



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



现代原子核物理

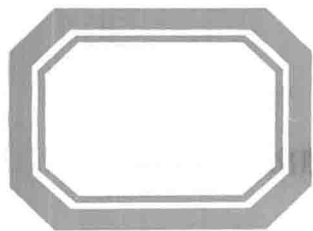
高等电子学



高维祥 编著

HEUP

哈尔滨工程大学出版社



基金项目“现代原子核物理”

Advanced Electronics

高等电子学

高维祥 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是中核集团“十二五”核专业研究生教育的规划教材之一。它是根据核工业研究生部 2012 年制定的“高等电子学教学大纲”要求编写的。

本书主要内容有:信号与系统、系统分析、半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、负反馈放大电路、集成运放及应用、串联型及开关型稳压电源、数字集成电路及应用、ADC 及 DAC 接口电路等。每章最后附有习题和参考答案。

本书是电路分析、模拟电子学、数字电子学及接口电路的综合。在理论阐述的基础上着重概念说明,强调实用性,书中引用大量的结论公式和较翔实的资料供选用,并且尽量多地反映近年来电子学的新成果和新器件。学习本书可以使学生全面掌握电子学的相关知识,为实际应用和新的探索打下良好基础。

本书是供核工业研究生使用的教材,亦可供其他院校相关专业的学生作为电子学课程教材选用,同时,也可供从事电子技术工作的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等电子学/高维祥编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0712 - 1

I. ①高… II. ①高… III. ①电子学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 299762 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 29.25
字 数 733 千字
版 次 2013 年 12 月第 1 版
印 次 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 150.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

原子核物理学(简称核物理学、核物理或核子物理)是20世纪新建立的一个物理学学科,是研究原子核的结构及其反应变化的运动规律的物理学分支。它主要有三大领域:研究各类次原子粒子与它们之间的关系、分类与分析原子核的结构,并带动相应的核子技术进展。原子核物理的研究内容包括核的基本性质、放射性、核辐射测量、核力、核衰变、核结构、核反应、中子物理、核裂变和聚变、亚核子物理和天体物理等。它研究原子核的结构和变化规律,射线束的产生、探测和分析技术,以及同核能、核技术应用有关的物理问题。

原子核物理内容丰富多彩,是物理学非常活跃的研究领域,一百多年来共有七十多位科学家因原子核物理领域的优异成绩而获得诺贝尔奖。并且原子核物理是一个国际上竞争十分激烈的科技领域,各国都投入大量人力、物力从事这方面的研究工作。它是一门既有深刻理论意义,又有重大实践意义的学科。

在原子核物理学产生、壮大和巩固的全过程中,通过核技术的应用,核物理与其他学科及生产、医疗、军事等领域建立了广泛的联系,取得了有力的支持。核物理基础研究又为核技术的应用不断开辟新的途径。人工制备的各种同位素的应用已遍及理工农医各部门。新的核技术,如核磁共振、穆斯堡尔谱学、晶体的沟道效应和阻塞效应,以及扰动角关联技术等都迅速得到应用。核技术的广泛应用已成为科学技术现代化的标志之一。

核物理的发展,不断地为核能装置的设计提供日益精确的数据,从而提高了核能利用的效率和经济指标,并为更大规模的核能利用准备了条件。截至2013年3月,全世界有30多个国家运行着435座核电机组,总净装机容量为374.1 GW,核能的发展必将为改善我国环境现状作出重要贡献。

“现代原子核物理”出版项目的内容包括激光核物理、工程核物理、核辐射监测与防护等理论与技术研究的诸多方面。该项目汇集和整理了我国现代原子核物理领域最新的一流水平的研究成果,是我国该领域的科学研究、技术开发的一个系统全面的出版项目。

值得称道的是,“现代原子核物理”项目汇集了国内核物理领域的多位知名学者、专家毕生从事核物理研究所积累的学术成果、经验和智慧,将有助于我国核物理领域的高水平人才培养,并进一步推动核物理有关课题研究水平的提高,促进我国核物理科学研究向更高层次发展。该项目的出版将有助于推动我国该领域整体实力的进一步提高,缩短我国与国外的差距,使我国现代原子核物理研究达到国际先进水平。

该系列丛书较之已出版过的同类书籍和教材,在内容组成、适用范围、写作特点上均有明显改进,内容突出创新和当今最新研究成果,学术水平高,实用性强,体系结构完整。“现代原子核物理”将是我国该领域的一个优秀出版工程项目,她的出版对我国现代原子核物理研究的发展有重要的价值。

该系列丛书的出版,必将对我国原子核物理领域的知识积累和传承、研究成果推广应用、我国现代原子核物理领域高层次人才培养、我国该领域整体研究能力提高与研究向更深与更高水平发展、缩短与国外差距、达到国际先进水平有重要的指导意义和促进作用。

我衷心地祝贺“原子核物理”项目成功立项出版。



中国工程院院士
中核集团科技委主任
二〇一三年十月

前 言

本书是在 2004 年版《高等电子学》试用教材的基础上,总结八年的教学实践,按核工业研究生部 2012 年“高等电子学教学大纲”的要求编写的。

本书的编写原则是在简要全面介绍电子学的相关知识基础上,对一些要点知识做较深入的分析讨论。在分析讨论中,侧重电子电路的原理和应用,同时对电子学的新发展做必要的介绍。

1. 为体现电子学知识的完整性,本书选材上涵盖了电子学领域的主要方面,如信号与系统分析、电子材料与器件、模拟电子学、数字电子学、电源技术、模拟电路与数字电路的接口技术,以及信号的产生与甄别技术等。除了介绍经典电子学知识外,更多的是叙述现代电子学知识,使读者既能打好分析电子电路的基础,又能掌握电子学的现代知识。

2. 为电子学领域的一些重点和难点问题作深入细致的分析讨论。对一些重要概念和分析方法等作了定性或定量的叙述。为加深对所学知识的掌握,在分析中尽量多地利用数学工具,以导出更加接近实际的结论。

3. 本书强调电子技术的实用性,重点介绍一些有应用价值的电路并给出详细的使用说明。书中还引入了很多有实用价值的计算公式和数据表,可供读者参考选用。为了使读者更好地掌握所学知识,书中有针对性地配有一些例题。

4. 为加深对电子技术新发展的了解,本书适当地介绍一些成熟且具有发展前景的新技术、新工艺和推出一些已经得到应用的新产品。如新型集成电路、特精尖器件和电流模电路等。这些具有前瞻性的内容对读者开阔视野、扩展思路无疑是有帮助的。

5. 根据核工业各领域对电子学的实际需求,本书重点叙述和讨论高精度、低功耗和高速宽带等方面的电子学知识。

6. 为使读者更好地巩固所学知识,本书各章后面都附有不同层次的习题和部分习题答案。

7. 本书各相关章节后面都有典型电路综合分析或设计,这些内容可帮助读者提高电子电路的综合分析能力和判读能力,使读者有较高水平的电子电路设计能力。

本书由核工业研究生部高维祥教授编写。资深核电专家朱自诚教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见和修改建议,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中,承蒙研究生部教务处章超、付冉、王皖燕老师的大力支持和帮助;资料室梁超梅老师,核物理教研室主任朱升云教授和应用数学教研室主任华大平教授等也都给予了很大帮助;资料室华烝承担了全书的录入编辑工作,在此一并表示深深的感谢。

由于本人的水平所限,再加时间较仓促,参考资料不足,因此书中一定会有不少缺点和错误,敬请相关师生和各界读者给予批评指正。

编 者

2012 年 11 月于北京原子城

本书常用文字符号说明

一、信号与系统

1. 信号

T

周期

ω

角频率

$s = \sigma + j\omega$

复频率

φ

相角

$f(t)$

连续信号

$f(n)$

离散信号

σ

收敛因子

2. 线性系统

LTI

线性时不变系统

$y_h(t)$

常系数线性微分方程齐次解

$y_p(t)$

常系数线性微分方程特解

$y_{zi}(t)$

系统零输入响应

$y_{zs}(t)$

系统零状态响应

$h(t)$

冲击响应

$H(s)$

传递函数

$F(j\omega)$

傅氏变换式

$L(s)$

拉氏变换式

二、电路

1. 电压

V (直流), u (交流)

电压

V_i, u_i

输入电压

$\dot{V}, V(j\omega)$

频域电压

$V(s)$

复频域电压

$V_M(u_m)$

电压幅值

u_{id}

差模输入电压

u_{ic}

共模输入电压

V_o, u_o

输出电压

V_{opp}, u_{opp}

输出电压峰值

e_n, V_n

噪声电压

e_{npp}

噪声电压峰峰值

F_n	噪声系数
V_{REF}, V_R	基准电压
$V_{\text{CC}}, -V_{\text{EE}}$	双极型管电路电源电压
$V_{\text{DD}}, -V_{\text{SS}}$	场效应管电路电源电压
V_+, V_-	运算放大器浮动电源电压
V_s	信号源电压
V_A	厄尔立电压
V_T	温度电压当量
2. 电流	
$I(\text{直流}), i(\text{交流})$	电流
I_i, i_i	输入电流
$\dot{I}, I(j\omega)$	频域电流
$I(s)$	复频域电流
I_o, i_o	输出电流
$I_M(i_m)$	电流幅值
I_Q	静态电流
I_L, i_L	负载电流
I_{set}	设置电流
I_F, i_F	反馈电流
I_{CS}	晶体管集电极反向饱和电流
I_s	信号源电流
I_B, i_b	晶体管基极电流
I_C, i_c	晶体管集电极电流
I_n	噪声电流
3. 电阻	
R, r	电阻
R_i, r_i	输入电阻
R_o, r_o	输出电阻
Z	阻抗
$r_{bb'}$	晶体管基区体电阻
$r_{b'e}$	射结等效电阻
r_e	射结动态电阻
R_L	负载电阻
R_s	信号源电阻、场效应管源极电阻
G_s	信号源电导
R_d, r_d	差模电阻
R_e, r_e	共模电阻
R_{if}, r_{if}	负反馈放大电路输入电阻
R_{of}, r_{of}	负反馈放大电路输出电阻
R_F, R_f	反馈电阻

R_{set}	设置电阻
R_{es}	差动电路射极等效电阻
4. 电容、电感	
C	电容
C_{L}	负载电容
C_{i}	输入电容
C_{o}	输出电容
C_{μ}	晶体管集电结电容
C_{π}	晶体管射结电容
C_{gs}	场效应管栅—源电容
C_{gd}	场效应管栅—漏电容
C_{j}	PN 结电容
C_{ob}	共基极接法的输出电容
L	电感
5. 增益	
A	增益
A_{u}	电压增益
A_{i}	电流增益
A_{r}	跨阻增益
A_{g}	跨导增益
A_{o}	中频增益
A_{d}	差模增益
A_{c}	共模增益
$A(s)$	复频域增益
$\dot{A}, A(j\omega), A(jf)$	频域增益
$A(\omega), A(f)$	频域增益的模
$\varphi(f), \varphi(\omega)$	频域增益附加相移
A_{f}	闭环负反馈增益
A_{of}	闭环中频增益
$A_{\text{f}}(j\omega), A_{\text{f}}(jf)$	闭环频域增益
T	环路增益
$T(j\omega)$	频域环路增益
$T(\omega)$	频域环路增益模
$G \cdot BW$	增益带宽积
g_{m}	低频跨导
6. 频率	
f	频率
ω	角频率
$f_{\text{H}}, (\omega_{\text{H}})$	上限截止频率
$f_{\text{L}}, (\omega_{\text{L}})$	下限截止频率

$f_{\beta}, (\omega_{\beta})$	晶体管共射接法截止频率
$f_{\alpha}, (\omega_{\alpha})$	晶体管共基接法截止频率
$f_o, (\omega_o)$	特征频率
f_{π}	负反馈临界振荡频率
f_s	采样频率
f_{cp}	时钟频率
BW	通频带
7. 其他	
P_{om}	最大输出功率

三、材料、器件

1. 半导体材料

N_i	本征半导体浓度
N_{ne}	N 型半导体电子浓度
N_{ph}	P 型半导体空穴浓度
N_d	掺入施主杂质浓度
N_a	掺入受主杂质浓度
V_B	PN 结内电场位差

2. 二极管

i_D	二极管电流
V_{th}	二极管阈电压
r_d	二极管交流电阻
R_D	二极管直流电阻
t_{re}	反向恢复时间
D	二极管
D_Z	稳压管
V_Z	稳压管稳定电压
I_Z	稳压管稳定电流
α_Z	稳压管温度系数
LED	发光二极管
SBD	肖特基二极管

3. 晶体管

T	晶体管、场效应管
f_T	特征频率
BV_{CBO}	射极开路, C、B 极间反向击穿电压
BV_{EBO}	集电极开路, E、B 极间反向击穿电压
BV_{CEO}	基极开路, C、E 极间反向击穿电压
I_{CBO}	射极开路, 集电极反向饱和电流
I_{CM}	集电极最大输出电流

P_{CM}	集电极最大耗散功率
V_{CES}	集电极、射极间饱和电压
$\beta, \beta(j\omega)$	晶体管共射电流放大系数
$\alpha, \alpha(j\omega)$	晶体管共基电流放大系数
r_{ce}	晶体管输出电阻
t_{on}	晶体管开通时间
t_{off}	晶体管关闭时间
t_{r}	上升时间
t_{f}	下降时间
t_{d}	延迟时间
t_{s}	存储时间
4. 场效应管	
JFET	结型场效应管
DMOSFET	耗尽型 MOS 场效应管
EMOSFET	增强型 MOS 场效应管
$I_{\text{D}}, i_{\text{D}}$	漏极电流
I_{DO}	$V_{\text{gs}} = 2V_{\text{TH}}$ 时漏极电流
I_{DQ}	静态漏极电流
I_{DSS}	漏极饱和电流
V_{P}	夹断电压
V_{TH}	阈电压
BV_{DS}	漏源极间击穿电压
BV_{GS}	栅源极间击穿电压
R_{on}	沟道导通电阻
r_{ds}	交流输出电阻
R_{Q}	直流等效电阻
k_{n}	电导参数
W/L	沟道的宽长比
5. 运算放大器	
A	运算放大器
A_{v}	电压型运算放大器
A_{i}	电流型运算放大器
V_{IO}	输入失调电压
$\Delta V_{\text{IO}}/\Delta T$	输入失调电压温漂
I_{IO}	输入失调电流
$\Delta I_{\text{IO}}/\Delta T$	输入失调电流温漂
I_{IB}	输入偏置电流
BW	开环带宽
S_{R}	转换速率
C_{op}	电压比较器

t_R	响应时间
BW_G	单位增益带宽
6. 数字集成电路	
G	门
FF	触发器
ALU	算术逻辑单元
V_L	逻辑低电平
V_H	逻辑高电平
V_{OFF}	关门电平
V_{ON}	开门电平
V_{TH}	门槛电压
I_L	低电平时电流
I_H	高电平时电流
CR	清零
St	复位
$\overline{LD}$	加载
CP	时钟信号
S/H	采样保持
t_w	脉冲宽度

四、其他

K_f	反馈系数
THD	非线性失真
DNL	微分非线性误差
INL	积分非线性误差
δ	顶降
Δu	过冲量

目 录

第 1 章 信号与系统	1
1.1 信号	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 几种常用的信号	2
1.2 系统	7
1.2.1 系统的基本特性	7
1.2.2 常用系统	8
第 2 章 信号与系统分析	9
2.1 信号与系统分析概述	9
2.2 时域分析法	9
2.2.1 引言	9
2.2.2 常系数线性微分方程求解法	10
2.2.3 $\delta(t)$ 函数配平法	12
2.2.4 零输入响应和零状态响应	13
2.2.5 单位冲击响应	15
2.3 频域分析法	16
2.3.1 傅氏级数	16
2.3.2 周期信号的频谱分析	18
2.3.3 傅氏变换	19
2.3.4 傅氏变换的性质	22
2.3.5 系统的频域分析	23
2.4 复频域分析法	24
2.4.1 拉氏变换	24
2.4.2 常用信号的拉氏变换式	25
2.4.3 拉氏变换基本性质	26
2.4.4 拉氏反变换	27
2.4.5 LTI 系统的复频域分析	30
2.4.6 系统函数	33
2.4.7 用系统函数的极零点理论分析系统特性	35

习题	36
习题参考答案	38
第3章 半导体材料与器件	40
3.1 半导体材料	40
3.1.1 本征半导体	40
3.1.2 杂质半导体	41
3.1.3 载流子	42
3.2 PN 结	43
3.2.1 平衡状态下的 PN 结	43
3.2.2 PN 结的伏安特性	44
3.2.3 PN 结的温度特性	46
3.2.4 PN 结电容	46
3.3 二极管	46
3.3.1 二极管特性	47
3.3.2 二极管电路的分析方法	48
3.3.3 其他类型二极管	50
3.4 双极型晶体管	51
3.4.1 晶体管结构	52
3.4.2 晶体管的工作状态	52
3.4.3 晶体管的电流放大作用	52
3.4.4 晶体管特性	54
3.4.5 晶体管的主要参数	57
3.4.6 晶体管选用时的注意事项	58
3.4.7 新型晶体管	59
3.5 场效应晶体管	60
3.5.1 结型场效应管	60
3.5.2 MOS 场效应管	63
3.5.3 场效应管的主要参数	68
3.6 功率 MOS 场效应管	68
3.7 绝缘栅双极型晶体管	70
3.7.1 一般说明	70
3.7.2 IGBT 特性	71
3.7.3 主要参数	71

