

不同气压下负流光特征的数值模拟

李在光, 祝宝友, 马明

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 为了研究雷暴云中不同高度下闪电启动负流光的特性, 使用柱对称的二维模式对平面平行极板间氮气中的负流光进行了模拟. 模式中使用了通量校正传输算法(FCT)求解连续方程以及动态网格细化算法来提高计算效率. 模拟结果显示, 流光经过初始阶段的调整后以一种稳态传播, 而稳态的特征是由气压和背景电场共同确定的背景电离频率决定. 背景电离频率与流光平均速度之间呈现良好的对数线性关系. 气压和背景电场通过背景电离频率(电子雪崩速度)来影响流光特征. 背景电场相同时, 随着气压降低背景电离频率增加, 流光发展速度变快, 流光更容易在较低气压下启动. 气压不变时, 背景电场增大则背景电离频率增大, 流光发展速度变快, 流光更容易在背景电场高值区启动.

关键词: 负流光; 模拟; 通量校正传输算法; 闪电启动

中图分类号: P427.3 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.05.006

引用格式: Li Zaiguang, Zhu Baoyou, Ma Ming. Numerical simulation of negative streamers at different pressures [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(5): 379-387.

李在光, 祝宝友, 马明. 不同气压下负流光特征的数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(5): 379-387.

Numerical simulation of negative streamers at different pressures

LI Zaiguang, ZHU Baoyou, MA Ming

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to study the characteristics of negative streamers about lightning initiation at different heights in the thunderclouds, a cylindrically symmetrical two-dimensional model was used to simulate negative streamers between planar parallel plates in nitrogen. In the model, a flux-corrected transport (FCT) technique was used to solve the continuity equations and an adaptive grid refinement strategy was used to increase computing efficiency. The simulation results indicate that, after the initial stage of adjustment the streamers propagate in a steady-state mode, the characteristics of steady-state are decided by background ionization frequency which is determined by pressure and background electric field together. A logarithmic linear relationship can be found between average streamer velocity and the background ionization frequency. Under the same background electric field, the background ionization frequency increases with the decrease in pressure, and streamers develop faster, implying they are more likely to initiate in the region with a relatively lower pressure. At the same pressure, the background ionization

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41075001, 41374160)资助.

作者简介: 李在光, 男, 1987年生, 硕士. 研究方向: 雷电物理. E-mail: lzg24@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 祝宝友, 博士/副教授. E-mail: zhuby@ustc.edu.cn

frequency increases as the intensity of the background electric field increases and streamers develop faster, and streamers tend to initiate in the region with a stronger background electric field.

Key words: negative streamer; simulation; flux-corrected transport; lightning initiation

0 引言

长期以来,人们开展了大量的流光(streamer,也译作流注)模拟以了解气体中电击穿机制.早期的一维流光模拟^[1-2]忽略了流光在半径方向的扩散和飘移.Dhali等^[3]首次使用二维模式对流光进行模拟,在计算中加入流光半径的变化,并在模式中加入通量校正传输算法(FCT)用以解决流光头部极大的电荷密度梯度造成的计算难题.之后,很多学者使用二维模式对多种气体中的流光进行了模拟研究^[4-8].

这些模拟大多都是在标准气压下研究流光的特性,很少关注气压对流光的影响.随着研究的深入和实际应用上的需要(比如雷暴云中伴随闪电启动的流光过程),尤其在诸如 red sprites 和 blue jets 等大气高空放电现象被观测到以后^[9-10],人们开始更多地关注不同气压下流光的特性.Liu等^[11-12]使用二维流光模式研究了 0, 30 和 70 km 高度(对应气压 1.01×10^5 , 146.65 和 0.67 Pa)下空气中流光的特性,指出流光在 sprite 高度(40~90 km)比起在地面有更低的流光头部的峰值电场、电子浓度、传播速度、加速度和扩展速率.Pancheshnyi等^[13]使用实验和模拟对比的方法研究了固定背景电场下 760~300 torr 气压范围内空气中正流光的特性,实验和模拟结果都显示,随着气压的降低流光有更大的平均速度、电流幅度以及通道直径.Briels等^[14]用实验方法研究了在空气和纯度为 99.9% 的氮气中正流光的特性,测量了空气和氮气中流光最小直径和气压的乘积的关系.Nijdam等^[15]用实验方法研究了在不同气压和不同氮气氧气比例的气体中正流光的特性,给出不同氮气氧气比例的气体中流光最小直径和气压的乘积为 0.07~0.12 bar·mm.从这些研究中可以看出气压影响着流光的特性.正流光和负流光的传播机制是不同的^[16].由于正流光比负流光更容易发生且在相同条件下有更大的传播速度^[17-18],所以在工业应用上正流光比负流光更广泛.因此大多数流光研究更关注正流光,上述气压对流光影响的研究也主要集中在正流光,而对负流光的研究较少.

作为雷暴云中频繁发生的大气放电现象,闪电在云内是如何发生的又是如何发展的,这一直是大气电学领域有待解决的问题^[19].Proctor^[20]在南非地区的观测表明,雷暴云中闪电的起始高度集中在 5.3 km 和 9.2 km 两个高度;近年来发现一类独特闪电事件——双极性窄脉冲事件,其正负极性事件高度分别位于 8~16 km 和 16~19 km^[21],即闪电在云内不同高度层内启动.负流光在闪电启动中起着重要的作用^[22],现有的对不同气压下负流光的模拟较少,对不同高度(气压)下大气中流光的模拟有助于对这些现象的了解.本文研究平面平行电极间氮气中负流光的特性,同时取 0.53×10^5 Pa 和 0.27×10^5 Pa 分别近似代表 5.3 km 和 9.2 km 两个高度,研究负流光特性在这两个气压下与标准气压下 (1.01×10^5 Pa) 的异同,增进对于闪电云内启动过程的了解.

