

基于 IEC 标准雷电后续回击电磁场的计算

田明宏, 魏光辉, 刘尚合, 毕增军

(军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003)

摘 要: 基于 IEC 标准雷电回击电流, 用击穿电流和电晕电流两种成分对雷电后续回击标准电流进行拆分拟合. 用一种新型脉冲函数表示回击中击穿电流, 电晕电流用双指数函数表达. 然后基于 DU 模型, 合理地选取了两种电流成分的放电时间常数, 并对雷电标准后续回击电磁场分布进行了计算, 计算结果比较符合雷电回击电磁场测量波形的四个特征.

关键词: DU 模型; 脉冲函数; 电磁脉冲; 雷电

中图分类号: TM863 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 06-0952-04

The Electromagnetic Fields Calculation of Lightning Subsequent Return Stroke Based on IEC Standards

TIAN Mingzhong, WEI Guanghui, LIU Shangzhe, BI Zengjun

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract: In this paper, the standard current of lightning subsequent return stroke is split into a breakdown current and a corona current based on IEC1312- 1. The breakdown current and the corona current are represented by a new pulse function and a double exponential function respectively. The subsequent return stroke standard current is fitted and some parameters are obtained. We assume for the electromagnetic fields calculating of lightning subsequent return stroke a breakdown discharge time constant and a corona discharge time constant based on DU model. The characteristic features of calculated field waveforms are similar to those of the typical field waveforms.

Key words: DU model; pulse function; electromagnetic pulse; lightning

1 引言

在微电子技术高度发达的今天, 雷电电磁脉冲危害随着微电子技术的发展而日益突出, 所造成的损失逐年增加. 雷电的电磁脉冲危害已经越来越引起人们的重视, 被认为是信息化时代的公害. 因此, 研究雷电回击产生的电磁脉冲场分布规律, 对研究微电子设备雷电电磁脉冲防护具有非常重要的意义.

为了研究雷电电磁脉冲场的特性, 从 1941 年 Bruce 和 Golde 首次提出雷电回击 BG 模型以来, 雷电研究者们相继提出各种雷电回击模型. BG 模型是最简单的一种工程模型, 认为通道电流与高度无关^[1]. Uman 和 McLain 考虑了高度的影响, 描述了一种 IL 模型, 但不足之处在于认为通道中无转移电荷分布. 1988 年 Nucci 等把回击期间电晕电荷分布考虑进模型, 提出了 MILE 模型. 同样, Rakov 等提出了 MILL 模型 (MILE 和 MILL 合称为 MIL, Modified IL)^[2]. 1981 年 Master 等研究者在 Lin 的研究基础上提出 MULS 模型. TCS 模型由 Heald 于 1985 年提出, 认为电流沿通道以光速向下传播, 其不合

理处在于电荷不可能被瞬时吸收到雷击头. Deindorfer 和 Uman 用衰减时间不同的两个电流组成电晕电流和击穿电流提出 DU 模型^[3], 与 Cocray 模型有一定的相似性^[4]. Thottappilli 引进变化的回击速度和电荷转移速度对其进行了发展 (MDU 模型). 1994 年 Thottappilli 和 Uman 对 DU 模型和 MDU 模型进行了改进, 提出 VDTC (随高度变化的放电时间常数) 模型. Moini 和 Rakov 等人于 2000 年基于天线理论, 把回击通道近似成有分布阻抗的单极子天线即是一种耗损天线, 提出了一种新的 AT 模型^[5]. 各种模型目的都是为了能更准确合理地计算雷电回击产生的电磁场.

