

人工触发闪电放电过程分析

I. 先导放电过程

言穆弘

(中国科学院兰州高原大气物理研究所 甘肃省兰州市 730000)

摘 要 利用人工触发闪电电场、电流和闪电通道亮度高速摄像观测资料, 分析了第一次回击前先导过程的放电特性。结果指出, 对于空中触发, 先导传输具有“双向”特征, 由于下行先导发展, 先导通道电流分布具有不均匀性, 连接导线汽化都发生在上行先导阶段。人工闪电第一次回击虽然与自然闪电继后回击特性十分相似, 但两者放电特征仍有差别, 前者具有较长的连续电流过程。

关键词 人工触发闪电 双向先导

分类号 P427.3

自 Newman 等^[1]首次用小火箭成功触发闪电以来, 美、法、日本和中国相继获得引雷成功, 闪电触发技术也日趋完善。Hubert 等^[2]根据放电特征把人工触发闪电分成四种类型。近代更有许多著作研究了自然和人工闪电的放电特征, 例如 Mazur^[3]进一步发展了早期 Kasemir 提出的先导传输过程中的“双向”特性, Shao^[4]利用干涉仪观测并详细地研究了自然负地闪的放电特征, Fisher 等^[5]利用人工触发闪电电流资料提出了“初始连续电流”和“无连续电流时期”概念。这些研究初步揭示了闪电放电结构, 但形态描述较多而物理解释较少, 且又较多偏重于自然地闪, 对人工触发闪电研究较少。本工作利用人工触发闪电电流、电场变化和通道高速摄像观测资料, 详细地研究了放电过程, 以及与自然闪电的异同点, 提出了一些观点和物理解释。全部内容包括先导过程和闪击间过程两部分, 本文是第一部分。

1 一般放电特征

图 1 是 1996 年 7 月 8 日在南昌地区获得的一次典型人工触发负地闪的波形特征。 A 为电场变化 ΔE , B 为通道辐射(中心频率约 10MHz)。触发闪电共产生 10 次回击(图中数字标示), 从触发上行先导开始(图中标号“0”)到最后一次回击结束历时约 520ms。

收稿日期: 1997-10-14; 改回日期: 1997-12-31

本工作得到国家自然科学基金(49235090, 49775254)资助

作者简介: 言穆弘, 男, 1940 年 3 月出生, 研究员, 主要从事大气电学研究

触发上行先导入云后维持了很长时间的连续电流过程,接着是直窜先导并形成第一次回击。此后相继出现 J 过程(有时伴有“ K ”变化)和连续电流过程(有时伴有“ M ”变化),和相应的直窜先导及继后回击。从宏观而言,这是经典人工触发闪电放电特征。但从图 1 可见,各次闪击以及闪击之间的连续电流,无论是持续时间或强度,甚至伴随的脉冲放电都有很大差别。图 1 中 C 是相应的电流测量,电场和电流有近似对应,但第一次回击对应不明显(由于电流测量采样速率较低,测量值不能反映快速变化真值,二者波形对应也很勉强,很难作对照分析,本文仅分析一些特殊点)。表 1 是各次闪击的有关特征参数。

