

自动检测

张是勉 杨树智 编 著

科学出版社

77.2

自动检测

张是勉 杨树智 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是一本系统论述自动检测仪表基本原理及其应用的书。它的主要特点是根据信息传输的观点研究各种检测仪表的功能，并着重讨论各类变换器的动态特性。

全书共分十四章，主要包括自动检测仪表的基本概念、检测仪表的数学模型、各类物理量的检测方法和各种变换器的原理及其应用等方面的内容，此外还介绍了红外探测技术和仪表噪声与干扰问题。书中涉及面较广，内容叙述深入浅出。

本书可供冶金、化工、电力、机械和国防等领域中从事自动控制、自动检测的科研设计人员、工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

自 动 检 测

张是勉 杨树智 编著

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年9月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1987年9月第一次印刷 印张：19 1/4 插页：2

印 数：0001—5,300 字数：505,000

统一书号：15031·839

本社书号：4179·15—8

定价：6.50元

前 言

自动检测或称仪器仪表学，是自动化科学技术的一个分支学科，是在仪器仪表研制生产的基础上发展起来的一门技术科学。

近几年来，随着微型电子计算机的迅速发展，信息处理技术已推进到前所未有的阶段。信息处理技术的进展大大超过了获取信息的自动检测技术的发展。为组成先进的自动检测系统和自动控制系统，人们对获取信息的自动检测技术提出了越来越高的要求，而它在四化建设中所起的作用也正在越来越被人们所重视。目前自动检测技术的主要发展趋向是：一方面应用电子计算机对一些传统的检测方法进行详细的理论分析，找出其设计参数中的相互关系从而进行最优设计；另一方面是尽量采用新材料、新器件和新技术组成先进的检测系统。这两条途径可以互相促进、相辅相成。

目前我国有关自动检测的专著较少，为满足从事仪器仪表的科研设计人员及高等院校有关专业教学等方面的需要，我们编著了这本书。本书是根据杨嘉墀教授和作者在中国科技大学自动化系讲授课程的部分内容，加上作者多年的科研实践经验总结，经反复修改补充而成的。本书的主要特点是从检测仪表的基础理论出发，建立各种不同类型的检测仪表的数学模型，并应用系统理论的观点来研究各类检测仪表的共同特性和规律。在讨论各种参数检测时，除了介绍其检测原理外，还着重讨论各类变换器的动态特性以及它们对系统特性的影响。在内容方面特别注意到基本理论知识和实验技能两方面的结合。

本书共分十四章。第一章从信息传输观点讨论检测仪表的基本原理和数学模型；第二章介绍如何应用虚位移和能量守恒原理建立一般机电系统的动力学方程；第三章应用阻抗分析原理研究

线性机电系统的各种特性；第四章介绍各种电参数的转换电路；第五章到第十二章讨论各种物理量的检测方法以及各类变换器的原理与动态特性；第十三章介绍红外探测技术及其在空间技术中的应用；第十四章讨论检测仪表中的噪声和干扰问题。

在成书过程中，杨嘉墀教授多方面加以指导并审阅了原稿，在此谨致衷心谢意。由于作者水平有限，谬误在所难免，敬希读者批评指正。

编著者

于1984年5月

目 录

第一章 检测仪表基本原理和数学模型	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 仪器仪表发展过程	2
§ 1-3 检测系统的基本概念	4
1-3-1 信息	4
1-3-2 信号	6
1-3-3 信息机器	7
1-3-4 仪器仪表与系统	8
§ 1-4 仪器仪表的模型	9
1-4-1 仪器仪表模型的分类	9
1-4-2 仪器仪表数学模型的作用	10
§ 1-5 描述系统的变量与方程.....	11
1-5-1 通过变量与跨越变量	11
1-5-2 作用力变量与流动变量	12
1-5-3 端口与端点方程	13
§ 1-6 仪器仪表元件的分类与数学描述	16
1-6-1 物理元件的端口变量与能量关系	16
1-6-2 能量储存元件	17
1-6-3 能量转换元件	24
1-6-4 功率源	30
1-6-5 相互连接元件	30
1-6-6 控制元件	35
§ 1-7 检测仪表的数学模型	38
1-7-1 流体中的变换器	38
1-7-2 磁电式变换器	40
1-7-3 电阻丝应变变换器	41