但对于各种模型有效性如何进行验证, 1979 年 Lin 等雷电研究者进行了被认为是经典的雷电回击电磁场的测量工作^[1]. 他们在距雷电通道水平距离 1- 200km 内多个点同时测量雷电回击电磁场, 总结出雷电回击电磁场有以下四个特征: (1) 电场和磁场都有一个起始尖峰, 观测距离大概超过 1km 时, 峰值随距离而下降; (2) 在几十千米范围内的电场, 起始峰值后有一个缓慢的上升沿, 持续时间超过 100 μ s; (3) 在几十千米范围内的磁场, 起始峰值后有一个隆起, 隆起最大值发生在

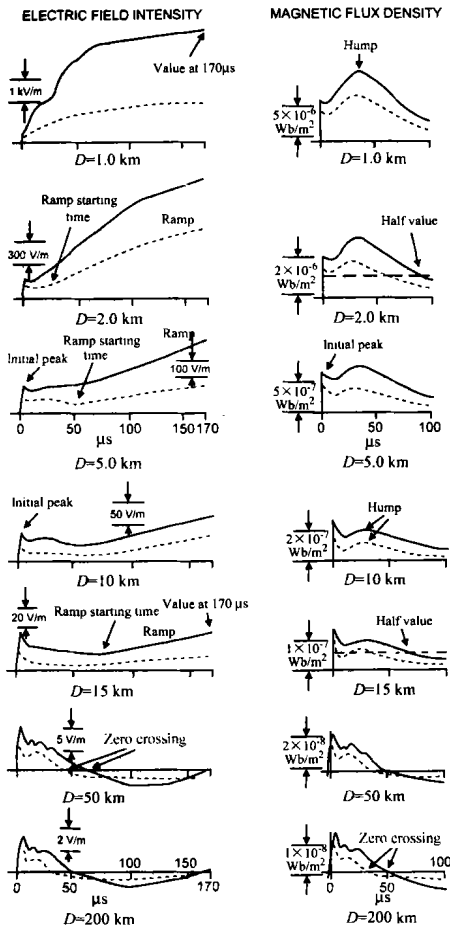


图 1 雷电回击地面垂直电场和水平磁场的典型观测波形。实线为首次回击,虚线为后续回击。距离分别为 1, 2, 5, 10, 15, 50 和 200km。

10-40 μ s 之间; (4) 在 50-200km 范围内电场和磁场, 起始峰值后都有过零点现象。典型地面电磁场观测波形见图 1, 图的左边是电场强度波形, 右边是磁通密度波形。所以验证模型的有效性一种是把一些实测参数代入模型计算电磁场, 所得结果与测量值相比较看是否一致。另一种是模型代入实测输入参数计算回击的近区和远区电磁场, 看模型能否再现以上四个特征。但到目前为止, 没有一种模型能使计算场与观察场相一致^[1-5]。本文作者按国外学者的通常做法对以上模型都进行了编程计算, 所得结果与国外公开发表的文献结果完全一致。国外学者基于 DU 模型计算雷电回击电磁场的时候, 通常把电晕电流和击穿电流的放电时间常数取相同的值^[1-2]。但如果合理地选取这两个放电时间常数, DU 模型计算的电磁场能很好地再现以上四个特征。基于这种情况, 作者按 DU 模型思想把雷电后续回击通道底部标准电流用电晕电流和击穿电流来进行拆分, 计算的电磁场能较好地再现以上四个特征。

2 IEC 标准后续回击通道底部电流的拆分与拟合

IEC 标准规定后续回击雷电流波形参数为 0.25/100 μ s, 用

10 阶的 heider 函数表示如下^[6]:

$$i(0, t) = \frac{I}{h} \frac{(t/S_1)^{10}}{1 + (t/S_1)^{10}} \exp(-t/S_2) \quad (1)$$

h 为电流的修正因子, $I = 50\text{kA}$, $h = 0.1993$, $S_1 = 0.454\mu\text{s}$, $S_2 = 143\mu\text{s}$ 。

