

过程测控仪表

华东理工大学

孙自强 钟伟民

2021.9

什么是过程控制系统？

测控仪表在过程控制系统中起什么作用？









过程控制系统：

以表征**生产过程**的参量为被控制量，使之接近给定值或保持在给定范围内的**自动控制系统**。

这里“**过程**”是指在生产装置或设备中进行的物质和能量相互作用和转换的过程。

表征过程的主要参量有**温度、压力、流量、物位、成分、浓度**等。通过对过程参量的控制，可使生产过程中产品的产量增加、质量提高和能耗减少。

一般的过程控制系统通常采用**反馈控制**的形式，这是过程控制的主要方式。

任何一个控制系统都必然要应用一定的测控技术和相应的仪表单元。

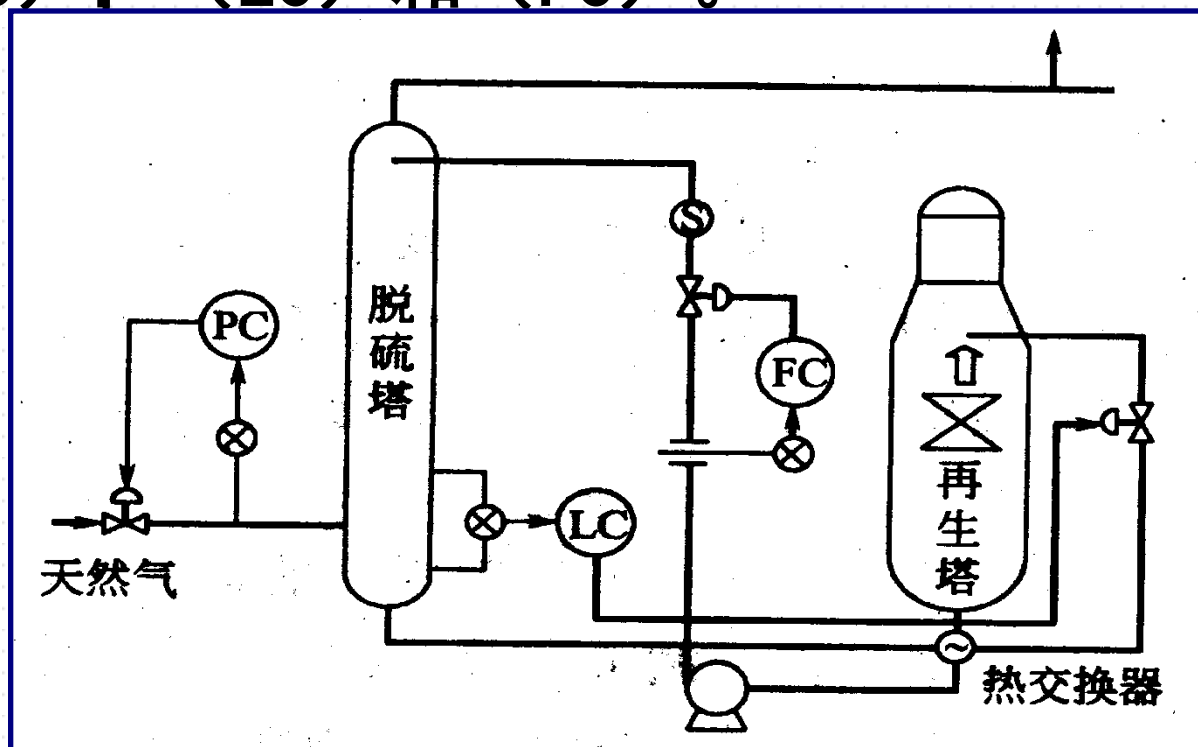
仪表

检测仪表——使用不同的**检测技术**，完成对各种过程参数的**测量**，并实现必要的**数据处理**。

控制仪表——将检测到的数据进行运算处理，并通过相应的单元实现对被控变量的**控制（调节）**。

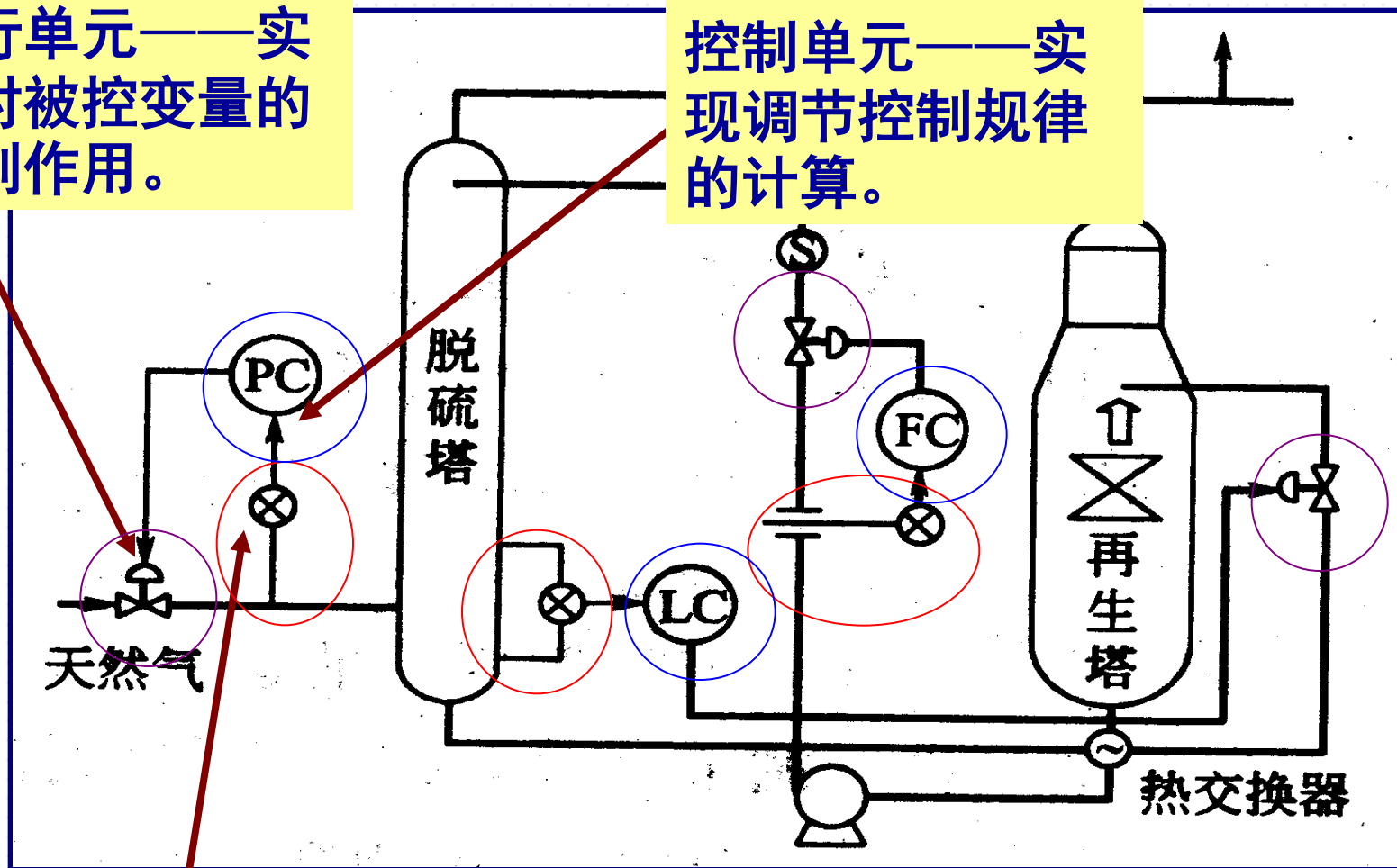
典型控制系统

天然气在经过脱硫塔时，需要进行控制的参数为：**进料的压力**（P）、**塔釜液位**（L）和**出料流量**（F），从而构成三个单参数的控制系统：（PC），（LC）和（FC）。



