

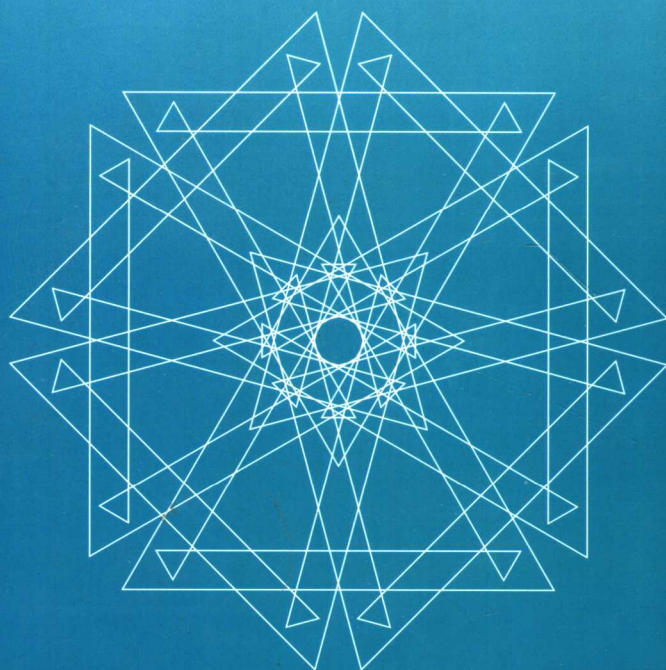
丛书主编 杨黎明

副主编 杨志勤 厉虹

机电一体化设计系列丛书

传感器检测技术

◎ 施湧潮 梁福平 牛春晖 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TP212
370
12

机电一体化设计系列丛书
丛书主编 杨黎明
副主编 杨志勤 厉虹

施湧潮 梁福平 牛春晖 编著

传感器检测技术



内 容 简 介

本书简要论述了检测技术和传感器的基础理论;对各种经典传感器和新型传感器的工作原理、结构、特性,以及应用等方面作了系统阐述;对计算机辅助检测技术作了概要介绍;最后描述了传感器与检测技术的典型应用。

本书可作为从事机电一体化系统设计、机械工程、检测技术、自动化和仪器仪表等行业工程技术人员的参考书,也适于作为与上述领域相关专业的大专院校师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

传感器检测技术/施湧潮,梁福平,牛春晖编著. —北京:国防工业出版社,2007.4

(机电一体化设计系列丛书/杨黎明主编)

ISBN 978-7-118-05025-7

I. 传… II. ①施…②梁…③朱… III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022046 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 字数 420 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

序 言

“机电一体化”是指在机械的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能等方面引入电子技术,并将机械装置、电力电子设备及相关技术设备组成的有机整体——机械电子产品或系统的总称。

机电一体化技术发展的状况标志着一个国家机械电子科学技术的发展水平,因此,发展机电一体化技术是发展我国机械电子科学技术的必由之路,也是振兴我国机械电子工业的主攻方向。目前,发达国家机电一体化技术已经很普及,国内一些工厂、企业、科研院所及大专院校在各领域已经开展机电一体化工作,并取得了一定成绩,但开展力度不大,不普遍。

为了促进我国机电一体化技术的发展,国防工业出版社特组织专家、教授和工程技术人员编写出版这套《机电一体化设计系列丛书》。

这套丛书包括:

- 《机构选型与运动设计》
- 《机械零部件选用与设计》
- 《机械优化设计》
- 《机械可靠性设计》
- 《转子现场动平衡技术》
- 《机电传动控制技术》
- 《伺服技术》
- 《传感器检测技术》
- 《精密机械元器件与电子元器件》
- 《机电一体化应用集锦》

编写这套丛书时,着重突出以下特点:

(1) 系统性。这套丛书涉及的内容基本覆盖机电一体化技术的相关学科,便于读者系统、深入地学习和应用机电一体化技术。

(2) 实用性。这套丛书从实用出发,本着“必需、够用、实际”的原则精选内容,在简要论述原理、方法、结构、标准的基础上,列举了大量的理论联系实际的例题,有较强的设计示范作用。

(3) 针对性。这套丛书主要是为中小工厂、企业从事机电一体化技术的人员学习和应用编写的,读者在机电一体化技术相关学科都有一定的理论基础和实践经验。因此,策划丛书书目时,基本是按一门学科或一个子系统一本书的原则划分的。因此,丛书内容专、篇幅小,便于读者根据需要选购。

