

智能传感与检测技术

(Smart Sensing & Measuring)

曹丽、彭黎辉

2023年2月

1

智能传感与检测技术

- 自动化系本科必修课，3学分
- 课内48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春季学期的教学方式
 - 教室（技科3311）：**线下教学**
 - 网络学堂：课件，作业和报告，讨论，公告
 - 荷塘雨课堂：**签到**，**互动答题**
 - 企业版微信群：通知，联络，讨论

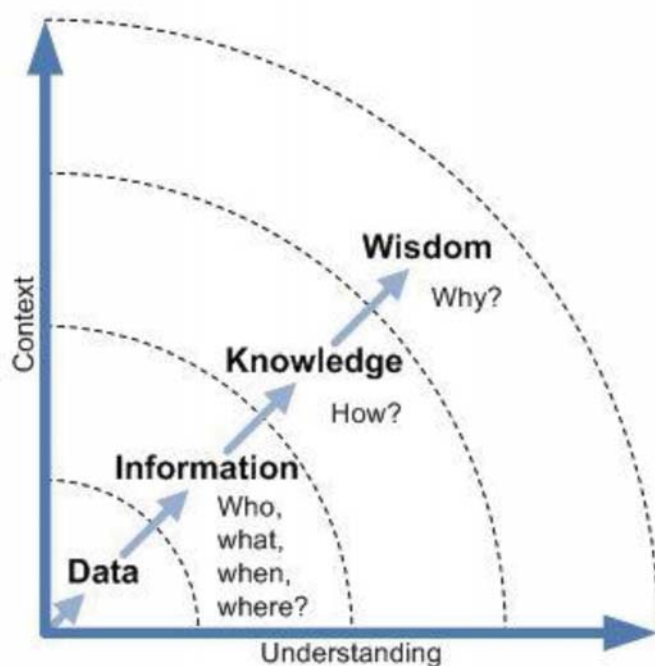
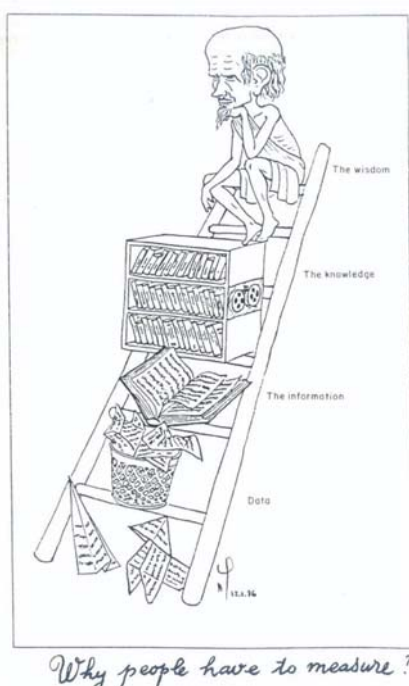
2

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、原理和结构的多样性

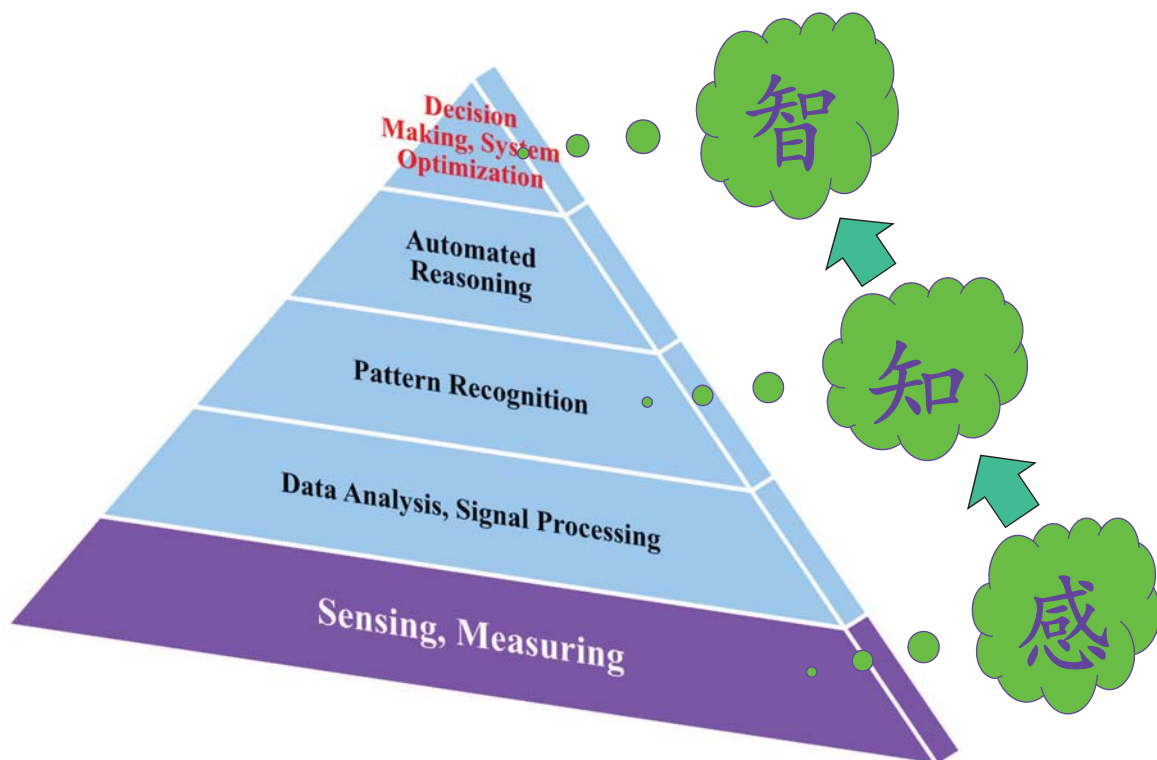
3

智能传感与检测技术



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。

智能传感与检测技术



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)

