


测控技术系列丛书

测控电路及装置

孙传友 孙晓斌 编著
李胜玉 张 一

 北京航空航天大学出版社
<http://www.buaapress.com.cn>

测控电路及装置

孙传友 孙晓斌 李胜玉 张 一 编著

北京航空航天大学出版社

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

内 容 简 介

《测控电路及装置》是为适应高等学校教学内容与课程体系改革的需要,将原有的《测控电路》、《控制电机》和《显示仪表》等课程的主要内容有机地整合成一门专业基础课程而编写的新教材。其目的是为学生学习和掌握各类测控系统打下完整而扎实的硬件基础。

全书共分八章。内容包括:模拟信号调理电路,数据采集电路,常用控制器件,控制电机,模拟量控制电路,开关量控制电路,显示、记录与报警装置和可编程控制器。每一章都附有习题与思考题。

本书可作为测控技术与仪器、自动化、机械设计制造及其自动化等专业的教材或教学参考书,也可供测控领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测控电路及装置/孙传友等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2002.5

ISBN 7-81077-121-3

I. 测… II. 孙… III. 控制电路 IV. TN27

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第075786号

测 控 电 路 及 装 置

孙传友 孙晓斌
李胜玉 张 一 编著
责任编辑 金友泉

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

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

E-mail: pressell@pubfca.bj.cninfo.net

北京密云华都印刷厂印装 各地书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:499千字

2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷 印数:5000册

ISBN 7-81077-121-3/TN·002 定价:26.50元

前 言

1998年教育部颁布的新的本科专业目录把原专业目录中仪器仪表类的九个专业合并为一个宽口径专业——测控技术与仪器专业,其理由是“本专业包含原专业目录中的各专业,其理论基础和技术基础相同,实质都属于测量控制技术”。新专业目录要求在业务上培养学生“具有本专业测控技术及仪器系统的应用及设计开发能力”(引自教育部有关文件)。

测控技术包括硬件和软件两方面。从“硬件”方面来看,如果把各类仪器仪表和测控系统“化整为零”地解剖开来,会发现它们的内部组成模块大多是相同的。从“软件”方面来看,如果把各个模块“化零为整”地组装起来,会发现它们的整机原理、总体设计思想以及主要的算法和程序也是大体相近的。这就是说,不同应用领域常见的测控仪器或系统,虽然名称、型号、性能各不相同,但它们在硬件、软件两方面的共性还是主要的。它们的共同的理论基础和技术基础实质就是测控技术。各种不同的仪器仪表产品只不过是“共同基础”(即测控技术)与各应用领域的“特殊要求”相结合的产物。因此,只要掌握了通用的测控技术,今后遇到具体的仪器仪表时,再了解一下该仪器仪表应用领域的特殊要求和某些专用电路,就能很快适应所从事仪器仪表或测控系统的具体工作。

正是基于上面这种共识,我们江汉石油学院、西安石油学院、抚顺石油学院和包头钢铁学院长期从事测控技术与仪器专业教学的老师联合编写了《测控电路及装置》和《测控系统原理与设计》两本关于测控技术的系列新教材。前一本教材主要讲授先修技术基础课没有讲授过的各类测控仪器和系统常用的电路模块及装置(包括测控电路、控制电机、显示记录报警装置)。目的是为了加强和拓宽学生的硬件基础。后一本教材主要讲授各类常见的测控仪器及系统的整机原理和总体设计思想、测控算法和程序设计、抗干扰技术、虚拟仪器与测控网络。旨在培养学生综合运用所学知识进行测控系统设计开发的能力。我们希望,这两本新教材的出版,能对测控技术与仪器专业的教学内容和课程体系改革起到抛砖引玉的作用。

《测控电路及装置》全书共分八章:模拟信号调理电路、数据采集电路、常用控制器件、控制电机、模拟量控制电路、开关量控制电路、显示、记录与报警装置、可编程控制器。每一章都附有习题与思考题。

本课程的先修课为:模拟电路、数字电路、感测技术、微机原理。为了避免与先修课的重复,有些电路虽然也是测控仪器和系统常用的,但由于先修课已讲过,因此,在本课程中就被删略了。本课程介绍的电路模块,只注重它们的外部特性和应用,而不强调其内部电路的分析和计算。可以说本课程是先修课程的补充、深化和提高。

全书计划学时为64学时,删去部分章节也适用于48~56学时。本书可作为测控技术与仪器、自动化、机械设计制造及其自动化等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书第五章由李胜玉撰写,第六章由张一撰写,其余章节由孙传友和孙晓斌撰写。全书由孙传友主编。徐爱钧教授审阅了全书,并提出了宝贵的意见。在此,我们谨向徐爱钧教授、北京航空航天大学出版社及参考文献各位作者表示诚挚的谢意,同时也衷心感谢四校有关领导对我们的大力支持。由于我们水平有限,缺点和错误在所难免,恳请各位读者批评指正。