(4) 适用性。这套丛书还可以作为大专院校和职业学校学习机电一体化技术的参考书或教材。因此,这套丛书对促进机电一体化技术的发展具有普及性和适用性。

希望读者喜爱这套丛书,并提出宝贵意见。

杨黎明
2006年9月

前 言

传感器检测技术是集机械工程、电子学、光学、材料科学、计量学、信息论、自动化和测控技术为一体的综合技术。随着现代科学技术的发展,特别是微电子技术、计算机技术、激光技术,以及信息处理技术的飞速发展,各个领域需要获取的信息量越来越多,对各种信息的检测精度要求越来越高,从而对传感器检测技术提出了更新更高的要求。这也正是现代传感器与检测技术得到飞速发展的原因。

本书遵循简明、实用、新颖的编写原则,力求理论联系实际,简要论述了检测技术和传感器的基础理论;对各种经典传感器和新型传感器的工作原理、结构、特性,以及应用等方面作了系统阐述;对计算机辅助检测技术作了概要介绍;最后描述了传感器与检测技术的典型应用。

本书可作为从事机电一体化系统设计、机械工程、检测技术、自动化和仪器仪表等行业的工程技术人员的参考书,也适用于作为与上述领域相关专业的大专院校师生的参考教材。

全书共分 15 章,由施湧潮教授和梁福平教授任主编。第 1 章、第 2 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章和第 13 章由施湧潮教授编写;第 3 章、第 4 章、第 5 章和第 7 章由梁福平教授编写;第 6 章和第 8 章由王晓飞副教授和梁福平教授合作编写;第 12 章、第 14 章和第 15 章由牛春晖博士编写。

本书在编写过程中查阅和参考了大量文献,并得到了中国仪器仪表行业协会传感器分会副理事长王文襄教授、中航电测仪器股份有限公司、沈阳仪表科学研究院,以及兄弟院校许多老师的大力支持,在此一并表示诚挚的谢意!

