

闪电电场变化波形时域特征分析 及放电类型识别

刘恒毅^{1,2} 董万胜² 王 涛^{1,2} 邱 实²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

2. 中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室)

提 要: 对闪电电场变化波形进行时域特征分析, 研究闪电放电类型识别方法, 是闪电探测系统研制工作的重要组成部分。利用闪电快电场变化资料, 研究分析闪电波形的时域特征, 分别统计负地闪回击和双极性窄脉冲波形的上升时间、下降时间、脉冲宽度等多个特征参数, 得出负地闪回击波形上升时间平均值为 $2.9\mu\text{s}$ 、下降时间平均值为 $89\mu\text{s}$ 、脉冲宽度平均值为 $15.4\mu\text{s}$, 而双极性窄脉冲波形的上升时间平均值为 $1.7\mu\text{s}$ 、下降时间平均值为 $2.1\mu\text{s}$ 、脉冲宽度平均值为 $2.4\mu\text{s}$ 。通过对闪电波形参数的统计分析, 给出了不同放电过程的识别判据, 实现了对地闪回击、双极性窄脉冲的自动识别, 并利用实测数据进行了验证。结果表明, 制定的波形识别判据对负地闪回击的识别效率可达到 90%, 对正地闪回击与双极性窄脉冲事件也有较高的识别率。

关键词: 波形识别 回击 双极性窄脉冲事件 闪电探测

A time-domain Analysis on Waveform Change of Lightning Electric Field and Identification of Discharge Types

Liu Hengyi^{1,2} Dong Wansheng¹ Wang Tao^{1,2} Qiu Shi²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

2. Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Abstract: The time-domain analysis on waveform change of lightning electric field and the identification of discharge types are one of the most important works in the study of lightning detection system. The rise-time, fall-time, pulse-width and a series of time-domain features of return strokes and narrow bipolar events were given through analyzing the fast electric field change data our system acquired. The rise-time of the negative return-stroke fields had an average of $2.9\mu\text{s}$, its fall-time and pulse-width were $89\mu\text{s}$, $15.4\mu\text{s}$ on average. The average

rise-time value of the narrow bipolar events was $1.7\mu\text{s}$. The mean of the fall-time value and pulse-width value of narrow bipolar events were $2.1\mu\text{s}$ and $2.4\mu\text{s}$, respectively. Some of the results were consistent with other researcher's, but some differences existed which is caused by the different equipment used. Nevertheless all the waveform features we got was still valuable for the identification. Based on these characteristics, a set of software which could distinguish return strokes and narrow bipolar events automatically from all of the lightning radiations events was designed. The classification results were tested by manual selection of data, and it proved a 90% correctness of identifying negative return strokes and a desired accuracy of identifying positive return strokes and narrow bipolar events. As a preliminary research of the waveform classification of lightning discharge events, this method already has a practical value. It can be used to distinguish cloud-to-ground lightning, cloud-to-cloud lightning and narrow bipolar events in the new lightning detection system.

Key Words: waveform identification return strokes narrow bipolar events lightning detection

引 言

根据闪电发生区域,可将闪电过程分为云闪、地闪两大类,云闪通常发生在雷暴云内正负电荷区之间而不到达地面;地闪为发生在云体和地面之间的放电。随着我国电子产业的发展,除地闪导致的直击雷害外,地闪和云闪带来的间接雷害也日益引起人们的重视^[1-3]。这种情况下,原有的地闪定位系统已不能满足新形势的需要,全闪定位系统的开发和应用已成为当前雷电探测领域前沿,而全闪定位信息中,云闪和地闪信息的辨别与区分成为全闪定位系统研发中必须要解决的科学问题。

早在 1970 年代 Krider 等人就利用提高触发电平、控制采样门限与波形特征识别相结合的办法排除云内放电对地闪定位的干扰^[4]。随后的地闪定位系统 LPATS 以及 IMPACT 对云闪与地闪的波形鉴别能力都有加强^[5-6]。现有地闪定位系统,通常使用电场与磁场信号能量以及频谱特征对比,同时结合电场波形时域特征区分云闪与地闪^[7-9]。全闪定位系统的特点决定了闪电信号分类识别技术在其中的重要地位。虽然某些具有三

维定位能力闪电探测系统可通过辐射点的发展路径对闪电类型进行一定程度上的判断,但是在实际应用中会受到每次定位辐射点数目以及系统探测范围等诸多条件的制约^[10-11],仍需使用基于波形特征识别的闪电信号分类技术。例如,现已投入商业运营的 SAFIR 系统集成了低频天线,通过低频电场波形特征区分云闪和地闪^[12]。1998 年在美国建立的三维全闪定位系统 LASA^[13-15]更是充分利用闪电电场波形的特征,实现对多种闪电事件的区分^[16]。LASA 的探测传感器是低频电场天线,通过计算电场波形的上升时间、下降时间、脉冲宽度,并把这些数据与定位结果对比来决定闪电的类型^[15-16]。

