

## 智能传感与检测技术（48学时）

第1-8周 （曹丽）	第9-16周 （彭黎辉）
概论、检测的基本概念 测量误差分析、测量不确定度 位移、距离测量 速度、加速度测量	温度测量 压力测量 流量测量 物位检测
实验课（8学时）：每人两个半天实验，写两个实验报告 第5-12周，分组和时间表待定	
教材（1）：张毅等， 《自动检测技术及仪表控制系统》，化工出版社，2012年（第三版） 教材（2）：王俊杰等， 《传感器与检测技术》，清华大学出版社，2011年 教材（3）：Jacob Fraden, Handbook of Modern Sensors, Springer, 2010 + 电子课件	

## 2021春季学期的融合式教学

- 荷塘雨课堂：语音直播，互动，课前预习
- 网络学堂：课件，课后作业，讨论
- 腾讯会议：现场（屏幕+语音）分享
- 微信群：通知和联络用
- 现场学生：只在雨课堂上参与互动，不点直播，不用会议  
避免网络流量拥堵和啸叫
- 远程学生：腾讯会议和雨课堂

## 实验课（8学时）安排

- 第5-12周，每周四周五下午或周末的半天，每班分两批。
- 实验课地点：中央主楼521室、704室等
- 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. 开关量传感器；AS-i总线(1)(2)；
  - D-0. 太赫兹光谱检测(1)(2)；
  - E-0. 磁场梯度探测；

## 智能传感与检测技术

- 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、陀螺仪、激光测距测速）
- 第7周：（4/5节假日？）
- 第8周：阵列和MEMS传感器（阵列传感器应用、MEMS工艺）

## 智能传感与检测技术

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

## 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+互动和出勤) 30%; 考试成绩 70%。
- 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](mailto:caoli@tsinghua.edu.cn)
- 答疑时间: 每周四下午 700A或701

## 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**

投票 最多可选1项

设置

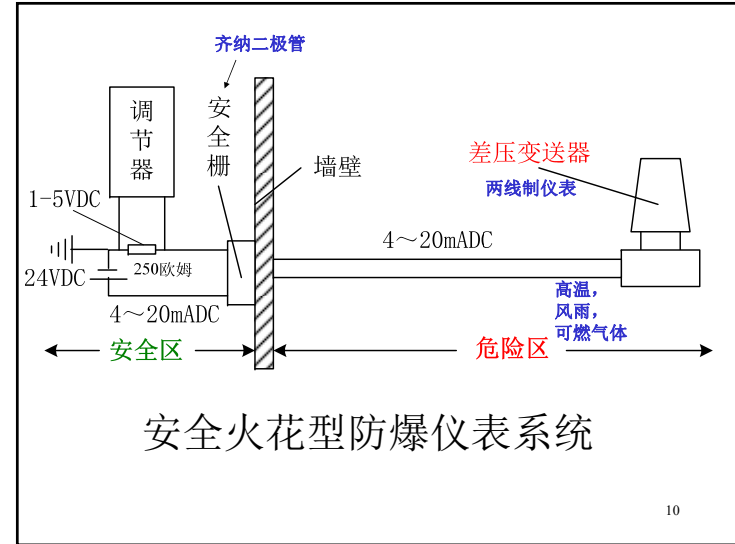
《智能传感与检测技术》, 将该课程名称翻译成英文, 你认为下面哪个翻译更容易接受?

