

雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究*

杨 静^{1)†} 郝秀书²⁾ 王建国³⁾ 赵 阳¹⁾ 张其林¹⁾ 袁 铁¹⁾ 周筠¹⁾ 冯桂力¹⁾

1) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

3) (武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

(2006 年 11 月 29 日收到, 2007 年 8 月 10 日收到修改稿)

对自然雷电的 9 次回击过程在水平导体上产生的感应电压特征进行了分析, 并利用数值模拟分析了各种参量对感应电压的影响. 自然雷电 9 次回击在导体上产生的感应电压的变化范围为 4.6—18.6 kV, 平均值为 11.2 kV. 感应电压的半峰值宽度和下降时间的几何平均值分别为 0.87 和 2.9 μs . 数值模拟结果表明, 回击在导体两端产生的感应电压随回击速度的增加而增大, 随导体高度的增加而增大. 当导体两端的接地电阻匹配时, 感应电压随电阻的增加而增大, 但并不满足线性关系. 当导体两端的接地电阻不匹配时, 高电阻端的感应电压远大于低电阻端的感应电压, 所以良好的接地可以有效地减小雷电在导体上产生的感应电压.

关键词: 感应电压, 自然雷电, 数值模拟

PACC: 9260P, 9260N

1. 引 言

雷电产生的过电压是造成通信和电力系统故障的一个重要原因, 因此对这些系统进行有效的防护需要了解雷电在传输线上产生的过电压特征. Nucci 等^[1]对雷电产生的过电压问题进行了概念性的、较全面的论述; Paolone 等^[2]分析了近距离雷电在地下电缆上产生的过电压特征; Michishita 等^[3]分析了击中高塔的雷电在附近导线上产生的过电压. 尽管如此, 从实验角度对感应电压进行的研究仍然很少, 而较多的研究是从理论上进行的. 由于数值模拟方法在很多学科中得到了广泛的应用^[4-8], 所以理论上对雷电产生的感应电压的研究常常也是利用数值模拟进行的. Baba 等^[9]采用时域有限差分方法计算了雷电击中高大建筑时, 建筑物对传输线上产生感应电压的影响. 文习山等^[10]利用数值方法, 从理论上分析了架空配电线路感应过电压的问题, 任合明等^[11]也从数值模拟角度分析了雷电电磁脉冲对架空电力线的耦合问题. 虽然数值模拟可以人为地改变一些模拟环境, 较好地分析各种因素对产生感应

电压的影响, 但是实际生活中某些具体环境是很难模拟的, 所以将实验观测和数值模拟相结合将是一个研究问题的有效方法. 2006 年夏季, 我们在山东滨州地区进行的人工引发雷电实验中, 获得了一次自然雷电 9 次回击过程在水平导体上产生的感应电压资料, 同时还获得了这次雷电的电磁场资料. 本文基于实验中获取的数据, 对这次自然雷电在水平导线上产生的感应电压特征进行了详细分析. 同时, 还利用数值模拟分析了各种参量对感应电压的影响.

2. 实 验

2006 年夏季在滨州地区进行的人工引发雷电实验, 除了测量人工引发雷电的电流及近距离电磁场外, 还进行了自然雷电的多站(5 站)观测. 电流和电磁场测量设备与 2005 年实验类似^[12], 电压的测量采用分压器, 电流的采样率为 $5 \times 10^6/\text{s}$, 磁场及电压的采样率为 $2 \times 10^6/\text{s}$.

图 1 给出了人工引发雷电实验的分布示意图(图中仅给出了与本文所用资料相关的部分). 图 1 中的 S_1 和 S_2 为水平导体的两端, 导体是直径为 2

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 40325013), 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KZCX2-YW-206)和国家自然科学基金(批准号: 40675008)资助的课题.

† E-mail: yangjing@lzb.ac.cn

mm 的铁丝,长度为 30 m.引流杆底部与 S_1 相接, S_2 端接分压器(由于各种原因,实验中仅对 S_2 端的对地感应电压进行了测量).水平导体距离地面的高度约为 1.5 m. M 表示磁场测量系统的位置,可以对人工引发雷电和自然雷电产生的磁场进行测量. L 表示这次自然雷电发生的位置,雷电击地点与测站的距离约为 2.7 km.

