

天津市高校“十五”规划教材

# 非电量测量与传感器应用

蒋敦斌 李文英 编著

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

非电量测量与传感器应用 / 蒋敦斌, 李文英编著.  
北京: 国防工业出版社, 2005. 1  
天津市高校“十五”规划教材  
ISBN 7 - 118 - 03568 - 8

I. 非... II. ①蒋... ②李... III. 非电量测量 - 传  
感器 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM938. 8②TP212. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 073372 号

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 25½ 587 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数 1—5000 册 定价 34.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店 68428422

发行邮购 68414474

发行传真 68411535

发行业务 68472764

# 前 言

传感器技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门综合技术,是在当代科学技术领域中,实现信息化的基础技术之一。现代测量、控制与自动化技术的飞速发展,尤其是信息科学、微电子技术、计算机技术与通信技术的发展,极大地促进了现代传感器技术的发展。加强传感器技术的研究、开发和应用已成为时代发展的必然要求。

编者从多年传感器原理及应用、非电量测控等课程的教学与科研开发等实践中体会到,仅仅让读者了解到传感器的基本原理是远远不够的,学习传感器的原理目的在于更好地将它们运用到科学研究生产实践中。因此,有必要将非电量测量的相关知识与传感器的原理、应用知识结合起来,给读者一个较为系统而完整的非电量测量与传感器的应用知识。出于此种想法,并参考了国内许多这方面的优秀教材,编写出本教材。本教材被列为天津市高校“十五”重点规划教材。

全书共分14章。在介绍具体传感器之前,前3章主要介绍非电量测量的一些必备基础知识。其中,第1章非电量测量与传感技术基础,介绍非电量测量技术概论、传感器概论及传感器的基本特征;第2章传感器电子学基础,介绍传感器应用技术中常见的基本电路、传感器信号放大等;第3章信号分离与转换电路,从硬件角度介绍非电量测量中基本的信号分离电路和信号转换电路;第4章至第12章集中介绍目前最常用的传感器原理及应用。其中,第4章应变式传感器及其应用,介绍金属应变式和半导体压阻式传感器原理、结构、特性及其应用;第5章变磁阻式传感器及其应用,介绍自感式传感器、互感式传感器、电涡流式传感器的原理及应用;第6章温度传感器及其应用,介绍热电阻传感器、热敏电阻、PN结温度传感器、集成温度传感器、红外温度传感器、石英晶体温度传感器、光导纤维温度传感器等及其应用;第7章光敏传感器及其应用,介绍光敏二极管、光敏三极管、光电池、光控晶闸管、光电耦合器件、热释红外线传感器、半导体硅色敏传感器和固态图像传感器等的工作原理及其应用;第8章光导纤维式传感器及其应用,介绍光导纤维式传感器结构、原理、分类及其在位移、压力、液位、流速、流量等测量中的应用;第9章压电式传感器及其应用,介绍压电效应与压电材料、压电式传感器主要应用类型、形

式及应用举例 ;第 10 章磁敏传感器及其应用 ,介绍霍尔元件、磁阻器件、磁敏二极管和磁敏三极管的原理及应用 ;第 11 章半导体气敏传感器及其应用 ,介绍电阻型半导体气敏传感器、非电阻控制型半导体气敏传感器 ,其中包括肖特基二极管气敏器件、MOS 二极管气敏器件、Pd-MOSFET 气敏器件及半导体气敏传感器的应用 ;第 12 章超声波传感器及其应用 ,介绍超声波及其物理性质、超声波传感器系列中的厚度振动换能器、圆柱形压电换能器、复合棒压电换能器、压电陶瓷双叠片弯曲振动换能器以及超声波传感器在汽车中等的的应用举例。

现代传感器应用技术总是与计算机相联系的。为了便于读者学以致用 ,第 13 章非电量测量的数据处理 ,从软件设计角度介绍数字滤波、标度变换、非线性补偿及误差修正。第 14 章传感器与单片机的接口技术 ,从实际应用出发 ,介绍传感器选择原则、传感器电源、模拟开关、A/D 转换器及其与单片机的接口技术 ,并以铁路桥梁桥墩振幅检测仪为例 ,介绍用电动式无源伺服式拾振器做振幅探测传感器 ,采用先进的 8051F000 单片机做智能控制部件 ,并详细介绍了应用硬件接口电路和相关知识。

