

有限元法在通信对绞电缆计算中的应用

肖 彪

(成都普天电缆股份有限公司线缆技术部,四川 成都 610042)

摘要:在通信电缆的结构设计中,一次传输参数(有效电阻、电感、电容、绝缘电导)的准确计算至关重要。对称电缆的电磁场通常情况下分布既不对称也不规则,因而无法找到准确的解析式。笔者利用有限元法对孤立线对、四对非屏蔽超五类电缆进行了一次传输参数数值计算,然后通过一次传输参数计算出二次传输参数,最后将部分计算结果与实际测试结果进行了对比,二者结果比较吻合。实践证明,利用有限元法计算对绞电缆的一次传输参数是可行的。

关键词:有限元法;通信电缆;一次传输参数;二次传输参数;计算中应用

中图分类号:TM248.2

文献标识码:A

文章编号:1672-6901(2007)05-0010-06

The Application of FEM in the Calculation of Paired Communication Cables

XIAO Biao

(Chengdu-Putian Cables Co., Ltd, Department of Wire and Cable Technology, Chengdu 610042, China)

Abstract: The accuracy in calculating primary transmission parameters (effective resistance, inductance, capacitance and insulation conductance) is very important for the design of cable construction. For symmetrical cables, it is hard to find an accurate analytical formula because the EM field distribution is neither symmetrical nor regular. Therefore the author calculated the primary transmission parameters of single pair and 4-pair unshielded category 5 + cables using FEM and calculated the secondary transmission parameters from the primary transmission parameters. The comparison between some of the results and measurements indicated good coherence. It has been demonstrated by practice that it is feasible to calculate the primary transmission parameters of paired cables using FEM.

Key words: FEM; communication cable; primary transmission parameters; secondary transmission parameters; application in calculation

0 引言

电缆行业要走出当前的困境,就必须开发和生产技术含量高、做工精细、具有特殊性能、结构新颖的电缆产品。然而,要在尽可能短的时间内开发出新型的铜缆并非易事,其中快速准确计算结构尺寸就是最大的难题之一。

由于通信电缆的主要结构尺寸与一次传输参数紧密相关,因此电缆结构计算的核心也就是如何快速准确计算电缆的一次传输参数及结构尺寸存在偏差(如绝缘偏心、导体或绝缘不圆等)对电缆一、二次传输参数的影响程度。

由于同轴电缆中电磁场分布比较规则,可以推导出理想条件下的一、二次传输参数计算表达式^[1]。至于对称电缆,通常情况下,其电场既不均匀也不对

称且为开放性场,受线对周围状况的影响也较大,无法推导出准确的计算一、二次参数的解析式。

随着计算机应用技术的发展,人们逐渐利用数值计算来解决上述难题。由于有限元法适用于复杂边界、多层媒质下的电磁场计算,且此方法通用性强,计算精度高,尤其适合于对称电缆一、二次传输参数的计算。近些年来,有限元法得到越来越多电缆工程师的重视。

本文介绍了利用有限元法计算孤立线对、四对非屏蔽超五类电缆(以下简称四对电缆)的计算实例,最后将部分计算结果与实际测试结果进行了对比,二者结果比较吻合。

1 有限元法概述

有限元法是一种以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法。该方法首先将所求解的物理问题通过数学描述,表达为相应的变分问题(即平时所说的泛函的极值问题),然后,在单元内利用简单的插值函数将变分问题化为普通的多元函数的极值问题,从而获得原物理问题的数值解。归根到底,

收稿日期:2006-12-20

作者简介:肖 彪(1971-),男,四川邻水人,高级工程师。

作者地址:四川成都市高新技术开发区紫荆西路2号
[610042].

有限元法是求解常微分和偏微分方程的一种数值计算方法。理论上讲,凡能够归纳为求解微分方程的工程问题都可以用有限元法来解决。该方法的思想是 Courant 于 1943 年提出的,经过几十年的发展,其成功地用于解决热传导、流体力学、机械零件的强度分析。1965 年, Winslow 首先将有限元法应用于电气工程,现已经成为电磁场数值计算的主导方法。

2 利用有限元法求解电缆一次传输参数的步骤

利用有限元法求解电磁场的应用步骤是:

- (1) 根据电磁场基本知识及待求问题,给出与待求问题相应的泛函及其等价变分问题;
- (2) 利用有限元法剖分场域,选取相应的插值函数;
- (3) 把变分问题离散化为一个多元函数的极值问题,导出一组联立的代数方程(有限元方程);
- (4) 求解方程,即求得待求边值问题的近似解;
- (5) 求解出场域内的场量后,根据相应的物理量关系求出其他与场量相关的物理量,如导体的有效电阻、波阻抗等。

2.1 电磁场的数学模型

2.1.1 麦克斯韦方程组

众所周知,电磁场的宏观描述可用麦克斯韦方程组。微分形式的麦克斯韦方程组为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot J &= -\frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

方程组(1)中涉及到 4 个场量: E 为电场强度(V/m)、 D 为电通量密度(C/m)、 H 为磁场强度(T)、 B 为磁感应强度(T); 2 个场源量: J 为电流密度(A/m²)、 ρ 为电荷密度(C/m³)。

当分析正弦激励源下的电磁现象时,根据方程组(1)可导出相量形式的麦克斯韦方程组:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \dot{E} &= -j\omega \dot{B} \\ \nabla \times \dot{H} &= \dot{J} + j\omega \dot{D} \\ \nabla \cdot \dot{D} &= \dot{\rho} \\ \nabla \cdot \dot{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

场量 E 、 D 、 B 、 H 之间的关系,由媒质的特性决定。对于线性介质而言其关系为:

$$\left. \begin{aligned} D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ J &= \gamma E \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ϵ 为介质的介电常数(F/m); μ 为介质的磁导率(H/m); γ 为介质的电导率(S/m)。

2.1.2 媒质分界面上的边界条件

不同媒质分界面上的边界条件可分为以下四种:

- (1) 分界面上 E 的切向分量是连续的,即 $E_{1t} = E_{2t}$;
- (2) 分界面上 D 的法向分量一般是不连续的,其不连续值相当于在分界面上可能存在面电荷密度 σ ,即 $D_{2n} - D_{1n} = \sigma$,当媒质均为不良导体时 $\sigma = 0$;
- (3) 分界面上 B 的法向分量总是连续的,即 $B_{1n} = B_{2n}$;
- (4) 分界面上 H 的切向分量一般是不连续的,其不连续值相当于在界面上可能流过的面电荷自由电流密度 k ,即 $H_{1t} - H_{2t} = k$ 。式中, k 为电流线密度(A/m),它的方向为沿界面切向且 H_{1t} 和 H_{2t} 正交,并规定按 H_{1t} 绕行的右螺旋法则定义其正向。当界面媒质均为不良导体时 $k = 0$ 。