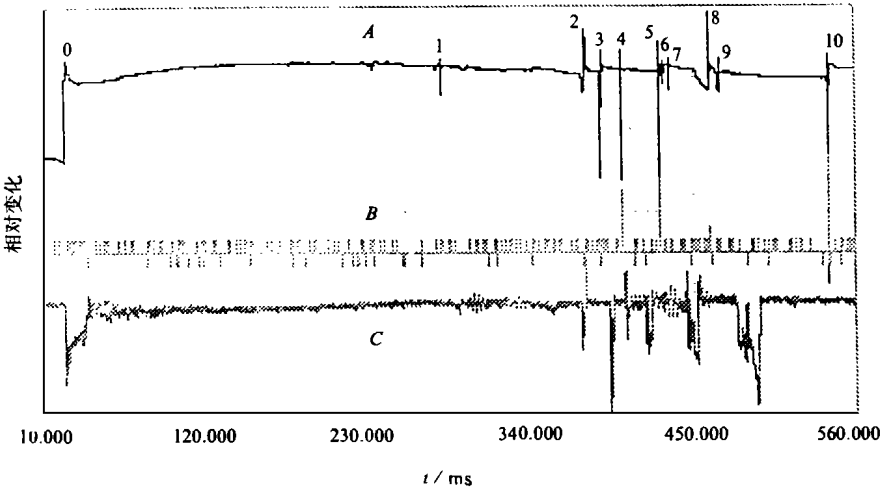


图 1 人工触发闪电波形

A 为电场变化, B 为辐射, C 为电流; 图中数字表示回击序号, “0”表示回击前先导过程
Fig. 1 Variation of triggered lightning flashes wave (July 8 1996 in Shigang, Nanchang),
 A : electric field change, B : radiation, C : electric current. The number is ordinal of the
return stroke. “0” is leader

表 1 一次人工触发闪电的特征参数(1996 年 7 月 8 日)

Table 1 Characteristic parameters of triggered lightning flashes (July 8 1996)

回击序号										
0(上行先导)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
回击电场 变化 ΔE (相对值)	10V	3.55V	5.91V	12.20V	12.66V	13.24V	1.3V	1.69V	7.85V	2.63V 21.88
相邻闪击 间隔/ms	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
辐射	无	无	有	无	有	有	无	无	无	有

从表 1 可见,火箭开始触发上行正先导到发生第一次回击历时约 256ms,维持了一段很长时间的连续电流过程,且电流有较大波动,上行正先导电流峰值在 5kA 以上。此后减小为连续电流,维持到激发第一次回击。这是一次典型的人工触发闪电第一次回击波

型, 产生的电场变化 ΔE 不大且小于上行先导。此次闪电共产生 10 次回击, 相邻回击之间的时间间隔相差较大, 例如, 第 1 次和第 2 次回击之间以及第 9 次和第 10 次之间的间隔时间较长, 约为 98.73ms, 而中间几次时间较短, 例如 5~6 和 6~7 仅 2.6ms 和 4.9ms。相应较短的间隔时间伴随产生较弱的回击(回击 6, 7, 9)。

从图 1 可见, 并不是所有回击都能产生辐射。对于自然地闪, 回击辐射主频为 1~20kHz, 峰值在 10kHz 附近, 高频部分主要出现在首次回击且多出现在回击后 30 μ s 处^[6]。图 1 辐射用场强计接收, 频率较高(10MHz), 第一次回击和强度较大的回击都没有接收到高频辐射。由于回击产生的辐射强度与通道中电流变率 dI/dt 成正相关, 这意味着 dI/dt 产生的高频辐射很弱, 其辐射主频在 kHz 附近。MHz 以上的辐射主要与放电击穿过程有关。回击 2, 4, 5, 10 接收到高频辐射, 尤其是回击 10, 高频辐射很强, 也就是说在这些回击之后, 通道顶端会发生较强的击穿放电过程。从上述分析可得到如下概念: MHz 以上的高频辐射通常和脉冲式放电击穿过程有关, 继后回击之后在原通道的云内部分有可能产生较强的击穿过程。

2 首次回击前的放电结构

2.1 “双向先导”传输

图 2 是导线接地和尼龙线接地空中触发两种人工触发闪电的地面电场变化。图中 *a* 是火箭上升阶段, 两种触发地面电场变化相反。随着火箭上升尖端产生电晕放电, 正离子通过持续击穿和电导向上输送, 负离子沿导线向下传输。对于地面触发, 负电流稳恒入地, 对地面电场影响小, 电场主要受上行正离子作用而增大; 对于空中触发, 下行负电荷被堆积在尼龙线上端(离地 30m 高度)而无法入地, 形成较高负电荷浓度, 其作用大于上行正离子而使地面电场减小。图中 *b* 是 先导放电阶段, 两种触发的电场变化相同即都急剧增加。这说明电场主要都受上行流光作用, 且此时尼龙线上端负电荷堆积已消失, 即已产生下行负先导和地导通。

