

高等学校应用型
通信技术系列教材

通信电子线路 要点分析及习题详解

陈启兴 编著



清华大学出版社

高等学校应用型通信技术系列教材

通信电子线路 要点分析及习题详解

陈启兴 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书言简意赅地分析了高频电子线路的要点,给出了经典习题的详解。全书共分10章,主要涉及无线电发送设备和接收设备的工作原理和系统组成、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、调幅信号的解调电路、角度调制电路、调角信号的解调电路、变频电路和反馈控制电路等内容。

本书注重选材,内容丰富。要点分析可以帮助读者掌握重点,经典习题详解有助于读者理解难点。

本书可以作为本科、高职高专、广播电视大学的电子信息和通信类专业的辅助教材,也可以供从事相关领域的工程技术人员和技术管理人员阅读参考,还可以作为相关专业硕士入学考试的辅助资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路要点分析及习题详解/陈启兴编著. —北京:清华大学出版社,2009.11

高等学校应用型通信技术系列教材

ISBN 978-7-302-20735-1

I. 通… II. 陈… III. 通信系统—电子电路—高等学校—教学参考资料 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 146256 号

责任编辑:刘 青

责任校对:李 梅

责任印制:何 莘

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:10.75 字 数:243 千字

版 次:2009 年 11 月第 1 版 印 次:2009 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:19.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:030839-01

随着我国国民经济的持续增长,信息化的全面推进,通信产业实现了跨越式发展。在未来几年内,通信技术的创新将为通信产业的良性、可持续发展注入新的活力。市场、业务、技术等持续拉动,法制建设的不断深化,这些也都为通信产业创造了良好的发展环境。

通信产业的持续快速发展,有力地推动了我国信息化水平的不断提高和信息技术的广泛应用,同时刺激了市场需求和人才需求。通信业务量的持续增长和新业务的开通,通信网络融合及下一代网络的应用,新型通信终端设备的市场开发与应用等,对生产制造、技术支持和营销服务等岗位的应用型高技能人才在新技术适应能力上也提出了新的要求。为了培养适应现代通信技术发展的应用型、技术型高级专业人才,高等学校通信技术专业的教学改革和教材建设就显得尤为重要。为此,清华大学出版社组织了国内近 20 所优秀的高职高专院校,在认真分析、讨论国内通信技术的发展现状,从业人员应具备的行业知识体系与实践能力和对通信技术人才教育教学的要求等前提下,成立了系列教材编审委员会,研究和规划通信技术系列教材的出版。编审委员会根据教育部最新文件政策,以充分体现应用型人才培养目标为原则,对教材体系进行规划,同时对系列教材选题进行评审,并推荐各院校办学特色鲜明、内容质量优秀的教材选题。本系列教材涵盖了专业基础课、专业课,同时加强实训、实验环节,对部分重点课程将加强教学资源建设,以更贴近教学实际,更好地服务于院校教学。

教材的建设是一项艰巨、复杂的任务,出版高质量的教材一直是我们的宗旨。随着通信技术的不断进步和更新,教学改革的不深入,新的课程和新的模式也将不断涌现,我们将密切关注技术和教学的发展,及时对教材体系进行完善和补充,吸纳优秀和特色教材,以满足教学需要。欢迎专家、教师对我们的教材出版提出宝贵意见,并积极参加教材的建设。

清华大学出版社

《通信电子线路》是电子信息和通信类专业的专业基础课,对专业课程有着非常重要的支撑作用,它在应用电子、通信工程、无线通信等方面一直受到重视。对学生来说,学好它不是一件容易的事情;对教师来说,教好它也有一定难度。为了帮助广大高校师生、工程技术人员、技术管理人员和相关专业硕士入学考试者尽快掌握该课程的重点,突破难点,提高考试成绩,作者编写了这本《通信电子线路要点分析及习题详解》。

