

文章编号: 1006-4354 (2012) 03-0031-04

雷电计数器误差分析及回击脉冲识别研究

陈 洁¹, 行鸿彦²

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省气象传感网技术工程中心, 南京 210044)

摘 要: 研究了实际地闪过程中三种放电脉冲的形成机理及电流参量, 在此基础上结合雷电计数器工作原理分析了计数误差的来源, 指出峰值较大的 M 分量脉冲是导致计数结果偏高的主要原因。通过大量的自然雷电及人工引雷测量数据对比研究, 提出通过计算脉冲波头陡度识别有效计数信号的方法, 将 $0.8 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 作为判断脉冲类型的特征值, 为研制能够测量具有科学意义计数结果的雷电计数器提供设计依据。

关键词: 误差分析; 回击脉冲; M 分量脉冲; 波头陡度

中图分类号: P427.32

文献标识码: A

雷电计数器为评估雷电防护装置的防护效能提供了一种直观、可靠的在线检测手段, 它不仅为电力部门分析输电线路事故原因提供数据支持, 同时也为相关单位优化防雷系统设计提供科学依据。准确计数是实现这些功能的基础, 也是衡量雷电计数器性能的重要指标, 因此, 提高计数精度一直是雷电计数器的研究重点。目前使用的雷电计数器是基于双指数型雷电流波形设计的, 提高这种计数器精度的研究大多集中在信号传感器的设计^[1], 关于雷电流模型选取引起的误差却很少有深入探究。本文在分析实际地闪雷电流特征的基础上, 探讨计数器产生计数误差的来源, 并研究有效信号的识别方法, 为设计高精度的雷电计数器提供理论指导。

1 实际地闪电流特征

实际地闪是一个包含不同类型云对地放电电荷转移的过程, 大致分为先导—回击过程、连续电流过程和 M 分量过程^[2]三类。研究不同形式地闪脉冲是否会对计数结果造成影响, 首先应对这三种放电脉冲特征进行分析。

1.1 回击电流脉冲特征

回击是由不同极性的先导纵向移动而激发的, 先导在雷云与大地之间建立起了放电通道, 通道接地后随之发生的回击过程使云地之间的异种电荷迅速中和, 产生峰值达几十~几百 kA 的回击电流, 持续时间十几~几百 μs 。地闪可以分为正地闪和负地闪, 其中自然界中 90% 以上的地闪为负极性^[3]。图 1 给出了张其林在山东滨州传统引发雷电实验中测量到编号 0503 闪电中的第 2 次和第 7 次负极性回击电流波形^[4], 可以看出, 单次回击雷电流波形总体符合 Bruce 和 Godle 提出的双指数形式, 波头上升陡度较大、波尾下降较缓慢, 具有典型的单峰值特征。

1.2 连续电流脉冲特征

多数回击后伴随有连续电流放电过程, 发生在回击过程后的这种脉冲相对平缓, 电流幅值几十到几百 A, 持续时间为几到几百 ms, 同时伴随有通道内的持续发光现象。张义军^[5]在石岗及南汇地区的人工触发闪电实验中测量到负连续电流峰值为 500 A, 持续时间为 8 ms, 正连续电流峰

收稿日期: 2012-03-20

作者简介: 陈洁 (1982—), 女, 西安市人, 汉族, 在读硕士研究生, 主要从事雷电防护设计。

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”计划; 江苏省高校科研成果产业化推进项目 (JHB2011-15); 江苏省“传感网与现代气象装备”优势学科平台

