

抱杆通信系统的建模仿真和雷击分流特性研究

Modeling and simulation of pole-hugging communication system and study on lightning split characteristics

姚学玲, 孙晋茹, 陈景亮

陕西省高电压大电流测试技术及装备工程实验室 西安交通大学 西安 710049

摘要: 随着 5G 网络通信技术的发展, 分布密集的小型抱杆通信基站将是未来的主要安装场景, 复杂接地场景下抱杆通信系统雷电流分流特性的研究具有重要意义。本文建立了通信抱杆的计算模型, 获得了抱杆本体和远端射频装置供电电缆的自感及其之间的互感与雷电流参量之间的相关规律, 在此基础上, 建立了典型 10m 抱杆通信系统的电路模型, 获得了 8/20 μ s 雷电流波注入下各支路的分流特性并进行了实验验证, 实验结果与仿真结果很好吻合, 验证了抱杆通信系统建模仿真计算的准确性, 为 5G 抱杆通信系统的雷电防护器件的试验方法和防护方案的设计提供了理论基础和试验数据支撑。

关键词: 通信基站, 抱杆系统, 仿真模型, 雷电流分流特性

1 引言

随着 5G 万物互联时代的来临, 其应用将渗透到车联网、智能电网、智能制造等未来社会的各个领域^[1,2]。针对传统的宏基站无法完全覆盖高楼林立、遮挡严重的密集城区的难题, 小型化、密集的抱杆通信基站将会是未来 5G 通信的显著特征。雷击是一种高电压、大电流、长距离的自然放电现象, 对远端射频单元 RRU (Remote Radio Unit)、微站、微波等无线通信系统的设备产生干扰和破坏, 严重威胁通信系统的安全运行, 因此, 抱杆通信系统阻抗特性及其雷电防护研究具有重要的理论意义和应用价值。

电感参数是杆塔雷电暂态分析的重要参数之一。国内外学者对电力系统杆塔的电感特性进行了大量的研究, 杜林等人从电感存储磁场能的角度将铁塔模型等效为互相平行的铁塔四根支柱导体结构, 并通过单根导体提出电感修正系数优化模型^[4], 但由于对杆塔结构做了过多的简化, 效果并不理想; 李鹏等人分析通信铁塔塔体钢材形状与其趋肤效应, 提出了铁塔扁钢、角钢和管钢的外自感估算方法^[5], 但这种估算方法误差较大, 在运用到铁塔整体时精度较低; 同时, 大量学者还通过研究获得了电力系统单一波阻抗及多波阻抗杆塔模型的数学和理论表达式, 其中比较有代表性的由其中比较有代表性的为 Jordan 提出的基于诺埃曼感应公式的 Jordan 公式和 Wagner 等人提出的采用电磁场理论推理的 Wagner 公式^[6,7]; 在此基础上 Sargent 提出的将杆塔应等效为圆锥模型得 Sargent 公式^[8]; Yamada 等人将杆塔等效为圆锥和圆柱, 并通过诺埃曼感应公式和德里复合贯穿深

度理论提出得 Yamada 公式^[9]; 文献 [10] 提出了杆塔平均阻抗的计算公式。相比而言, 电力传输线缆电感和线缆周围电磁场的研究较多, 可以通过建立 Ansys Maxwell 环境的电磁场模型进行仿真计算^[11-14]。

2008 年, Mohammad 和 Md. Osman 计算了雷击通信铁塔时, 在距离铁塔 10-490m 的场点上的电场、磁场强度及其在三个方向上的分量^[15], 刘昆等人^[16]基于 CST STUDIO 探究了 10m 铁塔周围的电磁感应, 发现铁塔内部的电磁感应强度远小于铁塔外部; 文献 [5] 通过 ABS 软件建立了铁塔的等效电路模型, 仿真分析了不同雷击点、不同接地电阻率、天线线缆对铁塔主梁、斜梁雷电流分布、入地电流的影响, 同时分析了天线线缆上的耦合电流情况。2014 年中国电信股份有限公司广东研究院关强华等人通过雷电观测试点收集塔放式 RRU 遭受雷击的情况, 通过 2 年多的实际观测收集发现当铁塔遭受雷击时, RRU 供电线缆上的雷电流幅值在 10kA 以内, 同时波形参数比较接近于 8/20s 波形。同时, 针对观测数据研究人员将 40m 铁塔等效成 40m 扁钢进行模拟实验, 通过实验发现当 10kA 的 10/350s 雷电流波形注入扁钢时, RRU 供电线缆上的电流幅值为 2.84kA, 分流比接近 1/4, 且波形接近于 10/350 μ s。同时推测当使用抱杆基站时, 分流比会更大^[16]。