3.7.4 驱动电路	71
3.8 FET 管与 BJT 管比较	72
3.9 MOSFET 管的发展现状	72
3.9.1 小功率 MOSFET 器件的新技术	72
3.9.2 大功率 MOSFET 管的新技术	73
3.9.3 纳米技术	73
习题	74
习题参考答案	76
第 4 章 放大电路	78
4.1 放大的概念和放大电路的基本性能	78
4.1.1 放大的概念	78
4.1.2 放大电路的基本性能指标	78
4.2 放大电路的分析方法	81
4.2.1 晶体管的等效电路	81
4.2.2 晶体管共射接法的高频杂 π 等效电路	83
4.2.3 晶体管电流放大系数的频率特性	85
4.2.4 晶体管小信号等效电路的误差评估	86
4.3 晶体管共射放大电路分析	87
4.3.1 基本共射放大电路	87
4.3.2 射极接电阻 R_e 的共射放大电路	89
4.3.3 射极接 R_e, C_e 补偿网络的共射放大电路	91
4.4 晶体管共基极放大电路分析	93
4.4.1 基本共基极放大电路	93
4.4.2 电感高频补偿电路	96
4.5 晶体管共集电极放大电路分析	96
4.6 场效应管放大电路	99
4.6.1 场效应管小信号等效电路	99
4.6.2 场效应管基本放大电路	101
4.6.3 场效应管放大电路分析	102
4.7 恒流源	105
4.7.1 基本镜像恒流源	105
4.7.2 Widlar 恒流源(微电流源)	106
4.7.3 Wilson 恒流源	106

4.7.4	多路恒流源	107
4.7.5	场效应管恒流源	108
4.8	差动放大电路	109
4.8.1	差动放大电路的基本组成和特性	109
4.8.2	差动放大电路的改进	110
4.8.3	差动放大电路的四种接法	111
4.8.4	场效应管差动放大电路	112
4.8.5	差动放大电路的传输特性	114
4.8.6	差动放大电路的频响分析	116
4.9	互补功率放大电路	116
4.9.1	互补功率放大电路的工作原理	117
4.9.2	甲乙类互补功率放大电路	117
4.9.3	复合管	118
4.9.4	功率 MOS 管构成的互补功放电路	119
4.10	放大电路的频率响应	120
4.10.1	放大电路频响的一般概念	120
4.10.2	放大电路频响的表达式	121
4.10.3	频响特性波特图表示法	121
4.10.4	Nyquist 图表示法	122
4.11	放大电路的阶跃响应	122
4.11.1	阶跃响应技术参数	123
4.11.2	单管放大电路的阶跃响应	123
	习题	124
	部分习题参考答案	127
第 5 章	多级放大电路	130
5.1	级间耦合方式	130
5.1.1	阻容耦合方式	130
5.1.2	直接耦合方式	130
5.1.3	变压器耦合方式	131
5.1.4	光电耦合方式	131
5.1.5	多级放大电路的级数	131
5.2	多级放大电路的基本性能指标	131
5.2.1	电压增益	131

5.2.2 输入电阻和输出电阻	132
5.3 多级放大电路的频率响应	133
5.3.1 高频响应的表达式	133
5.3.2 多级放大电路的波特图	134
5.3.3 多级放大电路的 Nyquist 图	137
5.4 二管组合放大电路	138
5.4.1 共射-共基组合放大电路	138
5.4.2 共集-共基组合放大电路	141
5.4.3 共集-共射组合放大电路	142
5.4.4 共射-共集组合放大电路	142
5.4.5 组合差动放大电路	142
5.5 多级放大电路的阶跃响应	143
5.5.1 多级放大电路阶跃响应输出信号的表达式	143
5.5.2 多级放大电路阶跃响应参数	144
习题	147
部分习题参考答案	149
第6章 负反馈放大电路	152
6.1 负反馈放大电路概述	152
6.1.1 负反馈放大电路的基本原理	152
6.1.2 不同信号组态的增益和反馈系数的数学表达式	153
6.2 负反馈放大电路的类型	154
6.2.1 四种负反馈放大电路	154
6.2.2 负反馈的判断	154
6.3 负反馈对放大电路性能的影响	155
6.3.1 提高增益稳定性	155
6.3.2 负反馈对输入电阻的影响	156
6.3.3 负反馈对输出电阻的影响	157
6.3.4 负反馈对频带宽度的影响	158
6.3.5 负反馈对非线性失真的影响	160
6.3.6 引入负反馈的注意事项	161
6.4 负反馈放大电路的分析方法	161
6.4.1 等效电路法	161
6.4.2 环路拆分法	161