

★ 国家职业技能培训与鉴定教材

★ 全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

维修电工

国家职业技能培训与鉴定教程

高级、技师、高级技师/国家职业资格三级、二级、一级

王 兵 主 编
凌 云 夏 军 副主编
肖伸平 主 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国家职业技能培训与鉴定教材

全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

维修电工

国家职业技能培训与鉴定教程

高级、技师、高级技师 / 国家职业资格三级、二级、一级

王兵 主编
凌云 夏军 副主编
肖伸平 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以《国家职业标准——维修电工》为依据,按照标准、教材、题库相衔接的原则组织编写,对参加维修电工(国家职业资格三级、二级、一级)鉴定考试的考生梳理知识、强化训练、提高应试能力有直接的帮助和指导作用。

本书在保证知识连贯性的基础上,着眼于操作技能,力求浓缩精练,体现了维修电工的职业特色,突出针对性、典型性、实用性,涵盖了相应级别考核的主要理论知识和操作技能。

本书是参加维修电工(国家职业资格三级、二级、一级)鉴定考试的必备参考指导用书,可作为高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校、中等职业学校相关课程的教材,也可作为企业技师培训教材和相关设备维修技术人员的自学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

维修电工国家职业技能培训与鉴定教程:高级、技师、高级技师/国家职业资格三级、二级、一级/王兵主编.

—北京:电子工业出版社,2012.8

国家职业技能培训与鉴定教材 全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

ISBN 978-7-121-17808-5

I. ①维… II. ①王… III. ①电工—维修—高等职业学校—教材 IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 178953 号

策划编辑:关雅莉 杨 波

责任编辑:郝黎明 文字编辑:裴 杰

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:北京市李史山胶印厂

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

开 本:787×1092 1/16 印张:22.5 字数:576 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版

印 次:2014 年 8 月第 3 次印刷

定 价:41.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

国家职业技能培训与鉴定教材

全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

维修电工 教材编写委员会

主任委员：史术高 湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）

副主任委员：（排名不分先后）

王 兵	湖南工业大学
肖仲平	湖南工业大学
邓木生	湖南铁道职业技术学院
汤光华	湖南化工职业技术学院
胡良君	张家界航空职业技术学院
尹南宁	衡阳技师学院
邱丽芳	湖南工业职业技术学院
雷刚跃	湖南信息职业技术学院
陈应华	湖南铁路科技职业技术学院
邱 俊	长沙民政职业技术学院
罗水华	湖南安全技术职业学院
夏 军	长沙市雷锋学校

委 员：（排名不分先后）

李广兵	长沙航空职业技术学院
朱国军	长沙航空职业技术学院
凌 云	湖南工业大学
彭志红	株洲工贸技师学院
王亚兵	中国铁通湘潭分公司
谭 波	湖南工业大学
李燕林	湖南工业大学
黄云章	湖南工业大学
周维龙	湖南工业大学
贺可恒	株洲电视台
吴兴锦	长沙航空职业技术学院
欧阳斌	长沙航空职业技术学院
王朝红	长沙航空职业技术学院
刘 奇	湖南省职业技能鉴定中心
钟美杰	长沙航空职业技术学院
赵雅平	甘肃省岷县职业中专

秘 书 处：甘昌意、刘南、杨波、刘学清

出版说明

人才资源是国家发展、民族振兴最重要的战略资源，是国家经济社会发展的第一资源，是促进生产力发展和体现综合国力的第一要素。加强人力资源开发工作和人才队伍建设是加快我国现代化建设进程中事关全局的大事，始终是一个基础性的、全面性的、决定性的战略问题。坚持人才优先发展，加快建设人才强国对于全面实现小康社会目标、建设富强民主文明和谐的社会主义现代化国家具有决定性意义。党和国家历来高度重视人力资源开发工作，改革开放以来，尤其是进入新世纪新阶段，党中央和国务院做出了实施人才强国战略的重大决策，提出了一系列加强人力资源开发的政策措施，培养造就了各个领域的大批人才。但当前我国人才发展的总体水平同世界先进国家相比仍存在较大差距，与我国经济社会发展需要还有许多不适应。为此，《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》提出：“坚持服务发展、人才优先、以用为本、创新机制、高端引领、整体开发的指导方针，培养和造就规模宏大、结构优化、布局合理、素质优良的人才队伍，确立国家人才竞争比较优势，进入世界人才强国行列，为在本世纪中叶基本实现社会主义现代化奠定人才基础。”