1 模拟的数值模型

本文模拟的是氮气中的负流光,而氮气作为中性气体,在计算中不需要考虑负离子的影响,又由于正离子的运动和扩散速度远远小于电子的运动和扩散速度(大约相差两个数量级),此外本文中模拟的时间尺度很短(大约几到十几个纳秒),所以本文中认为正离子是不动的,同时忽略了光电离的影响.本文计算的是柱对称的流光,模拟中使用的基本方程包括连续方程和泊松方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (v_e n_e) - D_e \nabla^2 n_e &= n_e v_e \alpha \\ \frac{\partial n_+}{\partial t} &= n_e v_e \alpha \\ \nabla^2 \varphi &= -q_e (n_+ - n_e) / \epsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, n_e , v_e , D_e 分别为电子的浓度、速度和扩散系数, α 为 Townsend 电离系数, 电离频率 $v_e \alpha$ 表示电离的强弱, n_+ 为正离子的浓度; 电子和正离子空间分布引起的空间电位 φ 分布由泊松方程来描述, 其中 ϵ_0 为介电常数, q_e 为电子电荷量.

本文模拟中使用的参数如下^[1]: 温度值固定, 取为 300 K; Townsend 电离系数为 $\alpha / (\text{cm}^{-1}) = 4.28 \times 10^{-2} P e^{-1.95 P / E}$, 是环境气压和空间电场的函数, 其中

气压和电场的单位分别为 Pa 和 V/cm; 电子扩散系数 D_e 在横向和纵向的分量分别为 $D_r=2\ 190\text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $D_z=1\ 800\text{ cm}^2/\text{s}$; 电子速度为 $u_e = \mu_e E$, 其中 E 为空间电场, $\mu_e/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = 3.87 \times 10^7/P$ 是电子的迁移率, 气压 P 的单位同样是 Pa, 电场的单位是 V/cm.

计算中以某一垂直于两极板的连线为 z 轴(对称轴), 并以位于 $z=0$ 处的负极板为下边界, 位于 $z=d$ 处的正极板为上边界, 连续方程和泊松方程使用的边界条件如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial n_e}{\partial z} \Big|_{z=d} = 0 \\ \varphi \Big|_{z=0} &= 0, \varphi \Big|_{z=d} = \varphi_0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0, \varphi \Big|_{r=R} = \varphi_0 \frac{z}{d} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, R 为数值计算的半径, φ_0 为极板间的外加电压, d 为极板间距离.

在本文所有的模拟中, 平板间距离均为 $d=5\text{ mm}$, 初始电荷分布为高斯形状:

$$n_e(r, z) \Big|_{t=0} = n_i(r, z) \Big|_{t=0} = n_0 \exp\left[-\left(\frac{r}{\delta_r}\right)^2 - \left(\frac{z}{\delta_z}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中, n_e 和 n_i 分别为离子和电子的浓度, 在 r 方向和 z 方向的高斯分布半径分别为 $\delta_r=0.092\text{ mm}$ 和 $\delta_z=0.138\text{ mm}$, n_0 为初始电荷的峰值浓度, 在本文的所有模拟中电荷分布的半径是固定不变的. 使用 1.01×10^5 , 0.53×10^5 和 $0.27 \times 10^5\text{ Pa}$ 3 个不同的气压值分别近似代表海拔高度 0 km , 5.3 km 和 9.2 km 的气压.

电子的连续方程(式(1))是对流占优的对流扩散方程, 对于这类问题的求解一般使用通量校正传输算法(flux-corrected transport, FCT). FCT 算法是 Boris 等^[23]为了求解一维流体中冲击波前阵面极大的浓度梯度问题而提出的, 使用反扩散项来消除数值扩散产生的误差, 同时在计算过程中对反扩散项进行了修正, 从而保持解的正确性. 但是该算法不能直接处理多维问题, 对于多维问题需要通过算子分裂将多维问题转化为多个一维问题来处理, 但算子分裂会引入额外的误差. Zalesak^[24]提出了可以直接应用于多维问题的 FCT 算法, 该算法明确提出了将低阶解与高阶解混合的思想, 引入反扩散项对低阶解进行校正并尽可能采用高阶解, 使该 FCT 算法具有很高的精度. Dhali 等^[3]最早将二维 FCT 算法

应用到流光模拟, 其后很多的二维流光模拟中都是用了 FCT 算法^[25-27]. Montijn 等^[28]提出了使用 FCT 算法和动态自适应网格方案对负流光模拟的算法, 在确保计算精度的情况下大大提高了计算的速度. 本文模拟中将使用这一算法进行计算.