编著者
2002年3月

目 录

绪 论

- 0.1 测控电路的功用..... 1
- 0.2 测控电路的类型和组成..... 2
- 0.3 本课程的内容和性质..... 3

第一章 模拟信号调理电路

- 1.1 放大电路..... 4
 - 1.1.1 比例放大器..... 4
 - 1.1.2 电桥放大器..... 6
 - 1.1.3 测量放大器..... 7
 - 1.1.4 低漂移放大器 11
 - 1.1.5 隔离放大器 13
 - 1.1.6 数控增益放大器 17
- 1.2 滤波电路 20
 - 1.2.1 滤波器的分类 20
 - 1.2.2 二阶有源 RC 滤波器 24
 - 1.2.3 高阶有源 RC 滤波器 27
 - 1.2.4 数控滤波器 30
 - 1.2.5 压控滤波器 36
- 1.3 模拟运算电路 37
 - 1.3.1 模拟乘法器 38
 - 1.3.2 常用特征值运算电路 43
 - 1.3.3 函数和反函数运算电路 ... 47
- 1.4 非线性校正电路 50
 - 1.4.1 开环式非线性校正 51
 - 1.4.2 闭环式非线性校正 52
 - 1.4.3 单臂电桥的非线性校正 ... 54
- 1.5 调制与解调 55
 - 1.5.1 调制和解调的基本概念 ... 55
 - 1.5.2 调幅及其解调 56
 - 1.5.3 调相及其解调 65
 - 1.5.4 调频及其解调 67
 - 1.5.5 脉冲调制及其解调 71
- 1.6 信号变换电路 72
 - 1.6.1 电压与电流的相互转换 ... 72

- 1.6.2 电压与频率的相互转换 ... 79
- 1.6.3 比较器和整形器 84
- 习题与思考题..... 92

第二章 数据采集电路

- 2.1 模拟开关 93
 - 2.1.1 模拟开关的类型和性能 ... 93
 - 2.1.2 常用电子模拟开关器件 ... 94
 - 2.1.3 模拟多路开关 99
- 2.2 采样/保持器 100
 - 2.2.1 采样/保持器的等效电路 100
 - 2.2.2 采样/保持器的基本类型 101
- 2.3 数/模转换器 103
 - 2.3.1 线性并行直接 DAC 103
 - 2.3.2 集成 DAC 105
 - 2.3.3 数/模转换器的输出接法 108
 - 2.3.4 数/模转换器的应用举例 111
- 2.4 模/数转换器 114
 - 2.4.1 常用的集成模/数转换器 114
 - 2.4.2 模/数转换器的输入接法 120
 - 2.4.3 新型($\Sigma-\Delta$)模/数转换器 122
- 2.5 模拟/浮点数转换电路 126
 - 2.5.1 模拟/浮点数转换的必要性 126
 - 2.5.2 模拟/浮点数转换的电路原理..... 128
- 习题与思考题 133

第三章 常用控制器件

3.1 继电器和接触器..... 134

3.1.1 电流继电器和电压继电器
..... 134

3.1.2 中间继电器和时间继电器
..... 135

3.1.3 热继电器..... 135

3.1.4 干簧继电器..... 136

3.1.5 接触器..... 137

3.2 电磁阀..... 137

3.3 电力电子器件..... 138

3.3.1 普通晶闸管(单向可控硅)
..... 138

3.3.2 双向晶闸管(双向可控硅)
..... 141

3.3.3 单结晶体管及触发电路
..... 143

3.3.4 全控型器件..... 147

3.4 固态继电器..... 153

3.4.1 交直流固态继电器..... 153

3.4.2 参数固态继电器..... 155

3.5 传感开关..... 157

3.5.1 行程开关..... 157

3.5.2 冲击开关..... 158

3.5.3 水银开关..... 160

3.5.4 温控开关..... 161

习题与思考题 163

第四章 控制电机

4.1 步进电动机..... 164

4.1.1 工作原理..... 164

4.1.2 类型及结构..... 166

4.1.3 主要特性..... 168

4.2 直流伺服电动机..... 171

4.2.1 工作原理..... 171

4.2.2 主要特性..... 173

4.2.3 工作状态..... 177

4.3 交流异步电动机和交流伺服电

动机..... 178

4.3.1 交流异步电动机..... 178

4.3.2 交流伺服电动机..... 184

4.4 小功率同步电动机..... 187

4.4.1 永磁式同步电动机..... 187

4.4.2 磁阻式电磁减速同步电
动机..... 189

4.5 测速发电机..... 190

4.5.1 交流测速发电机..... 190

4.5.2 直流测速发电机..... 191

4.6 自整角机..... 192

4.6.1 控制式自整角机..... 193

4.6.2 力矩式自整角机..... 195

习题与思考题 196

第五章 模拟量控制电路

5.1 导电角控制..... 197

5.1.1 可控整流电路..... 197

5.1.2 逆变器的基本概念..... 200

5.1.3 三相逆变器..... 203

5.2 脉宽调制(PWM)控制电路 ... 208

5.2.1 脉宽调制控制电路的基本
原理..... 208

5.2.2 常用触发脉宽调制方法
..... 213

5.2.3 PWM 功率转换电路 214

5.2.4 开关电源..... 218

5.3 变频控制电路..... 220

5.3.1 变频调速的基本原理与
分类..... 220

5.3.2 变频调速的控制方式和
特性..... 221

5.3.3 交流—交流变频器..... 222

5.3.4 交流—直流—交流变频器
..... 223

5.4 程控电源..... 229

5.4.1 程控相控型电源..... 229

5.4.2 程控直流稳定电源..... 230

习题与思考题 231

第六章 开关量控制电路

6.1 功率开关驱动电路·····	232
6.1.1 直流电源负载功率驱动电 路·····	232
6.1.2 交流电源负载功率驱动电 路·····	234
6.2 继电器和电磁阀驱动电路·····	239
6.3 步进电动机驱动电路·····	240
习题与思考题·····	244

