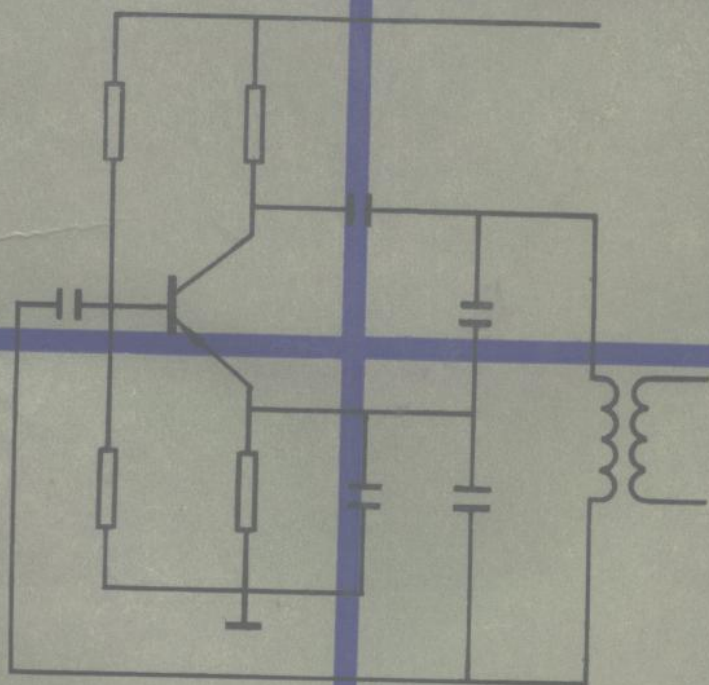


高频电路基础

吉健 编著



机械工业出版社

13.767
186

高频电路基础

吉 健 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

0229/111

本书主要介绍高频电子学的基本概念、基本参量与基本电路的组成、各电路元件的作用、电路的物理过程与各部分的工作原理；介绍高频电子线路的分析方法，微变等效电路的应用；高频电路各项指标的推证。设计原理、设计公式、设计举例以及各有关电路的调整与测试技术等内容。

本书内容充实，深入浅出。可供大专院校电子技术专业的师生与其他有关专业人员阅读或参考，亦可供从事电子技术和无线电工程的有关人员参考。

高频电路基础

吉健 编著

责任编辑：刘思源 周娟 责任校对：贾立萍
封面设计：刘代 版式设计：胡金英

责任印制：尹德伦

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850 × 1168¹/₃₂ · 印张 11³/₈ · 字数 297千字
1992年2月北京第1版 · 1992年2月北京第1次印刷
印数 0,001—3,700 · 定价：9.40元

ISBN 7-111-02823-6/TN·52

前 言

本书根据大专院校对于高频电子线路教学的基本要求，结合作者历年的教学与研究经验，编著而成。

本书对于高频电子学的基本电路诸如高频放大、振荡、调制、解调与混频等电路，进行了透彻的分析和讨论。在分析方法上，既照顾到电子专业学习的需要，同时还兼顾到其他各个领域从事电子科学技术工作的人员阅读与参考。在内容取舍方面，以基本概念、基本原理与基本分析为基础，同时兼顾到近期的发展。

本书与国内外同类书籍比较，主要具有如下特色：书中提出本征匹配系数，并且用该系数分析研究高频电子线路，得出了一系列放大器的指标表达式；提出并采用极增频率设计高频电子线路，将该频率参量应用于电子工程领域，解决了高于最高振荡频率与特征频率仍可以产生自激振荡的理论问题；提出一些高频电子线路的最佳设计公式，将其用于生产实践，可以降低高频电子设备的成本；推导出不同级数时的放大器稳定增益系列设计公式，使设计指标更加符合电路实际；此外，本书将集总参数和分布参数兼容讨论，使读者阅读后，对于高频电子线路有一个较全面的了解。本书理论联系实际，每章均有实践性内容，使学过本书的读者，具有一定的设计、调试与实验能力。

