

文章编号: 2096-1618(2017)05-0498-05

梯级先导电场变化特征分析

李海雷, 商鹏, 刘向科, 孙荆茶

(山东省雷电防护技术中心, 山东 济南 250031)

摘要:利用快慢天线测量的济南地区的2015年7-8月的闪电快慢电场,共选取12次闪电首次回击前的梯级先导数据进行分析,先导平均持续时间为1689 μs ,先导脉冲时间宽度6.81 μs 。按照梯级先导波形的特征将梯级先导分为4类,持续时间分别为:915.4 μs 、241.95 μs 、8.2 μs 及5513.87 μs ;脉冲时间宽度分别为:17.13 μs 、4.53 μs 、1.02 μs 及3.79 μs ;脉冲极性与首次回击极性相同,前三类脉冲为单极性脉冲,第四类前期脉冲双极性(脉冲下降沿与回击相同),后期脉冲单极性;前两类先导脉冲有小脉冲叠加现象,后两类脉冲曲线光滑;负地闪先导持续时间504.03 μs ,脉冲时间宽度10.62 μs ,正地闪先导持续时间2874.63 μs ,脉冲时间宽度3.82 μs 。

关键词:快慢天线;闪电;梯级先导;快慢电场;电场特征

中图分类号:TM937

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.05.006

0 引言

闪电是一种瞬间大电流放电过程,一次闪电过程可以分为预击穿(初始击穿)、先导过程、回击、继后回击及回击间过程,国内外众多学者已经深入研究了闪电的众多物理过程,闪电电场一直是研究的重点方向。近年来,随着测量仪器的不断改进,部分观测仪器的时间分辨率已经达到微秒级或亚微秒级,仪器的改进大大促进了闪电电场的研究深度。作为开辟放电通道的梯级先导过程的研究对确定雷击点的位置具有关键作用^[1]。Kirder等^[2]利用快慢电场测量仪的测量结果发现梯级先导脉冲的上升沿时间小于0.3 μs ,小于首次回击的上升沿时间平均值2.6 μs 。郅秀书等^[3]分析了广州从化地区的负地闪回击前200 μs 内先导电场变化波形后认为先导的电场变化特征可分为3类,且3类电场变化的先导脉冲平均时间间隔不同。王华^[4]分析了北京和广州地区云闪电电场变化特征,发现两地区的初始击穿时间宽度存在地区差异。试图利用快慢天线测量的济南地区的闪电快慢电场数据,对首次回击前的梯级先导电场进行分析,以期揭示闪电梯级先导的电场特征,为雷电防护技术的发展提供技术支持。

1 数据的选取

快慢天线的技术参数已经在相关文献中说明^[5-6],不再赘述。从2015年7月30-31日及8月31日两次雷暴过程测量记录到的3855次数据中,选取12次闪电作

为样本进行分析,这些闪电样本回击前的电场均有可识别的脉冲。12次样本中正地闪6次,负地闪6次,正负闪各占比50%。样本闪电的平均回击次数2.58次,最大回击次数8次,为正地闪。按照闪电发生时间不同,对12次闪电进行编号,例如7302025次闪电表示该闪电发生在7月30日20时25分。

2 梯级先导电场的变化特征

利用高频摄像机的研究表明,一般梯级先导是从回击前的30 ms开始^[7],因此,将回击前有连续电场变化的波形均认为是梯级先导引起的^[3]。分析发现样本闪电的梯级先导持续时间为5.4~9267 μs ,平均持续1689 μs ,远小于30 ms,最大时间长度为9.3 ms。郅秀书^[3,8]分析广东地区的闪电快慢电场特征时发现,在回击前200 μs 左右的先导电场脉冲容易分辨,这与先导的辐射强度较小有关,先导开始时,距离地面垂直高度较高,先导的辐射被淹没在整体电场中,不易被发现。分析主要集中在先导电场脉冲的可识别部分,较小的电场强度对电子设备等的危害可忽略。

