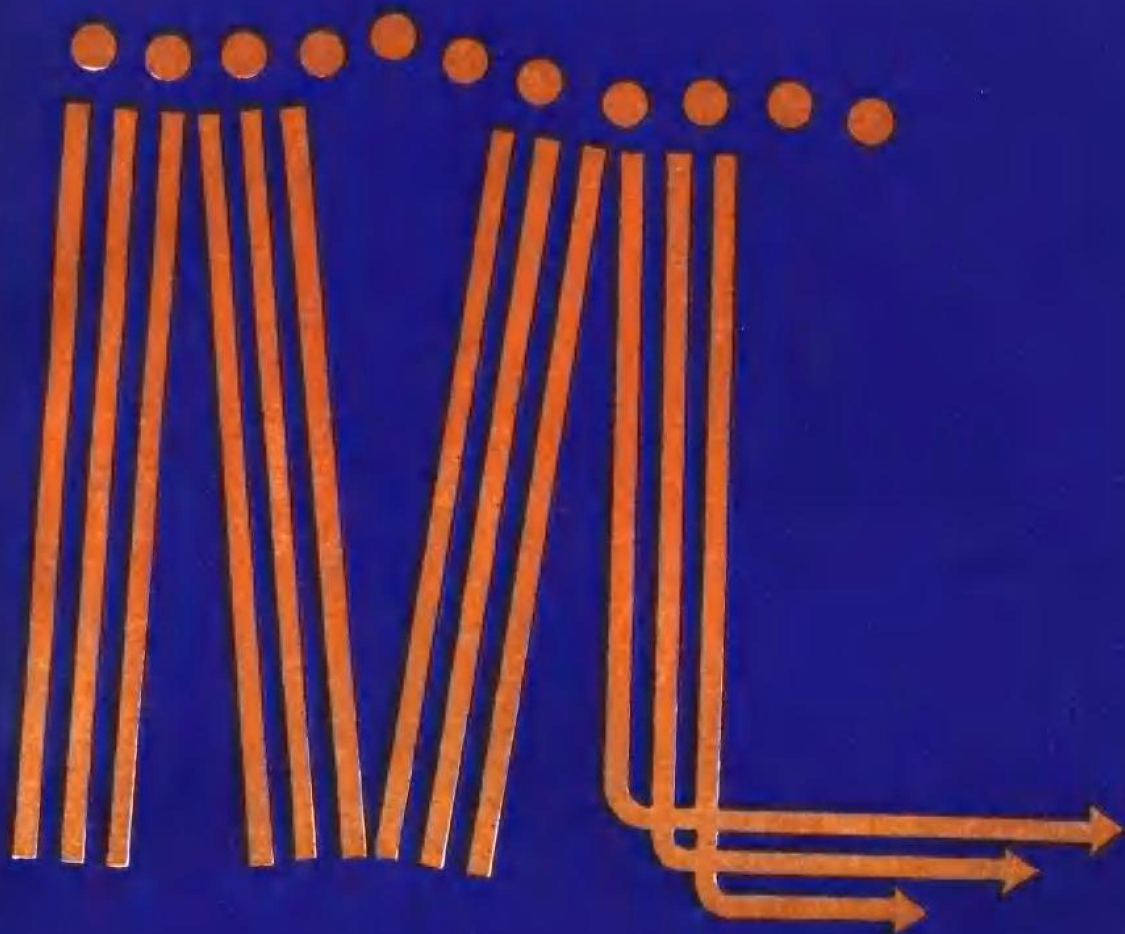




王锦春 主编

电路的计算机 辅助分析入门

内 容 简 介

本书是为高等院校电类专业学生学习《电路的计算机辅助分析》课而编写的教材。也可供非电类专业研究生和工程技术人员参考。全书包括：简单电路的机辅分析，线性电路的稳态、瞬态分析程序，非线性电路分析，容差分析，SPICE-Ⅰ程序分析及附录——线性代数方程组的求解，电路的优化设计简介。

电路的计算机辅助分析入门

王辅春 主编
责任编辑 赖毅敏

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：13 字数：299,000

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

ISBN7-5609-0143-3/TM·8

印数：1-2 000 定价：2.20元

前 言

随着计算机的广泛应用,现在几乎所有较为复杂的电路,特别是大规模集成电路(简称LSI)和超大规模集成电路(简称VLSI)都是用计算机进行辅助分析和设计的。为了使大学生适应这种新的形势和要求,有必要对电类专业高年级学生开设《电路的计算机辅助分析和设计》选修课。

目前国内有关电路机辅分析的书籍,多数篇幅庞大且偏重于理论算法。为使学生能用较少时间掌握电路机辅分析的基本算法,了解一些通用程序并能运用它去分析和解决一些电路中的问题,特编写了这本入门性教材。