职业教育培训是人力资源开发的主要途径之一，加强职业教育培训，创新人才培养模式，加快人才队伍建设是人力资源开发的重要内容，是落实人才强国战略的具体体现，是实现国家中长期人才发展规划纲要目标的根本保证。

职业资格鉴定是全面贯彻落实科学发展观，大力实施人才强国战略的重要举措，有利于促进劳动力市场建设和发展，关系到广大劳动者的切身利益，对于企业发展和社会经济进步以及全面提高劳动者素质和职工队伍的创新能力具有重要作用。职业资格鉴定也是当前我国经济社会发展，特别是就业、再就业工作的迫切要求。

国家题库的建立，对于保证职业资格鉴定工作的质量起着重要作用，是加快培养一大批数量充足、结构合理、素质优秀的技术技能型、复合技能型和知识技能型的高技能人才，为各行各业造就出千万能工巧匠的重要具体措施。但目前相当一部分职业资格鉴定题库的内容已经过时，湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）组织鉴定站所、院校和企业专家开发了新的题库，并经过人力资源和社会保障部职业技能鉴定中心审核，获准可以按照新的题库开展相应工种的职业资格鉴定工作。

职业教育培训教材是职业教育培训的重要资源，是体现职业教育培训特色的知识载体和

教学的基本工具，是培养和造就高技能人才的基本保证。为满足广大劳动者职业培训鉴定需要，给广大参加职业资格鉴定的人员提供帮助，我们组织参加这次国家题库开发的专家，以及长期从事职业资格鉴定工作的人员编写了这套“国家职业资格技能培训与鉴定教材”。本套丛书是与国家职业标准、国家职业资格鉴定题库相配套的。在本套丛书的编写过程中，贯彻了“围绕考点，服务考试”的原则，把编写重点放在以下几个主要方面。

第一，内容上涵盖国家职业标准对该工种的知识和技能方面的要求，确保达到相应等级技能人才的培养目标。

第二，突出考前辅导的特色，以职业资格鉴定试题作为本套丛书的编写重点，内容上紧紧围绕鉴定考核的内容，充分体现系统性和实用性。

第三，坚持“新内容”为编写的侧重点，无论是内容还是形式上都力求有所创新，使本套丛书更贴近职业资格鉴定，更好地服务于职业资格鉴定。

这是推动培训与鉴定紧密结合的大胆尝试，是促进广大劳动者深入学习、提高职业能力和综合素质、促进人才队伍建设的一项重要基础性工作，很有意义，是一件大好事。

组织开发高质量的职业培训鉴定教材，加强职业培训鉴定教材建设，为技能人才培养提供技术和智力支持，对于提高技能人才培养质量，推动职业教育培训科学发展非常重要。我们要适应新形势新任务的要求，针对职业培训鉴定工作的实际需要，统一规划，总结经验，加以完善，努力把职业培训鉴定教材建设工作做得更好，为提高劳动者素质、促进就业和经济社会发展做出积极贡献。

电子工业出版社 职业教育分社

2012年8月

前 言

本套教材的编写符合职业学校学生的认知和技能学习规律，形式新颖，职教特色明显；在保证知识体系完备，脉络清晰，论述精准深刻的同时，尤其注重培养读者的实际动手能力和企业岗位技能的应用能力，并结合大量的典型任务和项目来使读者更进一步灵活掌握及应用相关的技能。

为满足维修电工职业技能培训和职业技能鉴定需要，更好地服务于维修电工国家职业资格证书制度的推行工作，湖南省人力资源和社会保障厅职业技能鉴定中心、湖南省职业技术培训研究室组织行业专家、职业教育专家和职业技能培训与职业技能鉴定专家，成立了维修电工职业技能鉴定研究与题库开发课题组，对维修电工国家职业标准、职业技能培训教程、职业技能鉴定试题库和职业技能鉴定指南等进行了深入的研究，撰写了《维修电工 国家职业技能培训与鉴定教程 高级、技师、高级技师 / 国家职业资格三级、二级、一级》、《维修电工 国家职业技能鉴定指南 高级、技师、高级技师 / 国家职业资格三级、二级、一级》、《维修电工 国家职业技能培训与鉴定教程 初级、中级 / 国家职业资格五级、四级》、《维修电工 国家职业技能鉴定指南 初级、中级 / 国家职业资格五级、四级》4 种图书，并通过了湖南省人力资源和社会保障厅的审定。

