

美 J. 汤普金斯 J. G. 威伯斯特 著

林家瑞 罗述谦 等译

传感器

与

IBM PC 接口技术

华中理工大学出版社

内 容 提 要

该书紧紧抓住作为生理(或病理)与工业控制过程眼睛的传感器及其与 IBM PC 的接口,在非电信号与国际上广为流行的 IBM PC 机间架起了桥梁,使人体或工业中的非电信号能有效地在 IBM PC 机进行处理与分析。该书介绍了用于与 IBM PC 机接口的各种传感器的硬、软件的设计,每种传感器与 IBM PC 机接口所需的电子电路,这里还包括各种传感器的应用实例及其计算机程序,这些程序给出了如何采集与使用由传感器所提供信息的途径。

书中内容先进,实用性强。它既适用于从事传感器系统、传感器与 IBM PC 或等效计算机接口设计、安装与操作的工程师,设计师与技术人员的需要,也适于作高等学校有关专业师生在传感器技术、计算机接口技术以及它们之间联结方面的教科书或重要参考书之用。

INTERFACING SENSORS TO THE IBM® PC

Original English language edition published by Prentice Hall Inc.

Copyright ©1988 by Prentice Hall Inc.

WILLIS J. TOMPKINS

JOHN G. WEBSTER

EDITORS

All Rights Reserved

传感器与 IBM PC 接口技术

[美] W.J. 汤普金斯 J.G. 威伯斯特 著

林家瑞 罗述谦 等译

责任编辑 殷伯明

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:465 000

1993 年 11 月第 1 版 1993 年 11 月第 1 次印刷

印数:0 001—1 000

ISBN 7—5609—0731—8/TP·76

定价:9.90 元

(鄂)新登字第 10 号

译 序

本书作者系美国威斯康辛大学(麦迪逊)电气与计算机工程系教授,他们的多本著作已被译成中、日及俄文版本。他们接收与指导过的中国访问学者及留学生数以十计,对中国人民怀有友好的感情,1980年与1982年他们曾先后应邀到中国讲学。Willis J. 汤普金斯教授现任该大学电气与计算机工程系副主任、上届 IEEE/EMBS 主席。John G. 威伯斯特教授长期担任 IEEE/EMBS 行政委员会成员、IEEE/BME 汇刊医学仪器部副主编,他们均为国际生物医学工程界的著名学者。译者曾作为访问学者先后在作者的指导与帮助下从事带微机的医学仪器设计与心电信号处理分析研究工作。译者承作者的支持与同意,把1988年英文版原著译成中文以奉献给正投身于微机系统开发的我国广大读者,同时也是对著作者对我们过去与现在工作的支持和帮助的感谢。

该书紧紧地抓住作为生理(或病理)与工业控制过程眼睛的传感器及其与 IBM PC 的接口,在非电信号与国际上广为流行的 IBM PC 机间架起了桥梁,使人体或工业中的非电信号能有效地在 IBM PC 机上进行处理与分析。

该书介绍了用于与 IBM PC 机接口的各种传感器的硬、软件的设计,包括各种传感器的应用实例及其相应的计算机程序,这些程序给出了如何捕获与使用由传感器所提供的信息。

该书在软件编程上使用了三种不同的编程语言,包括 BASIC、8088 汇编语言与 C 语言。BASIC 语言易为广大读者所理解;8088 汇编语言能提高数字信号获取的速度;C 语言能把高、低级语言结合起来,具有标准化、结构化与良好的转移性特点。

该书附录在硬件上给出了作者设计的原型板各端口的配置及 IBM PC 作为数字示波器的全部软件清单。

尽管在本书问世三年来,计算机系统已有长足发展,80286、80386 及 80486 系统机已相继在国内、外市场推出。然而,由于它们是同一根藤上结的瓜,有着许多的兼容性,书中所介绍的传感器与 IBM PC 接口技术仍不失其有效性与实用性。

最近三年中,作者不仅在美国,而且还曾应邀到法国、德国、新西兰及印度等国讲授过本书的主要内容。书中内容先进,实用性强,既适于从事传感器系统、传感器与 IBM PC 或同类计算机的接口设计、安装与操作的工程师与技术人员的需要,又适于高等学校相应专业师生作为传感器与计算机接口技术的教科书与重要参考书。

该书由林家瑞(前言,第六,七,八,九,十三章,附录 A,附录 B)、罗述谦(第五,十,十一,十四章及附录 C)、周果宏(第一,二,四及十二章)、徐邦荃(第三章)、段茜琳(第八,九章)、林雪梅(第六,十三章)及董岚(索引)等翻译。全书最后由林家瑞、罗述谦校阅定稿。陈瑞红、贺建林为部分书稿的抄写作了具体工作,在此表示感谢。由于我们水平有限,译文中会有一些错误,欢迎读者提出宝贵意见。

林家瑞

罗述谦

1991 年 12 月

原 序

本书介绍用于与 IBM PC 机接口的各种传感器系统的硬、软件的设计,讨论每种传感器及其与 IBM PC 机接口所需的电子线路,还给出了各种传感器的应用实例以及如何采集与使用由传感器所提供信息的计算机程序。