- ☐ A **Intelligent Sensors and Measurements**
- ☐ B **Smart Sensor and Measurement Technology**

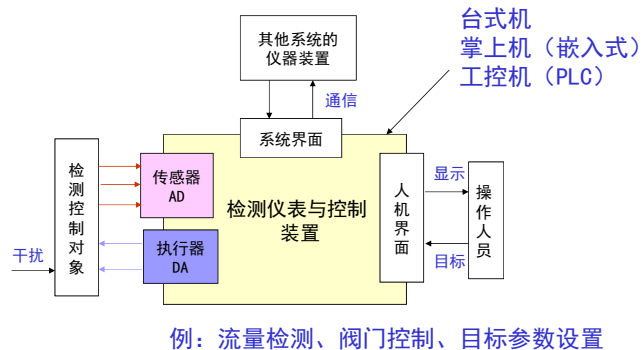
提交

## 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、加速度等。  
(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**响应形式**：如连续式和开关式等。
- 按输出**信号形式**：如模拟量和数字量等。
- 按输出**信号远传功能**：现场显示仪表和无线数据传输等
- 按**应用场所**：普通型、隔爆型(密封壳)及本质安全型(能量限制)

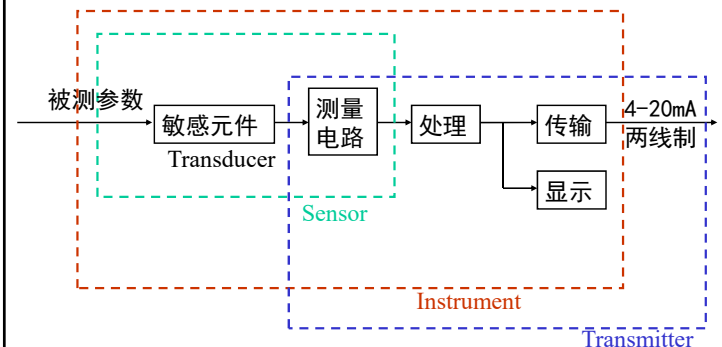


## 检测与控制系统的组成



⇒ 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。

## 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。

## 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)

多选题 1分

设置

此题未设置答案，请点击右侧设置按钮

传感器与检测技术在智能控制系统中的位置和作用是什么？

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

提交

投票 最多可选5项

设置

下列术语，你听过的有哪些？

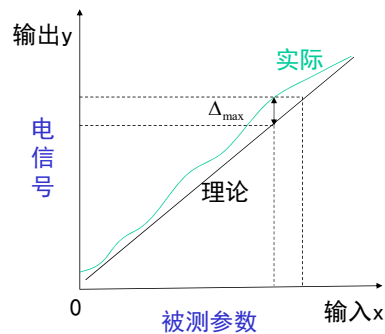
- ☐ A 灵敏度
- ☐ B 分辨率
- ☐ C 信噪比
- ☐ D 零点漂移
- ☐ E 滞环特性
- ☐ F 精度等级

提交

## 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

## 灵敏度和分辨率、非线性误差、线性度



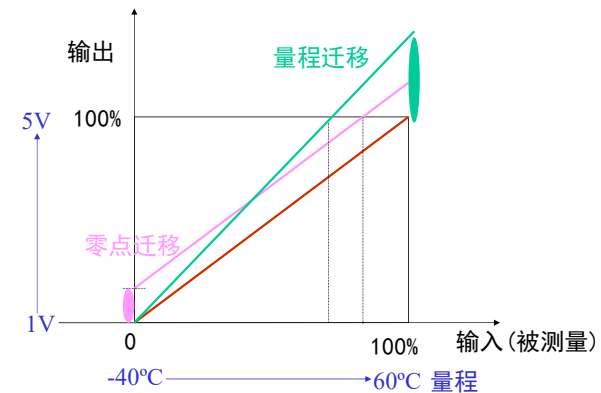
$$\text{灵敏度: } S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

线性仪表:  $S$ 一定

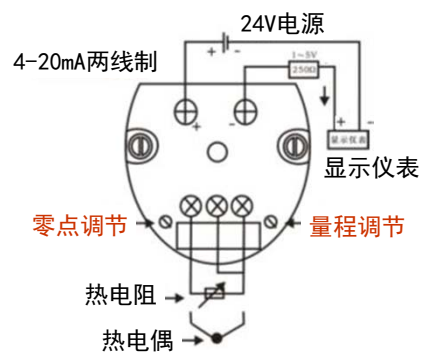
$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta_{\max}}{\text{量程}} \times 100\%$$