在本书编著过程中，承蒙有关单位和人员的大力支持，汪开程副教授和林永江高级工程师曾对本书提出许多宝贵意见，作者在此谨表衷心感谢。

由于作者水平所限，书中问题，恳请指正。





吉 健

1990年12月

基本符号表

A	增益
C	电容
E	电场
F	反馈系数, 系数, 声频 (即音频) 频率; f 频率
G, g	电导, 作为下标时表示信号源
H, h	混合参量
I, i	电流; 作为下标时表示输入或本征
K, k	常数, 系数
L	电感; 作为下标时表示负载
M	互感, 最大的简写; m 接入系数, 超相移因子
P, p	功率; 作为下标时表示并联或初级或实际 (有载)
Q	电荷, 静态的符号, 品质因数
R, r	电阻
S	散射参量
V, v	电压
X	电抗; x 广义失谐, 距离
Y, y	导纳; y^* 导纳参量的共轭复数
Z	阻抗参量, 阻抗, 负载的一种代号
a	共基极电流放大系数, 相移常数
β	共射极电流放大系数, 衰减常数
γ	非线性失真系数, 传播常数
η	效率
λ	波长

常用符号表

i_B	基极电流的瞬时值 (包括直流成分)
I_{B0}, I_B	基极电流的直流成分
i_b	基极电流的交流成分的瞬时值 (不含直流成分)
i_C	集电极电流的瞬时值 (包括直流成分)
I_{C0}, I_C	集电极电流的直流成分
i_c	集电极电流的交流成分的瞬时值 (不含直流成分)
v_{BE}	基射电压的瞬时值 (包括直流成分)
V_{BE0}, V_{BE}	基射电压的直流成分
v_{be}	基射电压的交流成分的瞬时值 (不含直流成分)
Q_D	有载品质因数
f_a	共基极电流放大系数的截止频率
f_B	共射极电流放大系数的截止频率
f_T	特征频率
f_j	极增频率
f_m	最高振荡频率
f_i	中频频率
$C_{b'c}$	集电极电容
C_o	集电极结势垒电容
ω	角频率 $\omega = 2\pi f$; Ω 角频率 $\Omega = 2\pi F$
ρ	回路特性阻抗, 驻波比
ξ	本征匹配系数
	独立电压源
	非独立电压源
	独立电流源
	非独立电流源

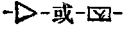
VI



直流电压源



噪声电压源方均值



放大器

目 录

第一章 高频参量与基本分析	7
§ 1-1 引言	7
§ 1-2 导纳参量与不定导纳矩阵	11
§ 1-3 基本高频放大器分析	23
§ 1-4 混合 Π 型等效电路的导纳参量	28
§ 1-5 最高振荡频率、截止频率与特征频率	35
§ 1-6 极增频率	40
§ 1-7 频率参量比较	41
§ 1-8 额外相移影响	42
§ 1-9 考虑引线电感的导纳参量	43
§ 1-10 负反馈电路的导纳参量	45
§ 1-11 场效应管的导纳参量	47
§ 1-12 分布参量系统基本分析	50
§ 1-13 散射参量	61
§ 1-14 散射参量与其他参量关系	64
§ 1-15 放大器散射参量分析	68
§ 1-16 晶体管参量测试	73
第二章 稳定性分析与设计	76
§ 2-1 稳定性基本分析	76
§ 2-2 本征稳定性	79
§ 2-3 稳定负载设计	80
§ 2-4 多级高频小信号放大器稳定性分析	82
§ 2-5 级联电路分析与设计	84
§ 2-6 设计举例	89
§ 2-7 高频放大器稳定性调试	91
第三章 高频小信号(单)调谐放大器	93
§ 3-1 引言	93

§ 3-2	一般要求	94
§ 3-3	变压器耦合(单)调谐放大器分析	96
§ 3-4	最大增益论证	102
§ 3-5	功率传输效率与插入增益	106
§ 3-6	谐振特性曲线分析	108
§ 3-7	增益带宽乘积	112
§ 3-8	自耦变压器耦合调谐放大器分析	112
§ 3-9	内部反馈的影响分析	114
§ 3-10	稳定增益	116
§ 3-11	单向化与中和理论分析	118
§ 3-12	调谐放大器设计	124
§ 3-13	场效应管调谐放大器	137
§ 3-14	高频小信号放大器调整	139
第四章	高频小信号双调谐放大器	141
§ 4-1	概述	141
§ 4-2	变压器耦合双调谐放大器分析	143
§ 4-3	双调谐放大器的谐振曲线方程式	151
§ 4-4	功率增益与功率传输效率	152
§ 4-5	谐振特性与双调谐放大器设计	153
§ 4-6	电容耦合双调谐放大器分析	159
§ 4-7	参差调谐放大器分析	163
§ 4-8	高频小信号放大器的其他类型	166
§ 4-9	自动增益控制	170
§ 4-10	调谐放大器的非线性失真	174
§ 4-11	干扰与噪声分析	179
§ 4-12	噪声系数与输入噪声温度	182
§ 4-13	噪声带宽	184
§ 4-14	多级电路的噪声系数	185
§ 4-15	晶体管噪声系数	187
§ 4-16	最高灵敏度	189
§ 4-17	双调谐放大器的调整	190
第五章	高频功率放大器	192
§ 5-1	引言	192

