

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.

人工触发闪电 M 分量的电流与电磁场特征

肖桐¹⁾²⁾* 张阳²⁾ 吕伟涛²⁾ 郑栋²⁾ 张义军²⁾

¹⁾(成都信息工程学院,成都 610225)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

摘 要

利用 2008—2010 年在广州从化人工触发闪电试验中观测到的闪电通道底部电流、近距离电场以及近距离磁场数据资料,对人工触发闪电 M 过程的电流和电磁场特征及相关性进行了分析。统计分析结果显示:M 分量电场波形持续时间和 10%~90% 上升时间几何平均值分别为 0.49 ms 和 0.12 ms; 电流波形持续时间、10%~90% 上升时间和电流变化的几何平均值分别为 0.53 ms, 0.11 ms 和 0.34 kA; 磁场波形持续时间、10%~90% 上升时间和磁场变化的几何平均值分别为 0.65 ms, 0.16 ms 和 2.76×10^{-5} T。此外,M 分量的电流、电场及磁场波形间存在一定的相互关系。相关分析结果表明:M 分量的电磁场与电流资料在峰值幅度上具有较显著相关性,几何形状也较为一致,利用电磁场资料反演 M 分量的电流波形具有可行性。

关键词: 人工触发闪电; M 分量; 电磁场特征

引 言

M 分量发生在回击过程之后的通道微弱发光阶段,并伴随有通道亮度的突然增加和电场的快速变化^[1]。Malan 等^[2]于 20 世纪 30 年代首次发现了这一现象并将其命名为 M 分量,其光脉冲信号表现为对称的形式。后来,研究者由触发闪电观测发现,M 过程中光强的增加与典型幅值为数百安培和上升时间为数百微秒的电流脉冲相关^[3]。但它与回击电流脉冲明显不同,只发生于任何通过通道底部的电流结束之后,通常表现出亚微秒的上升时间^[4]。M 分量通常产生转移到地面上的电荷为 0.1~0.2 C,小于继后回击脉冲大约 1 个量级^[5]。但少量的 M 过程峰值电流可以达到上千安培,有时可以与较小回击的电流峰值相比较。另外,研究也发现 M 分量有助于长连续电流的形成。因此,M 分量的研究有益于深化雷电防护机理的认识。但是自然闪电的出现具有较强的随机性^[6],很难实现对其进行闪电定位^[7-8]以及

近距离的声光电综合观测^[9]。所以,利用人工触发闪电获得近距离处地闪的多种参量,进而研究其物理过程,是一种行之有效的方法^[10]。

M 分量能够在电流及电磁场同步探测资料中表现出来。在电流资料中,M 分量表现为一个基本对称的电流脉冲波形;电场资料中,M 分量以持续时间较短的 U 形变化为主要特征;磁场资料中,M 分量的特征与电场中的特征较为相似。Thottappillil 等^[11]测量并初步给出了 M 分量峰值电流、10%~90% 上升时间等相关特征。张义军等^[12]研究了空中触发闪电的特性,发现回击有强辐射发生,而之后的 M 分量没有发现较强的 10 MHz 辐射,但有较强的磁场变化。虽然,目前对 M 过程有一定了解,但对于 M 分量产生的物理机制仍存在许多疑问,其电磁场波形特征并不明确,因此,通过对 M 分量的特征参数进行提取和分析,有助于进一步认识 M 分量特性。

研究 M 分量多从其电流特征着手,但其电流的直接测量存在很多困难,如何实现其电流的反演,显

2012-11-19 收到,2013-04-01 收到再改稿。

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

* email: 78025224@qq.com

得重要且必要。同时,利用闪电放电的回击电磁场特征反演回击电流的研究工作已应用于 LLS 闪电定位网络等诸多定位系统中^[13-14]。

除了利用远距离电磁场资料进行反演计算的应用之外,在美国新墨西哥州的触发闪电中也曾利用近距离磁场来反演电流^[15]。在国内,为了研究触发闪电的近距离磁场,周忠华等^[16]对近距离的磁场和电场进行了同步测量,大致估算出先导上升速度以及闪电通道中的电流大小等。

考虑到 M 过程的重要性,在以往研究的基础上拟通过人工引雷同步获得的电磁场和电流资料,对 M 过程特征参量进行综合统计分析,在此基础上,通过电场和磁场与电流之间的相关性分析,研究其线性电流反演的可操作性。