第七章 显示、记录与报警装置

7.1 模拟显示装置·····	245
7.1.1 示波器显示·····	245
7.1.2 指针式显示·····	252
7.2 模拟记录装置·····	255
7.2.1 磁电系笔式模拟记录仪 ·····	256
7.2.2 磁电系感光式模拟记录仪 (光线示波器)·····	258
7.2.3 自动平衡式显示与记录仪 表·····	259
7.2.4 模拟磁带记录仪·····	263
7.3 数字显示装置·····	266
7.3.1 LED 显示器·····	266

7.3.2 LCD 显示器·····	269
7.3.3 DVM 显示器·····	271
7.3.4 CRT 显示器·····	273
7.4 数字记录装置·····	276
7.4.1 数字磁记录的记录方式 ·····	276
7.4.2 磁盘存储器简介·····	278
7.4.3 磁带存储器简介·····	280
7.4.4 光盘存储器简介·····	281
7.5 声光报警装置·····	283
7.5.1 报警用声光器件·····	284
7.5.2 声光报警集成组件·····	284
习题与思考题·····	286

第八章 可编程控制器

8.1 PC 的特点与功能·····	287
8.2 PC 的组成和工作原理·····	288
8.2.1 PC 的组成·····	288
8.2.2 PC 的基本工作原理·····	291
8.3 PC 的编程方法·····	294
8.3.1 程序表达方式·····	294
8.3.2 PC 指令及编程方法·····	294
习题与思考题·····	300

绪 论

0.1 测控电路的功用

“测量”和“控制”是人类认识世界和改造世界的两个必不可少的重要手段。“测量”(或检测)是人们借助于专门的设备,通过实验的方法,对某一客观事物取得数量信息的过程。发明元素周期表的门捷列夫说过:“有测量才有科学”。任何一项科学研究都离不开相应的有效的测量和实验手段。

现代生产为了保证产品质量和提高生产效益,就必须对生产过程进行严格控制;而要实现这种控制,首先就必须对生产过程的各种参数和状态进行适时有效的检测。因此,检测是控制的基础,控制离不开检测。在现代生活中,家用电器和自动化办公设备大都既包含检测也包含控制;在航空、航天和军事国防中,测量和控制更是密不可分。

在科研和生产实践中,被测量或被控制的量一般可以分为电量与非电量两大类,而非电量的种类比电量的种类多得多。

图 0-1 是现代测控领域中比较常见的一种典型的微机化非电量测控系统简化框图。由图可见,测控对象的被测非电量,通过传感器转换为电量,测量电路对它进行信号调理和数据采集,由此得到的测试数据送入单片微机进行处理,处理后得到的控制数据送到控制电路产生相应的控制信号去控制执行器的动作。执行器的作用与传感器相反,是将控制电路的电信号转变为各种控制动作,以实现对被控对象的控制。另一方面,微机系统也将被测量的检测结果,送往显示器显示出来或送往记录器记录下来,供操作人员现场监视和分析。当检测结果异常时,微机还可启动报警器报警。

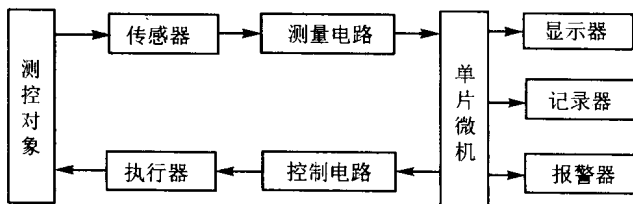


图 0-1 典型的测控系统简化框图

在整个测控系统中,单片微机不仅对测试数据进行必要的适时的处理,而且还对整个测量和控制的全过程进行有效的程序控制。因此,单片微机是整个测控系统的中心。

由图可见,测控对象与微型计算机之间是通过测量电路和控制电路相联系的。如果说单片微机是信息处理中心的话,那么,测量电路则是信息输入通道,控制电路则是信息输出通道。图中右侧的显示器、记录器和报警器则属于单片微机为操作人员提供的信息监视通道,或者简称人一机联系通道。图中的各个箭头代表了测控系统中“信息流”的流向。

测量电路与控制电路统称测控电路。它们是测控系统实现测量与控制功能的基本电路,在整个测控系统中起着十分关键的作用。测控系统的性能在很大程度上取决于测控电路。

目前仍广泛使用的一些较为简单的测量仪表和控制仪表内部,并不包含有微型计算机。这些非微机化的测量仪表和控制仪表,其内部的核心电路主要就是各种测量电路和控制电路。

0.2 测控电路的类型和组成

1. 测量电路的类型和组成

按照测量结果的表示形式来分,测量电路可分为模拟测量电路和数字测量电路两大类,其基本组成分别如图 0-2(a),(b)所示。

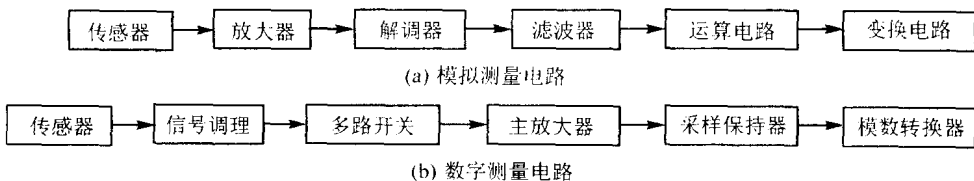


图 0-2 测量电路的类型和基本组成

图中传感器将被测非电量转换为电信号,被测信号一般比较微弱,通常需要先进行放大。有的传感器(如电感式,电容式和交流应变电桥等)输出的是调制过的模拟信号,因此,还需用解调器解调。被测信号中混杂有各种干扰,常常要用滤波器来滤除。有些被测参数比较复杂,往往要进行必要的运算,才能获取被测量。为了便于远距离传送、显示或 A/D 转换,常常需要将电压、电流、频率三种形式的模拟电信号进行相互变换。在图 0-2(a)所示通道中,被测信号一直是以模拟形式存在和传送的,通道中各个环节都是对模拟信号进行这样或那样的调理。因此,统称为信号调理电路。常规的模拟测量仪表,因为其测量结果是以模拟形式显示,所以,其测量电路(称为模拟测量电路)主要就是图 0-2(a)所示的调理电路。