由于编者的水平所限,加上时间仓促,书中一定会有不足、欠妥和错误之处,敬请读者不吝赐教。

编 者
2006 年 12 月

目 录

第 1 章 检测技术基础 / 1

1.1 概述 / 1

1.1.1 检测技术的地位和作用 / 1

1.1.2 检测系统的组成 / 2

1.1.3 检测技术的发展 / 3

1.2 测量误差和测量不确定度 / 5

1.2.1 测量和测量方法 / 5

1.2.2 测量误差 / 6

1.2.3 测量不确定度 / 8

1.3 测量数据的处理与表述方法 / 11

1.3.1 测量数据处理 / 11

1.3.2 测量数据的表述方法 / 14

第 2 章 传感器技术概论 / 16

2.1 传感器概述 / 16

2.1.1 传感器的定义与组成 / 16

2.1.2 传感器的分类 / 17

2.1.3 传感器技术的发展 / 19

2.2 传感器的基本特性 / 21

2.2.1 传感器的静态特性 / 21

2.2.2 传感器的动态特性 / 24

2.3 传感器的技术性能指标及改善性能途径 / 29

2.3.1 传感器的技术性能指标 / 29

2.3.2 改善传感器性能的技术途径 / 30

2.4 传感器的标定与校准 / 33

2.4.1 概述 / 33

2.4.2 传感器静态特性的标定 / 33

2.4.3 传感器动态特性的标定 / 33

2.4.4 传感器标定举例 / 35

第 3 章 电阻式传感器 / 38

3.1 应变式电阻传感器 / 38

3.1.1 应变式电阻传感器的工作原理 / 38

3.1.2 电阻应变计的结构规格与类型 / 39

3.1.3 电阻应变计的主要特性 / 42

3.1.4 电阻应变计的选择和粘贴工艺 / 45

3.1.5 电阻应变式传感器的测量转换电路 / 50

3.1.6 应变式传感器的构成及常用的弹性敏感元件 / 54

3.1.7 电阻应变计的温度误差及补偿 / 54

3.1.8 电阻应变式传感器的应用 / 57

3.2 压阻式传感器 / 63

3.2.1 压阻式传感器的工作原理 / 63

3.2.2 压阻式传感器的结构与特性 / 63

3.2.3 压阻式传感器的测量电路 / 65

3.2.4 压阻式传感器的温度误差及补偿 / 66

3.2.5 压阻式传感器的应用 / 67

3.3 电位器式传感器 / 71

3.3.1 电位器式传感器的工作原理和类型 / 71

3.3.2 电位器式传感器的结构与设计 / 72

3.3.3 电位器式传感器的

应用/72

3.4 传感器的选用原则/74

第4章 电感式传感器/76

4.1 自感式传感器/76

4.1.1 自感式传感器的工作
原理及结构形式/76

4.1.2 特性分析/77

4.1.3 转换电路/79

4.1.4 应用/82

4.2 差动变压器/84

4.2.1 工作原理/84

4.2.2 结构形式及特性/85

4.2.3 差动变压器的转换
电路/86

4.2.4 应用/89

4.3 电涡流式传感器/91

4.3.1 工作原理/91

4.3.2 结构特点及特性/92

4.3.3 转换电路/95

4.3.4 应用/97

4.4 压磁式传感器/100

4.4.1 压磁效应和压磁元件/100

4.4.2 压磁式传感器的结构/101

4.4.3 工作原理/101

4.4.4 压磁元件/102

4.4.5 压磁式传感器的转换
电路/102

4.4.6 应用/103

第5章 电容式传感器/105

5.1 电容式传感器的工作原理 和特性/105

5.1.1 工作原理/105

5.1.2 类型与结构形式及
特性/105

5.2 电容式传感器的测量转换 电路/109

5.2.1 电容式传感器的
等效电路/109

5.2.2 转换电路/109

5.3 电容式传感器的主要性能、 特点和设计要点/114

5.3.1 主要性能/114

5.3.2 特点/115

5.3.3 设计要点/116

5.4 电容式传感器的应用/118

5.4.1 电容式位移传感器/118

5.4.2 电容式加速度传感器/119

5.4.3 电容式差压传感器/119

5.4.4 电容式压力传感器/120

5.4.5 电容式称重传感器/121

5.4.6 电容式测厚传感器/121

5.4.7 电容式线位移传感器/122

5.4.8 电容式液位传感器/122

5.4.9 高分子电容式湿敏
传感器/123

5.5 硅电容式集成传感器/124

5.5.1 硅电容式集成压力
传感器/124

5.5.2 硅电容加速度传感器/125

第6章 压电式传感器/127

6.1 工作原理/127

6.1.1 压电效应/127

6.1.2 压电式传感器的等效
电路/128

6.1.3 压电式传感器的常用
结构形式/129

6.2 压电材料/130

6.2.1 压电材料的主要特性
参数/130

6.2.2 压电材料的分类及
特性/130

6.3 压电式传感器的测量电路/133

6.4 压电式传感器的应用/136

6.4.1 压电式力传感器/136

6.4.2 压电式压力传感器/137

6.4.3 压电式加速度传感器/138

6.4.4 压电式位移传感器/141

6.4.5 压电式料位测量系统/142

第7章 磁电式传感器/143

7.1 磁电感应式传感器/143

7.1.1 工作原理/143

7.1.2 类型与结构及设计要点/144

7.1.3 应用/146

7.2 霍耳传感器/148

7.2.1 工作原理/149

7.2.2 结构及特性分析/150

7.2.3 霍耳元件的基本电路/152

7.2.4 霍耳元件的测量误差及补偿方法/153

7.2.5 霍耳集成电路/155

7.2.6 霍耳传感器的应用/156

7.2.7 霍耳传感器的选用/160

7.3 磁栅式传感器/161

7.3.1 工作原理和结构/161

7.3.2 信号处理方法/163

7.3.3 磁栅式传感器的误差分析及特点/164

7.3.4 应用/164

第8章 热电式传感器/165

8.1 热电式传感器的类型/165

8.2 热电偶/166

8.2.1 热电偶的基本工作原理/166

8.2.2 热电偶的结构和常用的热电偶类型/167

