

郭秀峰, 赵念, 高玥, 等. 建筑物斜坡角度对稳定上行先导起始影响. 应用气象学报, 2024, 35(6): 692-703.

DOI: 10.11898/1001-7313.20240605

建筑物斜坡角度对稳定上行先导起始影响

郭秀峰^{1)2)3)*} 赵念¹⁾ 高玥¹⁾ 章玲¹⁾ 汪兆霞¹⁾ 赵宇彬¹⁾ 张贺¹⁾

¹⁾(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081)

³⁾(无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105)

摘要

建筑物斜坡角度(顶角)对上行先导的始发具有重要影响。该文基于已建立的三维变网格先导模型, 模拟斜坡型高建筑物雷击过程, 讨论斜坡角度在不同建筑物高度和雷电流峰值下, 对稳定上行先导始发的影响程度和规律。研究表明: 当雷电流峰值相同时, 建筑物高度越小宽度越宽, 斜坡角度对稳定上行先导起始的影响越大, 先导始发越困难。当建筑物高度相同时, 雷电流峰值越小, 斜坡角度对稳定上行先导起始的影响越大。斜坡角度对稳定上行先导起始的影响会随着建筑物高度和雷电流峰值的增加而减小。通过将斜坡角度对稳定上行先导起始的影响作为因变量, 斜坡角度、建筑物高度以及雷电流峰值作为自变量进行多元线性回归分析, 得到对上行先导的影响程度: 雷电流峰值最大, 斜坡角度次之, 建筑物高度最小。在常见的建筑物高度(100 m 以下)和雷电流峰值(小于 40 kA)下, 斜坡角度对稳定上行先导起始的影响不可忽略(大于 23.32%), 但在建筑物高度较高(500 m 以上)且雷电流峰值较大(大于 100 kA)情况下, 斜坡角度对稳定上行先导起始的影响相对较小(小于 15.88%)。

关键词: 斜坡型建筑物; 斜坡角度; 上行先导; 数值模拟

引言

雷暴天气发生时, 高大建筑物顶端因电场畸变增强作用更易达到先导始发阈值, 其中先导多发生于建筑物的尖端或拐角处^[1-3]。观测中发现建筑物的顶部几何形状是影响上行先导始发的重要因素之一^[4-5]。因此, 研究高建筑物顶部形状对上行先导始发的影响机理和影响程度, 以及对认识高建筑物雷击的物理机制和提高防护技术具有重要意义。

目前, 针对高建筑物的雷击过程已有大量观测和理论研究。吴姗姗等^[5]基于广州塔附近地闪观测发现, 建筑物上的地闪频次与建筑物顶部形状密切相关。Ullah 等^[6]在实验室通过缩放建筑结构的方法, 对比有无上行先导对建筑物尖端电场的影响, 发

现上行先导始发会提高不同建筑物的闪击概率。樊佳乐等^[7]通模拟分析对顶部倾斜角度为 37°的斜坡建筑物, 得到斜坡型建筑物的雷击概率与平顶建筑物相近但比针型建筑物小的结论。郭秀峰等^[8]对比长方体型、圆柱形等建筑物顶端形状对上行先导起始影响表明: 对于高度较矮和雷电流峰值较小的情况下, 尖端形状(塔形或斜坡)对先导起始的影响比较明显。由上述研究可知, 建筑物顶部的几何特征对上行先导始发存在不可忽略的影响, 而目前关于斜坡型建筑物斜坡角度对上行先导始发影响程度的研究报道相对较少, 因此需要对不同斜坡角度建筑物上的先导始发进行深入研究。

雷电观测易受到建筑物顶端不同形状等客观因素影响, 开展针对斜坡型建筑物的雷电观测对比研究困难较大, 因此通过建立数值仿真模型进行模拟

2024-06-12 收到, 2024-09-24 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(42205078), 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20190147), 中国气象局雷电重点开放实验室项目(2024KELL-B001)

* 邮箱: guoxf_88@163.com

试验,研究建筑斜坡角度对稳定上行先导始发的影响规律十分必要。谭涌波等^[9-12]、王雪雯等^[13]和吴荫等^[14]利用三维先导随机模型,研究建筑物高度和宽度变化对先导的影响。Guo等^[15]建立了三维变网格物理模型,研究塔形(简化为针型)建筑物的高度和雷电流峰值对上行先导的影响。常见的三维模型大多使用长方体建筑物模型或者将建筑物模型简化为针型。张冬冬^[16]利用有限元法建立二维模型,搭建矩形、半圆形、三角形和半椭圆形等建筑物研究电场畸变,而对于先导过程并未开展相关研究。因此,对于斜坡型建筑物的研究仍需深入。

本文建立三维变网格雷击物理模型,设置不同高度的斜坡型建筑物,重点研究建筑物斜坡角度对稳定上行先导起始的影响,评估该影响在不同建筑物高度和不同雷电流峰值下的变化规律,探究其对

针型、长方体型建筑物影响的差异。

1 模型及计算方法简介

1.1 模型设置

先导起始的判断离不开精确的尖端电场计算^[17],但建筑物尖端对远处电场的畸变影响较小,且超远处电场值对本研究影响较小。为了更精确地模拟建筑物周围电场的分布,本文采用变网格技术进行空间网格剖分,基于有限差分法求解泊松方程,建立三维变网格下的静电场计算模型,具体划分参照文献^[8]开展。

1.2 建筑物设置

设置三维模拟域范围为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m} \times 4000\text{ m}$,图1是斜坡型建筑物的三维外观和侧面示