7

智能传感与检测技术

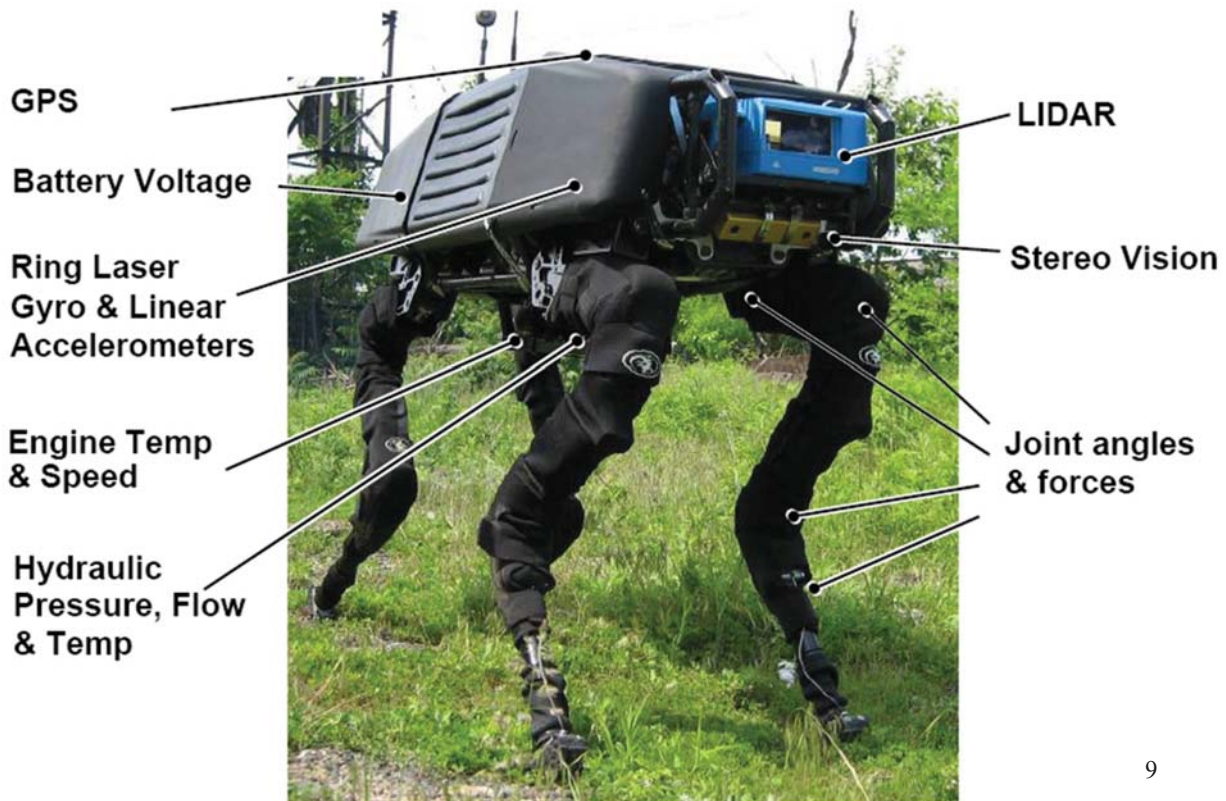


Big Dog 使用了哪些传感器？

8

Sensors

BostonDynamics



9

BigDog Sensors

BostonDynamics



| 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 |
| Total | | | 69 |

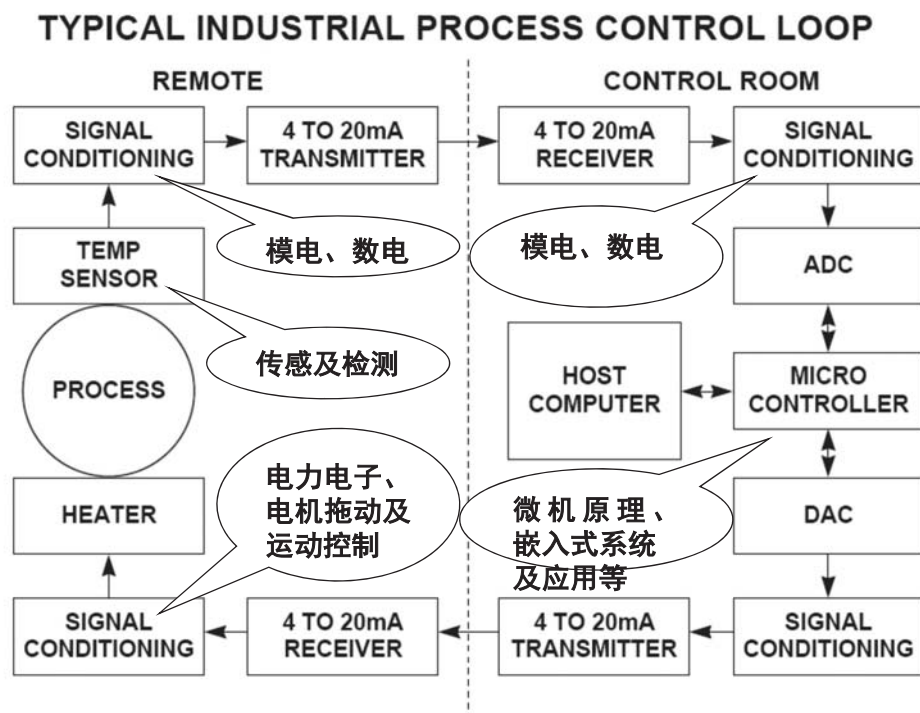
Proprioception

Exteroception

Homeostasis

10

智能传感与检测技术



11

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）

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。¹³

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？

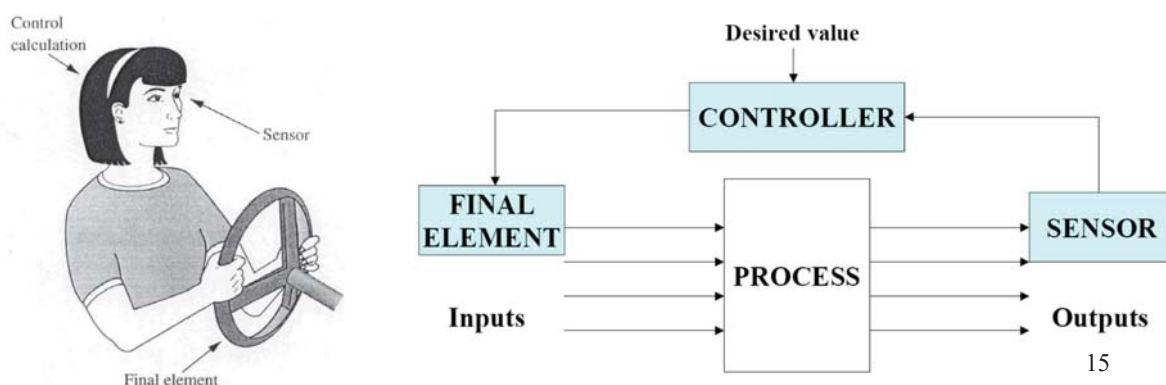
◆ 三位一体：
价值塑造
能力培养
知识传授

设计、实现一个自动化、智能无人系统

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。



15

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：学以致用用的实践能力，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.”

16

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，引导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。

17

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.

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>

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.

