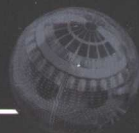


高等学校理工科
电子信息类课程

学习辅导丛书



模拟电子技术 学习辅导及习题详解

高吉祥 主编

▶ 学习要点

▶ 习题分析

▶ 练习题及参考解答

▶ 考研试题详解

学习的帮手

考研的参谋



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等学校理工科电子信息类课程学习辅导丛书

模拟电子技术

学习辅导及习题详解

高吉祥 主编

盛义发 朱卫华 高勐 朱惠玲 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为高等学校电子信息专业、电气工程专业、计算机专业、自动化专业及相近专业而编写的教材。本书分为两篇。第1篇主要介绍半导体器件、放大电路的基础、放大电路的频率响应、集成运算放大电路、放大器的反馈、集成运算放大器的应用、功率放大电路和直流稳压电源的教学基本要求、内容综述、典型题精解及习题。第2篇主要介绍模拟考题、近几年来全国重点大学部分高校研究生考题和综合设计。

根据教育部高等教育教学大纲的要求和多年来教学实践的体会,以及研究生入学考试和各类大学生电子设计竞赛的需要,本书不仅包括《模拟电子技术》教科书的基本知识和基本技能的训练,而且还编著了研究生入学考试模拟题、近几年来全国重点大学部分入学考试题及全国大学生电子设计竞赛题。

本书可作为报考理工科硕士研究生的考生考前复习用书,也可作为大学生、专科生学习课程的辅导教材,还可以作为大学生参加各类电子设计制作大赛和电子类、电气类、自动化类工程技术人员设计各类产品的有益参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术学习辅导及习题详解/高吉祥主编. —北京:电子工业出版社,2006.1

(高等学校理工科电子信息类课程学习辅导丛书)

ISBN 7-121-02204-4

I. 模... II. 高... III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 001010 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:22.75 字数:510 千字

印 次:2006 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:29.50 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbpp@phei.com.cn。

前 言

本书是为国防科技大学和南华大学联合编著的《模拟电子技术》相配套而编著的。但是,本书的出版,不仅可为考研人员备考《模拟电子技术》、《模拟电子技术基础》、《低频电子线路》及《模拟电子线路》一类课程提供一本实用的复习指导书,也为在校内的本科生、广大自考人员学习掌握这类课程的基本知识、基本技能和精髓,提供一本不可多得的教学辅导书和自学指南。同时,还为参加全国大学生电子设计竞赛的师生和从事电子工程设计的工程技术人员提供一本有益的参考书。

本书分为解析篇和实践篇两大部分。

第一篇 解析篇,有8章,它是与高吉祥主编的《模拟电子技术》一书相配套,各章的内容与之呼应。每章内容包括教学基本要求,内容综述、典型题精解及习题四个部分。教学基本要求中对各章涵盖的主要知识点分熟练掌握、正确理解和一般了解三个层次给出了基本要求,并指明了重点和难点;内容综述中对每章的主要教学内容,特别是要求熟练掌握/正确理解的重点内容进行了概括和论述,实际上是教材内容的浓缩;典型题精解则是在认真分析各大专院校多年来考研试卷和相关教材习题的基础上,综合归纳提出了各章的训练题型并给予解答;习题部分是在教材习题和参考书习题的基础上编写的。

第二篇 实践篇,有3章。第9章是模拟习题,第10章是全国重点大学近几年考研试卷精选。第11章是综合设计,搜集了十多年来全国大学生电子竞赛属于模电为主的考题,并给予了设计全过程。

《模拟电子技术》课程已形成了配套,包括主教材、学习辅导与习题详解,实验及课程设计、多媒体教学课件四个部分,在此一一列举。

1. 高吉祥主编,高天万副主编,陈和、朱卫华编著《模拟电子技术》2004年7月由电子工业出版社出版。

2. 高吉祥主编,盛义发、朱卫华、高勐、朱惠玲编著《模拟电子技术学习辅导及习题详解》2006年1月由电子工业出版社出版。

3. 高吉祥主编,易凡副主编、丁文霞、陆珉、刘安芝编著《电子技术基础实验与课程设计》(第二版)2005年2月由电子工业出版社出版。

4. 高吉祥主编,王旭东开发的《模拟电子技术》多媒体教学课件由电子工业出版社于2004年9月上市;