闪电类型区分,主要通过识别不同类型闪电特有的放电事件波形实现。现有闪电定位系统大多通过识别地闪回击波形进行云闪地闪区分,因此对地闪回击波形的识别是区分闪电类型的关键。此外一类有别于云闪和地闪的特殊云内放电(双极性窄脉冲事件)^[17]近年来越来越引起研究人员的关注,实现对这种波形的识别可为相关研究提供大量观测资料,因此也对此类波形的识别方法进行研究。自然产生的地闪回击波形与双极性窄脉冲波形都具有相当的复杂性。这种复

杂性一方面是由于闪电自身的发生发展过程具有多样性,另一方面是由闪电电磁信号传播路径的多样性造成的。图1所示,为本次实验获取资料中典型的地闪回击(图1a,b,c)、双极性窄脉冲(图1j)以及其他一些闪电放电事件电场变化波形。图1不仅显示了地闪回击与双极性窄脉冲的波形特点,通过与其他闪电放电事件波形(图1d、g、h、i)的对比还可体现出从复杂多样的闪电放电事件波形中对这两类波形进行识别的难度。因此要

利用波形特征实现闪电放电类型自动区分,首先必须对一定量的样本进行分析,进而确定能有效用于波形识别的特征;其次,在获得可用于波形识别的特征后还需实现程序对这些特征的自动提取;最后,要有合理的方法利用这些特征进行判断。按此思路,针对2007年在广东取得的闪电快电场数据,分析了负地闪回击和双极性窄脉冲波形特征,提出了这两类放电事件电场波形识别判据,并通过软件实现了闪电放电类型的自动识别。

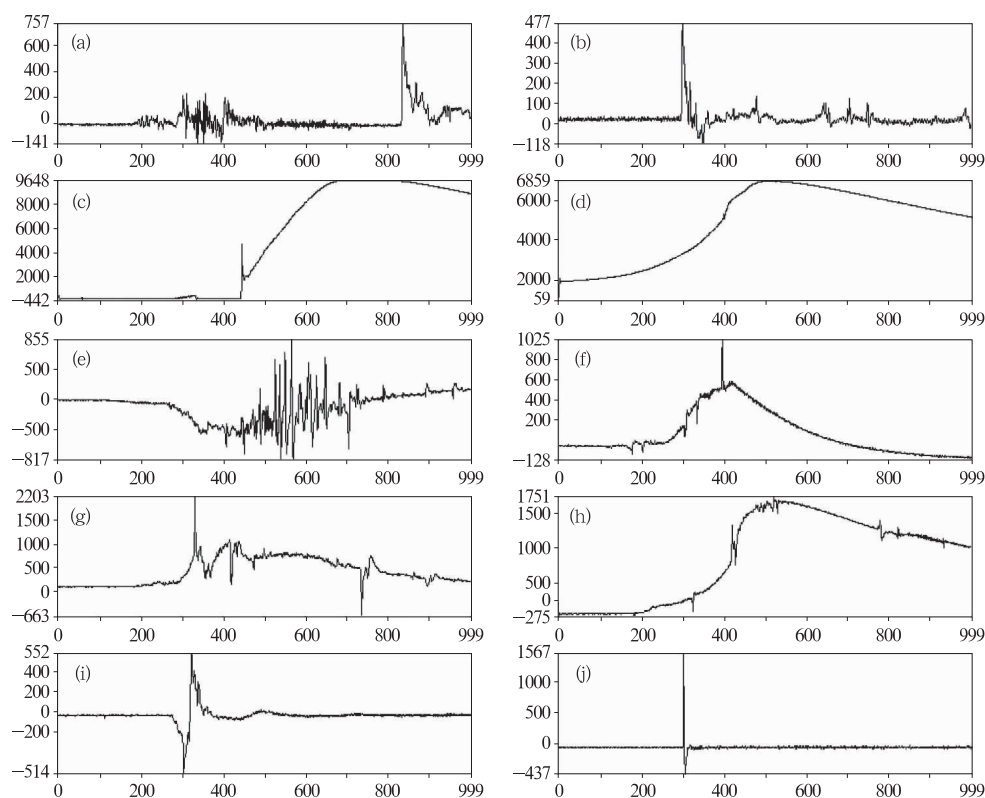


图1 典型回击及其他放电事件脉冲数据典型图例

图中横轴为时间,单位微秒,每幅图为1毫秒长的波形。纵轴为幅度,以采集卡输出的数字位码值为单位,量程为-10240至10240。图中a、b、c为典型的地闪回击波形,其中c是回击发生位置与观测站距离较近时的情况,b为相距较远时的情况。j是双极性窄脉冲波形。其余为其他闪电放电脉冲波形

