

输电线路雷击过程分析的雷电通道分形模型

何金良^{①*}, 张薛巍^①, 董林^①, 曾嵘^①, 刘泽洪^②

① 清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

② 国家电网公司特高压建设部, 北京 100031

* E-mail: hejl@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-12-26; 接受日期: 2009-04-22

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50737001)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2009CB724504)资助

摘要 如何合理进行输电线路的防雷分析是线路设计的关键问题之一. 本文对分形模拟应用到输电线路防雷中的三个重要问题, 即上行先导起始的判据和实现、与雷电流幅值建立联系及分形维数的计算和控制, 进行了讨论. 分析结果表明, 线路即使满足电气几何模型的完全屏蔽条件, 仍然存在绕击跳闸的可能性. 作为方法的进一步应用, 我们还计算了超高压交流线路在不同地面倾角下的绕击跳闸率以及特高压直流线路一个档距内的雷击落点分布特征, 可发现线路防雷中的薄弱环节. 本文工作为优化避雷线与导线的排列方式提供了一个有潜力的方法, 工程中可以适当地控制避雷线和相导线或极导线的弧垂来降低线路的绕击概率.

关键词

雷电先导

绕击

分形

介质击穿模型

电气几何模型

随着线路电压等级的提高, 杆塔高度、线路走廊的尺寸也增加, 遭受自然雷害的几率也相应增大. 各国数十年的雷击跳闸故障的资料表明, 500 kV 线路雷击跳闸主要是由雷电绕击相导线引起的^[1]. 目前我国输电线路的雷电防护设计及其性能估算以我国电力行业标准 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》为依据. 规程法的绕击计算未考虑雷电发展过程、雷电流大小和地面倾角对屏蔽效果的影响, 而是根据经验和小电流试验模型试验结果提出的综合平均法, 常不能反映线路的具体特性, 无法解释屏蔽失效的问题和绕击率过大的原因. 传统的电气几何模型(EGM)提出了击距的概念^[2], 将雷电流幅值与雷击距离联系起来, 将雷击输电线路用几何作图的方法来描述, 绕击率与雷电流幅值相关, 能够考虑线路结构和雷电参数等对绕击率的影响, 但该方法的理论是由保护角较大、杆塔高度较低的线路运行经验

总结而来的, 在超高压线路设计时, 理论计算的绕击率总是远小于实际运行值. 如 20 世纪 90 年代中后期, 华东地区连年屡次发生雷害事故, 而遭受雷害事故的杆塔多为 ZM1 型杆塔, 其边相导线保护角为 7.2°, 满足 EGM 的完全屏蔽条件. 根据现场调查情况, 经分析认为: 由于放电的分散性, 超出 EGM 绕击区定位的雷闪仍可能发生绕击^[3], 这一现象显然无法用 EGM 来解释.

雷电先导的发展呈现树状和狭窄的随机放电通道结构^[4], 该结构有明显的自相似特征, 而分形正是描述该结构的最好数学方法. 为了研究绝缘放电的特性, Niemeyer 等人提出了格点式随机分形模型 DBM(Dielectric Breakdown Model)^[5]. 后来, 不少研究者又将其用在对雷电闪道的模拟上^[6-11]. 分形模拟不仅其结果能够体现通道的分岔和弯曲, 而且其过程也与雷电放电过程基本类似. 但目前分形更多的

引用格式: 何金良, 张薛巍, 董林, 等. 输电线路雷击过程分析的雷电通道分形模型. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(11): 1818—1823

He J L, Zhang X W, Dong L, et al. Fractal model of lightning channel for simulating lightning strikes to transmission lines. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(11): 3135—3141, doi: 10.1007/s11431-009-0259-1

是作为描述现象的手段, 而缺乏工程应用方面的尝试. 文献[11]虽然利用分形模拟预测了雷击实际建筑物的概率, 但模拟场景过于简单, 而且并未得到能直接应用于工程的结果.

本文尝试将雷电的分形模型用于输电线路的雷电防护中, 期望本文的工作能为超高压及特高压线路防雷设计引入新的思路.

1 雷电通道的分形模拟

1.1 DBM 概述

为简洁起见, 本节以二维平板放电为例, 介绍 DBM 的主要算法和具体步骤. 后面的三维模拟基本思路相同.