但是,一些数字化测试仪表特别是微机化测控系统,因为测试结果要用数字形式显示,测试结果要用微机进行处理,所以,其测量电路除了对被测模拟信号进行必要的调理外,还要将模拟信号转换成便于数字显示或微机处理的数字信号。实现模拟信号数字化的电路称为数据采集电路。因此,数字测量电路一般由传感器、信号调理电路和数据采集电路三部分组成,如图 0-2(b)所示。图(b)中构成数据采集电路的多路开关用来对多路模拟信号进行采样;主放大器对采样得到的信号子样进行程控增益放大或瞬时浮点放大,采样保持器对放大后的子样进行保持;模数转换器在保持期间将保持的子样电压转换成相应的数据。如果被测信号的幅度变化范围不大的话,图(b)中主放大器可省去。对比图 0-2(a)和 0-2(b)可见,数字测量电路与模拟测量电路的区别就在于数字测量电路中包含有数据采集电路。

2. 控制电路的类型和组成

在微机化测控系统中,按照输出到被控设备的控制信号的形式,控制电路可分为模拟量控制电路和开关量控制电路两大类。模拟量控制是控制输出信号(电压、电流)的幅度,使被控设备在零到满负荷之间运行。而开关量控制则是通过控制设备处于“开”或“关”状态的时间达到运行控制的目的。

在微机化测控系统中,模拟量控制电路和开关量控制电路的基本组成分别如图 0-3(a),(b)所示。图(a)中,微机输出的数字量是代表输出量大小的一组二进制数码,经数模转换变为

模拟控制电压。而图(b)中微机“输出”的只是代表“开”或“关”的一位数码“1”或“0”。由于驱动被控设备,不仅需要一定的电压而且需要一定的电流。因此,在控制电路输出端都设置有能满足驱动功率要求的直流功放驱动电路或功率开关驱动电路。由于控制对象多为大功率的电气(强电)设备,容易产生各种干扰。所以,控制电路中大多采用光电耦合器进行输入、输出信号的隔离。

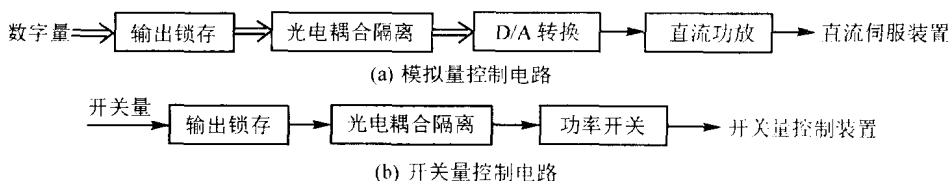


图 0-3 控制电路的类型与基本组成

0.3 本课程的内容和性质

本课程是测控技术与仪器专业的一门专业基础课。顾名思义,测控仪器是以测量和控制为目的的电子仪器。测控仪器的种类很多,用途很广。不同应用领域使用的测控仪器的名称、型号和性能都各不相同,都具有各自不同的特性——个性。但是这些不同领域的测控仪器,其内部组成电路和模块都是基本相同的;将各个模块组装成整机的基本原理也是大体相似的,这就是它们的两大共同点——共性。而且其共性与个性相比,共性是主要的,也就是说,不同应用领域的测控仪器只是“大同小异”罢了!我们没有那么多时间也没有必要去逐个学习不同应用领域的具体的测控仪器,只要抓住它们的共性,学习各类测控仪器通用的电路模块和整机原理,努力掌握各类测控仪器共同的理论基础和核心技术,就能增强对各类测控仪器的适应性,以不变应万变。

一般说来,各类微机化测控仪器基本上都是由图 0-1 所示的几大部分电路组成,只不过不同的测控仪器,性能指标有所不同,使用的元器件或电路结构可能有些不同罢了。因此,如果要掌握各类测控仪器通用的电路或模块,就必须学习和掌握图 0-1 所示各部分的组成电路或模块。对于图 0-1 中的单片微机和传感器这两部分在先修的微机原理和感测技术课中已学习过了,但是图 0-1 中其余的几个部分,在先修的电子技术等课程中大多没有学习过,而这些没有学习过的模块或部件,恰恰是测控仪器中必不可少的重要组成部分。因此,完全有必要专门开设一门《测控电路及装置》课程来讲述这些内容,以填补先修技术基础课与后续专业课之间的鸿沟,或者说在两者之间架起一道桥梁,为今后学习和掌握各类测控仪器打下完整而扎实的硬件基础。

《测控电路及装置》课程的内容除重点介绍图 0-1 中的测量电路和控制电路外,还讲述了图 0-1 中的显示、记录、报警装置和常用控制器件、控制电机及可编程控制器,也就是说课程内容包括了图 0-1 中除单片微机和传感器以外的各个部分。因此,这门课程实际上是整个测控仪器的“硬件基础”。为了避免重复,有些电路或模块虽然也是测控仪器常用的,但先修课程已学习过,在《测控电路及装置》课程中就被删略了。本课程介绍的电路模块,只注重它们的外部特性和应用,而不强调其内部电路的分析和计算。可以说,《测控电路及装置》课程是先修技术基础课的补充、深化和提高。

