

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.
doi:10.11898/1001-7313.20150407

两种类型 M 分量物理特征和机制对比

谢盟¹⁾²⁾ 张阳^{1)*} 张义军¹⁾ 吕伟涛¹⁾ 郑栋¹⁾

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⁾(成都信息工程大学, 成都 610225)

摘 要

综合分析人工触发闪电通道底部的电流数据和电场变化数据,获得对 M 分量的新认识。M 分量的幅值、上升时间、半峰值宽度、转移电荷量的几何平均值分别为 301 A, 341 μs , 662 μs , 0.207 C。但发现有两种类型的 M 分量,其统计特征和分布特征均体现了较大差别。第 1 类 M 分量幅度较小,半峰值宽度较大,上升时间较长;第 2 类 M 分量则幅度较大,半峰值宽度较小,上升时间较短,两类 M 分量和回击的时间间隔有较大差异。采用双波放电模型,通过设定不同入射电流波速度和反射电流波速度,对两类 M 分量进行从电流到电场的反演。结果表明:当模拟电场和测量电场比较一致时,第 1 类 M 分量的入射速度和反射速度的比值大于第 2 类 M 分量,即两类 M 分量的放电机制具有一定差异。

关键词: 触发闪电; M 分量; 分类; 物理机制

引 言

闪电是大气中的超强、超长放电现象,它具有随机性、瞬时性特点^[1-2]。M 分量是闪电连续电流过程中电流的扰动或暂态增强^[3-4],通常人们认为它与雷电通道微弱发光时,通道亮度瞬时性增强相对应^[5-6],其电流强度和光强度随时间变化具有一定对称性^[7-11]。虽然关于 M 分量的研究很多,但以往研究主要集中在 M 分量的总体特征方面,包括波形特征、光学特性等。如 Thottappillil 等^[4]分析了人工触发闪电的通道底部电流,统计发现 M 分量的幅值范围为 100~200 A,上升时间范围为 300~500 μs ,转移电荷量范围为 0.1~0.2 C。Qie 等^[11]对触发闪电中 63 次 M 分量的电流波形特征进行统计,幅值、持续时间、转移电荷量的几何平均值分别为 276 A, 1.21 ms, 101 mC。肖桐等^[12]统计了人工触发闪电 M 分量对应电流和电磁场波形的特征,发现 M 分量电

磁场和电流在峰值幅度上具有较显著的相关性,几何形状也比较一致。

随着技术手段进步和研究深入,近年对 M 分量机制探讨逐渐增多,也出现了对特殊 M 分量的关注。如研究发现千安量级的大幅值 M 分量,其强度和较弱的回击相当^[13];部分 M 分量的幅值超过 5 kA,上升时间低于 2 μs ,它们的波形接近较小的继后回击,并认为这类 M 分量是在某一条通道分支流过连续电流时,另一正在衰退的通道分支中流过直窜先导与其叠加形成的^[14];蒋如斌等^[15]分析了 6 次幅值达到几千安量级的 M 分量,给出了波形统计特征(幅值为 3.8~7.0 kA,上升时间为 12~72 μs),且通过物理模型的反演计算,认为该类 M 分量和通常的 M 分量有不同的物理机制,其产生与雷电通道状态有一定的关系。上述研究虽然给出了大幅值 M 分量的描述,但未明确给出其与通常 M 分量的具体统计差异,也未比较其放电过程的差别。

本文分析了 2008—2013 年广东闪电综合观测

2014-11-24 收到, 2015-02-09 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41205002, 41030960), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2012Y006), 科技部科研院所技术开发专项(2011EG137226)

* 通信作者, email: zhangyang@cams.cam.gov.cn

试验(GCOELD)的人工触发闪电电流资料,得到31次M分量的幅值、上升时间、半峰值宽度、转移电荷量等数值特征。采用将M分量分为两类的方法,对特殊M分量和通常M分量分别进行特征统计,并进行全面比较。最后通过M分量的双波模型反演了两类M分量的电场,对它们物理机制上的异同进行探讨。

1 试验和资料

本研究所涉及的资料包括通道底部电流资料和近距离慢电场资料,均来自广东闪电综合观测试验。

自然闪电的发生具有较强随机性,很难实现定点观测^[16]。人工触发闪电技术通过在适宜的雷暴条件下将闪电人为引发到地面,具有时间和地点的可预知性^[17-18]。如图1所示,当闪电成功触发时,电流经同轴分流器流入地面,同轴分流器能够在电流下维持较恒定的阻值,因此,其两端电压和电流呈线性关系,HBM(Hottinger Baldwin Messtechnik)电光转换将同轴分流器的电压信号转化为光学信号,由光纤传输到控制室内,再通过HBM电流记

