



工业自动化仪表系列丛书

机械量测量与 虚拟仪器技术应用

余光伟 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

工业自动化仪表系列丛书

机械量测量与虚拟 仪器技术应用

主 编 余光伟
参 编 郑敏 朱贺 宋卓远



机械工业出版社

《工业自动化仪表系列丛书》 编辑委员会

主任委员	张继培		
副主任委员	史美纪 (常务)	吴钦炜	
	王璐璐	罗命钧	秦起佑
	张沪光	张永江	
委	薛生虎	杜水友	梁国伟
员	蔡武昌	李竞武	陈晓竹
	萧 鹏	孙自强	彭 瑜
	张雪申	刘士荣	付敬奇
	凌志浩	刘建侯	徐建平
	俞金寿	余光伟	

编写说明

工业自动化仪表是国民经济各部门重要的现代技术装备之一，广泛用于冶金、电力、石油、化工、轻工、纺织、交通、建筑、食品、医药、农业、环保以及日常生活等各个领域。

工业自动化仪表是对物质世界的信息进行自动测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和组成部分。

为了认真总结国内外工业自动化仪表的先进经验，提高我国工业自动化仪表的科技、生产、应用水平，经中国仪器仪表学会、上海工业自动化仪表研究所、机械工业信息研究院和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会共同研究，决定组织编写、出版《工业自动化仪表系列丛书》。

目前，首先陆续出版以下 16 种：《温度测量技术及仪表》、《压力测量技术及仪表》、《流量测量技术及仪表》、《物位测量技术及仪表》、《机械量测量与虚拟仪器技术应用》、《物性分析技术及仪表》、《显示调节技术及仪表》、《可编程序控制器及其应用》、《控制阀选型和应用》（原名执行器）、《过程控制系统和应用》、《仪表可靠性工程和环境适应性技术》、《仪表本安防爆技术》、《集散控制系统及其应用》、《工业控制计算机系统及其应用》、《现场总线与工业以太网》、《过程分析技术及仪表》。

本系列丛书内容完整，系列齐全，基本上反映了工业自动化仪表技术与产品的全貌；文字力求深入浅出，通俗易懂。系列丛书既可作为从事工业自动化仪表专业的工程技术人员及广大用户的参考书籍，也可作为大专院校教材及科研、设计、制造、使用单位工程技术人员的培训教材。

编写出版《工业自动化仪表系列丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《工业自动化仪表系列丛书》编辑委员会

前 言

机械量仪表已经广泛地应用于工业、国防和民用的各个领域。机械量仪表是对机械量参数进行测量、记录及调节的仪表。所谓机械量参数是指位移、尺度（包括厚度、宽度、长度、直径等）、力和重量（包括张力、轧制力、转矩、重力等）、速度（包括转速、线速等）、振动、加速度等物理参数。机械量仪表主要用于工业生产或运输作业过程中的连续、自动、快速、准确称量和配料控制，各种旋转机械的监控和故障诊断分析、轧钢过程自动化检测和控制，以及金属切削加工和材料性能试验等。

机械量仪表在国际和国内市场的需求量呈上升趋势，推动了行业经济效益的有效增长。美、德、英、瑞典、日本等国家近十年来，对机械量仪表的研制和发展给予了充分重视，致力于新工艺、新技术、新检测原理的研究及其实用产品的开发应用。许多厂商正在研制新的高准确度、高稳定、高智能化的机械量仪表，进行了有效工作，在技术上取得了重大突破。我国机械量仪表的生产企业规模较小，研发和技术水平较低，不能满足国内高端产品的需要。目前，高端产品主要依靠国外配套，国家大型重点建设项目中机械量参数测量、控制管理系统也长期依赖于进口。因此，为加快我国高准确度、高稳定、高智能化的机械量仪表的技术研究和产品开发已刻不容缓，势在必行。

虚拟仪器技术是近年来迅速发展的一种新的测试技术，它利用高性能的模块化硬件，结合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化的应用。虚拟仪器不但可以完成几乎所有传统仪器的功能，而且其功能比传统仪器更为先进。如网络化仪器、一机多用、实时更换更新，在信号调理、数据分析、数据

