

钱勇,张阳,张义军,等. 人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟. 应用气象学报,2016,27(6):716-724.
doi:10.11898/1001-7313.20160608

人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟

钱勇¹⁾²⁾³⁾ 张阳¹⁾³⁾* 张义军¹⁾³⁾ 陈绿文⁴⁾ 吕伟涛¹⁾³⁾
郑栋¹⁾³⁾ 陈绍东³⁾⁴⁾ 颜旭³⁾⁴⁾ 徐良韬¹⁾³⁾

¹⁾(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)

²⁾(新疆防雷减灾中心,乌鲁木齐 830001) ³⁾(广州野外雷电试验基地,广州 510080)

⁴⁾(广东省防雷中心,广州 510080)

摘 要

2010—2014 年夏季广州野外雷电试验基地采用了两种引雷火箭开展人工引雷试验,通过对 25 次经典人工触发闪电电流资料的分析,进一步证实了当火箭携带铜线时先驱电流脉冲(precursor current pulse)为双极性振荡型,火箭携带钢丝时先驱电流脉冲为单极性,其中单极性脉冲电流峰值、10%~90% 上升时间、波形宽度和转移电荷量的几何平均值分别为 26 A, 0.33 μ s, 2.3 μ s, 27 μ C, 双极性脉冲相应的波形参数几何平均值分别为 67 A, 0.24 μ s, 2.1 μ s, 54 μ C. 双极性脉冲电流峰值的几何平均值接近是单极性的 2.6 倍,而波形持续时间和上升时间的几何平均值与单极性相近. 利用传输线模型,模拟铜线通道底部电流波形呈双极性振荡型,而钢丝通道底部电流波形呈单极性,这与实际测量的结果比较一致,推测这两种电流波形可能是传输线特性阻抗不同所导致,在传输线顶端由先导起始放电产生的电流脉冲应为单极性.

关键词: 人工触发闪电; 先驱脉冲; 特征参数; 模拟

引 言

初始击穿、先导、回击是地闪的重要放电特征,被长期研究和关注^[1]. 无论下行负地闪还是上行正地闪,均存在上行先导过程,其始发与传输过程是决定闪电能够成功发展、回击可能位置的主要因素,已经成为人们研究的重点问题^[2]. 由于自然正地闪的发生比例仅约占总地闪的 10%,而对于负地闪上行连接正先导是伴随着负先导而发生,相对于负先导而言上行正先导的发光强度、甚高频和超高频辐射相对较弱,对其辐射源的探测和定位也相对较难,所以对于正先导的研究结果,明显要少于负先导^[3-4]. 虽然对上行正先导的理论研究在一定程度上可依据实验室长间隙火花放电试验,但真实情况研究只能

依赖于高建筑物闪电和人工触发闪电的观测^[5].

人工触发闪电上行先导的起始过程是随着火箭及导线快速向上移动,导线顶端的局部电场强度逐渐增大,达到一定强度时产生电晕放电,此时在导线底部可以观测到不连续的电流脉冲信号,火箭继续上升到一定高度后,这些脉冲电流会逐渐过渡为连续电流且电流会连续增大到几十安培,甚至几百安培,此时的电流对应于连续上行先导的产生^[6-7]. 由于人工触发闪电具有发生位置和时间的可控性,以及各种物理参量便于测量的优势,已成为研究上行先导的重要手段^[8].

通过人工触发闪电试验观测,发现在稳定上行先导形成之前,电流波形通常以单个脉冲或脉冲簇的形式表现出来,被称为先驱电流脉冲^[9](precursor current pulse). 这些电流脉冲的幅值范围为 0.1~

2016-04-30 收到,2016-07-18 收到再改稿.

资助项目:国家自然科学基金项目(41205002,61327810),国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441406,2014CB441405),中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2015Z006,2013Z006)

* 通信作者, email: zhangyang@camscma.cn

100 A, 单个脉冲间的间隔为几十毫秒, 脉冲簇内脉冲间隔约几十微秒^[10]。Willett 等^[9]认为在稳定先导形成之前这些电流脉冲是由企图先导(attempted upward leader)产生的, 并根据先驱电流脉冲的时间间隔, 推测了企图先导的发展速度和长度。Biagi 等^[11]通过高速摄像观测到了金属线顶部与电流脉冲相对应的发光通道, 证实了这些电流脉冲是由企图先导产生的, 在距离地平面 128 m 和 158 m 时, 企图先导通道的长度分别是 1.5 m 和 8 m。

先驱电流脉冲是研究上行先导在起始阶段放电特征的重要参考依据, 是模式输入的重要初始参量。近年来, 国内外学者对于先驱电流脉冲的研究越来越多。但是国外报道的先驱电流脉冲为双极性^[12-14], 而 Jiang 等^[15]在中国山东观测的先驱电流脉冲为单极性的, 他们认为出现双极性情况是由于电流脉冲在金属线的两端因电阻率的突变而发生反射并进一步形成信号的叠加导致, 真正由一个先导梯级产生的电流脉冲可能是单极性的, 但并未给出论证依据^[3]。而本文在广州野外雷电试验基地采用了两种引雷火箭, 并同时观测到了单极性和双极性