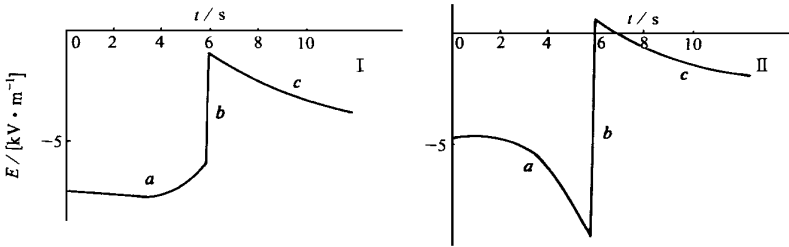


图 2 两次人工触发闪电地面电场变化

a 表示火箭上升阶段, *b* 表示先导阶段, *c* 表示连续电流阶段; I 地面触发 II 空中触发

Fig. 2 Variation of the ground electric field caused by triggered lightning flashes (July 8 1996 in Shigang Nanchang), *a*: stage of rocket lifting, *b*: stage of the leader, *c*: stage of the continuous current. I: The ground-triggering, II: the altitude-triggering

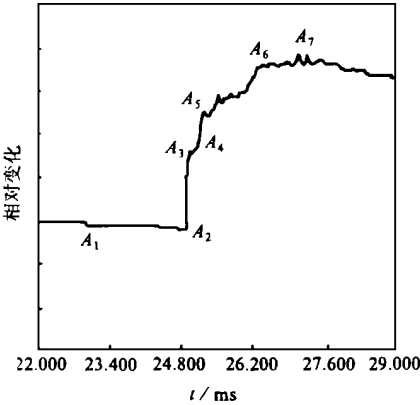


图 3 先导电场变化波形
记录仪时间常数 10s, 采样率为
10⁴s, 其它说明同图 1

Fig. 3 Case as Fig. 1, wave of
enlarged leader electric field change

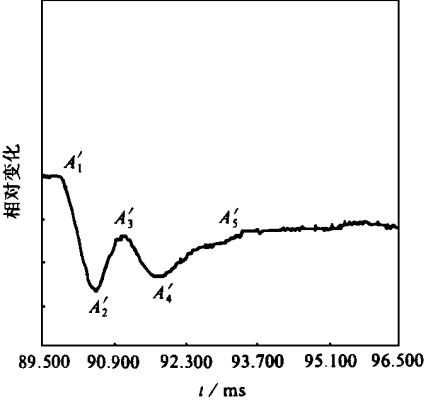


图 4 先导电流波形
同轴分压器测量, 记录仪频响
625Hz, 其它说明同图 1

Fig. 4 Case as Fig. 1, wave of
enlarged leader electric current

图 3 和图 4 是先导过程电场变化 ΔE 和相应通道电流 I 波形(相应于图 1 中“0”标号放大)。这是一次空中触发, 易见 ΔE 为正值, 表示受上行正先导作用(对于地面触发情况同^[7]), 随着正流光向上传输, 负电荷初始沉积于击穿点后部, 以增大局地负电位而维持流光持续传输, 此后沿着导线向下运动, 并在尼龙线上端被阻而累积, 随着上行先导发展, 负电荷累积增加且很快触发下行负流光。因维持正流光持续传输的电场($6 \times 10^5 \text{ V/m}$)低于负流光($3 \times 10^6 \text{ V/m}$), 且上行正流光触发点接近云体而环境电场相应较高, 因此, 上述先导过程中首先出现上行正先导, 接着又被触发下行负先导, 具有“双向先导”传输特点。此特征从图 3 分析可以得到证实。图 3 $A_1 \sim A_2$ 段是预击穿过程, A_2 是上行正先导初始触发点, $A_2 \sim A_3$ 段是其发展阶段, ΔE 为急剧正变化, $A_3 \sim A_4$ 段电场变化突然变平缓(约持续 0.19ms), 而 $A_4 \sim A_5$ 段又恢复快速电场正变化。