● 本书内容

本书以《国家职业标准——维修电工》为依据，对参加维修电工（国家职业资格三级、二级、一级）鉴定考试的考生梳理知识、强化训练、提高应试能力有直接的帮助和指导作用。体现了维修电工的职业特色，突出针对性、典型性、实用性，涵盖了相应级别考核的主要理论知识和操作技能。为便于考生把握相应等级的考核要求，指南给出了学习要点、工作要求及鉴定要素；为便于考生熟悉考核内容、题型，指南以试题的形式阐述了相应等级应掌握的考核点并配有参考答案或评分标准。

本书是参加维修电工（国家职业资格三级、二级、一级）鉴定考试的必备参考指导用书，可作为高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校、中等职业学校相关课程的教材，也可作为企业技师培训教材和相关设备维修技术人员的自学用书。

在培训、教学实践中，老师可根据不同培养目标所对应的技能要求，适当选择和增补相关的培训、教学内容。

● 配套教学资源

本书提供了配套的立体化教学资源，包括教学指南、电子教案等必需的文件，读者可以通过华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）下载使用或与电子工业出版社联系（E-mail: yangbo@pei.com.cn）。

● 本书主编

本书由湖南工业大学王兵担任主编，湖南工业大学凌云、长沙市雷锋学校夏军担任副主编，湖南工业大学肖伸平担任主审，湖南工业大学李燕林、黄云章、周维龙、株洲工贸技师学院彭志红、株洲电视台贺可恒、甘肃省岷县职业中专赵雅平等参与编写。由于时间仓促，作者水平有限，书中错漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

● 特别鸣谢

特别鸣谢湖南省人力资源和社会保障厅技能鉴定中心、湖南省职业技术培训研究室对本书编写工作的大力支持，并同时鸣谢湖南工业大学肖伸平、湖南铁道职业技术学院邓木生、湖南化工职业技术学院汤光华、张家界航空职业技术学院胡良君、衡阳技师学院尹南宁、湖南工业职业技术学院邱丽芳、湖南信息职业技术学院雷刚跃、湖南铁路科技职业技术学院陈应华、长沙民政职业技术学院邱俊、湖南安全技术职业学院罗水华等对本书进行了认真的审校及建议。

主 编

2012年8月

目 录

第 1 章 电子技术	1
1.1 运算放大器及应用	1
1.1.1 集成运算放大器的工作原理	1
1.1.2 基本运算电路	3
1.1.3 信号处理电路	6
1.1.4 集成运算放大器的使用常识	9
1.2 组合逻辑电路	10
1.2.1 集成逻辑门电路	10
1.2.2 集成逻辑门电路的应用	13
1.2.3 逻辑函数的化简	15
1.2.4 常用集成组合逻辑电路	20
1.3 时序逻辑电路	28
1.3.1 触发器	28
1.3.2 计数器	32
1.3.3 寄存器	38
1.4 脉冲电路	40
1.4.1 门电路组成的脉冲电路	40
1.4.2 555 定时器及其应用电路	41
1.5 数/模与模/数转换电路	44
1.5.1 D/A 转换器	45
1.5.2 A/D 转换器	47
第 2 章 电力电子技术	49
2.1 常用电力电子器件	49
2.1.1 电力二极管	49
2.1.2 晶闸管	50
2.1.3 门极可关断晶闸管 GTO	52
2.1.4 电力晶闸管	53