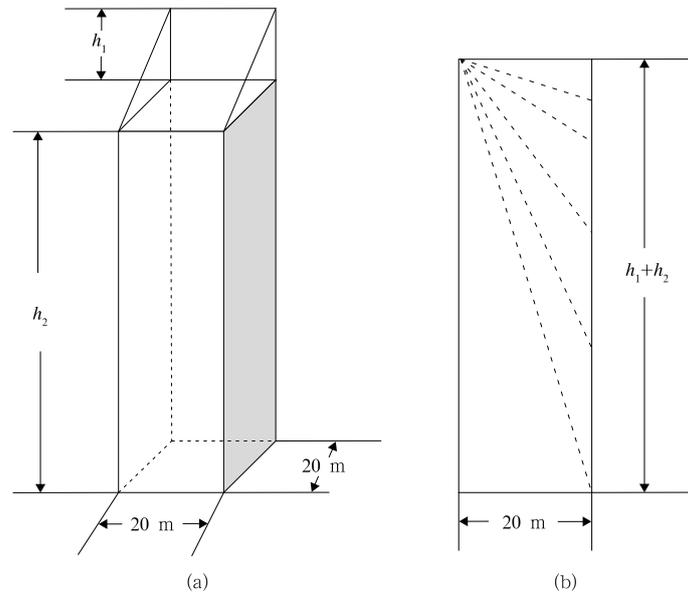


图1 斜坡型建筑物

(a)斜坡型建筑物三维外观,(b)斜坡型建筑物侧面

Fig. 1 Slope-type buildings

(a)three-dimensional appearance of slope building,(b)side of slope building

意图,建筑物底部宽度为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,斜坡高度为 h_1 ,建筑物主体高度为 h_2 ,建筑物高度为 $(h_1 + h_2)$,单位为 m 。其中建筑物斜坡角度是指建筑物斜边与建筑物高的夹角角度(顶角)。本文通过讨论建筑物斜坡角度在不同建筑物高度和雷电流峰值下,对稳定上行先导始发的影响,得到斜坡型建筑物斜坡角度对稳定上行先导起始的影响特征。

1.3 下行先导

为了更加真实地模拟雷暴环境中建筑物尖端上行先导始发过程,本研究在模型中加入下行先导。由于靠近地面处电场受高空中雷电下行先导分支的影响较小^[18-20],出于模型简化考虑,本文模型不考虑下行先导分支,认为其垂直向下发展。采用 Cooray 等^[18]提出的非均匀线电荷物理模型计算通道内电

荷量。

1.4 上行先导

上行先导的起始过程分为 3 个阶段：①初始电晕起始，②不稳定上行先导起始，③稳定上行先导起始^[21]。在下行先导和雷云环境电场的作用下，尖端附近电场发生畸变。此时，曲率半径较小部位电场值先达到起晕阈值，随后电离产生电子崩，尖端表面产生离子，当离子数超过临界值 N_{crit} 时，认为初始电晕起始^[22]。不稳定先导的起始取决于流注根部的电子数量，当流注空间电荷量超过 $1 \mu C$ 时，可以认为达到 1500 K 的转化温度，不稳定先导起始^[22-24]。关于稳定上行先导起始判断的研究，目前 Becerra^[25] 提出的稳定先导起始判据应用比较广泛，需计算先导发展过程，以不稳定先导发展长度超过 2 m 为条件。郭子炘等^[26] 通过对比，认为 Becerra 等^[24] 在判断不稳定先导向稳定先导转化时，忽略了先导起始过程中下行先导的发展影响，与实际差异较大，影响了判据的可靠性。因此本文对上行先导的始发判据采用文献^[26] 提出的初始流注动态临界长度法，基于先导物理模型计算上行先导的起始和发展长度。

郭子炘等^[26] 通过建立稳定上行先导起始物理模型，改进稳定上行先导转化条件，在考虑下行先导发展的基础上，分析风机叶片上稳定上行先导的

起始。计算得到上行稳定先导起始时刻对应的初始流注区域长度 (l_s^0) 存在临界值 (L_{D-crit})，此判据即为初始流注动态临界长度判据，定义为雷暴环境中，背景电场与流注区域电势曲线的交点横坐标 (l_s^0) 超过 L_{D-crit} 时，稳定上行先导起始。

此外，在下行先导向地面发展的过程中，由于其速度非常快，转动中的风机叶片相较于下行先导的发展速度相对静止，郭子炘等^[26] 在模型中将风机作为静态的接地物，因此这一判据针对本文的建筑物模型同样适用。

2 先导始发模型验证

根据 Warner^[27] 对 163 m 高塔上的负极性闪电观测和 Saba 等^[28] 对两座 60 m 高度的建筑物闪击观测与本文模拟结果进行对比。将模型参数设置与观测一致，比较稳定上行先导始发时，下行先导头部距地高度。本文运用郭子炘等^[26] 提出的初始流注动态临界长度判据判断稳定上行先导起始。

以 Saba 等^[28] 的观测数据为例，当流注长度超过 5.163 m 时，则判定稳定先导起始。图 2 是下行先导头部距地高度与初始流注长度随时间变化(图 2 中的时间从下行先导向下发展开始记录)。由图 2 可知，随着下行先导快速靠近地面，流注长度从缓慢

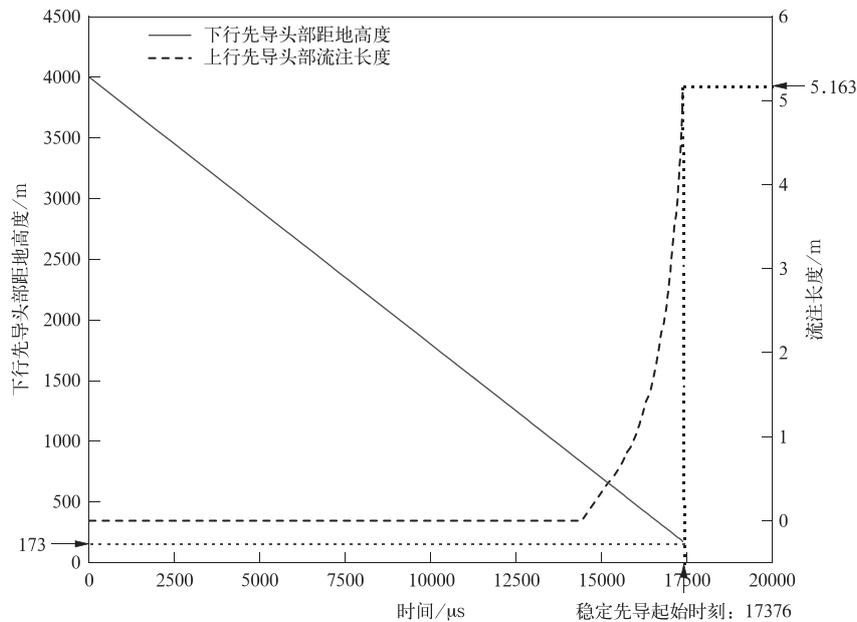


图 2 下行先导头部距地高度和上行先导头部流注长度随时间的变化
Fig. 2 Height of downward leader head from ground and length of upward leader head streamer change with time

增长变为快速增长,下行先导头部距地高度约为 173 m 时,上行先导流注长度达到 5.163 m,判定稳定先导起始。由于模型中未考虑风场、温度等环境因素,因此试验结果存在一定误差。本文的模拟结果与 Warner^[27] 的观测误差为 3.84%,与 Saba 等^[28] 的观测误差为 3.89%,由此也佐证了本文模型设置方法的合理性,适合用于模拟真实的雷暴环境。