本书的实例使用了三种不同的编程语言,即 BASIC、汇编程序与 C 语言。我们给出 BASIC 语言的实例是由于这种语言最易为广大读者所理解。我们提供 Intel 8088 汇编语言编程实例是为了表明使用这种语言能使计算机获得最大的效能。

我们采用 C 语言的实例是由于这种语言结合了高、低级语言的特点,最适于在仪器中应用。在实现这些应用中,C 语言有着超过汇编语言的重大改进,它是一种标准化与结构化的语言。程序的设计是建立在函数的基础上,这些函数彼此独立地被开发并组合在一起以实现某些应用。软件中函数的作用与硬件中黑盒子的作用相同。如果能对它们的输入/输出特性预先给予详细的说明,这些函数可由工作在同一课题不同方面的多个不同的软件设计者同时开发,然后将这些函数联结在一起,以实现系统的软件设计。

C 语言之所以最重要是由于它的可转移性好。通过设计,用 C 语言编写的某处理器的程序可以转移到另一种处理器上。别的语言也声称有这种能力,但唯有 C 语言才能真正做到。可将机器规定的函数,例如那些用汇编语言编写的函数,分离出来再改写到程序要移植的新结构上去。

许多传感器系统提供的是模拟电压,而在为 PC 机使用之前必先将它们转换为数字信号。本书为数据的转换提供了一个完整的信号采集系统的设计。在提供这种设计时,我们试图揭开连接到 IBM PC 机系统总线的某些秘密,并给出读者可自行安装与使用的一种实用的、便宜的与简单的设计方法。对于那些需要实验室优质系统的读者来说,我们为读者提供产生信号采集与图形显示电路板厂家的地址。

本书对于那些需要将任一类型的传感器与 IBM PC 机或等效计算机接口的人是十分有用的,尤其适用于那些与传感器系统的设计、安装和操作有关的从事实际工作的电气和计算机的工程师、设计师、技术员和管理人员作为重要的参考。此外,对那些在敏感器件、传感器、数据转换及接口技术方面未受过完全或正规集中教育的人或对那些在上面提及的任一个领域中要求具有现代技术发展水平的人尤为有用。

第一章包括各种运算放大器电路设计。它们对研制放大器、保护电路及模拟传感器接口所需的电子线路方面是十分有用的。它还包括无源、有源与开关电容器滤波器。

第二章给出了在模拟与数字电路设计中必备的实际知识,并讨论了电源设计的有关考虑。这些问题常为设计者所忽视,且往往只有当其余的设计完成后才被考虑到。

第三章阐明了 IBM PC 的系统总线并给出基本的硬件接口设计,这种接口支持书中所有的其它设计。本章也包括中断、计数器与定时器。

第四章讨论信号转换的理论与实践、二进制码、采样与数/模转换器,而第五章包括模/数转换器的选择与使用。

第六章论述了可用于 IBM PC 机及其它各种微型机系统中的通讯的串行接口。举例说明

了通过这一接口如何与传感器连接,这种接口通常用来与外围设备连接,如打印机或调制/解调器。

第七章介绍了温度传感器,如 $p-n$ 结、热电偶、热敏电阻,并说明如何与它们接口。

第八章介绍用于辐射的光学传感器,如光电阻型、光电压型及光发射型传感器,它还包括热检测器,如测辐射热仪、热电堆及热电敏感器件。

第九章讨论了位移传感器,它被用来测量加速度、压力与位移。具体包括电位计、应变片、线性可变差动变压器及压电传感器。

第十章阐述流量传感器,包括热、机械、差动压力、电磁与超声等类型。

第十一章阐述了各种熟悉的微机接口输入装置的基本原理并给出了如何把它们与 IBM PC 接口。这些装置包括操纵杆、跟踪球、鼠标器、 $x-y$ 数字化仪、光笔及数字照相机。

第十二章介绍了标准化通用接口总线(GDIB)与 PC 机的连接使用。这是一种用于控制和访问多个仪器的一种方法,每种仪器具有它自身的传感器或控制器接口。

第十三章描述了在计算机间采集数据的通讯技术,并讨论了电话通讯中调制与解调器的使用方法。这对遥感应用是非常重要的,这时中央计算机经常与作为传感系统的计算机分隔甚远。

第十四章讨论了局部区域网络概念(LAN),这种网络正变得日益重要,尤其对于商业的应用。在一个有限的物理环境中,例如一组实验室系统,LAN 为相互联系的传感系统提供了一种重要的方法。

附录 A 给出了数据采集系统及专为 IBM PC 机设计的其它硬件的厂家的名字、地址及电话号码。

附录 B 给出作者设计的原型电路板各端口配置及全书所举例的 Tecmar Lab Master 的数据采集系统。

附录 C 给出采用 IBM PC 机的数字示波器程序全部软件清单,它使用本书所介绍的原型电路板作信号采集板及单色图形板作显示。为实现性能的应用,程序采用 C 语言编写。