本书第 5 章 ~ 第 12 章由蒋敦斌教授编写 ,第 1 章 ~ 第 4 章和第 13 章、第 14 章由李文英教授编写。

传感器种类繁多 ,涉及面十分广泛 ,非电量测量与传感器应用又是一门多学科高度综合性的技术。由于水平所限 ,书中的疏漏和不足之处 ,欢迎读者指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 非电量测量与传感技术基础.....	1
1.1 非电量检测技术概论 .....	1
1.1.1 测量 .....	1
1.1.2 测量方法 .....	2
1.1.3 测控系统 .....	3
1.1.4 测量误差 .....	5
1.1.5 测量数据的处理与估算 .....	7
1.2 传感器概论.....	18
1.2.1 传感器的定义和作用.....	18
1.2.2 传感器技术.....	19
1.2.3 传感器的组成.....	20
1.2.4 传感器的分类.....	20
1.2.5 现代传感器及其发展方向.....	22
1.3 传感器的基本特性.....	24
1.3.1 传感器的静态特性.....	24
1.3.2 传感器的动态特性.....	29
第 2 章 传感器电子学基础 .....	40
2.1 电桥.....	40
2.1.1 直流电桥.....	40
2.1.2 交流电桥.....	43
2.2 电桥的电源.....	44
2.2.1 直流电桥的电源.....	44
2.2.2 交流电桥的电源.....	47
2.3 传感器信号放大.....	48
第 3 章 信号分离与转换电路 .....	83
3.1 信号分离电路.....	83
3.1.1 滤波器的基本知识.....	83
3.1.2 RC 有源滤波电路 .....	85
3.1.3 RC 有源滤波器设计 .....	89
3.1.4 集成有源滤波器.....	90
3.2 信号转换电路.....	94
3.2.1 电压电流转换电路.....	94

3.2.2	电压频率变换电路	99
第4章	应变式传感器及其应用	104
4.1	电阻应变计的基本原理与结构	104
4.1.1	电阻应变效应	104
4.1.2	电阻应变片结构与材料	105
4.1.3	电阻应变计的分类	107
4.2	电阻应变计的主要特性	109
4.2.1	静态特性	109
4.2.2	动态特性	111
4.2.3	其他特性参数	112
4.3	温度误差及其补偿	113
4.3.1	温度误差产生的原因	113
4.3.2	热输出补偿方法	113
4.4	测量电路	115
4.4.1	直流电桥	116
4.4.2	交流电桥	117
4.5	电阻应变式传感器	119
4.5.1	称重测力传感器	120
4.5.2	压力传感器	122
4.5.3	应变式加速度传感器	124
4.6	压阻式传感器	124
4.6.1	压阻效应	124
4.6.2	压阻系数	125
4.6.3	固态压阻式传感器	127
第5章	变磁阻式传感器及其应用	134
5.1	自感式传感器	134
5.1.1	变气隙式自感传感器	134
5.1.2	变面积式自感传感器	137
5.1.3	螺管式自感传感器	138
5.1.4	电感线圈的等效电路	139
5.1.5	测量电桥	141
5.1.6	自感式传感器的误差及补偿	146
5.2	互感式传感器	149
5.2.1	结构与类型	149
5.2.2	工作原理与等效电路	150
5.2.3	测量电路	153
5.2.4	互感式传感器的误差及补偿	154
5.3	电感式传感器的应用	156
5.3.1	位移与尺寸测量	156