第一章 模拟信号调理电路

1.1 放大电路

1.1.1 比例放大器

比例放大器分反相比例、同相比例和差动比例放大器三种。

一、反相比例放大器

简单的反相比例放大器如图 1-1-1 所示。在理想运放情况下,其主要运算公式可归纳如下:

$$\text{闭环电压增益} \quad A_f = R_f / R_i \quad (1-1-1)$$

$$\text{输入电阻} \quad R_i = R_i \quad (1-1-2)$$

$$\text{输出电阻} \quad R_o = 0 \quad (1-1-3)$$

$$\text{闭环带宽} \quad f_{cp} = f_{op} \cdot A_o \cdot \frac{R_f}{R_i} \quad (1-1-4)$$

$$\text{最佳反馈电阻} \quad R_f = \sqrt{\frac{R_i R_o (1 + A_f)}{2}} \quad (1-1-5)$$

$$\text{平衡电阻} \quad R_p = R_i // R_f \quad (1-1-6)$$

式中, A_o 、 f_{op} 、 R_i 、 R_o 分别为运放本身的开环直流增益、开环带宽、差模输入电阻和输出电阻。

图 1-1-2 是在图 1-1-1 基础上附加一个辅助放大器 A' , 用它提供的补偿电流去减小主放大器 A 从信号源吸取的电流, 以便大幅度提高主放大器的等效输入阻抗 R_i 。

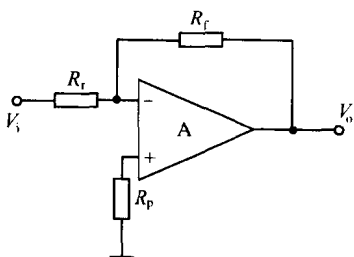


图 1-1-1 简单的反相比例放大器

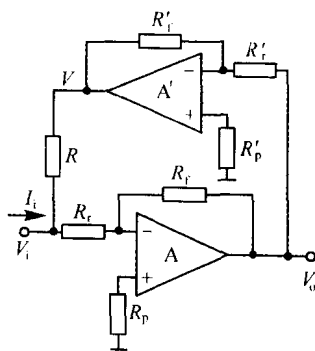


图 1-1-2 高输入阻抗反相放大器

在 $R'_f = R_f$, $R'_i = 2R_i$ 情况下, 有:

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_f R}{R - R_f} \quad (1-1-7)$$

上式表明:只要 R 稍大于 R_f , 就能获得很高的输入阻抗, 但 R 绝对不能小于 R_f , 否则输入阻抗为负值, 这意味着产生严重自激。

二、同相比例放大器

同相比例放大器电路如图 1-1-3 所示, 在理想运放情况下, 其主要电路运算可归纳如下:

$$\text{闭环增益} \quad A_f = 1 + \frac{R_f}{R} \quad (1-1-8)$$

$$\text{输入电阻} \quad R_i = \infty \quad (1-1-9)$$

$$\text{输出电阻} \quad R_o = 0 \quad (1-1-10)$$

$$\text{闭环带宽} \quad f_{cp} = f_{op} \cdot A_o / \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \quad (1-1-11)$$

$$\text{最佳反馈电阻} \quad R_f = \sqrt{\frac{R_i R_o}{2}} \cdot A_f \quad (1-1-12)$$

$$\text{平衡电阻} \quad R_p = R_f // R_r \quad (1-1-13)$$

式中, A_o 、 f_{op} 、 R_i 和 R_o 分别为运算放大器本身的开环直流增益、开环带宽、差模输入电阻和输出电阻。

三、差动比例放大器

简单的差动比例放大器如图 1-1-4(a) 所示。图中 $R_1 = R_3 = R_r$, $R_2 = R_4 = R_f$, 由理想运放特性可知:

$$\text{差模增益} \quad A_f = \frac{V_o}{V_{i2} - V_{i1}} = \frac{R_f}{R_r} \quad (1-1-14)$$

$$\text{差模输入阻抗} \quad Z_{id} = 2R_r \quad (1-1-15)$$

$$\text{共模输入阻抗} \quad Z_{ic} = \frac{1}{2}(R_f + R_r) \quad (1-1-16)$$

$$\text{共模抑制比} \quad \text{CMRR} = \frac{\text{CMRR}_R \times \text{CMRR}_{op}}{\text{CMRR}_R + \text{CMRR}_{op}} \quad (1-1-17)$$

式中, CMRR_{op} 为运放本身有限的共模抑制比, 而 CMRR_R 为:

$$\text{CMRR}_R = \frac{(1 + A_f)}{4\Delta} \quad (1-1-18)$$

Δ 为电阻 $R_1 \sim R_4$ 的公(误)差, 电阻实际值为:

$$R_1 = R_3 = R_r(1 \pm \Delta)$$

$$R_2 = R_4 = R_f(1 \pm \Delta)$$

增益可调的差动比例放大器电路如图 1-1-4(b) 所示, 该电路差模增益为:

$$A_f = 2 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_p}\right)$$

因此, 只要改变 R_p 就可改变电路增益, 且不破坏原有的共模抑制比。但由于 R_p 与增益之间呈非线性函数关系, 所以, 仅用于调整范围小于 10% 的场合。

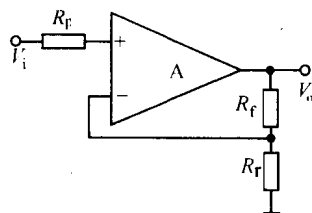


图 1-1-3 同相比例放大器

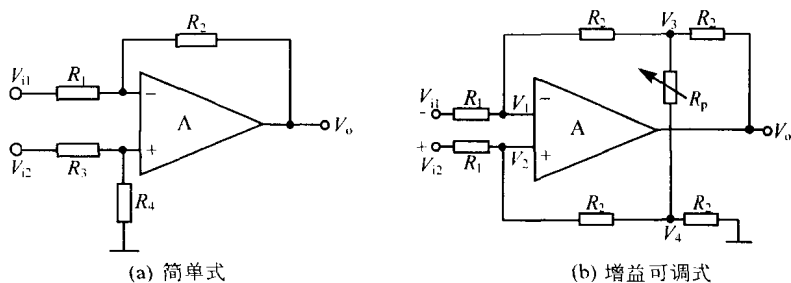


图 1-1-4 差动比例放大器

1.1.2 电桥放大器

许多传感器都是通过电桥的连接方式,将被测非电量转换成电压或电流信号,并用放大器做进一步放大。所以,电桥放大器是非电量测试系统中常见的一种放大电路。

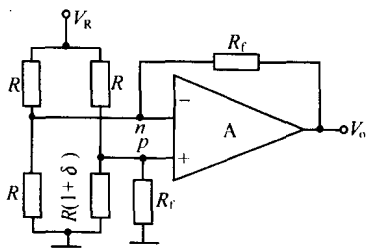


图 1-1-5 电桥电源接地式电桥放大器

当 $\delta \ll 2$ 时,有:

$$V_o \approx \frac{V_R}{2} \cdot \frac{R_f}{R} \cdot \delta \quad (1-1-20)$$

可见,此时输出电压 V_o 与相对变量 δ 成正比。这个电路的缺点是灵敏度与桥臂电阻 R 有关。因此,要求运放共模抑制比高,否则共模输入电压 $\frac{V_R}{2}$ 引起的输出误差为 $\Delta V_o = \frac{V_R}{2} \cdot \frac{1}{\text{CMRR}}$;还要求运放失调小,否则因运放失调引起的输出偏差为 $\Delta V'_o = \frac{2R_f + R}{R} V_{os} + R_f I_{os}$ 。式中, V_{os} , I_{os} 分别为运放的输入失调电压和输入失调电流。

二、电桥电源浮地式

为使灵敏度不受桥臂电阻的影响,可改为电桥电源浮地式,如图 1-1-6 所示。

在图 1-1-6 中,电桥输出电压 V_{AB} 在 V_R 浮地时为:

$$V_{AB} = \frac{V_R \cdot R(1+\delta)}{R+R(1+\delta)} - \frac{V_R \cdot R}{2R} = \frac{V_R \cdot \delta}{2(2+\delta)}$$

$$\text{当 } \delta \ll 2 \text{ 时: } V_{AB} = \frac{V_R}{4} \cdot \delta$$

在图 1-1-6(a) 中有:

$$V_A = V_{AB} = \frac{V_R}{4} \cdot \delta = V_o \cdot \frac{R_f}{R_f + R_1}$$

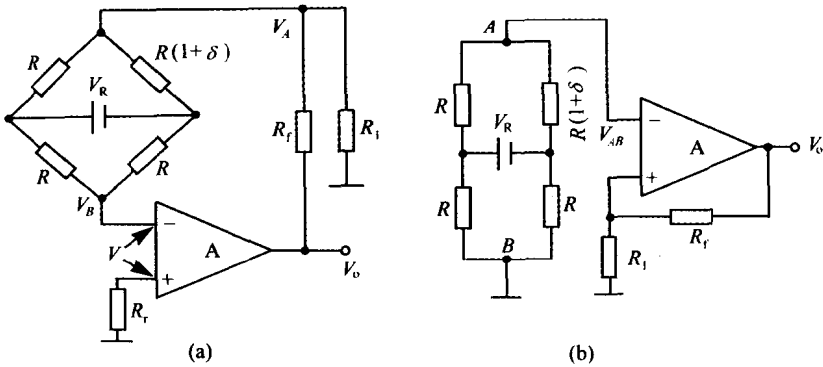


图 1-1-6 电桥电源浮地式电桥放大器

解之得：

$$V_o = \frac{V_R}{4} \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \cdot \delta \quad (1-1-21)$$

很显然上式对图 1-1-6(b)也是适用的。由此可见，输出电压与电桥电阻 R 无关，灵敏度不再受 R 的影响。

由式(1-1-20)与(1-1-21)可见，电桥放大器实质上是一种电阻—电压转换器。

1.1.3 测量放大器

测量放大器也称仪用放大器。了解测量放大器和集成测量放大器的结构、特性和应用对设计测控电路很重要。

一、电路结构与特性

三运放结构的测量放大器由两级组成，两个对称的同相放大器 A_1 、 A_2 构成第一级，差动放大器 A_3 构成第二级，如图 1-1-7 所示。为提高电路的抗共模干扰能力和抑制漂移的影响，应使电路上下对称，即取 $R_1 = R_2$ ， $R_4 = R_6$ ， $R_5 = R_7$ 。若 A_1 、 A_2 和 A_3 都是理想运放，则 $V_1 = V_4$ ， $V_2 = V_5$ ，故有：

$$V_3 = V_1 + \frac{V_1 - V_2}{R_G} \cdot R_1$$

$$V_6 = V_2 - \frac{V_1 - V_2}{R_G} \cdot R_2$$

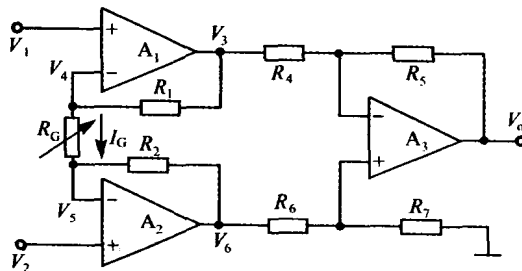


图 1-1-7 三运放结构的测量放大器

由上两式可得：

$$\frac{1}{2}(V_3 + V_6) = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (1-1-22)$$

$$A_{\text{fl}} = \frac{V_3 - V_6}{V_1 - V_2} = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G} = 1 + \frac{2R_1}{R_G} \quad (1-1-23)$$