19

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

21

智能传感与检测技术

□ 教师团队

- 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。
- 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。
- 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《计算摄像学专题》教学工作至今。
- 陆耿：长期负责检测技术系列实验。

22

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. ²³

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、郑老师和博士生助教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. AS-i总线(1)(2)； 1/2
 - D-0. 太赫兹光谱检测(1)(2)； 1/4
 - E-0. 磁场梯度探测； 1/4

课时安排

- 第1周：检测概论（概念/术语、原理/结构的多样性）
- 第2周：误差传递、测量不确定度、数据融合
- 第3周：位移检测（应变片、电容传感器、差动检测）
- 第4周：位移检测（电感传感器、偏位/零位法、平衡式检测）
- 第5周：加速度、距离检测（方向判别、PSD、调制解调）
- 第6周：速度检测（相关法、时差法/频差法、激光测距测）
- 第7周：阵列和MEMS传感器（阵列传感器应用、MEMS）
- 第8周：（结构光成像、计算成像）

25

课时安排

- 第 9周： 温度测量（1）
- 第10周： 温度测量（2）
- 第11周： 休假日
- 第12周： 压力测量（1）
- 第13周： 压力测量（2）
- 第14周： 物位测量（1）
- 第15周： 流量测量（1）
- 第16周： 流量测量（2）

26

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700A、Tel:62792559
caoli@tsinghua.edu.cn
- 答疑时间：每周四下午 700A或701

27

名词术语

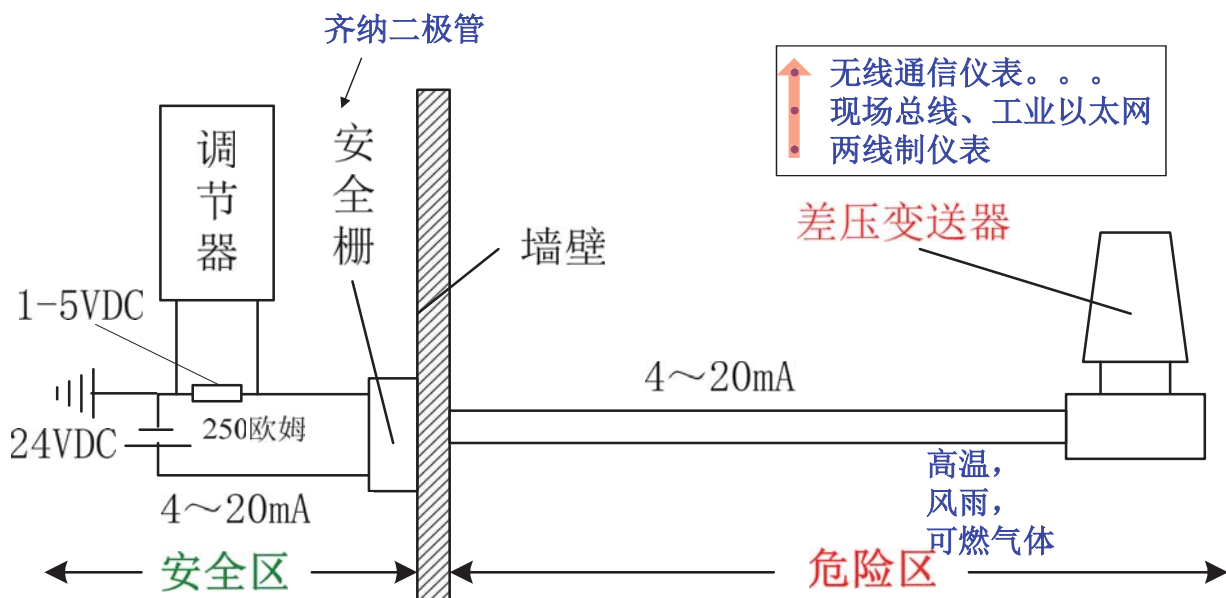
- 检测、测量、计量
Measurement, Measure, Metering, -meter, scale, gauge
- 仪器、仪表
Instrument, Instrumentation
- 传感器、敏感元件
Sensor, Transducer
- 变送器、调节器、执行器
Transmitter, Regulator, Actuator
- 仪表及检测技术 Instrumentation and Measurement Tech.
- 传感器与执行器 Sensor and Actuator
- **测控工程** Instrument and Control Engineering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

28

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）。

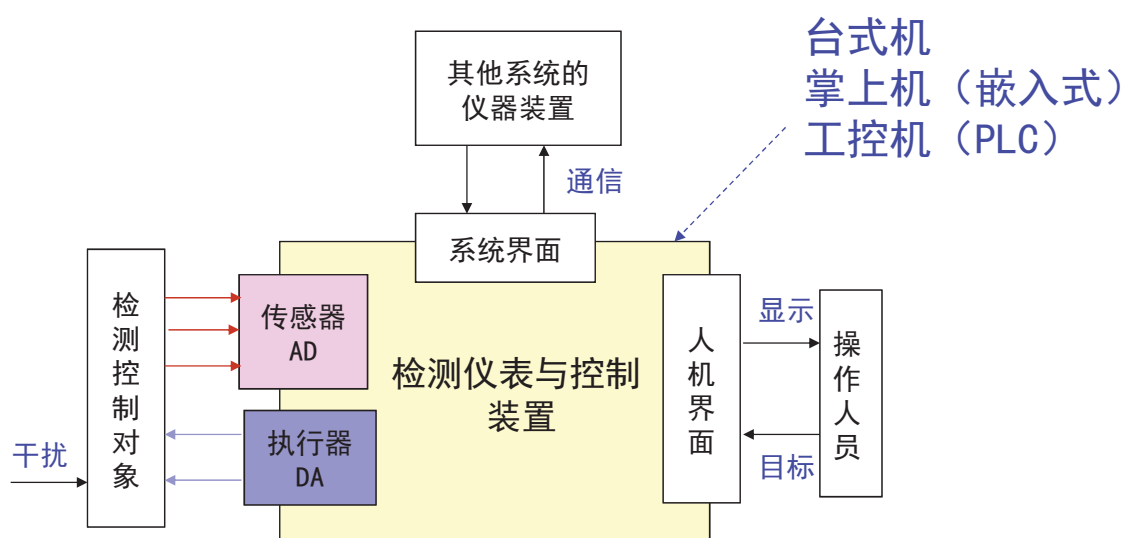
29



本质安全型（安全火花）防爆仪表

30

检测与控制系统的组成

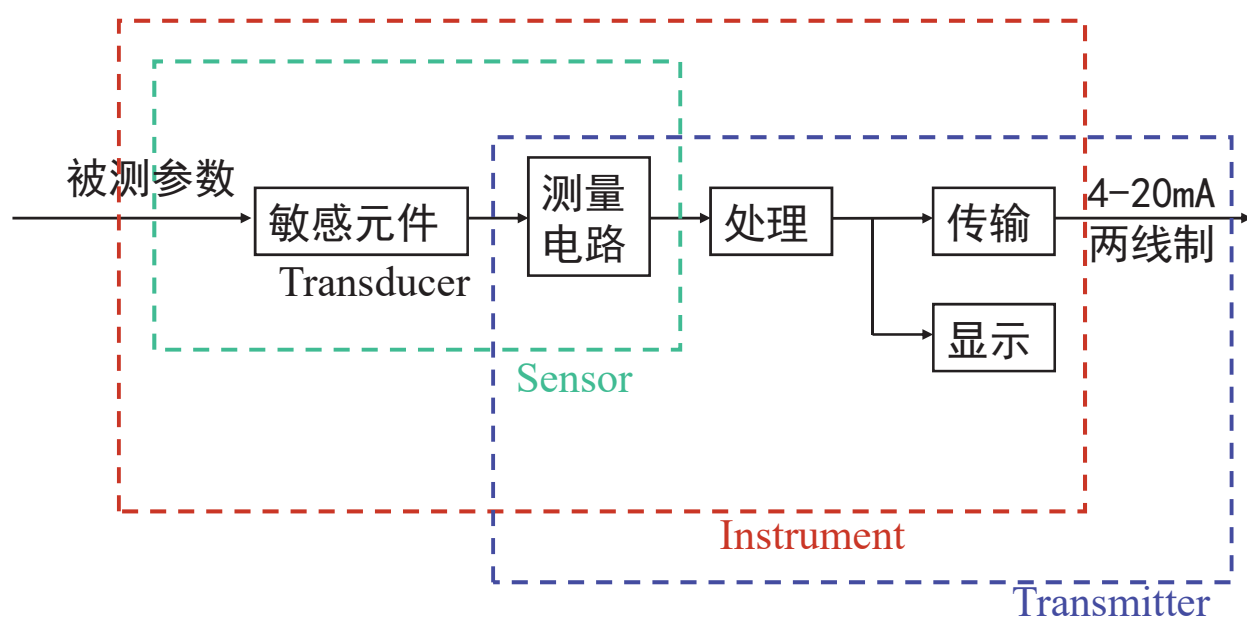


例：流量检测、阀门控制、目标参数设置

=》 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

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)