3 斜坡角度在不同条件下对先导起始的影响

斜坡型建筑物的斜坡角度对正极性稳定上行先导始发具有一定影响,图 3 是建筑物高度为 100 m,雷电流峰值为 20 kA 的条件下(保持其他变量相同),不同斜坡角度对应的稳定上行先导起始时下行先导头部距地高度变化情况。由图 3 可知,斜坡角度越大,下行先导头部距地高度越小。斜坡角度与下行先导头部距地高度间呈非线性关系,拟合优度 R^2 为 0.977。

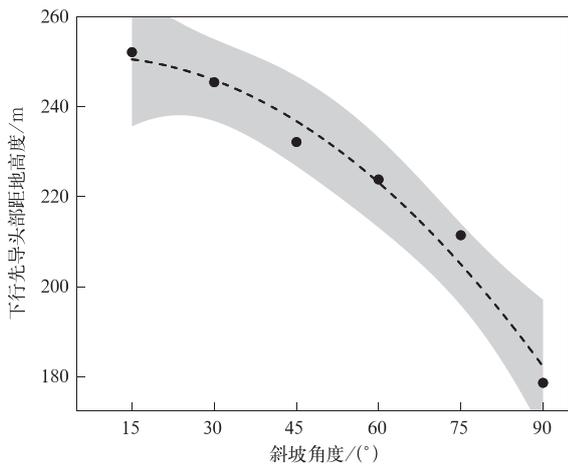


图 3 建筑物高度为 100 m,雷电流峰值为 20 kA 条件下,斜坡角度对下行先导头部距地高度的影响 (灰色表示达到 0.05 显著性水平)

Fig. 3 Under the condition of building height of 100 m and lightning current peak of 20 kA, influence of slope angle on the height of downward leader head from ground (the grey denotes passing the test of 0.05 level)

Qi 等^[4] 在观测中发现,建筑物高度、建筑物顶端形状、雷电流峰值及下行先导发展速度均会影响上行先导始发。图 4 和图 5 中固定建筑物高度为 400 m、斜坡角度为 45°、雷电流峰值为 40 kA,讨论不同下行先导发展速度($2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)对稳定上行先导起始的影响。由图 4 可知,随着下

行先导发展速度的增大,上行先导发展速度迅速提升,稳定上行先导始发时刻随之提前。图 5 下行先导发展速度从 $2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,初始流注动态临界长度的判据 L_{D-crit} 由 5.129 m 减少至 4.948 m,下行先导头部距地高度由 787.6 m 增加至 795.4 m。下行先导发展速度的

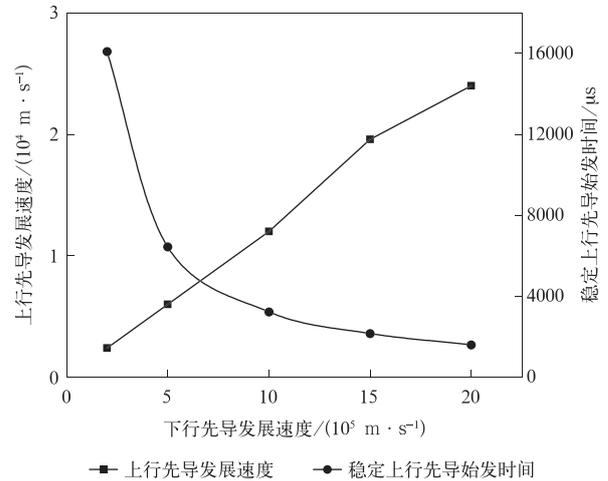


图 4 不同下行先导发展速度对稳定上行先导始发时间及上行先导发展速度的影响
Fig. 4 Influence of different downward leader development speeds on stable upward leader initiation time and upward leader development speed

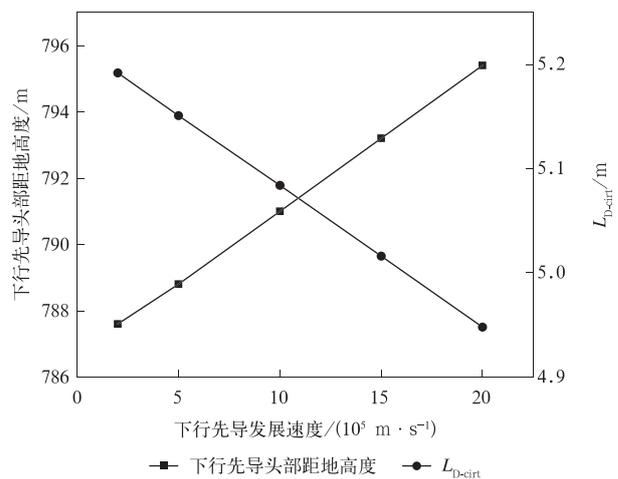


图 5 不同下行先导发展速度对下行先导头部距地高度及上行先导始发判据的影响
Fig. 5 Influence of different downward leader development speed on height from head of downward leader to ground and initiation criterion of upward leader

变化对上行先导发展速度以及稳定上行先导始发时刻影响较大,而较于整体的下行先导头部距地高度而言,稳定上行先导起始时随下行先导发展速度增加而增加的高度相对较小。因此本文主要分析建筑物高度和斜坡角度与雷电流峰值对稳定上行先导起始的影响。

为了研究斜坡角度在不同建筑物高度和雷电流峰值下对正极性稳定上行先导起始的影响,将其与不考虑形状的针型建筑物进行对比,得出斜坡角度在不同条件下对先导起始的影响。本文选取的建筑物高度分别为 100、200、300、400 m 和 500 m,雷电流峰值分别为 20、40、60、80 kA 和 100 kA,斜坡角度设为 15°、30°、45°、60°、75°、90°(长方体型)。保持其他变量相同,对比稳定上行先导起始时,不同斜坡角度、建筑物高度以及雷电流峰值的下行先导头部距地高度变化,下行先导头部距地高度越高,稳定上行先导起始的越早。

