

# 智能传感与检测技术

(Smart Sensing & Measuring)

吴嘉敏、陆耿、曹丽、彭黎辉

9/19/2023

1

# 智能传感与检测技术

- 课程简介
  - 课程目标
  - 课程沿革
  - 三位一体的教育方案
  - 国外大学的对应课程
  - 教学团队、教材和教学参考书
  - 实验课和课程安排
- 名词术语、基本概念
- 测量误差与不确定度

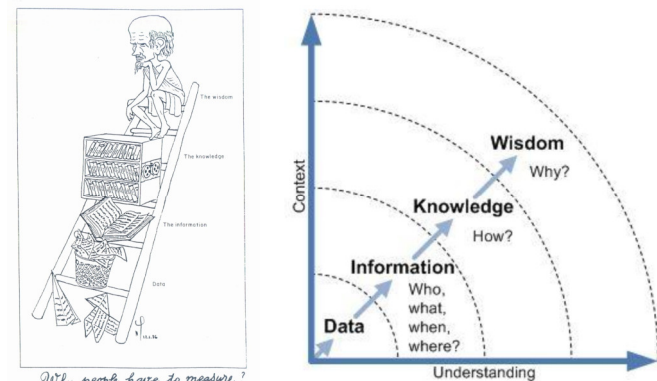
2

# 智能传感与检测技术

- 自动化系本科必修课，2学分
- 课内32学时 + 实验课8学时
  - 每人两个半天实验
  - 第5-12周，分组和时间表待定
- 2023秋季学期的教学方式
  - 教室（三教2101）：**线下教学**
  - 网络学堂：课件，作业和报告，讨论，公告
  - 荷塘雨课堂：**互动答题**
  - 企业版微信群：通知，联络，讨论

3

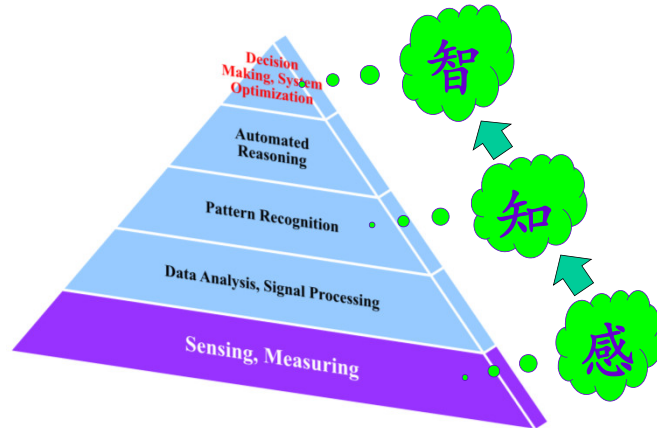
# 智能传感与检测技术



Why people have to measure?  
Tran Tie Lang, Electronics of measuring system, 1987, John Wiley & Sons. Inc

4

## 智能传感与检测技术



## 智能传感与检测技术

### □ 课程简介—课程目标

- ◆使同学掌握从事自动化及无人系统相关行业科学研究及技术开发所必备的传感及测量相关的基本理论及方法。
- ◆通过对本课程的学习，同学应能够综合应用已掌握的物理、电路、电子技术及计算机相关知识，使用传感器进行相关参数检测，能够分析比较同一参数的不同测量方法之间的性能优劣，能够根据实际问题的检测及传感需求设计相应的测量系统，能够设计基于多传感器的智能检测系统。

6

## 智能传感与检测技术

### “Big Dog” (现代版本牛流马)



BigDog has an on-board computer that controls locomotion, servos the legs and handles a wide variety of sensors. ....Sensors for locomotion include joint position, joint force, ground contact, ground load, a laser gyroscope, and a stereo vision system. Other sensors focus on the internal state of BigDog, monitoring the hydraulic pressure, oil temperature, engine temperature, rpm, battery charge and others. ([www.bostondynamics.com](http://www.bostondynamics.com))

7

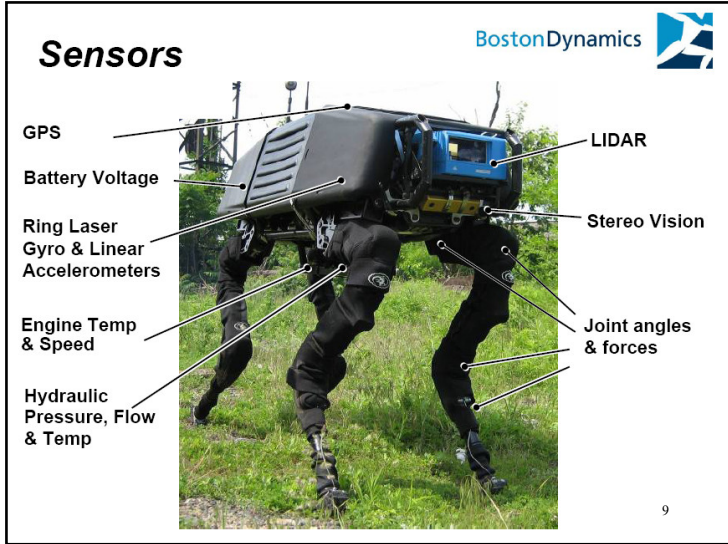
## 智能传感与检测技术



BigDog:235lbs; Payload:340lbs;