录设备中的光电转换模块重新转换为电信号。HBM在记录雷电流的同时通过一个输出端口将信号传输至横河DL850示波器,同时,该示波器也在采集慢电场资料(由慢电场天线测量,带宽200 Hz~2 MHz,时间常数为2 ms,距离引流杆约90 m),示波器各路的采样率均为10 MS/s。在通过HBM获得精细雷电流波形的同时,也实现了电流、电场的同步采集。

本文所分析的M分量来自2008—2013年广东闪电综合观测试验,共成功触发45次,获得电流资料共包含59次回击。若M分量波形相互重叠,M分量发生时连续电流很不平稳,将无法得到准确的波形特征,这里仅对未与其他波形叠加且连续电流比较平缓的M分量进行统计,共计31个样本。

图2a给出了一次触发闪电获得的电流波形片段(编号20130603)。电流在20 ms附近从突变到数千安,对应了触发闪电的一次回击(通常情况下,M分量的幅值为几百安,因此,这里所给出电流波形为2 kA量程,回击的峰值通常在几千安到几十千安,2 kA量程下,电流会达到饱和)。回击后电流并未立刻恢复初始的状态,而是经过约100 ms才缓慢下降到背景值,这是由于回击之后,雷电通道中发生了连续电流,它是一种持续的低频过程。连续电流上出现了几次小波动,这些电流脉冲对应M分量过程。参考过去对于雷电流资料的分析方法^[4],本文首先找到回击电流脉冲,确定回击后发生连续电流,再从连续电流波形上找出相对平稳时的电流扰动,即M分量。当连续电流相比之前的电流水平出现初始扰动,这一时刻被认定为M分量的起始点;当M分量脉冲下降到和连续电流波形无法分辨时,这一时刻被认定为M分量的终点^[4]。参考文献^[17]

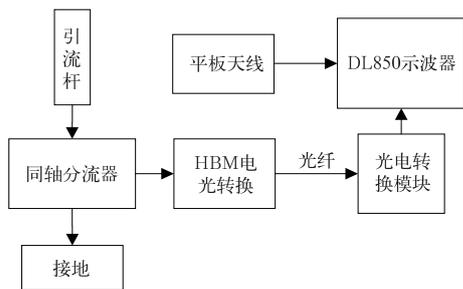


图1 试验设备示意图

Fig.1 Experimental equipment diagram

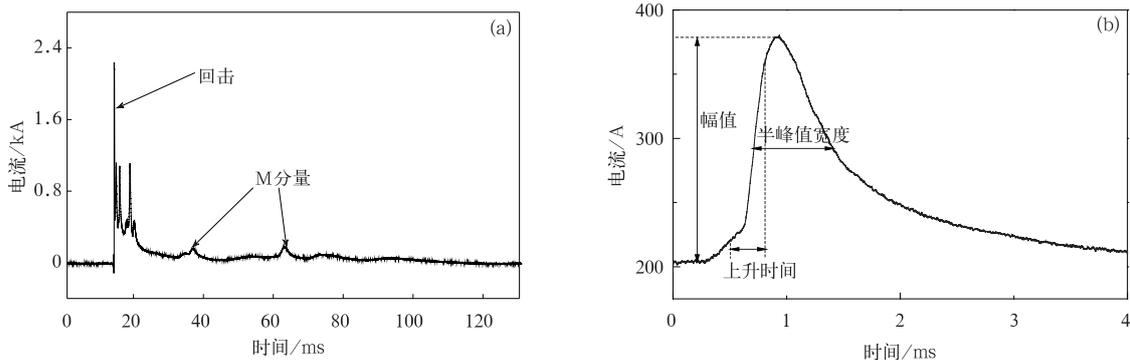


图2 触发闪电电流示例 (a)电流波形,(b)电流脉冲主要参数

Fig.2 Current for artificial triggered lightning (a)current waveform, (b)parameters of current pulse

对回击各参量的定义,图 2b 给出了 M 分量幅值、上升时间、半峰值宽度的定义:M 分量幅值是 M 分量峰值与 M 分量起始点连续电流强度的差值,上升时间是上升沿 10%和 90%值处的时间差,半峰值宽度为波形上升沿和下降沿 50%值处的时间差。转移电荷量为图 2b 中波形由起始点到终点对时间的积分。本研究主要关注 M 分量的幅值、上升时间、半峰值宽度和转移电荷量。

