

高等学校教学用书

电子器件及放大器

(下册 放大器部分)

原编者：北京邮电学院电子器件及放大器教研组

审校者：邮电学院电子器件及放大器教材选编组



人民邮电出版社

高等学校教学用书

电子器件及放大器

(下册 放大器部分)

原编者：北京邮电学院电子器件及放大器教研组

审校者：邮电学院电子器件及放大器教材选编组

人民邮电出版社

19582

內 容 提 要

本书是以北京邮电学院电子器件及放大器教研組教师与部分同学集体編写的讲义为基础加以审校修訂而成。全书分上下两册，共四篇。上册为电子器件部分，第一篇讲述电子管及离子管，第二篇讲述晶体管；下册为放大器部分，第三篇讲述电子管放大器，第四篇讲述晶体管放大器。本书适用于高等院校通信类专业的教学用书，也可供一般参考之用。

电 子 器 件 及 放 大 器

(下册 放大器部分)

原編者：北京邮电学院电子器件及放大器教研組

审校者：邮电学院电子器件及放大器教材选編組

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

(北京市书刊出版業營業許可証出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1961年7月北京第一版

印张 9 4/32 頁数 292

1962年4月北京第三次印刷

印刷字数 244 000 字

印数 15,471—25,670 册

統一书号：K15045·总1263—无326

定价：(10) 1.30 元

下册(放大器部分)緒論

1. 放大器的用途

放大器广泛地应用于国民經济和科学技术的各个部門。利用放大器，我們可以把微弱的电信号放大成我們所需要的强大电信号。

用放大器来放大电信号并不是說放大器可以产生或增加新的能量。放大器实质上是这样一种设备，通过它我們可以用微弱的电信号控制另一个能源，从而得到与控制信号形状相同，但能量却大得多的电信号。后者的能量是从被控制电源的能量轉換来的。

由于放大器具有这样的效能，因此它在有綫和无綫通信、科学研究、自动控制、医学、电影等有关設備中，起着重要的作用。

在通信方面，如果没有放大器，就无法实现远距离通信。通信技术能发展到今天的情况，甚至能和宇宙飞船上通信，没有放大器是根本不可能想象的。

我們很熟悉的无綫电广播和电视，担负着宣传党和国家政策的任务，也是我們的文化娱乐生活中不可少的工具。这些設備中也少不了放大器。

国防上用的雷达以及无綫电导航等設備，也需要放大器。

快速电子计算机中，采用了許多放大器。

在医学中，放大器用于生物电流的研究，用于心动电流、脑电流的记录，成为医生诊断疾病的有力工具之一。

随着无綫电电子学应用范围的扩大，放大器的应用領域也相应地扩大起来。

2. 放大器的分类

放大器要完成极其广泛的、多种多样的任务，这就使得放大器具

有极其不同的型式。为了研究的方便，我们就必须将放大器进行分类。放大器的分类可以有許多种方法，这里我们仅就其中几种最主要的加以介绍。

(1) 按放大器中的主要作用元件分类

按照放大器中的主要作用元件来分类，可分为电子管放大器，晶体管放大器，磁放大器和介质放大器。前二者是放大器中应用得最广泛的，因而本书主要以这两种放大器作为研究的对象。

(2) 按放大器工作频带分类

频率是电信号的主要参数。因此按放大器的工作频带来分类是恰当的。放大器的工作频带通常用两个边界频率来表征。这就是上限频率 f_B 和下限频率 f_H 。一般对这两个频率的定义是：在该频率上，放大器的放大能力比在中心频率上减到0.707。