2.1.3 变分问题的确定

根据电磁场的物理问题,转化为相应的变分问题。如二维静电场中,根据汤姆逊定理,处于介质中的一个固定的带电导体系统,其有面上的电荷分布应使合成的静电场具有最小的能量 W_e ,即:

$$W_e = \iint_v \left(\frac{1}{2} \epsilon E^2 \right) ds = \iint_v \frac{1}{2} \epsilon \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

边界条件: $\phi(x, y) = \varphi_i$

2.2 单元的剖分及插值函数的选取

对于平面域 D 进行剖分时,可采用多种几何剖分。最常用的是三角元剖分,剖分时要求三角形互不重叠,任一三角形的顶点必须同时也是其相邻三角形的顶点,而不能是相邻三角形边上的内点。遇到不同媒质分界面时不允许有跨越分界线的三角形。电磁场比较强的区域应剖分密些。典型的实例如图 1 所示。

三维场域的剖分往往按场域的几何特征划分为 n 个子区域,然后在每个子区域进一步划分成 M 层,在每一层内可参照二维场域剖分原则进行处理。在每个剖分单元内,通常选用线性变化的函数进行插值。

2.3 变分问题的离散化与有限元方程

将变分问题转化成为用所有剖分单元相关量表

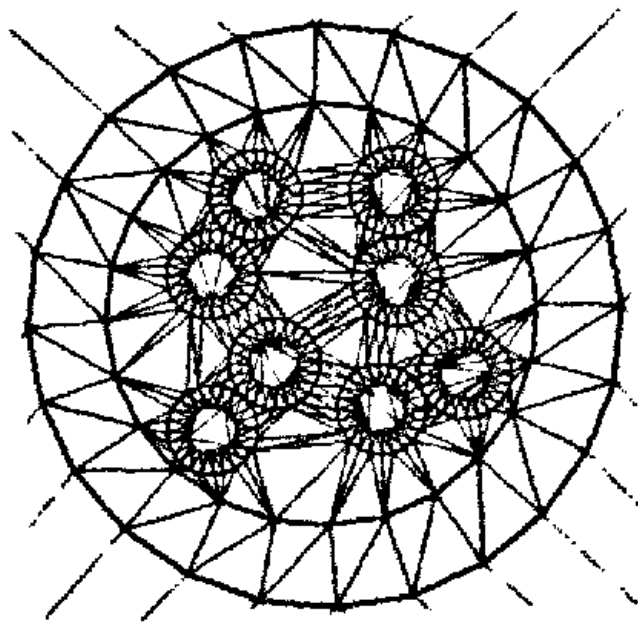


图1 三角元剖分实例(局部图)

示的离散化方程,并将已知的边界条件代入相应的方程之中。

2.4 求解有限元方程

通常情况下,其方程的系数构成的矩阵为稀疏矩阵。求解方程可采用成熟的代数解法:如直接法、超松弛迭代法等。若计算的精度不够时,再将有限单元进一步细分,并重复第2.3节和第2.4节步骤,直到相邻两次计算的场域内能量计算的相对误差小于给定的要求为止。

2.5 求电缆的一、二次传输参数

电缆的一次参数有:导体的有效电阻 R 、电感 L 、电容 C 和绝缘电导 G 。根据各参数与场量的关系,可按下述方法分别计算。

2.5.1 R 、 L 的计算

设导体的复电导率 $\gamma_c^* = \gamma_c + j\omega\epsilon$,则复电流密度 J^* 为:

$$J^* = \gamma_c^* E = (-\nabla \phi - j\omega A)(\gamma_c + j\omega\epsilon)$$

$$B = \nabla \times A$$

式中, γ_c 为导体的电导率, A 为矢量磁位。

导体截面 S 流过的电流 I 为:

$$I = \int_S J^* dS = \int_S (-\nabla \phi - j\omega A)(\gamma_c + j\omega\epsilon) dS \quad (4)$$

式中, ϕ 为标量电位; ω 为正弦激励源的角频率; S 为电流流过的截面积。

根据电流回路中的欧姆(或电阻)损耗 P 为:

$$P = \frac{1}{2\gamma_c} \int_V J \cdot J^* dV = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

式中, I_m 为电流的幅值,于是有: $R = \frac{2P}{I_m^2}$

电流环的平均能量 W_d 为:

$$W_d = \frac{1}{4} \int_V B \cdot H^* dV = \frac{1}{2} L I_{RMS}^2 = \frac{1}{4} L I_m^2$$

于是有: $L = \frac{4W_d}{I_m^2}$

式中, H^* 为复磁场强度; I_{RMS} 为电流的有效值。

2.5.2 C 、 G 的计算

带电系统中的静电储能 W_e 为:

$$W_e = \int_V E \cdot D dV = \frac{1}{2} C U^2$$

式中, U 为介质两端的电压,于是有:

$$C = \frac{2W_e}{U^2}$$

$$G = \frac{1}{R_{\text{绝}}} + \omega C \text{tg} \delta$$

式中, $R_{\text{绝}}$ 为绝缘电阻; $\text{tg} \delta$ 为绝缘介质的等效损耗角正切。通常情况下,电缆的绝缘电阻比较大,因此:

$$G \approx \omega C \text{tg} \delta$$

2.5.3 二次参数计算

电缆的二次参数,即波阻抗 Z ,传播常数 γ ,传输速度 V 可分别由以下各式计算:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

$$V = \frac{\omega}{\beta}$$

式中, α , β 分别为单位长度的电缆衰减和相移常数。

3 计算实例

为了便于比较孤立线对与四对电缆各参数的变化情况,本次计算时均取铜导体直径为 0.511 mm、高密度聚乙烯(HDPE)绝缘外径为 0.921 mm、线对节距为 9.09 mm(绞入系数约为 1.05)。加了色母料后的 HDPE 其相对介电常数取 2.37,损耗角正切值在 1 MHz ~ 100 MHz 内变化范围为 $3.0 \times 10^{-4} \sim 3.5 \times 10^{-3}$ 。

为了简化计算,计算时先将线对当成平行线处理,然后再将计算结果(R 、 L 、 G 、 C)分别乘以绞入系数。

3.1 孤立线对的计算

设此线对处于无限大的均匀空气介质中。由于线对周围没有其他线对及金属媒质的影响,因此,导体的有效电阻只包含回路的直流电阻、集肤效应引起的附加电阻及邻近效应引起的附加电阻。一次参数的计算结果见表 1。波阻抗、衰减和传播速度见表 2。其静电位等势线如图 2 所示,1 MHz 下正弦电流密度(幅值)分布如图 3 所示。从图 3 可以看到,由于邻近效应,两导体相邻一侧电流密度大些;由于集肤效应,在导体中部没有电流分布。