2 M 分量的分类比较

2.1 M 分量的基本特征和分类

2.1.1 M 分量的总体特征

表 1 列出了 M 分量的统计特征,幅值、上升时

间、半峰值宽度和转移电荷量的几何平均值分别为 301 A, 341 μs , 662 μs , 0.207 C。由表 1 可以看出,中国广东触发闪电 M 分量幅值的几何平均值与中国山东的结果比较接近;上升时间几何平均值与美国佛罗里达的结果接近,皆在 350 μs 左右;半峰值宽度几何平均值与美国佛罗里达的结果接近,均超过 600 μs 。不同的是,中国广东转移电荷量的几何平均远高于以往的统计结果,约是其他两地结果的 2 倍。总体而言,中国广东触发闪电 M 分量的强度和山东滨州的结果相近,时间参数与美国佛罗里达结果相似,转移电荷量远大于其余两地的统计结果。

图 3 给出了 M 分量的幅值、上升时间、半峰值宽度及转移电荷量的分布。半数以上(21/31)的 M

表 1 不同地点人工触发闪电 M 分量基本特征的统计结果
Table 1 Statistical results for M-component characteristics from different experiment sites

特征量	中国广东从化	中国山东滨州 ^[19]	美国佛罗里达 ^[20]
幅值/A	301	276	136
上升时间/ μs	341	251	353
半峰值宽度/ μs	662	242	612
转移电荷量/C	0.207	0.101	0.129

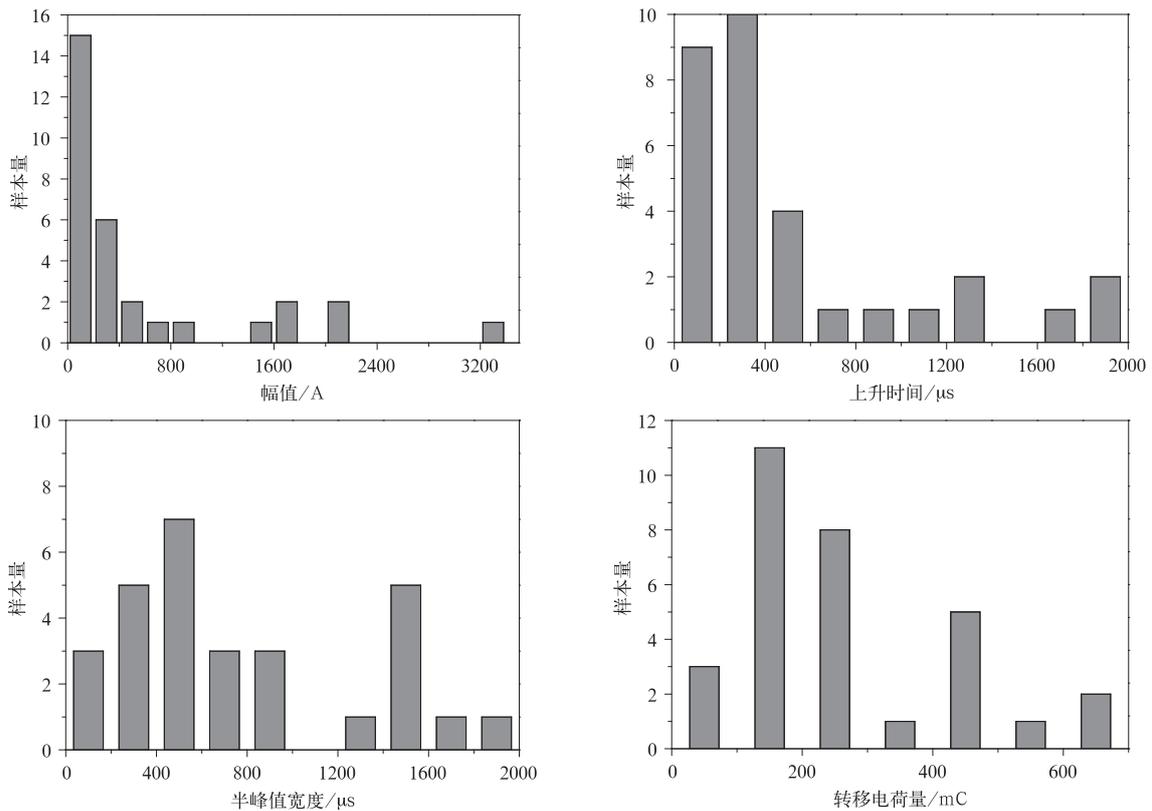


图 3 M 分量基本特征分布

Fig. 3 Distribution for M-component characteristics

分量幅值低于400 A,但部分(5/31)M分量幅值为1400~2200 A,最高达3200 A。M分量的上升时间主要分布于0~600 μs (23/31),过半数(19/31)的M分量上升时间小于400 μs 。大部分(21/31)M分量的半峰值宽度小于1000 μs ,1200 μs 以上仅在1400~1600 μs 区间有多个样本(5/31)。M分量的转移电荷主要分布在100~300 mC(19/31)。