作者认为此变化平缓段是下行负先导叠加作用的结果。即在 A_3 点(上行正先导开始出现 0.08ms 后, 若加上行先导出现前的预击穿过程, 即图 3 中 $A_1 \sim A_2$ 段则断(2.2ms)出现了下行负先导, 由于负电荷向下击穿传输而减弱了上行正先导对地面电场的作用, 从而使 ΔE 变平缓。 A_4 点是下行先导流光与大地连接点, 此后负电流畅通, 对电场影响减小, A_4 之后电场主要受上行先导作用故又快速增加。上述电场变化反映了“双向先导”的传输特点。此外还有下列佐证: (1) 尼龙线长度为 30m, 下行负先导传输时间为 0.19ms, 得到初始负先导传输速度为 $1.6 \times 10^5 \text{ m/s}$, 与 Shao 等^[4] 干涉仪测量结果($2 \times 10^5 \text{ m/s}$)基本一致。(2) $A_2 \sim A_3$ 段为 0.08ms, 上行传输距离约为 13m, 虽然先导尚未入云, 但基本上是垂直向上传输而水平分岔很小, 所以 $A_3 \sim A_4$ 段 ΔE 平缓不会是通道分岔所致。而 A_4 点以后 ΔE 在某些时段内的平缓变化可能是通道水平分岔所致。(3) 阶梯先导间隔通常为 $5 \sim 20 \mu\text{s}$ ^[9], 而 $A_3 \sim A_4$ 段约 $190 \mu\text{s}$, 所以不是阶梯变化, 且正先导较多为连续传输, 而较少阶梯变化^[6]。(4) 图 5 是利用高速摄影(1000F/s)得到通道接地时刻的亮度分布和相应照片^[8]。由图可见, 在 18m

高度处通道出现下行分岔,即存在下行先导。对于地面触发,观测不到通道分岔的结构。

上述分析得到以下结论:在人工触发闪电先导传输阶段,地面电场变化主要取决于上行正先导流光的作用。空中触发具有“双向先导”传输特征,即在上行先导出出现后不久(本例为0.08ms)伴随产生下行负先导。地面触发未发现“双向先导”^[8]。这两类触发没有观测到Mazur等^[3]提出的“双向先导”结构,即由于上行先导的分岔,屏蔽使通道下端电流被截止,从而产生反极性下行先导。事实上在上行先导入云前很少会出现分岔。本文提出的“双向先导”是出现在导线汽化前即先导初始阶段。

2.2 电场变化和通道电流结构

由于电场和电流测量非同步,所以只能从二者波形特点寻找对应点。图3中A₄是下行负先导接地点,此时测量到通道电流,故A₄和图4中A₁相对应。随着上行先导发展,先导电流很快增加(A₁~A₂段约为0.66ms),其中A₂~A₃电流减小段作者认为是导线汽化增大通道电阻之故,A₂是导线汽化点(滞后上行先导起始时间为0.93ms),即上行先导传输约

