧击的概率总体上呈先增大后减小的趋势(图6a), $d=500$ m时,达

到最大值58%。说明在 $d \leq 500$ m时,下行先导始发点离高建筑物越远,下行先导越容易击中UCL的侧面(相对于UCL的头部而言)。随着 d 的增大, R 总体呈增大趋势(图6b),UCL的长度呈增大趋势,因而连接点到UCL头部的长度也明显增大。Lu等^[7]观测到的一个UCL受侧击的个例中,连接点到UCL头部的长度为67 m,表4中有对应情况。

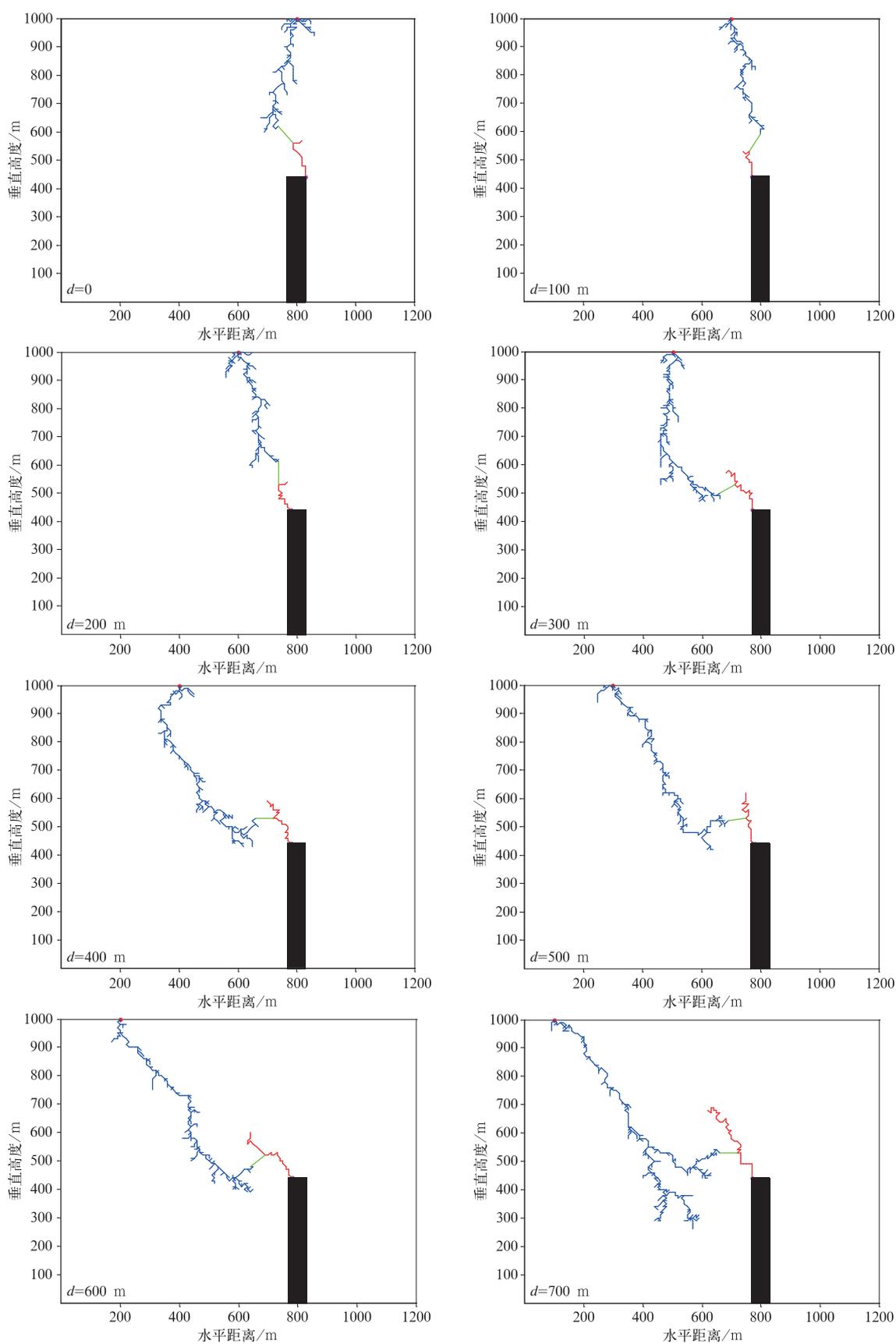
图 5 d 不同 UCL 受侧击的模拟结果Fig. 5 Simulation results of the tip-to-lateral connection behavior with different d