通信基站系统与电力杆塔结构存在着明显差异, 电力输电线路中, 高压电力线缆与杆塔垂直布局, 杆塔与输电线缆间不存在互感作用。而对于抱杆通信系统, 通信抱杆

主杆体还通过抱箍安装有远端射频单元 RRU，其供电电缆通常从地面上的供电电源沿抱杆主体向 RRU 供电，因此，在研究雷电流在抱杆和 RRU 供电电缆中的分流特性时必须考虑抱杆本体与线缆间之间存在的互感耦合作用，而对于抱杆通信基站系统，抱杆、供电电缆之间存在互感耦合作用。一方面，雷电流在抱杆本体、RRU 供电电缆芯线和屏蔽线各支路的雷电流分流特性涉及甚少，同时由于通信抱杆多为铁磁材料，存在磁饱和等特性，使得抱杆的动态电感随雷电流的磁场频率、幅值而变化，给抱杆通信基站系统的雷电防护性能的研究带来一定的困难。

本文通过建立了抱杆通信基站系统的三维电磁环境计算模型，获得雷电流注入下抱杆的自身电感及抱杆与 RRU 供电电缆之间的互感随雷电流频率和幅值等参数变化的规律。在此基础上，建立抱杆通信基站系统雷电流分流特性的回路模型，得到雷电流在抱杆、供电电源电缆芯线和屏蔽层中的分流并进行实验验证，为抱杆通信系统雷电防护技术的研究和防护方案的设计奠定一定的理论基础和实验数据支撑。

2 抱杆通信基站系统仿真模型的建模与计算

抱杆通信基站系统主要由避雷针、抱杆本体、RRU、供电电源及其线缆以及接地体组成，系统的结构示意图如图 1 所示。

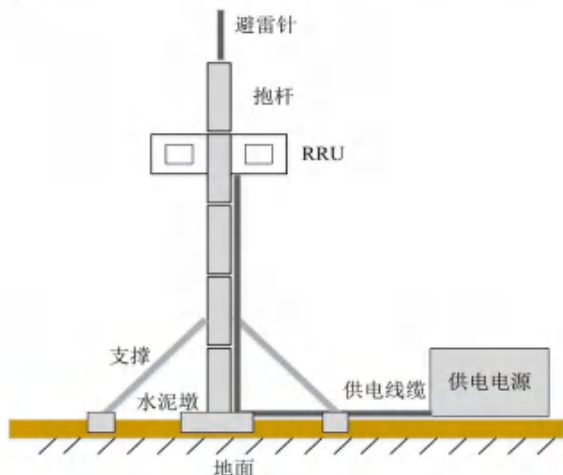


图 1 抱杆通信基站的结构示意图

本文通过建立抱杆通信基站系统的电磁场模型，采用有限元数值方法计算得到电磁场后，再通过磁场能量法对电磁数据进行后处理，从而得到抱杆通信系统中各部件的

电感。

自感磁能与电流的关系为：

$$W = \int dW = \int i d\psi = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

其中， W 为磁场能量， B 为磁感应强度， H 为磁场强度， L 为自感， I 为流经的电流幅值。

利用公式 (1)，在给定电流后，首先将求解域分为不同区域，求解每个区域内该电流产生的磁感应强度 B 和磁场强度 H ，进而算出磁场能量 W_i ，最后将各个区域的磁场能量求和得到求解域的总磁场能量 W 。

由此求得抱杆通信基站系统中部件的电感为：

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (2)$$

本文采用的抱杆模型为经典的美标 150&120 风速 10m 落地式屋顶抱杆模型，抱杆杆体的外径为 102mm、内径为 92mm；材质为钢。

2.1 雷击电流的频率特性分析

根据 IEC62305 标准，常用 8/20s、10/350s 来表征标准的雷电感应波形和直击雷电流波形，且电流变化规律可以用近似双指数函数表示。

$$i(t) = I_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中， $i(t)$ 为雷电流瞬时值， I_0 为雷电流峰值； α 和 β 分别为波前和波尾衰减系数； k 为波形矫正系数。

雷电流波可以看成无数多个不同频率连续变化的谐波合成，因此将上式进行傅里叶变换得到雷电波频谱表达式为：

$$I(i\omega) = k \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + i \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (4)$$

将上式对角频率进行积分得到其能量积累频谱为：

$$W(\omega) = \frac{k^2 R}{\pi} \cdot \frac{\beta - \alpha}{(\beta + \alpha)\alpha \cdot \beta} \left[\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right] \quad (5)$$

将其与雷电波总能量作比得到其相对能量积累频谱为：

$$\frac{W(\omega)}{W_0} = \frac{2}{\pi(\beta - \alpha)} \left[\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right] \quad (6)$$

根据公式 (6) 及波形参数分别对两种典型的雷电流波进行积累能量谱分析，结果如表 1 所示。

表 1 8/20 μ s 和 10/350 μ s 波形能量积累谱分析

频率 /Hz	100	500	1k	10k	50k	100k	200k	1M	100M
8/20 μ s	1.08110-3	5.40010-3	0.0108	0.1074	0.4739	0.7337	0.9160	0.9987	1
10/350 μ s	0.0301	0.1483	0.2882	0.8739	0.9803	0.9929	0.9981	0.9999	1