5.3.2	压力测量 .....	156
5.3.3	力和力矩测量 .....	157
5.3.4	振动与加速度测量 .....	157
5.4	电涡流式传感器 .....	158
5.4.1	工作原理 .....	158
5.4.2	结构类型及线圈参数对性能的影响 .....	160
5.4.3	电涡流传感器的测量电路 .....	163
5.4.4	电涡流式传感器的应用 .....	167
第6章	温度传感器及其应用 .....	173
6.1	温度传感器的分类 .....	173
6.2	热电阻传感器 .....	174
6.2.1	热电阻的工作原理 .....	174
6.2.2	热电阻的基本特性参数 .....	175
6.2.3	铂、铜热电阻 .....	176
6.2.4	其他热电阻 .....	177
6.3	热敏电阻 .....	177
6.3.1	热敏电阻的结构与材料 .....	178
6.3.2	负温度系数(NTC)热敏电阻器 .....	179
6.3.3	正温度系数(PTC)热敏电阻器 .....	179
6.3.4	热敏电阻的伏-安特性 .....	180
6.4	热敏电阻的主要技术参数、型号及应用 .....	181
6.4.1	主要技术参数 .....	181
6.4.2	热敏电阻型号 .....	182
6.4.3	热敏电阻应用 .....	183
6.5	PN结温度传感器 .....	185
6.5.1	PN结温度传感器 .....	185
6.5.2	集成温度传感器 .....	189
6.6	新型温度传感器 .....	194
6.6.1	红外温度传感器 .....	194
6.6.2	石英晶体温度传感器 .....	198
6.7	光导纤维温度传感器 .....	200
6.7.1	工作原理 .....	200
6.7.2	光导纤维温度传感器应用举例 .....	202
第7章	光敏传感器及其应用 .....	208
7.1	光电效应 .....	208
7.1.1	光的性质 .....	208
7.1.2	外光电效应 .....	210
7.1.3	内光电效应 .....	212
7.1.4	光敏电阻 .....	212

7.2	光敏二极管	217
7.2.1	光敏二极管工作原理	217
7.2.2	光敏二极管特性	218
7.2.3	高速光敏二极管	218
7.2.4	光敏二极管应用	219
7.3	光敏三极管	222
7.3.1	光敏三极管工作原理	222
7.3.2	光敏三极管的基本特性	223
7.3.3	光敏三极管应用	224
7.4	光电池	226
7.4.1	光电池的结构、原理	227
7.4.2	光电池的基本特性	227
7.4.3	光电池应用	229
7.5	光控晶闸管	231
7.5.1	光控晶闸管工作原理	231
7.5.2	光控晶闸管主要技术参数	231
7.5.3	光控晶闸管应用	232
7.6	光电耦合器件	234
7.6.1	光电耦合器件的工作原理	234
7.6.2	光电耦合器应用	234
7.6.3	光电开关式传感器	236
7.7	热释红外线传感器	237
7.7.1	热释电效应	237
7.7.2	热释红外线传感器工作原理	238
7.7.3	热释红外线传感器应用	238
7.8	半导体硅色敏传感器	239
7.8.1	工作原理	239
7.8.2	应用举例	240
7.9	固态图像传感器	240
7.9.1	电荷耦合器件的基本工作原理	241
7.9.2	CCD 图像传感器	243
7.9.3	固态图像传感器的应用	245
第8章	光导纤维式传感器及其应用	250
8.1	光导纤维导光的基本原理	250
8.1.1	斯乃尔(Snell's Law)定理	250
8.1.2	光导纤维结构	250
8.1.3	光导纤维导光原理	252
8.2	光导纤维传感器结构原理及分类	253
8.2.1	光导纤维传感器结构原理	253

8.2.2	光导纤维传感器的分类 .....	254
8.3	光导纤维传感器的应用 .....	256
8.3.1	位移的检测 .....	256
8.3.2	压力的检测 .....	258
8.3.3	液位、流速、流量的检测 .....	262
8.3.4	电流、电压的检测 .....	266
第9章	压电式传感器及其应用 .....	271
9.1	压电效应与压电材料 .....	271
9.1.1	压电效应 .....	271
9.1.2	压电材料 .....	271
9.2	压电式传感器测量电路 .....	276
9.2.1	压电式传感器的等效电路 .....	276
9.2.2	压电式传感器的测量电路 .....	277
9.3	压电式传感器及其应用 .....	279
9.3.1	压电式传感器主要应用类型、形式 .....	279
9.3.2	压电式传感器应用 .....	280
第10章	磁敏传感器及其应用 .....	286
10.1	霍尔元件 .....	286
10.1.1	霍尔效应与霍尔电势 .....	286
10.1.2	霍尔系数和灵敏度 .....	287
10.1.3	霍尔元件特性 .....	288
10.1.4	霍尔元件的应用 .....	291
10.2	磁阻器件 .....	295
10.3	磁敏二极管和磁敏三极管 .....	296
10.3.1	磁敏二极管 .....	296
10.3.2	磁敏三极管 .....	299
第11章	半导体气敏传感器及其应用 .....	303
11.1	电阻型半导体气敏传感器 .....	304
11.1.1	表面电阻控制型气敏传感器 .....	304
11.1.2	体电阻控制型气敏传感器 .....	307
11.2	非电阻控制型半导体气敏传感器 .....	308
11.2.1	肖特基二极管气敏器件 .....	309
11.2.2	MOS 二极管气敏器件 .....	309
11.2.3	Pd-MOSFET 气敏器件 .....	310
11.3	半导体气敏传感器的应用 .....	313
11.3.1	气体报警器 .....	313
11.3.2	煤气(CO)报警器 .....	314
第12章	超声波传感器及其应用 .....	316
12.1	超声波及其物理性质 .....	316