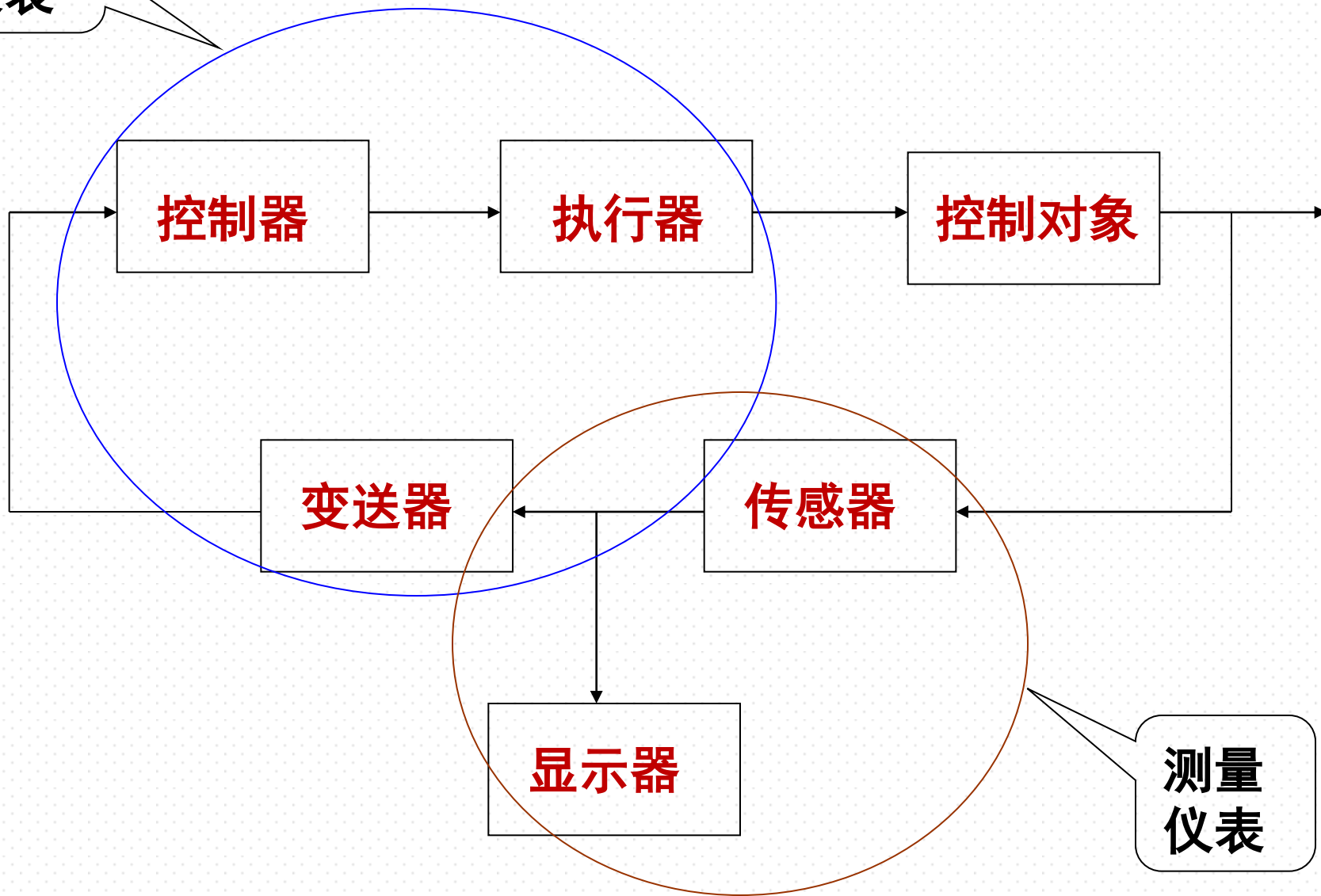
执行单元——实现对被控变量的控制作用。

控制单元——实现调节控制规律的计算。



测量变送单元——参数测量及测量信号的转换和传输。

控制
仪表



现代家庭中 有哪些测控技术？

为什么学习本课程：

*** 本课程是为自动化专业的学生开设的专业必修课；**

掌握测量和控制技术的基本概念、原理和应用方法；

初步具备设计和开发自动测控系统的能力。

为什么学习本课程：

*** 学习的目的在于：**

掌握生产过程中压力、温度、流量、物位等参数的检测方法；熟悉测量这些参数的典型仪表的构成原理、结构特点，并学会其正确的使用方法。

掌握控制器、变送器、显示器和执行器等典型控制仪表的结构原理、使用方法；并学会其正确的使用方法。

*** 通过本课程的学习，做到：**

- 1. 掌握提高测量精度的各种措施；**
- 2. 能对测量结果进行误差分析；**
- 3. 具有正确使用仪表和构成控制系统的能力。**

授课内容

48学时

教材：

孙自强. 过程测控技术及仪表装置. 化学工业出版社, 2017

参考教材：

陈忧先. 化工测量及仪表（第三版）. 化学工业出版社, 2013

吴勤勤. 控制仪表及装置（第四版）. 化学工业出版社, 2014

张毅、张宝芬等. 自动检测技术及仪表控制系统（第二版）. 化学工业出版社, 2013

课程授课和学习方式

✓ 课堂授课

✓ 讲座：国内外学者、工程师

✓ 课外自学，读书报告，课堂交流

课程考核

考核方式：

闭卷笔试

成绩评定方法：

$$\text{总成绩} = \text{平时成绩} * 30\% + \text{试卷成绩} * 70\%$$

平时成绩评定包括考勤、作业、课堂表现等

第一章 绪论

1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用和发展状况

自动控制系统的首要基础是检测获取信息

一. 测量的含义和地位

测量的含义：测量是**按照某种规律**，用数据来描述观察到的现象，即**对事物作出量化描述**。

测量是对非量化事物的量化过程，是人类对事物获得定量概念以及事物内在规律的过程。

测量与**检测**基本上是同义语。

测量的地位：

一切科学都建立在精确的数据上，而精确数据的获得依靠的就是测量。因此，**没有测量就没有科学。**

钱学森先生曾指出：“**信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术。测量技术是关键和基础。**”

