

# 峰值电流达几千安量级的闪电 $M$ 分量 放电特征及机理探讨\*

蒋如斌<sup>1)2)</sup> 郗秀书<sup>1)†</sup> 王彩霞<sup>1)2)</sup> 杨静<sup>1)</sup> 张其林<sup>3)</sup> 刘明远<sup>3)</sup> 王俊芳<sup>1)2)</sup>  
刘冬霞<sup>1)2)</sup> 潘伦湘<sup>1)2)</sup>

1) 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) 南京信息工程大学遥感学院雷电科学与技术系, 南京 210044)

(2010年4月27日收到; 2010年9月29日收到修改稿)

利用2009年山东人工触发闪电实验获取的实测雷电流资料、近距离电场和高速摄像资料, 分析了6次峰值电流达几千安量级的  $M$  分量. 6次  $M$  分量均对应闪电通道中明显的发光亮度的脉冲式变化, 持续时间小于1 ms.  $M$  分量的电流波形和近距离电场波形均呈较为对称的V形, 且波形的上升时间均为几十微秒, 同步记录结果显示, 电场先于通道底部电流发生变化且先达到峰值. 这些  $M$  分量在发生前, 闪电通道中存在一定的连续电流, 通道的导电性优于先导-回击过程.  $M$  分量发生前的闪电通道状况是影响其电流幅值、上升时间等参数的重要因素. 根据电流和电场同步波形判断,  $M$  分量起始于由上向下发展的过程, 该过程在接地后仍继续发展增强, 并在地面发生反射过程, 下行过程和反射过程的相互作用可能随高度而变化.

**关键词:** 闪电,  $M$  分量, 先导-回击, 通道电流

**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta

## 1. 引言

闪电是发生于大气的剧烈放电现象, 并伴随着强烈的光、电、磁等效应<sup>[1-4]</sup>, 其瞬态放电过程, 是闪电物理研究领域的重点内容.  $M$  分量是发生于地闪放电过程中的一类重要的物理过程. Rakov 等<sup>[5]</sup> 将云对地闪电的电荷转移过程大致分为三类: 先导-回击过程、连续电流过程和  $M$  分量过程. 先导在云地之间建立放电通道, 通道接地后随之发生的回击过程使云地之间的异号电荷迅速中和, 通道中电流的峰值可达几十千安<sup>[6, 7]</sup>. 多数回击后跟随有连续电流, 它是相对稳定而平缓的放电过程, 持续时间为几到几百毫秒, 电流幅值几十到几百安培, 并伴随着闪电通道的持续发光<sup>[8, 9]</sup>.  $M$  分量是叠加在连续电流上的脉冲过程, 并使闪电通道的发光亮度发生

瞬态增强. 自 Malan 等<sup>[10]</sup> 于1937年报道  $M$  分量以来, 不断有学者对  $M$  分量进行观测和分析. Thottappillil 等<sup>[11]</sup> 统计得到了人工引雷的  $M$  分量电流幅值、上升时间、转移电荷量分别为 100—200 A, 300—500  $\mu$ s, 0.1—0.2 C, 并指出发生  $M$  分量与回击的次数比例约为 4:1. Jordan 等<sup>[12]</sup> 分析了条纹相机对两次  $M$  分量的图像记录, 发现  $M$  分量通道发光亮度的波形和幅值随高度仅存在小的波动. Rakov 等<sup>[5, 13]</sup> 发现少数  $M$  分量的峰值电流可达到几千安量级. Campos 等<sup>[14, 15]</sup> 根据高速摄像资料, 统计了  $M$  分量的间隔、持续时间等, 并指出自然闪电  $M$  分量的时间参量比人工引雷的结果稍大.

由于不同学者对  $M$  分量观测结果的差异, 其物理机理仅有较少文献进行过探讨. Shao 等<sup>[16]</sup> 分析了 VHF 辐射源定位图像, 认为  $M$  分量对应于云内通道的发展及与原接地通道上端的连接过程. Rakov

\* 科技部气象行业专项(批准号:GYHY2007622), 国家自然科学基金(批准号:40774083, 40804028), 国家科技支撑计划(项目编号:2008BAC36B03)和中国科学院“百人计划”专项经费和 PHR(IHLB)(批准号:PHR201008435)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qix@ mail. iap. ac. cn

等<sup>[17]</sup>根据人工引雷的资料提出了  $M$  分量双波理论,据此计算的近距离电场与实测结果较为符合,并解释了电场随距离的衰减比回击过程缓慢<sup>[7]</sup>,但其理论对电流入射波和反射波的假设过于理想,且模拟结果中反射波的后半部分导致电场出现偏大的正净余,与实测结果有一定出入. Wang 等<sup>[18]</sup>通过分析高塔闪电中发生于上行正先导阶段的 LVE 事件(luminosity variation events),联系  $M$  分量过程,认为双波理论过于简单,并提出  $M$  分量可能联系于多波过程的理论,解释了不同作者对  $M$  分量在光学观测结果上的不一致,但其理论中关于多波过程能量来源于闪电通道周围环境电磁场的假设并未得到证实.

