

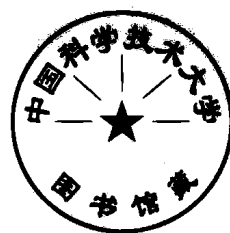
有綫傳輸原理

杜錫鈺 合編
王文煊

人民鐵道出版社

有 綫 傳 輸 原 理

杜 錫 鈺 合 編
王 文 煊



人 民 鐵 道 出 版 社

一 九 五 六 年 · 北 京

本書係參考蘇聯阿庫理森 (П. К. Акульшин), 科什捷耶夫 (И. А. Котеев), 庫理巴茨基 (К. Е. Кульбацки) 等所著之有綫傳輸原理 (Теория связи по проводом) 及其他有關書籍編著而成。內容共分十章。第一章均勻綫的基本參數, 敘述架空明綫及電纜的基本參數的特性及其計算方法; 第二章均勻傳輸綫, 敘述傳輸綫的性能、反射現象以及行波駐波的產生等; 第三章及第四章, 爲二端及四端網絡, 敘述網絡的基本原理; 第五章不均勻綫, 係利用四端網絡和均勻傳輸綫的性能敘述不同綫種的回路相連後其輸入阻抗和傳播常數隨頻率變化的情形; 第六章通信電纜的電氣特性。內容包括電纜的集中加感, 架空明綫中介入電纜及配合裝置等; 第七章濾波器敘述定K型和M型濾波器的性能及組成濾波器的設計以及濾波器的並聯使用; 第八章格形濾波器及晶體濾波器的概念; 第九章均衡器敘述衰耗均衡器及相位均衡器的性能及設計方法; 第十章電報訊號的傳送, 敘述和分析電報傳送時的瞬態現象及傳送速度等。本書中尚應有交叉理論一章, 因本社已有專冊出版, 故未列入。

本書供高等學校電信工程系的教材及從事電信工程的工程師、技術員參考。

有 綫 傳 輸 原 理

杜 錫 鈺 合 編
王 文 燿

責任編輯 周士鍾

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府十七號)

北京市書刊出版營業許可證出字第零壹零號

新 華 書 店 發 行

人民鐵道出版社印刷廠印

(北京市建國門外七聖廟)

一九五六年五月初版第一次印刷

平裝印 1—2,085册

書號: 500開本: 787×1092 $\frac{1}{8}$ 印張26 $\frac{3}{4}$ 插頁1頁609千字定價(10)4.00元

目 錄

第一章 均勻線的一次參數

(I) 架空明線	1
§ 1.1 銅線和鋼線的直流電阻和電感	1
§ 1.2 雙金屬線的直流電阻和電感	4
§ 1.3 集膚效應	5
§ 1.4 架空明線高頻時的有效電阻和內電感的計算	7
§ 1.5 架空明線的電容和漏導	11
§ 1.6 架空明線的幻路參數	12
(II) 電 纜	14
§ 1.7 鉛皮電纜參數的變動	14
§ 1.8 鉛皮電纜參數的計算	17
§ 1.9 同軸電纜	19

第二章 均勻傳輸線

§ 2.1 均勻傳輸線的公式	23
§ 2.2 特性阻抗	26
§ 2.3 傳播常數	28
§ 2.4 β 和 α 的計算	28
§ 2.5 衰耗單位, 電平	30
§ 2.6 阻抗配合線上電壓與電流的分佈	32
§ 2.7 波長, 傳播速度	33
§ 2.8 均勻線上產生的畸變	36
§ 2.9 無畸變傳輸	37
§ 2.10 均勻綫上的波	38
§ 2.11 具有矩形波前的投射波	40
§ 2.12 具有矩形波前的反射波	41
§ 2.13 負載為任意阻抗時電壓和電流沿線的分佈	43
§ 2.14 均勻線的輸入阻抗	50
§ 2.15 均勻線輸入阻抗和頻率的關係	52
§ 2.16 利用虛想斷路或短路線求均勻線上的電壓和電流	52
§ 2.17 均勻線的工作衰耗和介入衰耗	54
§ 2.18 由測量得到的斷路及短路阻抗值求均勻線的參數	58