两种类型的先驱电流脉冲, 根据通道底部的电流资料, 本文将对分析两种电流波形的特征参数, 并利用传输线模型分别模拟不同传输线底部的电流波形, 进一步推测这两种电流波形产生的原因。

1 试验观测和资料处理

广州野外雷电试验基地位于广州市从化区, 中国气象科学研究院自 2006 年开始, 每年 5—8 月在试验基地开展人工触发闪电的综合观测试验(详细描述见文献[16-17])。电流测量所采用的方法如图 1 所示, 试验中电流经过安装在引雷杆下面的同轴分流器(阻值为 1 mΩ, 带宽 DC-200 MHz)流入大地。为了兼顾不同强度放电过程的高垂直分辨率测量, 前端数字化仪采用大小两个不同量程的设置, 大量程通道设置为 ±50 kA, 小量程通道设置为 ±2 kA。同轴分流器下端所连接的接地系统为边长 10 m×10 m 的金属地网, 埋地深度为 1 m, 整个接地电阻是 6.7 Ω^[18-19]。

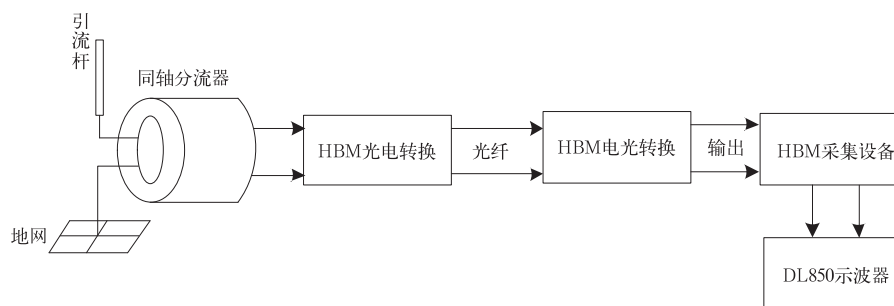


图 1 人工触发闪电电流测量示意图

Fig. 1 Artificially triggered lightning current measurement schematic

本文采用 2010—2014 年夏季在引雷试验场成功触发的 25 次经典人工触发闪电的电流资料, 触发火箭携带的金属线有铜丝和钢丝两种类型, 其中携带钢丝的火箭是我国自主研发的新型人工引雷专用火箭, 火箭由箭体、回收装置、尾翼、钢丝线轴及金属导线(Φ 为 0.2 mm)5 部分构成(详细描述见文献[20])。携带铜线的火箭从美国购进, 火箭的箭体是纸质的, 尾部携带的细铜线直径是 0.2 mm(详细描述见文献[12]), 并且所有触发闪电都为负极性闪电。考虑到先驱电流脉冲的幅度较小, 一般在几十安培量级, 小量程的电流数据被使用。

2 结果分析

2.1 先驱脉冲电流波形分类

根据人工触发闪电通道底部电流资料, 火箭携带铜线时触发的闪电先驱电流脉冲为双极性振荡型(如图 2 所示), 火箭携带钢丝时触发的闪电先驱电流脉冲为单极性(如图 3 所示)。两种火箭触发过程中, 先驱电流脉冲均会以单个脉冲或脉冲簇的形式出现, 单个脉冲时间间隔为几十毫秒。脉冲簇一般由 2~6 个单脉冲组成, 脉冲簇内的脉冲间隔为 11