VI

存储、数据显示等多个方面，都具有传统仪器无法相比的优越性。由于其主要的仪器功能是靠软件来完成，这也使设备制造的物质成本降到了最低，可以满足当今世界绿色环保、节约能源的要求。据专家预测，我国虚拟仪器行业的产值在未来若干年内将占仪器仪表行业总产值的50%以上。所以虚拟仪器技术是电子信息时代仪器技术发展的新理念，它代表了今后仪器仪表技术发展的先进方向。

本书由上海大学余光伟主编，参加编写的有郑敏、朱贺、宋卓远。

上海工业自动化仪表研究院史美纪老师和上海大学黄迪山老师在百忙中对本书进行了认真的审阅，并提出了很多建设性的意见和建议，在此深表感谢！

本书在编写过程中，引用了参考文献所列的论著、教材和论文的有关内容，在此谨向这些作者表示衷心感谢。由于编者的学识和实践经验所限，时间仓促，缺点和不足在所难免，恳请读者和同行指正与赐教。

编者

2010年8月20日

目 录

编写说明

前言

第 1 章 概论	1
1.1 机械量测量仪表的构成	1
1.2 机械量测量仪表的分类	2
第 2 章 力和重量传感器及测量仪表	4
2.1 概述	4
2.1.1 分类和特点	4
2.1.2 技术发展和应用	5
2.1.3 国外称重传感器技术发展特点及快速发展的原因	7
2.2 电阻应变式称重仪表	8
2.2.1 工作原理	8
2.2.2 电阻应变片	9
2.2.3 传感器电桥的温度补偿及参数标准化	10
2.2.4 测量电路	11
2.2.5 电阻应变式称重传感器的技术参数	12
2.2.6 电阻应变式传感器的工程应用	12
2.3 压电式力测量仪表	13
2.3.1 工作原理	13
2.3.2 传感器结构	13
2.3.3 主要技术参数	14
2.3.4 压电式传感器的应用	15
2.4 压磁式测量仪表	16
2.4.1 压磁测力的原理	16
2.4.2 压磁式测力传感器	17
2.4.3 压磁式测力仪表的测量电路	17
2.4.4 主要技术参数	18

VIII

2.4.5	压磁式传感器的应用	18
2.5	测力称重仪表的工业应用	20
2.5.1	电子吊车秤	20
2.5.2	电子料斗秤与电子液罐秤	21
2.5.3	轧制力测量仪	23
2.6	物料连续计量与电子皮带秤	24
2.6.1	工作原理	25
2.6.2	主要技术参数	26
第3章	转矩测量仪表	27
3.1	概述	27
3.1.1	转矩的检测方法	27
3.1.2	分类和特点	27
3.1.3	轴功率的测量	28
3.2	电阻应变式转矩测量仪表	28
3.2.1	工作原理	28
3.2.2	电阻应变式转矩传感器	29
3.2.3	扭矩传感器的安装	30
3.3	磁弹性式转矩测量仪表	32
3.3.1	工作原理	32
3.3.2	结构	33
3.3.3	测量系统	34
3.4	光电式转矩测量仪表	35
3.4.1	工作原理	35
3.4.2	结构	36
3.4.3	主要技术参数	36
3.5	振弦式转矩测量仪表	36
3.5.1	工作原理	37
3.5.2	振弦式转矩传感器	39
3.5.3	转矩和轴功率计算	39
3.5.4	测量电路	40
3.5.5	主要技术参数	41
3.6	相位差式扭矩测量仪表	42
3.6.1	工作原理	43