第三章 二端網絡

§ 3.1 網絡阻抗的一些定義	61
§ 3.2 網絡的方程式	62

§ 3.3 基本的二端網絡	64
§ 3.4 純電抗二端網絡的討論	65
§ 3.5 福斯特電抗定理	73
§ 3.6 純電抗二端網絡的構成	76
§ 3.7 福斯特定理的推廣	79
§ 3.8 由電阻與電抗元件構成的二端網絡	83
§ 3.9 等效及潛在等效二端網絡	87
§ 3.10 倒量網絡	89
第四章 四端網絡	358
§ 4.1 四端網絡的一般概念	360
§ 4.2 四端網絡的方程式	93
§ 4.3 四端網絡彼此連接的方法	99
§ 4.4 四端網絡的輸入阻抗	104
§ 4.5 四端網絡的影像阻抗及轉移常數	105
§ 4.6 用影像阻抗及轉移常數表示四端網絡方程式及輸入阻抗方程式	107
§ 4.7 依影像阻抗配合原則鏈索連接的網絡	110
§ 4.8 疊接阻抗 Z_k 及疊接傳輸常數 θ_k	111
§ 4.9 依疊接阻抗配合原則連接的網絡	112
§ 4.10 幾種常見四端網絡的參數	113
§ 4.11 衰耗器的計算	119
§ 4.12 等效四端網絡	124
§ 4.13 工作衰耗和介入衰耗	130
§ 4.14 工作衰耗及介入衰耗的加法	135
§ 4.15 變量器	140
§ 4.16 配合變量器	143
第五章 由若干均勻線段組成的回路	
§ 5.1 組成(不均勻)回路的概念	151
§ 5.2 組成回路看作無源不對稱四端網絡	152
§ 5.3 組成回路的特性阻抗	156
§ 5.4 組成回路輸入阻抗與特性阻抗的分析	156
§ 5.5 組成回路的固有衰耗	160
§ 5.6 組成回路的工作衰耗	163
§ 5.7 計算輸入阻抗的方法	166
§ 5.8 週期性重複的不均勻回路	167
§ 5.9 分支回路	173
第六章 通信電纜的電氣特性	
§ 6.1 利用加感減低回路衰耗	177
§ 6.2 關於集中加感回路的概念	180
§ 6.3 加感回路的傳播常數	182

§ 6.4	加感回路的特性阻抗	186
§ 6.5	加感電纜回路的參數	188
§ 6.6	加感電纜回路特性計算的舉例	196
§ 6.7	加感電纜回路的畸變及其減輕方法	198
§ 6.8	增加加感電纜的通信距離與加感制度	207
§ 6.9	加感電纜回路的多重利用	208
§ 6.10	加感電纜回路輸入阻抗與第一個線圈位置的關係	212
§ 6.11	由於不均勻加感節距，特性阻抗的偏移	217
§ 6.12	無加感電纜介入架空明綫	223
§ 6.13	藉用四端網絡來配合架空回路和介入電纜間的波阻抗	233
§ 6.14	提高電感的介入電纜	237
§ 6.15	無加感電纜的多重利用	242

第七章 濾波器

§ 7.1	濾波器的概念	244
§ 7.2	純電抗網絡的衰耗與位移	244
§ 7.3	定K型濾波器	249
§ 7.4	m型濾波器	257
§ 7.5	雙m型帶通濾波器	270
§ 7.6	高次m導出型濾波器	281
§ 7.7	變抗濾波器	285
§ 7.8	濾波器元件中含有損耗時的衰耗和相移常數	289
§ 7.9	濾波器設計方法與舉例	297
§ 7.10	濾波器的工作衰耗	300
§ 7.11	濾波器的並連使用	308

第八章 格型濾波器和晶體濾波器

(I)	格型濾波器	317
§ 8.1	導言	317
§ 8.2	傳送與衰耗的條件	318
§ 8.3	近似問題	319
§ 8.4	一些有用的格型網絡性能	321
§ 8.5	各種濾波器的阻抗函數和指引函數	322
§ 8.6	網絡構造與諸函數的關係	324
§ 8.7	頻率變換	326
§ 8.8	邵二決定參數法	327
§ 8.9	例題	335
§ 8.10	格型濾波器的等效網絡	339
(II)	晶體濾波器	341
§ 8.11	導言	341
§ 8.12	晶體的等效電路	341

§ 8.13 簡單格型帶通濾波器	342
§ 8.14 帶通濾波器的複合節	343
§ 8.15 由晶體與電容器構成的帶通濾波器	346
§ 8.16 由晶體，電容器與線圈組成的帶通濾波器	347
§ 8.17 由多個晶體組成的濾波器	352
§ 8.18 橋 T 型晶體濾波器	355

第九章 均衡器（等化器）

(I) 衰耗均衡器	357
§ 9.1 均衡器的意義	357
§ 9.2 常用衰耗均衡器的分類	
§ 9.3 二端衰耗均衡器的設計	
§ 9.4 定阻梯型均衡器的設計	
§ 9.5 格型衰耗均衡器	379
§ 9.6 梯型、格型與橋 T 型衰耗均衡器的互換	383
(II) 相位均衡器	385
§ 9.7 相位均衡器的意義	385
§ 9.8 相位均衡器的基本型式	386
§ 9.9 相位均衡器的計算法	388
§ 9.10 按相位曲綫來設計相位均衡器	389
§ 9.11 相位均衡器公式的推導	393
§ 9.12 設計例題	400
§ 9.13 按遲延時間的頻率特性計算相位均衡器	404

