

邮电高等函授教材

通信电子电路

李树德 陈一楠 编
龚绍胜 谢沅清 审

人民邮电出版社

邮电高等函授教材

通信电子电路

李树德 陈一楠 编

龚绍胜 谢沅清 审

人民邮电出版社

内 容 提 要

《通信电子电路》是邮电高等函授电信工程类专业必修的技术基础课教材，它也可供其它高等院校无线电技术专业师生以及从事电子技术的工程技术人员参考。

本书着重介绍通信电路的基本原理和分析方法。全书共分六章，主要内容有：小信号谐振放大器、谐振功率放大器、倍频与混频电路、振幅调制及检波电路、频率调制及鉴频电路、放大电路的噪声等。

邮电高等函授教材

通信电子电路

李树德 陈一楠 编

龚绍胜 谢沅清 审

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32

1989年6月 第一版

印张：12 页数：192

1989年6月河北第1次印刷

字数：316 千字

印数：1—1 500册

ISBN 7-115-03949-6/TN·223

定价：2.45元

编者的话

《通信电子电路》是邮电高等函授电信工程类专业必修的技术基础课程教材。它也可作为其它高等院校无线电技术专业的师生以及从事电子技术的工程技术人员的参考用书。

本书根据新教学计划和教学大纲，同时参照国家教委关于高等工科院校电子电路课程教学的基本要求，在原《高频电子线路》教材基础上，从实际出发，遵循“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的原则，并结合编者多年的教学实践，总结提高，认真修改，努力做到选材适当、概念清晰、重点突出、要求明确、结构紧凑、适合自学。

本书第一章、第六章由南京邮电学院函授部陈一楠同志编写；绪论、第二、三、四、五章由北京邮电学院函授分院李树德同志编写。全书由李树德同志统编。

本书在编写和审定过程中，得到了邮电高函“电子电路”教材编审组全体同志的热情帮助、南京邮电学院龚绍胜副教授和林鸿绩副教授认真审阅了书稿，西安邮电学院王学勤同志等亦为本书提出了很多宝贵意见；最后北京邮电学院谢沅清教授对本书又作了全面复审和指正，提出了不少指导性的有益意见。在此，我们谨向关心、帮助和支持本书编写出版的所有同志表示诚挚的感谢和致意。

本书内容虽经多次讨论修改，但限于水平，加之时间仓促，难免会有错误和不妥之处，恳望使用本书的师生及读者批评指正。

作者

1988年1月

目 录

绪论	(1)
第一章 小信号谐振放大器	(6)
本章基本要求	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 单调谐回路谐振放大器	(41)
第三节 多级单调谐回路谐振放大器	(52)
第四节 双调谐回路谐振放大器	(56)
第五节 采用集中选频的放大器	(64)
第六节 小信号谐振放大器的稳定性	(68)
第七节 小信号谐振放大器的设计估算方法	(78)
本章小结	(80)
习题	(82)
第二章 谐振功率放大器	(85)
本章基本要求	(85)
第一节 非线性电路的作用和特点	(85)
第二节 谐振功率放大器原理	(96)
第三节 谐振功率放大器的特性分析	(111)
第四节 谐振功率放大器的馈电电路和匹配网络	(123)
本章小结	(136)
习题	(139)
第三章 倍频与混频电路	(144)
本章基本要求	(144)
第一节 概述	(144)
第二节 倍频电路	(146)

