



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

检测系统数字化 测试技术

姚敏 王海涛 赵敏 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014010883

TN707
08

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

检测系统数字化测试技术

姚 敏 王海涛 赵 敏 编 著
王欣海 主 审



机械工业出版社



北航

C1697018

TN707
08

288010410

本书介绍了检测系统中电子电路的分析和设计方法,全书共11章,主要内容包括绪论、运算放大器、信号调理电路、锁相环电路、模拟开关、采样/保持器、D/A转换器、A/D转换器以及抗干扰技术等。本书特别注重检测电路的新技术、新器件和实际应用中的工程问题。

本书可以作为自动化专业、测试计量技术与仪器等相关专业本、专科学生的教学用书和参考用书,也可以作为从事测试技术的专业技术人员的参考用书。

为方便教师教学,本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作为教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件至 llm7785@sina.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

检测系统数字化测试技术/姚敏等编著. —北京:机械工业出版社,2013.8
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-43538-9

I. ①检… II. ①姚… III. ①电子电路-电路测试-自动检测系统-高等学校-教材 ④IV. ①TN707

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第177419号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏 韩 静

责任校对:纪 敬 封面设计:赵颖喆

责任印制:张 楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·404千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43538-9

定价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前言

本书的前身是《数字化测试技术》，数字化测试技术的出现为检测技术带来了巨大的技术进步，测试的速度更快、精度更高、处理的能力更强。光阴荏苒，这些年来科学技术已经发生了巨大的变化，数字化概念早已深入人心，数字化测试已经渗透到了测试系统、仪器仪表的各个角落。其实世界本身就不是连续的，而是量化的，从这个角度来说数字化处处都在，数字化测试是测试技术发展的必然选择。检测系统说到底也是人们认识世界的重要手段，是信息技术中的关键技术。检测技术中包含了传感器技术、数据采集与转换技术、信号调理技术等，今天的检测系统又是和计算机技术紧紧相连的，计算机技术的发展和嵌入式系统的应用，极大地推动了检测系统的发展。检测系统的数字化测试技术可以提高人们认识世界的能力，为生产过程、工业自动化、航空航天技术、科学研究提供必需的信息资源，为计算机控制提供信息来源。本书中所讨论的技术可以用于生产过程自动化、检测仪器与系统的设计、物联网、生物医学仪器等方方面面。

本书适应了现代测试技术发展的要求，在保留测试技术数据化方面的基本知识的同时，引入了当代测试技术上的新技术、新成就。通过对本书的学习可以帮助读者掌握测试技术的基本概念、信号调理电路的设计、数据的采集和处理、干扰的屏蔽等方面的相关知识，为测试系统和测试仪表的设计打下基础。

本书共分 11 章，各章的主要内容简要介绍如下：

第 1 章介绍了检测系统的基本概念、检测系统的基本组成，同时对检测系统的发展趋势做了描述。

第 2 章从工程应用角度较全面地对运算放大器做了介绍，其中，运算放大器的性能指标是了解运算放大器的依据，也是选择运算放大器的依据，本章对工程中常用的重要运算放大器电路做了仔细分析，本章内容是使用放大器的必备知识。

第 3 章对信号调理电路做了介绍，从传感器到数据转换器，中间的信号调理过程是非常重要的一个环节，也是测试电路质量好坏的保障，本章对有源滤波器电路、精密检波电路、积分器电路等做了介绍和分析。

第 4 章从测试系统的需求角度介绍了锁相环电路，对锁相环电路的工作原理和应用实例进行了分析。

第 5 章介绍了模拟开关。模拟开关似乎很简单，但在信号转换电路中是不可或缺的器件，本章介绍了模拟开关的主要技术指标、组成特点和应用方法。

第6章介绍了采样/保持电路。作为A/D转换电路的前置电路,采样/保持电路有利于提高系统的采集速度和信号的质量。本章对采样/保持器的主要技术指标、常用的采样/保持器电路做了介绍,本章的几个实例对应用采样/保持器是很有帮助的。

第7章介绍了D/A转换器。D/A转换器通常作为计算机的输出电路驱动控制系统,它也是一类A/D转换器的重要组成部分。本章对于D/A转换器指标的介绍,工作原理的分析和应用实例的介绍为读者掌握D/A转换器提供了帮助。

第8章是数字化转换的重要章节。本章介绍了5种类型的A/D转换原理,代表了目前最主流的A/D转换方案。本书对每一种A/D转换都做了仔细的分析,并配有应用实例,读者可以通过本章的学习牢固掌握A/D转换的工作原理,在实际应用中选择合适的A/D转换器电路。