Big Dog 使用了哪些传感器？

8

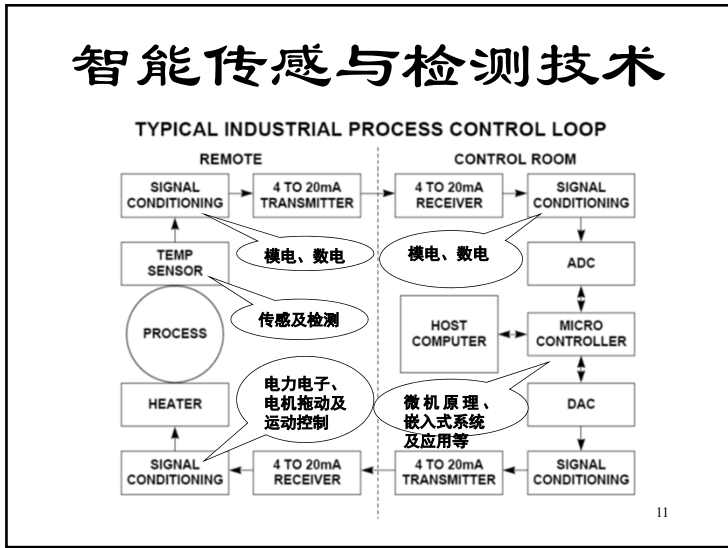


# BigDog Sensors

Type	Measurement Quantity	Location	N
Linear Pot	Joint displacements	Knee, Hip (2), Ankle	16
Load Cell	Actuator, ankle force	Legs	16
Current Sensor	Servo valve current	eBox	16
Stereo Vision	Obstacles, Optic Flow, Ground Slope	Body	3
LIDAR	Human Tracking	Body	1
Gyro	3 angular rates, 3 linear accelerations	Body	6
Temperature	Engine, Oil temperature	Body	3
Flow	Oil flow	Body	4
Pressure	Oil pressure	Body	2
Governor	Engine RPM, Battery voltage	Body	2
<b>Total</b>			<b>69</b>

本体感知  
Proprioception  
体外环境感知  
Exteroception  
体内环境感知  
Homeostasis

10



- # 智能传感与检测技术
- 课程简介—历史沿革、相关课程历史**
- ◆ 2000年以前：
    - 《过程参数检测》、《机械量检测》、《自动化仪表》、《误差分析》
  - ◆ 2000年：
    - 《检测原理》（必修课2学分）
    - 《现代检测技术基础》（选修课2学分）
    - 《检测技术系列实验》（实验课1学分）
  - ◆ 2019年：
    - 《智能传感器与检测技术》（必修课3学分）
  - ◆ 2023年秋：
    - 《智能传感器与检测技术》（必修课2学分）
- 12

# 智能传感与检测技术

## □ 课程简介—主要内容

- ◆ 测量系统基础知识，传感和测量的输入输出特性、灵敏度、分辨率、精度等级，误差传递法则，测量不确定度评定和表达，检测原理和技术的多样性。
- ◆ 位移、距离、速度、加速度、角速度等运动参数传感及检测方法，配合运动控制课程，典型应用为机器人、自动驾驶等。
- ◆ 温度、压力、物位、流量等过程参数传感及检测方法，配合过程控制课程，典型应用为“芯片”流程工业过程参数检测、结合“双碳”目标的建筑能源智慧管理中的能耗仪表。
- ◆ 智能传感及检测，包括多传感器融合、软测量、感觉量测量、光谱测量、光学检测及成像仪器、计算机视觉检测技术等。<sup>13</sup>

# 智能传感与检测技术

## □ 课程简介—对学生培养的作用

我们的培养目标？

- ◆ 三位一体：
  - 价值塑造
  - 能力培养
  - 知识传授

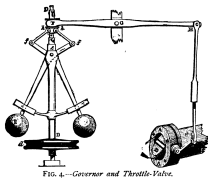
设计、实现一个自动化、智能无人系统

14

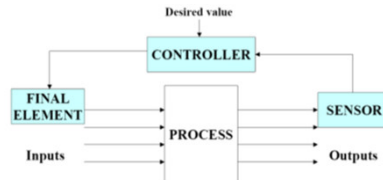
# 智能传感与检测技术

## □ 课程简介—对学生培养的作用

- ◆ 知识传授：传感与检测是实现“反馈”的手段，是设计、实现一个自动控制系统的必备知识。



1788: James Watt patents the centrifugal governor for controlling the speed of a team engine. The governor combines sensing, actuation, and control.

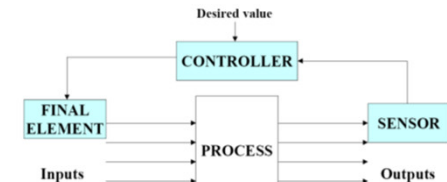


15

# 智能传感与检测技术

## □ 课程简介—对学生培养的作用

- ◆ 知识传授：传感与检测是实现“反馈”的手段，是设计、实现一个自动控制系统的必备知识。



16

## 智能传感与检测技术

### □ 课程简介—对学生培养的作用

- ◆ 能力培养：学以致用实践能力，培养同学综合应用已掌握的物理、电路、电子技术及计算机相关知识，使用合适的传感器和检测方法设计并实现相应的测量系统对被测对象相关参数进行检测的能力。

Lord Kelvin is famously quoted as saying: “To measure is to know. If you cannot measure it, you cannot improve it. When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it.”

17

## 智能传感与检测技术

### □ 课程简介—对学生培养的作用

- ◆ 价值塑造：结合课程思政，希望同学针对目前传感器及高端仪器中的“卡脖子”问题作更多的思考。

卡门涡街流量计→冯·卡门与钱学森

半导体制造行业→热式质量流量计、压力传感器→系友风采  
“计算成像传感、计算显微仪器”

18

## 智能传感与检测技术

### □ 国际相关大学同类课程情况

- ◆ MIT 2.671: Measurement and Instrumentation

<https://meche.mit.edu/featured-classes/measurement-and-instrumentation>

Experimental techniques for observation and measurement of physical variables such as **force, strain, temperature, flow rate, and acceleration**. Emphasizes **principles of transduction, measurement circuitry, MEMS sensors**, Fourier transforms, **linear and nonlinear function fitting, uncertainty analysis**, probability density functions and statistics, system identification, electrical impedance analysis and transfer functions, computer-aided experimentation, and technical reporting. **Typical laboratory experiments** involve oscilloscopes, electronic circuits including operational amplifiers, **thermocouples, strain gauges**, digital recorders, lasers, etc. Basic material and lab objectives are developed in lectures. Instruction and practice in oral and written communication provided.