1 数据获取

在2007年广东从化地区综合闪电观测

实验中,一套由7个快电场变化仪组成的观测网被用来探测全闪信息。快电场变化仪使用积分电路的时间常数为1ms,可对闪电在地面引起的160Hz到3MHz的电场变化信

号进行测量。数据采集系统由计算机与采集卡构成。采集控制程序驱动采集卡以 10MHz 采样频率 12bit 数字化精度对电场变化仪的信号进行采集,数字化后的信号通过 PCI 总线从采集卡连续的传输到计算机内存,当有采样数据高于阈值时,程序自动记录 1ms 长度的数据。记录时程序将数据连续每 5 个采样点相加,这样采样率从 10MHz 降为 2MHz,在减少数据量的同时数字化精度得到提高。阈值通过设计好的算法给出,随信号浮动变化。这种方法与固定触发阈值的记录方式相比,提高了记录信号细微变化的能力,还可避免环境中低频电场波动(一般为 50Hz 工频干扰)以及环境噪声所引起的误触发。数据保存时与触发时刻信息一同写入文件。所记录闪电事件的触发时刻信息由高精度 GPS 提供。当有满足触发条件的事件连续发生时,采集系统通过对采集卡中高速缓存的交替读写,可进行无死时间的分段连续采集(图 2)。使用这样的触发记录方式可以把所有满足触发条件的事件完整地记录下来。当有闪电发生时,采集系统获得的数据将是一组长度 1ms,时间间隔不等的数据(如图 1 中的波形)。下文中对具体闪电事件波形特征的分析就是利用这样的数据进行的。

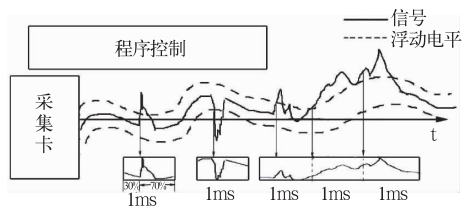


图 2 数据采集方式

本图为浮动触发电平分段记录方式的功能示意图。虚线为浮动电平算法计算出的浮动触发阈值,可以看到左起前两次触发都进行了 1ms 的记录,第三次触发后因连续触发进行了 3ms 的连续记录

图 3 为分别由常规数据采集方式,与分段数据采集方式给出的同一次地闪的波形记录,其中 a 为分段记录结果,b 为常规触发记录结果。在常规的数据采集方式中触发电平设为固定值,当信号幅度达到触发电平值时系统开始记录固定时间长度的数据。以此记录方式捕获波形(图 3b)的表现形式与图 2 中实线连续波形相同。以分段记录方式获取波形(图 3a)的表现形式与图 2 实线波形下方方框中的波形片断相同。对比图 3 中两种采集方式获得的数据,分段记录方式在保证记录有效数据的同时,减小了需要存储和分析处理的数据量,这种数据采集方式更适用于闪电探测系统。

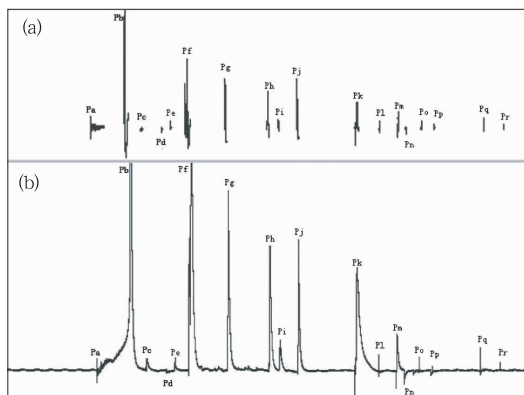


图 3 两种数据采集方式结果对比

其中 a、b 两图使用不同数据采集方式对同一闪电事件的波形记录。a 图使用浮动触发电平分段记录方法获得的波形,b 图使用固定触发电平的常规触发记录方法获得的波形。两图中标记出的脉冲 Pa 至 Pr 一一对应,但由于两个波形记录使用的快电场变化仪不同,两者的波形略有差异

2 波形特征分析

2.1 参数定义

区分不同闪电放电事件的波形,需对波形特征进行研究。对普通信号只要了解其斜率特征、极点数特征、极点距离特征、拐点数

特征,以及光滑性特征就可以大致确定波形^[18];对于描述闪电辐射这种自然产生的信号还必须结合专业知识,对特征进行具体分析和合理运用。图4是手工绘制的波形参数定义示意图。通过确定图4中标注的波形幅度和时间基准位置,对波形参数定义如下:

(1) 上升时间 t_r 是脉冲上升沿 10% 幅度位置到峰值点的时间差 $t_r = T_{P_1} - T_{a_1}$, T_{P_1} 和 T_{a_1} 分别表示 P_1 、 a_1 两点的 T 轴坐标值。

(2) 下降时间 t_f 是脉冲峰值点到下降沿 10% 幅度位置的时间差 $t_f = T_{b_1} - T_{P_1}$ 。

(3) 脉冲宽度 t_w 是脉冲上升沿 50% 幅度位置到下降沿 50% 位置的时间差 $t_w = T_{b_2} - T_{a_2}$ 。

(4) P_1 与 P_0 的时间间隔 t_{10} 代表被分析脉冲与前一同极性脉冲的时间间隔 $t_{10} = T_{P_1} - T_{P_0}$ 。

(5) P_1 与 P_2 的时间间隔 t_{21} 代表被分析脉冲与后一同极性脉冲的时间间隔 $t_{21} = T_{P_2} - T_{P_1}$ 。

(6) 后脉冲峰值比 R_{21} 代表被分析脉冲与后一同极性脉冲的幅度比 $R_{21} = (A_{P_2} - b_{ase}) / (A_{P_1} - b_{ase})$ 。