第9章专门介绍了D/A转换器和A/D转换器一些特殊应用,它们既可以作为进一步了解D/A转换器和A/D转换器工作原理的实例,也可以作为实际电路在测试系统中应用。

第10章介绍了频率量的测量。本章的分析原理和测量方法不仅可以用于分立元件组成的电路,也可以用于微机系统的频率测量和周期测量方法中。

第11章介绍了测试系统中的抗干扰方法。本章的内容可以帮助读者把好测试电路设计中抗干扰这道关,为设计一个可靠稳定的测试系统奠定基础。

本书由姚敏老师主编并制定了本书的主要编写内容,其中第1~4章由姚敏老师编写;第5~10章由王海涛老师编写;第11章由赵敏老师编写。王欣海老师主审并对本书内容提出了许多宝贵意见。书中的主要内容是作者多年来教学、科研工作的经验积累,参考了有关文献并结合了原有讲义中的基本概念编写而成的。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言	1
第1章 绪论	1
1.1 检测系统与测试技术	1
1.2 检测系统的基本组成	2
1.3 检测系统的发展趋势	3
第2章 运算放大器	6
2.1 概述	6
2.1.1 集成运算放大器的 发展与分类	6
2.1.2 集成运算放大器的主要参数	6
2.2 运算放大器应用基础	10
2.2.1 理想运算放大器	10
2.2.2 实际运算放大器的误差分析	12
2.2.3 运算放大器的调零电路设计	21
2.2.4 运算放大器保护电路的设计	23
2.3 测量放大器	27
2.3.1 测量放大器的增益	28
2.3.2 失调参数的影响	29
2.3.3 测量放大器的抗共模干扰能力	30
2.3.4 测量放大器的应用	31
2.3.5 测量放大器集成电路	32
2.4 动态自动校零运算放大器	35
2.4.1 动态校零工作原理	35
2.4.2 动态自动校零集成运 算放大器 ICL7650	36
2.5 隔离放大器	39
2.5.1 变压器耦合隔离放大器	40
2.5.2 光耦隔离放大器	42
2.5.3 电容耦合隔离放大器	45
2.6 电荷放大器	49
2.6.1 电荷放大器的基本原理	49
2.6.2 电荷放大器的特性分析	50
2.6.3 电荷放大器的应用	51
【习题】	52

第3章 信号调理电路	55
3.1 有源滤波器	55
3.1.1 有源滤波器的种类和 基本性能	55
3.1.2 二阶有源滤波器	58
3.1.3 开关电容滤波器	61
3.1.4 开关电容滤波器集成器件	63
3.2 精密整流电路	65
3.2.1 概述	65
3.2.2 精密半波整流电路	66
3.2.3 精密全波整流电路	69
3.2.4 峰值整流电路	72
3.2.5 整流电路的应用	73
3.3 鉴相电路	74
3.3.1 概述	74
3.3.2 相位/脉宽(转换式) 鉴相器	74
3.3.3 相位/数字转换器	77
3.3.4 模拟鉴相电路	78
3.4 调制与解调	79
3.4.1 幅值调制	80
3.4.2 频率调制	81
3.4.3 相敏检波电路	83
3.5 积分器	86
3.5.1 积分器的基本工作原理	86
3.5.2 积分器误差分析	87
3.6 电压比较器	90
3.6.1 概述	90
3.6.2 比较器的应用	91
3.6.3 集成电压比较器	96
【习题】	97
第4章 锁相环电路	102
4.1 锁相环简介	102
4.2 集成锁相环的工作原理	103