33

多选题 1分

设置

传感器与检测技术在智能控制系统中的位置和作用是？

- ☒ A 前端技术
- ☒ B 补充技术
- ☒ C 源头技术
- ☐ D 没有检测也可以控制
- ☒ E 获取数据和信息的手段

提交

34

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

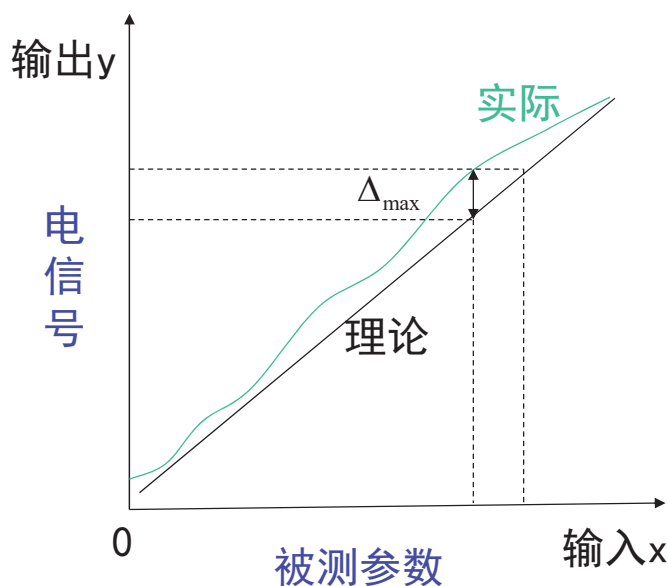
35

测量的基本概念

- 传感器或仪表的输入输出特性
- 测量灵敏度和线性度
- 测量范围、上下限、量程
- 零点迁移、量程迁移
- 滞环、死区和回差
- 测量精度等级
- 重复性和再现性
- 动态特性：响应有延时或震荡，与 t 有关

36

灵敏度和分辨率、非线性误差、线性度



灵敏度: $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$

线性仪表: S 一定

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

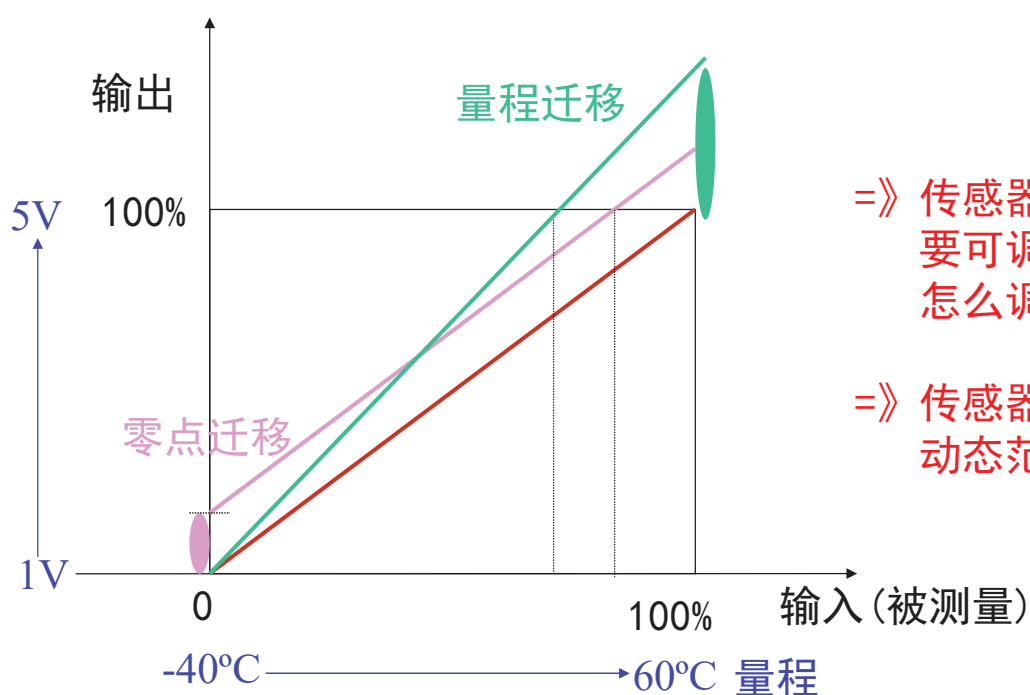
分辨率:

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。

37

零点迁移和量程迁移

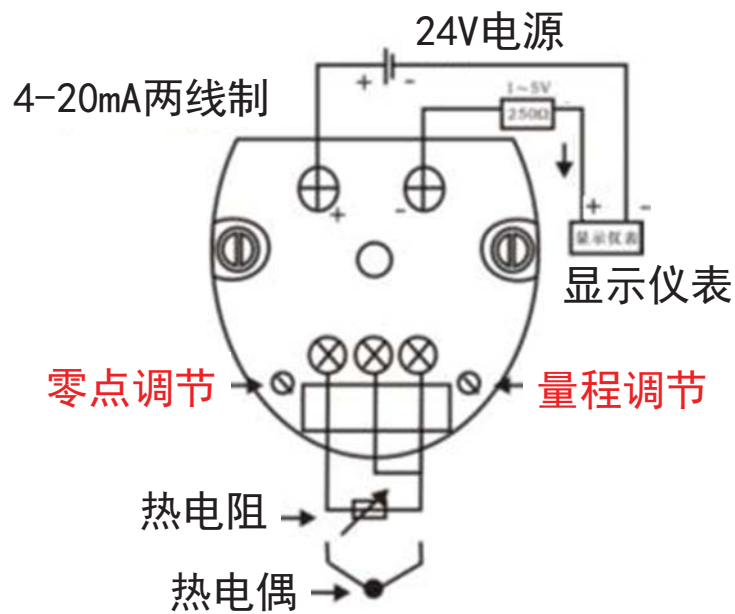


=> 传感器电路
要可调节,
怎么调?

=> 传感器的
动态范围?