图 1 中给出了运行若干步的模拟放电图样, 其中黑点表示放电通道中的点, 黑点以实线相连形成通道. 模拟区域内的电场在准静态近似下, 电位满足 Poisson 方程. 将上下边界和放电通道都作为第一类边界条件, 即其中格点的电位是固定的. 于是无需考虑空间电荷, 因为其效应已包含在边界条件中. 图 1 中每一格点电位 φ_{ij} 可由离散的 Laplace 方程求取, 即

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{4}(\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1}). \quad (1)$$

每一步的放电过程是邻近已生成的放电通道的未放电格点 (i', j') , 如果与放电通道中某点 (i, j) 之间的平均场强超过放电临界场强 E_c , 即

$$E_{i'j',ij} \equiv (\varphi_{i'j'} - \varphi_{ij}) / d_{i'j',ij} \geq E_c. \quad (2)$$

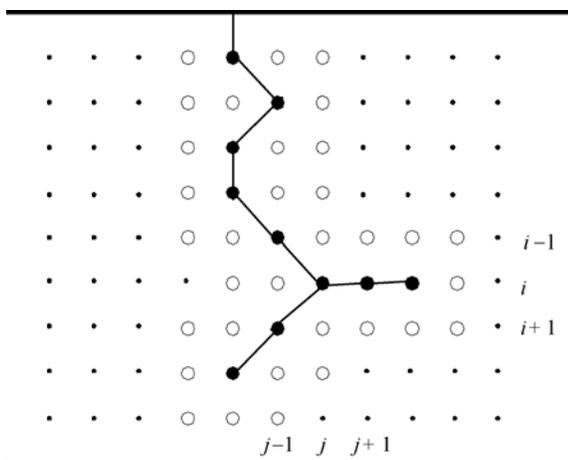


图 1 平板放电过程的 DBM 模拟方法示意图

该点就是可能放电点, (2)式中 $d_{i'j',ij}$ 为两点之间的距离. 可能放电点在图 1 中用白圈表示. 一个可能放电点成为新的通道点的概率 p 与局部的场强有关, 其表达式如(3)式所示

$$p(i, j \rightarrow i', j') = \frac{E_{i'j',ij}^\eta}{\sum E_{i'j',ij}^\eta}, \quad (3)$$

其中 (i, j) 和 (i', j') 分别为一个已放电点和一个可能放电点, η 称为发展概率指数, 放电通道由 (i, j) 向 (i', j') 发展的概率与两点之间平均场强的 η 次方成正比. (3) 式右端分母是对所有 (i, j) 和 (i', j') 的组合求和, 需要说明的是, 每一个通道点和每一个与之邻近的可能发展点都构成一个这样的组合.

按计算出的概率随机抽取下一步的放电发展方向, 如果新的放电通道是由 (i, j) 向 (i', j') 发展, 假设沿着放电通道电场强度为 E_{ch} , 则 (i', j') 处更新后的电位为

$$\tilde{\varphi}_{i'j'} = \varphi_{ij} - E_{ch} d_{i'j',ij}. \quad (4)$$

然后开始下一步的模拟, 如此循环, 直到通道联通上下边界, 表示此时间隙击穿.

1.2 模拟的场景、步骤和参数

在本文中只考虑比较常见的下行负极性雷的情形. 雷电通道的形成分为下行先导和上行先导两部分, 因而模拟需要在一般气体放电模拟的基础上考虑多条上行先导起始、发展以及上、下行先导头部相接(末跃)等的实现. 我们所采用的三维模拟场景如图 2