4.3	CD4046 的典型应用	107	8.3.2	双积分式 A/D 转换器的特性与 参数选择	168
4.4	频率合成器	109	8.3.3	集成化双积分式 A/D 转换器	171
第 5 章	模拟开关	112	8.4	电压/频率转换式 A/D 转换器	183
5.1	模拟开关简介	112	8.4.1	电荷平衡式 V/f 转换工 作原理	184
5.2	电子模拟开关	113	8.4.2	集成化 V/f 转换器	185
5.2.1	模拟开关的特性	113	8.5	并行式 A/D 转换器	190
5.2.2	集成模拟开关	113	8.6	$\Sigma - \Delta$ 型 A/D 转换器	191
5.2.3	模拟多通道开关电路	115	8.6.1	$\Sigma - \Delta$ 型 A/D 转换原理	191
5.3	模拟开关应用需注意的问 题及其工程应用	118	8.6.2	集成化 $\Sigma - \Delta$ 型 A/D 转换 器及应用	195
【习题】		122	【习题】		199
第 6 章	采样/保持器	124	第 9 章	D/A 转换器与 A/D 转换器 的典型应用	207
6.1	概述	124	9.1	数字控制高精度、高稳定线 性电路	207
6.2	采样/保持器的基本结构及 工作原理	128	9.2	数字波形发生器电路	211
6.3	集成采样/保持器	131	9.3	单板式数字仪表	214
6.4	采样/保持器的应用	133	9.4	利用锁相时钟提高数字多用表抑 制串模干扰的能力	217
6.5	采样/保持器使用中应注意 的问题	134	【习题】		218
6.5.1	采样/保持器选用时应 注意的问题	134	第 10 章	准数字信号的数字转换	220
6.5.2	电路设计中应注意的问题	135	10.1	概述	220
【习题】		136	10.2	频率/数字转换	220
第 7 章	D/A 转换器	139	10.3	周期、脉宽及时间间隔/数 字转换	221
7.1	量化与量化误差以及 D/A 转换 器的技术指标	139	10.4	频率比测量	223
7.2	线性 D/A 转换原理	142	【习题】		223
7.3	集成化 D/A 转换器	147	第 11 章	检测系统的抗干扰措施	225
7.4	D/A 转换器接口的隔离	149	11.1	干扰的来源	225
【习题】		150	11.1.1	干扰的分类	225
第 8 章	A/D 转换器	154	11.1.2	干扰的耦合	226
8.1	概述	154	11.1.3	干扰波的传递途径	230
8.2	逐次逼近式 A/D 转换器	154	11.2	屏蔽技术	231
8.2.1	逐次逼近式 A/D 转换器 的原理	154	11.2.1	静电屏蔽	231
8.2.2	集成化逐次逼近式 A/D 转换器	159	11.2.2	电磁屏蔽	232
8.3	双积分式 A/D 转换器	165	11.2.3	低频磁屏蔽	234
8.3.1	双积分式 A/D 转换器的原 理与特性	165	11.2.4	驱动屏蔽	234

11.3 滤波技术	235	11.4 接地技术	239
11.3.1 电磁干扰滤波器	235	11.5 印制电路板的抗干扰设计	243
11.3.2 滤波器的分类及特性	236	参考文献	254
11.3.3 滤波器的安装	239		

第1章 绪论

1.1 检测系统与测试技术

检测技术是人们认识和改造世界的重要手段，也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志。检测技术包含了传感技术、信息处理技术、信号转换技术等。如果说机器是改造世界的工具，那么检测系统与检测仪器就是人们认识世界的工具；而改造世界是以认识世界为基础的。认识世界有两个方面，一是探索自然规律，积累科学知识；二是对生产现场的了解，用以指导生产。认识世界和改造世界同等重要，而且认识世界往往是改造世界的先导，从这个角度来说，检测系统与机器同等重要。

在今天的现代化国民经济活动中，检测系统有着比以往更为广泛的用途，已经涉及了所有人类各种活动的需求。钱伟长教授说过“飞机要上天，离开了航空仪表就飞不起来”。在国民经济建设中，检测技术的作用意义重大，在工业生产中起着把关者和指导者的作用，它从生产现场获取各种参数，运用科学规律和系统工程的方法，综合有效地利用各种先进技术，通过自控手段和装备，使每个生产环节得到优化，进而保证生产规范化，提高产品质量，降低成本，满足需求，保证安全生产。

现在，检测系统及检测技术已经广泛地应用于炼油、化工、冶金、电力、电子、轻工、纺织等行业。例如，在上海宝山钢铁公司的技术装备投资中，有1/3经费是用于购置检测设备和自控系统。即使原来认为可以用土法生产的制酒工业，今天也需要通过精密的仪器仪表严格控制温度流程才能创出名牌。

检测系统是信息的源头技术，今天世界已经从工业化时代进入信息化时代，向知识经济时代迈进。这个时代的特征是以计算机为核心延伸了大脑的功能，起着扩展人的脑力劳动的作用，使人类正在走出机械化的过程，进入以物质手段扩展人的感官神经系统及脑力、智力的时代。这个时代检测的作用主要是获取信息，作为智能行动的依据。

检测系统的功能在于用物理、化学或生物的方法，获取被检测对象运动或变化的信息，通过信息转换的处理，使其成为易于人们阅读和识别表达（信息、显示、转换和运用）的量化形式，或进一步信号化、图像化，并通过显示系统显示出来，以便于观测、处理、保存，或直接进入自动化、智能化的控制系统中。