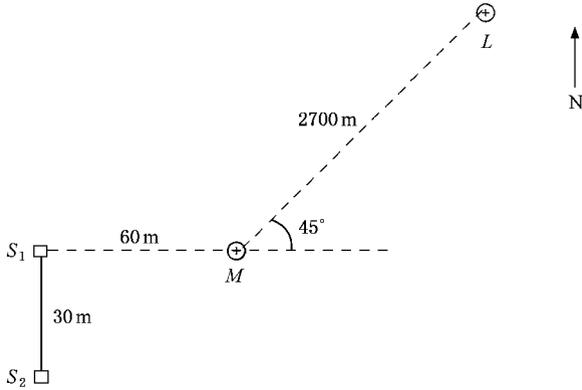


图 1 人工引发雷电实验分布示意图 S_1 和 S_2 表示水平导体的两端, S_1 端接地, S_2 端接分压器; M 为磁场测量系统位置, L 为自然雷电击地位置

3. 资料分析

图 2 给出了自然雷电第三次回击在 2.7 km 处产生的磁感应强度 B 及在水平导体上产生的感应电压 V 的波形.通过对磁场测量系统两路天线所测到的磁感应强度进行分析可知,这次雷电与两个天线所在平面大致均成 45° 角.表 1 中列出了各次回击

在 2.7 km 处产生的磁感应强度幅值 A_B 及在水平导体上产生的感应电压幅值 A_V .表 1 中时间参量的定义方法如图 2 所示.

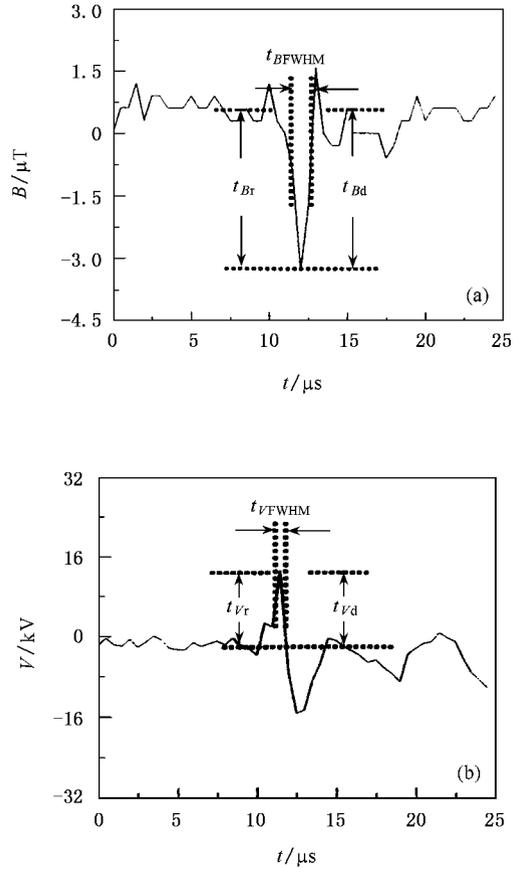


图 2 自然雷电第三次回击在 2.7 km 处产生的磁感应强度 B 及在导体上产生的感应电压 V (a)磁感应强度 (b)导体上的感应电压

表 1 自然雷电产生的磁感应强度幅值 A_B 及在水平导体上产生的感应电压幅值 A_V 以及相关的时间参量

回击次序	$A_B/\mu\text{T}$	$t_{Br}/\mu\text{s}$	$t_{Bd}/\mu\text{s}$	$t_{BFWHM}/\mu\text{s}$	A_V/kV	$t_{Vr}/\mu\text{s}$	$t_{Vd}/\mu\text{s}$	$t_{VFWHM}/\mu\text{s}$
1	5.2	1.2	1.0	1.5	18.6	1.5	2.0	2.0
2	2.1	1.1	1.0	0.8	11.3	1.5	3.0	1.0
3	4.3	1.0	1.5	1.0	16.5	1.5	3.0	1.0
4	2.6	1.0	1.0	1.0	9.5	0.7	3.0	0.6
5	4.3	1.6	1.0	1.2	12.2	1.5	3.3	1.2
6	3.0	1.1	1.2	1.2	11.2	1.0	3.0	0.7
7	2.7	1.0	1.0	0.8	10.5	1.0	3.0	0.7
8	1.5	1.0	1.0	0.7	4.6	0.8	3.0	0.6
9	3.3	0.8	1.0	0.8	11.2	0.6	3.0	0.7
数学平均	3.2	1.06	1.08	1.00	11.8	1.12	2.92	0.94
几何平均	3.0	1.08	1.07	0.97	11.2	1.06	2.90	0.87
标准偏差	1.2	0.22	0.17	0.26	3.9	0.38	0.36	0.45