上限频率 f_B 与下限频率 f_H 之比 $\frac{f_B}{f_H}$ 远大于1的放大器，称为宽频带放大器①。这个比值 $\frac{f_B}{f_H}$ 接近于1的放大器，称为窄频带放大器。窄频带放大器的负载大多数具有周期性特性的振荡回路，故又称为周期性放大器。宽频带放大器一般是非周期性负载，故又称非周期性放大器。窄频带放大器的工作频率大多数处于较高的频率（几百千赫以上②），故又称高频放大器③。宽频带放大器的工作频率延伸至很低的频率（几赫），故又称低频放大器。习惯上所称的低频放大器，并不限于工作于低频。例如属于低频放大器范畴的视像放大器，其上限频率可达6兆赫。综上所述可以看到，低频放大器是本书研究的对象。将低频放大器进一步分类，主要可分为音频放大器、视像放大器和直流感应放大器。这种分类方法也主要是按照其工作频段来区分的。音频放大器的工作频段是声音信号所处的频段，它的下限频率 $f_H=30\sim 100$ 赫，上限频率 $f_B=5\sim 15$ 千赫。视像放大器工作于电视图象信号的频段，其下限频率达几赫，而上

① 在这一定义下，音频和超音频放大器，都被称之为宽频带放大器。

② 属于窄频带放大器的RC选择性放大器，其工作频带可处于很低的频率。

③ 无线电接收设备中的中频放大器，也被归入高频放大器的类型。

限頻率达几兆赫。直流放大器的主要标志在于它的下限頻率延伸至零頻率，并非它只能放大直流。它的上限頻率因其用途而往往有很大的差别，在許多非电气測量仪器中采用的直流放大器，其上限頻率仅几百到几千赫，而用于高級示波器中的直流放大器，其上限頻率可达十几兆赫甚至更高。

(3) 按被放大的信号分类

按照被放大的信号来分类，可分为簡諧波放大器和脈冲放大器。如所周知，任何电的信号，只要滿足狄里赫利条件，都可以分解为一系列簡諧波分量之和。含有許多簡諧波分量的信号通过放大器后，不但其各分量之間的相对幅度会改变，而且其相对相位也会改变。当放大后只要求信号中各諧波分量的相对幅度不变时，这种放大器就称为簡諧波放大器。而当放大后不仅要求信号中各諧波分量的相对幅度不变，而且也要求其相对相位不变，即要求信号形状严格保持不变时，这种放大器就称为脈冲放大器。音頻放大器以及真空管电压表用的放大器属于前者；电视图象信号和示波器的放大器属于后者。

按照放大的信号来分类具有很大的实际意义。在分析比較放大器的性能时，对这两类放大器采用不同的指标。在測試时，也采用着不同的方法。

对簡諧波放大器，我們只需知道它的稳态特性就够了，进行分析計算时，采用簡諧波作为激励信号，用符号法运算。对脈冲放大器，必須研究其过渡特性，分析計算时用单位跃变函数作激励信号，运用拉氏变换。測試时，用矩形脈冲和锯齿波作激励信号。

本书中的分析計算，也分成这样的两类来进行。

3. 放大器的主要指标

放大器的指标是用来表征放大器的特性的。各种放大器有共同的特性，也有其独具的特性。放大器的指标也是这样。根据放大器的用途的不同，往往提出不同的指标，而各个指标的重要性也不

同。这里我們介紹几个一般的主要指标。还有一些指标，将在以后的章节中根据需要分别加以介紹。

(1) 放大系数

放大系数是輸出信号电压、电流或功率和輸入信号电压、电流或功率之比。与此相应可以有电压放大系数、电流放大系数和功率放大系数。在电子管放大器中，电压放大系数用得最多。晶体管放大器也常常用到电流放大系数和功率放大系数。

在簡諧波放大器中，电压放大系数的复量表示式为

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}} = K e^{j\varphi},$$

式中 \dot{U}_{in} —放大器輸入电压的复量表示式，

\dot{U}_{out} —放大器輸出电压的复量表示式，

φ —放大器輸出电压相对于輸入电压的相移。

实际应用中往往用对数来表示放大系数，有两种表示法。一种是将放大系数的幅模取以10为底的对数乘以20，記做符号 α_d ，单位为分貝 (db)：

$$\alpha_d = 20 \lg K \text{ (分貝)}。$$

另一种是将放大系数的幅模取自然对数，記做符号 α_N ，单位为奈培 (nep)：

$$\alpha_N = \ln K \text{ (奈培)}。$$

在无綫电工程中，习惯用分貝；在有綫通信中，习惯用奈培。

在脈冲放大器中，放大系数往往表为時間函数

$$K(t) = \frac{U_{out}(t)}{U_{in}(t)}。$$

(2) 失真

信号通过放大器后，它的形状或多或少要发生一些改变，这种改变称为失真。失真可分为直綫性失真和非綫性失真两大类。前者是由于放大器中存在电抗元件而引起，它与輸入信号幅度的大小无关。后者由放大器中的非綫性元件所引起，它与輸入信号幅度的大