1-7-4 机电式电容变换器	44
1-7-5 仪表变换器数学模型的作用	46
§ 1-8 物理系统的辨识	48
1-8-1 物理系统的数学模型	48
1-8-2 物理系统辨识	49
第二章 一般机电系统的动力学方程	52
§ 2-1 引言	52
§ 2-2 应用虚位移和能量守恒原理求机电耦合系统的 机械力	53
2-2-1 虚位移与能量守恒原理	53
2-2-2 一般机电耦合系统的机械力	58
2-2-3 磁场耦合的机械力	64
2-2-4 电场耦合的机械力	74
§ 2-3 典型机电系统的运动方程	80
2-3-1 磁场式电感变换器的动态特性	80
2-3-2 电场式电容变换器的动态特性	89
2-3-3 强迫运动的电磁变换器	96
第三章 一般机电系统的阻抗分析	106
§ 3-1 电系统与机械系统的阻抗	106
3-1-1 电系统与机械系统的相似性	106
3-1-2 电系统的复数阻抗	110
3-1-3 机械系统的复数阻抗	114
§ 3-2 机电耦合系统的阻抗	130
3-2-1 机电耦合系统的运动阻抗	130
3-2-2 机电耦合系统的转移阻抗	137
§ 3-3 机电系统的互易性定理	139
3-3-1 一般机电系统的互易性原理	139
3-3-2 应用拉格朗日方程分析机电系统的互易关系	142
3-3-3 机电耦合系统的等效电路	148
§ 3-4 机电变换器的电阻抗分析	153
3-4-1 由电网络输入端求机械系统参数	153

3-4-2 互易定理在变换器标定中的应用	157
第四章 电参数的转换	160
§ 4-1 电参数转换电路的作用与要求	160
4-1-1 引言	160
4-1-2 转换电路的电压灵敏度	161
4-1-3 转换电路的功率灵敏度	162
§ 4-2 直流不平衡电桥	164
4-2-1 引言	164
4-2-2 直流不平衡电桥的误差	165
4-2-3 电压灵敏度与参数的选择	167
4-2-4 功率灵敏度与参数的选择	169
§ 4-3 交流不平衡电桥	175
4-3-1 引言	175
4-3-2 电压灵敏度与参数的选择	176
4-3-3 功率灵敏度与参数的选择	181
4-3-4 差动变压器输出的电桥电路	187
§ 4-4 直流平衡电桥和交流平衡电桥	193
4-4-1 直流平衡电桥	193
4-4-2 交流平衡电桥	194
第五章 直线位移的检测	196
§ 5-1 电感式位移变换器	196
5-1-1 电感式变换器的一般特性	196
5-1-2 变磁阻式变换器	198
5-1-3 电感式变换器的转换电路	202
5-1-4 差动变压器式位移变换器	210
§ 5-2 电容式位移变换器	216
5-2-1 电容式变换器的一般特性	216
5-2-2 电容式变换器的灵敏度和线性度	218
5-2-3 电容式变换器的转换电路	222
§ 5-3 电阻式位移变换器	226
5-3-1 电阻式变换器的一般特性	226
5-3-2 电阻式位移变换器的分辨力和线性度	229

5-3-3 电阻式变换器的负载效应	232
§ 5-4 感应同步器位移检测装置	237
5-4-1 引言	237
5-4-2 旋转变压器的工作原理	238
5-4-3 直线感应同步器的工作原理	240
5-4-4 鉴幅型位移检测系统	243
5-4-5 鉴相型位移检测系统	249
§ 5-5 光栅位移检测装置	252
5-5-1 光栅的工作原理	252
5-5-2 光栅位移-电信号的转换	253
5-5-3 光栅模拟信号-数字信号转换	255
第六章 角位移的检测	259
§ 6-1 自整角机角位移检测系统	259
6-1-1 微型同步机	259
6-1-2 自整角机发送机特性	260
6-1-3 同步控制变压器	262
6-1-4 自整角机接收机	264
6-1-5 差动同步发送机和接收机	266
§ 6-2 旋转变压器角位移检测装置	268
6-2-1 正弦、余弦旋转变压器基本原理	268
6-2-2 旋转变压器的运算装置	269
6-2-3 用旋转变压器作角位移变换	272
§ 6-3 轴角数字编码器	275
6-3-1 引言	275
6-3-2 增量编码器	277
6-3-3 数字代码原理	279
6-3-4 二进制码编码器	282
6-3-5 循环码编码器	284
6-3-6 用V形电刷编码器消除非单值性	289
6-3-7 磁性轴角编码器	291
第七章 应变、力、载荷和力矩的检测	294
§ 7-1 力检测系统的动态特性	294