第三节 混频的基本原理.....	(155)
第四节 二极管混频电路.....	(167)
第五节 其它混频电路.....	(177)
第六节 混频干扰及其抑制方法.....	(181)
本章小结.....	(186)
习题.....	(188)
第四章 振幅调制及检波电路	(192)
本章基本要求.....	(192)
第一节 概述.....	(192)
第二节 低电平调幅电路.....	(204)
第三节 高电平调幅电路.....	(218)
第四节 二极管峰值包络检波电路.....	(227)
第五节 乘积检波器.....	(237)
本章小结.....	(243)
习题.....	(245)
第五章 频率调制及鉴频电路	(250)
本章基本要求.....	(250)
第一节 概述.....	(250)
第二节 实现调频和鉴频的原理和方法.....	(269)
第三节 变容二极管直接调频电路.....	(272)
第四节 限幅器.....	(292)
第五节 斜率鉴频器.....	(296)
第六节 相位鉴频器与比例鉴频器.....	(307)
第七节 其它形式的鉴频器.....	(321)
本章小结.....	(326)
习题.....	(329)
第六章 放大电路的噪声	(333)
本章基本要求.....	(333)
第一节 电阻的热噪声.....	(333)

第二节	晶体三极管和场效应管噪声	(341)
第三节	噪声系数	(345)
第四节	晶体管放大级和场效应管放大级的噪声系数	(353)
第五节	噪声系数的测量	(361)
本章小结		(369)
习题		(370)
参考资料		(371)
习题答案		(371)

绪 论

一、通信技术简述

通信是指用任何方法、通过任何媒介完成各种性质的信息——包括语言、音乐、文字、图象、电码和数据等的传递。通信是人类传递和交流信息的手段和方法，它对整个社会和人们的物质生活以及精神生活产生了重要和深远的影响，因而从某种意义上讲，它是人类文明与社会进步的重要标志。

随着人类社会生产力的发展，通信方式和通信技术也随之发生巨大变革。在古代就利用烽火狼烟、驿站快马接力、信鸽、旗语等方式传递信息。自从1837年莫尔斯(F.B.Morse)发明了电报、1876年贝尔(A.G.Bell)发明了电话，使通信技术产生了重大突破，使人类进入了电气通信(电信)的新时代。通信技术从有线到无线、从电报电话到传真、广播和电视，传递着人类社会的语言、图象和文字信息，它缩短了时间也同时缩小了空间，推动着社会发展。近一、二十年来，电子计算机和通信卫星的发明使用，特别是计算机的大量应用，使人类社会进入了信息时代，因而通信的重要性也越加显著，成为当今信息时代的神经系统。

由于计算机与通信相结合，促使通信技术又一次发生历史性的重大变革，可以说，现代通信技术和计算机技术成为实现信息系统现代化的两大技术支柱。概括说来，现代通信技术主要包括四大核心技术：光通信技术、卫星通信技术、数字传输技术和程控交换技术。它们以数字化技术、大规模集成电路技术和电路技术为基础，与计算机相结合，实现现代化的先进通信，发展全球通信网。

近几年，我国通信事业有了很大发展，1986年2月我国第一颗

广播通信卫星的成功发射和试用，标志着我国通信技术在向现代化迈进。

二、通信系统组成和基本原理

实现传输信息的系统称为“通信系统”。一个完整的通信系统应由五部分组成。即：信号源、发送设备、传输信道、接收设备、收信装置，如图0-1所示。按照传输信道媒介的不同，通常将电信分为有线电通信和无线电通信两大类。

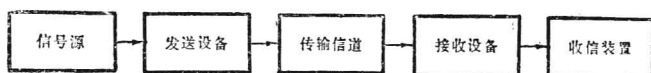


图 0-1 通信系统组成方框图

如若发送端将被传输的声音信息先经声—电换能器（如话筒）变换为相应的电信号，利用架空明线或电缆将电信号传送到远方；在远方接收端再利用另一种电—声换能器（如耳机）将传送来的电信号恢复为原来被传输的声音信息。这一过程就是实现有线电话通信的基本原理。

如若在发送端将反映声音信息的电信号去控制载波（等幅高频振荡信号）后，利用空间发射天线以电磁波形式向远方传送。在接收端利用接收天线将收到的电磁波还原为与发送端相似的高频电信号，再经过相应的变换和处理，最后恢复为原来的声音信息。这就是无线电通信的基本原理。

