

架空任意弯曲电缆终端感应电流的计算

蒋小勇 谢拥军

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文给出了架设在地面上的任意弯曲电缆在任意极化平面波照射下, 其终端感应电流的通用表达式。该表达式考虑到了大地和电缆弯曲形式对电缆终端感应电流的重要影响。该方法对于电子系统的防护以及电磁兼容分析具有一定指导意义。

关键词: 架空电缆, 任意弯曲电缆, 感应电流

中图分类号: 0441.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)09-1510-03

The Calculation of Terminal Currents on an Arbitrarily Bended Cable

Jiang Xiao-yong Xie Yong-jun

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract In this paper, a unified formulation to determine the terminal currents of an arbitrarily bended cable excited by a plane wave at any polarization angle is presented. Both the influence of the earth and the curve of cable on the terminal currents are considered in this paper. The method given in this paper is of great significance to the reinforcement of the electronic systems and EMC research.

Key words Aerial cable, Arbitrarily bended cable, Induced current

1 引言

在许多复杂的通信、电子、电力系统中, 电磁场对电源线和信号线的耦合经常造成系统性能的降低甚至整个系统的失效。因而研究电磁场对各类传输线的耦合和干扰, 对于电力、电子系统防护以及电磁兼容分析有重要应用价值, 受到众多学者的高度重视。

Vance 和 Taylor 分别研究并给出了架设在地面上水平电缆终端感应电流的计算方法^[1,2]。同时, 双绞线作为一种常用的数据传输线, 也得到了充分的研究。60 年代, Alksne 将双绞线近似为双螺旋线结构^[3]。Taylor 采用 Alksne 提出的双螺旋线结构给出了电磁场作用下, 双绞线终端感应电流的通用表达式^[4]。但 Vance 仅仅给出了架设在地面上平直电缆终端电流的计算公式, 没有给出弯曲电缆终端电流的计算方法。Taylor 为了分析问题的方便, 没有考虑到地面对电磁波的反射作用和对电缆终端电流的影响。而在实际应用当中, 大地的影响和电缆的弯曲形式都是必须考虑的因素。

本文在以上研究的基础上, 考虑了更为全面和一般的情形。首先, 给出了任意弯曲电缆终端感应电流的数值计算方法。其次考虑了大地影响, 给出了架空弯曲电缆在其每一点

处切向方向的电场表达式。最后进一步得到了架空任意弯曲电缆终端感应电流的通用表达式。同时以一些常用弯曲电缆为例, 数值分析了大地和电缆弯曲形式对电缆终端电流的影响情况。

2 架设在地面上弯曲电缆终端电流的通用表达式

图 1 表示架设在地面上长为 L 的任意弯曲电缆, 它可以表示为 $r(x(l), y(l), z(l))$, ($l \in [0, L]$)。电缆两端分别接负载 Z_1, Z_2 。平面波以 (ψ, φ) 角入射到电缆上, (ψ, φ) 角的定义和平面波的入射方向在图 2 中给出了详细的说明。图 2 中 p 表示入射波的传播方向, $E_{i_{\text{vav}}}$ 表示入射波垂直极化时的电场矢量, $E_{i_{\text{hah}}}$ 表示入射波水平极化时的电场矢量。参考 Taylor 在文献[2, 4]中的分析方法, 架空电缆与大地组成了一个传输线结构, 在任意极化平面波入射时, 架设在地面上弯曲电缆两端 $l=0$ 和 $l=L$ 处的感应电流为

$$I_0 = \frac{1}{D} \int_0^L E(l) [Z_0 \cosh \gamma(l-L) - Z_2 \sinh \gamma(l-L)] dl - \left[\frac{Z_0}{D} \int_0^h E_t(L) dx - \frac{Z_0 \cosh \gamma L + Z_2 \sinh \gamma L}{D} \int_0^h E_t(0) dx \right] \quad (1)$$