8.2.3 热电偶的温度补偿/168

8.2.4 热电偶的测量电路及应用/170

8.3 热电阻/172

8.3.1 概述/172

8.3.2 热电阻材料和常用的热电阻及其结构/173

8.3.3 热电阻的测量电路及应用/174

8.4 半导体热敏电阻/176

8.4.1 热敏电阻的结构/176

8.4.2 热敏电阻的主要特性/176

8.4.3 热敏电阻的测量电路及应用/178

8.5 新型温度传感器/180

8.5.1 PN结温度传感器/180

8.5.2 压电型温度传感器/180

8.5.3 集成温度传感器/181

8.6 热敏元件、温度传感器及仪表的选用/182

8.6.1 热敏元件的选用/182

8.6.2 温度变送器的选用/183

8.6.3 温度仪表的选用/184

第9章 光电式传感器/186

9.1 光源/186

9.1.1 光源类型/186

9.1.2 光源的选用/189

9.2 光电效应和光电器件的选用原则/190

9.2.1 光电效应/190

9.2.2 光电器件选用的一般原则/192

9.3 光电器件/192

9.3.1 光电管/192

9.3.2 光电倍增管/194

9.3.3 光敏电阻/195

9.3.4 光电池/198

9.3.5 光电二极管/199

9.3.6 高速光电二极管/201

9.3.7 光电三极管/202

9.3.8 光电闸流晶体管/204

9.4 光电式传感器及其应用/205

9.4.1 光电式传感器的类型/205

9.4.2 光电式传感器应用实例/206

第10章 数字式传感器/209

10.1 光栅传感器/209

10.1.1 光栅/209

10.1.2 莫尔条纹/210

10.1.3 光栅传感器的结构和工作原理/212

10.1.4	光栅传感器的应用/ 215
10.2	感应同步器/ 216
10.2.1	感应同步器的结构/ 216
10.2.2	感应同步器的工作原理/ 217
10.2.3	感应同步器的应用/ 220
10.3	编码器/ 220
10.3.1	绝对编码器/ 221
10.3.2	增量编码器/ 222
10.3.3	编码器的应用/ 222
第 11 章	光纤传感器/ 224
11.1	光纤传感器技术基础/ 224
11.1.1	光纤结构和类型/ 224
11.1.2	光纤导光原理和性能参数/ 225
11.2	光纤传感器的结构原理与分类/ 227
11.2.1	光纤传感器的结构原理/ 227
11.2.2	光纤传感器的分类/ 228
11.3	光纤传感器的应用/ 230
11.3.1	温度的检测/ 230
11.3.2	位移和振动的检测/ 232
11.3.3	压力的检测/ 235
11.3.4	液位、流速、流量的检测/ 237
11.3.5	电流、电压的检测/ 240
11.3.6	干涉型光纤传感器/ 242
第 12 章	超声波传感器/ 246
12.1	声波的物理基础/ 246
12.1.1	声波的分类/ 246
12.1.2	超声波的波型/ 246
12.1.3	超声波的传播速度/ 246
12.1.4	超声波的反射、折射以及波型转换/ 247
12.1.5	声波的衰减/ 248
12.1.6	多普勒效应/ 248
12.2	超声波传感器的原理和结构/ 249
12.2.1	压电式超声波传感器/ 249

12.2.2	磁致伸缩型超声波传感器/ 251
12.2.3	电磁型超声波传感器/ 252
12.3	超声波传感器的应用/ 252
12.3.1	超声波测厚/ 252
12.3.2	超声波物位测量/ 253
12.3.3	超声波测距/ 256
12.3.4	超声波流量测量/ 256
12.3.5	超声波无损探伤法/ 258
第 13 章	固态图像传感器/ 261
13.1	电荷耦合器件的基本原理/ 261
13.1.1	电荷存储/ 261
13.1.2	电荷转移/ 262
13.1.3	电荷检测/ 263
13.2	固态图像传感器的类型和基本特性参数/ 264
13.2.1	固态图像传感器的类型/ 264
13.2.2	固态图像传感器的基本特性参数/ 270
13.3	特种图像传感器/ 272
13.3.1	红外固态图像传感器/ 272
13.3.2	微光 CCD 图像传感器/ 274
13.4	固态图像传感器的应用/ 274
13.4.1	应用范围/ 274
13.4.2	应用示例/ 275
第 14 章	计算机辅助检测技术/ 282
14.1	计算机检测系统概述/ 282
14.1.1	计算机检测系统的基本结构/ 282
14.1.2	接口技术/ 283
14.1.3	总线技术/ 290
14.2	计算机检测系统的设计/ 291
14.2.1	传感器的选择/ 291
14.2.2	主计算机选型/ 292
14.2.3	输入、输出通道设计/ 293
14.2.4	软件设计/ 293

14.2.5	计算机检测系统 设计的基本步骤/ 293	15.2.3	液位传感器/ 308
14.3	虚拟仪器/ 294	15.2.4	空气流量传感器/ 309
14.3.1	基本概念及特点/ 294	15.2.5	温度传感器/ 310
14.3.2	构成形式/ 295	15.2.6	汽车用压力传感器/ 310
14.3.3	虚拟仪器的开发 平台/ 296	15.2.7	爆燃传感器/ 311
14.3.4	虚拟仪器的设计 思路/ 297	15.3	家用电器中的传感器/ 312
第 15 章	传感器检测技术在机电系统 中的典型应用/ 299	15.3.1	洗衣机中所用传 感器/ 313
15.1	检测系统设计/ 299	15.3.2	控制燃烧过程的 传感器/ 317
15.1.1	传感器的选用原则/ 299	15.3.3	小型家电中的传 感器/ 318
15.1.2	设计测试系统应 考虑的因素/ 299	15.4	机器人传感器/ 319
15.1.3	检测过程中的抗 干扰技术/ 300	15.4.1	机器人视觉传感器/ 320
15.2	传感器在汽车工业中的应用/ 305	15.4.2	机器人触觉传感器/ 322
15.2.1	曲轴转角及转速 传感器/ 306	15.4.3	机器人接近觉传 感器/ 326
15.2.2	车速传感器/ 307	15.4.4	听觉、嗅觉、味觉 传感器/ 327
			参考文献/ 329

