

# 雷电回击模型在雷电磁场计算中的应用分析

蒋宝忠, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**雷电回击模型是研究分析雷电产生电磁场特性的重要环节,介绍了雷电回击模型的假设条件、分类方法以及常用模型构建的物理思想和数学表达式,分析了两类模型的内在联系、几种雷电回击电流波形曲线和 DU 模型中部分参数对电磁场计算的影响,并为今后雷电回击模型的研究建立提出了建议。

**关键词:**雷电;回击;模型;通道;电磁场

**Abstract:** The lightning return stroke model is very important for studying and analyzing the characteristics of lightning electromagnetic fields. The assumption and classifying methods of lightning return stroke models are introduced as well as the mathematical expression of commonly used models. The intrinsic link between two types of models, several current waveform curves of lightning return stroke and the impact of some parameters of DU model on the calculation of lightning electromagnetic fields are all analyzed. Furthermore, the suggestions on research of lightning return stroke models are put forward.

**Key words:** lightning; return stroke; model; channel; electromagnetic field

**中图分类号:** TM854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0038-04

## 0 引言

随着智能电网在中国的推广,以特高压电网为骨干网架的逐步形成,雷电等自然灾害对高压架空输电线路的侵害概率也大大增加,输电线路和电气设备受雷电直接或间接效应的威胁严重,其危害越来越引起人们的重视。为了保护电气设施,提升电网的综合防护能力,国内外学者加大了对雷电磁辐射场特性的研究。雷电回击模型一直是进行雷电理论研究的重要环节,对精确分析雷电产生的电磁辐射场具有重要意义。自 20 世纪 40 年代 Bruce 和 Golde 首次提出雷电回击模型以来,在雷电研究者的不断探索下,现对雷电回击模型的研究及其在电磁场计算中的应用已取得较大的进步。

## 1 雷电回击模型的发展与现状

### 1.1 建立雷电回击模型的假设条件

工程应用中大多数雷电回击电流模型是在下列条件下建立的:①雷电回击电流模型多是针对第一回击建立,因为雷电第一回击是引起雷电过电压的主要原因;②雷电回击通道是垂直于地面的理想化传输线;③不考虑放电通道分支;④大地是理想的平面导

体;⑤回击高度低于回击波前。

### 1.2 雷电回击模型的分类及数学表达式

自 1941 年 BG 模型出现以后,相继出现了各种工程模型,这些模型具有不同的特点和应用范围,总的来说主要分为两大类,即传输线(TL)类型和传输电流源(TCS)类型,每类中的各种雷击模型都在各自领域内不断地发展。

#### 1.2.1 传输线(Transmission Line)类型

传输线模型的基本思想是将雷电回击电流看作是在放电通道的底部注入了一个特定的基电流,该电流沿着通道向上传播,形成回击电流<sup>[1]</sup>。

(1)BG 模型:BG 模型<sup>[2]</sup>是 1941 年由 Bruce 和 Golde 提出。该模型是最简单的一种工程模型,认为通道电流与通道高度无关,在回击过程中,当回击高度低于回击波前时,即通道中电流一致。回击波上方通道中电流为 0。设在 t 时刻, z 高度处的回击电流为  $i(z', t)$ ,基点电流为  $i(0, t)$ , v 为回击波前传播速度,则回击通道电流表达式为

$$i(z', t) = i(0, t) \quad z' \leq vt \quad (1)$$

电流幅值变化规律与基点电流模型选取有关。该模型也存在一定的局限性,它假设回击通道内各点电流一致,不随高度和时间变化,那么就要求  $v = \infty$ ,这显然与实际雷电回击情况不符合。

(2)TL 模型:TL 模型<sup>[3]</sup>是由 Uman 和 McInnis 提

出。该模型考虑了通道高度对电流的影响,但没有考虑基电流在传播过程中的失真和衰减,认为回击过程是先导从地面以电流脉冲形式传递到云端。 $t$ 时刻  $z'$  高度处的回击电流比基点电流有一个  $z'/v$  的时间延迟。回击通道电流  $i(z', t)$  可用基点电流表示为

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (2)$$

该模型的优点是能够使回击电流在回击顶端的数值为 0,实现电流连续性。不足之处在于认为通道中无转移电荷分布,只有在大地为理想导体,电场为完全辐射场时才能利用公式进行电流和电场峰值或其导数值与回击速度之间的换算。

(3)MTL模型: Nucci等对 TL模型进行了修订,把回击期间电晕电荷分布、静电荷汲出和中和考虑进模型,于 1988年提出了 MTLE模型。认为通道电流随通道高度呈指数衰减<sup>[4]</sup>,引入了衰减系数  $e^{-z'/\lambda}$ 。回击通道电流  $i(z', t)$ 表示为

$$i(z', t) = e^{-z'/\lambda} i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  是电流衰减常数,根据 Lin等人的实验数据,通常取 2 000 m。