由上式和式(1-1-14)可得整个放大器的闭环放大倍数为：

$$A_f = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = - \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) \cdot \frac{R_5}{R_4} \quad (1-1-24)$$

整个放大器的共模抑制比为：

$$\text{CMRR} = \frac{A_{\text{fl}} \text{CMRR}_2 \cdot \text{CMRR}_1}{A_{\text{fl}} \text{CMRR}_2 + \text{CMRR}_1} \quad (1-1-25)$$

式中, CMRR_2 为第二级的共模抑制比, 由式(1-1-17)决定; CMRR_1 为第一级的共模抑制比, 由运放 A_1 和 A_2 的共模抑制比 CMRR_1 和 CMRR_2 决定：

$$\text{CMRR}_1 = \frac{\text{CMRR}_1 \cdot \text{CMRR}_2}{|\text{CMRR}_1 - \text{CMRR}_2|} \quad (1-1-26)$$

当 $\text{CMRR}_1 \gg A_{\text{fl}} \cdot \text{CMRR}_2$ 时, 式(1-1-25)简化为：

$$\text{CMRR} \approx A_{\text{fl}} \cdot \text{CMRR}_2 \quad (1-1-27)$$

由上式可见, 图 1-1-7 所示测量放大器比图 1-1-4 所示差动比例放大器的共模抑制比提高 A_{fl} 倍。因此, 一般测量放大器都取第二级增益 $A_{f2} = 1$, 使第一级增益 A_{fl} 为整个放大器增益 A_f 。

此外, 由式(1-1-15)可见, 差动放大器的输入电阻为 $2R_i$, 如果为提高输入电阻而增大 R_i 的话, 那么由式(1-1-14)可知, 应保证具有一定增益就需相应增大 R_i 值, 这将增大了差动放大器的输出失调电压 ΔV_o ：

$$\Delta V_o = \pm \frac{V_{i0}(R_i + R_f)}{R_i} \pm I_{i0} \cdot R_i \quad (1-1-28)$$

式中, V_{i0} 、 I_{i0} 分别为运放的输入失调电压和输入失调电流。

因此, 差动比例放大器要提高输入电阻比较困难, 而图 1-1-7 电路由于运放输入电流接近于零, 故差模输入电阻近乎无穷大。

二、测量放大器集成电路

美国 Analog Devices 公司生产的 AD612 和 AD614 型测量放大器, 是根据测量放大器原理设计的典型的三运放结构单片集成电路。其它型号的测量放大器, 虽然电路有所区别, 但基本性能是一致的, 如 AD521、AD522 等。现以 AD612 和 AD614 为例将测量放大器的集成电路作一简单介绍。

AD612 和 AD614 是一种高精度、高速度的测量放大器, 能在恶劣环境下工作, 具有很好的交直流特性。其内部电路结构如图 1-1-8 所示。电路中所有电阻都是采用激光自动修刻工艺制作的高精度薄膜电阻, 用这些网络电阻构成的放大器增益精度高, 最大增益误差不超过 $\pm 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 用户可很方便地连接这些网络的引脚, 获得 1~1 024 倍二进制关系的增益。这种测量放大器在数据采集系统中应用广泛。

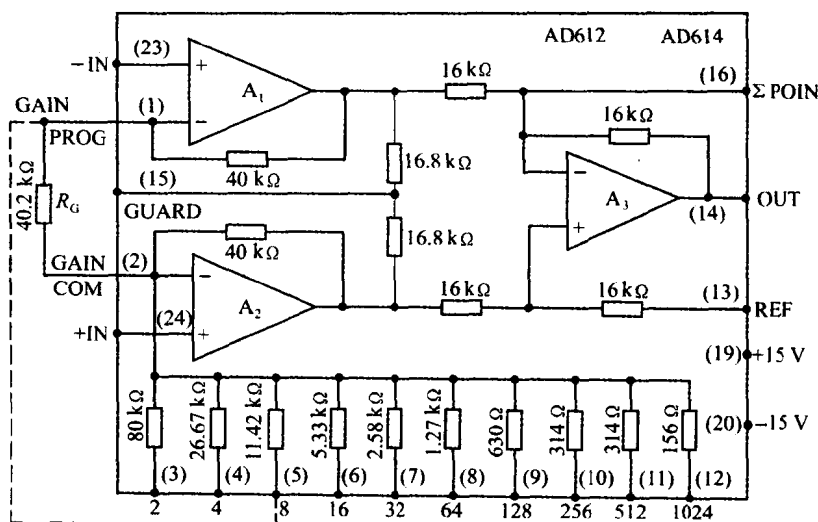


图 1-1-8 AD612 和 AD614 测量放大器内部电路

AD612 和 AD614 的增益可控有两种增益状态。一种是二进制,另一种是非二进制。

二进制增益状态是利用精密电阻网络获得的。当 A_1 的反相端(1)和精密电阻网络的各引出端(3)~(12)不相连时, $R_G = \infty$, $A_1 = 1$ 。当精密电阻网络引出端(3)~(10)分别与(1)端相连时,按二进制关系建立增益,其范围为 $2^1 \sim 2^8$ 。当要求增益为 2^9 时,需把引出端(10)、(11)均与(1)端相连。若要求增益为 2^{10} ,需把(10)、(11)和(12)端均与(1)端相连。所以,只要在(1)端和(2)~(12)端之间加一个多路转换开关,用数码去控制开关的通与断,可方便地进行增益控制。