本文利用人工引雷实验获取的电流、电场以及高速摄像资料,分析了 6 次峰值电流达几千安量级的  $M$  分量的波形特征,并通过对比先导-回击过程,探讨了  $M$  分量的物理机理.

## 2. 实验和资料

2009 年夏季在山东滨州地区进行了人工引发雷电实验 (SHATLE2009),实验采用传统触发方式,并通过 0.5 m $\Omega$  同轴分流器和 Pearson 线圈两套设备对雷电放电电流进行测量,雷电流信号经具有高压隔离功能的光纤系统传输至距离引雷点 70 m 的发射控制室,并使用多通道高速数字示波器 DL750 进行记录,采样率为 10 MHz. 实验在距离火箭发射点 30 m, 60 m 和 480 m 处分别设置了同步观测点,以测量雷电产生的光、电、磁信号,测量仪器包括大气平均电场仪(测量范围为 0— $\pm 100$  kV/m,采样率为 10 Hz),快、慢天线雷电电场变化仪(带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz,时间常数分别为 0.1 ms 和 6 s),高速摄像系统(拍摄速度为 6000 f/s,空间分辨率为 640  $\times$  1024 像素),以及磁场测量系统等. 关于 SHATLE 实验的详细介绍和不同距离观测点的具体设置,可参阅郗秀书等<sup>[19, 20]</sup>相关文献.

本文所分析的  $M$  分量全部来自于 2009 年 8 月 5 日成功触发的闪电 0902,所用资料包括由同轴分流器测量得到的闪电通道底部的雷电流资料、距离闪电通道 30 m 处由慢天线雷电电场变化仪测量的地面电场变化资料、以及距离火箭发射点 460 m 处由高速摄像系统测量的光学资料. 由于雷电流数据和电场变化数据均由 DL750 多通道数字记录仪进

行记录,保证了二者在时间上的同步和采样率的一致.

## 3. 观测结果

### 3.1. 电流和电场特征

根据触发闪电发生时大气平均电场仪的记录及雷电流的测量结果,闪电 0902 为负极性闪电,图 1 给出了其通道底部的整体雷电流波形. 此次闪电包含大电流回击过程 4 次,电流峰值达几千安量级的  $M$  分量 6 次,回击和  $M$  分量的峰值电流分布范围分别为 12.1—16.3 kA, 3.8—7.0 kA. 相比其他文献记录的  $M$  分量几十到几百安培量级的电流峰值<sup>[11, 21]</sup>,这几回  $M$  分量的电流明显偏大,已达到小型回击的电流峰值量级. 此外,需要说明的是,图 1 中标示的脉冲过程  $RM$ ,其峰值电流达 3.4 kA,从电流、电场波形上看,该过程既有  $M$  分量的特征,又有类似于回击之处,其物理过程可能存在一定的特殊性,故这里暂不进行讨论.

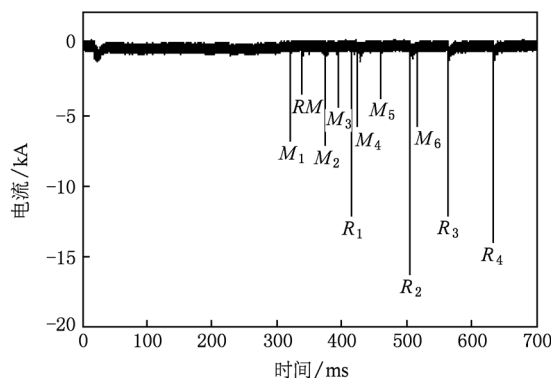


图 1 闪电 0902 的整体雷电流波形

图 2 给出了  $R_1$  和  $M_1$  过程对应的电流及 30 m 处地面电场变化的同步记录波形的时间展开图,可以看到,  $M$  分量的电流和近距离电场均呈现较为对称的 V 形,相应的波形变化时间明显大于先导-回击过程. 详细分析所有 6 次  $M$  分量的电流、电场同步波形,可得到其主要特征: 1) 30 m 处地面电场的负向变化先于通道底部电流的负向变化,即电场开始变化时,电流信号持续稳定在背景值中,当电场变化一段时间后,电流才出现明显的变化; 2) 当电流变化可以分辨时,电场仍处于负向变化的过程中,尚未达到峰值; 3) 电流峰值滞后于电场峰值; 4) 电

流上升时间为几十微秒(10%—90%峰值的平均值为42 μs),大于微秒、亚微秒量级的回击电流上升时间;5)电流、电场波形的上升沿和下降沿的时间

大致相同,不同于先导-回击过程中极快的电流上升沿和电场下降沿特征.