图 2 为 8/20s 雷电流波中能量谱的柱状图，从中按照 IEC62305 规定的 8/20s 双指数波的分析发现：频率在 100kHz 范围占比达到约 70%。另一方面，按照 IEC 61643-11 的规定，8/20s 雷电流波是一个反极性不超过 20%（或 30%）的阻尼振荡波，其能量的分布讲比较集中，对具有欠阻尼振荡的 8/20 μ s 的傅里叶分析结构如图 3 所示。

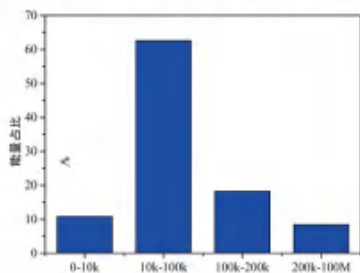


图 2 8/20s 雷电流波的能量谱分析

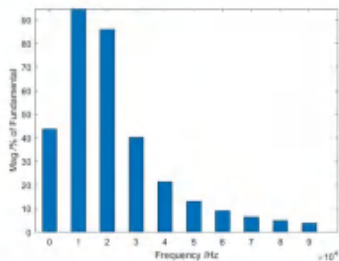


图 3 具有欠阻尼振荡的 8/20s 能量谱分析

从表 1 和图 2 得出：对于 8/20 μ s 双指数波，在频率 1kHz 附近能量积累到总能量的 10%，在频率 200kHz 附近能量积累到 91.60%；而 10/350 μ s 波形在频率 0.5kHz 附近能量积累到总能量的 14.83%，在 10kHz 附近能量就会积累到 87.39%，因此，两种雷电流波的频率上限均在 1MHz 左右，但欠阻尼的 8/20 μ s 雷电流波是一个中心频率在 10kHz-20kHz 的频率较为丰富的雷电流波。

2.2 抱杆通信基站系统的结构参数

10m 抱杆通信基站系统主要由避雷针、5 节钢管、RRU 等组成，主要部件的参数如表 2 所示。

表 2 10m 抱杆的主要结构参数

序号	部件名称	部件尺寸 /mm	材质	数量
1	避雷针	$\Phi 16 \times 1494$	钢	1
2	钢管 (I)	$\Phi 102 \times 5 \times 1988$	钢	1
	钢管 (II)	$\Phi 102 \times 5 \times 1984$	钢	1
	钢管 (III)	$\Phi 102 \times 5 \times 1984$	钢	1
	钢管 (IV)	$\Phi 102 \times 5 \times 1984$	钢	1
	钢管 (V)	$\Phi 102 \times 5 \times 1984$	钢	1

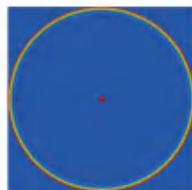
在进行抱杆通信基站系统的模型建立时，忽略了每两段抱杆钢管之间连接部分对整体的影响。另外，抱杆杆体安装在支撑底座上，并通过接地排线连接到接地网上，而支撑底座固定连接在水泥结构中，与大地及雷击不构成能量泄放回路，本文的仿真计算和试验验证暂不考虑抱杆支撑底座等的影响。

对于典型的 8/20 μ s 雷电流波，其波长约为 3000m。实际应用中，抱杆通信基站系统的最大高度一般不会超过 60m，抱杆高度仅为 8/20 μ s 波形波长的 1/50，远远小于雷电流波的波长，抱杆通信基站可视为电小物体，其雷电流传导过程可遵循欧姆定律和基尔霍夫定律，因此，可以将基站模型等效为有电感、电阻构成的集中参数问题。

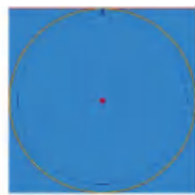
2.3 雷电流频率对抱杆通信系统电感的影响

抱杆杆体材质为钢材，导电良好，由于雷电波的高频分量较多，因此，抱杆杆体上的雷电流在传输过程中会存在趋肤效应。

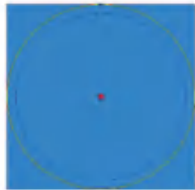
在 Ansys Maxwell 环境中，建立抱杆杆体的截面模型，可以得到其电流密度如图 4 所示。



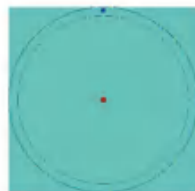
(a) 频率 1kHz



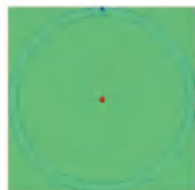
(b) 频率 5kHz



(c) 频率 10kHz



(d) 频率 50kHz



(e) 频率 100kHz

图4 抱杆杆体截面电流密度与频率关系的仿真结果

从图4中发现，抱杆杆体外表面电流密度很大，内部基本没有电流。而且随着雷电流频率的增大，这种现象越来越明显。这是因为抱杆杆体材质为铁磁材质，其磁导率相对较大，且抱杆厚度在5mm左右，远大于电流集中区域，因此其趋肤效应现象非常明显。

根据雷电流波的频率分布和图2所示的电流密度的仿真结果，可以进一步得到抱杆杆体的趋肤深度与频率之间的关系：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (7)$$