对于被传输的其它信息如文字、音乐、图象、数据等，也是先设法变换为相应的电信号，然后根据上述原理组成相应的通信系统，就可实现各种不同信息的传输。

下面以无线电通信系统为例来说明它的组成部分和基本原理。图0-2为无线电调幅发射设备的组成方框图，它由高频、低频和电源三大部分组成。

高频部分有主振级——由石英晶体振荡器产生频率稳定度高的

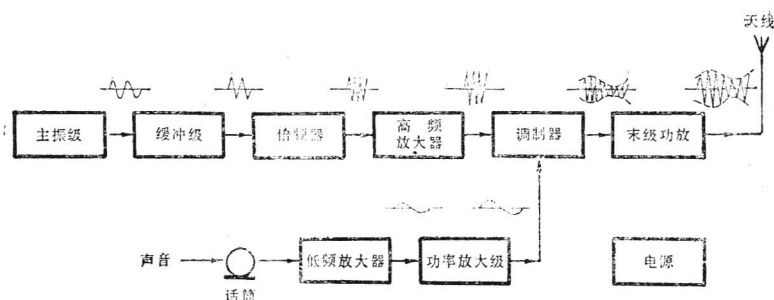


图 0-2 调幅发射设备组成方框图

载波；缓冲级——用来减弱后级对主振级的影响；倍频器——将载波频率提高到所需要的频率值；高频放大器——作高频放大以提高输出功率；调制器——用反映声音信息的低频电信号去控制载波振幅的变化，这一控制过程称为调幅；末级功放——将受调的调幅高频信号放大，使其输出功率达到所需要的发射功率电平，然后经发射天线以电磁波形式向远方辐射。

低频部分有话筒（或录音带、拾音器）、低频电压放大级、低频功率放大级。这样将使低频电信号通过逐级放大获得所需的功率电平，然后对载波进行调幅。在图0-2中，各部分的波形图形象地说明了无线电信号的变换和发送过程。

无线电信号的接收过程与上述发射过程相反。为了提高灵敏度和选择性，无线电接收设备目前都采用超外差式，其组成方框图如图0-3所示。

无线电信号的接收过程是：从接收天线收到的微弱高频调幅信号经输入回路选频后，通过高频放大送到混频器与设备内部的本地振荡器产生的等幅高频信号进行混频，在其输出端得到波形包络形状不变、而频率由原来载频变换为中频的调幅信号，经中频放大后送到检波器，从调幅信号中检取出原调制的低频电信号，然后再经过低频放大，最后从扬声器或耳机还原成原来的声音信息（语言或音乐）。

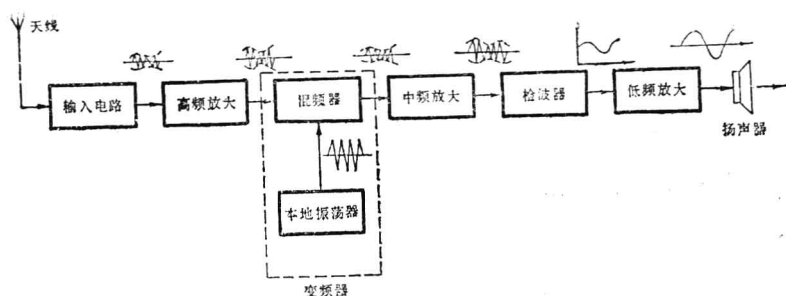


图 0-3 超外差式接收设备组成方框图

其中，混频器是超外差式接收设备的核心。如果将混频器与本振共用一个电子器件完成，就称为“变频器”。从调幅信号中检取出原来反映声音信息的低频电信号的过程，称为“解调”，其作用恰与调制过程相反。通常对调幅信号的解调叫做“检波”，对调频信号的解调叫做“鉴频”。