19

## 智能传感与检测技术

### □ 国际相关大学同类课程情况

- ◆ MIT 2.671: Measurement and Instrumentation

<https://meche.mit.edu/featured-classes/measurement-and-instrumentation>

Go Forth and Measure is a self-directed assignment created by Prof. Ian Hunter for 2.671 to give the students an opportunity to make measurements on something of personal interest to them. In the past three semesters, this project expanded to a full-semester project, including a research proposal, preliminary results, rough draft, and final copy of a research paper.

20

# 智能传感与检测技术

## □ 国际相关大学同类课程情况

### ◆ Stanford ME220: Introduction to Sensors

<https://online.stanford.edu/courses/me220-introduction-sensors>

This course is an essential introduction to the variety of sensors that are used in engineering practice and in many modern applications. You will learn how to select and use sensors for laboratory experiments and final products, and understand the **underlying issues that govern sensor performance**. The course will include a comprehensive descriptions of **the fundamental principles of operation of sensors, and highlight how these principles impact the use of sensors for applications**.

After taking this class, students should be able to describe and define performance criteria for sensors, and predict and analyze performance for different transducers and sensors. Students will also be able explain the physics of transduction mechanisms, interpret a spec sheet, analyze and interpret sensor output data, and propose a sensor system design to solve a problem.

# 智能传感与检测技术

## □ 国际相关大学同类课程情况

### ◆ Stanford ME220: Introduction to Sensors

<https://online.stanford.edu/courses/me220-introduction-sensors>

Topics include

- Basics of measurements
- Emerging applications and technologies
- Introduction to sensors, as transducers from physical parameters to signals
- Sensing principles for displacement, force, pressure, acceleration, temperature, optical radiation, nuclear radiation
- Sensor range, sensitivity, accuracy, repeatability, noise
- Introduction to common circuits for calibrating and conditioning sensor signals to improve their performance

22

# 智能传感与检测技术

## □ 教师团队

- 吴嘉敏：科研方向为计算成像，显微仪器领域。2021年开始承担负责研究生《计算影像学专题》教学工作至今。
- 彭黎辉：科研方向为检测及传感技术，2001年开始承担本科《现代检测技术》教学工作，2002年开始承担并负责研究生《多传感器融合理论及其应用》教学工作，2005年开始承担本科《检测原理》教学工作至今。
- 曹丽：科研方向为检测及传感技术，2001年开始承担并负责本科《现代检测技术》教学工作，2005年开始承担并负责本科《检测原理》教学工作至今。
- 陆耿：长期负责检测技术系列实验。

23

# 智能传感与检测技术

## □ 教材和参考书

- ◆ 张毅、张宝芬、曹丽、彭黎辉等，《自动检测技术及仪表控制系统》，化工出版社，2012年（第三版）
- ◆ 王俊杰、曹丽、彭黎辉等，《传感器与检测技术》，清华大学出版社，2011年
- ◆ Ernest O. Doebelin著，王伯雄等译，《测量系统应用与设计》，第5版，电子工业出版社，2007。
- ◆ Alan Morris, Reza Langari, Measurement and Instrumentation: Theory and Application, 3rd Edition, Elsevier, 2020.
- ◆ Jacob Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications, 5th Edition, Springer, 2016. 24



## 实验课（8学时）安排

- 第5-12周，每周四、周五下午，每班分两批。
- 实验课地点： 中央主楼521室、700d室、户外 无二级选课
- 实验课负责： 陆耿老师和研究生助教3人。
- 基础实验4学时（二选一）：
  - A-1. 金属箔式应变计—应变电桥；
  - A-2. 变面积式电容传感器—位移测量；
  - B-1. 温度传感器—热敏电阻温度特性实验；
  - B-2. 电感传感器—差动变压器和零点残余电压补偿；
- 应用实验4学时（三选一）：
  - C-0. LiDAR+SLAM；
  - D-0. 计算成像；
  - E-0. 人体生理参数测量；

25

## 课时安排

第1周：检测概论（概念/术语、原理/结构的多样性）

误差传递、测量不确定度

第3周： 温度测量（1）

第4周： 温度测量（2）

第5周： 压力测量（1）

第6周： 物位测量（1）

第7周： 流量测量（1）

第8周： 流量测量（2）

第9周： 流量测量（3）

26

## 课时安排

第10周：位移检测（应变片、电容、差动检测、偏位/零位法）

第11周：深度检测（距离检测、结构光、ToF）

第12周：加速度、速度检测（方向判别、时差法/频差法）

第13周：光电传感基础（成像模型、基本参数、像传感器原理）

第14周：计算成像（点扩散函数、解卷积、超分辨率、CRLB）

第15周：光场感知（四维光场、光场重建、激光测距测）

第16周：光电智能传感（光学神经网络、光电模拟芯片）

27

## 课程要求

- 期末半开卷考试（允许带一张A4纸）
- 综合考评：平时成绩（作业、实验报告、互动）40%；  
考试成绩 60%。
- 听课—》阅读—》思考—》提问—》实践。
- 每班一名课代表，督促班级同学学习，协调实验分组等。
- 联系方式：中主701A（彭）、中主307（吴）  
中主521（陆）、中主701（曹）  
lihuipeng@tsinghua.edu.cn; wujiamin@tsinghua.edu.cn;  
lug@tsinghua.edu.cn; caoli@tsinghua.edu.cn;
- 答疑时间：每周五上午 701A

28

## 名词术语

- 检测、测量、计量  
**Measurement**, Measure, Metering, -meter, scale, gauge
- 仪器、仪表  
**Instrument**, Instrumentation
- 传感器、敏感元件  
**Sensor**, Transducer
- 变送器、调节器、执行器  
**Transmitter**, Regulator, Actuator
- 仪表及检测技术 Instrumentation and Measurement Tech.
- 传感器与执行器 Sensor and Actuator
- 测控工程 Instrument and Control Engineering
- 感知、遥感 Detection, Remote Sensing
- **Intelligent Sensors and Measurements**
- **Smart Sensor and Measurement Technology**
- . . . .