式中， ω 为角频率， μ 为磁导率， σ 为电导率。

抱杆杆体趋肤深度与频率的关系如图5所示，抱杆杆体单位长度自感量与雷电流频率之间的仿真计算结果如图6所示。

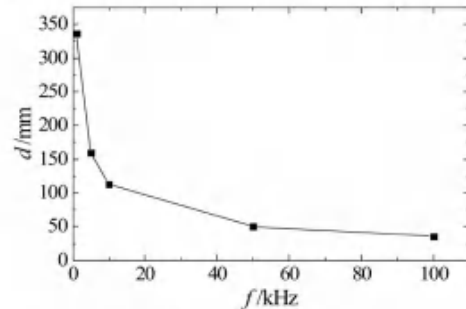


图5 抱杆杆体趋肤深度与频率的关系

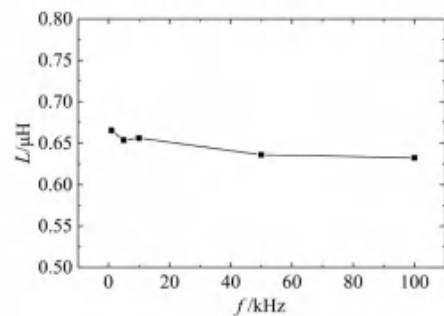


图6 抱杆杆体单位长度自感与雷电流频率的关系

从图6得出：在雷电流波形覆盖的主频段，抱杆杆体单位长度自感的变化不大，最大变化量仅为5%。这是因为：虽然抱杆的趋肤深度随着频率而变化，但在雷电流频带内，趋肤深度的变化仅为300μm左右，而抱杆的厚度为5mm，雷电流流过的横截面积变化非常小，故其自感的变化可以基本忽略。因此，在建立抱杆自感模型时，可以选取雷电流频带内的固定频率进行仿真计算，后续抱杆通信系统防雷电建模和计算时，也采用固定频率进行仿真计算。

2.4 雷电流幅值对抱杆本体电感的影响

对于抱杆材质钢材料来说，其磁感应强度B与磁场强度H是非线性变化，磁导率会在较大范围内变化，其数值远大于真空磁导率，常见铁磁材料B-H曲线如图7所示。

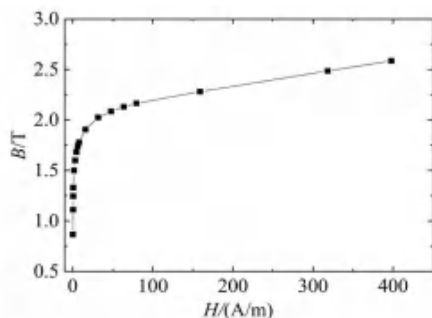


图7 铁磁材料B-H曲线

结合图7所示的铁磁材料的B-H曲线来分析8/20 μ s雷电流波与抱杆的作用过程：由于8/20 μ s雷电流波的特征是短时间的高幅值脉冲，电流变化率非常快，当其作用于磁性材料时，会产生很强的瞬时磁场，铁磁材料的磁畴瞬态转向，致使其附近的外磁场发生变化，B的变化引起的改变，从而引起抱杆自感的变化，抱杆杆体单位长度自感量L'与雷电流峰值的关系如图8所示。

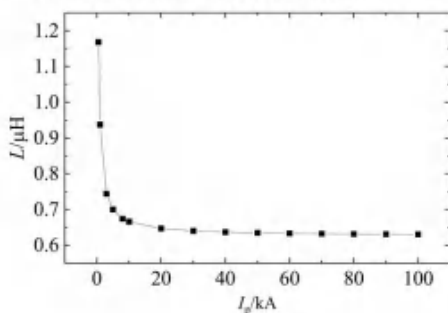


图8 抱杆杆体单位长度自感量与雷电流峰值之间的关系

由图8可以得出：抱杆杆体单位长度电感量随电流幅值的增大而减小。

根据电磁场安培环路定律：

$$\oint_L H \cdot dl = \Sigma I \quad (8)$$

由公式(8)知：随着电流峰值的增加，B随之增大，相应导体的 μ 降低，抱杆的电感量应随之减小。但是从图8发现：随着雷电流峰值的增加，抱杆电感的变化越来越小，当电流从30kA增加到100kA时，电感的变化约为0.01 μ H，这主要是由于雷电流的瞬态变化引起 μ 的非线性而引起。