第1章 检测技术基础

检测技术在国民经济各领域和国防建设中有着广泛的应用。检测技术是多门学科和多种技术的综合应用技术,它涉及信息论、数理统计、电子学、光学、精密机械,以及传感技术、计量测试技术、自动化技术、微电子技术和计算机应用技术等学科知识和近代技术。

检测技术,有时也称为测试技术,它包含测量和检验(试验)两部分。测量,就是把被测对象中的某种信息测出来,并加以度量;检验(试验),就是通过某种方法,把检测系统存在的某种信息,通过专门的装置,人为地激发出来,并加以测量。

本章将简要阐述检测技术的地位和作用,检测系统的组成和检测技术的发展,以及检测过程中存在和需要处理的基本内容,即:测量误差、测量不确定度、测量数据的处理。

1.1 概 述

1.1.1 检测技术的地位和作用

检测是指在工农业生产、科学研究、国防建设,以及医疗卫生等各个领域为及时获得生产过程,被测、被控对象的有关信息而实时或非实时地对一些参量进行定性检查和定量测量。因此,检测是意义更为广泛的测量。

对工业生产而言,采用各种先进的检测手段对生产过程进行检查、测量,对确保安全生产,保证产品质量,提高产品合格率,降低能源和原材料消耗,提高企业的劳动生产率和经济效益是必不可少的。

在工业生产中,为了保证生产过程能正常、高效、经济地运行,必须对生产过程的某些工艺参数,如温度、压力、流量等进行检测和控制。例如化工厂生产合成氨,需要严格控制合成塔中心的化学反应速度;而要控制反应速度,就要严格控制影响反应速度的主要因素——温度和压力。这就需要在线、实时、高精度地检测与控制这两个参量。为保证设备完好及安全生产,需对动力设备、电气设备进行安全检测,例如对汽轮机的轴向位移和径向振动的监测,对压力容器和蒸汽锅炉在运行中的泄漏、裂纹及腐蚀程度的检测等,都需要高性能的检测仪器及装置。国防建设中,对检测的需求更多,要求更高。研制任何一种新型武器,从设计零部件到样机试验,都要经过许多严格的检测。至于在导弹、卫星研制和控制过程中,需检测的动态参量就更多,要求也更高。没有可靠的检测手段,要使导弹准确命中目标,卫星准确入轨是根本不可能的。

现代机械工业的发展,面临着新兴科学技术发展的挑战。宇航、高能物理、超导、纳米技术、激光、计算机、微电子技术以及智能机器的发展,对机械工业提出了新课题。另一方面,随着机械加工精度的提高和生产自动化的发展,现代机械加工过程已从单机自动化和自动生产线发展到柔性制造系统,并朝着无人化工厂方向发展。生产中除了加工后的测量外,还应包括在线检测,即从备料到产品包装、入库等流程的全过程,以及设备管理、故障诊断和安全监控等。因此,先进的检测技术已成为生产系统不可缺少的一个组成部分。

随着计算机和电子技术的发展,机械与电子相结合,形成了机电一体化系统。机电一体化系

统是在机械结构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进了电子技术,是将机械装置与电子设备以及软件等有机地结合起来构成的系统。机电一体化技术的兴起和发展,使机电产品的结构与功能产生了质的飞跃。机电产品由以往取代、延伸或扩大人的体力劳动的作用,跃变到取代、延伸与加强人的部分脑力劳动的作用。与此同时,机电产品的制造过程发生了飞跃。制造过程不仅包含物质流与能量流,而且包含了信息流。制造过程正在走向柔性化、集成化、智能化。柔性制造系统与计算机集成制造系统的出现和发展,正是这一趋势的体现,这一切的关键就在于信息的获取、传输、存储、分析、处理和利用。而所有这一切均离不开检测技术与检测设备。

此外,随着人们生活水平的提高,检测技术与人们的日常生活愈来愈密切。如起居室中温度、湿度的控制,防火、防盗及家用电器的测试,用先进的医疗仪器进行疾病的检查与诊断等。

1.1.2 检测系统的组成

检测系统由对被检测对象进行检出、变换、传输、分析、处理、判断和显示等不同功能的环节组成。检测系统最基本的组成原理框图如图 1-1 所示。

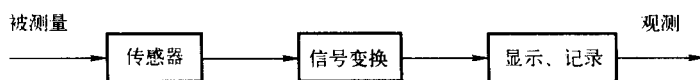


图 1-1 检测系统组成原理框图

传感器作为检测系统的第一环节,将检测系统或检测过程中需要检测的信息转化为人们熟悉的各种信号,这是检测过程的第一步。通常,传感器将被测量转换成以电量为主要形式的电信号,例如将机械位移转换为电阻、电容或电感等电参数的变化;又如将振动或声音转换成电压或电荷的变化。