186m时导线就被汽化(取先导速度 $2\times 10^5\text{m/s}$),此时下行先导已接地且上行先导尚未入云。从实测导线被烧断的余线长度,确定出汽化高度为430m,即火箭上升到244m时尖端出现上行流光。图5是下行先导接地时刻通道亮度的垂直分布,下行先导被触发是在30m高度处,该高度以上通道亮度大于以下通道,说明该高度以上导线已汽化。这是汽化通道阻抗大于下部击穿通道阻抗之故。从图还可见,通道亮度分布很不均匀,意味着先导瞬刻通道电流分布不均匀性。在90m高度以上亮度很小,90m高度以下亮度随高度降低而增加,且延伸到30m高度处。我们知道,30m高度以上为汽化通道,其阻抗基本相同,亮度差别说明下部通道发生放电过程,且越接近30m高度放电也越大。作者认为上述光度分布不均匀结构恰恰说明了下行先导的作用,即随着下行负流光被激发传输,雪崩正离子高速向上运动,中和通道中的沉积负离子,因放电而发光,且随高度增加而减弱,当先导接地后通道电流分布逐渐趋于均匀。

对照图3和图4,电流增长阶段(A₁~A₄)和上行先导电场增长阶段(A₄~A₇)时间上相当,约为1.8ms。此后两者都逐渐减弱,而电场变化出现两个正性脉冲(图3中A₇附近),持续时间分别为0.17ms和0.14ms。若取先导速度为 $2\times 10^5\text{m/s}$ ^[6],则A₄~A₇段先导传输距离为360m,若加上A₂~A₄初始先导段并考虑为垂直传输,则先导上升高度可达595m,加上触发点高度先导可发展到860m,已进入云区。因此,两个正性脉冲是先

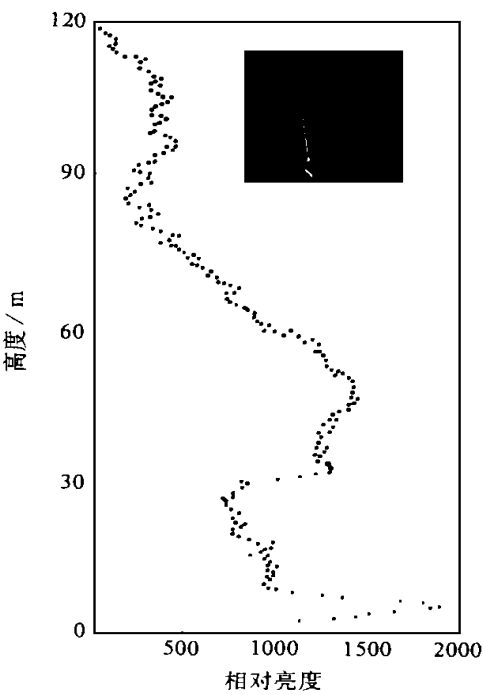


图5 引雷通道照片和亮度垂直分布
本照片为通道接地时刻,速率1 000F/s
Fig. 5 Luminosity height and its time evolution of triggered lightning flashes at channel grounded

导在云内发生的正性放电。

2.3 人工触发闪电分类

文献[2, 6]将人工触发闪电波形分为四种类型:

(1) 经典 A 型为最常见波形, 触发上行先导并连接形成连续电流, 持续一段时间后触发直窜先导并形成回击, 类似于自然闪电的继后回击。

(2) 经典慢“S”型: 仅触发上行流光和连续电流, 无直窜先导, 也不产生回击。

(3) 异常 B 型: 触发上行流光后直接形成回击, 无连续电流, 类似于自然闪电的首次回击。

(4) 假经典 PC 型: 类似于异常 B 型, 两者波形较难区分。

Hubert 等^[2]对于上述分类的解释: 认为经典 A 和 S 型是火箭连接金属线汽化后电流并不中断, 仍然维持连续电流流动。此后, 或发展直窜先导并形成回击(A 型), 或最后电流终止无回击(S 型)。对于异常 B 和 PC 型, 是导线汽化后通道电流迅速降到零, 此后云中激发下行先导产生回击。若用铜线, 由于其电导率高, 流过的电流大, 所以在铜线汽化后电流仍可在汽化通道中维持而不会被“截止”。A 或 S 型若用钢线, 因其电导率低, 流过的电流小, 可能会被“截止”, 产生异常 B 型。以上情况表明触发闪电类型似乎取决于接地导线的种类。