2.5 抱杆高度与自身电感之间的关系

抱杆的高度会因安装场景的不同而发生变化，计算得到雷电流作用下抱杆杆体自感量随长度变化规律如图9所示。

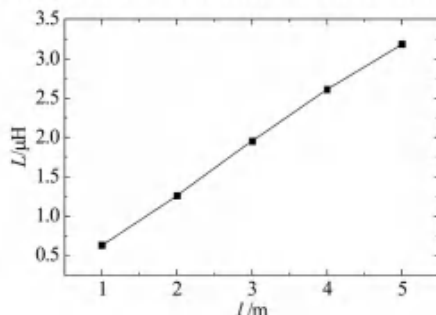


图9 抱杆杆体自感量与长度之间的关系

由图9曲线得出：在雷电流作用下，抱杆杆体的电感量与杆体长度基本成线性关系：

$$L_{pole} = 0.6458l - 0.0088 ; R^2 = 0.9992$$

3 RRU 供电电缆的电感及其与抱杆杆体之间的互感建模及计算

3.1 RRU 供电电缆的建模及参数计算

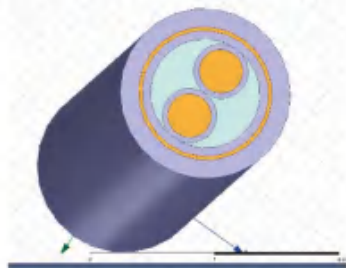
屏蔽双芯电缆是通信设备最为常见的供电电缆线，其电气参数如表3所示。

表3 屏蔽双芯线的参数

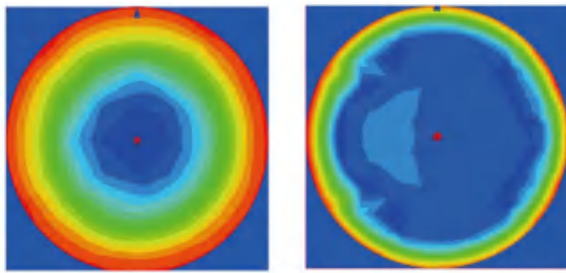
结构	参数
导体截面 /mm ²	2×4
导体直径 /mm	2.6
绝缘标称厚度 /mm	0.8
绝缘外径 /mm	4.3±0.3
电缆外径 /mm	12.0±0.5

3.1.1 电缆芯线的建模与参数计算

电缆芯线的 Maxwell 仿真模型如图10所示。



(a) 线缆芯线的仿真模型



(b) 芯线电流密度仿真结果 (10kHz, 100kHz)
图 10 屏蔽双线电缆的 Maxwell 仿真模型

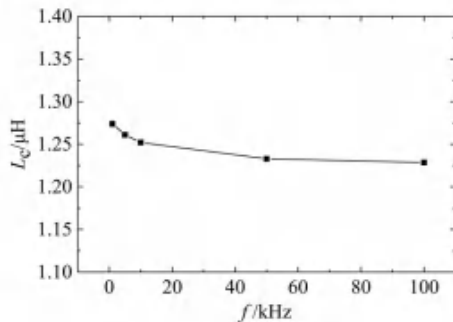
从图 10(b) 所示的仿真结果可以看出：当雷电流的频率为 10kHz 时，其截面中心基本均没有电流流过，电流集中在导体表面，在 100kHz 高频情况下，趋肤效应非常明显。