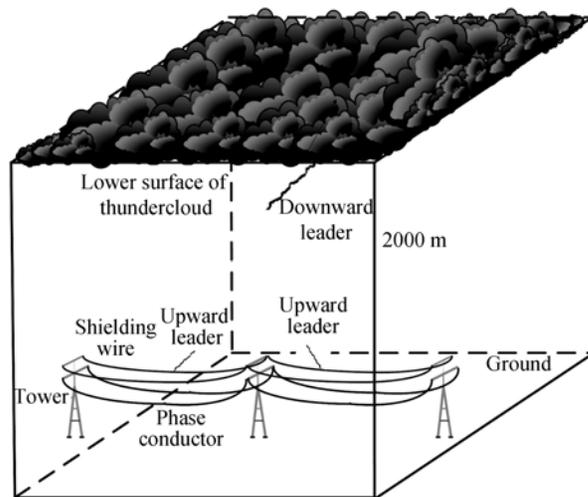


图 2 用分形方法模拟雷击输电线路的场景图

所示, 下行先导从雷云底部起始, 当其逼近大地时, 上行先导会从地面及输电线路的某位置起始并向上发展。

模拟中, 大地以及地面上构筑物(如杆塔、避雷线等)设为零电位, 雷云底部等效成一个平板电极, 电位为 $-U_0$ 。另外要在雷云底部随机选择一点, 产生一段初始的下行先导通道。在每一时间步, 检查下行先导头部与地面之间的平均场强, 如果超过击穿临界值 E_g , 则雷电将直击大地; 检查地面目标上可能产生上行先导的点处的场强, 如果其中某点与一邻近点之间的平均场强大于上行先导起始的临界场强 E_u , 则此处出现击穿, 上行先导起始。对已经起始的每条上行先导, 按照类似于下行先导的方式发展; 计算每条上行先导的头部与下行先导的头部之间的平均场强, 设其最大值 $E^{(k)}$ 对应于第 k 条上行先导。如果 $E^{(k)}$ 不小于 E_f (E_f 为末跃场强判据), 则发生末跃。单次模拟结果显然具有很大的随机性。为使得模拟具有实际价值, 须多次模拟得到统计结果。

先导发展临界场强 E_c 和先导通道内沿发展方向的场强 E_{ch} 可从文献[6, 8]中找到。末跃阈值 E_f 以及直击大地的临界场强 E_g 的大小暂采用估计值, 即取气隙击穿场强的一部分, 典型的为 15 kV/cm 。上行先导的起始判据 E_u 、雷云电位大小 U_0 和发展概率指数 η 将在下节中讨论。

2 对分形模拟的讨论

2.1 上行先导起始的判据和实现

上行先导发展判据通常可以简单地写为 $E \geq E_c$, 而上行先导的起始判据和发展判据并不相同, 比较公认的判据如下, 正上行先导的起始场强应该满足 $E \geq E_u \approx 500 \text{ kV/m}$ [12]。但需要特别指出的是, 对于输电线, 原则上 E_u (起晕场强)应由下式计算[13]。

$$E_u = 3000\delta m(1 + 0.03/\sqrt{\delta r}), \quad (5)$$

其中 m 为表面粗糙度因子, r 为导线半径, δ 为相对空气密度。

当多个地面物体上的点满足上行先导起始判据时, 不可能让每个点都有上行先导起始。解决此问题的一个方法是预先设置上行先导可能起始的点, 称为“热点”, 一般一一对应于地面构筑物表面出现较大曲率处(如杆塔塔头和横担端部)。允许多条上行先导

同时发展, 实际上是引入某种竞争机制。一般而言, 杆塔和避雷线的屏蔽作用体现在从它们出发的上行先导的“起跑线”比较靠前; 但是由于通道会出现分岔和扭曲, 它们的发展不一定比从相导线的起始的先导更“快”, 在这种情况下就可能发生绕击。另外, 分形模拟和气体放电过程都具有所谓法拉第屏蔽效应[14], 如果相导线上先产生上行先导, 使得周围热点处的场强大大降低, 就很可能抑制避雷线上行先导的起始。另外, 在模拟中已经考虑到上行先导的发展速度约为下行先导的 $1/3$ [15]。

2.2 与雷电流幅值建立联系

EGM中, 雷电流幅值 I_m 与击距 r_s 的关系为[16]

$$r_s = kI_m^p. \quad (6)$$

通常取 $k=6.72$, $p=0.8$ 。选择文献[17]中论证的 EGM 适用的 330 kV 单回线路。三条相导线水平排列, 高度 22 m , 相邻间距 11 m 。避雷线与同侧边相导线的间距为 9 m , 保护角 24° 。雷电流幅值 I_m 一一对应于击距, 根据 EGM 的计算, 也就一一对应于发生绕击的概率 $P_s(I_m)$ 。另一方面, 我们在模拟中设定雷云高度 500 m , 对不同的雷云电位 U_0 , 用分形模拟, 也可以得到绕击概率 $P_s(U_0)$ 。由这两条曲线的对应关系可以求出在绕击概率相同时 U_0 与 I_m 的对应关系, 如图 3 所示。为了能在更高电压等级的线路中应用, 将图 3 中结果进行了拟合并外推。

