



中等专业学校教学用书

有线传输原理

原编者：北京邮电学院中技部有线传输教研组

审校者：邮电院校有线传输教材选编组

人民邮电出版社

有 綫 传 輸 原 理

原編者：北京邮电学院中技部有綫傳輸教研組

审校者：邮电院校有綫傳輸教材选編組

人 民 邮 电 出 版 社

內 容 提 要

本书系参照邮电部电信中等专业学校有线传输原理教学大纲的要求，并吸取了几年来各邮电院校在教学改革中积累的一部分经验而编写的。全书共分概論、均匀线的电气特性、通信回路間的相互干扰、二端网络、四端网络、滤波器及非均匀线与长途通信线路的概念等七章，内容着重阐述物理概念，每章并附有問答題和計算題。本书是适用于通信类中等专业的教学用书，也可以作为电信工程技术人员参考书。

有 线 传 输 原 理

原編者：北京邮电学院中技部有线传输教研组

审校者：邮电院校有线传输教材选編組

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京崇文 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业所可发号：四八零)

印刷者：邮 电 部 北 京 邮 票 厂

发行者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

1961年 7 月北京第一版

印张 8 6/32 頁数 262

1961年 7 月北京第一次印刷

印刷字数 219,000

印数 1-6,150 册

統一書号：15045·总1252—有251

定价：(9) 1.00 元

序 言

本书系参照邮电部电信中等专业学校有线传输原理教学大纲(1957年修订)并吸收了几年来各院校在教学改革中积累的一部分经验而选编的。

有线传输原理课程主要研究电磁能在具有分布参数和集中参数的电路上的传输性质,为学习有线通信各专业课的理论基础。根据教学大纲的要求,在讲述本课程时应着重阐明物理概念,所以本书采用先讲均匀线后讲电气网络的系统,以便加强物理概念的阐述。为了巩固学习,本书每章都附有问答题和计算题。

本书内容共分七章:第一章概论,着重介绍有线通信的主要特点是传输宽频带的电流。第二章叙述均匀线的电气性质,从电磁波在均匀线上传播的物理概念出发,讲解特性阻抗和传播常数(阻抗匹配无反射时)与输入阻抗和工作损耗(阻抗不匹配有反射时)的意义、计算公式和它们与频率的关系。第三章叙述通信回路间的相互干扰,主要介绍回路间相互干扰的起因及其减小方法的基本概念。第四章叙述电抗二端网络的频率特性及倒量和等效二端网络,为实用电路打下基础。第五章叙述四端网络,在均匀线的物理概念基础上讲解四端网络的传输性质,并介绍几种四端网络的实用电路,如衰减器、转电线圈和衰减均衡器等。第六章叙述滤波器的一般原理,并分析K型M型与组合滤波器的电路及其特性和计算电路元件。第七章对非均匀线、长途电缆的加感回路、架空明线中的介入电缆及同轴电缆作概念性的介绍。

本书原稿是北京邮电学院前中技部有线传输教研组于1960年集体编写的有线传输原理教材。本书是在西安邮电学院负责主持下,经邮电院校有线传输教材选编组以上述原稿为基础,并根据长春邮电学院等院校的教学经验,进行审校修订,作为通信类中等专业的

