

闪电先导静电场波形理论分析

张义军 言穆弘 刘欣生

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

提 要

通过对地闪电先导过程静电场变化波形的理论分析指出, 先导所致静电场时间变化率 dE/dt 是一个比静电场变化 ΔE 更能反映先导传播特性的物理量。利用 dE/dt 时变曲线可以较精确地确定先导开始位置、接地附近先导传播速度以及接地瞬时的先导电流, 同时利用 dE/dt 极值点的特征可以揭示通道传播过程中倾斜、弯曲特征。

关键词: 闪电; 先导过程; 电场变化。

1 引 言

自然地闪中先导过程是闪电物理研究中一个十分重要的问题。利用多点测量先导引起的地面电场变化来讨论先导过程的一些特征, 通常只能描述先导发展的总体特征, 无法揭示先导的传播特性。例如, 先导通道发生分枝、倾斜或弯曲时, 上述分析方法就受到很大限制。由于先导所致 dE/dt 变化与通道电荷分布无关, 所以可利用 dE/dt 波形特性来讨论先导传播特征。Thomson^[1] 首先在这方面做了尝试, 用 dE/dt 波形讨论了倾斜、分叉和电荷三维分布情况下先导的传播特性, 但没有注意到先导在传播过程中的弯曲现象。通常自然闪电先导传播开始是垂直向下, 到临近地面会发生倾斜、弯曲。研究这种传播特性对于探讨地面建筑物的防雷击是有用的。本文利用一次自然地闪观测实例, 通过地面电场变化 ΔE 和 dE/dt 波形仔细分析了先导传播特性, 以及先导通道在地面附近的弯曲与 dE/dt 波形的可能联系。这将对雷电防护的研究具有重要意义。

2 先导静电场波形理论分析

假定云中电荷源为稳态球对称分布, 先导通道是一维垂直的, 由文献[1]可知, $\frac{dE}{dt}$ 波形中有三个和通道电荷分布无关的特性点: ① $t = 0$ 时, $dE/dt = 0$, 即为先导开始点; ② $t = t_m$, 即第二个 $dE/dt = 0$ 点, 则可得到此点高度与地面之间先导的平均传播速度;

③ $t = t_L$, 即先导接地点, 则可求得先导接地瞬时的电流。

如果先导通道不是垂直而是局部倾斜的, 选择测站为坐标系原点, 测站到闪电方向为正方向, 则:

$$D = D' + (H' - z) \operatorname{tga} \tag{1}$$

H' 为先导通道开始倾斜时高度, D' 为该高度处距测站的水平距离, 其值随每次倾斜而变, D 为通道上任一点距测站的水平距离, z 为此点的高度, α 为通道与垂直方向的夹角, 其符号取决于测站位置, 如图 1 所示。

利用静电学概念, 考虑到 $t = t(z, D)$, 假定 ρ_L, v 为常数, 由文献[1]得到:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dt} \right) = \frac{dz}{dt} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) + \frac{dD}{dt} \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dE}{dt} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) = \frac{\rho_L v}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{D^2 - 2z^2}{(z^2 + D^2)^{3/2}} \right\} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dE}{dt} \right) = \frac{\rho_L v}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{-3Dz}{(z^2 + D^2)^{3/2}} \right\}$$

规定 z 向上为正, $dz/dt = -v_z$ 表示先导在垂直方向的传播速度, $dD/dt = v_D$ 表示水平方向的传播速度, 其符号取决于测站位置。

在通道的垂直部分, $dD/dt = 0, D = D_0$ (D_0 是云中电荷源离测站的水平距离), dE/dt 的极值条件是 $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) = 0$, 得到 $z = z_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} D_0$, 在 z_0 高度上 dE/dt 达到极值。

对负先导, 在 $z > z_0$ 段, $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) > 0$, $\frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dt} \right) < 0$, 即随着时间的增加和高度的减小, $\frac{dE}{dt}$ 值减小; 在 $z < z_0$ 段, 情况相反, 随高度的减小, dE/dt 值增加。

在通道的倾斜部分, dE/dt 的极值条件为:

$$-V_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) + V_D \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dE}{dt} \right) = 0$$