供电电缆芯线自感和电阻随雷电流频率和其结构参数的变化规律如图 11、图 12 所示。

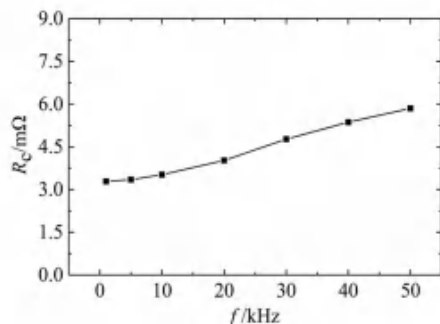
从图 11、12 仿真计算结果得出：

1) 随着雷电流频率的变化，线芯电感变化不大，在频率 100kHz 范围内，最大差值仅为线缆电感的 3.6%，但电缆线芯电阻变化较大。

2) 随着线缆半径的增大，线缆自感逐渐减小，自感与线芯半径成幂函数关系；而线芯电阻随着半径的增大明显减小。

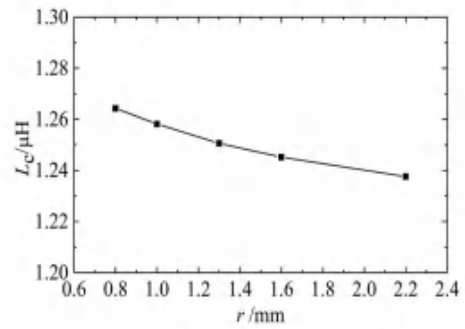


(a) 电缆芯线的自感

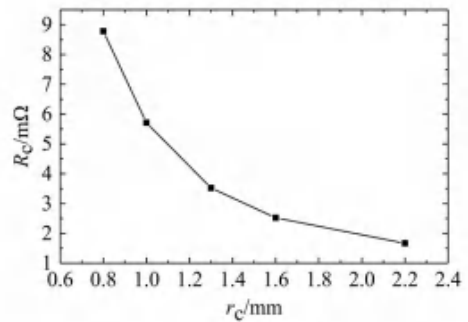


(b) 电缆芯线的电阻

图 11 供电电缆芯线电感和电阻随雷电流频率的变化



(a) 电缆芯线的自感

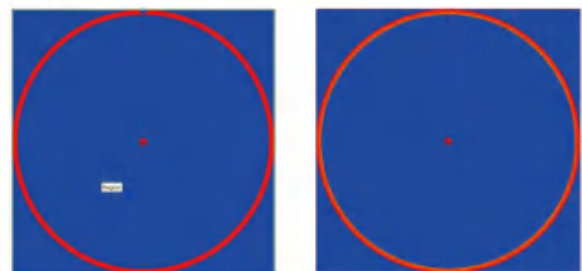


(b) 电缆芯线的电阻

图 12 供电电缆芯线电感和电阻随线缆芯线半径的变化

3.1.2 电缆屏蔽层的建模与参数计算

将供电电缆的屏蔽层等效为空心圆柱模型并建立屏蔽层的等效 3D 仿真模型，计算得到的屏蔽层界面电流密度如图 13 所示。



(a) 频率 10kHz

(b) 频率 100kHz

图 13 双线电缆屏蔽层的电流密度与频率之间的关系 (a:10kHz, b:100kHz)

由图 13 可知，当雷电流频率在 10kHz 到 100kHz 时，屏蔽层上均有电流通过，基本上不存在趋肤效应。这是因为：编织结构的屏蔽层本身非常薄，且非铁磁材料的屏蔽层具有较大的趋肤深度，因此可认为雷电流在屏蔽层截面均匀流经。

图 14 为屏蔽层自感的变化规律。由图 14 可知：线缆屏蔽层的自感随屏蔽层长度呈线性变化。

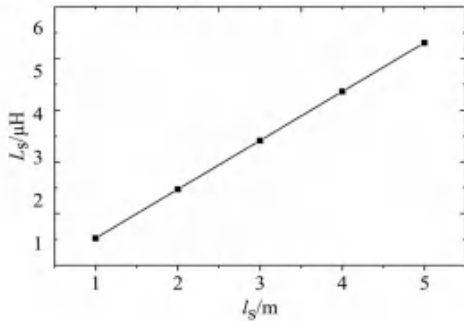


图 14 供电电缆屏蔽层的自感与长度之间的关系

屏蔽层的等效电阻可按照等效的 3D 空心圆柱进行计算，但由于屏蔽层的编制结构，屏蔽层的实际电阻应将屏蔽层的编制系数考虑即可。

3.2 供电电缆与抱杆杆体之间的互感建模及计算

通信电缆的屏蔽层通常为铜或铝编织结构，当外部或内部存在电场时，屏蔽层表面会感应出电荷并直接导入大地，因此，屏蔽层的存在使得抱杆与电缆芯线之间没有电场作用。但当变化迅速的雷电流入侵抱杆时，抱杆与电缆芯线和屏蔽层之间将产生较强的磁耦合互感作用。同样地，建立抱杆系统部件之间耦合的仿真模型，计算得到的各支路之间的互感与长度之间的关系如图 15 所示。

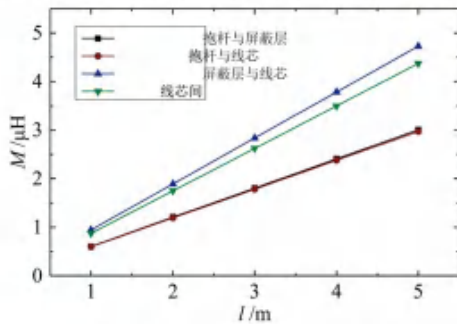


图 15 抱杆通信系统各支路之间的互感

4 抱杆通信系统的建模计算实验验证

4.1 雷电流作用下抱杆通信系统的电路模型

在抱杆通信系统各部件自感和相互关联的互感仿真计算基础上，可以获得抱杆通信系统的电路仿真模型如图 16 所示。

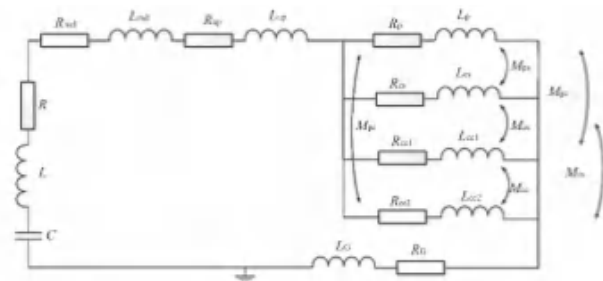


图 16 抱杆通信系统的等效电路模型

图 16 中， R_{up} 、 L_{up} 为 RRU 抱箍与第 I 段抱杆的最上端之间部分的电阻和自感， R_p 、 L_p 为抱箍以下第 I 段抱杆的电阻和自感， R_{cc1} 、 L_{cc1} 和 R_{cc2} 、 L_{cc2} 分别为线缆两芯线的电阻和自感， R_{cs} 、 L_{cs} 为屏蔽层的电阻和自感， R_G 、 L_G 为接地引线及接地网的电阻和自感； M_{ps} 、 M_{pc} 、 M_{cc} 、 M_{cs} 分别为抱杆与屏蔽层间、抱杆与芯线间、线缆芯线间以及芯线与屏蔽层间的互感； R_{rod} 、 L_{rod} 为避雷针的电阻和自感； R 、 L 和 C 表示模拟雷电流发生器的波形形成的电阻、电感和电容。