7-1-1 力检测系统的运动方程	294
7-1-2 力检测系统的动态响应	295
§ 7-2 应变变换器	300
7-2-1 电阻丝应变变换器原理与特性	300
7-2-2 电阻丝应变变换器的灵敏度与线性度	303
7-2-3 电阻丝应变变换器的工作电流	307
7-2-4 半导体应变变换器	309
§ 7-3 弹性元件力变换器	315
7-3-1 弹性杆轴向载荷变换器	315
7-3-2 弹性环力变换器	317
7-3-3 悬臂梁式力变换器	321
7-3-4 力矩变换器	323
7-3-5 弹性元件的非理想特性	325
§ 7-4 压磁式变换器	328
7-4-1 压磁式变换器的基本原理	328
7-4-2 压磁式变换器的机械结构	330
7-4-3 压磁式变换器的电路与输出特性	331
7-4-4 载荷分布的影响	333
§ 7-5 压电晶体变换器	334
7-5-1 压电效应原理与压电晶体材料	334
7-5-2 压电晶体变换器的一般特性	340
7-5-3 压电晶体变换器灵敏度与动态响应	343
✓ 第八章 转动速度的检测	347
§ 8-1 引言	347
§ 8-2 模拟式转动速度变换器	348
8-2-1 交流测速发电机	348
8-2-2 直流测速发电机	351
8-2-3 电容式转速变换器	354
8-2-4 变磁阻式转速变换器	358
8-2-5 磁敏式转速变换器	362
8-2-6 涡流式转速变换器	365
§ 8-3 数字式转动速度变换器	367

8-3-1 数字式转速检测系统	367
8-3-2 频闪式转速仪	368
8-3-3 光电数字式转速检测系统	369
8-3-4 霍尔转速变换器	372
§ 8-4 特殊转速的检测方法	376
8-4-1 低转速高精度检测系统	376
8-4-2 稳速直流机与同步机的瞬时速度的检测	378
第九章 振动、速度和加速度的检测	380
§ 9-1 引言	380
§ 9-2 振动系统的动态特性	381
9-2-1 振动振幅变换器特性	381
9-2-2 速度变换器特性	386
9-2-3 加速度变换器特性	386
9-2-4 加速度变换器的动态误差	387
§ 9-3 振动加速度变换器	391
9-3-1 应变式加速度变换器	391
9-3-2 压电晶体加速度变换器	394
§ 9-4 单方向加速度变换器	397
9-4-1 振弦丝加速度变换器	397
9-4-2 摆式加速度变换器	399
§ 9-5 高精度加速度变换器	404
9-5-1 在惯性导航系统中使用高精度加速度变换器 的必要性	404
9-5-2 利用伺服方法做高精度加速度变换器	406
9-5-3 加速度积分与准确度	412
9-5-4 摆式陀螺加速度变换器	414
9-5-5 双积分加速度变换器	417
第十章 流体压力的检测	421
§ 10-1 引言	421
§ 10-2 流体压力的敏感元件	422
10-2-1 弹簧管	422
10-2-2 波登管	422