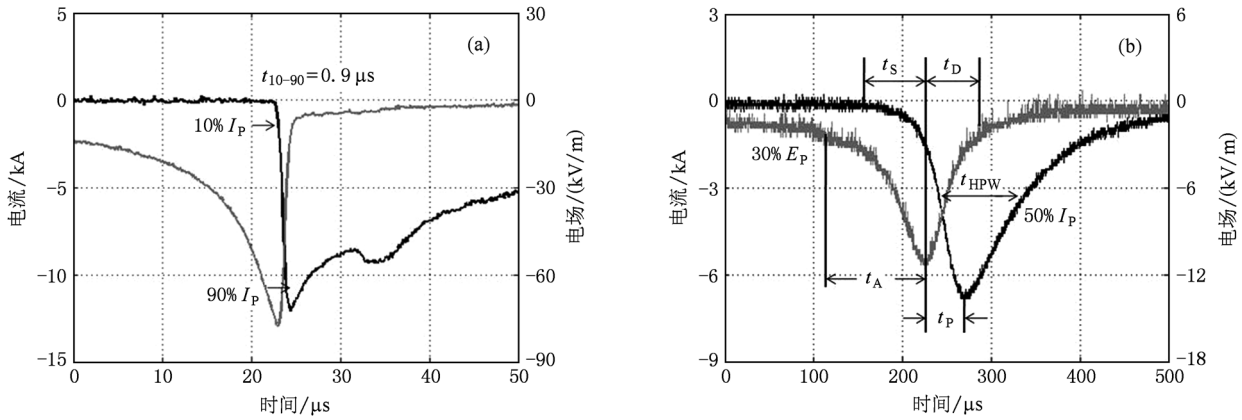


图2 先导-回击过程和M分量过程的电流、30 m处电场变化波形(图中深色线为电流波形,浅色线为电场变化波形) (a)先导-回击过程;(b)M分量过程

对于所归纳的特征1)—3),Rakov等<sup>[17]</sup>有过类似的记录并认为这三个特征是M分量物理机理必须解释的最重要的观测事实.对于M分量几十微秒的电流上升时间,本文的测量结果与Thottappillil等<sup>[11]</sup>给出的几百微秒量级有较大出入,而短的电流上升时间与大的峰值电流,表明了这几次M分量的特殊性.此外,特征5)所描述的电流、电场波形的准对称性,体现了M分量和先导-回击过程在波形上的显著差异,这在本质上是由于二者所联系的物理过程不同所导致的.

文对闪电0902的先导-回击过程和M分量的电流、电场波形特征参数做了统计,列于表1,各参数的定义如图2中标注所示.可以看到,M分量的各时间参量均大于先导-回击过程,同时值得注意的是,对于电场峰值滞后电流开始变化的时间 $t_s$ ,先导-回击过程仅为亚微秒量级,考虑到电场信号传播30 m距离需要0.1 μs,所以可认为其电场峰值的时间与电流开始变化的时间几乎是一致的,而M分量的 $T_s$ 分布范围为17—48 μs,其电场峰值对电流开始时间存在明显的滞后.

为进一步定量描述电流、电场波形的特征,本

表1 0902的先导-回击过程和M分量的电流、电场波形特征参数

参数	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
峰值电流 $I_P$ /kA	12.1	16.3	12.1	14.0	6.7	7.0	4.3	5.6	3.8	5.6
电流10%—90%峰值时间 $t_{10-90}$ /μs	0.9	1.4	0.9	1.3	48	30	56	12	72	34
电流波形的半峰值宽度 $t_{HPW}$ /μs	20.7	30.8	29.6	34.6	91	62	104	58	90	77
电场30%峰值升到峰值时间 $t_A$ /μs	11.4	3.7	4.6	4.0	65	35	41	44	112	21
电场峰值降至30%峰值时间 $t_D$ /μs	1.0	0.9	0.7	0.6	40	28	40	12	53	27
电场峰值滞后电流开始时间 $t_S$ /μs	0.3	0.3	0.2	0.2	48	28	33	17	35	28
电流峰值滞后电场峰值时间 $t_P$ /μs	1.3	2.1	0.9	2.2	43	34	40	13	63	33

