

北京市高等教育精品教材立项项目

---

国家电工电子教学基地系列教材

# 模拟集成电路基础

李金平 主编

李金平 路勇 延凤平 编著

董在望 主审

清华大学出版社  
北方交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是国家电工电子教学基地系列教材之一,2002 年被列为北京市高等教育精品教材立项项目。全书适应当今电子技术发展的趋势,结合教改,在阐述电子电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及简单应用的同时,增加了新的内容,包括半导体器件基础、双极型模拟集成电路的基本单元电路、MOS 模拟集成电路的基本单元电路、负反馈放大电路、集成运算放大器的分析与应用、现代模拟集成电路技术、脉冲波形的产生与处理电路、电子电路计算机辅助分析与设计、光电器件及电路。教材中的重点和难点部分都给出了相应的例题,每章后都有一定数量的习题和机辅分析题,书的最后附有参考答案。

本书可作为高等学校电子信息类专业及其相近专业的本、专科生教材和教学参考书,也可供电子技术专业人员参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路基础/李金平主编;李金平,路勇,延凤平编著. —北京:北方交通大学出版社, 2003. 3

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7 81082 113 X

. 模... . 李... 李... 路... 延... . 模拟集成电路 - 高等学校 - 教材  
. TN431. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000170 号

策划编辑:郭 洁 责任编辑:闫 聪 郭 洁

印 刷 者:北京东光印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010 51686045,62237564

清 华 大 学 出 版 社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:26.5 字数:590千字

版 次:2003年3月第1版 2003年5月第2次印刷

印 数:3001~8000册 定价:34.00元

# 国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 陈后金 邹家 郑光信 屈波

侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞 廖桂生

薛质 戴瑜兴

---

# 总 序

---

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。

在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。

在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。

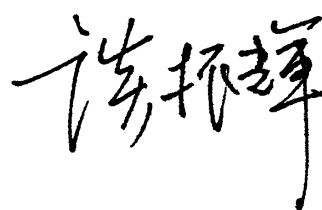
在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北方交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北方交通大学  
“国家电工电子教学基地系列教材”  
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, reading '高振军' (Gao Zhenjun), written in a cursive style.

2003年2月

---

# 前 言

---

20 世纪 90 年代以来,电子技术呈现出系统集成化、设计自动化、用户专用化、测试智能化的发展态势,从而对 21 世纪的人才培养提出了更高更新的要求。为了适应电子技术的发展和 21 世纪人才培养的要求,电子电路课程体系和内容的改革势在必行。基于面向 21 世纪电工电子系列课程体系与内容的改革成果,基于多年的教学实践,我们认为:强调技术理论与工程实践相融合、技术理论与计算机方法相融合及基础技术理论与现代电子技术相融合,应作为编写本教材的出发点。

编写本教材的基本思想是:

——明确本课程的定位,教材内容必须注重基础,即着重基本概念、基本原理和基本分析方法,这些基础内容是模拟电路和电子技术在今后较长时期起作用的重要理论和基本技术。在注重基础内容的同时,也必须反映电子信息技术的最新发展(如半导体激光放大器、电流模技术、EDA 技术等)及趋势。

——内容安排上力求符合认知规律,突出电子电路的基本原理、分析及应用。

——为了建立基本的模拟电子电路基础知识平台,使模拟电子线路形成较完整的体系,把原属于数字电路内容的脉冲波形的产生与处理电路纳入本教材。

——考虑到电子电路的发展依赖于器件的发展及集成电路芯片设计的需要,也考虑到不同专业方向的知识需求,加大了半导体器件的篇幅,以便给教学双方提供一定的知识内容选择空间。

——建立集成化的课程体系,通过介绍通用和专用集成器件,使读者了解模拟集成电路的结构及基本单元电路在集成电路与系统中的应用,为以后设计与应用模拟集成电路芯片奠定基础。

