

空中人工引发雷电先导过程的特征分析

张义军 董万胜 张广庶 郗秀书

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘 要 利用闪电电场变化仪对空中人工引发雷电引起的电场变化进行了两站同步观测,并结合高时间分辨率的光学观测资料的分析研究,揭示了一次空中引发雷电先导物理过程的特征.当携带金属导线的火箭上升到几百米高度时,在金属导线的上端和下端激发产生了一个双向传输的先导,当向下的负先导接近地面时,一个向上的正连接先导由地面激发,正负先导的平均传播速度为 0.86×10^5 m/s,随着向下负先导的接地,将产生一个小回击过程,而由金属导线上端激发的向上正先导的传播速度为 1.1×10^5 m/s.

关键词 空中引发雷电 先导 电场

文章编号 0001-5733(2003)04-0446-04 中图分类号 P483 收稿日期 2002-03-19,2003-01-15收修定稿

CHARACTERISTICS OF THE LEADING PROCESSES TO THE ARTIFICIAL INDUCED LIGHTNING IN THE AIR

ZHANG YIJUN DONG WANSHENG ZHANG GUANGSHU QIE XIUSHU

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract We have studied the physical processes leading to one triggered lightning flash using the altitude-triggering technique. The main characteristics of the triggered lightning are inferred from data of simultaneous electric field change measurements at two stations and highly time-resolved optical signals. The results reveal the characteristics of leading propagation to the triggered lightning. When the rocket attached with a thin steel wire is ascending to the height of several hundred meters, a typical bi-directional leader is initiated at the top and bottom end of the wire. When the negative leader propagating downward approaches to the ground, a positive connecting leader is excited from the ground and propagates upwards. The average speed of the negative and connecting positive leaders is around 0.86×10^5 m/s. A mini-return stroke is produced with the connection to the ground of downward negative leader. The upward positive leader initiated from the top end of wire propagates at a speed of about 1.1×10^5 m/s.

Key words Altitude-triggering lightning, Leader, Electric field.

1 引 言

地闪是通过向下先导在地面附近的连接过程完成的,当下行先导接近地面目标并在其上激发出向上发展的连接先导时雷击将不可避免地发生,从而

引起严重的雷电灾害,因此地闪的连接过程一直是雷电物理研究的重点问题.但由于自然地闪的发生具有很大的随机性,闪电击中地面上的已知点或其附近的几率非常低,很难对自然地闪进行有针对性的研究,所以对地闪中向下传输的先导与地面物体的相互作用的认识显得异常困难.自20世纪70年

基金项目 国家自然科学基金项目(40135010,49975003).

作者简介 张义军,男,生于1963年12月,毕业于中国科学院兰州高原大气物理研究所大气物理专业.主要研究方向为大气电学.

E-mail: zhangyj@ns.lzb.ac.cn

代人工引发雷电试验成功后,美国、法国、日本先后发展了这一技术,并在雷电物理和雷电防护等方面取得了许多成果^[1,2]。我国自 20 世纪 80 年代起利用新型抛伞引雷火箭进一步发展了人工引发雷电技术,在我国南北方成功地引雷几十次^[3,4],这一技术已成为雷电物理过程研究的有效手段。目前主要采用传统触发方式和空中触发方式^[5]。由于空中引发雷电中包含有类似于自然地闪的下行先导过程,并且在下行先导接近于地面时,地面目标物上将激发产生上行连接先导过程,所以利用空中触发方式引发的雷电更接近于自然雷电^[6],有利于对地闪连接过程的详细研究。1998 年夏季在广东从化进行了人工引发雷电试验,本文拟对空中人工引发雷电中先导的物理过程进行分析。

2 实验及观测

人工触发雷电技术是在一定的雷暴发生条件下,向雷暴发射携带一定长度的、直径为 0.2mm 的细金属导线的小火箭。在传统触发方式中,金属导线与地相连接,火箭上升到 200~400m 高度时,在强电场作用下金属导线尖端产生向上的先导,这与地面高建筑物触发的自然雷电相类似^[1]。在空中触发方式中,随着引雷火箭的上升,由火箭携带的线轴中首先拉出约 100m 长的绝缘尼龙线,然后是大约 500m 的细金属导线(与传统触发方式中使用的金属导线相同)。当金属导线被拉出一定长度时,在其两端激发产生一双向先导^[5],图 1 表示出在负雷暴电场中双向先导的产生及发展过程。在金属导线顶端首先激发向上的正先导,并向云中传播,同时在导线的下端不断有负极性电荷的累积,使整个导线和已形成的正先导呈电中性。随着正先导的发展,导线下端的负电荷累积得越来越多,从而导致负极性先导的激发和向地面传播。当负先导接近地面时,在 4m 高的接地引流杆顶端将激发向上的连接正先导,正负先导连接后形成一小回击过程,但金属导线上端的正先导仍继续向上发展到云内。空中引发雷电技术更近似地模拟了自然雷电的向下先导过程和地面连接过程。