本书是在清华大学出版社 2008 年 5 月出版的高等学校应用型通信技术系列教材之一的《通信电子线路》基础上,凭借作者多年的《通信电子线路》课程教学经验,并分析学生学习《通信电子线路》课程的特点,整理而成。本书内容共 10 章,全面分析了《通信电子线路》课程的要点,提供了经典习题的详细解答。

本书的主要特点有:

(1) 本书作为主教材《通信电子线路》的辅助教材,包括了其中的全部习题的详细解答。

(2) 本书与有些教材的章节安排不一定相同,但内容基本上是一致的。本书梳理了其他同类教材的习题,修改了个别习题的纰漏,给出了经典习题的详细解答。

(3) 本书体现了 1987 年批准公布的《电子线路(I)(II)课程教学基本要求》和“1991 年国家教委电子线路课程教学指导小组扩大会议”的精神。

(4) 本书的电路图和公式编辑遵照了国家标准 GB 74728《电气图用图形符号》的有关规定。如果选用没有遵照这些规定的同类教材,对其中的电路图和公式,配套使用本书时请注意对照,尤其是公式中的符号。如果有不清楚的,可以参考清华大学出版社 2008 年 5 月出版的高等学校应用型通信技术系列教材之一的《通信电子线路》教材。

(5) 本书具有较强的实用性和针对性。全书内容丰富,题材广泛,语言规范,计算准确,注意了对知识性和科学性的要求。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,恳切希望读者批评和指正。

编 者

2009 年 4 月

第 1 章 绪论	1
1.1 要点分析	1
1.1.1 无线电发射设备的组成及其工作原理	1
1.1.2 超外差式接收机的基本组成	1
1.1.3 超再生接收机的基本组成及其工作原理	2
1.2 经典习题详解	2
第 2 章 高频小信号放大器	4
2.1 要点分析	4
2.1.1 串、并联等效互换	4
2.1.2 并联谐振回路的耦合连接与接入系数	4
2.1.3 空芯变压器的等效电路	5
2.1.4 耦合谐振回路的频率特性	6
2.1.5 晶体管的等效电路	7
2.1.6 晶体管谐振放大器	8
2.1.7 场效应管谐振放大器	9
2.1.8 放大电路的噪声	9
2.1.9 放大电路噪声的表示方法及其计算	10
2.2 经典习题详解	11
第 3 章 高频功率放大器	41
3.1 要点分析	41
3.1.1 丙类谐振功率放大器的工作原理	41
3.1.2 谐振功率放大器的折线分析法	41
3.2 经典习题详解	43
第 4 章 正弦波振荡器	63
4.1 要点分析	63
4.1.1 互感耦合型振荡器	63
4.1.2 电容三点式振荡器	63

4.1.3	电感三点式振荡器	64
4.1.4	克拉泼振荡电路	65
4.1.5	西勒振荡电路	65
4.1.6	晶体振荡器	66
4.2	经典习题详解	67
第5章	振幅调制电路	87
5.1	要点分析	87
5.1.1	低电平调幅电路	87
5.1.2	高电平调幅电路	89
5.2	经典习题详解	91
第6章	调幅信号的解调电路	100
6.1	要点分析	100
6.1.1	二极管大信号包络检波器	100
6.1.2	二极管小信号检波器	102
6.2	经典习题详解	103
第7章	角度调制电路	110
7.1	要点分析	110
7.1.1	调频波与调相波的数学表达式	110
7.1.2	调角波的频谱和带宽	110
7.1.3	变容二极管直接调频电路	111
7.1.4	石英晶体振荡器直接调频	112
7.1.5	调相电路	113
7.2	经典习题详解	114
第8章	调角信号的解调电路	128
8.1	要点分析	128
8.1.1	鉴相器	128
8.1.2	鉴频器	130
8.2	经典习题详解	131
第9章	变频电路	140
9.1	要点分析	140
9.1.1	晶体管混频器	140
9.1.2	场效应管混频器	141
9.1.3	二极管混频器	142