检测系统是一种获取信息的工具，起着不可或缺的信息源的作用。检测是信息时代的信息获取—处理—传输的链条中的源头技术。如果没有测试，就不能获取生产、科研、环境、社会等领域中全方位的信息，进入信息时代将是不可能的。钱学森院士曾经说过：“新技术革命的关键技术是信息技术。信息技术由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成。测量技术则是关键和基础”。人们提到信息技术通常想到的只是计算机技术和通信技术，而实际上关键的基础性的技术是检测技术。检测技术是信息的源头技术，仪器工业是信息工业的重要组成部分。

检测系统数字化的意义在于利用计算机和数字技术的优势,通过对模拟信号的数字化处理,提高对信号的采集能力,测试的准确度、抗干扰能力和使用范围,使信号的显示、保存、传输大为方便,并为进一步智能化应用提供了基础。

1.2 检测系统的基本组成

当代的检测仪器或者检测系统几乎都由传感元件或传感器、信号或数据处理器、显示器或记录器等几大部分组成。不同类型的检测装置,这些组成部分的要求和复杂程度可能相差悬殊,有时在结构设计上也可能将其相邻的两部分合并成一体,看起来似乎缺少了某一部分,使划分界线变得困难或模糊了。例如,一只最简单的热电偶式温度表,只有热电偶、补偿导线(延长距离用)和带有冷端补偿器的毫伏表三部分,它的唯一的信号处理部件是一个由双金属片做成的冷端补偿器,且隐藏在毫伏表之内。但是,一台智能化的热电偶式温度测量仪中,信号处理器是微型计算机系统和高精度的信号调理电路,它能对不同型号的热电偶进行各种误差的修正和补偿,得出误差小于 0.1°C 的测量结果。此时信号处理器成了整个系统组成中的最重要的部分。

简单地把现代检测系统的组成结构归纳一下,基本上可分成图 1-1 和图 1-2 所示的三种类型。图 1-1 给出了单参数检测仪器结构示意图。其中图 1-1a 是不带微机系统的直读式检测仪器仪表,图中的点画线表示出各部件的可能组合范围。显示器目前已趋向于采用数字显示器,但也有采用模拟电表的,图 1-1b 是带有微机系统的检测仪器,它具有很强的数据处理

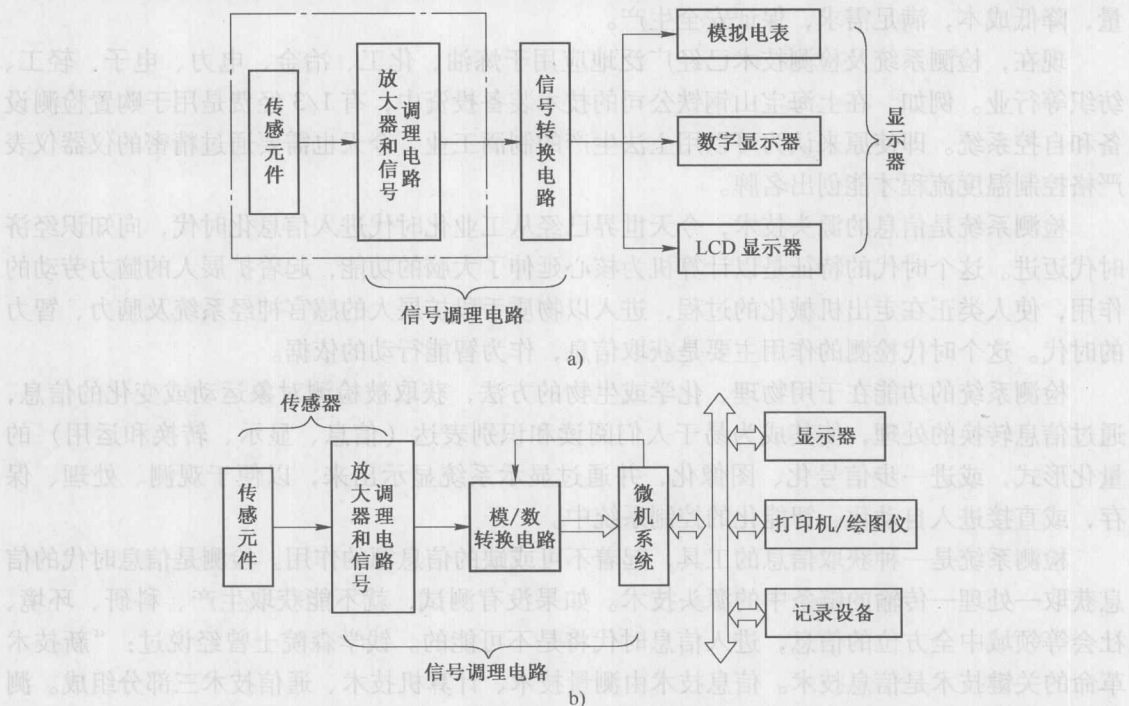


图 1-1 单参数检测仪器结构示意图

功能,构成高精度自动检测仪器。图 1-2 所示为多参数检测仪器结构示意图,它采用多路选通的办法分时采集多个(N 个)传感器测得的原始数据,通过微型计算机系统的数据处理,得出被测对象的整体性能评价。多参数综合检测系统也称多路数据采集系统,它广泛地应用于大型设备的运行监测、生产流程的检测与控制,以及诸如飞机试飞、发动机试车等整机性能的综合测试。