值为 350 A，持续时间为 4 ms，正负连续电流之间的时间间隔为 6 ms。一般较南方人工触发闪电

而言，北方人工触发闪电要弱得多，连续电流强度也如此，如图 2。

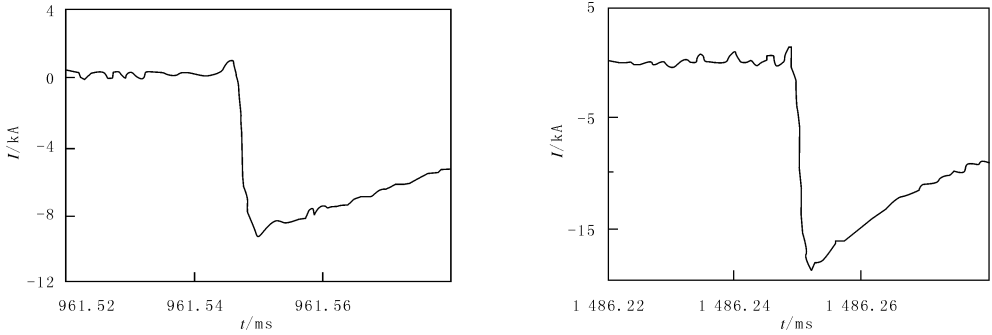
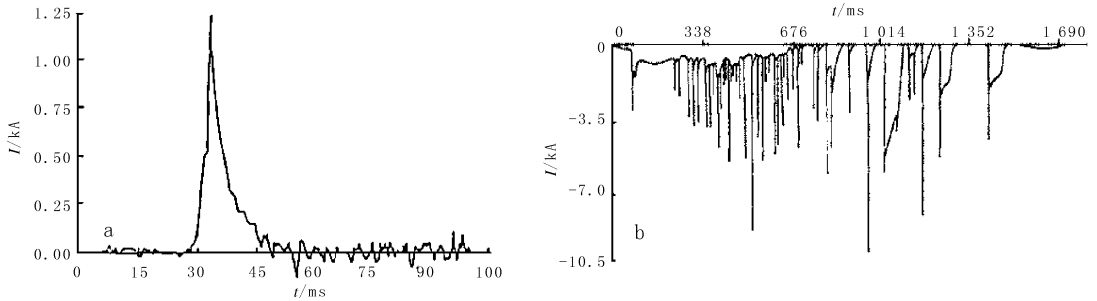


图 1 编号 0503 地闪中两次回击电流波形



(a) 1993 年北京地面人工引发电流 (b) 1996 年江西南昌空中引发电流
陈洁 1. tif 陈洁 1. tif 图 2 不同地区连续电流波形

1.3 M 分量脉冲特征

M 分量是叠加在连续电流上的脉冲放电过程，伴随的是通道内发光亮度瞬态增强现象，其特征参数大多来源于人工引雷实验数据。赵阳等^[6]指出约 48% 的地闪回击过程后跟随有 M 分量放电过程，它呈现为一个准对称的电流脉冲波。Thottappillil 等统计的 1995 年前实验数据中典型 M 分量电流峰值范围在 100~200 A^[7]，平均半峰值宽度为数百 μs^[8]，如图 3。

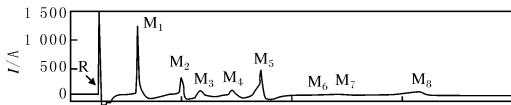


图 3 M 分量脉冲放电过程

地闪雷电流是雷电防护设计中最重要电参量之一，在上述三种放电脉冲电流中由于回击电流的幅值最大、破坏力最强，受到人们的普遍关

注，是防雷减灾工作中的研究重点。

2 雷电计数器设计依据及工作原理

2.1 回击电流波形选取

雷电计数器是一种用以记录传输线路或设备遭受地闪回击脉冲冲击次数的在线测量仪器，通常安装在输电线避雷器放电回路或雷电防护系统引下装置上。现有计数器^[9-10]采用国际电工委员会（简称 IEC）规范中推荐的双指数型波作为回击电流脉冲的典型波形，如图 4。这种波形广泛用于雷电物理研究及电气工程防护设计，尽管与自然界中实际的雷电波形有一定差别，但主要特征是一致的。

2.2 计数器工作原理

根据这种雷电流波形特征设计的计数器电路构成如图 5，当雷电流流经放电回路或引下装置泄入大地时，传感器将感应到的极性有异、峰值较大的雷电流脉冲信号输出为一个较小的电压电流信号，然后经限幅整形和极性转换电路后产生