以式(3)代入, 并考虑 $\frac{V_D}{V_z} = \operatorname{tga}$ 得到:

$$D^2 - 2z^2 + 3Dz \operatorname{tga} = 0 \tag{4}$$

其中 $V_z > 0, V_D$ 符号取决于测站位置。以式(1)代入式(4), 并求解得到 dE/dt 达到极值点的高度为:

$$z = \frac{(H' \operatorname{tg}^2 \alpha + D' \operatorname{tga}) \pm \sqrt{(H' \operatorname{tg}^2 \alpha + D' \operatorname{tga})^2 + 8(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)(D' + H' \operatorname{tga})^2}}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)} \tag{5}$$

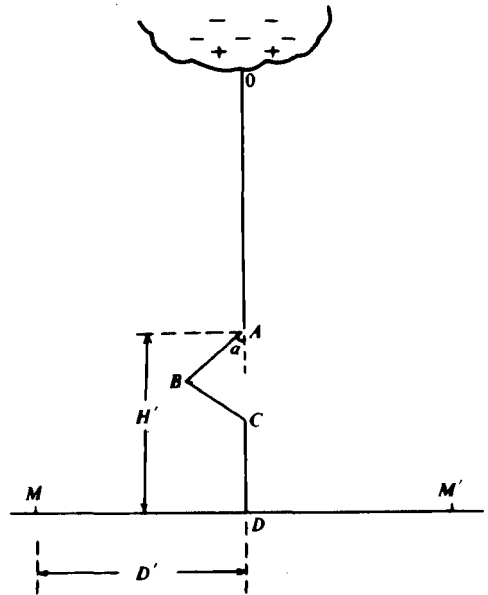


图 1 闪电通道等效图 (M 和 M' 表示测站位置)

因 z 不能为负值,故式(5) 只有一个解,即对于一次倾斜通道, dE/dt 最多出现一个新极值。随着多次倾斜, H' 、 α 、 D' 随之变化,于是就出现多个极值。所以,利用 dE/dt 极值分布可以讨论闪电通道的倾斜特征。

3 自然闪电实例分析

3.1 观测

1990 年夏季,在甘肃永登黑林子山区进行了自然闪电观测。利用场磨型电场仪,响应时间优于 $0.1s$ ^[2],以及电场变化仪,时间常数为 $4.2s$ ^[3],分别测量地面平均电场强度和闪电引起的电场变化。研究闪电放电过程细节,可用微机来记录,微机的最小采样时间为 $0.1ms$ 。此外,还配有闪电通道的视频摄像,估计测量及记录系统的总误差不会超过 10% 。

3.2 先导电场变化波形

图 2 是 1990 年 8 月 9 日一次自然负地闪的地面电场变化波形。地闪发生时的人工引发闪电的火箭发射场测站,其地面电场为 $+4kV/m$ 左右。火箭发射场和距其 $550m$ 远的学校两个测站同时记录了整个闪电过程的电场变化,以及通道摄像照片。利用声光差记录,可得知闪电离测站的水平距离 D_0 分别为 $1.02km$ 和 $1.5km$ 。

从图 2 可见, L 和 R 是明显的先导和回击过程,其持续时间分别为 $7.0ms$ 和 $0.8ms$,闪电时两个测站的地面电场均为正电场,是雷暴下部正电荷区所致^[4,5,6]。这一地闪的先导前有一长 $350.0ms$ 的慢电场变化过程。其中 A 、 B 段持续时间分别为 $40.0ms$ 和 $22.0ms$,变化幅度为 $8.5kV/m$ 和 $7.0kV/m$,是地面正电场情况下的负电场变化,这在国外也曾被观测到。Thomson^[7] 认为这种较长时间的电场变化是先导之前由一个独立于地闪的云内放电过程所致。这种云内放电过程有可能为接着发生的负地闪创造条件。这次负地闪可能就是通过云内放电过程中和了云下部正电荷区内部分正电荷,而形成一窗口,主负电荷区的闪电先导通过此窗口向地面伸展,产生了对地放电的负极性地闪。

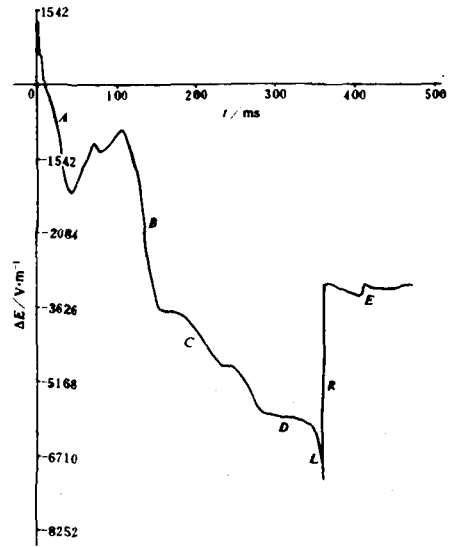


图2 闪电的地面电场变化波形

图 2 中 C 段持续时间约 $130.0ms$,显然不是云内放电过程,可能是云内电荷运动所致。 D 段是先导过程前的预击穿过程。 E 段是继后回击,发生于首次回击后约 $36.0ms$,持续时间 $1.6ms$,但它引起的地面电场变化较小,仅为 $121.0V/m$,可能只中和了先导中的剩余电荷。