3.6.2	磁电式扭矩测量仪表	43
3.6.3	光电式扭矩测量仪表	44
3.6.4	测量电路	44
第4章	位移测量仪表	45
4.1	概述	45
4.2	模拟式位移传感器	45
4.2.1	电阻式位移传感器	46
4.2.2	电容式位移测量仪表	50
4.2.3	电感式位移测量仪表	52
4.2.4	电涡流式位移测量仪表	57
4.2.5	光电式位移传感器	65
4.2.6	电荷耦合摄像器件 (CCD) 式位移测量仪表	74
4.3	数字式位移传感器	78
4.3.1	计量光栅的类型与常用光路	80
4.3.2	缩微计量光栅位移传感器	80
4.3.3	莫尔条纹光栅	85
4.3.4	直光栅	86
4.3.5	感应同步器	86
4.3.6	磁栅式传感器	92
第5章	厚度测量仪表	97
5.1	电感式测厚仪	98
5.2	涡流式测厚仪	100
5.2.1	涡流测厚仪	100
5.2.2	低频涡流测厚仪	102
5.3	电容式测厚仪	103
5.3.1	工作原理	103
5.3.2	主要技术参数	104
5.4	微波测厚仪	104
5.4.1	工作原理	104
5.4.2	主要技术参数	105
5.5	超声波测厚仪	105
5.5.1	超声波测厚的基本原理	105
5.5.2	袖珍数字式超声波测厚仪	107

X

5.5.3	高精度超声波测厚仪	108
5.5.4	高温钢板超声波测厚仪	109
5.6	核辐射穿透式厚度计	110
5.6.1	氦厚度计	112
5.6.2	镭厚度计	112
5.6.3	铀厚度计	113
5.6.4	镅厚度计	113
5.6.5	铯厚度计	114
5.7	核辐射反射式厚度计	114
5.7.1	γ 射线反射式厚度计	114
5.7.2	β 射线反射式厚度计	115
5.7.3	X荧光镀层(或涂层)厚度计	117
5.8	X射线测厚仪	118
5.8.1	单通道X射线测厚仪	119
5.8.2	双通道X射线测厚仪	120
5.9	激光测厚技术	121
5.9.1	三角法激光测厚原理	121
5.9.2	偏转法激光测厚原理	124
第6章	速度测量仪表	126
6.1	离心式转速表	126
6.2	涡流转速表	127
6.3	发电式转速表	128
6.3.1	直流测速发电机	129
6.3.2	空心杯转子异步测速发电机	130
6.4	频闪式转速表	131
6.5	电子数字式转速表	132
6.5.1	磁电式转速表	133
6.5.2	光电式转速表	134
6.6	直流转速和交流转速表	135
6.7	光纤式转速表	136
6.8	霍尔式转速表	137
6.9	多普勒速度计	137
6.10	相关速度计	139

6.10.1	相关测速原理	139
6.10.2	相关线速度计	140
6.10.3	相关转速表	141
第7章	振动测量仪表	143
7.1	概述	143
7.1.1	振动量测量	143
7.1.2	振动测量仪分类和测振系统	144
7.2	振幅测量	146
7.2.1	机械式测振仪	146
7.2.2	电容式测振仪	148
7.2.3	涡流式测振仪	150
7.2.4	测量振幅的其他方法	152
7.3	振动加速度测量	153
7.3.1	电阻应变式加速度计	153
7.3.2	压电式加速度计	154
7.3.3	其他加速度计	157
7.4	振动速度测量	159
7.4.1	磁电式速度传感器	159
7.4.2	振动速度的其他测量方法	162
7.5	振动传感器的校准	162
7.5.1	比较校准法	162
7.5.2	绝对校准法	163
第8章	频谱分析仪	165
8.1	概述	165
8.1.1	频谱分析及应用	165
8.1.2	频谱分析测量系统	165
8.1.3	频谱分析仪的分类	166
8.2	带通滤波器	166
8.2.1	理想滤波器	166
8.2.2	带通滤波器的特性	166
8.3	几种典型的频谱分析仪	168
8.3.1	等对数带宽频谱分析仪	168
8.3.2	恒定百分比带宽频谱分析仪	170