M分量的幅值、上升时间、半峰值宽度、转移电荷量的分布中,有一些M分量表现出了不同特性。图3中有6个M分量的幅值大于1 kA,最高超过3 kA。结合特殊M分量研究^[14-15,21],本文推断这6个M分量的物理机制与通常的M分量有所区别。因此,本文将按幅值大于等于或小于1 kA对M分量进行分类,深入分析M分量的特征和物理机制。

2.1.2 M分量的分类及基本特征比较

本文将M分量按照幅值大小分为两类:第1类幅值小于1 kA,第2类幅值大于等于1 kA,并分别获得了两类M分量各参量的几何平均值,结果见表2。可以看出,第2类M分量的幅值大约是第1类M分量幅值的10倍,其上升时间和半峰值宽度约是第1类M分量的1/4。

图4给出了第1类M分量和第2类M分量分布。第2类M分量的上升时间均小于400 μs ,其中过半数小于200 μs ,第2类M分量的上升时间普遍小于第1类M分量。第2类M分量的半峰值宽度均小于400 μs 。上升时间与半峰值宽度中,第2类M分量的波形不仅陡度较大,波形也较窄。第1类M分量电荷转移量多为100~300 mC,第2类M分量的转移电荷量的分布较为随机,但整体较大,半数以上的转移电荷超过了400 mC。

表2 第1类和第2类M分量特征比较

Table 2 Comparison of two types of M-component

特征量	第1类M分量	第2类M分量
幅值/A	191	2005
上升时间/ μs	452	105
半峰值宽度/ μs	866	216
转移电荷量/C	0.176	0.407

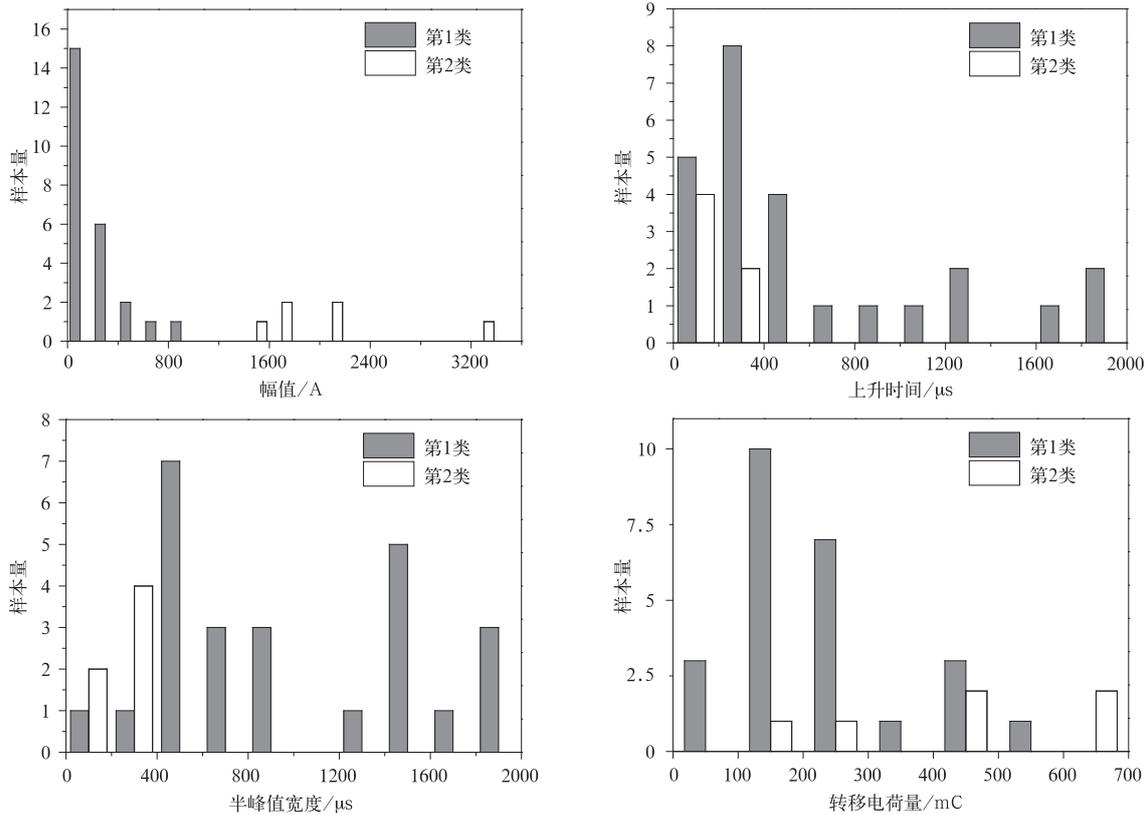


图4 两类M分量的基本特征分布

Fig. 4 Distribution of M-component characteristics

对M分量进行分类后,两类M分量特征表现差异较大。第2类M分量比第1类M分量的幅值更高,上升时间更短,半峰值宽度更小,转移电荷量更大,两类M分量的产生机制可能存在区别。