测量水平的高低直接反映一个国家科学水平的高低。

二. 测量技术的不断发展

各种科学技术的发展都离不开测量技术，同时也进一步促进了各种测量工具和测量理论的发展。

检测技术的新发展主要表现在：大大提高了**被测参数的精度**；极大地扩展了**测量的对象和领域**。

趋势：现代仪器仪表产品向着计算机化、网络化、智能化、多功能化的方向迅速发展，而且将能更高速、更灵敏、更可靠、更简捷地获取对象全方位的信息。

三. 过程检测仪表在工业生产中的作用

- * 准确而及时地检测出生产过程中的各有关参数

- * 利用过程检测仪表提供的信息：

可以组成自动保护、自动报警和自动诊断系统，以**保证生产的安全进行**；

可以组成自动控制系统，对生产过程实现实时的自动控制，既**提高劳动生产率**又能**提高产品质量（质量一致性很重要）**；

可以实现**自动计量和自动管理**。

在石油、化工、生物医药等工业生产中，
检测仪表主要检测以下参数：

* 压力

* 物位

* 流量

* 温度

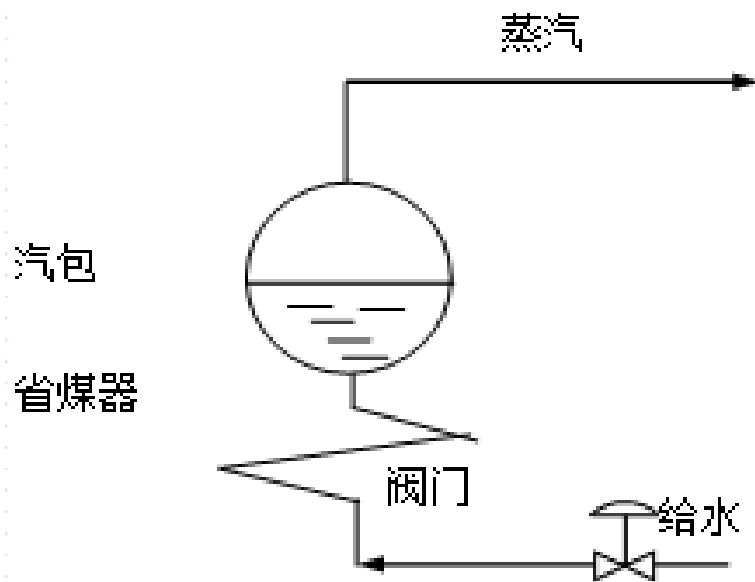
* 成分

1.1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用

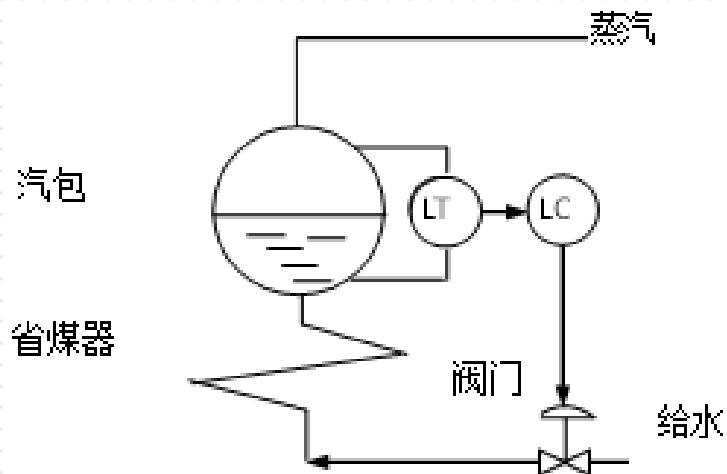
以锅炉汽包液位控制系统为例

手工控制时主要有**三步**：

1. 观察被控变量的数值，在此即为汽包的液位；
2. 把观察到的被控变量值与设定值（指工艺所要求的汽包液位高度）加以比较，根据二者的偏差大小或随时间变化的情况，作出判断，并发布命令；
3. 根据命令操作给水阀，改变进水量，使液位回到设定值。



测控系统：采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制

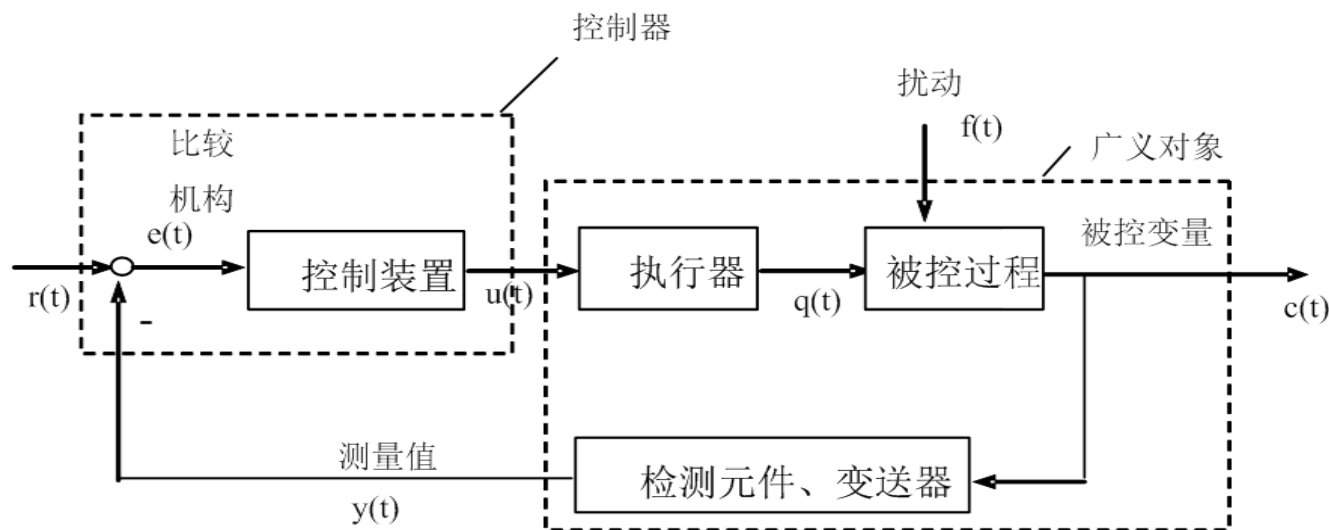