教学用书。

参加原稿編写的北京邮电学院前中技部有綫传输教研組教师是：郑祖惠、刘棣华、金維高等同志；胡书金、陈溥同志参加了初稿的編写工作。

参加审校修訂的教材选編組成員是：西安邮电学院教师郑祖惠，重庆邮电学院教师姚光玉，长春邮电学院教师赵巨川和石家庄邮电学院教师侯志勳等同志。

参加本书繪图工作的还有西安邮电学院制图教研組全体教师。

由于經驗不足、审編時間很短等原因，本书內容难免有不够妥善，甚至錯誤之处，希望讀者，特别是使用本书的教师和同学积极提出批評和改进意見，以便今后修訂提高。

1961年5月

目 录

序 言

第一章 概論	(1)
1—1 有綫通信的方式和使用頻帶	(1)
1—2 有綫通信的傳輸特点和“有綫傳輸原理”課程的任務	(4)
第二章 均勻綫的电气性質	(5)
2—1 均勻綫的一次参数	(5)
2—2 电磁波在无限长均匀綫上的傳播	(12)
2—3 均勻綫的特性阻抗与傳播常数	(27)
2—4 电磁波在有限长均匀綫上的傳播	(38)
2—5 均勻綫中的信号畸变	(49)
2—6 均勻綫的輸入阻抗	(52)
2—7 均勻綫的工作衰耗	(62)
第三章 通信回路間的相互干扰	(70)
3—1 未交叉回路間的相互干扰	(70)
3—2 串音衰耗与防护度	(79)
3—3 交叉回路間的相互干扰	(84)
3—4 电綫回路間的相互干扰与电綫的平衡的概念	(100)
第四章 二端网络	(104)
4—1 二端网络的一般概念	(104)
4—2 电抗二端网络及其頻率特性	(104)
4—3 倒量二端网络与等效二端网络	(111)
4—4 电抗二端网络的簡化	(118)
第五章 四端网络	(121)
5—1 四端网络的一般概念	(121)
5—2 四端网络的傳輸方程式及其参数	(123)
5—3 四端网络的輸入阻抗与特性阻抗	(130)

5-4	四端网络的传输常数与传输方程式	(133)
5-5	四端网络的链接及常用四端网络的特性阻抗与传输常数	(138)
5-6	四端网络的工作衰耗与介入衰耗	(142)
5-7	衰耗器的计算	(145)
5-8	电信用的变量器及其用途	(149)
5-9	衰耗均衡器	(158)
第六章	滤波器	(165)
6-1	滤波器的一般原理	(165)
6-2	常数K型滤波器	(170)
6-3	M型滤波器	(190)
6-4	滤波器中的损耗的概念	(214)
6-5	晶体滤波器的概念	(217)
6-6	滤波器并联运用的概念	(222)
第七章	非均匀线及长途通信电缆线路的概念	(229)
7-1	非均匀线的概念	(229)
7-2	长途电缆加感回路的概念	(231)
7-3	架空明线线路中的介入电缆	(235)
7-4	同轴电缆的概念	(235)
附录:		
I	双曲线函数的性质	(238)
II	用计算尺计算复数	(244)
III	双曲线函数表	(247)
IV	衰耗器元件数据	(250)
V	绝对电平和功率、电压及电流的对照表	(252)

主要参考书目

第一章 概 論

1—1 有綫通信的方式和使用頻帶

電信就是用电来传递信息。在实际应用中，有各种不同的通信方式：

1) 电报——用电传递文字的通信方式叫做电报通信。最近发展的电报通信是用电来传递图片，它叫做传真电报。

2) 电话——用电传递语音。发话人和收话人都在同一个城市内通话的叫做市内电话；发话人和收话人不在同一城市内通话的叫做长途电话。

3) 广播——用电向广大听众传播语言、音乐的方法叫做声音广播；而把活动的图象向广大观众传播的方法叫做电视广播。

各种通信方式都可用金属导线或不用金属导线而用无线电波来传播信号。前者叫做有线通信，如有线电报、有线电话和有线广播等；后者叫做无线通信，如无线电报、无线电话和无线广播等。

为了便于研究有线通信的传输原理，下面简单介绍有线通信各种通信方式所使用的频带。

一) “直”流电报的使用频带

“直”流电报是把持续时间不同的脉冲电流以不同的组合，组成代表文字的信号电流来传递消息，例如如图1.1中，由一个持续时间为 τ 的脉冲电流和一个持续时间为 3τ 的脉冲电流组成代表文字“A”的信号电流。

上述“直”流电报的脉冲电流可以用福里哀级数形式表示为一个直流成分和一系列的不同频率、不同振幅的交流成分。所以“直”流电报的

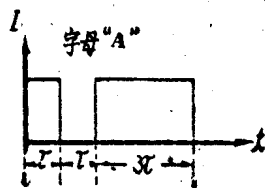


图 1.1 电报信号电流

信号电流不仅有直流分量，同时还有交流分量。根据一般电报机械的通报速度，“直”流电报的信号电流需要的頻带为0—100赫。

二) 电话通信所需的頻带

电话通信的基本原理是由发話端用送話器把声能变化转换为电能的变化，经过导綫传送至收話端，再由收話端用受話器把电能变化转换为声能的变化，即还原成声波。

人說話所产生的复杂的空气振动可以分解为一系列的幅度不同、频率不同的简单的正弦振动，它所占频率范围大約从100赫到10900赫。人的听觉器官耳朵能感觉到比較寬的頻带的声音，約自20—20000赫。如果电话通信要发送与收听整个频率范围的話音，那么对于机械与綫路設備的质量，就要有很高的要求，这是很不經濟的。因此，我們要求在保証一定通話质量的前提下，尽可能使电话通信传送話音的频率范围小一些。