~49 μs。随着火箭上升,单极性脉冲电流波形持续时间逐渐变大,而双极性脉冲电流波形的振荡时间逐渐增加。

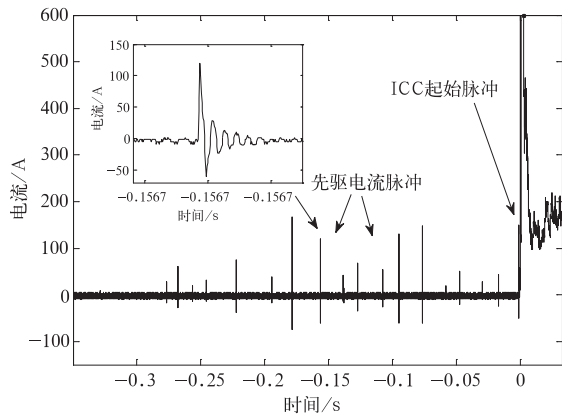


图 2 双极性先驱电流脉冲
Fig. 2 Bipolar precursor current pulse

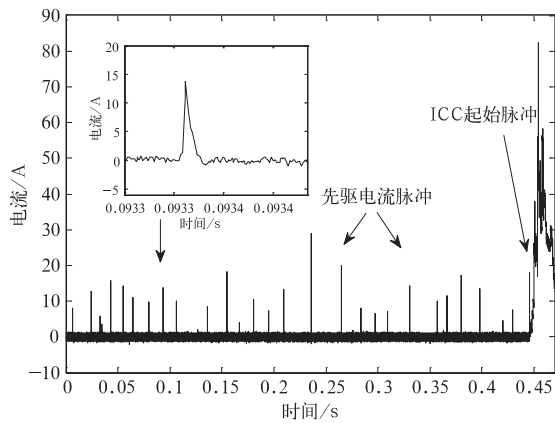


图 3 单极性先驱电流脉冲
Fig. 3 Unipolar precursor current pulse

2.2 先驱脉冲电流波形特征参数

2.2.1 单极性先驱脉冲电流波形参数

2012—2014 年 18 次人工触发闪电由携带钢丝的火箭触发,根据通道底部的电流资料,本文提取了

218 个单极性脉冲的波形参数。提取的电流波形参数包括峰值电流 (I_p)、波形宽度 (T_w)、半峰值宽度 (T_{HPW})、10%~90% 上升时间 (T_{10})、10%~90% 波形陡度 (S_{10})、转移电荷量 (Q),相应参数的定义说明见图 4,其中转移电荷量根据电流波形与时间的积分得出^[21-22]。

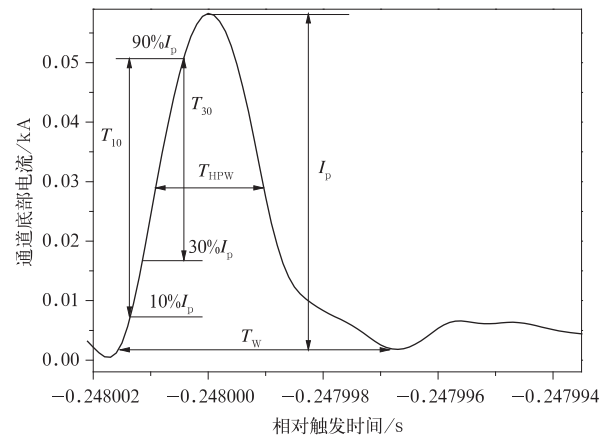


图 4 电流脉冲参数定义
Fig. 4 Parameters of the current pulse

表 1 给出了单极性脉冲参数的统计结果。单极性脉冲电流峰值范围为 13~131 A,几何平均值为 28 A;10%~90% 上升时间范围为 0.08~1.75 μs,几何平均值为 0.33 μs;10%~90% 波形陡度范围为 0.01~0.64 kA·μs⁻¹,几何平均值为 0.06 kA·μs⁻¹;波形宽度范围为 1.0~4.7 μs,几何平均值为 2.3 μs;转移电荷量范围为 8~69 μC,几何平均值为 27 μC;半峰值宽度范围为 0.16~3.12 μs,几何平均值为 0.73 μs。Jiang 等^[15] 根据中国山东滨州的 4 次人工触发闪电电流资料,得出先驱脉冲电流峰值、10%~90% 上升时间、波形持续时间、转移电荷量的几何平均值分别为 45 A, 0.49 μs, 3.2 μs, 54.8 μC,大于本文结果,这可能是由于其考虑的是连续上行先导起始部分的脉冲,而本文考虑的是上行先导起始之前的先驱电流脉冲。

表 1 人工触发闪电单极性先驱电流脉冲波形参数统计

Table 1 Unipolar precursor current pulse waveform parameters of the artificial triggered lightning

单极性脉冲	I_p/A	$T_{10}/\mu s$	$S_{10}/(kA \cdot \mu s^{-1})$	$T_w/\mu s$	$Q/\mu C$	$T_{HPW}/\mu s$
算术平均值	28	0.39	0.08	2.4	30	0.81
几何平均值	26	0.33	0.06	2.3	27	0.73
标准偏差	13	0.25	0.07	0.7	12	0.38
最大值	131	1.75	0.64	4.7	69	3.12
最小值	13	0.08	0.01	1.0	8	0.16
中值	24	0.32	0.06	2.4	29	0.75

2.2.2 双极性先驱脉冲电流波形参数

2010—2011 年 7 次人工触发闪电由携带铜线的火箭触发,根据通道底部的电流资料,提取 78 个双极性脉冲第 1 个峰值的波形参数,提取的波形参数定义和单极性脉冲相同。表 2 是双极性脉冲电流波形参数统计结果。双极性脉冲的电流峰值范围为 22~201 A,几何平均值为 67 A;10%~90%上升时

间范围为 0.07~1.28 μs ,几何平均值为 0.24 μs ; 10%~90%波形陡度范围为 0.02~1.68 $\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$,几何平均值为 0.25 μs ;波形宽度范围为 0.8~5.4 μs ,几何平均值为 2.1 μs ;转移电荷量范围为 13~302 μC ,几何平均值为 54 μC ;半峰值宽度范围为 0.15~2.35 μs ,几何平均值为 0.70 μs 。