参加本书编写的有:王辅春(第一、三、四、五章),程桂芬(第二章),秦毅(第六章),张秀屏(附录一,二),由王辅春负责主编。1984年9月,机械工业部部属高等院校理论电工第四次学科协作组会议对该书进行了评审。认为它可作为电类专业学生的电路机辅分析课的教材或者用于《电路》课中讲授此部分内容的补充教材。

在进行修改和补充时,各章分工是:第一章(张秀屏),第二、三章(程桂芬、王辅春),第四、五章(王辅春),第六章(崔杜武、王辅春),附录一(张秀屏),附录二(崔杜武),仍由王辅春主编。

本书在编写过程中,除参考了国内外的一些同类教材和讲义外,还得到机械工业部部属院校的许多同志的热情支持和帮助,谨致以诚挚的谢意。

本书承蒙余庆健和肖杰生同志进行了认真审阅,并提出许多宝贵意见和建议,谨致以衷心感谢。

限于编者的水平,错误和不妥之处一定不少,请读者给予指正。

编者

1985年7月

目 录

第一章 简单电路的机辅分析	(1)
§ 1.1 梯形电阻电路.....	(1)
§ 1.2 无源三端电路的等效互换.....	(5)
§ 1.3 最大功率传递定理.....	(9)
§ 1.4 串联电路的谐振.....	(11)
§ 1.5 一、二阶电路.....	(15)
§ 1.6 利用回路法、节点法解题.....	(24)
第二章 线性电路的稳态分析	(33)
§ 2.1 元件模型.....	(34)
§ 2.2 节点分析法.....	(34)
§ 2.3 建立节点电压方程的直接法.....	(39)
§ 2.4 直流分析程序.....	(44)
§ 2.5 例题及计算结果.....	(58)
§ 2.6 线性电路的正弦稳态分析程序.....	(62)
§ 2.7 改进的节点法.....	(80)
第三章 线性电路的瞬态分析	(83)
§ 3.1 常微分方程的几种数值解法.....	(83)
§ 3.2 “瞬态伴随网络模型”分析法.....	(86)
§ 3.3 线性电路的瞬态分析程序.....	(93)
§ 3.4 状态变量法.....	(110)
§ 3.5 混合分析法.....	(118)
§ 3.6 稀疏表格法.....	(121)
第四章 非线性电路分析	(124)
§ 4.1 非线性器件的模型.....	(124)
§ 4.2 非线性电路的直流分析.....	(130)
§ 4.3 非线性电路的瞬态分析.....	(141)
第五章 容差分析	(145)
§ 5.1 容差分析的一般概念.....	(145)
§ 5.2 节点法(增量网络法).....	(147)
第六章 SPICE-I 程序分析	(157)
§ 6.1 SPICE的电路元件.....	(157)
§ 6.2 SPICE分析的类别.....	(158)
§ 6.3 模拟电路概述.....	(159)
§ 6.4 稀疏矩阵问题.....	(163)

§ 6.5 非线性电路的几个问题	(167)
§ 6.6 动态电路的瞬态分析	(169)
§ 6.7 SPICE-I 程序结构	(172)
附录一 线性代数方程组的求解	(180)
§ 1-1 问题的提出	(180)
§ 1-2 Gauss消去法的计算过程	(181)
§ 1-3 主元消去法	(185)
§ 1-4 严格主元消去法程序	(187)
附录二 电路的优化设计简介	(191)
§ 2-1 引言	(191)
§ 2-2 电路优化设计时目标函数的确定	(191)
§ 2-3 单变量优化方法	(193)
§ 2-4 利用目标函数导数的多变量优化方法	(195)
§ 2-5 多变量优化的直接搜索法——单纯形法	(199)
参考文献	(202)

第一章 简单电路的机辅分析

本章通过一些简单电路的计算,通俗地介绍利用计算机对电路进行辅助分析的初步方法。从中可以看出,机辅分析与手算相比较,不仅计算速度和精确程度大为提高,而且能进行一些模拟实验,便于较为深透地了解某些电路的性质,同时也为进一步学习CAD打下基础。

§ 1.1 梯形电阻电路

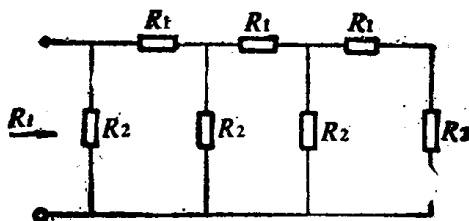


图1.1.1 梯形电阻电路

有一梯形电阻电路如图1.1.1所示,求其入端电阻 R_i 。

手算时,按电阻的串、并联公式可得

$$R_i = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1 + R_2}}}}}}$$

若用计算机进行计算,其程序如下:

```
10 INPUT R1, R2
20 RI = 1 / (1 / R2 + 1 / (R1 + 1 / (1 / R2 + 1 / (R1 + 1 / (1 / R2 + 1 / (R1 + R2))))))
30 PRINT "RI = ", RI
40 END
```

