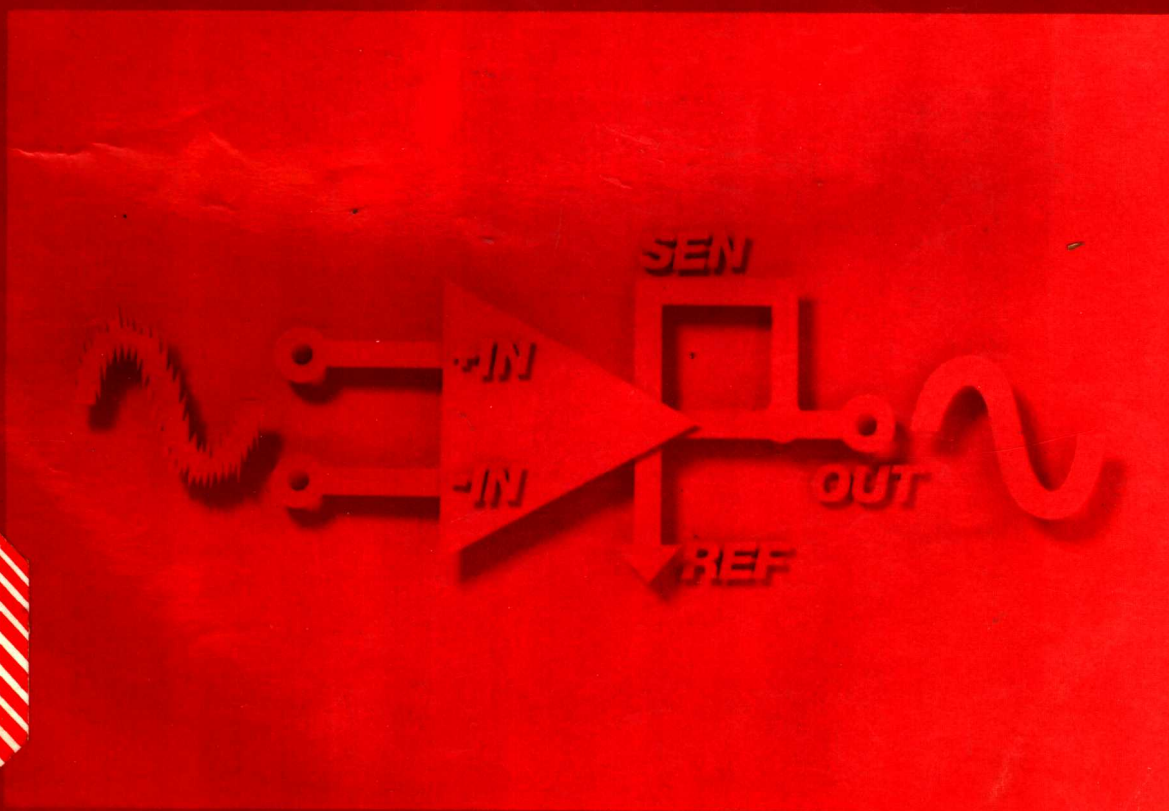


ADI 产品应用技术丛书

仪表放大器应用技术

高光天 主编



科学出版社

ADI 产品应用技术丛书

仪表放大器应用技术

高光天 主编

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是《ADI 产品应用技术丛书》之一。本书从应用角度系统地介绍了当代最新集成仪表放大器的基本结构、设计考虑、典型应用及选择方法。书中对精密测量和数据采集系统中的抗干扰技术作了精采描述；从系统干扰噪声耦合机理入手，深入浅出地介绍了噪声分析方法和屏蔽、防护措施及规则；从集成运算放大器的结构入手，通过典型实例系统地论述了正确去耦、接地的原则及方法。附录部分是从美国模拟器件公司最新版本的器件手册中选编的 11 种最常用的典型仪表放大器的详细技术资料。

本书集仪表放大器的基本原理、应用技术和常用典型器件为一体，既可供从事电子技术的广大科研和工程技术人员作为一本非常实用的仪表放大器应用手册使用，又可作为高等学校的“模拟电子技术”和“模拟集成电路”等课程的教学参考书。

ADI 产品应用技术丛书 仪表放大器应用技术

高光天 主编

责任编辑 张建荣

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

科学出版社图文印刷部 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995 年 8 月第 一 版	开本：850×1168 1/16
1995 年 8 月第一次印刷	印张：13 1/2
印数：1—3500	字数：420 000

ISBN 7 - 03 - 004803 - 2/TP · 460

定价：25.00 元

序

众所周知,由于微电子技术的迅速发展,电子产品已经深入到国民经济的各个领域。展望 21 世纪信息高速公路的开通,以计算机为核心的多媒体信息网将进入千家万户,对人类社会的生活方式将再一次进行重大变革,其发展前途不可限量。

然而,目前的计算机所能接受的信息必须是数字量,即以高低两种电平的组合来表示不同的信息;而日常生活中所遇到的信息,如温度的高低、速度的快慢、光线的强弱,无论在时间上还是空间上都是连续变化的,属于模拟量。如何将这种模拟量正确地转换为数字量,经过计算机处理后给以正确的显示,或再转换为正确的相应模拟量,始终是电子技术领域中的重要课题。如果这个问题没有解决好,比如选用的电子器件其性能达不到要求,那末,即使计算机的运行速度再快,运算的精确度再高,也是无济于事的。

美国模拟器件公司(Analog Devices Inc., 简称为 ADI)是专门生产模拟信号处理器件的世界著名公司。自从 1965 年创建以来,其在高性能线性器件、数据转换器件、超大规模混合信号专用集成电路,甚至数字信号处理器件等方面的产品,在世界上一直处于领先地位,有些还属世界首创。它们在工业自动化、国防、航天、通信、计算机外围设备等许多领域,都得到极其广泛的应用。在我国,自从实行改革开放政策以来,它们也受到越来越多的工程技术人员、高校师生和广大用户的关注。令人遗憾的是,现在还缺少系统的、成套的、有关 ADI 产品的技术资料 and 书刊。

鉴于上述情况,我认为由高光天同志主编的《ADI 产品应用技术丛书》是一项非常有意义的工作。高光天同志在物理测量及电子技术领域内辛勤耕耘了二十多年,是一位造诣很深的高级技术人才。这套丛书,在书目安排上,取材新颖,全面地反映了现代模拟电子技术领域中的重要课题;在内容上,表达准确,条理清楚,实用性很强。它既是电子设备设计者在确定方案、选用器件时不可缺少的参考资料,也是高等院校有关专业师生在学习“模拟电子技术”和“模拟集成电路”等课程时的主要参考书。本人深信,这套丛书的出版,必将有助于扩大 ADI 产品的应用并推动我国模拟电子技术的发展和课程教学的现代化。

童诗白

1994 年 8 月

《ADI 产品应用技术丛书》出版说明

进入 90 年代, 电子科学技术的飞速发展和广泛应用使它不仅在传统的雷达、通信、导航、广播电视、电子对抗等领域的应用中得到发展和提高, 而且随着微电子、光电子和计算机技术的突飞猛进, 它又促进了自动控制、光纤通信、人工智能、多媒体等新技术的成长和发展。电子技术应用日趋广泛, 从国防尖端的导弹、卫星, 一直扩展到工农业生产、文化教育、体育卫生、行政管理乃至家庭生活。也就是说, 它已渗透到国民经济和科学技术的各个领域。

鉴于电子科学技术如此迅速发展和广泛应用, 其决定因素之一是电子器件的发展。从某种意义上讲, 现代电子科学技术是一门“组合”科学。根据“黑箱”方法, 着眼于电子器件的外部特性, 为完成性能优良、功能独特的实验、产品或系统工程, 如何跟踪现代电子器件的发展, 如何选择既满足设计技术指标要求而又权衡性能价格比的理想电子器件进行组合, 这显然是每位设计者在实际工作中最为关心的一个问题。