和

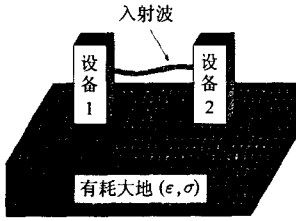


图1 架空电缆示意图

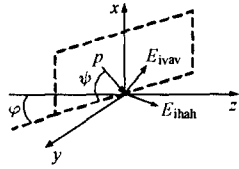


图2 入射波方向坐标系

$$I_L = \frac{1}{D} \int_0^L E(l) [Z_0 \cosh \gamma l + Z_1 \sinh \gamma l] dl + \left[\frac{Z_0}{D} \int_0^h E_t(0) dx - \frac{Z_0 \cosh \gamma L + Z_1 \sinh \gamma L}{D} \int_0^h E_t(L) dx \right] \quad (2)$$

其中 $D = Z_0(Z_1 + Z_2) \cosh \gamma L + (Z_0^2 + Z_1 Z_2) \sinh \gamma L$
 $k = \omega \sqrt{\mu_0 \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)}$, $\gamma \approx jk$, $Z_0 \approx 60 \ln \left(\frac{2h}{a} \right)$
 Z_0 表示传输线系统的特性阻抗, γ 表示传输线系统的传播系数, h 是弯曲电缆在终端处的架设高度。可以看到, 电缆终端电流由电缆在每一点处的切向电场 $E(l)$ 和电缆终端处沿负载方向的电场 $E_t(0)$, $E_t(L)$ 激励产生。对于不同弯曲形式的电缆, 源作用项 $E(l)$, $E_t(0)$, $E_t(L)$ 的表达式会有所不同。考虑到地面的影响, 作用到电缆上的电磁场由入射场和地面反射场两部分组成。本文给出在距地面高为 h 处, 入射场 $E^{inc}(l)$ 和大地反射场 $E^{ref}(l)$ 的表达式。对于具体电缆, $E(l)$, $E_t(0)$, $E_t(L)$ 可以按式(5), (6), (7)计算。

对于垂直极化波

$$E_v^{inc} = E_0 (\cos \psi \hat{x} - \sin \psi \sin \phi \hat{y} + \sin \psi \cos \phi \hat{z}) \cdot \exp(jkx \sin \psi + jky \cos \psi \sin \phi - jkz \cos \psi \cos \phi)$$

$$E_v^{ref} = R_v E_0 (\cos \psi \hat{x} + \sin \psi \sin \phi \hat{y} - \sin \psi \cos \phi \hat{z}) \cdot \exp(-j2kx \sin \psi - j2kh \cot \psi \cos \psi \sin^2 \phi - j2kh \cot \psi \cos \psi \cos^2 \phi) \cdot \exp(-jkx \sin \psi + jky \cos \psi \sin \phi - jkz \cos \psi \cos \phi) \quad (3)$$

对于水平极化波

$$E_h^{inc} = E_0 (\cos \phi \hat{y} + \sin \phi \hat{z}) \cdot \exp(jkx \sin \psi + jky \cos \psi \sin \phi - jkz \cos \psi \cos \phi)$$

$$E_h^{ref} = R_h E_0 (\cos \phi \hat{y} + \sin \phi \hat{z}) \cdot \exp(-j2kx \sin \psi - j2kh \cot \psi \cos \psi \sin^2 \phi - j2kh \cot \psi \cos \psi \cos^2 \phi) \cdot \exp(-jkx \sin \psi + jky \cos \psi \sin \phi - jkz \cos \psi \cos \phi) \quad (4)$$

R_v 表示垂直极化波在空气-大地界面反射系数, R_h 表示水平极化波在空气-大地界面反射系数。

$$E(l) = [E^{inc}(l) + E^{ref}(l)] \cdot \hat{l}(l) \quad (5)$$

$$E_t(0) = [E^{inc}(l) + E^{ref}(l)] \cdot \hat{i}_0 |_{l=0} \quad (6)$$

$$E_t(L) = [E^{inc}(l) + E^{ref}(l)] \cdot \hat{i}_L |_{l=L} \quad (7)$$

$\hat{l}(l)$ 是电缆在每一点处的切向单位矢量。 \hat{i}_0 , \hat{i}_L 表示在电缆终端处沿负载方向的切向单位矢量。 $E(l)$ 就表示在电缆每一