如果梯形电阻电路为多个网孔,可设想为无限多,如图1.1.2(a)所示。试求其入端电阻 R_i 。

手算时,是采用去掉一个 R_1 和 R_2 支路后,其入端电阻仍认为是 R_i 的办法,即将图1.1.2(a)改画为图1.1.2(b)。于是有

$$R_i = \frac{R_2(R_1 + R_i)}{R_2 + R_1 + R_i} \quad \therefore \quad R_i = \frac{-R_1 + \sqrt{R_1^2 + 4R_1R_2}}{2}$$

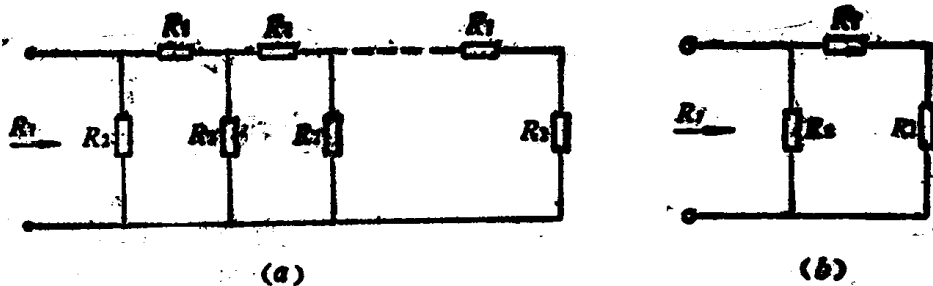


图1.1.2

(a)无限梯形电阻电路; (b)改画后的电路

如用计算机计算时, 可编写程序如下:

```

5  INPUT R1, R2, N
10 PRINT "R1=" ; R1, "R2=" ; R2, "N=" ; N
20 RI = R2
30 FOR I = 1 TO N
40 RI = RI + R1
50 RI = RI * R2 / (RI + R2)
60 NEXT I
70 PRINT "RI=" ; RI
80 END

```

只要将 N 的数值加到足够大, 就可以达到预期的目的。

我们再来研究当电阻值各不相等时的梯形电阻电路, 如图1.1.3所示。仍求其入端电阻 R_i 。

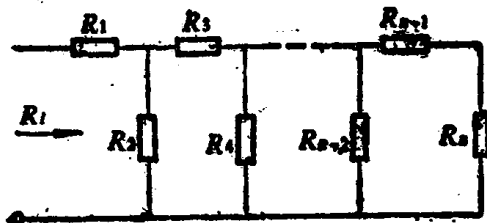


图1.1.3 梯形电阻电路

手算时, 可得

$$R_i = R_1 + \frac{1}{G_2 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{G_4 + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{\vdots + \frac{1}{R_{n-1} + 1/G_n}}}}}} \quad (1.1.1)$$

式中 $G_i = \frac{1}{R_i}$ 。这样一种表达式又称为连分式。为计算它, 要用到“收敛”的概念。令 f 为连分式:

$$f = b_0 + \frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{a_3}{b_3 + \ddots}}}$$

我们定义下面连分式为 f 的 k 阶收敛:

$$f_k = b_0 + \frac{a_1}{b_1 + \frac{a_2}{b_2 + \frac{\vdots}{\vdots + \frac{a_k}{b_k}}}} = \frac{A_k}{B_k}$$

可以证明, A_k 和 B_k 满足递推公式:

$$A_k = b_k A_{k-1} + a_k A_{k-2} \quad B_k = b_k B_{k-1} + a_k B_{k-2} \quad (1.1.2)$$

式中 $A_1 = 1$, $A_0 = b_0$, $B_1 = 0$ 和 $B_0 = 1$ 。

连分式常用在控制系统中函数和无理数的数值计算。例如, $\arctan x$ 有下面展开式:

$$\arctan x = \frac{x}{1 + \frac{x^2}{3 + \frac{4x^2}{5 + \frac{9x^2}{7 + \dots}}}} \quad (1.1.3)$$

有了递推公式可以很容易地编写程序。下面就是计算有限连分式或无限连分式 n 阶收敛的程序,

```

10  DIM A(10), B(10)
20  FOR I=1 TO 9
30  READ A(I), B(I)
40  IF (A(I)=0 AND B(I)=0 AND I > 1) THEN 60
50  NEXT I
60  M=I-1
70  AAONE=1
80  AATWO=B(1)
90  BBONE=0
100 BBTWO=1
110 FOR J=2 TO M
120 ATEMP=AATWO
130 BTEMP=BBTWO
140 AATWO=B(J)*AATWO+A(J)*AAONE
150 BBTWO=B(J)*BBTWO+A(J)*BBONE
160 AAONE=ATEMP
170 BBONE=BTEMP

