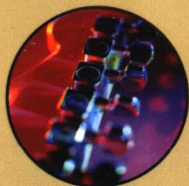




“十一五”国家级规划教材

传感器与测试技术



叶湘滨 熊飞丽 张文娜 罗武胜 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TP212.06
173

“十一五”国家级规划教材

传感器与测试技术

叶湘滨 熊飞丽 张文娜 罗武胜 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书分三篇,共16章,系统地论述了传感器与测试技术的理论基础、常用传感器的原理、特性以及典型参量的测试。第一篇共4章,主要介绍传感器与测试技术理论基础。内容包括:传感器与测试技术的基本概念、地位、作用以及发展动向,信号分析与处理,测量误差与数据处理,测试系统的特性分析。第二篇共7章,介绍常用传感器原理、特性、信号调理电路以及应用,简要介绍其他传感器的原理,包括微机械传感器、模糊传感器、基于人工神经网络的传感器和网络传感器。第三篇共5章,介绍典型参量的测试,其中主要介绍了位移、振动、温度、压力以及流量的测量。

本书可作为测控技术与仪器、机械工程及其自动化等专业的本科生教材,也可供其他相关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与测试技术/叶湘滨等编著. —北京:国防工业出版社,2007.4

“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-118-05079-0

I. 传… II. 叶… III. 传感器-测试技术-高等学校-教材 IV. TP212.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第035026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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张22½ 字数516千字

2007年4月第1版第1次印刷 印数1—5000册 定价38.00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

前 言

人类对客观世界的认识和改造活动都是以测试工作为基础的。传感器与测试技术已愈来愈广泛地应用于工业、农业、国防、航空、航天、医疗卫生和生物工程等各个领域。测试是进行科学研究的基本方法,国防和高科技的发展离不开传感器与测试技术。

随着科学技术的发展,对传感器与测试技术人员的需求不断增加,不少高校都开设了传感器与测试技术课程或类似课程。为了适应传感器与测试技术的发展,满足课程建设和教学改革的需要,我们在整理多年教学与科研成果的基础上参考了大量的最新文献,撰写了本书,奉献给广大读者。

本书从传感器与测试技术的基本理论入手,然后介绍具体种类的传感器的工作原理、特性与应用,最后介绍典型参量的测试。在介绍传感器与测试技术理论基础时,以信号分析、数据处理、测试系统的基本特性为主,力求叙述简洁、透彻。在介绍各种传感器时,以经典的传感器基本工作原理为主,结合生产和工程实际,使教材具有较好的实用性和参考价值,同时编入一些现代的传感器,如模糊传感器、网络传感器、微型传感器等,开阔学生的视野和思路,有助于启发学生的科学学习方法和创新意识。在介绍典型非电量测试时,以测试原理与测试方法为主,着重强调传感器的应用,突出课程重点。把传感器与测试技术结合起来的写法,充分考虑了传感器的应用和教学内容的需要,能引导学生将基本理论、基本分析方法用于解决实际问题,力求使学生在掌握基本传感器原理与典型参量测试方法的同时,了解测试技术的本质,提高解决实际问题的能力。

全书内容广泛、循序渐进,可读性好,富有启发性,学生容易接受和理解,同时也便于教学安排,授课教师可以根据不同的专业和教学对象来取舍教学内容。

本书编写中参考了许多文献,在此谨向参考文献的作者们表示衷心感谢。由于作者水平有限,书中难免有错误和缺点,恳请广大读者批评指正。

目 录

第一篇 传感器与测试技术理论基础

第 1 章 绪论	2
1.1 测试技术概述	2
1.1.1 测试的基本概念	2
1.1.2 被测量的分类	2
1.1.3 测试系统的组成	3
1.1.4 测试技术的任务和内容	3
1.2 传感器的定义、组成及分类.....	4
1.2.1 传感器的定义	4
1.2.2 传感器的组成	4
1.2.3 传感器的分类	4
1.3 传感器与测试技术的作用	5
1.4 传感器与测试技术的发展动向	6
1.4.1 传感器的发展途径	6
1.4.2 传感器与测试技术的发展方向	6
第 2 章 信号分析与处理	8
2.1 信号的分类	8
2.1.1 确定性信号和随机信号	8
2.1.2 连续信号和离散信号	10
2.1.3 能量信号和功率信号	11
2.2 信号的描述.....	12
2.2.1 信号的时域和频率描述方法	12
2.2.2 周期信号的描述	13
2.2.3 非周期信号的描述	17
2.2.4 随机信号的描述	25
2.3 数字信号处理基础.....	42
2.3.1 时域采样和采样定理	42
2.3.2 泄漏和窗函数	45