在群星璀璨的电子器件世界中, 我们选择了世界著名的美国模拟器件公司 (Analog Devices Inc. 简称 ADI) 产品, 试图作为观察现代电子器件的一个窗口。ADI 是以数据采集和信号处理产品久负盛名的全球性公司, 近年来利用现代高新技术, 扩大了生产线并且开拓出许多新领域, 尤其是数字信号处理 (DSP) 和高性能混合信号专用集成电路 (ASIC) 独具特色。ADI 的产品主要包括: A/D 与 D/A 转换器、运算放大器、模拟信号处理器件、传感器、音频/视频器件、磁盘驱动器件、汽车应用器件、通信器件、自动测试设备器件、电压基准、模拟开关与多路转换器、数据采集子系统、数字信号处理器件、微机监控器件等。这些产品在电子测量、信号处理、通信、自动控制和计算机接口技术等领域已得到广泛应用。展望 21 世纪信息高速公路的开通, 随着以计算机为核心的多媒体技术的日益普及, ADI 产品将愈来愈成为现代电子技术应用中基本的不可缺少的电子器件。

正是由于 ADI 产品技术的先进性、专业的基础性和应用的广泛性, 又考虑到广大工程技术人员和高校师生对 ADI 产品的关注并对其系统、成套技术资料 and 书刊的需求, 我们组织编写这套丛书, 以飨读者。

本丛书包括 ADI 产品的综合手册, 例如《ADI 产品捷选手册》和《ADI 产品技术指南》, 也包括 ADI 产品的专题介绍, 例如《运算放大器应用技术》、《仪表放大器应用技术》、《数据转换外围器件应用技术》、《数据转换新器件应用技术》、《压频转换器应用技术》、《传感器接口应用技术》等。

本丛书侧重先进性和实用性。从应用角度出发把 ADI 产品分专题, 系统、深入浅出地介绍给读者, 使读者分门别类地对 ADI 产品的基本原理、特性、典型应用和选择方法有全面、深入的了解。

本丛书既可供科研和工程技术人员使用, 又可作为高等院校“模拟电子技术”和“模拟集成电路”等课程的参考书, 以便与现代电子技术接轨。

本丛书是在北京市英赛尔器件集团董贵强董事长倡导和支持下, 组织电子科学技术界多年从事 ADI 产品研究和应用的专家和工程技术人员编写的。清华大学童诗白教授、吉林工业大学戴逸松教授、李桂成副教授、吉林大学邹广田教授和第一汽车制造厂任湛谋研究员级高级工程师对本丛书的编写给予了鼓励、支持和指导。谨向他们致以深切的谢意。在编写过程中也得到同事们的关心和帮助, 值此一并表示衷心的感谢。

由于现代电子技术的飞速发展以及编者水平有限, 丛书中定会存在许多不足, 丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们恳切地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

前 言

仪表放大器源于运算放大器,而又优于运算放大器。仪表放大器是通过将运算放大器的优化组合,专门设计成的精密差分电压放大器,而不是兼顾求和、微分、积分、信号处理或其它非电压放大功能的通用运算放大器。单片仪表放大器又把关键元件做在仪表放大器的内部,所以使用非常方便。由于仪表放大器的特殊结构决定它具有高共模抑制、高输入阻抗、低噪声、低线性误差、低失调漂移、增益设置灵活和使用方便等特点。随着计算机技术、传感器技术和精密电子测量技术的发展,使仪表放大器得到更加广泛的应用。仪表放大器在噪声环境下提取微弱信号、精密传感器信号放大和远程精密测量等方面别具特色。实际应用结果表明,仪表放大器现已成为数据采集、高速信号调节、现代医用仪器和高档音响设备中不可缺少的电子器件。

自从1972年美国模拟器件公司研制成功世界上第一个单片仪表放大器AD520以来,仪表放大器的独特功能和广泛应用已得到越来越多的电子工程师和技术人员的关注。现在市场上仪表放大器种类繁多,而大多数人对仪表放大器的了解和使用远非像运算放大器那样得心应手。如何掌握、使用 and 选择仪表放大器已成为人们非常关心的一个问题。为此,我们编写这本《仪表放大器应用技术》,希望能满足广大读者的需求并促进仪表放大器的应用。

本书参考了世界著名的美国模拟器件公司(ADI)的有关仪表放大器的最新技术资料 and 专著,从基本原理、设计考虑、典型应用到选择方法及常用典型器件都作了系统的介绍。本书也对精密测量和数据采集系统中的抗干扰技术做了简明实用的描述:从系统干扰噪声耦合机理入手,深入浅出地介绍了噪声分析方法和屏蔽、防护措施及规则;从集成运算放大器的结构入手,通过大量实例系统地论述了正确去耦、接地原则及方法。本书在编写过程中力求做到先进性、实用性和规范性,尽可能反映出现代仪表放大器最新技术和最新应用。本书虽然以ADI产品为背景,但是由于该公司这方面产品在世界上的先进性、实用性和互换性,对于其它公司的同类产品的了解和使用也具有一定的指导意义。

北京市英赛尔器件集团是美国ADI产品国内指定销售公司,对本书介绍的各种仪表放大器均有现货供应,从而为用户选购仪表放大器和技术咨询提供了方便。

总之,本书集仪表放大器的基本原理、应用技术和常用典型器件为一体,既可供从事电子技术的广大科研和工程技术人员使用,是一本非常实用的仪表放大器应用手册;又可作为高等院校“模拟电子技术”和“模拟集成电路”等课程的教学参考书,以便与现代电子技术接轨。

本书第一章、第四章、第三章的大部分、第二章的§2.1、§2.2、§2.3、§2.7节及附录I由高光天编写。第二章的§2.4、§2.5、§2.6节和第三章的§3.2节由张金毅编写。附录I中共介绍11种最常用、典型的仪表放大器,其中AD624, AMP-01由张金毅编译;AD524, AD526, AD620, AD626, SSM-2141由高尚编译;AMP-02, SSM-2142由张春慧编译;AMP-05由刘荆璞编译;AD625由高山编译。本书主编高光天和副主编张金毅负责全书审校,刘荆璞和张春慧也参加部分审校工作。全书由高光天负责总纂定稿。编译原文中的疏漏及不妥之处已作了修改,某些公式还补充了推导过程。

本书初稿承蒙清华大学童诗白教授审阅,提出了许多宝贵意见。吉林工业大学戴逸松教授和李桂成副教授对本书的编写给予很大关注和支持,谨向他们致以深切的谢意。本书在编写、排版和校对过程中得到王志华、高凯平和殷守利等同志的帮助,谨此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中一定会有一些不妥之处,欢迎读者批评指教。

编 者

1994年8月

目 录

序

《ADI 产品应用技术丛书》出版说明

前言

第一章 仪表放大器基本原理

§ 1.1 概述	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 什么是仪表放大器	2
1.1.3 仪表放大器的特点是什么?	2
1.1.4 在何处使用仪表放大器?	3
§ 1.2 仪表放大器的外部特性	3
§ 1.3 由运算放大器构成的仪表放大器	4
1.3.1 由单运放减法器构成的仪表放大器	4
1.3.2 用输入缓冲器改进简单减法器	5
1.3.3 三运放仪表放大器设计考虑	7
1.3.4 基本的双运放仪表放大器	7
1.3.5 具有后置滤波的双运放仪表放大器	9
§ 1.4 单片仪表放大器	11
1.4.1 优于运放构成的仪表放大器	11
1.4.2 单片仪表放大器设计	11
1.4.3 优化的高性能单片仪表放大器	15