Rakov等也对 TL模型进行了修订,提出了 MTLL模型。认为通道电流随通道高度呈线性衰减,引入了衰减系数  $1 - z'/H$ 。回击通道电流  $i(z', t)$  表示为

$$i(z', t) = (1 - z'/H) i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (4)$$

式中,  $H$  是雷电放电通道的高度。

MTLE模型和 MTLL模型统一称为 MTL模型<sup>[5]</sup>。

(4)Lin- Standler-Uman模型: Lin- Standler-Uman模型<sup>[6]</sup>是由 Lin, Uman和 Standler于 1980年提出。该模型认为通道电流由持续电流、向上的衰减电流和光速向下运动的电晕电流组成,且某一高度  $z'$  处到达的向下脉冲电流与该点电荷放电形成电晕电流之间是不同步的,而是存在一个指数形式、与通道高度有关的时间延时。

(5)MULS模型: Master<sup>[7]</sup>等在 Lin的模型定义基础上对回击电流中的击穿脉冲电流进行了修订,于 1981年提出了 MULS模型。认为回击通道总电流由:①回击波前向上传播引起的持续击穿脉冲电流  $i_1$ ;②云中电荷向通道放电形成的均匀电流  $i_2$ ;③回击波前与先导储存的电荷作用形成向下传播的电晕电流  $i_3$  三部分组成。

电晕电流是回击波前到达通道中每一高度时,位于该处的微电流源电荷被接通,形成以光速向下传播的电晕电流。在  $z'$  处的电晕电流源为

$$i_3(z', t) = \int_z^H I \exp(-z''/\lambda_c) \{ \exp[-\alpha(t-t')] - \exp[-\beta(t-t')] \} dz' \quad (5)$$

其中,在进行电磁场计算时取  $t' \approx z''/v$ ,  $1/\alpha$  和  $1/\beta$  是单个电晕电流源的双指数曲线的时间常数;  $I$  为每单位先导通道长度向回击通道注入的电晕电流峰值;  $\lambda_c$  为电晕电流高度衰减的常数。

又有学者认为脉冲电流峰值与光强峰值有类比效应,脉冲电流峰值也应随高度变化而呈指数规律变化。

$$i_3(z', t) = e^{-z'/\lambda_p} i_3(0, t - z'/v) \quad (6)$$

虽然实践表明该模型的可靠性有很大提高,但因可变参数较多,不便于完成数值计算。

### 1.2.2 传输电流源 (Traveling Current Source)类型

传输电流源模型被也称为放电模型,认为雷电回击电流是由向上移动的先导和被激活的电流源向下传播形成的电晕电流构成<sup>[8]</sup>,该类模型间的区别主要是表现在电晕电流模型的构建上。

(1)TCS模型: TCS模型<sup>[9]</sup>是由 Heidle于 1985年提出。认为回击波前经过通道中  $z'$  点时,将此处电荷接入回击通道,并形成以光速向下运动的电流源,它到达通道底部时比在  $z'$  处有一个  $z'/c$  的时间延迟,根据假设得到回击通道电流为

$$i(z', t) = i(0, t + z'/v) \quad (7)$$

该模型的不足在于电荷不能瞬时被吸收到回击波前。

(2)DU模型: DU模型<sup>[10]</sup>是由 Deindorfer和 Uman于 1990提出。认为放电时先导头和先导核心部分的电荷放电较快,而电晕层中电荷放电较慢,即回击通道内同一高度处击穿电流放电衰减时间常数  $\tau_{bd}$  比电晕电流放电衰减时间常数  $\tau_c$  小。每个电流分量随时间按指数规律变化,而延时时间常数则不随通道高度改变,每种电流成分随高度变化的表达式为

$$i(z', t) = i(0, t_h) - i(0, z'/v^*) e^{-t/\tau} \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为回击过程中放电衰减时间常数。

$$v^* = v(1 + v/c)$$

$$t_h = (t - z'/v)$$

$$t_h = (t + z'/c)$$

此后又出现了 Cooray模型<sup>[11]</sup>,该模型与 DU模型具有一定的相似性, Thottappillil等对 DU模型进行了修订,引入了变化的回击向上运动速度及变化的向下电荷传播速度,两个速度都是通道高度的函数。随