12.1.1	声波的波形及其转换 .....	316
12.1.2	超声波的反射与折射 .....	317
12.1.3	超声波传播过程中的衰减 .....	317
12.2	超声波传感器 .....	317
12.2.1	厚度振动换能器 .....	318
12.2.2	圆柱形压电换能器 .....	319
12.2.3	复合棒压电换能器 .....	319
12.2.4	压电陶瓷双叠片弯曲振动换能器 .....	320
12.3	超声波传感器的应用 .....	322
12.3.1	超声波传感器的基本探测电路 .....	322
12.3.2	超声波传感器应用举例 .....	325
第 13 章	非电量测量的数据处理 .....	334
13.1	数字滤波 .....	334
13.1.1	常用的数字滤波方法 .....	335
13.1.2	各种数字滤波方法的比较 .....	341
13.2	标度变换 .....	341
13.2.1	标度变换原理 .....	341
13.2.2	线性刻度的标度变换 .....	342
13.2.3	非线性参数的标度转换 .....	342
13.3	非线性补偿及误差修正 .....	345
13.3.1	线性插值法 .....	345
13.3.2	二次抛物线插值法 .....	346
13.3.3	查表法 .....	348
13.3.4	传感器温度误差的修正 .....	350
13.3.5	零位漂移的补偿 .....	351
第 14 章	传感器与单片机的接口技术 .....	353
14.1	单片机测控系统概述 .....	353
14.1.1	单片机测控系统的一般结构 .....	353
14.1.2	测控系统对计算机的选择 .....	354
14.2	传感器与单片机接口的关键技术 .....	356
14.2.1	选择传感器的基本原则 .....	356
14.2.2	传感器的电源配置及抗干扰 .....	357
14.2.3	放大器 .....	361
14.2.4	采样/保持器(S/H) .....	362
14.2.5	多路模拟开关与抗干扰措施 .....	364
14.3	A/D 转换器及其接口 .....	366
14.3.1	A/D 转换器 .....	367
14.3.2	A/D 转换器与单片机的接口技术 .....	369
14.3.3	CPU 与 A/D 的同步控制方式 .....	370

14.4	C8051F00x 单片机在铁路桥梁与桥墩振动测量中的应用 .....	372
14.4.1	传感器——电动式拾振器 .....	372
14.4.2	信号积分放大 .....	374
14.4.3	C8051F000 单片机简介 .....	374
14.4.4	铁路桥梁振幅检测仪控制部分硬件设计 .....	375
14.5	非电量测控电路中的抗干扰技术 .....	380
14.5.1	电磁干扰 .....	380
14.5.2	屏蔽、隔离、布线、接地与灭弧技术 .....	382
14.5.3	电源干扰的抑制 .....	390
	参考文献 .....	395

# 第 1 章 非电量测量与传感技术基础

## 1.1 非电量检测技术概论

现代科学技术的飞速发展,使人类社会进入瞬息万变的信息时代。在信息时代中,人们从事社会活动、生产实践和科学实验,主要依靠对信息资源的开发、获取、传输和处理。传感器将一切科学研究和生产过程中要获取的非电量信息,转换成易于测量、传输和处理的电信号。因此,传感器是处于研究对象与测控系统的接口位置,其地位和作用特别重要,是感知、获取与检测各类非电量信息的窗口。一切科学实验、生产过程,尤其是检测和自动控制系统要获取的信息,都是通过传感器将其转换成便于传输和处理的电信号。非电量信息是传感器感知、获取和转换的对象。非电量信息的类型十分广泛,如光、磁、热、声、力、压力、加速度、速度、位移、湿度、浓度、颜色、气味等。

