

机械工程技术 广东工业大学机电工程学院

## 绪论

### 0.1 测试技术概况

#### 0.1.1 测试和测量系统

1. 测试：测量(检测)和试验

本书：测量技术和仪器。主要介绍机械工程领域中常见物理量(压力、应变、位移、加速度、温度等)的测量和信号分析方法。

2. 测量系统的用途

人类认识和改造世界离不开测试技术

(1) 产品开发与工程试验过程 (2) 过程与系统控制  
(3) 监测与诊断

0.1.1 测试和测量系统 广东工业大学机电工程学院

### 2. 测试技术的用途

测试的重要性：认识世界，进而改造世界

在工程领域，科学实验、产品开发、生产监督、质量控制等，都离不开测试技术。测试技术应用涉及到航天、机械、电力、石化和海洋运输等每一个工程领域。



2. 测试技术的用途 广东工业大学机电工程学院

#### 1) 工业自动化中的应用

在各种自动控制系统中，测试环节起着系统感官的作用，是其重要组成部分。

(1). 机械手、机器人中的传感器

转动/移动位置传感器、力传感器、视觉传感器、听觉传感器、接近距离传感器、触觉传感器、热觉传感器、嗅觉传感器。



密歇根大学的机械手装配模型



广州中鸣数码的机器狗

1) 工业自动化中的应用 广东工业大学机电工程学院

#### (2). AGV自动送货车

超声波测距传感器、判断建筑物内人和物所在位置；红外线色彩传感器运动轨迹和AGV小车位置识别；条形码传感器，货品识别。



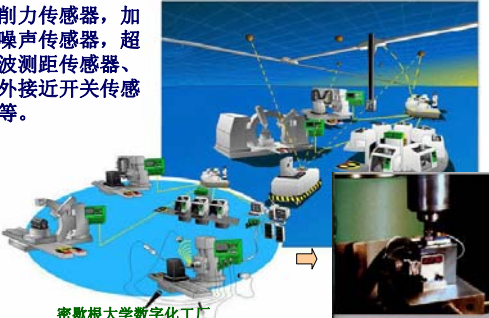
香港理工AGV模型



1) 工业自动化中的应用 广东工业大学机电工程学院

#### (3). 生产加工过程监测

切削力传感器，加工噪声传感器，超声波测距传感器、红外接近开关传感器等。





密歇根大学数字化工厂

2. 测试技术的用途 广东工业大学机电工程学院

#### 2) 流程工业设备运行状态监控

在电力、冶金、石化、化工等行业，设备运行状态关系到整个生产线的监测系统。

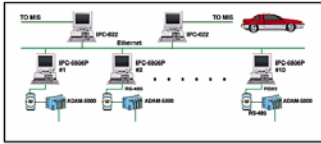
- 扬子石化50MW热电机组监测系统
- 阳逻电厂300MW汽轮机监测系统
- 荆门电厂200MW机组监测系统
- 青山热电厂生产信息实时查询系统
- 沙角电厂生产信息实时查询系统
- 宝钢30KW以上风机监测系统
- 宝钢精轧F2轧机网络化监测系统
- 宝钢冷轧带钢振动纹监测系统
- 武钢风机状态监测系统

石化企业输油管道、储油罐等压力容器的破损和泄露检测。

### 3) 产品质量测量

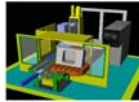
在汽车、机床等设备,电机、发动机等零部件出厂时,必须对其性能质量进行测量和出厂检验。



图示为汽车出厂检验原理框图,测量参数包括润滑油温度、冷却水温度、燃油压力及发动机转速等。通过对抽样汽车的测试,工程师可以了解产品质量。



汽车扭矩测量



机床加工精度测量

### 4) 楼宇控制与安全防护

为使建筑物成为安全、健康、舒适、温馨的生活、工作环境,并能保证系统运行的经济性和管理的智能化。在楼宇中应用了许多测试技术,如闯入监测、空气监测、温度监测、电梯运行状况。