### 3.2. 闪电通道的亮度特征

闪电通道的发光亮度,与通道中流过的电流大小及通道的物理状态直接相关,不同的物理过程,对应闪电通道不同的亮度变化特征.图3给出了高

速摄像系统连续拍摄的5幅通道亮度图像,对应于 $M_4$ .图中,下部比较直的通道为钢丝气化部分(即 $h_1$ 到 $h_3$ ,约340 m),上部弯曲的为自然闪电通道( $h_3$ 以上).可以看到,M分量过程伴随着通道发光亮度的迅速增强及减弱,呈现出明显的亮度脉冲特

征. 实际上, 在  $M$  分量发生前后, 通道发光亮度的变化是很缓慢的, 处于相应的背景值中, 我们所观测到的这几次  $M$  分量, 区别于背景值的图像数为 3—6

幅, 根据高速摄像系统  $167 \mu\text{s}$  的时间分辨率, 可知这些  $M$  分量的持续时间小于  $1 \text{ ms}$ , 这与 Thittappillil 等<sup>[11]</sup> 平均  $2.1 \text{ ms}$  的观测结果存在一定差别.

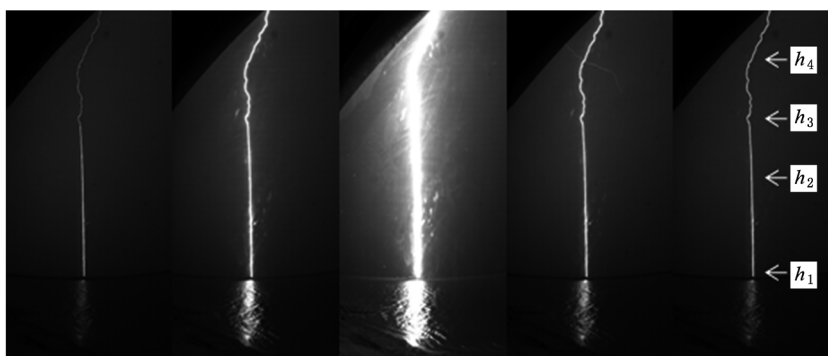


图3 高速摄像得到的  $M_4$  对应的通道亮度图像, 两幅图像之间的时间间隔为  $167 \mu\text{s}$

## 4. $M$ 分量机理分析

### 4.1. $M$ 分量发生前闪电通道的状态

$M$  分量对应的脉冲过程是叠加在连续电流上的, 而在先导回击过程发生之前, 闪电通道基本上处于截止状态, 这两个结论在以往的研究中

被广泛认同, 所以  $M$  分量和回击发生前闪电通道物理状态的差异, 包括整个通道发光亮度及通道底部雷电流的差异等, 被认为是区分它们的重要依据<sup>[5, 22]</sup>. 我们观测到的几次  $M$  分量的峰值电流大而持续时间短, 这可能指示了其发生前闪电通道的物理状态存在一定的特殊性, 为此, 我们根据相应的高速摄像资料和电流资料进行了详细分析.

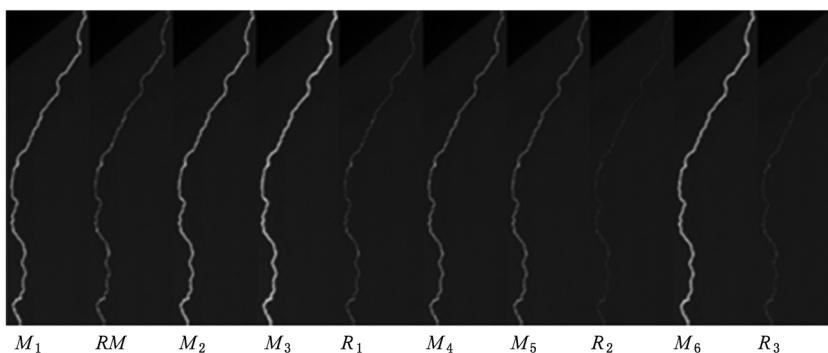
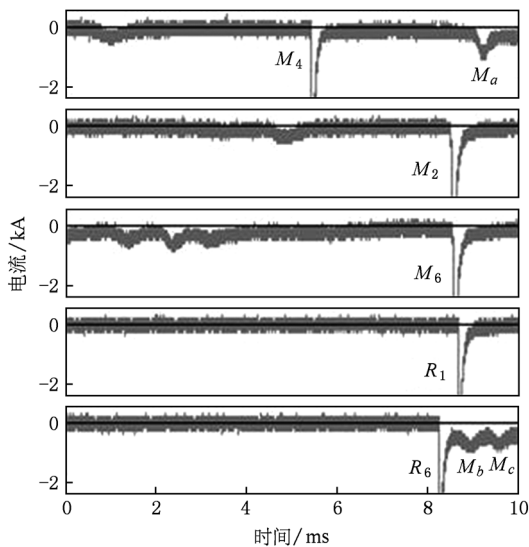


图4 高速摄像得到的先导-回击过程和  $M$  分量过程发生前的通道亮度图像

图4 给出了  $M$  分量和回击发生前, 自然放电通道部分的亮度情况 (由于记录时间设置的问题,  $R_4$  未被记录). 可以看到, 相比回击发生前,  $M$  分量发生前的闪电通道存在较为明显的发光, 这证实了  $M$  分量发生前闪电通道的电离程度要优于回击发生前. 需要说明的是, 图4 中显示, 回击发生前的闪电通道中仍呈现一定的发光, 表明此时通道中有很微弱的电流流过, 这与已有的对回击过程研究的结论存在一定差异, 其详细的物理过程将另文进行分析.