小有密切的關係。失真的表示方法，對簡諧波放大器與脈沖放大器有很大的差別。

簡諧波放大器的直綫性失真用振幅—頻率特性和相位—頻率特性來表示。

脈沖放大器的直綫性失真用單位躍變信號前沿陡峭程度的減弱（波前失真）和波的平台部分的改變（波頂失真）來表示。波前失真以時間來度量，一般以從其最終穩定值的10%至90%所需時間—建立時間 t_r 來表示。波頂失真用所謂下垂百分比 ρ 來表示，它是在給定的脈沖持續期，波頂下垂部分和初始最大值之比。

直綫性失真的結果在音頻放大器中使音色改變，在視頻放大器中使圖像清晰度降低。

如果簡諧波放大器有非綫性失真，那末當輸入為一正弦波時，輸出將不再是正弦波，這個非正弦波中包含有高次諧波，產生了新的頻率。我們用諧波功率和基波功率之比的平方根來表示失真的大小，稱之為非綫性失真係數，記做

$$\gamma = \sqrt{\frac{\text{諧波功率}}{\text{基波功率}}}$$

用單位躍變信號來激勵脈沖放大器時，很難用示波器觀察出非綫性失真的結果。因此通常用鋸齒波作為研究脈沖放大器非綫性失真的激勵信號，脈沖放大器非綫性失真的表示方法，讀者可參考有關的資料〔1〕。

非綫性失真的結果，表現在音頻放大器中是使聲音雜噪難聽，表現在視頻放大器中是使圖像黑白對比度改變，在彩色電視中使顏色色調變化。

（3）信號噪聲比

放大器中的噪聲主要為交流哼聲、電子管的內部噪聲和電阻的熱噪聲等。為了使信號能很好地被接收，噪聲電平應遠低於信號電平。單獨地用噪聲的絕對值不如用信號噪聲比這個相對值來表示放大器的指標來得完善，通常用下面兩種表示法：

$$\text{信号噪声比} = \sqrt{\frac{\text{有用信号功率}}{\text{噪声功率}}},$$

$$\text{噪声系数} = \sqrt{\frac{\text{噪声功率}}{\text{有用信号功率}}},$$

二者互为倒数。式中有用信号功率取放大器額定輸出功率之值。信号噪声比和噪声系数也可取对数用分貝表示。

在音頻放大器中，要求噪声系数为（-50~-60）分貝。

4. 本书放大器部分学习的目的和要求

“放大器”是有、无线通信各专业的基礎課。放大器是电子电路的一个重要部分，也可以称为綫性电子电路。要求学生通过这门課程的学习，具有分析一般綫性电子电路的能力，同时还能根据給定的技术条件，进行工程上的計算。

因此，在学习时要求学生对于基本概念和分析方法有透彻的理解；对于簡單而又基本的公式應該熟悉并能熟練和正确地应用它們。

为了滿足以上要求，在学习过程中，最好是經常把电路、物理概念和基本公式有机地結合起来，进行思考。特別应当重視实验和参加工业生产等实际环节，經常应用理論去联系实际，这是学好本課程的重要方法。

参 考 資 料

- [1] 寬頻帶放大器，Г.И.布亚里克著，人民邮电出版社，1955

目 录

下册(放大器部分)緒論

第三篇 电子管放大器

第 一 章 阻容耦合放大器

- § 1 引言 (1)
- § 2 阻容耦合放大級的图解分析 (4)
 - 2—1 图解分析法 (4)
 - 2—2 放大器中的非綫性失真 (7)
- § 3 阻容耦合放大級的等效电路分析 (10)
 - 3—1 阻容耦合放大級的分频段简化分析 (11)
 - 3—2 五极管阻容耦合放大級的特点 (22)
- § 4 脈冲放大器的特点及其分析方法 (28)
 - 4—1 脈冲放大器的特点 (28)
 - 4—2 脈冲放大器的分析方法 (29)
- § 5 阻容耦合放大級的过渡特性 (30)
 - 5—1 短時間过渡特性 (31)
 - 5—2 长時間过渡特性 (34)
 - 5—3 阴极阻抗及屏柵极阻抗对波頂失真的影响 (35)
- § 6 用运算法求阻容耦合放大級的过渡特性 (37)
- § 7 阻容耦合脈冲放大級的设计 (38)