表 2 人工触发闪电双极性先驱电流脉冲波形参数统计

Table 2 Bipolar precursor current pulse waveform parameters of the artificial triggered lightning

双极性脉冲	I_p/A	$T_{10}/\mu\text{s}$	$S_{10}/(\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	$T_w/\mu\text{s}$	$Q/\mu\text{C}$	$T_{HPW}/\mu\text{s}$
算术平均值	78	0.28	0.55	2.2	73	0.88
几何平均值	67	0.24	0.25	2.1	54	0.70
标准偏差	43	0.22	0.35	0.7	66	0.63
最大值	201	1.28	1.68	5.4	302	2.35
最小值	22	0.07	0.02	0.8	13	0.15
中值	71	0.17	0.30	2.4	52	0.64

2.2.3 两种先驱脉冲波形参数对比

对比表 1 和表 2 发现,双极性脉冲电流峰值的几何平均值接近是单极性脉冲的 2.6 倍,波形陡度

远大于单极性脉冲,而上升时间,波形持续时间和半峰值宽度的几何平均值与单极性脉冲的比较接近。图 5 给出了单极性和双极性脉冲特征参数分布,可

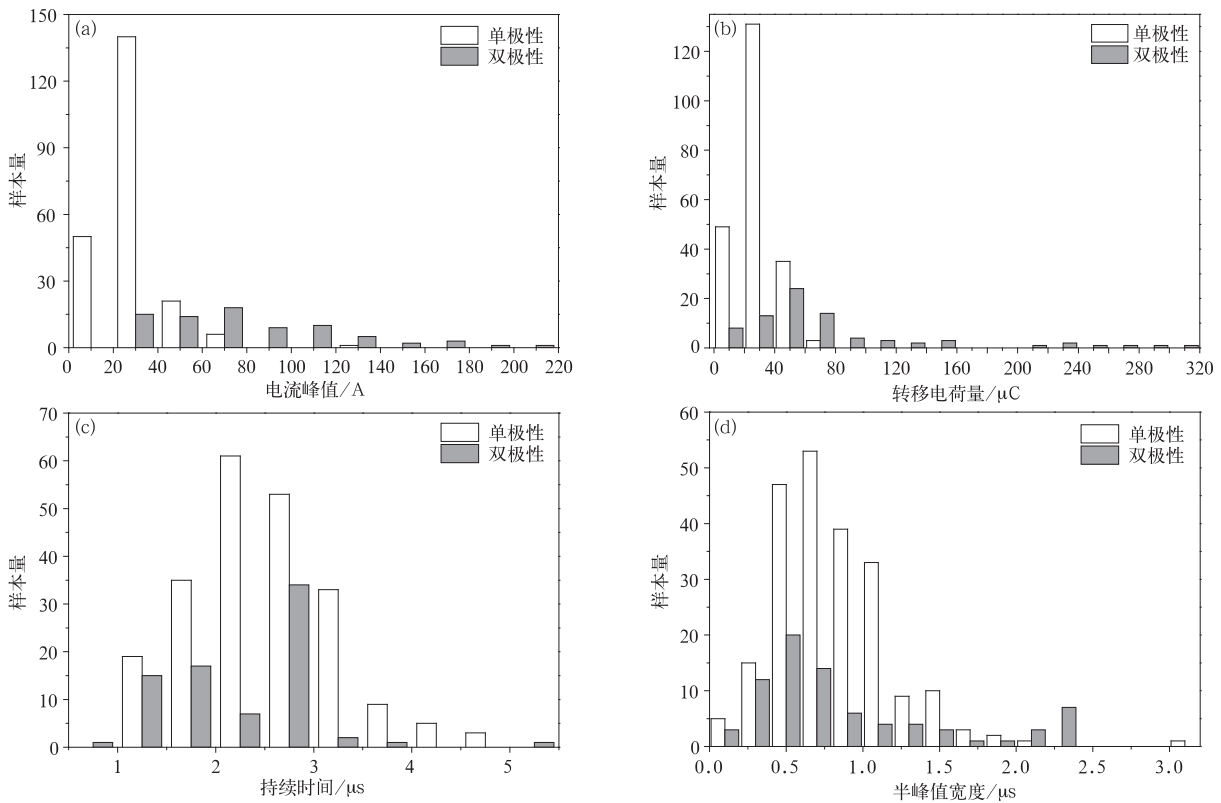
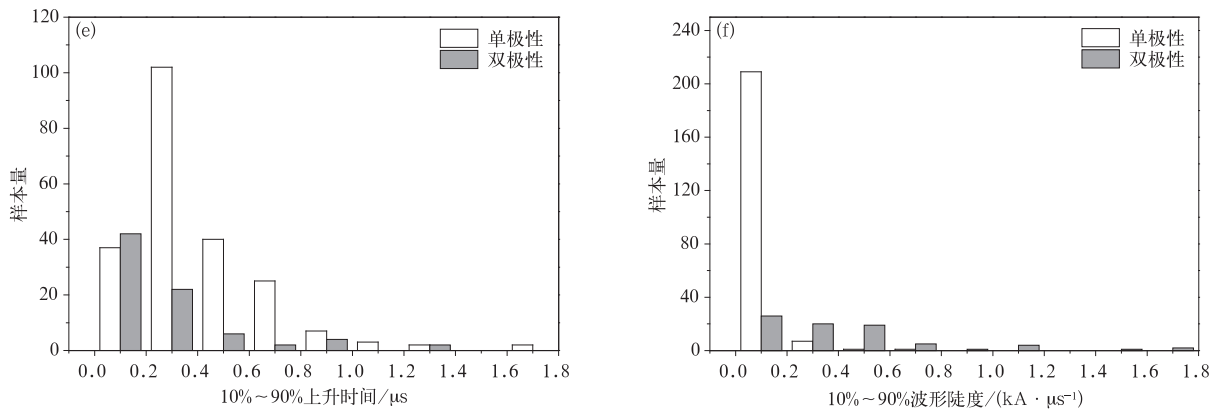