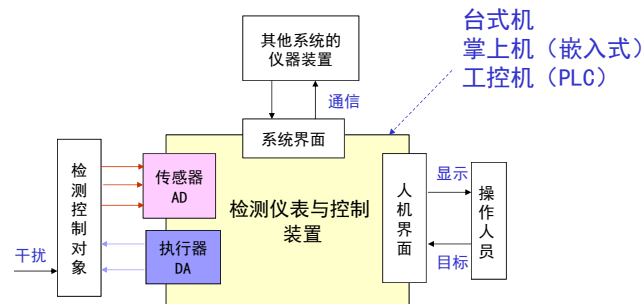
29

## 传感器及检测仪表的种类分类

- 按**检测参量**：如温度、压力、流量、位移、速度、加速度。  
(电工量、热工量、机械量、物性和成分量、光学量、状态量和过程量)
- 按**传感效应**：光电、压电、热电、磁电等。
- 按**能量来源**：有源传感器(能量转换型，如压电、热电、光电式)，  
无源传感器(能量控制型，如压阻、电容式)等。
- 按**传感器材料**：导体、半导体、有机、无机材料、生物材料等。
- 按输出**信号形式**：模拟量和数字量。
- 按输出**响应形式**：连续式和开关式。
- 按输出**信号远传**功能：现场显示仪表和无线数据传输。
- 按**应用场所**：普通型、隔爆型(密封壳)及本质安全型(能量限制)。

30

## 检测与控制系统的组成

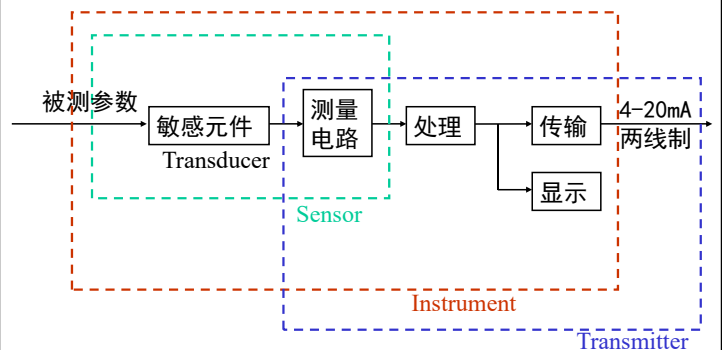


例：流量检测、阀门控制、目标参数设置

⇒ 传感器与检测技术：自动化和智能无人系统的**源头技术**，获取数据及信息的手段。

31

## 检测仪表的组成



⇒ **智能传感与检测**：突出新型传感、突出检测与智能处理相结合的发展趋向，加强智能检测专题讲解。

32



下列术语，你听过的有哪些？

- ☐ A 灵敏度
- ☐ B 分辨率
- ☐ C 信噪比
- ☐ D 零点漂移
- ☐ E 滞环特性
- ☐ F 精度等级

提交

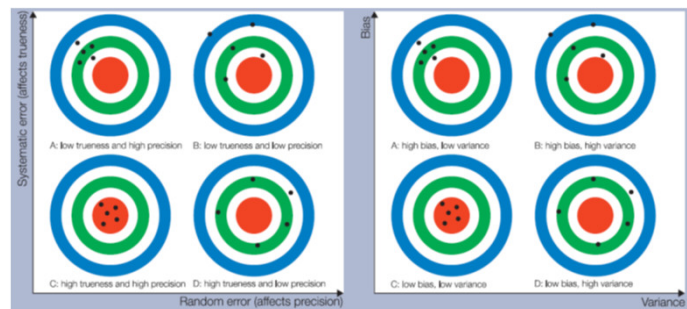
33

## 测量的基本概念

- 准确度、精度
- 灵敏度和线性度
- 测量范围、上下限、量程
- 零点迁移、量程迁移
- 滞环、死区和回差
- 精度等级
- 重复性和再现性
- 动态特性：响应有延时或震荡，与 t 有关

34

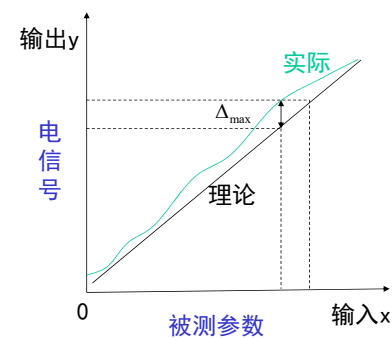
## 准确度、精度



Shervin Shirmohammadi and Hussein Al Osman, Machine Learning in Measurement Part 1: Error Contribution and Terminology Confusion, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, April, 2021.