```

```

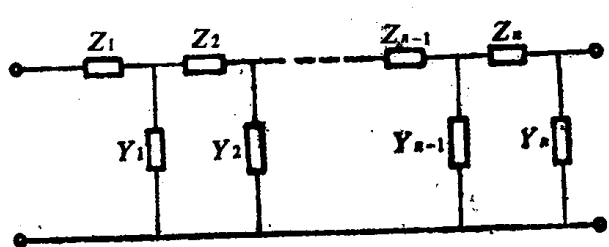
180 NEXT J
190 F = AATWO/BBTWO
200 PRINT "no" , "a" , "b"
210 FOR K=1 TO M
220 PRINT K, A(K), B(K)
230 NEXT K
240 PRINT "convergent=" , F
250 DATA 0, 0, 1, 1, 1, 3, 4, 5, 9, 7
260 DATA 16, 9, 25, 11, 36, 13, 49, 15
270 END

```

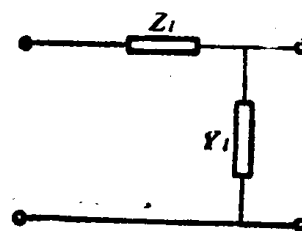
no	a	b
1	0	0
2	1	1
3	1	3
4	4	5
5	9	7
6	16	9
7	25	11
8	36	13
9	49	15

convergent = .7853972

分析梯形网络最简单的方法可能是应用传输矩阵。对图1.1.4(a)所示的梯形网络研究后
可知，它可视为由 n 个图1.1.4(b)所示的那类环节组成。如果 Z_i 和 Y_i 分别表示串联阻抗和
并联导纳，则第 i 节的传输矩阵



(a)



(b)

图1.1.4

(a)梯形网络 (b)

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 + Y_i Z_i & Z_i \\ Y_i & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.4)$$

而整个传输矩阵为

$$T = T_1 T_2 \dots T_{n-1} T_n = \prod_{i=1}^n T_i \quad (1.1.5)$$

这些矩阵乘法运算可依次由计算机执行。如果设前 r 个传输矩阵的部分积 M_r 已经求得，则

M_{r+1} 可用下式计算

$$M_{r+1} = M_r T_{r+1} \quad (1.1.6)$$

考虑式(1.1.4), 则有

$$\begin{bmatrix} A_{r+1} & B_{r+1} \\ C_{r+1} & D_{r+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + Z_{r+1} Y_{r+1} & Z_{r+1} \\ Y_{r+1} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.7)$$

或

$$\begin{aligned} A_{r+1} &= A_r(1 + Z_{r+1} Y_{r+1}) + B_r Y_{r+1} \\ B_{r+1} &= A_r Z_{r+1} + B_r \\ C_{r+1} &= C_r(1 + Z_{r+1} Y_{r+1}) + D_r Y_{r+1} \\ D_{r+1} &= C_r Z_{r+1} + D_r \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

当已知梯形网络各节的串联阻抗和并联导纳时, 就可按式(1.1.7)或式(1.1.8)编写方程进行分析。如梯形网络为无源互易网络, 则有

$$\text{Det}(M_r) = A_r D_r - B_r C_r = 1$$

可用它对计算结果的精度进行检验。具体程序略。

通过这个例题我们初步了解到手算和利用计算机解题的异同: 它们的共同点是都要依据电路理论建立起数学模型才能进行计算。但手算时强调解题的技巧, 而在用计算机计算时强调的是解题的通用性和普遍性, 所以希望将问题规格化、系列化。

§ 1.2 无源三端电路的等效互换

1. 电阻的Y(T)形联接与 $\Delta(\pi)$ 形联接的等效互换



图1.2.1

依据电路理论, 当已知 R_{12} 、 R_{23} 和 R_{31} 时, 可以得知图1.2.1(a)和(b)所示电路的等效互换公式为:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_2 &= \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \\ R_3 &= \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

当 $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$ 时, 则 $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$,

于是 $R_Y = \frac{1}{3} R_\Delta$

当已知 R_1 , R_2 和 R_3 时, 可推算出

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3}$$

$$R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}$$

$$R_{31} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}$$

(1.2.2)

据此可以编写程序如下

```

10 INPUT R12, R23, R31
15 PRINT "R12="; R12, "R23="; R23, "R31="; R31
20 S = R12 + R23 + R31
30 R1 = R12 * R31 / S, R2 = R23 * R12 / S, R3 = R31 * R23 / S
40 PRINT "R1="; R1, "R2="; R2, "R3="; R3
50 END