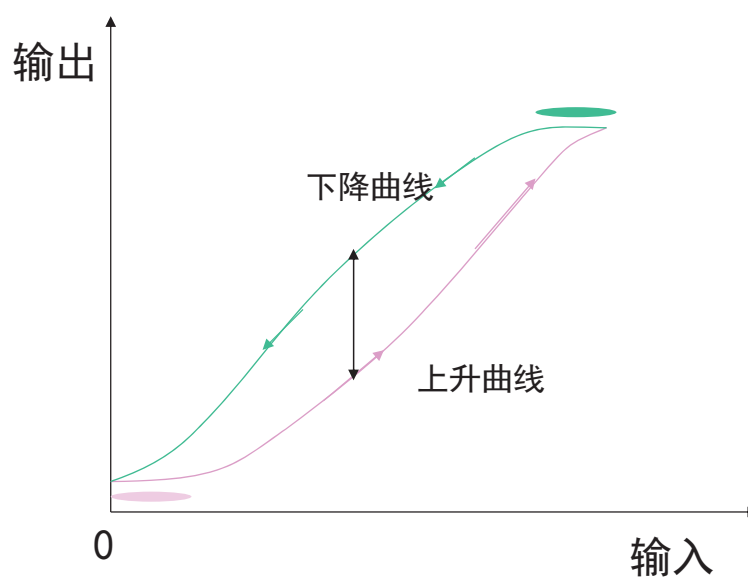
38

温度变送器模块：接线和调节



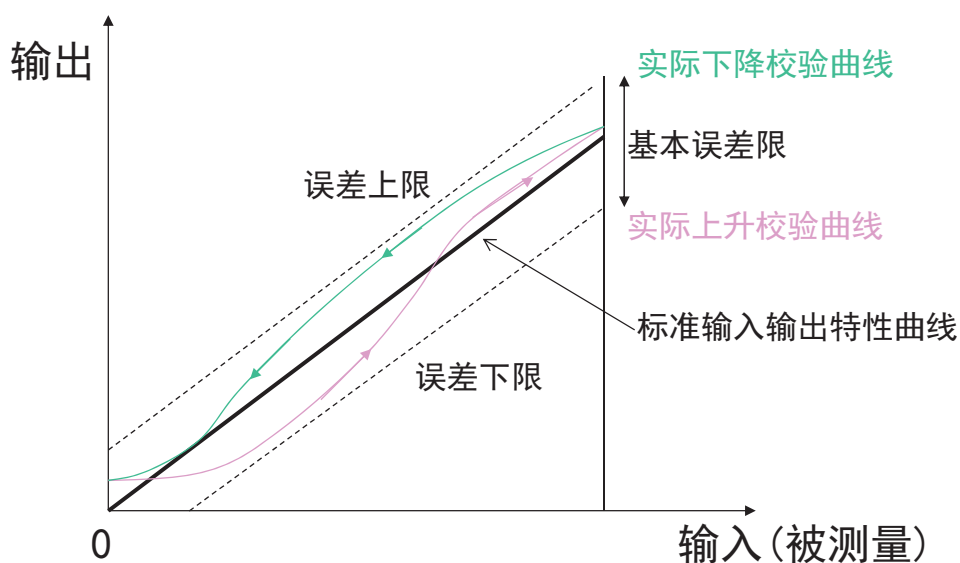
39

滞环、死区和回差



例：磁路、弹簧等储能元件

测量精度等级

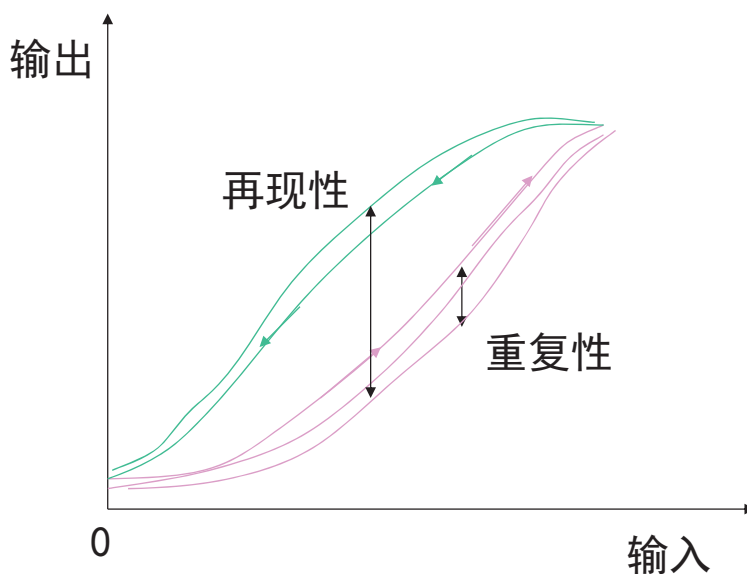


精度等级 0.5级：基本误差不超过量程的 $\pm 0.5\%$
最大误差不超过量程的 0.5%

41

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？

42

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

43

“测量”所涉及的知识范围

- 经典的测量智慧
 - 刻度线的吻合，视觉判断
 - 放大测量，提高测量灵敏度
 - 平衡测量，抵消其他干扰
 - 中医（望、闻、听、切），综合诊断
 - ...
- 成熟的工业自动化仪器仪表技术
- 测量法规
- 现代传感和检测技术
 - 实时在线检测、动态检测
 - 结构化、多元化测量
 - 微弱信号测量
 - 新工艺和安装技术
 - 结合通信、网络、系统集成
 - 新型传感和智能处理
- 对象研究（行业专家）、原理研究（创新设计）

44

测量法规

- 测量仪表检定
 - 国家质量技术监督局
- 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
 - ...

45



国际单位制（SI）的新定义

七个基本单位，其他所有单位都可以从基本单位中导出

- 千克kg—用普朗克常数 h 定义
- 安培A—用基本电荷 e 定义
- 开尔文K—用玻尔兹曼常数 k 定义
- 摩尔mol—用阿伏伽德罗常数 N_A 定义
- 秒s—
- 米m—
- 坎德拉Cd—



基本单位的定义有四个变化

- 》 2018. 11. 16国际计量大会投票通过
- 》 2019. 05. 20正式生效



新定义的意义

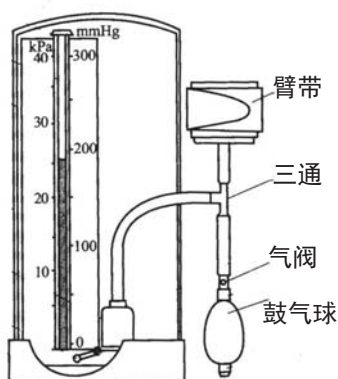
国际千克原器：

- 定义来源：1升水的质量为1kg
- 一个标准的39mm直径和高度的铂合金圆柱体
- 全世界现在大约有100个千克原器的复制品
- -》用普朗克常数定义-》纳米、生物技术

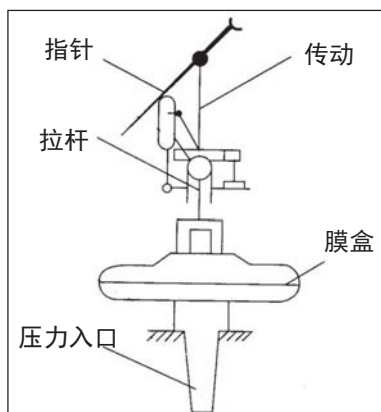
国际米原器：

- 1875年【米条约】
- 定义来源：赤道到北极距离的（1/1000万）为1米
- -》用光速定义-》超微细加工

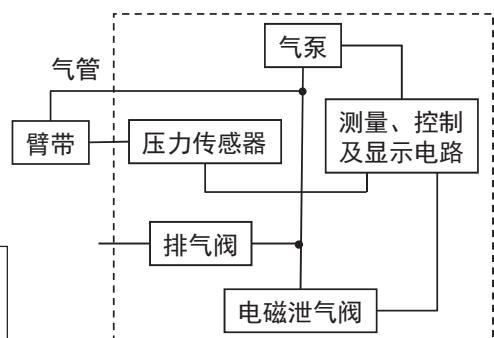
血压测量仪表的变化123



1. 水银压力计
(+听音)

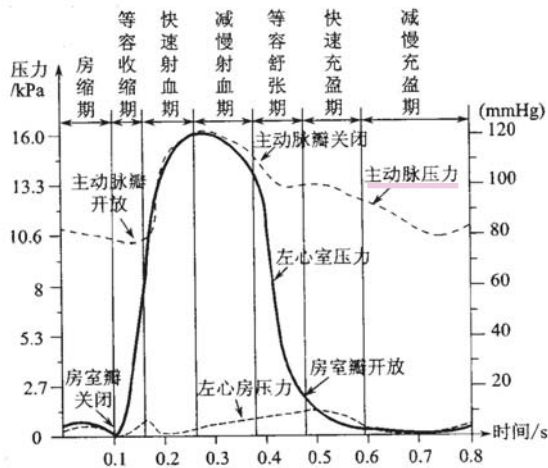


2. 压力表
(弹性敏感元件)

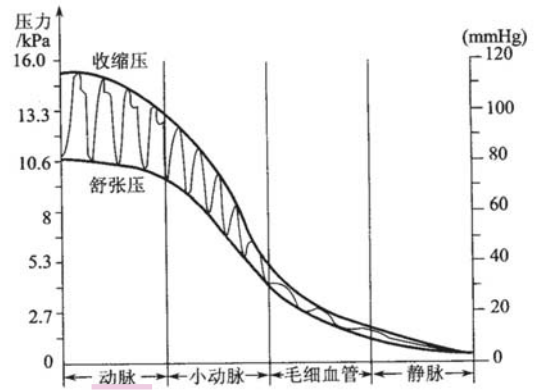


3. 电子血压计
(半导体压力传感器)

被测对象研究：心脏泵血



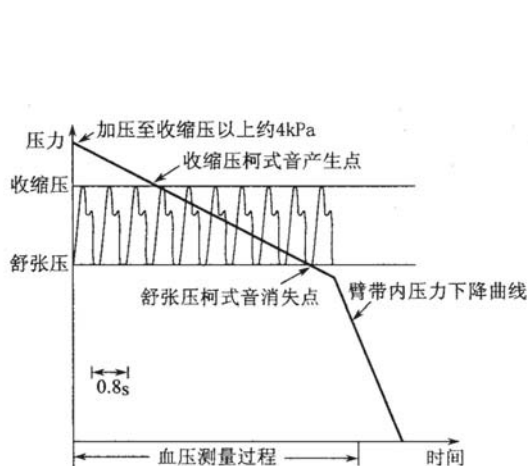
一个心动周期中的血压变化



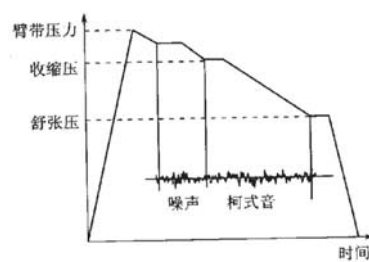
各类血管中的血压的变化

49

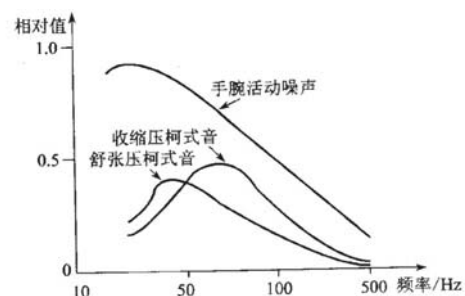
血压测量原理



- 臂带内压力和柯氏音产生的关系：
- 产生脉搏声音的血压=》收缩压
 - 脉搏声音变弱=》舒张压



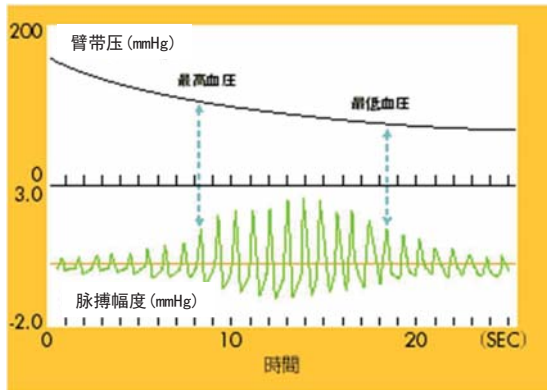
柯氏音出现次序 (1905年俄国医生)



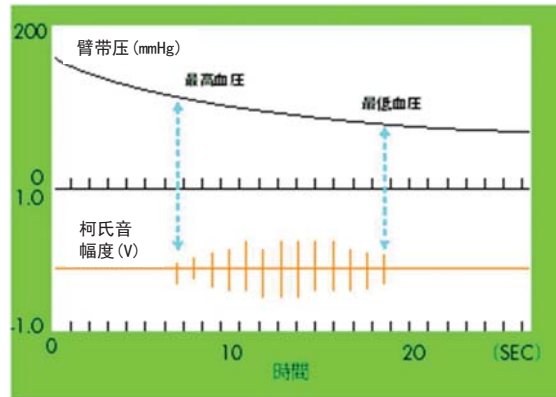
柯氏音与噪声频谱分布

50

电子血压计原理



压力传感器采集的脉压波形

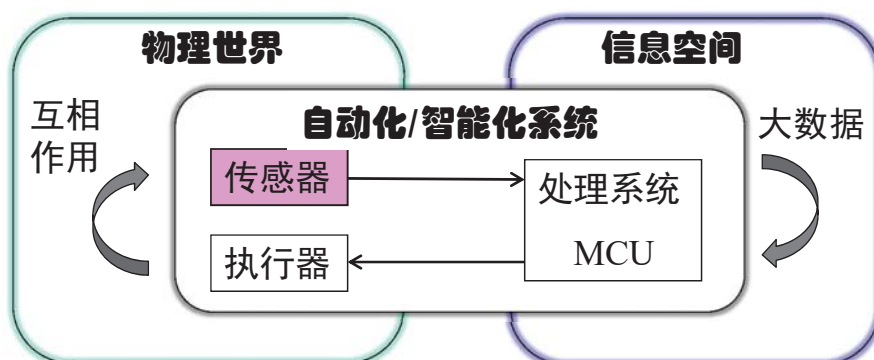


柯氏音的幅值

51

传感器与检测的重要性

- 信息获取的手段
- 大数据和网络信息化的源头
- 定量或定性分析的依据
- 控制质量/数量、保证安全、综合决策的前提条件
- 要求高灵敏度、高精度、低功耗、小型化、智能化
- 原理和结构的多样性，要求设计人员具备综合应用能力