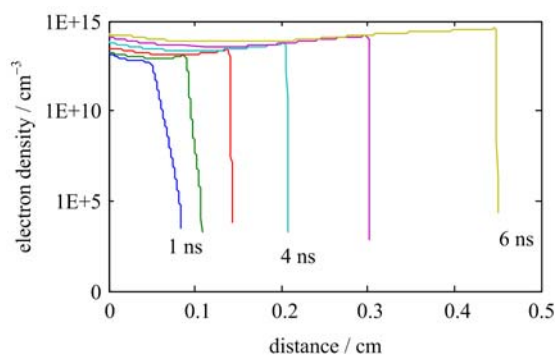
文中在描述流光头部发展时以轴线上净电荷最大处作为流光头部的位置, 并以当前时刻与前一时刻流光头部位置差与时间间隔相除作为当前时刻流光的平均速度, 以最后记录和最初记录的流光头部位置差与时间间隔相除作为流光的平均速度, 流光电流则指由电子和离子的运动而引起的极板间的回路电流, 使用 Sato^[29]给出的公式来计算. 此外, 由于流光在运动过程中会形成分支从而使模拟发散^[28], 文中在有发散的情况时只取发散之前的数据, 所以会看到不同的流光运动的距离并不相同.

2 结果及分析

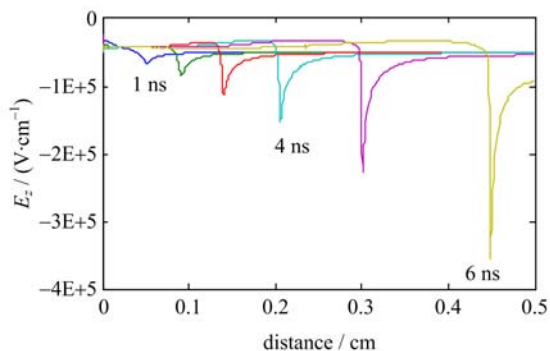
2.1 标准气压下负流光基本特性研究

很多基于工业应用的流光模拟都是在一个固定的气压(一般为标准气压)下进行的, 本节也将在标准气压下对负流光的特性进行一些模拟. 把呈电中性的等离子体团(即初始电荷)放置于负极板附近, 在背景电场的作用下电荷团将向正极板方向运动, 从而形成向正极板方向运动的负流光. 流光从电中性的初始电荷开始后, 经过一个初始阶段的调整后会以一种接近稳态(steady state)传播^[3], 这一初始阶段的时间长短由于初始参数的不同而存在差异. 图 1 给出了标准气压下模拟的一个负流光在轴线上的电子浓度和电场分量随时间的变化示意图. 从图 1(a)中可以看出, 随着时间增加, 流光头部(电子浓度梯度最大位置)不断向前传播, 流光头部和流光体内的电子浓度在持续增加, 导致流光头部内电场持续增加, 最大可达到 400 kV/cm (图 1(b)). 然而流光通道内的电场并没有被完全屏蔽, 即流光通道内电场强度虽然小于背景电场但并不为零, 在这个电场作用下流光体内将会有碰撞电离发生, 这也是流光体内的电子和正离子浓度持续增大的原因.

分别使用 10^{12} cm^{-3} , 10^{13} cm^{-3} 和 10^{14} cm^{-3} 这 3 个不同的初始电荷浓度模拟初始电荷浓度对流光的影响, 结果示于图 2. 从图 2(a)中流光头部位置随时间的变化可以看出, 初始电荷浓度为 10^{14} cm^{-3} 时流光头部发展到 4 mm 所需要的时间为 4.5 ns , 当浓度分别为 10^{13} cm^{-3} 和 10^{12} cm^{-3} 时流光头部前进相



(a)



(b)

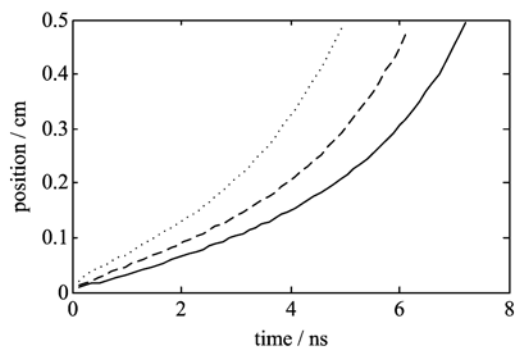
曲线从左到右分别代表模拟开始后时间
 $t=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 和 6.0 ns 的值.
 背景电场为 50 kV/cm , 气压为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,
 初始电荷浓度为 10^{13} cm^{-3}

图 1 一个负流光在轴线上的电子浓度(a)和电场分量(b)

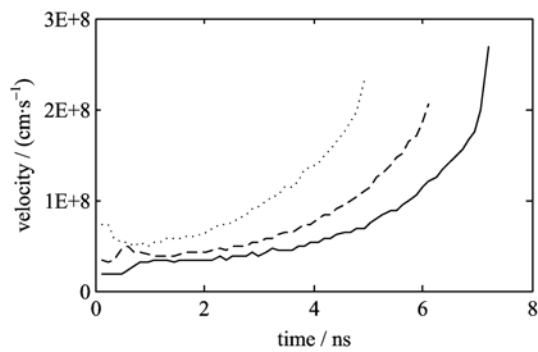
Fig. 1 On-axis electron density (a) and electric field (b) for a negative streamer

同距离的时间分别增至 5.7 ns 和 6.7 ns , 即初始电荷浓度越大, 流光头部向前运动的速度越快, 流光在相同时刻拥有更大的速度, 随着时间增加流光速度增加也越快(图 2(b)); 从图 2(c) 中可以看出, 流光电流随时间呈指数增加, 初始电荷浓度越大, 流光在同一时刻拥有越大的电流幅度。