表 4 d 不同情况下 UCL 受侧击情况的模拟结果Table 4 Simulation results of tip-to-lateral connection as the value of d changes

d/m	N_t	N_l	$P/\%$	R	L_u/m	L_c/m
0	400	136	35	0.13	199	27
100	400	165	41	0.17	198	35
200	396	175	44	0.18	207	42
300	384	203	53	0.26	229	66
400	295	149	51	0.26	251	71
500	165	95	58	0.34	285	101
600	59	31	53	0.37	306	110
700	7	2	29	0.49	320	156

注: N_t 为接地点在建筑物顶面的次数, N_l 为 UCL 受侧击的次数, P 为 UCL 受侧击的概率, R 为 UCL 连接点以上的长度与 UCL 总长度比值的平均值, L_u 为 UCL 平均长度, L_c 为连接点到 UCL 头部的长度。

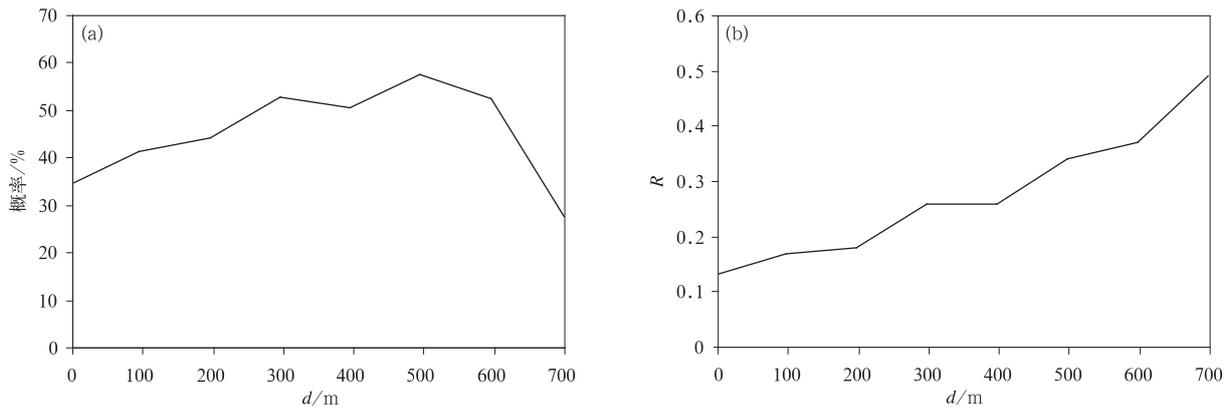


图 6 UCL 受侧击概率随 d 的变化(a)及 R 随 d 的变化(b)
(R 为 UCL 连接点以上的长度与 UCL 总长度比值的平均值)

Fig. 6 Changes of probability of tip-to-lateral connection behavior with d (a) and changes of R with d (b)
(R is the average ratio of the length between connection point to the tip of UCL and the whole length of UCL)

3 结论与讨论

采用闪电先导二维随机模式,通过改变下行先导始发点和高建筑物的水平距离(d),模拟了下行先导发展、上行先导发展和先导之间的连接过程,讨论了高建筑物顶面、高建筑物侧面、地面接地的概率与 d 的关系,建筑物顶面 UCL 受侧击的概率与 d 的关系以及 UCL 长度特征、UCL 连接点以上的长度与 UCL 总长度比值的平均值(R)随 d 的变化等。得到以下结论:

1) 各位置接地概率受下行先导始发位置影响: $d \leq 300$ m 时,超过 96% 的闪电接地点在建筑物顶面; $d > 300$ m 时,随着 d 的增加,接地点在高建筑物顶面的概率迅速减小,而在地面和高建筑物侧面的概率均升高,但高建筑物侧面的接地概率在 $d = 500$ m 时达到最大值,然后开始降低,此后超过 50% 的接地点在地面。

2) UCL 长度受起始位置影响:起始于地面和高建筑物侧面的 UCL 长度较短,波动范围较小(约几十米),起始于高建筑物顶面的 UCL 长度较长,波动范围较大(约 400 m)。另外,头部-侧面连接的 UCL 比头部-头部连接的 UCL 偏长 10~40 m。

3) UCL 受侧击概率受 d 影响:随着水平距离 d 增加,UCL 受侧击的概率总体上呈先增大后减小的趋势($d = 500$ m 时,达到最大值 58%),UCL 连接点以上的部分占整个 UCL 长度的比例总体上呈增加趋势,连接点到 UCL 头部的长度增大明显。

研究中还模拟了不同高度建筑物情形。当建筑物高度分别为 100, 200, 300, 400, 500 m 时,起始于建筑物顶面的 UCL 长度均与建筑物高度呈正相关,且随着建筑物高度增加,接地点在建筑物顶面的概率增加。