1 资料获取与数据预处理

本研究所使用的资料为 2008—2010 年广州从化人工触发闪电的电流资料、近距离电场资料和磁场资料。3 年内质量可靠的资料包括 18 次回击,共 31 次 M 分量,其中 12 次回击后的连续电流过程中出现了 M 分量,出现比例为 66.7%,这一结果略高于 Malan 等^[17]通过光学和电场观测得到的 40%。电流和电磁场观测方式如下:电流波形资料通过串接在回击通道中的同轴分流器直接测量,带宽为 DC-200 MHz,测量量程为 ± 2 kA,电流噪声电平为电流测量量程的 3%。电场变化波形通过距离引流杆约 80 m 处的快天线来测量,所使用的快天线带宽为 200 Hz~2 MHz,其时间常数能够正确呈现尺度为毫秒量级的 M 过程的波形。磁场波形由测量近距离磁场的大量程磁天线测量,与引流杆的直线距离同样是 80 m 左右,时间常数为 2 ms,带宽范围为 200 Hz~500 KHz。以上电流、电场以及磁场资料均采用 DL750 示波器同步采集存储,采样率是 10 MSa/s,记录长度为 2 s,预触发位置为 40%。

M 分量以持续时间较短的 U 形(或钩状)电场变化为主要特征,即在近距离观测到的 M 分量电场变化以负电场变化开始,紧接着是一略大的正电场变化^[1]。图 1 给出了 2010 年 7 月 21 日 15:00(北京时,下同)同步观测到的触发闪电第 2 次回击之后的 M 分量电流、近距离电场和磁场的波形。由图 1 可知,3 种资料中 M 分量几乎同时发生了相应的变化。在电场波形上 M 分量表现出了明显的 U 形变

化,具有明显的对称结构特征。在电流波形上,M 分量呈现单极性,峰值小于回击峰值,上升沿时间大于回击的上升沿时间,波形也呈对称结构。近距离磁场资料上,由于叠加了静磁场和辐射场,导致波形并不标准。通过观察放大之后的波形(图 2)不难发现,磁场资料与电流资料的时间尺度对应性较好,整体波形同样表现出良好的对称性。

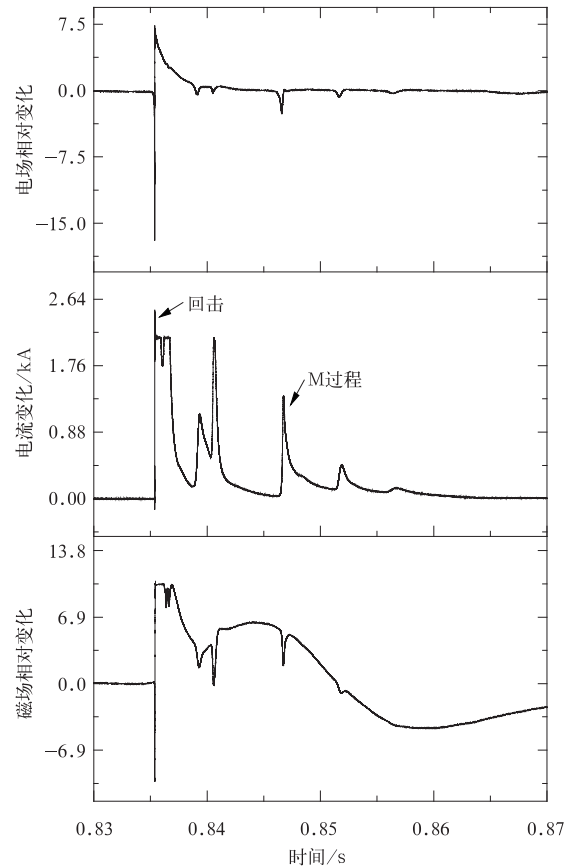


图 1 触发闪电第 2 次回击的电场、通道底部电流、磁场变化波形

Fig. 1 The electric field, channel base current and magnetic field changes of the second return stroke in triggered lightning

由于所用资料中电流与电磁场数据带宽不同,导致不同数据间波形存在差异,影响了提取参数的准确性,同时考虑到近距离电磁场存在静场、感应场、辐射场等分量,其电流与电磁场间关系较为复杂。参考德国 Peissenberg 塔和日本 Fukui 烟囱的上行闪电以及美国佛罗里达和中国山东的人工触发闪电试验发现,虽然 M 过程大多在百微秒量级,但不同地区不同类型的地闪电流资料中 M 分量的各

项特征参量具有较大的分布范围。依据 Thottapillil 等^[3]和赵阳等^[18]对 M 过程时间尺度的统计结果发现,波形的持续时间通常为 0.5~2 ms, 10%~90%上升时间大多在 100~500 μs 区间。基于此,通过编程设计了通带范围为 500 Hz~20 kHz 的带通滤波器,对所有数据进行了滤波处理,以期获得 M 分量带宽范围内的有效数据。这一带通范围的选择,符合 M 分量的带宽范围,既可以有效滤除低频上连续电流的影响,又不会丢失 M 分量的关键信息,如上升时间等。图 3 为图 1 中电流资料滤波前后的对比图,电场和磁场的滤波效果与此类似。如图 3 所示,虽然滤波处理的确损失了 20 kHz 以上的快脉冲和 500 Hz 以下的慢变化成分,但是对于 M 分量所在的频率范围而言,计算结果保留了 M 分量的绝大部分信息。观察对比图不难发现,通过滤波去除了连续电流等一些慢变化的干扰,使得 M 分量这类较快变化过程更加清晰明了,易于分辨和提取。滤波后,选取全部峰值大于本底噪声 2 倍的 M 分量进行统计分析,并且保证每 1 个磁场或者电场的 M 分量数据都有相应的电流数据与之对应。