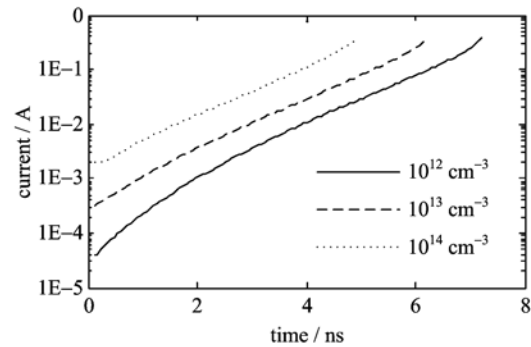
对比图 2(b) 和图 2(c) 中流光速度和电流随时间的变化曲线, 发现不同初始电荷浓度下流光速度和电流随时间的变化曲线具有一定的相似性. 为了更好地对比这种相似性, 把不同初始电荷浓度开始的流光的速度曲线或电流曲线沿着时间轴向右平移, 如图 3 所示. 从图中可以看出, 初始电荷浓度不同的流光, 虽然在初始时刻的速度和电流不同, 但是经过一段时间的发展之后, 流光的速度和电流随时间的变化趋势是一致的, 即在气压和背景电场确定的情况下, 流光有其确定的发展过程, 这一发展过程即稳态(steady state)^[3]. 以不同的初始电荷浓度开



(a)



(b)



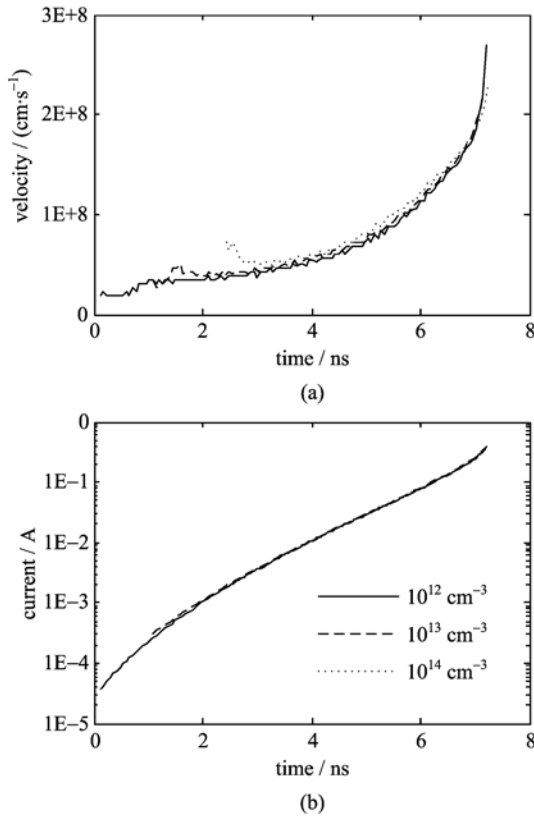
(c)

初始电荷浓度分别为 $10^{12}, 10^{13}$ 和 10^{14} cm^{-3} ,
 背景电场为 50 kV/cm , 气压为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$

图 2 以不同初始电荷浓度开始的流光的流光头部位置(a)、流光速度(b)和流光电流(c)随时间的变化图

Fig. 2 Streamer head position (a), streamer velocity (b) and streamer current (c) for streamers with different initial ionization densities

始的流光, 初始电荷浓度越大, 流光在开始时的速度和电流也越大; 在经过一段时间脱离了初始电荷的影响之后, 流光按照其气压和背景电场下确定的稳态过程发展, 这时流光的性质以及随后的发展与初始电荷无关; 而初始电荷浓度越大, 进入这一稳态过程所需的时间越短. 因此, 在接下来的模拟中我们将不再考虑初始电荷浓度的影响, 在模拟中使用固定的初始电荷浓度, 并以电流的斜率作为判断不同稳



初始电荷浓度为 10¹², 10¹³ 和 10¹⁴ cm⁻³ 的
曲线沿着时间轴向右的平移量分别为 0, 0.98 和 2.31 ns

图 3 不同初始电荷浓度开始的
流光速度平移 (a) 和电流平移 (b)

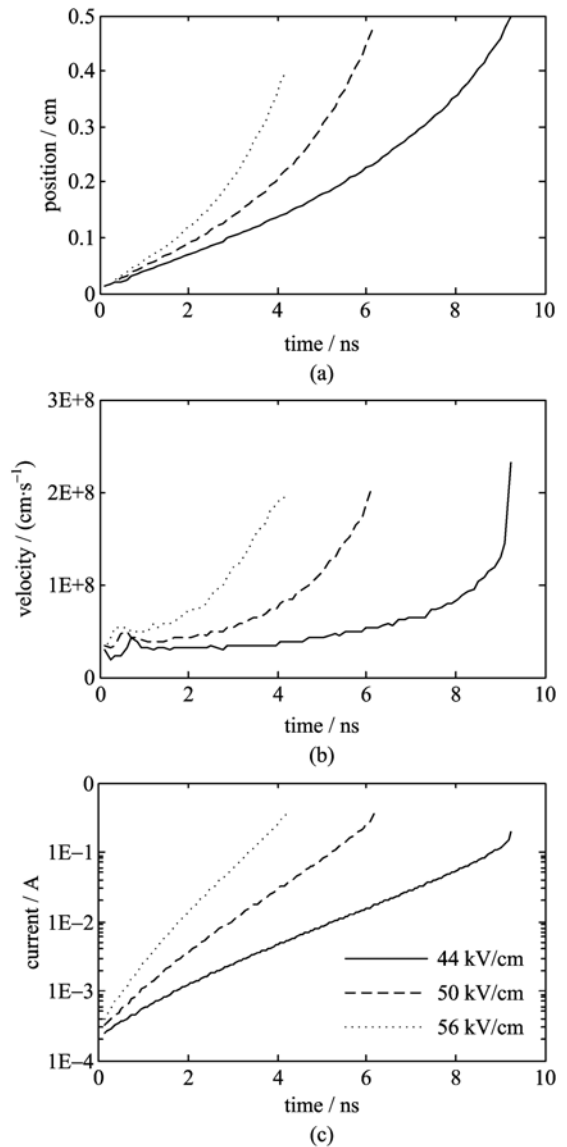
Fig. 3 Shifted streamer velocity (a) and streamer current (b)
for streamers with different initial ionization densities