9.1.4 混频器的干扰	142
9.2 经典习题详解	144
第 10 章 反馈控制电路	152
10.1 要点分析	152
10.1.1 自动增益控制电路	152
10.1.2 自动频率控制电路	152
10.1.3 锁相环路	153
10.1.4 锁相环路的应用	155
10.2 经典习题详解	157
参考文献	162

绪 论

1.1 要点分析

1.1.1 无线电发射设备的组成及其工作原理

以无线电调幅广播发射机为例,其方框图如图 1.1 所示。无线电调幅广播发射机主要由正弦波振荡器、缓冲器、高频电压放大器、振幅调制器、高频功率放大器、声-电变换器、低频电压放大器及发射天线等组成。正弦波振荡器产生高频载波信号;缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器,提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性;高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度;振幅调制器完成调制,得到调幅波;高频功率放大器实现调幅信号的功率放大,以便于调幅信号远距离辐射出去;天线把调幅信号有效地辐射到空间;声-电变换器把语音信号转换为电信号;低频电压放大器把微弱音频信号的幅度进行放大。我国的调幅广播的载波频率为 $535 \sim 1605\text{kHz}$ 。

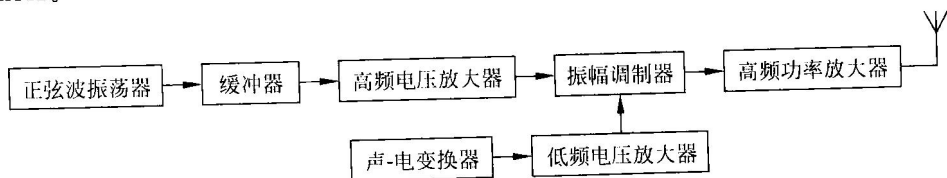


图 1.1 无线电调幅广播发射机的基本组成方框图

1.1.2 超外差式接收机的基本组成

超外差式接收机是目前最流行的无线电接收机,其基本组成方框图如图 1.2 所示,主要包括选频电路、混频器、本机振荡器、中频信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭等。需要注意的是,有一些超外差式接收机的选频电路与混频器之间还有一级高频小信号放大器。

本机振荡器产生正弦波信号,输入混频器后,与输入的高频信号互相作用产生一个固定载波频率的信号——中频信号,这是超外差式接收机的关键技术所在。虽然天线感应不同的已调波信号有不同的载波频率,但是超外差式接收机从中频信号放大器以后的电

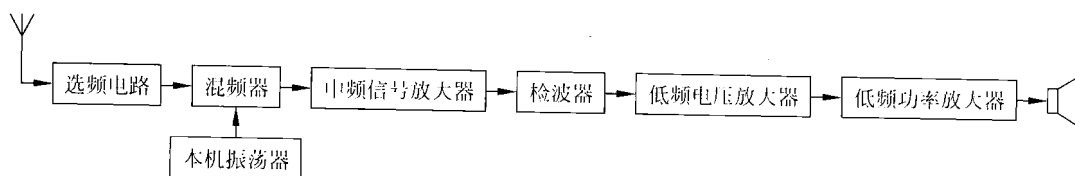


图 1.2 超外差式接收机的基本组成方框图

路的工作频率都是不变的。对于超外差收音机,选择不同的节目,本质上就是选择不同载波频率的已调波信号,这个操作常被称为选台。

1.1.3 超再生接收机的基本组成及其工作原理

超再生接收机,又被称为直接转换型接收机、零差接收机或零中频接收机,可以认为是一种特殊的超外差式接收机。其基本组成方框图如图 1.3 所示。虽然结构简单,但是,目前在一些简易电子通信系统中应用较多。