图 5 两种极性的脉冲参数分布 (a)电流峰值,(b)转移电荷量,(c)持续时间,(d)半峰值宽度,(e)10%~90%的上升时间,(f)10%~90%陡度

Fig. 5 Two polarity precursor current pulse parameter distributions (a)peak current,(b)charge transfer,(c)time of duration,(d)half peak width,(e)10%—90% rise time,(f)10%—90% slope



续图 5

以更直观地看出单极性和双极性波形参数分布的关系。由图 5a 和 5b 可以看出,双极性脉冲电流峰值和转移电荷量分别主要分布在 20~80 A 和 20~80 μC ,而单极性脉冲电流峰值和转移电荷量分别主要分布在 10~40 A 和 10~40 μC ,图 5c~图 5f 中双极性脉冲波形的持续时间、半峰值宽度、10%~90%上升时间的分布情况与单极性脉冲相近。

测量得到的电流波形取决于先导发展的特征形态,然而由于测量电流的设备位于金属线的底端,所以在金属线顶端产生的电流信号必然在金属导线中存在一个传输过程,这导致了所测量的电流波形并不是先导起始放电过程的真实呈现^[3]。Biagi 等^[12]推测真正由先导起始放电产生的电流脉冲是单极性的,类似本文给出的单极性脉冲,出现双极性振荡型是由于信号在底部发生反射所致,并认为在通道底部测量的双极性脉冲的第 1 个峰值是由金属线顶端产生的电流脉冲和金属线底端反射的电流脉冲叠加形成的,其电流峰值接近金属线顶端电流峰值的两倍。本文通过统计两种电流波形特征参数,发现双极性脉冲电流峰值接近是单极性的 2.6 倍,与文献^[12]的说法比较接近。谢施君等^[23]通过实验室长间隙放电模拟闪电,测量得到的先驱电流脉冲也为单极性,且先驱脉冲的波形与本研究比较相似,因此,认为在金属线顶端由先导起始放电产生的电流脉冲可能是单极性的,下面通过模拟进一步论证本文对不同脉冲极性的解释。

3 两种先驱电流脉冲波形的模拟

根据传输线模型,本文分别模拟了火箭携带钢

丝和铜线两种情况下通道底部电流波形。模拟中将铜线和钢丝这两种触发线视为均匀传输线,并将它们分割成许多小的微元段 dz 。这样每个微元段可看作由电阻、电容、电感、电导组成的集中参数电路,可以用 Γ 型网络等效,于是整个传输线就可以等效成无穷多个 Γ 型网络的级联。用分布式并联电流源表示上行先导通道,并假设在传输线与先导通道的连接处注入一个电流脉冲 i_0 ,然后在节点处电流脉冲将分别以速度 v 沿着先导通道向上传输,以接近光速 c 沿着传输线向下传输,沿着传输线的电流分布可用下式^[24-25]表示:

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \times \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_t^n \rho_g^n i_0 (h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c}) + \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_0 (h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c})] \times u(t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c}), \text{其中}, 0 \leq z' \leq h. \quad (1)$$