本文较好地模拟了闪电下行先导头部与上行先导头部、下行先导头部与上行先导侧面相连接的情形,但由于模拟量大,计算效率相对较低,模式设定

的分辨率较低,未能精细化描述连接过程。本文讨论的是孤立高建筑物上的闪电连接过程,而实际情况高建筑物往往以群体形式存在,在建筑物群的影响下,建筑物受雷击情况可能会有差异,因此,展开高建筑物群闪电模拟,是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Dwyer J R, Uman M A. The physics of lightning. *Physics Reports*, 2014, 534(4): 147-241.
- [4] Lu W T, Chen L W, Ma Y, et al. Lightning attachment process involving connecting of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(20): 5531-5535.
- [5] Gao Y, Lu W T, Ma Y, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmos Res*, 2014, 149: 193-203.
- [6] 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.
- [7] Lu W T, Ma Y, Chen L W, et al. Four Ways of How Downward and Upward Leaders Make Connecting During the Lightning Attachment Process. XV International Conference on Atmospheric Electricity, 2014.
- [8] 谭涌波,张冬冬,周博文,等. 地闪近地面形态特征的数值模拟. 应用气象学报, 2015, 26(2): 211-220.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李丹,张义军,吕伟涛. 风力发电机叶片姿态与雷击概率关系模拟分析. 应用气象学报, 2013, 24(5): 585-594.
- [12] Peesapati V, Cotton I. Lightning Protection of Wind Turbines — A Comparison of Real Lightning Strike Data and Finite Element Lightning Attachment Analysis. *Sustainable Power Generation and Supply*, 2009: 1-8.
- [13] Rioussel J A. Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations. *J Geophys Res*, 2007, 112(15203): 1-17.
- [14] Wiesmann H J, Zeller H R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. *Appl Phys*, 1986, 60(5): 1770-1773.
- [15] Femia N, Niemeyer L, Tucci V. Fractal characteristics of electrical discharges: Experiments and simulation. *Phys D Appl Phys*, 1993, 24(6): 615-622.
- [16] Popov N A. Spatial structure of the braching streamer channel in a corona discharge. *Plasma Physics Reports*, 2002, 28(7): 615-622.
- [17] Perera M D N, Sonnadara D U J. Research Article Fractal nature of simulated lightning channels. *Sri Lankan Journal of Physics*, 2012, 13(2): 9-25.
- [18] 王道洪, 鄒秀书, 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] Vladislav M, Lothar H R. Evaluation of the Lightning Protection System at the WSR-88D Radar Sites. National Oceanic and Atmospheric Administration Final Report, 2001: 1-53.
- [20] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L02803, doi: 10. 029/2007GL032136. 22.
- [21] Becerra M, Cooray V. On the velocity of positive connecting leaders associated with negative downward lightning leaders. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(5): 1-5.
- [22] Mousa A M. Validity of the Collection Volume Method/Field Intensification Method for the Placement of Lightning rods on Buildings. Proc of the 26th International Conference on Lightning Protection, 2002: 1-6.
- [23] Lu W T, Chen L W, Zhang Y, et al. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *J Geophys Res: Atmosphere*, 2012, 117(19): 1984-2012.
- [24] 张义军,吕伟涛,张阳,等. 广州地区地闪放电过程的观测及其特征分析. 高电压技术, 2013, 39(2): 383-392.

Simulation of Various Connecting Patterns During the Lightning Connection Process Based on the Stochastic Lightning Leader Model

Liao Yihui¹⁾²⁾ Lü Weitao²⁾³⁾ Qi Qi²⁾ Zhang Rong²⁾ Zhang Dongdong¹⁾
Tan Yongbo¹⁾²⁾³⁾ Zhang Yijun²⁾³⁾

¹⁾ (*College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

²⁾ (*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

Abstract

Considering the observed fact that most upward connecting leaders (UCL) does not branch during downward negative cloud-to-ground (CG) strikes, the simulation scheme of upward positive leaders is modified based on the existing two-dimensional (2D) stochastic lightning model. In addition, two connecting patterns, i. e., the tip-to-tip connecting and the tip-to-lateral connecting (lateral strike) between the downward leader and the UCL are simulated during the process in which lightning strikes tall buildings. Sensitivity experiments are carried out on the connecting process between leaders during the process of lightning striking a tall building by altering the horizontal distance between the initiation point of the downward leader (at a height of 1000 m) and the tall building. Results indicate that when the value of d increases from 0 to 700 m, the probability of a lateral strike for the UCL generally exhibits a trend of first increasing and then decreasing. As the value of d increases, the length of the UCL exhibits an increasing trend, and the ratio of the part of the UCL above the connecting point accounting for the entire length of the UCL upon the lateral strike generally exhibits an increasing trend. The probability of each grounding position is under the influence of the horizontal distance. The UCL initiating from the top of tall structures is longer than that initiating from the ground or the side surface of tall structures. Furthermore, tall structures with different heights are also investigated.

Key words: tall structures; connecting point; grounding point; tip-to-lateral