分辨率:  
输出能响应和分辨的最小输入量。  
例如: 糖水浓度分辨率;  
AD转换的1个LSB。

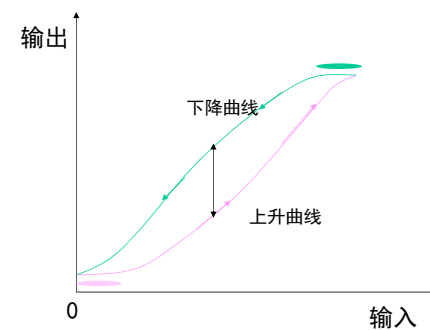
## 零点迁移和量程迁移



## 温度变送器模块: 接线和调节

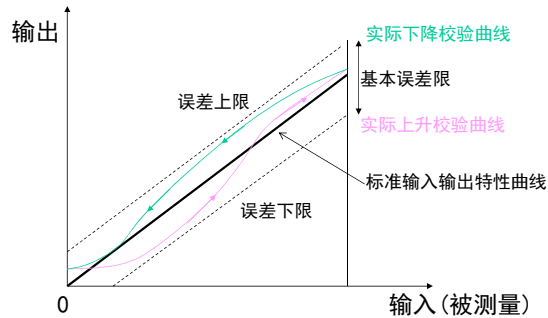


## 滞环、死区和回差



例: 磁路、弹簧等储能元件

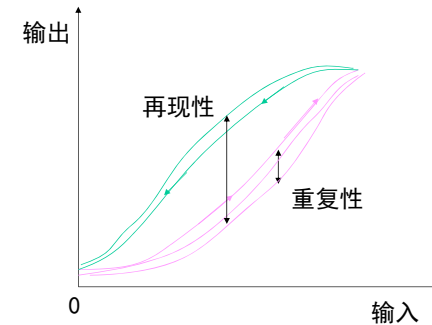
## 测量精度等级



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 $0.5\%$

## 重复性 和 再现性

(随机性) (稳定性)  
(不包括滞环和死区) (包括)



### 单选题 1分

设置

此题未设置答案, 请点击右侧设置按钮

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

## “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)

## 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 用气体超声流量计测量天然气流量
  - JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示
  - ...



## 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

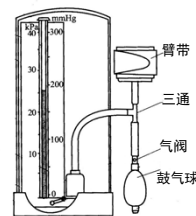
国际千克原器：

- 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

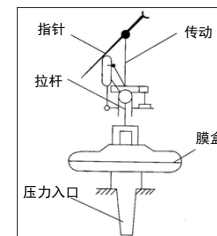
国际米原器：

- 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

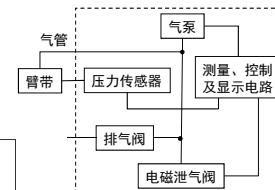
## 血压测量仪表的变化123



1. 水银压力计  
(+听音)

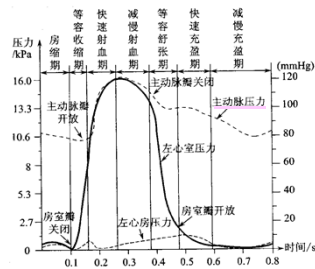


2. 压力表  
(弹性敏感元件)

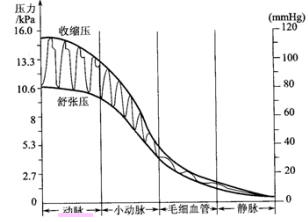


3. 电子血压计  
(半导体压力传感器)