图示为某公司楼宇自动化系统。该系统分为:电源管理、安全监测、照明控制、空调控制、停车管理、水/废水管理和电梯监控。



### 5) 家庭与办公自动化

在家电产品和办公自动化产品设计中,人们大量的应用了传感器和测试技术来提高产品性能和质量。



全自动洗衣机中的传感器:衣物重量传感器,衣质传感器,水温传感器,水质传感器,透光率光传感器(洗净度)液位传感器,电阻传感器(衣物烘干检测)。



指纹传感器



透光率传感器



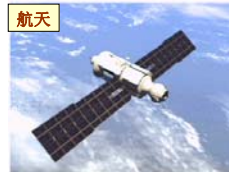
温湿度传感器



温度传感器

### 6) 其他应用

#### 航天



#### 农业



#### 交通



#### 医学



### 7) PC机中的测试技术应用

#### 鼠标:光电位移传感器



#### 摄像头:CCD传感器



#### 声笔:超声波传感器



#### 麦克风:电容传声器



#### 声卡:A/D卡 + D/A卡



#### 软驱:速度、位置伺服



### 3. 信息和信号

**信息:** 消息、情报或知识

**信号:** 物理量, 物质, 具有能量

信号是信息的载体, 信息总是蕴涵在信号之中, 并依靠信号来传输。

**测试的目的和任务:**

通过信号的检测和分析, 获取蕴涵在信号中的有用信息。

### 4. 静态测量和动态测量

(1) **静态测量:** 被测信号不随时间变化, 或因其变化非常缓慢而忽略其变化。

(2) **动态测量:** 被测试信号随时间的变化较快。

0.1.1 测试和测量系统 广东工业大学机电工程学院

### 5. 测量系统的一般构成

用途和要求不同，其组成及其构成方式也不同

图 0-2 测量系统的一般构成

0.1.1 测试和测量系统 广东工业大学机电工程学院

### 5. 测试系统的一般组成

典型测试系统框图

**传感器:** 感受被测量的变化并将其转换成有用信号输出;  
**信号调理:** 将传感器的信号转换成更适合进一步传输和处理形式。如调制、放大、滤波。  
**信号处理:** 运算、分析;  
**激励装置:** 有些信息尚未载于可检测的信号中;