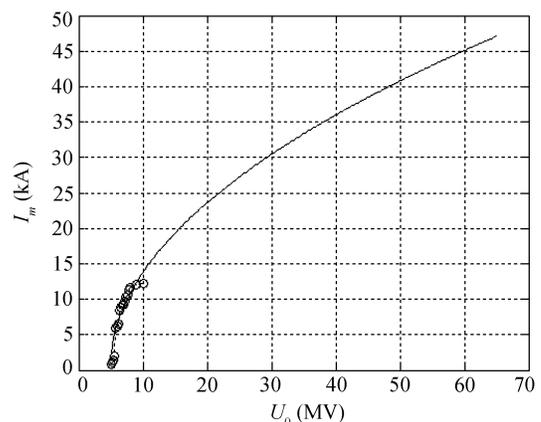


图3 等效雷云电位与雷电流幅值的对应关系

2.3 分形维数的计算和控制

分形模拟结果的合理性由其分形维数决定。从

实际的照片(可以看作闪电通道在二维垂直面上的投影)可以计算分形维数(盒维数). 将照片中的闪电通道放在一个边长为 r_1 的网格内, 数出与之相交的网格(即盒子)数 $N_1(r_1)$, 如网格边长缩小为 r_2 , 这时和通道相交的盒子数为 $N_2(r_2)$. 这个过程可以重复进行下去. 分形维数的定义为

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\ln[N(r)]}{\ln(1/r)} \right). \quad (7)$$

由(7)式知 $N(r) \sim r^{-D}$, 对此式取对数, 则 $\ln N_i$ 和 $\ln r_i$ 的双对数坐标上拟合得到的直线斜率的大小就是维数 D .

即使观察同一条闪道, 不同的观测角度甚至不同的照相技术都会得到不同的结果, 但分形维数 D 的观测结果大都为 1.1~1.3^[9]. 表 1 是在不同发展概率指数 η 下, 模拟所得的一些通道的分形维数计算结果的统计情况. 将三维的模拟结果投影到 4 个不同垂直面上, 来模拟从不同角度观察闪电, 进而计算这些二维投影的分形维数. 当 η 取 1.25~1.50 时模拟结果与上述观测结果最接近.

表 1 闪电先导通道分形维数的模拟结果统计

η	分形维数 D (样本数: 40)	
	平均值	标准差
1.10	1.670	0.066
1.15	1.593	0.066
1.20	1.478	0.055
1.25	1.345	0.054
1.30	1.258	0.068
1.35	1.197	0.064
1.40	1.161	0.053
1.45	1.129	0.049
1.50	1.103	0.052
2.0	1.098	0.042
3.0	1.049	0.024

3 分形模拟在输电线路防雷中的应用举例

3.1 500 kV 交流线路绕击故障率的计算

以交流 500 kV 酒杯塔为例, 塔型如图 4 所示. 为了与 EGM 分析结果比较, 不考虑线路的弧垂.

取落雷密度为 4 个/($\text{km}^2 \cdot \text{年}$), 绕击耐雷水平为

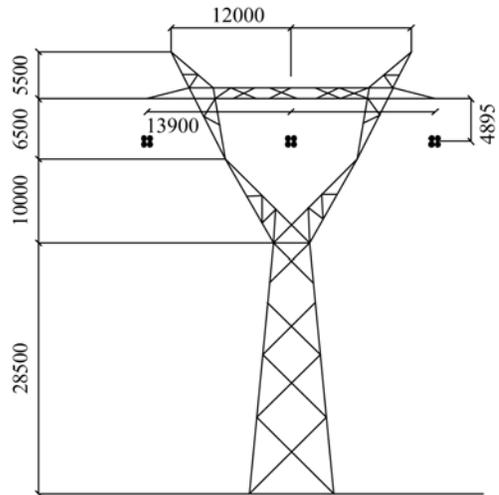


图 4 500 kV 直线酒杯塔

20.4 kA, 雷电流幅值 I_m 的概率分布取(其中 P 为幅值大于 I_m 的雷电流出现的概率)

$$\lg P = -\frac{I_m}{88}. \quad (8)$$

由(8)式离散化可以得到一个近似的雷电流幅值分布, 其中雷电流 I_m 为一系列离散值. 对于每个与这些电流离散值对应的 U_0 , 通过多次模拟可以得到绕击率. 再由与 U_0 对应的 I_m 出现的概率即可估算出绕击跳闸率. 计算所得不同地面倾角下的绕击跳闸率及其与 EGM 的计算结果对比如图 5 所示. 在水平地面上, 线路即使满足 EGM 的完全屏蔽条件, 还是可能发生绕击跳闸. 地面倾角较小时, 分形模拟的结果比 EGM 要大得多, 这与实际运行经验较为接近. 若