2.3.3	频域采样和栅栏效应	48
2.3.4	离散傅里叶变换和快速傅里叶变换	49
第3章	测量误差与数据处理	52
3.1	误差的基本概念	52
3.1.1	误差的定义及表示法	52
3.1.2	误差的来源	53
3.1.3	误差的分类	54
3.1.4	表征测量结果质量的指标	55
3.2	误差的基本性质与处理	55
3.2.1	随机误差	55
3.2.2	系统误差	58
3.2.3	粗大误差	61
3.2.4	测量结果的数据处理步骤	62
3.3	测量不确定度	63
3.3.1	测量不确定度的基本概念	63
3.3.2	标准不确定度的评定	64
3.3.3	测量不确定度的合成	66
3.3.4	测量不确定度的评定步骤	69
3.4	最小二乘法与回归分析	71
3.4.1	最小二乘法	71
3.4.2	回归分析	74
第4章	测试系统的特性分析	76
4.1	概述	76
4.2	测试系统的静态特性	76
4.2.1	非线性度	77
4.2.2	灵敏度	77
4.2.3	回程误差	78
4.2.4	重复性	78
4.3	测试系统的动态特性	79
4.3.1	动态参数测试的特殊问题	79
4.3.2	研究测试系统动态特性的方法	80
4.3.3	测试系统动态特性的数学描述	81
4.3.4	测试系统的动态特性分析	84
4.4	测试系统动态特性的测定	91
4.4.1	阶跃响应法	91
4.4.2	频率响应法	94
4.5	实现不失真测试的条件	95

第二篇 传感器原理与应用

第5章 电阻应变式传感器	99
5.1 电阻应变片的工作原理	99
5.1.1 金属的应变效应	99
5.1.2 电阻应变片的结构	99
5.1.3 电阻—应变特性	100
5.1.4 电阻应变片的横向效应	102
5.2 电阻应变片的种类和主要参数	102
5.2.1 电阻应变片的种类	102
5.2.2 电阻应变片的主要参数	105
5.3 电阻应变片的温度误差及其补偿	106
5.3.1 温度误差及其产生的原因	106
5.3.2 温度补偿方法	107
5.4 电阻应变式传感器的信号调理电路	108
5.4.1 测量电桥的工作原理	108
5.4.2 电阻应变仪	112
5.5 电阻应变式传感器的应用	114
5.5.1 电阻应变式力传感器	114
5.5.2 电阻应变式压力传感器	119
5.5.3 电阻应变式加速度传感器	122
5.6 压阻式传感器	122
5.6.1 晶体的晶面、晶向	123
5.6.2 半导体的压阻系数	124
5.6.3 压阻式压力传感器	128
5.6.4 压阻式加速度传感器	130
5.6.5 压阻式传感器的应用	131
第6章 电容式传感器	133
6.1 电容式传感器的工作原理及结构形式	133
6.1.1 变间隙式电容式传感器	134
6.1.2 变面积式电容式传感器	137
6.1.3 变介电常数式电容式传感器	138
6.2 电容式传感器的等效电路	139
6.3 电容式传感器的信号调理电路	140
6.3.1 电桥电路	140