0.1.1 测试和测量系统 广东工业大学机电工程学院

### 6. 模拟信号与数字信号

(1) **模拟信号:** 随时间连续变化的物理信号。  
 特点: 在时间上是连续的, 可以取任意时间值。

(2) **数字信号:** 时间轴上是离散的(不连续)数值, 但幅度却是固定不变的信号, 即用二进制1、0记录信号。

一般传感器的输出是模拟信号。而计算机只能接收和处理数字信号。  
 模/数转换 (A/D): 将模拟量转换为数字量。

0.1 测试技术概况 广东工业大学机电工程学院

### 0.1.2 测试技术的发展概况

1. 新原理新技术在测试技术中的应用

2. **传感器的发展:** 传感器向着高精度、高灵敏度、大测量范围、小型化、智能化的方向发展, 新型传感器层出不穷, 可测量迅速增多。

(1). 利用新发现的材料和新发现的生物、物理、化学效应开发出的新型传感器

光纤流速传感器

荧光材料制作的电子鼻传感器

2. 传感器的发展 广东工业大学机电工程学院

(2). 传感器+嵌入式计算机 → 智能传感器

嵌入式计算机

振动网络传感器

智能压力网络传感器

智能倾角RS232传感器

IC总线数字温度传感器

0.1.2 测试技术的发展概况 广东工业大学机电工程学院

### 3. 计算机测试系统与虚拟仪器的应用

- 1). 计算机辅助测试
- 2). 现场总线技术的应用
- 3). Internet网和远程测试
- 4). 虚拟仪器技术的应用

### 4. 多参量测量系统的开发

### 5. 电路设计的改进

简化系统, 提高系统特性。

虚拟仪器技术 广东工业大学机电工程学院

## 计算机虚拟仪器技术

用PC机+仪器板卡 → 代替传统仪器  
用计算机软件 → 代替硬件分析电路



我们的工作

0.1 测试技术概况 广东工业大学机电工程学院

### 0.1.4 课程的研究对象和内容

**1. 对象:** 机械工程动态测试中常用的传感器、信号调理电路及记录仪器的工作原理，测量装置基本特性的评价方法，测试信号的分析 and 处理，以及常见物理量的测量方法。

**2. 课程的内容 (知识点):**

- 信号及其描述
- 测试装置的基本特性
- 常用传感器
- 信号调理、处理和记录
- 信号处理初步
- 常见物理量的测量

## 0.2 测量的基础知识

- 0.2.1 量和量纲
- 0.2.2 法定计量单位
- 0.2.3 测量、计量、测试
- 0.2.4 基准和标注
- 0.2.5 量值的传递和计量器具检定
- 0.2.6 测量方法
- 0.2.7 测量装置
- 0.2.8 测量误差
- 0.2.9 测量精度和不确定度
- 0.2.10 测量器具的误差
- 0.2.11 测量结果的表达方式
- 0.2.12 间接测量结果的综合

## 0.2 测量的基础知识

### 0.2.1 量和量纲

1. 量：是现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。如长度、时间、质量、温度等。
2. 量值：由数值和计量单位的乘积
3. 基本量和导出量：
  - (1) 基本量：独立的量  
SI: 长度、质量、时间、温度、电流、发光强度、物质的量
  - (2) 导出量：由基本量或导出量的函数定义的量
  - (3) 量制：基本量和相应导出量的特定组合

### 0.2.1 量和量纲

#### 4. 量纲和量纲法则

- (1) 量纲：基本量的幂的乘积表达式， $\dim X$ ；表示量的种类，定性地区分量。
- (2) SI的7个基本量的量纲： $L, M, T, \theta, I, N, J$   
导出量的量纲： $L^a M^b T^c I^d \theta^e N^f J^g$   
速度的量纲： $LT^{-1}$ ；力的量纲： $LMT^{-2}$   
电压的量纲： $L^2MT^{-3}I^{-1}$  电阻的量纲： $L^2MT^{-3}I^{-2}$
- (3) 量纲法则：等号两侧的量纲应相同

#### 5. 无量纲量

量纲中幂都为零的量，如应变，弧度。

## 0.2 测量的基础知识

### 0.2.2 我国的法定计量单位

#### 1. 基本单位

##### 1) 长度单位：米，m

1米=真空中光在1/299792458秒内所经路程的长度

##### 2) 质量单位：千克，kg

1 Kg = 国际千克原器(铂铱合金、巴黎国际计量局)的质量  
=1000 cm<sup>3</sup>纯水在最大密度(约4<sup>0</sup>C)时的质量

##### 3) 时间单位：秒，s

1 秒=铯-133原子基态的两个超精细能级间跃迁对应的辐射的9192631770个周期的持续时间

### 1. 基本单位

#### 4) 电流单位：安培，A

#### 5) 温度单位：开尔文，K

1 K=水的三相(水、水蒸汽、冰)点热力学温度的1/273.16

#### 6) 物质的量：摩尔，mol,

1 mol=0.012 kg碳-12的原子数目  
用于研究微观世界中粒子的多少

#### 7) 发光强度单位：坎德拉，cd

### 0.2.2 我国的法定计量单位

#### 2. 辅助单位

##### 1) 弧度：rad

半径长度的圆弧所对应的圆心角

##### 2) 球面度：sr

面积等于半径平方的球面所对应的立体角

#### 3. 导出单位

按物理量之间的关系，由基本单位和辅助单位以相乘或相除的形式所构成的单位。

速度:  $v=dx/dt$       量纲:  $LT^{-1}$   
 加速度:  $a=dv/dt$       量纲:  $LT^{-2}$   
 力:  $F=ma$       量纲:  $LMT^{-2}$   
 功:  $W=FX$       量纲:  $L^2MT^{-2}$   
 电压:  $U=dW/dQ$       量纲:  $L^2MT^{-3}I^{-1}$   
 1伏电压在数值上等于将1库仑(Q)的正电荷从a点移到b点, 电场力作了1焦耳(J)的功。  
 电阻:  $R=U/I$       量纲:  $L^2MT^{-3}I^{-1}$