第十章 電報回路的瞬態

§ 10.1 引言	408
§ 10.2 赫維塞運算法	408
§ 10.3 赫維塞公式	410
§ 10.4 福氏級數對非週期函數的應用	414
§ 10.5 福氏積分	416
§ 10.6 利用福氏積分求電流的方法	421
§ 10.7 求複雜回路裏電流增長曲綫的方法	423
§ 10.8 電報綫終端電流增長曲綫的求法	426
§ 10.9 求綫終端電流增長速度的原則	429
§ 10.10 試驗法求電流增長曲綫	431
§ 10.11 求不均勻電報回路終端電流增長的速度	434
§ 10.12 不均勻回路和均勻回路電氣特性對比的實用法則	434
§ 10.13 求輸入電流曲綫的疊加方法	435
§ 10.14 正弦電勢的頻譜	437

附 錄：

A. 柱形導綫的高頻電阻和內電感	442
B. 穿透深度	447
C. 矩陣代數	449
D. 純電抗二端網的電抗曲綫斜率為正及 $\left \frac{dx_{11}}{d\omega} \right \geq \left \frac{x_1}{\omega} \right $ 條件的證明	450
E. 中分定理的證明	465
F. 雅可賓橢圓函數	466
G. 符號表示說明	469

第一章 均勻線的一次參數

均勻線按其構造來分，有架空明線和電纜。架空明線就是架到電桿上的線，有銅線，鐵線和銅覆鋼線。電纜有鉛皮電纜和同軸電纜，鉛皮電纜就是許多軟銅芯線，彼此以空氣-紙絕緣，然後包以鉛皮。同軸電纜就是一根實心銅線作為一根導線，而外罩一空心銅管，作為另一導線。各種不同線種，性能不同，用途也不同。各種線種的性能都可以用它每公里長的電阻，電感，電容和漏導來表示。這四項值能表示均勻線的性能，但是它們本身或者隨溫度氣候而改變，或者隨頻率而改變。所以電阻，電感，電容和漏導叫作均勻線參數（或稱均勻線的一次參數）。它們都是分佈性的。現在分別來敘述計算它們的方法。

〔I〕 架空明線

§1.1 銅線和鋼線的直流電阻和電感

設 ρ 代表在 20°C 時，導線金屬的電阻係數， d 是其直徑的公厘數。則一公里長導線的直流電阻 R'_0 是：

$$R'_0 = \rho \frac{1275}{d^2} \quad (1.1)$$

一般說均勻線的電阻若干，就是指一公里長導線的電阻。當指一個回路的，即來回兩根導線電阻的時候，則稱每對公里導線的電阻若干。這時，應把 (1.1) 式值乘以 2。

導線的電阻是隨溫度而改變的。當溫度不等於 20°C ，其電阻按下列公式計算：

$$R_t = R'_0 [1 + \sigma(t - 20^{\circ})] \quad (1.2)$$

式中 R_t 是溫度等於 $t^{\circ}\text{C}$ 時的電阻。 σ 是 20°C 時導線的温度係數。

一般常用導線金屬的 ρ 和 σ 列於表 1.1。一般常用的各種直徑的銅線和鐵線每公里長的直流電阻列於表 1.2。

由這個表看出，直徑粗的導線電阻較小，而同直徑的鐵線電阻比銅線的約大七

表 1.1

名 稱	電 阻 係 數 ρ —歐 (公厘) ² /公尺	溫 度 係 數 σ
銅	0.01785	0.0039
鋁	0.0291	0.0037
鐵	0.139	0.0046

表 1.2

名 稱	導 線 直 徑 (公 厘)	電 阻 (歐/公里)
硬 銅 線	4.0	1.42
	3.5	1.86
	3.0	2.52
	2.5	3.63
鐵 線	5.0	7.04
	4.0	11.05
	3.0	19.66
	2.5	28.2
	2.0	41.0
	1.5	78.5
	1.2	122.0

至八倍，所以對通信質量要求較高的地方採用粗線或銅線。一般要考慮到經濟關係，採用細的銅線或鐵線。

現在來討論架空銅線和鐵線的直流電感，以 a 代表兩導線軸心間距離，以 r 代表導線的半徑。因為我們用的架空線， $a \gg r$ 。所以仍可設各導線電流產生的磁通是許多同心圓。計算一根導線的電感再乘 2 即可。

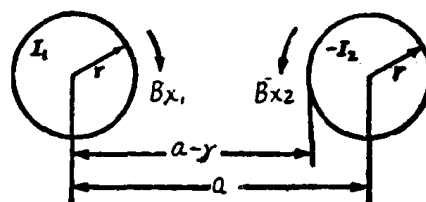


圖 1.1

現在計算導線 I 的電感。電感就是用通過導線的電流去除由其產生的磁鏈即可。由導線 I 內電流產生的磁鏈可分四部分討論：（1）在導線 I 內部的磁鏈；（2）在兩導線中間的磁鏈；（3）跨越導線 II 的；（4）在導線 II 以外的。但是第（4）部分磁鏈會被導線 II 的電流在該處產生的磁鏈對消掉，可以不計。而第（3）部分磁鏈中，在導線 II 軸心以左，某一磁通所環鏈的匝數和軸心以右相對稱位置的磁通所環鏈的匝數之和，可以看作只計該軸心以左的磁通環鏈導線 I 全匝。而將其軸心以右部分從略，計算出來，無大誤差。