第 二 章 补偿放大器

- § 1 引言 (40)
- § 2 简单并联高频补偿电路 (40)
 - 2—1 频率特性分析 (41)
 - 2—2 过渡特性分析 (44)
- § 3 长時間过渡特性的补偿 (48)

3—1 板极去耦滤波器补偿电路	(48)
3—2 其它波顶补偿电路	(51)
§ 4 复杂补偿	(51)
4—1 最平频率特性放大器的计算方法	(54)
4—2 短时间过渡特性最佳参量的计算方法	(55)
4—3 有损耗的串并联复杂补偿电路的工程计算	(60)

第三章 多级电压放大器

§ 1 引言	(62)
§ 2 多级电压放大器的频率特性	(63)
§ 3 多级电压放大器的过渡特性	(66)
3—1 在单级中无过射的多级放大器的波前失真	(66)
3—2 在单级中有过射的多级放大器的短时间失真	(69)
§ 4 多级放大器的波顶失真	(73)
§ 5 级数的决定	(73)
§ 6 电压输出级的特点	(74)

第四章 行波放大器

§ 1 引言	(76)
§ 2 行波放大器的基本原理	(77)
§ 3 行波放大器的低频特性	(80)
§ 4 行波放大器每级的最佳电子管数	(82)

第五章 功率放大器

§ 1 引言	(83)
§ 2 屏栅管单边功率放大器	(85)
2—1 屏栅管单边功率放大器的基本电路	(85)
2—2 屏栅管单边功率放大器的分析	(85)
§ 3 推挽功率放大器	(97)
3—1 推挽放大器的工作原理	(98)
3—2 电子管在放大电路中的工作状态	(100)
3—3 推挽放大器的分析	(104)
3—4 栅流失真与瞬变失真	(113)

§ 4 推挽放大器中的末前级	(115)
4-1 倒相器	(115)
4-2 推动级	(116)
4-3 电感耦合推挽前置放大级	(124)
§ 5 输出变压器	(125)
5-1 输出变压器的参量	(126)
5-2 输出变压器的结构及其与电气参量的关系	(128)

第六章 放大器中的反馈

§ 1 引言	(134)
§ 2 负反馈对放大器特性的改善	(136)
2-1 反馈的基本概念	(136)
2-2 反馈对放大系数的影响	(137)
2-3 负反馈对反馈环内非信号电压的作用及对信号噪声比的改善	(140)
2-4 负反馈对频率特性的影响	(144)
2-5 负反馈对输出电流和输出电压的稳定作用及对输出阻抗的影响	(148)
2-6 反馈放大器输入回路的连接及其对输入阻抗的影响	(153)
§ 3 反馈在放大器中的应用举例	(154)
§ 4 反馈放大器的自激及其防止	(163)
4-1 自激的概念	(163)
4-2 自激的鉴别	(165)
4-3 自激的防止	(168)
§ 5 寄生反馈	(184)

第七章 直流放大器

§ 1 引言	(187)
§ 2 直流放大器中零点漂移的主要原因	(188)
§ 3 减小直流放大器中零点漂移的原则	(190)
§ 4 减小零点漂移的简单电路	(191)
§ 5 直流放大器实际线路介绍	(198)

第八章 放大器中的交流声

- § 1 引言 (200)
- § 2 交流声的主要来源及其减小方法 (201)
 - 2-1 由灯丝电源所引起的交流声 (201)
 - 2-2 由于板极电源所引起的交流声 (203)
 - 2-3 杂散电磁场的干扰 (204)
- § 3 交流声的识别与排除 (206)
 - 3-1 交流声的识别 (206)
 - 3-2 交流声的排除 (207)

第四篇 晶体管放大器

第一章 晶体管放大器的一般理论

- § 1 单级放大电路 (209)
 - § 2 直流偏流的供给和稳定问题 (215)
- 附录一 Z 参量 T 型等效电路输出阻抗 R_0 的推导
- 附录二 用 H 参量双回路等效电路分析放大级的特性

第二章 晶体管放大器的级间耦合电路

- § 1 引言 (222)
- § 2 RC耦合电路 (225)
 - 2-1 电路简介 (225)
 - 2-2 工作点的选择 (226)
 - 2-3 电路计算 (227)
 - 2-4 频率特性 (230)
- § 3 变压器耦合电路 (232)
 - 3-1 电路简介 (232)
 - 3-2 电路计算 (233)

第三章 晶体管音频功率输出级、末前级和多级放大器

- § 1 引言 (236)
- § 2 晶体管单边功率输出级 (237)
- § 3 晶体管推挽输出级 (240)

§ 4 晶体管放大器末前级的特殊问题	(247)
4-1 变压器耦合线路负载阻抗的选择	(247)
4-2 变压器耦合末前级计算中的特殊问题	(248)
4-3 倒相级中的特殊问题	(248)
§ 5 晶体管音频多级放大器	(249)
5-1 多级放大器电路构成的原则	(249)
5-2 音频多级放大器的设计思考路线	(251)
5-3 晶体管音频放大器的实际线路	(252)

第四章 晶体管补偿放大器

§ 1 引言	(254)
§ 2 晶体管放大器的频率特性与过渡特性	(255)
§ 3 晶体管放大器的补偿	(258)
3-1 集电极电感补偿	(258)
3-2 发射极反馈补偿	(262)
3-3 基极补偿	(265)
§ 4 晶体管补偿放大器的设计思考路线	(266)
§ 5 视频放大器的实际线路	(267)

第五章 晶体管直流放大器

§ 1 晶体管直流放大器的特点	(269)
§ 2 工作状态的稳定	(270)
§ 3 晶体管放大器中零点漂移的补偿	(272)
3-1 相互补偿法	(272)
3-2 借助于非线性元件来进行温度补偿	(274)
3-3 采用平衡线路和应用深反馈的线路	(275)

第三篇 电子管放大器

第一章 阻容耦合放大器

§ 1. 引言

在緒論中已經介紹了放大器的用途。在許多場合下，为了滿足負載的要求，往往不是用一个电子管所能解决的，因此实际的放大器一般包括几級。所謂放大器的級就是由一管的柵極到下一管的柵極所包括的电路，如图 1.1 虛綫中的部分。放大器各級之間的連系可以采用各种不同的耦合方式如阻容耦合、电感耦合、变压器耦合等。图 1.1、图 1.2、图 1.3 分別給出了放大器的这几种耦合方式。

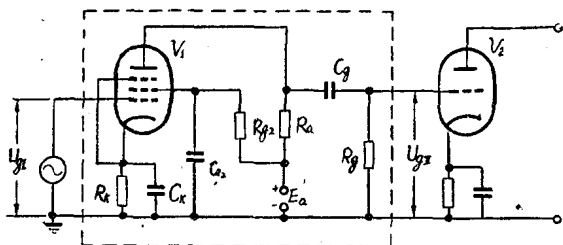


图 1.1 阻容耦合放大級

图 1.1 中所示的阻容耦合放大級是各种放大器电路中应用最广的一种，它的优点是頻帶可以很寬，結構簡單、輕便、价廉。因此它广泛地应用于不同用途的各种放大器——如脈冲放大器、音頻放大器中。

下面我們就图 1.1 的綫路来介紹阻容耦合放大級中各个元件的作用：

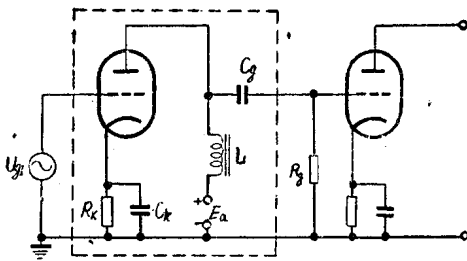


图 1.2 电感耦合放大级

1. 板极负载电阻

R_a : 板极电源电压 E_a 通过 R_a 加到电子管 V_1 的板极上, 使电子管获得正常的直流板极电压。当 V_1 的栅极上加入交变信号时, 板流发生脉动并在 R_a 上产生交流压降。为了获得大的放大量, 则 R_a 必须大。但 R_a 太大时电子管的板压将被它降去太多。

另一方面, 我们希望放大器的频带要宽, 而从以后的研究中可以知道 R_a 大则频带变窄。所以 R_a 的数值要看用途的不同而定, 如脉冲放大器中一般为几百欧到几千欧、而音频放大器

中则为几十千欧到几百千欧。

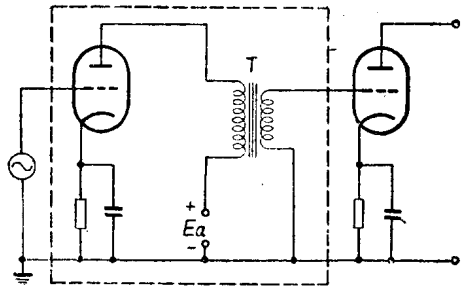


图 1.3 变压器耦合放大级

2. 耦合电容 C_c : 它的作用是把前级电子管板极上的交流信号送到下一级电子管的栅极上, 同时隔断前级板极上的直流高压。由于有了电容 C_c 和电阻 R_k , 对直流而言, R_k 上分配到的直流压降几乎为零, 全部直流压降都降在 C_c 的两端。但对交流来说, 如果 C_c 的阻抗远小于 R_k , 则 C_c 两端的交流压降便很小而全部交流信号都降在电阻 R_k 上, 即后一级电子管的栅极上只有前级耦合过来的交流信号电压。

要 C_c 的阻抗小, 就需要加大 C_c 。但随着电容量的加大, 其体积也增大, 因而它对地的寄生电容也增大, 以后我们将会知道寄生电容的加大将使放大器的高频特性变坏, 一般 C_c 在 0.01 微法到 1

微法的范围内。

3. 栅漏电阻 R_g ：它有两个任务：第一是使电子管的偏压 E_g 能加到栅极上去，并洩漏掉可能堆积在栅极上的电子。第二是前面已经提到过的，使 R_g 上的交流信号电压分配到栅极上去。因此 R_g 的值愈大，分配到的电压也愈大，但是太大了会影响堆积在栅极上的电子的洩漏，因而影响放大器的正常工作。 R_g 允许值的大小视电子管的结构不同而异，电子管手册载有各电子管最大允许的 R_g 值。普通电压放大管约为 0.5 兆欧 ~ 1 兆欧；功率管限为 0.5 兆欧 ~ 0.1 兆欧或更小。

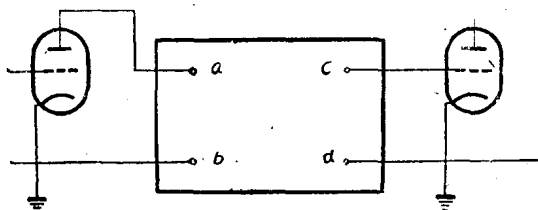
4. 阴极电阻：它的作用是利用板流的直流分量在它上面产生一直流压降供给电子管以负偏压。用这种方法取得的偏压称为“自给栅偏压”。

5. 阴极旁路电容 C_k ：它的作用是旁路板流 i_a 中的交流分量，以免交流成份也在 R_k 上产生交流压降，因此 C_k 应选择得大一些。

6. 屏栅极降压电阻 R_{g2} ：屏栅极电压与板压用一个电源供电时，需将电源电压降低到符合屏栅压的要求， R_{g2} 就是供降压之用。

7. 屏栅极旁路电容 C_{g2} ：其作用是旁路屏栅流的交流分量，以免它在 R_{g2} 上产生交流压降，以使屏栅压保持不变，因此 C_{g2} 不宜太小。

上面我们介绍了阻容耦合放大级中各元件的作用，其中 R_a ， R_g ， C_g 完成了将前一电子管板极上的交流信号耦合到下一电子管



1.4 级间耦合电路的一般表示法