第二章 仪表放大器设计考虑

§ 2.1 外部共模抑制和建立时间的调整	16
§ 2.2 折合到输入端与折合到输出端误差	16
§ 2.3 热电偶效应	16
§ 2.4 干扰噪声	16
2.4.1 噪声的分类	17
2.4.2 假设条件与分析方法	17
2.4.3 形成干扰噪声的条件	17
2.4.4 系统噪声类型及其耦合机理	17
2.4.5 小结	21
§ 2.5 屏蔽与防护	21
2.5.1 电容性耦合噪声屏蔽	21
2.5.2 电感性耦合噪声屏蔽	25
2.5.3 驱动屏蔽与防护	27
2.5.4 防护驱动器的使用	28
2.5.5 小结	28
§ 2.6 去耦与接地	29
2.6.1 运算放大器有四个端子	29
2.6.2 从差分到单端的转换	30

2.6.3 负电源去耦	31
2.6.4 正电源去耦	32
2.6.5 正反馈法	32
2.6.6 其它补偿	33
2.6.7 接地误差	33
2.6.8 接地问题的处理	34
2.6.9 仪表放大器的参考端	34
2.6.10 其它输入端	35
§ 2.7 电缆终端	37
第三章 仪表放大器应用	
§ 3.1 数据采集方面的应用	38
3.1.1 传感器接口应用	38
3.1.2 桥路的应用	39
3.1.3 软件可编程增益放大器	39
3.1.4 高性能数据采集仪表放大电路	41
3.1.5 高速数据采集电路	42
3.1.6 高速三运放仪表放大器	43
3.1.7 高增益、视频带宽的三运放仪表放大器	44
3.1.8 高分辨率模数转换器信号调节	44
§ 3.2 音频方面的应用	45
3.2.1 简化话筒前置放大器	45
3.2.2 电流加法器合成音频信号	46
3.2.3 失真度测量	46
3.2.4 改善音频前置放大器	48
§ 3.3 其它方面的应用	50
3.3.1 用叠层仪表放大器的方法降低噪声	50
3.3.2 零漂移仪表放大器	52
3.3.3 远程负载检测技术	52
3.3.4 13 位线性双向电流源	53
3.3.5 精密电压-电流转换器	54
3.3.6 斗链式缓冲器	54
3.3.7 仪表放大器作为常规运算放大器	55
第四章 仪表放大器选择	
§ 4.1 仪表放大器技术指标	57
§ 4.2 误差分析	61
§ 4.3 仪表放大器选择树	61
§ 4.4 仪表放大器选择指南	61
附录 I 常用仪表放大器	
• AD526 软件可编程增益仪表放大器	64
• AD524 精密仪表放大器	76
• AD620 低价格、低功耗仪表放大器	88
• AD624 精密仪表放大器	103
• AD625 可编程增益仪表放大器	115
• AD626 低价格、单电源差分放大器	127

• AMP-01 低噪声精密仪表放大器	138
• AMP-02 高精度 8 脚仪表放大器	158
• AMP-05 快速建立时间 JFET 输入仪表放大器	168
• SSM-2141 高共模抑制差分线路接收器	187
• SSM-2142 平衡线路驱动器	193
附录 I 仪表放大器代换指南	199
参考文献	200

第一章 仪表放大器基本原理

§ 1.1 概述

1.1.1 引言

一般来说,人们一谈起仪表放大器总是以仪表放大器不是运算放大器的话题开头。对于信息灵通的读者来说这是一种简捷的解释,然而对于信息比较闭塞的读者则是一种糟糕的说明。有些运算放大器被供货商称作仪表放大器,虽然有时它们被用在仪表方面,其实并非为仪表放大器。

一名工程师当需要设计一个带有增益的信号调节电路时,闪现在头脑中的第一个想法就是由现有的各种各样的低成本集成运算放大器所带来的极端的灵活性。对于一个给定的增益电路,运算放大器作为一种放大器

件,在功能上显然是不言而喻的。但是在干扰环境下,在要求高精度的应用中,常常要求对运算放大器电路增加一些价格较贵的附加电路,而且也要对器件的特性、制作工艺、检测仪器以及设计者的经验等提出相应的严格要求。

另一方面,现实世界远非理想的——温度的起伏,电噪声的存在,以及由物理定律决定的通过远程导线电阻所引起的电压降等等。此外,实际的传感器很难呈现零输出阻抗和理想的 $0 \sim 10V$ 范围输出。感应的、泄漏的和耦合的电磁干扰噪声,在某种程度上总是存在,而且是不可避免的。鉴于上述原因,研制一种专门用于放大精密测量信号而又优于运算放大器的一种新型放大器——仪表放大器则是十分必要的。

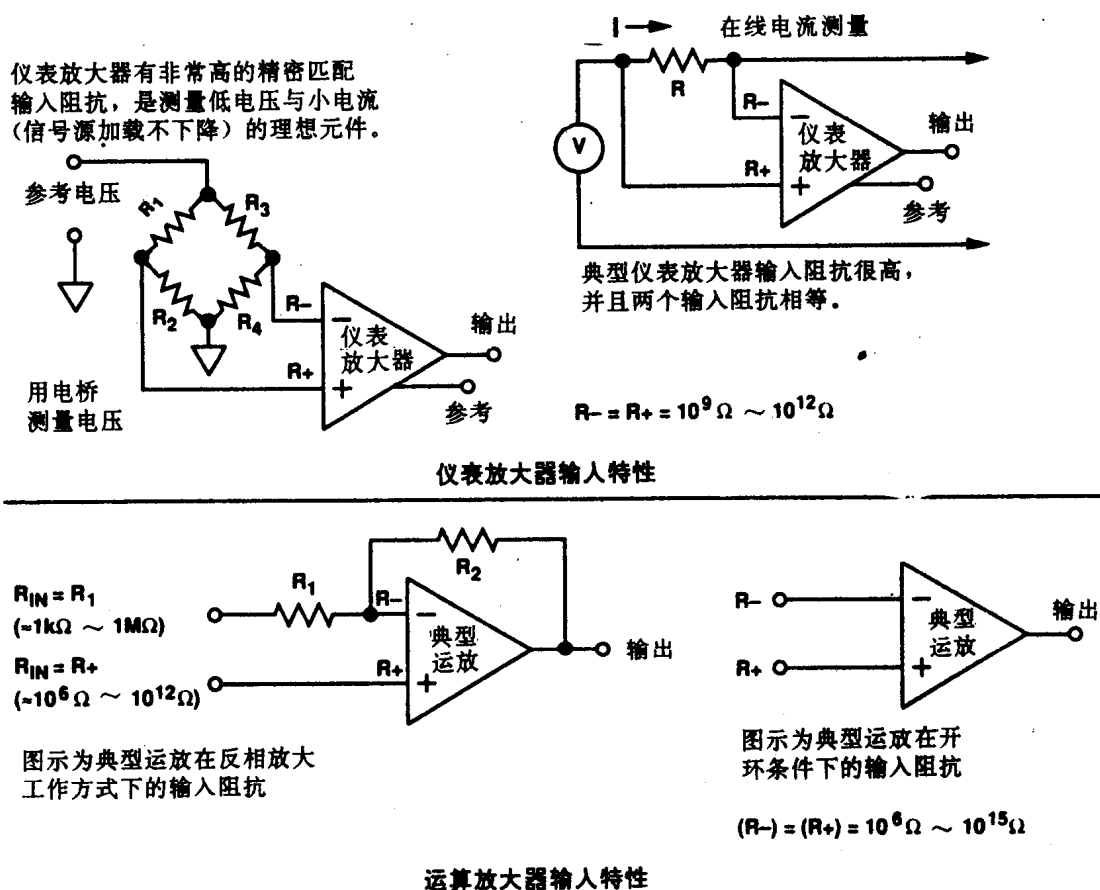


图 1.1 运算放大器与仪表放大器输入特性比较

1.1.2 什么是仪表放大器?