图5 给出了几次  $M$  分量和回击发生之前电流记录波形的时间展开图, 时间长度取  $10 \text{ ms}$ , 由于电流测量系统背景噪声约为  $53 \text{ A}$ , 较小的电流值难以分辨和读取, 所以图中标出了零线位置以便比较, 并截取了相同的纵轴宽度, 大于纵轴范围的脉冲即为所讨论的  $M$  分量和回击. 可以看到, 在回击发生之前较长时间内, 电流基本上处于零线上, 而  $M$  分量发生前的电流存在一定的波动, 偏离零线, 这进一步证实了连续电流的存在. 当然, 在接近于  $M$  分

图5  $M$  分量和回击之前的电流变化情况

量发生时, 电流与零线的偏离并不明显, 这一方面可能是因为实际的电流信号淹没于背景噪声中难以辨认, 另一方面可能是因为相应的连续电流确实比较小. 同时, 详细分析所有 6 个  $M$  分量发现, 在接近  $M$  分量发生时, 电流有逐渐向零减小的趋势, 这种趋势在  $M_6$  中体现得较为明显(见图 4). 以上分析说明了我们观测到的这些  $M$  分量, 在发生之前放电通道中的连续电流并不十分可观. 实际上, 图 5 中的几个电流弱峰, 比如所标示的  $M_a, M_b, M_c$ , 都是较为典型的  $M$  分量<sup>[23]</sup>, 它们的电流峰值为几百安培, 电流上升时间和半峰值宽度等都与已有文献的研究结果比较一致. 从电流波形上看,  $M_a$  等发生时, 连续电流都较为明显, 且并非呈现减弱趋势. 所以, 前一时刻闪电通道的物理状态, 是影响其后所发生的物理过程的重要因素. 我们观测到的这几次峰值达几千安量级的  $M$  分量, 连续电流存在但是并不十分可观, 其归零的变化趋势, 可能在客观上要求这些较强的  $M$  分量的始发过程比一般  $M$  分量强, 云地电荷发生转移及中和时的电荷密度也大, 并进一步导致了通道中电流的上升陡度、峰值较大, 而波形的半峰值宽度等时间参数较小.

#### 4.2. $M$ 分量由上向下发展的起始过程

$M$  分量是由上行过程还是下行过程激发, 不同学者的观点并不一致. Rakov 等<sup>[5, 17]</sup> 的双波理论认为  $M$  分量起始于云对地的入射波过程; Shao 等<sup>[16]</sup> 认为  $M$  分量是云内通道的发展与到地的通道连接;

而 Wang 等<sup>[18]</sup> 认为  $M$  分量是通道不同位置发生的各种波的混合现象, 并相互影响, 根据其理论,  $M$  分量既可能起始于上行过程也可能起始于下行过程. 通过我们的分析发现, 所有  $M$  分量都存在通道底部的电流变化滞后于 30 m 处电场变化的情况, 且呈现比较一致的波形特征, 这说明不同  $M$  分量发生的物理过程是总体相似而不是存在显著个体差异的. 进一步分析图 2(a) 可以知道, 对于先导-回击过程, 通道底部电流开始变化的时间, 大致是直窜先导接地并且回击发生的时间, 所以, 产生于该时间之前的电场上升沿波形, 可以认定是由直窜先导所导致的, 它是从雷暴云开始, 沿通道发展的下行过程. 而对于图 2(b),  $M$  分量的电场波形的上升沿, 与先导-回击过程的电场上升沿, 存在明显的相似性(除时间长短外), 再结合其电流变化滞后于电场变化的观测事实, 认定我们所观测到的  $M$  分量是起始于由上向下发展的过程, 与 Rakov 等<sup>[5, 17]</sup> 一致.