1998 年 7~8 月,在广东从化地区进行了人工引发雷电实验,实验中雷电产生的电场变化由一平板慢天线系统在两个站进行同步测量,系统带宽为 4Hz~1.5MHz,采样率为 12.5Ms/s,记录长度为 2MW(即 2 兆个数据点)。观测站 1 和观测站 2 距引雷点

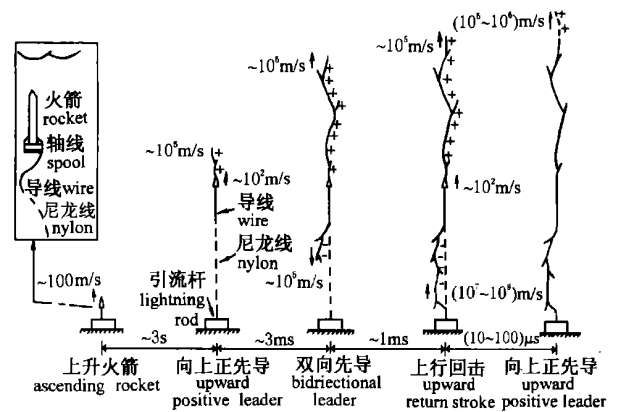


图 1 空中引发雷电发生发展过程示意图

Fig. 1 Sequence of events involved in the altitude triggered lightning

分别为 60m 和 1300m,并在观测站 2 利用一高速数字化雷电放电传输特性自动观测系统 ALPS (Automatic Lightning Progressing Feature Observation System) 观测人工引发雷电放电通道的发光特性。ALPS 系统由一变焦镜头、光电二极管阵列、放大器、多通道数字化仪和微机组成。闪电通道的发光图像首先经镜头成像在位于焦平面的光电二极管阵列上,变为电信号,再经过放大、A/D 转换后记录在微机中。光电二极管阵列由 256(16×16)个光电二极管组成^[7]。实验中这一系统可记录 16000 幅图像,每幅图像间的时间间隔为 100ns,记录长度为 1.6ms,空间分辨率约为 55m。

3 资料和分析

1998 年 8 月 22 日在一次局地对流雷暴的成熟阶段成功引发雷电 5 次。引发雷电均为典型的负闪电,其特征相似,具有初始的双向先导和小回击过程。图 2 是在测站 2 拍摄到的 9805 号人工引发雷电照片,从图 2 可以看到闪电通道中大约有 250m 是比较直的,这是由金属导线被电流汽化后形成的,通道的上下部分则是引发雷电在空气中击穿形成的。

图 3a 中电场变化首先从 A 点开始减小,然后基本保持稳定不变,图 3b 中,电场变化一直增加。从图 3a 的扩展波形可知,AB 段以梯级形式减小,梯级数为 11 个,10%~90% 的下降时间小于 1μs,梯级之间的时间间隔平均为 20μs。这是由于在初始阶段火箭尖端的电场强度不大,先导或流光激发后不能持续传输,从而形成一系列小梯级。此后随着电荷在金属导线上上下两端的累积,电场变化变为连续。从 B 点开始图 3a 中的电场变化基本不变,而图 3b

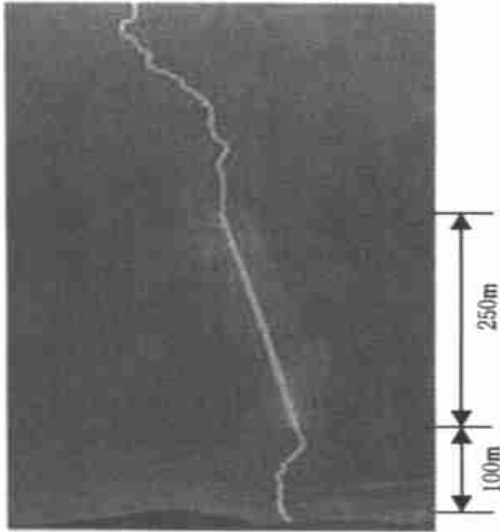


图2 9805号空中引发雷电照片
 触发时间为1998-08-22-16:00:48(北京时间);
 距引雷点1.3km处拍摄.