后 Thottappillil 和 Uman 考虑了高度变化对放电时间常数的影响,对 DU 模型进行了修订,建立了 VDTC 模型。Moini 和 Rakov 等人于 2000 年基于天线理论提出了一种新的 AT 模型<sup>[12]</sup>,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,认为该模型是前几种模型的折中表述,根据选取衰减函数不同,能够得到不同的模型。

这两种类型的工程模型所描述的回击电流公式的区别在于电流波的传播方向不同:传输线模型认为电流向上运动( $v=v_f$ ,  $v_f$  表示电流波先导的速度,  $v$  是电流波的传播速度),传输电流源模型认为电流向下运动( $v=c$ )。虽然在同一种模型中电流波的传播方向可能为上也可能为下,但整个回击电流总的方向是相同的。

## 2 雷电回击模型的对比分析

根据上述几种工程模型,通过给定一组典型参数,进行数值计算将计算所得回击雷电流曲线与实测雷电流曲线进行对比(图 1、图 2 和图 3)<sup>[4]</sup>,TL 模型、MTLL 模型、MTLE 模型和 DU 模型的电流曲线起始部分与实测曲线比较接近,但波形的后续部分与实测曲线有一定差距。TCS 模型和 BG 模型的电流曲线起始部分呈现一个尖峰,与实测曲线有一定差距,但后续部分与实测曲线吻合的比较好。MTL 模型可以看作是 MULS 模型的特殊情况。DU 模型中选取适当的电晕电流和击穿电流参数,再经过离散化数值处理后得到的雷电流波形,除了波形中的一些高频成分以外,与实测电流有较好的相似性。

## 3 DU 模型中各参数对电磁场的影响分析

### 3.1 放电时间常数 $\tau$

在 Uman 提出 DU 模型时假设击穿电流放电时

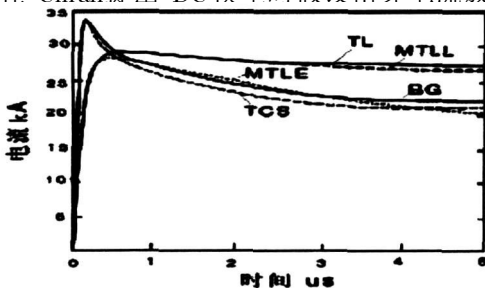


图 1 计算雷电流波形

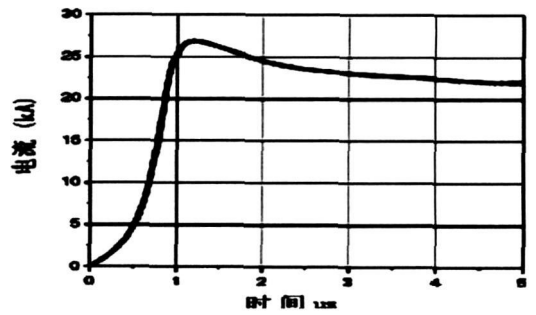


图 2 离散化 DU 模型计算雷电流波形

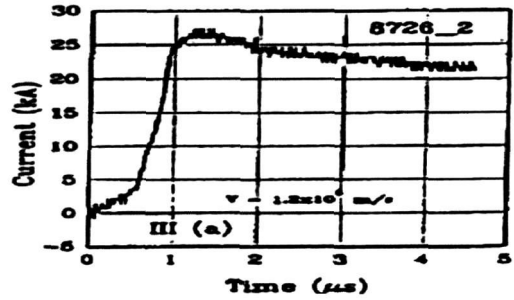


图 3 实测触发雷电流波形

间常数  $\tau_{BD}$  在 0.1 至 1.2  $\mu s$  之间以及电晕电流放电时间常数  $\tau_c$  在 1 至 20  $\mu s$  之间,文献 [13] 在距离回击通道水平距离  $r=15$  km 处,计算取  $\tau_{BD}=0.6 \mu s$ ,  $\tau_c$  取不同值和  $\tau_c=5 \mu s$   $\tau_{BD}$  取不同值时的电场和磁场,发现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。

### 3.2 雷电流回击速度

一般取雷电流回击速度  $v=c/3$  到  $v=c/2$ ,  $c$  为光速,在  $r=50$  m 处,计算看出垂直电场的初始峰值随着回击速度的增加而下降,而切向磁场的初始峰值随着回击速度的增加而增加,但是所有波形花费的上升时间随着回击速度的增加而减少,说明对于近区场,回击速度增大后,电磁场高频分量将增加<sup>[14]</sup>。

### 3.3 通道高度

文献 [12] 中研究了雷电回击通道高度对回击电磁场的影响,得出在回击电流到达通道顶端前这段有意义的时间内,雷电回击通道高度对回击电磁场计算结果没有影响。在回击电流到达通道顶部以后,电磁场随着通道高度的减小而增加,因此,在计算雷电辐射电磁场时,应该将放电通道的高度取得足够长,以