从表 1 可以看出,自然雷电 9 次回击在导体上产生的感应电压 V 的变化范围为 4.6—18.6 kV. 感应电压的几何平均值为 11.2 kV. 感应电压的半峰值宽度 t_{VFWHM} 和下降时间 t_{Vd} 的平均值分别为 0.87 和 2.9 μs , 与 Michishita 等^[3] 的观测结果一致. 图 3(a) 给出了感应电压幅值 A_V 与磁感应强度幅值 A_B 的拟合曲线, 由此可知, 两者之间近似满足线性关系. 图 3(b) 给出了这次雷电在导体上产生的感应电压幅值 A_V 与磁感应强度波形上升时间 t_{Br} 的拟合曲线. 虽然将雷电在导体上产生的感应电压与回击电流的上升时间做拟合更有直接意义, 但由于自然雷电电流的直接测量通常是把电流测量设备安装在高塔上实现的, 对发生在我们周围的自然雷电的电流进行直接测量几乎是不可能的. 因此, 无法从直接测量结果知道这次自然雷电各次回击的上升时间, 所以, 这里只能对感应电压幅值和磁感应强度波形上升时间之间做拟合. 下面将利用数值模拟分析回击电流上升时间对感应电压的影响.

4. 感应电压的数值模拟

计算雷电在传输线上产生的感应电压, 首先要选择回击模式, 即电流沿雷电通道的时空分布. 对于电流随高度衰减的改进传输线模式, t 时刻通道中高度为 z' 处的电流 $i(z', t)$ 可以表示为

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) \exp(-z'/\lambda),$$

其中 λ 为衰减系数, $i(0, t)$ 为通道底部的电流. 通道底部的电流可以表示为 Heidler 函数和双指数函数之和. Heidler 函数包含以下两项^[13]:

$$i_{H1}(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right),$$

$$i_{H2}(0, t) = \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right),$$

其中,

$$\eta_1 = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}}\right) \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}}\right)^{1/n_1}\right],$$

$$\eta_2 = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}}\right) \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}}\right)^{1/n_2}\right],$$

双指数函数表示为^[13]

$$i_{DE}(0, t) = I_D \{ [1 - \exp(-\alpha t)] - [1 - \exp(-\beta t)] \}.$$

那么, 通道底部总电流为

$$i(0, t) = i_{H1}(0, t) + i_{H2}(0, t) + i_{DE}(0, t).$$

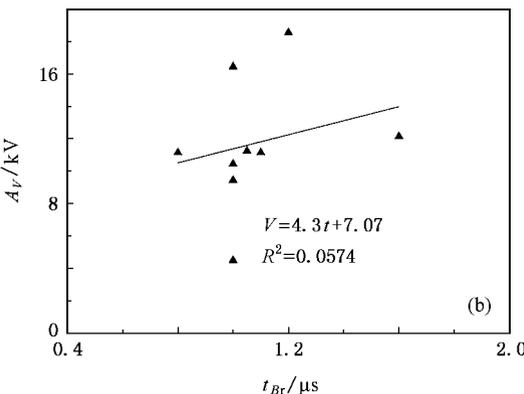
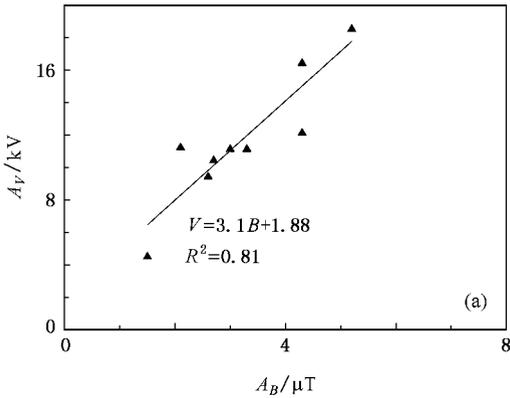


图 3 感应电压幅值 A_V 与磁感应强度幅值 A_B 及磁感应强度波形上升时间 t_{Br} 的拟合关系 (a) 感应电压幅值与磁感应强度幅值的关系 (b) 感应电压幅值与磁感应强度波形上升时间的关系

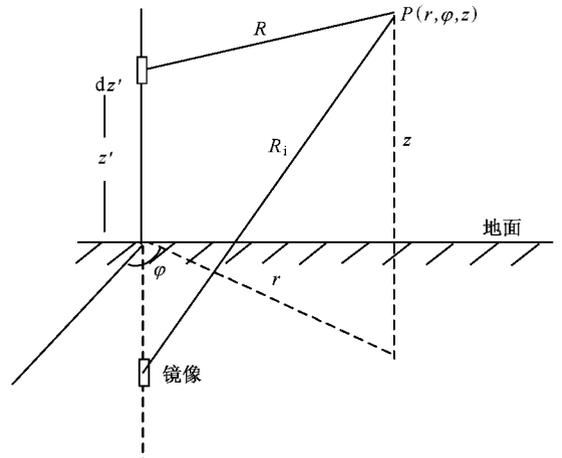


图 4 雷电通道中小电流元在空间 P 点产生的电磁场

回击模式选定以后, 需计算回击在空间某一点产生

的电磁场.假定大地为良导体,则雷电通道中高度为 z' 、长度为 dz' 、电流大小为 $i(z', t)$ 的电流元在空间位置 $P(r, \varphi, z)$ 产生的垂直电场 $dE_z(r, z, t)$ 和水平电场 $dE_r(r, z, t)$ 分别为^[14]