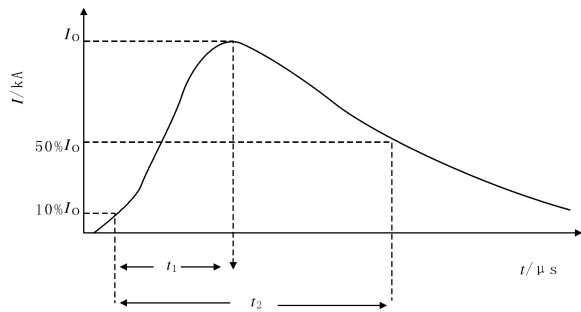


图4 双指数型雷电流波形

一个波形平稳、极性恒定的矩形脉冲, 该脉冲可以触发计数显示电路, 即计数器将每感应到一个电流脉冲计数一次。

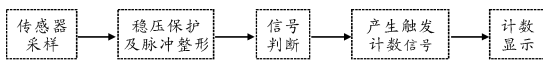


图5 雷电计数器电路框图

2.3 计数误差分析

基于电磁感应原理的电流互感器用于计数器的信号采样, 在实际运行中各种瞬态脉冲都可能通过传感器输出感应信号, 并产生触发计数脉冲。为了避免被测量线路或设备受操作暂态脉冲的影响, 通过设置门限电流值 I_D 滤除幅值明显小于雷电流的脉冲造成的计数干扰。 I_D 一般取值 $600 \sim 700 \text{ A}$ ^[9-10]。

由于回击过程后的连续电流及叠加在连续电流过程中 M 分量的电流幅值低于 I_D , 不会对雷电计数器计数结果造成影响, 现有计数器设计中并未考虑这两种脉冲电流的干扰。随着测量仪器精度的提高及人工引雷技术的成熟, 1998 年起国内外研究者陆续测量到电流峰值超过千安级的 M 分量脉冲^[11-13], 它产生的触发计数脉冲是现有计数器信号处理电路无法识别的, 如果设计中忽略了这种脉冲的影响, 就会导致计数结果偏高。因此, 有效区分回击脉冲及峰值较大的 M 分量脉冲是提高计数器准确计数的关键。

3 回击脉冲特征参量研究

3.1 回击脉冲波形判断方法

张其林、郅秀书等通过 2005—2009 年山东滨州进行的人工引雷实验获取了大量雷电流资料,

图 6 是一次编号为 0902 的负极性完整地闪电放电过程^[12], 包括 4 次回击过程 ($R_1 \sim R_4$) 和 6 次峰值千安级的 M 分量过程 ($M_1 \sim M_6$), 表 1 是 0902 号波形的回击脉冲和大峰值 M 分量脉冲的电流参量。

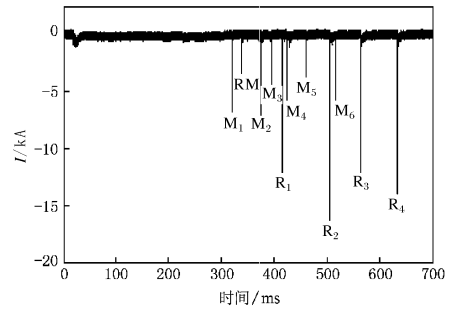


图6 山东滨州 0902 号地闪电流波形

表 1 回击脉冲与 M 分量脉冲电流参量

电流参量	$I_{\text{peak}}/\text{kA}$	$T_{10\% \sim 90\%}/\mu\text{s}$	$T_{\text{hpw}}/\mu\text{s}$
回击脉冲	12.09~16.34	0.9~1.4	20.7~34.6
M 分量脉冲	3.79~6.99	12.4~71.7	58~104

注: I_{peak} —电流峰值; $T_{10\% \sim 90\%}$ —波头时间; T_{hpw} —半峰值时间, 数据参考文献 [12-13]。

较 M 分量脉冲而言, 回击脉冲具有电流峰值大、波头上升快及脉冲持续时间短的特点, 由于回击脉冲电流峰值范围几~几百 kA, 单纯的提高计数器门限电流值无法科学消除 M 分量脉冲的影响, 还可能造成小型回击脉冲计数的遗失。

雷电流陡度 α 是指雷电流在单位时间内上升的数值, 表示雷电流增长的速度, 由雷电流 i 对时间 t 的微分求得, 一般采用 $\text{kA}/\mu\text{s}$ 表示, 其平均上升陡度 α 为

$$\alpha = \frac{di}{dt} = \frac{1}{T_1} I(t), \quad (1)$$

对两种脉冲的波头斜率进行计算, 计算结果如表 2, 计算满足关系式

$$\text{波头陡度 } \alpha = \frac{\text{电流峰值 } I_{\text{peak}}}{\text{波头时间 } T_{10\% \sim 90\%}}. \quad (2)$$