图5给出了两类M分量幅值与回击到出现M分量时间差的关系。可以看出,回击到第2类M分量出现时间普遍较短(时间差最大为22.56 ms),回击发生50 ms以上时,出现的M分量均属于第1类M分量。这说明,在长连续电流的中后期(150 ms后),仍具备产生第1类M分量的条件,而第2类M分量似乎只出现在回击发生后不久,可能由于回击发生后的一段时间内(几十毫秒),通道的状态更容易产生内部击穿^[21],或在这段时间内通道存在更多分支所导致^[14]。

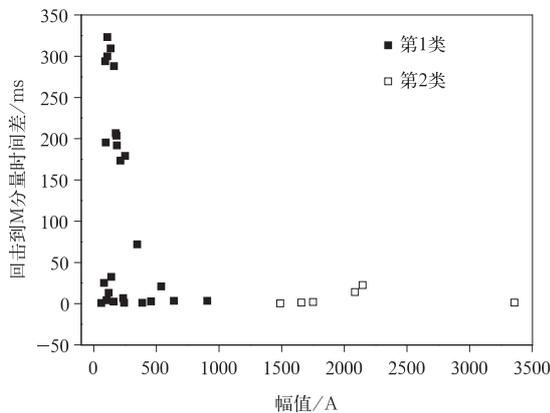


图5 两类M分量幅值与回击到M分量时间差的关系

Fig. 5 Relationship between M-component amplitude and the lag between return stroke and M-component

第2类M分量的幅值远大于第1类M分量几百安培的幅值,达到数千安量级。本文研究发现,6次M分量背景值均低于100 A,而多数第1类M分量的背景值约为200 A,蒋如斌等^[15]分析了幅值较大的M分量和典型的M分量,并发现在幅值较大的(第2类)M分量发生时,电流呈现逐渐减小的趋势,而在较典型(第1类)M分量发生时,连续电流较明显,未呈下降趋势。连续电流状态侧面反映,当第2类M分量发生时,通道的电离程度较低,状态较差,而在第1类M分量发生时,通道内有可观的连续电流,通道状态相对较好,这与图5所得结果一致。前一时刻通道的物理状态,是影响其后所发生物理过程的重要因素^[15],根据通道状态的差异,可

以推测第2类M分量的产生机制和第1类M分量有一定区别。

2.2 两类M分量物理机制的比较

Rakov等^[6]提出了M分量的双波物理机制,机制假设雷电电流波在通道底部会发生反射,M分量由下行入射电流波和上行反射电流波叠加产生。双波物理模型已被用于M分量物理机制研究,在未考虑M分量分类的情况下,有研究对M分量产生的电场进行反演,所得计算电场和测量电场有较好的一致性,但在波形下降沿有较大差别^[7,15]。模型假设如下:电流的反射系数为+1;入射波和反射波在通道中匀速传播,且不发生任何畸变;电荷的反射系数为-1,通道与地面垂直。本文针对特征上具有差异的两种M分量,采用双波模型进行反演计算验证,以期获得对这两类M分量的更深入认识。

在采用双波模型对M分量电场进行反演的研究中,电流波的入射速度和反射速度通常设为相等^[7,15,19]。事实上,电流入射波和反射波速度并不一定相等,这可能是之前研究中测量电场和计算电场在下降沿出现差别的原因。Chen等^[22]通过甚高频干涉仪观测触发闪电时发现,部分(1次)M分量的物理过程对应了从云到地的较快下行过程(6.2×10^6 m/s)及由地到云的较快上行过程(2.2×10^6 m/s)。下行过程沿云中电荷的击穿通道进入雷电通道,再经过雷电通道流入地面,上行过程则沿下行过程的路径反向传播。多数M分量(7次)对应了发生在云中的击穿过程,这样的击穿过程一般发生在分支通道的末端。Shao等^[21]也提出,部分M分量是通道上部出现的正极性流光反射形成的,而反冲流光的速度比正极性流光更快。因此,本文尝试将电流波的入射、反射速度分别设为 v_1, v_2 ,参考Rakov等^[6]等给出的电流表达式,通道中某高度某时间的电流如式(1)所示:

$$I(Z, t) = \begin{cases} I(H, t - \frac{H-Z}{v_1}), & t < \frac{H}{v_1}; \\ I(H, t - \frac{H-Z}{v_1}) + I(H, t - \frac{H+Z}{v_2}), & t \geq \frac{H}{v_1}. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, H 为雷电通道的总高度, Z 对应通道中某处的高度, t 为时间, v_1 和 v_2 为电流波的入射和反射速度,这是一个以电流波发生反射的时刻作为分界点的分段函数。反射前,任意高度电流只与 $[t -$