2.1 梯级先导的分类

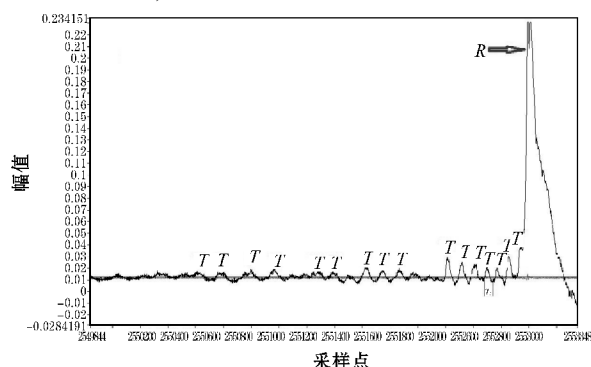
郅秀书^[3]按照先导电场脉冲的最后一跳与回击电场间的特征,将先导脉冲分为了3类,一类为最后一个先导脉冲下降到一半时即发生回击,一类为最后一个先导脉冲完全下降后即发生回击,一类为最后的先导脉冲与回击间有寂静期。李婵等^[9]分析了2012年5-9月广东闪电电场,发现存在不规则先导脉冲现象,类似预击穿的脉冲簇。余海等^[10]分析了2011年7-8

收稿日期:2017-01-05

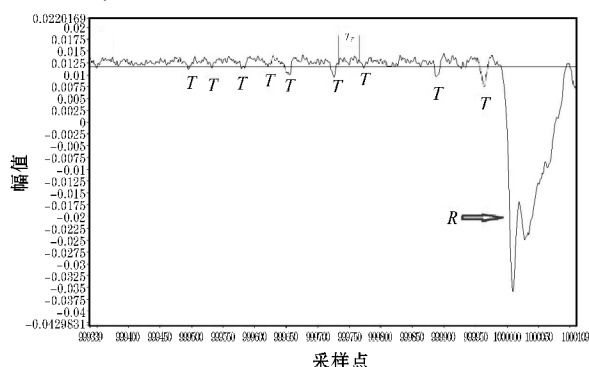
基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2016DP04);山东省气象局青年科研基金资助项目(2016SDQN11)

月青海大通的闪电电场特征后认为,梯级先导是初始击穿过程。文中根据样本闪电电场的波形特征,将闪电电场样本分为4类(图1所示), R 代表回击, T 代表先导脉冲, T_i 表示脉冲宽度(图1a中), T_T 表示脉冲间隔宽度(图1b中),图中横轴为采样点,每个采样点 $0.2\text{ }\mu\text{s}$,竖轴为相对幅值。第一类波形(图1a)占样本闪电的25%,典型特征为先导前期电场平滑波动,最后一个先导未下降完毕即产生回击。第二类波形(图1b)占比33.33%,典型特征为先导前期电场平滑波

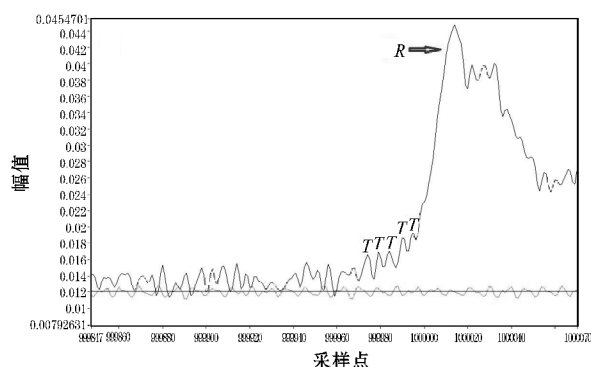
形,最后一个先导下降完毕后即产生回击。第三类波形(图1c)占比16.67%,典型特征为前期先导脉冲不易区分,慢电场总体电场强度上升时梯级先导较易识别。需要说明的是,图1(c)中上升先导前(T 所示)的波形变化始终存在,因此只考虑上升部分为梯级先导。第四类波形(图1d)占比25%,典型特征为不规则的脉冲簇,既有双极性脉冲,也有单极性脉冲,值得注意的是,该类不规则波形全部出现在正地闪中,因手中数据不足,不能对二者间的关系进一步分析。