## 被测对象研究：心脏泵血

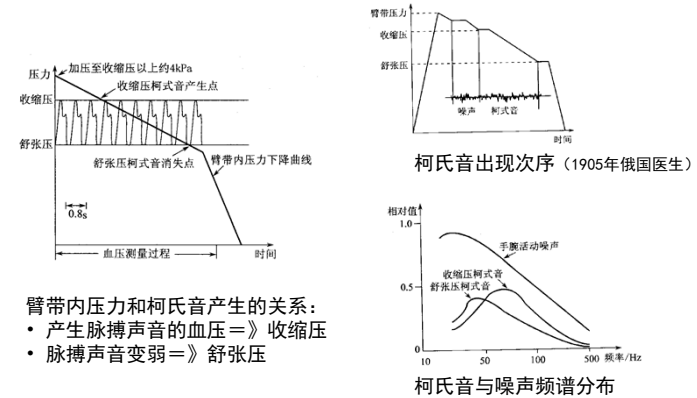


一个心动周期中的血压变化

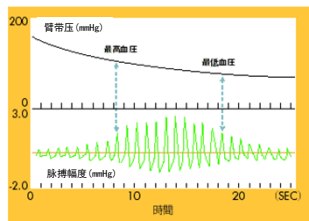


各类血管中的血压的变化

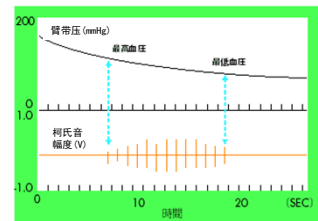
## 血压测量原理



## 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

## 主观题 10分

设置

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。

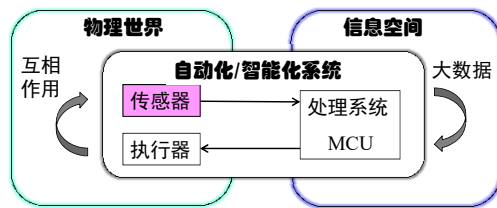
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



## 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



## 传感原理的选择

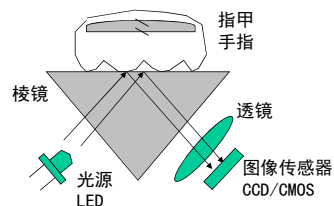
- PC机手写板输入原理
  - 电磁感应，光电，超声波，
  - 电阻式、电容式触摸屏
- 指纹输入的检测原理
  - 棱镜光学，电容，扩散光学，
  - 电场，感热，感压

==》小型化、高精度、低功耗、耐干扰、低成本，才能有应用上的优势。

## 指纹输入的传感原理

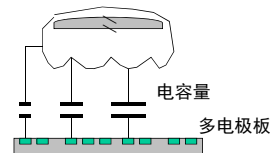
### (1) 棱镜光学法

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

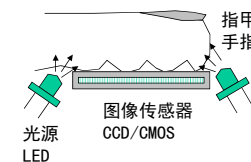


指纹锁: 560dpi  
手机屏: 1920\*1080 pixels  
(441ppi)

## 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

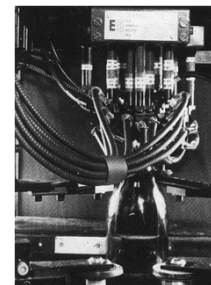
## 检测结构的选择

例：光电检测中的检测结构设计

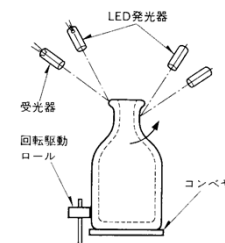
- 瓶口缺陷检测
- 工具高度检测
- 焊锡异常检测

==》将复杂检测问题通过结构设计使后续处理更简单、快速。

## 瓶口缺陷检测

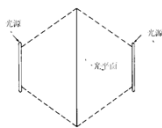


(a) 生产线上的检测

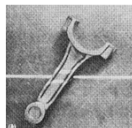


(b) 旋转瓶身，观测时序列信号

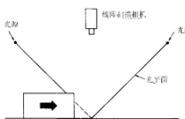
## 利用结构光检测物体高度



(a) 两平面交叉 (俯视图)