§ 5-2	基本电路及其原理	192
§ 5-3	高频功率放大器分析	194
§ 5-4	动态特性	203
§ 5-5	负载特性	206
§ 5-6	耦合网络分析	209
§ 5-7	频率影响分析	215
§ 5-8	传输线变压器电路	218
§ 5-9	馈电线路	220
§ 5-10	中间放大器	221
§ 5-11	高效率高频功率放大器	223
§ 5-12	高频功率放大器设计	225
§ 5-13	高频功率放大器调试	232
第六章 正弦波自激振荡器		235
§ 6-1	振荡原理	235
§ 6-2	电容反馈式振荡器	244
§ 6-3	电感反馈式振荡器	249
§ 6-4	克莱普振荡器	253
§ 6-5	西勒振荡器	256
§ 6-6	变压器耦合振荡器	259
§ 6-7	阻容振荡器	266
§ 6-8	负阻振荡器	275
§ 6-9	振荡方程	277
§ 6-10	频率稳定分析	281
§ 6-11	晶体振荡器	286
§ 6-12	寄生振荡	293
§ 6-13	特高频振荡器	296
§ 6-14	振荡器设计	299
§ 6-15	振荡器调试	304
第七章 调制、解调与混频电路		306
§ 7-1	调制原理	306
§ 7-2	调幅器电路	309
§ 7-3	调幅器分析	312
§ 7-4	调频电路	327

X

§ 7-5 混频电路及其分析.....	324
§ 7-6 振幅检波器.....	329
§ 7-7 鉴频器与鉴相器.....	335
§ 7-8 电路的非线性失真.....	341
§ 7-9 统调原理.....	345
§ 7-10 高频电路实践	347
参考文献	351

第一章 高频参量与基本分析

本章讨论各种高频参量，并以导纳参量为主对高频小信号放大器的基本电路进行系统的分析，导出主要性能指标关系式。本章后一部分讨论场效应管的导纳参量、分布参量电路与散射参量等内容。

§ 1-1 引 言

在电子技术中，高于数十千赫频率的振荡信号都有一些共同的特性，一般把这种频率范围的振荡简单地称为高频信号（如果按照规定的波段划分，高频仅指6~30MHz的频率范围）。产生、放大以及完成变换等任务并工作于高频区域的电子线路，称为高频电路。

高频电路有许多应用，例如在无线电技术中，人们把所需要的信号（例如声频信号或其他低频信号）传到远处，就得把该信号“装载”于高频振荡上，这样的高频振荡称为载波或载频，装载于其上的声频信号则称为调制信号。经过调制的高频振荡称为（高频）已调波。

已调波由无线电发射机发射出去，成为电磁波，在目的地由无线电接收机天线把电磁波转变为高频电压（或高频电流），经过放大和变换等过程，还原为原来的（声频）信号。

1-1-1 基本特征

在高频电子线路中，并联谐振电路的应用最为广泛，下面进行分析，研究其特性。

简单的并联谐振电路的基本形式如图 1-1-1 所示。图中 L 为回路电感， C 为回路电容， r 是回路损耗电阻（串联表示形式），当忽略回路电容的损耗（一般如此）时， r 就是电感线圈的损耗

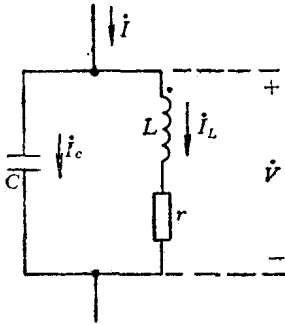


图 1-1-1

电阻。

并联谐振电路的导纳为

$$Y = j\omega C + 1/(r + j\omega L)$$

上式可转化为

$$Y = r[r^2 + (\omega L)^2]^{-1} + j[\omega C - \omega L(r^2 + \omega^2 L^2)^{-1}] \quad (1-1-1)$$