根据雷电回击电磁场计算公式^[1], 就雷电通道底部电流而言电流和电流的导数都影响计算结果。所以本文按以下原则对标准电流进行拆分拟合。(1) 用击穿电流和电晕电流组合来表示雷电回击标准电流, 但两者的总和电流波形与标准波形要相一致, 即后续回击要符合 0.25/100 μ s 的要求; (2) 拟合电流的导数和标准电流的导数要近似一致。拟合中用公式(2)拆分标准电流。用一种新型脉冲函数^[7]表示击穿电流即公式前半部分, 用传统的双指数函数表示电晕电流即公式的后半部分, 公式中 G 为击穿电流的修正因子。脉冲函数比较易于计算, 同时在时间为零时电流导数为零符合雷电流的物理特性。根据最小二乘法原理, 由公式(2)拟合所得的各参数值如下:

$$I_{BD} = 52131889\text{kA}, I_C = 5316951\text{kA}, S_1 = 0.109603\mu\text{s},$$

$$S_2 = 25.76553\mu\text{s}, a = 142167552\mu\text{s}, b = 26102025\mu\text{s}.$$

图 2 是后续回击电流拆分拟合的结果, I_C 表示电晕电流, I_{BD} 表示击穿电流, 两者之和的总电流用 $i(0, t)$ 表示, 总电流半峰值时间约为 100 μ s。拟合电流波形显示, 电流峰值 10%~90% 的上升时间大约 0.25 μ s。图 3 是后续回击拟合电流和标准电流的波形比较, 可以看出拟合电流波形符合 0.25/100 μ s 的要求。对公式(2)求导可得电流的导数公式(3), 拟合电流的导数波形见图 4(a)。图 4 是拟合电流导数波形与后续回击标准电流导数波形比较, 图中 b 为后续回击标准电流导数波形减去前约 0.4 μ s 的结果, 在这段时间内导数值几乎为零。为了便于拟合, 我们削减标准电流波形前 0.4 μ s 几乎为零部分。其实这对电磁场计算没有影响, 基于拟合电流计算的结果相当于把标准电流计算的回击电磁场向前平移了 0.4 μ s, 电磁场总波形几乎没有改变。

$$i(0, t) = I_{BD} [1 - \exp(-t/S_1)]^2 \exp(-t/S_2) / G + I_C [\exp(-t/a) - \exp(-t/b)] \quad (2)$$

$$G = [2S_2 / (S_1 + 2S_2)]^2 [S_1 / (S_1 + 2S_2)]^{5/2}$$

$$\frac{di(0, t)}{dt} = \frac{I_{BD}}{G S_1 S_2} [1 - \exp(-t/S_1)] \exp(-t/S_2) \# [(S_1 + 2S_2) \# \exp(-t/S_1) - S_1] - I_C [\exp(-t/a) / a - \exp(-t/b) / b] \quad (3)$$

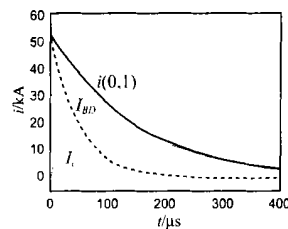


图 2 后续回击电流拆分结果

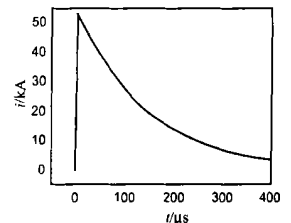


图 3 后续回击拟合电流和标准电流的比较

3 后续回击电磁场的计算

根据拟合电流的各种参数, 本文基于 DU 模型编程计算了雷电后续回击地面电磁场。计算中雷电回击通道电流 $i(z, t)$ 是一个随通道高度和时间而变化的函数, 计算的电磁场结果采用柱坐标系表示, 地面电磁场计算如公式(4)和公式(5)所示^[1]。其中, c 是光速。几何结构图见图 5, 假设雷电通道垂直于地面, 大地为良导电平面。公式(4)和公式(5)描述的观察点在地面上即 $z = 0$, 则 $R = \sqrt{x^2 + r^2}$ 。

$$E_z = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \left[\frac{2x^2 - r^2}{R^5} \frac{Q}{R} \left(x, S - R/c \right) + \frac{2x^2 - r^2}{cR^4} i(x, t - R/c) - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{9i(x, t - R/c)}{9t} \right] \quad (4)$$

$$B_\phi = \frac{L_0}{2\pi} \frac{Q}{R^3} \left[\frac{r}{R^3} i(x, t - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{9i(x, t - R/c)}{9t} \right] \quad (5)$$