非电量检测技术的任务是通过传感器准确地、及时地掌握各种信息,一般情况下是要获取被测非电量的大小。因此,非电量检测技术的主要含义就是测量,取得测量数据。

传感器技术的发展,更加完善和充实了测控系统。测量与控制不仅是现代生产系统的必需,而且现代的生活、办公、通信也越来越多地依赖测量与控制。例如,一部现代小轿车往往装有几十个不同的传感器对点火时间、燃油喷射、空气燃烧比、防滑、防碰撞等进行控制。自动洗衣机、微波炉、数码相机、复印机、打印机等也都装有不同类型和数量的传感器,通过测量与控制使其正确完成规定的功能。随着计算机应用技术和测控技术的发展,测量系统所涉及到的内容将更加广泛,更加充实。

为了更好地掌握传感器及其应用,需要对非电量测量的基本概念、测量方法、测量系统的结构、测量误差及数据处理等方面的知识进行学习和研究,只有了解和灵活掌握了这些基础知识,才能更加有效地完成非电量的检测工作。

### 1.1.1 测量

测量是以确定量值为目的的一系列操作。测量的实质是将被测量与同种性质的标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数。其表达式如下:

$$x = nu \quad (1-1)$$

或 
$$n = x/u \quad (1-2)$$

式中  $x$ ——被测量值;

$u$ ——标准量,即测量单位;

$n$ ——比值(纯数),含有测量误差。

测量结果是指由测量所获得的被测的量值。测量结果可以用数值、曲线或图形形式表示出来。无论采用哪种形式表示,测量结果都应该包括测量单位、比值和测量误差。

被测量值和比值等都是测量过程的信息,这些信息依赖于物质在空间和时间上进行

传递。参数承载了信息而成为信号。测量过程就是运用传感器从被测对象(非电量)获取被测量的信息,将建立起的测量信号经过变换、传输、处理,最终获得被测量的量值。

### 1.1.2 测量方法

测量方法是指实现被测量与标准量比较得出比值的方法。根据不同测量对象和测量任务进行具体分析,选择合适的传感器和切实可行的测量方法,对测量工作是至关重要的。

测量方法从不同角度分类。从获得测量值的方法分类,可分为直接测量、间接测量和组合测量;从测量的精度因素分类,可分为等精度测量和不等精度测量;从测量方式分类,可分为偏差式测量、零位测量和微差法测量;从被测量状态分类,可分为静态测量和动态测量;从传感器是否与被测量对象接触分类,可分为接触测量和非接触测量;从测量系统是否向被测对象施加能量分类,可分为主动式测量与被动式测量等。

#### 1. 直接测量、间接测量与组合测量

使用仪表和传感器对被测量对象测量时,对仪表读数不需要任何运算而直接表示测量结果的测量方法称为直接测量。例如,用钳形表测量某一相交流电流、用弹簧秤测量重量、用弹簧压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量具有测量过程简单、快捷等优点,其缺点是测量精度低。

使用仪表和传感器对被测量对象测量时,对于测量有确定函数关系的若干量进行测量,将被测量值代入函数关系式,经过运算得到所需结果,这种测量方法称为间接测量。间接测量过程繁琐,花费时间、精力较多,一般用于直接测量不能完成或者缺乏直接测量手段的场合。

若被测量必须经过求解方程组,才能得到测量结果,这种测量方法称为组合测量。组合测量虽然可以得到较精确的测量结果,但测量过程复杂,花费时间、精力多。组合测量多用于科学实验和一些特殊场合。

#### 2. 等精度测量与不等精度测量

使用相同的仪表和测量方法对同一被测量进行多次重复测量,称为等精度测量。

使用不同精度的仪表或不同的测量方法,或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量,称为不等精度测量。