表1 孤立线对一次参数计算结果

频率/MHz	$R/(\Omega/m)$	$L/(H/m)$	$G/(S/m)$	$C/(F/m)$
1	0.445585	5.74×10^{-7}	5.02×10^{-8}	4.00×10^{-11}
4	0.853151	5.42×10^{-7}	7.46×10^{-7}	
10	1.329097	5.3×10^{-7}	2.76×10^{-6}	
20	1.829112	5.24×10^{-7}	6.90×10^{-6}	
31.25	2.324815	5.21×10^{-7}	1.21×10^{-5}	
62.5	3.275402	5.18×10^{-7}	2.86×10^{-5}	
100	4.135938	5.16×10^{-7}	5.02×10^{-5}	

注:表中的单位长度电容值的计算未考虑介电常数 ϵ 随频率的不同而变化,即取一个恒定值 $\epsilon = 2.37$ 。另外,在频率为 1 kHz 条件下,将线对架空后实测电容值 $C = 3.9 \times 10^{-11}$ F/m。

表2 孤立线对二次参数计算结果

频率/MHz	Z/Ω	α (dB/m)	$V/(m/s)$
1	120.2	0.0161	$0.6954c$
4	116.5	0.0323	$0.7144c$
10	115.2	0.0515	$0.7243c$
20	114.5	0.0729	$0.7280c$
31.25	114.1	0.0946	$0.7314c$
62.5	113.8	0.1392	$0.7332c$
100	113.6	0.1829	$0.7344c$

注: c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s, 以下各表相同。

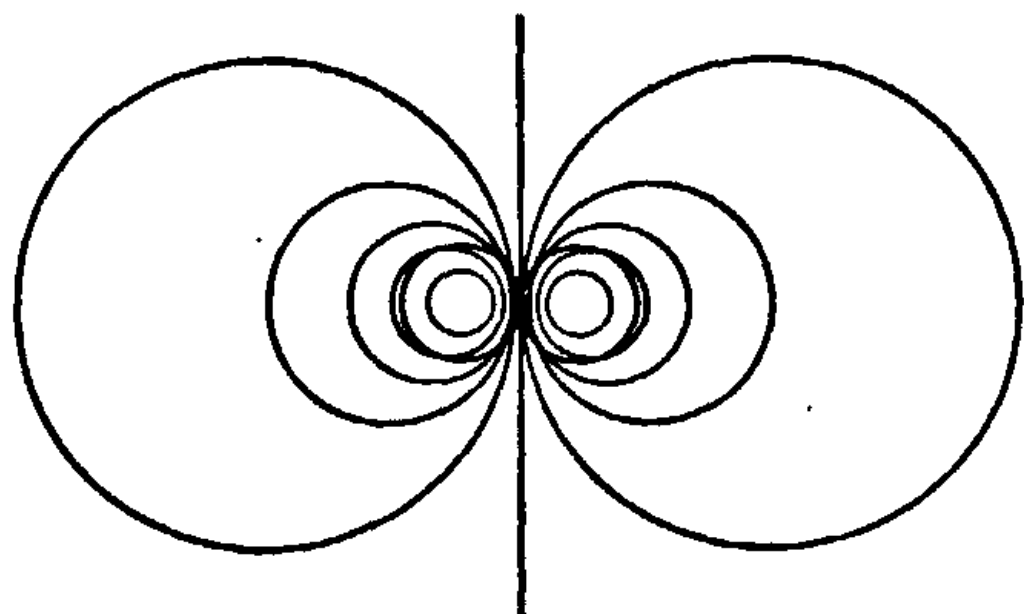


图2 孤立线对静电位等势线

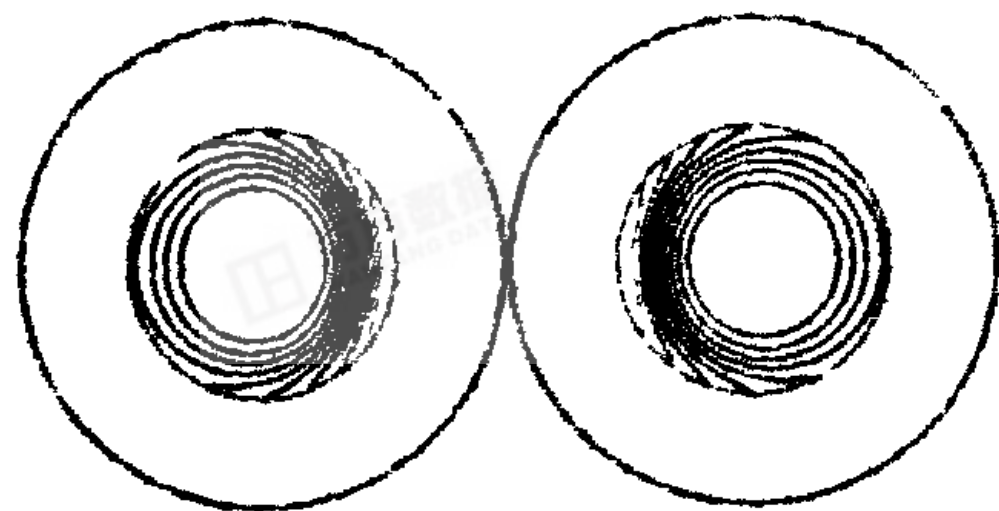


图3 孤立线对 1 MHz 下正弦电流密度(幅值)分布

3.2 四对非屏蔽超五类缆的计算

由于线对在成缆绞制过程中,线对会相互部分地嵌入其它线对外轮廓所构成的“圆”内,为了能准确地反映现实的电缆,笔者参照文献[2]引入了线对等效直径系数(1.65~1.70,泡沫绝缘时取 1.65,实心 HDPE 绝缘取 1.70)。将四对线排列成图 4 所示的结构,四线对的外切圆直径等于电缆缆芯外径。

考虑到线对的一次参数与周围线对的分布有

关,分别计算了同一线对在线对间相对位置不同的四个位置(如图 5 所示,作图时保持图 4 中的缆芯直径不变,分别转动线对,然后调整位置使之位置趋于合理化)的 R 、 L 、 G 、 C 值,然后求平均值。实践证明,不同的位置其计算结果有细微差异。