在使用本书时,我们假设读者具有一般技术基础知识,不难理解线路与软件。

W. J. 汤普金斯

J. G. 威伯斯特

目 录

译 序

原 序

第一章 放大器	(1)
1.1 理想运算放大器	(1)
1.2 基本运算放大器电路	(2)
1.3 模拟计算	(5)
1.4 运放的非线性应用	(8)
1.5 关于运算放大器的一些考虑	(11)
1.6 保护	(12)
1.7 无源滤波器	(16)
1.8 有源滤波器	(17)
1.9 开关电容滤波器	(20)
1.10 电压控制振荡器	(20)
参考文献	(22)
第二章 接地、屏蔽与电源	(24)
2.1 干扰	(24)
2.2 接地	(24)
2.3 电场干扰	(26)
2.4 隔离	(32)
2.5 磁场问题	(34)
2.6 电磁场	(35)
2.7 电源	(36)
参考文献	(40)
第三章 IBM PC 总线接口	(41)
3.1 原型板	(41)
3.2 并行 I/O 端口的设计	(43)
3.3 中断结构	(54)
3.4 计数器	(65)
3.5 定时器	(67)
3.6 可编程序定时器	(68)
3.7 8253 定时/计数器	(70)
3.8 8253 定时/计数器应用举例	(71)
参考文献	(74)
第四章 基本信号转换	(75)
4.1 二进制代码	(75)
4.2 采样概念	(80)
4.3 D/A 转换器	(84)
参考文献	(87)

第五章 A/D 转换器	(89)
5.1 ADC 概述	(89)
5.2 A/D 转换方法	(93)
5.3 ADC 与 IBM PC 接口技术	(99)
5.4 数据采集系统	(100)
5.5 如何选择和使用 ADC	(104)
5.6 一个用于 IBM PC 的低成本数据采集系统	(107)
参考文献	(112)
第六章 串行 RS-232C 接口	(113)
6.1 串行接口	(113)
6.2 同步交换	(114)
6.3 异步方法	(114)
6.4 串行位流译码和错误的检测	(115)
6.5 传输线设计的若干考虑	(117)
6.6 传输线驱动器与接收器	(119)
6.7 RS-232C 标准的电压与机械定义	(121)
6.8 异步通讯适配器的实际应用	(122)
6.9 串行接口的数据采集	(125)
6.10 纤维光学	(126)
参考文献	(126)
第七章 温度传感器的接口	(127)
7.1 $p-n$ 结温度计	(127)
7.2 IC 温度传感器	(132)
7.3 热电偶	(134)
7.4 温度计的标定	(139)
7.5 电阻型温度传感器	(141)
7.6 温度的其它测量方法	(154)
参考文献	(155)
第八章 光学传感器的接口	(157)
8.1 光辐射源	(157)
8.2 频谱的修正	(161)
8.3 光路径的修正	(162)
8.4 光敏器件	(164)
8.5 几种普通传感器系统	(169)
8.6 简单传感器的应用	(170)
参考文献	(172)
第九章 位移传感器的接口	(174)
9.1 分压式电阻传感器	(174)
9.2 电阻应变片	(175)
9.3 线性可变差动变压器	(186)
9.4 压电传感器	(195)
9.5 等效电路	(196)
9.6 信号调节	(199)

9.7 加速计.....	(201)
9.8 压力传感器.....	(205)
9.9 位移传感器.....	(205)
参考文献	(205)
第十章 流量传感器接口	(207)
10.1 热流量计	(207)
10.2 机械流量计	(209)
10.3 差压流量计	(211)
10.4 电磁流量计	(213)
10.5 超声流量传感器	(214)
参考文献	(226)
第十一章 用户输入装置接口	(228)
11.1 操纵杆	(228)
11.2 跟踪球	(233)
11.3 鼠标器	(235)
11.4 触摸屏	(236)
11.5 光笔	(238)
11.6 $x-y$ 数字化仪	(242)
11.7 数字照相机	(243)
参考文献	(245)
第十二章 GPIB (IEEE 488)接口	(246)
12.1 GPIB 总线结构	(246)
12.2 GPIB 应答规约	(248)
12.3 总线操作	(248)
12.4 GPIB 举例:一种用于监护多个住院病人的系统	(251)
12.5 GPIB 接口器件	(253)
参考文献	(253)
第十三章 电话通讯.....	(254)
13.1 调制/解调器通讯.....	(254)
13.2 音频级调制/解调器.....	(255)
13.3 运行性能	(258)
13.4 通讯约定	(260)
参考文献	(261)
第十四章 局部区域网络	(262)
14.1 LAN 的类型	(262)
14.2 网络拓扑结构	(263)
14.3 LAN 举例	(264)
14.4 标准	(266)
14.5 未来的 LAN	(267)
参考文献	(268)
附录 A PC 机接口硬件的生产厂家	(269)
A1 并行数据采集板生产厂家	(269)
A2 串行数据采集系统的生产厂家	(270)

A3 GPIB 插板的生产厂家	(270)
附录 B 电路图与端口的定义	(272)
B1 原型电路数据采集板	(272)
B2 Tecmar Lab Master 数据采集板端口	(272)
附录 C 数字示波器程序	(277)
C1 程序	(277)
C2 未来的软件方向	(278)
附录 D 本书缩写词一览表	(306)
附录 E 常用双输入组合逻辑门符号	(311)