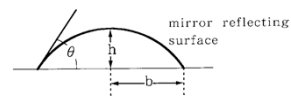


(c) 结构光检测的成像图

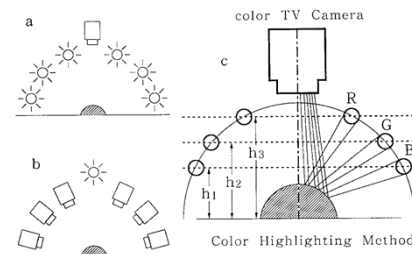


(b) 摄像头观测物体通过 (侧面图)

## 焊锡检测

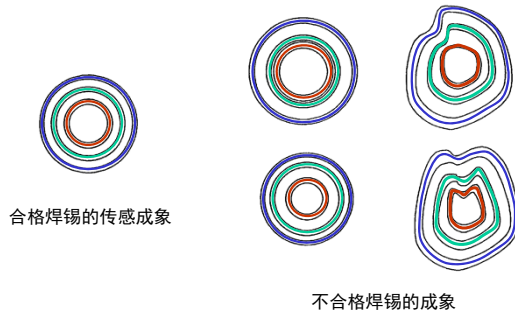


焊锡表面形状



照明与接收的方法 (a), (b), (c)

## 焊锡形状检测结果



## 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。

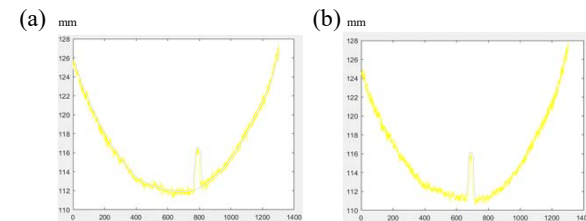
## 思考题

- 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。

## 思考题

- 1-9 激光旋转2D测距仪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  $y_0$ ？



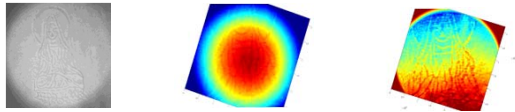
提示：

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

## 思考题

1-10 西汉日光镜（魔镜）反射太阳光的成像图片如图（a）。利用激光共焦点测距显微镜扫描得到的镜面二维凹凸数据如（b）。如何能够说明微小凹凸结构是投影成像的根源？

(a) 太阳光下成像图片 (b) 原始测量数据 (c) 剔除镜面弯曲的数据



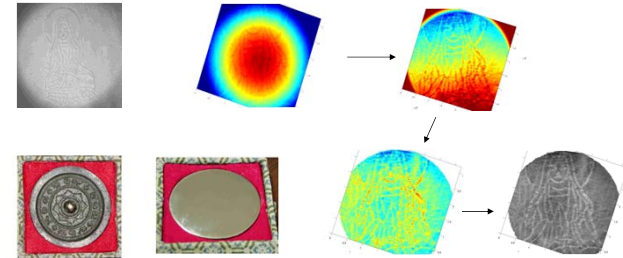
出处：曹丽，许聪，基于激光共焦位移计的日光镜表面扫描检测，第九届全国光学测试学术会议，2001年

## 思考题

1-10 西汉日光镜（魔镜）反射太阳光的成像图片如图（a）。利用激光共焦点测距显微镜扫描得到的镜面二维凹凸数据如（b）。如何能够说明微小凹凸结构是投影成像的根源？

答：经过剔除镜面弯曲和平台倾斜后，可以清晰看到镜面上有与成像密切相关的微米级的凹凸结构。

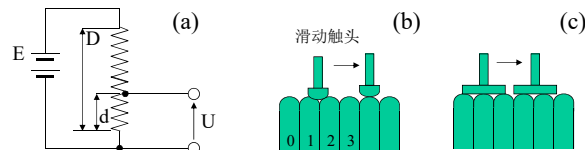
(a) 太阳光下成像图片 (b) 原始测量数据 (c) 剔除镜面弯曲的数据



## 思考题

1-11 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):

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