假定云中电荷是球对称分布,地闪中和的电荷在地面产生的电场变化 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\Delta Q H}{(D_0^2 + H^2)^{3/2}} \quad (6)$$

对此地闪过程,利用两个测站的电场变化资料作定量估算,计算得到其中和电荷量 ΔQ 为 3.6C,中和的电荷中心高度约 2.9km。估算误差在 30%—50% 内,和我们在甘肃其他地区的多站观测拟合结果^[8] 及人工触发闪电结果相符合^[3]。

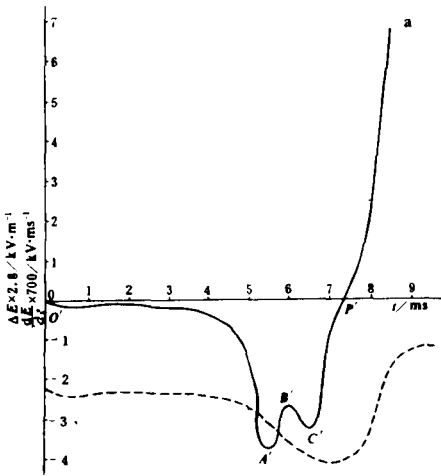


图 3(a) 闪电的 $\frac{dE}{dt}$ (实线) 和 ΔE (虚线) 波形

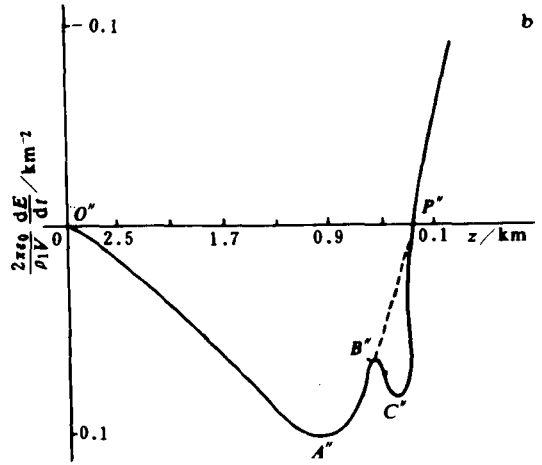


图 3(b) $\frac{dE}{dt}$ 的理论波形
(实线为倾斜通道,虚线为垂直通道)

3.3 先导通道特征

分析经摄像记录经过慢放得到的闪电通道实况照片(图略),发现先导在伸展过程中是多分枝的,在地面附近发生二次弯曲,最后近似垂直接地产生回击。为了分析先导传播过程静电场变化特征,利用实测 ΔE 原始资料,作先导所致地面电场变化的时间变化率 dE/dt 及电场变化 ΔE 波形(图 3(a))。时间取样 $\Delta t = 0.5ms$,所以图 3(a) 中 dE/dt 波形实际为 $\Delta E/\Delta t$ 时变曲线,和微分形式并不完全等效。分别对取样时间 $\Delta t = 0.1ms, 0.2ms$ 作类似曲线,结果和图 3(a) 一致,故差分形式能近似反映 dE/dt 变化特征。图 3(a) 中第一个 $dE/dt = 0$ 的点,即 0 点为先导开始时刻,整个先导持续时间约 8.2ms。假定先导从云中电荷中心高度(2.9km)开始向下传播,则可得到整个先导过程平均传播速度 V 。图中 P'

表 1 先导参数计算结果

参数	t (ms)	H (km)	V (m/s)	z_m (km)	t_m (ms)	V_m (m/s)	$\left. \frac{dE}{dt} \right _0$ (kV/m · s)	I (kA)
计算值	8.2	2.9	3.5×10^5	0.27	0.7	3.9×10^5	2.6×10^3	1.69