$$\begin{aligned} dE_z(r, z, t) &= \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\chi(z-z')^2 - r^2}{R^5} \right. \\ &\quad \times \exp(-z'/\lambda) \int_0^t i(0, \tau - z'/v - R/c) d\tau \\ &\quad + \frac{\chi(z-z')^2 - r^2}{cR^4} \exp(-z'/\lambda) i(0, t - z'/v - R/c) \\ &\quad \left. - \frac{r^2}{c^2 R^3} \exp(-z'/\lambda) \frac{\partial}{\partial t} i(0, t - z'/v - R/c) \right], \\ dE_r(r, z, t) &= \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \right. \\ &\quad \times \exp(-z'/\lambda) \int_0^t i(0, \tau - z'/v - R/c) d\tau \\ &\quad + \frac{3r(z-z')}{cR^4} \exp(-z'/\lambda) i(0, t - z'/v - R/c) \\ &\quad \left. + \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \exp(-z'/\lambda) \frac{\partial}{\partial t} i(0, t - z'/v - R/c) \right], \end{aligned}$$

其中 ϵ_0 为自由空间的介电常数, $R = \sqrt{r^2 + (z-z')^2}$ 为观测点与电流元之间的距离.

感应电压是雷电所产生的电磁场与导体之间耦合的结果,现有的耦合模型有三种,分别是由 Rusck^[15]、Chowdhuri 等^[16]和 Agrawal 等^[17]提出的.在这三种耦合模型中,只有 Agrawal 等^[17]提出的模型在假定的条件下(传输线近似)是严格的,所以这里采用以 Agrawal 等^[17]的场-传输线耦合方程为基础的 LIOV 模拟程序. LIOV 是意大利的 Bologna 大学、瑞士联邦理工学院和罗马的 La Sapienza 大学联合开发的,它以 Agrawal 等^[17]的场-传输线耦合方程为基础,来计算雷电在水平传输线上产生的感应电压.通过 LIOV 程序不但可以计算雷电电流波形参数(幅值、上升时间、持续时间)和回击速度对产生的感应电压的影响,还可以分析传输线的几何性质(高度、长度等)、雷击地点相对于传输线的位置和导体终端阻抗等对产生感应电压的影响.但是,对于雷电通道垂直于地面的情况, Rusck^[15]提出的耦合方法与 Agrawal 等^[17]提出的耦合方法是等价的.

雷电相对于传输线的位置如图 1 示.由于实际情况下传输线的高度均大于 1.5 m,所以模拟时高度取为 10 m.另外,国外做感应电压的测量实验时,

大多数情况下都使导体两端的电阻匹配^[2].而现实生活中,导体两端电阻完全匹配的情况很少.所以,实验过程中 S_1 端接地,经实际测量其接地电阻大于 2.5 Ω . S_2 端接分压器,这样导体两端的电阻差就比较大,可以较好地反映实际情况.模拟时,导体两端的电阻比值为 10^3 ,以较好地模拟导体两端较大的电阻差.

表 2 列出了模拟过程中 Heidler 函数各参量的取值.表 2 中的 I_{01} 和 I_{02} 为回击电流的幅值, τ_{11} 和 τ_{21} 为电流波形的上升沿, τ_{12} 和 τ_{22} 为电流波形的下降沿, n_1 和 n_2 指数的取值一般在 2—10 之间.

表 2 Heidler 函数各参量的取值

参 量	取 值
I_{01}/kA	30
$\tau_{11}/\mu\text{s}$	0.25
$\tau_{12}/\mu\text{s}$	2.5
n_1	2
I_{02}/kA	29
$\tau_{21}/\mu\text{s}$	2.1
$\tau_{22}/\mu\text{s}$	230
n_2	2

图 5 给出了回击电流峰值对感应电压的影响. Heidler 函数各参量的取值如表 2 所列,回击速度取为 1.2×10^8 m/s.由图 5 可以看出,当电流 I_{01} 从 20 kA 依次变为 30、40、50 kA 时,雷电在导体两端产生的感应电压逐渐增大.这与上述感应电压幅值和磁感应强度幅值之间的关系类似.

图 6 给出了回击电流上升时间对感应电压的影响. Heidler 函数各参量的取值如表 2 所列.由图 6 可以看出,当时间参量 τ_{11} 从 0.25 μs 依次变为 1、2、3 μs 时,雷电在导体两端产生的感应电压均减小,即感应电压随电流上升时间的增大而减小,但并不满足线性关系.