$(H-Z)/v_1]$ 时刻通道顶部的电流强度 $I(H, t - (H-Z)/v_1)$ 有关,而在电流波传播至通道底部后,通道中入射电流波和反射电流波开始叠加, $I(H, t - (H+Z)/v_2)$ 对应 t 时刻高度 Z 处的反射电流波强度。通过电荷密度和电流的关系, M 分量电场的垂直分量和电流的关系可表示为

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

式(2)中, D 为电场测量点到雷电通道的水平距离, 试验场的平板天线距离接闪杆约为 90 m。 $R = \sqrt{D^2 + Z^2}$, 上面的表达式可以分为 3 部分, 它们分别对应了静电场、感应场、辐射场。通常假设通道高度 $H = 5$ km。

这里分别选出 1 个第 1 类 M 分量波形和 1 个第 2 类 M 分量波形进行电场反演, 两个 M 分量的电流波形如图 6 所示。其中, 第 1 类 M 分量的波形来自 2014 年 6 月 20 日触发闪电第 3 次回击对应的连续电流, 第 2 类 M 分量的波形来自 2014 年 6 月 3 日第 7 次回击对应的连续电流。为了减小电流噪声对反演结果的影响, 本文对波形进行了滑动平均处理。

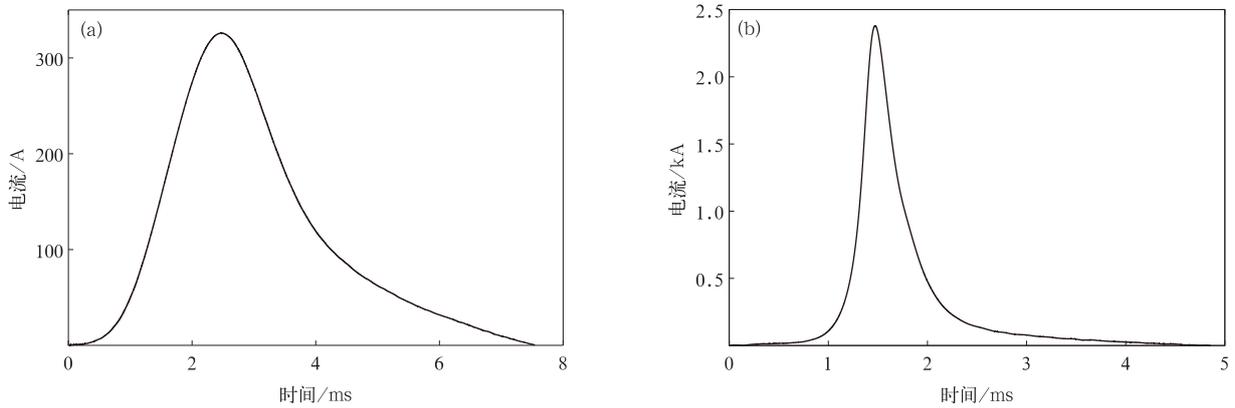


图 6 第 1 类 M 分量(a)和第 2 类 M 分量(b)的电流波形

Fig. 6 Current waveform of Type 1(a) and Type 2(b) M-component

本文尝试了 v_1, v_2 取值为 $1 \times 10^6 \sim 40 \times 10^6$ m/s 的多种组合, 图 7a 给出了第 1 类 M 分量的最佳计算电场波形, 对应 $v_1 = 2 \times 10^6$ m/s, $v_2 = 4 \times 10^6$ m/s。图 7b 给出了第 2 类 M 分量的最佳计算电场波形, 对应 $v_1 = 9 \times 10^6$ m/s, $v_2 = 4 \times 10^7$ m/s, 两类 M 分量

在一致性较好时的参数设置并不相同, 第 1 类 M 分量对应的 $v_1/v_2 = 1/2$, 而第 2 类 M 分量一致性最佳时 $v_1/v_2 = 9/40$, 这说明了两类 M 分量的放电过程存在差别。计算电场和测量电场被表示在同一坐标系下, 以便比较, 设初始电场为 0。