(7) 前脉冲峰值比 R_{01} 代表被分析脉冲与前一同极性脉冲的幅度比 $R_{01} = (A_{P_0} - b_{ase}) / (A_{P_1} - b_{ase})$ 。

(8) R_{ab} 是被分析脉冲前的最大波形波动幅度与其峰峰值之比 $R_{ab} = (P_{reMax} - P_{reMin}) / (A_{P_1} - A_{V_1}) = (A_{P_0} - A_{V_0}) / (A_{P_1} - A_{V_1})$ 。

(9) R_m 是所分析脉冲峰峰值与所在数据中最大值最小值之差的比值 $R_m = (A_{P_1} - A_{V_1}) / (Max - Min)$ 。

(10) 脉冲负向与正向幅度的比 $R_b = (b_{ase} - A_{V_1}) / (A_{P_1} - b_{ase})$ 。

其中 t_r 、 t_f 、 t_w 三个参数反映被分析脉冲的斜率特征及持续时间,可用于确定脉冲的基本形状。通过 t_{10} 与上升时间 t_r 以及 t_{21} 与

下降时间 t_f 的对比还可以确定 P_1 与 P_0 以及 P_2 与 P_1 是否存在重叠。 R_{21} 、 R_{01} 两个参数反映被分析脉冲前后脉冲的幅度状况。 R_{ab} 用于观察脉冲前方波形的变化幅度,尤其当待分析脉冲前没有与其极性相同的脉冲或没有脉冲时, R_{ab} 可代替 R_{01} 参数用于分析。 R_b 反映脉冲的双极性特征。脉冲峰峰值与所在数据最大值最小值之差的比值 R_m 可以描述脉冲在整条数据中的幅度地位。

在进行波形特征提取前,为保证波形光滑性一致,所有数据均经过低通滤波。经比较在不严重影响波形参数的前提下,选用 500kHz 作为低通滤波的截止频率可达到较好效果。

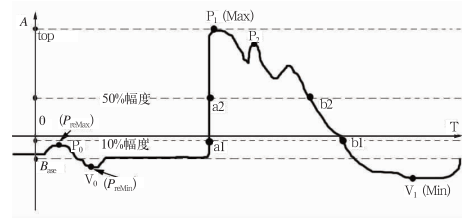


图4 波形特征定义图示

此图为人工绘制,无具体单位。图中横轴(T)为时间轴,纵轴(A)为幅度轴。 P_1 为所分析脉冲峰值点, P_2 为其次级峰值点, V_1 为其反向过冲的谷值点。 P_0 和 V_0 分别为前一个脉冲的峰值点和谷点。 B_{ase} 和 top 分别为所分析脉冲起始值与峰值确定的两个基准。另外,设 Max 与 Min 分别为波形中的最大值与最小值, P_{reMax} 与 P_{reMin} 为 a_1 前部数据中的最大值与最小值。 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别为 10% 幅度基准和 50% 幅度基准与所分析脉冲上升沿与下降沿的交点

2.2 回击波形特征分析

表1中列出的是负地闪回击初始峰值特征统计结果以及部分前人相关工作的结果。其中除 t_{10} 、 R_{01} 两个参数的统计使用 129 个样本外,均使用全部 750 个样本进行统计。对前人工作中没有给出的统计项以“/”标记。

上升时间和下降时间两个特征的统计结

果,很好地反映出回击波形初始峰值具有陡峭上升沿与缓慢下降沿的特点。尽管上升时间的最大值达 $23.5\mu\text{s}$,但从 $2.9\mu\text{s}$ 的平均值可以看出绝大多数情况下上升时间都很短。上升时间统计结果与 Master 等人 (1984)^[19]、以及张义军等人 (2003)^[20] 工作中的结果相比,具有较好的可比性。Master 等人使用的探测设备,与我们所用设备性能相

似,因此平均值较为接近;张义军等人 (2003)^[20] 使用的电场信号来自 DF 探测器集成的低频电场天线带宽在 400kHz 以下,因此接收信号频率较低,波形的上升沿会相对较为缓慢。选取的样本包含不同距离的地闪回击,因此下降时间和脉冲宽度的取值变化范围较大,没有找到合适的已有工作进行对比。