感应电压是雷电产生的电磁场与导体间耦合的结果,而回击产生的电磁场是由通道底部电流和回击速度得到的,回击辐射场的表达式为

$$E_r = \frac{v}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} I_p,$$

其中 c 为光速, v 为回击速度, r 为观测点距雷电通道的水平距离.从表达式可以看出,水平电场与回击速度之间满足线性关系,因此,推测感应电压随回击速度的增大而增大.图 7 给出了回击速度对感应电压的影响. Heidler 函数各参量的取值如表 2 所列.由

图 7 可以看出,当回击速度从 0.5×10^8 m/s 依次变为 1.5×10^8 、 2.0×10^8 、 2.9×10^8 m/s 时,导体两端的感应电压均逐渐增大,即回击速度越大,雷电在导体

两端产生的感应电压也就越大,这一结论与理论预测结果一致.而且,高电阻端的感应电压远大于低电阻端的感应电压,回击速度越大,感应电压波形就越陡.

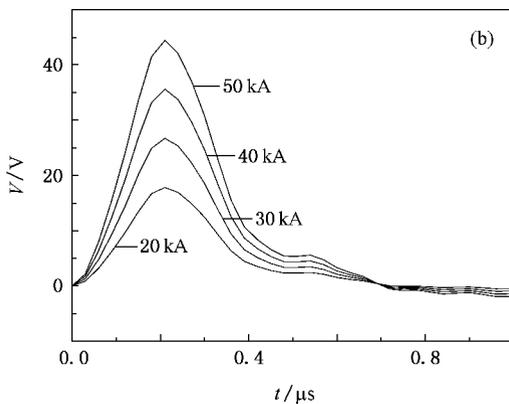
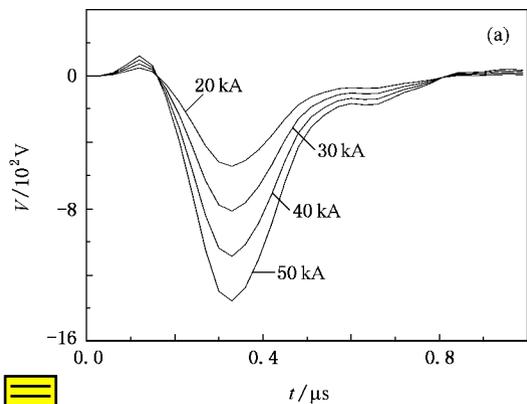


图 5 回击电流峰值对感应电压的影响 (a)导体高电阻端 (b)导体低电阻端

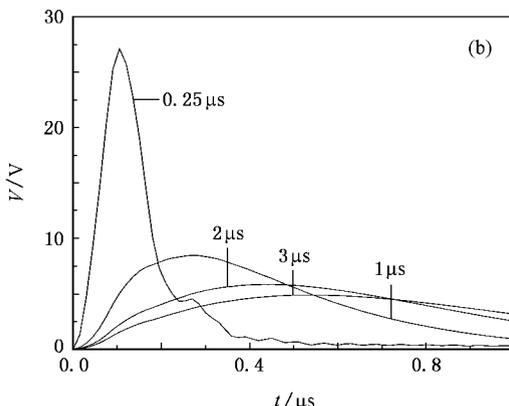
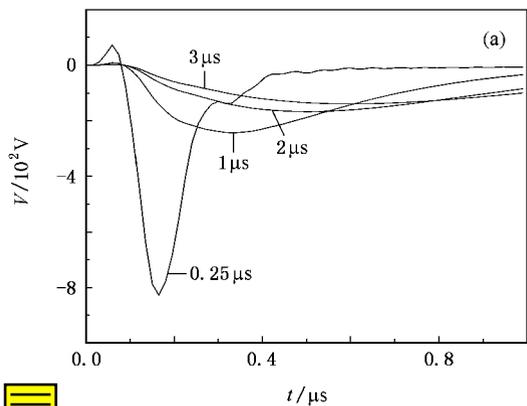