10-2-3 圆形弹性膜片	424
§ 10-3 电容式压力变换器	427
10-3-1 膜片电容压力变换器	427
10-3-2 差动式电容压力变换器	431
§ 10-4 电感式压力变换器	433
10-4-1 差动变压器式压力变换器	433
10-4-2 扭臂式变磁阻压力变换器	434
§ 10-5 应变式压力变换器	436
10-5-1 应变片式压力变换器	436
10-5-2 应变丝式压力变换器	439
§ 10-6 光电式压力变换器	439
10-6-1 光电变换原理	439
10-6-2 光敏元件差动输出电路	440
§ 10-7 力平衡式压力变换器	443
10-7-1 力平衡式压力变换器原理	443
10-7-2 变换器的动态特性	444
§ 10-8 膜片压力变换器在流体中的动态特性	448
10-8-1 流体的传输特性	448
10-8-2 流体对膜片动态特性的影响	449
§ 10-9 数字式振动筒压力变换器	452
10-9-1 振动筒压力变换器工作原理	452
10-9-2 变换器输出信号的转换	454
10-9-3 变换器振动系统的特性	456
§ 10-10 振弦丝压力变换器	460
第十一章 流量的检测	464
§ 11-1 引言	464
§ 11-2 差压流量计	465
11-2-1 皮托管	465
11-2-2 文丘里管	466
11-2-3 差压孔板	468
11-2-4 力平衡式差压流量计	470
§ 11-3 转子流量计	472

§ 11-4 靶式流量计	474
§ 11-5 电磁流量计	476
11-5-1 电磁流量计的工作原理	476
11-5-2 电磁流量计转换电路	477
11-5-3 电磁流量计的特点	478
§ 11-6 容积流量计	479
11-6-1 椭圆齿轮流量计的工作原理	479
11-6-2 椭圆齿轮流量计的读数方式及转换电路	481
§ 11-7 涡轮流量计	483
11-7-1 涡轮流量计的工作原理	483
11-7-2 涡轮流量计的结构与转换电路	484
§ 11-8 旋涡流量计	485
11-8-1 卡尔曼旋涡	485
11-8-2 卡尔曼旋涡流量计	488
11-8-3 流体旋涡流的进动	491
11-8-4 旋进式旋涡流量计	495
§ 11-9 超声流量计	498
11-9-1 引言	498
11-9-2 超声流量计的工作原理	499
11-9-3 血液流量测量	504
§ 11-10 激光流速计	507
11-10-1 多普勒效应原理	507
11-10-2 激光流速检测系统	510
§ 11-11 核磁共振流量计	514
11-11-1 核磁共振原理	514
11-11-2 核磁共振流量计结构	519
第十二章 温度的检测	520
§ 12-1 热电偶温度计	520
12-1-1 热电偶的工作原理	520
12-1-2 热电偶自由端温度变化引起的误差及其补偿	522
12-1-3 热电偶的材料	525
12-1-4 热电变换元件的动态特性	530

§ 12-2 热电阻温度计	534
12-2-1 金属丝热电阻温度计	534
12-2-2 半导体热电阻温度计	539
§ 12-3 线性石英温度计	542
12-3-1 石英谐振器的温度系数	542
12-3-2 石英晶体的频率-数字转换	543
§ 12-4 声速测温装置	544
12-4-1 声速测温工作原理	544
12-4-2 声速测温的误差	545
12-4-3 声速测温装置及其应用	546
第十三章 光学高温计和红外辐射探测	548
§ 13-1 红外辐射原理	548
13-1-1 红外频谱	548
13-1-2 辐射能量的术语	549
13-1-3 绝对黑体模型与辐射定律	550
§ 13-2 光学高温计	555
13-2-1 光学高温计	555
13-2-2 光电高温计	557
13-2-3 双色高温计	559
§ 13-3 光学调制及其用途	561
13-3-1 光学调制器的作用	561
13-3-2 用光学调制盘进行背景过滤	562
13-3-3 用光学调制盘探测目标方位信息	564
§ 13-4 红外辐射探测器	567
13-4-1 红外辐射通量的探测	567
13-4-2 红外辐射调制系统与转换电路	569
13-4-3 卫星姿态控制用的红外地平仪	570
§ 13-5 红外辐射探测器的最佳设计	573
第十四章 噪声和干扰	582
§ 14-1 什么是噪声	582
14-1-1 噪声与噪声电压	582
14-1-2 几种主要的噪声	583

