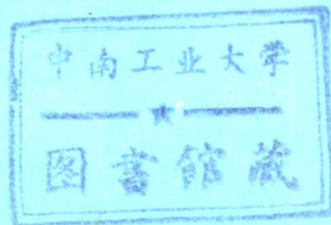


697338

仪表电子电路原理及应用

YIBIAO DIANZI DIANLU
YUANLI JIYINGYONG

戴逸松 编著



电子工业出版社

仪表电子电路原理及应用

戴逸松 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书从工程应用角度出发,介绍仪器仪表中各类常用的电子电路原理、计算、特点及使用方法。内容包括信号前置放大(低噪声低漂移前放、高阻抗高共模抑制前放、数据放大、电荷放大),信号滤波电路(谐振放大、有源滤波、宽带放大),信号变换电路(非线性校正、频率变换、移相电路、取样积分器),信号处理电路(调幅与检波、调频与鉴频、锁定放大器、锁相环路)。书中给出大量实用的仪表电路及其参数,并介绍国内外有关的集成组件,供使用者参考应用。

读者对象:仪器仪表、自动控制、信号检测、广播电视工作的科技人员、大专院校师生。

仪表电子电路原理及应用

戴逸松 编著

(特约)责任编辑 苏魁武

电子工业出版社出版(北京万寿路)

吉林工业大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张:20.88 字数:482.3千字

1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷

印数:1720册 定价:5.90元

统一书号:ISBN7-5053-0575-1/TN·208

前 言

仪器仪表从其作用对象来分有两大类：一类是对电压、电流、频率等电量进行测量的仪表称电测仪表。另一类是对温度、压力、尺寸、速度、应力等非电量进行测量的仪表称非电量电测仪表。后者实质上是通过各种传感器转换成电量再进行测量。近年来这类仪表发展极为迅速，它对国民经济的重要性越来越明显，在生产过程自动化、产品质量检查及控制、生产过程中工艺参数自动调节，以及在物理、化学、地质、天文、海洋等各个科学领域的研究、探索、测量、分析中均有广泛的应用。

作为一个完整的测量仪表，包括信号获取、转换、显示、处理等各个环节。从传感器或测量探头中接受的电信号一般是微小的，而且往往伴随有大量干扰和噪声，要把这种信号转换成可以显示、记录及适合计算机处理的形式，还必需通过适当的测量电路。这种测量电路的主要特点是：（1）被处理信号往往是频率较高、频带较宽，因而要采用高频、宽频带的电子电路。（2）这种被测信号通常伴随大量干扰和噪声，必须采用适当的滤波电路及一些其他信号变换电路才能恢复信号。（3）考虑到信号源的情况，仪表电路的前置放大级应具有高输入阻抗抗共模抑制比、低噪声低漂移的特点。

（4）传感器或其他探测器（包括接收机的天线）中的信号往往是各种调制波，因此在仪表电路中要采用适当的调制及解调电路，例如调幅与检波，调频与鉴频电路等。总之，仪器仪表中采用了大量专用的电子电路。了解、掌握这些仪表电路对于正确使用或研制改进仪表质量及性能都是非常重要的。

考虑到国内从事仪器仪表工作的专业人员需要，作者搜集了散在国内书刊、杂志中的各类仪表电子电路，编写成册，以供读者参考。由于本书参考资料很多，所引用的书刊未一一列名，请有关作者及单位谅解。本书中不包括传感器内容，也不包括后接的记录、显示仪表以及计算机接口电路等。对于书中给出的计算公式推导尽量简化，有些仅给出结果。本书除了介绍各种常用的仪表电子电路的原理、计算、特点及使用方法外，还给出了大量应用实例，以及近年来国内外出现的有关集成组件，供使用者参考。

本书经吉林工学院苏魁武教授主审，作者在此深表感谢。

作者希望本书对从事仪器仪表、自动控制、信号检测、广播电视等领域工作的科技人员、大专院校师生、科研人员有所帮助。由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，热忱希望读者批评指正。