第一章 放大器

传感器是将待测的物理量或化学量转换成电信号输出的一种装置。本书将对温度、压力、流量及运动等物理量的传感器(输入变换器)进行讨论。传感器将它的输出电信号传送到信号调节电路,该电路是与 IBM PC 接口的预备电路。传感器的输出信号通常都很小,需要进行放大。放大器不仅产生增益,而且还能用作滤波,信号处理或非线性校正。本章将着重讨论运算放大器(简称运放或 OP),因为运放比分立的晶体管电路更便于进行电路设计。

1.1 理想运算放大器

运算放大器是高增益的直流差分放大器。它通常使用于由外部反馈网络决定特性的电路结构中。电路的传递函数定义为输出函数与输入函数之比。对于电压放大器的传递函数(又称增益)为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (1.1)$$

设计电路的最佳方法是首先假设运算放大器是理想的运算放大器。这样使得传递函数的计算要容易得多。在完成初步的设计后,再考虑运算放大器的非理想特性,并算出它们对电路的影响。如果这些影响不太重要,这个设计就算完成;否则,还需再作进一步的设计。

图 1.1 示出简化的运算放大器的等效电路图。这个模型包括一个连接在两个输入端 v_1 和 v_2 间的输入阻抗 R_d 。输出电路由一个受控电压源与连接到输出端的输出阻抗 R_o 串联构成。两个输入端间的电压差产生流经 R_d 的电流。差分电压被放大 A 倍(A 为运算放大器的增益),从而产生输出电压。

为简化电路设计,对理想运算放大器的特性作如下假设:

- (1) 开环增益:无穷大;
- (2) 输入阻抗 R_d :无穷大;
- (3) 输出阻抗 $R_o=0$;
- (4) 带宽:无穷大(无限频率响应);
- (5) 无失调电压。即当输入 $v_1=v_2$ 时,输出 $v_o=0$ 。

最后一个特性十分重要。图 1.1 表明, $v_2-v_1=v_o/A$ 。当 v_o 为有限值,而 A 为无穷大(典型值 100 000)时,必有 $v_2-v_1=0$,即 $v_1=v_2$ 。由于 v_1 和 v_2 间的差分阻抗 R_d 很大,且 $v_1=v_2$,故通常忽略 R_d 中的电流。这两点假设对设计运算放大器电路是十分有用的,可综述如下:

定则 1 当运算放大器工作在线性范围内时,两个输入端的电压相等。

定则 2 运算放大器的任一端点都无电流流入。

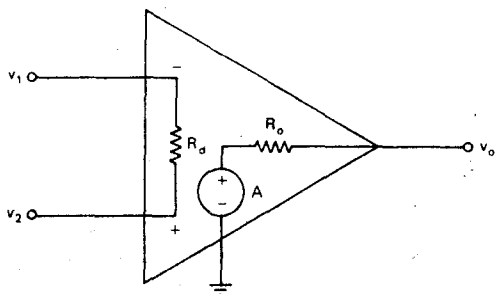


图 1.1 运算放大器等效电路

当在电路图中表示运算放大器时,只画出图 1.1 中的三角形符号,而不必示出其内部元件。

1.2 基本运算放大器电路

本节假定运算放大器是理想的,并给出几种有用的电路。在大多数电路中,运算放大器被用在闭环结构中,运算放大器外部的反馈网络减少了增益,却提供了其它有用的特性。

1.2.1 反相放大器

图 1.2 给出了基本反相器电路。它有广泛的应用,包括在仪器中。这里的反馈阻抗 R_f 使反相放大器具有很多优点,比如增加了带宽,降低了输出阻抗。

1. 增益方程。可以很容易地导出这个电路的增益方程(传递函数)。由于同相输入端接地,它的电位为零伏。根据定则 1,反相输入端的电位也是零伏,并称为虚地。图 1.2 中的反相端对各种实用目的都是地电位。

克希霍夫电流定律阐明流入或流出一个结点的所有电流之和必须为零。根据定则 2,没有电流流入运算放大器的输入端,因此, $i_i + i_f = 0$,

$$i_i = -i_f \quad (1.2)$$

因为 R_i 的右端接地,为零伏电位,其左端是 v_i ,因此,按欧姆定律, $i_i = v_i / R_i$ 。同理, $i_f = v_o / R_f$ 。将这些方程代入(1.2)式,得

$$\frac{v_i}{R_i} = -\frac{v_o}{R_f} \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad (1.3)$$

因此,可知该电路把输入信号反相,反相放大器的增益为 $-R_f/R_i$ 。

2. 输入/输出特性。电路的线性范围由电源电压决定。图 1.3 说明,对于 $\pm 15\text{V}$ 电源,当 v_o 超过饱和电压 V_s (典型值 $\pm 13\text{V}$) 时,电路饱和。无论 v_i 怎样增大,输出也不再改变。对于大多数运算放大器来说,最大线性输出电压振幅比总的电源电压差值小 4V 左右。反相放大器的输入阻抗一般很低。因为反相器基本接地,所以从信号来看,输入阻抗为 R_i ,增大 R_i ,输入阻抗也随之增加,但这减小了有用的增益。可以通过增加 R_f 来提高增益,但对 R_f 的最大值有一个实际的限制。