当不同斜坡角度建筑物的上行先导满足稳定上行先导始发条件时,相对应的下行先导头部距地高度与同样条件下针型建筑物的下行先导头部距地高度进行对比,得到斜坡型建筑物的斜坡角度对稳定上行先导起始的影响程度 η ,

$$\eta = \frac{Z_n - Z_s}{Z_n} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: η 为稳定上行先导起始时,斜坡型建筑物与针型建筑物下行先导头部距地高度的差异,单位为%。 Z_n 和 Z_s 分别为针型建筑物和斜坡型建筑物在一定模拟条件下得到的上行稳定先导始发时,下行先导头部距地高度,单位为m。 η 取值范围为 $[0, 1]$, η 越接近于1,则建筑物顶端稳定上行先导的始发越困难,与针型差异越大; η 越接近于0,则建筑物顶端稳定上行先导的始发越容易,越接近针型。

3.1 斜坡角度在不同建筑物高度下对稳定上行先导起始的影响

图6是雷电流峰值为20 kA时,在不同建筑物高度情况下,斜坡角度对 η 影响的等高线分布。由图6可知,斜坡角度越小, η 越小,即随着斜坡角度不断减小,尖端附近电场电势的畸变更趋近于针型。随着建筑物高度增加, η 逐渐减小,当雷电流峰值取20 kA、建筑物高度为100、200、300、400 m和500 m时,最大 η (斜坡角度为90°)和最小 η (斜坡角度为15°)的差值分别为19.30%、14.53%、13.23%、

10.68%和9.26%。不同斜坡角度带来的稳定上行先导起始差异随建筑物高度增加而减小。在建筑物高度达到500 m时,差值均在10%以下。因此,当建筑物高度较低时,斜坡角度对稳定上行先导始发的影响较大,建筑物顶端稳定上行先导的始发越困难,与针型建筑物差异越大。

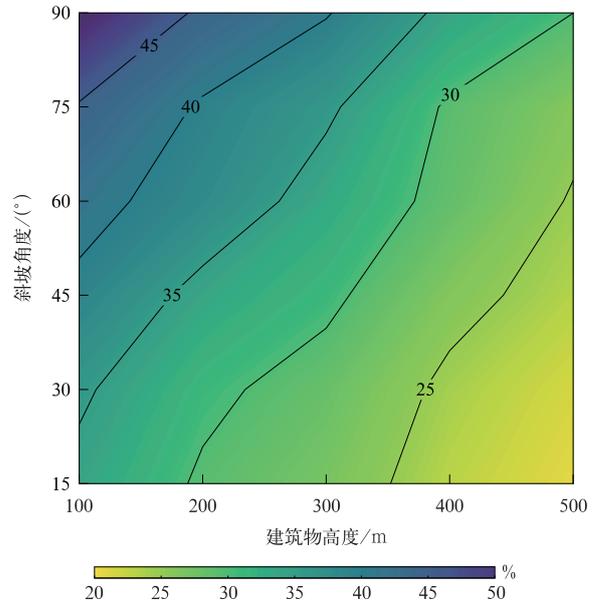


图6 雷电流峰值20 kA条件下建筑物高度和斜坡角度对 η 的影响

Fig. 6 Influence of building height and angle on η when peak value of lightning current is 20 kA

进一步研究建筑物高度对稳定上行先导起始的影响。图7是雷电流峰值为20 kA、斜坡角度为15°时, η 和下行先导头部距地高度随建筑物高度变化情况。由图7可知,在相同斜坡角度、不同建筑物高度情况下,建筑物高度越高,下行先导头部距地高度越大,其尖端的稳定上行先导始发越早。吕伟涛等^[29]对国内外高建筑物的雷电观测数据分析表明,建筑物高度为100~500 m,建筑物越高,其上发生的闪电中上行闪电占比越高,上行先导越容易始发,与本文结论一致。

在研究建筑物高度对稳定上行先导起始的影响时,本文固定建筑物宽度为20 m。为了分析建筑物宽度变化对稳定上行先导起始的影响程度,选择两个不同高度的建筑物(斜坡角度为45°,雷电流峰值为20 kA)进行对比。由图8可知,随着建筑物宽度增加, η 随之增长,建筑物宽度越大,稳定上行先导

始发越困难。当建筑物宽度由 20 m 增加到 60 m 时, η 分别为 4.68% 和 4.84%, 与建筑物高度、斜坡角度相比, 建筑物宽度变化对稳定上行先导起始的影响较小, 因此本文不讨论建筑物宽度对稳定上行先导始发的影响。

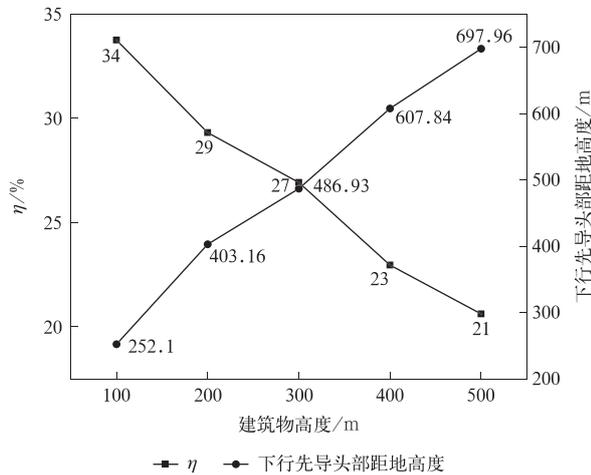


图 7 雷电流峰值 20 kA 和斜坡角度 15° 条件下斜坡型建筑物高度对先导起始的影响
Fig. 7 Influence of slope building height on the initiation of leader when peak value of lightning current is 20 kA and slope angle is 15°

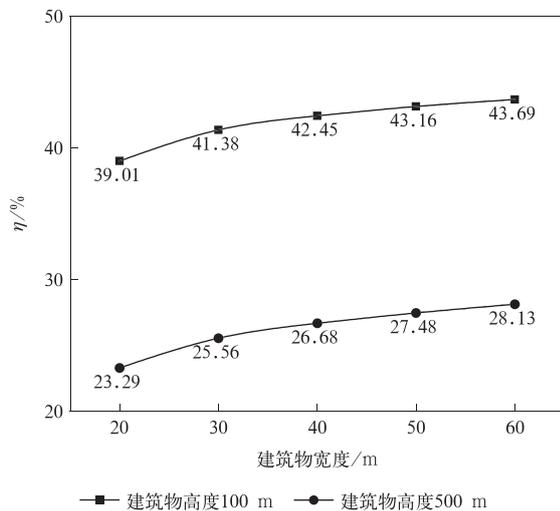


图 8 建筑物宽度对 η 的影响
Fig. 8 Influence of building width on η

3.2 斜坡角度在不同雷电流峰值下对稳定上行先导起始的影响

选取建筑物高度为 100 m, 研究不同雷电流峰值下斜坡角度对稳定上行先导起始的影响情况。图

9 为斜坡角度在不同雷电流峰值下对 η 影响的变化。在同一建筑物高度下, 随着雷电流峰值增大, 斜坡角度对稳定上行先导起始的影响降低。建筑物顶端附近的电场随雷电流峰值增大而增大, 此时雷电流峰值对先导起始影响的占比增加, 建筑物顶端附近的电场受斜坡角度的影响变小。在本研究设置中 (除去斜坡角度 90°), 建筑物高度为 100 m、雷电流峰值为 20 kA、斜坡角度为 75° 时影响最大, 此时的 η 为 44.45%; 建筑物高度为 500 m、雷电流峰值为 100 kA、斜坡角度为 15° 时影响最小, η 为 12.22%。