6.3.2	调频电路	141
6.3.3	谐振电路	142
6.3.4	运算放大器式电路	142
6.3.5	脉冲宽度调制电路	143
6.4	影响电容式传感器精度的因素分析	145
6.4.1	温度的影响	145
6.4.2	漏电阻的影响	145
6.4.3	边缘效应	146
6.4.4	寄生参量的影响	146
6.5	电容式传感器的应用	147
6.5.1	电容式测微仪	147
6.5.2	差动电容式压力传感器	147
6.5.3	电容式液位传感器	147
6.5.4	硅电容式加速度传感器	148
第7章	电感式传感器	150
7.1	变磁阻式电感式传感器	150
7.1.1	变磁阻式传感器工作原理	150
7.1.2	变磁阻式传感器等效电路	152
7.1.3	变磁阻式传感器信号调节电路	153
7.1.4	影响传感器精度的因素分析	155
7.1.5	变磁阻式传感器的应用	156
7.2	差动变压器式电感式传感器	156
7.2.1	螺管式差动变压器	157
7.2.2	差动变压器的信号调节电路	159
7.2.3	差动变压器的应用	160
7.3	涡流式电感式传感器	161
7.3.1	高频反射式涡流传感器	161
7.3.2	低频透射式涡流传感器	164
7.3.3	涡流式传感器的应用	165
第8章	压电式传感器	166
8.1	压电效应及压电材料	166
8.1.1	压电效应	166
8.1.2	压电材料	166
8.2	压电常数和表面电荷的计算	171
8.3	压电式传感器等效电路	174
8.4	压电式传感器的信号调节电路	176
8.4.1	电压放大器	176

8.4.2	电荷放大器	179
8.5	压电式传感器的应用	180
8.5.1	压电式加速度传感器	180
8.5.2	压电式测力传感器	182
第9章	红外传感器	184
9.1	红外辐射的基本知识	184
9.1.1	红外辐射的基本概念	184
9.1.2	红外辐射源	185
9.1.3	红外辐射的基本定律	186
9.2	红外传感器	187
9.2.1	红外传感器的分类与特点	187
9.2.2	红外传感器的性能参数	188
9.2.3	常见红外传感器	189
9.3	红外传感器应用	192
9.3.1	红外测温	192
9.3.2	红外热成像	193
9.3.3	红外分析仪	195
9.3.4	红外无损探伤	196
9.3.5	红外检测在军事上的应用	197
第10章	固态图像传感器	199
10.1	固态图像传感器概述	199
10.2	CCD的基本工作原理	199
10.2.1	CCD的MOS结构及电荷存储原理	199
10.2.2	CCD电荷转移	202
10.2.3	CCD电荷的产生	203
10.2.4	CCD电荷的输出	203
10.3	线型与面型固态图像传感器	204
10.3.1	线型固态图像传感器	204
10.3.2	面型固态图像传感器	207
10.4	固态图像传感器主要特性参数	214
10.5	固态图像传感器的应用	217
第11章	其他传感器	222
11.1	微机械传感器	222
11.1.1	微机械传感器的概念及特点	222
11.1.2	微机械传感器的材料与加工技术	223
11.1.3	典型微机械传感器	225

11.2	模糊传感器	229
11.2.1	模糊传感器的概念及特点	229
11.2.2	模糊传感器结构	231
11.2.3	模糊传感器举例	233
11.3	基于人工神经网络的传感器	236
11.3.1	人工神经网络基本知识	236
11.3.2	前向神经网络和反馈神经网络	238
11.3.3	人工神经网络在智能传感器中的应用	239
11.4	网络传感器	243
11.4.1	网络传感器的概念	243
11.4.2	网络传感器的类型	244
11.4.3	基于 IEEE 1451 标准的网络传感器	245
11.4.4	网络传感器所在网络的体系结构	249

第三篇 典型参量的测试

第 12 章	位移的测量	252
12.1	感应同步器	252
12.1.1	感应同步器结构	252
12.1.2	感应同步器工作原理	253
12.1.3	细分原理	254
12.1.4	感应同步器位移测量系统	255
12.2	光栅传感器	258
12.2.1	计量光栅的结构及分类	258
12.2.2	光栅传感器组成	259
12.2.3	测位移原理	260
12.2.4	辨向原理	261
12.2.5	细分技术	262
第 13 章	振动的测量	265
13.1	概述	265
13.1.1	振动的类型及基本参数	265
13.1.2	振动的测试内容及测量方法	266
13.1.3	振动测试系统的构成	266
13.2	常用测振传感器	267
13.2.1	常用测振传感器概述	267
13.2.2	绝对式测振传感器原理	267