35

## 灵敏度和分辨率、非线性误差、线性度



$$\text{灵敏度: } S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

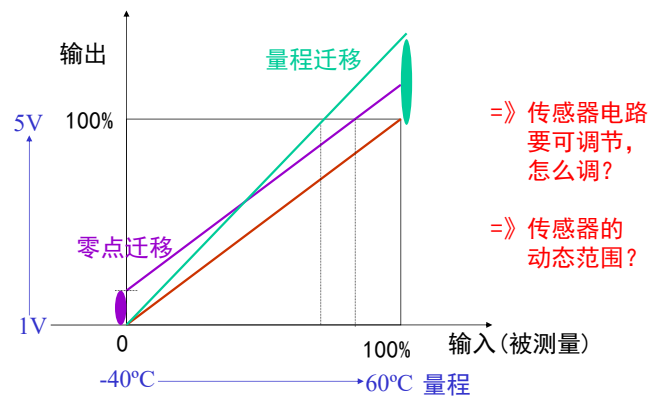
线性仪表：S一定

$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta_{\max}}{\text{量程}} \times 100\%$$

分辨率：  
输出能响应和分辨的最小输入量。  
例如：打印机的分辨率；  
AD转换的1个LSB。

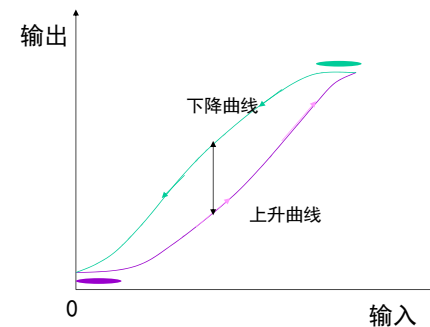
36

## 零点迁移和量程迁移



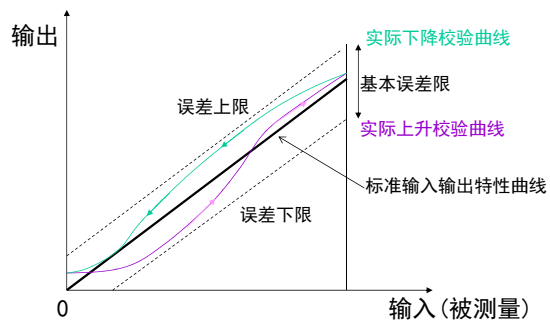
37

## 滞环、死区和回差



例: 磁路、弹簧等储能元件<sup>38</sup>

## 测量精度等级

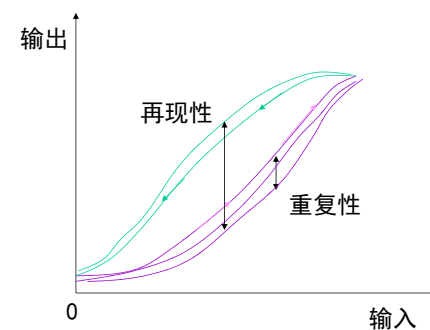


精度等级 0.5级: 基本误差 不超过量程的  $\pm 0.5\%$   
最大误差 不超过量程的  $0.5\%$

39

## 重复性 和 再现性

(随机性) (稳定性)  
(不包括滞环和死区) (包括)



=> 选多少位的ADC更好? 16、12、10位?

40

如果AD转换的1个LSB比电路噪声还小，那么该数字仪表的分辨率还能否达到1个LSB？

- ☐ A 能
- ☐ B 不能

提交

41

## 对传感器或检测系统基本要求

- 高灵敏度 (High Sensitivity)
- 高分辨率 (High Resolution)
- 高稳定性 (High Reliability, Stability)
- 高信噪比 (High SN ratio)
- .....
- 准确性和精密性 (Accuracy, Precision)

42

## 误差传递和测量不确定度

- 误差的定义和分类
  - 随机误差分析、正态分布特性
  - 置信区间和置信概率
  - 误差传递法则
  - 平均值的标准偏差的估计
  - 测量不确定度的定义和表示方法
- 国防科技大学-大学物理实验(国家级精品课)  
(<https://www.bilibili.com/video/BV1TJ411L7it?p=13>)  
第13讲~16讲

43

## 误差传递和测量不确定度

- Abstract Definition of Sensor: *A device that, when given a certain environment, will deliver information about the environment at a given time*

$$S(E, t) = \{V(t), \varepsilon(t)\}$$

a device that receives a signal or stimulus and responds with an electrical signal

44

## 误差的定义

- 绝对误差：测量值与真值之差，有正负
- 相对误差：绝对误差与真值之比
- 引用误差：绝对误差与量程之比
- 最大允许误差：MPE 红外耳温计  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  (36.0~39.0)
- 真值、约定真值（多次测量的平均值；或上一级标准仪器测量所得的示值代替）
- 示值

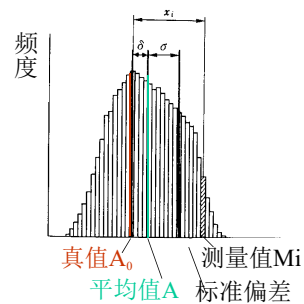
45

## 测量法规

- 标准化建立和管理
  - 国际标准化工作委员会，国家计量院
- 国家标准和检定规程
  - JJG 270-95 血压计和血压表检定规程
  - GB/T 18604-2001 用气体超声流量计计量天然气流量
  - JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示
  - ...
- 测量仪表检定
  - 国家质量技术监督局

46

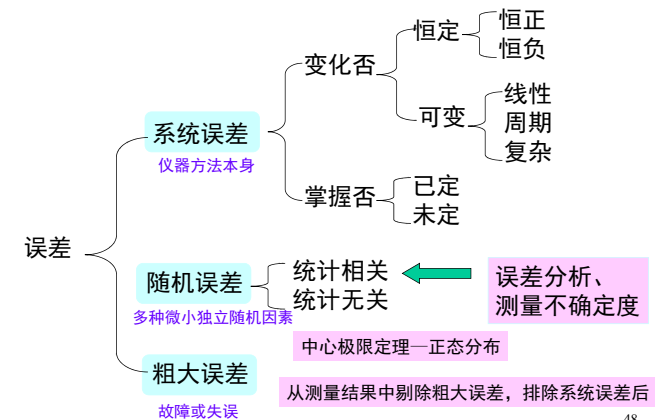
## 测量结果分布



误差=系统误差+随机误差

47

## 误差分类



48

## 误差、平均值、真值、偏差、残差、方差、标准偏差

$$x = M - A_0$$

$$v_i = M_i - A$$

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i$$

$$A_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} A$$

大数定理

$$\delta = A - A_0$$

$$\sum v_i = 0$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A_0)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A_0)^2}$$

49

## 方差、标准偏差、协方差、相关系数

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A_0)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A_0)^2}$$

$$\sigma_{X_i X_j}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - A_i)(X_{jk} - A_j)$$

$$r(X_i, X_j) = \frac{\sigma_{X_i X_j}^2}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}, [-1, +1]$$

两组测量值  $X_{ik}$  和  $X_{jk}$  :

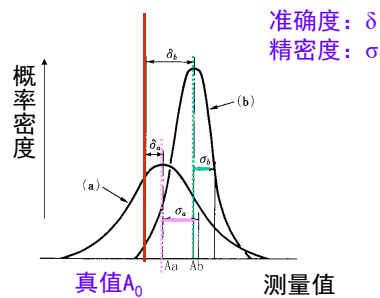
$$|r(X_i, X_j)| = 1 \quad \text{完全相关} \\ \text{直线回归 } p=1$$

$$|r(X_i, X_j)| = 0 \quad \text{完全不相关} \\ \text{没有直线关系} \\ \text{相互独立}$$

50

## 测量的准确度与精（密）度

Accuracy and Precision

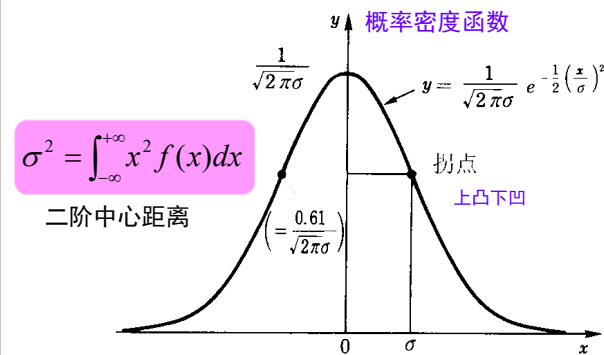


准确度高  $\Rightarrow$  测量方法 (a)

精密度高  $\Rightarrow$  测量方法 (b)

51

## 随机误差的正态分布



52

## 随机误差的正态分布

$$N(A, \sigma^2)$$

$$y = f(M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{M-A}{\sigma}\right)^2}$$

归一化

$$t = \frac{M - A}{\sigma}$$

$$N(0,1)$$

$$y = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

53

## 正态分布函数的特征值

$$x = \pm\sigma, \quad e^{-0.5} \approx 0.61$$

$$P(-\infty < x < +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

$$p(x) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(x)dx = 0.6827$$

$$p(x) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(x)dx = 0.9545$$

$$p(x) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(x)dx = 0.9973$$

54

## 置信区间与置信概率

- **置信区间**：随机变量取值的范围，用正态分布标准偏差的倍数即 $\pm z \sigma$ 来表示， $z$ 为**置信系数**。
- 置信系数愈大，置信区间愈宽，置信概率愈大。
- 随机误差的分布范围愈大，测量精度愈低。
- 如有95%的**置信概率**时，其可靠性已经比较高了，此时的置信区间是 $\delta = \pm 2 \sigma$ 。

$$p(x) = \int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(x)dx = 0.9545$$

55

## 正态分布的置信概率的数值表

t or Z	0.00	0.50	0.6745	0.7979	1.00	1.96	2.00	3.00	$\infty$
概率密度 $f(t)$	0.3989	0.3521	0.3177	0.2901	0.2420	0.0584	0.054	0.0044	0.00
置信概率 $\varphi(z)$	0.0000	0.3829	0.5000	0.5751	0.6827	0.9500	0.9545	0.9973	1.0000

$\delta = \pm 6 \sigma$  的置信概率是多少？

56

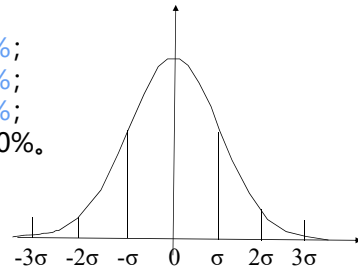


填空题 4分

设置

测量值落在随机正态分布的 $\pm k\sigma$ 之间的概率分别是：

k=1时，概率为[填空1]%;  
k=2时，概率为[填空2]%;  
k=3时，概率为[填空3]%;  
k= [填空4] 时，概率为50%。



正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

作答

57

## 误差传递法则

间接测量Y与互相独立的直接测量  $X_1, X_2, \dots$  有关系式

$$Y = \phi(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$X_1, X_2, \dots$  的标准偏差为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ ，求Y的标准偏差  $\sigma_Y$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{d\phi}{dx_1}\right)_0^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{d\phi}{dx_2}\right)_0^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{d\phi}{dx_n}\right)_0^2 \sigma_n^2}$$

泰勒级数展开

$$Y = Y_0 + \left(\frac{d\phi}{dx_1}\right)_0 x_1 + \left(\frac{d\phi}{dx_2}\right)_0 x_2 + \dots + \left(\frac{d\phi}{dx_n}\right)_0 x_n$$

当  $Y = a_1 X_1 \pm a_2 X_2 \pm \dots \pm a_n X_n + k$  时，则有

$$\sigma_Y^2 = a_1^2 \sigma_1^2 + a_2^2 \sigma_2^2 + \dots + a_n^2 \sigma_n^2$$

58

单选题 1分

设置

启停秒表的标准偏差为0.04秒。用此秒表测量时间时，由于启停原因引起的测量标准偏差约为：

- ☐ A 0.08秒
- ☒ B 0.06秒
- ☐ C 0.04秒
- ☐ D 0.02秒

提交

59

单选题 1分

设置

单次测量的标准偏差为  $\sigma$ ，则n次测量平均值的标准偏差为：

- ☐ A  $\sigma/n$
- ☐ B  $n\sigma$
- ☐ C  $\sigma/(n-1)$
- ☒ D  $\sigma/\sqrt{n}$