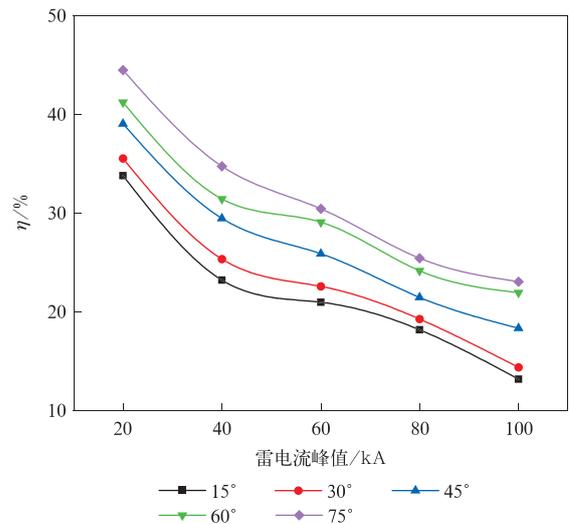


图 9 不同雷电流峰值条件下建筑物斜坡角度对 η 的影响
Fig. 9 Influence of building slope angle on η under different lightning current peaks

进一步研究雷电流峰值对稳定上行先导起始的影响, 图 10 是建筑物高度为 100 m 时, 不同斜坡角度下, 下行先导头部距地高度随雷电流峰值变化对比。由图 10 可知, 雷电流峰值越大, 下行先导头部距地高度越高, 先导越容易始发。由于上行先导始发受建筑物顶部周围的电场影响, 而此电场由下行先导产生的电场决定^[30], 雷电流峰值越大, 下行先导发展过程中产生的电场越强, 建筑物尖端的电场也越大, 上行先导越容易始发^[31-33]。谢施君等^[34]利用先导仿真模型计算结果表明: 随着雷电流峰值和避雷针高度的增加先导起始时刻随之提前, 避雷针上的先导发展过程受雷电流峰值、避雷针高度影响, 其发展速度也随下行先导的趋近而逐渐增加, 但本文的三维模型考虑了建筑物斜坡角度, 更贴合真实的雷暴环境。

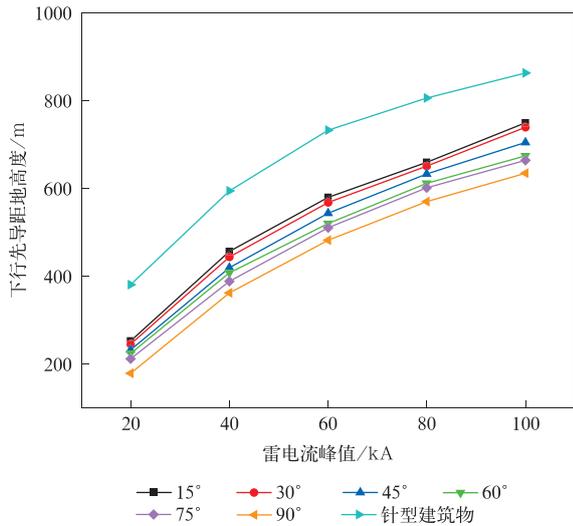


图 10 雷电流峰值对下行先导头部距地高度的影响

Fig. 10 Influence of lightning current peak on height of downward leader head from ground

4 模拟结果

由第 3 章研究可知,建筑物斜坡角度越大,对稳定上行先导始发影响也越大,先导越不容易始发。其物理机制是不同斜坡角度的建筑物对建筑物顶端上方电场畸变影响不同。建筑物斜坡角度越小,建筑物上方的电场畸变越大,使上行先导始发更早,建筑物顶端稳定上行先导的始发也就越容易。郭秀峰^[35]通过计算建筑物周围电位的空间分布,探讨建筑物高度宽度对大气电场畸变的影响,发现建筑物尖端越高越细时,尖端处的电场畸变越显著。张冬冬^[16]针对建筑物形状对大气电场畸变的研究也指出,同样高度的建筑物,建筑物的弯曲度越小(越接近针型),电场的畸变越明显。

4.1 稳定上行先导起始影响因素的多元线性回归分析

建筑物高度和斜坡角度以及雷电流峰值对上行先导始发均具有一定影响,为了探究这 3 种因素对先导起始的影响程度,本文利用 SPSS 软件分析试验数据。将 η 作为因变量,斜坡角度、建筑物高度以及雷电流峰值作为自变量进行多元线性回归分析,其中, θ 为建筑物斜坡角度, $15^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。 H_b 为建筑物高度, $100 \text{ m} \leq H_b \leq 500 \text{ m}$ 。 I_p 为雷电流峰值, $20 \text{ kA} \leq I_p \leq 100 \text{ kA}$ 。

在达到 0.05 显著性水平的情况下,回归分析的

R^2 为 0.89,意味着 I_p 、 H_b 、 θ 可以解释 η 的 89%。由于 R^2 可能随自变量数量增加而虚高,本文还计算了调整后的 R^2 为 0.887,说明在考虑到自变量数量后,模型的解释力仍很高,进一步证实了模型的拟合优度和可靠性。其中 I_p 、 H_b 、 θ 的标准化系数分别为 -0.688 、 -0.429 、 0.482 ,由标准化系数可知: I_p 和 H_b 对 η 呈显著负向影响, θ 对 η 呈正向影响,对 η 的影响程度: I_p 最大, θ 次之, H_b 最小。回归方程如下:

$$\eta = 0.142\theta - 0.023H_b - 0.184I_p + 33.376. \quad (2)$$

在实际应用中,通过公式可计算斜坡型建筑物与针型在不同建筑物高度和雷电流峰值下对稳定上行先导起始的差异,为高建筑物防雷方案的设计提供一定参考价值。由于影响先导起始因素很多,本文仅讨论了建筑物高度、斜坡角度和雷电流峰值,而关于其他形状建筑物以及温度、风速等环境因素未进行具体分析,与实际存在差异。