仪表放大器 (Instrumentation Amplifier) 是一种闭环增益组件, 具有差分输入和相对参考端的单端输出。通常情况下, 两个输入端阻抗平衡并且阻值很高, 典型值 $\geq 10^9 \Omega$ 。与运算放大器相同之处是仪表放大器输出阻抗很低, 通常仅有几毫欧; 与运算放大器不同之处是运算放大器的闭环增益是由其反相输入端与输出端之间连接的外部电阻决定, 而仪表放大器则使用与输入端隔离的内部反馈电阻网络。仪表放大器的两个差分输入端施加输入信号, 其增益既可由内部预置, 也可由用户通过引脚内部设置或者通过与输入信号隔离的外部增益电阻设置。图 1.1 对运算放大器与仪表放大器输入特性之间的差别作了比较。

1.1.3 仪表放大器的特点是什么?

如前所述, 仪表放大器是一种经过优化处理的精密差分电压放大器件, 试图用在恶劣环境条件下进行精密测量, 每当对有用信号的获取发生困难的时候, 则需使用仪表放大器。仪表放大器之所以具有如此独特的作用, 是由于它具有下述特点:

(1) 高共模抑制

仪表放大器的共模抑制比非常高, 以便使噪声的拾取和传感器遥测应用特性——地线压降都最小。

共模抑制是指抵消任何共模信号(两输入端电位相同)而放大差模信号(两输入端电位不同)的特性, 这是仪表放大器所提供的最重要的功能。共模增益 (A_{CM}) 是指输出电压变化与共模输入电压变化之比。这是指两个输入端共模电压从输入到输出的净增益(衰减)。例如, 共模增益为 $1/1000$ 的仪表放大器, 在其输入端为 $10V$ 的共模电压而在其输出端呈现出 $10mV$ 的变化。差模或常模增益 (A_D) 是指两个输入端施加(或跨接)不同的电压时输入与输出之间的电压增益。共模抑制比 (CMRR) 则是差模增益 (A_D) 与共模增益 (A_{CM}) 之比。

共模抑制通常规定为在给定频率下, 满度范围共模电压 (CMV) 变化, 并且规定不平衡源阻抗为 $1k\Omega$ 。共模抑制 (CMR) 是共模抑制比 (CMRR) 的对数表达形式, 即:

$$CMR = 20 \log_{10} CMRR$$

为了使仪表放大器有效工作, 要求既能放大两输入端微伏级差模信号而同时又能抑制几伏的共模信号。

这样就要求仪表放大器具有很高的共模抑制, CMR 典型值为 $70dB$ 至 $100dB$ 以上, 一般在高增益时

CMR 得到改善。虽然采用运算放大器构成仪表放大器, 按减法器连接, 也具有共模抑制, 但是用户必须提供精密匹配电阻。然而, 带有预调整电阻网络的单片仪表放大器却非常方便。

(2) 高输入阻抗

因为信号源阻抗可能很高和/或不平衡, 所以仪表放大器必须有一个极高的输入阻抗。仪表放大器的同相和反相输入端的阻抗都很高而且相互十分匹配, 其典型值为 $10^9 \Omega$ 至 $10^{12} \Omega$ 。

(3) 低噪声

由于仪表放大器必须能够处理非常低的输入电压, 故仪表放大器不能把自身的噪声加到信号上。在 $1kHz$ 条件下, 折合到输入端 (RTI) 的输入噪声要求小于 $10nV/\sqrt{Hz}$ 。

(4) 低线性误差

输入失调和比例系数误差能通过外部的调整来修正, 但是线性误差是器件的固有缺陷, 并且它不能由外部调整来消除。所以低线性误差必须由仪表放大器生产厂家的结构设计来保证。线性误差通常规定为在正与负满度电压及在零电压条件下, 厂家测量仪表放大器的误差占满度的百分数。对于一个高质量的仪表放大器典型的线性误差为 0.01% , 有的甚至低于 0.0001% 。

(5) 低失调电压和低失调电压漂移

正如使用运算放大器一样, 仪表放大器必须有低的失调电压。由于一个仪表放大器由两个独立的部分组成: 输入级和输出级。总输出失调等于输入失调乘以增益加上输出失调。虽然初始的失调电压通过外部来调零, 但失调电压漂移则不能通过调整来消除。与失调电压一样, 仪表放大器的失调漂移也由两部分组成, 即输入部分和输出部分, 每一部分都对总误差起作用。当增益增加时, 输入级的失调漂移成为主要的失调误差源。输入和输出失调其典型值分别为 $100\mu V$ 和 $2mV$ 。

(6) 低输入偏置电流和低失调电流误差

正如使用运算放大器一样, 仪表放大器也有偏置电流流入和流出它的输入端: 双极型输入运算放大器的基极电流, FET 输入运算放大器的栅极电流。这个偏置电流流过不平衡的信号源电阻将产生一个失调误差。应当注意, 如果输入源电阻很大, 例如用交流输入耦合而没有一个电阻性的通路返回到电源地, 输入共模电压将上升直到放大器处于饱和状态。为防止这一问题, 通常用一个高阻值的电阻把每个输入端和地相连。输入失调电流误差被定义为流过两个输入端的偏置电流之间的失

配程度。双极型输入仪表放大器的偏置电流典型值为 1nA 至 $0.5\mu\text{A}$ ；而 FET 输入的仪表放大器在常温下的偏置电流典型值为 50pA 。

(7) 充裕的带宽

对于特定的应用，仪表放大器必须提供足够的带宽。因为典型的单位增益小信号带宽是在 500kHz 到 4MHz 之间，在低增益时的性能容易得到保证，但是在较高增益的情况下带宽则成为较大的问题。

(8) 性能稳定

在工作条件发生变化的情况下，例如温度变化和电源电压变化，仪表放大器的关键参数极其稳定。这是因为对单片仪表放大器特性起关键作用的所有元件做在器件内部，外部只有决定增益的单个电阻或电阻对。这样厂商可以优化，赋予并且保证元件的技术特性，而用户只需根据其性能等级进行选择应用，而无需给出具体的使用精度或专门设计。

(9) 具有“检测”端和“参考”端

仪表放大器的独特之处还在于带有“检测”(sense)端和“参考”端，允许远距离检测输出电压而内部电阻压降和地线压降(IR)的影响可减至最小。对于低电流非远端负载，检测端可直接连到输出端，参考端可连接到电源地。检测端和参考端还有另外一些用法，将在本书“仪表放大器应用”一章加以讨论。

(10) 使用方便

仪表放大器属于真正的差分放大器，两个输入端允许直接与“浮动”信号源连接，仅检测两个输入端的电压差。由于仪表放大器准确度的获得是以牺牲其灵活性为代价的，它专门设计成为电压放大器，而不是兼顾积分、微分、整流或其它非电压放大功能的通用放大器。而且又把关键元件做在单片仪表放大器的内部，所以使用非常方便。只要用一只电阻或电阻对便可设置所需要的增益。厂商提供增益公式或传递函数以便允许用户对所需设置的增益选择提供所需电阻值。必要时厂商也给出对某个电阻或电阻对的特殊要求。

1.1.4 在何处使用仪表放大器？

(1) 数据采集

仪表放大器的基本用途是在噪声环境下对传感器输出的弱信号进行放大。对压力或温度传感器信号的放大是仪表放大器的典型应用。常规的桥路应用包括使用负载传感器进行应变力和重量测量及使用电阻测温计(RTD)的温度测量。