作 者

1988年3月

目 录

前 言

第一篇 信号放大滤波电路

第一章 电路元件及器件的高频特性	(1)
§ 1.1 电路元件的高频特性.....	(1)
§ 1.2 晶体管的高频等效电路.....	(4)
§ 1.3 晶体管短路电流放大系数.....	(7)
§ 1.4 晶体管的 y 参数.....	(9)
§ 1.5 场效应管的高频等效电路.....	(13)
第二章 谐振放大器	(14)
§ 2.1 概述.....	(14)
§ 2.2 LC 谐振回路的频率特性.....	(15)
§ 2.3 谐振回路的耦合联接方式.....	(18)
§ 2.4 单调谐回路放大器.....	(24)
§ 2.5 双调谐回路放大器.....	(28)
§ 2.6 多级谐振放大器.....	(34)
§ 2.7 晶体管内反馈的影响及解决.....	(39)
§ 2.8 固体滤波器.....	(45)
第三章 宽频带放大器	(51)
§ 3.1 宽带放大器的性能指标.....	(51)
§ 3.2 基本组态晶体管宽带放大器.....	(54)
§ 3.3 共射极宽带放大器的频带扩展方法.....	(62)
§ 3.4 宽带放大器级联电路.....	(67)
§ 3.5 负反馈对管宽带放大器.....	(73)
§ 3.6 集成宽带放大器 (5G722, 5G313)	(75)
§ 3.7 集成超高频、低噪声宽带放大器 (CX35, CX25G01) 及应用	(77)
第四章 选频放大器	(81)
§ 4.1 概述.....	(81)
§ 4.2 RC 低通有源滤波器	(85)
§ 4.3 RC 高通有源滤波器	(90)
§ 4.4 RC 带通有源滤波器	(93)
§ 4.5 RC 带阻有源滤波器	(104)
§ 4.6 梳状滤波器.....	(106)

§ 4.7	LC高频滤波器	(108)
§ 4.8	有源R滤波器	(110)

第二篇 信号前置放大电路

第五章	低噪声前置放大器	(114)
§ 5.1	噪声的基本知识	(114)
§ 5.2	器件内部的噪声	(118)
§ 5.3	前置放大器噪声系数	(122)
§ 5.4	前置放大器 E_n-I_n 噪声模型及应用	(125)
§ 5.5	前置放大器的低噪声设计	(127)
§ 5.6	低噪声前置放大器实用电路	(130)
§ 5.7	前置放大器的结构设计	(134)
§ 5.8	前置放大器的噪声测试	(136)
§ 5.9	低噪声低漂移晶体管及集成化前置放大器 (FC-74, 5G0P07D)	(138)
第六章	调制式前置放大器	(142)
§ 6.1	概述	(142)
§ 6.2	调制器	(142)
§ 6.3	解调器	(147)
§ 6.4	双通道调制放大器	(154)
§ 6.5	5G7650-CMOS 斩波稳零单片集成运放	(157)
第七章	高输入阻抗高共模抑制比前置放大器	(163)
§ 7.1	差动放大式高输入阻抗放大器	(163)
§ 7.2	自举反馈型高输入阻抗放大器	(164)
§ 7.3	带自举反馈的复合跟随器	(165)
§ 7.4	三运放式高输入阻抗高共模抑制比放大器 (AD524)	(167)
§ 7.5	高输入阻抗集成运算放大器 (TD-05, F355 357)	(171)
§ 7.6	集成化数据放大器 (ZF605)	(173)
第八章	电荷放大器	(177)
§ 8.1	概述	(177)
§ 8.2	电荷放大器原理	(178)
§ 8.3	电荷放大器的频率特性	(179)
§ 8.4	电荷放大器的噪声及漂移特性	(180)
§ 8.5	电荷放大器的实用电路	(181)
第九章	前置振荡器	(182)
§ 9.1	前置振荡器的原理	(182)
§ 9.2	前置振荡器的基本电路形式	(182)
§ 9.3	调幅式前置振荡器实用电路	(186)