当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过**检测仪表**（液位变送器）得到其检测值。

在自动**控制装置**（液位控制器）中，将检测值与设定值比较，得到**偏差**，经过运算后，发出控制信号，这一信号作用于**执行器**（在此为控制阀），改变给水量，以克服扰动的影响，使被控变量回到设定值。

检测仪表、控制装置、执行机构和被控对象一起组成了一个**自动控制系统**。

自动控制系统结构方框图



检测元件和变送器单元功能是感受并测出被控变量的大小，变换成控制器所需要的信号形式。一般检测单元为敏感元件、转换元件及信号处理电路组成的传感器，若检测单元输出的是标准信号，则称检测单元为变送器。

控制器包括比较机构和控制装置，将检测单元的输出信号与被控变量的设定值进行比较得出偏差信号，根据这个偏差信号的正负、大小变化情况，按一定的运算规律计算出控制信号传送给执行机构。

执行器的作用是接受控制器发出的控制信号，相应地去改变控制变量。

除此以外，自动控制系统还可根据需要设置转换器、运算器、操作器、显示装置和各类自动化仪表和装置系统，以完成复杂的测控任务。

1.1.2 过程测控仪表发展状况

检测仪表发展状况

1. 模拟式

检测元件和变送器将被控变量（物理量、化学量）变换为另一个物理量（电压、电流等），用标尺、指针、曲线等方式显示

2. 数字式

具有模/数转换器，数字显示，无读数误差；机械运动机构非必需，检测显示速度、准确性和重复性高

3. 智能化

配置调节和控制电路，集成显示和调节功能；配置微处理器，自诊断、自校正、非线性补偿

发展趋势：智能化、虚拟化、网络化、微型化、多功能一体化

1.1.2 过程测控仪表发展状况

控制仪表发展状况

按能源形式分类：电动，气动

按信号类型分类：模拟式、数字式

按结构类型分类：基地式、单元组合式、计算机控制系统（含DCS等）

- 单元组合仪表之间用标准统一信号联系
 - 气动仪表(QDZ系列) 为20—100kPa气压信号
 - 电动仪表信号为4~20mA直流电流信号(DDZ—III系列)