提交

60

## 1. 测量平均值的正态分布

每个测量结果  $M_i$  按正态分布  $N(A_0, \sigma^2)$  时

测量数据平均值  $A$  的正态分布则为  $N(A_0, \sigma^2/n)$

误差传递法则

## 2. 测量真值与测量标准偏差的估计

真值  $A_0$  的无偏估计就是平均值  $A$ ;

测量方差的无偏估计是  $\hat{\sigma}^2$ ;

实验标准偏差也称贝塞尔公式:  $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$

测量数据平均值的实验标准偏差为  $\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$

61

## 标准偏差的分析比较

总体标准偏差: 偏离真值的程度  $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}$

实验标准偏差: 偏离平均值的程度  $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$

测量结果平均值的标准偏差:  $\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$

A类标准不确定度

62

## 测量不确定度的定义

- 1993年国际标准化组织, 发布GUM

“Guide to the expression of Uncertainty in Measurement”

- 国家计量技术规范JJF1059-1999  
«测量不确定度评定与表示»

- 表示测量结果的不可信程度(分散程度)、是与测量结果相关联的参数。
- 用测量平均值的标准偏差来表示, 也可以用标准偏差的倍数或置信区间的半宽度
- 测量不确定度不反映测量结果与真值是否接近的程度。

$$X = x \pm U \quad (x - U \leq X \leq x + U)$$

63

## 测量不确定度的分类

### 1) 标准不确定度 (standard uncertainty)

$$X = x \pm U \quad (x - U \leq X \leq x + U)$$

A类: 由一系列的测量结果根据概率统计得到,  $U_A$

B类: 根据资料或假定的概率分布得到,  $U_B$

### 2) 合成标准不确定度 (combined standard uncertainty)

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_i}\right)^2 u^2(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_i}\right) \left(\frac{\partial \phi}{\partial X_j}\right) u(X_i) u(X_j) r(X_i, X_j)$$

### 3) 扩展不确定度 (expanded uncertainty)

$$U = k u_c \quad X = x \pm U \quad (x - U \leq X \leq x + U)$$

置信概率为P的扩展不确定度  $P=95\%$  ( $k=2$ ) 或  $99\%$  ( $k=3$ ),  $k$ 为包含因子  
一般地, 如不作特殊说明,  $P=95\%$  ( $k=2$ )。

64

## 测量不确定度的评定方法

相同条件下，对被测量X进行n次重复测量，得测量值 $X_i$ ，求其平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

A类标准不确定度

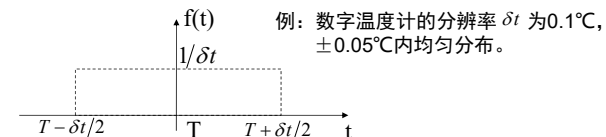
$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

A类标准不确定度的自由度  $n-1$

(自由度是标准不确定度的不确定度)

65

## 均匀分布——测量结果的区间分布



$$f(t) = \begin{cases} 1/\delta t, & (T - \delta t/2 \leq t \leq T + \delta t/2) \\ 0, & t < T - \delta t/2 \text{ or } t > T + \delta t/2 \end{cases}$$

$$\sigma^2 = \int_{-a}^{+a} x^2 \frac{1}{2a} dx = \frac{a^2}{3}$$

均匀分布的期待值和标准偏差，分别为T和  $\frac{\delta t}{2\sqrt{3}}$ ，

置信概率为100%时的包含因子则为  $\sqrt{3}$  (k为1.73)。

结论是B类标准不确定度为  $\frac{\delta t}{2\sqrt{3}} = 0.29\delta t$ 。

66

## 测量不确定度评定步骤

- 测量结果的不确定度一般**包含若干分量**，这些分量可按其数值的评定方法归并成A、B两类，A类是指对多次重复测量结果用统计方法计算的标准偏差，B类是指用其他方法估计的相当于标准偏差的近似值；
- 如果**各分量是独立的**，测量结果的合成标准不确定度是各分量平方和的正平方根；
- 根据需要可将合成标准不确定度乘以一个包含因子k (取值范围2~3)，作为扩展不确定度，使结果给出的范围能以高概率(95%以上)包含被测真值。

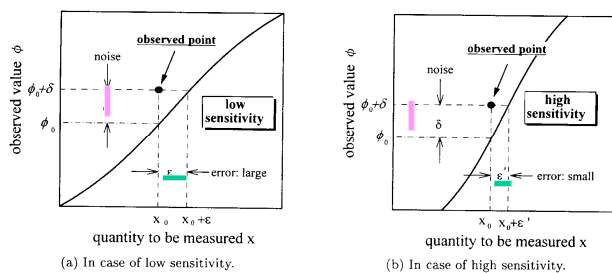
67

## 测量不确定度评定（案例）

- 标杆长度校准结果
  - 标记点中心距离实测值：1000.982mm
  - 测量结果测量扩展不确定度：U=0.010mm, k=2
- 不确定度分量包括
  - 三坐标测量机UPMC850的不确定度：U=0.004mm, k=2
  - 标记点中心位置的不确定度（印刷、对准等）