本文触发个例为经典 A 型, 连续电流持续时间约为 256ms。此后触发直窜先导形成回击(图 1), 由前面分析可知, 在上行先导被激发 0.93ms 后导线已汽化, 此时先导尚未入云, 无连续电流, 但测量到较大先导电流约为 5kA。这说明即使导线已汽化, 汽化通道仍有电导, 可以维持电流流动, 只是使电流减小(图 4, $A_2 \sim A_3$ 段), 而不会等于零, 且随着先导发展汽化通道电流增加。本次触发试验的连接导线为钢丝, 1992~1996 年内共触发成功 13 次, 其中只有一次是异常 B 型, 其它都是 A 或 S 型, 1989~1991 年触发成功 12 次。也全部采用钢线, 都是 S 型。因此作者认为, 导线汽化后通道电流不会迅速降到零, 触发类型与导线种类无关, 而是取决于云中电结构。

图 6 是一次地面触发经典“S”型触发的电场和电流波形, 没有形成回击, AB 段是预击穿阶段, BC 段是上行先导(与电流记录 $A'B'$ 和 $B'C'$ 段对应), 其上升时间约为 2ms, 实测导线汽化高度为 220m。

作者认为人工触发闪电类型仅与云中电荷强度及分布有关, 与导线种类及汽化特性无关。根据放电特性可分为以下几类:

(1) 先导入云处是强电荷区。先导顶端处相对“正电位”使云中负电荷流向通道而形成连续电流, 其持续时间取决于云中电荷分布。此后连续电流渐趋于零, 进入无电流阶段, 该阶段是产生直窜先导的重要条件, 它意味着原通道在近地面附近因负电荷堆积而使电流截止(另文介绍)。促使负电荷能持续汇聚在通道附近, 随着负电位提高会激发负击穿沿汽化通道向下传输而形成直窜先导, 接地并形成回击, 类似于自然闪电继后回击, 这就是经典 A 型。

(2) 先导入云处是弱电荷区。形成不强的连续电流且逐渐趋于零, 此后虽然原通道在地面附近已被截止, 但云中已无足够的负电荷向通道汇聚, 通道顶端无法产生高电位而触发直窜先导, 是经典 S 型。

(3) 先导入云处是高强电荷区。因通道顶端“正电位”很高, 其底部很快被截止使连

续电流趋于零, 负电荷累积形成高电位, 从而产生下行先导并形成回击, 即 B 或 PC 型。

(4) 先导入云处是很弱的电荷区。先导未入云或入云后不久即熄灭, 触发失败。

我国北方雷暴较弱, 人工触发闪电都为经典 S 型^[9], 南方雷暴强度大, 多为经典 A 型^[10], 但也有经典 S 型个例(图 6)。此外, 北方通常是触发正闪即是上行负流光, 而南方是负闪即为上行正流光。前者是云中正电荷向通道汇聚, 后者是云中负电荷汇聚。因维持负流光传输电场比正流光约高一个量级, 因此, 北方雷暴多触发经典 S 型。

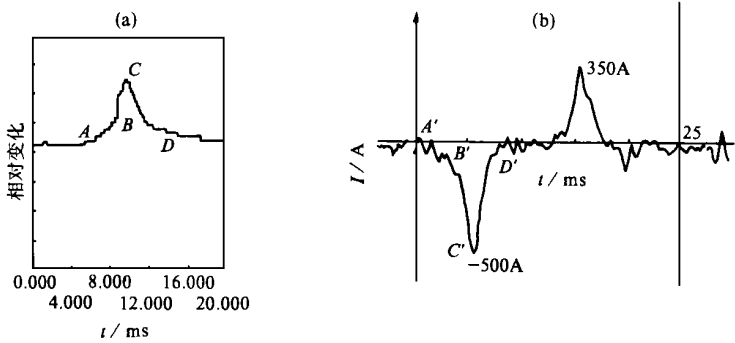


图 6 1995 年 8 月 20 日火箭触发先导电场变化(a)和电流波形(b)
Fig. 6 Variation of triggered lightning flashes wave (August 20 1995
in Nanhui, Shanghai), a: electric field change, b: electric current