1.2.2 同相放大器

图 1.4 示出第二种基本的运算放大器电路,同相放大器。根据定则 1,运算放大器的反相输入端也应是 v_i 。根据定则 2, i_f 必经 R_i 流入地,这是因为没有电流能流入运算放大器。按分压器法则

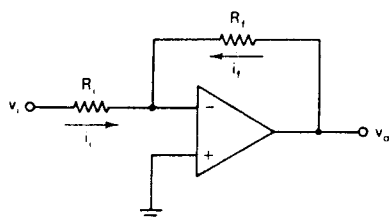


图 1.2 增益等于 $-R_f/R_i$ 的基本反相器电路

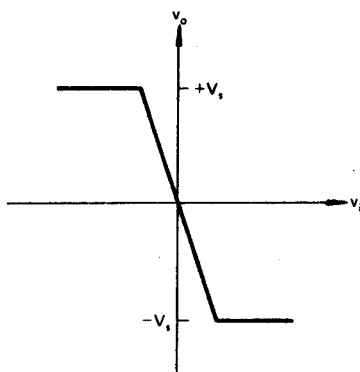


图 1.3 仅当低于饱和电压 V_s 时,反相器输入/输出特性是线性的

$$v_i = \frac{R_i V_o}{R_i + R_f}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_i + R_f}{R_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (1.4)$$

同相放大器中,电路增益为正,总是大于或等于1,并且输入阻抗非常大,接近无穷大。

1.2.3 单位增益放大器

在同相放大器中,如果置 R_i 等于无穷大, R_f 等于零,电路就简化为图 1.5 那样。根据定则 1,在反相输入端也必定是 v_i 。而反相输入端又直接连接到 v_o ,因此 $v_o = v_i$,输出电压跟随输入电压。

读者可能产生一个问题?为什么要使增益为1?一个非常重要的答案是,作为缓冲放大器或阻抗转换器,单位增益放大器是很有用的。作为缓冲放大器,单位增益放大器把电路与后级的负载效应相隔离。一个应用例子是应用在数据转换系统中。许多 A/D 转换器在模拟输入信号电压范围内具有变化的输入阻抗。使用单位增益放大器,将得到一个恒定不变的输入阻抗。对于某些 D/A 转换器,需要一个高阻抗负载来保证正常工作,但又不想对输出电压进行换算,在这种应用中,就需要用单位增益放大器。它也常用在采样-保持电路中保持电容器后面,以防止电容器在转换期间内放电。

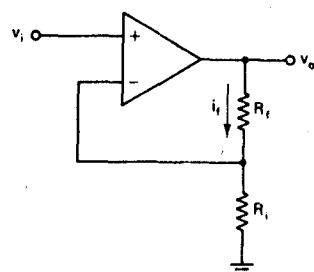


图 1.4 同相放大器电路,增益为 $(R_f + R_i)/R_i$

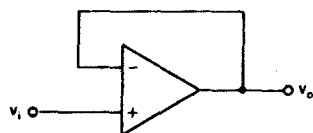


图 1.5 具有非常高输入阻抗的单位增益放大器

1.2.4 差动放大器

一种非常重要的运算放大器结构叫做差动放大器,它是反相和同相两种结构的组合,具有自己的特点。在放大来自于心电图机或脑电图机的生物电信号时,差动放大器可以抑制 60Hz* 的干扰,这干扰对放大器来说是共模输入。

图 1.6(b) 给出一个简单的单运算放大器的差动放大器。根据定则 2,无电流流入运算放大器输入端,因此,从 v_2 来的电流流经 R_1 ,再通过 R_2 到地。于是,根据分压器原理,同相输入端的电压为

$$v_5 = \frac{R_2 v_2}{R_1 + R_2} \quad (1.5)$$

根据定则 1,反相输入端的电压必定等于同相输入端的电压。因此,电路的上半部像是一个反相器。把电路上半部作为反相器求解电流得

$$i = \frac{v_1 - v_5}{R_1} = \frac{v_5 - v_6}{R_2} \quad (1.6)$$

将(1.5)式代入(1.6)式得

$$v_6 = \frac{(v_2 - v_1)R_2}{R_1} \quad (1.7)$$

此即差动放大器的增益方程式。差动放大器的方程式表明,当两个输入端连接在一起,并用同

* 译注:美国的市电频率为 60Hz,我国的市电频率是 50Hz。

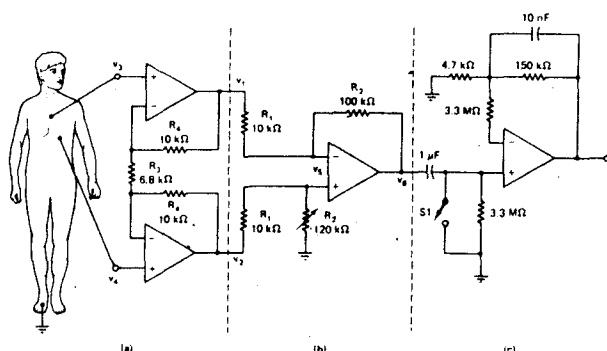


图 1.6 心电图放大器

(a)与(b)为仪表放大器级;(c)为同相放大器级

一个电压源驱动时,共模电压(CMV)为 $v_1 = v_2$,于是 $v_6 = 0$ 。我们使用“共模”这个术语,是因为在两个输入端上有公共的驱动电压,差动放大器的共模增益(CMG)为零。