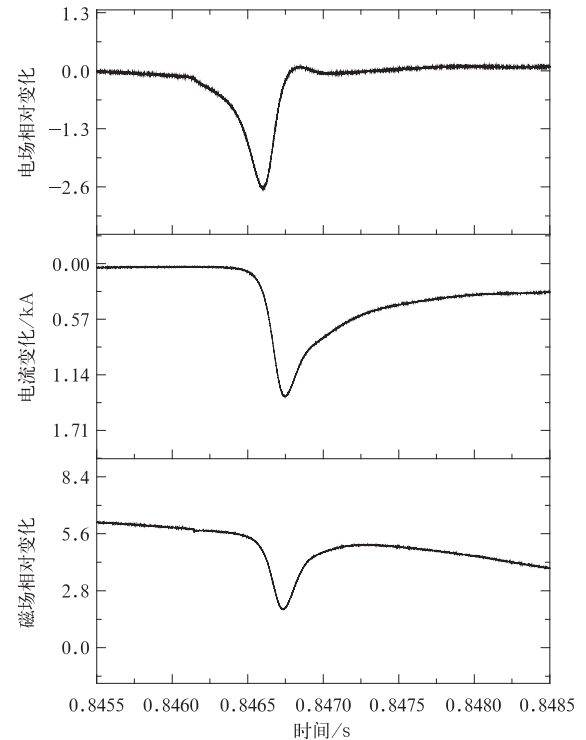
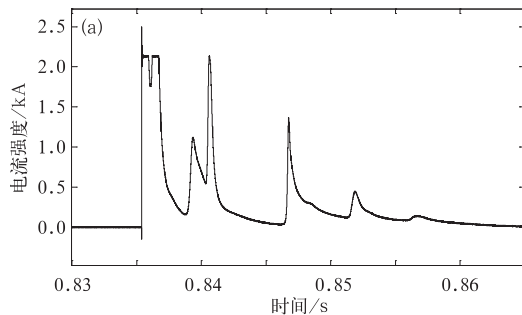


图 2 第 2 次回击后一次 M 分量的放大图

Fig. 2 The enlarged waveform of once M-component after second return stroke in triggering lightning

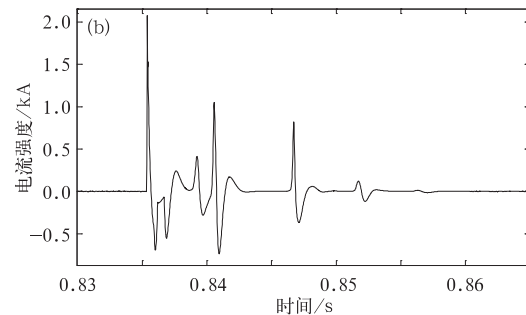


图 3 滤波前(a)与滤波后(b)电流变化

Fig. 3 The current data before filtering(a) and after filtering(b)

2 M 分量波形特征及相关分析

2.1 电流与电磁场资料的统计特性

本文对经过滤波处理后的电流、电场和磁场资料,分别提取了一些重要的波形参数进行对比分析, M 过程的开始点和结束点是以拐点作为判定标准。现以电流资料的各个分析参量为例,详细说明各个参量的意义,电场与磁场特征参量的定义与此类似。电流资料提取的参数如图 4 所示,其中 I_M 为 M 分量的电流幅度,根据开始点到峰值的差别计算; T_M

是 M 分量的持续时间,即从 M 过程开始到结束的时间; T_R 为 10%~90%上升沿时间,指在上升沿上幅值的 10%处到幅值 90%处的时间; T_w 是波尾时间,指 M 过程波峰到结束点的时间; T_H 是半峰值宽度,表示从上升沿 50%幅值处到下降沿 50%幅值位置的时间。表 1~3 分别给出了电流、电场和磁场资料中提取出的 M 分量各项参数信息的统计结果。图 5 为电流与电磁场资料上 M 分量的持续时间、上升时间、半峰值宽度、波尾时间和时间间隔等 5 项参数的统计分布直方图。