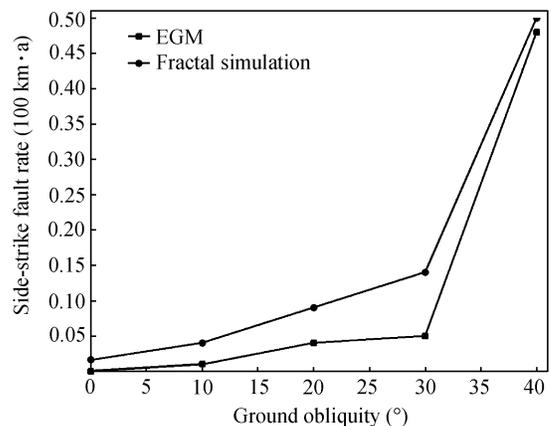


图 5 地面倾角对分形法和 EGM 绕击故障率的影响

地面倾角大于 30° , 二者相差不明显, 地面倾角造成的保护角变化的影响已超过分形模拟中所考虑的先导发展过程中的一些随机因素的影响, 成为决定绕击跳闸率的主要因素。

3.2 ±800 kV 直流线路的雷击行为特性

±800 kV 直流线路塔型如图 6 所示. 计算一个档距(取为 400 m)内的雷击落点分布情况. U_0 的大小根据与之对应的 I_m 出现的概率按(8)式进行随机抽取。

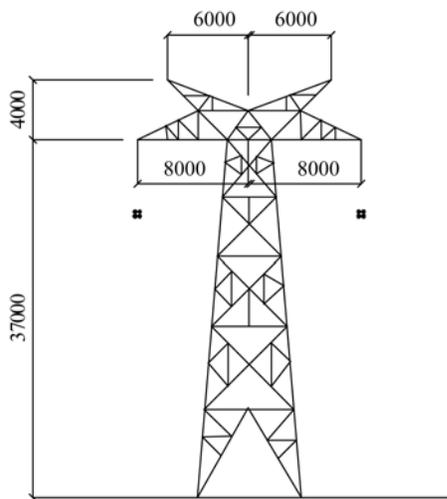


图 6 ±800 kV 直流线路直线塔

将雷击点的区域分成表 2 所示的 7 部分, 档距中央和两端的长度各占总长度的 1/2. 不考虑弧垂和设置避雷线和导线弧垂分别为 15 和 10 m 时的计算结果如表 2 所示, 负极性雷绕击负极导线的概率(f, g)要明显小于绕击正相导线的概率(d, e), 这与物理概念和实际运行经验一致. 负极导线较之正极导线不易产生上行先导, 因而发生绕击的概率也低得多。

表 2 一个档距内雷击落点的概率分布

落点	概率(模拟次数: 1000)	
	不考虑弧垂	考虑弧垂
a-杆塔	0.300	0.294
b-档距中央避雷线	0.292	0.271
c-档距两端避雷线	0.336	0.335
d-档距中央正极导线	0.032	0.049
e-档距两端正极导线	0.029	0.032
f-档距中央负极导线	0.006	0.011
g-档距两端的负极导线	0.005	0.008

在考虑弧垂的情形下, 绕击概率比未考虑弧垂

时大, 而档距中央正导线的绕击概率已经超出左右两段绕击概率之和, 同时档距中央避雷线上的落雷概率明显减小, 说明这一部分输电线路将是防雷的软肋. 加上弧垂, 实际上是考虑到输电线路各个截面处保护角不同. 如果避雷线的弧垂比相导线的弧垂更大, 档距中央处保护角就增大, 屏蔽可能失效。