如果 $v_1 \neq v_2$,则差动放大器增益(DG)等于 R_2/R_1 ,实际上,差动放大器不能完全抑制掉共模电压。差动放大器抑制共模电压能力的定量量度称为共模抑制比(CMRR):

$$\text{CMRR} = \frac{\text{DG}}{\text{CMG}} \quad (1.8)$$

CMRR变化范围很宽,某些应用中仅为100,而在高Q值的生物电位放大器中,则可大于10 000。差分放大器结构的特点在于它可抑制像 60Hz 噪声那样同时加在两个输入端上的信号。

1.2.5 仪表放大器

单运放差动放大器的输入阻抗很低。这对象应变片桥这样的低阻抗源是很合适的,但对高阻抗源就不那么令人满意了。解决这个问题的办法是使用图 1.6(a)和(b)中所示的仪表放大器。基本放大器的每个输入端各连接一个同相放大器。同相放大器的 R_i 连接在一起,省去了对地的连接。计算共模增益时,把两个跟随器与简单的差动放大器分开考虑。假设 $v_3 = v_4$,根据定则 1,两个运算放大器反相输入端都应是 v_3 ,这就在 R_3 的两端加上相等电压,因此没有电流流过 R_3 。根据定则 2,从运放的输入端流出的电流为零,因此没有电流流经 R_i 。在两个运放输出端的电压都是 v_3 ,所以 CMG 等于 1。

为计算差分增益,假定 $v_3 \neq v_4$ 。于是在电阻 R_3 上有一个等于 $v_3 - v_4$ 的电压降。这产生一个流经 R_3 的电流。据定则 2,同样大小的电流也流经两个 R_i ,输出电压为

$$v_1 - v_2 = i(R_4 + R_3 + R_4) \quad (1.9)$$

而输入电压为

$$v_3 - v_4 = iR_3 \quad (1.10)$$

于是差分增益为

$$\text{DG} = \frac{v_1 - v_2}{v_3 - v_4} = \frac{2R_4 + R_3}{R_3} \quad (1.11)$$

因为 CMG 等于 1,所以 CMRR 就等于 DG。由于仪表放大器第一级 CMG 等于 1,且到第二级

的输入信号相等,所以总的 CMG 为 0。

把各级的增益[(1.11)式和(1.7)式]相乘,就得出仪表放大器的总增益:

$$v_6 = (v_3 - v_4) \frac{R_2}{R_1} \frac{2R_4 + R_3}{R_3} \quad (1.12)$$

它具有高输入阻抗,高 CMRR,且增益可通过改变 R_3 来调节。此电路对同时加在仪表放大器两个输入端的 60Hz 干扰有抑制作用。

1.2.6 心电放大器

仪表放大器的一个应用例子是心电(ECG)放大器。仪表放大器抑制干扰的能力使得它作为多运放电路的前放级是一个很好的选择。由于它具有高抗干扰性,所以在放大器的后几级中仅对所需要的信号放大。这个放大器的高输入阻抗也是很需要的,因为它是 ECG 电极的负载。

图 1.6 是一个 ECG 放大器,仪表放大器提供高输入阻抗及高 CMRR,调节 120k Ω 电位器可使 CMRR 达到最大。由于电极可能产生高达 0.2V 的失调电位,故有意把直流耦合前放级(仪表放大器级)的增益做低些以防止饱和。从式(1.12)知,增益为 40。在输入端没有使用耦合电容器,因为它们会阻塞运放的偏置电流。1 μ F 耦合电容器与 3.3M Ω 电阻组成一个高通滤波器。从简单高通滤波器的传递函数计算得出,该滤波器可通过 0.05Hz 以上的频率。输出级是一个增益约为 32[式(1.4)]的同相放大器。10nF 电容器及 150k Ω 电阻形成一个低通滤波器,它可通过高达 100Hz 的频率。反相输入端的 3.3M Ω 电阻用于平衡偏流源阻抗(见 1.5 节),在输出饱和时,为使 1 μ F 电容器充电,可将 S_1 瞬时闭合。一般在导联转换或去除纤颤之后这样作,以使输出返回至线性区。本电路使用通用的 741 运放就能很好地工作,但若若要使流经电极的直流电流保持很小,则需使用有低偏置电流的运算放大器。

1.3 模拟计算

运算放大器电路能够完成模拟计算和其它的数学运算。然而,发展的趋向是使用数字信号处理,因为它更具灵活性并且节省硬件。但当数字处理消耗太多时间时,模拟信号处理可能有些好处。

1.3.1 反相器和换算变换器

我们经常要使信号反相,或对电压换算。适当地选择 R_f/R_i ,反相放大器结构能够给出所要求的增益变化和符号反相。一个可能的应用是用反相器来换算数字-模拟转换器的输出。

1.3.2 加法器(加法放大器)