0.2.3 测量、计量、测试

1. **测量:** 以确定被测对象的量值为目的而进行的实验过程
2. **计量:** 实现单位统一和量值准确可靠的活动, 计量部门的测量
3. **测试:** 具有试验性质的测量, 包括测量和试验
4. **测量四要素:**  
被测对象、计量单位、测量方法、测量误差

0.2.4 基准和标准

1. **工作计量器具:** 用于现场测量而不适用于检定工作的计量器具。测量工作中所用。
2. **计量标准:** 用于检定工作计量器具的计量器具
3. **基准:** 保存、复现计量单位的计量器具, 具有现代科学技术所能达到的最高准确度。

工作基准:  
副基准:  
国家基准:

0.2.5 量值的传递和计量器具检定

1. **量值传递:** 通过对计量器具实施检定或校准, 将国家基准所复现的计量单位量值经过各级计量标准传递到工作计量器具。
2. **计量器具检定:** 为评定计量器具的计量特性, 确定其是否符合法定要求所进行的全部工作
3. **检定规程:** 检定计量器具时必须遵守的法定技术文件。
  - (1) **内容:** 适用范围、计量器具的计量特性、检定项目、检定条件、检定方法、检定周期及检定结果等。
  - (2) **分类:** 国家、部门和地方。
  - (3) **所有的计量器具都必须实施相应的检定。**

0.2.6 测量方法

1. 按是否直接测定被测量的原则来分可分为
  - (1) **直接测量法:** 直接通过测量仪器得到被测值。
  - (2) **间接测量:** 根据直接测量值和函数关系, 计算出被测量的量值。如测矩形边长来测面积
  - (3) **组合测量:** 将直接测量值或间接测量值与被测量值之间按已知关系组合方程组, 通过解方程组得到被测值。

2. 按被测量是否和已知的同种量进行比较可分为
  - (1) **直接比较测量:** 直接把被测量与标准量作比较, 被测量与标准量的量纲相同。如用卷尺测量身高。
  - (2) **间接比较测量:** 利用仪器把原始形态的待测物理量的变化变换成与之保持函数关系的另一种物理量的变化。如水银温度计。  
注: 大部分传感器属于间接测量
3. 按测量条件不同可分为
  - (1) **等精度(等权)测量:**
  - (2) **不等精度(不等权)测量:**

## 0.2.6 测量方法



### 4. 按传感器是否与被测物体作机械接触可分为

- 接触测量：
- 非接触测量：

### 5. 按被测量是否随时间变化的原则可分为

- 动态测量：
- 静态测量：

## 0.2 测量的基础知识



### 0.2.7 测量装置及有关术语

1. 测量装置：为确定被测量所必需的器具和辅助设备的总体。
2. 测量装置的有关术语
  - (1) 传感器：直接作用于被测量，并能按一定的规律将被测量转换成同种或别种量值输出的器件。
  - (2) 测量变换器：提供与输入量有给定关系的输出的测量器件；是一种能把输入能量转化为另一种输出能量装置；传感器是第一级的测量变换器；当其输出量为标准信号时，被称为变送器。
  - (3) 检测器：用以指示某种特定量的存在而不必提供量值的器件或物质，如化学试纸。

## 0.2.7 测量装置及有关术语



- (4) 测量器具的示值：测量器具所指示的被测量
- (5) 准确度等级：测量器具的等级或级别
- (6) 标称范围：又称示值范围，是测量器具标尺范围所对应的被测量示值的范围
- (7) 量程：标称范围的上下限之差的模
- (8) 测量范围：在测量器具的误差处于允许极限内的情况下，测量器具所能测量的被测量值的范围
- (9) 漂移：测量器具的计量特性随时间的慢变化