8.3.3	恒定带宽频谱分析仪	171
8.3.4	并联滤波型实时频谱分析仪	173
8.3.5	时间压缩型实时分析仪	175
8.3.6	FFT 分析系统	177
8.3.7	B&K 频谱和系统分析仪	178
第 9 章	虚拟仪器技术	180
9.1	虚拟仪器概述	180
9.1.1	虚拟仪器的概念	180
9.1.2	虚拟仪器的系统构成	181
9.1.3	虚拟仪器的特点	183
9.1.4	虚拟仪器的演变与发展	184
9.2	LabVIEW 概述	187
9.2.1	LabVIEW 特点	188
9.2.2	LabVIEW 的应用领域	189
第 10 章	测试信号处理	191
10.1	噪声与干扰	191
10.1.1	干扰类型	191
10.1.2	干扰的耦合方式	193
10.1.3	干扰来源	194
10.1.4	常见的抗干扰措施	196
10.2	信号放大	206
10.2.1	放大电路分类	206
10.2.2	放大原理	207
10.2.3	放大器选型或设计的主要依据	207
10.3	加窗处理	208
10.3.1	常用窗函数	209
10.3.2	窗函数的选用原则	211
10.4	滤波	213
10.4.1	滤波器分类	214
10.4.2	理想滤波器	216
10.4.3	滤波器性能	218
10.4.4	滤波器选用原则	220
10.5	消除零点误差及零漂	221

10.5.1	消除零点误差意义	221
10.5.2	硬件消除法	222
10.5.3	软件补偿法	222
10.6	信号同步	224
10.6.1	同步的缘由	224
10.6.2	同步的方式	226
10.7	信号波形的恢复与显示	228
10.7.1	采样波形正常恢复的条件	228
10.7.2	内插显示技术	231
10.8	调制与解调	236
10.8.1	调制分类	236
10.8.2	幅值调制与解调	238
10.8.3	频率调制与解调	239
第 11 章	虚拟仪器技术在滚动轴承振动测量中的应用	241
11.1	滚动轴承的振动特性	241
11.1.1	滚动轴承的振动类型	241
11.1.2	滚动轴承的振动机理	241
11.1.3	滚动轴承振动信号的频率特征	247
11.2	滚动轴承的失效机理	252
11.2.1	轴承的失效形式	252
11.2.2	滚动轴承的故障诊断	256
11.2.3	滚动轴承故障诊断方法	260
11.3	基于虚拟仪器技术的滚动轴承振动速度测振仪	268
11.3.1	SHU 型滚动轴承振动速度测振仪系统结构	268
11.3.2	振动测试系统的配置	270
11.3.3	滚动轴承振动数据的采集	276
11.3.4	信号分析技术	282
11.3.5	软件系统结构	283
11.3.6	实验验证	287
参考文献	294

第 1 章 概 论

机械运动是各种复杂运动的基本形式，机械量是表征机械运动的基本物理量。机械量测量仪表是用来对力、转矩、位移、速度、加速度和振动等机械量进行测量的仪表。

对机械量进行测量的方法按照它们的物理原理可以区分为机械的、光学的和电学的多种。在生产过程中广泛地采用电测的方法，这是因为它和其他方法相比有一系列的优点：①准确度高、灵敏度高、测量范围大；②便于实现远距离的测量；③能够进行连续的测量；④响应快；⑤对被测状态的影响小；⑥能给出供自控装置及记录、打印等应用的信号。因此，本书内容以机械量电测仪表为主。

1.1 机械量测量仪表的构成

机械量测量仪表通常由传感器和显示仪表两部构成，而显示仪表又由测量电路、显示装置和辅助电源等部分组成，其相互关系如图 1-1 所示。图中虚线表示不是所有的传感器和显示装置都需要辅助电源。

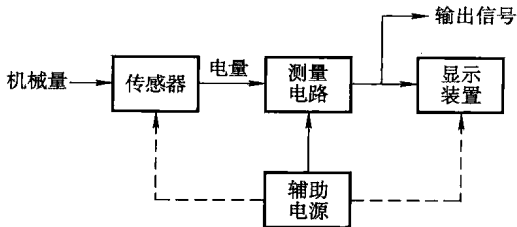


图 1-1 机械量测量仪表的构成

传感器是一种信息转换器，它借助于检出元件接收物理量形式的信息，并按一定规律将它转换成同种或别种物理量形式

信息。检出元件又称检出器，是直接响应被测量，并将它转换成适用于测量形式的元件或器件，是传感器最基本的组成部分。传感器分为自源式传感器和他源式传感器两类。自源式传感器是指在被测量的作用下检出元件本身能产生电能，并输出与被测量成一定关系的电信号的传感器。反之，需要外加能源才能将被测量转换为电信号输出的传感器称为他源式传感器。