(2) 医用仪器

仪表放大器也广泛用于医疗设备之中，例如心电图

和脑电图的监视器及血压监视器等生理传感器。

(3) 音频方面的应用

由于仪表放大器具有高的共模抑制能力，所以在音频方面得到广泛应用，例如话筒信号前置放大器、电流加法器合成音频信号等，即把仪表放大器用于在噪声环境下提取微弱信号及最大限度地减小由于接地环路引起的失调和噪声。

(4) 高速信号调节

由于当今视频数据采集系统对速度和精度要求的提高，对高频带的仪表放大器的要求不断地增加，尤其是在要求进行失调修正和输入缓冲的 CCD 成像设备领域。使用带校正的双采样技术对 CCD 图像进行失调修正，用两个采样保持放大器监视图像和参考电平并把这些信号送入一个仪表放大器，从而获得一个经校正的直流输出。

§ 1.2 仪表放大器的外部特性

图 1.2 为基本的仪表放大器功能框图。

由于一个理想的仪表放大器仅检测输入端的电压差，所以任何共模信号（即对两个输入端有相同电位的信号），例如噪声和地线中的电压降，都在其输入级被抑制，而不进行放大。

通常用一个电阻或电阻对设置仪表放大器的所需增益，所以生产厂家会提供一个传递函数或增益方程为用户计算所需的电阻值。

仪表放大器的输出有它自己的参考端，可用来驱动一个对地负载，就像那些在仪表中通常出现的情况那样。图 1.2 所示为输入地和输出地被同时汇聚到一点上，并在该点与电源“地”相联。这种星形接地对减小电路中的接地环路是一种十分有效的方法；但一些残留的共模地电流仍然存在，这些电流流过 R_{CM} 将产生共模电压误差 V_{CM} 。仪表放大器依靠高共模抑制特性将在放大差分信号的同时抑制 V_{CM} 和任何共模噪声。

当然，与运算放大器一样，对仪表放大器也必须提供电源。通常仪表放大器在规定范围内工作时，对它供电的电源为一个双电源，而对某些仪表放大器仅需一个单电源。

一个仪表放大器可以用一个或多个运算放大器构成，也可设计成单片式结构，两种方法各有优缺点。通常用运算放大器构成的仪表放大器可在较低的价格上提供较宽的适应性，有时能提供单片式结构无法达到的性能，例如在甚高频带方面的应用。相反，单片式结构提供了功能完整、规格齐全的仪表放大器，在通常情况下单片式结构在生产时已经调整到很高精度。我们将首

先讨论用运算放大器设计构成的仪表放大器。

§ 1.3 由运算放大器构成的仪表放大器

虽然仪表放大器的设计方式有多种,但这些设计方式大多数可分为两类。最常用的结构是由几个相互连接的运算放大器和一个精密电阻网络组成。这种方法在模块式和混合式仪表放大器中非常流行,其中最实用的设计是使用最少量的元件。在另一类设计中,不是使用运算放大器而是使用基本有源电路元件如差分电路和可控电流源以及反射器,这便消除了所有不必要的或多余

的特性,势必减少有源器件(三极管)的数量,以及减少了对精密电阻匹配的依赖性。这种方法最常用在单片仪表放大器的设计,这里成本与芯片尺寸成反比。有些老的模块或仪表放大器也使用这种技术,这是因为相当精密度的集成运算放大器仅在近年来才达到实用阶段。新的模块式仪表放大器也可以使用这一方法,因为尽管在低增益下线性度有些损失,在高增益下线性误差趋于降低。下面先讨论由运算放大器构成的仪表放大器,然后再讨论单片式仪表放大器。

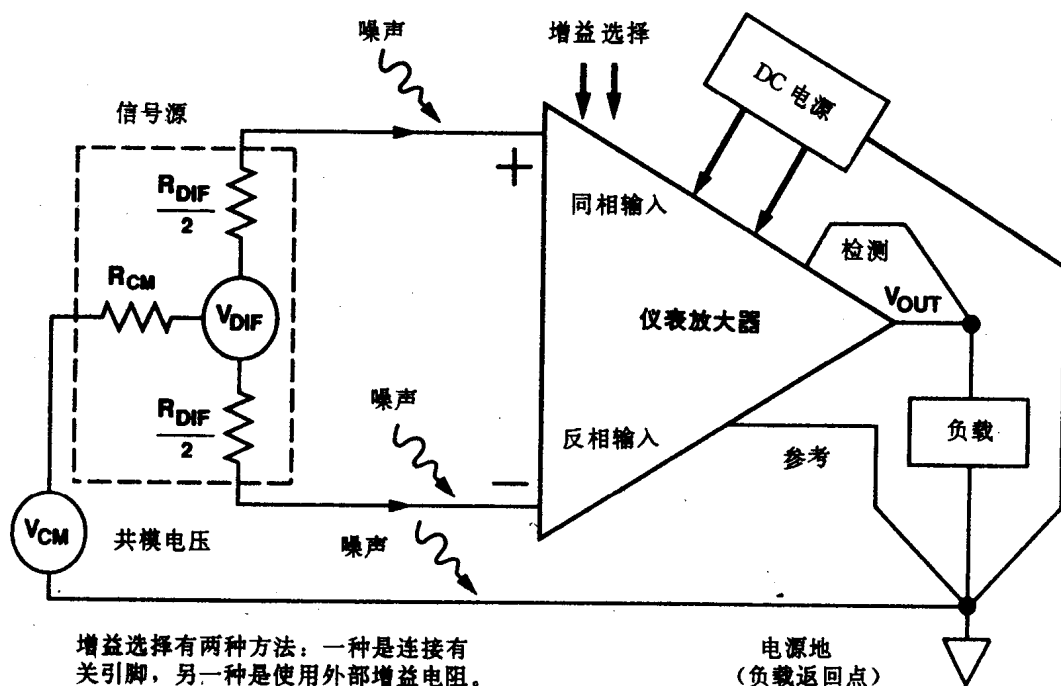


图 1.2 基本的仪表放大器

1.3.1 由单运放减法器构成的仪表放大器

用运算放大器构成差分增益模块的最简单的方法如图 1.3 所示,并且根据叠加原理可推出该电路的传递函数。

对于 $V_{IN\#2}$ ($V_{IN\#1}$ 接地), 输出为:

$$V_{OUT2} = V_{IN\#2} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

对于 $V_{IN\#1}$ ($V_{IN\#2}$ 接地), 输出为:

$$V_{OUT1} = -V_{IN\#1} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

通过叠加得:

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_{OUT2} + V_{OUT1} \\ &= V_{IN\#2} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) - V_{IN\#1} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned}$$

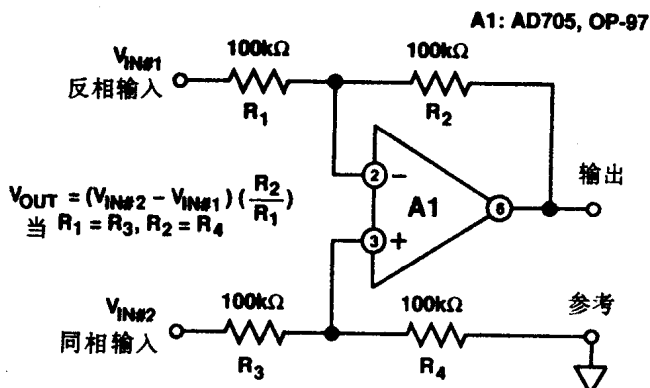


图 1.3 单运放仪表放大器电路图

如果 $R_1=R_3$, $R_2=R_4$, 则

$$V_{OUT} = (V_{IN\#2} - V_{IN\#1}) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