——考虑各学校教学计划和课程内容安排上的差异,所增加的新内容都具有相对的独立性,教学双方可根据实际需要加以取舍,从而使教材具有通用性。

——增加电子电路(单元电路、模拟集成电路)的应用实例,提高初学者的

学习兴趣。

——配合各章的主要内容,配备较多层次不同、类型不同的习题。从第 3 章开始还增设了计算机辅助分析和设计题,以使读者提高综合应用已学知识分析问题的能力。

本书由李金平主编。全书共分为 9 章,其中第 1~5 章、第 7 章和第 8 章由李金平编写,第 6 章、第 9 章由路勇编写,第 2 章中 2.2 节有关光特性部分和 2.7 节、第 3 章中 3.11 节由延凤平编写。最后,李金平对各章进行了文字润饰和定稿。

教育部前电工课程教学指导委员会副主任兼电子技术与线路课程教学指导小组组长、清华大学董在望教授主审了全书,并提出了许多宝贵的意见,这些意见对提高本书质量十分重要。

本书在编写过程中始终得到北方交通大学电子信息工程学院张思东院长、贾怀义书记、张有根副院长等领导的热情支持。

在此,对上述所有帮助过我们的同志表示深切的谢意。

由于作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2003 年 1 月

---

# 目 录

---

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 常用符号说明 .....               | 1  |
| 第 1 章 绪论 .....             | 1  |
| 1.1 引言 .....               | 1  |
| 1.2 放大器的基本概念 .....         | 2  |
| 1.3 模拟电子系统举例 .....         | 4  |
| 习题 .....                   | 5  |
| 第 2 章 半导体器件基础 .....        | 7  |
| 2.1 半导体基础知识 .....          | 7  |
| 2.1.1 半导体的特性 .....         | 7  |
| 2.1.2 半导体的能带 .....         | 8  |
| 2.1.3 本征半导体 .....          | 9  |
| 2.1.4 杂质半导体 .....          | 10 |
| 2.1.5 半导体内光与电子的相互作用 .....  | 12 |
| 2.1.6 载流子的扩散运动和漂移运动 .....  | 14 |
| 2.2 PN 结 .....             | 16 |
| 2.2.1 PN 结的形成 .....        | 16 |
| 2.2.2 PN 结的接触电位差 .....     | 17 |
| 2.2.3 PN 结的能带结构 .....      | 18 |
| 2.2.4 PN 结的光电效应与电致发光 ..... | 19 |
| 2.2.5 PN 结的伏安特性 .....      | 20 |
| 2.2.6 PN 结的反向击穿特性 .....    | 22 |
| 2.2.7 PN 结电容 .....         | 23 |
| 2.3 半导体二极管 .....           | 26 |
| 2.3.1 二极管的结构 .....         | 26 |
| 2.3.2 二极管的伏安特性 .....       | 27 |
| 2.3.3 二极管的等效电阻 .....       | 29 |
| 2.3.4 二极管的主要参数 .....       | 30 |

|                              |                               |     |
|------------------------------|-------------------------------|-----|
| 2.3.5                        | 半导体二极管的模型 .....               | 31  |
| 2.3.6                        | 稳压二极管 .....                   | 32  |
| 2.3.7                        | 二极管应用举例 .....                 | 33  |
| 2.4                          | 双极型晶体管 .....                  | 36  |
| 2.4.1                        | 晶体管的结构 .....                  | 36  |
| 2.4.2                        | 晶体管的工作原理 .....                | 37  |
| 2.4.3                        | 晶体管的模型 .....                  | 40  |
| 2.4.4                        | 晶体管的特性曲线 .....                | 43  |
| 2.4.5                        | 晶体管的参数 .....                  | 48  |
| 2.4.6                        | 温度对晶体管参数的影响 .....             | 50  |
| 2.5                          | 场效应晶体管 .....                  | 50  |
| 2.5.1                        | 绝缘栅型场效应管 .....                | 51  |
| 2.5.2                        | 结型场效应管 .....                  | 58  |
| 2.5.3                        | 场效应管的主要参数及特点 .....            | 61  |
| 2.6                          | 集成化元器件 .....                  | 64  |
| 2.6.1                        | 集成双极型晶体管 .....                | 64  |
| 2.6.2                        | 集成二极管 .....                   | 65  |
| 2.6.3                        | 集成 MOS 管 .....                | 65  |
| 2.6.4                        | 集成电阻 .....                    | 66  |
| 2.6.5                        | 集成电容 .....                    | 66  |
| 2.6.6                        | 集成化元器件的特点 .....               | 67  |
| 2.7                          | 半导体管光电器件 .....                | 67  |
| 2.7.1                        | 半导体发光器件 .....                 | 67  |
| 2.7.2                        | 半导体光电探测器 .....                | 77  |
|                              | 习题 .....                      | 83  |
| 第 3 章 双极型模拟集成电路的基本单元电路 ..... |                               | 87  |
| 3.1                          | 单管共射放大电路的构成 .....             | 87  |
| 3.2                          | 放大电路的分析方法 .....               | 89  |
| 3.2.1                        | 静态分析 .....                    | 89  |
| 3.2.2                        | 动态分析 .....                    | 90  |
| 3.3                          | 频率响应的基本概念及单管共射放大电路的频率响应 ..... | 102 |
| 3.3.1                        | 频率响应的基本概念 .....               | 102 |
| 3.3.2                        | 频率响应的分析方法 .....               | 103 |
| 3.3.3                        | 单管共射放大电路的高频响应 .....           | 108 |
| 3.3.4                        | 单管共射放大电路的低频响应 .....           | 112 |
| 3.4                          | 共集放大电路 .....                  | 115 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 3.4.1  | 共集放大电路的中频特性.....        | 115 |
| 3.4.2  | 共集放大电路的高频响应.....        | 116 |
| 3.5    | 共基放大电路.....             | 117 |
| 3.5.1  | 共基放大电路的中频特性.....        | 117 |
| 3.5.2  | 共基放大电路的高频响应.....        | 119 |
| 3.6    | 共射、共集及共基放大电路性能比较.....   | 120 |
| 3.7    | 电流源电路及基本应用.....         | 121 |
| 3.7.1  | 常用的电流源电路.....           | 121 |
| 3.7.2  | 电流源的主要应用.....           | 124 |
| 3.8    | 差分放大电路.....             | 125 |
| 3.8.1  | 典型差分放大电路的工作原理及性能分析..... | 125 |
| 3.8.2  | 改进型差分放大电路.....          | 135 |
| 3.8.3  | 差分放大电路的失调与温漂.....       | 138 |
| 3.9    | 多级放大电路.....             | 140 |
| 3.9.1  | 直接耦合放大电路的特殊问题.....      | 141 |
| 3.9.2  | 多级放大电路的中频特性.....        | 142 |
| 3.9.3  | 多级放大电路的频响.....          | 143 |
| 3.10   | 低频功率放大电路.....           | 145 |
| 3.10.1 | 乙类互补推挽功率放大电路.....       | 146 |
| 3.10.2 | 甲乙类互补推挽功率输出级.....       | 149 |
| 3.10.3 | 准互补推挽功率输出级.....         | 151 |
| 3.10.4 | 单电源互补推挽功率输出级.....       | 152 |
| 3.11   | 光放大器.....               | 153 |
| 3.11.1 | 光放大器的工作机理.....          | 153 |
| 3.11.2 | 半导体光放大器.....            | 156 |
| 3.11.3 | 掺铒光纤放大器.....            | 158 |
| 3.11.4 | 光纤拉曼放大器.....            | 161 |
| 3.11.5 | 光放大器的应用.....            | 163 |
|        | 习题.....                 | 165 |
|        | 机辅分析题.....              | 172 |
| <br>   |                         |     |
| 第4章    | MOS 模拟集成电路的基本单元电路.....  | 174 |
| 4.1    | MOS 场效应管的特点.....        | 174 |
| 4.2    | MOS 场效应管的模型.....        | 175 |
| 4.2.1  | MOS 场效应管的直流模型.....      | 175 |
| 4.2.2  | MOS 场效应管的交流小信号模型.....   | 175 |
| 4.3    | MOS 管三种基本放大电路.....      | 176 |

|                          |                        |            |
|--------------------------|------------------------|------------|
| 4.4                      | MOS管恒流源负载 .....        | 177        |
| 4.4.1                    | 单管增强型有源负载.....         | 177        |
| 4.4.2                    | 单管耗尽型有源负载.....         | 178        |
| 4.4.3                    | 威尔逊电流源有源负载.....        | 178        |
| 4.5                      | MOS管电流源 .....          | 179        |
| 4.5.1                    | MOS管基本电流源 .....        | 179        |
| 4.5.2                    | 威尔逊电流源.....            | 180        |
| 4.5.3                    | 几何比例电流源.....           | 181        |
| 4.6                      | MOS单级放大电路 .....        | 182        |
| 4.6.1                    | E/E型NMOS单级放大电路 .....   | 182        |
| 4.6.2                    | E/D型NMOS单级放大电路 .....   | 183        |
| 4.6.3                    | CMOS有源负载放大电路.....      | 184        |
| 4.6.4                    | CMOS互补放大电路.....        | 186        |
| 4.6.5                    | 源极跟随器.....             | 188        |
| 4.7                      | MOS管差分放大电路 .....       | 189        |
| 4.8                      | CMOS功率放大电路 .....       | 190        |
| 4.9                      | MOS模拟开关 .....          | 191        |
| 4.9.1                    | 单管MOS传输门模拟开关 .....     | 191        |
| 4.9.2                    | CMOS传输门和CMOS模拟开关 ..... | 193        |
| 4.9.3                    | MOS模拟开关的应用举例 .....     | 194        |
|                          | 习题 .....               | 197        |
|                          | 机辅分析题 .....            | 203        |
| <b>第5章 负反馈放大电路 .....</b> |                        | <b>205</b> |
| 5.1                      | 反馈的基本概念 .....          | 205        |
| 5.1.1                    | 反馈放大电路的构成.....         | 205        |
| 5.1.2                    | 基本反馈方程式.....           | 207        |
| 5.2                      | 反馈放大器的分类及其判别方法 .....   | 208        |
| 5.2.1                    | 负反馈放大器的分类.....         | 208        |
| 5.2.2                    | 反馈组态的判别方法.....         | 210        |
| 5.3                      | 负反馈对放大器性能的影响 .....     | 211        |
| 5.3.1                    | 负反馈提高了增益的稳定性.....      | 211        |
| 5.3.2                    | 负反馈可展宽放大器的频带宽度.....    | 212        |
| 5.3.3                    | 负反馈可改善放大器的非线性失真.....   | 213        |
| 5.3.4                    | 负反馈对放大器输入阻抗的影响.....    | 214        |
| 5.3.5                    | 负反馈对放大器输出电阻的影响.....    | 215        |
| 5.3.6                    | 信号源内阻对负反馈放大器性能的影响..... | 218        |

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 5.4   | 负反馈放大器的分析方法      | 219 |
| 5.4.1 | 等效电路法            | 219 |
| 5.4.2 | 方框图分析法           | 220 |
| 5.4.3 | 深负反馈条件下的近似计算     | 222 |
| 5.5   | 负反馈放大器的稳定性及其相位补偿 | 224 |
| 5.5.1 | 反馈放大电路自激振荡的条件    | 224 |
| 5.5.2 | 负反馈放大电路稳定性的判别方法  | 225 |
| 5.5.3 | 防止负反馈放大电路自激的方法   | 228 |
| 5.6   | 负反馈放大器实例         | 232 |
|       | 习题               | 234 |
|       | 机辅分析题            | 239 |
| <br>  |                  |     |
| 第6章   | 集成运算放大器的分析与应用    | 241 |
| 6.1   | 集成运算放大器的组成及基本特性  | 241 |
| 6.1.1 | 概述               | 241 |
| 6.1.2 | 集成电路的基本结构        | 241 |
| 6.1.3 | 模拟集成运放的典型电路      | 244 |
| 6.2   | 集成运算放大器的主要参数     | 253 |
| 6.3   | 线性应用及理想运放模型      | 255 |
| 6.3.1 | 线性应用和非线性应用       | 255 |
| 6.3.2 | 理想运放模型           | 256 |
| 6.4   | 基本运算电路           | 256 |
| 6.4.1 | 比例运算电路           | 257 |
| 6.4.2 | 加减运算电路           | 257 |
| 6.4.3 | 积分运算和微分运算电路      | 261 |
| 6.4.4 | 对数运算和指数运算电路      | 263 |
| 6.5   | 电压比较器            | 265 |
| 6.5.1 | 单门限电压比较器         | 265 |
| 6.5.2 | 迟滞比较器            | 266 |
| 6.6   | 波形发生电路           | 268 |
| 6.6.1 | 矩形波发生电路          | 268 |
| 6.6.2 | 三角波发生电路          | 271 |
| 6.6.3 | 锯齿波发生电路          | 273 |
| 6.7   | 集成运算放大器的其他应用     | 274 |
| 6.7.1 | 电流 - 电压变换电路      | 274 |
| 6.7.2 | RC有源滤波器          | 275 |
| 6.7.3 | 测量放大器            | 276 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 6.7.4 | 双极性增益可调放大器.....         | 279 |
| 6.7.5 | 交流耦合放大器.....            | 279 |
| 6.7.6 | 线性稳压电路.....             | 281 |
|       | 习题 .....                | 282 |
|       | 机辅分析题 .....             | 286 |
| <br>  |                         |     |
| 第7章   | 现代模拟集成电路技术 .....        | 289 |
| 7.1   | 电流模电路 .....             | 289 |
| 7.1.1 | 电流模电路的基本概念.....         | 289 |
| 7.1.2 | 跨导线性电路.....             | 290 |
| 7.2   | 电流反馈型集成运算放大器 .....      | 295 |
| 7.2.1 | 电流反馈集成运算放大器的基本特性.....   | 296 |
| 7.2.2 | 电流反馈集成运算放大器的典型电路.....   | 296 |
| 7.2.3 | 电流反馈集成运算放大器的闭环特性.....   | 298 |
| 7.3   | 跨导运算放大器 .....           | 300 |
| 7.3.1 | 跨导运算放大器的典型电路.....       | 300 |
| 7.3.2 | 跨导运算放大器的应用举例.....       | 302 |
| 7.4   | 在系统可编程模拟集成电路 .....      | 305 |
| 7.4.1 | 在系统可编程模拟电路的结构及工作原理..... | 306 |
| 7.4.2 | 在系统可编程模拟器件的设计应用.....    | 310 |
|       | 习题 .....                | 314 |
|       | 机辅分析题 .....             | 316 |
| <br>  |                         |     |
| 第8章   | 脉冲波形的产生与处理电路 .....      | 317 |
| 8.1   | 脉冲信号与参数 .....           | 317 |
| 8.2   | 半导体器件的开关特性 .....        | 318 |
| 8.2.1 | 二极管的开关特性.....           | 318 |
| 8.2.2 | 晶体三极管的开关特性.....         | 319 |
| 8.3   | 逻辑门电路 .....             | 320 |
| 8.3.1 | 基本的逻辑运算与逻辑门电路.....      | 320 |
| 8.3.2 | TTL集成逻辑门 .....          | 322 |
| 8.3.3 | CMOS集成逻辑门.....          | 328 |
| 8.4   | 555集成定时器 .....          | 333 |
| 8.4.1 | CMOS集成定时器的结构.....       | 333 |
| 8.4.2 | CMOS集成定时器的工作原理.....     | 334 |
| 8.5   | 单稳触发器 .....             | 335 |
| 8.5.1 | 用555定时器构成的单稳触发器.....    | 335 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.5.2 单稳触发器应用举例.....                        | 337 |
| 8.6 多谐振荡器 .....                             | 338 |
| 8.6.1 由门电路构成的多谐振荡器.....                     | 338 |
| 8.6.2 由555定时器构成的多谐振荡器.....                  | 339 |
| 8.7 施密特触发器 .....                            | 341 |
| 8.7.1 由555定时器构成的施密特触发器.....                 | 342 |
| 8.7.2 集成施密特触发器.....                         | 343 |
| 8.7.3 施密特触发器应用举例.....                       | 344 |
| 8.8 锯齿波发生器 .....                            | 345 |
| 习题 .....                                    | 346 |
| 机辅分析题 .....                                 | 348 |
| <br>  |     |
| 第9章 电子电路计算机辅助设计 .....                       | 350 |
| 9.1 PSpice 仿真模型的应用 .....                    | 350 |
| 9.1.1 PSpice 模型.....                        | 350 |
| 9.1.2 模型举例.....                             | 351 |
| 9.1.3 硬件描述语言中的模型与参数.....                    | 356 |
| 9.1.4 仿真分析模型.....                           | 356 |
| 9.2 电子工作台简介 .....                           | 366 |
| 9.2.1 电子工作台概述.....                          | 366 |
| 9.2.2 电子工作台的特点.....                         | 367 |
| 9.2.3 系统要求.....                             | 368 |
| 9.2.4 软件安装.....                             | 368 |
| 9.2.5 Electronics Workbench 软件的使用 .....     | 369 |
| 9.2.6 Electronics Workbench 软件的电路分析方法 ..... | 376 |
| 9.3 PAC Designer 软件及开发实例 .....              | 390 |
| 9.3.1 ispPAC 简介 .....                       | 390 |
| 9.3.2 PAC Designer 对系统的要求 .....             | 390 |
| 9.3.3 PAC Designer 软件的主要功能 .....            | 390 |
| 9.3.4 PAC Designer 软件的安装 .....              | 390 |
| 9.3.5 PAC Designer 软件的使用方法 .....            | 391 |
| 9.3.6 ispPAC80 器件的软件设计方法 .....              | 395 |
| <br>  |     |
| 习题参考答案 .....                                | 398 |
| 参考文献 .....                                  | 404 |

# 常用符号说明

## 1. 电流和电压符号的一般规定 (以基极电流为例)

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| $I_B$       | 大写符号、大写下标,表示基极直流电流        |
| $I_b$       | 大写符号、小写下标,表示基极电流交流分量的有效值  |
| $i_B$       | 小写符号、大写下标,表示基极电流含有直流的总瞬时值 |
| $i_b$       | 小写符号、小写下标,表示基极电流交流瞬时值     |
| $I_{b,max}$ | 基极电流交流分量的最大值              |
| $I_B$       | 基极电流直流变化量                 |
| $I_b$       | 基极电流交流分量变化量               |
| $i_B$       | 基极总瞬时电流变化量                |

## 2 常用的基本符号

### 1) 电阻

|          |                     |
|----------|---------------------|
| $R, r$   | 电阻通用符号              |
| $G, g$   | 电导通用符号              |
| $R_i$    | 不包括偏置电阻的输入电阻        |
| $R_i$    | 包括偏置电阻时的输入电阻        |
| $R_o$    | 不包括集电极负载电阻时的输出电阻    |
| $R_o$    | 包括集电极负载电阻时的输出电阻     |
| $R_{if}$ | 不包括偏置电阻时负反馈放大器的输入电阻 |
| $R_{if}$ | 包括偏置电阻时负反馈放大器的输入电阻  |

|          |                        |
|----------|------------------------|
| $R_{of}$ | 不包括集电极负载电阻时负反馈放大器的输出电阻 |
| $R_{of}$ | 包括集电极负载电阻时负反馈放大器的输出电阻  |
| $R_s$    | 信号源内阻                  |
| $R_L$    | 外加负载电阻                 |
| $R_L$    | 放大器的负载电阻               |

### 2) 电容、电感及阻抗

|       |        |
|-------|--------|
| $C$   | 电容通用符号 |
| $C_i$ | 输入电容   |
| $C_L$ | 负载电容   |
| $C_M$ | 密勒等效电容 |
| $L$   | 电感通用符号 |
| $Z$   | 阻抗通用符号 |

### 3) 电压

|                  |            |
|------------------|------------|
| $U, u$           | 电压通用符号     |
| $U_s, u_s$       | 信号源电压      |
| $U_i$            | 输入信号电压     |
| $U_o$            | 输出信号电压     |
| $U_{CC}, U_{DD}$ | 正电源电压      |
| $U_{EE}, U_{SS}$ | 负电源电压      |
| $U_B, U_G$       | 基极、栅极偏置电压  |
| $U_{ref}$        | 基准电压(参考电压) |
| $U_{ID}, U_{id}$ | 差模输入电压     |
| $U_{IC}, U_{ic}$ | 共模输入电压     |
| $U_{OD}, U_{od}$ | 差模输出电压     |
| $U_{OC}, U_{oc}$ | 共模输出电压     |
| $U_{o,max}$      | 最大输出电压     |

|                   |            |                  |                             |
|-------------------|------------|------------------|-----------------------------|
| $U_f$             | 反馈电压       | $P_{o,max}$      | 最大输出功率                      |
| $V$               | 电位、电平通用符号  | $P_C$            | 耗散功率                        |
| $V_H$             | 逻辑高电平      | NEP              | 噪声等效功率                      |
| $V_L$             | 逻辑低电平      | 7) 频率            |                             |
| $V_{oH}, V_{oL}$  | 输出逻辑高、低电平  | $f,$             | 频率、角频率通用符号                  |
| $V_{iH}, V_{iL}$  | 输入逻辑高、低电平  | $f_H, f_L$       | 放大电路上限频率(高频截频)、下限频率(低频截频)   |
| $V_{on}, V_{off}$ | 开门、关门电平    | $f_{Hf}, f_{Lf}$ | 反馈放大电路上限频率(高频截频)、下限频率(低频截频) |
| 4) 电流             |            | BW               | 通频带                         |
| $I, i$            | 电流通用符号     | $f_p, p$         | 极点对应的频率、角频率                 |
| $I_s, i_s$        | 信号源电流      | $f_z, z$         | 零点对应的频率、角频率                 |
| $I_i$             | 输入电流       | 3 器件参数符号         |                             |
| $I_o$             | 输出电流       | $U_D$            | 二极管正向压降                     |
| $I_L$             | 负载电流       | $U_Z$            | 稳压二极管稳定电压                   |
| $I_f$             | 反馈电流       | $U$              | PN结势垒电压                     |
| $I_{ref}$         | 基准电流(参考电流) | $U_T$            | 晶体管温度电压当量                   |
| $I_o$             | 恒流源电流      | $U_{GS,th}$      | 增强型场效应管的阈值电压(开启电压)          |
| $I_{oH}$          | OC门开路时的漏电流 | $U_{GS,off}$     | 耗尽型场效应管的阈值电压(夹断电压)          |
| 5) 增益             |            | $U_A$            | 厄尔利电压                       |
| $A$               | 增益通用符号     |                  | 晶体管基区调宽系数, 场效应管沟道长度调制系数     |
| $A_U, A_I$        | 电压、电流增益    | $U_{CES}$        | 晶体管C, E间饱和压降                |
| $A_R, A_G$        | 互阻、互导增益    | $U_{CB0,B}$      | 射极开路时C, B间反向击穿电压            |
| $A_s$             | 源增益        | $U_{CE0,B}$      | 基极开路时C, E间反向击穿电压            |
| $A(s)$            | 增益函数       | $U_{EB0,B}$      | 集电极开路时E, B间反向击穿电压           |
| $A(jf), A(j)$     | 正弦增益函数     |                  | 源、漏间反向击穿电压                  |
| $A_f$             | 反馈放大电路的增益  |                  |                             |
| $A_{Ud}$          | 差模电压增益     |                  |                             |
| $A_{Uc}$          | 共模电压增益     |                  |                             |
| $B$               | 反馈系数用符号    |                  |                             |
| $B_U, B_I$        | 电压、电流反馈系数  |                  |                             |
| $B_R, B_G$        | 互阻、互导反馈系数  |                  |                             |
| 6) 功率             |            |                  |                             |
| $P_{DC}$          | 直流电源供给功率   |                  |                             |
| $P_o$             | 输出功率       |                  |                             |

|               |                     |               |                 |
|---------------|---------------------|---------------|-----------------|
| $I_S$         | 二极管反向饱和电流           | $C_{b e}$     | 混合 模型中发射结等效电容   |
| $I_{ES}$      | 发射结反向饱和电流           | $C_{gs}$      | 场效应管栅、源间等效电容    |
| $I_{CBO}$     | 发射极开路时 C, B 间反向饱和电流 | $C_{gd}$      | 场效应管栅、漏间等效电容    |
| $I_{CEO}$     | 基极开路时 C, E 间反向饱和电流  | $C_{ds}$      | 场效应管漏、源间等效电容    |
| $I_{CM}$      | 集电极最大允许电流           | $C_D$         | 扩散电容            |
| $I_{DSS}$     | 耗尽型场效应管的饱和漏极电流      | $C_T$         | 势垒电容            |
| $f$           | 晶体管共基电流放大系数的截止频率    | , 琿           | 晶体管共基交、直流电流放大系数 |
| $f$           | 晶体管共射电流放大系数的截止频率    | , 瑯           | 晶体管共射交、直流电流放大系数 |
| $f_T$         | 特征频率                | $n_i$         | 本征半导体电子浓度       |
| $P_{CM}$      | 晶体管集电极最大允许耗散功率      | $n$           | 电子浓度            |
| $P_{on}$      | TTL 门的空载导通功耗        | $p_i$         | 本征半导体空穴浓度       |
| $P_{off}$     | TTL 门的空载截止功耗        | $p$           | 空穴浓度            |
| $r_D$         | 二极管正向电阻             | $N$           | 电子型半导体          |
| $r_{bb}$      | 基区体电阻               | $P$           | 空穴型半导体          |
| $r_e$         | 发射结微变电阻             | $W$           | 沟道宽度            |
| $r_{b e}$     | 混合 模型中发射结微变电阻       | $L$           | 沟道长度            |
| $h_{ie}$      | 共射 h 模型中输入电阻        |               | 跨导比             |
| $h_{fe}$      | 共射 h 模型中电流放大系数      | $K$           | MOS 管的导电因子      |
| $h_{oe}$      | 共射 h 模型中输出电导        | $E_{GO}$      | 半导体材料的禁带宽度      |
| $h_{ib}$      | 共基 h 模型中输入电阻        | $N_A$         | 受主杂质浓度          |
| $h_{fb}$      | 共基 h 模型中电流放大系数      | $N_D$         | 施主杂质浓度          |
| $h_{ob}$      | 共基 h 模型中输出电导        | $\mu_n$       | 电子迁移率           |
| $r_{ds}$      | 场效应管共源接法时输出电阻       | $\mu_p$       | 空穴迁移率           |
| $g_m, g_{mb}$ | 跨导、背栅跨导             | $D_n$         | 电子扩散系数          |
| $C_{b c}$     | 混合 模型中集电结等效电容       | $D_p$         | 空穴扩散系数          |
|               |                     | $U_+$         | 运放的同相输入端        |
|               |                     | $U_-$         | 运放的反相输入端        |
|               |                     | 4 其他符号        |                 |
|               |                     | $V_D, V_{Dz}$ | 二极管、稳压二极管       |