§ 9.4 调频式前置振荡器实用电路·····	(188)
第三篇 信号变换电路	
第十章 非线性校正电路 ·····	(192)
§ 10.1 概述·····	(192)
§ 10.2 折线型非线性校正电路·····	(193)
§ 10.3 非线性校正实用电路·····	(195)
§ 10.4 渐变型非线性校正电路·····	(197)
§ 10.5 自动非线性校正电路·····	(201)
第十一章 频率变换电路 ·····	(203)
§ 11.1 概述·····	(203)
§ 11.2 非线性元件变频作用及计算方法·····	(204)
§ 11.3 晶体管倍频器·····	(207)
§ 11.4 晶体管混频器·····	(209)
§ 11.5 晶体管混频器计算·····	(211)
§ 11.6 晶体管混频器的实用电路·····	(215)
§ 11.7 二极管混频器·····	(217)
§ 11.8 场效应管混频器·····	(220)
§ 11.9 混频电路的干扰及其抑制·····	(223)
§ 11.10 频率合成器·····	(226)
第十二章 移相电路 ·····	(227)
§ 12.1 概述·····	(227)
§ 12.2 正弦波移相电路·····	(228)
§ 12.3 精密移相电路·····	(232)
§ 12.4 恒移相电路·····	(235)
第十三章 取样积分变换电路 ·····	(237)
§ 13.1 取样积分原理·····	(237)
§ 13.2 取样门电路·····	(240)
§ 13.3 取样积分器·····	(244)
§ 13.4 多点信号平均器·····	(247)
第四篇 信号调制及解调电路	
第十四章 调幅及检波电路 ·····	(249)
§ 14.1 概述·····	(249)
§ 14.2 调幅波产生电路及集成组件 (BG314) ·····	(251)
§ 14.3 小信号平方律检波器·····	(256)
§ 14.4 大信号包络检波器·····	(258)
§ 14.5 包络检波器的实用电路·····	(263)

∞14.6	同步检波器及集成组件 (AD630)	(266)
§ 14.7	锁定放大器	(278)
§ 14.8	交流幅度检波电路	(281)
§ 14.9	高精度模拟乘法器 (TD4206) 及在调幅中应用	(286)
第十五章	调频及鉴频电路	(288)
§ 15.1	概述	(288)
§ 15.2	直接调频电路	(291)
§ 15.3	间接调频电路	(296)
§ 15.4	斜率鉴频器	(299)
§ 15.5	相位鉴频器	(302)
§ 15.6	限幅器	(304)
§ 15.7	比例鉴频器	(306)
§ 15.8	脉冲计数式鉴频器及集成组件 (5G32)	(308)
§ 15.9	锁相环路原理及实用电路	(312)
§ 15.10	锁相环路的应用及集成化锁相环路 (BG322)	(320)

第一篇 信号放大滤波电路

第一章 电路元件及器件的高频特性

§ 1.1 电路元件的高频特性

电子电路是由各种晶体管及电阻、电感、电容等电子元件组成。这些元件在高频工作时将具有复杂的电气性能。例如电感线圈具有电感参数 L ，但它同时具有电阻 R 及分布电容 C ；在低频工作时，往往仅考虑它的主要参数，而当频率升高时，则线圈中的 C 和 R ，特别是分布电容 C 的作用十分突出。为此在高频电路中必须要先研究元件的高频等效电路及电气特性。

一、电感线圈

现在常用的电感线圈有下列两种：

(1) 单层线圈 即把导线依次平绕在一个绝缘介质圆筒上。其电感量与圈数 N 、线圈直径 D 有关，单层线圈的电感量约几微亨至几毫亨，其分布电容较小，通常用于谐振回路中。注意线圈的 L 与 N^2 有关， N 加倍使 L 增加到4倍。

(2) 多层线圈 在骨架上绕制多层线圈后，可以大大提高线圈的电感量，可达几十毫亨至几百毫亨。由于这种线圈的分布电容太大，故通常用作高频扼流圈。要减少线圈的分布电容，在高频电路中，经常采用一种蜂房式线圈，其分布电容可以减至5pF以下，因而也可以用于中波段的谐振回路线圈。

为减少线圈分布电容，最好是减少圈数 N 。现在线圈常采用磁芯，这是由镍-锌铁氧或锰-锌铁氧体构成颗粒状压制而成，它可以提高线圈电感，又可阻挡涡流，从而减少损耗。

电感线圈中的电阻主要是导线电阻，其次是介质及铁芯损耗的等效电阻。虽然线圈在直流工作状态时电阻 R 很小，但高频工作时由于导线内的趋表效应（集肤效应）及骨架介质损耗，可以使电阻大大增加。据测量，当工作频率为1MHz时，其线圈电阻值可增加11倍。为减少线圈高频工作时的电阻，可以采用多股线以减少集肤效应，在导线表面镀银以减少电阻，以及采用低介质损耗的骨架（例如瓷骨架，或用空心线圈），这在大功率广播发射机中是常用的。

由上可见, 一个电感线圈在高频工作时, 主要电路参数为 L, R, C 。图1-1a给出其完整等效电路。

设线圈的固有谐振频率为

$$f_{0L} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_L}} \quad (1-1)$$

则当工作频率 $f < f_{0L}$ 时, 线圈呈现感性, 而当 $f > f_{0L}$, 线圈将呈现容性, 使线圈失去电感作用。因此通常线圈仅能工作在 f_{0L} 频率以下, 这时线圈可用图1-1b的等效电路来近似。