目前用得较多的其它通信系统主要有：载波通信系统、电缆通信系统、微波中继通信系统、卫星通信系统等。详细内容由其它课程分别介绍。

三、本课程的性质、任务和基本内容

《通信电子电路》课程是高等院校电信工程，包括微波、载波、交换、线路和无线电技术各专业的共同必修的一门重要的技术基础课。

为贯彻“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的原则，本课程的任务是研究通信系统中常用的集总参数通信电路的基本理论、原理和基本分析方法，通过对各基本单元电路的研究和学习，从而建立比较完整的系统概念。

学习本课程可使读者获得通信电子电路方面较为系统的基本理论和分析方法与基本技能，为培养和提高读者对实际通信电路进行分析和工程计算创造了条件，也为学习与从事其它相关专业的科技工作打下坚实的理论基础。

《通信电子电路》主要内容有：小信号谐振放大器、谐振功率放大器、倍频电路、混频电路、振幅调制及检波电路、频率调制及鉴频电路、放大电路的噪声等。为了与其它相关课程分工配合，紧密衔接，本课程抓住并突出其基本内容。电子电路中以晶体管为主，适当介绍集成电路。各章内容在选材和结构上与传统的写法相比，作了较大的变动和考虑。在内容取舍上力求删繁就简，确保重点。

关于放大电路的高频特性和正弦波自激振荡器的内容由《电子电路基础》课程介绍；关于锁相内容单独设课《锁相原理与应用》。小信号谐振放大器中先导出晶体管的网络参数，然后结合放大电路进行定量分析；对于非线性电路的各种近似分析方法分散在相关章节介绍；高频功率放大器仅分析研究窄带的谐振功率放大器特性；倍频电路和混频电路合并为一章，着重强调频率变换的特性和分析；振幅调制中对低电平调幅和高电平调幅都作了必要介绍，以低电平调幅为主；振幅检波中重点介绍大信号二极管峰值包络检波的原理和定量分析，对同步检波的基本原理作了适当介绍；频率调制中只研究直接调频电路及其分析，对间接调频仅介绍几种实现方法；鉴频电路中重点分析斜率鉴频电路，从工作原理上讲清相位鉴频器和比例鉴频器的特性；由于噪声是影响通信质量的一个重要因素，而噪声机理又比较复杂，本书只介绍通信放大电路噪声的基本知识和概念。凡前续课程中研究过的内容，本书不作重复论证，需用时仅归纳小结或者直接引用。

四、说明

为适合读者自学要求，本书每章开头列出本章基本要求。教材编写上努力做到概念正确、思路清晰、文字通顺、重点突出。每一章都列举适量例题，每章末写有本章小结，各节末附有复习思考题，章末附有适量的习题，这些都是为配合教学而安排的。

读者有条件并应创造条件主动参阅有关书刊资料的相关内容，以加深对课程的理解和掌握。

第一章 小信号谐振放大器

本章基本要求

1. 复习并掌握串联、并联谐振回路的特点及耦合回路的分析方法；
2. 掌握晶体管 Y 参数等效电路和 Y 参数的计算；
3. 掌握单回路谐振放大器的特性及其指标计算，掌握双回路谐振放大器在临界耦合时的指标计算；
4. 正确理解谐振放大器不稳定的原因及其稳定的具体措施。

第一节 概 述

一、小信号谐振放大器的特点

把谐振系统接在放大晶体管和输出负载之间所构成的放大器称为谐振放大器（又称调谐放大器），如图1-1所示。其中谐振系统可以是单谐振回路、耦合谐振回路，也可以是各种带通滤波器。在多级谐振放大器中，若在每级放大器之后接入一个谐振系统，称之为分散滤波型谐振放大器；如将分散在各级的谐振系统用一个高质量的带通滤波器替代，这种放大器常称为集中选频型谐振放大器。

本章所讨论的仅限于在小信号条件下工作的谐振放大器。大信

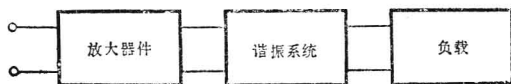


图 1-1 谐振放大器的方框图

号谐振放大器又称谐振功率放大器，将在第二章讨论。

小信号谐振放大器被广泛应用于广播、电视、通信、雷达等电子设备中。其突出的特点是具有明显的选频性能，单级增益较高。它可以对某一频率或某一频带的信号进行选频放大；而对工作频带以外的无用信号，则能给予抑制或衰减。小信号谐振放大器的选频性能主要由它的等效负载谐振回路所决定。