态的依据。

图 4 给出了在标准气压和固定初始电荷浓度下,不同背景电场(44, 50 和 56 kV/cm)下流光特性的差异.可以看出,背景电场越大时,流光头部运动的速度越快,达到相同的速度所需要的时间越短,达到相同电流所需要的时间也越短,并且流光电流增长的斜率越大.这与 Briels 等^[17]的实验中负流光特性随着外加电压的变化趋势是一致的.在其他气压(0.53×10⁵ 和 0.27×10⁵ Pa)下进行了类似的模拟,均显示类似的流光特性随背景电场变化趋势.值得指出的是,在气压和初始电荷浓度相同而背景电场不同时流光的电流曲线不再具有相似性,也就是说流光具有不同的稳态过程,说明背景电场是影响流光稳态过程的重要因素之一.下面将研究背景气压对流光特性的影响。

2.2 变化气压中负流光特性研究

Liu 等^[12]按照相似性法则(随着气压的变化,流



初始电荷浓度为 10¹³ cm⁻³, 气压为 1.01×10⁵ Pa

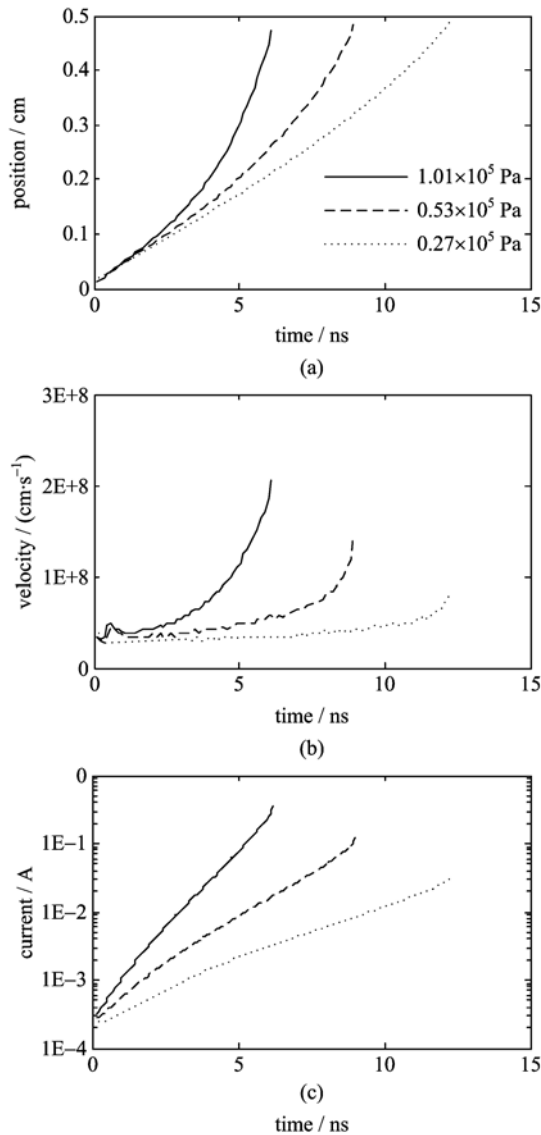
图 4 以不同背景电场开始的流光的流光头部位置 (a)、
流光速度 (b) 和流光电流 (c) 随时间的变化图

Fig. 4 Streamer head position (a), streamer velocity (b)
and streamer current (c) for streamers
with different background electric fields

光的时间尺度、空间尺度和初始电荷浓度的大小与气压成一定比例变化)设置初始条件对 0, 30 和 70 km 高度下的流光进行了模拟.这种相似性法则一般用于研究中高层(40~90 km)的大气放电,该高度的气压相对于标准气压相差很大,背景电场与背景气压保持同步变化,即背景电场随高度呈指数衰减。

图 5 给出了相似性法则条件下 0.53×10⁵ Pa 和 0.27×10⁵ Pa 气压层与标准气压下流光特征的

比较,这两个气压与其背景电场之比与标准气压下 50 kV/cm 背景电场的比值保持一致. 从图 5 中可以看出,在背景电场按照相似性法则变化的条件下,随着气压的减小流光头部的运动速度变慢,达到相同速度所需要的时间变长,达到相同电流所需要的时间也变长,并且流光电流增长的斜率变小,流光在低气压下比高压时有更小的传播速度和加速度.