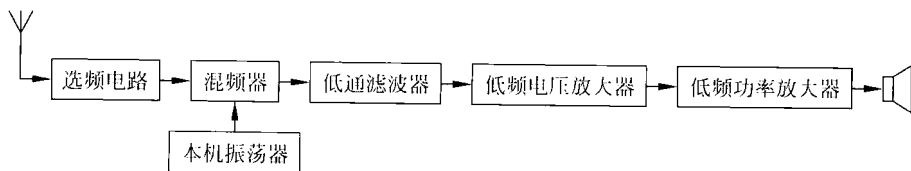


图 1.3 超再生接收机的基本组成方框图

在这种接收机中,本机振荡器输出信号的频率与选频电路输出信号的载波频率或中心频率相同,也就是说,该接收机的中频频率为零,这样放大和滤波就能在低频处实现,而在低频段只需较低的功耗就可以获得与在较高中频处相同的增益,同时还可以用表面贴封装的电阻和电容实现滤波,而无须外加一个既昂贵又庞大的类似 SAW(声表面波滤波器)的滤波器。对于超再生接收机,本质上就是把已调波的频谱线性搬移到调制信号(基带信号)的频带内,而无须检波器。超再生接收机只适用于模拟调制中的标准调幅、双边带调幅、单边带调幅、残留边带调幅和数字调制中的 OOK 调制。

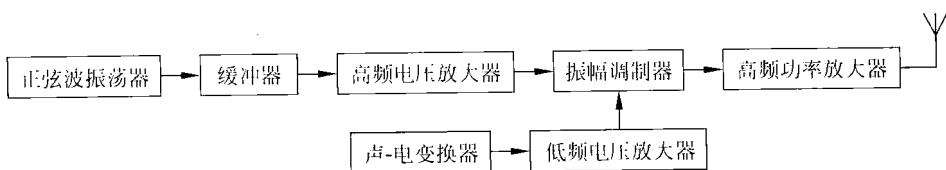
1.2 经典习题详解

1.1 电磁波具有哪些特点?

答 (1)电磁波具有波粒二象性;(2)在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$;(3)具有绕射、折射和反射等特点。

1.2 试画出无线电发射设备的一般组成方框图,并简要说明各部分的功能。

答 以调幅广播为例,无线电发射设备的一般组成方框图如图题 1.2 所示。



图题 1.2 调幅广播发射机的基本组成方框图

正弦波振荡器产生高频载波信号；缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器，提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性；高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度；振幅调制器完成调制，得到调幅波；高频功率放大器实现调幅信号的功率放大，以便于调幅信号远距离辐射出去；天线把调幅信号有效地辐射到空间；声-电变换器把语音信号转换为电信号；低频电压放大器把微弱音频信号的幅度进行放大。

1.3 现代通信系统有哪几种接收机？各有什么优缺点？

答 有直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机。

直接放大式接收机的优点是结构比较简单，成本较低，特别适合于作固定工作频率的接收机。直接放大式接收机的缺点主要是，由于工作频率一般是固定的或者只能微调，所以不能选择别的电台节目；对于不同的载波频率，接收机的灵敏度（接收微弱信号的能力）和选择性（区分不同电台的能力）变化比较剧烈，而且灵敏度受到高频小信号放大器不稳定的影响，不可能太高。

超外差式收音机的优点是灵敏度比较高，既适合于作固定工作频率的接收机，也适合于作工作频率变化范围较大的接收机，而且调谐方便，工作性能比较稳定。其缺点主要是，结构相对比较复杂。

超再生接收机的优点是灵敏度比较高，既适合于作固定工作频率的接收机，也适合于作工作频率变化范围较大的接收机，而且调谐方便。其缺点主要是，选择性、稳定性和信噪比稍差；当本机振荡器输出信号的频率发生漂移时，接收机的非线性失真比较严重。

高频小信号放大器

2.1 要点分析

本章的要点主要包括：电路的等效互换、晶体管的等效电路、单管谐振放大器的计算、多级谐振放大器的计算、小信号放大器的稳定性和放大电路的噪声等。

2.1.1 串、并联等效互换

图 2.1 是串、并联阻抗的等效互换电路图,其中, X_1 和 X_2 表示电抗(容抗或感抗)。

设 $Q = X_1/r_1 = R_2/X_2$ (等效前后品质因数不变),则串联转换为并联的计算式为

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= (1 + Q^2)r_1 \\ X_2 &= (1 + 1/Q^2)X_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