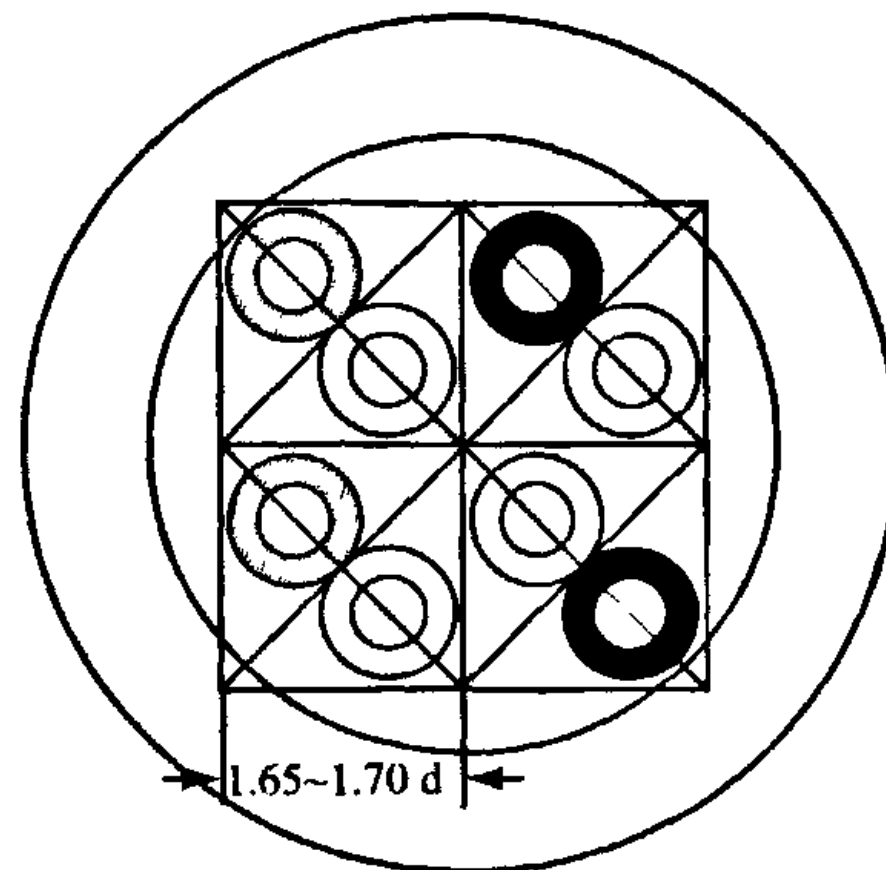


图4 四对线对的排列结构

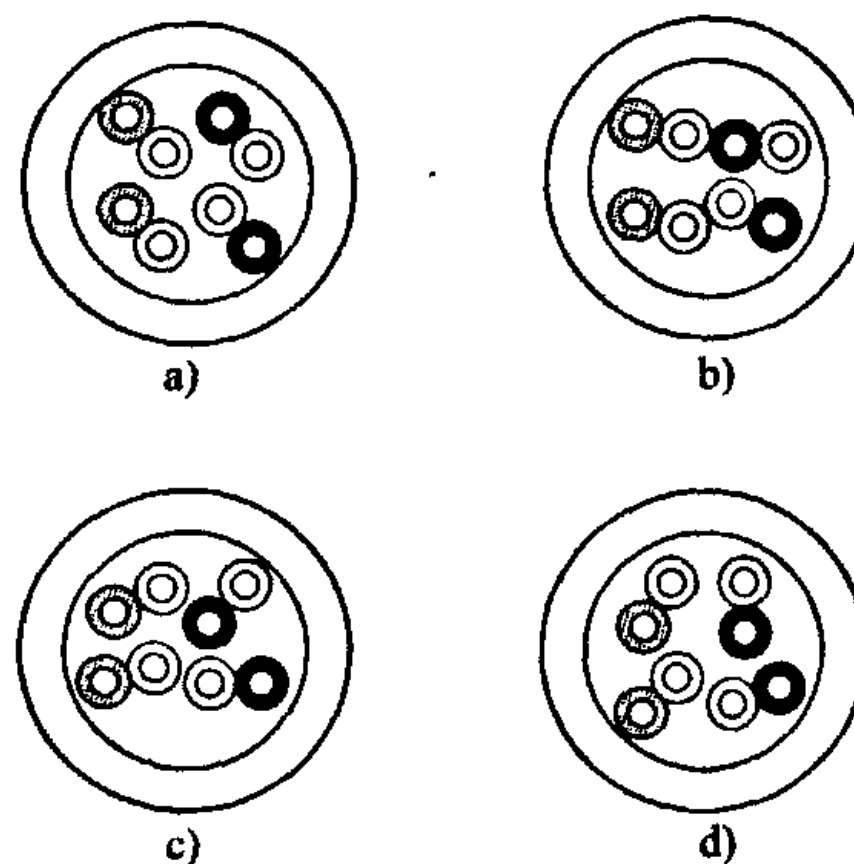


图5 四对线对排列结构的四种型式

由于线对间的相互影响,导体的有效电阻除包含回路的直流电阻、集肤效应引起的附加电阻及邻近效应引起的附加电阻外,还包括所分析线对在其它线对上产生涡流损耗引起的附加电阻。一次参数的计算结果见表 3;波阻抗、衰减和传播速度见表 4。其静电位等势线(其它线对接地)如图 6 所示,1 MHz 下正弦电流密度(幅值)分布如图 7 所示。

表3 四对电缆一次参数计算结果

频率/MHz	$R/(\Omega/m)$	$L/(H/m)$	$G/(S/m)$	$C/(F/m)$
1	0.4397	5.4830×10^{-7}	5.78×10^{-8}	4.6×10^{-11}
4	0.8384	5.1674×10^{-7}	8.58×10^{-7}	
10	1.3066	5.0549×10^{-7}	3.18×10^{-6}	
20	1.8315	4.9970×10^{-7}	7.92×10^{-6}	
31.25	2.2828	4.9686×10^{-7}	1.40×10^{-5}	
62.5	3.2118	4.9349×10^{-7}	3.28×10^{-5}	
100	4.0576	4.9181×10^{-7}	5.78×10^{-5}	

注:表中的单位长度电容值的计算未考虑介电常数 ϵ 随频率不同而变化;另外,在 1 kHz 时,实测值 $C = 4.6 \times 10^{-11} \sim 5.2 \times 10^{-11}$ F/m。

从图 6 可以看出,多线对存在时,电场会发生畸

变,等势线不再象孤立线对那样呈圆形。从图7也可以看到,由于邻近效应,两导体相邻一侧电流密度大些;由于集肤效应,在导体中部没有电流分布。

表4 四对电缆二次参数计算结果及实测结果

频率 MHz	Z/ Ω		α /(dB/m)		V/(m/s)
	计算值	实测值	计算值	实测值	
1	109.70	108	0.0175	0.019	0.662c
4	105.97	105	0.0348	0.039	0.682c
10	104.94	103	0.0555	0.063	0.691c
20	104.26	102	0.0799	0.090	0.695c
31.25	103.97	102	0.1020	0.113	0.697c
62.5	103.54	102	0.1495	0.162	0.699c
100	103.41	102	0.1964	0.208	0.700c