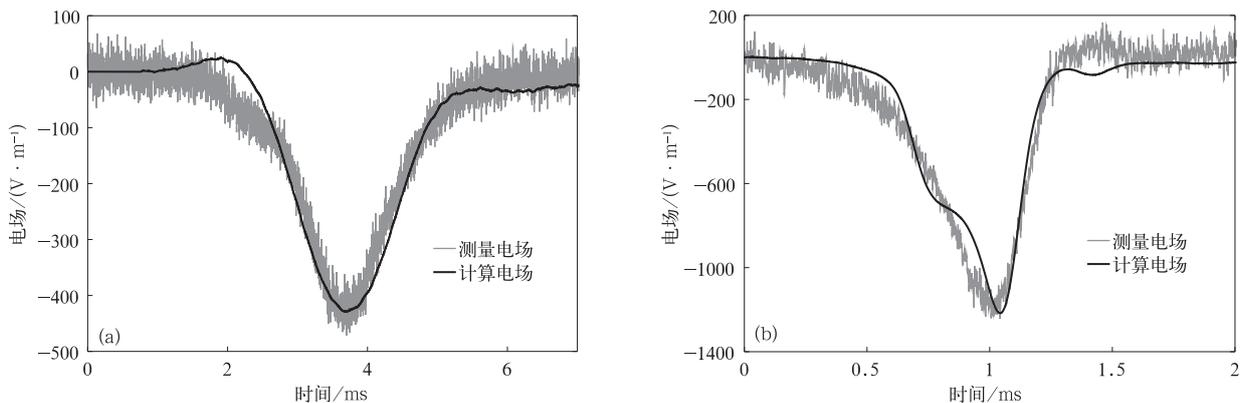


图 7 第 1 类 M 分量(a)和第 2 类 M 分量(b)与测量电场一致性最佳的电场计算结果

Fig. 7 Calculated result for Type 1(a) and Type 2(b) M-component, which is most consistent with measured field

有研究也佐证了本文的推测。Shao等^[21]通过无线电干涉仪观测云地闪发现,通常情况下,M分量是云中电荷通过击穿过程汇入雷电主通道,并经该通道流入地面的物理过程。但存在部分M分量,它们对应了由通道上部产生正极性流光,并沿回击通道(非该M分量所对应回击的通道)传播,在分支末端发生反冲,并以更快的速度沿分支通道返回,再经主通道流入地面。在验证不同速度下M分量计算电场和测量电场的一致性时,两类M分量的 v_2 均大于 v_1 ,但第2类M分量的 v_1, v_2 相差更大。因此,第1类M分量对应了通常情况下云中电荷击穿汇入主通道的过程,而第2类M分量对应了正极性流光-反冲流光过程。

通道上部击穿引发的M分量可能是由于回击发生后,通道分支中存在未能完全中和的电荷(可能是由于这条分支的导通性较差),且有分支通道发生连续电流,维持主通道的电离状态。若残余电荷经过短时间的积累,发生击穿,有可能重新导通分支通道和主通道,产生上面所述的“特殊”M分量。通道上部击穿引起的流光速度较快($2 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ m/s,云中电荷击穿为 1×10^7 m/s),根据Shao等^[21]的观测数据,这类M分量出现在回击之后不久^[21],与图5中第2类M分量到回击的时间较小的结果一致。文献[14]认为,通常情况下,M分量的发生需要一条接地的、有连续电流的通道,而上升时间较短、峰值较大的M分量还需要一条不完全导通的、衰退的通道。通常情况下,M分量和连续电流发生在同一个通道分支中,而上升时间较短、峰值较大的M分量则需要闪电有多个分支通道,这类M分量是在一个分支发生连续电流的同时,另一个分支发生类似于直窜先导与回击的物理过程,两者同时汇入主通道而形成的。回击发生后,更短的时间通常意味着更多的残余电荷和同时存在的分支通道,结合文献[14,21],本文认为,电流波入射和反射速度与距离回击的时间与M分量的类型有着密切的联系,第1类M分量和第2类M分量物理机制存在一定差异。

3 结 论

本文分析了触发闪电中M分量的幅度、上升时

间、半峰值宽度和转移电荷量,并对中国广东、中国山东和美国佛罗里达的触发闪电统计特征进行了比较,得到以下结论:

1) 通常情况下,M分量的幅值低于400 A,上升时间小于400 μ s,半峰值宽度小于1 ms,转移电荷量为0.1~0.3 C。但在幅值、上升时间、半峰值宽度、转移电荷量的分布中,均有部分M分量表现出不同的特性。

2) 第2类M分量的幅值约为第1类M分量的10倍,半峰值宽度和上升时间约为第1类M分量的1/4,转移电荷量约为第1类M分量的2倍,两类M分量的参数分布也有较大差别。

3) 采用双波放电模型对两类M分量的模拟计算表明:当模拟电场和测量电场较一致时,第1类M分量的入射速度与反射速度的比例大于第2类M分量的,反映了两类M分量形成的物理机制有一定差异。