张其林等<sup>[24]</sup> 曾用源电荷模式分析直窜先导过程, 得出距离闪电通道 60 m 处 60% 的先导电场变化来自于 110 m 以下通道, 而 90% 来自于 460 m 以下通道的结论. 实际上, 在距离更近的 30 m 处, 不论是  $M$  分量的下行始发过程还是先导过程, 电场变化都将更为明显的体现为主要受较低通道的影响. 由于近距离电场主要是静电场, 所以电场达到峰值的时间, 基本上对应了闪电通道中所含电荷量最大的时间; 而通道底部电流开始变化的时间, 就是先导接地或  $M$  分量下行过程接地的时间. 根据表 1, 回击过程的电场峰值滞后电流开始时间  $t_s$  为亚微妙量级, 而  $M$  分量的  $t_s$  则达几十微秒, 这说明先导接地后通道中负电荷迅速被中和, 电场迅速呈现反向变化, 而  $M$  分量下行过程接地后, 30 m 处电场仍在增强, 说明在一定时间内, 通道中的净负电荷仍在增加, 下行过程仍在增强.

#### 4.3. $M$ 分量下行过程接地后的反射过程

对先导-回击过程(仅讨论负极性闪电)而言, 当先导接地后, 将随即发生自下而上发展的回击过程, 通道中负电荷被迅速中和, 使电场呈现反向变化, 表 1 中  $t_D$  列出了几个回击的电场由峰值降至 30% 峰值的电场变化时间, 不到 1  $\mu$ s. 同样,  $M$  分量的下行过程接地后, 也将激发一个反射过程, 这可由电场先于电流达到峰值的观测事实得到证明, 同时, 当所测电场降至较低水平时, 电流仍然较大也

进一步说明了这一点. 反射过程在 Rakov 等<sup>[17]</sup>的双波理论中被明确提出, 他们对反射波与入射波的关系做了几个重要的假定: 1) 电流的反射系数为正 1; 这样, 由于通道底部电流为入射波和反射波的同相位叠加, 可根据实测电流得到入射波、反射波随时间的变化; 2) 入射波和反射波在通道中以固定的速度传播并且在传播过程中不发生任何畸变和衰减; 据此能进一步得到通道中电流的时空演化; 3) 电荷的反射系数为负 1; 入射波和反射波产生极性相反的电场,  $M$  电场实际上是二者之差. Rakov 等<sup>[5, 17]</sup>据此建立了  $M$  分量的双波模型, 并解释了  $M$  分量电场随距离的衰减要弱于先导-回击过程. 根据这一双波模型, 下面我们对 30 m 处电场进行模拟, 并与实测结果进行对比.

假定放电通道垂直于地面, 通道中电流的时空分布为

$$I(Z, t) = I(H, t - (H - Z)/v), \quad t < H/v, \quad (1)$$

$$I(Z, t) = I(H, t - (H - Z)/v) + I(H, t - (H + Z)/v), \quad t \geq H/v, \quad (2)$$

式中  $H$  为整个通道的高度, 假定为 5 km,  $v$  为入射波和反射波的传播速度, 假定为  $5.5 \times 10^7$  m/s.

距离通道  $D$  处的地面垂直电场为

$$E(D, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \left[ \frac{2Z^2 - D^2}{R^5} \int_0^t I(Z, \tau - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{2Z^2 - D^2}{cR^4} I(Z, \tau - \frac{R}{c}) - \frac{D^2}{c^2R^3} \frac{\partial I(Z, \tau - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] dZ, \quad (3)$$

式中  $D = 30$  m,  $R = \sqrt{D^2 + Z^2}$ , 公式中包含三项, 分别对应静电场、感应场和辐射场, 由于距离较近, 电场主要表现为静电场, 在静电场假定下, 地面垂直电场可简化为

$$E(D, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{\rho_L(Z, t - \frac{R}{c}) Z}{(D^2 + Z^2)^{3/2}} dZ, \quad (4)$$

式中  $\rho_L$  为  $Z$  高度处的电荷密度(单位长度电荷量), 根据双波理论中通道不沉积电荷的假设, 有  $\rho_L(Z, t) = \frac{I(Z, t)}{v}$ , 所以得到

$$E(D, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 v} \int_0^H \frac{I(Z, t - \frac{R}{c}) Z}{(D^2 + Z^2)^{3/2}} dZ. \quad (5)$$

图 6 给出了根据实测电流波形对  $M_1$  的电场模拟结果与实测结果的对比, 为了去除由连续电流的作用而产生的影响, 图中统一将电场调整为从零开始变化. 可以看到, 模拟结果与实测结果具有一定的一致性, 尤其是二者的上升沿有较为明显的对应, 这表明双波理论的描述与  $M$  分量实际在通道中的发展过程是基本符合的. 当然, 模拟电场的后半部分存在一定的过冲, 而实测电场则基本降回至零值, 这个误差的出现与双波理论的理想假定有一定联系.