由此我们得到了一个简单的差分电压放大器。虽然这一电路确实提供了仪表放大器功能,即放大差分信号的同时抑制共模信号,但也有些严重的缺陷。首先,同相和反相输入的阻抗相当小而且不相等,这就要求驱动该放大器的信号源具有非常低的阻抗。同时,在这一例子中反相输入的阻抗为 $100k\Omega$ (因为 R_1 直接连到放大器的求和点“虚地”上),而同相输入阻抗则为它的两倍,等于 $200k\Omega$ 。另外同相输入的信号将通过 $100k\Omega$ 电阻以 0.5 的增益去驱动反相输入。另外,这一电路要求四只电阻必须精密地按比例匹配以保持优良的共模抑制。

当 $V_{IN\#1} = V_{IN\#2} = V_{IN}$ 时,

$$V_{OUTCM} = V_{OUT}$$

$$= V_{IN} \left[\left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right]$$

如果我们要增益等于 1, 则所有电阻必须相等。在这些电阻中只要有一个 0.1% 失配, 共模抑制便下降到 66dB。可以推导如下:

设 $R_1=R_2=R_3=R$, $R_4=1.001R$,

$$V_{OUT} = V_{IN} \left[\left(\frac{1.001R}{2.001R} \right) \left(\frac{2R}{R} \right) - \frac{R}{R} \right] = 0.0005V_{IN}$$

$$CMR = 66dB$$

尽管有些缺点, 这种简易仪表放大器在高性能仪表放大器中作为一个组成部件还是很有用的。它也可作为

一个独立的功能电路并且非常适合于视频和其它高速方面的应用, 或者低频率、高共模电压的应用, 同时输入电阻还为该放大器提供了输入保护。单片仪表放大器, 例如 ADI 的 AD626 及 AMP-03, 也借鉴了其内部预先调整的电网络, 在这两种器件的设计中均使用了改进的简单减法器。

由于简单减法器电路对加在运算放大器上的电压进行了分压, 故该电路的共模输入范围可增加至单个运算放大器以外的范围。减法器电阻匹配通过在 AD626 和 AMP-03 内部使用隔离的氧化薄膜电阻网络得到了保证。因此, 这两种器件不仅通过它们自己内部预调整电阻使价格下降, 而且还可用在输入电压等于或超过电源电压的场合。例如, 当电源电压为 $\pm 15V$ 时, 该减法器能测量高至 $\pm 20V$ 共模电压的信号。

1.3.2 用输入缓冲器改进简单减法器

在简单减法器电路前加高输入阻抗的缓冲放大器是对减法器电路作重要改进的一种有效方法。图 1.4 所示的是用三只运算放大器组成的仪表放大器电路。

这个电路提供匹配的高阻抗输入, 使输入源阻抗对电路共模抑制的影响为最小。使用双运算放大器作为双输入缓冲放大器是一种最佳结构, 因为在整个温度范围内两个运算放大器彼此之间有良好的 consistency。虽然这个电路的电阻值与图 1.3 所示的电路不同, 但这两个电路的传递函数完全相同。

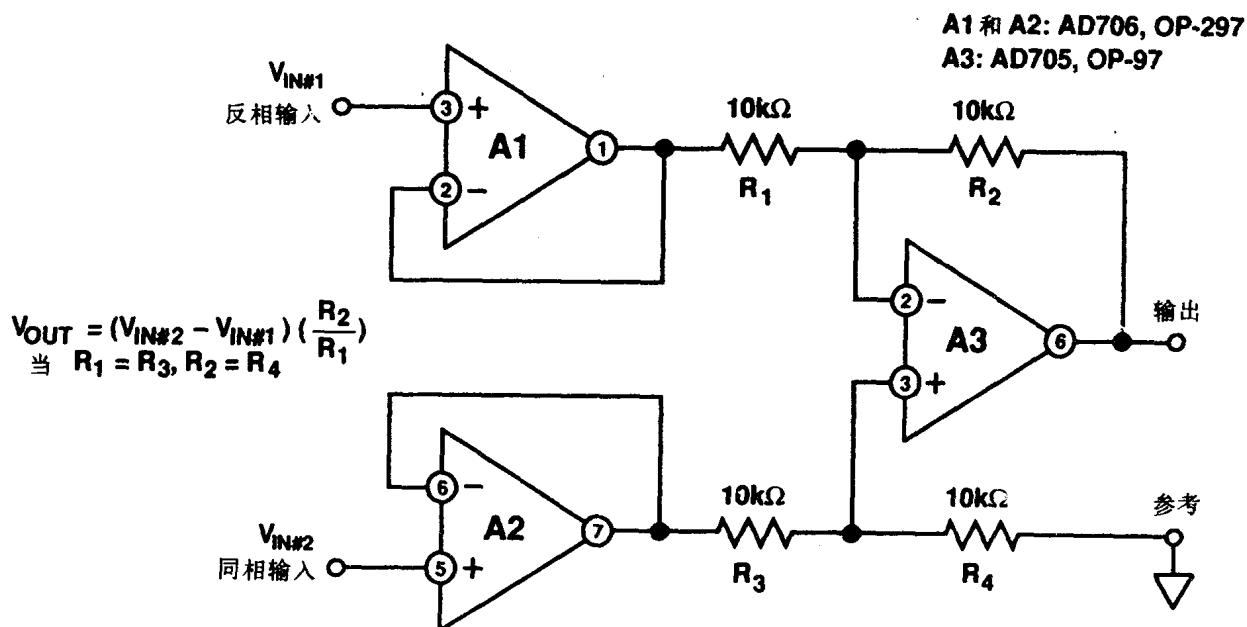


图 1.4 输入缓冲形式的减法器电路

图 1.5 所示的电路是对上述电路的进一步的改进：现在的输入缓冲器具有增益作用，从而使电路更加灵活。该电路的传递函数很容易推导。图中 A₁ 和 A₂ 两个输入缓冲器都接成同相放大器，其输出分别为

$V_1 = V_{IN\#1} (1 + R_5/R_6)$ 和 $V_2 = V_{IN\#2} (1 + R_8/R_7)$ 。再按照图 1.3 所示电路传递函数的推导方法，进行类似推导，可得：