Fig. 2 A picture of triggered lightning 9805

中的电场变化则明显增加,表明从金属导线尖端激发产生的向上正先导开始连续传播(因为正先导比负先导更容易在较低的环境电场中激发和传输).随着这一正先导的发展,金属导线下端的负电荷进一步累积增加.从距B点0.8ms之后的C点开始,图3b中的电场变化明显增加,由此可推断此时向下的负先导开始持续的发展传播.在DE段,两站的电场变化中均叠加有大量小脉冲,同时从图3b中可见DE段电场变化增加的斜率比CD段要大,这表明随着向下负先导的接近地面,一个向上的正先导开始由地面激发并向上传输,与向下的负先导会合.当两个先导连接时,在DE段的后部产生了小回击过程,并引起电场的快变化.连接过程大约持续了0.4ms,而从C点到E点,向下的负先导和向上的连

接正先导在1.28ms的时间内传播了110m(尼龙线长度为110m),所以其平均传播速度为 0.86×10^5 m/s,在自然闪电中负先导的平均传播速度的下限为 1.0×10^5 m/s,两者比较接近,且与人工引发雷电中正先导的光学观测结果一致^[8].

图4是此次引发雷电ALPS记录到的相对光强资料.可以看出,闪电通道首先在大约111m高度开始发光,对应金属导线的底部,这一连续的发光是与局部的负电晕放电过程相关的.但由金属导线尖端激发的向上正先导的发光在这一阶段并未被ALPS探测到.小回击过程产生了最强的光辐射,但仅发生在金属导线底端与地面之间,相对光强峰值在0~55m段比55~111m段大200个相对单位,在111~166m段,相对光强为115个相对单位,而在166m高度以上,则基本不发光.小回击产生的光脉冲的半峰宽度为 $5\mu\text{s}$,比自然闪电回击的光脉冲要窄得多,在自然闪电中,回击过程的光脉冲半峰宽度一般大于 $20\mu\text{s}$ ^[9].小回击过程产生的光脉冲从地面向上的传播速度约为 1.2×10^8 m/s,与自然闪电回击速度一致.在小回击发生 $5\mu\text{s}$ 之后,一个明亮的发光在332~387m高度出现,并以 4.8×10^7 m/s的速度向上传播到553~608m高度,这个明亮的发光持续了30~40 μs ,显然,它是沿着被金属导线尖端向上发展的正先导部分电离的通道向上传播的,所以金属导线尖端向上的正先导传播的长度为221m.从图3可见,这一正先导传播的时间从B点到E点约为2ms,因此这个正先导的传播速度为 1.1×10^5 m/s,与自然闪电的观测结果相吻合.而在111~166m到332~387m段,可能是由于小回击过程的持续时间较短,金属导线尚未被熔化,闪电通道没有被ALPS探测到发光.通过对ALPS记录的波形进一步展开

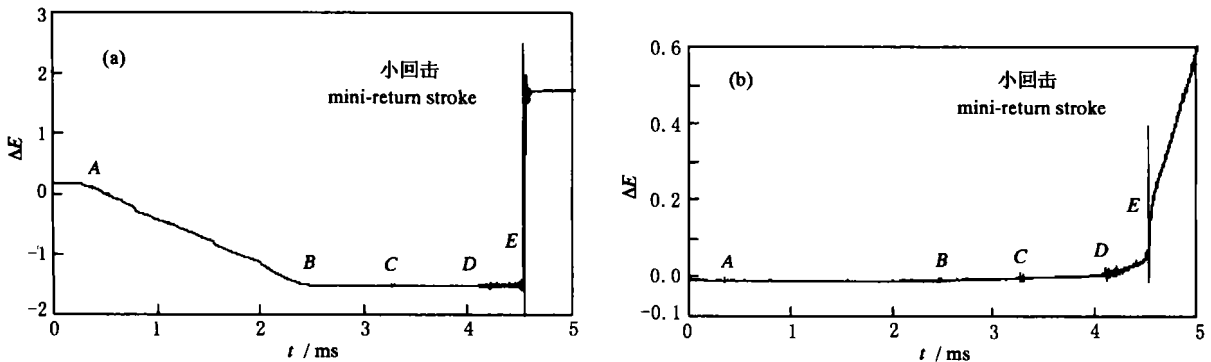


图3 9805空中引发雷电的电场变化记录

(a) 观测站1; (b) 观测站2.