结合小信号谐振放大器在接收设备中的应用，下面先介绍它的一些主要性能指标。

1. 谐振增益

谐振增益的定义，是指放大器在谐振频率（或中心频率）上的电压增益或功率增益，用它来表示对有用信号的放大能力，分别用符号 K_{v0} 或 K_{p0} 表示。

2. 通频带

通频带的定义，是指放大器的增益比最大增益下降 3dB 时的上、下限截止频率之差，用 $2\Delta f_{0.7}$ 表示。在实际工作中，为了不失真地放大有用信号，一般要求通频带要大于有用信号的频谱宽度。谐振放大器的幅频特性曲线及通频带，如图 1-2 所示。

3. 选择性

选择性的定义，是指通频带以外的某一特定频率上的电压增益与最大电压增益的比值，即

$$S = \frac{K_u(\omega)}{K_{u0}} \quad (1-1)$$

它表示放大器对处于通频带以外的各种干扰信号的滤除能力。或者说，从各种干扰信号中选择出有用信号的能力。显然， S 越小，选择性就越好。

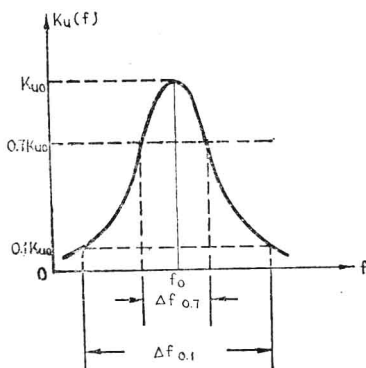


图 1-2 谐振放大器的幅频特性曲线及通频带

实际上, 通频带和选择性这两者之间往往是相互制约的。一般情况下, 通频带越宽, 对某些邻近频率干扰 (如 $f_{\text{干扰}}$) 的选择性就越差, 见图 1-3 所示。只有当幅频特性为理想矩形, 并使矩形的宽度等于通频带, 见图 1-4 所示的图形, 这时放大器的通频带与选择性才算达到理想的要求。

因此, 为了统一表示通频带和选择性的要求, 或者说在满足通频带要求的条件下, 选择性通常还采用矩形系数 $K_{n0.1}$ 、 $K_{n0.01}$ 来表示, 即

$$K_{n0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (1-2)$$

$$K_{n0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (1-3)$$

式中 $\Delta f_{0.1}$ 和 $\Delta f_{0.01}$ 分别是电压增益下降到最大值的 0.1 倍和 0.01 倍时的失谐宽度。显然, $K_{n0.1}$ 和 $K_{n0.01}$ 越接近于 1, 实际曲线就越接近于矩形, 表明放大器在满足通频带要求下的选择性也就越好。由此可见, 有了矩形系数这个定义式 (或这个指标), 我们就可对通频带及选择性这两个既相互制约又相互矛盾的指标, 提出一个综合的统一要求。

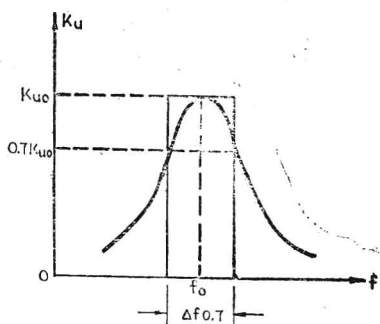
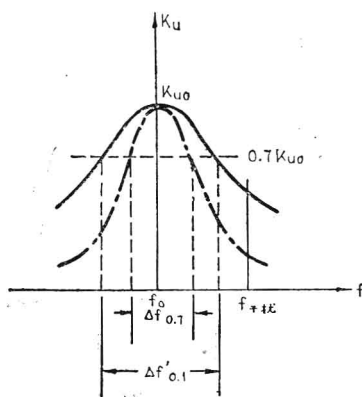


