



高等院校电子信息与电气学科特色教材

模拟电子技术基础习题解答

吴友宇 伍时和 主编
武汉理工大学电子技术课程组 编著

清华大学出版社





高等院校电子信息与电气学科特色教材

模拟电子技术基础习题解答

吴友宇 伍时和 主编
武汉理工大学电子技术课程组 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是武汉理工大学电子技术课程组编写的《模拟电子技术基础》一书的习题解答。除对原书中所有习题进行详细的解答外,书中还列出了各章的要点,并对难点进行了分析。

本书可作为模拟电子技术基础课程的教学辅导书,供选用原书做教材的教师和学生参考。

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

模拟电子技术基础习题解答/吴友宇,伍时和主编. —北京:清华大学出版社,2012.1
(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-23121-9

I. ①模… II. ①吴… ②伍… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—解题
IV. ①TN710-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 114249 号

责任编辑:盛东亮

责任校对:梁毅

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62795954,jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

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

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:10.75 字 数:270 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:19.00 元

产品编号:031342-01

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才才是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求,等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的



过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人:盛东亮 shengdl@tup.tsinghua.edu.cn

编者前言

本书是以武汉理工大学电子技术课程组编写的《模拟电子技术基础》一书中的习题为基础编写的。书中对《模拟电子技术基础》一书中所有习题进行了详细的解答,此外还对《模拟电子技术基础》各章的要点、难点进行了分析,可供使用该教材的教师、工程技术人员、考研的读者参考使用。希望本书的出版和使用,能够对所有使用武汉理工大学电子技术课程组编写的《模拟电子技术基础》作为教材的教师有所帮助,能够更好地做好教学工作,有利于教学质量的提高。

由于编者水平有限,书中难免有不足、差错和不完善之处,敬请读者及使用者给予体谅和包容。

本书编者

2010年7月于武汉

目 录

第一部分 《模拟电子技术基础》内容提要	1
第 1 章 半导体的基本知识	1
第 2 章 半导体二极管及其电路	1
第 3 章 双极型三极管及其放大电路	2
第 4 章 单极型场效应管及其放大电路	7
第 5 章 功率放大电路	8
第 6 章 集成运算放大电路	9
第 7 章 负反馈放大电路	10
第 8 章 信号的运算与处理电路	12
第 9 章 正弦波信号产生电路	14
第 10 章 直流稳压电源	15
第 11 章 电子电路的 OrCAD/PSpice 仿真	15
第二部分 相关难点分析	17
第三部分 习题与解答	34
习题 1	34
客观检测题	34
习题 2	36
客观检测题	36
主观检测题	37
习题 3	43
客观检测题	43
主观检测题	50
习题 4	71
客观检测题	71
主观检测题	72
习题 5	83
客观检测题	83
主观检测题	86
习题 6	92
客观检测题	92
主观检测题	93



习题 7	102
客观检测题	102
主观检测题	103
习题 8	118
客观检测题	118
主观检测题	121
习题 9	141
客观检测题	141
主观检测题	142
习题 10	150
客观检测题	150
主观检测题	151
习题 11	160

第一部分

《模拟电子技术基础》内容提要

第 1 章 半导体的基本知识

本章重点为本征半导体、P 型半导体和 N 型半导体的基本电特性,主要是理解载流子、多数载流子、少数载流子等概念。PN 结是 P、N 型半导体紧密结合在一起时,由于多数载流子的扩散运动和少数载流子的偏移运动处在平衡状态时在交界面处形成的空间电荷区。当外加电压破坏这一平衡时,多数载流子、少数载流子运动会得到加强或削弱,形成 PN 结的单向导电性。PN 结的伏安特性表达式(也是二极管,三极管的发射结伏安特性)为