定义线圈的品质因数

$$Q_L = \frac{\omega L}{R} \quad (1-2)$$

一个线圈的电阻越小, 它的品质因数越高。当工作频率 f 提高时, 表面上看 Q_L 将会提高, 实际上, 由于 f 提高时, 线圈的电阻 R 也将上升, 故其 Q_L 值反而会下降。在高频工作时, 一个线圈的 Q_L 值大致为几十倍左右。空心线圈可能会较高。

在电路计算中为方便起见, 可采用并联等效电路来等效电感线圈如图1-2所示。显然, 两者的等效条件是它们的阻抗相等, 可用导纳相等来表示:

$$\frac{1}{R + j\omega L} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega L_p}$$

根据复数的实部及虚部分别相等, 得

$$R_p = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{R} \approx \frac{(\omega L)^2}{R} \quad (1-3)$$

$$\omega L_p = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{\omega L} \approx \omega L$$

或 $L_p \approx L \quad (1-4)$

式(1-3)说明与电感线圈串联的电阻 R 越小, 或与线圈并联的电阻 R_p 越大, 则线圈的 Q_L 值越高。

二、电容器

电容器的电容量 C 是由组成电容器的金属板几何形状、面积以及金属板之间的电介决定。由几片金属平板构成的多片电容器(图1-3)的电容量为

$$C = (n-1) \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$$

式中 ϵ_0 为真空的介电系数, 值为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$;

ϵ_r 为极板间的相对介电系数, S 为极板面积 (m^2),

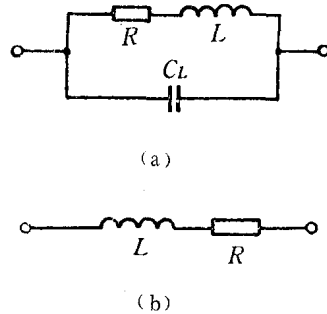


图1-1 线圈等效电路
(a) 完整的等效电路
(b) 简化的等效电路

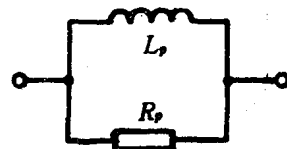


图1-2 电感线圈的并联等效电路

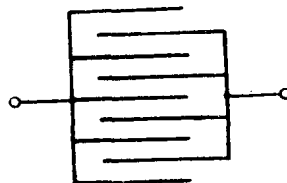


图1-3 多片电容器

d 为两板间距离(m), C 单位为法拉。常用的电容器有:

(1) 瓷介质电容器 在瓷管或瓷盘二侧涂以金属层构成, 一般容量为 pF 至几百 pF。介质损耗少, 可用作谐振回路电容。

(2) 云母电容器 在金属板之间用云母片作为介质, 容量为几十 pF 至几万 pF, 介质损耗小, 耐压高, 用作谐振回路电容。

(3) 纸介质电容器 由金属薄膜中间夹电容器纸卷成, 容量可达 $1\mu\text{F}$, 介质损耗较大, 一般用作隔直耦合电容或滤波电容。

(4) 电解质电容器 电容器的介质采用浸有电解液的纸构成, 容量可达几十 μF 至几万 μF 。这种电容器工作时必需有规定的电压极性, 如电压极性接反, 则可能击穿。常用于滤波及耦合电路。

在仪表电子电路中还用各种可变电容和半可变电容, 这是因为象收音机、电视机不只在某一频率上运用, 而是在一定的频率范围内运用, 所以这些仪器中电容应该是可调的。可变电容器当动片全部转入定片间时, 电容量最大, 记作 C_{max} ; 当动片全部转出定片时, 电容量最小, 记作 C_{min} 。定义该可变电容的频率覆盖系数为:

$$K_d = \sqrt{\frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}}}$$

这是因为谐振回路的谐振频率为 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$, 故该可变电容器可使回路谐振频率的变化为

$$\frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} = \sqrt{\frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}}} = K_d$$