是第二个 $dE/dt = 0$ 点,也就是 ΔE 达到极值的点。 P' 点之前 dE/dt 波形出现了三个极值,可能是通道弯曲所致。在 P' 点之后无极值,故可以判定 P' 点出现在图 1 中的 CD 段,可计算该点的高度 z_m ,同时利用实测 P' 点到回击开始的时间间隔 t_m ,则可计算 z_m 到地面之间

的平均传播速度 V_m 。由测量回击开始时刻的斜率 $\left. \frac{dE}{dt} \right|_0$ 。则能计算该时刻的瞬时先导电流,上述结果列于表 1,和 Thomason^[9] 的计算结果差不多。

从表 1 可见, V 和 V_m 同量级,且和光学实测速度一致,说明先导近似以恒定速度传输。

根据第二节分析,假定闪电通道为图 1 所示,即通道发生二次倾斜,偏离垂直方向角度 α 为 45° ,云中电荷中心高度 $H = 2.9\text{km}$,测站选在 M 点,取 $D_0 = 1.5\text{km}$, $H'' = 0.3\text{km}$,同时取 $H' = 0.6\text{km}$,利用静电场概念,理论计算先导分别在 OA 、 AB 、 BC 及 CD 段传播过程中的 $\frac{2\pi\epsilon_0}{\rho_L V} \frac{dE}{dt}$ 值,结果示于图 3(b)。图中虚线是假定整个先导通道垂直传播时的拟合计算结果,极值点 A'' ,高度约为 $1.02 \pm 0.01\text{km}$ 。由于通道倾斜,产生了除 A'' 之外的另两个极值点 B'' 和 C'' ,计算得到高度分别为 $0.59 \pm 0.01\text{km}$ (即在 AB 段内),和 $0.45 \pm 0.01\text{km}$ (在 BC 段内)。对不同的 H' 和 α 做同样计算, dE/dt 变化趋势与图 3(b) 相同,只是极值大小有差异。与图 3(a) 比较,二者有很相同的变化趋势。所以实测闪电先导通道可近似用图 1 通道等效。

假定先导通道在初始传播时垂直,则 dE/dt 达第一个极值时的高度 $z_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} D_0 = 1.03\text{km}$,相应先导传播到 z_0 高度的时间为 $t_0 = 5.3\text{ms}$ 。与图 3(a) 对照,可知 t_0 与极值点 A' 相对应,所以 A' 点应在图 1 中垂直段 OA 内。图中 B' 、 C' 两点是通道弯曲所致,在 z_0 和 z_m 高度之间。

若取图 1 中 M' 测站,即表示在所有倾斜通道中 $D > D_0$,同时 $D^2 - 2z^2 > 0$ 。对于 AB 段,即初始倾斜段远离测站,那么 $D > D'$, $V_D > 0$,故 $\text{tg}\alpha > 0$ 。对于负地闪($\rho_L < 0$),则 $-V_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) > 0$, $V_D \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dE}{dt} \right) > 0$ 。这说明在 AB 倾斜通道中, z 和 D 变化对 $\frac{dE}{dt}$ 的影响一致,两项合成结果使 $\frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dt} \right) > 0$,即不可能再产生极值点;对于 BC 段,因 $D < D'$, $V_D < 0$,以及 $\text{tg}\alpha < 0$,同样得到 $-V_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) > 0$, $V_D \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dE}{dt} \right) < 0$ 。说明在 BC 倾斜段 z 和 D 变化对 $\frac{dE}{dt}$ 的影响相反,两项共同作用结果可产生 $\frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dt} \right) = 0$ 的点,即 dE/dt 的新极值点。由此可见,在通道远离测站时,只有出现二次相反方向的倾斜时,才能产生 A' 点以外的 dE/dt 极值,且极值点发生在第二次倾斜时段内。

若取图 1 中 M 测站,即表示在所有倾斜通道中 $D < D_0$,区分两种情况:① 假定 $D^2 - 2z^2 > 0$,类似于上面分析,在 AB 段, D 、 z 变化对 dE/dt 的贡献相反,能产生新极值点,在 BC 段贡献相同,不能产生极值点。② 假定 $D^2 - 2z^2 < 0$,那么 $-V_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{dE}{dt} \right) < 0$,这意味着在 $z < z_0$ 段内,随着 z 的减小, dE/dt 值也必须减小,这和 $z < z_0$ 段要求矛盾,此假定不成立。