点处的切向电场, 即总场沿电缆切向方向的投影。

3 数值结果和讨论

考虑如图 3 所示的一段任意单根弯曲电缆架设在地面上, 我们并不知道电缆所满足的曲线方程, 但通过测量, 这段曲线总可以用一系列点来表示为 $(X(n), Z(n))$ 。按照本文叙述的方法, 可以用数值方法计算电缆的终端感应电流。假设电缆半径 $a = 12.5 \text{ mm}$, 两端接匹配负载, 垂直极化平面波入射且电场幅度为 1 V/m 。图 4 给出了电缆终端电流随入射角 ψ 的变化曲线 ($h = 1 \text{ m}$, $\phi = 10^\circ$, $f = 10 \text{ MHz}$)。

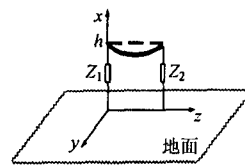


图3 架设在地面上一段弯曲电缆示意图

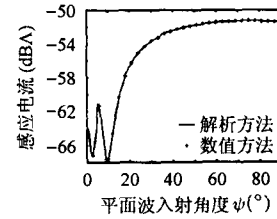


图4 单根架空电缆终端电流随入射角 ψ 的变化曲线

当然, 当已知电缆曲线方程时, 也可以更方便地用解析方法求得电缆终端的电流。假设本例中的电缆满足曲线方程 $r = [(h + (\sqrt{3}/2)R - R \sin[(l + 5/3\pi)/R], 0, (R/2) - R \cos[(l + 5/3\pi)/R]]$, $R = 5 \text{ m}$ 。用解析方法求得的终端电流同样在图 4 中给出。可以看到, 两种方法得到的结果是一致的。在实际工程应用当中, 可以根据不同曲线弯曲形式选择适当的计算方法。

作为第二个算例, 假设一垂直极化平面波以 (ψ, ϕ) 角入射到长为 L 的双绞线上。由于双绞线曲线方程可以由 $r = (h \pm R_0 \cos \alpha l, \pm R_0 \sin \alpha l, \alpha pl / (2\pi))$ 给出。我们可以直接求出双绞线终端感应电流的解析表达式。将双绞线曲线方程 $r = (h \pm R_0 \cos \alpha l, \pm R_0 \sin \alpha l, \alpha pl / (2\pi))$ 代入式(5), (6), (7), 并考虑到螺距 p 和波长 λ 远大于线间距, 可以得到

$$E_v^{inc} \cdot \hat{l}_1(l) - E_v^{inc} \cdot \hat{l}_2(l) \equiv jk \frac{\alpha p}{\pi} E_0 R_0 \sin \psi \cos \phi \cdot (\sin \psi \cos \alpha l + \cos \psi \sin \phi \sin \alpha l) \cdot \exp(-jk \cos \psi \cos \phi \cdot \frac{\alpha pl}{2\pi} + jkh) \quad (8)$$

$$E_v^{ref} \cdot \hat{l}_1(l) - E_v^{ref} \cdot \hat{l}_2(l) \equiv jk \frac{\alpha p}{\pi} R_v E_0 R_0 \sin \psi \cos \phi \cdot (\sin \psi \cos \alpha l - \cos \psi \sin \phi \sin \alpha l) \cdot \exp(-jk \cos \psi \cos \phi \cdot \frac{\alpha pl}{2\pi} + jkh - j2kh \sin \psi - j2kh \cot \psi \cos \psi \sin^2 \phi - j2kh \cot \psi \cos \psi \cos^2 \phi)$$

$$E_t(0) = E_0 \cos \psi \cdot (\exp(jkx \sin \psi) + R_v \exp(-j2kx \sin \psi - j2kh \cot \psi \cos \psi \sin^2 \phi - j2kh \cot \psi \cos \psi \cos^2 \phi - jkx \sin \psi)) \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 E_i(L) = & E_0 \cos\psi \cdot (\exp(jkx \sin\psi) \\
 & + R_0 \exp(-j2kh \sin\psi - j2kh \cot\psi \cos\psi \sin^2\varphi \\
 & - j2kh \cot\psi \cos\psi \cos^2\varphi - jkx \sin\psi \\
 & - jkz_L \cos\psi \cos\varphi)) \quad (10)
 \end{aligned}$$