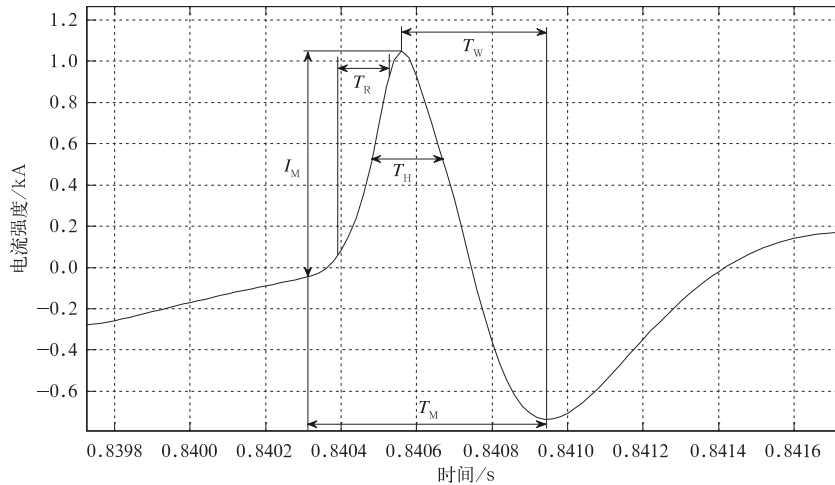


图 4 M 过程特征参量示意图

Fig. 4 Characteristic parameters of M-component

表 1 电流资料中 M 分量参数的统计结果

Table 1 Statistic results of M-component parameters for current waveform

参数	样本量	算数平均值	几何平均值	中值	标准偏差
持续时间/ms	31	0.63	0.53	0.5	0.41
10%~90%上升时间/ms	31	0.13	0.11	0.12	0.11
波尾时间/ms	31	0.34	0.31	0.34	0.13
半峰值宽度/ms	30	0.20	0.17	0.15	0.13
电流幅度/kA	31	0.47	0.34	0.32	0.39

电流资料(表 1)表明,M 分量电流幅度的几何平均值为 0.34 kA,标准偏差为 0.39 kA,这一统计结果较 Thottappillil 等^[3]给出的 0.12 kA 的结果偏大,但小于 Miki 等^[19]统计德国 Peissenberg 塔数据得到的 0.51 kA,造成这一结果可能是由于人工触发闪电和高塔上的上行闪电不同,以及不同的地理

条件造成的统计样本不同;10%~90%上升时间的几何平均值为 0.11 ms,标准偏差 0.11 ms;持续时间的几何平均值为 0.53 ms,标准偏差为 0.41 ms;波尾时间的几何平均值为 0.31 ms,标准偏差为 0.13 ms;半峰值宽度的几何平均值为 0.17 ms,标准偏差为 0.13 ms。

表 2 电场资料中 M 分量参数的统计结果

Table 2 Statistic results of M-component parameters for electric field waveform

参数	样本量	算数平均值	几何平均值	中值	标准偏差
持续时间/ms	24	0.52	0.49	0.47	0.24
10%~90%上升时间/ms	24	0.15	0.12	0.10	0.12
波尾时间/ms	24	0.30	0.28	0.30	0.09
半峰值宽度/ms	23	0.17	0.15	0.16	0.07
电场相对变化	24	0.54	0.38	0.32	0.51

电场资料(表 2)表明,M 分量电场相对变化的几何平均值为 0.38,标准偏差为 0.51;持续时间的几何平均值为 0.49 ms,标准偏差为 0.24 ms,小于 Thottappillil 等^[11]对佛罗里达自然闪电分析得到 0.9 ms,由自然闪电落点的不确定性可知,自然闪电的通道距

离一般较远,因此可以认为造成这一结果的原因除了统计样本不同外,也有测量系统距闪电通道的距离,以及滤波带来的影响;10%~90%上升时间的几何平均值为 0.12 ms,标准偏差为 0.12 ms;波尾时间的几何平均值为 0.28 ms,标准偏差为 0.09 ms;半峰值

宽度的几何平均值为0.15 ms,标准偏差为0.07 ms。

表3 磁场资料中M分量参数的统计结果

Table 3 Statistic results of M-component parameters for magnetic field waveform

参数	样本量	算数平均值	几何平均值	中值	标准偏差
持续时间/ms	18	0.68	0.65	0.66	0.24
10%~90%上升时间/ms	18	0.19	0.16	0.14	0.12
半峰值宽度/ms	17	0.23	0.21	0.24	0.1
波尾时间/ms	18	0.38	0.37	0.36	0.1
磁场幅度/ 10^{-5} T	18	4.66	2.76	2.53	5.87

磁场资料(表3)表明,M分量磁感应强度的几何平均值为 2.76×10^{-5} T,标准偏差为 5.87×10^{-5} T;持续时间的算术平均值为0.68 ms,几何平均值为0.65 ms,标准偏差为0.24 ms;10%~90%上升时间的算术平均值为0.19 ms,几何平均值为0.16 ms,标准偏差0.12 ms;波尾时间的算术平均值为0.38 ms,几何平均值为0.37 ms,标准偏差为0.1 ms。