式(1)中, h 为金属线头部距离地面的高度, c 为电流脉冲在金属线中的传播速度, z' 为电流脉冲传输的高度, t 为时间, n 为等效 Γ 网络的个数, ρ_t 和 ρ_g 分别为传输线顶部和底部的反射系数,可用式(3)表示:

$$\rho_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}}, \quad (2)$$

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g}. \quad (3)$$

其中, Z_{ch} 为先导通道的等效特性阻抗, Z_g 为整个接地系统的特性阻抗, Z_t 为传输线的特性阻抗可用式(4)表示:

$$Z_t = \frac{\sqrt{R + j\omega L}}{\sqrt{G + j\omega C}}. \quad (4)$$

其中, R, L, G, C, ω 分别是传输线单位长度上的电阻、电感、电导、电容和角频率。

根据前文中对单极性先驱电流脉冲波形参数的统计分析,模拟中将单极性电流脉冲作为传输线顶端的初始输入脉冲,可用下式表示:

$$i(h, t) = \frac{I_0}{\eta} [e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}], \quad (5)$$

式(5)中, I_0 取电流的峰值 28 A, η 为峰值修正因子取 0.0752, τ_1 和 τ_2 是波尾和波头的时间常数,取 1.81 μs 和 0.59 μs ,波形如图 6 所示。

模式中钢丝的直径是 0.2 mm,单位长度的电阻是 7 Ω/m ,铜线的直径也是 0.2 mm,单位长度的电阻是 0.5 Ω/m 。传输线单位长度的电感、电容可分别由下式求得^[12]:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{2h}{r}\right), \quad (6)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}. \quad (7)$$

其中, μ_0 为自由空间磁导率, ϵ_0 为自由空间介电常

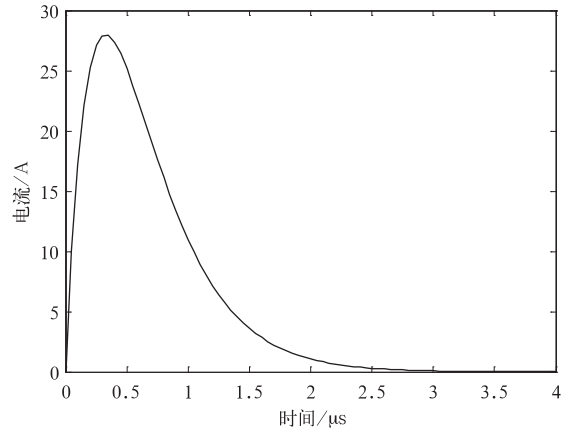


图 6 通道底部单极性电流脉冲
Fig. 6 Channel bottom unipolar current pulse

数, h 为相对地面的高度, r 为传输线的半径,两种传输线所用的是同一个接地系统(10 m \times 10 m 地网,网格 5 m \times 5 m,埋地 1 m)接地电阻为 6.7 Ω 。图 7a 是 0.2 mm 铜线的一个先驱脉冲个例模拟结果,图 7b 是 0.2 mm 钢丝的一个先驱脉冲个例模拟结果,其中红线表示的是传输线顶部注入的初始电流脉

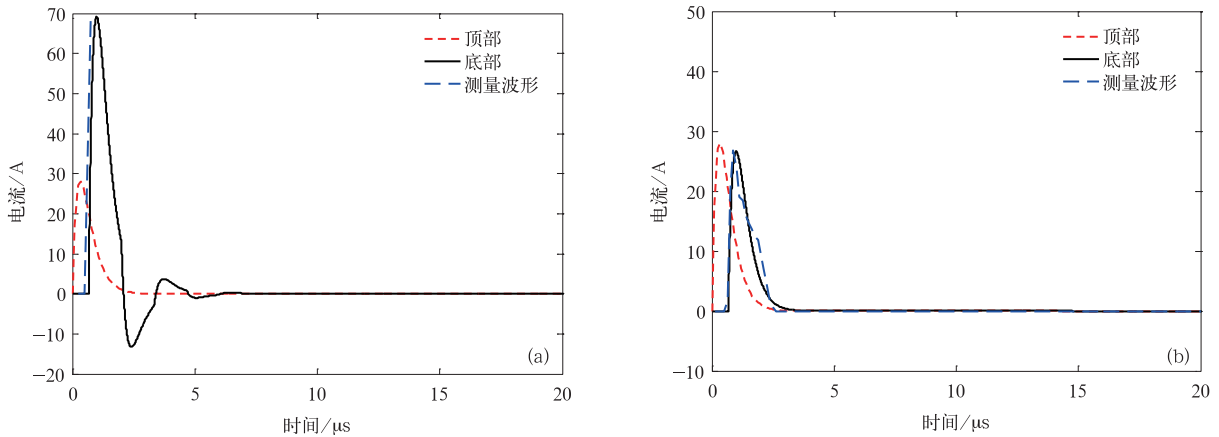


图 7 两种传输线通道底部电流波形的模拟结果

(a)0.2 mm 铜线的模拟结果,(b)0.2 mm 钢丝的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of two kinds of transmission line channel bottom current waveforms

(a)simulation results of 0.2 mm copper wire,(b)simulation results of 0.2 mm steel wire

冲,黑线表示传输线底部的电流波形,蓝线表示通道底部实际测量的电流波形。可以发现,在传输线顶部注入相同的单极性电流脉冲,模拟铜线的通道底部电流呈明显的双极性振荡型,而模拟钢丝的通道底部电流波形呈现出单极性。表 3 是模拟的数值结