2.1.5	电力场效应晶体管	54
2.1.6	绝缘栅双极型晶体管	55
2.1.7	其他新型电力电子器件	57
2.2	晶闸管整流电路	58
2.2.1	单相可控整流电路	58
2.2.2	三相半波可控整流电路	59
2.2.3	三相全控桥式整流电路	62
2.2.4	集成触发电路	63
2.3	逆变电路	65
2.3.1	有源逆变电路	65
2.3.2	无源逆变电路	67
2.3.3	脉宽调制型逆变电路	69
第3章	特种电动机	72
3.1	单相异步电动机	72
3.1.1	单相异步电动机的工作原理	72
3.1.2	常用的单相电动机的类型	73
3.2	微型同步电动机	75
3.2.1	永磁式同步电动机	75
3.2.2	反应式同步电动机	76
3.2.3	磁滞式同步电动机	78
3.3	测速发电机	79
3.3.1	直流测速发电机	79
3.3.2	交流异步测速发电机	81
3.4	伺服电动机	83
3.4.1	直流伺服电动机	83
3.4.2	交流伺服电动机	86
3.5	自整角机	90
3.5.1	自整角机分类	90
3.5.2	自整角机结构与工作原理	90
3.5.3	自整角机选用	95
3.6	旋转变压器	95
3.7	步进电动机	98
3.7.1	步进电动机的工作原理	99
3.7.2	步进电动机的运行特性及指标	101
3.8	无刷直流电动机	103
3.8.1	无刷直流电动机工作原理	104
3.8.2	无刷直流电动机的机械特性及调节特性	105

3.9	直线电动机	106
第 4 章	传感检测技术	109
4.1	检测技术的基础	109
4.2	温度测量与热敏传感器	112
4.2.1	热电偶	112
4.2.2	热电阻	116
4.3	压力测量与压力传感器	117
4.3.1	电阻应变式压力传感器	117
4.3.2	薄膜应变传感器	119
4.3.3	电容式传感器	120
4.3.4	压电式传感器	121
4.4	位移与速度传感器	123
4.4.1	电感式传感器	123
4.4.2	感应同步器	125
4.4.3	光电码盘式传感器	126
4.4.4	磁电感应式传感器	127
4.4.5	接近传感器	129
4.5	流量检测	133
4.5.1	流量及其测量方法	133
4.5.2	几种速度式流量传感器	134
第 5 章	交直流调速技术	137
5.1	调速基础知识	137
5.2	晶闸管直流调速	139
5.2.1	单闭环直流调速系统	140
5.2.2	双闭环直流调速系统	145
5.3	直流脉宽调速系统	147
5.4	交流调速	150
5.4.1	交流调压调速	150
5.4.2	串级调速	153
5.4.3	变频调速	154
5.4.4	典型变频调速系统	159
5.4.5	通用变频器的使用	163
第 6 章	PLC 编程及应用	177
6.1	概述	177
6.2	FX2 系列 PLC	179

6.2.1	FX 系列可编程控制器简介	180
6.2.2	FX2 系列 PLC 基本指令及应用	184
6.2.3	FX2 系列 PLC 的编程应用	193
6.2.4	FX2 系列步进顺控指令及其编程应用	198
6.3	FX2 系列 PLC 常用功能指令	204
6.3.1	功能指令格式	204
6.3.2	常用功能指令	206
第 7 章	供配电技术	214
7.1	电力系统中性点的运行方式	214
7.2	高低压电气设备	219
7.2.1	电力变压器和互感器	219
7.2.2	常用高低压电器与装置	223
7.3	工厂供电系统的保护装置	225
7.3.1	常用的保护继电器及其接线和操作方式	225
7.3.2	高压电力线路的继电保护	227
7.3.3	电力变压器的继电保护	230
7.4	变配电所的自动装置	232
7.5	防雷、电气防火防爆	235
7.5.1	防雷技术	235
7.5.2	电气防火防爆	241
第 8 章	复杂设备电路故障检修	244
8.1	数控机床电气控制系统	244
8.1.1	数控机床电气控制概述	244
8.1.2	数控机床对运动坐标的控制	246
8.1.3	数控机床的 PLC 功能	248
8.1.4	数控机床的安全互锁	249
8.1.5	数控机床的典型控制环节	252
8.1.6	数控机床维修基础	258
8.1.7	数控机床维修方法	261
8.1.8	数控系统的故障诊断与维修	264
8.1.9	伺服系统的故障分析与维修	271
8.1.10	数控机床 PLC 的故障分析与维修	274
8.1.11	电源维护及故障诊断	275
8.2	B2012A 型龙门刨床	277
8.2.1	龙门刨床的控制特点	278
8.2.2	B2012A 型龙门刨床工作原理	278