双绞线结构如图 5，取螺距 $p=1/12\text{m}$ ，螺旋线半径 $R_0=0.61\text{mm}$ ， $L=1.2\text{m}$ ， $\epsilon_r=5$ ， $\sigma=0.01$ ；双绞线两端接匹配负载，垂直极化平面波入射且电场幅度为 1V/m 。为了研究大地对电缆终端电流的影响，我们首先给出了在不考虑大地影响时双绞线和平行传输线终端电流随入射角度 ψ 的变化曲线($h=0.01\text{m}$ ， $\varphi=10^\circ$ ， $f=10\text{MHz}$) 如图 6 所示。终端感应电流随着 ψ 的增大而减小，在 $\psi=90^\circ$ 时达到最小值，这与文献 [5] 所得到的结论一致。同时可以看到，双绞线比平行传输线有更强的抗干扰能力。从图 7 可以看到，当考虑大地影响时，双绞线终端电流不再随入射角 ψ 增大而单调减小。最后图 8 给出了电缆终端电流随架设高度 h 的变化曲线($\varphi=10^\circ$ ， $f=1\text{MHz}$)，可以看出随着架设高度 h 的增大，终端感应电流

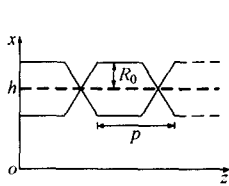


图 5 架设在地面上的双绞线结构示意图

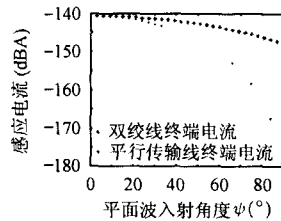


图 6 忽略大地影响时终端电流随入射角 ψ 的变化曲线

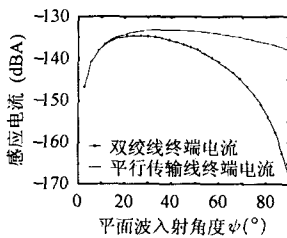


图 7 考虑大地影响时终端电流随入射角 ψ 变化曲线

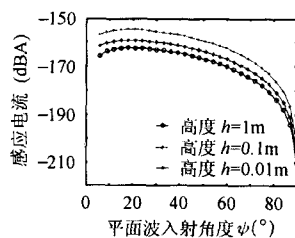


图 8 双绞线终端电流随高度 h 变化曲线

逐渐减小。从以上结果可以明显看出，大地对电缆终端感应电流的作用是显著的，在分析中应充分考虑其影响。

4 结束语

本文研究并给出了架设在地面上任意弯曲电缆在任意极化平面波照射下，其终端感应电流的通用表达式。该表达式更为全面地考虑到了大地和电缆弯曲形式对电缆终端感应电流的影响。数值分析了一段弯曲架空电缆和一类常用双绞线终端电流随各种因素的变化情况。可以得出，在实际应用中，大地的影响和电缆的弯曲形式都是必须考虑的因素。本文方法对于电子系统防护以及电磁兼容分析具有一定实际意义。

参考文献

- [1] Vance E F 著，高攸刚译. 电磁场对屏蔽电缆的影响. 北京：人民邮电出版社，1988 年 4 月，第一章至第三章.
- [2] Taylor C D, Satterwhite R S, Harrison Jr. C W. The response of a terminated two-wire transmission excited by a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Trans. on Antennas & Propagat.*, 1965, AP-13 (8): 987 - 989.
- [3] Alksne A Y, Magnetic fields near twisted wires. *IEEE Trans. on Space Electron. Telem.*, 1964, SET-10: 154 - 158.
- [4] Taylor C D, Castillo J P. On the response of a terminated twisted-wire cable excited by a plane-wave electromagnetic field. *IEEE Trans on EMC*, 1980, EMC-22(1): 16 - 19.
- [5] 马金平, 毛乃宏等. 场对双绞线的电磁耦合研究. *电波科学学报*, 1998, 13(1): 93 - 96.

蒋小勇：男，1980 年生，硕士生，从事电磁场理论的研究和应用工作。

谢拥军：男，1968 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为计算微波与计算电磁学、微波通信、电磁兼容及电波传播特性等。