§ 14-2 噪声的指标与检测	588
14-2-1 等效噪声带宽	588
14-2-2 噪声指数	590
14-2-3 噪声的检测	591
§ 14-3 关于接地问题	592
14-3-1 地线及其重要性	592
14-3-2 检测系统的干扰及其抑制	594
主要参考文献	601

第一章 检测仪表¹⁾基本原理和数学模型

§ 1-1 引 言

人类在观察和测量自然界各种现象时，必须有仪器仪表组成的检测系统，它是人类感觉器官极其重要的扩展。如果没有仪器仪表，不管是对宏观的世界还是对微观的世界进行科学研究都是不可能的，因此，它对所有科学部门都是非常重要的，是绝对不可缺少的。

在科学研究中，我们要观察的自然现象是千变万化的，要测量的参数也是多种多样的，仪器仪表的设计、制造、使用的知识也是千差万别的，因此，仪器仪表学是不是一门科学？各种不同场合使用的仪表，在量程、反应速度、精确度、输出形式、使用环境等方面是五花八门的，但是否有一些共同的规律？有没有共同的理论？人类在长期的实践中，总是不断地总结经验，把感性认识提高到理性认识形成理论；当然，对组成检测系统的仪器仪表也不例外。近几年来，在国际计量技术联合会（IMEKO）举办的国际会议上，很多学者对这个问题进行了论述。仪器仪表科学是对测量方法和仪器仪表设计的共同理论进行研究的一门科学。

从人类使用机器或装置来看，可以归纳为两类：仪器仪表和动力机械。前者是实现信息形式的转换，与信息处理有关，属于信息机器；后者是实现能量形式的转换，属于能量机器。一般来说，在科学研究中检测系统用得很多，它的规模根据检测对象或解决检测的具体问题而定。现代检测仪表的设计、制造和使用的知识领域是非常广泛的，事实上包括整个物理学范畴，精密机械

1) 检测仪表：能确定所感受的被测变量大小的仪表的总称，它或者是变送器（transmitter）、变换器（transducer），或者自身兼有检测元件和显示装置。

设计, 电子技术, 电子计算机技术和自动控制理论. 然而, 在各种不同的实用例子中, 仪器仪表都具有共同的规律和特性, 它们都要完成输入量到输出量的变换. 在信息转换过程中, 必须有同一的概念, 统一的逻辑结构和原理.

近几年来, 由于科学的发展, 对检测技术提出了许多越来越高的要求, 因为被测参量往往是在不断地变化着的, 所以经常要求在动态情况下进行测量, 由于常常要观测一些新的、不易观测的现象, 因此对检测仪表的要求是快速、灵敏和精确; 有时检测过程必须在极其困难的环境和条件下进行.

同时, 由于其它学科如材料科学、电子技术和自动控制技术的发展, 使我们能够设计和生产出范围更广泛的多种多样的检测仪表, 如各种各样新型的变换器, 特别是由于电子计算机的发展, 提供了快速数据处理的手段, 使得仪器仪表科学有了很大的发展. 具体地说, 有些大型的检测系统已经生产出来, 这些设备不但能够检测各种现象和物理参数, 而且能够传递和处理这些信息, 使我们从大量数据中得到所需要的信息, 并以人们所要求的形式显示出来, 这样, 使得现代检测仪表的性能和使用范围大大地增加了; 当然, 仪表的复杂性和成本也同样地增加了.

应该着重指出, 从现代科学技术发展来看, 仪器仪表的设计和生产和建立各种检测系统, 已成为各科学研究工作和工业、国防自动化系统的关键问题. 特别是由于电子计算机的高速发展, 各种原始信息的准确获得已大大落后于数据处理技术. 因此, 加强检测方法和仪器仪表的科学研究, 培养这方面的科学研究和工程技术人才是非常重要的.

§ 1-2 仪器仪表发展过程

在人类进化过程中, “劳动创造了人本身”¹⁾. 人成为制造和使用工具的动物. 人们只有通过精巧的手和有想象力的脑子的有

1) 恩格斯, 自然辩证法, 人民出版社, 149 页 (1971).