果,模拟铜线底部电流波形的第 1 个峰值是 68 A,约是初始输入电流的 2.4 倍,波形持续时间是 1.6 μs ,相比初始电流脉冲偏小。模拟钢丝底部电流波形的峰值是 26 A,波形持续时间是 2.6 μs ,相比初始输入电流脉冲比较接近。

表3 模拟数值结果

Table 3 Simulated numerical results

模拟结果	初始电流	铜线		钢丝	
		测量结果	模拟结果	测量结果	模拟结果
电流峰值/A	28	69	68	25	26
波形持续时间/ μs	2.8	1.8	1.6	2.1	2.6
10%~90%上升时间/ μs	0.2	0.18	0.21	0.19	0.2

4 结论与讨论

2010—2014年夏季广州野外雷电试验基地采用了两种引雷火箭开展人工引雷试验,通过对25次经典人工触发闪电电流资料的分析,得出以下结论:

1) 进一步证实了当火箭携带铜线时触发闪电先驱电流脉冲为双极性振荡型,火箭携带钢丝时先驱电流脉冲为单极性。

2) 单极性脉冲电流峰值、10%~90%上升时间、10%~90%陡度、波形宽度、转移电荷量和半峰值宽度的几何平均值分别为26 A, 0.33 μs , 0.058 $\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 2.3 μs , 27 μC , 0.73 μs , 双极性脉冲相应的波形参数几何平均值为67 A, 0.24 μs , 0.250 $\text{kA} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 2.05 μs , 54 μC , 0.70 μs 。

3) 基于传输线模型,在导线顶部注入相同的单极性电流脉冲,模拟铜线通道底部的电流波形呈双极性振荡型,而模拟钢丝通道底部的电流波形呈单极性,模拟结果和实测结果比较接近。

根据波形参数统计分析,双极性振荡型电流脉冲的第1个峰值可能正如Biagi等^[12]所言,由顶部产生的电流脉冲与底部反射的相同极性的脉冲相互叠加产生,电流信号经过传输线流入接地系统,如果传输线的特性阻抗与接地系统阻抗不匹配,会导致信号在传输线与接地系统的连接点处发生反射,阻抗差别较大,反射现象就会越明显,这样导致了电流的幅值是原来的2.6倍,传输线模拟结果也进一步验证了本文的推测。由于钢丝的特性阻抗与接地系统阻抗比较接近,信号在连接点处反射比较弱,这样在通道底部探测到的电流波形可能更接近于通道顶部电流波形,也意味着在传输线顶端由先导起始放电产生的电流脉冲应为单极性。

致谢:感谢广州野外雷电实验基地、广东省防雷中心、广州市从化区气象局及各科研院所的科研工作者对试验的大力支持。

参考文献

[1] Zhang Y, Zhang Y J, Zheng D, et al. Preliminary breakdown,

following lightning discharge processes and lower positive charge region. *Atmos Res*, 2015, 161-162: 52-56.

- [2] 李俊,张义军,吕伟涛,等.一次多回击自然闪电的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 401-411.
- [3] 蒋如斌,郗秀书,杨静,等.人工触发闪电起始阶段上行正先导的光学和电流特征//S13 第十届防雷减灾论坛——雷电灾害与风险评估, 2012.
- [4] Edens H E, Eack K B, Eastvedt E M, et al. VHF lightning mapping observations of a triggered lightning flash. *Geophys Res Lett*, 2012, 39(19): L19807, doi: 10.1029/2012GL053666.
- [5] 王彩霞,郗秀书,蒋如斌,等.一次人工触发闪电上行正先导的传输特征. *物理学报*, 2012, 61(3): 553-560.
- [6] 王道洪,郗秀书,郭昌明.雷电与人工引雷.上海:上海交通大学出版社, 2000: 1-12.
- [7] 陈渭民.雷电学原理.北京:气象出版社, 2003: 289-292.
- [8] 李俊,吕伟涛,张义军,等.一次多分叉多接地的空中触发闪电过程. *应用气象学报*, 2010, 21(1): 95-100.
- [9] Willett J C, Davis D A, Laroche P. An experimental study of positive leaders initiating rocket-triggered lightning. *Atmos Res*, 1999, 51(3): 189-219.
- [10] Horii K. Experiment of Artificial Lightning Triggered with Rocket. *Mem Fac Eng, Nagoya Univ Japan*, 1982, 34: 77-112.
- [11] Biagi C J, Jordan D M, Uman M A, et al. High-speed video observations of rocket-and-wire initiated lightning. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(15): L15801, doi: 10.1029/2009GL038525.
- [12] Biagi C J, Uman M A, Hill J D, et al. Transient current pulses in rocket-extended wires used to trigger lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2012, 117(D7): D07205, doi: 10.1029/2011JD016161.
- [13] Biagi C J, Uman M A, Hill J D, et al. Observations of the initial, upward propagating, positive leader steps in a rocket and wire triggered lightning discharge. *Geophys Res Lett*, 2011, 38(24): L24809, doi: 10.1029/2011GL049944.
- [14] Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Laroche P, et al. Leader properties determined with triggered lightning techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1998, 103(D12): 14109-14115.
- [15] Jiang R, Qie X, Wang C, et al. Propagating features of upward positive leaders in the initial stage of rocket-triggered lightning. *Atmos Res*, 2013, 129: 90-96.
- [16] Zhang Y, Yang S, Lu W, et al. Experiments of artificially triggered lightning and its application in Conghua, Guangdong, China. *Atmos Res*, 2014, 135-136(1): 330-343.