另一种非二进制增益关系与一般三运放测量放大器一样,只要在(1)端和(2)端之间外接一个电阻 R_G ,则增益为:

$$A_1 = 1 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

三、测量放大器的使用

1. 差动输入端的连接

测量放大器不论是三运放结构还是单片结构,它的两个输入端都是有偏置电流的,使用时要特别注意为偏置电流提供回路。如果没有回路,则这些电流将对分布电容充电,造成输出电压不可控制的漂移或处于饱和。因此,对于浮置的,例如变压器耦合、热电偶以及交流电容耦合的信号源,必须对测量放大器每个输入端构成到电源地的直流通路,电路正确连接如图 1-1-9 所示。

2. 护卫(guard)端的连接

当测量放大器通过电缆与信号源连接时,电缆的屏蔽层应连接到测量放大器的护卫端。如果电缆的屏蔽层不接护卫端而接地,如图 1-1-10 所示,那么对交流共模干扰 V_{cm} 就不能有效地抑制。因为电缆的信号传输线与屏蔽层之间存在分布电容。分布电容 C_1, C_2 和传输线电阻 R_1, R_2 分别构成两个 RC 分压器。由于这两个分压器并不完全对称相等,这就使共模干扰电压 V_{cm} 在测量放大器两输入端以差模形式呈现出来,从而被差模放大并形成干扰。

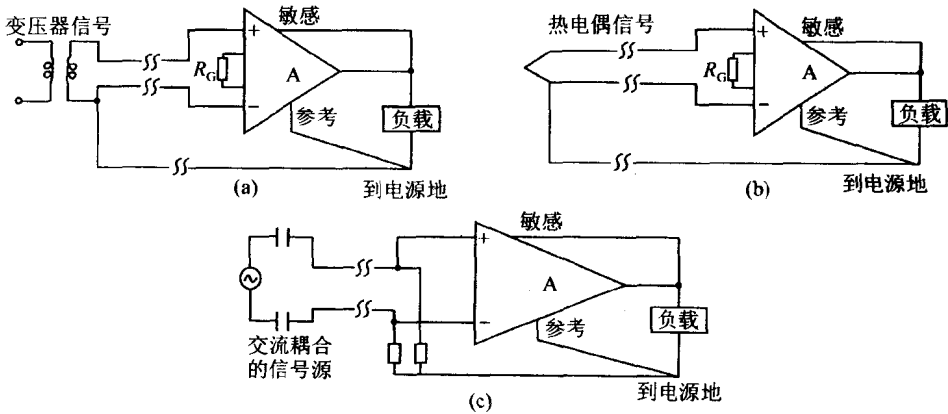


图 1-1-9 测量放大器输入端的正确连接

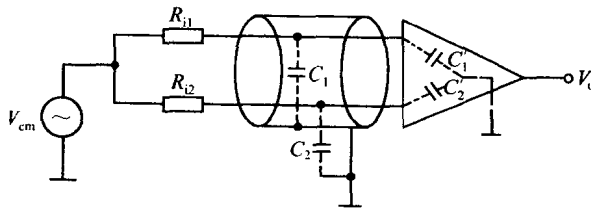


图 1-1-10 电缆屏蔽层接地的影响

由图 1-1-8 可见, 护卫端 15 脚引自测量放大器前级两运放输出的中点。依据式(1-1-22)可知, 其电位即为共模输入电压 V_{cm} , 屏蔽层接护卫端就使 RC 分压器两端电位都是 V_{cm} , 电位差为零, 分压值也必为零, 这样就有效地消除了共模干扰。

3. R 端、S 端的连接

测量放大器通常设有 R 端和 S 端, 如图 1-1-11 所示。其中 S 端称为敏感(Sence)端, R 端称为参考(Reference)端。一般情况下, R 端接电源地, S 端接输出端, 如图 1-1-7 所示。

当测量放大器的输出信号要远距离传输时, 可按图 1-1-12 加接跟随器, 并将 S 端与负载端相连, 把跟随器包括在反馈环内, 以减小跟随器漂移的影响。R 端可用于对输出电平进行偏移, 产生偏移的参考电压 V_r 应经跟随器接到 R 端, 以隔离参考源内阻, 防止其破坏测量放大器末级电阻的上下对称性而导致共模抑制比降低。

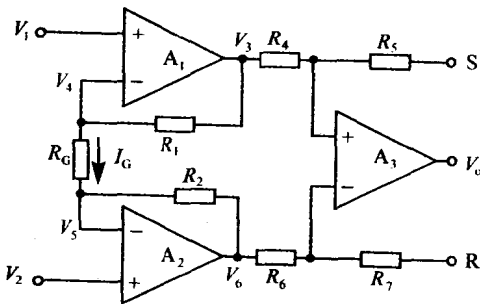


图 1-1-11 测量放大器的 S 端、R 端

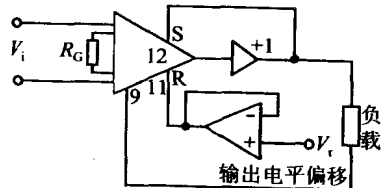


图 1-1-12 S 端、R 端的连接