第 9 章 液压系统	295
9.1 液压控制元件	295
9.2 液压传动系统应用实例	306
第 10 章 单片机应用技术	312
10.1 单片机系统结构与组成	312
10.1.1 80C51 系列单片机概述	312
10.1.2 80C51 单片机内部结构与外部引脚	313
10.1.3 80C51 的 CPU 组成	314
10.1.4 存储器	316
10.1.5 定时器/计数器	318
10.1.6 中断系统	319
10.1.7 串行口	320
10.2 MCS-51 指令	321
10.2.1 寻址方式	321
10.2.2 MCS-51 单片机指令分类介绍	322
10.3 单片机应用	329
10.3.1 汇编语言程序设计	329
10.3.2 显示器及键盘接口	332
10.3.3 D/A 转换与 A/D 转换	333
第 11 章 测绘	335
11.1 电子电路的测绘	335
11.2 继电控制电路测绘	337
第 12 章 电气设备修理工艺及培训指导	339
12.1 电气设备修理工艺及修理工艺编制方法	339
12.1.1 电气设备修理工艺	339
12.1.2 电气设备修理工艺的编制	341
12.2 培训指导	343
参考文献	345

图 1.1.1 集成运放芯片外形结构与引脚分配示意图

第1章 电子技术

教学目标

- 熟悉运算放大器的工作特性及基本运用。
- 掌握常用的数字逻辑电路的工作原理与应用。
- 掌握脉冲电路的工作原理及运用。
- 熟悉常用的 A/D 与 D/A 转换电路。

电子技术研究的对象是电子元器件和由电子元器件构成的各种基本功能电路，以及由某些基本功能电路所组成的有各种用途的装置或系统。电子技术按照其处理信号的不同，可分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。

模拟信号是随时间连续变化的信号，例如，速度、压力、温度、声音等信号。产生、传输和处理模拟信号的电路统称为模拟电子电路，简称模拟电路。

数字信号是时间和幅值都不连续的信号。产生、传输和处理数字信号的电路统称为数字电路。从整体来看，数字电路又可以分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两类。