表 1 负地闪回击初始峰值特征统计

波形特征	平均值	标准差	最大值	最小值	结果出处
	2.9	1.7	23.5	1	本次工作
$t_r/\mu\text{s}$	2.6	1.2	/	/	Master et al. (1984) ^[19]
	8.33	/	20	3	张义军等人(2003) ^[20]
$t_f/\mu\text{s}$	89.0	193.8	929.0	4.5	本次工作
$t_w/\mu\text{s}$	13.4	57.4	887.5	2.5	本次工作
	29.3	76.3	509.0	2.5	本次工作
$t_{10}/\mu\text{s}$	11	8.8	/	/	Krider et al. (1977) ^[21]
样本数/129	8.9	3	/	/	V. Cooray et al. (1985) ^[22]
	14.8	8.8	/	/	Bok-Hee LEE et al. (2006) ^[23]
$t_{21}/\mu\text{s}$	6.9	21.6	430	0	本次工作
	/	/	11.6	3.2	Bok-Hee LEE et al. (2004) ^[24]
R_{21}	0.61	0.27	1.01	0	本次工作
	/	/	0.77	0.23	Bok-Hee LEE et al. (2004) ^[22]
R_{01}	0.07	0.07	0.36	-0.001	本次工作
	0.1	0.07	0.38	0.01	Krider et al. (1977) ^[21]
	0.18	0.09	/	/	Bok-Hee LEE et al. (2006) ^[23]
R_m	0.71	0.09	1	0.46	本次工作
R_b	0.15	0.11	0.73	0	本次工作
	0.32	/	/	/	张义军等人(2003) ^[20]
R_{ab}	0.08	0.08	0.66	0	本次工作

由于在数据中,存在大量回击初始峰值脉冲前无其他脉冲的情况。因此对 t_{10} 、 R_{01} 的统计,只使用了存在前一脉冲的样本。其他参数所用样本数都为 750 个

t_{10} 与 R_{01} 反映回击初始峰值前最后一个先导脉冲的特征。因为样本中包含不同距离的地闪回击,所以并不是每个样本数据都包含先导脉冲。具有先导脉冲的数据共 129 段。个别数据因回击前存在电场波动导致基准计算错误,使先导幅度出现了负值,但这属于极个别情况。两参数统计结果与 Krider 等人 (1977)^[21]、V. Cooray 等人 (1985)^[22] 以及 Bok-Hee LEE 等人 (2006)^[23] 的统计结果

相比存在较大差异,这可能是由于探测设备差异,以及波形自身的复杂性引起的。两参数虽然与已有工作的统计结果存在较大差异,但在所用数据的波形识别工作中仍具有实用价值。

R_{21} 与 t_{21} 反映回击初始峰值与其次峰的相对关系。表 1 中 t_{21} 与 R_{21} 取 0,代表此回击没有次级峰值,一般对应距离测站较远回击的波形;取值大的 t_{21} ,对应距离测站较近的

地闪回击(图 1c)。 R_{21} 与 t_{21} 的取值范围包含了 Bok-Hee LEE 等人 (2004)^[24] 给出的范围,且此次统计给出的平均值也处于 Bok-Hee LEE 等人统计的取值范围中。差异可能是由设备以及样本选取的不同造成的。

R_b 、 R_m 和 R_{ab} 三个参数体现波形的幅度特征。 R_b 的统计结果虽然最大值可达 0.75,但平均值仅为 0.15,这说明绝大多数回击的反向过冲幅度都远小于初始峰值,这与张义军等人 (2003)^[20] 的平均结果相比具有较好的可比性。从 R_m 平均值与数据最大、最小值的对比可以看出,多数回击初始峰值的峰峰值为数据中的最大峰峰值,但在闪电距离测站较近或次级峰值大于初始峰值的情况下,仍存在初始峰值的峰峰值小于整条数据中最大峰峰值的情况。 R_{ab} 反映的信息与 R_{01} 有一定程度的重叠,但峰峰值的比较可以更好地反映回击前可能出现的双极性脉冲的情况。

2.3 双极性窄脉冲波形特征分析

一类伴随有强烈高频辐射的脉冲被 Willett 称为双极性窄脉冲(图 1j),其极性有正有负,脉冲幅度与地闪回击幅度相当^[25]。这类事件最早由 Le Vine, Willett, Medelius 等人先后发现^[26-27]。首次简要的报道是由

Shao 和 Smith 等人给出的^[28-29]。通过对大量双极性窄脉冲事件的研究,Smith 等人对其特征进行了统计,并与常规闪电电场变化进行了比较^[14,30]。Smith 认为双极性窄脉冲由一类称为袖珍云闪的放电产生,且区别于常规地闪和云闪放电^[30]。这类放电事件的物理机制未明,需要对其进行进一步研究,因此也作为识别的重点予以关注。

这种脉冲根据初始峰值极性的不同可分为负双极性窄脉冲(NNBPs, Narrow Negative Bipolar Pulses)和正双极性窄脉冲(NPBPs, Narrow Positive Bipolar Pulses)两种。本文选出两种脉冲样本共 75 个,其中正双极性窄脉冲 29 个。在选取样本时主要考虑脉冲幅度相对于周围波形的大小及其发生时间相对前后数据的孤立性。由于对双极性窄脉冲的认识尚不充足且缺少距离信息,在选取样本时对脉冲的上升时间、下降时间以及脉冲宽度的取值略有放宽,以便为后续研究提供足够资料。表 2 内容为双极性窄脉冲初始峰值特征的统计结果,以及与 Smith (1999)统计结果的对比。对无法对比的统计项以“/”标记。