參看圖 1.2，假定電流密度是均勻的，則導線截面以內和以外的磁力綫都是許多同心圓。按全電流公式，計算得截面內 x 點的磁化力是：

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x},$$

而 $I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I$: (I 是全電流, I_x 是產生 H_x 的電流) x 處的磁通密度 $B_x = \mu_o \mu_r H_x = \mu_o \mu_r \frac{I_x}{2\pi r^2}$

(μ_o 為空氣的磁導係數, μ_r 為導體的相對磁導係數)。

在 dx 環內產生的磁通量等於該處的磁通密度乘垂直於該磁通的面積。則單位長導線 dx 環內的磁通是:

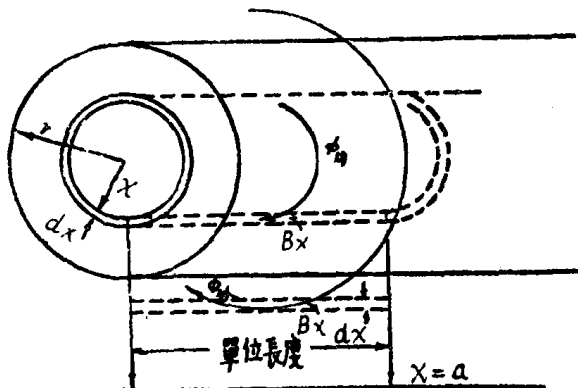


圖 1.2

$$d\phi_x = B_x dx = \mu_o \mu_r \frac{I_x}{2\pi r^2} dx.$$

這樣, 導線內部電感得

$$L_{內} = \frac{N\phi}{I} = \frac{1}{I} \int_0^r \frac{\pi x^2}{\pi r^2} \mu_o \mu_r \frac{I_x}{2\pi r^2} dx = \frac{\mu_o \mu_r}{8\pi} \text{ 亨/公尺。} \quad (1.3)$$

仿照同樣的辦法, 導線 I 以外各點的磁通密度是:

$$B_x = \mu_o \mu_r H_x = \mu_o \mu_r \frac{I}{2\pi x}.$$

所以, 由導線 I 表面到導線 II 軸心環鏈的磁通產生的電感, 叫作外電感, 等於

$$L_{外} = \frac{1}{I} \int_r^a \frac{\mu_o \mu_r I}{2\pi x} dx = \frac{\mu_o \mu_r}{2\pi} \ln \frac{a}{r}. \quad (1.4)$$

故導線 I 的電感是

$$L_o = L_{內} + L_{外} = \frac{\mu_o}{4\pi} \left(\frac{\mu_r}{2} + 2 \ln \frac{a}{r} \right)$$

而由導線 I 和導線 II 產生的總電感是:

$$L = 2L_o = 2 \times \frac{\mu_o}{4\pi} \left(\frac{\mu_r}{2} + 2 \ln \frac{a}{r} \right)$$

因為 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$, 並設長 1 公里,

$$\left. \begin{aligned} \text{則 } L &= \left(\mu_r + 4 \ln \frac{a}{r} \right) \times 10^{-4} \text{ 亨/公里,} \\ \text{或 } L &= \left(0.1 \mu_r + 0.92 \log \frac{a}{r} \right) \times 10^{-3} \text{ 亨/公里.} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

距地面 h 高的單導線電感是：

$$L = \frac{1}{2} \left(0.1\mu_r + 0.92 \log \frac{2h}{r} \right) \times 10^{-3} \text{亨/公里。} \quad (1.6)$$

由公式中看出，鐵線電感比同直徑的銅線電感要大，而導線間距離愈大，線徑愈細，電感就愈大。

§1.2 雙金屬線的直流電阻和電感

雙金屬線的直流電阻可以看作是由導線「心部」直流電阻和環套直流電阻並聯組成。設 R'_{01} 代表該導線中心部分的直流電阻，而 R'_{02} 代表環套的直流電阻，則雙金屬線的直流電阻 R'_0 是：

$$R'_0 = \frac{R'_{01} R'_{02}}{R'_{01} + R'_{02}}. \quad (1.7)$$

雙金屬線的外電感計算方法和上節一樣，計算結果就是 (1.4) 式的形狀。但是計算其內電感就複雜的多。圖 1.3 是半徑為 r 的雙金屬導線的橫截面，它的心部的半徑為 r_1 ，電流為 I_1 ，磁鏈為 λ_1 。環套內的電流為 I_2 ，磁鏈為 λ_2 。則在單位長導線心部任一點 x ，可求得