- [17] 张义军,杨少杰,吕伟涛,等. 2006—2011年广州人工触发闪电观测试验和应用. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 513-522.
- [18] Zheng D, Zhang Y, Lu W, et al. Characteristics of return stroke currents of classical and altitude triggered lightning in GCOELD in China. *Atmos Res*, 2013, 129: 67-78.
- [19] 谢盟,张阳,张义军,等. 两种类型 M 分量物理特征和机制对比. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 451-459.
- [20] 郗秀书,杨静,蒋如斌,等. 新型人工引雷专用火箭及其首次引雷实验结果. *大气科学*, 2010, 34(5): 937-946.
- [21] 周方聪,张义军,吕伟涛,等. 人工触发闪电连续电流过程与 M 分量特征. *应用气象学报*, 2014, 25(3): 330-338.
- [22] 肖桐,张阳,吕伟涛,等. 人工触发闪电 M 分量的电流与电磁场特征. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 446-454.
- [23] 谢施君. 负性地闪雷击点选择过程的模拟试验及仿真模型研究. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [24] Rachidi F, Janischewskyj W, Hussein A M, et al. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, 43(3): 356-367.
- [25] Rachidi F, Rakov V A, Nucci C A, et al. Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2002, 107(D23): ACL 16-1-ACL 16-6.

Characteristics and Simulation of Artificially Triggered Lightning Precursor Current Pulse

Qian Yong¹⁾²⁾³⁾ Zhang Yang¹⁾³⁾ Zhang Yijun¹⁾³⁾ Chen Lüwen⁴⁾ Lü Weitao¹⁾³⁾
Zheng Dong¹⁾³⁾ Chen Shaodong³⁾⁴⁾ Yan Xu³⁾⁴⁾ Xu Liangtao¹⁾³⁾

¹⁾ (*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Lightning Protection and Disaster Reduction Center of Xinjiang, Urumchi 830001*)

³⁾ (*Guangzhou Field Experiment Site for Lightning Research and Testing, Guangzhou 510080*)

⁴⁾ (*Lightning Protection Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080*)

Abstract

During summers from 2010 to 2014, two kinds of rocket are used for artificially triggered lightning experiments in Guangzhou Field Experiment Site for Lightning Research and Testing. Based on the analysis upon current data of 25 classical rocket-and-wire triggered lightnings, it can be confirmed that the unipolar precursor pulse is generated from the lightning triggered by copper wire, while the unipolar precursor pulse is generated from the lightning triggered by steel wire. As for the unipolar precursor pulse, the geometric mean (GM) values of peak current, rise time, duration of waveform and charge transfer are 26 A, 0.33 μs , 2.3 μs and 27 μC , respectively. While for the bipolar precursor pulse, the corresponding values are 67 A, 0.24 μs , 2.1 μs and 54 μC , respectively. The GM value of peak current for bipolar precursor pulse is close to 2.6 times that of the unipolar precursor pulse, however, GM values of duration and rise time are similar. Furthermore, the channel base current waveforms generated from copper and steel line are simulated by using the transmission line model. The simulated waveform is consistent with the observed one. The channel base current waveforms exhibit a bipolar oscillation, which can be caused by the obviously small characteristic impedance for copper wire than the grounding block. It is confirmed that the two forms of current waveform are caused by the difference between characteristics impedance of transmission line and grounding system. Precursor pulses are known that can be attributed to the superposition between the channel top current pulses and the bottom reflected current pulses. The current flows into the grounding system. If the characteristic impedance of transmission line doesn't match with the characteristic impedance of grounding system, the current will reflect at the connecting point between the transmission line and grounding system. With larger difference between the characteristic impedance of transmission line and grounding system, the reflection is more obvious. As a contrast, the characteristic impedance of steel wire is close to that of grounding system, which leads to weak reflection. Therefore, the current at the channel bottom generated from triggered lightning with steel wire is the same as the top current. The current pulses generated by the upward leader initial discharge at the top of the transmission line are unipolar. The conclusion is also verified by simulation results.

Key words: artificially triggered lightning; precursor pulse; characteristic parameters; simulation