1.2 测控仪表主要相关基础知识

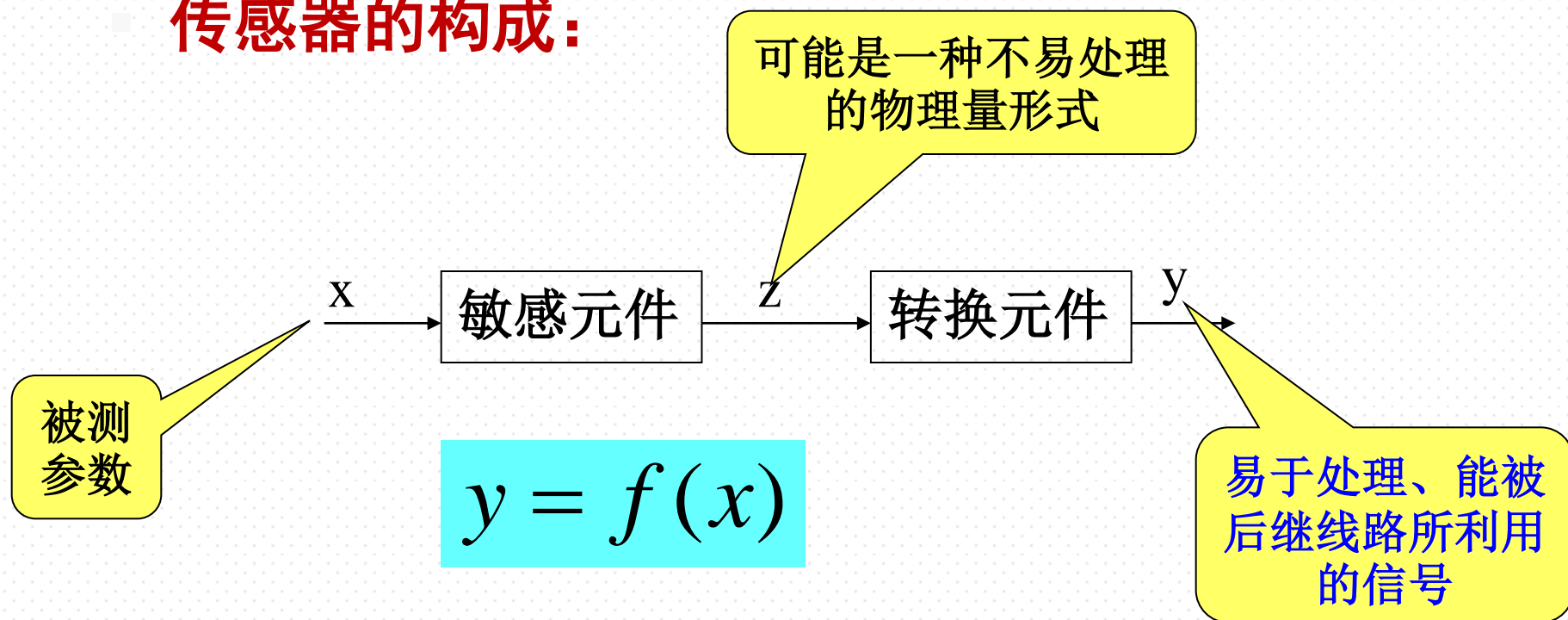
——检测技术基础

1.2.1 检测的基本概念

一. 传感器与测量系统的组成

传感器的定义：能感受规定的被测量并按照一定的规律**转化成**可用输出信号的器件或装置。

传感器的构成：



非电量电测：以一定的精度把被测量转换成与之有确定关系的、易于处理的**电量信号**输出。

电量信号的优点：精度高、动态响应快、易于运算放大、易于远距离传送、易于和计算机接口。

变送器：

将易于处理、能被后继线路所利用的信号进行进一步的处理，转换成标准统一信号

**（国际标准为4 ~ 20mA或1 ~ 5V直流信号），
此时的传感器一般称为变送器。**

自动测量系统（检测仪表）的组成：

被测量



获取信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度。

把传感器输出的信号放大、处理或转换，使之能在显示装置上指示或记录下出来。

模拟显示、数字显示、图像显示。

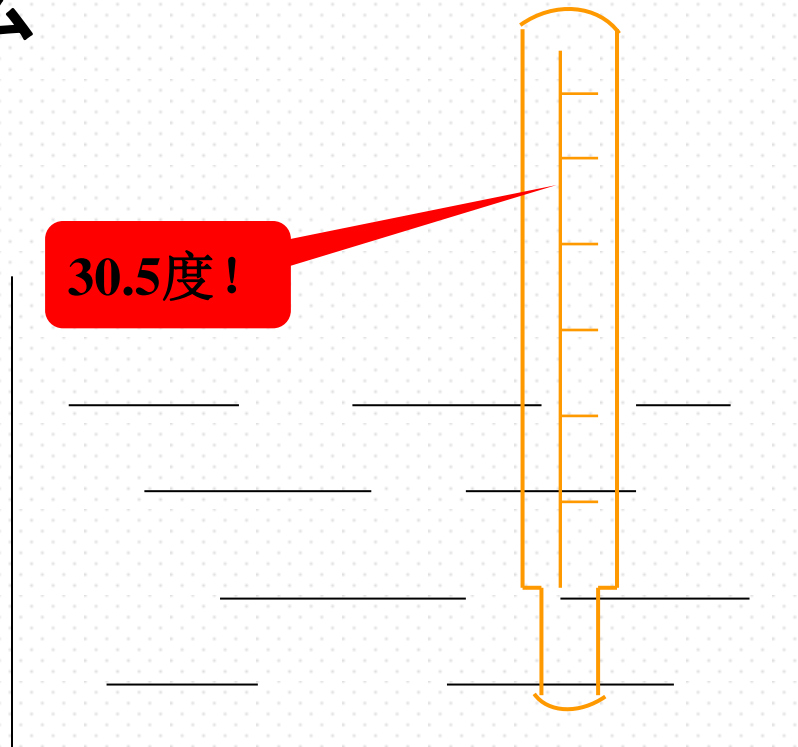
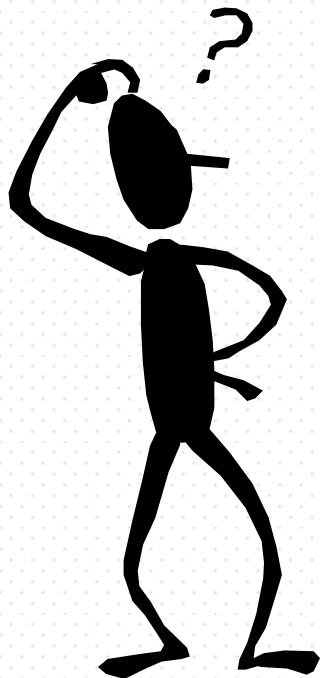
自动记录仪记录被测参数的变化过程。