图 11 是建筑物高度为 100~500 m 与雷电流峰值为 20~100 kA 情况下,不同斜坡角度的 η 分布情况,其中箱体部分是 η 由小到大占比的 25%~75%。由图 11 可知,建筑物高度为 100 m、雷电流峰值为 20 kA 时不同斜坡角度下 η 的最大值均超过 30%。在常见的建筑物高度(100 m 以下)和雷电流峰值(小于 40 kA)下,斜坡角度对先导起始的影响不可忽略(大于 23.32%),但在建筑物高度较高(500 m 以上)且雷电流峰值较大(大于 100 kA)情况下,斜坡角度对先导起始的影响相对较小(小于 15.88%)。

4.2 斜坡型建筑物与长方体型建筑物对稳定上行先导起始影响差异

为了进一步分析斜坡型建筑物与长方体型建筑物对先导起始影响的差异,定义 η_r 的公式如下:

$$\eta_r = \frac{Z_s - Z_r}{Z_r} \times 100\%. \quad (3)$$

式(3)中: η_r 为稳定上行先导起始时,斜坡型建筑物与长方体型建筑物下行先导头部距地高度的差异,单位为%。 Z_s 和 Z_r 分别为斜坡型建筑物和长方体型建筑物在一定模拟条件下得到的上行稳定先导始发时,下行先导头部距地高度,单位为 m。 η_r 的取值范围为 $[0, 1]$, η_r 越小,即斜坡型建筑物与长方体型建筑物间对稳定上行先导起始影响的差异越小。

图 12 是建筑物高度范围为 100~500 m 与雷电

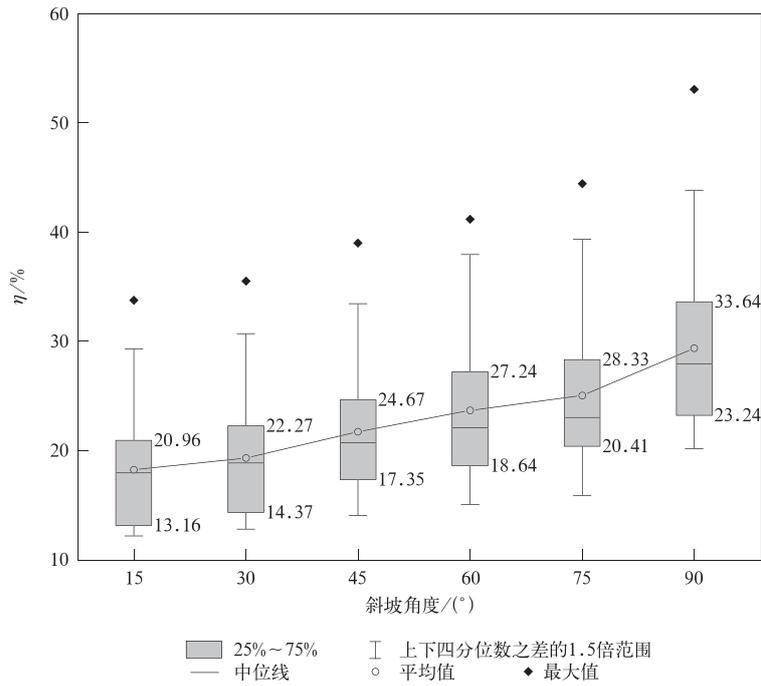


图 11 不同斜坡角度建筑物的 η 分布箱线图

Fig. 11 Box plot of η distribution of buildings with different slope angles

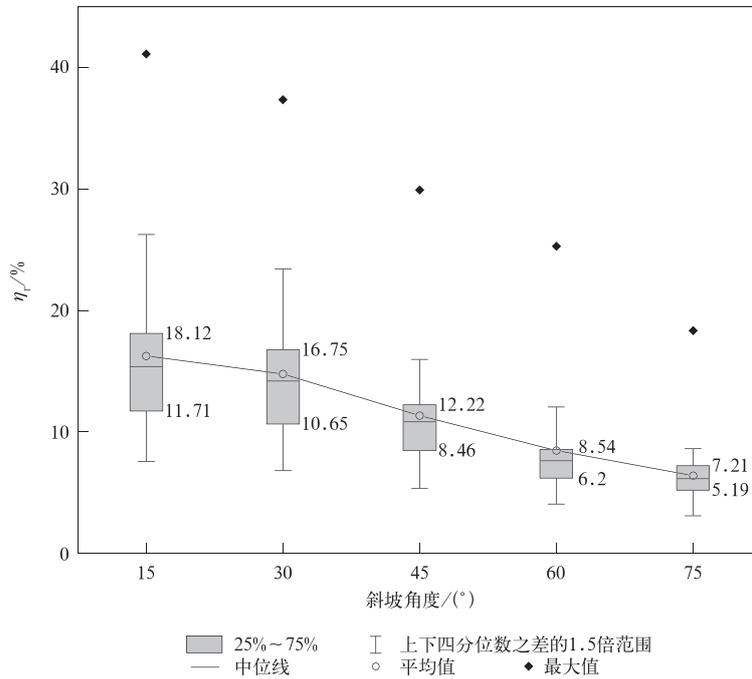


图 12 不同斜坡角度建筑物的 η_r 分布箱线图

Fig. 12 Box plot of η_r distribution of buildings with different slope angles

流峰值范围为 20~100 kA 情况下,不同斜坡角度的 η_r 分布。由图 12 可知,在不同斜坡角度下,随着斜坡角度的增大, η_r 整体随之减小。其中斜坡角度

为 75 $^{\circ}$ 时,仅当建筑物高为 100 m、雷电流峰值为 20 kA 时, η_r 大于 10%, η_r 大于 20%的情况仅占 8%。由此可见,当建筑物高度较高且雷电流峰值较

大时,斜坡型建筑物与长方体型建筑物对稳定上行先导起始的影响差异较小,可进行近似分析。

5 结论与讨论

本文利用三维变网格先导模型模拟斜坡型高建筑物雷击过程,分析斜坡角度在不同建筑物高度和雷电流峰值下对上行先导始发的影响规律,并通过 η 定义其斜坡角度对稳定上行先导起始的影响程度,得到以下主要结论:

1) 分析斜坡角度在不同建筑物高度下对稳定上行先导起始的影响,当建筑物高度较低时,斜坡角度对稳定上行先导起始影响明显。当建筑物高度增加时,斜坡角度对稳定上行先导起始的影响减小,其先导的始发特征越接近于针型。建筑物宽度增加时,斜坡角度对稳定上行先导起始的影响变大,而相较于建筑物高度而言,建筑物宽度变化对先导起始的影响较小。

2) 分析斜坡角度在不同雷电流峰值下对稳定上行先导起始的影响,当雷电流峰值较小时,斜坡角度对稳定上行先导起始的影响明显。雷电流峰值变大,雷电流峰值对先导起始的影响占比增大,斜坡角度对先导起始的影响则减小。

3) 通过将 η 作为因变量,雷电流峰值、建筑物高度以及斜坡角度作为自变量进行多元线性回归分析,得到雷电流峰值和建筑物高度对 η 呈显著负向影响,斜坡角度对 η 呈正向影响;雷电流峰值对 η 影响程度最大,斜坡角度次之,建筑物高度最小。

4) 在常见的建筑物高度(100 m 以下)和雷电流峰值(小于 40 kA)下,斜坡角度对稳定上行先导起始的影响不可忽略(大于 23.32%),但在建筑物高度较高(500 m 以上)且雷电流峰值较大(大于 100 kA)的情况下,斜坡角度对先导起始的影响相对较小(小于 15.88%)。

综上所述,为了贴合实际环境中的雷击过程,在模拟斜坡型建筑物上的先导起始过程时,建筑物的斜坡角度对先导起始的影响不可忽略,但本文在模拟过程中仅考虑斜坡角度,建筑物高度和雷电流峰值作为变量,关于建筑物群与其他复杂尖端的建筑物以及风速、温度等环境因素对先导始发的影响未进行讨论,也是今后的工作重点。

参考文献

- [1] 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(2):196-199.
- [2] Saba M M F, Lauria P B, Schumann C, et al. Upward leaders initiated from instrumented lightning rods during the approach of a downward leader in a cloud-to-ground flash. *J Geophys Res Atmos*, 2023, 128(8). DOI: 10.1029/2022JD038082.
- [3] 郭秀峰, 谭涌波, 郭凤霞, 等. 建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算. *应用气象学报*, 2013, 24(2):189-196.
Guo X F, Tan Y B, Guo F X, et al. Numerical simulation of effects of building tip on atmospheric electric field distortion. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(2):189-196.
- [4] Qi Q, Lyu W, Wang D, et al. Two-dimensional striking distance of lightning flashes to a cluster of tall buildings in Guangzhou. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(22). DOI: 10.1029/2021JD034613.
- [5] 吴姗姗, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于光学资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2):203-210.
Wu S S, Lü W T, Qi Q, et al. Characteristics of downward cloud-to-ground lightning flashes around canton tower based on optical observations. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2):203-210.
- [6] Ullah I, Bahrom M N R B, Khan M A, et al. An experimental study of electromagnetic field propagation due to lightning upward leaders and its probability on different small-scale structures. *Energies*, 2022, 15(18). DOI: 10.3390/en15186597.
- [7] 樊佳乐, 谭涌波, 余骏皓, 等. 基于三维多上行先导模型的高建筑物年雷击次数分析. *科学技术与工程*, 2023, 23(20):8560-8569.
Fan J L, Tan Y B, Yu J H, et al. Analysis of annual lightning strikes of tall buildings based on the multiple upward leaders three-dimensional model. *Sci Technol Eng*, 2023, 23(20):8560-8569.
- [8] 郭秀峰, 高玥, 章玲, 等. 建筑物顶端几何特征对上行先导起始影响的3D模拟. *科学技术与工程*, 2024, 24(15):6154-6163.
Guo X F, Gao Y, Zhang L, et al. 3D simulation research on the effect of geometric characteristics of building tip on the initiation of upward leader. *Sci Technol Eng*, 2024, 24(15):6154-6163.
- [9] 谭涌波, 陈之禄, 张冬冬, 等. 高层建筑对周围建筑雷击保护距离的模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(4):498-505.
Tan Y B, Chen Z L, Zhang D D, et al. Simulation on the stroke protection distance of tall buildings to surrounding buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(4):498-505.
- [10] 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.
- Tan Y B, Zhang D D, Zhou B W, et al. A numerical study on characteristics of cloud-to-ground lightning near surface configuration. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(2): 211-220.
- [11] 谭涌波, 周博文, 郭秀峰, 等. 建筑物高度对上行闪电触发以及传播影响的数值模拟. 气象学报, 2015, 73(3): 546-556.
- Tan Y B, Zhou B W, Guo X F, et al. A numerical simulation of the effects of building height on single upward lightning trigger and propagation. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 73(3): 546-556.
- [12] 谭涌波, 张鑫, 向春燕, 等. 建筑物上侧击雷电的三维数值模拟. 应用气象学报, 2017, 28(2): 227-236.
- Tan Y B, Zhang X, Xiang C Y, et al. Three-dimensional numerical simulation of side flash on buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(2): 227-236.
- [13] 王雪雯, 谭涌波, 林雨荷, 等. 多上行先导模型先导传播速率比优化及模拟研究. 应用气象学报, 2024, 35(2): 237-246.
- Wang X W, Tan Y B, Lin Y H, et al. Optimization and simulation of leader propagation rate ratio in multiple upward leader model. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(2): 237-246.
- [14] 吴萌, 谭涌波, 林雨荷, 等. 高层建筑对矮建筑物保护作用的三维数值模拟. 应用气象学报, 2023, 34(6): 749-758.
- Wu M, Tan Y B, Lin Y H, et al. Three-dimensional numerical simulation of the protective effect of tall building on short building. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 749-758.
- [15] Guo X F, Ji Z Y, Gao Y, et al. 3D corona discharge model and its use in the presence of wind during a thunderstorm. *Front Environ Sci*, 2022, 10. DOI: 10. 3389/fenvs. 2022. 946020.
- [16] 张冬冬. 基于尖端电场畸变的闪电连接过程的数值模拟. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- Zhang D D. Numerical Simulation of Lightning Connection Process Based on Tip Electric Field Distortion. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.
- [17] 裴晓芳, 丁洁, 郭秀峰, 等. 空间分辨率对上行先导起始过程数值模拟的影响. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3876-3884.
- Pei X F, Ding J, Guo X F, et al. Effect of spatial resolution on numerical simulation of upward leader initiation process. *Sci Technol Eng*, 2022, 22(10): 3876-3884.
- [18] Cooray V, Rakov V, Theethayi N. The lightning striking distance—Revisited. *J Electrostat*, 2007, 65(5/6): 296-306.
- [19] 关雨依, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异. 应用气象学报, 2023, 34(5): 598-607.
- Guan Y N, Lü W T, Qi Q, et al. Difference between 2D and 3D development characteristics of an upward lightning leader. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 598-607.
- [20] 许伟群, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次触发闪电金属汽化通道的亮度与电流特征. 应用气象学报, 2023, 34(6): 739-748.
- Xu W Q, Lü W T, Qi Q, et al. Luminosity and current characteristics of metal-vaporized channel of an artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 739-748.
- [21] 郭子妍. 大型风机叶片雷击接闪的极性效应与风险评估方法. 北京: 华北电力大学, 2020.
- Guo Z X. Polarity Effect and Risk Assessment Method of Lightning Stroke on Large Fan Blades. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [22] Gallimberti I. The mechanism of the long spark formation. *J Phys Colloques*, 1979, 40(C7): C7-193-C7-250.
- [23] 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(17): 2441-2452.
- [24] Becerra M, Cooray V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. *IEEE Trans Power Deliv*, 2006, 21(2): 897-908.
- [25] Becerra M. Glow corona generation and streamer inception at the tip of grounded objects during thunderstorms: Revisited. *J Phys D: Appl Phys*, 2013, 46(13). DOI: 10. 1088/0022-3727/46/13/135205.
- [26] 郭子妍, 李庆民, 于万水, 等. 负极性雷击下地面物体上行先导稳定起始的初始流注动态临界长度判据. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1713-1722.
- Guo Z X, Li Q M, Yu W S, et al. The dynamic critical length criterion of initial streamer for the stable upward leader inception under negative lightning strikes. *Proc CSEE*, 2020, 40(5): 1713-1722.
- [27] Warner T A. Upward Leader Development from Tall Towers in Response to Downward Stepped Leaders//2010 30th International Conference on Lightning Protection(ICLP). Cagliari, Italy, IEEE, 2010: 1-4.
- [28] Saba M M F, Paiva A R, Schumann C, et al. Lightning attachment process to common buildings. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(9): 4368-4375.
- [29] 吕伟涛, 陈绿文, 马颖, 等. 广州高建筑物雷电观测与研究 10 年进展. 应用气象学报, 2020, 31(2): 129-145.
- Lü W T, Chen L W, Ma Y, et al. Advances of observation and study on tall-object lightning in Guangzhou over the last decade. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 129-145.
- [30] Guo X F, Ji Z Y, Gao Y, et al. Effects of positive corona on upward leader initiation from tall building by 3D numerical simulation. *Atmos Res*, 2023, 291. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2023. 106822.
- [31] 齐奇, 吕伟涛, 武斌, 等. 广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测. 应用气象学报, 2020, 31(2): 156-164.
- Qi Q, Lü W T, Wu B, et al. Two-dimensional optical observation of striking distance of lightning flashes to two buildings in Guangzhou. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 156-164.
- [32] 王雪娟, 化乐彦, 王炳浩, 等. 高建筑物雷电光谱校正对通道温度反演的影响. 应用气象学报, 2024, 35(4): 493-501.