反相器可对几个输入电压求和。每个输入端通过一个权电阻连到反相输入端。由于反相输入端对所有输入及反馈电流求和,因此称为求和结点。

图 1.7 示出基本的加法放大器。和反相放大器的情况一样,在反相输入端的电压必定等于零,因此,流入运放的电流等于零。

* 译注:总增益应为 $\frac{v_6}{v_3 - v_4} = \frac{R_2}{R_1} \frac{2R_4 + R_3}{R_3}$ 。

这样, $i_f = i_1 + i_2 + \cdots + i_n$

$$\text{及 } i_1 = \frac{v_1}{R_1}, i_2 = \frac{v_2}{R_2}, \cdots, i_n = \frac{v_n}{R_n} \quad (1.13)$$

由于反相输入端是零电压, $v_o = -i_f R_f$, 代入后得

$$v_o = -R_f \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \cdots + \frac{v_n}{R_n} \right) \quad (1.14)$$

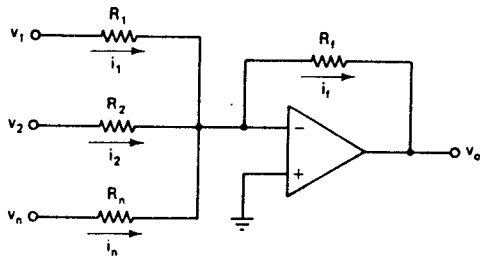


图 1.7 基本加法放大器

电阻 R_f 决定电路的总增益。电阻 $R_1, R_2, \cdots, R_n$ 决定各个通道的权系数和输入阻抗。

上述电路基本上都由电阻性元件组成。可用电容器对反相放大器作进一步的校正, 分析时仍使用同样的基本理想特性。

1.3.3 积分器

积分器是能产生输出正比于输入信号积分的电子电路, 图 1.8 示出一个简单的模拟积分器。电容器 C 的一个端点接在求和结点, 另一端接在输出端上。因此, 电容器上电压也就是输出电压。我们不能用一个简单的代数关系来描述积分器的输出, 因为, 对于一个固定的输入, 输出是由 v_i, R 及 C 所决定的速率变化的。因此, 要计算输出电压, 我们必须知道输入电压加了多长时间。初始时未充电的电容器上电压为

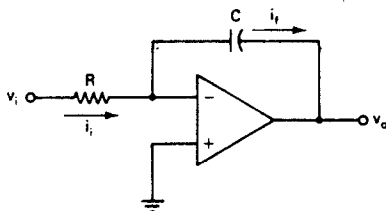


图 1.8 简单的模拟积分器

$$v = \frac{i_f t_1}{C} \quad (1.15)$$

式中, i_f 是流经 C 的电流, t_1 是积分的间隔。对于 v_i 为正时, $i_i = v_i/R$, 因为 $i_f = i_i$, 且由于反相,

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} v_i dt + v_{ic} \quad (1.16)$$

这表明 v_o 等于输入电压在从 0 到 t_1 这段时间积分的负值再乘以 $1/RC$ 的倍数。电压 v_{ic} 是电容器的初始电压。

图 1.8 的理想积分器有一个严重的缺点, 如果 v_i 的连接不确定, v_o 就要减小, 直到达到运放的饱和电压。所以发生这种情况是因为积分器是作为直流输入的开环放大器工作的。

图 1.9(a) 表示防止此问题发生的一个实际积分器。在复位周期, S_1 闭合, S_2 断开。电路作为一个反相器对电容器 C 充电至 $-v_{ic}$ (基准电压 V_r 反相后的一个倍数)。由于输入电阻等于反馈电阻, 反相器的增益为 -1 , v_o 等于 V_r , C 被初始化至 V_r 。在积分周期, S_1 断开, S_2 闭合; 在保持周期, 两个开关都断开。它保持输出电压 v_o 恒定不变, 用于读出及以后的处理。

开关 S_1 和 S_2 可以是继电器触点或像 FET (场效应晶体管) 那样的固体开关, 或模拟开关, 开关动作由外部逻辑控制。在用几个积分器求解一个微分方程时, 这简化了初始条件的设置及起始积分。图 1.9(b) 表明运算顺序。