致 谢:感谢中国气象科学研究院、广东省防雷中心、广东省从化市气象局对广东闪电综合观测试验的大力支持。

参 考 文 献

- [1] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报,2006,17(5):611-620.
- [2] 张阳,张义军,孟青,等. 北京地区正地闪时间分布及波形特征. 应用气象学报,2010,21(4):442-449.
- [3] Fisher R J, Schnetzer G H, Thottappillil R, et al. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. *J Geophys Res*, 1993, 98: 22887-22908.
- [4] Thottappillil R, Goldberg J, Rakov V, et al. Properties of M components from current measured at triggered lightning channel base. *J Geophys Res*, 1995, 100(12): 25711-25720.
- [5] Malan D J, Collens H. Progressive lightning III - The fine structure of return lightning strokes. *Proc R Soc London A*, 1937, 162: 175-203.
- [6] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A, et al. Mechanism of the lightning M component. *J Geophys Res*, 1995, 100: 25701-25710.
- [7] Rakov V A, David E C, Keith J R, et al. M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges. *J Geophys Res*, 2001, 106: 22817-22831.
- [8] Leandro Z S C, Marcello M F S, Osmar P, et al. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. *Atmos Res*, 2007, 84: 302-310.
- [9] 赵阳, 鄒秀书, 陈明理, 等. 人工触发闪电中的M分量特征. 高原气象, 2011, 30(2): 508-517.

- [10] 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.
- [11] Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash. *J Geophys Res*, 2011, 116: D10102(1-11).
- [12] 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.
- [13] Rakov V A, Uman M A, Wang D, et al. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14117-14130.
- [14] Megumu M, Takatoshi S. Characterization of Current Pulses Superimposed on the Continuous Current in Upward Lightning Initiated from Tall Objects and in Rocket Triggered Lightning. 28th International Conference on Lightning Protection, 2006.
- [15] 蒋如斌,鄒秀书,王彩霞,等. 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. 物理学报,2011,60:079201.
- [16] 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.
- [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] 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.
- [19] Jiang R B, Qie X S, Yang J, et al. Characteristics of M-component in rocket-triggered lightning and a discussion on its mechanism. *Radio Science*, 2013, 48: 1-10.
- [20] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A, et al. Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes. *J Geophys Res*, 1992, 97: 9935-9950.
- [21] Shao X M, Krehbiel P R, Thomas R J, et al. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. *J Geophys Res*, 1995, 100: 2749-2783.
- [22] Chen M L, Shen Y C. Fine Spatial Structures and Associated Electric Field Changes for an M-component Observed with a VHF Broadband Interferometer System. 32nd International Conference on Lightning Protection, 2014.

Comparative Analysis on Characteristics and Mechanism for Two Types of M-component in Triggered Lightning

Xie Meng¹⁾²⁾ Zhang Yang¹⁾ Zhang Yijun¹⁾ Lü Weitao¹⁾ Zheng Dong¹⁾

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

²⁾ (*Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*)

Abstract

Parameters such as amplitude, rise time, half-peak width and charge transfer is obtained by analyzing channel base current data from triggered lightning, which is acquired by GCOELD (Guangdong Comprehensive Observation Experiment of Lightning Discharge) during 2008 and 2013. Geometric mean value of amplitude, rise time, half-peak width and charge transfer from 31 samples are 301 A, 341 μs , 662 μs and 0.207 C, among which geometric mean value of amplitude is close to the result from Shandong Artificially Triggering Lightning Experiment, while rise time and half-peak width are close to results in Florida. From the histogram for parameter distribution, M-component is mostly within 400 A, the rise time is lower than 400 μs , the half-peak width is less than 1 ms, and the charge transfer is from 0.1 C to 0.3 C. Whereas, histogram of amplitude, rise time, half-peak width and charge transfer indicates portion of M-component has unusual characteristics. Combined with previous research, it's concluded that M-component can be divided into two types, by amplitude lower/higher than 1 kA. Geometric mean value of amplitude, rise time, half-peak width and charge transfer is analyzed, respectively. Two types of M-component show obvious differences, for instance, the amplitude of Type 2 M-component is almost 10 times the value of Type 1 M-component, while the rise time and half-peak width is approximately quarter of the corresponding parameter for Type 1. In general, Type 2 M-component has higher amplitude, shorter rise time and narrower half-peak width than Type 1. The relationship between M amplitude and the lag between return stroke and M-component for Type 1 and Type 2 are compared, and lags of Type 2 M-components are shorter than 50 ms, shorter than lags of Type 1 M-components as a whole. It possibly indicates that the lower the amplitude of M-component is, the longer the lag is. With M-component two-wave model, the electric field are calculated. By configuring incident wave velocity and reflected wave velocity to various values, it's found that the result is consistent with measured electric field, but the incident velocity is always smaller than reflected velocity for both Type 1 and Type 2. The ratio between incident wave velocity and reflected wave velocity for Type 1 is larger than that of Type 2. Based on analysis for M-component characteristics and M-component classification, two types of M-component may correspond with streamer occurred by breakdown in channel branch into main channel and breakdown within part of the lightning channel, indicating Type 1 M-component has some differences with Type 2 M-component in mechanism.

Key words: artificial triggered lightning; M-component; classification; physical mechanism