Fig. 3 Records of electric field change for triggered lightning 9805

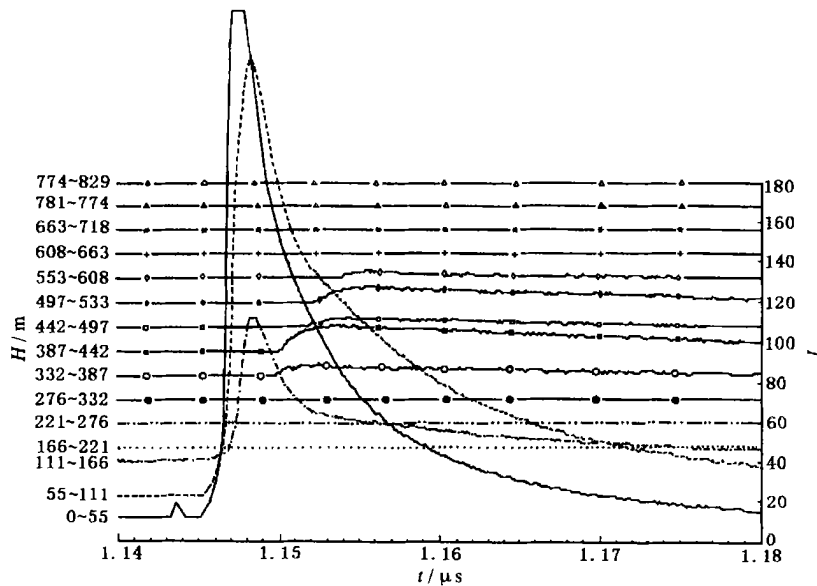


图4 9805 人工引发雷电的 ALPS 记录

图中横坐标以小回击的发生时刻为 0 点. 0~111m 为尼龙线, 111~387m 为金属线, 387m 以上为空气. L 表示光强.

Fig. 4 Record of ALPS for flash 9805

可见,在小回击发生 $200\mu\text{s}$ 之后金属导线被熔化蒸发.

4 结果和讨论

通过两站高时间分辨率的电场变化同步观测资料和高时空分辨率的光学观测,对一次空中人工引发雷电先导过程中的主要特征进行了研究.当携带金属导线的火箭上升到几百米高度时,首先有一个典型的双向导过程在金属导线两端被激发,随着向下负先导的接地,将产生一个小回击过程.由金属导线尖端激发的向上正先导在初始阶段呈不连续的脉冲型,脉冲间隔为 $20\mu\text{s}$,上升时间小于 $1\mu\text{s}$.当向下的负先导接近地面时,一个向上的正连接先导由地面激发,正负先导的平均传播速度为 $0.86 \times 10^5 \text{ m/s}$.随后发生的小回击过程在金属导线底端和地面之间产生了最强的光辐射,光辐射从地面以 $1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度向上传播.而由金属导线尖端激发的向上正先导的传播速度为 $1.1 \times 10^5 \text{ m/s}$.这些参数都在自然闪电观测结果的范围之内,进一步表明空中引发雷电技术是研究雷电物理和连接过程的有效工具.

参考文献

[1] Uman M A. The Lightning Discharge. San Diego: Academic, 1987,

138

- [2] Horri K, S Sumi. Technology and observed data of triggered lightning by rocket. *T. IEE Japan*, 1997, **117-B**: 441 ~ 445
- [3] Xincheng Liu, Caiwei Wang, Yijun Zhang, et al. Experiment of artificially triggering lightning in China. *J. Geophys. Res*, 1994, **99**(D5): 10727
- [4] 陈明理,刘新中,刘欣生等. 1991 年北京延庆人工引雷实验及分析. *地球物理学报*, 1994, **37**(2): 167 ~ 173
CHEN Mingli, LIU Xinzong, LIU Xincheng, et al. Successful experiment and analysis of artificially triggering lightning in Beijing in 1991. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)*, 1994, **37**(2): 167 ~ 173
- [5] Uman M A, V A. Rakov et al. Triggered-lightning experiment at Camp Blanding, Florida (1993 ~ 1995). *J. IEE Japan*, 1997, **117-B**: 446 ~ 452
- [6] Laroche P, V Idone, A. Eybert-berard and L. Barret, Observation of bi-directional leader development in a triggered lightning flash. 1991 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Florida, April. 1991, **57**(1): 1 ~ 10
- [7] Wang D, V A Rakov, MA Uman, et al. Attachment process in rocket-triggered lightning strokes. *J. Gophys. Res.*, 1999, **104**: 2143
- [8] Kito Y, K Horii et al. Optical aspects of winter lightning discharges triggered by rocket-wire technique in Hokuriku district of Japan. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**: 6147
- [9] Jordan D M, V P Idone, R E Orville, et al. Luminosity characteristics of lightning M component. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 25695