一个电容器在高频工作时, 它的主要参数同样由电容 C 、引线电感 L_0 、介质损耗 R_p 以及引线电阻 R 组成。图 1-4 a 为电容器的完整等效电路。当工作频率较低时, 即

$$f < f_{0c} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

时可忽略 L_0 及 R , 故简化等效电路为图 1-4b。其电容器的品质因数为

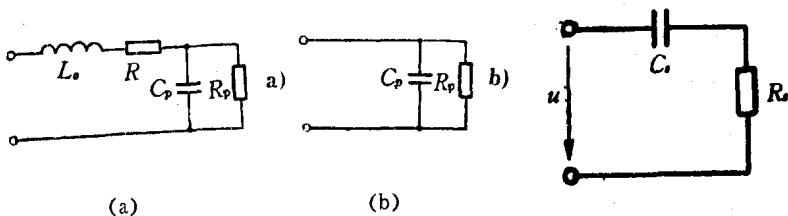


图1-4 电容器等效电路

(a) 完整的等效电路 (b) 简化的等效电路

图1-5 电容器的串联等效电路

$$Q_c = \frac{R_p}{\frac{1}{\omega C_p}} = \omega C_p R_p$$

一般, 电容介质损耗很小, 故 R_p 很大, 即 Q_c 可以达几千至几万。

电路计算时, 可采用图 1-5 所示串联等效电路, 应用阻抗相等原理, 可证明

$$R_s \approx \frac{1}{\omega^2 C_p^2 R_p}, \quad C_s = C_p$$

三、电阻器

仪表电子电路中常用的电阻器有下列几种:

(1) 炭膜电阻 这是在瓷管上涂一层炭膜, 并加以开槽以增加电阻值。这类电阻性能稳定、体积小、价格便宜, 是电路中最常用的电阻元件。

(2) 金属膜电阻 这是在瓷管上涂一层金属膜构成。这类电阻耐高温, 同样瓦数的电阻体积小, 电阻温度系数小, 性能特别稳定, 而且噪声小, 一般用于精密仪器的电路中。但价格稍高。

(3) 线绕电阻 这类电阻是用金属电阻丝绕在瓷管上构成的。因此可以承受更大功耗, 其瓦数可达几十至几百瓦以上。这类电阻的附加电感较大。只能用于低频作为降压电阻使用。

对于高频电路中的电阻等效电路, 一般可不考虑 L 及分布电容 C ; 仅对线绕电阻才考虑线圈电感。

例 图 1-6 为一个电感线圈和电容器串连, $L=585\mu\text{H}$, $Q_L=100$, $C=200\text{pF}$, $R_{cp}=30\text{M}\Omega$, $f=465\text{kHz}$, 求等效串联电路的 L_0 , C_0 及 R_0 。

由给定条件

$$R_L = \frac{\omega L}{Q_L} = \frac{2\pi \times 465 \times 10^3 \times 585 \times 10^{-6}}{100} = 17\Omega$$

$$R_c = \frac{1}{R_{cp} \omega^2 C^2} = \frac{1}{30 \times 10^6 \times (2\pi \times 465 \times 10^3)^2 (200 \times 10^{-12})^2} = 0.1\Omega$$

故

$$R_0 = R_L + R_c = 17.1\Omega$$

$$L_0 = L = 585\mu\text{H}$$

$$C_0 = C = 200\text{pF}$$

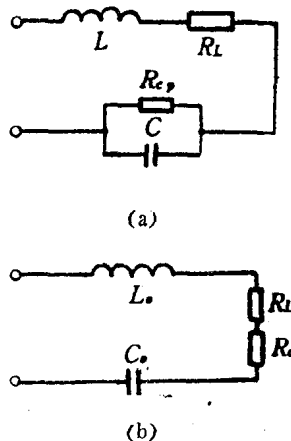


图1-6 等效电路计算

(a) 原电路 (b) 等效电路

§ 1.2 晶体管的高频性能及等效电路

一、晶体管的高频特性

高频电路中工作的晶体管其主要特点是:

(1) 晶体管在高频使用时, 其信号频率越高, 则放大倍数越小。当频率上升到一定值时, 晶体管将不具有放大功能。

从器件内部物理机理来看, 主要是由于晶体管中载流子从发射极到集电极的传送是

由发射极到基极的扩散过程及基极到集电极的漂移过程决定。这种扩散及漂移过程是需要时间的，称为载流子渡越时间。这样当正半周载流子还没有来得及输送到集电极时，负半周时信号电流将反向，使实际信号电流减少，从而使放大能力下降。