■ **一次仪表：传感器**（传感器和变送器一体化的仪表）

■ **二次仪表：检测系统或检测仪表**

二. 测量及测量方法

什么是测量？



水温的变化转变成温度计内水银体积的变化，然后与温度计刻度标尺上的测量单位相比较。

测量的含义：

一般所说的测量，是用实验方法去确定一个参数的量值（数值和单位），即通过实验，把一个被测参数的量值（被测量）和作为比较单位的另一个量值（标准）进行比较，确定出被测对象的大小和单位。

测量方法

直接测量——把被测量与作为测量标准的量直接进行比较。

间接测量——通过对与被测量有一定函数关系的其他量的测量来确定。

组合测量——无法通过直接或间接测量获得量值，需要通过直接测量的测得值或间接测量的测得值**建立联立方程**，加以求解后得到被测量的量值

工厂和实验室通过各种测量仪表来实现直接测量，所采用的基本测量方法为：

1. 偏差法：用仪表指针的位移（即偏差）来表示被测量的大小。

2. 零位法：测量中，让被测量与已知标准量进行比较，调整标准量，使两者相等。

3. 微差法：让被测量的标准量与已知的标准量进行比较，得到差值，再用偏差式测量方法测出此差值。

三. 测量系统或仪表的基本技术性能和术语

1. 测量范围和量程

测量范围：测量仪表的误差处在规定极限内的一组被测点的值，即最小被测量（下限）到最大的被测量（上限）；

量程：测量范围的上限值和下限值的代数差。

例如：某温度变送器的测量范围为 $0 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，则量程为 1000°C ；如果将测量范围改变成 $400 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，则量程为 600°C 。

一般用高精度级别的仪表示值来代替。

2. 测量仪表的误差

- (1) **示值误差**：测量仪表的示值与对应输入量的**真值**之差；
- (2) **（最大）允许误差**：对给定的测量仪表，在出厂时被规定的误差极限值；
- (3) **基本（固有）误差**：在**标准条件下**确定的测量仪表的误差；
- (4) **附加误差**：在**非标准条件**时所增加的误差。