```

R12 = 5 R23 = 5 R31 = 10

R1 = 2.5 R2 = 1.25 R3 = 2.5

```

10 INPUT R1, R2, R3
15 PRINT "R1="; R1, "R2="; R2, "R3="; R3
20 S = R1 * R2 + R2 * R3 + R3 * R1
30 R12 = S / R3, R23 = S / R1, R31 = S / R2
40 PRINT "R12="; R12, "R23="; R23, "R31="; R31
50 END

```

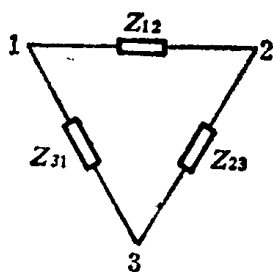
R1 = 5 R2 = 5 R3 = 10

R12 = 12.5 R23 = 25 R31 = 25

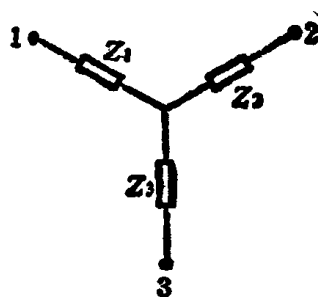
2. 阻抗的Y形联接与△形联接的等效互换

由电路理论知, △—Y联接的等效互换式为:

$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$



(a)



(b)

图1.2.2

$$Z_2 = \frac{Z_{23}Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \quad \Delta - Y \quad (1.2.3)$$

$$Z_{12} = \frac{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_3Z_1}{Z_3}$$

$$Z_{23} = \frac{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_3Z_1}{Z_1}$$

$$Z_{31} = \frac{Z_1Z_2 + Z_2Z_3 + Z_3Z_1}{Z_2} \quad Y - \Delta \quad (1.2.4)$$

式(1.2.3)和(1.2.1)及式(1.2.4)和(1.2.2)具有相同的形式,只不过是复数运算而已,据此可编写程序如下:

```

5   PRINT "⟨1—Y OR Y—⟨1"; INPUT A$; PRINT A$
10  FOR I=1 TO 3
20  READ A(I), B(I)
30  PRINT "Z", I, "=", A(I), "+J( ", B(I), " )"
35  IF A$ = "Y—⟨1" THEN M=A(I), N=B(I); GOSUB 260
40  A(0)=A(0)+A(I)
50  B(0)=B(0)+B(I)
60  NEXT I
70  M=A(0); N=B(0)
80  I=0
90  GOSUB 260
100 Q=1; I=1; J=2; GOSUB 170
110 Q=2; I=1; J=3; GOSUB 170
120 Q=3; I=2; J=3; GOSUB 170
125 PRINT
130 FOR I=1 TO 3
135 IF A$ = "Y—⟨1" THEN M=C(I); N=D(I); GOSUB 260
137 PRINT "Z'", I, "=", A(I), "+J( ", B(I), " )"; GOTO 150
140 PRINT "Z'", I, "=", C(I), "+J( ", D(I), " )"
150 NEXT I
155 DATA 2.091743, 1.972477, 1.761468, -0.1284404, 3.1, -0.33
160 END
170 X1=A(I); Y1=B(I); X2=A(J); Y2=B(J)
180 GOSUB 230
190 X1=X; Y1=Y; X2=A(0); Y2=B(0)
200 GOSUB 230
210 C(Q)=X; D(Q)=Y
220 RETURN

```

```

230  X = X1 * X2 - Y1 * Y2
240  Y = X1 * Y2 + Y1 * X2
250  RETURN
260  A(I) = M / (M^2 + N^2)
270  B(I) = - N / (M^2 + N^2)
280  RETURN

```

⟨1——Y OR Y——⟨1

Y——⟨1

Z 1 = 2.091743 + J(1.972477)

Z 2 = 1.761468 + J(-.1284404)

Z 3 = 3.1 + J(-.33)

Z' 1 = 5.000412 + J(3.000284)

Z' 2 = 8.997744 + J(4.999478)

Z' 3 = 5.998827 + J(-1.999196)

⟨1——Y OR Y——⟨1

⟨1——Y

Z 1 = 2.091743 + J(1.972477)

Z 2 = 1.761468 + J(-.1284404)

Z 3 = 3.1 + J(-.33)

Z' 1 = .6365516 + J(.322445)

Z' 2 = 1.141919 + J(.5314806)

Z' 3 = .7146745 + J(-.2964807)

⟨1——Y OR Y——⟨1

⟨1——Y

Z 1 = 3 + J(0)

Z 2 = 3 + J(0)

Z 3 = 3 + J(0)

Z' 1 = 1 + J(0)

Z' 2 = 1 + J(0)

Z' 3 = 1 + J(0)

⟨1——Y OR Y——⟨1

Y——⟨1

Z 1 = 3 + J(0)

Z 2 = 3 + J(0)

Z 3 = 3 + J(0)

Z 1 = 8.999999 + J(0)

Z 2 = 8.999999 + J(0)