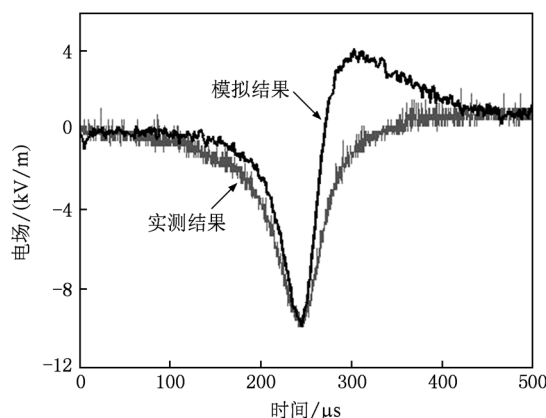


图 6  $M_1$  在 30 处地面电场的模拟结果与实测结果的对比

实际上, 在双波理论中, 由于反射波在入射波接地后才被激发, 所以二者对通道的作用存在一定的时间差, 那么当入射波接近结束时, 反射波由于时间上的滞后将在通道中起主导作用, 根据电荷反射系数为负 1 的假定, 此时通道中将出现正电荷净余, 并进一步导致模拟电场出现正值, 这与我们的实际观测结果是不相符的. 所以, 虽然模拟结果基本正确, 但双波理论中对入射波和反射波的理想假定并不能完全适用于这几次  $M$  分量. 由于模拟误差主要出现于电场变化波形的下降沿, 说明入射波与反射波在通道中的相互作用可能是随高度而变化的.

## 5. 结论与讨论

详细分析了由人工触发闪电实验得到的 6 次强烈  $M$  分量特征, 其峰值电流范围为 3.8—7.0 kA, 平均为 5.5 kA; 电流波形 10%—90% 峰值的上升时间为 12—72  $\mu$ s, 平均为 42  $\mu$ s. 这些  $M$  分量的峰值电流和 10%—90% 峰值电流上升时间, 与已有文献的

常规观测结果存在一定差异. 同步记录的电流波形和近距离电场波形均呈现类似于 V 形的准对称性, 电场波形先于电流波形发生变化, 电流峰值也滞后于电场峰值.

由高速摄像资料和电流测量资料判断, 所分析的  $M$  分量在发生之前, 闪电通道存在弱的连续电流, 其通道的导电性优于先导-回击过程发生之前. 电流和电场的同步波形特征表明,  $M$  分量是起始于由上向下发展的过程, 该过程在接地后一定时间内仍继续发展增强. 在  $M$  分量的下行过程接地后, 将发生反射过程, 下行过程和反射过程的相互作用可能是随高度而变化的. 这几次  $M$  分量的观测事实, 一方面与 Rakov 等的双波理论对  $M$  分量基本物理过程的解释相符合, 另一方面, 与其理论中的理想

假定也存在一定出入.

由于我们设置的高速摄像系统的拍摄速度较低,  $167 \mu\text{s}$  时间分辨率的摄像资料难以体现更为细节的通道亮度变化信息, 而电流测量系统的背景噪声则使得较小的电流难以分辨, 这些导致了我们对一些物理过程的分析难以实现更精确的量化. 所以, 虽然本文得到了关于几次特殊  $M$  分量物理过程的一些结论, 但要进一步完善  $M$  分量的物理机制或建立更合理的物理模型并加以验证, 仍需要积累更多的由不同观测手段获取的高时间分辨率、高精度资料以做更深入的研究.

感谢山东省防雷中心和滨州市气象局对人工引雷实验的大力支持; 感谢所有参与野外观测的实验人员.