$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

清楚地理解 PN 结的单向导电性是理解二极管、三极管电路工作原理的基础。PN 结的伏安特性表达式是理解以后乘法器电路,包括二极管频率搬移电路分析的基础。

PN 结除了单向导电性之外,还具有电容效应,利用电容效应可制作变容二极管。

PN 结击穿有齐纳击穿和雪崩击穿两种。齐纳击穿是价电子被强拉出来导电的击穿现象,在 PN 结的外加电压达到 $4E_g/q$ 时出现。雪崩击穿是价电子被撞击出来并形成雪崩效应的击穿现象,在 PN 结的外加电压达到 $6E_g/q$ 时出现。 E_g 为 PN 结量子阱能带宽度,由材料性质确定; q 为电子电荷量,即 $1.602\ 189\ 2 \times 10^{-19}$ C(库仑)。

第 2 章 半导体二极管及其电路

本章的重点为:

(1) 二极管的基本结构就是 PN 结,它具有 PN 结的电特性。

(2) 二极管的基本电路模型有以下几种:

① 理想电路模型,正向 $v_D=0$,反向 $i_D=0$ 。

② 恒压降模型,正向 $v_D=0.6\text{V}$,反向 $i_D=0$ 。

③ 折线模型,正向 $v_{th}=0.5\text{V}$, $r_d=(v_D-v_{th})/i_D$,反向 $i_D=0$ 。

④ 小信号模型, $r_d=26/i_D$ 。

电路的分析将以上述的等效电路模型为依据。

(3) 二极管电路的分析方法:

① 断开二极管,用电位法确定二极管两端的电位,判断其是处于正向导通还是反向截止(若有多个二极管并联还要进一步分析其中某一个管导通后并联点电位的变化对其他管两端电位的影响)。

② 若正向导通则用正向电路模型等效。理想电路模型将二极管两端短接;恒压降模

型将二极管用一个电压降为 0.7V(硅管)或 0.3V(锗管)的电压源代替,电压源正极与二极管的正极一致;折线模型将二极管用一个电阻 r_d ($r_d = v_T / i_D$) 与一个电压降为 0.6V(硅管)或 0.2V(锗管)的电压源串联代替,电压源正极与二极管的正极一致;小信号模型将二极管用一个电阻 r_d ($r_d = v_T / i_D$) 代替(小信号模型仅用于分析变化量部分)。

③ 若反向截止则用反向电路模型等效,即将二极管开路。

④ 根据上述等效电路及要求结合电路理论求解。

(4) 二极管的参数: I_F 为最大整流电流, I_R 为反向电流, V_{BR} 为反向击穿电压, C_B 为反向势垒电容, C_D 为正向扩散电容,要理解这些参数的物理含义。

(5) 特殊二极管以稳压二极管为主,其正向特性与普通二极管相同,其反向特性与普通二极管不同。稳压管反向特性的反向击穿区在电路中主要作为稳压器件使用,在这种情况下,其反向等效电路用一动态电阻 r_z 与一电压值为稳定电压的电压源(电压源的正极与稳压二极管负极相同)串联等效。

稳定电压与工作温度的关系为

$$V_z(T) = V_z + V_z \alpha \Delta T$$

式中, V_z 为 20°C 时的稳定电压值, α 为稳定电压温度系数, ΔT 为工作温度与 20°C 的温度差。

稳压管稳压电路调节电阻的计算公式为

$$(V_{\text{imax}} - V_z) / (I_{z\text{max}}) < R < (V_{\text{imax}} - V_z) / (I_{z\text{min}} + I_{L\text{max}})$$

第 3 章 双极型三极管及其放大电路

本章是模拟电子技术的重要基础,主要包括:

(1) 基本概念

① 放大电路模型:

电压放大模型

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$$

电流放大模型

$$\dot{A}_I = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$$

互阻放大模型

$$\dot{A}_R = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i}$$

互导放大模型

$$\dot{A}_G = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i}$$

四种电路模型的转换可以采用戴维南或诺顿定理进行。

② 放大电路的输入电阻和输出电阻:

输入电阻

$$R_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$$

输出电阻

$$R_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} \bigg|_{\substack{\dot{V}_s=0 \\ R_L=\infty}}$$

③ 放大电路电路增益:

电流增益 $20\lg|A_i| \text{ dB}$ 电压增益 $20\lg|A_v| \text{ dB}$ 功率增益 $10\lg|A_p| \text{ dB}$

④ 放大倍数的频率特性:

$$\dot{A}_v(j\omega) = \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)}$$

或

$$\dot{A}_v(j\omega) = |A(j\omega)| \angle \varphi(j\omega)$$

⑤ 通频带为

$$BW = f_H - f_L$$

式中, f_H 为上限截止频率, f_L 为下限截止频率, 分别指放大器的放大倍数随着信号频率的上升或随着信号频率的下降降低到中频频率电压放大倍数的 0.707 倍时所对应信号频率。

(2) 三极管的三个工作区、输入输出特性、电流电压基本关系

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = I_S(e^{v_{be}/V_T} - 1)$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B}$$

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha) = \Delta I_C / \Delta I_B$$

当 $I_{CEO} = I_{CBO}(1 + \beta)$ 很小时, 动态 β 与静态 $\bar{\beta}$ 可以认为相等。

(3) 共基极、共射极、共集电极三种基本放大电路的构成原则

① 应具有产生偏置电流 I_B 的偏置电路。② 输出应具有能将变化的电流转变成电压的器件, 如 R_c 、 R_e 。

③ 输入信号要能加到三极管的 b、e 极之间并且不影响三极管的直流工作状态。

④ 电源的极性要使三极管处于放大状态, 即发射结处于正向偏置状态 $V_{BE} = 0.7\text{V}$ (硅管) 或 0.3V (锗管), 集电结处于反向偏置状态。若把 N 沟道与 NPN 型, P 沟道与 PNP 型双极型三极管相类比, 则场效应管放大电路的构成原则相似。

(4) 放大电路直流通路和交流通路概念, 放大电路的分析方法

① 图解法。主要任务包括:

(a) 直流负载线求解。通过点 $[V_{CC}, 0]$ 及点 $[0, V_{CC}/(R_c + R_e)]$ (若电路中不存在 R_e , 则

此处仅有 R_c), I_{BQ} 通常采用估算法得出, 确定 Q 点及空载时放大电路的电压放大倍数。

(b) 交流负载线。斜率 $= -1/R'_L$, $R'_L = R_c // R_L$, 经过 Q 点和 $[(V_{CQ} - \Delta I_c R'_L), (I_{CQ} + \Delta I_c)]$ (电阻单位为 $k\Omega$, 电压单位为 V, 电流单位为 mA) 确定放大电路有载时的最大动态不失真范围以及有载时电路的放大倍数, 其中 $V_o = +V_{CE}$ (共射极、共基极) 或 $-V_{CE}$ (共集电极), 若静态工作点在交流负载线的中点, 最大不失真输出电流为 I_{CQ} , 输出电压为 V_{CEQ} , 若静态工作点不在交流负载线的中点, 最大不失真输出电流及输出电压等于 I_{CQ}, V_{CEQ} 减去截止输出特性曲线或饱和输出特性曲线与负载线的交点中较小的一段的值。一般情况下, 输出电流, 输出电压等于 I_{CQ}, V_{CEQ} 减去 V_i 最大值引起 I_B 变化最大值输出特性曲线与负载线的交点一段的值。图解法仅用于单级放大电路的分析。

② 放大电路的解析分析方法。主要任务包括:

直流静态值计算(直流通路的概念: 将电路中的所有电容两端开路后的电路形式即为直流通路)和交流动态值计算(交流通路概念: 将电路中的所有电容两端短路, 直流电源对“地”短路后的电路形式即为交流通路)。

用直流通路估算放大电路的直流 Q 值, 即 I_{CQ}, V_{CEQ}, I_{BQ} , 其计算方法一般从求 I_B 入手, 并利用 $I_E = (1 + \beta) I_B, I_C = \beta I_B$ 及克希荷夫电压及电流定律求解。根据本书内容直流偏置可以有固定式、电压反馈式、分压式及电流源四种偏置形式。