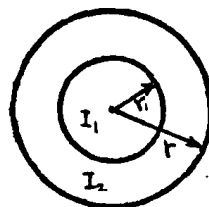


圖 1.3

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x}; \quad d\varphi_x = \mu_0 \mu_{r1} \frac{I_x}{2\pi x} dx,$$

式中 μ_{r1} 為心部導體的相對磁導係數。

又 $I_x = \frac{x^2}{r_1^2} I_1$ ，及該磁通所環鏈的匝數，對 I_1 說，等於 $\frac{x^2}{r_1^2}$ ；而對全電流 I

$= I_1 + I_2$ 說，應等於 $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{x^2}{r_1^2}$ ，其中 R_1 和 R_2 分別代表心部和環套的電阻。

所以心部電流 I_1 在心部產生的磁鏈為

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \int_0^{r_1} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{x^2}{r_1^2} \right) \left(\frac{\mu_0 \mu_{r1}}{2\pi x} \frac{x^2}{r_1^2} I_1 dx \right) \\ &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0 \mu_{r1}}{8\pi} I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \frac{\mu_0 \mu_{r1}}{8\pi} I. \end{aligned}$$

在 $r_1 \leq x \leq r$ 的範圍內，由 I_1 產生的磁通是：

$$d\varphi_x = \mu_0 \mu_{r2} H_x dx; \quad \mu_{r2} \text{ 為外部導體的相對磁導係數，而 } H_x = \frac{I_1}{2\pi x}.$$

由 I_2 產生的磁通是

$$d\varphi'_x = \mu_0 \mu_{r2} H'_x dx; \text{ 而 } H'_x = \frac{I'_x}{2\pi x} = \frac{1}{2\pi x} \frac{x^2 - r_1^2}{r^2 - r_1^2} I_2。$$

以上兩部分磁通總和所環鏈的匝數是：

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{x^2 - r_1^2}{r^2 - r_1^2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

所以 I_1 及 I_2 在 r_1 到 r 間產生的磁鏈為

$$\lambda_2 = \int_{r_1}^r \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{x^2 - r_1^2}{r^2 - r_1^2} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right] \left[\mu_0 \mu_{r2} \left(\frac{I_1}{2\pi x} + \frac{1}{2\pi x} \frac{r_2^2 - r_1^2}{r^2 - r_1^2} I_2 \right) \right] dx。$$

每根單位長的雙金屬線內電感等於

$$\begin{aligned} L_{\text{內}} &= \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{I}, = \\ &= \frac{\mu_0 \mu_{r1}}{8\pi} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^2 + \frac{\mu_0 \mu_{r2}}{2\pi(\rho_1 A_2 + \rho_2 A_1)^2} \left[\rho_1^2 \pi^2 \frac{r^4 - r_1^4}{4} + \right. \\ &\quad \left. + A_1^2 (\rho_2 - \rho_1)^2 \ln \frac{r}{r_1} + \rho_1 A_1 A_2 (\rho_2 - \rho_1) \right]。 \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中 ρ_1 和 ρ_2 分別代表導線心部和環套的電阻係數，而 A_1 和 A_2 分別代表導線心部和環套的面積。

結合(1.4)式與(1.8)式，可得由兩根雙金屬導線所做的回路，其每對公里的電感是：

$$\begin{aligned} L &= 0.92 \log \frac{a}{r} + 0.1 \mu_{r1} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^2 + 0.4 \frac{\mu_{r2}}{(\rho_1 A_2 + \rho_2 A_1)^2} \\ &\quad \left[\rho_1^2 \pi^2 \frac{r^4 - r_1^4}{4} + A_1^2 (\rho_2 - \rho_1)^2 \ln \frac{r}{r_1} + \rho_1 A_1 A_2 (\rho_2 - \rho_1) \right] \text{ 毫亨/公里。} \end{aligned} \quad (1.9)$$

§1.3 集 膚 效 應

當導線傳送交流時，其有效電阻值將隨頻率的增高而加大，但其內電感則隨頻率的增高而降低，現在來討論它的原因。設將導線截面積分成許多面積相等的同心圓環。那末，各環的直流電阻就相等，且彼此構成並連電路，各環內的電流密度也

相等。

當傳送交流時，交變磁場在導線內誘生反電勢。磁場愈強及頻率愈高，反電勢就愈大。

但是各環內的反電勢並不相同，愈靠近導線的軸心，被環鏈的磁通愈多，所以愈靠近軸心，反電勢愈大，因而電流密度愈小，也就是電流趨於沿表面傳導。這種現象叫作集膚效應。頻率非常高時，導線中心實際上沒有多少電流。