1.1 运算放大器及应用

1.1.1 集成运算放大器的工作原理

1. 集成运算放大器件的识读

常见的集成运算放大器有圆形、扁平形、双列直插式等，有 8 引脚、14 引脚等。其外形和引脚分配如图 1.1.1 所示。

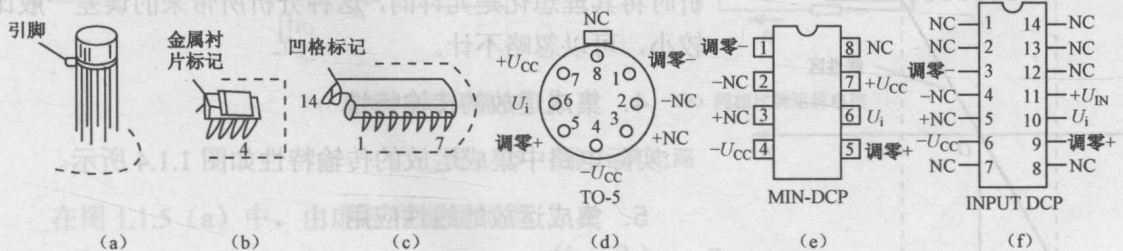


图 1.1.1 集成运算放大器外形结构与引脚分配示意图

2. 集成运算放大器的组成及符号

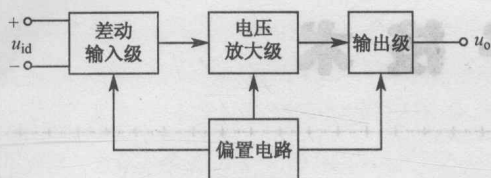


图 1.1.2 集成运算放大器内部组成原理框图

集成运算放大器内部实际上是一个高增益的直接耦合放大器，内部组成原理框图用图 1.1.2 表示，它由输入级、中间级、输出级和偏置电路四部分组成。

(1) 输入级

输入级是提高运算放大器质量的关键部分，要求其输入电阻高，为了能减小零点漂移和抑制共模干扰信号，输入级都采用具有恒流源的差动放大电路，又称差动输入级。

(2) 中间级

中间级的主要作用是提供足够大的电压放大倍数，故而又称电压放大级。要求中间级本身具有较高的电压增益。

(3) 输出级

输出级的主要作用是输出足够的电流以满足负载的需要，同时还需要有较低的输出电阻和较高的输入电阻，以起到将放大级和负载隔离的作用。

(4) 偏置电路

偏置电路的作用是为各级提供合适的工作电流，一般由各种恒流源电路组成。

集成运算放大器的符号如图 1.1.3 所示，其中 u_- 为反相输入端，即信号从该端输入时，输出信号与输入信号极性相反； u_+ 为同相输入端，即信号从该端输入时，输出信号与输入信号极性相同。



图 1.1.3 集成运放的符号

3. 理想集成运放的性能指标

理想集成运放的主要性能指标有以下几个方面。

- ① 开环电压放大倍数 $A_{ud} \rightarrow \infty$ ；
- ② 输入电阻 $r_{id} \rightarrow \infty$ ；
- ③ 输出电阻 $r_{od} \rightarrow 0$ 。

此外还有没有失调，没有失调温漂，共模抑制比趋于无穷大等。尽管理想运放并不存在，但由于集成运放的技术指标都比较接近理想值，在具体分析时将其理想化是允许的，这种分析所带来的误差一般比较小，可以忽略不计。

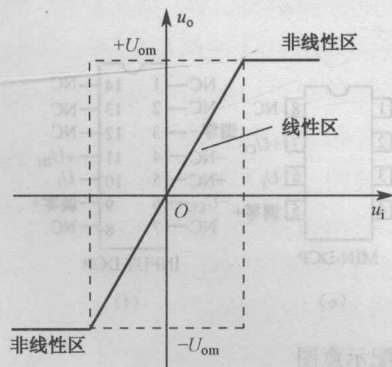


图 1.1.4 集成运放的传输特性

4. 集成运放的传输特性

实际电路中集成运放的传输特性如图 1.1.4 所示。

5. 集成运放的线性应用

集成运放工作在线性区的必要条件是引入深度负反馈。当集成运放工作在线性区时，输出电压在有限值之间变化，而集成运放的 $A_{ud} \rightarrow \infty$ ，则

$$u_{id} = u_{od} / A_{ud} \approx 0$$

由 $u_{id} = u_+ - u_-$,

得

$$u_+ \approx u_- \quad (1.1.1)$$

式 (1.1.1) 说明, 同相端和反相端电压几乎相等, 所以称为虚假短路, 简称“虚短”。由集成运放的输入电阻 $r_{id} \rightarrow \infty$, 得

$$i_+ = i_- \approx 0 \quad (1.1.2)$$

式 (1.1.2) 说明, 流入集成运放同相端和反相端的电流几乎为零, 所以称为虚假断路, 简称“虚断”。

6. 集成运放的非线性应用

当集成运放工作在开环状态或外接正反馈时, 由于集成运放的 A_{ud} 很大, 只要有微小的电压信号输入, 集成运放就一定工作在非线性区。其特点是, 输出电压只有两种状态, 不是正饱和电压 $+U_{om}$, 就是负饱和电压 $-U_{om}$ 。

① 当同相端电压大于反相端电压, 即 $u_+ > u_-$ 时, $u_o = +U_{om}$;

② 当反相端电压大于同相端电压, 即 $u_+ < u_-$ 时, $u_o = -U_{om}$ 。

综上所述, 在分析具体的集成运放应用电路时, 首先判断集成运放工作在线性区还是非线性区, 再运用线性区和非线性区的特点分析电路的工作原理。当在集成运放中引入负反馈时, 一般都工作在线性区。