初始电荷浓度为 10^{13} cm^{-3} , 在气压为 1.01×10^5 , 0.53×10^5 和 0.27×10^5 Pa 时对应的背景电场分别为 50, 26.32 和 13.16 kV/cm

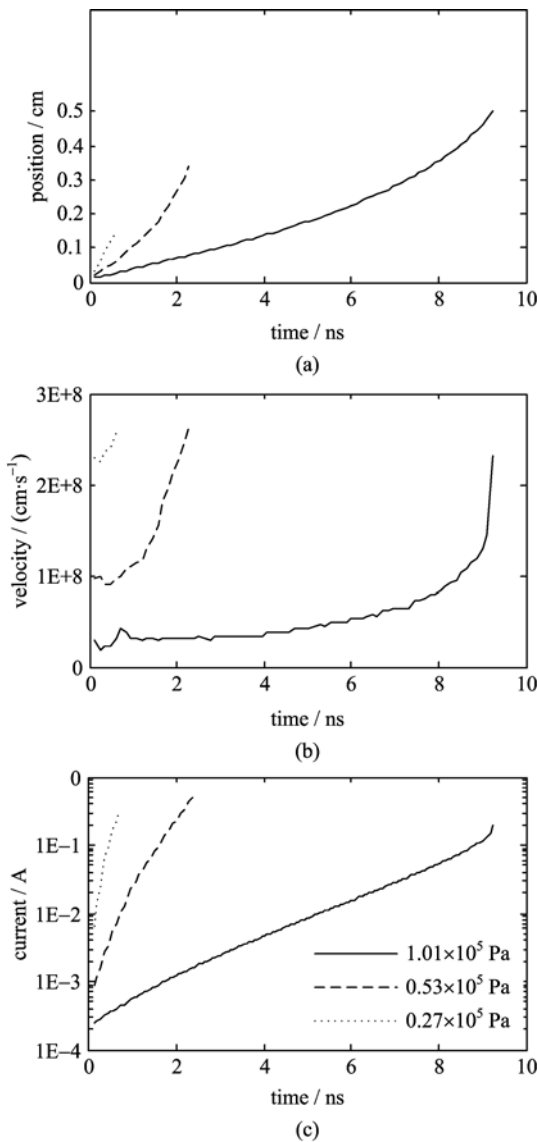
图 5 背景电场按照相似性法则变化时不同气压下流光头部位置(a)、流光速度(b)和流光电流(c)随时间的变化图

Fig. 5 Streamer head position (a), streamer velocity (b) and streamer current (c) for streamers at different pressures, where background electric field changes with pressure as similarity laws

虽然本文研究的高度(0, 5.3, 9.2 km)与 Liu 等^[12]研究的高度(0, 30, 70 km)不同,但总体上流光特性随气压变化的趋势是一致的. 值得指出,相似性法则下 0.53×10^5 Pa 和 0.27×10^5 Pa 气压下流光变化趋势与图 4 中固定气压下流光随背景电场递减的变化趋势一致,即在背景气压相差不大时,相似性法则下更多体现的是背景电场不断减小对流光特性的影响.

然而实际雷暴云中由于强对流等因素的存在,不同气压(即不同高度)可能出现具有相同或相近背景电场的情况,从 Marshall 等^[30]使用探空气球对云内电场探测的结果可以看出这一点. 接下来将研究这种背景电场相近的条件下不同气压下流光特性的差异. 图 6 是背景电场不变时流光特征随气压的变化情况. 从图中可以看出,在背景电场不变的情况下,随着气压的减小,流光头部的运动速度变快,达到相同速度所需要的时间变少,流光电流随时间增大的斜率变大. 随着气压的减小,背景电场与该气压下击穿电场(随高度指数衰减)的比值越大,在很短的时间形成分支从而使模拟发散,流光头部最后运动的距离也越小,如图 6(a)所示. 然而图 6(c)表明,在初始电荷浓度和背景电场相同的条件下,不同气压时的流光稳态也不相同,表明气压也是影响稳态过程的重要因素. 事实上,雷暴云中启动位置更高的常规云闪通常先于启动位置稍低的普通地闪,或许表明在云内电场相差不大时较低气压下流光过程更易形成.

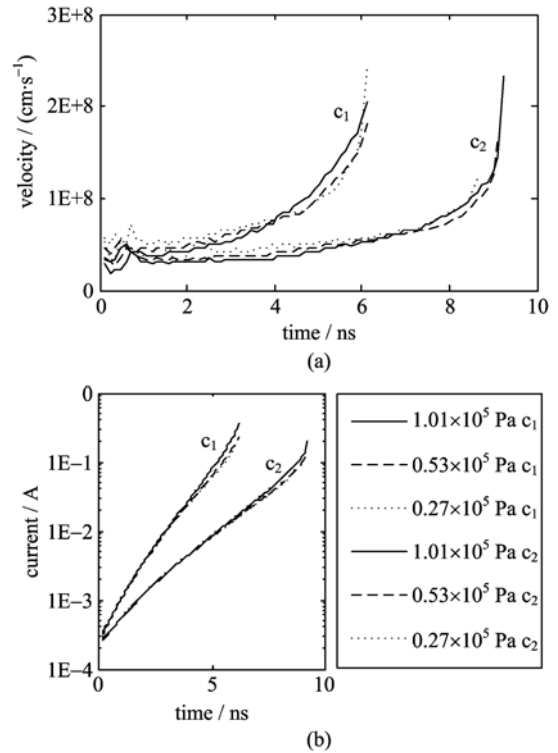
上述模拟结果表明,背景电场和背景气压都可以影响流光的稳态特征. 事实上流光的发展由电子雪崩的速度决定,影响电子雪崩速度的是电离频率项 $v_e \cdot \alpha$ (式(1)),它与背景电场和气压有关. 考虑到图 2 中电场和气压不变时流光稳态保持一致,我们猜测由气压和背景电场共同决定的背景电离频率是影响流光特征的主要因子. 本文把气压和背景电场变化时背景电离频率保持不变称为守恒条件. 图 7 给出了两组满足不同守恒条件的不同气压下的流光特征. 图中 c_1 组和 c_2 组的背景电离频率分别为 $10.59 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 和 $5.44 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 由图中可以看出,当背景电离频率不同时,两组流光特征明显不同,并且背景电离频率大的流光速度增加得更快,电流的斜率也越大;但当背景电离频率守恒时,虽然气压和背景电场变化但流光特征基本保持不变. 这说明,背景气压与背景电场一起通过影响电子雪崩的