因為導線內部的電流密度減小，就相當於把傳送電流的有效面積減小，自然，其有效電阻就加大，因為電流向表面集中，所以其內電感減小。

表 1.3

$X=mr$	K_1	K_2	X	K_1	K_2	X	K_1	K_2
0.0	1.0	1.0	4.0	1.687	0.688	12.5	4.680	0.226
0.1	1.0	1.0	4.1	1.715	0.671	13.0	4.856	0.217
0.2	1.00001	1.0	4.2	1.752	0.657	13.5	5.033	0.209
0.3	1.00004	1.0	4.3	1.789	0.643	14.0	5.209	0.202
0.4	1.00013	1.0	4.4	1.826	0.629	14.5	5.386	0.195
0.5	1.00032	1.0	4.5	1.863	0.616	15.0	5.562	0.188
0.6	1.00067	1.0	4.6	1.899	0.603	16.0	5.915	0.176
0.7	1.00124	0.999	4.7	1.935	0.590	17.0	6.268	0.166
0.8	1.00212	0.999	4.8	1.971	0.579	18.0	6.621	0.157
0.9	1.0034	0.998	4.9	2.007	0.567	19.0	6.974	0.149
1.0	1.005	0.997	5.0	2.043	0.556	20.0	7.328	0.141
1.1	1.008	0.996	5.2	2.114	0.535	21.0	7.681	0.135
1.2	1.011	0.995	5.4	2.184	0.516	22.0	8.034	0.126
1.3	1.015	0.993	5.6	2.253	0.498	23.0	8.741	0.123
1.4	1.02	0.996	5.8	2.324	0.481	24.0	8.887	0.118
1.5	1.026	0.987	6.0	2.394	0.465	25.0	9.094	0.113
1.6	1.033	0.983	6.2	2.463	0.451	26.0	9.446	0.109
1.7	1.042	0.979	6.4	2.533	0.436	27.0	9.797	0.105
1.8	1.052	0.974	6.6	2.603	0.424	28.0	10.154	0.101
1.9	1.064	0.968	6.8	2.673	0.412	29.0	10.508	0.098
2.0	1.078	0.961	7.0	2.743	0.400	30.0	10.861	0.094
2.1	1.094	0.953	7.2	2.813	0.389	32.0	11.568	0.088
2.2	1.111	0.945	7.4	2.884	0.379	34.0	12.275	0.083
2.3	1.13	0.935	7.6	2.954	0.369	36.0	12.982	0.079
2.4	1.152	0.925	7.8	3.024	0.360	38.0	13.688	0.074
2.5	1.175	0.913	8.0	3.094	0.351	40.0	14.395	0.071
2.6	1.2	0.901	8.2	3.165	0.343	42.0	15.102	0.067
2.7	1.227	0.888	8.4	3.235	0.335	44.0	15.809	0.064
2.8	1.256	0.874	8.6	3.306	0.327	46.0	16.516	0.061
2.9	1.286	0.860	8.8	3.376	0.320	48.0	17.223	0.059
3.0	1.318	0.845	9.0	3.446	0.313	50.0	17.930	0.057
3.1	1.351	0.830	9.2	3.517	0.306	60.0	20.465	0.047
3.2	1.385	0.814	9.4	3.587	0.299	70.0	25.001	0.040
3.3	1.42	0.798	9.6	3.658	0.293	80.0	28.536	0.035
3.4	1.456	0.782	9.8	3.728	0.287	90.0	32.071	0.031
3.5	1.492	0.766	10.0	3.799	0.282	100	35.607	0.028
3.6	1.529	0.743	10.5	3.975	0.268			
3.7	1.566	0.733	11.0	4.151	0.256			
3.8	1.603	0.717	11.5	4.327	0.245			
3.9	1.64	0.702	12.0	4.504	0.235			

導線的導磁係數愈大，其內部磁通愈多。反電勢的作用愈大，所以，集膚效應愈顯著。

導線的截面積愈大，電流密度改變時，其有效面積百分比的變化愈大，所以，其集膚效應愈顯著。

導線的導電率愈大，電流愈易通過，電流密度也易發生變化，其集膚效應愈顯著。

因為頻率愈高，電流愈集中到導線表面，所以在較高頻率時導線中心可以換成價值較廉的金屬，這就是使用銅覆鋼線的原因。

§ 1.4 架空明線高頻時的有效電阻和內電感的計算

由上節所講，知道當導線傳送高頻電流時，因為集膚效應的影響，其電阻值和內電感值都有所改變。其變化的數值計算起來很複雜，需用貝塞爾函數，計算的步驟列於附錄 I。計算的結果分別列於表 1.3 和表 1.5。

表 1.3 是用於計算銅線和鐵線的有效電阻和內電感已知線種和使用頻率，可先算出 x ，由表 1.3 中查得 K_1 ，乘以直流電阻，就得有效電阻。查得 K_2 ，乘以直流的內電感值，就得該頻率時的內電感。例如，擬計算 4.0 公厘銅線在 10,000 赫時的有效電阻和內電感，則

$$x = mr = r \sqrt{\frac{\omega \mu}{\rho}} = \frac{0.004}{2} \sqrt{\frac{2\pi \times 10^4 \times 4\pi \times 10^{-7}}{1.78 \times 10^{-8}}} = 3.$$