注:阻抗z实测值为输入阻抗的实测平均值。

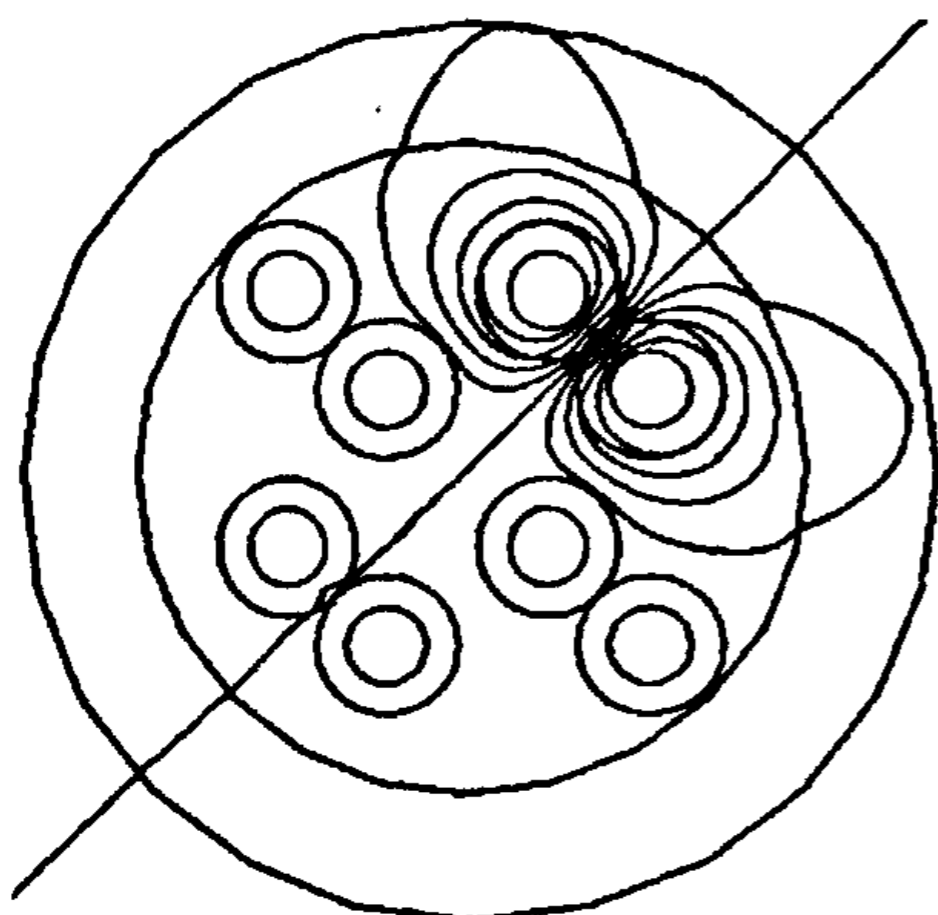


图6 四对电缆静电等势线

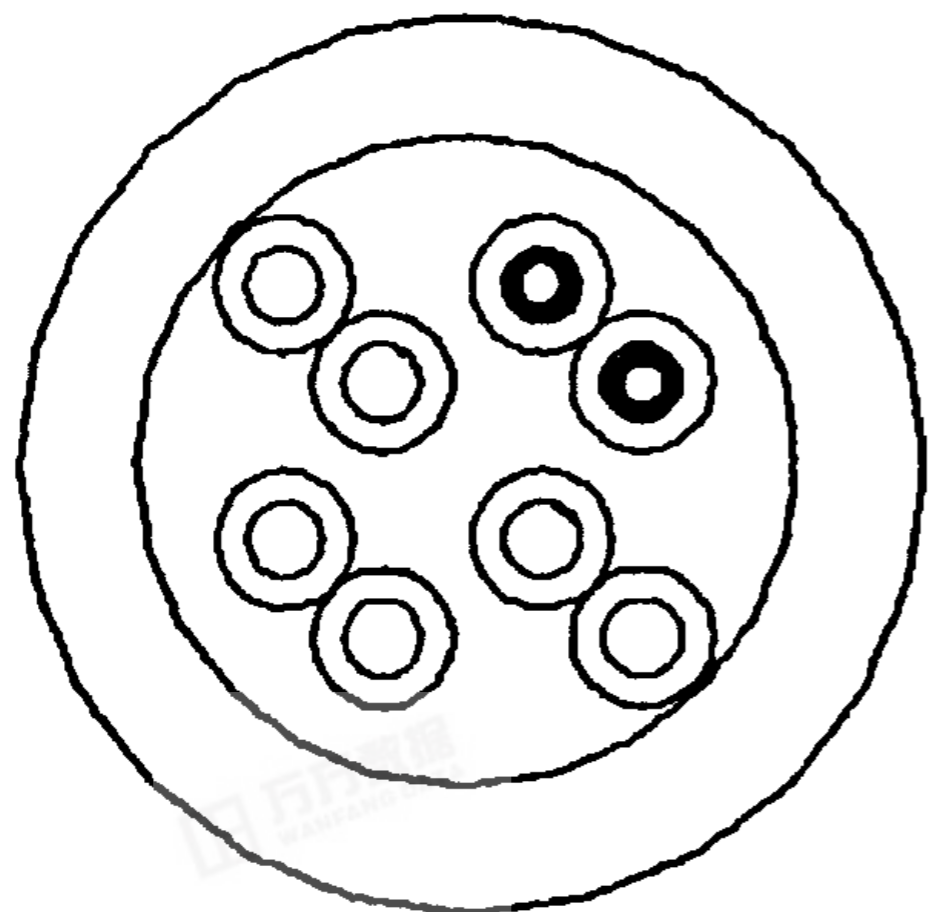


图7 四对电缆1 MHz下正弦电流密度(幅值)分布

3.3 孤立线对与四对电缆计算结果分析

为了便于观察两种电缆的计算结果,将不同频率下的导体有效电阻、电感、绝缘电导、电容、波阻抗、传播速度分别绘成图8~图14。

从图8~图14可以看出:

(1) 孤立线对的导体有效电阻比四对线的略大(见图8)。这是因为在四线对中尽管附加的金属损耗有使导体有效电阻增大的趋势,但另一方面,由于被研究的线对产生的电磁场会在其它三对线上引起