参加编写工作的有高吉祥、盛义发、朱卫华、高勐、朱惠玲等人。高吉祥主编。第4章、6章、9章、10章、11章由高吉祥执笔,第1章、2章由盛义发、高吉祥执笔,第3章由高

勔执笔,第5章由朱惠玲、高吉祥执笔,第7、8章由朱卫华执笔。本书在编写过程中得到南华大学凌球校长和国防科学技术大学电子科学与工程学院唐朝京副院长的大力支持与具体指导。本书由唐朝京主审,叶光华、刘安芝、库希树、刘希顺、高广珠、陈和、王新林、唐东、陆珉、关宇锋、张清明、余丽等人为本教材的编撰做了大量的工作,在此表示感谢。

高吉祥
2005年12月于长沙

常用文字符号说明

一、常用符号

(1) 电流和电压

I_B 、 U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流量
I_b 、 U_{be}	大写字母、小写下标表示交流有效值
$\dot{I}_b$ 、 $\dot{U}_{be}$	大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量
i_B 、 u_B	小写字母、大写下标表示总瞬时值
i_{be} 、 u_{be}	小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

(2) 直流电源电压

V_{CC}	双极型三极管集电极直流电源电压
V_{BB}	双极型三极管基极直流电源电压
V_{EE}	双极型三极管发射极直流电源电压
V_{DD}	场效应管漏极直流电源电压
V_{GG}	场效应管栅极直流电源电压
V_{SS}	场效应管源极直流电源电压

(3) 电阻

R	大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
r	小写字母表示器件的等效电阻

二、基本符号

1. 电流和电压

I_i 、 U_i	输入电流、输入电压
I'_i 、 U'_i (I'_d 、 U'_d)	净输入电流、净输入电压
I_o 、 U_o	输出电流、输出电压
$U_{o(AV)}$	输出电压平均值
U_{om}	最大输出电压
I_f 、 U_f	反馈电流、反馈电压
I_Q 、 U_Q	静态电流、静态电压
U_{REF}	参考电压
U_s	信号源电压
U_T	温度的电压当量
I_+ 、 U_+	集成运放同相输入端的电流、电压

- I_- 、 U_- 集成运放反相输入端的电流、电压
2. 功率
- P 功率的通用符号
- P_o 输出交变功率
- P_{om} 输出交变功率最大值
- P_V 电流提供的直流功率
3. 频率
- B_W 通频带宽度
- f_H 放大电路的上限(-3dB) 频率
- f_L 放大电路的下限(-3dB) 频率
- f_o 振荡频率、谐振频率
- ω 角频率的通用符号
4. 电阻、电容、电感、阻抗
- R_i 、 R_o 电路的输入电阻、输出电阻
- R_{if} 、 R_{of} 有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
- R_L 负载电阻
- R_s 信号源内阻
- G 电导的通用符号
- C 电容的通用符号
- L 电感的通用符号
- X 电抗的通用符号
- Z 阻抗的通用符号
5. 增益或放大倍数, 反馈系数
- A 增益或放大倍数的通用符号
- A_c 共模电压放大倍数
- A_d 差模电压放大倍数
- A_i 电流放大倍数
- A_u 电压放大倍数
- A_{uf} 有反馈时的电压放大倍数
- A_{us} 考虑信号源内阻时的电压放大倍数
- F 反馈系数的通用符号

三、器件符号

1. 器件及引脚名称

- D 场效应管的漏极

G	场效应管的栅极
S	场效应管的源极
VD	二极管
VD _Z	稳压管
VT	双极型三极管,场效应管
b	双极型三极管的基极
c	双极型三极管的集电极
e	双极型三极管的发射极
2. 器件参数	
A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'c}$	集电结等效电容
$C_{b'e}$	发射结等效电容
I_{CBO}	集电极 — 基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极 — 发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
$I_{C(AV)}$	整流二极管平均电流
I_s	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S_R	集成运放转换速率
U_Z	稳压管稳定电压
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极 — 基极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极 — 发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极 — 基极之间的反向击穿电压
U_{CES}	集电极 — 发射极之间的饱和管压降
U_{Icm}	集成运放最大共模输入电压
U_{Idm}	集成运放最大差模输入电压
U_{IO}	集成运放输入失调电压
U_P	场效应管的夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
B_{WG}	集成运放的单位增益带宽

f_T	双极型三极管的特征频率
f_α	共基截止频率
f_β	共射截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
r_{be}	共射接法下基极 — 发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极 — 发射极之间的微变等效电阻
r_{DS}	场效应管漏极 — 源极之间的微变等效电阻
r_{GS}	场效应管栅极 — 源极之间的微变等效电阻
r_{id}	集成运放差模输入电阻
α	共基电流放大系数
$\bar{\alpha}$	共基直流电流放大系数
α_{TIO}	集成运放输入失调电流温漂
α_{UIO}	集成运放输入失调电压温漂
β	共射电流放大系数
$\bar{\beta}$	共射直流电流放大系数

四、其他符号

D	非线性失真系数
K	热力学温度
K_{CMR}	共模抑制比
M	互感系数
Q	品质因数
S	整流电路的脉动系数
S_r	稳压系数
T	周期, 温度
η	效率
τ	时间常数
φ	相位角

目 录

第 1 篇 解 析 篇

第 1 章 半导体器件基础	1
1.1 教学内容与要求	1
1.2 内容综述	1
1.2.1 半导体二极管	2
1.2.2 双极型三极管	3
1.2.3 场效应管	4
1.3 典型题型及习题精解	6
1.4 自测习题	11
第 2 章 放大电路的基础	14
2.1 教学内容与要求	14
2.2 内容综述	14
2.2.1 放大电路	14
2.2.2 半导体三极管基本放大电路	15
2.2.3 场效应管放大电路	18
2.2.4 多级放大电路	22
2.3 典型题型及习题精解	22
2.4 自测习题	42
第 3 章 放大电路的频率响应	53
3.1 教学内容与要求	53
3.2 内容综述	54
3.2.1 频率响应的一般概念	54
3.2.2 三极管的频率参数	55
3.2.3 单管共射放大电路的频率响应	56
3.2.4 多级放大电路的频率响应	58
3.3 典型题型及习题精解	58
3.4 自测习题	65
第 4 章 集成运算放大电路	68
4.1 教学内容与要求	68
4.2 内容综述	68

4.2.1 集成运算放大器的组成及主要技术指标	69
4.2.2 电流源电路	70
4.2.3 差动放大电路	71
4.2.4 中间级	73
4.2.5 输出级	74
4.3 典型题型及习题精解	75
4.4 自测习题	86
第5章 反馈放大电路	92
5.1 教学内容与要求	92
5.2 内容综述	93
5.2.1 反馈的概念	93
5.2.2 反馈分类及判断方法	93
5.2.3 负反馈放大电路的组态	94
5.2.4 深度负反馈放大电路的计算	95
5.2.5 负反馈对放大电路性能的影响	96
5.2.6 负反馈对放大电路的自激及消除	97
5.3 典型题型及习题精解	98
5.4 自测习题	116
第6章 集成运算放大器的应用	125
6.1 教学内容与要求	125
6.2 内容综述	125
6.2.1 运算电路	126
6.2.2 信号处理中的放大电路	129
6.2.3 滤波电路	130
6.2.4 电压比较器	132
6.2.5 正弦波振荡器	133
6.2.6 非正弦波振荡器	136
6.2.7 波形变换电路	137
6.2.8 利用集成运放实现的信号转换电路	138
6.2.9 模拟乘法器及其应用	138
6.3 典型题型及习题精解	149
6.4 自测习题	166
第7章 功率放大电路	170
7.1 教学内容与要求	170
7.2 内容综述	170
7.2.1 功率放大电路的一般问题	170

7.2.2 互补对称功率放大电路	171
7.2.3 其他形式的功率放大电路	172
7.3 典型题型及习题精解	173
7.4 自测习题	179
第 8 章 直流稳压电源	185
8.1 教学内容与要求	185
8.2 内容综述	185
8.2.1 直流电源的组成与功能	185
8.2.2 小功率整流滤波电路	186
8.2.3 硅稳压管稳压电路	187
8.2.4 串联反馈式直流稳压电路	188
8.3 典型题型及习题精解	189
8.4 自测习题	195

第 2 篇 实 战 篇

第 9 章 模拟试卷	199
9.1 模拟试卷(一)	199
9.2 模拟试卷(二)	201
9.3 模拟试卷(三)	203
9.4 模拟试卷(四)	204
9.5 模拟试卷(五)	207
第 10 章 全国重点大学近几年考研试卷精选	210
10.1 国防科技大学 1999 年硕士研究生入学考试试卷	210
10.2 电子科技大学 1999 年硕士研究生入学考试试卷	212
10.3 南京航空航天大学 1999 年硕士研究生入学考试试卷	219
10.4 哈尔滨工业大学 1999 年硕士研究生入学考试试卷	223
10.5 上海交通大学 1999 年硕士研究生入学考试试卷	225
10.6 国防科技大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	228
10.7 电子科技大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	230
10.8 北京理工大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	235
10.9 北方交通大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	237
10.10 东南大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	239
10.11 浙江大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	241
10.12 西安交通大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	243
10.13 湖南大学 2000 年硕士研究生入学考试试卷	245
10.14 国防科技大学 2001 年硕士研究生入学考试试卷	246

10.15	东南大学 2001 年硕士研究生入学考试试卷·····	248
10.16	国防科技大学 2002 年硕士研究生入学考试试卷·····	251
10.17	东南大学 2002 年硕士研究生入学考试试卷·····	255
10.18	国防科技大学 2003 年硕士研究生入学考试试卷·····	257
10.19	华中科技大学 2003 年硕士研究生入学考试试卷·····	259
10.20	国防科技大学 2004 年硕士研究生入学考试试卷·····	261
10.21	华中科技大学 2004 年硕士研究生入学考试试卷·····	263
第 11 章	综合设计 ·····	267
11.1	简易数控直流电源(1994 年全国大学生电子设计竞赛 A 题) ·····	267
11.2	直流稳压电源(1997 年全国大学生电子设计竞赛 A 题) ·····	279
11.3	测量放大器(1999 年全国大学生电子设计竞赛 A 题) ·····	286
11.4	宽带放大器(2003 年全国大学生电子设计竞赛 B 题) ·····	295
11.5	实用低频功率放大器(1995 年全国大学生电子设计竞赛 A 题) ·····	304
11.6	高效率音频功率放大器(2001 年全国大学生电子设计竞赛 D 题) ·····	312
11.7	水温控制系统(1997 年全国大学生电子设计竞赛 C 题) ·····	324
11.8	数字式工频有效值多用表(1999 年全国大学生电子设计竞赛 B 题) ·····	331
11.9	简易电阻、电容和电感测试仪(1995 年全国大学生电子设计 竞赛 D 题) ·····	342
参考文献	·····	349

第 1 篇 解 析 篇

第 1 章 半导体器件基础

1.1 教学内容与要求

电子电路要用电子器件来构成。在学习电子电路之前,必须对半导体器件(半导体二极管、稳压管、变容二极管、双极型三极管、场效应管)有一定的了解。本章重点是各器件的特性。对于半导体器件,主要着眼于在电路中的使用,关于器件内部的物理过程只要求有一定的了解。本章主要内容的基本要求如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 第 1 章教学内容及基本要求

教 学 内 容		基本要求			重点与难点
		熟练掌握	正确理解	一般了解	
半导体基础知识				√	重点： 二极管、三极管、场效应管的特性
PN 结与 半导体 二极管	PN 结的特性		√		
	PN 结的单向导电性		√		
	二极管的伏安特性	√			
	主要参数及其特殊二极管			√	
半导体 三极管	三极管的结构			√	
	电流的分配与放大作用	√	√		
	三极管的特性与工作状态	√	√		
	三极管的主要参数			√	
场效 应管	场效应管的结构与分类		√		
	场效应管的特性	√	√		
	场效应管的主要参数			√	

1.2 内容综述

半导体材料包括本征半导体和杂质半导体。本征半导体是纯净的半导体,导电率低,

热激发条件下仅有少数电子获得足够能量形成电子空穴对。杂质半导体是在本征半导体中掺杂少量的有用杂质,N型半导体电子为多子,P型半导体空穴为多子。半导体的两种导电机理是电场作用下的漂移运动和载流子浓度差作用下的扩散运动。半导体电性能与半导体的掺杂浓度和温度有关,掺杂浓度越大、温度越高,其导电能力越强。电子电路中常用的半导体器件有二极管、稳压器、变容二极管、双极型三极管和场效应管。

1.2.1 半导体二极管

1. PN 结及其单向导电性

PN结是半导体器件的基本结构单元,是由载流子的扩散运动和漂移运动动态平衡形成的,其基本特性是单向导电性。

外加正压:削弱内电场,耗尽层变窄,扩散 > 漂移,电流大。

外加反压:增强内电场,耗尽层变宽,扩散 < 漂移,电流 ≈ 0 。

(1) PN 结的单向导电性

PN结的伏安特性: $I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$

式中, I_s 为反向饱和电流; U_T 是温度的电压当量,在常温(300K)下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

$U > 0$, 且 $U \gg U_T$ 时, $I \approx I_s e^{U/U_T}$, 伏安特性呈非线性指数规律;

$U < 0$, 且 $|U| \gg U_T$ 时, $I \approx -I_s$, 电流基本与 U 无关。

(2) PN 结的反向击穿特性

当PN结反向电压增大到一定值时,反向电流随电压的增加而急剧增大。PN结的反向击穿有齐纳击穿(Zener Breakdown)和雪崩击穿(Avalanche Multiplication)之分。

(3) PN 结的温度特性

温度升高时,正向偏置的PN结的内建电势减少,PN结的正向端电压降以 $-(2.0 \sim 2.5)\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的规律减小;反向饱和电流则以温度每升高 10°C 加倍的规律增加。

(4) PN 结的电容特性

PN结电容由势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 组成。PN结正向偏置时,以扩散电容 C_d 为主,其大小与扩散电流呈正比;反向偏置时,以势垒电容 C_b 为主,它随外加反偏电压的变化而变化。

2. 半导体二极管

半导体二极管是由一个PN结构成的,其基本特性就是PN结的特性。与理想PN结不同的是,它存在一个正向导通电压或阈值电压 $U_{D(on)}$ 。

(1) 二极管的主要参数

最大整流电流 I_F 、反向击穿电压 U_{BR} 、反向电流 I_R 、最高工作频率 f_M 等。

(2) 二极管的应用与特殊二极管

利用二极管的单向导电性和反向击穿特性,可以构成整流、稳压、限幅等各种功能电路。除普通二极管外,还有若干特殊二极管,如稳压二极管、变容二极管、光电二极管、发光

二极管等。

3. 稳压管

二极管工作在反向击穿区时,即使流过管子的电流变化很大,管子两端的电压变化也很小,利用这种特性可以做成稳压管。稳压管工作时,只要流过它的电流总在 $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 之间,就可以保证稳压正常,且工作安全。

稳压管的主要参数有稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、动态内阻 r_Z 、电压的温度系数 α_U 和额定功耗 P_Z 。

4. 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结在反偏工作时势垒电容效应而做成的一种特殊二极管。PN 结的电容效应也就是变容二极管的电容效应,它包括势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d ,以 C_b 为主。

1.2.2 双极型三极管

1. 三极管的结构及类型

双极型三极管是通过一定的工艺,将两个 PN 结结合在一起而构成的器件。双极型三极管有两种类型:NPN 型和 PNP 型。无论何种类型,内部均包含两个 PN 结:发射结和集电结,并引出三个电极:发射极、基极和集电极。其内部结构特点是发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度,基区厚度很小。

2. 三极管的放大原理

(1) 实现放大的条件

内部条件要求基区很薄,发射区多子的浓度高,集电区面积大。外部条件是发射结正向偏置,集电结反向偏置。

(2) 放大原理

因为发射结正向偏置,而且发射区重掺杂,所以发射区的多数载流子大量注入基区。由于基区非常薄且多子的浓度低,注入的载流子在基区被复合的较少,绝大部分在浓度差的作用下扩散至集电结。又因为集电结反向偏置,所以扩散到集电结的载流子被集电结内的强电场漂移到(拉到)集电区,形成集电极电流。所谓三极管的放大作用的实质是:基区内的扩散远远大于复合。

(3) 三极管的电流分配关系及输入输出特性

① 三极管的电流分配关系

晶体三极管满足下列电流分配关系:

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

其中电流放大系数 α 和 β 的关系是

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

② 三极管的输入、输出特性

共射极电路的输入和输出特性分别为：

$$I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE}=\text{常数}} \text{ 和 } I_C = f(U_{CE}) |_{I_B=\text{常数}}$$

共基极电路的输入和输出特性分别为：

$$I_E = f(U_{EB}) |_{U_{CB}=\text{常数}} \text{ 和 } I_C = f(U_{CB}) |_{I_E=\text{常数}}$$

③ 三极管三种不同工作状态的偏置条件及特点如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 三极管的三种工作状态的偏置条件及特点

工作状态	NPN	PNP	特点
截止状态	E 结, C 结均反偏 $U_B < U_E, U_B < U_C$	E 结, C 结均反偏 $U_B > U_E, U_B > U_C$	$I_C \approx 0$
放大状态	E 结正偏, C 结反偏 $U_C > U_B > U_E$	E 结正偏, C 结反偏 $U_C < U_B < U_E$	$I_C \approx \beta I_B$
饱和状态	E 结, C 结均正偏 $U_B > U_E, U_B > U_C$	E 结, C 结均正偏 $U_B < U_E, U_B < U_C$	$U_{CE} = U_{CES}$ I_C 基本不受 I_B 控制

3. 三极管的主要参数

① 电流放大系数 α, β 。

② 极间反向电流 I_{CBO}, I_{CEO} 。它们是由少数载流子形成的, 与温度有关, 且影响管子的工作稳定。

③ 极限参数：

集电结最大允许耗散功率 P_{CM} , 如果管子的实际耗散功率超过此值, 管温过高, 易损坏; 集电极最大允许电流 I_{CM} , 工作时如管子的 I_C 值超过它时, β 将下降较多; 三极管的击穿电压 $U_{(BR)CEO}$; 以上三种参数共同决定了三极管的安全工作区。

④ 温度对三极管参数的影响：

若 T (温度) 升高, 将导致 I_{CBO}, I_{CEO} 和 β 增大, 而使 U_{BE} 减小, 这均使 I_C 增大。

1.2.3 场效应管

场效应管是一种利用电场效应来控制其电流大小的半导体器件。根据结构的不同, 场效应管也可分为两大类: 结型场效应管 (JFET) 和金属氧化物 - 半导体场效应管 (MOSFET)。每一类又有 N 沟道和 P 沟道两种类型。MOSFET 简称 MOS 管, 其每一类型又可以分为增强型和耗尽型两种。

1. 场效应管的特性

输出特性：

$$i_D = f(U_{DS}) |_{U_{GS}=\text{常数}}$$