- [1] Wang D, Takagi N, Watanable T, Rakov V A, Uman M A 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 14369
- [2] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 郗秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [3] Zhang Q L, Qie X S, Wang Z H, Zhang T L, Yang J 2009 *Radio Science* **44** RS1011
- [4] Wu M L, Xu J Y, Ma R P, Zhang T L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5007 (in Chinese) [吴明亮, 徐寄遥, 马瑞平 2006 物理学报 **55** 5007]
- [5] Rakov V A, Crawford D E, Rambo K J, Schnetzer G H, Uman M A 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 22817
- [6] Wang D H, Qie X S, Guo C M 1999 *Lightning and Artificially Triggered Lightning*. (Shanghai: Shanghai Jiaoda Press) p1 (in Chinese) [王道洪, 郗秀书, 郭昌明 1999 雷电与人工引雷(上海: 上海交大出版社) 第 1 页]
- [7] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 郗秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [8] Shindo T, Uman M A 1989 *J. Geophys. Res.* **94** 5189
- [9] Fisher R J, Schnetzer G H, Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A, Goldberg J D 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 22887
- [10] Malan D J, Collens H 1937 *Proc. R. Soc. London A* **162** 175
- [11] Thottappillil R, Goldberg J D, Rakov V A, Uman M A, Fisher R J, Schnetzer G H 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 25711
- [12] Jordan D M, Rakov V A, Beasley W H, Uman M A 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 22025
- [13] Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, Fernandez M I, Fisher R J, Schnetzer G H, Thottappillil R, Eybert-Berard A, Berlandis J P, Lalande P, Bonamy A, Laroche P, Bondiou-Clergerie A 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 14117
- [14] Campos L Z S, Saba M M F 2007 *Atmos. Res.* **84** 302
- [15] Campos L Z S, Saba M M F 2009 *Atmos. Res.* **91** 416
- [16] Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 2749
- [17] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A, Fisher R J, Schnetzer G H 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 25701
- [18] Wang D, Takagi N, Watanable T 2007 *J. Atmos. Elec.* **27** 61
- [19] Qie X S, Zhang Q L, Zhou Y J, Feng G L, Zhang T L, Yang J, Kong X Z, Xiao Q F, Wu S J 2007 *Science in China D* **50** 1241 [郗秀书, 张其林, 周筠珺, 冯桂力, 张廷龙, 杨静, 孔祥贞, 肖庆复, 吴书君 2007 中国科学 D **37** 564]
- [20] Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, Yang J, Feng G L, Kong X Z, Zhou Y J, Zhang T L, Zhang G S, Zhang T, Wang D F, Cui H H, Zhao Z K, Wu S J 2009 *Atmos. Res.* **91** 310
- [21] Wang D, Rakov V A, Uman M A, Fernandez M I, Rambo K J, Schnetzer G H, Fisher R J 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 4213
- [22] Wang C W, Liu X S, Dong W S, Zhang C H 1998 *Plateau Meteorology* **17** 10 (in Chinese) [王才伟, 刘欣生, 董万胜, 张翠华 1998 高原气象 **17** 10]
- [23] Wang C X, Qie X S, Yang J, Jiang R B, Zhang Q L, Wang J F 2010 *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & Technical Exhibition on EMC RF/Microwave Measurement & Instrumentation* Beijing, April 12—16, 2010 p1303
- [24] Zhang Q L, Qie X S, Zhou J J, Zhang T L, Kong X Z, Feng G L, Yang J, Zhao Y, Zhang Y J 2006 *High Power Laser and Particle Beams. Geophys.* **18** 2004 (in Chinese) [张其林, 郗秀书, 周筠珺, 张廷龙, 孔祥贞, 冯桂力, 杨静, 赵阳, 张义军 2006 强激光与粒子束 **18** 2004]

## Lightning $M$ -components with peak currents of kilo amperes and their mechanism\*

Jiang Ru-Bin<sup>1)2)</sup> Qie Xiu-Shu<sup>1)†</sup> Wang Cai-Xia<sup>1)2)</sup> Yang Jing<sup>1)</sup> Zhang Qi-Lin<sup>3)</sup>  
Liu Ming-Yuan<sup>3)</sup> Wang Jun-Fang<sup>1)2)</sup> Liu Dong-Xia<sup>1)2)</sup> Pan Lun-Xiang<sup>1)2)</sup>

1) (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2) (Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Department of Lightning Science and Technology, College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(Received 27 April 2010; revised manuscript received 29 September 2010)

### Abstract

Characteristics of six  $M$ -components with peak currents of kilo amperes are analyzed by using the data from the artificially triggering lightning experiment in Shandong 2009, including the current at the base of the discharge channel, the surface electric field change at 30 m from the channel, and the high-speed camera records. The  $M$ -component is associated with the abrupt enhancement of channel luminosity with a duration of less than 1ms. Both the current and electric field are characteristic of relatively symmetric waveforms with a rise time of several tens of microseconds. The simultaneous records show that the electric field starts to change and reaches its peak earlier than the channel base current. Because of the obvious continuing current flowing in the channel, the conductivity of the discharge channel prior to the  $M$ -component is better than that prior to the leader-return strokes. The channel condition before the occurrence of the  $M$ -component is crucial to current amplitude and rise time. According to the waveforms of current and electric field recorded simultaneously, it is inferred that the  $M$ -component evolves from up to down and the evolvement continues after contacting the ground, and then an upward reflected process is induced. Further analysis shows that the interaction between these two processes is likely to be changed with altitude.

**Keywords:** lightning,  $M$ -component, leader-return stroke, discharge current

**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta

---

\* Project supported by the Special Project for Commonweal Industry Scientific Research of China (Grant No. GYHY QX200706022), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40774083, 40804028), National Science and Technology Support Projects (Grant No. 2008BAC36B03), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences, and PHR(IHLB) (Grant No. PHR201008435).

† Corresponding author. E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn