



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材
浙江省高等教育重点建设教材

电子系统设计与实践 (第2版)

贾立新 王涌 等 编著

清华大学出版社



浙江省高等教育重点建设教材

电子系统设计与实践 (第2版)

贾立新 王涌 等 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是浙江省高等教育重点建设立项教材。教材内容围绕电子系统的设计与实现方法来安排。全书由四部分组成：第一部分“模拟电子系统设计与实践”，主要介绍放大电路、滤波电路和直流稳压电源等典型模拟电路的设计原理和方法。第二部分“数字电子系统的设计与实践”，主要介绍 CPLD/FPGA 的结构和原理、面向综合的 VHDL 语言、基于 Quartus II 软件和 VHDL 语言的数字系统设计。第三部分“SoC 单片机系统设计与实践”，主要介绍 SoC 单片机 C8051F360 的结构及片内资源、并行总线单片机系统和串行总线单片机系统设计、单片机数据通信技术。第四部分“综合电子系统设计与实践”，以数字化语音存储与回放、DDS 信号发生器、高速数据采集系统等三个典型综合电子系统为实例，从方案设计、理论分析计算、软硬件设计、系统调试等方面详细介绍了综合电子系统的设计方法。

本书突出了理论与实践相结合。书中介绍的电子系统大多采用当前主流芯片，硬件电路和软件都经过实际反复调试验证，每一章安排相应的设计训练题。为了便于实践，书中给出了 FPGA 最小系统、SoC 单片机最小系统等电子系统核心实验模块的设计制作方法。

本书适合作为高等学校电子信息类专业学生电子系统设计、电子技术综合提高型实验、大学生电子设计竞赛赛前训练等教学环节的教材或参考书，也可作为相关工程技术人员的参考书。

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

电子系统设计与实践/贾立新等编著. —2 版. —北京：清华大学出版社，2011.2

(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-24274-1

I. ①电… II. ①贾… III. ①电子系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 244583 号

责任编辑：文 怡

责任校对：李建庄

责任印制：王秀菊

出版发行：清华大学出版社

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

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

印 装 者：北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：23.5 字 数：582 千字

版 次：2011 年 2 月第 2 版 印 次：2011 年 2 月第 1 次印刷

印 数：1~3000

定 价：39.00 元



前言

“创新来源于实践”，研究型、创新型实验是培养学生工程实践能力、创新能力与团队协作精神的重要载体。以全国大学生电子设计竞赛和电工电子实验教学示范中心建设为背景，越来越多的高校开设了以培养学生综合能力为主要目标的电子系统设计与实践方面的课程。编写本书的目的就是为电子信息类专业学生在学完模电、数电、单片机等基础课程后开展电子系统设计、电子技术综合提高型实验、电子设计竞赛赛前训练、毕业设计等实践教学提供一本合适的教材或参考书。

本书是在2007年4月出版的浙江省高等教育重点建设教材《电子系统设计与实践》基础上重新编写出版的。本书具有以下特色：

1. 面向教学需要。为了便于教学，本书在内容编排上与现有相关课程(如模电、数电、单片机等)相衔接，具有高起点、综合性的特点。全书由模拟电子系统设计、数字电子系统设计、单片机电子系统设计、综合电子系统设计四部分组成，各部分相对独立、循序渐进，教学过程中可以根据实际情况取舍。

2. 突出学生工程实践能力培养。本书以电子系统设计为主线，在内容设计上注重以下能力培养：对电子系统的理论分析、设计、计算能力，常用开发工具的使用能力，集成电路应用能力，电子系统调测能力，技术创新能力等。通过对上述能力的培养，弥补传统理论课教学的不足。

3. 理论与实践相结合。作为一本实践类教材，为了便于学生课后动手实践，本书在编写中作了如下安排：每一章节后面均安排设计训练题；提供了电子系统中常用核心模块的制作方法，包括元器件选择、PCB板的布局和布线、电路的调试等内容，便于自行制作；与本教材相配套，作者研制开发了一套综合电子系统实验板，书中所有设计实例和大部分设计训练题均可在实验板上验证。

在第一版教材的使用过程中，电子系统设计领域发生了快速发展，同时，兄弟学校在使用本教材的过程中也提出了许多宝贵的意见。作者在第一版的基础上，对本书的内容作了较大修改和更新。对本书各部分的内容说明如下：

第一部分 模拟电子系统设计。实际的电子产品大多为数模混合的综合电子系统，虽然模拟电路所占的比例可能很少，但模拟电路或许是整个电子系统设计和实现中最具挑战性的部分，而且往往在系

统性能上起到关键的作用。该部分内容主要介绍基于集成运算放大器的放大电路和有源滤波电路设计,较深入地介绍了集成运算放大器主要参数的含义及其与设计目标的关系。考虑到稳压电源是各种电子系统中必不可少的组成部分,为了使设计者掌握基本的稳压电源设计技术,本部分内容增加了线性稳压电源和开关稳压电源的基本原理和设计方法的内容。

第二部分 数字电子系统设计。随着微电子技术的发展,电子系统朝着更低成本、更快、更小、更复杂的趋势发展。实现数字系统的两种主流设计方法为:用 HDL 语言编程,采用 CPLD/FPGA 实现特定的功能;用软件编程语言编程,采用微控制器实现特定的功能。本部分内容和第三部分内容将分别介绍这两种主流的数字系统设计方法。与第一版教材相比,本部分内容改用 Quartus II 软件代替已很少使用的 Maxplus II 软件,用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 FPGA 代替了 Cyclone 系列 FPGA。考虑到嵌入式存储器、PLL 已是 FPGA 的标准配置,本书增加了嵌入式存储器、PLL 工作原理和使用方法的介绍。本部分内容还增加了设计复用技术、FPGA 最小系统设计等内容。

第三部分 单片机电子系统设计。为了避免与单片机课程内容重复,删除了第一版教材中有关 MCS-51 单片机内容,直接介绍 SoC 单片机 C8051F360。通过对 C8051F360 单片机内部集成的 A/D 转换器、D/A 转换器、SMBus 接口、SPI 接口应用的介绍,展示了 SoC 单片机在电子系统设计中的魅力。在这一部分内容编写中,作者摆脱了传统单片机系统设计方法的束缚,提出了以下两方面的改革思路:一方面将单片机系统扩展分为并行总线扩展和串行总线扩展两条主线;另一方面将 CPLD/FPGA 引入单片机系统设计中,发挥单片机和 CPLD/FPGA 各自的优势,提高单片机系统的集成度和实现单片机系统的硬件可重构功能。

第四部分 综合电子系统设计。该部分内容选取了数字化语音存储与回放、DDS 信号发生器、高速数据采集三个典型的综合电子系统设计实例。这三个电子系统综合性强,都包含模拟、数字、单片机子系统,软硬件相结合,同时可很好地与本书前面三部分内容相衔接,更重要的是,这些电子系统中所包含的技术应用范围很广,能起到举一反三的作用。

参加本书编写工作的有贾立新、王涌、周文委、朱金芳等。第 2 章由朱金芳编写,第 3 章由周文委编写,第 13 章由王涌编写,其余各章由贾立新编写。贾立新任本书主编,负责全书的整体规划、统稿与定稿工作。

本书在编写过程中得到了浙江工业大学信息工程学院省级电工电子实验教学示范中心各位老师的热情支持。在本书出版之际,谨向他们致以最诚挚的谢意。

清华大学出版社多位编辑为本书的出版做了卓有成效的工作,在此深表谢意。

本书的出版得到了浙江省信息处理与自动化技术重中之重学科资助。

与本书配套的部分教学资源已上网,具体网址:<http://kczy.zjut.edu.cn/szdl>(单击“电子设计与科技创新”标题)。由于我们水平有限,书中难免有错误和不妥之处。如果您在阅读本书的过程中发现错误或是有改进本书的建议,请您通过 jlx@zjut.edu.cn 与作者联系。

编者

2010 年 11 月于杭州浙江工业大学



编委会名单

顾问(按姓氏音序排列):

- | | |
|-----|---------------|
| 李衍达 | 清华大学信息科学技术学院 |
| 邬贺铨 | 中国工程院 |
| 姚建铨 | 天津大学激光与光电子研究所 |

主任:

- | | |
|-----|-----------|
| 董在望 | 清华大学电子工程系 |
|-----|-----------|

编委会委员(按姓氏音序排列):

- | | |
|-----|-------------------|
| 鲍长春 | 北京工业大学电子信息与控制工程学院 |
| 陈怡 | 东南大学高教所 |
| 戴瑜兴 | 湖南大学电气与信息工程学院 |
| 方达伟 | 中国计量学院信息工程学院 |
| 甘良才 | 武汉大学电子信息学院通信工程系 |
| 郭树旭 | 吉林大学电子科学与工程学院 |
| 胡学钢 | 合肥工业大学计算机与信息学院 |
| 金伟其 | 北京理工大学信息科技学院光电工程系 |
| 孔力 | 华中科技大学控制系 |
| 刘振安 | 中国科学技术大学自动化系 |
| 陆大绘 | 清华大学电子工程系 |
| 马建国 | 西南科技大学信息与控制工程学院 |
| 彭启琮 | 电子科技大学通信与信息工程学院 |
| 仇佩亮 | 浙江大学信电系 |
| 沈伯弘 | 北京大学电子学系 |

- | | |
|--------|---------------------|
| 童家榕 | 复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院 |
| 汪一鸣(女) | 苏州大学电子信息学院 |
| 王福源 | 郑州大学信息工程学院 |
| 王华奎 | 太原理工大学信息与通信工程系 |
| 王 瑶(女) | 美国纽约 Polytechnic 大学 |
| 王毓银 | 北京联合大学 |
| 王子华 | 上海大学通信学院 |
| 吴建华 | 南昌大学电子信息工程学院 |
| 徐金平 | 东南大学无线电系 |
| 阎鸿森 | 西安交通大学电子与信息工程学院 |
| 袁占亭 | 甘肃工业大学 |
| 乐光新 | 北京邮电大学电信工程学院 |
| 翟建设 | 解放军理工大学气象学院 4 系 |
| 赵圣之 | 山东大学信息科学与工程学院 |
| 张邦宁 | 解放军理工大学通信工程学院无线通信系 |
| 张宏科 | 北京交通大学电子信息工程学院 |
| 张 泽 | 内蒙古大学自动化系 |
| 郑宝玉 | 南京邮电学院 |
| 郑继禹 | 桂林电子工业学院二系 |
| 周 杰 | 清华大学自动化系 |
| 朱茂镒 | 北京信息工程学院 |



序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步和市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向全国教学研究型 and 教学主导型普通高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括为:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易懂易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。



目 录

第一部分 模拟电子系统设计与实践

第 1 章 基于集成运放的放大电路设计	3
1.1 运算放大器的模型	3
1.2 用集成运放构成的基本放大电路	5
1.3 集成运放的主要参数	9
1.4 正确使用集成运算放大器	14
1.5 设计训练题	16
第 2 章 模拟滤波器的设计	17
2.1 模拟有源滤波器设计	17
2.1.1 概述	17
2.1.2 有源低通滤波器和高通滤波器设计	20
2.2 开关电容滤波器	22
2.2.1 开关电容滤波器的基本原理	23
2.2.2 单片集成开关电容滤波器及其使用	25
2.3 设计训练题	28
第 3 章 直流稳压电源设计	29
3.1 概述	29
3.2 固定式线性直流稳压电源设计	31
3.3 可调式直流稳压电源设计	34
3.4 开关直流稳压电源设计	36
3.5 设计训练题	39

第二部分 数字电子系统设计与实践

第 4 章 CPLD 和 FPGA 的基本结构和原理	43
4.1 CPLD 的基本结构和工作原理	43
4.2 FPGA 的基本结构和工作原理	48

4.3	FPGA 器件在电路配置技术	57
4.4	CPLD 与 FPGA 的比较	63
4.5	FPGA 最小系统设计	64
4.6	设计训练题	67
第 5 章	硬件描述语言 VHDL	69
5.1	概述	69
5.2	VHDL 的语言要素	71
5.3	VHDL 程序的基本结构	74
5.4	VHDL 程序的句法	77
5.4.1	并行语句	77
5.4.2	顺序语句	80
5.5	常量、变量与信号	84
5.6	VHDL 结构体的三种描述方法	86
5.7	常用组合逻辑电路的 VHDL 描述	88
5.8	常用时序逻辑电路的 VHDL 描述	90
5.9	有限状态机(FSM)的 VHDL 描述	92
5.10	设计训练题	95
第 6 章	数字系统设计举例	98
6.1	概述	98
6.2	EDA 软件 Quartus II 的基本操作——以 4 位数字频率计设计为例	99
6.2.1	设计题目	99
6.2.2	数字频率计的工作原理	99
6.2.3	数字频率计的硬件电路设计	100
6.2.4	数字频率计的顶层设计和底层模块设计	102
6.2.5	设计项目的输入、编译、仿真、处理	107
6.3	Quartus II 宏功能模块 LPM 的使用——以正弦信号发生器设计为例	119
6.3.1	设计题目	119
6.3.2	使用嵌入式锁相环 PLL	119
6.3.3	使用在系统嵌入式存储器	120
6.3.4	正弦信号发生器设计	123
6.4	设计项目的复用技术	124
6.5	设计训练题	126

第三部分 单片机电子系统设计与实践

第 7 章	SoC 单片机 C8051F360 的基本原理	131
7.1	C8051F360 单片机简介	131


7.2	并行 I/O 端口	133
7.3	振荡器	140
7.4	10 位 ADC	144
7.5	10 位电流模式 DAC	149
7.6	中断系统	152
7.7	设计训练题	158
第 8 章	基于并行总线的单片机系统设计	160
8.1	并行总线单片机系统概述	160
8.2	C8051F360 单片机外部数据存储器接口	162
8.3	数据存储器并行扩展技术	166
8.4	图形点阵式 LCD 模块接口设计	169
8.4.1	内置汉字库图形点阵式 LCD 模块——LCD12864	169
8.4.2	LCD12864 模块并行接口设计	174
8.4.3	LCD12864 模块显示程序设计	175
8.5	基于 CPLD 的编码式键盘接口设计	181
8.6	单片机与 FPGA 接口设计	188
8.7	并行总线单片机最小系统设计	192
8.7.1	方案设计	192
8.7.2	MCU 模块硬件电路设计	193
8.7.3	键盘显示模块硬件电路设计	199
8.7.4	单片机最小系统的初始化程序设计	200
8.8	设计训练题	203
第 9 章	基于串行总线的单片机系统设计	206
9.1	SPI 总线扩展技术	207
9.1.1	SPI 串行总线	207
9.1.2	C8051F360 单片机的增强型 SPI 接口	208
9.1.3	增强型 SPI 接口应用示例一——串行 D/A 转换器扩展技术	212
9.1.4	增强型 SPI 接口应用示例二——串行 Flash ROM 扩展技术	214
9.2	I ² C 总线扩展技术	224
9.2.1	I ² C 串行总线	224
9.2.2	I ² C 总线数据传送的软件模拟	227
9.2.3	C8051F360 单片机的 SMBus(I ² C)总线接口	233
9.2.4	SMBus 总线接口应用示例——串行 A/D 转换器扩展技术	236
9.3	串行总线单片机系统设计示例——可校时数字钟设计	241
9.3.1	设计题目	241
9.3.2	LED 显示接口设计	241
9.3.3	非编码式键盘设计	244

9.3.4	实时时钟电路设计	246
9.3.5	系统软件设计	247
9.4	设计训练题	254
第 10 章	单片机数据通信系统设计	256
10.1	串行异步通信系统设计	256
10.1.1	概述	256
10.1.2	C8051F360 单片机的串行口 UART0	260
10.1.3	双机异步通信编程示例	263
10.2	CAN 现场总线通信技术	268
10.2.1	CAN 现场总线简介	268
10.2.2	CAN 总线接口设计	269
10.2.3	CAN 控制器 SJA1000	271
10.2.4	SJA1000 内部寄存器功能说明	273
10.2.5	CAN 总线通信系统设计示例——多点温度检测系统	280
10.3	设计训练题	287

第四部分 综合电子系统设计与实践

第 11 章	基于 SoC 单片机的数字化语音存储与回放系统	291
11.1	设计题目	291
11.2	总体方案设计	291
11.3	模拟子系统设计	293
11.4	系统软件设计	297
11.5	系统调试	301
11.6	DPCM 语音压缩算法	302
11.7	设计训练题	305
第 12 章	DDS 信号发生器的设计	306
12.1	设计题目	306
12.2	直接数字频率合成的原理	306
12.3	采用专用 DDS 集成芯片实现的信号发生器	308
12.4	采用单片机+FPGA 实现的 DDS 信号发生器	314
12.4.1	方案设计	314
12.4.2	主要技术参数的分析与确定	315
12.4.3	数字部分电路设计	316
12.4.4	模拟部分电路设计	320
12.4.5	FPGA 内部 DDS 子系统设计	323
12.4.6	单片机控制软件设计	326

12.4.7 系统调试	331
12.5 设计训练题	334
第 13 章 高速数据采集系统设计	336
13.1 设计题目	336
13.2 方案设计	336
13.3 数据采集通道的设计	337
13.4 信号采集与存储控制电路的设计	342
13.5 高速数据采集系统硬件电路总体设计	344
13.6 系统软件设计	346
13.7 系统调试	347
13.8 设计训练题	348
附录 A ESDM-3 综合电子系统设计实验板简介	350
参考文献	360



第一部分 模拟电子系统 设计与实践

导读：

虽然近十年来,由于数字电子技术的发展,许多传统上隶属于模拟电子学领域的功能,现在都用数字的形式实现了,但模拟电路的重要性并没有降低。这是因为从自然现象中获得的电信号基本上都是模拟信号,需要模拟电路对其进行处理。当今许多实际应用的电子系统都是由数字子系统和模拟子系统相结合的综合电子系统。虽然模拟子系统在整个电子系统中所占的比重并不大,但往往是设计中极具挑战性的部分,而且对整个电子系统的性能指标起到关键的作用。

由于运算放大器和各种模拟集成电路的广泛应用,由分立元件构成的模拟电路已很少使用了。在进行模拟电子系统设计时,已经不再需要精心设计功能单元电路(因为各种功能模拟电路芯片应有尽有),而是把注意力放在如何将性能优良的集成电路连接成系统,满足设计要求。

本部分主要介绍最常用的放大电路、滤波器、稳压电源3种模拟子系统的基本设计方法。第1章主要介绍由运算放大器构成的典型放大电路,分析运算放大器主要参数的含义,以及如何正确选择和使用运算放大器。第2章介绍模拟有源滤波器的设计和开关电容滤波器的原理及应用。第3章主要介绍线性稳压电源和开关稳压电源的基本工作原理和设计方法。



基于集成运放的放大电路设计

1.1 运算放大器的模型

运算放大器最早应用于模拟计算机中,它可以完成诸如加法、减法、微分、积分等各种数学运算。随着集成电路技术的不断发展,运算放大器的应用日益广泛,可以实现信号的产生、信号的变换、信号处理等各种各样功能,已成为构成模拟系统最基本的集成电路。

运算放大器是由多级基本放大电路直接耦合而组成的高增益放大器。通常由高阻输入级、中间放大级、低阻输出级和偏置电路组成,其内部结构框图如图 1-1-1 所示。

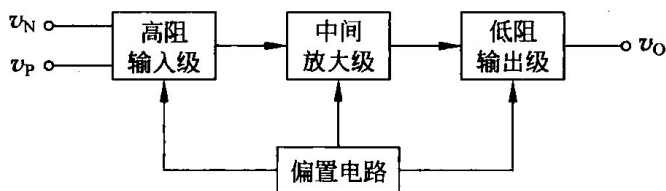


图 1-1-1 运算放大器的内部结构框图

当运算放大器与外部电路连接组成各种功能电路时,从系统角度看,无需关心其复杂的内部电路,而是着重研究其外特性。具体地讲,人们利用厂商提供的运放参数构成表征外特性的简化运算模型。常用的有理想运算放大器模型和实际运算放大器模型。

1. 理想运算放大器模型

理想运算放大器的模型如图 1-1-2 所示。理想运算放大器具有以下特性:

- ① 开环电压增益 $A_{vo} = \infty$;
- ② 输入电阻 $r_i = \infty$;
- ③ 输出电阻 $r_o = 0$;

- ④ 上限截止频率 $f_H = \infty$;
- ⑤ 共模抑制比 $K_{CMR} = \infty$;
- ⑥ 失调电压、失调电流和内部噪声均为 0。

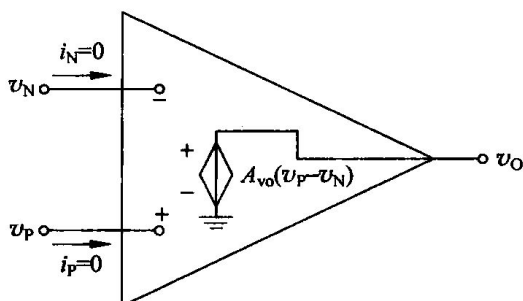


图 1-1-2 理想运算放大器模型

从理想运算放大器的这些条件可以导出理想运放线性运用时具有的两个重要特性：

① 理想运算放大器的同相输入端和反相输入端的电流近似为 0，即 $i_N = i_P = 0$ 。这一结论是由理想运放输入电阻 $r_i = \infty$ 而得到的。

② 理想运算放大器的两输入端电压差趋于 0，即 $v_N = v_P$ ，这一结论是由理想运放的电压增益 $A_{vo} = \infty$ 时输出电压为有限值而得到的。

对于理想运算放大器的前三条特性，通用运算放大器一般可以近似满足，后三条特性一般通用运算放大器不易达到，但对某些功能电路非常重要，实际使用时，可选用专用运算放大器来近似满足。如可选用宽带运算放大器获得一定的频带宽度，选用精密运算放大器使失调漂移、内部噪声趋于 0。

2. 实际运算放大器模型

实际运算放大器的模型如图 1-1-3 所示。实际运算放大器的模型包括以下主要参数：

- ① 差分输入电阻 r_i ;
- ② 开环电压增益 A_{vo} ;
- ③ 输出电阻 r_o ;
- ④ 差分输入电压 $v_{id} = v_P - v_N$ 。

其中，增益 A_{vo} 又称开环差模增益，因为在输出不加负载时有：

$$v_O = A_{vo} v_{id} = A_{vo} (v_P - v_N) \quad (1-1-1)$$

$$v_{id} = \frac{v_O}{A_{vo}} \quad (1-1-2)$$

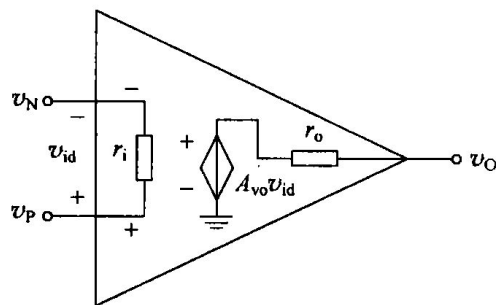


图 1-1-3 实际运算放大器的模型

实际运算放大器的主要参数一般在器件的数据手册中给出。如 741 运算放大器的 $r_i = 2M\Omega$, $A_{vo} = 200V/mV$, $r_o = 75\Omega$ 。由于运算放大器的开环增益都非常大，对于一个有限的输出，只需要非常小的差分输入电压。譬如，要维持 $v_O = 6V$ ，一个空载 741 运算放大器需要 $v_{id} = 6/200000 = 30\mu V$ ，是非常小的电压。一个空载 OP77 运算放大器只需 $v_{id} = 6/(12 \times 10^6) = 0.5\mu V$ 。