信号变换部分是对传感器所送出的信号进行加工,如将电阻抗变为电压或电流、对信号进行放大等。为了用传感器输出的信号进一步推动显示、记录仪器和控制器,或将此信号输入计算机进行信号的分析和处理,需对传感器输出的信号作进一步变换。信号变换的具体内容很多,如用电桥将电路参量(如电阻、电容、电感)转换为可供传输、处理、显示和记录的电压或电流信号;利用滤波电路抑制噪声、选出有用信号;对在传感器及后续各环节中出现的一些误差作必要的补偿和校正;信号送入计算机以前需经模—数转换及在计算机处理后送出时需经数—模转换等。经过这样的加工使传感器输出的信号变为合乎需要、便于传输、便于显示或记录和可作进一步处理的信号。

显示与记录部分将所测信号变为一种能为人们所理解的形式,以供人们观测和分析。

上述检测系统各组成部分都是“功能块”的含义,在实际工作中,这些功能块所表达的具体装置或仪器的伸缩性是很大的。例如信号变换部分可以由很多仪器组合成的一个完成特定功能的复杂群体,也可以简单到一个变换电路,甚至可能仅是一根导线。

由于信号分析和处理理论以及信息处理技术的迅速发展,特别是计算机技术在信号处理中的广泛应用,近年来已将信号的后继处理部分引入到检测系统,成为检测系统的有机组成部分,形成如图 1-2 所示的较为复杂的检测系统。这些信号处理部分无论是运用模拟信号处理技术,还是数字信号处理技术,都是将所测信号进一步变换、运算等,从原始的检测信号中提取表征被测对象某一方面信息的特征量,以利于人们对客观事物动态过程的更深入认识。

检测系统是要检测出被测对象中人们所需要的某些特征性参量信号,不管中间经过多少环节的变换,在这些过程中必须忠实地把所需信息通过其载体信号传输到输出端。整个过程要求

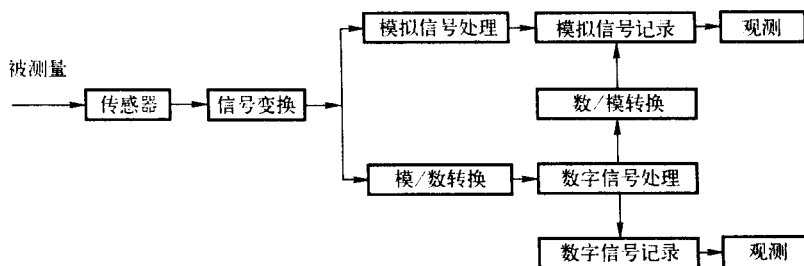


图 1-2 包含信号处理功能的检测系统框图

既不失真,也不受干扰。这就要求系统本身既具有不失真传输信号的能力,还具有在外界各种干扰情况下能提取和辨识信号中所包含的有用信息的能力。

检测系统在一定程度上是人类感官的某种延伸,但它能获得比人的感官更客观、更准确的量值,具有更为宽广的量程,反应更为迅速。不仅如此,检测系统通过对所测结果的处理和分析,把最能反映研究对象本质的特征量提取出来并加以处理,这就不仅是单纯的感官的延伸,而且具有了选择、加工、处理以及判断的能力,也可以认为是一种智能的复制和延长。

1.1.3 检测技术的发展

检测技术虽然已经得到广泛的应用,但随着科学技术的发展,对它提出了愈来愈高的要求。目前,除不断提高精度、扩展功能、扩大应用范围外,总的趋势是一体化、小型化、智能化和网络化。具体地说可以有以下几个方面。

1. 提高系统性能,扩大应用范围

随着生产和科学技术的发展,对检测系统及仪器性能的要求愈来愈高,需要研制能检测生产和工艺过程中极端参数的检测系统和仪器。例如,纳米量级的长度和位移测量、液态金属温度的连续测量、固体物质表面高温测量、极低温度测量(超导)、混相流量测量、脉动流量测量、微差压测量、分子量测量、高精度质量称重、大吨位测量、超高压大电流测量等。因此要求检测系统及仪器在原有的基础上不断提高技术性能指标,扩大应用范围。

检测系统及仪器的可靠性对其质量来说已成为一个重要的指标。仪器仪表可靠性的研究包括仪器仪表可靠性和故障率的数学模型和计算方法的研究,仪器仪表可靠性设计、预测、检测和分析试验研究;仪器仪表组件可靠性对整机性能的影响和确定整机可靠性的方法研究等。