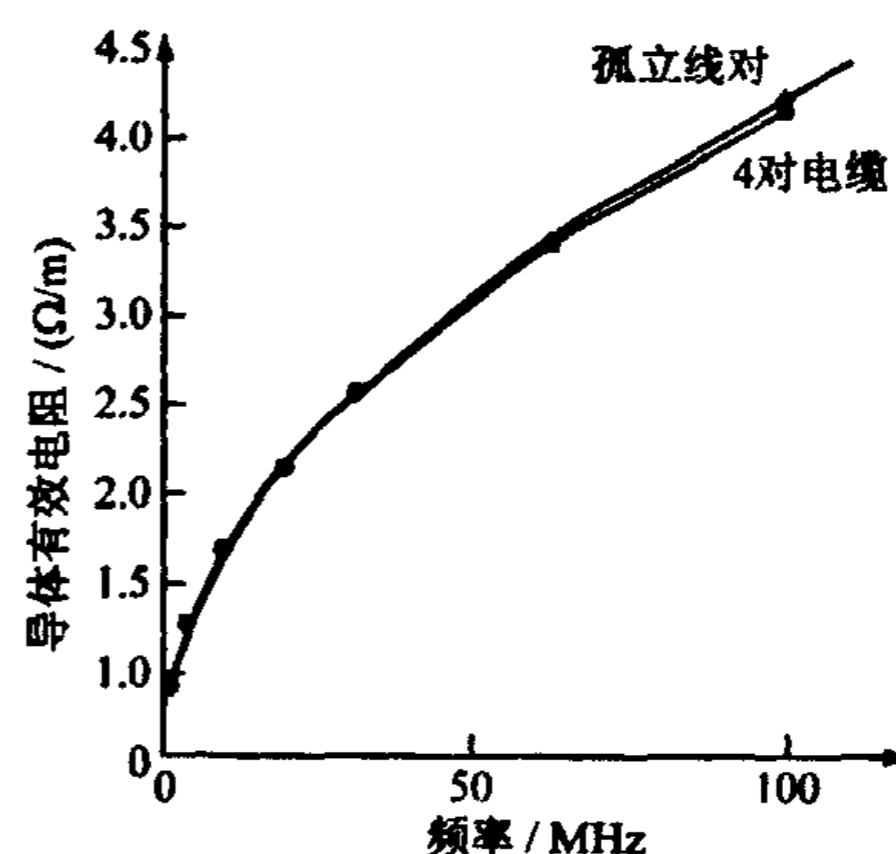


图8 不同频率下的导体有效电阻

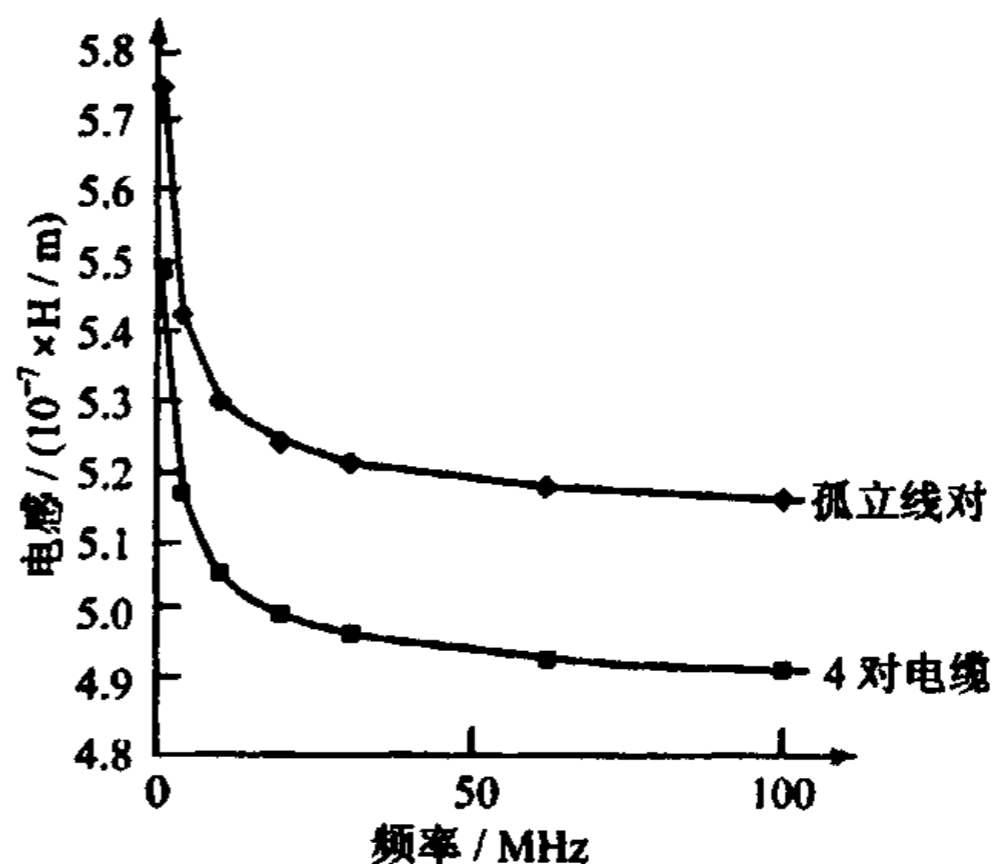


图9 不同频率下的电感

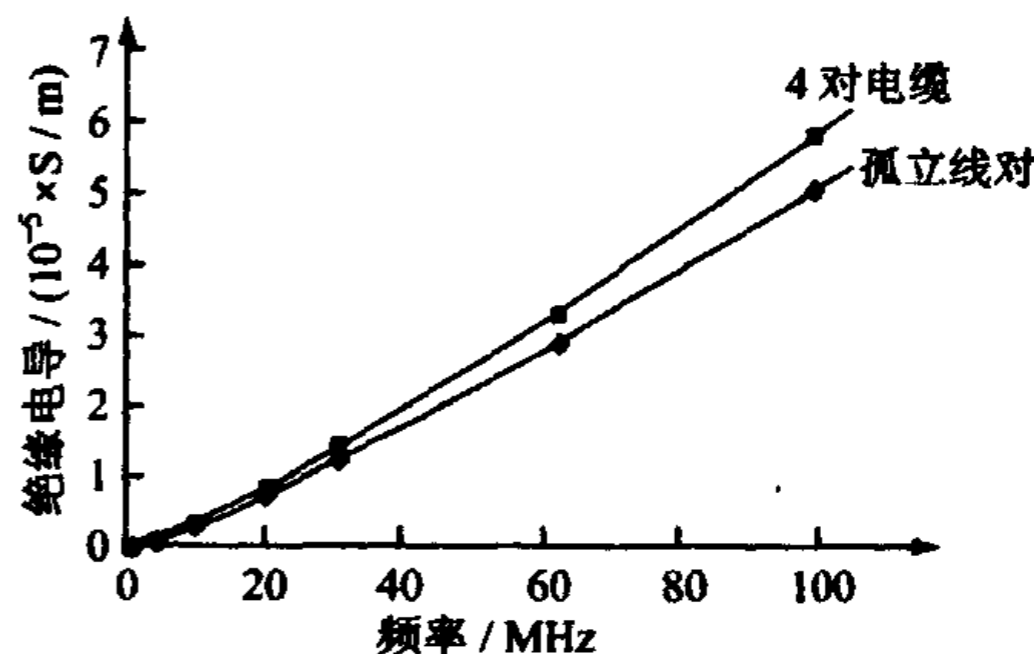


图10 不同频率下的绝缘电导

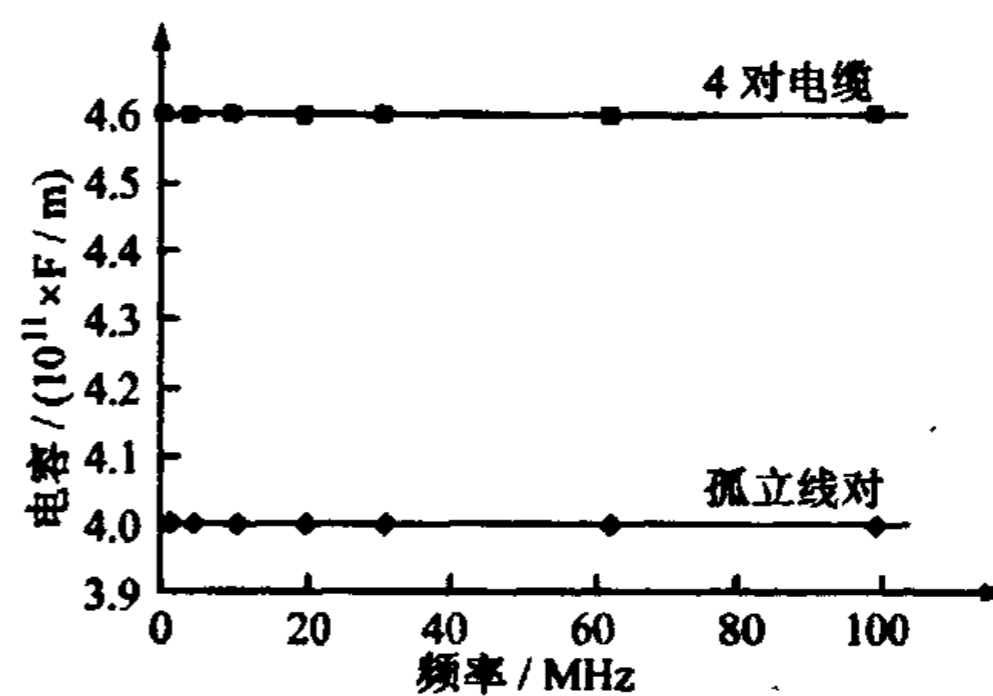


图11 不同频率下的电容

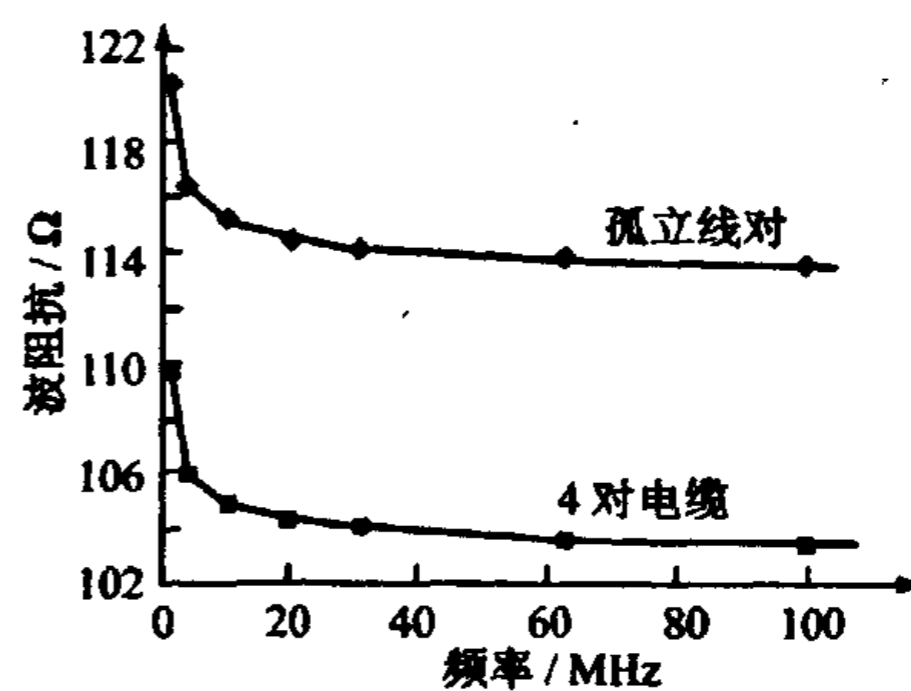


图12 不同频率下的波阻抗

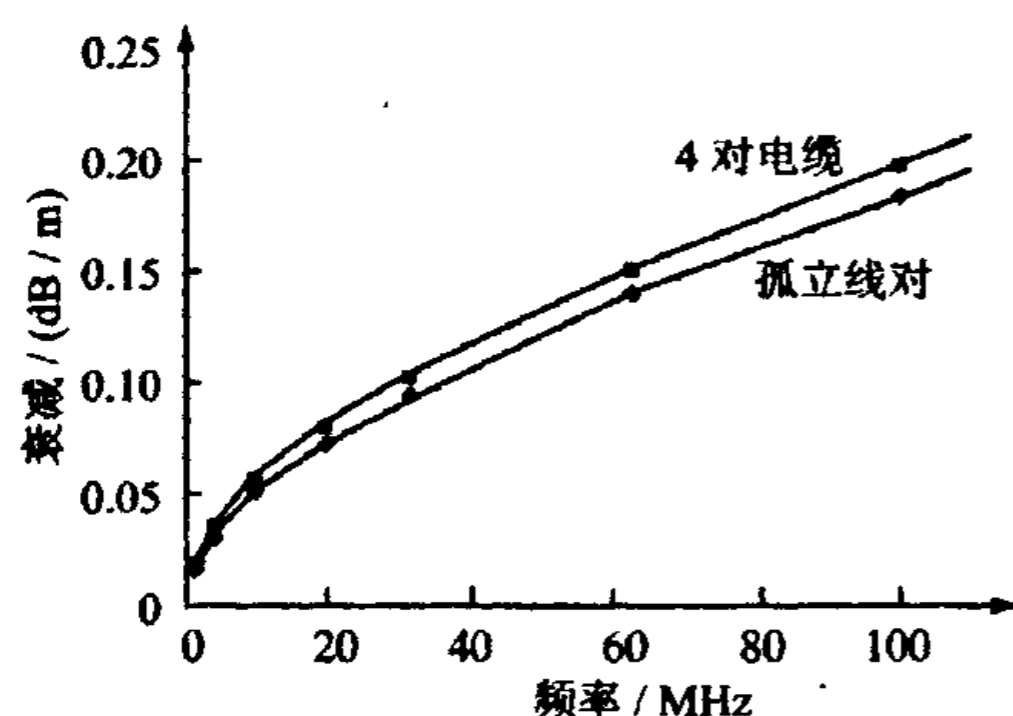


图13 不同频率下的衰减

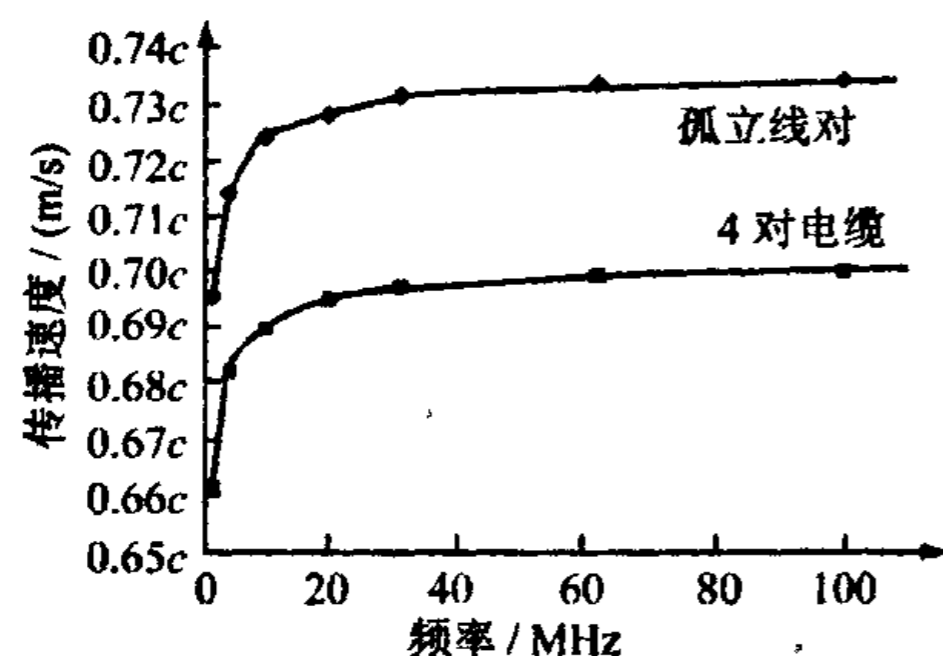


图14 不同频率下的传播速度

涡流,涡流产生的磁场与被研究线对产生的磁场方向相反,从而使穿过导体的磁通量减小,削弱了集肤效应引起的电阻增加程度。

(2) 孤立线对的电感比四线对电缆的电感大(见图9)。因为四线对电缆中被研究的线对产生的电磁场在其它三对线上引起涡流,涡流产生的磁场与被研究线对产生的磁场方向相反,从而引起总的电感减小。

(3) 孤立线对的电容比四线对的电容小(见图11)。

(4) 孤立线对的绝缘电导比四线对的绝缘电导小,这主要是因为电容较小的缘故(见图10)。

(5) 孤立线对的波阻抗比四线对的波阻抗大(见图12)。

(6) 孤立线对的衰减比四线对的衰减小(见图13)。