68

## 高灵敏度对降低测量不确定性的作用



低灵敏度

高灵敏度

69

## 测量方程与解逆问题

- 被检测量 $X$ ，观测量 $\phi$

$$X \xrightarrow{H} \phi \xrightarrow{G} X'$$

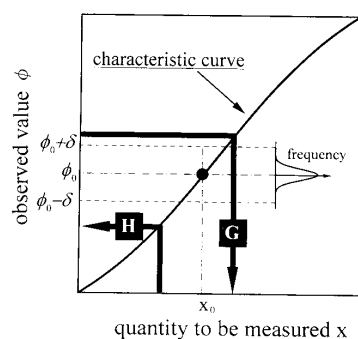
- 物理法则变换 $H$ ： $\phi = H(X)$
- 逆变换 $G$ ： $X' = G(\phi)$
- 设观测误差 $\delta$ ，测量误差 $\varepsilon$ ，则  $X_0 + \varepsilon = G(\phi_0 + \delta)$
- 一次近似展开：

$$\varepsilon = \delta \cdot \left. \frac{\partial G(\phi)}{\partial \phi} \right|_{\phi=\phi_0}$$

$$\delta = \varepsilon \cdot \left. \frac{\partial H(X)}{\partial X} \right|_{X=X_0}$$

70

## 被测量与观测量的关系



71

多选题 1分

设置

请选择正确的说法，

- ☒ A 测量不确定度可以用测量数据平均值的标准偏差表示
- ☒ B 测量准确度是平均值与真值之差
- ☐ C 测量不确定度包含测量准确度
- ☒ D 高精度测量是测量不确定度相对小的测量

提交

72

## 思考题

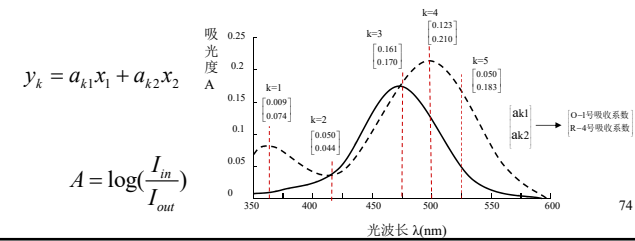
1. 准确度和测量不确定度的定义是什么？两者关系如何？提示  $M \in A_0 \pm b \pm U$
2. 启停秒表的标准不确定度为  $0.04\text{sec}$ ，问用此秒表测量时间时，由于启停原因引起的标准不确定度为多少？
3. 正态分布变量以50%的概率落在区间  $a$  至  $b$  中，求该量的最佳估计值。设  $\Delta = (b - a)/2$  是区间的半宽，求标准不确定度  $U$  与  $\Delta$  的关系。
4. 已知最大允许误差为  $\Delta$ ，并且测量值在  $M \pm \Delta$  范围内可视为均匀分布，如何计算B类标准不确定度？（含计算过程）
5. 输出量为标称值  $150\text{mm}$  的杆的长度，所用测长仪在所使用的这一段长度所给出的系统偏差是  $-0.06\text{mm}$ ，输入量系统偏差的不确定度可以忽略不计，该杆经过了  $n=20$  次独立重复测量，结果如下所示，求输出量的最佳估计值及其测量不确定度  $U(y)$ 。（写出计算式及计算结果）

150.14, 150.04, 149.97, 150.08, 149.93, 149.99, 150.13, 150.09, 149.89, 150.01  
149.99, 150.04, 150.02, 149.94, 150.19, 149.93, 150.09, 149.83, 150.03, 150.07mm

73

## 思考题

6. 对同一被测物理量用不同种方法测量得到  $m$  组测量数据，已知其平均值和方差分别为  $(X_1, X_2, \dots, X_m)$  和  $(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2)$  时，求综合这  $m$  组数据的最佳方法。
7. 上述第6题中，如果各种检测方法的方差相同，但测量数据的个数不同，即已知测量平均值和测量数据个数分别为  $(X_1, X_2, \dots, X_m)$  和  $(n_1, n_2, \dots, n_m)$  时，又该如何综合这些数据？
8. 如图所示有两种物质的标准溶液的吸收光谱曲线，为测量这两种成分混合溶液的浓度  $x_1, x_2$ ，需要至少采集两个波长点下的吸光度测量值  $y_1, y_2$ ，问图中所示的五个波长点选择哪两个最合适？提示：吸光度测量方差同为  $\sigma^2$ 。



74

## 多传感器的数据融合-加权与递推

- 前述两个传感器的加权融合问题也可以用递推的方式来表达

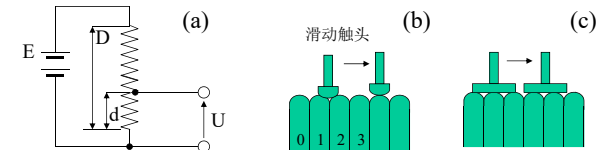
$$\begin{aligned}\hat{x}_1 &= x_1, \hat{\sigma}_1^2 = \sigma_1^2, \\ \hat{x}_2 &= \hat{x}_1 + \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2} (x_2 - \hat{x}_1), \hat{\sigma}_2^2 = (1 - \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2}) \hat{\sigma}_1^2 \\ &= (1 - K) \hat{x}_1 + K x_2\end{aligned}$$

- $K$  大则表示对新数据的依赖增大，对先前的估计依赖减小； $K$  小则表示对新数据的依赖减小，对先前的估计依赖增大。
- $K$  是使新估计的方差最小而得到的。
- Kalman滤波就是不断调整  $K$ ，快速达到最佳估计的方法。简易的Kalman滤波即为一阶互补滤波。

75

## 思考题

9. 图(a)所示的电位器是一种位置传感器。  
(1) 写出位置传感器的理想输入输出特性公式。  
(2) 图(b)所示大小的滑动触头，在滑动接触缠绕的电阻丝时，会出现同时接触两根或只接触一根的情况。试描绘精细的输入输出特性曲线。  
(3) 图(c)所示大小的滑动触头，与图(b)相比，对于测量有何不同？



提示 for (b):

$$U = \frac{d}{D} E = \begin{cases} \frac{i}{N} E, & \text{滑动接触凸点 } (i) \text{ 时} \\ \frac{i}{N-1} E, & \text{滑动接触凹点 } (i+0.5) \text{ 时} \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

76