上述结构组成反映出电子电路可分布在组成检测仪器或系统的各个部分。在传感器中,常需要用电子电路将传感元件(或称敏感元件)一次变换后得出的电信号进一步放大、调理及转换,变成易于传送的输出信号,或者还需要将某些误差补偿掉,将干扰抑制掉。在直读式数字仪表中,常需要用电子电路将传感器输出的模拟信号转换成数字信号(模/数转换)去控制数码管显示数据。至于带有微机系统的检测仪器或检测系统,电子电路更是其重要的组成部分。可以说,现代检测仪器已是电子化的仪器,不仅信号转换与数据处理属于电子技术领域,而且有许多非电量敏感元件本身也属于电子元器件,如硅压阻式压力传感器、PN 结温度传感器、光敏二极管、半导体气敏传感器等。因此,研究检测仪器电子电路已成为检测技术领域、仪器仪表工业的一个重要分支。

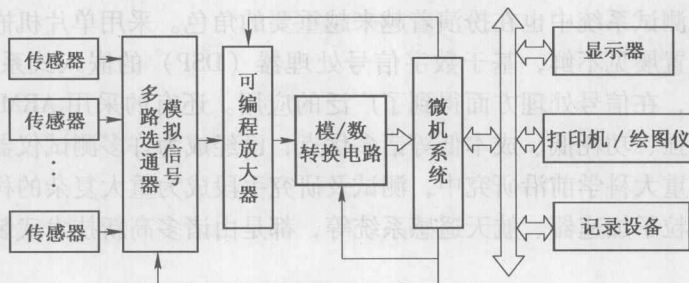


图 1-2 多参数检测仪器结构示意图

1.3 检测系统的发展趋势

1) 现代测试仪器(系统)发展已成为许多国家的一项战略措施。发达国家中的科学仪器的发展,已从自发状态转入到有意识、有目标的政府行为上来。美、日、欧等发达国家和地区早已制定了各自的发展战略并锁定目标,而且有专门的投入,以加速原创性仪器的发明、发展、转移(化)和产业化进程。

2) 当今测试技术在生物、医学、材料、航天、环保、国防等直接关系到人类生存和发展的诸多领域中正在取得引人注目的发展。研究的尺度深入到介观(Mesoscopic, 包含纳米技术)和微观,要求不但能确定分析对象中的元素、基因和含量,而且能回答原子的价态、分子结构和聚集态、固体结晶形态、短寿命反应中间产物的状态和生命化学物理进程中的激发态;不但能提供在自在状态下的分析数据,而且可作表面、内层和微区分析,甚至三维立体扫描分析和时间分群数据。因此,发展高分辨率、高选择性、高灵敏度的活体动态研究技术、原位技术、非接触(无损)测定技术等已成为趋势,发展超快时间分辨技术和超高空间分辨技术已成为仪器发展新追求目标。

测试研究的对象和过程已从静态转入动态。国际上正在大力发展集采样、样品处理

(制作)、自动检测分析和结果输出一身的流程分析系统;发展现场和实时的研究手段。生命科学等复杂体系研究的瓶颈是缺乏灵敏、有效和快速的现场或实时的研究手段,解决这个问题突破口在于发展新的检测原理和新的检测仪器。

3) 现代测试仪器(系统)的研制和生产趋向智能化、微型化、集成化、芯片化和系统工程化。利用现代微制造技术 MEMS(光、机、电)、纳米技术、计算机技术、仿生学原理、新材料等高新技术发展新式的科学仪器已成为主流,如微型全化学分析系统、微型实验室、生物芯片、芯片实验室等。

例如,正在发展的芯片型自动分析元件,不仅有测试功能,而且还可以执行分离、反应等操作。综合这些芯片的功能将组成微型的分析仪器,进而形成芯片实验室。现在用于基因及基因组研究的器件包括微流量分配装置、微电泳仪、微聚合酶链式反应器(PCR仪)等。这些分离分析元器件可做在玻璃、熔石英(Fused Silica)或塑料上,大小犹如芯片,但具备某些“传统”分离、分析仪器的功能。