#### 3. 偏差式测量、零位测量与微差法测量

用仪表指针位移(即偏差)确定被测量的量值的测量方法称为偏差式测量。采用偏差式测量方法时,必须预先用标准仪表或器具对使用仪表刻度进行标定。偏差式测量是根据仪表指针在刻度上指示的值,决定被测量的数值。这种测量虽然简单、快捷、直观,但测量精度不高。

用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态,当测量系统平衡时,用已知的标准量决定被测量的量值,这种测量方法称为零位测量。具体地讲,采用这种测量方法时,是将已知标准量直接与被测量相比较,连续调节已知标准量,当指零仪表指零时,被测量与已知标准量相等。例如,天平称重、电位差计测量电位都是采用这种测量方法。采用零位测量方法可以获得较高的测量精度,但测量过程比较复杂、费时,不适用于测量迅速变化的信号。应用这种方法测量时,必须预先进行指针零位校准。

微差法测量方法是将被测量与已知的标准量相比较,取得差值后,再用偏差法测得该差值。显然,微差法测量是综合了偏差式测量与零位测量的优点而提出的一种测量方法。采用这种方法测量时,不需要调整已知的标准量,而只需测量两者的差值即可。设  $N$  为已知的标准量,  $X$  为被测量,  $\Delta$  为二者之差,则被测量  $X = N + \Delta$ 。由于  $N$  是标准量,其误差很小,且  $\Delta \ll N$ ,因此,可选用高灵敏度的偏差式仪表测量  $\Delta$ ,即使测量  $\Delta$  的精度较低,但由于  $\Delta \ll x$ ,所以得到的测量精度仍很高。

微差法测量具有响应快、测量精度高的优点,特别适用于在线控制参数的测量。

### 1.1.3 测控系统

非电量的测量系统与控制系统,简称为测控系统。现代的生产与生活离不开测量与控制。高新技术、尖端科技更离不开测控。当今的信息时代是以计算机广泛应用为主要标志,而计算机的发展首先归功于微电子技术的发展。一块半导体芯片上能集成成千上万个元件和逻辑单元取决于超精细工艺制作出的图案,而这不仅依赖于光刻的精确重复定位,而且依赖于定位系统的精密测量与控制。航空航天飞行器的发射与飞行,都需要靠精密测量与控制保证它们轨道的准确性。

#### 1. 测控系统的组成

测控系统主要由传感器、测量控制电路(简称测控电路)和执行机构3部分组成,如图1-1所示。

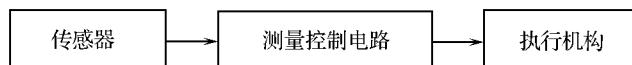


图1-1 测控系统的组成

传感器作为非电量的敏感元件,其功能是探测被测对象的变化并转换成易于测量和控制的电信号。但是,传感器的输出信号一般很微弱,而且常伴随着各种噪声,需要通过测控电路将它放大,剔除噪声,选取有用信号,按照测量与控制功能要求,进行所需演算、处理与转换,输出能控制执行机构动作的信号。在整个测控系统中,测控电路是最灵活的部分,起着十分关键的作用,它具有便于放大、转换、传输,以及适应各种使用要求的功能。一旦传感器确定后,整个测控系统,乃至整个机器和生产系统的性能在很大程度上取决于测控电路。

#### 2. 测控系统的基本要求

测控系统实际上包括非电量即被测对象的测量与控制两部分。对整个测控系统要求而言,可概括为精度高、响应快和转换灵活,当然也还有其他方面的要求,例如系统的可靠性和功能价格比等。

##### (1) 精度高

对于测控系统首先要求具有高精度,要求传感器能准确地检测被测对象的状态与参数,这是获得高质量产品的基础,也是实现准确控制的前提条件。因此,测控电路应具备如下性能。

##### ① 低噪声与高抗干扰能力

传感器输出信号的变化往往是很微小的。在精密测量中,要精确测得被测参数的微

小变化,必须要求测量电路具有低噪声和高抗干扰能力,这就要求采用低噪声元器件,合理安排电路,合理布局和接地,采用适当的隔离与屏蔽等。对信号进行调制,合理安排电路的通频带,对抑制干扰起着十分重要的作用。所谓对信号进行调制,就是给信号赋予一定特征,使其与干扰信号相区别,再通过合理安排电路的通频带等,只允许所需信号通过,达到抑制干扰的目的。此外,合理选用电路形式对抗干扰也是至关重要的,例如,采用具有高共模抑制比的电路,对抑制干扰的作用十分明显。