(2) 晶体管的2个P-N结均有一个势垒，在这耗尽层中分别充上电荷，相当于一个电容器，这些电容器会造成信号傍路，使实际信号电流减少。

提高器件的高频工作能力，设计了多种高频晶体管，它们是锗漂移型管及硅外延型管。国产器件分别为3AG及3DG系列，其工作频率可达几百MHz。

二、晶体管的高频等效电路

晶体管包含有2个P-N结，为此首先分析P-N结的高频等效电路。

(1) P-N结高频等效电路

P-N结的特点是存在一个势垒（又名阻挡层、耗尽层），如图1-7a所示。这个势垒就相当是一个电容器，在P-N结二侧就会存储电荷，相应的电容称为势垒电容 C_j 。当反偏电压 U 越大时， C_j 将会减少，即

$$C_j \sim \frac{1}{U^a}$$

正向P-N结时， C_j 将不起主要作用。此时载流子在N区扩散需要时间，故在N区将会有电荷积聚，称为扩散电容 C_D 。扩散电容正比于发射极直流工作电流 I_D ，即 $C_D \sim I_D$ 。

综上所述，P-N结的高频等效电路如图1-7b所示。

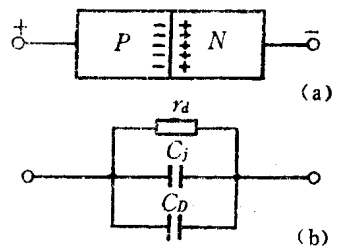


图1-7 P-N结及高频等效电路

(a) P-N结势垒

(b) P-N结高频等效电路

示。图中结电阻 $r_a = \frac{26}{I_e}$ ， I_e 为毫安； C 为势垒电容及扩散电容之和， $C = C_j + C_D$ 。正偏时， C_D 起主要作用，约几十皮法至几百皮法，高频晶体管的 C_D 较小。反偏时， C_j 起主要作用，约几pF。目前最小可为0.5pF。

(2) 晶体管共基极T型等效电路

图1-8a表示晶体管原理图，发射区E到有效基区B'之间的P-N结称为发射结。集电区C到有效基区B'之间P-N结称为集电结。B'-B为基极引出线，用 r_b 表示， r_b 在共基放大器中相当负反馈作用，故要求越小越好。低频管的 r_b 为几百欧，而高频管 r_b 在150欧以下，最好的可达几十欧或几欧（硅管）。

图1-8b给出共基极T型等效电路。 C_e 为发射结的电容，其中 $r_e = \frac{26}{I_e}$ 。

因发射结为正偏，故 C_e 主要是扩散电容。 r_c 、 C_c 为集电结的电阻、电容，因为集电结为反偏，反向电阻 r_c 在100kΩ以上， C_c 主要是势垒电容。受控电源 αi_e 表示晶体管的放大作用。

(3) 晶体管共射极混合π型等效电路

分析共射极晶体管高频放大器时，常用混合π型等效电路，图1-9给出电路图，它可以由晶体管原理图得到。电路参数可由T型等效电路导出，各个参量分别为：

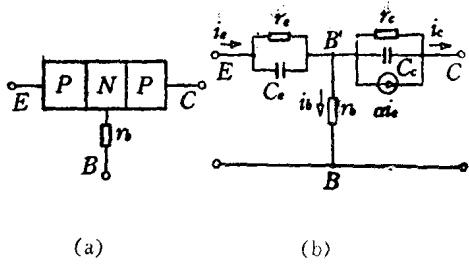


图1-8 晶体管共基极放大器

(a) 晶体管原理图 (b) T型等效电路

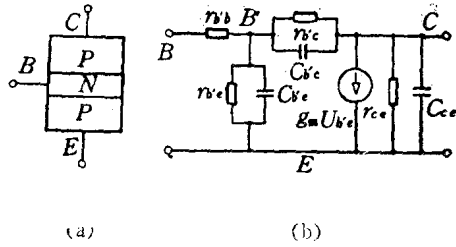


图1-9 晶体管共射极放大器

(a) 晶体管原理图 (b) 混合π型等效电路

$r_{b'e}$ ——发射结的结电阻。由于发射结正向偏置， $r_{b'e}$ 较小，约几百欧。

$$r_{b'e} = \beta_0 r_c = \frac{26\beta_0}{I_c} \quad (1-5)$$

结电导

$$g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}}$$

例 $I_c = 1\text{mA}$, $\beta_0 = 20$, 则 $r_{b'e} = \frac{26 \times 20}{1} = 520\Omega$; $g_{b'e} = \frac{1}{r_{b'e}} = 1.92\text{ms}$