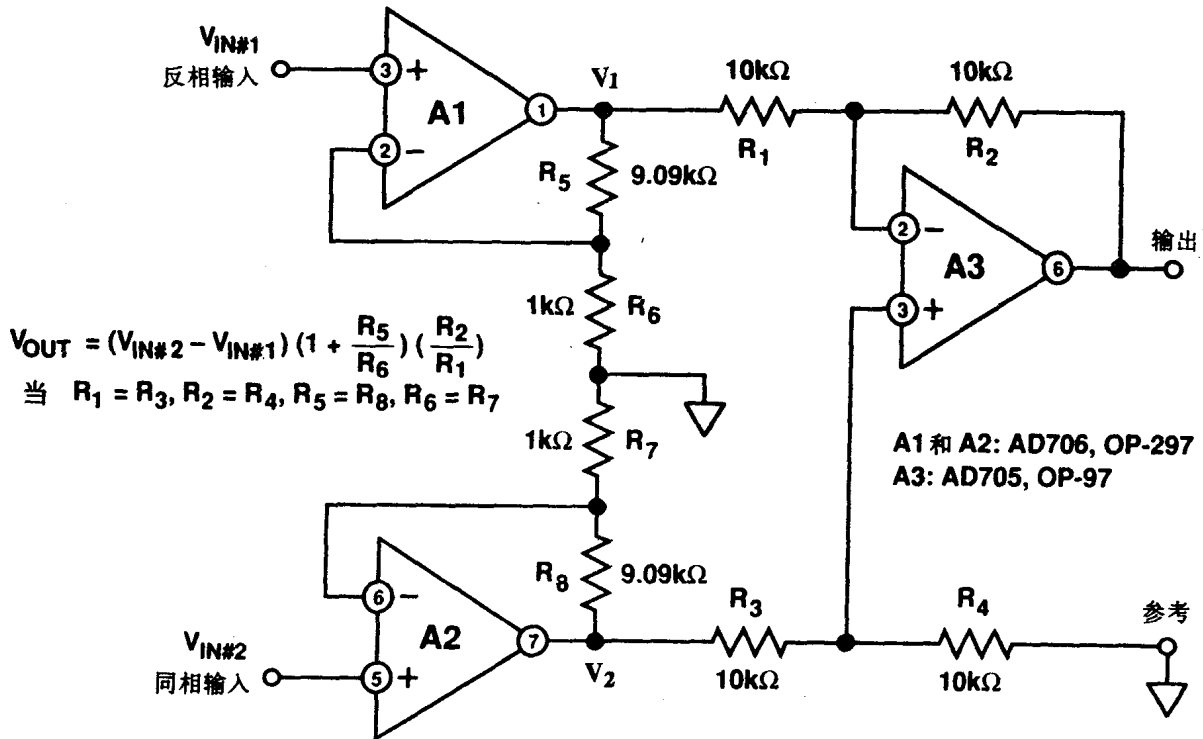


图 1.5 具有增益缓冲放大器的缓冲减法器电路

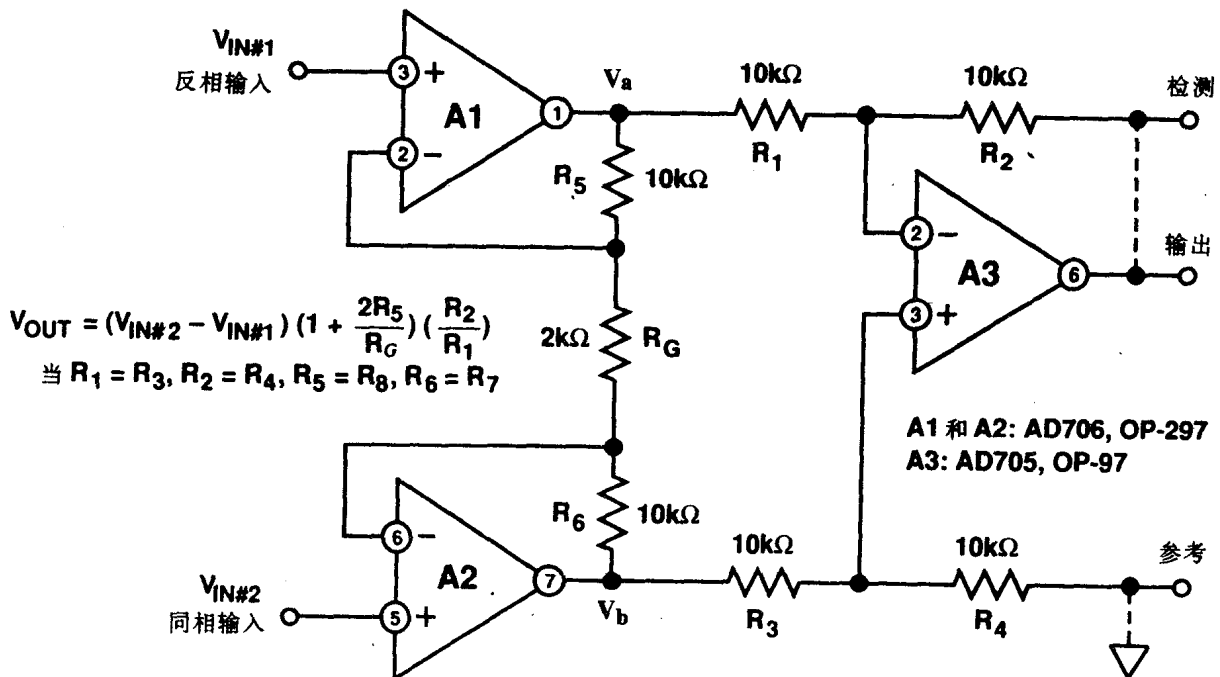


图 1.6 典型的三运放仪表放大器电路

$$V_{OUT} = V_{IN\#2} \left(1 + \frac{R_8}{R_7} \right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_{IN\#1} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

如果 $R_5 = R_8$, $R_6 = R_7$ 及 $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, 则

$$V_{OUT} = (V_{IN\#2} - V_{IN\#1}) \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

在图 1.5 所示的电路中差分信号增益增加的同时, 共模信号增益也增加。图 1.6 所示的电路为改进设计的最终结果, 现已成为仪表放大器设计中最通用的结构。

这种典型的三运放仪表放大器电路是对图 1.5 带缓冲的减法器电路巧妙的改进。在这种结构中, 单个增益电阻 R_G 连接在两个输入缓冲器求和点上, 取代了图 1.5 所示电路的 R_6 和 R_7 , 此时电路的差分增益的改变可通过改变这一个外加电阻来实现。一旦这个减法器电路自身的匹配电阻比率被设定后, 在改变增益时不再对电阻匹配有任何要求。

现在推导该电路的传递函数。对 A_1 和 A_2 应用叠加原理, 求 V_a 和 V_b 。

当 $V_{IN\#2} = 0$ 时,

$$V_a = V_{IN\#1} (1 + R_5/R_G)$$

$$V_b = -V_{IN\#1} (R_6/R_G)$$

当 $V_{IN\#1} = 0$ 时,

$$V_a = -V_{IN\#2} (1 + R_5/R_G)$$

$$V_b = V_{IN\#2} (1 + R_6/R_G)$$



所以

$$V_a = V_{IN\#1} (1 + R_5/R_G) - V_{IN\#2} (R_5/R_G)$$

$$V_b = V_{IN\#2} (1 + R_6/R_G) - V_{IN\#1} (R_6/R_G)$$

再对 A_3 应用叠加原理得:

$$V_{OUT} = V_b \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_a \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

将前面求得的 V_a , V_b 代入上式, 并且当 $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$ 和 $R_5 = R_6 = R_F$ 时, 可推出传递函数为:

$$V_{OUT} = (V_{IN\#2} - V_{IN\#1}) \left(1 + \frac{2R_F}{R_G} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

与前面的电路相同, 图 1.6 中的 A_1 和 A_2 运算放大器为输入电压缓冲器。由于电阻 R_G 连接于这两个放大器的求和点之间, 当一个差分电压被加到仪表放大器的输入端时, 整个输入电压都呈现在 R_G 两端。由于 R_G 两端的电压等于 V_{IN} , 所以流过 R_G 的电流等于 V_{IN}/R_G , 因此输入信号将通过放大器 A_1 和 A_2 获得增益并得到放大。然而须注意的是对加到放大器输入端的共模电压在 R_G 两端具有相同的电位, 从而不会在 R_G 上产生电流。由于没有电流流过 R_G (也就无电流流过 R_5 和 R_6), 放大器 A_1 和 A_2 将作为单位增益跟随器而工作。因此,

共模信号将以单位增益通过输入缓冲器, 而差分电压将按 $[1 + (2R_F/R_G)]$ 的增益系数被放大。

所有这些至少在理论上表明, 用户可以得到所需求的前端增益 (由 R_G 来决定), 而不增加共模增益和误差, 即差分信号将按增益成比例增加, 而共模误差则不然, 故增益 (差分输入电压/共模误差电压) 的比率将增大。因此共模抑制比 (CMRR) 理论上直接与增益成比例增加, 这是一个非常有用的特性。

由于结构上的对称性, 输入放大器的共模误差最终将在输出级的减法器中被消除。这些特性便是这种结构得到广泛应用的解释。

1.3.3 三运放仪表放大器设计考虑

三运算放大器组成的仪表放大器可以由场效应晶体管 (FET) 或双极型输入的运算放大器构成。FET 输入的运算放大器有非常低的偏置电流, 通常适用于很高的源阻抗 ($>10^6 \Omega$) 的场合。但 FET 放大器通常共模抑制 (CMR) 较低、失调电压较大, 并且其失调漂移也大于双极型的放大器。对于给定的电源, FET 运放的转换速率较高。双极型输入级的放大器与 FET 输入的放大器相比有较高的 CMR 和较低的输入失调电压漂移。超 β 双极型输入级具有 FET 和双极型的许多优点, 它甚至比 FET 器件有更低的输入偏置电流 (I_B) 漂移。