## 0.2 测量的基础知识



### 0.2.3 测量误差

#### 1. 定义：测量结果与被测量真值之差

$$\begin{aligned}\text{测量误差} &= \text{测量结果} - \text{真值} \\ &= (\text{测量结果} - \text{总体均值}) + (\text{总体均值} - \text{真值}) \\ &= \text{随机误差} + \text{系统误差}\end{aligned}$$

- 1) 真值：被测量在被观测时所具有的量值，是一个理想概念
  - 约定真值：充分接近真值，可代替真值使用的量值
- 2) 测量结果：由测量所得的被测量值

## 0.2.8 测量误差



### 2. 误差分类

从不同角度有不同的分类方法

#### 1) 根据产生误差的原因分

- (1) 器具误差：由测量器具本身存在的缺陷而产生的，与测量器具的工作原理、结构设计、制造、安装调整等因素有关
  - (2) 方法误差：由测量方法（测量仪表的原理不完善）不完善所引起的，如使用近似的数学模型，使用直线代替弧线
  - (3) 调整误差：由测量前未将测量器具和被测对象调整到正确位置和状态所引起的，如零位误差
  - (4) 观测误差：观测者主观判断不当所引起的
  - (5) 环境误差：测量过程中环境状态变化所引起的
  - (6) 测量对象误差：测量对象自身变化所引起的
- (3) 和 (4) 合称为人员误差，属于观测者主观因素或操作失误所引起的

## 2 误差分类



### 2) 根据误差的统计特征分

- (1) 系统误差：多次测量中，出现的某种保持恒定或按确定的方式变化的误差（在重复性条件下，无限次重复测量同一个量所得结果的平均值与被测量真值之差）
  - 已定系统误差：通过修正也可以应当消除
  - 未定系统误差：
- (2) 随机误差：多次测量中，以不可预知的方式变化着的误差（测量结果在重复性条件下，无限次重复测量同一个量所得结果的平均值之差）。
  - 随机误差就其个体而言是不确定的，但其总机却有一定的统计规律可循，不可能被修正，但了解其统计规律性之后可控制或减小他们对测量结果的影响
- (3) 粗大误差
  - 由某种不正常原因造成的一种明显超出规定条件下预期误差范围的误差（超出规定条件下预期的误差，即明显歪曲测量结果的误差），应该剔除掉

## 0.2.8 测量误差



### 3 误差的表示方法

1. 绝对误差:
2. 相对误差: 相对误差 = 误差/真值
  - (1) 当误差值很小时  
相对误差 = 误差/测量结果
  - (2) 无量纲量, 描述误差与真值比值的大小, 常用 %、‰或百万分数表示
3. 引用误差: 用于表示计量器具特性。
  - (1) 引用值: 计量器具的标称范围的最高值或量程 $X_m$
  - (2) 引用误差: 计量器具的绝对误差与引用值之比

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

## 3 误差表示方法



### 4. 分贝误差

分贝误差 =  $20 \lg(\text{测量结果}/\text{真值})$

分贝误差 =  $10 \lg(\text{测量结果}/\text{真值})$

单位为分贝 (dB), 无量纲量, 是一种特殊形式的相对误差

### 5. 误差的分布特征量

$\mu$  —— 测量值概率分布的期望 (平均值)

$\sigma$  —— 测量值概率分布的标准偏差, 分布特征量值一

$\delta_s$  —— 系统误差

## 0.2 测量的基础知识



### 0.2.9 测量精度和不确定度

1. 精密性: 表示测量结果中随机误差大小的程度, 反映了在一定条件下进行多次测量时所得结果彼此符合的程度 (反映测量数据分散性大小的程度, 建议不宜随便使用)
2. 正确度: 表示测量结果中系统误差大小的程度, 反映了在规定条件下测量结果中所有系统误差的综合
3. 准确度: 表示测量结果和被测量真值之间的一致程度, 反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合, 也称为精确度
4. 不确定度: 表示测量结果的可靠程度, 用来表征被测量之值所处范围的一种评定
5. 重复性: 在相同测量条件下, 对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性
6. 复现性: 在不同测量条件下, 对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性

## 0.2 测量的基础知识



### 0.2.10 测量器具的误差

与测量器具的误差有关的术语有:

1. 测量仪器的示值误差: 示值与真值之差
2. 基本误差: 在标准条件下具有的误差, 又称固有误差
3. 允许误差: 技术标准、检定规程等对测量仪器所规定的允许的误差极限值
4. 测量器具的准确度: 给出接近于被测量真值的示值的能力
5. 测量器具的重复性和复现性误差:
6. 回程误差: 也称为滞后误差
7. 误差曲线
8. 校准曲线:

## 0.2 测量的基础知识



### 0.2.11 测量结果的表达方式

#### 1. 概率统计特征量

1) 单个测量样本 (测量列)  $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$

(1) 样本平均值:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

是总体期望值  $\mu$  的无偏估计值, 即有  $\bar{\mu} = \bar{x}$

(2) 样本标准偏差  $s$  和总体标准偏差  $\sigma$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \hat{\sigma}$$

## 1 数据的概率统计特征量



2) 多个测量样本  $x_{ij} \begin{cases} (i=1, 2, 3, \dots, n) \\ (j=1, 2, 3, \dots, m) \end{cases}$

样本平均值、样本标准偏差都是随机变量, 服从正态分布。

$$\bar{x} \sim N(\mu, \sigma_x^2)$$

样本平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  无偏估计值

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

### 0.2.11 测量结果的表达方式



#### 2. 测量数据的概率分布

- 1) 误差分析中的大多数公式是建立在正态分布的基础上的
- 2) 测量数据都不是严格服从正态分布的
- 3) 数据的预处理:
  - (1) 消除系统误差
  - (2) 正态性检验
  - (3) 剔除粗大误差

### 0.2.11 测量结果的表达方式



#### 3 测量结果的表达方式

- 1) 第一种表达方式  $x_0 = \bar{x} \pm \delta_{\max}$   
 $\delta_{\max}$  —— 极限误差  
 无法说明测量精确度, 已被淘汰
- 2) 第二种表达方式  $x_0 = \bar{x} \pm t_{\beta} \hat{\sigma}_{\bar{x}}$ 
  - (1) 真值位于区间  $[\bar{x} - t_{\beta} \hat{\sigma}_{\bar{x}}, \bar{x} + t_{\beta} \hat{\sigma}_{\bar{x}}]$  的概率为  $\beta$
  - (2) 相应于置信概率  $\beta$  的  $t_{\beta}$  可查t分布表
  - (3) 测量数据要服从正态分布

### 3 测量结果的表达方式



#### 3). 第三种表达方式

测量结果=样本平均值±不确定度

- (1) 直接测量时, 不确定度为  $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$

$$X = \bar{x} \pm \hat{\sigma}_{\bar{x}} = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$$

- (2) 接测量时, 要采用综合不确定度

### 第一章 测量基础知识



#### 1.6 间接测量结果的综合

##### 1.6.1 间接测量结果的平均值的计算

设间接测量量y与直接测量量 $z_j$ 之间的关系式为

$$y = f(z_1, z_2, z_3, \dots, z_m)$$

则间接测量量y的平均值为

$$\bar{y} = f(\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3, \dots, \bar{z}_m)$$

### 1.6 间接测量结果的综合



#### 1.6.2 误差传递规律

1. 绝对误差的传递:

$$\delta_y = \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial z_j} \right) \delta_j$$

2. 标准偏差的传递

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial z_j} \right)^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_{1 \leq j < m} \left( \frac{\partial y}{\partial z_j} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial z_i} \right) \text{cov}(z_j, z_i)}$$

### 1.6 间接测量结果的综合



#### 1.6.3 不确定度的综合

A类:  $s_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$

B类:  $u_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$

当各个分量都具有同等作用而又互不相关时, 综合不确定度为

$$\sigma_{unc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 + \sum_{j=1}^m u_j^2}$$

### 1.6.4 误差传递规律的应用

1. 不确定度的分配，经常采用均分原则；
2. 采用不均分原则，可减小难测量项目的测量难度；
3. 直接测量量的数目尽量少