统计结果中,上升时间 t_r 、下降时间 t_f 以及脉冲宽度 t_w 很好地体现出双极性窄脉冲“窄”的特点。 R_m 绝大多数取值为 1, R_a

表 2 双极性窄脉冲初始峰值特征统计

波形特征	平均值	标准差	最大值	最小值	结果出处
$t_r/\mu s$	1.7	0.6	4	1	本次工作
	/	/	3.1	1.5	David A. Smith 1999 ^[30]
$t_f/\mu s$	2.1	0.8	4.5	1	本次工作
$t_w/\mu s$	2.4	0.6	4.5	1.5	本次工作
	/	/	6	3.4	David A. Smith 1999 ^[30]
R_m	1.00	0.01	1	0.94	本次工作
R_b	0.31	0.08	0.54	0.11	本次工作
	0.37	/	/	/	David A. Smith 1999 ^[30]
R_{ab}	0.03	0.02	0.10	0.003	本次工作

均非常小并且 NBP 前不存在其他脉冲,这些结果充分反映出它孤立存在的特征。所有统计结果与 Smith 1999^[30] 给出的结果有较好的一致性,存在的差异可能由计算方法以及样本的选取差异造成。

3 闪电放电类型的波形识别

3.1 波形判别标准

根据对两类放电事件波形特征的分析,我们制定了一组进行波形特征匹配的判断标准。在制定波形特征判断标准时,把某些波形特征参数的可能取值分为较大可能区 A 区和较小可能区 B 区。例如,回击的上升时间取值集中分布在 $5\mu\text{s}$ 附近,这一区间就被设定为 A 区,其余部分被设为 B 区。以下规则中根据待分析脉冲幅度的差异,8、9 两项会做适当调整。在进行判断时,如果波形满足所有 A 区条件或满足 B 区条件的参数小于 2 个即可给出结果。满足所有回击条件,或满足大部分回击条件但有一个条件取值在 B 区的波形,被归类为回击。满足所有双极性窄脉冲条件的波形被归类为双极性窄脉冲。其余波形被分为“其他类”。根据波形的幅度情况这一要求可作部分调整。

对于回击波形,其基本特征应满足:

1) 上升时间要短。

A 区($1\mu\text{s} \leq t_r < 10\mu\text{s}$)

B 区($10\mu\text{s} \leq t_r < 25\mu\text{s}$)

2) 下降时间取值要大于上升时间一定程度。

A 区($t_f - t_r > 3\mu\text{s}$, $t_f/t_r > 2.5$, $5\mu\text{s} \leq t_f < 500\mu\text{s}$)

B 区($t_f - t_r > 3\mu\text{s}$, $1.5 \leq t_f/t_r \leq 2.5$, $t_f \leq 5\mu\text{s}$, $500\mu\text{s} \leq t_f < 750\mu\text{s}$)

3) 脉冲宽度要符合前面统计特征时给出的范围。

A 区($t_w \geq 4\mu\text{s}$)

B 区($2.5\mu\text{s} \leq t_w < 4\mu\text{s}$)

4) 脉冲的起始值不能过大,使用 R_i 表示。

初始峰值为正极性时, ($0.5 < R_i < 1.4$)

初始峰值为负极性时, ($-1.4 < R_i < -0.5$)

5) 脉冲的反向过冲幅度不得大于初始峰值幅度。

A 区($0 \leq R_b \leq 0.25$)

B 区($0.25 < R_b \leq 0.66$)

6) 脉冲的上升沿不得有其余脉冲叠加,下降沿一般情况下必须有次峰叠加。对部分下降沿没有次峰叠加的波形,要求其幅度必须小于一定阈值。($t_{21} < t_f$)

7) 回击前一脉冲幅度必须小于回击初始峰值,其比值满足前文统计范围。

A 区($R_{01} < 0.35$, $t_{10} > 1\mu\text{s}$ 或不存在前一峰值, $R_{ab} \leq 0.3$)

B 区($0.35 \leq R_{01} < 0.5$, $t_{10} > 1\mu\text{s}$ 或不存在前一峰值, $0.3 < R_{ab} \leq 0.5$)

8) 次峰峰值与初始峰值的比例一般情况下要小于 1,在距离初始峰值较近时可略大 1。

总体上要求 $R_{21} < 1.5$,

9) 脉冲峰峰值相对于其所在波形的最大变化幅度不能过小。

总体上要求 $R_m > 0.5$

而对于双极性窄脉冲,其基本特征则应满足:

1) 上升时间短。

$1\mu\text{s} \leq t_r \leq 4\mu\text{s}$

2) 下降时间短。

$1.5\mu\text{s} \leq t_f \leq 4\mu\text{s}$, $|t_r - t_f| \leq 3\mu\text{s}$

3) 脉冲宽度窄。

$1.5\mu\text{s} \leq t_w \leq 5\mu\text{s}$

4) 脉冲起始值需在零轴附近。

5) 总脉冲数不大于两个。

6) 被分析脉冲前无其他脉冲。

$$R_{ab} < 0.1$$

7) 在整段数据中,被分析脉冲峰峰值等于或接近最大值与最小值之差。

$$R_m > 0.94$$

8) 脉冲下降沿不允许有脉冲叠加。

$$t_{21} > t_f$$

9) 后一脉冲幅度要小于被分析脉冲。

$$R_{21} < 0.4$$

10) 脉冲反向过冲幅度与初始峰值幅度的比要符合前文给出的范围。

$$0.11 < R_b < 0.54$$

11) 脉冲幅度不能过小,这个特征最好能对照定位结果进行使用。

3.2 波形判别标准测试

为测试波形识别程序的识别效果,选取2007年7月6日11时,一个小时的数据进行程序识别与人工识别效果对比,对比结果在表3中给出。人工识别是按照目前对不同闪电放电过程电场变化波形的认识,对波形进行区分。虽然前人给出大量回击和双极性窄脉冲的电场变化波形特征的统计结果,但在缺少闪电发生位置信息时,对部分闪电波形的特征仍无法进行准确判断。尤其对双极性窄脉冲而言,它的特点之一就是辐射很强,如果不利用定位信息对其幅度进行归一化,很难与其他类似的小幅度双极性脉冲相区分,而它孤立发生的特点,又导致无法与相邻闪电过程幅度进行比较。正地闪回击的人工识别也存在类似的困难,相比之下负地闪回击波形在数据中较容易确认。如表3所示,通过人工识别共找出负地闪回击168个,程序识别出了153个。由于数据中正地闪回击和双击性窄脉冲波形幅度均偏小,难以确凿地给出结论,所以这里给出人工确认的数字仅作参考。

表3 程序分类效果与人工分类效果对比

	程序区分	人工区分
负地闪回击数	153	168
正地闪回击数	45	53
双极性窄脉冲数	23	20

从试验结果来看,目前的方法实现了对基本放电事件的分类功能,对负地闪回击的识别率在90%左右,对正地闪回击以及双极性窄脉冲事件的识别也有较好的效果。对于在测试中出现的问题将逐步予以改进。

4 结果与讨论

闪电放电事件区分技术是闪电探测系统特别是全闪探测系统的重要组成部分。在不同闪电探测系统中,区分闪电放电事件的依据都是结合各自数据特点制定的。文中所用快电场变化数据来自正在开发中的一套全闪探测系统。通过负地闪回击时域特征分析,得到回击上升时间、下降时间、脉冲宽度的平均值分别为 $2.9\mu\text{s}$ 、 $89.0\mu\text{s}$ 、 $13.4\mu\text{s}$,与前后脉冲的时间间隔平均值分别为 $29.3\mu\text{s}$ 与 $6.9\mu\text{s}$,与前后脉冲幅度比的平均值分别为0.07与0.61,并得到回击与所在数据最大最小值之差的比值、回击反向过冲幅度与初始峰值的比值,以及与初始峰值前最大最小值之差的比值的平均值分别为0.71、0.15、0.08。通过双极性窄脉冲时域波形特征分析得到其上升时间、下降时间、脉冲宽度的平均值分别为 $1.7\mu\text{s}$ 、 $2.1\mu\text{s}$ 、 $2.4\mu\text{s}$,脉冲幅度与所在数据最大最小值之差的比值、反向过冲幅度与初始峰值的比值,以及与初始峰值前最大最小值之差的比值的平均值分别为1.00、0.31、0.03。虽然由于探测设备以及计算方法的差异,只有部分参数的统计结果与前人做出的结果具有较好的可比性,但作为针对这套闪电探测系统的波形特征分析而言,无论对于闪电放电事件区分还是闪电放电特

征研究,全部参数的统计结果都具有很好的指导意义。

负地闪回击和双极性窄脉冲波形特征的分析结果,被用来制定两类放电事件波形的判别标准。结合此标准编写的波形识别程序,很好地实现了数据读取、预处理、波形特征自动提取,以及波形特征判别功能。在初步的分类效果测试中,对负地闪回击的识别效率在90%左右,对正地闪回击和双极性窄脉冲事件的识别也有较好的效果。

波形自动识别是用计算机代替人进行波形识别,因此波形自动识别效果只能尽可能地接近人工识别的效果。实际闪电波形非常复杂,且与传感器特性、距离等因素有关,即使非常仔细的人工识别,也无法完全确保判断的准确性。目前的工作是在不利用闪电定位结果的情况下仅仅通过波形特征分析做出的。由于缺少足够样本,对正地闪回击的识别利用了负地闪回击的特征分析结果。尽管如此,对回击和双极性窄脉冲波形的识别已较好地达到人工识别的效果,已具有实用价值。

