闪电的人工触发和研究*

王才伟　刘欣生　张义军　肖庆复

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所　兰州　730000)

摘　要　介绍了人工引发闪电技术的发展历史和原理,以及近几年来我们利用这一技术在闪电物理研究方面取得的进展.给出了人工引发闪电电流和高速摄像同步测量结果,并分析了各电流分量及其涉及的物理过程.在对比人工引发闪电与自然闪电异同的基础上,指出它在各方面都与从高建筑物始发的上行雷电十分相似.人工引发闪电在研究雷击机理、雷击效应、雷电防护以及电波传播、植物诱变育种等方面也具有广泛的应用前景.

关键词　人工引发闪电,闪电物理,雷击机理,雷电防护

RESEARCH ON ARTIFICIALLY TRIGGERED LIGHTNING

WANG Cai-Wei　LIU Xin-Sheng　ZHANG Yi-Jun　XIAO Qing-Fu

(*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou*　730000)

Abstract　The history and theory of artificially triggered lightning experiment are reviewed, and new progresses have been made in the study of lightning physics by use of this technique. The physical processes involved in the discharge of a triggered lightning flash are analyzed based on simultaneous measurements of currents and channel luminosity. In comparison of rocket-triggered lightning with the lightning initiated upward from high building, it has been found that these two methods are very similar in every aspect. Artificially triggered lightning has practical use in the study of lightning strike mechanisms, lightning hazard and protection as well as in the propagation of radio wave and plant mutation breeding.

Key words　artificially triggered lightning, lightning physics, lightning strike mechanism, lightning protection

闪电是强对流风暴中的瞬态放电现象.自古以来,雷电所产生的划破长空的眩目的闪光以及与之相伴随的震人心魄的霹雳给人们留下了强烈的印象,因而成为近代科学最早研究的对象之一.早在18世纪中期,Franklin通过著名的风筝实验首次证实了雷云中的电荷与实验室中摩擦产生的电荷的同一性.据估计,一次中等强度回击放电过程的峰值功率可达4×10^8kW.闪电产生的高温、过电压和强电磁辐射常常对森林、电力、通信、航空航天等部门及高建筑物等造成重大的损害.全球平均每秒钟发生闪电50—100次,但由于它出现时间上和空间上的随机性以及高电压大电流的危险性,人们难以在近距离对它进行深入的研究.另一方面,即使最大的高压实验室中的长火花放电也根本无法模拟自然界中闪电发生的云雾和大气环境条件、放电通道的几何尺度、空间电荷对流光始发和传播的影响以及闪电所释放的巨大的能量.

为了在近距离研究云对地闪电(地闪)的物理机理,20世纪60年代,美国Langmuir实验室在雷暴当空时施放带有接地金属导线的气球,希望以此来引发闪电.这一想法没有成功,因为在雷暴的强电场中,金属尖端会产生大量的电晕离子,它包围在尖端四周,限制了局部电场的进一步增强以及电击穿的发生和传播.后来由于受到深水炸弹激起的水柱偶尔触发雷暴云对地放电的启发,才认识到只有在雷暴电场中以高于离子漂移的速度(~100 m/s),突然引进高耸的接地导体尖端,才有较大的可能触发云-地间的放电.1967年,美国Newman等人在雷暴云下的强环境电场中,发射拖带接地导线的小火箭,首次在水面上成功地引发了闪电.从70年代以来,法国、日本、美国和中国等相继利用并改进这种火箭-导线技术来进行人工引发闪电实验[1—4].

* 国家自然科学基金和中国科学院资助项目

2000-02-18收到初稿,2000-05-20修回

1 人工触发闪电技术

目前采用的人工引发雷电技术是在雷暴当顶且地面电场强度达到每米几千伏时,发射拖带直径为0.2mm细金属丝的小火箭.绕有金属丝的线轴固定在火箭的尾翼上,火箭的飞行速度约100—200m/s,最大飞行高度约800m.金属丝下端可以是接地的(地面触发方式),也可以是不接地的(空中触发方式).在后一种情况下,火箭升空时首先从线轴放出的是几十到几百米长的尼龙线,然后才是与地绝缘的金属导线,由于这种方式能模拟自然闪电的下行先导的接地行为,因而目前得到了较多的使用.当火箭上升到离地面几百米高度时,环境电场强度从每米几千伏增加到数十千伏.由于细金属丝对电场的局部增强作用,在紧靠导线上、下端处的电场强度就会超过10^6 V/m而发生电击穿,并以电子雪崩的方式先后形成向上和向下传输的先导.下行先导首先到达地面,形成类似于回击的快速电荷中和过程(微回击),然后上行先导进入云中,形成了云-地之间的电流通道.