对于传感器的基本要求：①输出量（电量）与输入量（机械量）保持单值对应并有良好的线性关系；②有较高的灵敏度；③对被测状态的影响小；④能在较差的工作条件下工作；⑤较好的频响特性以及较小的惯性；⑥稳定可靠。

传感器的输出信号有时由于其性质、大小等原因不足以直接使显示装置等动作，还需要通过测量电路进行放大、滤波、运算、变换、调制与解调等各环节。它应具有高的信噪比和足够的增益以及尽可能小的失真。

指示装置用来显示被测量的值，分模拟式显示装置和数字式显示装置两类。

辅助电源则应提供各环节所需的一定频率、波形和大小的电能，以保证仪表正常的工作。

1.2 机械量测量仪表的分类

机械量测量仪表通常按被测量进行分类，这样对仪表的用途比较明确。对被测量相同的机械量仪表则再按其传感器的种类分类，使仪表的工作原理比较清楚。例如，电阻应变式称重仪表、微波式测厚仪、涡流式测振仪等。机械量测量仪表的分类见表 1-1。

表 1-1 机械量测量仪表分类表

传感器类别 \ 被测量		位移	厚度	力、重量	转矩	速度、加速度	振动
		电阻式	电位器 电阻应变	0 0		0	0

(续)

传感器类别		被测量					
		位移	厚度	力、重量	转矩	速度、加速度	振动
电容式	变极距	0	0	0			0
	变面积	0					
	变介质		0				
电感式	螺管式	0	0				0
	变气隙	0	0				0
	差动变压器	0	0	0			0
	涡流	0	0				0
	磁弹性			0	0		
	感应同步器	0					
磁电式	磁阻					0	
	动圈					0	0
	霍尔元件	0				0	0
	磁栅	0					
压电式			0				
光电式	模拟式	0			0	0	0
	光栅	0				0	
	编码器	0					
	激光	0				0	0
振弦式		0		0	0		
射线式	核辐射		0				
	X线		0				
微波式		0	0				
超声式			0				

注：0表示已有机械量测量仪表品种。

第2章 力和重量传感器及测量仪表

2.1 概述

2.1.1 分类和特点

力和重量测量仪表一般按测力称重传感器的工作原理进行分类。测力称重传感器的工作原理基本上分为两类：一类是利用某些物质受力作用时，其固有物理特性发生的变化，如磁弹性式、压电式、振弦式等；另一类是利用物体受力作用产生的弹性变形，测定其变形量来测量其受力的大小，这一类有压磁式、电阻应变式、电容式、电感式等。

常用的力和重量测量仪表的分类和特点如下：

1) 电阻应变式 测量原理为把被测力转换成应变弹性体的变形，用电阻应变片测量其应变变量来测定被测力。其特点是测量准确度高、响应快、结构强度高、测量范围宽、侧向力对测量准确度的影响小、输出信号小、过载性能较差、不均匀载荷对测量准确度的影响较大。它广泛用于称量系统中，在轧制力、张力测量中也有应用。

2) 磁弹性式 测量原理为利用软磁材料受力作用时磁导率的变化来测定被测力。其特点是输出信号大、内阻低、抗干扰性能好、过载性能好、不均匀载荷对测量准确度的影响小、能在差的环境条件中工作、测量准确度一般、安装时要注意防止侧向力的作用、反应速度较慢。它广泛用于轧制力和张力的测量中。

3) 电容式 测量原理为把被测力转换为电容器极板的位移，测量其电容量的变化来测定被测力。其特点是结构强度高、过载性能好、测量准确度较高、不均匀载荷影响小、测量电路较复杂、温度对测量准确度的影响较大。它主要用于轧制力的