(7) 孤立线对的传播速度比四线对的传播速度快(见图14)。

4 结束语

(1) 实践发现,利用有限元法计算同轴缆时,计算结果与实测结果相差很小。本文将有限元法用于计算对称缆时与实测结果相差稍大一些。造成的原因主要有:其一,对绞电缆的电场分布比较复杂,计算时所建的模型不够精确。如果同时考虑结构偏差(如绝缘偏心、导体不圆等)、绝缘单线与线对轴线存在夹角、绞对时绝缘变形等因素的影响后,计算结果会精确些。其二,对绞电缆的各参数受加工参数的波动影响较大,因此测试数据分散性也较同轴电缆大。因此如何建构合理的对称电缆结构模型还需要进一步研究。

(2) 有限元法计算对称电缆时,计算结果比经验公式计算的结果精度高。因此,有限元法是计算对绞电缆的一种行之有效的方法。

(3) 经过利用计算机对计算的结果进一步处理,还能直观地观察电场、电流密度等分布情况。

(4) 由于目前针对电缆计算的有限元分析软件很少,在电缆计算时存在着计算模型处理工作量大的问题,影响了有限元法在电缆行业的广泛使用。如果能针对电缆的计算特点,专门开发一个电缆计算软件将会极大地推动电缆设计水平的提高。

参考文献:

- [1] 王春江. 电线电缆手册(第2版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- [2] 徐守森. 通信电缆绞缆工艺学[M]. 北京:机械工业出版社, 1987.
- [3] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京:高等教育出版社, 1983.