回击脉冲波头陡度为 $10.77 \sim 13.44 \text{ kA}/\mu\text{s}$, M 分量脉冲波头陡度为 $0.05 \sim 0.45 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 很显然, 前者具有较大的波头陡度值, 可以通过计算脉冲斜率的方法区分这两种脉冲。

表 2 回击电流与 M 分量电流波头陡度 α kA/ μ s

回击脉冲				M 分量脉冲					
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
13.44	11.64	13.44	10.77	0.14	0.23	0.08	0.45	0.05	0.17

3.2 回击脉冲特征值 α 的确定

回击脉冲波头陡度随极性的不同差异较大,正闪平均雷电流陡度大于负闪陡度^[16],应选取负极性地闪回击脉冲波头陡度作为判断回击脉冲信号的依据。比较不同类型负极性回击电流波头陡度,见表 3。

表 3 不同类型回击电流波头陡度 α kA/ μ s

人工引雷回击	自然地闪首次回击	自然地闪继后回击	国内使用参数
1	2.6	1.4	0.8

注:表中数据分别参考文献 [8, 14-16]。

自然地闪首次回击电流波头陡度值最大,继后回击 α 值略小,人工引雷回击 α 值最小,这可能和人工触发闪电较自然闪电放电强度小有关。对比表 2、表 3,确定以 0.8 kA/ μ s 作为判别脉冲类型的波头陡度临界值,小于该值视为 M 分量脉冲,大于该值视为回击脉冲。

4 结论

将实际地闪雷电流波形与雷电计数器脉冲处理电路相结合,根据不同类型放电脉冲与触发计数指令之间的关系分析了计数误差来源,提出了区分大峰值 M 分量脉冲与回击脉冲的方法,为解决现有雷电计数器识别效率低下问题提供研究思路。

参考文献:

[1] 王珏,张适昌,严萍,等.用自积分式罗氏线圈测量纳秒级高电压脉冲电流[J].强激光与粒子束,2004,16(3):399-403.

[2] Crawford D E, Rakov V A, Uman M A, et al. The close lightning electromagnetic environment: Dart-leader electric field change versus distance[J]. J Geophys Res, 2001, 106 (D14): 14909-14917.

[3] 陈成品,鄒秀书,张广庶,等.地闪参量特征的统计分析[J].中国电机工程学报,1999,19(3):50-54.

[4] 张其林,鄒秀书,孔祥贞,等.人工引发闪电和自然闪电回击电流波形的对比分析[J].中国电机

工程学报,2007,27(6):67-71.

[5] 张义军,刘欣生.南方人工引雷试验及电流特征[J].中国电机工程学报,1999,19(4):59-62.

[6] 赵阳,鄒秀书,陈明理,等.人工触发闪电中的 M 分量特征[J].高原气象,2011,30(2):508-517.

[7] Thottappillil R, Goldberg J D, Rakov V A, et al. Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base[J]. J Geophys Res, 1995, 100 (D12): 25711-25720.

[8] 赵阳,鄒秀书,孔祥贞,等.人工触发闪电电流波形特征参数分析[J].物理学报,2009,58(9):6616-6626.

[9] 彭向阳,张元芳.数字式雷电/操作冲击计数器的研制[J].高压电器,1996(5):17-45.

[10] 中国科学院电工研究所.避雷设备用雷电接闪计数器:中国,92100083.9[P].1995-03-15.

[11] Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, et al. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama[J]. J Geophys Res, 1998, 103 (D12): 14117-14130.

[12] 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[J].物理学报,2011,60(7):1-8.

[13] Wang Cai xia, Qie Xiu shu, Yang Jing. The Luminosity and Current Characteristics of M-component from triggered-lightning in Shandong [C] // 2010 Asia-Pacific international symposium on electromagnetic compatibility. USA: IEEE Digital Library, 2010: 1293-1296.

[14] Berger K, Anderson R B, Kroninger H. Parameters of lightning flashes[J]. Electra, 1975, 80: 23-37.

[15] Anderson R B, Eriksson A J. Lightning parameters for engineering application[J]. Electra, 1980, 69: 65-102.

[16] 李家启,李博,申双和,等.基于 ADTD 系统的雷电流波头陡度频率分布特征[J].气象科技. 2010, 38(6): 741-745.