- Wang X J, Hua L Y, Wang B H, et al. Spectral correction impacts of lightning from tall buildings on channel temperature inversion. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(4): 493-501.
- [33] 李丹, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电先导三维自持发展模式的建立. *应用气象学报*, 2015, 26(2): 203-210.
- Li D, Zhang Y J, Lü W T, et al. A 3D self-consistent propagation model of the lightning leader. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(2): 203-210.
- [34] 谢施君, 何俊佳, 陈维江, 等. 避雷针迎面先导发展物理过程仿真研究. *中国电机工程学报*, 2012, 32(10): 32-40; 6.
- Xie S J, He J J, Chen W J, et al. Simulation study on the development process of the upward leader incepted from lightning rod. *Proc CSEE*, 2012, 32(10): 32-40; 6.
- [35] 郭秀峰. 空间分辨率对建筑物尖端大气电场畸变影响的数值模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- Guo X F. Numerical Simulation Study on the Influence of Spatial Resolution on the Distortion of Atmospheric Electric Field at the Tip of Buildings. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.

Influences of Building Slope Angle on the Initiation of Stable Upward Leader

Guo Xiufeng¹⁾²⁾³⁾ Zhao Nian¹⁾ Gao Yue¹⁾ Zhang Ling¹⁾
Wang Zhaoxia¹⁾ Zhao Yubin¹⁾ Zhang He¹⁾

¹⁾ (College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of
Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (College of Atmosphere and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105)

Abstract

The slope angle (or top angle) of the building significantly influences the formation of upward leader. To simulate the lightning strike process on tall and sloping building using three-dimensional variable grid leader model, the influence of slope angle (θ) on the initiation of stable upward leaders is analyzed, focusing on various building heights (H_b) and peak values of lightning current (I_p). It can be concluded from data that, when the peak lightning current is held constant, reducing the building height and increasing the building width result in an enhanced influence of the slope angle on stable upward leader inception (η), which in turn makes it increasingly challenging to incept. When the height of building is held constant, a reduction in the peak value of lightning current enhances the influence of slope angle on the inception of stable upward leaders (η). This, in turn, makes the inception process increasingly challenging. Changes in building width have a lesser impact on the initiation of the upward leader compared to building height. As heights of buildings and peak values of lightning currents increase, the influence of slope angle on the initiation of stable upward leader becomes less significant. By conducting a multiple linear regression analysis with η as the dependent variable and slope angle (θ), building height (H_b), and peak lightning current (I_p) as independent variables. Results indicate that I_p and H_b have a significant negative effect on η , whereas θ has a positive effect on η . The degree of influence on η is as follows: I_p has the greatest influence, followed by θ , while H_b has the least influence. The influence of slope angle on the inception of stable upward leaders, represented by the parameter η , is significant for building heights below 100 m and peak lightning current values below 40 kA, with the estimated effect exceeding 23.32%. In contrast, for building heights exceeding 500 m and peak values of lightning current above 100 kA, the impact of slope angle on stable upward leader inception is relatively minimal, with an estimated effect of less than 15.88%, in the case, the distinction between the impact of sloped buildings and rectangular buildings on the inception of stable upward leader is sufficiently marginal to enable an approximate analytical approach.

Key words: slope buildings; slope angle; upward leader; numerical simulation