参考文献

- [1] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [2] 孟青, 吕伟涛, 姚雯, 等. 地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J]. 气象, 2005, 31(9): 30-33.
- [3] 陈绍东, 王孝波, 李斌, 等. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. 气象, 2006, 32(10): 11-19.
- [4] Krider E. P., Noggle R. C., Uman M. A., A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes[J]. Appl. Meteor, 1976, 15: 301-306.
- [5] Casper P. W., Bent R. B., Results from the LPATS USA national lightning detection and tracking system for the 1991 lightning season[R]. in Proc. 21st Int. Conf. on Lightning Protection, Berlin, 339-342.
- [6] Cummins K. L., Murphy M. J., Bardo E. A., et al., A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network[J]. J. Geophys. Res., 1998, APRIL 27, VOL. 103, NO. D8: 9035-9044.
- [7] Markson R. J., Ruhnke L. H., Lightning Locating System, United States Patent, Patent NO.: US 6,246,367 B1, 2001.
- [8] Moses R. L., Kuzma J. G., Ostrander K. A. et al., System for classifying lightning strikes to enhance location estimation thereof, United States Patent, Patent No.: 5,325,299, 1994.
- [9] Kuzma J. G., Ostrander K., Moses R. L., et al., Sampled data lightning strike detection and mapping system capable of early detection of an invalid strike from sampled, United States Patent, Patent No.: 5,305,210, 1994.
- [10] Richard P., Auffray G., VHF-UHF interferometric measurements applications to lightning discharge mapping[J]. Radio Sci., 1985, 20(2): 171-192.
- [11] Kawasaki Z. I., Yamamoto K., Matsuura K. et al., SAFIR operation and evaluation of it's performance[J]. Geophys. Res. Lett., 1994, 21(12): 1133-1136.
- [12] Finke U., Kreyer O., Detect and locate lightning events from Geostationary Satellite observations, Report Part I: Review of existing lightning location systems, September 2002: 3-17.
- [13] Robert, S. Massey, Kenneth B. Eack, Marc H. Eberle et al., Operation of an array of field-change detectors to provide ground truth for FORTE data, ICAE'99.
- [14] Smith D. A., Eack K. B., Harlin J. et al., The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations[J]. J. Geophys. Res., 2002, 107, NO. D13, 4183.
- [15] Shao, X. M., Mark Stanley, Amy Regan et al. Total lightning observations with the new and improved Los Alamos sferic array (LASA)[J]. J. Atmos. Ocean. Tech., 2006, 23: 1273-1288.
- [16] Murphy M. J., Cummins K. L., Albur E. P., Lightning detection and data acquisition system, United States Patent, pub. NO.: US 2003/0151397 A1, 2003.
- [17] Heavner M. J., Suszcynsky D. M., Smith D. A. et al. LF/VLF intracloud waveform classification

- [R]. Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 2003, Centre National d'Etudes Spatiales, 601-604.
- [18] 张文栋, 杨东凯, 周劲, 信号的模糊识别, 测试技术学报[J], 1994, 8(2): 140-145.
- [19] Master M. J., Uman M. A., Beasley W. et al. Lightning induced voltages on power lines: experiment [J]. IEEE Trans, 1984, PAS103: 2519-2529.
- [20] 张义军, 言穆弘, 张翠华, 等. 甘肃平凉地区正地闪特征分析[J]. 高原气象, 2003, 22(3): 295-300.
- [21] Krider E. P., Weidman C. D., Noggle R. C. et al., The electric field produced by lightning stepped leaders[J]. J. Geophys. Res., 1977, 82:951-960.
- [22] Cooray V., Lundquist S., Characteristics of the radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90: 6099-6110.
- [23] Lee B. H., Jeong D. C., Lee D. M. et al., Characteristics of the Lightning Stepped-Leader Electromagnetic Pulses[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(2A): 933-939.
- [24] Lee B. H., Eom J. H., Kang S. M. et al., Characteristics of the Radiation Field Waveforms Produced by Lightning Return Strokes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 41:4379-4385.
- [25] Willett J. C., Bailey J. C., and Krider E. P., A Class of Unusual Lightning Electric Field Waveforms With Very Strong HF Radiation[J]. J. Geophys. Res., 1989, 94 16:255-267.
- [26] LeVine, D. M., Source of the strongest RF radiation from lightning[J]. J. Geophys. Res., 1980, 85: 4091-4095.
- [27] Medelius P. J., Thomson E. M., and Pierce J. S., E and DE/DT Waveshapes for Narrow Bipolar Pulses in Intracloud Lightning[J]. Proc. Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, NASA Conference Publication CP-3106, Cocoa Beach, FL, NASA, 12-1-12-10.
- [28] Shao, X. M., and Krehbiel P. R., The Spatial and Temporal Development of Intracloud Lightning[J]. J. Geophys. Res., 1996, 101(26): 641-668.
- [29] Smith, D. A., Shao, X. M., Holden D. N. et al., Observations of Isolated High Frequency Radio Bursts in Association with Thunderstorm Activity: A Possible Link to TIPP Events. Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, 1996, 77 (Fall Meeting Suppl.), F89.
- [30] Smith D. A., and Coauthors, A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions[J]. J. Geophys. Res., 1999, 104 (D4): 4189-4212.