图 7 是根据考虑弧垂情形的计算结果绘制的线路长度方向的绕击分布图。

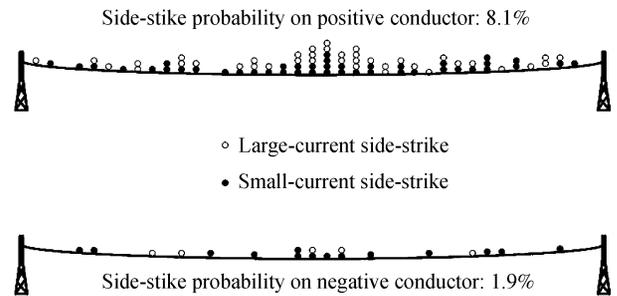


图 7 正负极导线沿线绕击发生情况

绕击最有可能发生在档距中段. 图 7 所示仅是绕击次数, 而不是绕击跳闸的次数, 而小电流绕击(即绕击电流小于耐雷水平)并不能造成跳闸. 线路的正、负极导线对负极性雷的耐雷水平分别为 32.9 和 23.3 kA. 统计结果表明, 负极导线发生小电流绕击的比例为 14/19, 正极导线为 42/81, 正负极绕击跳闸率之比约为 8:1, 我国南方电网公司多条直流线路的长期运行统计结果(8~10:1)与之比较接近。

4 结论

本文主要研究了分形方法在雷电先导过程模拟和高压输电线路防雷中的应用. 虽然模拟的核心算法 DBM 早已成熟, 但要将其用于实际工程中, 还有很多问题需要考虑. 为此本文讨论了上行先导的起始和发展在模拟中的实现, 关键是允许多条上行先导起始, 另外将模拟结果与雷电流幅值这一雷电重要参数联系起来. 另外计算了模拟雷电通道投影的分形维数, 作为对模拟可靠性的一个验证。

计算结果表明: 1) EGM 在超高压以上线路的防雷设计中往往得出偏于乐观的结果, 而分形模拟跟踪先导发展过程, 考虑了随机因素, 因而能得到与运行数据更为接近的结果. 2) 分形模拟方法能计算一个

档距内雷击落点的分布情形, 明确指出档距中央的正极导线这一防雷薄弱环节, 为优化避雷线与导线的排列方式提供了一个有潜力的方法, 工程中可以适当地控制避雷线和相导线或极导线的弧垂来降低线路的绕击概率。

参考文献

- 1 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析. 高电压技术, 1998, 24(2): 76—79
- 2 张纬钹, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合. 北京: 清华大学出版社, 2002
- 3 钱冠军, 丁一正. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究. 高电压技术, 1997, 23(2): 70—72
- 4 Vecchi G, Labate D, Canavero F. Fractal approach to lightning radiation on a tortuous. J Phys D Appl Phys, 1994, 29(4): 691—704
- 5 Niemeyer L, Pietronero L, Wiesmann H J. Fractal dimension of dielectric breakdown. Phys Rev Lett, 1984, 52(12): 1033—1036[[doi](#)]
- 6 Tsonis A A, Elsner J B. Fractal characterization and simulation of lightning. Atmos Phys, 1987, 60: 187—192
- 7 Richman C I. Fractal geometry of lightning strikes. In: Conference Record of IEEE Military Communications Conference, Vol 3. Monterey: IEEE, 1990. 1085—1090
- 8 Dul'zon A A, Lopatin V V, Noskov M D, et al. Modeling the development of the stepped leader of a lightning discharge. Tech Phys+, 1999, 44(4): 394—398[[doi](#)]
- 9 Kawasaki Z, Matsuura Z. Does a lightning channel show a fractal? Appl Energ, 2000, 67: 147—158[[doi](#)]
- 10 Nguyen D T, Deegan G, Alessandr F D. Fractal nature of probabilistic model of lightning discharge. In: Proceedings of IEEE Region International Conference on Electrical and Electronic Technology, Vol 2. Singapore: IEEE, 2001. 814—818
- 11 Petrov N I, Petrova G N, Alessandro F D. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. IEEE T Dielect El In, 2003, 10(4): 641—654[[doi](#)]
- 12 Petrov N I, Petrova G N. Mathematical modeling of the trajectory of a leader discharge and the vulnerability to lightning of isolated and grounded objects. Tech Phys+, 1995, 40(5): 427—436
- 13 Delleria L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. Part II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs. IEEE T Power Deliver, 1990, 5(4): 2023—2029[[doi](#)]
- 14 张济忠. 分形. 北京: 清华大学出版社, 1995
- 15 Uman M A. The Lightning Discharge. New York: Academic Press, 1987
- 16 Brown G W, Whitehead E R. Field and analytical studies of transmission lines. IEEE T Power Deliver, 1969, 88(5): 617—626[[doi](#)]
- 17 Nguyen T T, Holt R. Lightning protection of transmission lines: Optimal shielding design procedure. IEE P-Gener Transm D, 2003, 150(6): 659—667[[doi](#)]