根据清晰度試驗方法，确定了电话通信所需的頻带如下：

最重要的通話頻带 300~2700赫

可以滿意的通話頻带 300~2400赫

质量优良的通話頻带 300~3400赫

由于乐器发出的声音含有較寬的頻带，約自30赫到16000赫。因此規定：

可以滿意的音乐和歌唱的頻带 100~5000赫

质量优良的音乐和歌唱的頻带 50~10000赫

在电话电路計算技术中，对通話頻带中包含的各种频率——計算是不方便的。因此人們把800赫或1000赫用作中間計算频率。对于这两个频率，电话机—耳朵系統有着最高的灵敏度，所以它們在电话电路計算技术中具有代表性，而用800赫計算时，角频率 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.1416 \times 800 = 5000$ ，計算时尤为方便。

三) 載波通信的頻带

上面讲到电报通信应用的頻带为0—100赫，电话通信所需頻带是300~2700赫，这些频率是比較低的。实际上由金属导綫构成的綫

路可以传输很高频率的电流，例如架空铜线线路能够传输 150 千赫的高频电流。为了提高线路利用率，我们把几个通报或通话所需频带的电流分别变到频率较高的区域，沿线路传输到对方站，经过滤波器的选择作用，再分别把提高了频率的电流恢复为原来电报或电话频带的电流，这种通信方法叫做“载波通信”，或者叫做“高频电流通报、通话”方法。利用载波通信方法可以在一对导线组成的线路上进行许多路电报或电话通信，而互不干扰。

图 1.2 示出了载波电话通信的方框图。图中发送站的 M_1 、 M_2 及 M_3 为变换频率设备， ϕ_1 、 ϕ_2 及 ϕ_3 为滤波器，它们将几个话音频带（300—2700 赫）分别变到较高的频带区域；例如 4300—6700 赫、

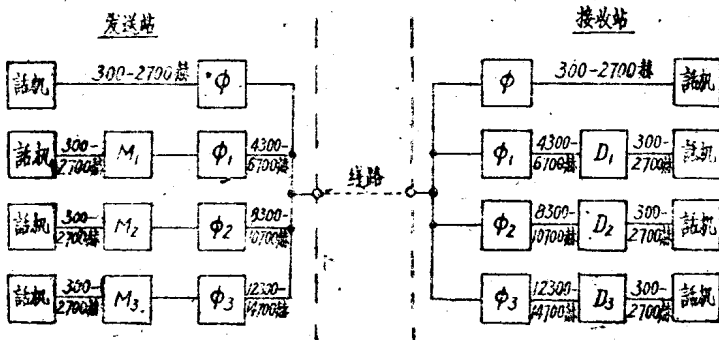


图 1.2 载波电话通信的方框图

8300—10700 赫及 12300—14700 赫。这些频带不同的电流可以合在一起通过一对导线传输到接收站。在接收站里，先经过滤波器 ϕ_1 、 ϕ_2 及 ϕ_3 分别选出某一段频带的电流，再由恢复频率的设备 D_1 、 D_2 和 D_3 分别把收到的提高于频率的电流恢复为原来话音频带的电流。同时，还可在导线上传输一个话音频带的电流，也需要在发送端和接收端都装上一个 300—2700 赫的滤波器 ϕ 。这样在一对导线上就可通很多路的电话（上例为单方向的四路电话）。

在架空明线线路上装设的载波电话，目前有单路、三路及十二路等，最高传输频率为 150 千赫；在对称电缆线路上，60 路载波电话

的使用頻帶為12—252千赫。在同軸電纜上可以裝設几百路到几千路的載波電話，最高傳輸頻率以兆赫計。

四) 傳真電報與電視所需的頻帶

傳真電報用電傳送不活動的圖像。它的基本原理是：發送端利用光電管將光能的變化轉換為電能的變化，經過導線傳送到接收端，再由接收端利用錄影燈將電能的變化轉換為光能的變化。根據一般傳真電報機的工作速度，傳真電報通信所需頻帶通常在0—3000赫。