背景电场为 44 kV/cm, 初始电荷浓度为 10^{13} cm^{-3}
 图 6 背景电场不变时不同气压下流光头部位置(a)、
 流光速度(b)和流光电流(c)随时间的变化图
 Fig. 6 Streamer head position (a), streamer velocity (b)
 and streamer current (c) for streamers at different
 pressures, where background electric field is fixed

速度来影响流光特征. 为了进一步阐述电离频率对
 流光特性的影响, 我们选择流光平均速度考查它随
 背景电离频率的变化关系, 结果示于图 8. 从图中可
 以看出, 流光平均速度随着背景电离频率的增大而
 增大, 二者之间呈现良好的对数线性(指数)关系. 结
 合图 7 可知, 背景电离频率越大、流光平均速度越
 大, 则流光电流也越大.

根据上述模拟结果我们猜测, 实际雷暴云中气
 压是通过影响云内环境电场下的背景电离频率(电



初始电荷浓度为 10^{13} cm^{-3} ; c_1 组在气压为 1.01×10^5 , 0.53×10^5 ,
 $0.27 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时对应的背景电场分别为 50, 30, 17,
 17.81 kV/cm ; c_2 组在气压为 1.01×10^5 , 0.53×10^5 , $0.27 \times 10^5 \text{ Pa}$
 时对应的背景电场分别为 44, 26, 18, 15.18 kV/cm

图 7 两组背景电场随气压变化满足守恒条件下的
 流光速度(a)和流光电流(b)随时间的变化图
 Fig. 7 Streamer velocity (a) and streamer current (b)
 for streamers at different pressures, where background
 electric field changes with pressure as constant laws

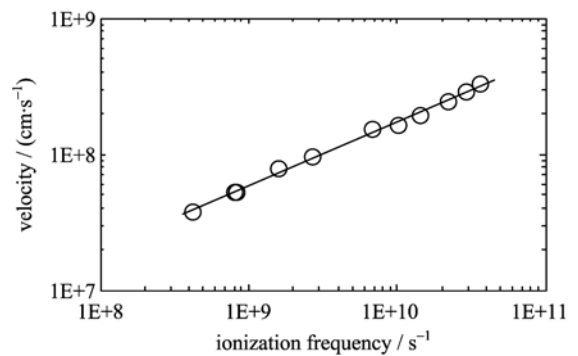


图 8 相同初始电荷浓度(10^{13} cm^{-3})的流光,
 平均速度与背景电离频率之间的关系
 Fig. 8 Streamer mean velocity vs background
 ionization frequency for streamers with same
 initial ionization density (10^{13} cm^{-3})

子雪崩速度)来影响雷暴闪电流光特征的. 对于雷暴
 云内不同电荷层内背景电场相差不大的情况, 较高

高度的电荷层内气压较低则背景电离频率增加,流光发展速度和流光电流增加,即闪电流光更容易在位置较高的电荷层内启动.同样,对于雷暴云内特定的电荷层,由于气压变化不大,因此背景电场较大的区域电离频率也较大,则流光更容易在雷暴云内背景电场强度较大的区域内发动.同时指出,本文模拟结果显示流光平均发展速度随电离频率呈指数增加关系,虽然雷暴云内不同区域的电场幅度高度变化,这可以部分地解释观测到的闪电云内流光发展速度的较大落差,但是总体而言雷暴云内较高高度(气压较低)的流光速度应该比较低位置(气压较高)的流光发展速度更快.这有待未来实验观测结果的证实.

3 结论

本文使用了二维柱对称的流光模式对平面平行极板间氮气中的负流光进行了模拟.模式中计算连续方程中使用了 FCT 算法以确保计算的准确性,使用了动态自适应网格方案来提高计算的速度.使用该模式研究了标准气压和对应于雷暴闪电启动区域的变化气压下负流光的特性,主要结论如下:

(I) 在流光脱离初始电荷的影响后,流光以一种稳态运动,初始电荷浓度的大小只影响进入稳态的快慢,气压和背景电场共同确定的背景电离频率决定流光的稳态特征.背景电离频率越大流光的发展速度越快,流光的平均速度与背景电离频率之间呈现指数增加的关系.

(II) 气压通过背景电场下的背景电离频率(电子雪崩速度)来影响流光特征.背景电场不变时,随着气压降低背景电离频率增加,流光发展速度越快、流光电流越大,流光更容易在较低气压下启动.背景气压不变时,背景电场越大则背景电离频率越大,流光较容易在背景电场高值区启动.

本文结果表明,雷暴云中电场相近时流光更容易在气压较低位置(云中较高位置)发生.这可以部分解释雷暴放电过程中启动位置更高的云闪先于启动位置稍低的普通地闪发生.本文结果同时表明,对于雷暴云内固定高度层,背景电场大的地方流光更容易发生,这可以解释闪电总是倾向于在雷暴云内异极性电荷层之间、电场强度最大的区域启动.然而,闪电的云内启动过程非常复杂且一些主要过程依然未知(如云内启动的流光过程如何转变为连续传播的先导过程^[19]),仍然有待于进一步的研究.本文的流光模式只是一个非常简单的模式,为了使计

算简化本文的模拟是在氮气中进行的,并用氮气中流光的特性来近似空气中流光的特性.由于氮气和空气之间气体特性不同,模拟中需要考虑的具体过程也不尽相同.在接下来的研究工作中,将对模式进行改进,增加一些粒子过程以及光电离过程,使模拟更接近雷暴云中电击穿的情况.