固定式偏置电路计算公式

$$I_{BQ} = (V_{CC} - V_{BE}) / R_b$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$$

电压反馈式偏置电路计算公式

$$I_{BQ} = (V_{CC} - V_{BE}) / [R_b(1 + \beta) + R_f]$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C + I_B) R_c$$

分压式偏置电路计算公式

$$V_B = V_{CC} R_{b2} / (R_{b1} + R_{b2})$$

$$I_{BQ} = (V_B - V_{BE}) / [R_b + R_c(1 + \beta)]$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} \quad \text{或} \quad I_E = (V_B - 0.7) / R_e$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_c + R_e)$$

这一种偏置电路要求 $I_{R_{b2}} = (5 \sim 10) I_B, V_B = (3 \sim 5) V_{BE}$ 。

③ 交流动态值计算。 h 参数微变等效电路分析法是交流动态值计算的手段, 方法是以交流电路为基础作出放大电路的微变等效电路, 即三极管 b、e 极之间用电阻 $r_{be} = 200 + 26(1 + \beta) / I_{EQ}$ 等效, c、e 极之间用受控电流源 βI_b 与电阻 r_{ce} 并联代等效(规定 I_b 正方向由 b 极指向 e 极, 电流控制受控电流源 βI_b 则由 C 指向 E)后, 其他电路元件以其在交流通路连接方式再与三极管用其为微变电路等效后的 e、b、c 各接点连接, 即放大电路的微变等效电路, 由于 r_{ce} 较大, 一般可以忽略。

用微变等效电路分析放大电路的交流指标(包括单级和多级放大电路), 例如电压放大倍数 A_{vi}, A_{vs} 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 和输出电压。

三种放大电路的分析与计算：共射(源)极、共基(栅)极、共集电(漏)极电路的输入电阻、输出电阻、电压放大倍数的计算。

(a) 具有发射极电阻的共射极放大器(若 R_e 被电容旁路, 则在下面各式中令 $R_e = 0$ 即可)。

电压放大倍数

$$\dot{A}_v = \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_e}$$

电路的输入电阻

$$R_i = [r_{be} + (1 + \beta)R_e \parallel R_{b1} \parallel R_{b2}]$$

电路的输出电阻

$$R_o = R_c \parallel \left[r_{ce} + R_e + \frac{R_e}{r_{be} + R'_s + R_e} (\beta r_{ce} - R_e) \right] \approx R_c, \quad R'_s = R_b \parallel R_s$$

(b) 共基极放大器的电压放大倍数为

$$\dot{A}_v = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

输入电阻

$$R_i = R_c \parallel \frac{r_{be} + R_s \parallel R_b}{1 + \beta}$$

输出电阻

$$R_o = R_c \parallel \left[r_{ce} \left(1 + \frac{\beta R'_s}{r_{be} + R'_s} \right) - \frac{(1 + \beta) R'_s}{\beta (r_{be} + R'_s)} R'_s \right] \approx R_c$$

$$R'_s = R_e \parallel r_{be} \parallel R_s$$

(c) 共集电极放大器的电压放大倍数为

$$\dot{A}_v = \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta)R'_L}, \quad R'_L = R_L \parallel R_c$$

输入电阻

$$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R'_L], \quad R'_L = R_L \parallel R_c$$

输出电阻

$$R_o = R_e \parallel \frac{r_{be} + R'_s}{1 + \beta}, \quad R'_s = R_b \parallel R_s$$

(5) 放大电路的频率响应

它包括高频响应和低频响应, 高频响应是由三极管的极间电容引起的, 低频响应是由耦合电容和旁路电容引起的。放大电路的频率特性包括相频特性和幅频特性, 分别用 $\varphi(j\omega)$ 和 $A(j\omega)$ 表示, 分别表示相位移和电压放大倍数随输入信号的频率变化而变化的特性。