当回路调到谐振时，式(1-1-1)的虚部等于零，即

$$\omega C - \omega L[r^2 + (\omega L)^2]^{-1} = 0$$

由上式求得并联谐振电路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{1}{Q_0^2}} \quad (1-1-2)$$

式中 $Q_0 = \omega_0 L/r$ Q_0 是电感线圈的品质因数。

或 $Q_0 = \rho/r$

$\rho = \omega_0 L$ ρ 称为回路的特性阻抗。

通常 $Q_0 \gg 1$ ，这时

$$f_0 \approx 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1-1-2a)$$

将式(1-1-2)代入式(1-1-1)中，得到并联谐振电路的谐振电导为

$$g_{p0} = \frac{1}{(1 + Q_0^2)r} \quad (1-1-3)$$

通常 $Q_0 \gg 1$ ，则

$$g_{p0} \approx 1/(Q_0^2 r) \quad (1-1-4)$$

将上式稍加变化

$$g_{p0} \approx r/\rho^2 \quad (1-1-5)$$

或

$$g_{p0} \approx Cr/L \quad (1-1-6)$$

观察式(1-1-1)可知，当 $f < f_0$ 时，回路呈感性；当 $f > f_0$ 时，回路呈容性。

将并联谐振电路应用于调谐放大器时，一般都注意其在谐振频率附近的特性。下面对此进行分析 当 $r^2 \ll (\omega L)^2$ 的情况下，

由式 (1-1-1) 得到

$$Y \approx [r/(\omega L)^2] + j[\omega C - 1/(\omega L)]$$

将上式改写如下

$$Y \approx \frac{1}{Q_0^2 r} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

将式 (1-1-4) 代入上式, 在谐振频率附近, 即在小失谐情况下, 有

$$Y \approx g_{p0} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

上式可改写为

$$Y \approx g_{p0} \left[1 + jQ_0 \left(\omega C Q_0 r - \frac{Q_0 r}{\omega L} \right) \right]$$

$$\text{即} \quad Y \approx g_{p0}(1 + jx) \quad (1-1-7)$$

$$\text{式中} \quad x = \sigma Q_0 \quad (1-1-8)$$

σ 称为相对失谐参量。

$$\sigma = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \quad (1-1-9)$$

在谐振频率附近, 有

$$\frac{\omega + \omega_0}{\omega \omega_0} \approx \frac{2}{\omega_0}$$

于是

$$\begin{aligned} \sigma &\approx 2(\omega - \omega_0)/\omega_0 \\ x &\approx 2(f - f_0)Q_0/f_0 \end{aligned} \quad (1-1-10)$$

式中 $f - f_0$ 是绝对失谐量, 用 Δf 表示, 即

$$\Delta f = f - f_0 \quad (1-1-11)$$

将上式代入式 (1-1-10) 中, 有

$$x \approx \frac{2\Delta f}{f_0} Q_0 \quad (1-1-12)$$

x 称为广义失谐, 也叫做一般失谐。

并联谐振回路导纳的模为

$$Y \approx g_{p0} \sqrt{1+x^2} \quad (1-1-13)$$

其相角为

$$\phi_{p1} = \text{tg}^{-1}x \quad (1-1-14)$$

并联谐振电路的等效阻抗为

$$Z = \frac{1}{g_{p0}(1+jx)} \quad (1-1-15)$$

等效阻抗的相角为

$$\phi_p = -\text{tg}^{-1}x \quad (1-1-15a)$$

在谐振时，并联谐振电路的向量图如图1-1-2所示。可以看出在谐振时，回路电压和源电流同相。

并联谐振电路接上信号源时，如图1-1-3所示。图中 V_g 为信号源电压， R_g 为信号源电阻。由该图和式(1-1-15)有

$$\dot{V} = \dot{I} / [g_{p0}(1+jx)]$$

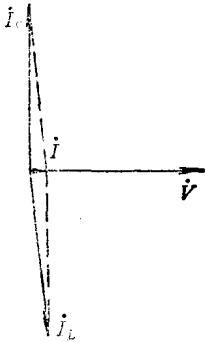


图 1-1-2

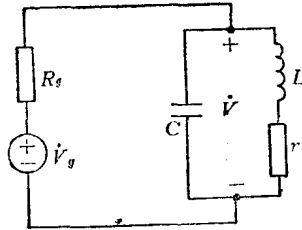


图 1-1-3

其模为

$$V = I / [g_{p0} \sqrt{1+x^2}] \quad (1-1-15b)$$

当谐振时， $x=0$ ，则

$$V \Big|_{f_0} = V_0 = I / g_{p0} \quad (1-1-16)$$

由上列两式，有

$$y = \frac{V}{V_0} = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \quad (1-1-17)$$