在微型元器件、微处理器高度发展的基础上,研究和开发小型价廉而又准确可靠的家用和个人分析仪器可能有广大的市场容量。

嵌入式系统在测试系统中也在扮演着越来越重要的角色。采用单片机嵌入式系统构成的测试仪器或测试装置屡见不鲜,基于数字信号处理器(DSP)的嵌入式系统,利用DSP高速、高精度的特点,在信号处理方面得到了广泛的应用。还有的采用ARM架构处理器嵌入式系统,因其性能强、功耗低、成本低等诸多优点,已经成为许多测试仪器的核心单元。

另外,在一些重大科学前沿研究中,测试及研究手段成为重大复杂的科研工程,如大型天文望远镜、高能粒子加速器、航天遥感系统等,都是由诸多高新技术武装起来的分系统集成系统。

4) 通信方式的多样化。测试系统的通信功能强大,方式多样,实现了系统之间互联、信息互换和互用,成为现代测试系统发展的一个重要标志。

通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)已在现代测试系统、测试仪器中得到广泛应用。USB具有可热拔插、接口体积小、通信速度快的特点。USB2.0的峰值传输速度可以达到480Mbit/s,它有4种传输类型:批量传输、同步传输、中断传输和控制传输,能满足多种需要。USB性能可靠、提供电源,支持主机与设备之间的多数据流和多信息流传输,且支持同步传输和异步传输两种类型。目前USB3.0也开始得到应用,和USB2.0相比,它支持全双工,新增了5个触点,两个为数据输出,两个数据输入。USB3.0供电标准可达900mA,并支持光纤传输,而采用光纤时其速度更有可能达到25Gbit/s。

IEEE1394是一种高速串行总线,它的特点是:支持高速传输,支持100Mbit/s、200Mbit/s和400Mbit/s的传输速率;支持热拔插,即插即用,使用更加方便。IEEE1394采用树形或者菊花链拓扑结构,每条总线最多可以连接63台设备。一些低功耗设备也可以通过总线获得电源。

现场总线(Field Bus)是一类总线的总称,如Profibus、CAN、LonWorks等,较新的总线规范还有LXI仪器总线。现场总线的特点是开放性、互操作性和互用性,可以与任何遵守相同标准的其他设备或者系统相连,实现设备互联、系统间的信息传送和互换、互用。现场总线系统的结构具有高度分散性和对现场环境的适应性。现场总线的物理层采用RS-485标准,能够支持双绞线、同轴电缆、光缆、射频、红外线、电力线等传输媒介,具有较强的

抗干扰能力,能采用两线制实现供电与通信,并可满足安全防爆等要求。

5) 测试仪器网络化。由于仪器的自动化、智能化水平的提高,多台仪器联网已推广应用,虚拟仪器、三维多媒体等新技术开始实用化。在现今这个网络化的时代,通过 Internet,仪器用户之间可异地交换信息和浏览,厂商能直接与异地用户交流,能及时完成如仪器故障诊断、指导用户维修或交换新仪器改进的数据、软件升级等工作。仪器操作过程更加简化,功能更换和扩张更加方便。网络化测试系统(仪器)是今后测试技术发展的必然道路。

第2章 运算放大器

2.1 概述

2.1.1 集成运算放大器的发展与分类

运算放大器 (Operational Amplifier, OP) 是于 20 世纪 40 年代作为模拟计算机功能元件开发出来的。在过去的模拟计算机中, 通过对放大器施加特殊的负反馈以实现加、减、乘、除的原始运算甚至微积分运算。今天模拟计算机虽早已消失, 但是运算放大器在信号调理中是不可或缺的器件, 测试系统中需要用到各种类型的放大器, 市场上也可以看到各种高性能、低价格、使用方便的单片集成化运算放大器。在电路设计时, 它可与晶体管、电阻和电容等一样作为基本元件进行处理。而且, 更高性能的新产品正在不断推出。

到 20 世纪末, 集成运算放大器已发展了四代产品。第一代是差动运算放大器电路实现半导体集成化的初期产品, 目前已被淘汰; 第二代以采用有源负载为标志; 第三代以超 β 晶体管作为差分输入级为特点; 第四代采用斩波器的稳零方式 (Chopper Stabilized Amplifier)。第四代集成运算放大器采用了中、大规模集成技术, 其质量性能指标已接近理想集成运算放大器。