综上所述,当闪电通道发生接近测站的倾斜时, dE/dt 将产生极值,此时 $\text{tg}\alpha < 0$,且对一次倾斜最多只能产生一个极值。当通道出现新的相反方向倾斜(或通道变为垂直)时,新的反向极值出现。图 3(a) 中 B' 是极大值点,出现在该倾斜段内(若测站为 M' 则在 BC 段,若为 M 则在 AB 段)。而 C' 点是极小值点,出现在通道反向转弯处。对于 M' 测站为

C 点, M 测站为 B 点。且 C' 点前的闪道传播方向是接近测站的。所以利用 z_0 点以外 dE/dt 极值点特征分布,可以揭示闪电通道的一些倾斜特征。实际闪电通道常是许多个 ABC 倾斜组合而成,每一组 ABC 倾斜都可能在 dE/dt 曲线上出现两个极值点(若倾斜长度很短,也可能不出现极值)。所以,利用实测 dE/dt 曲线中极值点的数目和分布,可以探索闪道内较长倾斜的情况。尤其是回击前最后一个极值点,它反映了近地面附近的一次倾斜,通常和地面高建筑物被激发的上引流光有关。讨论和计算上述倾斜的平均高度范围,对高建筑物的防雷是有用的。

4 结 论

本文利用一次自然地闪先导过程的电场变化测量和通道摄像记录,理论分析了地闪先导过程静电场变化波形,得到以下结论:

(1) 该次负地闪是在地面为正电场,即测站被云下部次正电荷区控制情况下发生的。其先导前有一长350ms的慢电场变化,其中云内放电过程中中和了部分云下部的正电荷,为负地闪的先导传播打开了一个窗口。地闪中和电荷量为3.6C,电荷中心高度约为2.9km。

(2) 此地闪在传播过程中总体发生了两次较大倾斜,倾斜高度在 z_m (0.27km)和 z_0 (1.03km)高度之间。

(3) 先导所致静电场时间变率 dE/dt 是一个比静电场变化 ΔE 更能反映先导传播特征的物理量。利用 dE/dt 时变曲线可以较精确地确定先导开始点,估算先导的平均传播速度和回击开始时先导的瞬时电流分别为 $3.5 \times 10^5 \text{m/s}$ 和1.69kA。

(4) 先导所致静电场时间变化率 dE/dt 波形,尤其是极值的数目和分布特征与闪电通道的倾斜、弯曲有一定的相关性。在 $z < z_0$ 段,极值点通常在闪道向着测站方向倾斜、弯曲内出现。并利用极值点分布可以近似确定倾斜、弯曲的位置。

参 考 文 献

- 1 Thomson E. M.. A theoretical study of electrostatic field wave shapes from lightning leaders. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**: 8125—8135.
- 2 肖庆福,肖正华,惠世德. DC-S型大气电场仪. 电子技术应用, 1988, **5**: 13—15.
- 3 刘欣生等. 人工引发雷电试验及其特征的初步分析. 高原气象, 1990, **9**(1): 64—73.
- 4 刘欣生等. 闪电引起的地面电场变化特性及雷暴云下部的正电荷层. 气象学报, 1987, **45**(3): 500—504.
- 5 叶宗秀,邵选民,刘欣生. 雷暴云的电场及电荷分布. 高原气象, 1987, **6**(3): 234—243.
- 6 王才伟等. 雷暴云下部正电荷所产生的电场. 高原气象, 1987, **6**(1): 65—74.
- 7 Thomson E. M.. Characteristics of port moresby ground flashes. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: 1027—1036.
- 8 邵选民,刘欣生. 云中闪电及云下部正电荷的初步分析. 高原气象, 1987, **6**(4): 317—325.
- 9 Thomson E. M.. Speed and current for lightning stepped leaders near ground as determined from electric field records. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**: 8136—8142.

A THEORETICAL ANALYSIS OF ELECTROSTATIC FIELD CHANGE WAVESHAPE CAUSED LIGHTNING LEADER

Zhang Yijun Yan Muhong Liu Xingsheng

*(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics,
Academia Sinica, Lanzhou 730000)*

Abstract

By analyzing theoretically the electrostatic field change of a CG lightning leader process, it is indicated that temporal variation rate of electrostatic field dE/dt caused by leader development is better than net field change ΔE for characterizing the leader propagation. Starting position of the leader, velocity of leader propagation near the ground and leader instant current when leader reached the ground could be determined by using the time-varying curve of dE/dt . Meanwhile, the features of inclination or flexion of lightning channel can be inferred from the distribution of extreme value point by the curve of dE/dt versus time.

Key words: Lightning; Leader process; Electric field change.