由以上结果可知,电磁场资料与电流资料中M分量的各项参数的统计结果十分接近,且标准偏差较小数据比较稳定,上述统计结果表明三者具有较好的一致性。另外,上述结论是对3种不同数据进行合理滤波处理后得到的,根据以往的研究结果,可以认为在500 Hz~20 kHz通带范围内,保留了M分量的主要成分,滤波处理虽然降低了原始数据的带宽,但对于M过程本身来说,其通带范围与M分量的时间尺度相匹配,统计结果具有实际应用价值。

另外,结合图5的结果可以发现,除M分量时间间隔外,电磁场与电流资料中M分量的其他时间参数大体上满足对数正态分布。其中,图5a和图5b表示电磁场与电流持续时间的统计直方图,图5a中磁场持续时间分布区间为[0.4 ms,1.5 ms],电流持续时间分布区间为[0.4 ms,1.84 ms],二者集中分布在0.6 ms附近,图5b中电场持续时间分布区间为[0.18 ms,1.44 ms],电流持续时间分布区间为[0.18 ms,1.84 ms],集中分布于0.4 ms附近,显然电磁场与电流的持续时间集中分布在1.2 ms以下,而1.5 ms以上的区间则只有少量电流数据而没有电磁场数据。图5c中磁场上升时间总体分布为[0.06 ms,0.56 ms],电流上升时间总体分布为[0.02 ms,0.5 ms],二者在0.1 ms处的分布较为集中,图5d中电场数据分布于[0.06 ms,0.5 ms],电流数据分布于[0.02 ms,0.5 ms],电流与电磁场上

升时间主要分布在[0,0.2 ms]这一区间内,分布范围较为一致。图5e上磁场的半峰值宽度分布范围是[0.06 ms,0.46 ms],电流的半峰值宽度分布范围是[0.12 ms,0.6 ms],集中在[0.1 ms,0.3 ms]这一区域,而图5f中电场的半峰值宽度分布于[0.08 ms,0.36 ms]上,电流的半峰值宽度分布于[0.06 ms,0.6 ms]上,并且集中在[0.1 ms,0.2 ms]上。图5g所示磁场的波尾时间分布区间为[0.24 ms,0.64 ms],电流的波尾时间分布区间为[0.3 ms,0.62 ms],图5h中电场的波尾时间分布区间为[0.1 ms,0.46 ms],电流的波尾时间分布区间为[0.12 ms,0.62 ms],可知3种资料在这一项参数上的分布差异较明显。通过上述分析还发现,各项参数分布的概率最大值点基本与几何平均值基本吻合。

2.2 电流与电磁场的波形相关分析

图6分别给出了电流对应电场和磁场资料上,M分量幅值、持续时间、10%~90%上升时间和波尾时间的统计散点分布图。表4给出了电流与电磁场资料各项参数的相关性。图6a为电流与磁场峰值的散点图,二者的相关系数为0.93。基于传输线模型的电磁场计算公式^[1]如下,式(1)等号右边第1项为静磁场,是近距离时磁场的主要分量,第2项为辐射场,远距离时磁场的主要分量:

$$B(r, \phi, 0, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_{H_B}^{H_T} \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} + \int_{H_B}^{H_T} \frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) \right] a_\phi dz' \quad (1)$$

式(1)中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m·A⁻¹,为真空磁导率。由式(1)可知,对于确定观测位置,电流与磁场峰值存在确定的计算关系式。因为前期对数据进行了滤波,所以预处理之后的信号低频成分大幅减少,辐射场所占的比例相对较大,滤波后的结果类似于远距离测得的磁场数据,其电流磁场波形存在线性