并联转换为串联的计算式为

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{R_2}{1 + Q^2} \\ X_1 &= \frac{X_2}{1 + 1/Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

当 $Q > 10$ 时,可以近似为

$$\left\{ \begin{aligned} R_2 &\approx Q^2 r_1 \\ X_2 &\approx X_1 \end{aligned} \right\}, \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{aligned} r_1 &\approx \frac{R_2}{Q^2} \\ X_1 &\approx X_2 \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

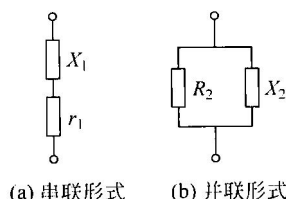


图 2.1 串、并联阻抗等效互换电路图

2.1.2 并联谐振回路的耦合连接与接入系数

1. 变压器耦合连接

在图 2.2 中,设变压器为理想变压器。等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2.4)$$

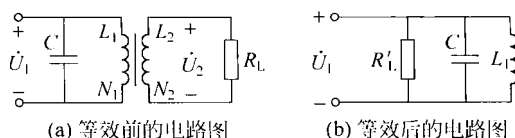


图 2.2 变压器耦合连接电路图

2. 自耦变压器耦合连接

在图 2.3 中,等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2.5)$$

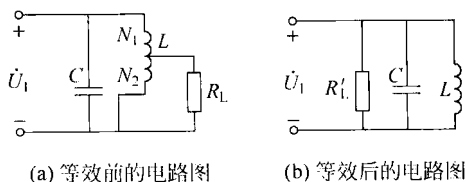


图 2.3 自耦变压器耦合连接电路图

3. 双电容分压耦合连接

在图 2.4 中,等效后的电阻为

$$R'_L = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^2 R_L \quad (2.6)$$

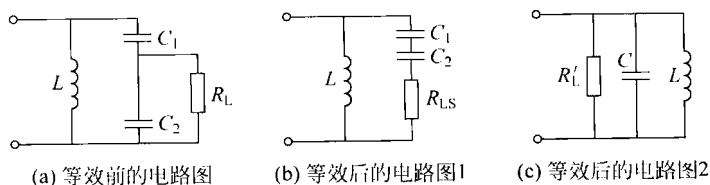


图 2.4 双电容分压耦合连接电路图

定义与变比关系有关的接入系数为

$$p = \frac{\text{转换前的圈数(或容抗)}}{\text{转换后的圈数(或容抗)}} \quad (2.7)$$

则对于上面讨论的三种情况,可以得到电阻转换的通式为

$$R'_L = \frac{1}{p^2} R_L \quad (2.8)$$

推广到电导、电抗、电流源和电压源的等效变比关系为

$$g'_L = p^2 g_L, \quad X'_L = \frac{1}{p^2} X_L, \quad I'_g = p I_g, \quad U'_g = \frac{1}{p} U_g \quad (2.9)$$

2.1.3 空芯变压器的等效电路

在图 2.5 中,变压器是空芯变压器。利用反映阻抗,可以简化电路的分析与计算。设 $Z_L = R_L + jX_L$, $Z_{11} = R_1 + jX_{11}$, $Z_{22} = (R_2 + R_L) + j(X_{L2} + X_L) = R_{22} + jX_{22}$, $X_M =$

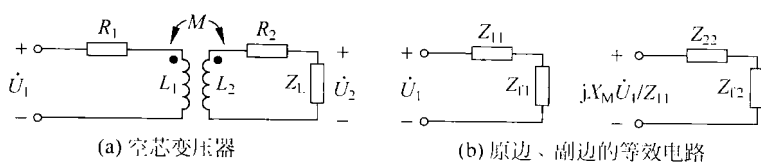


图 2.5 空芯变压器及其等效电路

$j\omega M$, 则反映阻抗为

$$\left. \begin{aligned} Z_{11} &= R_{11} + jX_{11} = \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} - j \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \\ Z_{22} &= R_{22} + jX_{22} = \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} - j \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