图 1-3 通频带与特定频率上选择性的矛盾

图 1-4 谐振曲线与理想矩形的关系

小信号谐振放大器，除了上述三个主要性能指标外，另外还有稳定性、噪声系数等一些性能指标。

由上分析可见，将小信号谐振放大器与宽频带放大器作比较，它们之间的根本差异就在于放大器的频率特性上。小信号谐振放大器具有谐振的性质，即具有较强的选频特性，它的频率特性主要集中在谐振频率附近，上、下限频率的比值接近于1；而一般放大器，不存在谐振特性，它们的上、下限频率的比值远大于1。同时小信号谐振放大器其单级增益通常比较高（如分散滤波型）。由于这些差别，在电路结构、性能要求、分析方法等方面带来了一系列的差异。下面我们将逐步讨论这些问题。

二、晶体管的Y参数等效电路

小信号谐振放大器的分析方法同以前学过的小信号放大器一样，均可采用等效电路的分析方法。原则上来说，亦可采用混合 π 型等效电路来进行分析。但是，由于小信号谐振放大器其等效负载属并联回路，因此在计算并联回路时采用导纳Y参数比较方便，另外在高频时Y参数也比较容易测量。对窄带谐振放大器来说，在通频带内可近似假设 $f=f_0$ ，这样，应用网络参数（Y参数）的晶体管等效电路，就能使小信号谐振放大器的分析计算大为简化。

对于一个晶体三极管，如果取电压 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 作为自变量，电流 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 作为因变量，不难写出晶体管的Y参数的电路方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_i \dot{U}_1 + Y_r \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 &= Y_f \dot{U}_1 + Y_o \dot{U}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

晶体管是一个有三个引出端的器件，在实际应用中其中的一端作为输入电路和输出电路的公共端。在小信号运用时，我们常可把晶体管看成为一个线性有源四端网络。式（1-4）中 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{U}_1$ 分别表示输入端的交流电流和交流电压的复数有效值， $\dot{I}_2$ 和 $\dot{U}_2$ 分别表示输出端的交流电流和交流电压的复数有效值，并规定它们的正方向

向，如图1-5所示。而 Y_i 、 Y_r 、 Y_f 和 Y_o 是描述这些电流电压关系的比例系数，它们只与四端网络——晶体管本身的特性有关，它们能精确地反映网络（即晶体管）对外电路所呈现的电特性，因此通常把它们称为四端网络参数—— Y 参数。下面我们来看每一个 Y 参数的物理意义。

令 $\dot{U}_2 = 0$ ，即令输出端对交流短路，则由式（1-4）可得：

$$Y_i = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \bigg|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{是输出交流短路时的输入导纳；}$$

$$Y_f = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \bigg|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{是输出交流短路时的正向传输导纳；}$$

同理，令输入端交流短路，即 $\dot{U}_1 = 0$ ，可以得出

$$Y_r = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \bigg|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{是输入交流短路时的反向传输导纳；}$$

$$Y_o = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \bigg|_{\dot{U}_1=0} \quad \text{是输入交流短路时的输出导纳。}$$

根据以上定义式及方程式（1-4），我们就可以得到如图1-5所示的晶体管 Y 参数等效电路。

晶体三极管的 Y 参数可以通过直接测量得到。即在输出端交流短路的情况下，输入端加测试信号，可以测出 Y_i 和 Y_f ；在输入端交流短路的情况下，输出端加测试信号，可测出 Y_r 和 Y_o 。另外，也

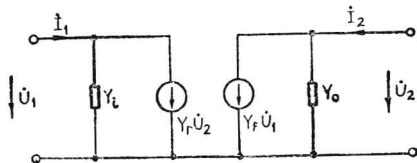


图 1-5 晶体管 Y 参数等效电路