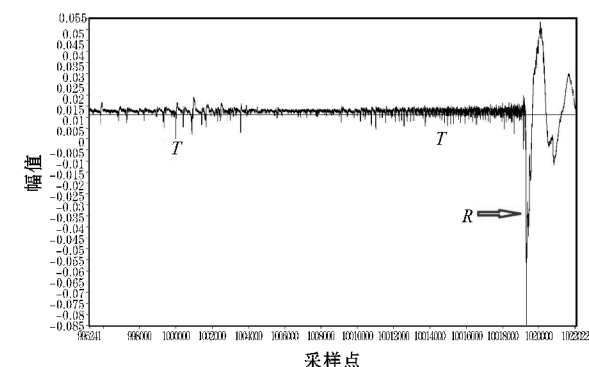
(a) 第一类波形,7302025次闪电



(b) 第二类波形,7310135次闪电



(c) 第三类波形,7301714次闪电



(d) 第四类波形,7310014次闪电

图1 4个先导的电场变化波形

2.2 梯级先导的电场脉冲变化特征

从12次闪电样本中选取了107个先导脉冲,经统计先导脉冲的平均时间宽度为 $6.81\text{ }\mu\text{s}$,均方差 $6.30\text{ }\mu\text{s}$,时间宽度从 $0.6\sim 30\text{ }\mu\text{s}$ 不等。梯级先导脉冲的极性与回击的极性相同。先导脉冲幅值随时间变化而逐步增强,梯级先导的最后一跳均为先导部分最高幅值,这与先导逐步接近地面有关。部分先导的T波形由单个脉冲构成,如图1(b)及图1(c)所示,部分先导的T波形上叠加有小脉冲,如图1(a)及图1(d)所示。4类先导脉冲波形尚存在一定的差异。

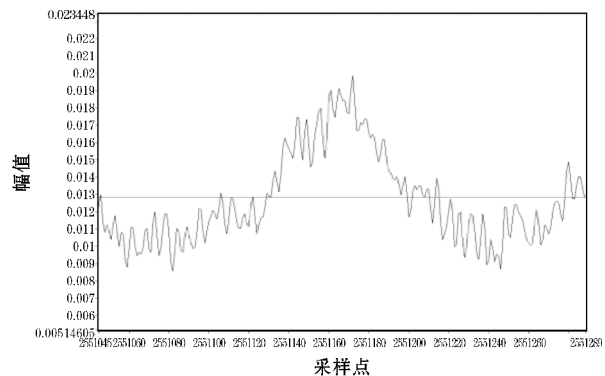
2.2.1 第一类波形

第一类先导的持续时间为 $252.2\sim 1830.4\text{ }\mu\text{s}$,平均 $915.4\text{ }\mu\text{s}$,均方差 $818.68\text{ }\mu\text{s}$ 。脉冲波形呈对称的倒V型,脉冲间隔时间宽度不明显,为连续的脉冲。先导脉冲的时间宽度为 $8\sim 30\text{ }\mu\text{s}$,平均 $17.13\text{ }\mu\text{s}$,均方差

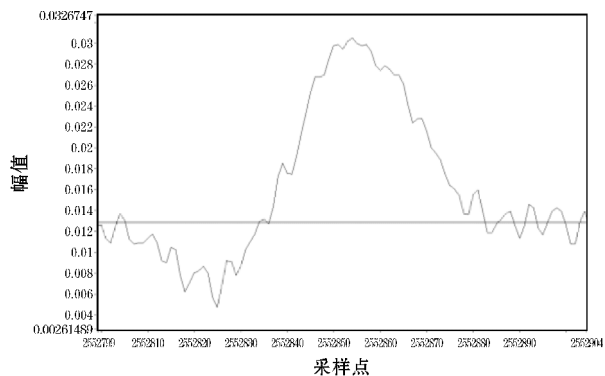
$5.06\text{ }\mu\text{s}$ 。展开第一类波形的先导脉冲(图2所示)后发现,先导脉冲上叠加有小脉冲,小脉冲的时间宽度主要集中在 $0.4\sim 1.6\text{ }\mu\text{s}$,越靠近回击叠加的小脉冲越少,小脉冲时间宽度越小。

2.2.2 第二类波形

第二类先导过程持续时间为 $66.2\sim 564.2\text{ }\mu\text{s}$,平均 $241.95\text{ }\mu\text{s}$,均方差 $201.70\text{ }\mu\text{s}$ 。脉冲呈对称V型,先导脉冲的时间宽度为 $2.4\sim 8\text{ }\mu\text{s}$,平均 $4.53\text{ }\mu\text{s}$,均方差 $1.32\text{ }\mu\text{s}$ 。脉冲间时间间隔为 $8.0\sim 22.6\text{ }\mu\text{s}$,平均 $12.8\text{ }\mu\text{s}$,均方差 $4.32\text{ }\mu\text{s}$,该数据与Kirder测量的佛罗里达闪电数据^[11]及邝秀书测量的广东地区闪电数据^[3]结果相近。该类波形的单个脉冲有细微差别,如图3所示,图3(a)脉冲波形较平滑,图3(b)脉冲有小脉冲叠加,叠加的小脉冲数量比第一类波形数量较少,小脉冲脉冲时间宽度为 $0.6\sim 0.8\text{ }\mu\text{s}$ 。