分析放大电路的高频响应时, 放大电路的小信号等效电路同样是在交流通路的基础上, 三极管用其高频微变等效。三极管 b、e 极之间用 r'_{bb} 与 $r'_{be} \parallel C'_{be}$ 串联代替, c、b 极之间用 C'_{bc} 代替, c、e 极之间用电压控制受控电流源 $g_m V'_{be}$ 代替, V'_{be} 为 r'_{be} 或 C'_{be} 两端的电压降, 其中 r'_{bb} 为晶体管 b 区的体电阻 $r'_{be} = 26(1 + \beta) / I_{EQ}$, C'_{be} 为发射结的结扩散电容, C'_{bc} 为集电结的结势垒电容, 为 $3 \sim 5 \text{pF}$, g_m 为三极管高频跨导, 与 β 的关系为 $g_m = \beta / r'_{be}$ 或 $g_m r'_{be} = \beta$ 。

三极管其他的高频参数为

$$\omega_{\beta} = \frac{1}{r'_{be}(C'_{be} + C'_{bc})}$$

$$\omega_T = \frac{g_m}{C'_{be} + C'_{bc}}$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\omega(C'_{be} + C'_{bc})r'_{be}}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega C'_{be}/g_m}$$

三极管等效电路中将 C'_{bc} 归算到输入端(b、e之间)的电容量为

$$C_m = (1 + g_m R'_1) C'_{bc}$$

归算到输出端(c、e之间)的等效电容量为

$$C'_m = \left(1 - \frac{1}{g_m R'_1}\right) C'_{bc}$$

用 $f_T = 1/[2\pi r'_{be}(C'_{be} + C'_{bc})]$ 关系可计算出 C'_{be} 。

幅频特性的标准形式为

$$A_{vH} = \frac{A_{v_0}}{1 + jf/f_H}$$

$$A_{vL} = \frac{A_{v_0}}{1 - jf_L/f}$$

相频特性的标准形式为

$$\varphi = -\arctan(f/f_H)$$

$$\varphi = \arctan(f_L/f)$$

式中, f_H 为高频截止频率, f_L 低频截止频率, 可以由放大电路的电路结构和等效电路求得。

当放大倍数用对数分贝数表示时, 其图形称为波特图, 用极坐标表示时, 其图形称为奈奎斯特图。对于单级单管共射极放大电路, 其高频电压放大倍数与中频(放大电路上限截止频率以下与下限截止频率以上之间的频率段称为中频段)电压放大倍数之间的关系为

$$A = A_M / (1 + jf/f_H)$$

$$f_H = 1/[2\pi R(C'_{be} + C_M)]$$

$$C_M = (1 + g_m R'_L)$$

$$R = R_s + r_{be}$$

$$A_M = -\beta R_L / R$$

由此而构成的多级放大电路的高频响应为

$$A(jf) = [A_{M1}/(1 + jf/f_{H1})] \cdot [A_{M2}/(1 + jf/f_{H2})] \cdot [A_{M3}/(1 + jf/f_{H3})] \cdot \dots$$

每个单级的 f_H 可按照上述方法进行, 而总的上限截止频率为

$$f = \sqrt{\left(\frac{1}{f_{H1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_{H2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_{H3}}\right)^2 + \dots}$$

分析放大电路的低频响应时, 放大电路的交流通路为 V_{CC} 对公共端短接, 所有耦合电容和旁路电容均保留在原有电路中, 但 R_e 及 R_{b1} 、 R_{b2} 等电阻可以忽略。对于单级单管共射极放大电路其低频电压放大倍数与中频(放大电路的上限截止频率以下、下限截止频率以上之

间的频率段称为中频段)电压放大倍数之间的关系为

$$A = A_M / (1 + j f_L / f)$$

$$f_L = f_L = 1 / (2\pi RC)$$

$$R = R_s + r_{be}$$

$$C = \{C_1 [C_e / (1 + \beta)]\} / \{C_1 + [C_e / (1 + \beta)]\}$$

多级放大电路的低频响应为

$$A = [A_{M1} / (1 + j f_{L1} / f)] \cdot [A_{M2} / (1 + j f_{L2} / f)] \cdot [A_{M3} / (1 + j f_{L3} / f)] \cdot \dots$$

求解每个单级的 f_L 可按照上述方法进行,总的下限截止频率为

$$f_L = \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2 + \dots}$$

第 4 章 单极型场效应管及其放大电路

本章主要介绍场效应管及其构成的放大电路,主要内容包括:

(1) 场效应管的工作原理、主要参数、电压转移特性、输出特性。场效应管是电压控制电流的器件,电流电压关系为

$$i_D = I_{DSS} (1 - v_{GS} / V_P)^2 \quad (\text{耗尽型})$$

$$i_D = I_{D0} (v_{GS} / V_T - 1)^2 \quad (\text{增强型})$$

式中, I_{DSS} 为 $v_{GS} = 0$ 时耗尽型管的漏极电流, I_{D0} 为 $v_{GS} = 2V_T$ 时增强型管的漏极电流。

(2) 场效应管构成的放大电路。场效应管放大电路一般只用于构成共源极和共漏极放大器,偏置形式也只有自生偏压偏置(只适应于耗尽型管)和分压式偏置电路。

自生偏压偏置电路的直流参数计算公式为

$$V_{GS} = -I_{DS} R_s, \quad I_D = (1 - V_{GS} / V_P)^2$$

分压式偏置电路的直流参数计算公式为

$$V_G = V_{DD} R_{g2} / (R_{g1} + R_{g2})$$

$$V_{GS} = V_G - I_{DS} R_s$$

$$I_D = (1 - V_{GS} / V_P)^2 \quad (\text{耗尽型})$$

$$I_D = (V_{GS} / V_T - 1)^2 \quad (\text{增强型})$$

联立上述方程可以求得 I_D 与 V_{GS} , 即

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_d + R_s)$$

注意: $I_{GS} = 0, R_{GS} = \infty$ 。计算交流参数时,放大电路的微变等效电路是将场效应管的 g, s 极之间用电阻 $r_{gs} = \infty$ 代替, d, s 极之间用受控电流源 $g_m V_{gs}$ 与电阻 r_d 并联代替,规定 V_{gs} 正方向由 G 指向 S , 电压控制受控电流源 $g_m V_{gs}$ 则由 D 指向 S , 其他电路元件以其在交流通路连接方式再与场效应管用其微变电路等效后的 g, d, s 各接点连接,即为放大电路的微变等效电路。由于 r_d 比 r_{ce} 要小得多,故一般不忽略,必要时可以将受控电流源 $g_m V_{gs}$ 与电阻 r_d 并联转换成受控电压源 $g_m V_{gs} r_d$ 与电阻 r_d 串联进行电路参数的计算。

用微变等效电路分析放大电路的交流指标(包括单级和多级放大电路)电压放大倍数 A_{vi}, A_{vs} 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。共源极和共漏极输入电阻为

$$R_i = R_g \quad (\text{自生偏压偏置电路})$$

$$R_i = R_{g3} + R_{g1} \parallel R_{g2}$$

输出电路一般等于 R_d (共源极) 或 R_s (共漏极)。

放大倍数为

$$\dot{A}_v = -g_m R'_L / (1 + g_m R_s)$$

若考虑 r_d 的影响, 则为

$$\dot{A}_v = -[g_m R'_L r_d / (1 + g_m R_s r_d / R)] / R$$

$$R = r_d + R_s + R_L$$

第 5 章 功率放大电路

(1) 功率放大器是在大信号条件下工作, 所以只能用图解的方法分析。模拟电子电路所介绍的功率放大器有甲类、乙类、甲乙类等放大器。甲类功率放大器的效率太低, 使用较少, 乙类放大器存在交越失真, 所以常用的是甲乙类放大器。甲乙类功率放大器有单电源工作的 OTL (无输出变压器)、OCL (无输出耦合电容)、BTL (桥式电路) 等类型。

(2) 功率放大器的参数计算包括:

输出功率

$$P_o = V_{om}^2 / 2R_L$$

电源提供功率

$$P_V = 2V_{CC} V_{om} / \pi R_L$$

功率放大管损耗功率

$$P_T = (P_V - P_o) / 2$$

功率放大器的效率

$$\eta = P_o / P_V$$

式中, V_{om} 大小随不同的电路而不同, 对于双电源 OCL 电路, V_{om} 为

$$V_{om} = V_{CC} - V_{CES} \quad (\text{最大不失真输出幅值})$$

$$V_o = V_{im} \quad (\text{当输入电压不够大时})$$

对于单电源 OTL 电路, V_{om} 为

$$V_o = (V_{CC} / 2) - V_{CES} \quad (\text{最大不失真输出幅值})$$

$$V_o = V_{im} \quad (\text{当输入电压不够大时})$$

对于 BTL 电路, V_{om} 为

$$V_o = V_{CC} - 2V_{CES} \quad (\text{最大不失真输出幅值})$$

$$V_o = V_{im} \quad (\text{当输入电压不够大时})$$

(3) 三极管最大损耗为

$$P_{T(\max)} = 0.2P_{om} \quad (\text{理想状态, 即 } V_{CES} = 0 \text{ 时的输出功率})$$

一般情况下, 甲乙类功率放大三极管的最大功率损耗出现在输出电压幅值

$$V_o = 2V_{CC} / \pi \quad (\text{OCL})$$

或

$$V_o = V_{CC} / \pi \quad (\text{OTL})$$

时,其计算公式为

$$P_{T1(\max)} = P_{T2(\max)} = V_{CC}^2 / (\pi^2 \cdot R_L) \quad (\text{OCL})$$

或

$$P_{T1(\max)} = P_{T2(\max)} = (V_{CC}/2)^2 / (\pi^2 R_L) \quad (\text{OTL})$$

(4) 功率放大电路的三种失真有:非线性饱和失真(三极管工作点过高进入饱和区工作引起的失真,调节方法,增大 R_b 的值)、截止失真(三极管工作点过低进入截止区工作引起的失真,调节方法,降低 R_b 的值)和交越失真(功率放大电路中的乙类工作状态由于三极管工作点在截止区工作引起的失真,是输出电压的波形在由负变正或由正变负时出现的一种失真现象,调节方法,增加放大电路的偏置电路,使三极管静态时工作于靠近截止区的甲乙类状态)。

第 6 章 集成运算放大电路

(1) 集成运算放大器的偏置电路为恒流源。

镜像恒流源

$$I_C = I_{REF} = (V_{CC} - V_{BE})/R_c$$

微恒流源

$$I_C = (V_T/R_e^2) \ln(I_{REF}/I_S)$$

$$I_{REF} = (V_{CC} - V_{BE})/R_c$$

比例恒流源

$$I_C = R_{e1} I_{REF}/R_e^2$$

$$I_{REF} = (V_{CC} - V_{BE})/(R_c + R_{e1})$$

(2) 集成运算放大器为直接耦合多级放大器,为了抑制耦合放大器存在的零点漂移,输入级采用差分放大电路,所以输入具有两端,称为同相输入端和反相输入端。为了提高输出带负载能力,输出级为射极跟随器,所以输出电阻很小。

(3) 差分放大电路直流参数计算 $I_{E1} = I_{E2}$, 差分放大电路

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_c$$

$$V_E = 0 - I_B R_b - V_{BE}$$

具有发射极电阻及调零电阻的典型差分放大电路

$$I_B = [0 - (-V_{EE}) - V_{BE}]/[R_b + (R_w/2 + 2R_c)(1 + \beta)]$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_{C1} R_c$$

$$V_E = 0 - I_B R_b - V_{BE}$$

(4) 差分放大电路参数计算。差动信号放大倍数为

$$A_{VD} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_w/2}$$

$$R'_L = R_c \parallel \frac{R_L}{2} \quad (\text{双端})$$

$$R_c \parallel R_L \quad (\text{单端})$$