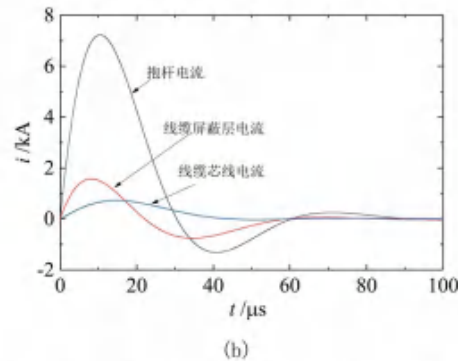
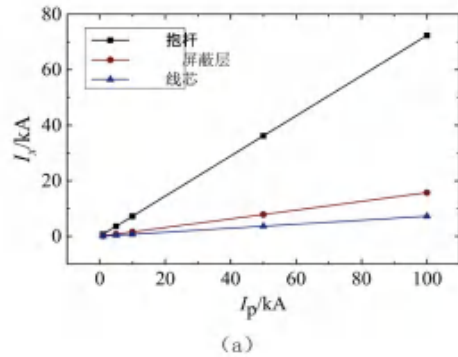


图 17 抱杆通信系统中各支路的雷电流分流特性

表 4 抱杆通信系统各支路雷电流的时间参数

时间参数 电流 /kA	t_f/s			t_i/s		
	杆体	屏蔽层	芯线	杆体	屏蔽层	芯线
10	7.694	6.691	11.59	21.36	17.38	28.71

由于抱杆、供电电缆是并联关系，它们与接地线和接地网为串联关系，接地线和接地网并不影响雷电流在抱杆、电缆芯线和屏蔽层支路的分流，因此，仿真和实验验证可以在特定接地阻抗的雷电流发生回路中进行。

在注入波前时间 t_f / 半峰值时间 t_i 为 7.919 / 21.24s 的 8/20 μ s 雷电流波条件下，10m 抱杆通信系统中各支路的分流特性（供电电缆在抱杆外侧）如图 17 所示，表 4 为各分流波形的时间参数。

从图 17 和表 4 的仿真结果得出：

1) 在注入 8/20s 雷电流波情况下，抱杆通信系统中抱杆、电缆屏蔽层、电缆芯线的雷电流分流比为 9.96:2.16:1。

2) 在注入 8/20s 雷电流波情况下，流经抱杆、屏蔽层 (6.691/17.38s)、芯线的雷击分流波形 (11.59/28.7s) 的时间参数发生了较大变化，抱杆本体的雷电流参数与注入 8/20 μ s 电流波形基本一致。

4.2 雷电流作用下抱杆通信系统的分流特性的试验验证

按照 10m 抱杆、接地电阻 10 Ω 的实验回路（图 18a）进行验证，用 Tektronix MDO3014 示波器测得的各支路雷电流分流波形，如图 18 所示。

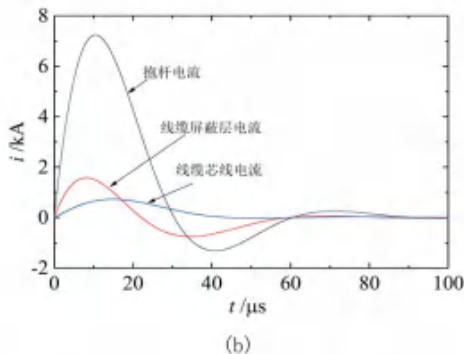
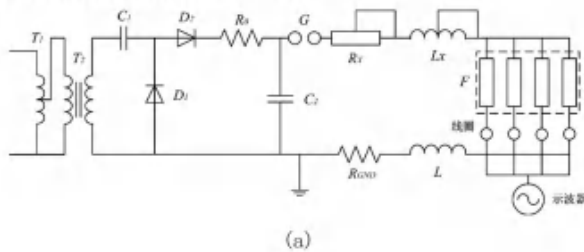


图 18 抱杆通信系统雷电流分流特性的实验验证

从图 18 实验结果可以得出：抱杆通信系统中，线缆屏蔽层中的分流波形明显变短，而芯线的分流波形显著变长；抱杆、屏蔽层和芯线的雷击分流比为 10.25:2.155:1，雷击分流比实验结果与仿真结果吻合很好，偏差仅为 2.83%，验证了抱杆通信系统建模计算的准确性。

5 结论

本文建立了抱杆通信系统的电磁场仿真模型，获得了各部件的自感、电阻以及相互关联的互感随雷电流特性变化的规律；并建立了抱杆通信系统的电路仿真模型，获得了 8/20 μ s 雷电流注入下，各支路的雷击分流特征。主要结论包括：

1) 建立了抱杆通信系统电参数的计算模型，获得了抱杆各部件在雷电流下的趋肤效应对其自感和电阻的影响规律，发现在 8/20s 雷电流波频率分布范围内，结果表明部件自感的变化在 5% 以内；随着雷电流峰值的增加，抱杆本体、电缆的自感呈指数规律减少，但当雷电流峰值增加至一定值后，自感变化量很小。