Z 3 = 8.999999 + J(0)

用此程序当然可以计算电阻的△—Y交换。

§ 1.3 最大功率传递定理

从图1.3.1所示电路得知, 当 R_L 为任意值时其功率 P 为:

$$P = I^2 R_L = \left(\frac{U_s}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = f(R_L)$$

要使 P 为最大, 应使 $dP/dt = 0$, 由此可解得

$$R_L = R_0$$

此即负载获得最大功率的条件。负载所得的最大功率则为

$$P_{L_{\max}} = \frac{U_s^2}{4R_0}$$

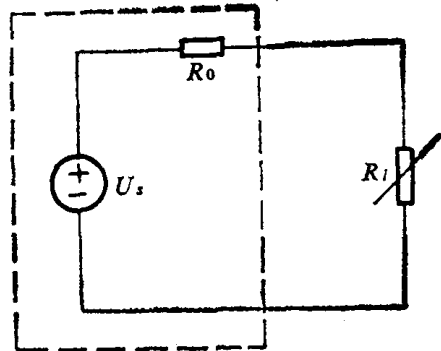


图1.3.1

根据上述原理可编写具体程序, 并可打印出负载功率 P 随 R_L 变化的曲线, 这更易看清其变化规律。

```

10 INPUT US, RO, M
20 PRINT "rO=" ; RO, "r1=" ; M, "us=" ; US
30 PRINT "plmax=" ; US^2/(4 * RO)
40 PRINT "+ .....->p"
50 FOR RL=0 TO M

```

```

ro=4.5      r1=25      cs=80
Pl max=355.5556

```

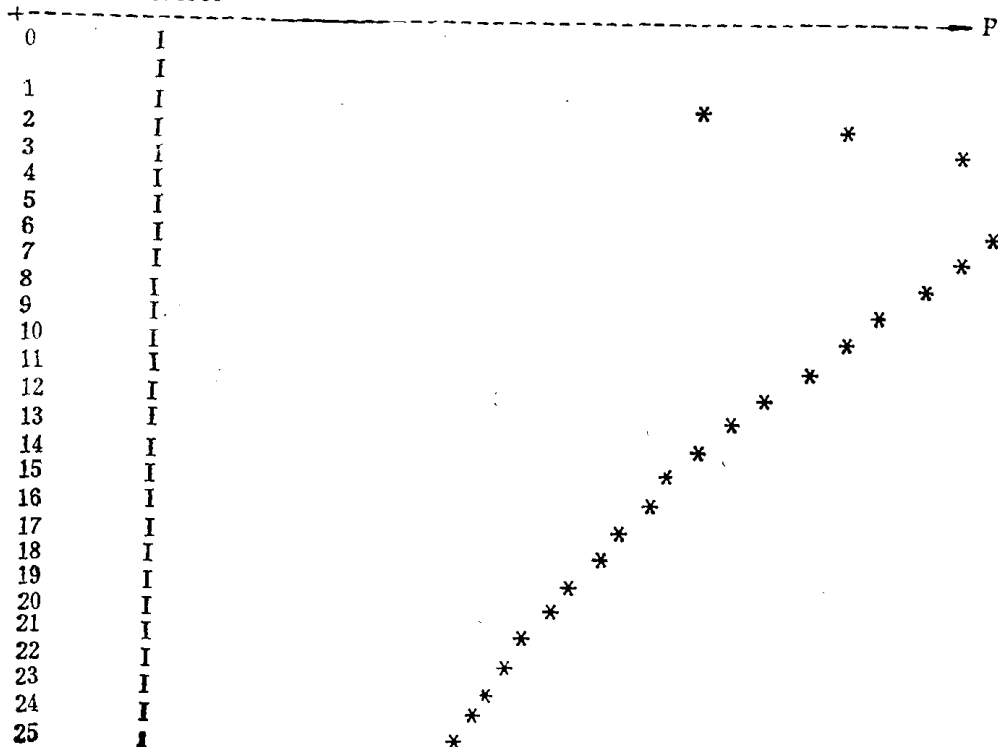


图1.3.2

```

60 P = US^2 * RL / (RO + RL)^2
70 PRINT TAB(1); RL; TAB(10); "I"; TAB(P/5); "*"
80 NEXT RL
90 END

```

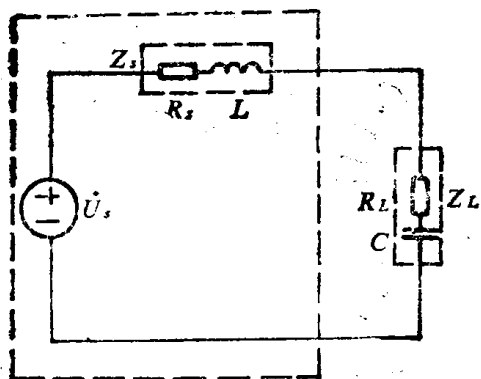


图1.3.3

1. 交流电路

我们知道，在正弦稳态电路中，负载从电源获得最大功率的条件为：

$$Z_L = \dot{Z}_s$$

即负载阻抗等于电源内阻抗的共轭复数时，负载获得的功率最大。

现在仅介绍一种功率随频率变化的情况。设电路如图1.3.3所示，交流电源电压为 $\dot{U}_s$ ，其频率可调，其内阻抗 $Z_s = R_s + j2\pi FL$ 。负载阻抗 $Z_L =$