2 人工引发闪电的初始先导

先导是一种持续击穿的电荷传输过程.由于先导在闪电的起始和发展过程中的重要作用,它的激发和传播一直是闪电物理研究中的一个热点.早期Schonland[5]提出的闪电先导的源电荷模式,认为先导从空间电荷源始发,以单极性向一个方向传输,在先导通道中电荷分布均匀.此后,Kasemir[6]提出了双向不带电先导概念,将闪道看作环境电场中的导体,极性相反的先导从环境电场吸取能量并沿不同方向传输,而整个先导系统为电中性.后一种观点长期来未受到重视,原因是不同极性双向传输的先导始发于同一个雪崩源处,难以被人接受.人工引发闪电为先导的研究提供了一个直观的手段,证实了在一定的条件下双向先导发生和发展的可能性[7].根据我们的实践,如果环境电场条件合适,一般当火箭上升到150—500m高度就能触发闪电,而此时小火箭及其拖带的导线离云的底部尚有近千米之遥.所以,这种在雷暴环境中的人工引发的闪电并不是简单地用导线将带电云体与大地短路产生的放电,而是通过初始先导的连续击穿作用,使电荷得以输送和沉积,从而在云的电荷中心与大地之间为主放电过程"开辟"一条高导电率的通道.图1为1998年8月22日在广州附近一次空中触发闪电起始过程的高速数字化摄像照片.金属导线下端绝缘尼龙线的长度约100m,两幅照片的时间间隔为1ms.由图1(a)可见,当火箭上升到离地面约270m时,导线两端出现双向传输的先导.由地面电场变化和光学测量的对比分析可知,上行正先导的始发早于下行负先导,但其亮度较弱.上下两个先导之间是长度约为170m的导电性能良好的金属导线.由于先导电流一般小于十几安培,低于导线的熔断电流,所以不发光.1ms之后,上行先导也已进入云中.这时云与地之间有上百安培的初始连续电流流过,它使金属导线汽化,整个放电通道呈现明亮的发光[图1(b)].利用人工引发闪电并配合各种光学、电学和电磁学的测量手段,我们已成功地得到了先导的一些重要性质,如它们的传播速度约为$(3-5)\times10^5$ m/s,负先导以梯级方式前进,正负先导发展中的分枝特点等,还观测到了上行负先导两个分枝先后入云和下行先导两个分枝同时接地等有趣的现象[8—10].

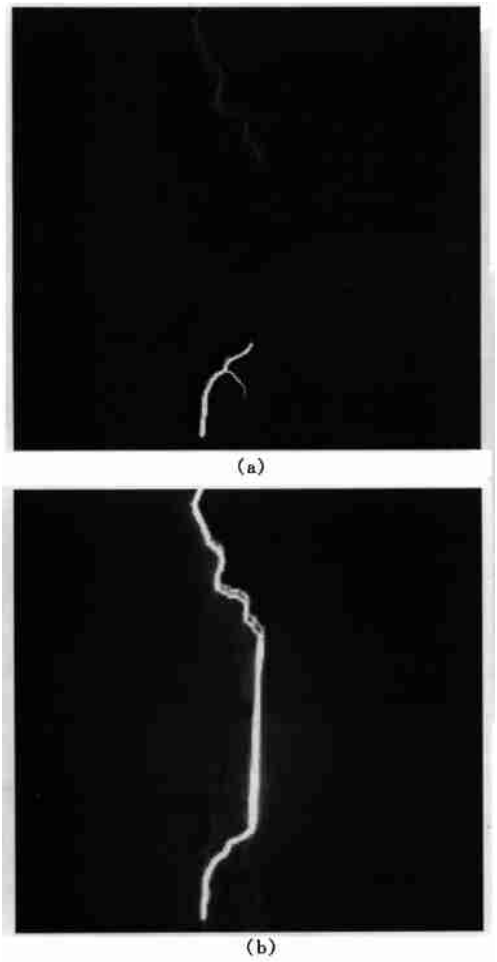

图1 人工引发闪电初始先导的高速摄像照片

3 下行先导的接地行为

绝大部分自然闪电都是由云下部负电荷区向下发展的先导开始的,先导所取的路径取决于云地之间的电场结构,因此与空间电荷的分布密切有关.当这种带有极高电位的下行负先导接近地面时,会在地面激发出向上发展的正极性的"迎接流光".当它与下行先导会合时,就开始了强烈的回击放电过程."迎接流光"最易于从地面的突出物如高建筑的顶部产生,从而使建筑物成为放电通道的一部分,也就是说受到了雷击.雷击的机理及其防御是工程技术界长期关注的问题,而对于下行先导接近地面时的行为、它与地面突出物的相互作用以及最终的连接过程的研究则是解决这一问题的关键.用空中触发闪电技术并配合光学、地面电场变化和闪电电流测量系统,我们已成功地研究了下行先导和迎接先导的出现的时间序列、它们的梯级特征及二者连接时的浪涌电流[7,10].更高时空分辨率(例如亚微秒量级以上)的研究正在准备之中.图2为江西南昌附近两次空中触发闪电的照片,它是用普通照相机B门拍得的.摄影点离闪电只有76 m,视野的垂直尺度约为48 m.图2(a)中闪电直接打在地面上,由于近地面风和湍流的作用,放电期间整个放电通道自右往左地作水平漂移,而且其形状也在发生变化,逐渐变得蜿蜒曲折.地面上还有一些发光点,它们是闪电的高电位在地面尖端激发出来的流光放电.照片中右边呈带状的发光是由上行先导入云后的初始连续电流引起的,此后共有10个强弱和时间间隔不等的回击,它们在照片中呈亮线状,在某些回击之后还跟随有长短不等的延续电流.由图还可看到,放电通道以高度约30 m为界,其上下段的发光有所差异.30 m以上回击之后延续电流的发光较明显,这是因为那一段闪道是由金属丝汽化而成的,而30 m以下部分的闪道则是由空气击穿离化而形成的,二者的发光特性有所不同.图2(b)照片所示的是另一次闪电,我们有意将它引到一根4 m高、接地良好的铜棒(相当于避雷针)上.这次闪电除了包含了更多的回击光脉冲外,也显示出与图2(a)相似的一些形态特征,例如闪道的移动和变形,从地面尖端激发出来的流光放电以及闪道上下部分发光的差异等.但它有一个明显的有别于图2(a)的特点,那就是不论闪道形状如何变化,它自始至终以避雷针为接地点.这也正是传统的避雷针的工作原理:当闪电的下行先导出现于避雷针的作用范围以内时,由避雷针产生的上行先导会"抢先"与闪电的下行先导相连接,从而让闪电电流流过其本身以保护其他目标物.但安装得很高的避雷针有可能自行激发向上的闪电,或者将原来不会打在本地的较远处的闪电也"引导"过来,由此反而增加了目标物的遭受雷击的机会,因而近些

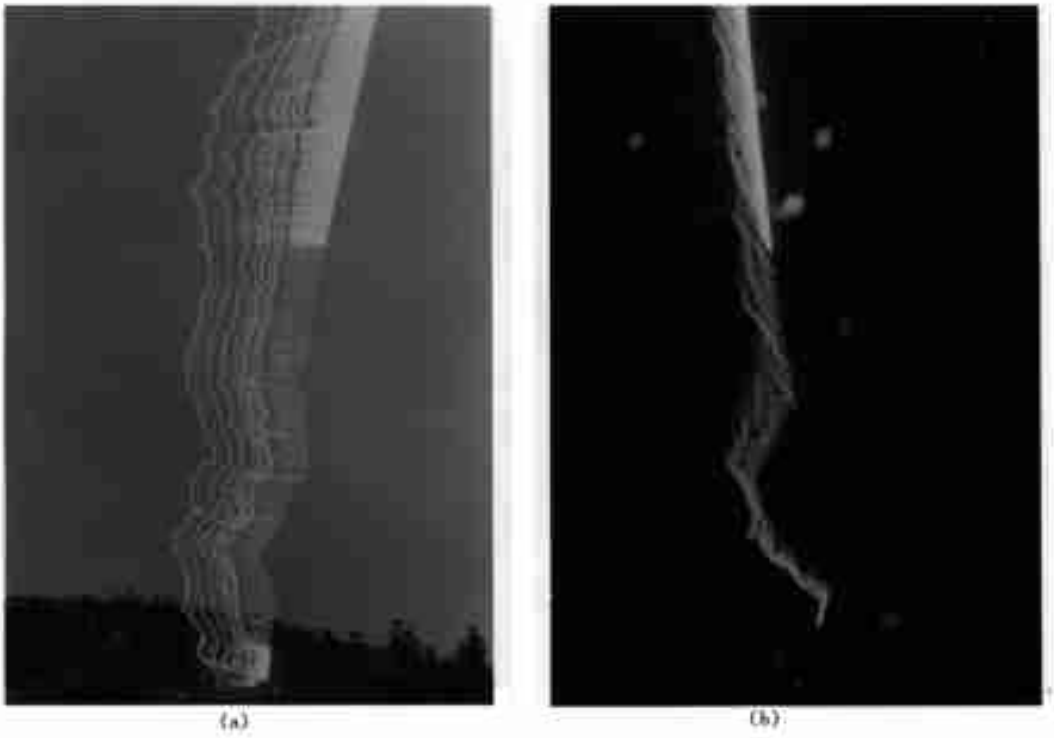

图2 两次空中触发闪电的近距离照片

年来有不少研究者认为普通的避雷针应该慎重使用.

4 闪电电流和放电通道的发光特征

电流是雷电中最重要的物理参数,其余伴随的物理过程如雷声、闪光、电磁辐射和电场变化等都是由电流而产生的副产品.闪电电流中包含了不同量值、不同时间尺度的成分,如先导电流、回击电流、延续电流和 M 分量电流等.一次强回击的峰值电流可达几万安培以上,而其上升时间仅为微秒量级.大部分回击发生后几毫秒之内其电流就下降到接近于零,但也有些回击之后电流并不迅速下降到零,而是以延续电流的方式持续几十甚至几百毫秒.这种延续电流的平均强度虽然只有一二百安培,但由于其持续时间长,释放的能量往往十分可观.由粗略估算不难得到一次中等强度的连续电流的能量作用积分 $\int i^2 \mathrm{d}t$ 要比回击的大一个量级.延续电流放电过程总的说来比较平稳,但其中也可能叠加一些上升时间为毫秒量级、强度达几百到上千安培的电流脉冲,即 M 过程.虽然回击与 M 过程都是脉冲性质的放电,但回击的直窜先导(dart leader)发生之前,云与地之间没有明显的电流流过,或者说处于准截止状态.回击所中和的主要是先导沉积在通道中的电荷.而 M 过程发生之前,云与地之间仍有几十到上百安培的连续电流流动着,通道一直保持着良好的导电状态.就电流的上升时间而言,回击要比 M 过程快 3 个量级,电流值大 1—2 个量级.闪电不同电流分量的发生机制、形态特征以及互相过渡转化,与云中的电荷分布结构、降水粒子的带电状况和微物理性质有关.

由于自然闪电发生的时空随机性,闪电电流的直接测量和研究很不容易.过去通常采用的方法是利用已有的或专门构建的高构筑物,配以示波器等装置来记录闪电电流.由于高塔被雷电击中的几率很小,为了增加机会,有时把它建在雷电频发区的高山之上.但即使如此,这种守株待兔式的方法的效率也是很低的.人工引发的闪电使人们可以在预定发生闪电的地点设置电流传感器和记录系统,并结合其他的设备进行综合观测.目前最常用的测量闪电电流的方法是在放电通道中接入同轴分流器,截取雷电流电压降信号.为了隔离雷电高压,先将它进行 E/O 转换变成光学信号,然后通过光纤传输到几十米以外的仪器室通过 O/E 转换成为电信号,最后用高速大容量数字化示波器以 10 M/s 以上的采样率进行记录.图 3 为 1999 年 7 月在广州附近用高速摄像系统记录的一次人工引发闪电的通道亮度变化和相应的电流波形.电流测量的采样率为 0.2μs,因而它能比时间分辨率为 1 ms 的数字化高速摄像系统显示更多的放电过程细节.

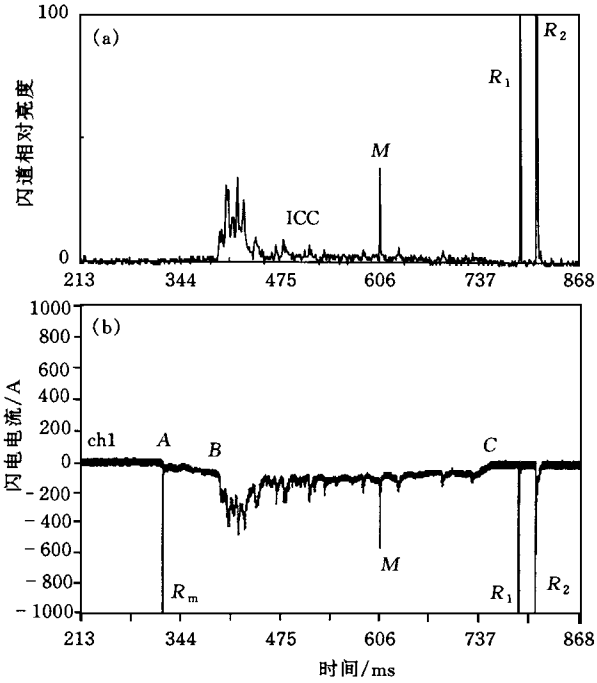

图 3 一次人工触发闪电通道亮度变化和闪电电流

(a)闪电通道亮度变化;(b)闪电电流

图 3(b)中电流均为负值,表示闪电将云中的负电荷输向大地.其中电流脉冲 R_m 由下行先导接地时的微回击(见图 1)所形成,其峰值为 914 A,持续时间只有 3μs,摄像系统因时间分辨率较低而未能记录到它的发光.其余部分的电流和亮度波形都有非常好的对应关系,它们依次为代表流光和上行先导在云下发展引起的电流(A—B 段),先导入云后在云中传输时的初始连续电流(B—C 段),叠加于其上面的 M 分量电流脉冲 M 和初始连续电流结束后的两个回击电流脉冲 R_1 和 R_2.值得注意的是,在脉冲 M 之前闪道仍有几十安培的电流流过且可测得通道尚在发光,但在回击 R_1 和 R_2 之前都有一段测不到电流和发光的时间.考虑到本电流测量系统的噪声电平大于 10 A,而光学测量在离闪电 1300 m 以外处进行,难以测到微弱的发光现象,所以回击前的"无电流"时期是否意味着放电通道的完全截止至今仍难以定论.图 3 所示的是一次比较弱的闪电,它只有两次回击,其峰值电流分别只有 6.6 kA 和

14.6kA,它们后随的延续电流也很短.实际上大多数闪电都包含两个以上的回击,例如图2的两次闪电都比它强得多,回击数都超过10个,整个放电过程持续时间都在1s以上.平时我们感觉到闪电时发光的闪烁就是由于闪电有多个强度起伏很大的电流脉冲的缘故.与南方地区(如江西、广东等)成为明显对比的是,在我国北方地区(如甘肃),雷暴云下部有广阔的正电荷区[11].在那里人工引发闪电时正电荷流向大地,放电过程非常短暂,只有几十毫秒且都没有回击过程,往往是先导进入云中后很快就消亡了[8,12].这种差异起因于二者雷暴云电结构的不同,同时也表明了云下部正电荷区的电环境和微物理条件不利于先导的发展和闪电放电过程的延续.

5 人工触发闪电与自然闪电的比较

自然发生的云对地闪电按其初始先导的行进方向可分为两类:一类通常称为"下行雷",它是当雷暴云中局部区域电场足够强时发生电击穿,并以梯级先导的方式向下推进,到达地面时形成"首次回击".另一类为"上行雷",先导不是从云中开始,而是始发于处于强电场中的地面上的高耸突出物体,如孤立的山顶、高大的树木或人类构建的超高建筑物.这种由地面尖端始发向上运动的先导进入云中,形成地与云之间的放电通道.与下行雷相比,由上行先导的激发、传输而引起的上行雷没有传统意义上的"首次回击".这是因为作为气溶胶状态的带电云体是电的不良导体,先导进入云中后并不立即发生快速的中和过程(回击),而是首先开始一段初始连续电流放电过程,等这一电流基本停歇后,才由直窜先导引发继后回击.这与前面介绍的用火箭-导线技术人工引发的闪电非常相似.至于继后回击及以后的放电过程,应该说不论自然发生的下行雷、上行雷还是人工引发雷电,都没有本质上的差别.在自然界中,上行雷发生的几率非常小.但从高建筑物特别是超高建筑物受雷击的角度而言,上行雷却是不容忽视的.据报道,高度低于150m的地面建筑物受雷击,一般都是下行雷的作用.随着高度的增加,在其总雷击次数中上行雷的比例迅速上升,高度为200m时约为50%,400m时可能超过80%.

6 人工引发闪电技术的实际应用

自20世纪70年代初法国原子能委员会开始有计划地进行人工引发闪电实验以来,这一方法以及与其相关的测量技术已得到了长足的发展.目前,它已成为闪电物理研究的重要手段.此外人工引发闪电还被广泛应用于研究雷击机理和雷击效应.例如,在美国肯尼迪航天中心,20世纪80年代以来就对多种目标物进行了雷击试验,其中包括弹药仓、液体或固体燃料罐、微电子设备乃至模拟的飞行器.1993年起,在佛罗里达州的Camp Blanding建立了国际雷电研究试验中心,利用人工引发闪电对架空输电线和地下电缆等对直接雷击和感应雷的响应进行试验研究.日本自20世纪70年代末以来一直进行闪电对输配电线路和避雷装置作用的野外实验研究.在我国,利用人工引发闪电技术,研究闪电与地面物体的相互作用以及评估消雷器的性能的实验也正在实施之中.由于人工引发的闪电发生的确切时间、地点和电流波形都是已知的,它已被作为一个超大功率的宽带辐射源,用来进行电波传播和远距离的无线电定位试验.此外,由于人工引发闪电通道周围是一个强电磁环境,它可能作为一种物理因素或刺激条件用于植物的诱变育种中.

参 考 文 献

[1] Fiuex R P *et al*. IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1978, PAS-97:725

[2] Hubert P, Laroche P *et al*. J. Geophys. Res., 1984, 89: 2511

[3] Kito Y, Horii K. J. Geophys. Res., 1985, 90:6147

[4] Liu X S, Wang C W *et al*. J. Geophys. Res., 1994, 99: 10727

[5] Schonland B. IV Proc. R. Soc. London Ser. A, 1938, 164: 132

[6] Kasemir H. J. Geophys. Res., 1960, 65:1873

[7] Wang C W, Yan M H *et al*. Chinese Sci. Bult., 1999, 44: 163

[8] 王才伟,刘欣生,董万胜等.高原气象,1998,17:65[WANG Cai-Wei, LIU Xin-Sheng, DONG Wan-Sheng *et al*. Plateau Meteorology, 1998, 17:65(in Chinese)]

[9] 王才伟,张义军,肖庆复等.高原气象,1998,17:24[WANG Cai-Wei, ZHANG Yi-Jun, XIAO Qing-Fu *et al*. Plateau Meteorology, 1998, 17:24(in Chinese)]

[10] 张义军,刘欣生,王才伟等.高原气象,(待发表)[ZHANG Yi-Jun, LIU Xin-Sheng, WANG Cai-Wei *et al*. to be published in Plateau Meteorology (in Chinese)]

[11] 刘欣生,郭昌明,王才伟等.气象学报,1987,45:500[LIU Xin-Sheng, GUO Chang-Ming, WANG Cai-Wei *et al*. Acta Meteorologica Sinica, 1987, ,45:500(in Chinese)]

[12] 刘欣生,郄秀书,张义军等.高原气象,1998,17:1[LIU Xin-Sheng, QIE Xiu-Shu, ZHANG Yi-Jun *et al*. Plateau Meteorology, 1998, 17:1(in Chinese)]