上式称为并联谐振电路的电压谐振曲线方程式。

具有抽头接法的并联谐振电路如图1-1-4所示。该图a为电感抽头式并联谐振电路；该图b是电容抽头式并联谐振电路。

分析得到图1-1-4a的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{1e} + L_{2e})C}} \quad (1-1-18)$$

式中 $L_{1e} = L_1 + M$ 与 $L_{2e} = L_2 + M$ 。

图1-1-4b的谐振频率为

$$f_0 = 1/[2\pi\sqrt{LC}] \quad (1-1-19)$$

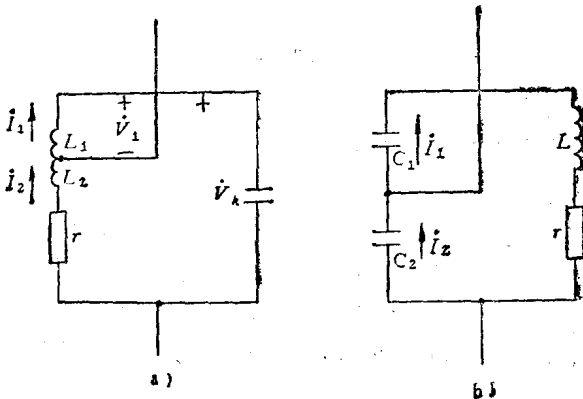


图 1-1-4

式中 C 是回路电容串联值

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (1-1-20)$$

抽头式并联谐振电路的谐振电导为

$$g_{pL} = g_{p0} / m_L^2 \quad (1-1-21)$$

上式是对于图1-1-4a的情况，对于图1-1-4b，则

$$g_{pC} = g_{p0} / m_C^2 \quad (1-1-22)$$

式中 m_L 与 m_C 称为接入系数（或抽头系数）

$$m_C = C_1 / (C_1 + C_2)$$

和

$$m_L = L_{1e} / (L_{1e} + L_{2e}) \quad (1-1-22a)$$

从式 (1-1-21) 与 (1-1-22) 看出, 当抽头变化时, 抽头处的谐振阻抗将跟着改变。

将式 (1-1-22a) 稍加变化, 有

$$m_L = I_k \omega L_{1e} / [I_k \omega (L_{1e} + L_{2e})]$$

即

$$m_L = V_1 / V_k$$

又考虑到

$$V_1 / V_k = W_1 / (W_1 + W_2) = W_1 / W$$

则 m_L 又可表示为

$$m_L = W_1 / W$$

上式中 W_1 、 W_2 与 W 分别是电感 L_1 、 L_2 与 $L_1 + L_2$ 的圈数。

1-1-2 并联谐振电路的极—零图分析

极—零图分析法是把电路看成一个网络(例如四端网络), 然后求出其有关的网络函数(例如其输入阻抗), 令该函数的分子等于零, 所得到的根称为零点; 在该函数的分母等于零的情况下(这时该网络函数等于无限大)所得到的根称为极点。之后在坐标图上绘出该网络的零点和极点分布, 进而研究其特性。下面利用极—零图法对于并联谐振电路进行基本分析。

根据图1-1-1得到并联谐振电路的阻抗为

$$Z = \frac{\dot{V}}{I} = 1 / [j\omega C + 1 / (r + j\omega L)] \quad (1-1-23)$$

将上式改写成以下形式

$$Z = \frac{s + r/L}{C[s^2 + sr/L + 1/(LC)]} \quad (1-1-24)$$

式中 $s = j\omega$, 其量纲与角频率一样, s 称为复频率。

将上式分解因子, 有

$$Z = \frac{s - n_0}{C(s - p_1)(s - p_2)} \quad (1-1-25)$$

或