$$R_L + \frac{1}{j2\pi FC} \text{ 于是有}$$

$$R_L = R_s$$

$$\frac{1}{2\pi FC} = 2\pi FL$$

负载功率 P 随频率 F 变化的曲线，可用下列程序打印出来。

```

10 INPUT C
20 PRINT "C="; C
30 READ US, RS, RL, L
40 DATA 5, 10, 10, 10E-3
50 FOR F=1000 TO 3000 STEP 200

```

C=0.000001

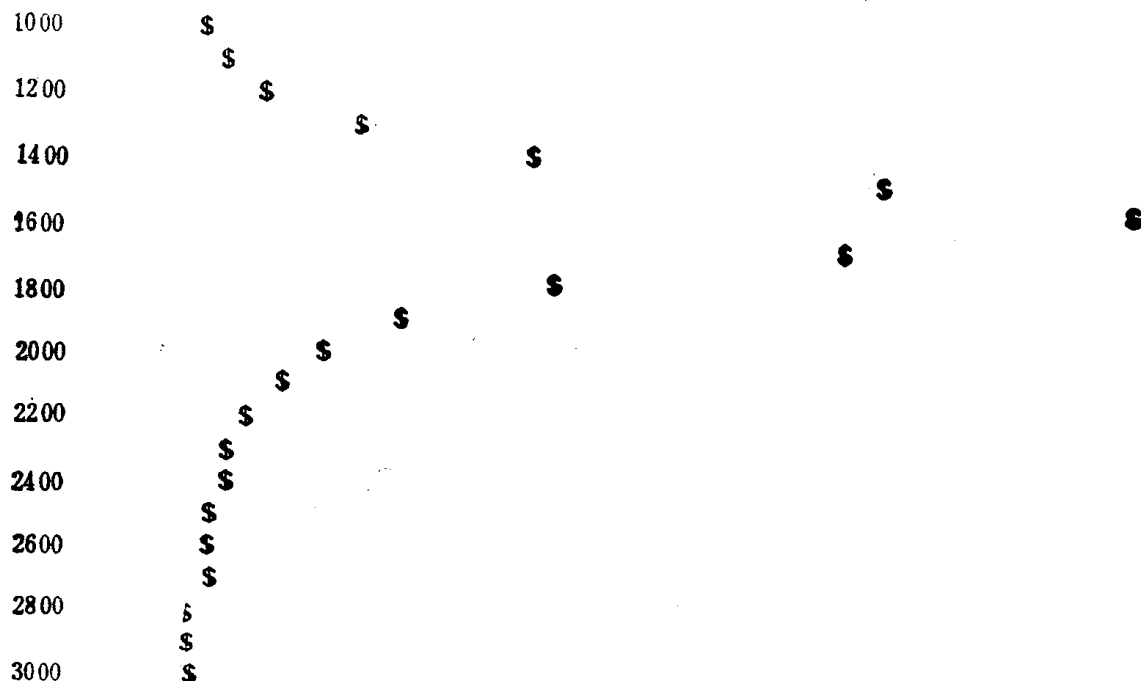


图1.3.4

```

60  W = 2 * 3.1415 * F; XL = W * L; XC = 1 / (W * C)
70  P = RL * US ^ 2 / ((RS + RL) ^ 2 + (XL - XC) ^ 2)
80  PRINT F; TAB(10 + 80 * P); "$"
90  NEXT F
100 END

```

§ 1.4 串联电路的谐振

如图1.4.1所示, R 、 L 、 C 串联电路在正弦电压作用下, 其复数阻抗为

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

上式的虚部是频率 F (或角频率 $\omega = 2\pi F$) 的函数。当频率 F 从零开始增加时, 感抗 $X_L = \omega L$ 成正比增加, 而容抗 X_C 则单调下降。当 $\omega = \omega_0$ 时, 电抗为零, 即有