2. 仪器仪表的一体化和小型化

鉴于传感器与测量电路的分开,有时常会受到电磁干扰信号的影响,而且使用也不方便,所以希望把传感器和测量电路结合在一起。近年来研制成功的一种物性型检测传感器,就是在半导体技术的基础上,进一步实现材料、器件、电路、系统一体化的新型仪表。它利用某些固体材料的物性(机械特性、电特性、磁特性、光特性、化学特性等)变化,实现信息的直接变换。也就是说,利用不同材料的物理、化学、生物效应做成器件,直接测量被测量的信息,而且把电路也做在一起。这样,它与一般传感器相比,有构造简单、体积小、质量轻、无可动部件、反应快、灵敏度高、稳定性好、可靠性高等特点,能解决许多原先难于实现的参数测量、成分测量和非接触测量等问题。

光机电一体化仪器仪表的研制是一体化仪器仪表发展的一个重要标志。在检测过程中,把传感器置于被测对象上,相当于加一负载在上面,这样或多或少会影响测量精度,而且有些被测对象和检测环境中根本不可能安装传感器。例如高速回转轴的振动、转矩测量,人体血液测量等。因此基于光学测量原理的非接触式测量设备、光机电一体化传感器和检测系统应运而生。

例如光栅式数字传感器、激光多普勒流量计、光纤传感器、固态图像传感器等。

从仪器仪表本身的角度考虑,微型仪器也是人们长期追求的目标。至今,这个目标已部分得到实现。例如:掌上式频率计和频谱分析仪已面市;手提式血液分析系统已可取代大型生化仪器;手提式微金属检测仪可方便地检测水质;传统的用于元素分析的质谱仪是一台庞大的设备,它具有真空、电离、探测等许多部分,目前已做得如台式计算机般大小,并已着手向手提式方向发展,等等。随着科学技术的发展,航天航空、医疗器械等领域对仪器仪表的大小、质量有了特殊的要求,从而也促使仪器仪表进一步向小型化和微型化方向发展。

3. 检测仪器及系统的智能化

自 20 世纪 70 年代以来,以大规模集成电路为基础的微处理器已大量应用于检测技术中,使检测仪器及系统智能化走上了快速发展的道路。带微处理器的检测仪器与传统的仪器相比,除精度提高外,还有下列功能扩展的特点:

(1) 自校正功能。可以通过功能键送入的指令,按预先编制并在机内存储的操作程序,完成自校准、自调零、自选量程、自动测试和自动分选。这样就能对传感器的非线性及仪器零点进行校准,能根据机内或机外基准定期作自校准,提高仪器的精度,而且可降低对元器件长期稳定性的要求。

(2) 信息交换功能。可以按参数之间的关系式,通过计算进行参数变换,因而可以通过某些参数的检测而自动求出一系列其他有关的未知数,便于实现多功能、多参数检测,或者通过最易测的参数测量,而获得难测甚至无法测出的参数。

(3) 统计处理功能。可根据误差理论对测得的数据进行处理,求出误差,并从测量结果中扣除,这就提高了仪器的测量精度。它可以根据工作条件(例如环境温度、相对湿度、大气压力等)的变化,根据一定公式计算修正值,并修正测量结果;这样就使测量的精度提高,结果更为可靠。它还可以采用多次读数的平均值或作相关计算方法来抑除噪声,以检测出被噪声完全淹没的信号。

(4) 记录、存储功能。可根据需要把瞬时测量值、中间结果等按时间存储或记录输出,供事后分析改进。

(5) 远程输入、输出功能。可配置远程通信接口,传递检测数据和各种操作命令、控制信息、输入参数等,可方便地接入自动检测、控制的大网络系统。

(6) 故障检测、诊断和自恢复功能。经过合理的设计,均可使智能仪器、智能检测系统具有故障自诊断、检测;经冗余设计的智能仪器、智能检测系统,还能具备一定的故障自恢复能力。

另外,由于包括微处理器、单片机在内的大规模集成电路的成本和价格不断降低,功能和集成度不断提高,使得智能仪器、智能检测系统与传统仪表和相应的传统检测系统相比具有更高的性能/价格比。