改变初、次级回路参数或耦合参量, 可使耦合回路达到部分谐振、复谐振或全谐振。

1. 部分谐振

部分谐振又分为初级部分谐振与次级部分谐振。初级部分谐振的条件是

$$X_{11} = \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \quad (2.11)$$

次级部分谐振的条件是

$$X_{22} = \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \quad (2.12)$$

2. 复谐振

有两种情况可以产生复谐振。第一种是在初级部分谐振的同时, 初级回路达到共轭匹配的情况为

$$\left. \begin{aligned} X_{11} &= \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \\ R_{11} &= \frac{X_M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

另一种是在次级部分谐振的同时, 次级回路达到共轭匹配的情况为

$$\left. \begin{aligned} X_{22} &= \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \\ R_{22} &= \frac{X_M^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

3. 全谐振

全谐振的条件是: 初级和次级回路都呈现电阻性。对于全谐振有一种特殊情况——最佳全谐振, 它既满足全谐振的条件, 初、次级回路又满足共轭匹配的条件。

2.1.4 耦合谐振回路的频率特性

耦合谐振回路的谐振曲线的通用表达式为

$$\alpha = \frac{2\eta}{\sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}} \quad (2.15)$$

其中, $\eta = kQ$ 是耦合因数; $\xi = Q_L \times 2\Delta f/f_0$ 是广义失谐量。

η 值不同, 频率特性也不同。

1. $\eta = 1$ 时特性曲线的通频带和矩形系数

$\eta = 1$ 时, 称为临界耦合, 特性曲线呈单峰, 回路处于最佳耦合下的全谐振。

特性曲线的通频带为

$$2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_L} \quad (2.16)$$

矩形系数为

$$K_{r0.1} = \frac{\sqrt[4]{396}}{\sqrt{2}} = \sqrt[4]{99} \approx 3.15 \quad (2.17)$$

2. $\eta < 1$ 时的特性曲线

$\eta < 1$ 时, 称为弱耦合, 特性曲线呈单峰, 次级回路两端电压小于临界耦合时的值, 通频带也变窄了。

3. $\eta > 1$ 时的特性曲线

$\eta > 1$ 时, 称为强耦合, 特性曲线呈双峰。

2.1.5 晶体管的等效电路

1. y 参数等效电路

晶体管的 y 参数等效电路如图 2.6 所示。其中, y_{11} 为输出短路时的输入导纳; y_{12} 为输入短路时的反向传输导纳; y_{21} 为输出短路时的正向传输导纳; y_{22} 为输入短路时的输出导纳。

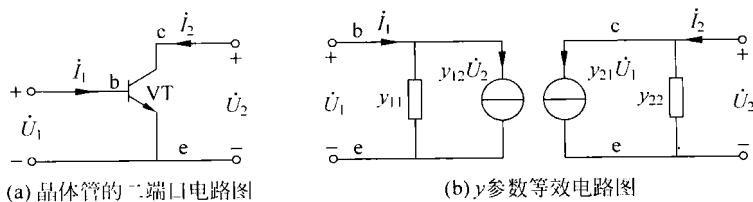


图 2.6 晶体管及其 y 参数等效电路图

2. 混合 π 型等效电路

晶体管的混合 π 型等效电路如图 2.7 所示。其中, $r_{b'e} = \frac{26\beta_0}{I_E(\text{mA})}$, $g_m = \frac{I_E(\text{mA})}{26}$ 。