2.4 正性击穿

干涉仪观测发现^[4], 自然负地闪回击后, 由于通道顶端的正电位, 除了发生正常的连续电流过程外, 当正电位很高时(相对于云中负电荷区)能产生快速正性击穿且伴随产生回击, 一般滞后于回击约 2ms, 流光速度高达 10^7 m/s, 且常伴有很强的负性反跳流光。既然人工触发闪电第一次回击相当于自然继后回击, 那么其先导后期是否也有正性击穿?

Shao 等^[4]从干涉仪和电场变化观测发现, 放电击穿通道干涉信号和电场脉冲有很好的对应关系, 即观测到电场脉冲必然伴有通道干涉仪信号, 亦即电场脉冲必然与某种击穿放电相联系。所以我们虽无干涉仪信号观测, 但可用电场脉冲信号来讨论击穿过程。

图 3 中在上行先导激发后约 2ms (A_7 点附近) 出现两个正脉冲, 幅度不大, 持续时间分别为 0.17ms 和 0.14ms。由于电流测量取样速率低, 故在图 5 中无反映, 但在高速摄像通道亮度变化中有反映^[8]。显然这不是 Shao 等指出发生在回击之后的正性快速击穿, 而是上行正先导电荷在云中传输途中遇到负电荷团发生的放电, 且不伴随产生负性反跳流光(图中无反相脉冲), 这是一种“正性慢击穿”, 作者认为这也是一种“M”分量, 但通道电流增加不多, 而伴有较长连续电流, 持续时间长达 256ms。这是由于先导输送和累积的正电荷量远小于回击, 很难在通道顶端产生高电位而触发“正性快速击穿”。我们在触发成功的 11 次负地闪中, 没有在第一次回击前观测到正性快速击穿, 只观测到上述“正性慢击穿”。所以就放电特性而言, 人工触发闪电第一次回击和自然继后回击之间还存在差别, 其根本原因是先导和回击输送电荷量差距太大, 从而会引起不同的放电过程。自然闪电回击后能产生快速正性击穿, 且能激发回击, 而长于 40ms 的长连续电流过程较少见^[6]。但人工触发闪电先导后期只观测到慢正性击穿, 不能激发回击, 且伴有较长的连续电流阶

段。本例达到 256ms, 此后的闪击之间连续电流持续时间较短(表 1)。表 2 为另一次人工触发负闪连续电流时间, 共产生 5 次回击, 第一次回击前连续电流长达 550ms, 此后短些, 但比表 1 中的都长。这一地区未形成回击。

表 2 人工触发负地闪连续电流时间(1995 年 8 月 20 日, 上海)
Table 2 Time of continuous for triggered lightning flashes (August 20 1995 in shanghai)

回击序号	0(先导)	1	2	3	4	5
连续电流时间	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	—
/ ms	550	150	35	85	180	

图 6 电流波形中出现一个较大正电流脉冲(峰值约为 350A), 而电场无相应变化。摄像记录发现通道在云底附近出现明显分岔^[10], 这意味着云内分岔更多。所以除了上行先导作用外, 分岔中的正电荷对其以下通道的屏蔽作用也是一个因素, 它减弱了环境负电场从而使主通道中电流减小。随着屏蔽作用的加强, 主通道下部会出现电流“截止点”, 且会逐步累积负电荷, 其结果将吸引分岔中正电荷沿主通道入地, 即测量到正电流脉冲, 峰值可达 350A。由于“截止点”附近累积的负电荷对地面电场的作用与通道正电荷作用相反, 从而使地面电场变化很小。此后随着分岔中电荷不断被中和而减弱并趋于零。