由表 1.3 查得 $K_1 = 1.318$ 和 $K_2 = 0.845$ 。所以

$$R_{10,000} = 1.318 R_{\text{直流}},$$

$$L_{\text{內 } 10,000} = 0.845 L_{\text{內直流}}.$$

因為計算有效電阻之先，必先計算直流電阻，所以將 x 的公式，變換成和 R'_0 (直流電阻) 有關係的式子，使用起來更方便些。

$$\begin{aligned} \text{因} \quad x &= r \sqrt{\frac{\omega \mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{f \mu_r 8\pi \times 10^{-7}}{\frac{\rho}{\pi r^2}}}, \\ x &= \sqrt{\frac{f \mu_r \times 8\pi}{(R'_0 \times 10^3) 10^4}} = 5.01 \sqrt{\frac{f \mu_r}{10^4 R'_0}}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中 R'_0 代表每公里的導線直流電阻。

倘若 R'' 代表每對公里的導線直流電阻，則

$$x = 5.01 \sqrt{\frac{f \mu_r}{10^4 R''/2}} = 7.09 \sqrt{\frac{f \mu_r}{10^4 R''}}. \quad (1.11)$$

所以知道使用頻率，線種後，很易算出其直流電阻，進而按(1.10)或(1.11)式算出 α 。由表1.3查出 K_1 和 K_2 ，再計算有效電阻和內電感。

計算時，應特別注意單位，且 K_2 只是表示內電感的變化。求總電感時，必須另加外電感一項。

計算 α 時，銅線和鐵線的相對導磁係數是：

銅導線=1

鐵導線=120~140

鋼導線=80~100

使用單導線時，鐵導線的相對導磁係數必須採用140。

圖1.4和圖1.5畫出了頻率到40仟赫範圍內幾種銅線和鐵線的有效電阻和電感對頻率變化的情形。

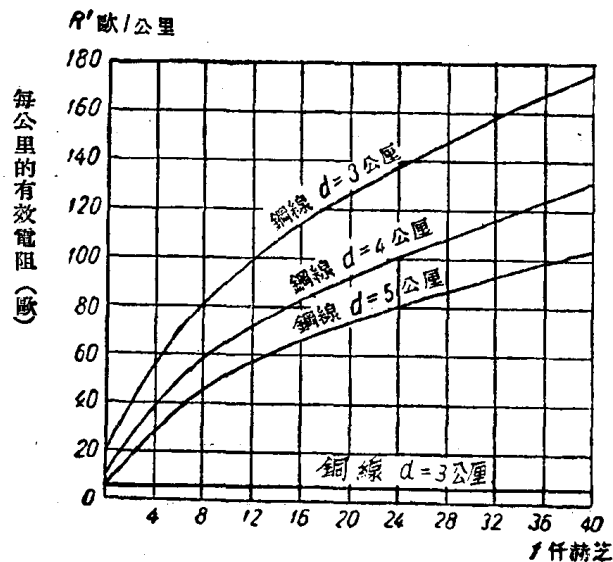


圖 1.4

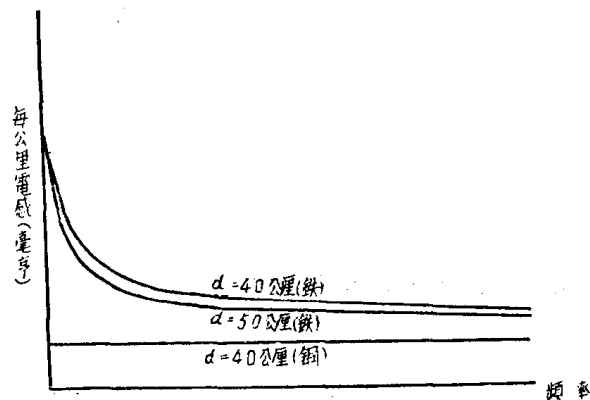


圖 1.5

由圖1.4看出，細線的電阻隨着頻率增長的速率比粗線快，而鐵線的電阻比銅線的變化大。例如，到40仟赫，3.0公厘銅線的電阻只是其直流電阻的2.5倍，而同直徑鐵線這時的電阻是其直流電阻的9倍。因為銅線的相對導磁係數很小，而鐵線的很大，所以同直徑的銅線和鐵線相比較，後者的內電感要大得多，從而鐵線的電感要比銅線大。頻率增高時，只是內電感要下降，所以頻率增高時，銅線的電感變化很小，而鐵線的電感要下降。