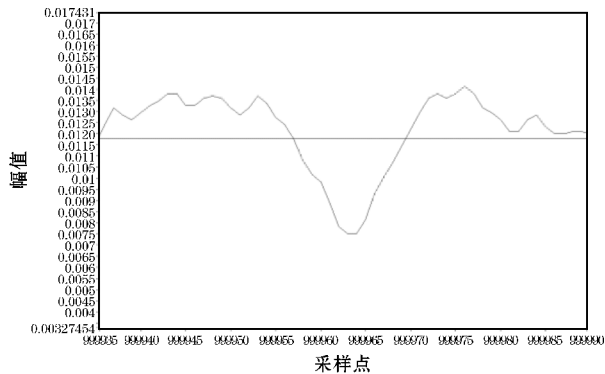


(a) 前期先导脉冲

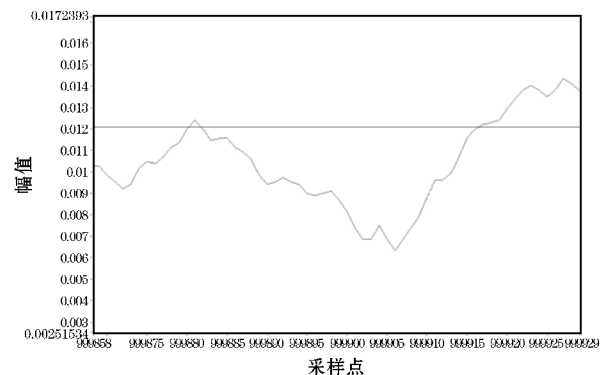


(b) 临近回击先导脉冲

图 2 第一类波形(7302025 次闪电) 先导脉冲展开图



(a) 7310135 次闪电最后一次先导脉冲



(b) 7310256 次闪电最后一次先导脉冲

图 3 第二类波形先导展开图

2.2.3 第三类波形

第三类波形先导持续时间为 $5.4 \sim 11 \mu\text{s}$,平均 $8.2 \mu\text{s}$,均方差 $3.96 \mu\text{s}$ 。先导脉冲的时间宽度为 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{s}$,平均 $1.02 \mu\text{s}$,均方差 $0.18 \mu\text{s}$ 。伴随慢电场总体电场强度增加而不断增加,脉冲间间隔的时间宽度不明显,脉冲曲线平滑。梯级先导随慢电场强度增加而增加。产生该类波形的原因是闪电与快慢天线间距离较大造成的,当距离较远时,仪器测量的电场强度主要由于云内减少的电荷产生,梯级先导本身的电场变化被淹没在总体场强中^[12],当先导靠近地面时,先导产生的电场突出了总体电场。分析快电场变化后发现,该类波形的快电场变化抖动较小,仅在回击时有轻微的可识别的电场抖动,如图 4 所示。Michishita 等通过分析不同距离的首次回击平均频谱密度后发现,随着传播距离的增加,频谱密度的高频部分快速衰减^[13],由于梯级先导的辐射场中高频段占主要部分^[14],因此距离对先导快电场的波形影响较大,进一步证明了造成该类波形的主要原因是距离。

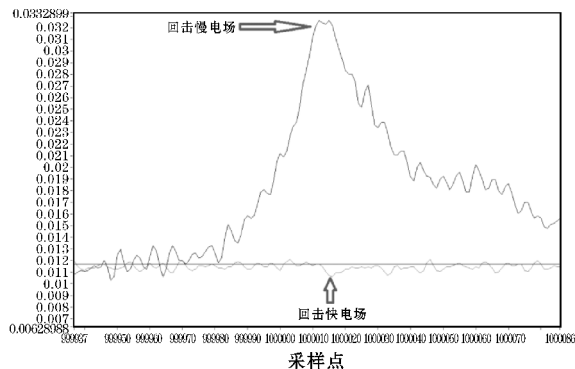
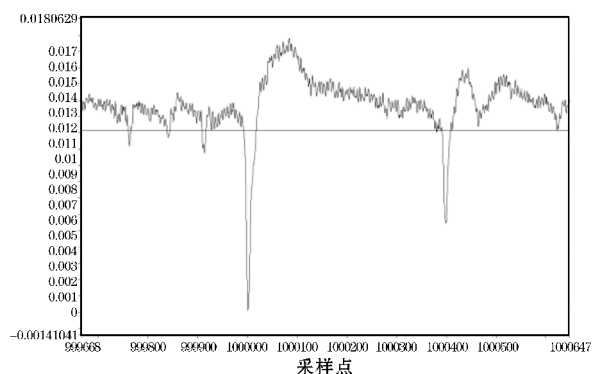