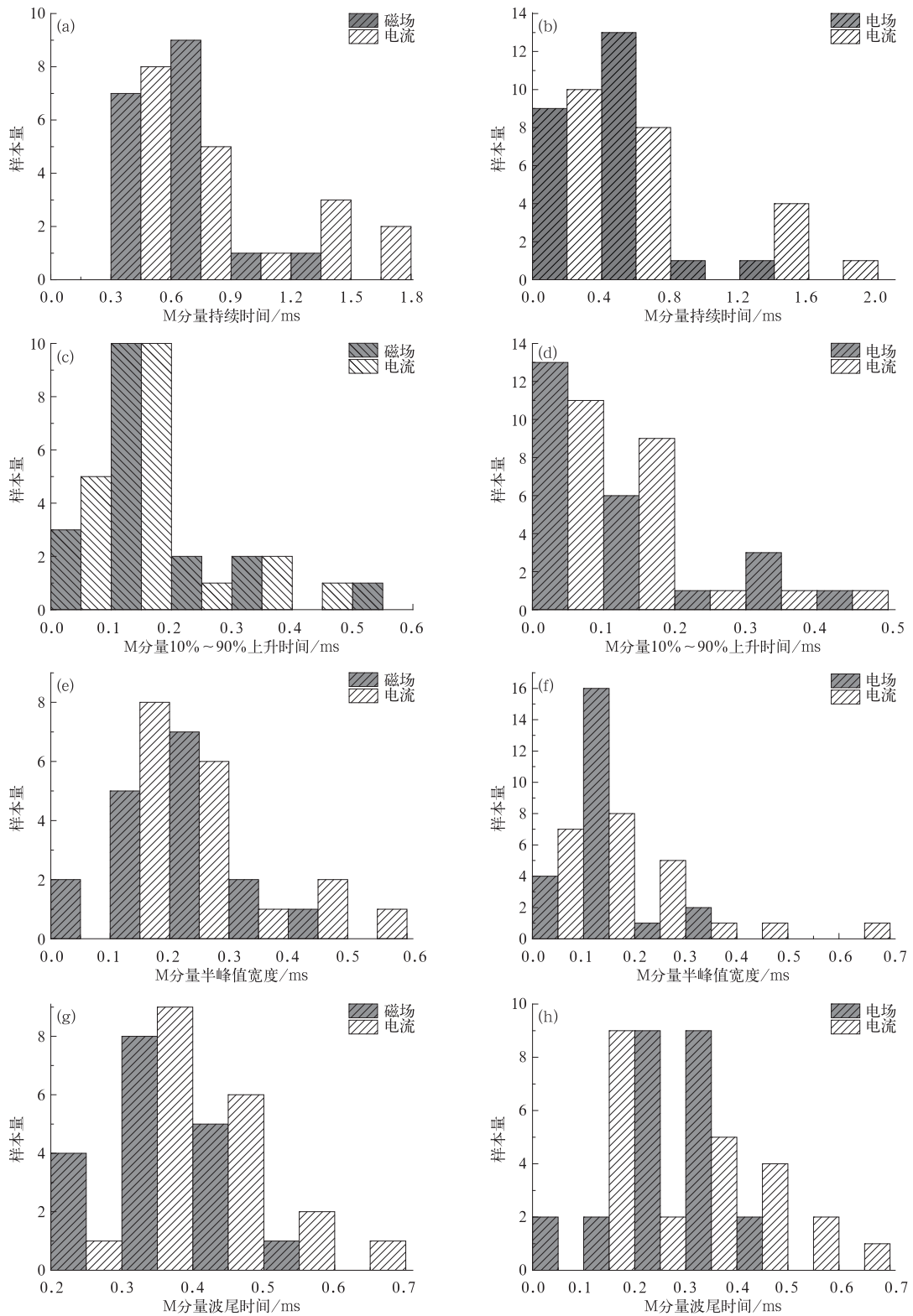


图 5 电磁场与电流持续时间直方图 (a)磁场与电流持续时间,(b)电场与电流持续时间,(c)磁场与电流上升时间,(d)电场与电流上升时间,(e)磁场与电流半峰值宽度,(f)电场与电流半峰值宽度,(g)磁场与电流波尾时间,(h)电场与电流波尾时间

Fig. 5 The statistic histograms of duration magnetic and electric versus current

- (a)duration of magnetic versus current,(b)duration of electric versus current,(c)rise time of magnetic versus current,
- (d)rise time of electric versus current,(e)half-peak width of magnetic versus current,(f)half-peak width of electric versus current,(g)decline time of magnetic versus current,(h)decline time of electric versus current

相关性。假设回击速度为常量,远距离上磁感应强度与回击电流峰值呈线性关系,因此可以认为二者相关性较高,并且真实可信。图6b为电流与电场峰值的散点图,二者也具有较好的线性相关性,其相关系数为0.86。初步解释如下,根据传输线电流模式,回击电场与回击电流满足下列关系^[14],

$$E(r, \phi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_{H_B}^{H_T} \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} \cdot \int_0^t i(z', t - R/c) d\tau dz' + \int_{H_B}^{H_T} \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' - \int_{H_B}^{H_T} \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_z, \quad (2)$$

经过带通滤波处理后,式(2)可以化简为

$$E(r, \phi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_{H_B}^{H_T} \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' - \int_{H_B}^{H_T} \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_z. \quad (3)$$

保留的信号以辐射场分量为主,同样假设回击速度为常量,远距离电场与电流也呈线性关系,可以认为计算得到的相关系数真实可靠。

值得注意的是,本文所用的电场峰值是相对值,与绝对值相差 k 倍,二者线性相关,因此不会对各项参量的统计结果及相关性造成影响。其中,图6a是

电流与磁场在峰值上的散点图,大体上满足线性关系 $I = 0.06B + 0.11$, 相关系数为0.93,这与 Hussein 等^[20]给出的高大建筑物引发的上行闪电回击电流峰值与磁场强度峰值的关系式类似。图6b是电流与相对电场变化在峰值上的散点图,二者之间的关系为 $I = 0.7E + 0.1$, 相关系数为0.86。上述关系式表明:闪电的M过程其电流特征(尤其是峰值电流)能够从其电磁场波形特征获得。