参考文献 (References)

- [1] Davies A J, Davies C S, Evans C J. Computer simulation of rapidly developing gaseous discharges [J]. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 1971, 118(6): 816-823.
- [2] Davies A J, Evans C J, Woodison P M. Computation of ionisation growth at high current densities [J]. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 1975, 122(7): 765-768.
- [3] Dhali S K, Williams P F. Two-dimensional studies of streamers in gases [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(12): 4 696-4 707
- [4] D'yakonov M I, Kachorovskii V Y. Theory of streamer discharge in semiconductors [J]. *Sov Phys JETP*, 1988, 67(5): 1 049-1 054.
- [5] Vitello P A, Penetrante B M, Bardsley J N. Simulation of negative-streamer dynamics in nitrogen [J]. *Physical Review E*, 1994, 49(6): 5 574-5 598.
- [6] Kulikovskiy A A. Two-dimensional simulation of the positive streamer in N_2 between parallel-plate electrodes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28 (12): 2483; doi: 10. 1088/0022-3727/28/12/015.
- [7] Wang Xianghan, Wang Feng, Qiu Yuchang. Dynamic simulations of two-dimensional streamer discharge in uniform field in SF_6 [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(7): 1 358-1 362.
王湘汉, 汪枫, 邱毓昌. 均匀场中 SF_6 二维流注放电模型的动态仿真 [J]. *高电压技术*, 2008, 34(7): 1 358-1 362.
- [8] Zhang Yun, Zeng Rong, Li Xiaolin, et al. Numerical simulation on streamer discharge of short air gap of atmospheric air [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(28): 6-12.
张贇, 曾嵘, 黎小林, 等. 大气中短空气隙流注放电过程数值仿真 [J]. *中国电机工程学报* 2008, 28(28): 6-12.
- [9] Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system [J]. *Science*, 1990, 249(4964): 48-51.
- [10] Sentman D D, Wescott E M, Osborne D L, et al.

- Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(10): 1 205-1 208.
- [11] Liu N, Pasko V P. Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (A4): A04301; doi: 10.1029/2003JA010064.
- [12] Liu N, Pasko V P. Effects of photoionization on similarity properties of streamers at various pressures in air [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(2): 327; doi:10.1088/0022-3727/39/2/013.
- [13] Pancheshnyi S, Nudnova M, Starikovskii A. Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(1): 016407; doi: 10.1103/PhysRevE.71.016407.
- [14] Briels T M P, Veldhuizen E M V, Ebert U. Positive streamers in air and nitrogen of varying density: experiments on similarity laws [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(23): 234008; doi:10.1088/0022-3727/41/23/234008.
- [15] Nijdam S, van de Wetering F M J H, Blanc R, et al. Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(14): 145204; doi:10.1088/0022-3727/43/14/145204.
- [16] Gallimberti I, Bacchiega G, Bondiou-Clergerie A, et al. Fundamental processes in long air gap discharges [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2002, 3(10): 1 335-1 359.
- [17] Briels T M P, Kos J, Winands G J J, et al. Positive and negative streamers in ambient air: Measuring diameter, velocity and dissipated energy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41 (23): 234004; doi:10.1088/0022-3727/41/23/234004.
- [18] Luque A, Ratushnaya V, Ebert U. Positive and negative streamers in ambient air: Modelling evolution and velocities [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(23): 234005; doi:10.1088/0022-3727/41/23/234005.
- [19] Dwyer J R, Uman M A. The physics of lightning [J]. *Physics Reports*, 2014, 534(4): 147-241.
- [20] Proctor D E. Regions where lightning flashes began [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96(D3): 5 099-5 112.
- [21] Wu T, Dong W, Zhang Y, et al. Discharge height of lightning narrow bipolar events [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5): D05119; doi:10.1029/2011JD017054.
- [22] Proctor D E. Lightning flashes with high origins [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D2): 1 693-1 706.
- [23] Boris J P, Book D L. Flux-corrected transport. I. SHASTA, a fluid transport algorithm that works [J]. *Journal of Computational Physics*, 1973, 11 (1): 38-69.
- [24] Zalesak S T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids [J]. *Journal of Computational Physics*, 1979, 31(3): 335-362.
- [25] Morrow R. Properties of streamers and streamer channels in SF6 [J]. *Physical Review A*, 1987, 35(4): 1 778-1 785.
- [26] Guo J, Wu C H J. Two-dimensional nonequilibrium fluid models for streamers [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1993, 21(6): 684-695.
- [27] Min W G, Kim H S, Lee S H, et al. An investigation of FEM-FCT method for streamer corona simulation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(4): 1 280-1 284.
- [28] Montijn C, Hundsdorfer W, Ebert U. An adaptive grid refinement strategy for the simulation of negative streamers [J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 219(2): 801-835.
- [29] Sato N. Discharge current induced by the motion of charged particles [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1980, 13(1): L3; doi:10.1088/0022-3727/13/1/002.
- [30] Marshall T C, McCarthy M P, Rust W D. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D4): 7 097-7 103.