运算放大器是一种高增益的直接耦合放大器。它有两个输入端和一个输出端, 符号如图 2-1 所示。其中 “+” 代表同相输入端, “-” 代表反相输入端。

理想运算放大器的输入、输出满足式 (2-1):

$$V_o = A_o (V_p - V_n) \quad (2-1)$$

其中 A_o 是放大器的开环电压增益。

加上不同的外接反馈网络之后, 运算放大器能实现多种电路功能, 如加法器、减法器、积分器、微分器、滤波器、对数放大器、检波器、波形发生器、稳压源、恒流源和其他各种信号变换电路等。可以说, 运算放大器是应用最广、通用性最强的一种线性集成电路。集成运算放大器按产品的性能一般分为通用型、高速型、高阻型、高压型、宽带型、高精度型、大功率型、跨导型、低功耗型和低漂移型等; 按照生产工艺来分, 又可分为双极型、双性-场效应型、MOS 型和组合结构的特殊型。

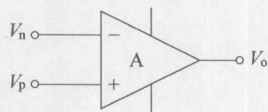


图 2-1 运算放大器的符号

2.1.2 集成运算放大器的主要参数

运算放大器的性能是通过它的参数表现出来的, 描述运算放大器的参数很多, 这里主要介绍其中 15 个运算放大器参数。

1. 输入失调电压 V_{os}

【定义】在运算放大器的输入端外加一直流补偿电压,使放大器的输出端为零电位,则所加的补偿电压值即等于输入失调电压。

输入失调电压主要是由放大器输入级的失配引起的。以双极型晶体管为输入级的集成运算放大器, V_{os} 一般在 $\pm 50\text{mV}$ 以内。输入失调电压是温度的函数,双极型运算放大器的输入失调电压的温度漂移与 V_{os} 本身的大小成正比,且可用下式来近似估算:

$$\frac{\partial V_{os}}{\partial T} = \frac{V_{os}}{T} \quad (2-2)$$

在室温下, $T=298\text{K}$ (25°C), 每毫伏 (mV) 失调电压引起的温漂为 $3.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 使用时可取

$$\frac{\partial V_{os}}{\partial T} = (0.003 \sim 0.004) V_{os} \quad (2-3)$$

2. 输入偏置电流 I_{ib}

【定义】当输入信号为零时,运算放大器两输入端静态输入电流的平均值叫做输入偏置电流,以符号 I_{ib} 表示。输入偏置电流也是在输出电平为零的条件下定义的,但是实际上这个条件的影响极小,可以不提。

双极型运算放大器的 I_{ib} 是两输入管的基极电流的平均值,而以结型或 MOS 型场效应晶体管为输入级的运算放大器, I_{ib} 是两输入管栅极电流的平均值。 I_{ib} 与放大器的输入阻抗直接相关, I_{ib} 越小,输入阻抗越高。双极型运算放大器的 I_{ib} 从几微安 (μA) 到几个纳安 (nA), 而以 MOS 型场效应晶体管为输入级的运算放大器的 I_{ib} 可低至皮安 (pA) 级。输入偏置电流也是温度的函数。双极型放大器的 I_{ib} 随着温度的升高而下降,即

$$\frac{\partial I_{ib}}{\partial T} = CI_{ib} \quad (2-4)$$

$$C = \begin{cases} -0.005/^\circ\text{C} & (T > 25^\circ\text{C}) \\ -0.015/^\circ\text{C} & (T < 25^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (2-5)$$

以结型场效应晶体管为输入级的放大器,温度每上升 10°C , I_{ib} 约增加 1 倍。

3. 输入失调电流 I_{os}

【定义】当输入信号为零时,运算放大器两输入端静态输入电流之差叫做输入失调电流。严格来讲,输入失调电流是在运算放大器的输出直流电平为零的情况下定义的,但实际上输出电平对 I_{os} 的影响极小,所以这个条件也可不提。

输入失调电流是由放大器输入级的失配引起的,且随温度的变化而变化。双极型运算放大器输入失调电流随温度的变化规律可近似由下式表示:

$$\frac{\partial I_{os}}{\partial T} = CI_{os} \quad ^\circ\text{C}$$

$$C = \begin{cases} -0.005/^\circ\text{C} & (T > 25^\circ\text{C}) \\ -0.015/^\circ\text{C} & (T < 25^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (2-6)$$

4. 静态功耗 P_{co}

【定义】在无外接负载的情况下,对于额定的电源电压,运算放大器本身所消耗的正、负电源的总功率叫做静态功耗。

5. 开环电压增益 A_o

【定义】运算放大器在开环时，输出电压增量与输入差模电压增量之比叫做开环电压增益。即

$$A_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \quad (2-7)$$

或者

$$A_o = 20 \lg \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \quad (2-8)$$