为了通过M过程电磁场的波形获得电流波形,同样对波形之间的时间尺度参数进行相关分析。如表4所示,电流与磁场、电流与电场在持续时间上的相关系数为0.62和0.64。电流与磁场10%~90%上升时间的相关系数为0.86;电流与电场10%~90%上升时间的相关系数为0.69,磁场与电流在10%~90%上升时间上同样表现出了很好的相关性。电流与磁场、电流与电场在半峰值时间的相关系数分别为0.76和0.77。电流与磁场、电流与电场在波尾时间上的相关系数分别为0.48和0.45,相比前3项参数,该项参数相关性略低。上述相关系数结果表明,电流与电磁场波形之间在时间尺度上存在一定相关性,但其线性相关程度并不令人满意,研究工作需进一步加强。

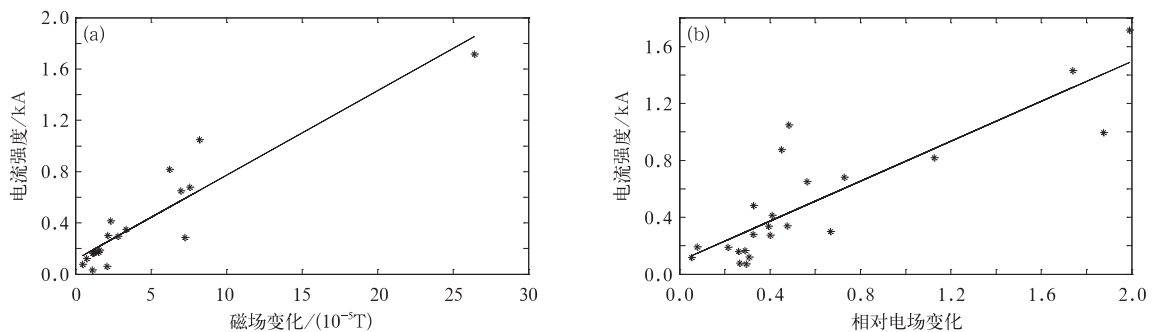


图6 磁场与电流峰值(a)及电场与电流峰值(b)散点图

Fig. 6 Scatter of amplitude of current versus magnetic(a) and current versus electric(b)

表4 电流与电磁场资料各项参数的相关分析

Table 4 Correlation of parameters of current and electromagnetic field waveform

参数	电流与磁场 相关系数	电流与电场 相关系数
峰度	0.93	0.86
持续时间	0.62	0.64
10%~90%上升时间	0.86	0.69
半峰宽度	0.76	0.77
波尾时间	0.55	0.39

3 小结

本文基于2008—2010年广州从化人工触发闪电的通道底部电流、近距离电场以及近距离磁场资料,对触发闪电M过程的电流和电磁场特征及相关性进行研究,统计分析发现:

1) 电场、电流和磁场上持续时间的几何平均值分别为0.49 ms, 0.53 ms和0.65 ms; 10%~90%

上升时间的几何平均值分别为 0.12 ms, 0.11 ms 和 0.16 ms; 波尾时间的几何平均值分别为 0.28 ms, 0.31 ms 和 0.37 ms; 半峰值宽度的几何平均值分别为 0.15 ms, 0.17 ms 和 0.21 ms。电流与磁场峰值的几何平均值分别为 0.34 kA 和 2.76×10^{-5} T。

2) 电场与电流波形上 M 分量峰值的相关系数为 0.86, 磁场与电流波形上 M 分量峰值的相关系数为 0.93。可见, 电流与磁场资料表现出了很好相关性, 这一点为电磁场反演电流峰值奠定了良好的基础。

3) M 分量在波形时间相关性具有如下特征: 持续时间方面, 电场与电流的相关系数为 0.64, 磁场与电流波形的相关系数为 0.62; 10%~90% 上升时间方面, 电场与电流和磁场与电流波形的相关系数分别为 0.69 和 0.86; 波尾时间方面, 电场与电流波形的相关系数为 0.39, 磁场与电流波形的相关系数为 0.55; 半峰值宽度方面, 电场与电流和磁场与电流波形的相关系数分别为 0.77 和 0.76。

由于幅值、持续时间和 10%~90% 上升时间反映了 M 分量的几何形状特征, 因此通过上述统计计算得到的相关性可知, 本次试验中电流、磁场和电场资料上的 M 分量在几何形状上具有一定的一致性, 并且相对于电场资料, 磁场资料表现出了更强的相关性, 在波形上有明显的相似性, 幅度上也有一定的相关性。

本文从理论推导和实测资料分析两个方面, 共同验证了电磁场与电流资料的相关性, 为电磁场反演电流的计算提供了基础, 尤其是峰值方面较好的相关性, 使得利用 M 过程电磁场峰值数据反演电流峰值成为可能。波形时间尺度相关性方面, 部分参量的相关系数较低, 影响了整个波形的形状相关性。因此, 还需要从物理模型入手, 进一步完善 M 过程电流波形的反演工作。