13.2.3	相对式测振传感器原理	270
13.2.4	测振传感器的选择	272
13.3	振动的激励与激振器	272
13.3.1	振动的激励	272
13.3.2	激振器	273
13.4	振动系统特性测试	275
13.5	机械振动参数的估计	276
13.6	振动传感器的标定	278
13.6.1	传感器的标定	278
13.6.2	振动传感器的标定装置	279
13.6.3	振动传感器灵敏度的标定方法	281
第14章	温度的测量	283
14.1	概述	283
14.1.1	温标	283
14.1.2	温度测量的主要方法及分类	285
14.2	热电偶测温	285
14.2.1	工作原理	286
14.2.2	热电偶回路热电势	286
14.2.3	热电偶测温基本定律	288
14.2.4	热电偶冷端温度补偿	289
14.2.5	热电偶材料、类型及结构	292
14.2.6	热电偶测温	295
14.2.7	热电偶的标定	297
14.2.8	热电偶的频响特性与时间常数测定	297
14.3	金属电阻测温	299
14.3.1	工作原理、结构和材料	299
14.3.2	测量电路	301
14.4	半导体温度传感器	301
14.4.1	半导体热敏电阻	301
14.4.2	集成温度传感器	305
14.4.3	数字温度传感器 DS18B20	308
第15章	压力的测量	312
15.1	概述	312
15.1.1	压力的概念	312
15.1.2	压力的计量单位	312
15.1.3	压力测量的基本方法	313
15.2	测压弹性元件	314

15.2.1	圆形膜片和膜盒	314
15.2.2	波纹管	315
15.2.3	弹簧管	317
15.2.4	薄壁圆筒	318
15.3	常用的压力传感器	318
15.3.1	应变式压力传感器	319
15.3.2	压电式压力传感器	319
15.3.3	压阻式压力传感器	320
15.4	动态压力测量时管道传输效应	321
15.4.1	传感器的安装	321
15.4.2	测量系统动态特性分析	321
15.5	压力传感器的标定	323
15.5.1	静态标定	323
15.5.2	动态标定	324
第16章	流量的测量	330
16.1	流量测量基础	330
16.1.1	流量及定义	330
16.1.2	流体的主要特征	330
16.2	流量计分类	333
16.3	常用流量计	333
16.3.1	椭圆齿轮流量计	333
16.3.2	差压式流量计	334
16.3.3	转子流量计	338
16.3.4	涡轮流量计	339
16.3.5	靶式流量计	340
16.3.6	电磁流量计	342
16.3.7	超声波流量计	344
	参考文献	347

第一篇

传感器与测试技术 理论基础

- 第 1 章 绪论
- 第 2 章 信号分析与处理
- 第 3 章 测量误差与数据处理
- 第 4 章 测试系统的特性分析

第1章 绪论

1.1 测试技术概述

1.1.1 测试的基本概念

测试是具有试验性质的测量。测量是指以确定被测对象属性量值为目的的全部操作。试验是对未知事物的探索性认识过程。因此,测试具有探索、分析和研究的特征,是测量和试验的综合。

人类对客观世界的认识和改造活动都是以测试工作为基础的,科学技术的发展离不开测试技术。测试技术属于信息科学的范畴,与计算机技术、自动控制技术以及通信技术构成完整的信息技术学科。

1.1.2 被测量的分类

被测量的种类非常之多,一般将众多的被测量分为电量和非电量两大类。

1. 电量

电量包括电压、电流、功率以及电阻、电容、电感、频率、相位、功率因数、增益、电场强度等。

2. 非电量

非电量是除电量以外的一切量。非电量大致可分为热工量、机械量、物性和成分量以及状态量四大类。

(1) 热工量。包括:温度、热量、比热容、热分布;压力(压强)、压差、真空度;流量、流速、风速;物位、液位、界面等。

(2) 机械量。包括:位移、尺寸、形状、形变;力、应力、力矩、扭矩;重量、质量;振动、速度、加速度、噪声等。

(3) 物性和成分量。包括气/液体化学成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、湿度、密度等。