$$X(\omega_0) = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

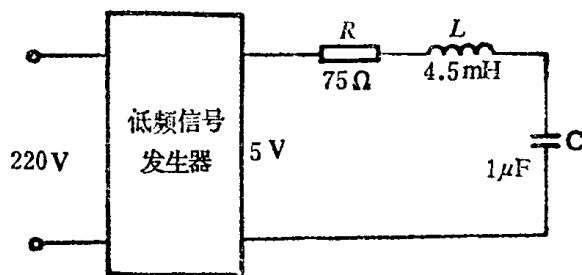


图1.4.1 串联谐振实验电路

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

或

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ω_0 称为谐振角频率。其程序如下, 打印曲线如图1.4.2所示。

```

5  READ U, R, L, C
10  INPUT N, P, Q; PRINT "U="; U, " "; R, "L="; L,
    "C="; C, "N="; N, "P="; P, "Q="; Q
20  PRINT TAB(5); "+ .....→F"
30  FOR F = 3500 TO 12000 STEP 300
40  W = 2 * 3.14159 * F; XL = W * L; XC = 1 / (W * C)
50  Z = SQR(R ^ 2 + (XL - XC) ^ 2); UR = U * R / Z; UL = U * XL / Z;
    UC = U * XC / Z
55  PRINT TAB(6); ":",
60  IF UL = UC THEN 120
70  IF UL < UC THEN 150
80  PRINT TAB(7 + N * UR); "*",
90  PRINT TAB(7 + Q * UC); "$";
100 PRINT TAB(7 + P * UL); "&"
110 GOTO 180
120 PRINT TAB(7 + N * UR); "*",
130 PRINT TAB(7 + P * UL); "&"

```

```

140 GOTO 180
150 PRINT TAB(7+N*UR), "*",
160 PRINT TAB(7+P*UL), "&",
170 PRINT TAB(7+Q*UC), "$"
180 NEXT F
190 DATA 5, 70, 0.0045, 0.0000001
200 END
    U=5      R=70      L=.0045      C=.0000001      N=2      P=2
           Q=2

```

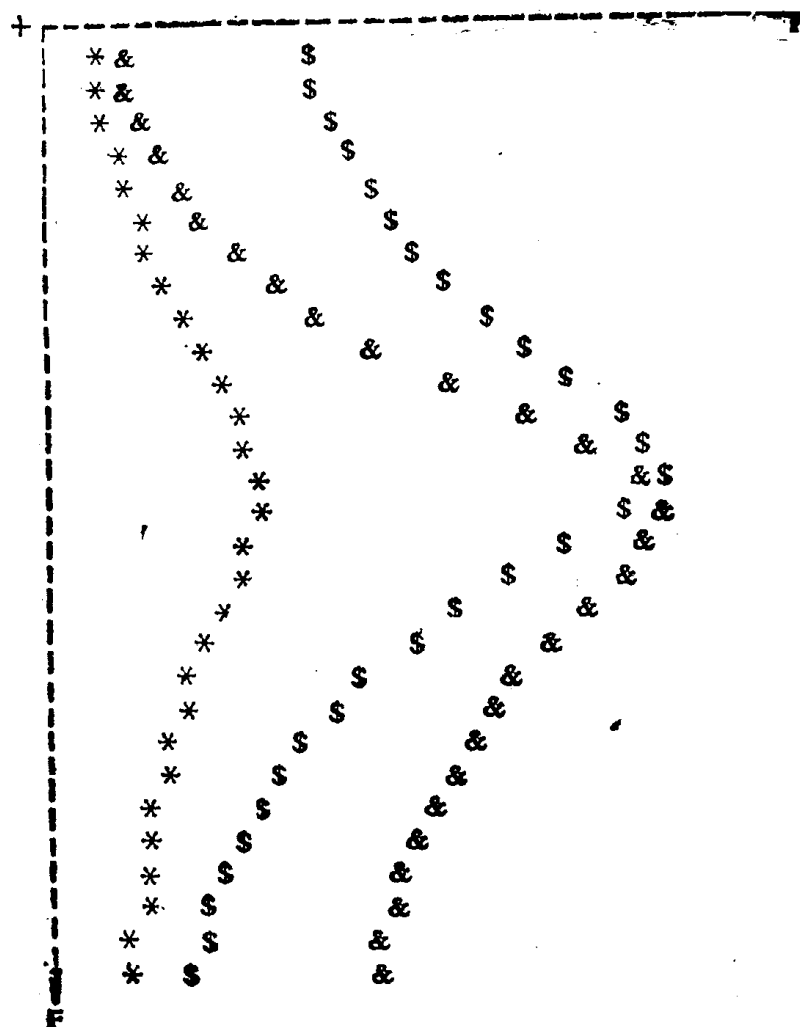


图1.4.2 调频率谐振曲线

当正弦电压的频率一定时，调节电感 L 或电容 C 亦可发生谐振现象。调节电容时（频率及电感 L 不变）其程序如下，曲线如图1.4.3所示。

```

10 READ U, R, L, F
15 INPUT M, N, A
16 PRINT "U="; U, "R="; R, "L="; L, "F="; F

```