電視用電傳送活動的圖像，其工作原理較為複雜。我們可從傳真電報推算出電視所需傳送的頻帶。電視每秒鐘要換25—30幅圖像，這樣才能利用人的視覺暫留作用，看起來活動圖像的動作是連續的而不是跳動的。傳真電報傳送一幅圖像要40—50秒，所以電視傳送速度比傳真電報高出1500倍左右，這樣電視的最高頻率約為4.5兆赫。電視的傳送頻帶一般從0到4或5兆赫。

1—2 有線通信的傳輸特點和“有線傳輸原理” 課程的任務

一) 有線通信的傳輸特點

1) 同時傳送的頻帶寬

在上節中已經指出，電報、電話通信都要使用一定寬度的頻帶，而載波通信和電視通信占用更寬的頻帶。這就不同於電力傳輸只用單一的50赫頻率。

2) 功率小效率低

有線通信傳輸的電能功率甚小，例如送話器的發送功率大約只有1毫瓦，載波電話的發送功率一般也只數十毫瓦。

同時，有線通信採用綫路兩端的發送設備內阻和接收器阻抗都等於綫路阻抗的傳輸方法。這樣全部發送功率一半消耗在內阻上，接收設備至多只能接收到一半功率，所以效率很低，這也不同於功率大效率高的電力傳輸。

二) “有线传输原理”课程的任务

“有线传输原理”这门课程的主要任务是：研究架空明线线路和电缆线路及常用无源网络在所使用的频带范围内的传输性质，讨论计算通信线路和无源网络的参数和元件值。在研究传输性质时，必须考虑到经济原则和质量要求。

问 题

1. 说明有线通信的各种方式和它们的使用频带。
2. 说明有线通信的传输特性。

第二章 均匀线的电气性质

本章研究电磁能在均匀线上传播的物理过程，传输方程式以及有关的电气特性。

2-1 均匀线的一次参数

有线通信线路按其结构来分，有架空明线线路和电缆线路两种：把金属导线架挂在电杆上，构成架空明线线路；把由一条或若干条相互绝缘的导线放在同一保护外皮中所构成的电缆，敷放在地下或架挂在电杆上，构成电缆线路。架空明线和电缆线路都有四个基本的电气特性：电阻，电感，电容和绝缘电导。这四个基本的电气特性叫做线路的一次参数。通信线路的一次参数是分布在整个线路上的，如果是均匀分布的，也就是沿线各处的电气特性是完全相同的，这种线路称为均匀线。均匀线的一次参数通常是按一公里为单位来计算的。

一) 通信架空明线线路的一次参数

现在通信线路几乎都采用双线回路，所以下面只讨论双线回路的一次参数。

1) 导綫电阻

①直流电阻 导綫的直流电阻决定于导綫的材料，导綫的横截面面积和它的长度。

双綫回路的直流电阻等于：

$$R_0 = \rho \frac{8000}{\pi d^2} \text{ 欧/公里} \quad (2.1)$$

式中， ρ —温度为摄氏20度时的电阻系数，单位为欧· $\frac{\text{平方毫米}}{\text{米}}$

d —导綫直径，单位为毫米。

当温度不等于摄氏20度时，导綫直流电阻按下列公式计算：

$$R_t = R_{20} [1 + \sigma(t - 20)],$$

式中， R_t —温度为 t 度时的导綫直流电阻，

σ —电阻的温度系数。

架空明綫綫路的导綫是用硬铜、铁或铝做成的。电纜綫路的导綫是用软铜做成的，有时也用铝。这些金属的特性列于表 2.1 中。

常用导綫金属的特性

表 2.1

金 属 名 称	ρ	σ	比 重
铜	0.01785	0.0039	8.9
铝	0.0291	0.0037	2.71
铁	0.139	0.0046	7.7

②交流电阻 导綫中传送交流电流时，由于集肤效应，随着频率的增高，使电流分佈趋于表面，这样，导綫的有效截面积减小，电阻随着增大。频率愈高，集肤效应愈显著，导綫电阻也就愈大。在导磁系数较大的导綫里，和在綫径较大的导綫里，集肤效应尤为显著。