正是由于采用微处理器、单片机的智能检测仪器和系统具有上述优点,所以有关它们的研制、生产、应用与日俱增。

4. 虚拟仪器和检测系统网络化

虚拟仪器概念的引入使传统仪器仪表的面貌发生了革命性的变化。基于虚拟仪器的计算机辅助检测技术成为检测技术领域中具有极强生命力的新军。“软件就是仪器”已成为现实。应用图形化编程语言 Labview, Labwindows, CVI, VEE 等开发软件,用户可以自己定义自己的仪器,方便地创建仪器的软面板,或通过 VXI, PXI, PCI 仪器总线自由地将各测试模块组成完整的检测系统,或将 RS232, GPIB 等接口的仪器自由组合起来,从而大大扩展了仪器的功能,节省了大量的硬件资源。

网络技术大大缩短了时间和空间领域。网络化仪器可把远在千里之外的检测任务放在本实验室进行。现场网络化、智能化仪器仪表通过嵌入式 TCP/IP 协议软件,使它们与计算机一样,成为网络中独立的节点,用户通过浏览器或符合规范的应用程序即可实时浏览这些检测信息,以及实时监控检测系统。

1.2 测量误差和测量不确定度

1.2.1 测量和测量方法

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 为被测量值; u 为标准量,即测量单位; n 为比值(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获取被测量的信息,将建立的测量信号经过变换、传输、处理,最终获得被测量的量值。

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分析,选择合适的测量仪器(系统)和切实可行的测量方法,对测量工作是至关重要的。

测量方法可从不同角度加以分类。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,其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,用弹簧秤测量质量,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,缺点是测量精度低。

使用测量仪器(系统)对被测量对象测量时,对于被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, Δ 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 Δ ,即使测量 Δ 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。

1.2.2 测量误差

1. 测量误差有关术语

(1) 真值。真值是指在一定的时间及空间条件下,某被测量的真实数值。通常认为,真值是客观存在,但不可测量的,是一个理想的概念。在测量中,一方面无法获得真值,而另一方面又往往需要运用真值。因此,在实际测量中,经常采用“约定真值”和“相对真值”。约定真值对给定的目的而言充分接近于真值,因而可以代替真值使用。在实际测量中,被测量的实际值、已修正过的算术平均值均可作为约定真值。相对真值叫实际值,是在满足规定准确度时用来代表真值使用的值。

(2) 标称值。标称值是指测量器具(仪器)上标志的量值。如标准砝码上标出的 1 kg,受制造、测量(或检定)及环境条件变化的影响,标称值不一定等于它的实际值。为此,在给出标称值的同时,通常也给出它的误差范围或精度等级。

(3) 示值。示值是指由测量仪器(系统)给出或提供的量值,也称测量值。

(4) 测量结果。测量结果是指由测量所得的测量值。在测量结果的表述中,还应包括测量不确定度和有关影响量的值。

(5) 测量精度。测量精度,即测量结果的精度,是指反映测量结果与真值接近程度的量。它与测量误差相对应,即误差大,精度低;误差小,精度高。也就是说,测量精度是从另一角度评价测量误差大小的量。

测量精度可细分为准确度(反映测量中系统误差的大小,即测量结果偏离真值的程度)、精密(反映测量中随机误差的大小,即测量结果的分散程度)、精确度(反映测量结果中系统误差和随机误差综合影响的程度)。

(6) 测量不确定度。测量不确定度是表征被测量的真值在某量值范围内不能肯定的程度,

是对测量误差极限估计值的评价。

(7) 测量误差。测量误差是测量结果与被测量真值之差,即:测量误差 = 测量结果 - 真值。

2. 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: Δ 为绝对误差; X 为测量值; L 为真值。

对测量值进行修正时要用到绝对误差。修正值实际上是与绝对值符号相反、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够的,因为绝对误差并没有反映出多大范围内得到的误差。如,绝对误差 $\Delta = 1^{\circ}\text{C}$, 这个误差对拉制单晶硅(1420°C)测量而言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: δ 为相对误差,通常用百分数表示; Δ 为绝对误差; L 为真值。

当实际测量中被测量的真值 L 无法知道时,则用测量值 X 代替真值 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 为引用误差; Δ 为绝对误差。

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 $\pm 1\%$ 。

此外,在使用传感器和仪表进行测量时,还常用到基本误差和附加误差两个概念。

4) 基本误差

基本误差是指仪表在规定的标准使用条件下所具有的误差。仪表的基本误差是在电源电压 (220 ± 5) V、电网频率 (50 ± 2) Hz、环境温度 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 、环境相对湿度 ($65\% \pm 5\%$) 的条件下标定的。如果仪表在这个规定条件下工作,那么仪表所具有的误差就是基本误差。测量仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

5) 附加误差

附加误差是指当仪表的使用工作条件偏差额定工作条件下出现的误差。当使用工作条件的温度、频率、电源电压波动时,引起的误差分别表示为温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

3. 测量误差的分类

通常将测量误差按其性质分为三类:随机误差、粗大误差和系统误差。