图 6 回击电流上升时间对感应电压的影响 (a)导体高电阻端 (b)导体低电阻端

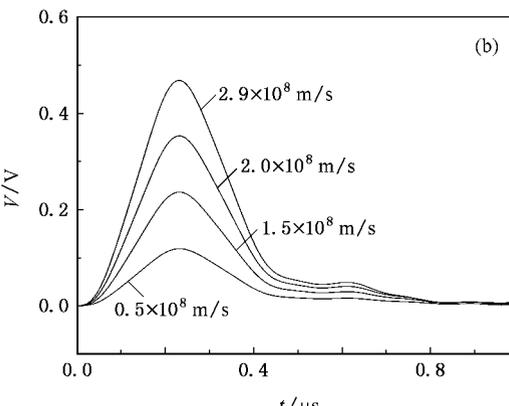
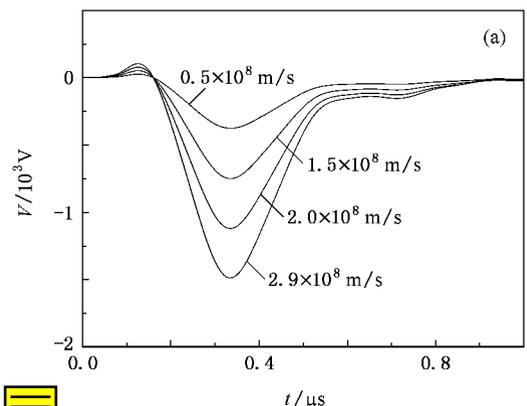


图 7 回击速度对感应电压的影响 (a)导体高电阻端 (b)导体低电阻端

图 8 给出了导体高度 h 对感应电压的影响. 回击速度取 Idone 等^[18]得到的结果 (1.2×10^8 m/s), 其他各参量取值如表 2 所列. 由图 8 可以看出, 导体高度越高, 雷电在导体两端产生的感应电压越大. 比较图 5—图 8 可以发现, 雷电在导体两端产生的感应电压极性正好相反, 这一模拟结果与 Michishita 等^[3]的实测结果一致. 导体两端感应电压的极性之所以相反, 是因为感应电压主要是电场与导体之间相互作用的结果, 而无论电场的方向如何, 总可以分解为沿导体走向(此处称为水平电场)和垂直于导体走向(此处称为垂直电场, 与一般意义上的垂直电场(电场方向垂直于地面)不同)两个分量. 水平电场的作用使导体两端分别积累正负电荷, 而本文测量的感应电压是导体末端相对于大地的电位差, 所以两端感应电压的极性正好相反. 垂直电场的作用使得正负电荷沿导体横截面的径向积聚, 沿导体方向上的正负电荷近似均匀分布, 对感应电压的贡献较小.

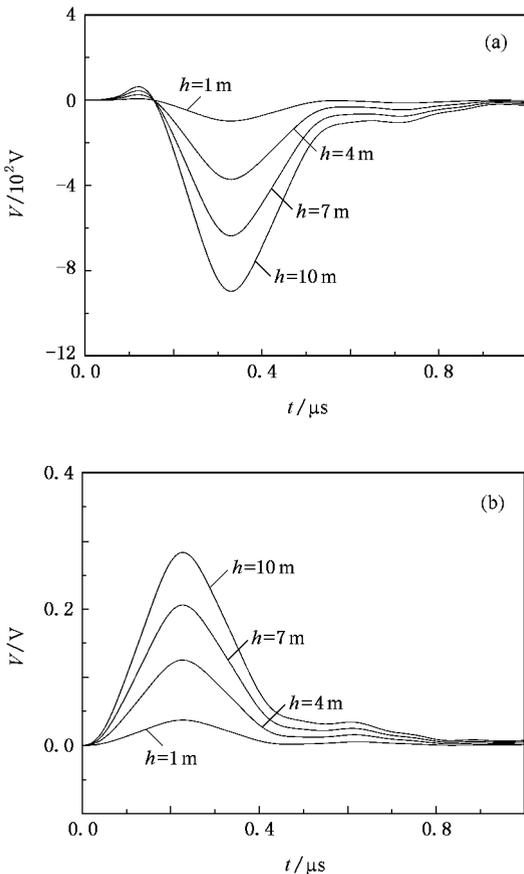


图 8 导体高度对感应电压的影响 (a) 导体高电阻端 (b) 导体低电阻端

图 9 给出了导体两端的接地电阻匹配时接地电阻对感应电压的影响. 回击速度仍然取 Idone 等^[18]

得到的结果 (1.2×10^8 m/s), 导体高度取为 10 m, 其他参量的取值如表 2 所列. 由图 9 可知, 随着导体两端接地电阻的增大, 雷电在导体两端产生的感应电压的陡度和幅值也在迅速增大. 当两端电阻大于 $10^6 \Omega$ 时, 电阻值继续增加, 导体两端感应电压幅值变化不大. 如图 9 所示, 当导体两端的电阻线性增加时, 雷电在导体两端产生的感应电压并不以相同的倍数线性增加, 总的趋势是增加的幅度越来越小. 当导体两端的电阻取值在 10^4 — $10^6 \Omega$ 之间时, 雷电在导体两端产生的感应电压接近; 当导体两端的电阻为 10^2 和 $10^3 \Omega$ 时, 雷电在导体近端 (S_1) 产生的感应电压分别是远端 (S_2) 感应电压的 2.48 倍和 1.68 倍.