1.1.2 基本运算电路

常见的基本运算电路有比例运算、加法、减法、微积分和乘法运算等。

1. 比例运算电路

比例运算电路分为反相比例运算电路和同相比例运算电路两种。图 1.1.5 (a) 所示为反相输入比例运算电路; 图 1.1.5 (b) 所示为同相比例运算电路。

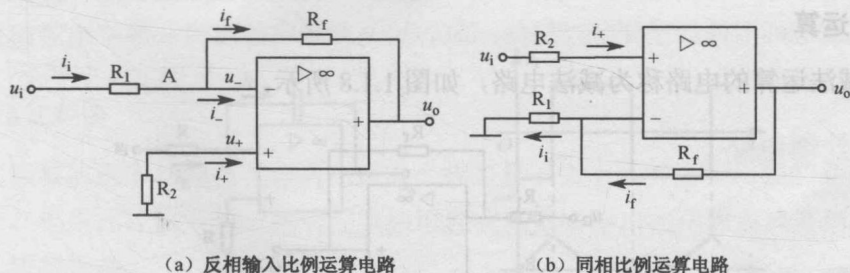


图 1.1.5 比例运算电路

在图 1.1.5 (a) 中, 由虚断和虚短可得

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-(i_f \times R_f)}{i_i \times R_1} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1.1.3)$$

平衡电阻 $R_2 = R_1 // R_f$ 。

当 $R_1 = R_f = R$ 时, $u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_i = -u_i$, 输入电压与输出电压大小相等, 相位相反, 称为反相器。在图 1.1.5 (b) 中

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (1.1.4)$$

当 $R_f = 0$ 或 $R_1 \rightarrow \infty$ 时, 如图 1.1.6 所示, $u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})u_i = u_i$, 即输出电压与输入电压大小相等, 相位相同, 该电路称为电压跟随器。

2. 加法运算电路

能实现加法运算的电路称为加法电路, 如图 1.1.7 所示。在图 1.1.7 所示电路中, 由叠加定理可得

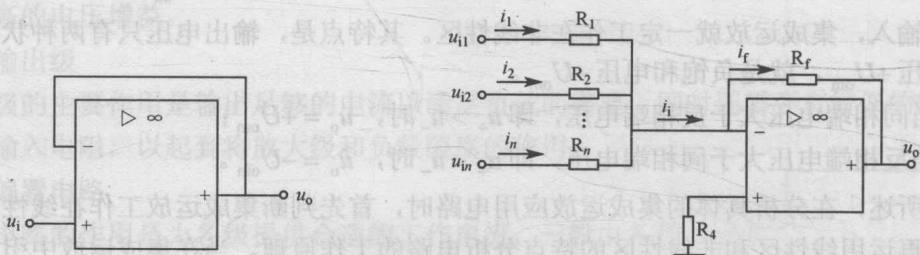


图 1.1.6 电压跟随器

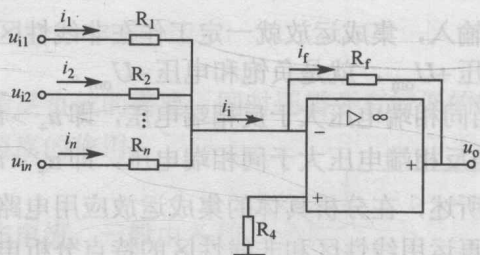


图 1.1.7 加法电路

$$\begin{aligned} u_o &= -\left(R_f \times \frac{u_{i1}}{R_1}\right) + \left(-R_f \times \frac{u_{i2}}{R_2}\right) + \cdots + \left(-R_f \times \frac{u_{in}}{R_n}\right) \\ &= -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} + \cdots + \frac{u_{in}}{R_n}\right) \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

式 (1.1.5) 实现了各信号按比例进行加法运算。如取 $R_1 = R_2 = \cdots = R_n = R_f$, 则 $u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + \cdots + u_{in})$, 实现了各输入信号的反相加加。

3. 减法运算

能实现减法运算的电路称为减法电路, 如图 1.1.8 所示。

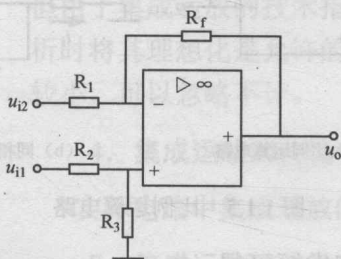


图 1.1.8 减法电路

在图 1.1.8 所示电路中, 由叠加定理可得