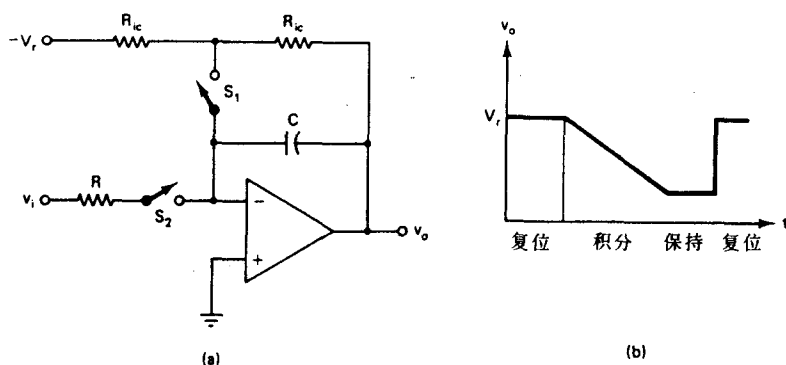


图 1.9 实际的积分电路

1.3.4 微分器

微分器的输出信号正比于输入信号对时间的变化速率。图 1.10 示出一个简单的微分电路。通过电容器的电流为

$$i_i = C \frac{dv_i}{dt}$$

如果 dv_i/dt 为正, i_i 沿 $-v_o$ 的方向流经 R , 即

$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt} \quad (1.17)$$

这种微分方法看上去简单, 但实际的微分在高频时产生稳定性的问题。电路的不稳定性是由于微分器的理想增益曲线与运放的开环增益曲线相交引起的, 如图 1.11(b) 所示, 在图 1.11(a) 中, 加上 R_i 是为了使微分器的增益曲线在两曲线交点 $f_i = 1/(2\pi R_i C)$ 处向下弯曲。在高频时, R_i 使微分器变差。可以证明曲线相交在频率 $\omega_i^2 = A_0 \omega_0 / RC$ 处。由此, 及方程式 $R_i C = 1/\omega_i$ 发现, 为设计一个稳定电路, 应使

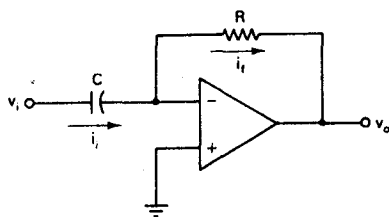


图 1.10 简单的微分电路

$$\omega_i = \left(\frac{A_0 \omega_0}{RC} \right)^{1/2} = \frac{1}{R_i C} \quad (1.18)$$

或

$$R_i = \left(\frac{R}{A_0 \omega_0 C} \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

$A_0 \omega_0$ 是运放的增益带宽乘积。

某些运放比别的一些更适于作微分器使用。高频特性趋向于把选择限于那些具有高转换速率和增益-带宽乘积的器件。高转换速率 FET 运放, 例如 LU356, 很适于微分器用。

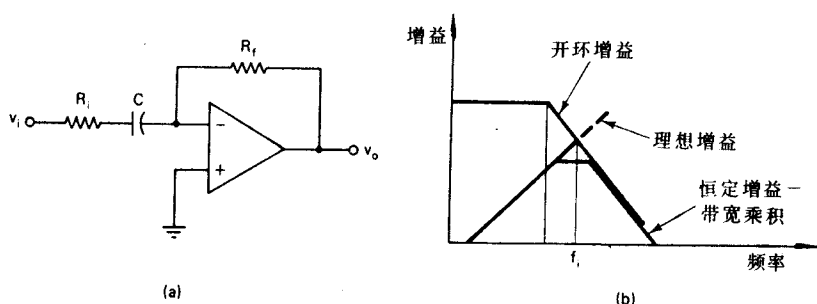


图 1.11 实际微分器
(a) 电路图; (b) 增益-频率特性

1.4 运放的非线性应用

1.4.1 比较器

比较器是比较两个输入电压并产生与两个输入端状态相关输出的电路。电路 1.12(a) 示出一个基本的比较器电路。因为没有反馈阻抗,运放工作在开环状态。一个输入端设置为基准电位,另一个为未知的输入。比较器输出指示未知的输入信号高于还是低于基准电压。图 1.12(a)中,基准电压 V_r 馈送给同相输入端,而 v_i 加在反相输入端。当 v_i 变得比 V_r 大时,输出 v_o 变为 $-V_s$ (负饱和电压)。若 v_i 小于 V_r ,则 $v_o = +V_s$ 。把输入交换,那样输出也会反相。图 1.12(b)示出传输特性。

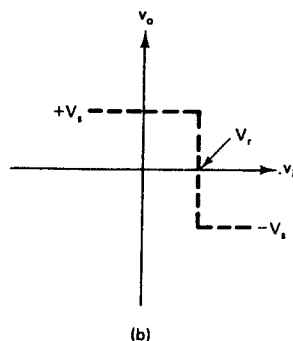
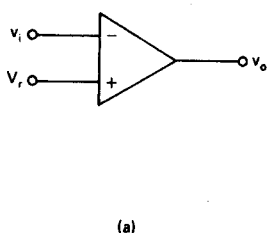


图 1.12 简单比较器
(a) 电路图; (b) 传输特性

比较器应尽可能快地改变输出状态。比较器开环工作,所以无须频率补偿(1.5 节),因为不存在需要稳定的闭环。频率补偿会减慢速度、响应时间及转换速率。响应时间是当输入达到触发电位时,输出发生跃变所需要的时间。转换速率则代表在跃变期间,放大器输出能够变化多快。国家半导体公司的 LM 101 A 放大器,具有高转换速率,因此适于作比较器使用。

1.4.2 带滞后的比较器

对于图 1.12 中的简单比较器,如果在 v_i 上有噪声, v_o 会在 $\pm V_s$ 之间非常迅速地波动。对这个问题的解决办法是在比较器外引入一个正反馈(将输出信号的一部分反馈到同相输入端)。图 1.13(a)表示一个带滞后的比较器电路。引入 R_2 后,正反馈加到 R_1 上。如果输出变高, R_2 则反馈回一个信号,叠加到基准电压上。 V_r 的增量为