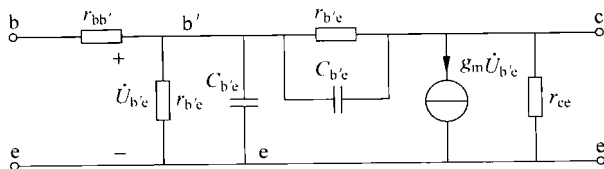


图 2.7 晶体管混合 π 型等效电路

2.1.6 晶体管谐振放大器

以图 2.8 为例。直接分析图 2.8 是不易的,尤其是计算放大器的性能指标。只有通过简化的等效电路才可行。一般的,等效电路分三步完成。第一步,把晶体管 VT_1 用其 y 参数等效电路进行等效,如图 2.9(a)所示;第二步,把变压器的 1、2 端和 4、5 端的电路等效到 1、3 端,如图 2.9(b)所示;第三步,把电路等效为简单的 RLC 并联谐振回路,如图 2.9(c)所示。

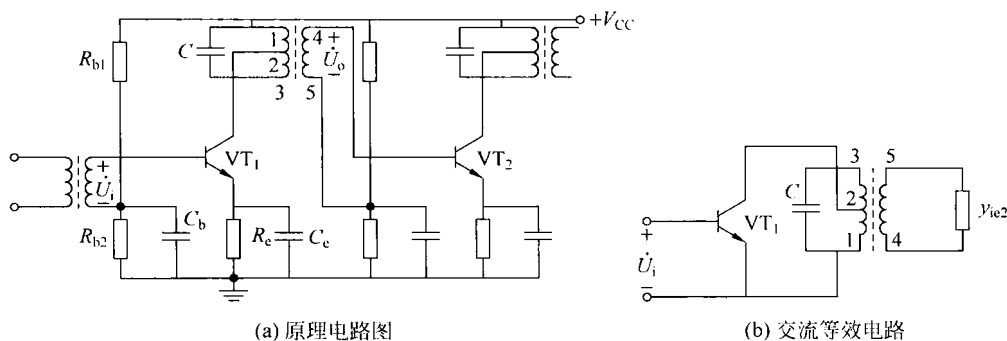


图 2.8 高频小信号放大器电路图

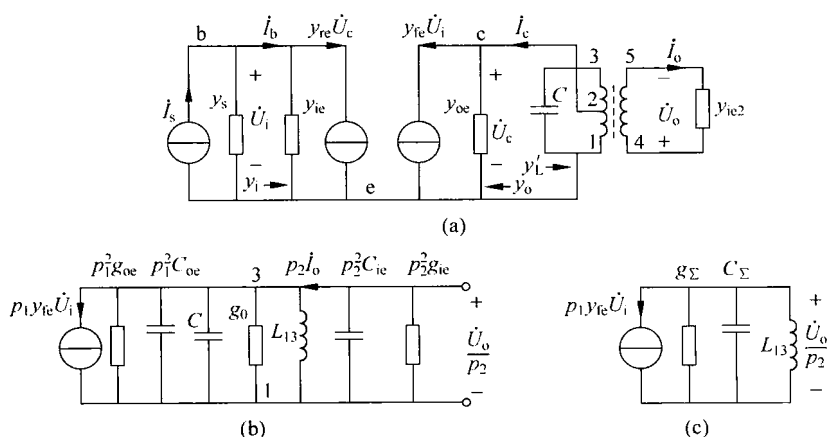


图 2.9 单调谐放大器的等效电路

图 2.9 中, $p_1 = \frac{N_{12}}{N_{13}}$, $p_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}}$, $g_\Sigma = p_1^2 g_{oe} + g_0 + p_2^2 g_{ie}$, $C_\Sigma = p_1^2 C_{oe} + C + p_2^2 C_{ie}$, $g_0 =$

$$\frac{1}{\omega_0 L_{13} Q_0}, Q_L = \frac{1}{\omega_0 L_{13} g_\Sigma}.$$

放大器的增益为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{p_1 p_2 y_{ie}}{g_\Sigma + j \left(\omega C_\Sigma - \frac{1}{\omega L_{13}} \right)} \quad (2.18)$$