集膚效應對雙金屬線的影響，要複雜的多。因為頻率增高時，鋼心部分和銅環套部分都有集膚效應。且鋼心部分的集膚效應不只是使電流趨向其表面，而且要跨過其表面，進入到銅環套裏面去。這樣，頻率不斷增高時，在雙金屬導線的截面裏，不只是鋼心部分和銅環部分本身內的電流密度在不斷變化，而這兩部分通過的電流量對比關係，也在不斷變化，所以計算起來非常複雜。

為了使計算化簡起見，可以把雙金屬線的集膚效應分作兩種情況來討論，就是在低頻時和在高頻（8000赫以上）時。

在低頻時，因為銅環套很薄，集膚效應的影響不顯着，可以忽略不計。只計算鋼心部分的集膚效應。這時，它的有效電阻等於

$$R' = \frac{R'_1 R'_2}{R'_1 R'_2} \text{ 歐/公里,} \quad (1.12)$$

式中 R'_2 代表銅環套的直流電阻， R'_1 等於鋼心部分的直流電阻乘 K_1 ， K_1 值是由表1.3查得的。

它的內電感仍可參照 (1.8) 式計算，但其 R_1 應改為 R'_1 ，同時 A_1 應改為考慮集膚效應後，電流通過的實效面積。

在高頻時，則可假設全部電流在環套內通過，而鋼心部分沒有電流，則其有效電阻和內電感是

$$R' = R'_{02} \left(1 - \frac{\theta}{d} \right) K' \text{ 歐/公里,} \quad (1.13)$$

$$L'_{\text{內}} = \frac{\mu_{r2}}{2} 10^{-4} \frac{\theta}{d} K'' \text{ 亨/公里,} \quad (1.14)$$

式中 R'_{02} 是環套每公里的直流電阻， θ 代表環套的厚度， d 代表導線直徑（ θ 與 d 的單位應相同）， μ_{r2} 是環套的相對磁導係數。

(1.13) 與 (1.14) 兩式的推導可參閱附錄工。頻率愈高，由這兩式計算的結果愈準確。其中 K' 和 K'' 是 y 的函數，列於表1.4。

$$y = 20\theta \sqrt{\frac{f\mu_2}{\rho_2}}, \quad (1.15)$$

θ 是環套厚度的公尺數。如果環套是銅的，且 θ 以公分表示，則

$$y = 0.15\theta\sqrt{f} \quad (1.16)$$

表 1.4

y	K'	K''	y	K'	K''
0.1	0.94	160	1.3	1.41	2.7
0.2	0.97	100	1.4	1.5	2.5
0.3	1.00	62	1.5	1.63	2.4
0.4	1.02	38	1.6	1.66	2.3
0.5	1.04	24	1.7	1.74	2.2
0.6	1.06	14	1.8	1.83	2.1
0.7	1.09	8	1.9	1.90	2.0
0.8	1.13	6	2.0	1.99	1.9
0.9	1.17	5	2.5	2.5	1.6
1.0	1.23	4	3.0	3.0	1.3
1.1	1.28	3.2	3.5	3.5	1.1
1.2	1.34	2.9	4.0	4.0	1.0
			74.0	y	$\frac{4}{y}$

圖1.6畫出了雙金屬導線 $d=4.0$ 公厘， $\theta=0.4$ 公厘的有效電阻和電感對頻率的關係。爲了比較起見，在該圖上也畫出了同直徑銅導線的電阻和電感對頻率的關係。由圖上看出，在高頻時，雙金屬線的性能和同直徑銅導線的性能非常接近。所以，從經濟觀點來看，從機械強度來看，在高頻時，將銅導線的心部換成鋼導線是很恰當的。

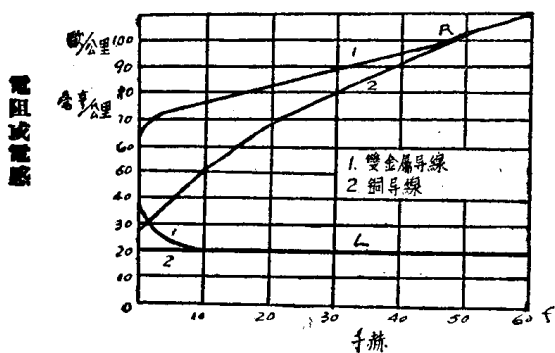


圖 1.6

實際上，頻率用到40仟赫時，銅環的厚度 θ 等於0.4公厘即可。而用到150仟赫時，銅環厚度 θ 只要0.2—0.25公厘就可以，這樣就可以節省75%的銅。

例：求10,000赫時一公里4.0公厘銅覆鋼線的有效電阻和內電感，銅環厚0.4公厘。

銅環直流電阻

$$R'_{02} = \frac{\rho_2 1000}{\pi(d-\theta)\theta} = \frac{1000 \times 1.78 \times 10^{-8}}{\pi(3.2)0.4 \times 10^{-6}} = 3.94 \text{ 歐/公里,}$$

由 (1.16) 式

$$y = 0.15\theta\sqrt{f} = 0.15 \times 0.4\sqrt{10,000} = 0.6。$$