通常,大多数干扰表现为共模干扰,它同时作用于差动电路的两个输入端,采用高共模抑制比差动电路能有效地抑制干扰。

### ② 低漂移,高稳定性

由半导体材料特性决定,半导体器件和集成电路的所有参数严格意义上讲都是温度的函数,如运放的失调电压和失调电流、二极管与三极管的漏电流,都会随温度变化而变化。电路工作中元器件流过的电流产生的热量、外界环境温度变化都会引起电路漂移。减少漂移的基本做法是选择低温漂器件,同时应尽量减少电路关键部分的温度变化,让大功率器件远离前级电路,安排好散热等。

电路的稳定性是保证精确测量与控制的首要条件,噪声与干扰会引起电路短时间段工作不稳定,漂移会使电路随外界环境温度变化而变化。此外,电路长期工作、元器件老化、开关与插件件的弹性疲劳和氧化引起接触电阻变化等都是影响电路长期工作稳定性的主要原因。

### ③ 线性度与保真度

线性度是衡量一个系统或一台仪器的精度的又一重要指标。大多数情况下,要求系统的输入与输出之间具有线性关系。这是因为线性关系使用方便、便于读出,且换量程时不需要重新标定,在进行A/D转换、细分、伺服跟踪时不必考虑非线性因素,波形不失真等。从理论上讲,输入与输出之间的非线性关系,只要系统按非线性标定,也并不一定影响精度。

非电量测量中,要求输出不失真地反映被测对象的变化。保真度的概念原本是从视听音响设备中借用而来,为使输出不失真地反映输入变化,不但要求测量电路有良好的线性,而且要求信号所占有的频带内有良好的频率特性。

### ④ 有合适的输入与输出阻抗

即使测量电路很完美,将其用于实际测量时,仍有可能给系统带来误差,其中主要原因之一是电路的输入、输出阻抗前后级不匹配。例如,若测量电路的输入阻抗太低,接入电路后会使传感器的状态发生变化。一方面,从不影响前级的工作状态出发,要求电路的输入阻抗要高,但输入阻抗越高,输入端噪声也越大,因此要求电路的输入阻抗与前级的输出阻抗相匹配。另一方面,若电路的输出阻抗过大,接入低输入阻抗的下级电路或轻负载后,会造成电路输出下降,因此要求电路的输出阻抗与后级的输入阻抗相匹配。

### (2) 响应速度快

响应速度是测量电路的另一项重要指标。实时动态测量已成为测量技术发展的主流。要求准确地测出被测对象的变化状态,实现对被测系统准确控制,测量电路必须具有良好的频率特性,较快的响应速度。对于一个高速变化的运动系统,如果控制滞后会引起系统产生振荡,其振幅很可能越来越大,这会导致系统失控和不稳定。总之,为了能够测

量出快速变化参数,为了使一个高速运动系统稳定,测控电路有较快的响应速度和良好的频率特性是必不可少的。

### (3) 转换灵活

为了满足不同情况下非电量测量与控制的需要,要求测控电路具有灵活地进行各种转换的能力,包括如下转换。

#### ① A/D 转换与 D/A 转换

传感器的输出信号以模拟信号居多。为了便于计算、分析处理和长期保存,常需要数字信号,这就需要 A/D 转换。为了控制被测对象或控制执行机构动作,又常需要模拟信号,这时又需要 D/A 转换。

#### ② 信号形式的转换

D/A 转换或 A/D 转换本身就是信号的一种转换形式。此外,为了便于信号处理与传输,常需要直流与交流、电压与电流信号之间的转换。一个信号可以用其幅值、相位、频率、脉宽等表示,为了便于信号处理传输与控制上的需要,也往往要进行幅值、相位、频率与脉宽信号之间的转换。