2) 建立了 10m 抱杆通信系统的电路模型，在 8/20s 雷电流注入条件下，获得了抱杆、电缆芯线和屏蔽层各支路的雷电流分流特性，发现：抱杆本体中雷电流的波形参数与注入电流波基本一致，屏蔽层中的电流波前时间和半峰值时间均缩短，而电缆芯线中的雷电流波前时间和半峰值时间显著变长，且抱杆、电缆屏蔽层和芯线中，雷电流分流比为 9.96:2.16:1（或近似为 10:2:1），并进行了实验室验证，计算值与实测值之间的最大偏差约为 5%，研究结果对 RRU 的防雷器的性能试验方法及防护方案的设计提供了理论依据和实验数据支撑。

参考文献

- 1 W. Jiang. Device to device based cooperative relaying for 5G network: a comparative review [J]. ZTE Communications, 2017, 15(S1):60 - 66
- 2 F.-L. Long, 5G new radio (NR): standard and technology[J], ZTE Communications, 2017, 15(S1): 1 - 2
- 3 杜林, 糜翔, 杨勇等. 雷击输电线路杆塔时的杆塔等效模型[J]. 高电压技术, 2011, 037(001):28-33
- 4 李鹏, 吕英华, 李子伟等. 移动通信铁塔直击雷电流分布的研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(1): 66-72+101

- 5 Jordan C A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires part. II [J]. General Electric Review, 1934, 34:180-185
- 6 Wagner CF, Hileman A R. A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines III-a simplified method stroke to tower[J]. AIEE Trans on Power Apparatus and System, 1960, 79(10):589-603
- 7 Sargent M, Darveniza M. Tower Surge Impedance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1969, PAS-88(5):680-687
- 8 Yamada T, Mochizuki A. Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1):P.393-402
- 9 Anderson John G, Clayton Roger, Elahi, et al. Estimating lightning performance of transmission lines. II. Updates to analytical models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3):P.1254-1267
- 10 Inan A S, Osterberg P M. Calculating the per-unit-length circuit parameters of a coaxial transmission line using singularity functions[C], IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004:2067-2070
- 11 张琪, 杜志叶, 王振东等. 基于有限元的单芯XLPE电缆电感计算研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 390-394
- 12 陈志龙, 强锡富, 彭立群. 考虑趋肤效应和涡流效应的柱形导体内部磁场和内部电感的有限元分析[J]. 电子器件, 2000, 23(3):214-218
- 13 王琦, 赵启明, 袁建生. 长直平行双导线电感传统计算方法误差分析与修正[J]. 电线电缆, 2017(06):4-7+43
- 14 Hossaini M S I, Goni M O. Numerical Electromagnetic Analysis of GSM Tower under the Influence of Lightning Over-voltage using Method of Moments[C], International Power & Energy Conference. IEEE, 2008
- 15 刘昆, 郭君峰, 张顺. 雷击通信塔的空间瞬态电磁分布研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, 30(4):325-332
- 16 关强华, 黄建华, 罗森文等. 塔放式RRU防雷[J]. 电信科学, 2014(S1):168-171

上接15页

垒下降越多,会导致压敏电压降低,漏电流增大,但老化特性提高;反之,老化性能差,压敏电压高漏电流小。传递速率快和降低温度的影响一致。

6 结束语

(1) 工艺专业化是指按相同工艺特征建立生产企业。在按工艺专业原则建立的企业中,集中了相同类型的设备和相同的工种的工人,对不同的种类的工作进行相同工艺方式的加工。

工艺专业化原则建立企业的优点是:

① 对产品品种变化的适应能力强;② 生产系统的可靠性较高;③ 技术交流,便于小组管理;④ 工艺及设备管理较方便。

(2) 前段工艺对压敏电阻电性能的影响:① 原料混料要均匀,参数是压敏电阻器的耐浪涌电流能力。② 压片工艺的参数是压片厚度和压片重量。③ 排胶的参数是装填密度,温度曲线和气体流量曲线。④ 烧结的参数是最高烧成温度,最高温度下的保温时间及降温速率。⑤ 刷银的参数

是印银直径,最小自由边和银层厚度。⑥ 烧银的参数是温度曲线和传递速率。

参考文献

- 1 谢继强. 工艺专业化和对象专业化的优缺点. [课程论文], 广东工业大学, 2010年10月
- 2 白厚善, 宋桂明, 李鹏, 李鑫, 王玲. 专业化生产压敏瓷粉的技术经济分析. <https://www.docin.com/p-1357890351.html>
- 3 朱满龙. 单片式压敏电阻的配方与生产工艺简介. <https://wenku.baidu.com/view/14a5522427284b73f24250e0.html>
- 4 任省平, 石永杰, 石微静. ZnO压敏电阻器生产工艺的改进. 电子元件与材料, 1998年04期
- 5 张萃, 杨景峰, 程鑫昌. 制备工艺对ZnO压敏电阻的影响. 中国电子学会敏感技术分会电压敏专业学部第十八届学术年会论文专刊, 50-52页, 2011年9月