3. 仪表的精度及精度等级

精密度，准确度，精确度

精（确）度：测量结果与被测量真值的一致程度。

精度等级：符合一定的计量要求，使**误差保持在规定的极限以内**的测量仪表的级别。

工业仪表用**引用误差**或**相对误差**的形式给出测量器具的**允许误差**，即：

$$J = \frac{\text{最大示值误差}}{\text{仪表的量程}} \times 100\%$$

将所得的**引用误差**去掉百分符号（%）即为**精度的级别**。

注意：

精度等级有一个数值序列，工业上使用的仪表的等级一般为：0.5、1.0、1.5、2.5、4.0等，用一定的符号形式标志在仪表的面板上。

若精度等级为1.5级，意味着该仪表允许的引用误差不超过1.5%。

4. 滞环、死区和回差

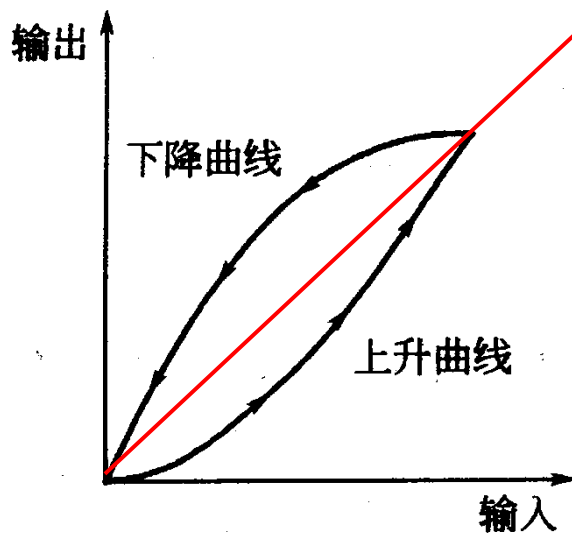
弹性形变、
磁滞现象等

传动机构的摩
擦和间隙等

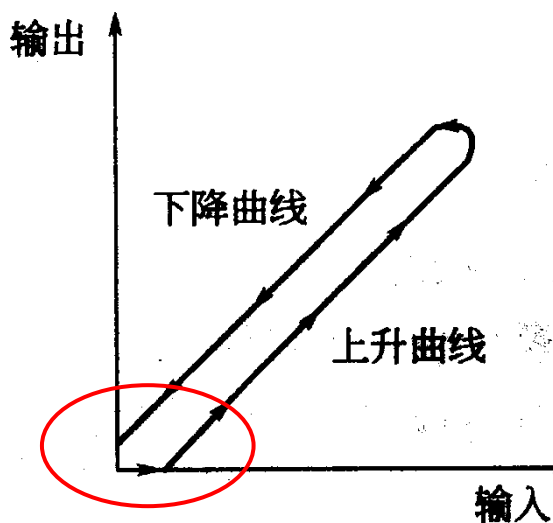
滞环：由于仪表内部的某些元件具有储能效应。

死区：由于仪表内部的某些元件具有死区效应。

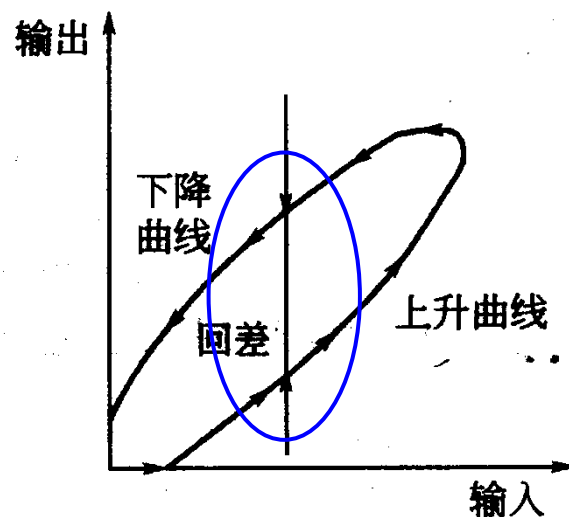
回差：实际上升曲线(正行程)和实际下降曲线(反行程)之间的最大差值与量程比的百分数。



滞环效应



死区效应



综合效应

5. 灵敏度

仪表的**灵敏度**表示在稳态下，测量仪表对被测参数变化的反应能力。

定义：测量仪表响应的变化除以对应的激励变化，即

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

灵敏度过高时，仪表的精度要下降。**通常，仪表标尺上的分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。**

6. 显示装置的分辨力（灵敏限、灵敏阈）

定义：显示装置能有效辨别的最小的视值差（即能引起仪表指针发生动作的被测参数的最小变化量）。

一般模拟式仪表的**分辨力**规定为最小刻度分格值的一半（即不大于仪表允许误差绝对值的一半）。

对于数字式仪表，其输出显示的最后一位所代表的输入量即为该仪表的分辨率。

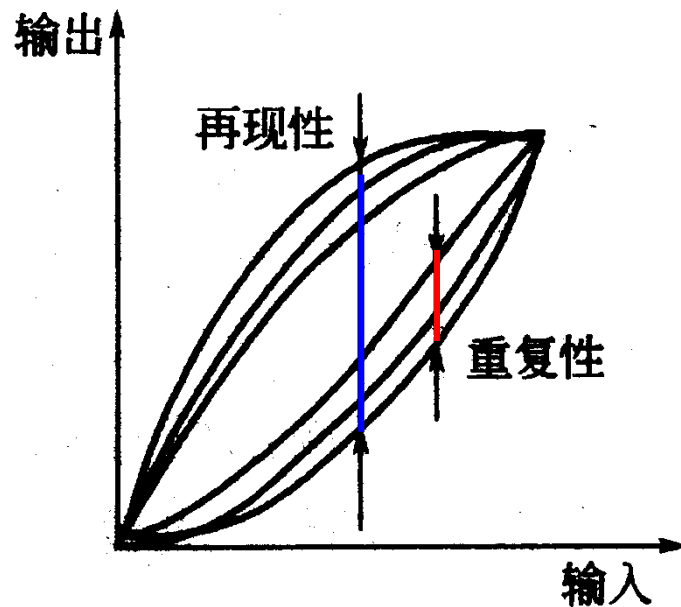
7. 重复性和再现性

重复性：

在同一工作条件下，**同方向**连续多次对同一输入值进行测量所得的多个输出值之间互相一致的程度称为仪表的重复性。

再现性：

再现性包括滞环和死区，取仪表实际上升曲线和下降曲线之间离散程度最大点的值来表示。

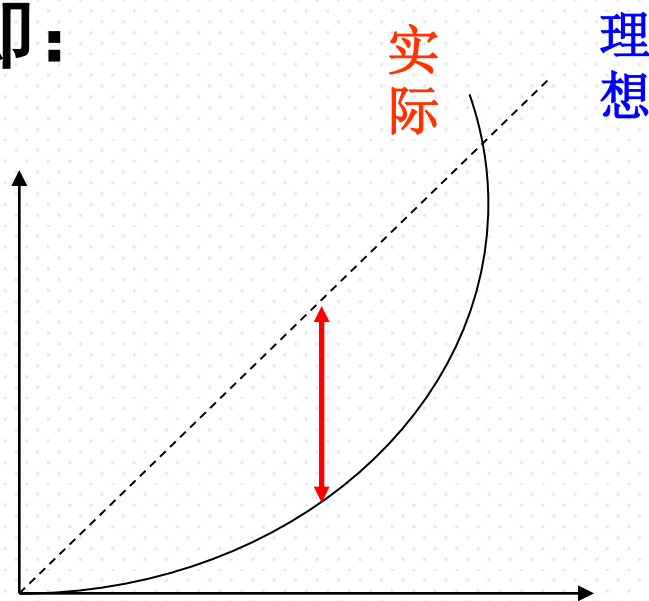


8. 线性度（非线性误差）

对于理论上具有线性刻度特性的测量仪表，由于种种因素的影响，实际上并不是线性的。

所谓非线性误差是**衡量曲线偏离线性程度**的指标，用实际值与真值之间的绝对误差的最大值和量程之比的百分数来表示，即：

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



9. 动态误差

被测参数的信号在转换和传输的过程中，会遇到各种运动惯性和时间上的滞后，使得参数的测量需要一个时间过程，从而造成在动态下仪表示值与被测参数实际值之间的差异，即**动态误差**。