图 4 第三类波形快慢电场对比图(7310720 次闪电)

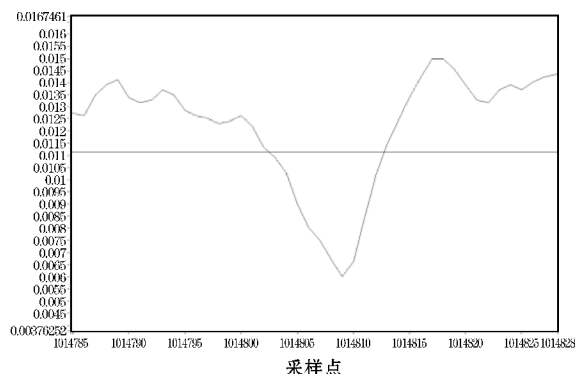
2.2.4 第四类波形

第四类波形均为正地闪,先导持续时间为 $2161.8 \sim 9267.2 \mu\text{s}$,平均 $5513.87 \mu\text{s}$,持续时间大于其余三类波形,该类波形总体为不规则脉冲簇,脉冲时间宽度为 $1.8 \sim 12 \mu\text{s}$,平均 $3.79 \mu\text{s}$,均方差 $1.37 \mu\text{s}$,偏离较小,脉冲曲线光滑。脉冲间隔时间宽度为 $5 \sim 90 \mu\text{s}$,平均 $28.07 \mu\text{s}$,均方差 $19.51 \mu\text{s}$ 。分析图 1d 可发现该先导的电场波形大体分为两部分,前期电场表现为双极性,但下降沿与首次回击极性相同,如图 5(a)所示,下降沿时间小于上升沿时间。后期先导脉冲呈对称 V 型^[8,15],如图 5(b)所示,下降沿时间与上升沿时间相当。

该类脉冲簇与预击穿脉冲簇相似,但仍有细微差别,预击穿的脉冲簇前半周期极性通常和首次回击极性相同,也有些与首次回击极性相反^[8],在该样本中发现所有脉冲簇的极性均与首次回击的极性相同。



(a) 前期先导脉冲



(b) 后期先导脉冲

图5 第四类波形(7310320次闪电)先导脉冲展开图

2.3 正负地闪脉冲电场特征对比分析

负地闪的先导持续时间为 $5.4 \sim 1830.4 \mu\text{s}$,平均 $504.03 \mu\text{s}$,脉冲时间宽度为 $0.6 \sim 30 \mu\text{s}$,平均 $10.62 \mu\text{s}$,这与郅秀书统计的广东地区的负地闪先导脉冲时间宽度(平均 $4.6 \mu\text{s}$,时间间隔 $2 \sim 10 \mu\text{s}$)^[3,9]略有差别。正地闪的先导持续时间为 $66.2 \sim 9267.2 \mu\text{s}$,平均 $2874.63 \mu\text{s}$,脉冲时间宽度为 $1.6 \sim 7.4 \mu\text{s}$,平均 $3.82 \mu\text{s}$ 。对比后发现,正地闪的先导持续时间高于负地闪,负地闪的脉冲宽度大于正地闪。

3 结束语

分析济南地区快慢天线测量的闪电首次回击前梯级先导快慢电场变化特征,发现先导的平均持续时间为 $1689 \mu\text{s}$,先导脉冲时间宽度 $6.81 \mu\text{s}$ 。因部分先导脉冲间隔时间宽度不明显,在此脉冲间隔时间宽度不做总体统计。按照波形特征将梯级先导分为了4类,第一类先导平均持续时间 $915.4 \mu\text{s}$,脉冲上有小脉冲叠加,脉冲时间宽度平均 $17.13 \mu\text{s}$,脉冲间隔不明显。第二类先导平均持续时间 $241.95 \mu\text{s}$,先导脉冲的时间宽度 $4.53 \mu\text{s}$,脉冲间时间间隔 $12.8 \mu\text{s}$,脉冲平滑。第三类先导由闪电与快慢天线间距离造成,先导持续时