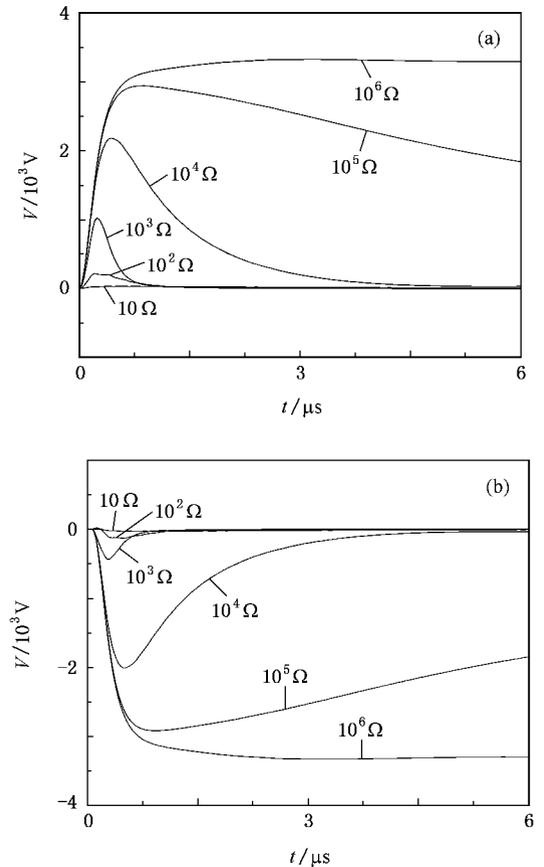


图 9 导体两端的接地电阻对感应电压的影响 (a) S_1 端 (b) S_2 端

5. 讨 论

虽然国外对感应电压已经做了较多的研究, 但由于实验条件和观测设备安全性等各方面因素的限制, 从实验角度对感应电压的研究仍然较少. 因此, 需要加强感应电压的观测实验, 增加感应电压观测

数据的积累.

感应电压主要由水平电场和导体间相互作用产生,而根据 Michishita 等^[3]的测量结果,一次回击在距雷电通道 375 m 处产生的垂直电场约为 4 kV/m,而相同位置处的水平电场仅为 0.02 kV/m,在此位置的导体上产生的感应电压约为 15 kV.如此低的水平电场之所以能够产生那么高的感应电压,这是因为导体长度较长、导体容纳电荷的能力较大,产生的感应电荷较多.如果实际中传输线的长度很短,则可能很少发生感应电压造成传输线中断.正因为实际所用的传输线长度都在千米量级,因此感应电压造成的供电中断才屡有发生.模拟结果也显示(限于篇幅,本文没有给出),导体长度越长,在两端产生的感应电压越大,且感应电压波形有些振荡.这可能是因为模拟过程中导体两端电阻不匹配、导体长度较长(1 km),电磁波在导体两端来回反射造成的.

以上已提到,感应电压主要是水平电场与导体间耦合的结果,但是由于实验中导体 S_1 端接地,而分压器也有地线(S_2 端),这样 S_1 、 S_2 和大地是否会形成一个环路?对于这个问题,我们认为虽然大地是一个等电位体,但由于两个地线的距离较远(约 70 m),且大地是有电阻的(实际测量其电阻率约为 $1.8 \Omega \cdot \text{m}$),而电流在大地中呈辐射状传输,因此形成回路的概率很小.所以,磁场因环路对感应电压的贡献较小.

本文利用数值模拟分析了各种因素对感应电压

的影响.尽管模拟中较多考虑了实际环境,但由于实际情况非常复杂,还有一些因素在本文模拟中未加以考虑,比如土壤的电阻率因土壤状况的不同而不同、潮湿土壤的电阻率小于干燥土壤的电阻率、盐碱地的电阻率小于非盐碱地的电阻率等.而且传输线的构成、传输线的长度都有不同,这些问题在以后的数值模拟中也应该给予考虑.

6. 结 论

对自然雷电 9 次回击在导体上产生的感应电压特征进行了分析.结果表明,回击在水平导体上产生的感应电压的变化范围为 4.6—18.6 kV,平均值为 11.2 kV,感应电压的半峰值宽度和下降时间的平均值分别为 0.87 和 2.9 μs .