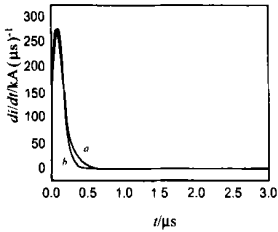


图 4 后续回击拟合电流导数与标准电流导数比较。a 为拟合电流导数波形, b 为标准电流导数波形

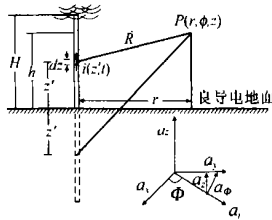


图 5 雷电回击几何结构模型

Diendorfer 和 Uman 在提出 DU 模型时, 把回击电流分成击穿电流和电晕电流两部分, 每种电流具有不同的放电时间常数。如果给定通道底部电流和放电时间常数 S , 则通道高度 x 处击穿(或电晕)电流 $i(x, t)$ 由下式确定^[3]:

$$i(x, t) = i(0, t_m) - i(0, x/v^*) e^{-t/v^*} \quad (6)$$

其中, $v^* = v/(1 + v/c)$, $t_e = (t - x/v)$, $t_m = (t + x/c)$

计算回击电磁场时取通道高度 $H = 7.5\text{km}$, 回击速度 $v = 113 \times 10^8\text{m/s}$, $c = 3 \times 10^8\text{m/s}$ 。根据 Uman 提出的击穿电流放电时间常数 S_{BD} 在 0.1 至 1.2Ls 之间以及电晕电流放电时间常数 S_C 在 1 至 20Ls 之间的观点, 为了使计算电磁场能较好地再现以上四个特征, 文中研究了 S_{BD} 和 S_C 对回击地面电磁场的影响, 选取相应参数值。图 6 和图 7 是距离回击通道水平距离 $r = 15\text{km}$ 处, 以拟合电流为通道底部电流, $S_{BD} = 0.6Ls$, S_C 取不同值计算的地面电场和磁场。同样, 图 8 和图 9 是 $S_C = 5Ls$, S_{BD} 取不同值计算的地面电场和磁场。计算中给 E_z 和 B_ϕ 都乘以不同的标度化系数。 E_z 乘以 $-2\text{Pr}/\epsilon_0$, B_ϕ 乘以 $2\text{Pr}/L_0$ 。由图 6~ 图 9 可以看出击穿电流放电时间常数主要影响回击电磁场的起始峰值, 对磁场起始峰值后的隆起幅度影响不大。随着击穿电流放电时间常数的增加电磁场起始峰值下降。而电晕电流的放电时间常数对电磁场的起始峰值和磁场起始峰

值后的隆起幅度都有影响。当电晕电流的放电时间常数增大时, 电磁场的起始峰值和磁场起始峰值后的隆起幅度都减小。由公式(4)~ (5)可知, 雷电回击电磁场和电流以及电流的导数相关。如果电荷在较短时间内放电, 就会形成较强的回击电流, 导致回击电磁场峰值的上升。根据计算的结果, 对照雷电电磁场的特征, 计算时取放电时间常数 $S_{BD} = 0.6Ls$ 和 $S_C = 5Ls$ 。