$C_{b'e}$ ——发射结电容，包括势垒电容 C_{j_e} 和扩散电容 C_{D_e} ，发射结为正偏，以 C_{D_e} 为主。 $C_{b'e}$ 大致数值为 $10 \sim 500\text{pF}$ 。

$$C_{b'e} = C_e \approx C_{D_e}$$

$r_{b'c}$ ——集电结电阻，由于集电结处于反偏，故 $r_{b'c}$ 较大，约 $10\text{k}\Omega \sim 10\text{M}\Omega$ 。硅管 $r_{b'c}$ 更大。高频时由于 $r_{b'c} \gg 1/\omega C_{b'c}$ ，故一般可忽略 $r_{b'c}$ 。

$C_{b'c}$ ——集电结电容，由于集电结反偏， $C_{b'c} \approx C_{j_c}$ ，故 $C_{b'c}$ 大致数值为几pF，由于 $C_{b'c}$ 造成内部负反馈，故高频时起重要作用，希望越小越好。例：某手册给出晶体管CG301参数为

$$r_{b'c} C_c = 40\text{ps}, C_c = 2.5\text{pF},$$

则

$$C_{b'c} = C_c = 2.5\text{pF}$$

$$r_{b'c} = \frac{r_{b'c} C_c}{C_c} = \frac{40}{2.5} = 16\Omega$$

$g_m U_{b'e}$ ——表示晶体管放大作用的受控电流源，即当在 B' 与 E 之间加上交变电压 $U_{b'e}$ 时，在集电极造成的受控电流。注意 $U_{b'e}$ 为内电压， U_{b_e} 为外电压。

$$g_m = \frac{\alpha_0}{r_c} = \frac{\alpha_0 I_c}{26} \quad (1-6)$$

α_0 为共基极短路低频电流放大系数，当晶体管工作在甚高频时，载流子传输的延时作用使跨导 g_m 变为

$$g_m = g_m e^{-j\frac{m\omega}{\omega_\alpha}}$$

式中 $\omega_\alpha = 2\pi f_\alpha$ ， m 是频率为 ω_α 时的剩余相位

r_{ce} —— 集、射之间电阻，一般为几十千欧以上。

C_{ce} —— 集、射极电容，一般约 2~10pF。

晶体管共射极混合 π 型等效电路的参数基本与频率无关，可以适用到很高频率。一般可工作到 $f \leq 0.2f_\alpha$ ，这里 f_α 为晶体管共基极短路电流放大系数。

§ 1.3 晶体管短路电流放大系数

晶体管最主要的特性是电流放大作用，它的主要工作参数是短路电流放大系数。低频电子电路中分别用 α_0 及 β_0 表示共基及共射短路电路电流放大系数，高频时分别由等效电路计算。

一、共射极短路电流放大系数 β

对于共射极电路，输入为基极电流 i_b ，输出为集电极电流 i_c ， β 的定义为

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \Big|_{\dot{U}_c=0}$$

β 为复数。由图 1-9，集电极输出短路时，有 $\dot{U}_c=0$ ，故

$$\dot{i}_c = g_m \dot{U}_{b'e} \quad (1-7)$$

$$\text{及} \quad \dot{U}_{b'e} = \dot{i}_b \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 代入式 (1-7)，得

$$\dot{\beta} = \frac{g_m r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} = \frac{\beta_0}{1 + j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明，当 f 升高时， β 减少。复数电流放大系数的模 $|\beta|$ 下降到 β_0 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时的频率，叫做 β 截止频率，记作 f_β ，由式 (1-9) 得

$$\sqrt{[2\pi f_\beta r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})]^2 + 1} = \sqrt{2}$$

故

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (1-10)$$

式 (1-9) 写成

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{f}{f_\beta}} \quad (1-11)$$

及

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} \quad (1-12)$$

图 1-10 给出 β 与 f 的关系曲线, 说明当 f 增加时, 由于结电容的影响使 β 下降, 即高频放大能力下降。

当 $|\beta|=1$ 时的频率称为晶体管特征频率 f_T , 由式 (1-12) 得

$$1 = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_T}{f_\beta}\right)^2}}$$

故

$$f_T = f_\beta \sqrt{\beta_0 - 1} \approx \beta_0 f_\beta, \quad (1-13)$$

由式 (1-10) 得

$$f_T = \frac{1}{2\pi r_e (C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (1-14)$$