图 6 个例指出, 对于地面, 上行先导的分岔和屏蔽作用可以在通道下部产生电流截止点, 但不一定能触发下行负先导, 是否触发取决于云中电荷强度, 但至少为“双向先导”传输提供了可能性。

3 结 论

本文利用人工触发闪电的电场变化、电流和通道亮度高速摄像测量资料, 分析了第一次回击前先导过程的放电特征, 得到以下结论:

- (1) 对于空中触发, 先导传输具有“双向先导”特征, 即在上行正先导触发后不久, 伴随会产生下行负先导传输。
- (2) 首次讨论了人工触发回击前先导通道中电流分布不均匀性, 指出这是导线汽化和存在下行先导的结果。
- (3) 对 Hubert 等的人工触发闪电分类及其原因提出了看法, 指出无论哪种类型, 导线汽化都发生在上行先导阶段。触发类型仅与云中电结构有关, 而与导线种类无关。指出异常 B 或 PC 型其第一次放电特征也类似于自然闪电的继后回击, 而不是首次回击。
- (4) 人工触发闪电第一次回击前的放电特征和自然闪电继后回击仍有差别, 前者有较长的连续电流阶段且伴有慢性正击穿放电, 后者常发生快速正性击穿且连续电流时间较短。

致谢: 在分析中得到刘欣生, 王才伟, 张义军, 董万胜, 肖庆复的帮助, 张翠华输入了全文, 特此致谢。

参考文献

1 Newman M M, J R Stahman, J D Robb, et al. Triggered lightning strokes at very close range. *J Geophys Res*, 1967, 72: 4761 ~ 4764

2 Hubert P, P Laroche, A Eybert-Berard, et al. Triggered lightning in New Mexico. *J Geophys Res*, 1984, 89: 2511 ~ 2521

3 Mazur V, L H Ruwnke. Common physical processes in natural and artificially triggered lightning. *J Geophys Res*, 1993, 98: 12913 ~ 12930

4 Shao X M, P R Krehbiel, R J Thomas, et al. Radio interferometric observations of cloud — to — ground lightning phenomena in Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100: 2749 ~ 2783

5 Fisher R J, G H Schnetzer, R Thottappillil, et al. Parameters of triggered — lightning flashes in Florida and Alabama. *J Geophys Res*, 1993, 98: 22887 ~ 22902

6 Uman M A. *The Lightning Discharge*. Orlando, Florida: Academic Press, 1987. 110 ~ 141

7 刘欣生, 郭昌明, 肖庆复等. 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

8 王才伟, 张义军, 肖庆复等. 空中触发闪电的下行先导及其接地行为. *高原气象*, 1998, 17(1): 24 ~ 33

9 张义军, 言穆弘, 王才伟等. 人工触发闪电条件和对雷暴特征的可能影响. *高原气象*, 1992, 11(2): 178 ~ 185

10 张义军, 刘欣生. 南方人工触发闪电试验及电流特性分析. *中国电机工程学报* (待发表)

THE ANALYSIS OF THE DISCHARGING
PROCESSES OF TRIGGERED LIGHTNING FLASHES

I. LEADER PROCESSES

YAN Mu — hong

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract In this paper, the characteristics of leader discharge of artificially triggered lightning flashes were analysed by use of electrical field, current data, and digital photographic obtained with a high — speed CCD camera system (frame rate 1 000F/s). The results show that a bi — directional leader process initiated from both ends of altitude wire was observed for the so — called altitude — triggering. Because the development of the downward moving leader the channel electric current was non — uniformity. The metal channel — vaporized develop during the upward moving leader. The first return stroke of the artificially triggered lightning flashes are much the same as the subsequent return stroke of the natural lightning, but the both the discharge characteristic have some difference and the former was longer time of the continuous current process.

Key words Triggered lightning flashes Bi — directional leader