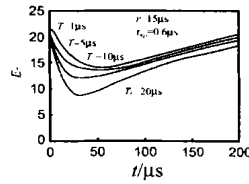


图 6 $r = 15\text{km}$ 处, $S_{BD} = 0.6Ls$, S_C 取不同值计算的地面电场

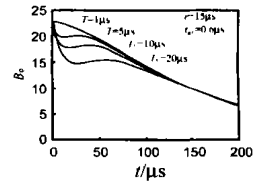


图 7 $r = 15\text{km}$ 处, $S_{BD} = 0.6Ls$, S_C 取不同值计算的地面磁场

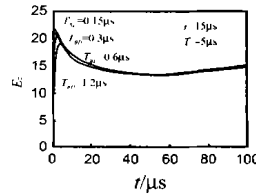


图 8 $r = 15\text{km}$ 处, $S_C = 5Ls$, S_{BD} 取不同值计算的地面电场

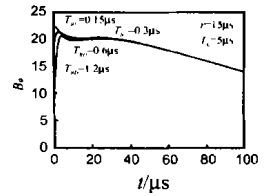


图 9 $r = 15\text{km}$ 处, $S_C = 5Ls$, S_{BD} 取不同值计算的地面磁场

由所获得的各种参数, 按 DU 模型计算了水平距离 $r = 5, 10, 15, 100$ 和 200km 处, IEC 标准后续回击 200Ls 时间内的地面电磁场, 如图 10 所示。图中电磁场计算值是标度化后的结果。可以看出, 电场和磁场都有一个起始尖峰, 随观测距离增大, 峰值随距离而下降; 几十千米范围内的电场, 起始峰值后有一个缓慢的上升沿, 持续时间超过 100Ls; 几十千米范围内的磁场, 起始峰值后有一个隆起, 隆起最大值发生在几十微秒处; 远区电磁场, 起始峰值后都有过零点现象。计算电磁场波形完全具有图 1 雷电回击实测电磁场的四个典型特征。但在 Lin 观测到的回击电磁场中, 远区电磁场大约在起始峰值后几十微秒有过零点现象, 而基于 IEC 标准计算的后续回击远区电磁场过零点时间比较滞后。研究中我们发现雷电回击通道底部电流波形对远区电磁场过零点有较大影响。由于雷电是一个随机性比较强的放电现象, 所以这可能是 Lin 所观测到的雷电回击通道底部电流波形与 IEC 标准所规定的后续回击

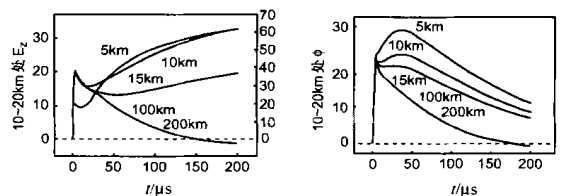


图 10 不同水平距离处, IEC 标准后续回击地面电磁场计算波形(左图表示电场波形, 右图表示磁场波形)

通道电流波形不同而造成的结果。

4 结论

本文基于 IEC 标准雷电回击电流, 用击穿电流和电晕电流两种成分对雷电后续回击标准电流进行拆分拟合。用一种新型脉冲函数表示回击中击穿电流, 用双指数函数表示电晕电流。基于 DU 模型, 选取通道中两种电流不同放电时间常数计算了雷电回击地面电磁场, 计算结果能较好地再现雷电回击电磁场的四个典型特征。

参考文献:

- [1] Rakov V A, Uman M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application [J]. IEEE trans. on EMC, 1998, 40(4): 403- 426.
- [2] Gomes C, Cooray V. Concepts of lightning return stroke models [J]. IEEE trans on EMC, 2000, 42(1): 82- 96.
- [3] Diendorfer G, Uman M A. An improved return model with specified channelbase current [J]. J Geophys. Res, 1990, 95 (D9): 13621 - 13644.
- [4] Cooray V. A model for subsequent return strokes [J]. J Electrostatics, 1993, 30: 343- 354.
- [5] Moini R, et al. A new lightning return stroke model based on antenna theory [J]. J Geophys. Res, 2000, 105(D24): 29693- 29702.
- [6] IEC1312- 1. 雷电电磁脉冲的防护 [S]. 1995.
- [7] 张飞舟. 雷电回击脉冲电磁场的理论与数值计算 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2001.

作者简介:



田明宏 男, 1974 年生于安徽无为, 军械工程学院博士生, 现主要从事雷电磁场理论研究和数值计算及电磁测量等方面研究。



魏光辉 男, 1964 年生于河北宁晋, 军械工程学院教授、博士生导师, 主要从事兵器防电磁危害理论与技术研究。



刘尚合 男, 1937 年生于山西闻喜, 中国工程院院士、军械工程学院教授、博士生导师, 主要从事静电及电磁防护研究。