双綫回路每公里交流电阻可由下面公式计算：

$$R = k, R_0 \text{ 欧/公里} \quad (2.2)$$

式中 R_0 —双线回路每公里直流电阻,

k_1 —由于集肤效应而使电阻增大的系数, 这系数大于1, 它与
 传送电流的频率, 导线截面积, 电阻系数, 导磁系数有
 关。

关于铜包钢线(外面包有铜层的钢导线)的电阻计算公式, 这里从略。

考虑到集肤效应, 不同的导线材料, 不同线径, 在不同频率下的电阻可依表 2.2 查得。

不同材料, 不同线径的导线, 在不同频率下的电阻值 表 2.2

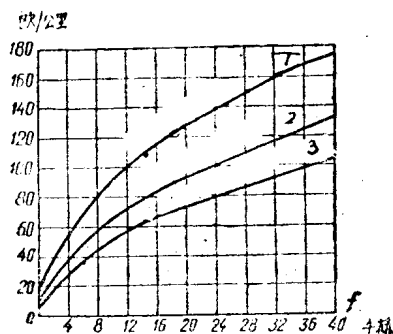
材料 线径 频率	铁 线			铜 线		
	3 毫米	4 毫米	5 毫米	3 毫米	4 毫米	5 毫米
0	19.6	11.05	7.04	2.52	1.86	1.42
200	20.5	12.6	9.10	2.52	1.86	1.42
300	21.6	14.0	10.7	2.52	1.86	1.42
500	24.5	17.2	13.4	2.52	1.86	1.42
800	29.2	21.1	16.5	2.52	1.87	1.44
1200	34.9	25.2	19.7	2.52	1.88	1.45
2000	43.7	31.7	24.8	2.57	1.92	1.51
3000	52.3	38.1	30.0	2.63	2.01	1.61
5000	66.0	48.2	38.2	2.81	2.23	1.86
7000	77.0	56.6	45.0	3.05	2.50	2.13
10000	91.0	67.1	53.4	3.45	2.90	2.49

从表 2.2 中可以看出, 不论用那种金属材料做成的导线, 它们的电阻总是随着通过电流的频率增高而增大, 而且铁线的电阻比铜线的电阻变化大。

这些关系也可由图 2.1 及图 2.2 看出。

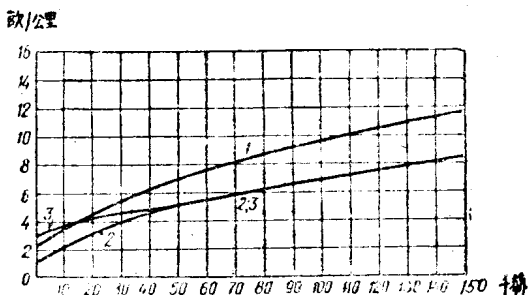
2) 导线的电感

导线的电感由内外两部分电感组成; 外电感是导线外部的磁链与线内流通的电流之比, 内电感是导线内部的磁链与线内流通的电流之比。导线电感的计算公式已在“电工学”课程中讲过, 这里只列出



1—鉄綫 $d=3$ 毫米 2—鉄綫 $d=4$ 毫米 3—鉄綫 $d=5$ 毫米

图 2.1 鉄綫的电阻的頻率关系



1—銅綫 $d=3$ 毫米 2—銅綫 $d=4$ 毫米 3—銅包鋼綫 $d_2=4$ 毫米, $d_1=3.2$ 毫米

图 2.2 銅綫和銅包鋼綫的电阻的頻率关系

公式，不加推导。双綫回路每公里的电感量等于：

$$L = (4 \ln \frac{a}{r} + k_2 \mu_r) \times 10^{-4} \text{ 亨/公里} \quad (2.3)$$

式中 a —两导綫中心間距离，单位为厘米，

r —导綫的半径，单位为厘米，

μ_r —导綫材料的相对导磁系数，

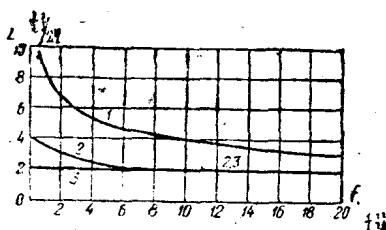
k_2 —由于集肤效应而使电感减小的系数。

公式(2.3)中第一項是外电感，它与通过电流的頻率没有关系，只决定于导綫的半径 r 与导綫中心間距离 a 。第二項是内电感，它与导

线材料及通过电流的频率都有关系。当频率增高时，由于集肤效应，电流分布趋于表面，故内磁链减小，内电感随着减小。所以，随着频率的增高，导线的电感要减小，当频率很高时，导线的电感等于外电感，即为一定的常数值。