#### ③ 信号的选取

测量结果所获取的信号中不但包括有用信号和噪声,而且还包括具有不同特征的其他信号。这些不同特征的信号可能由不同的信号源产生,也可以有不同的物理含义。例如,测量结果为不同频率信号,但在测量与控制中需要选取某一频率或某一频带,或者选取某一瞬变信号等,因此,要求测量电路具有选取所需信号的能力。

#### ④ 信号的处理与运算

通常,在测量与控制中常需要对信号进行处理与运算,例如,放大、整流、滤波、求平均值、差值、峰值、绝对值、求微分、积分、对数运算等。信号的处理与运算也包括非线性环节的线性化处理与误差补偿、进行逻辑判断、进行更为复杂的函数运算等。

### (4) 可靠性与功能价格比

随着测控技术的发展,测控系统应用越来越广泛,系统本身规模越来越大,这对系统的可靠性提出了严格的要求。一个系统由若干个单元部分组成。假设每个单元的各种可靠性是相互独立的,那么,整个系统的可靠性为各部分可靠性的乘积。例如,一个智能化温度检测系统,含有传感器、放大、A/D、单片机及外围芯片、打印、显示等 7 部分单元,每部分的可靠性为 0.99,则整个系统的可靠性仅为  $0.99^7 = 0.93$ 。若考虑到电源、接插件等部件和元器件可靠性,系统的可靠性还会更低。由此可见,一个测控系统对电子元器件的可靠性提出了极高的要求。

功能价格比是衡量和综合评估一台仪器或系统的重要指标之一。一个成本高昂的测量和控制系统难以被用户接收。在满足性能指标的基础上,应尽可能地优化系统、降低成本、提高产品的功能价格比。

## 1.1.4 测量误差

测量的目的是通过测量获取被测量的真实值。由于种种原因,例如,传感器本身性能差、测量方法不完善、外界干扰等诸多因素影响,都会造成被测参数的测量值与真实值不一致。测量值与真实值两者之间不一致的程度用测量误差表示。测量误差实际上是测量

值与真实值之间的差值,它反映了测量质量的好坏。

不同场合对测量误差的要求是不一样的。例如,在量值传递、产品质量检验等场合应保证测量结果要有足够的准确度,这时测量的可靠性至关重要;当测量值用做控制信号时,应保证测量的稳定性和可靠性。显然,测量结果的准确程度应与测量的目的与要求相联系、相适应,不顾场合、不惜成本、片面追求高准确度的做法是不可取的。

### 1. 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法多种多样,下面介绍几种基本的测量误差表示方法。

#### (1) 绝对误差

绝对误差可定义为

$$\Delta = X - L \quad (1 - 3)$$

式中  $\Delta$ ——绝对误差;

$X$ ——测量值;

$L$ ——真实值。

对测量值进行修正时要用到绝对误差。修正值实际上是绝对值符号相反、大小相等的值。实际值等于测量值加上修正值。

采用绝对误差表示测量误差,有时并不能准确地反映测量质量的好坏。例如,测量温度时,仅讲测量的绝对误差是不行的,因为绝对误差并没有反映出多大范围内得到的误差。例如,绝对误差  $\Delta = 1$ , 这个误差对测量控制单晶硅(1 420 )测量来讲是一个好的测量结果,但对人体体温测量来讲,这个测量误差是不允许的。

#### (2) 相对误差

相对误差可定义为

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1 - 4)$$

式中  $\delta$ ——相对误差,相对误差通常用百分数给出;

$\Delta$ ——绝对误差;

$L$ ——真实值。

当实际测量时被测量的真实值  $L$  无法知道时,则用测量值  $X$  代替真实值  $L$  进行误差计算,得出的相对误差定义为标称相对误差,即

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (1 - 5)$$

#### (3) 引用误差

引用误差是表示相对满量程的一种误差表示方法,用仪表测量时常采用这种误差表示方法。引用误差也用百分数表示,即

$$r = \Delta / (\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}) \quad (1 - 6)$$

式中  $r$ ——引用误差;

$\Delta$ ——绝对误差。

仪表精度等级是根据引用误差来确定的。例如,某一个仪表的精度等级为 0.1 级,表示该仪表的引用误差的最大值不超过  $\pm 0.1\%$ ,同样,1.0 级仪表的引用误差的最大值不超过  $\pm 1\%$ 。