参考文献

- [1] 王道洪, 郝秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 131-132.
- [2] Malan D J, Collens H. Progressive Lightning III—The Fine Structure of Return Lightning Strokes. Proc R Soc London: Ser A, 1937, 162: 175-203.
- [3] Thottappillil R, Goldberg J D, Rakov V A, et al. Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base. *J Geophys Res*, 1995, 100: 25711-25720.
- [4] 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.
- [5] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [6] 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.
- [7] 郑栋, 孟青, 吕伟涛, 等. 北京及其周边地区夏季闪电活动时空特征分析. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 638-644.
- [8] 张文娟, 孟青, 吕伟涛, 等. 时间差闪电监测网的误差分析和布局优化. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 402-410.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A. K and M changes in close lightning ground flashes in Florida. *J Geophys Res*, 1990, 95: 18631-18640.
- [12] 张义军, 刘欣生, 王才伟, 等. 空中人工触发闪电试验及特性分析. *高原气象*, 1998, 17(1): 55-64.
- [13] Rachidi F, Bermudez J L, Rubinstein M, et al. On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems. *Journal of Electrostatics*, 2004, 60: 121-129.
- [14] Uman M A, Krider E P. A review of natural lightning; Experimental data and modeling. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1982, 24(2): 79-112.
- [15] Hubert P, Laroche P. Triggered lightning in New Mexico. *J Geophys Res*, 1984, 89(2): 2511-2521.
- [16] 周忠华, 刘欣生. 人工触发闪电放电电流的间接测量及其特征分析. *高原气象*, 1993, 12(1): 67-76.
- [17] Malan D J, Schonland B F J. Progressive Lightning, 7, Directly Correlated Photographic and Electrical Studies of Lightning from Near Thunderstorm. Proc R Soc London: Ser A, 1947, 191: 485-503.
- [18] 赵阳, 郝秀书, 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.
- [19] Miki M, Shindo T, Rakov V A, et al. Characterization of Current Pulses Superimposed on The Continuous Current in Upward Lightning Initiated From Tall Objects and in Rocket-Triggered Lightning // Paper of 28th International Conference on Lightning Protection. Kanazawa, Japan, 2006.
- [20] Hussein A M, Janischewskyj W, Chang J S, et al. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *J Geophys Res*, 1995, 100(5): 8853-8861.

Current and Electromagnetic Field of M Component in Triggered Lightning

Xiao Tong¹⁾²⁾ Zhang Yang²⁾ Lü Weitao²⁾ Zheng Dong²⁾ Zhang Yijun²⁾

¹⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

²⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Based on data obtained in the triggered lightning at Conghua, Guangzhou during the period of 2008—2010, the characteristics and correlations of base current and electromagnetic field of M component are analyzed.

Lightning M components are transient enhancements in the continuing current and in the associated channel luminosity after the return stroke. A typical M component is characterized by a more or less symmetrical current pulse at the channel base. The M component characteristics of each charge is examined using multiple station measurements of electric and magnetic fields at distances of 80 m, 2 km and 9 km from triggered lightning channels, respectively. Different bandwidth between the current and the electromagnetic field could lead to the differences between different data waveform, affecting the accuracy of the extracted parameters. Furthermore, the relation between the current and the close electromagnetic field is complex since it includes the static field, the induction field and radiation field. The ranging from 500 Hz to 20 kHz band pass filter is designed to filter these data, in order to obtain the valid data within the bandwidth of the M component.

Results show that the geometric mean values of duration, 10%—90% rise time, decline time and half-peak width for electric field waveform of M component are 0.49 ms, 0.12 ms, 0.28 ms and 0.15 ms, respectively. The geometric mean values of duration, 10%—90% rise time, decline time, half-peak width and peak for current waveform of M component are 0.53 ms, 0.11 ms, 0.31 ms, 0.17 ms and 0.34 kA. The geometric mean values of duration, 10%—90% rise time, decline time, half-peak width and peak for magnetic field waveform of M component are 0.65 ms, 0.16 ms, 0.37 ms, 0.21 ms and 2.76×10^{-5} T.

In addition, the following relationship exists between the current, electric field and magnetic field waveform of M component. The correlation coefficient of duration, 10%—90% rise time, decline time, half-peak width, peak between the electric field and current are 0.64, 0.69, 0.39, 0.77 and 0.86, respectively. The coefficients between the magnetic field and current are 0.62, 0.86, 0.55, 0.76 and 0.93, respectively.

In summary, there is a relatively strong correlation between the peaks of current and electromagnetic field waveform, and their geometry is comparable. As a result, the current waveform of M component can be calculated by the electromagnetic field data.

Key words: triggered lightning; M component; electromagnetic field