集成运算放大器的开环电压增益目前可以从 60dB 直到 140dB。

6. 共模抑制比 $CMRR$

运算放大器应该放大的是输入差模电压，并要削弱共模电压的影响。共模抑制比表示的就是放大器的这种能力。

【定义】运算放大器的差模电压增益与共模电压增益之比叫做共模抑制比。即

$$CMRR = \frac{A_{def}}{A_{com}} \quad (2-9)$$

或

$$CMRR = 20 \lg \frac{A_{def}}{A_{com}} \quad (2-10)$$

通常集成运算放大器的共模抑制比在 60 ~ 120dB 之间。

通常运算放大器芯片给出的 $CMRR$ 是直流时的值。由于频率增加时， $CMRR$ 会降低，因此，当处理信号频率在 1kHz 以上，并且放大器采用同相输入形式时，需要注意 $CMRR$ 降低引起的误差。

7. 最大输出幅度 V_{om}

【定义】在规定的电源电压和负载电阻下，运算放大器能够输出的最大峰—峰电压值叫做最大输出幅度。

对于实际运算放大器，若输入电压太大，则输出信号接近正、负电源电压而进入饱和状态，开始出现失真。例如，运算放大器 NJM4580（双运放）的电源电压范围是 $\pm 15V$ 时，它的最大输出电压范围为 $\pm 13.5V$ 。一般来说， V_{om} 随电源电压和负载的不同而变化。

运算放大器输出饱和前的电压称为最大输出电压。另外，负饱和前电压到正饱和前电压的范围称为输出动态范围。有些运算放大器可以输出到正、负电源电压的极值，称为满幅度或者轨对轨（Rail to Rail）输出运算放大器。

8. 开环带宽 f_{BW}

【定义】运算放大器的开环电压增益随信号频率的升高而下降。当开环增益下降到直流增益的 0.707（-3dB）时的信号频率叫做放大器的开环带宽。

9. 单位增益带宽 GB

【定义】运算放大器在 1:1 的比例放大状态下，当闭环增益下降到 0.707 时的频率叫做单位增益带宽（闭环 -3dB 带宽）。当然，也可定义为：开环增益下降到 1 时的频率叫做单位增益带宽。

10. 电源电压抑制比 SVR

【定义】运算放大器供电电源的单位电压变化引起的等效输入失调电压的变化叫做电源

电压抑制比,用符号 SVR 表示。

通常运算放大器芯片参数给出的 SVR 是直流时的值,频率增高时该值降低。另外,正、负电源不同特性也不同。仅单电源变化比正、负电源电压的绝对值相等那样变化时的影响大。为了减小 SVR 的影响,可在正、负电源中接入旁路电容。

11. 差模输入电阻 R_i

【定义】运算放大器在开环时,两输入端之间的差模电压变化量与由它引起的输入电流变化量之比叫做差模输入电阻。

对于用两个双极型晶体管作差动输入级的运算放大器,其差模输入电阻与输入偏置电流 I_{ib} 有下述关系:

$$R_i = \frac{52 \times 10^{-3}}{I_{ib}} \quad (2-11)$$

I_{ib} 越小, R_i 越大。双极型运算放大器的输入电阻可从几十千欧到几兆欧。

12. 开环输出电阻 R_o

【定义】运算放大器在开环时,输出电压增量与由它引起的输出电流增量之比叫做开环输出电阻。

13. 转换速率 S_r

【定义】在大信号条件下,运算放大器的输出电压随时间的最大变化率叫做转换速率。

转换速率与放大器的电路结构、反馈深度与补偿网络有关,参数表里给出的 S_r 一般是在增益为 1 的情况下测出的。集成运算放大器的转换速率从每微秒零点几伏到每微秒几百伏。

如果正向与负向的转换速率不同,应取数值小者。

对于正弦信号,如果其满幅度输出电压为

$$V_o = \frac{1}{2} V_{om} \sin 2\pi ft \quad (2-12)$$

根据转换速率的定义,输入信号需满足:

$$S_r = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{\max} \geq \pi f V_{om} \quad (2-13)$$

或者

$$f \leq \frac{S_r}{\pi V_{om}} \quad (2-14)$$

14. 建立时间 T_s

【定义】当运算放大器接成 1:1 的负反馈组态,且加入大信号阶跃电压时,输出电压达到其与最终值相比误差小于规定值 δ 时所需的时间叫做建立时间。

15. 最大输入共模电压 V_{icm}

【定义】放大器的正常工作状态不被破坏而在输入端所能承受的最大共模电压叫做最大输入共模电压。

为了保证集成运算放大器的正常工作,其数据表中通常会对它的一些参数的技术指标给出一定的裕度,表 2-1 给出了 OP07 集成运算放大器的技术指标。