由于 $r_e \ll r_{b'e}$, 可见 f_T 远大于 f_β . f_T 表示共射极放大器可以运用到电流增益的最高频率极限。

习惯上, 人们经常用 f_T 来表示晶体管的基本参数。这是因为同一型号的晶体管在一定工作点下 f_T 基本相同, 但由于 β_0 不同, 故 f_β 可能差很多倍。由晶体管手册找到 f_T 后, 即可根据器件的 β_0 来求 f_β , 例如某一晶体管 $\beta_0=50$, $f_T=500\text{MHz}$, 则 $f_\beta=f_T/\beta_0=10\text{MHz}$ 。

其次, 根据式 (1-13), 测定某一 $f (f \gg f_\beta)$ 的 β 值, 由

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} \approx \frac{f_T / f_\beta}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = \frac{f_T}{f}$$

可求出 f_T 。例如某一晶体管, 在 $f=60\text{MHz}$ 时, 测得 $\beta=19.7$, 求得 $f_T=1182\text{MHz}$ 。

二、共基极短路电流放大系数

对于共基极晶体管电路, 最重要的高频性能指标, 就是共基极短路电流放大系数, 即

$$\dot{\alpha} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_e} \Big|_{\dot{U}_c=0} \quad (1-15)$$

根据晶体管电路, 已知 $\dot{I}_e = \dot{I}_c + \dot{I}_b$ 代入式 (1-15) 得到

$$\dot{\alpha} = \frac{\dot{\beta}}{1 + \dot{\beta}}$$

由式 (1-11), 得

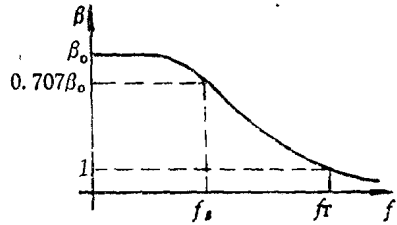


图 1-10 共射极放大器的 $\beta \sim f$ 曲线

$$\dot{\alpha} = \frac{\frac{\beta_0}{1+\beta_0}}{1+j\frac{f}{(1+\beta_0)f_\beta}} = \frac{\alpha_0}{1+j\frac{f}{f_\alpha}} \quad (1-16)$$

式中 f_α 为 α 下降到 $\frac{\alpha_0}{\sqrt{2}}$ 时的截止频率，即

$$f_\alpha = (1+\beta_0)f_\beta \approx \beta_0 f_\beta \quad (1-17)$$

α_0 为低频时共基极短路电流放大系数约为 0.7~0.9。由于 $f_\alpha \gg f_\beta$ ，说明共基极放大器具有更高的截止效率，因此工作在几百 MHz 的高频放大器常采用共基极放大器。

由式 (1-17) 及式 (1-13) 可知 $f_\alpha > f_T \gg f_\beta$

§ 1.4 晶体管的 y 参数

以上我们从晶体管内部物理过程出发，推导了晶体管共基极 T 型等效电路及共射极混合 π 型等效电路。虽然在第三章宽带放大器中经常用到这些电路，但其主要缺点是等效电路中各元件数值不易测量，计算也很麻烦。因此在谐振放大器中我们经常用到的是 y 参量等效电路，利用它可以把晶体管的等效电路用最简单形式来表示，便于测量及电路分析。

一、 y 参量的定义

一个晶体管可以看成是两端口网络。小信号时晶体管放大器输入端和输出端电压与电流之间为线性关系。图 1-11a 给出共射极放大器，其关系为：

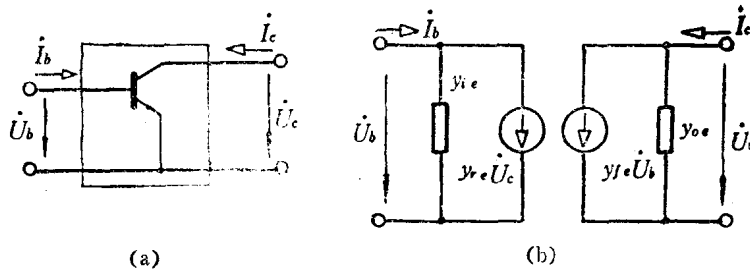


图1-11 共射极放大器 y 参数

(a) 共射极放大器连接 (b) 共射极 y 参数等效电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= y_{ie} \dot{U}_b + y_{re} \dot{U}_c \\ \dot{I}_c &= y_{fe} \dot{U}_b + y_{oe} \dot{U}_c \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

根据式 (1-18)，相应的共射极 y 参数等效电路如图 1-11b 所示。 y 参数下标第 2 字母 e 表示共射接法的 y 参数。分别定义如下：

y_{ie} —— 内导纳，又称输入导纳