52

传感原理的选择

- 手写输入的检测原理
 - 电磁感应，光电，超声波，
 - 电阻式、电容式触摸屏
- 指纹输入的检测原理
 - 棱镜光学，电容，扩散光学，
 - 电场，感热，感压

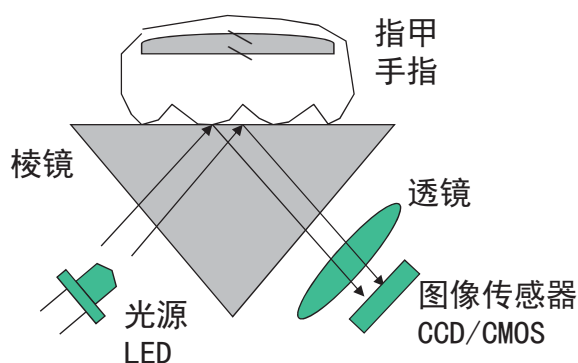
==》小型化、高精度、低功耗、耐干扰、低成本，才能有应用上的优势。==》 smart

53

指纹输入的传感原理

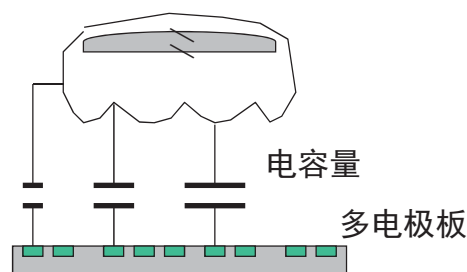
(1) 棱镜光学法

经过空气层反射和在隆线与镜面交界处的直接反射不同



(2) 电容法

到达电极板的距离不同
静电容量不同



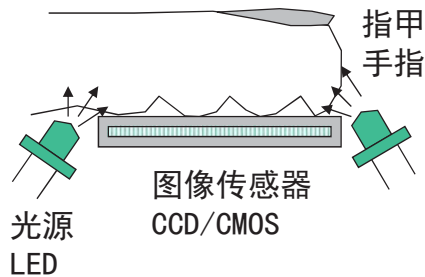
指纹锁: 560dpi
手机屏: 1920*1080 pixels
(441ppi)

54

指纹输入的传感原理

(3) 扩散光光学法

观测通过手指内的光线，谷线处由于光扩散而变暗



(4) 电场方法

到达真皮距离不同造成电场强度分布不同

(5) 感热方法

隆线皮肤体温与谷部空气温度的差

(6) 感压方法

凹凸压力分布

=》传感原理创新

55

检测结构的选择

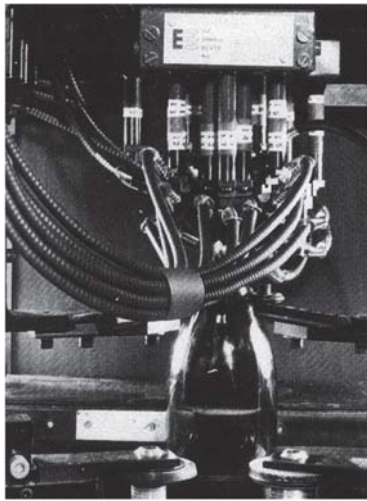
例：光电检测中的检测结构设计

- 瓶口缺陷检测
- 工具高度检测
- 焊锡异常检测

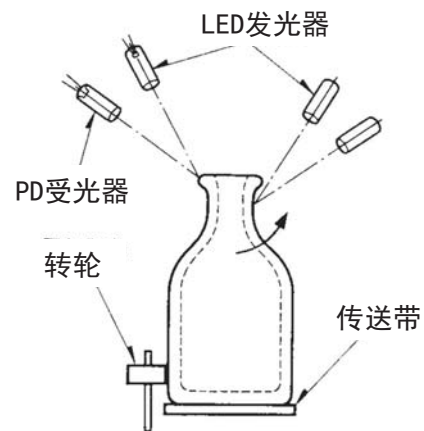
=》将复杂检测问题通过结构设计使后续处理更简单、快速。=》 smart

56

瓶口缺陷检测



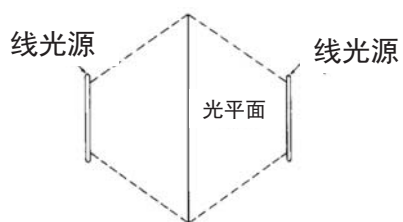
(a) 生产线上的检测



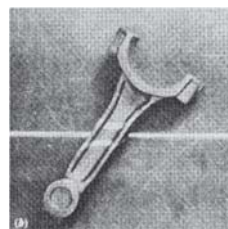
(b) 旋转瓶身，观测时序列信号

57

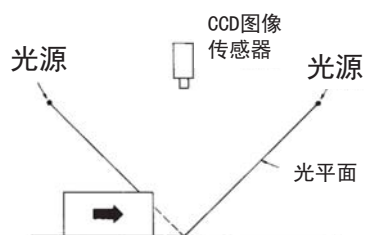
利用结构光检测物体高度



(a) 两平面光交叉(俯视图)

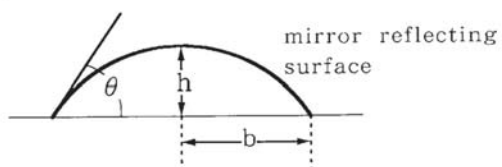


(c) 结构光检测的成像图



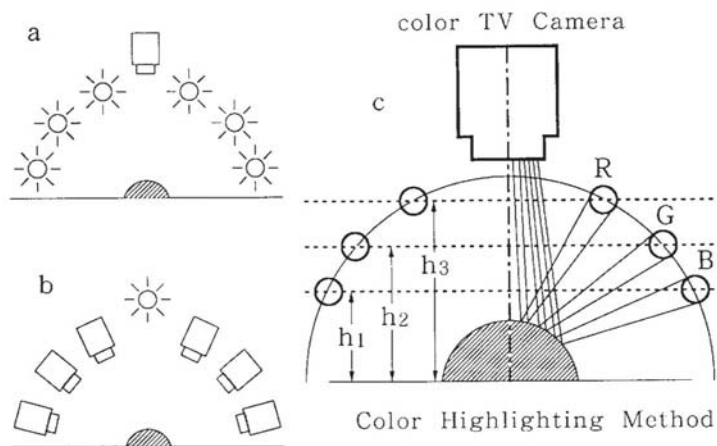
(b) 摄像头观测物体通过(侧面图)