间 $8.2 \mu\text{s}$,脉冲时间宽度 $1.02 \mu\text{s}$,脉冲间隔时间宽度不明显。第四类先导波形类似预击穿脉冲簇,脉冲持续时间 $5513.87 \mu\text{s}$,先导脉冲时间宽度 $3.79 \mu\text{s}$,脉冲间隔宽度 $28.07 \mu\text{s}$,前期脉冲上叠加有小脉冲,后期脉冲为平滑曲线。正负闪电的先导持续时间及脉冲宽度有一定差别,正地闪的先导时间高于负地闪,负地闪的脉冲宽度大于正地闪。

4种类型的先导波形说明梯级先导并不是单一的击穿放电,而是由一系列比较复杂的放电过程组成,因手中数据不足,不能对先导的放电过程进行分析。

参考文献:

- [1] 汪志东,周碧华,张琪. 地闪梯级先导电场波形特征研究[J]. 电波科学学报,2015,30(2):365-370+382.
- [2] Kirder E P, Weidmen C D, Doggle R C. The electric fields produced by lightning stepped leader[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 82(6): 951-960.
- [3] 郅秀书,张义军,刘欣生,等. 广东地区一次雷暴过程负地闪先导的电学特征分析[J]. 气象学报,2001,59(3):341-351.
- [4] 王华,郑栋,张义军,等. 北京和广州地区云闪初始击穿电场变化特性[J]. 气象与环境科学, 2016,39(3):22-31.
- [5] 李海雷,刘向科,商鹏. 基于快慢天线的闪电电场特征分析[J]. 山东气象,2016,36(4):34-38.
- [6] 曹冬杰,田立言,肖瑾,等. 闪电多参量高速大容量实时数据采集、显示和分析系统[J]. 高原气象,2011,3(2):518-524.
- [7] Beasley W, U man M A, Rustan Jr P L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes[J]. J Geophys Res, 1982, 87(C7):4883-4902.
- [8] 郅秀书,张其林,袁铁,等. 雷电物理学[M]. 北京:科学出版社,2012:48-88.
- [9] 李婵,张阳,吕伟涛,等. 地闪不规则先导的多尺度熵特征[J]. 应用气象学报,2014,25(3):347-353.
- [10] 余海,张广庶,李亚珺,等. 多回击负地闪先导通道的辐射和光学特征[J]. 高原气象,2013, 32(3):894-903.
- [11] Kirder E P, Radda G J. Radiation field waveforms produced by lightning stepped leaders[J]. Geophys Res, 1975, 80(18):2653-2657.

[12] 刘恒毅,董万胜,王涛,等. 闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别[J]. 气象, 2009,35(3):49–59.

[13] Michishita K,Ishii M,Hojo J I. Characteristics of radiation field spectra form positive first return strokes[R]. 10th International Conference on Atmospheric Electricity, june10–14, Osaka, Japan, 1996:333–336.

[14] 郝秀书,郭昌明,张翠华,等. 地闪回击的微秒级辐射场特征及近地面连接过程分析[J]. 高原气象,1998,17(1):44–54.

[15] 王道洪. 雷电与人工引雷[M]. 上海:上海交大出版社,2000:55–56.

Analysis of Stepped Leade Electric Field Change Characteristics

LI Hai-lei, SHANG Peng, LIU Xiang-ke, SUN Jing-cha
(Shandong Lightning and Electricity Protection Center,Jinan 250031 ,China)

Abstract:This text utilises the fast and slow lightning speed of antenna measurement by the electric field in Jinan area during July to August 2015 , to analyze the stepped forerunner datas by a total of 12 times. The forerunner average duration is 1689 μs , the forerunner pulse time width is 6.81 μs . It is divided into four categories according to the characteristics of the stepped waveform. The duration is 915.4 μs ,241.95 μs ,8.2 μs and 5513.87 μs ; the pulse duration width is 17.13 μs ,4.53 μs ,1.02 μs and 3.79 μs . The pulse polarity is the same with the first return stroke polarity , the former three types pulse are unipolar pulse , and the earlier stage of the fourth pulse is bipolar (pulse declined is the same with return stroke) , the late pulse is unipolar. There is a small pulse superposition phenomenon with the first two types pilot pulse , and the curves of latter two types pulse are smooth. The pilot duration of minus earth lightning is 504.03 μs , and the pulse width is 10.62 μs , moreover, the pilot duration of the positive earth lightning is 2874.63 μs , and the pulse width is 3.82 μs .

Keywords:fast and slow antenna; lightning; stepped leader; slow electric field; electric field characteristics