- [4] 丁丽娟. 数值计算方法[M]. 北京理工大学出版, 1997.
- [5] 郑玉东. 通信电缆[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 王春江, 梁奇, 李健. 野战通信(综合、对称)电缆鉴定资料汇编[R]. 上海电缆研究所, 1988.
- [2] 野战电缆的设计和试验[J]. 传输线技术, 1977, (3): 22-24.
- [3] 地面支援设备电缆的现状与未来的设想[J]. 传输线技术, 1971, (2): 14-16.
- [4] 王春江, 梁奇. 尼龙12在野外移动用通信电缆中应用的探讨[A]. 上海市通信学会1986年年会[C]. 上海: 1986.
- [5] 徐应麟主编. 电线电缆手册第2册[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.

- [6] 卢荫, 龚自觉, 贾进芹. 交联聚烯烃绝缘橡皮护套软电缆的硫化工艺[J]. 电线电缆, 2006, (1): 27-28.
- [7] 王佩琪. 氨基甲酸乙酯电缆外护套[J]. 通信电缆, 1977, (2): 56-58.
- [8] 高祥萍, 陈贵生, 李惠琴, 等. 国产热塑聚酯型聚氨酯性能及加工工艺试验小结[R]. 上海电缆研究所, 1979.
- [9] 王春江, 范洪欣. 特种用途电线电缆的设计和研发及其指导思想[J]. 电线电缆, 2007, (1): 7-11.
- [10] MIL-C-13777, 美国特种用途通信电缆试验方法[S].