58



焊锡表面形状

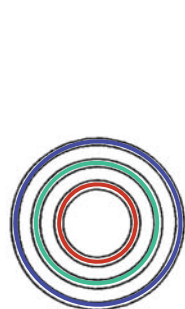
焊锡检测



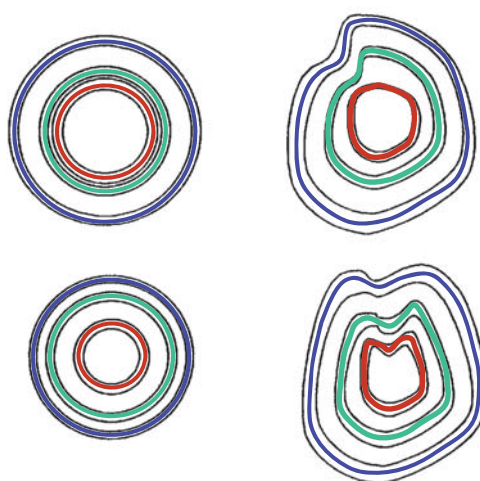
照明与成像的方法 (a), (b), (c)

59

焊锡形状检测结果



合格焊锡的传感成像



不合格焊锡的成像

60

传感数据的分析和处理

- 传感器总有输出结果。
 - 采集处理后，上位机也总有计算结果。
 - 结果意味什么？是否有意义？→首先怀疑结果！
 - 测量条件？→改变测量条件，反复测试！
 - 传感器性能？→达到了预期效果？
 - 理论模型修正？→输出结果的完整解释。
-
- 测量方法不同、输出结果不同。→互相标定
 - 真值可能测不出来，
 - 但对测量方法的分辨率、SN比、不确定度等要有所把握。

==》传感和检测的直接数据经处理后才能满足具体的需求。

61

思考题

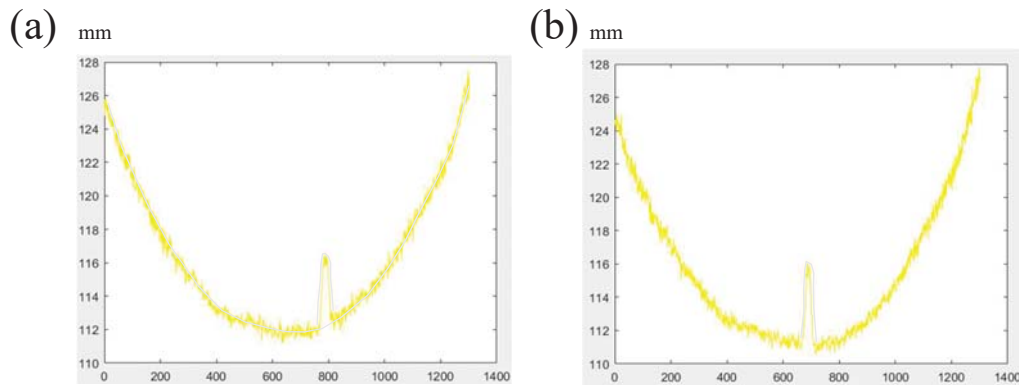
- 1-1 什么是仪表的灵敏度和分辨率？两者间存在什么关系？
- 1-2 如果AD转换的1个LSB比电路噪声还小，那么该数字仪表的分辨率还能否达到1LSB？
- 1-3 什么是本质安全防爆型仪表？
- 1-4 为什么仪表有时需要调节零点和调节量程？
- 1-5 Sensor, Transducer, Transmitter和Instrument的区别是什么？
- 1-6 仪表为什么要有行业标准、规范或检定规程？
- 1-7 一台精度为0.5级的温度显示仪表，下限刻度为负值，为全量程的25%，该仪表在全量程内的最大允许误差为1℃，求该仪表刻度的上下限及量程各为多少？
- 1-8 电子血压计和听音式水银柱血压计，哪种测量人体血压更准确？为什么？试分析腕式和臂式电子血压计可能有何不同。

62

思考题

1-9 激光测距仪（单线旋转式）对地面的扫面结果如图(a)，测距结果为一曲线。曲线中有突变的数据，经确认是地砖之间的沟缝造成的，图(b)为水平移动测距仪时的另一次测量结果。

(1) 写出曲线数学模型。(2) 如何估计仪器到地面的距离 y_0 ?



提示：

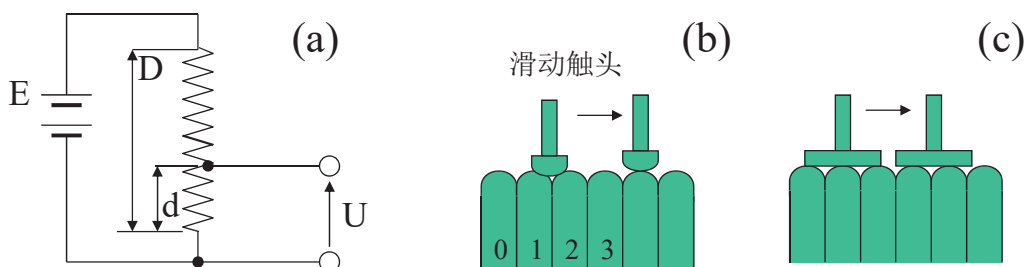
$$y = \frac{y_0}{\cos(i\Delta\theta + \theta_0)}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n, \Delta\theta = 0.05^\circ)$$

63

思考题

1-10 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):

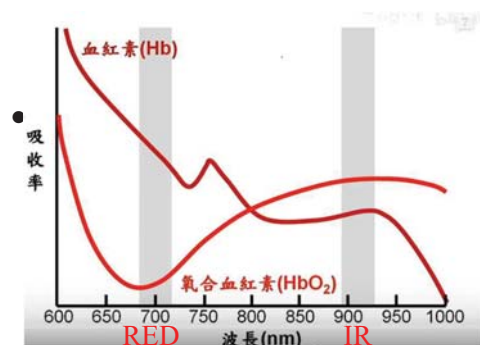
$$U = \frac{d}{D} E = \begin{cases} \frac{i}{N} E, & \text{滑动接触凸点 (i) 时} \\ \frac{i}{N-1} E, & \text{滑动接触凹点 (i+0.5) 时} \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

64

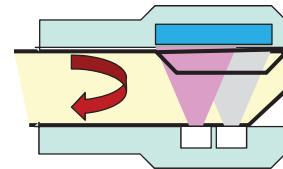
血氧仪的测量原理

- 血氧饱和度 $SpO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} = \frac{1}{1 + C_{Hb}/C_{HbO_2}}$

- 吸收光谱

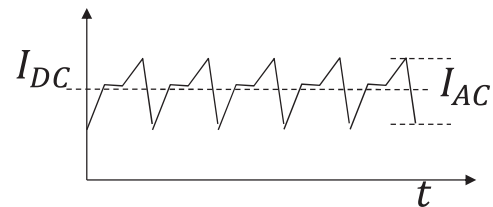


- 两个LED，光电二极管



透射式

- 传感器输出



- 求 $R = \frac{(I_{AC}/I_{DC})_{RED}}{(I_{AC}/I_{DC})_{IR}}$

- 查表 $R \rightarrow SpO_2$

=》反射式，图像传感器