保证计算的结果是有意义。

### 3.4 大地电容率

大地相对电容率的值一般在 3 到 10 之间,基于 DU 模型,计算在地面场点  $r=5 \text{ km}$  处的电磁场。得出波形的初始峰值和后沿随着大地相对电容率的增加而增加,波形的上升沿变得越来越陡峭,且上升时间下降,这说明随着大地相对电容率的减少,导致镜像电流减少,从而使得高频分量在减少<sup>[15]</sup>。

文献 [13] 在研究中还发现雷电回击通道底部电流波形对远区电磁场过零点也有较大影响。

## 4 结 语

通过对以上各种雷电回击模型的比较分析不难发现:现有的雷电回击模型主要是以这两种类型为基础在进行不断的修订和发展,目的都是为了能更合理地计算雷电回击产生的电磁场,使其与实测参数相一致。每类模型都有不同的侧重点和应用范围,但在特定条件下也能实现模型间的相互等价,如 TCS 模型在  $v=\infty$  时等价于 BG 模型, MULS 模型在均匀电流为 0 时等价于 MTL 模型。实践也表明,还没有一类模型能够完全准确地反映出雷电回击通道的全部特性,只能是最大限度地接近。在选取 DU 模型作为研究模型时,通过适当选取参数在达到控制精度的同时使该模型计算出的电磁场能够实现文献 [4] 中所给出的电磁场应具备的 4 个典型特征,与实际产生电磁场具有较好的一致性。

因雷电的产生具有随机性强、预测难度大的实际特点,为使雷电回击模型准确并实现:(1)可利用测量得到的电磁场数据推出雷击电流;(2)可预测距离雷击点极近处的电场和磁场值;(3)可获得对自然界雷击及其相关现象的更佳理解<sup>[16]</sup>。为此在建立雷电回击模型同时要做到:建立和完善当地落雷雷电统计数据数据库,并判断其可靠性,为准确建立雷电回击模型提供参考;结合先进的计算仿真工具,综合考虑多维参数对雷电回击电流的影响,使所建模型更具普遍性;对已建模型进行电磁场计算,以是否体现电磁场的 4 个典型特征<sup>[4]</sup>为依据校验其准确性。

### 参考文献

[1] F. Mattos, C. Christopoulos. A Nonlinear Transmission Line

Model of the Lightning Return Stroke [J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1988, (30): 401-406.

[2] Bruce C E R, Golde R H. The Lightning Discharge [J]. J Inst Elect 1941, (88): 487-520.

[3] Uman M A, McLain D K. Magnetic Field of Lightning Return Stroke [J]. Geophys Res 1969(74): 6899-6910.

[4] VA Rakov and M A Uman. Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application [J]. IEEE trans on EMC. 1998, 40(4): 403-426.

[5] C Games, V Cooray. Concepts of Lightning Return Stroke Models [J]. IEEE Trans on EMC. 2000, 42(1): 82-96.

[6] Lin Y T, Uman M A, Standler R B. Lightning Return Stroke Models [J]. Geophys Res 1980, (85): 1571-1583.

[7] Master M J, Uman M A, Lin Y T et al. Calculation of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields above Ground. JGR. 1982, (86): 12127.

[8] R. Thottappillil M. A. Uman. Comparison of Lightning Return-stroke Models. J Geophys Res, 1993, 98: 903-914.

[9] Heidler F. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation [C]. Proc 6th Int Symp Electromagn Compat Zurich Switzerland 1985, 29F2: 157-162.

[10] Deindorfer G, Uman M A. An Improved Return Stroke Model with Specified Channel Base Current [J]. Geophys Res 1990(95): 13621-13644.

[11] V Cooray. A Model for Subsequent Return Strokes [J]. J Electrostatics 1993(30): 343-354.

[12] 田明宏, 魏光辉, 刘尚合. 通道高度对雷电回击电磁场的影响研究 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 499-500.

[13] 田明宏, 魏光辉, 刘尚合, 等. 基于 IEC 标准雷电后续回击电磁场的计算 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 951-954.

[14] 田明宏, 盛松林, 魏光辉, 等. 雷电回击参数对回击电磁场计算的影响研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(6): 600-601.

[15] Weidman C. D., Krider E. P., The Amplitude Spectra of Lightning Radiation Fields in the Interval From 1 to 20 Mhz [J]. Radio Science 1986, (21): 964-970.

[16] 陈燕萍. 浅谈雷击模型 [J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 15-17.

(收稿日期: 2010-01-10)