(4) 状态量。包括颜色、透明度、颗粒度、磨损度、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等。

在实际工业生产中,需要测量的量是五花八门,远不止以上所举的项目。但从本质上看,不少是从上述一些基本量中派生出来的,如位移就可派生出线位移、角位移、长度、厚度、入射角、角振动等。

电量的测量技术随着电子技术的飞速发展而得到很大的提高,这使得人们研究采用电量的测量技术来测量非电量,即利用传感器将被测的非电量转换成电量,然后用电量的测量技术来测量,这也是所谓的非电量电测技术。

本书所介绍的被测量的测量主要指的也就是非电量的测量。

1.1.3 测试系统的组成

一个典型的测试系统原理框图如图 1-1 所示,其中包括传感器、信号调理电路以及记录、显示仪器等。

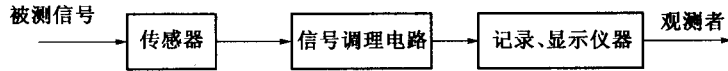


图 1-1 测试系统原理框图

传感器是测试系统的第一个环节,用来感受被测信号,并将被测信号转换为适合于系统后续处理的电信号。它获得信息的正确与否,决定了测试系统的精度。因此,传感器在测试系统中占有重要的位置。

信号调理电路是对传感器的输出电信号作进一步的加工和处理,多数是进行电信号之间的转换,包括对信号的转换、放大、滤波等。例如:用电桥将电路参量(如电阻、电容、电感)转换为电压或电流;用滤波器抑制噪声,选出有用信号等。通过信号的调理,最终获得便于传输、显示、记录以及可作进一步后续处理的信号。

记录、显示仪器是将所测得的信号变为一种能为人们所理解的形式,以供人们观察和分析。

上述测试系统各组成部分描述的是一种“功能模块”的形式。在实际的测试系统中,这些功能模块所表达的具体装置或仪器的差异是很大的。例如,信号调理电路部分有时可以由很多仪器组合成的一个完成特定功能的复杂群体;有时却可能简单到仅有一个变换电路,甚至可能仅是一根导线。

1.1.4 测试技术的任务和内容

测试的基本任务是获取信息。信息是客观事物的时间、空间特性,是无所不在、无时不存的。但是人们为了某些特定的目的,总是从浩如烟海的信息中把需要的部分取出来,以达到观测事物某一本质问题的目的。所需了解的那部分信息以各种技术手段表达出来,给人们提供观测和分析的途径,这种对信息的表达形式称之为“信号”,所以信号是某一特定信息的载体。信息、信号、测试与测试系统之间的关系可以表述为:获取信息是测试的目的;信号是信息的载体;信息是信号所载荷的内容;测试是通过测试系统、设备得到被测参数信息的技术手段。

因此,测试技术的任务可以概括为:发现与各种信息相对应的信号表现形式,以及信息、信号之间的定性、定量关系;在不同环境下寻求最佳的信号获取、变换、处理、存储、传输、指示、记录等方法、手段与设备。

测试技术研究的主要内容包括被测量的测量原理、测量方法、测量系统以及数据处理等 4 个方面。

测量原理是指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象及有关定律的总体。例如:压电式传感器测量振动加速度时所以依据的是压电效应;热电偶测量温度时所依据的是热电效应等。不同性质的被测量用不同的原理去测量,同一性质的被测量也可用不同的原理去测量。

一般将测量过程和测量条件等内容称为测量方法。根据对测量任务的具体要求和现场实际情况,需要采用不同的测量方法。例如:根据传感器是否与被测物表面接触,分为接触测量法和非接触测量法;根据测量的方式,分为偏差式测量法、零位式测量法以及微差式测量法;按所测得的量(参数)是否为欲测之量,可分为直接测量法和间接测量法等。

测量系统是指用于特定测量目的,由全套测量仪器和有关的其他设备、软件以及人员所形成的一个系统。

数据处理是指为了一定的目的,按照一定的规则和方法对测试数据进行收集、加工的过程,进而将测试数据所代表的事物内在规律提炼出来,得出正确的结果。

1.2 传感器的定义、组成及分类

1.2.1 传感器的定义

传感器(transducer 或 sensor)是能够感受规定的被测量,并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件(transduction element)是指传感器中能将敏感元件的输出转换为适于传输或测量的电信号部分。