关于铜包钢线的电感计算公式，这里也从略。

图 2.3 绘出了铁线、铜包钢线和铜线线路的电感的频率关系。从图中可以看出，各种不同金属材料做成的导线的电感总是随着通过电流的频率增高而减小的。其中铜线的电感变化较小，而铁线的电感变化很大。在频率较高时，铜包钢线的电感差不多是与铜线的电感相等的，而铁线的电感也随着频率的增高趋近于铜线的电感。



1—铁线， $d=4$ 毫米 2—铜包钢线，导线外径 $d_2=4$ 毫米，钢心线直径 $d_1=3$ 毫米
3—铜线， $d=4$ 毫米

图 2.3 铁线、铜包钢线和铜线的双线路的电感和频率的关系

3) 线路的电容

线路的电容由线间距离，导线半径和线路周围环境的介质来决定。关于计算电容的公式也已在电工学中讲过，这里只把公式列出，而不加推导。双线路的电容等于：

$$C = \frac{\epsilon_r \times 10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}} \text{ 法/公里} \quad (2.4)$$

式中 ϵ_r —相对介电系数，空气的 $\epsilon_r \approx 1$ ，

a —两导线中心间距离，单位为厘米，

r —导线的半径，单位为厘米，

根据实际测量的结果，双线路的电容值比用公式 2.4 计算所得的数值约大 5%，这是因为公式 2.4 里没有考虑到悬挂导线的隔电子和邻近导线的存在。所以在计算时，应该在公式 2.4 中加上一

个修正系数1.05。于是：

$$C = \frac{1.05 \epsilon_r}{36 \ln \frac{a}{r}} \times 10^{-3} \text{ 法/公里} \quad (2.5)$$

必須注意，綫路的电容是与通过电流的頻率沒有关系的。

4) 綫路的絕緣电导

双綫回路用絕緣材料使二条导綫相互絕緣，同时每条导綫对大地也是絕緣的。但是任何介質都不可能絕對不导电，因此綫路上总是存在着一定的絕緣电导。綫路的絕緣电导依通过电流的頻率和气候情况而定，可以利用下列近似公式来計算：

$$G = G_0 + \nu f \quad (2.6)$$

式中 G_0 —通直流时的絕緣电导，单位为漠/公里；

f —通过交流电流时的电流頻率，单位为赫，

ν —通过交流电流时，介質中的损耗系数。

对架空明綫双綫回路來說，在干燥的天气下， $G_0 \approx 0.1 \times 10^{-6}$ 漠/公里；在雨天， $G_0 \approx 0.5 \times 10^{-6}$ 漠/公里。对单綫回路來說， G_0 值大約要增加一倍，因为双綫回路經過两个隔电子，它們的絕緣电阻（絕緣电导的倒值）是串联相加的，而单綫回路仅經過一个隔电子，所以絕緣电阻要小一倍，也就是絕緣电导增加一倍。

綫路通过交流电流时，由于介質中有极化损失，絕緣电导就要加大。而且这种极化损失与頻率有正比关系，所以在公式 2.6 中有 νf 項。介質中的损耗系数 ν 还与隔电子型式及气候条件有关。一般隔电子可用下列 ν 值来計算：天气干燥时， $\nu = 0.05 \times 10^{-9}$ ；天气潮湿时， $\nu = 0.25 \times 10^{-9}$ ；当有冰霜时， $\nu = 0.75 \times 10^{-9}$ 。

二) 电綫綫路一次参数的特点

由于电綫綫路的导綫綫径比較小，导綫之間距离很小，因此电綫綫路的一次参数与架空明綫綫路相比較，有許多不同之点：

1) 电綫綫路的直流电阻比較大，通交流电流时，集肤效应不显著，这是由于綫径小的緣故。当电綫綫路通过高頻电流时，又有