模拟结果表明,在保持其他条件不变的情况下,感应电压随回击速度的增加而增大,随导体高度的增加而增大.而且,在导体两端接地电阻匹配的情况下,当电阻增加时,雷电在导体两端产生的感应电压也随着增大,但并不满足线性关系.模拟结果还显示,在导体两端电阻不匹配的情况下,雷电在高电阻端产生的感应电压远大于在低电阻端产生的感应电压,而且由于雷电产生的感应电压随导体两端电阻的增加呈非线性增加趋势.所以,良好的接地可以有效地减小雷电在导体上产生的感应电压,从而可对传输线进行较好的防护.

- [1] Nucci C A, Rachidi F 1993 *IEEE Trans. EMC* **35** 75
- [2] Paolone M, Petrache E, Rachidi F 2005 *IEEE Trans. EMC* **47** 509
- [3] Michishita K, Ishii M, Asakawa A 2003 *IEEE Trans. EMC* **45** 135
- [4] Gou X Q, Zhang Y J, Dong W S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 957 (in Chinese)[苟学强、张义军、董万胜 2006 物理学报 **55** 957]
- [5] Yuan X Q, Li H, Zhao T Z, Wang F, Yu G Y, Guo W K, Xu P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3806 (in Chinese)[袁行球、李辉、赵太泽、王飞、俞国扬、郭文康、须平 2004 物理学报 **53** 3806]
- [6] Guam Z Q, Yutaka A, Jiang D H, Lin H, Yoshitake Y, Wu C X 2004 *Chin. Phys.* **13** 105
- [7] Yao Z H, Yoder G L, Culbertson C T, Ramsey J M 2002 *Chin. Phys.* **11** 226
- [8] Wu M L, Xu J Y, Ma R P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5007 (in Chinese)[吴明亮、徐寄遥、马瑞平 2006 物理学报 **55** 5007]
- [9] Baba Y, Rakov V A 2006 *IEEE Trans. EMC* **48** 212
- [10] Wen X S, Peng X Y, Xie G R 1998 *Proc. CSEE* **18** 299 (in Chinese)
- [文习山、彭向阳、解广润 1998 中国电机工程学报 **18** 299]
- [11] Ren H M, Zhou B H, Yu T B, Wang Z 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1539 (in Chinese)[任合明、周璧华、余同彬、王钊 2005 强激光与粒子束 **17** 1539]
- [12] Qie X S, Zhang Q L, Feng G L, Zhou Y J, Wu S J, Kong X Z, Zhang T L, Yang J, Xiao Q F 2007 *Sci. China D* **37** 564 (in Chinese)[鄒秀书、张其林、冯桂力、周筠、吴书君、孔祥贞、张廷龙、杨静、肖庆复 2007 中国科学 D **37** 564]
- [13] Heidler F, Cvetic J M, Stanic B V 1999 *IEEE Trans. Pow. Del.* **14** 399
- [14] Uman M A 1985 *J. Geophys. Res.* **90** 6121
- [15] Rusek S 1977 *Lightning* (Vol. 2) (New York: Academic Press) p747
- [16] Chowdhuri P, Gross E T B 1967 *Proc. IEE* **114** 1899
- [17] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H 1980 *IEEE Trans. EMC* **22** 119
- [18] Idone V P, Orville R E 1982 *J. Geophys. Res.* **87** 4903

Observation of the lightning-induced voltage in the horizontal conductor and its simulation *

Yang Jing^{1)†} Qie Xiu-Shu²⁾ Wang Jian-Guo³⁾ Zhao Yang¹⁾ Zhang Qi-Lin¹⁾
Yuan Tie¹⁾ Zhou Yun-Jun¹⁾ Feng Gui-Li¹⁾

1) (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

2) (Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

3) (School of Electrical Engineering , Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

(Received 29 November 2006 ; revised manuscript received 10 August 2007)

Abstract

Characteristics of induced voltage in a horizontal conductor due to a natural lightning with 9 dart leader/return stroke sequence were analyzed. Effect of various parameters on the induced voltage was examined by numerical simulation. The induced voltage varied from a minimum of 4.6 kV to a maximum of 18.6 kV with a geometric mean of 11.2 kV. The geometric mean of the half-peak width and the down time of the induced voltage was 0.87 and 2.9 μs , respectively. The simulated results showed that the induced voltage on both ends of the horizontal conductor would increase with increasing return stroke velocity and also increase with increasing height of the horizontal conductor. The voltage would also increase with increasing of the matched grounding impedances on both ends of the horizontal conductor but the relationship was nonlinear. The induced voltage at the higher impedance end was much larger than that at the lower impedance one provided that the impedances at both ends were not matched, which indicates that good grounding can decrease effectively the induced voltage along the conductor.

Keywords : induced voltage , natural lightning , numerical simulation

PACC : 9260P , 9260N

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 40325013), the Main Direction Program of the Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX2-YW-206), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40675008).

† E-mail : yangjing@lzb.ac.cn