实际上,很多传感器都难以严格区分是敏感元件还是转换元件,它们都是将感受的被测量直接转换为电信号。例如半导体气体传感器、测量温度的热电偶等,它们是将敏感元件和转换元件合二为一了。

传感器在某些领域又被称为变换器、检测器或探测器。传感器输出的电信号的形式很多,如电阻、电容、电感以及电压、电流、频率、脉冲等。

1.2.2 传感器的组成

一般地讲,传感器由敏感元件和转换元件组成。但是随着传感器集成技术的发展,传感器的信号调理电路也会安装在传感器的壳体内或者与敏感元件集成在同一个芯片之上。因此,信号调理电路以及所需电源都应作为传感器组成的一部分,如图 1-2 所示。

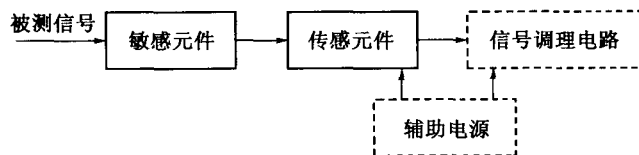


图 1-2 传感器的组成

信号调理电路的种类要视传感元件的类型而定。常用的信号调理电路有电桥、放大器、振荡器和阻抗变换器等。

1.2.3 传感器的分类

传感器的种类繁多、不胜枚举,其分类方法也很多。下面介绍常用的分类方法。

1. 按被测量分类

这种分类方法能够很方便地表示传感器的功能,也便于用户使用。前面已经介绍了被测量的种类,有多少种被测量,就会有多少种类型的传感器,如位移传感器、温度传感器、振动传感器等。

2. 按工作原理分类

该种分类方法是以传感器的工作原理为依据,如电阻式、电感式和压电式传感器等。其优点是避免了传感器种类过于繁多,有利于对传感器进行归纳性的研究。现多采用此种方法。本书在介绍传感器时也是采用这种分类方法加以介绍。

3. 按能源分类

按此种方式可以将传感器分为有源传感器和无源传感器两类。

有源传感器犹如一台微型发电机,能将非电功率转换为电功率,传感器起能量转换的作用,因此又称为发电型传感器。如磁电式、压电式和热电式等传感器,其后续的信号调理电路通常是信号放大器。

无源传感器并不起能量转换作用,被测量仅对传感器中的能量起控制作用,因此必须有辅助能源(电源),如电阻式、电感式和电容式传感器等。无源传感器本身不是一个信号源,所以后续的信号调理电路通常是电桥或谐振电路。

4. 按结构性质分类

按此种方式可以将传感器分为结构型和物性型两类。

结构型传感器是依靠传感器的结构参数变化而实现信号转换的。例如,变间隙的电容式传感器是依靠改变电容极板间距的结构参数来实现将被测的位移量转换为传感器的电容量。

物性型传感器是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应来感受被测量的,并将其转换为可用电信号。例如测量温度的热敏电阻、测量湿度的半导体传感器以及光电传感器、霍耳传感器等。

1.3 传感器与测试技术的作用

随着科学技术的飞速发展和工程技术的迫切需求,传感器与测试技术已越来越广泛地应用于工业、农业、国防、航空、航天、医疗卫生和生物工程等各个领域。

(1) 测试是科学研究的基础。科学上的发现和技术上的发明是从对事物的观察开始的。对事物的精细观察就要借助于仪器,就要测试,特别是在自然科学和工业生产领域更是如此。伟大的化学家、计量学家门德烈耶夫说过:“科学是从测量开始的,没有测量就没有科学,至少是没有精确的科学、真正的科学。”

(2) 传感器是实现测试的首要环节。传感器处于被测对象与测试系统的接口位置,即测试系统之首。因此,传感器成为感知、获取信息的窗口。可以毫不夸张地说,没有精确的传感器,就没有精确的测试。

(3) 国防和高科技的发展离不开传感器与测试技术。传感器与测试技术是兵器发展的基础与前提。在现代的战争中,传感器与测试的精度决定了武器系统的打击精度,其测试速度、诊断能力决定了武器系统的反应能力。飞机、火箭、宇宙飞船,从它的加工到装