对于使用三运放结构仪表放大器的粗心设计者, 一个共同而经常忽视的问题是仪表放大器工作在高增益时, 其共模电压 (CMV) 范围降低。图 1.7 所示为一个三运放结构仪表放大器在增益为 1000 时的电路图。

在这个例子中, 输入放大器 A_1 和 A_2 工作增益为 1000 情况下, 而输出放大器为单位增益。这就意味着, 每个输入放大器的输出电压将等于输入电压峰-峰值的一半乘以 1000, 加上输入端的共模电压 (共模电压仅在单位增益时通过, 而与差分增益无关)。因此, 如果一个 10mV 的差分信号加到放大器的输入端, 那么放大器 A_1 的输出将等于 +5V 加上共模电压, 放大器 A_2 的输出将为 -5V 加上共模电压。如果放大器在 $\pm 15V$ 电源下工作, 则通常留有 7V 左右的余量, 从而允许有一个 8V 的共模电压, 而不是在单位增益时的典型共模电压满度值 12V。增益越高或电源电压越低都将进一步减小共模电压范围。

1.3.4 基本的双运放仪表放大器

双运放结构仪表放大器是一种特殊类型的仪表放大器。它在少数有限的应用中非常有用, 但由于有严重

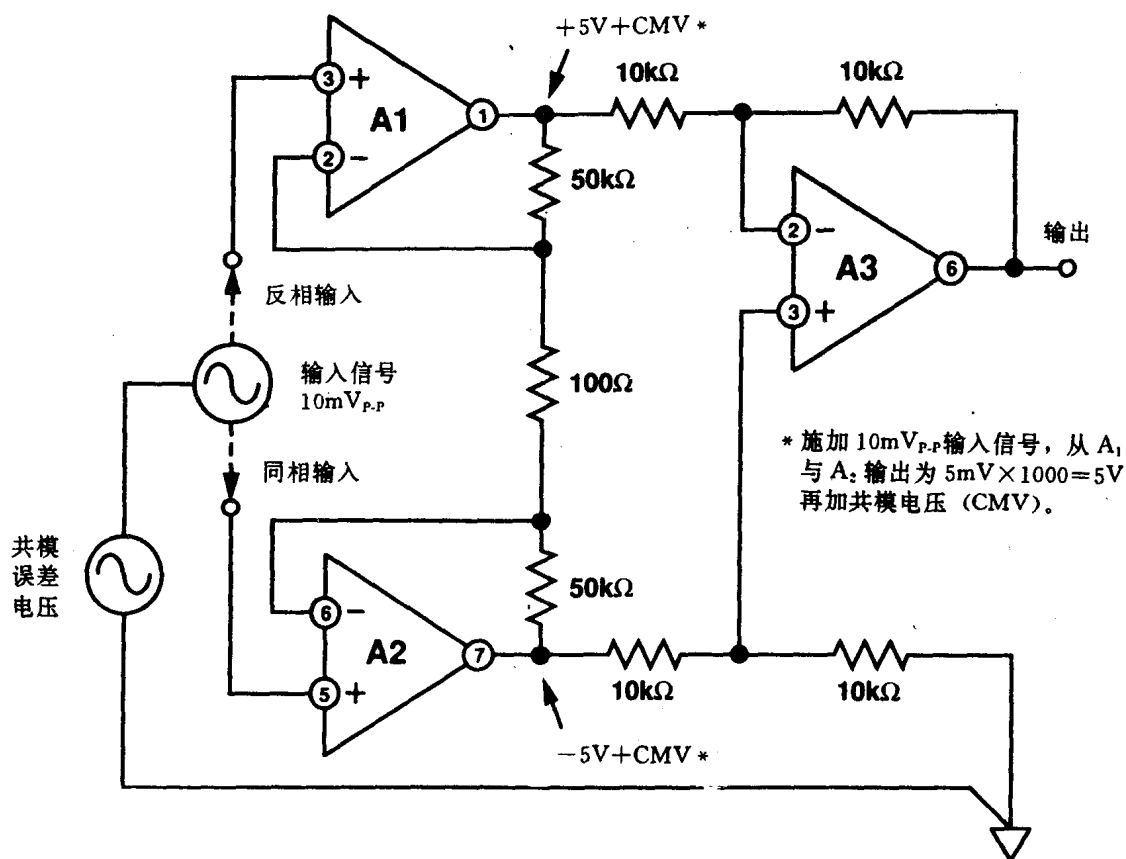


图 1.7 三运放仪表放大器呈现共模电压范围下降

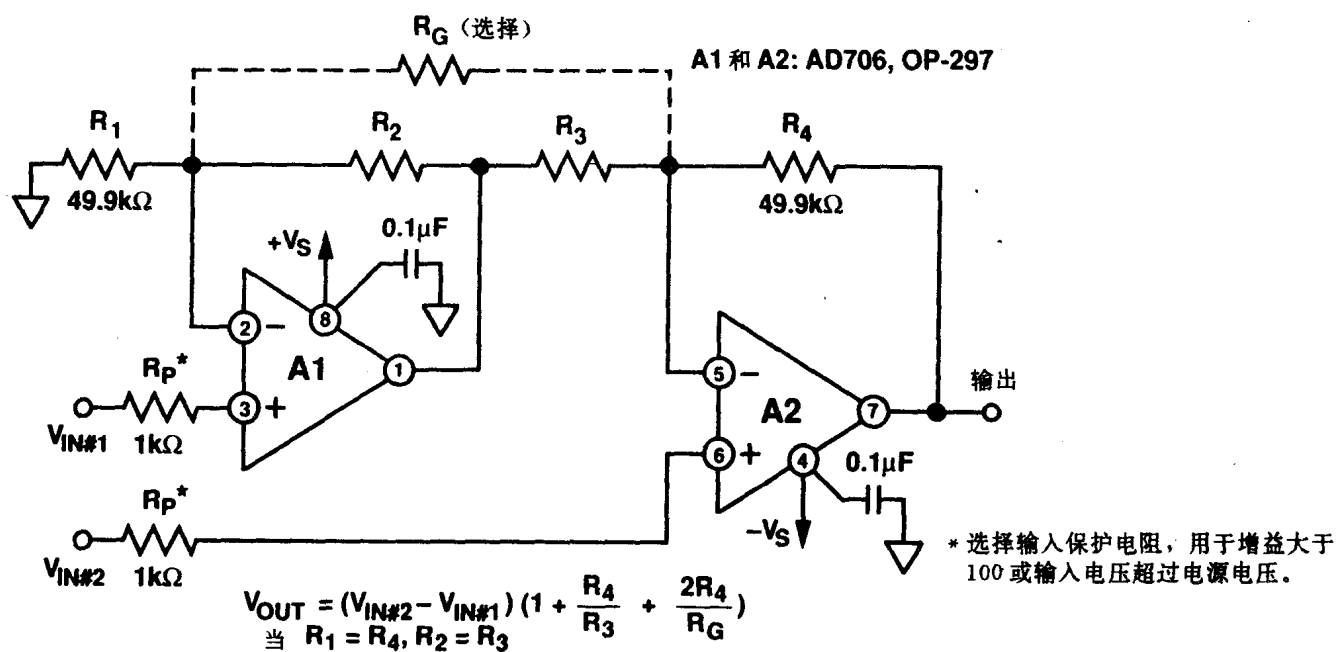


图 1.8 双运放仪表放大器