习惯上用**时间常数**和**滞后时间**来衡量动态误差。

时间常数的大小由传感器或显示仪表所具有的惯性所决定，时间常数越大，动态误差就越大。

滞后时间主要存在于成分分析系统中，其造成的动态误差更大。

四. 化工测量仪表的应用特点

在化工生产过程中，使用测量仪表不仅要满足常温、常压及一般性介质的测量，而且要求某些仪表能耐高温、耐低温、耐高压、防腐、防爆、防堵塞，或具有较好的动态性能。

1.2.2 测量误差概述

对工程上所使用的检测仪表的**首要要求**：

希望测量的结果准确可靠，即希望能正确地反映客观实际。

测量结果不可能绝对准确的原因：

检测仪表本身不可能做到绝对准确；

操作人员的技术熟练程度不同；

受环境条件变化的影响。

一. 测量误差

测量值和“真值”之间始终存在着的
一定差值，就是测量误差，即：

$$\Delta y = y - y_0$$

其中： Δy ——测量误差

y_0 ——真值

y ——测量值

式中的测量误差有正、负号，并有量纲。

测量误差越小，表明测量的精度越高。

真值、测量值与误差的关系

$$\Delta y = y - y_0$$

Δy —— 误差
 y —— 测量值
 y_0 —— 真值

测量值的算术平均值

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

真值

$$y_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{y}$$

测量平均值与真值之间的偏差

$$\delta = \bar{y} - y_0$$

注意到:

- * 通常一个参数的“**真值**”是不知道的，需要去测定它。
- * 由于测量方法、测量仪器、以及人的观察能力等都不能做到完美无缺，故**真值**是无法得到的。
- * 在测量技术中，通常用若干次测量值的算术平均值来近似真值，测量次数越多，越接近真值。
- * 在实际中，也常用适当精度的仪表（如使用国家标准计量机构标定过的标准仪表）的示值来代替真值，称为约定真值。

测量误差的几种表示方法：

绝对误差： 绝对误差 = 示值 - 约定真值

相对误差：
$$\text{相对误差 (\%)} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{约定真值}} \times 100\%$$

引用误差：
$$\text{引用误差 (\%)} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{量程}} \times 100\%$$

最大引用误差：
$$\text{最大引用误差 (\%)} = \frac{\text{最大绝对误差}}{\text{量程}} \times 100\%$$

真值（℃）	0	50	100	150	200	250	300
示值（℃）	0	51	102	149	198	253	300
绝对误差（℃）	0	1	2	-1	-2	3	0
相对误差（%）	0	2	2	-0.7	-1	1.2	0
引用误差（%）	0	0.3	0.7	-0.3	-0.7	1	0
量程=300-0=300 ℃							
最大引用误差（%）：1%							

例题1:

某台1.5级的测温仪表的标尺范围为 $0 \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，
校验时其最大绝对误差为 $\Delta t_{\max} = 6^{\circ}\text{C}$ ，问：是否符合1.5级的精度要求？

解1：该仪表的最大引用（允许）误差为：

$$J = \frac{6}{500 - 0} \times 100\% = 1.2\%$$

因为 $J < 1.5\%$ ，所以该测温仪表是符合1.5级精度要求的。

例题1:

某台1.5级的测温仪表的标尺范围为 $0 \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，
校验时其最大绝对误差为 $\Delta t_{\max} = 6^{\circ}\text{C}$ ，问：是否符合1.5级的精度要求？

解2：该仪表允许的最大绝对误差为：

$$\Delta t_{\text{允许}} = 500 \times 1.5\% = 7.5^{\circ}\text{C}$$

因为 $\Delta t_{\text{允许}} > 6^{\circ}\text{C}$ ，所以该测温仪表是符合1.5级精度要求的。

例题2:

有一测量任务要求测量50MPa的压力，现已有三个压力表：

(1) 0~60MPa, 1.5级； (2) 0~100MPa, 1.0级； (3) 30~60MPa, 2.5级。试问选用哪一个表能得到较好的测量结果？

解：3个仪表都满足被测参数尽量接近满度值一半以上的要求。

各仪表的最大绝对误差为：

$$\Delta y_1 = 60 \times 1.5\% = 0.9\text{MPa}$$

$$\Delta y_2 = 100 \times 1.0\% = 1.0\text{MPa}$$

$$\Delta y_3 = 30 \times 2.5\% = 0.75\text{MPa}$$

因为 Δy_3 最小，所以应该选择仪表 (3)。

二. 测量误差的分类

- 根据误差的特性，可以分成以下三类：
 - 随机误差（又称偶然误差）
 - 系统误差
 - 粗大误差（又称疏忽误差）

随机误差

$$y - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

随机误差是指测量结果与在重复条件下，对同一被测量进行**无限多次**测量所得测量结果的平均值之差。

随机误差是由于复杂的客观事物内部中我们尚未认识因而无法控制的因素所造成的误差。

随机误差出现的大小和方向似乎是没有规律的，但具有随机变量的一切特点。通过多次测量，可以发现随机误差的分布**属于正态分布**。

系统误差

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - y_0$$

系统误差是指在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得测量结果的平均值与被测量真值之差。

系统误差表明一个测量结果偏离实际值的程度。其值越小，测量就越准确。

特征：在一定的条件下，误差是固定的或按一定的规律变化（如线性变化、周期性变化等）。故虽无法通过增加测量次数来减少其对测量结果的影响，但可以对其进行修正，在有限程度内加以补偿。

粗大误差

粗大误差是由于测量方法不当，或操作人员在读取或记录测量数据时粗心所造成的误差。

粗大误差的数值很难估计，但在一定的测量条件下，其绝对值特别大，显著偏离实际值，必须加以剔除。

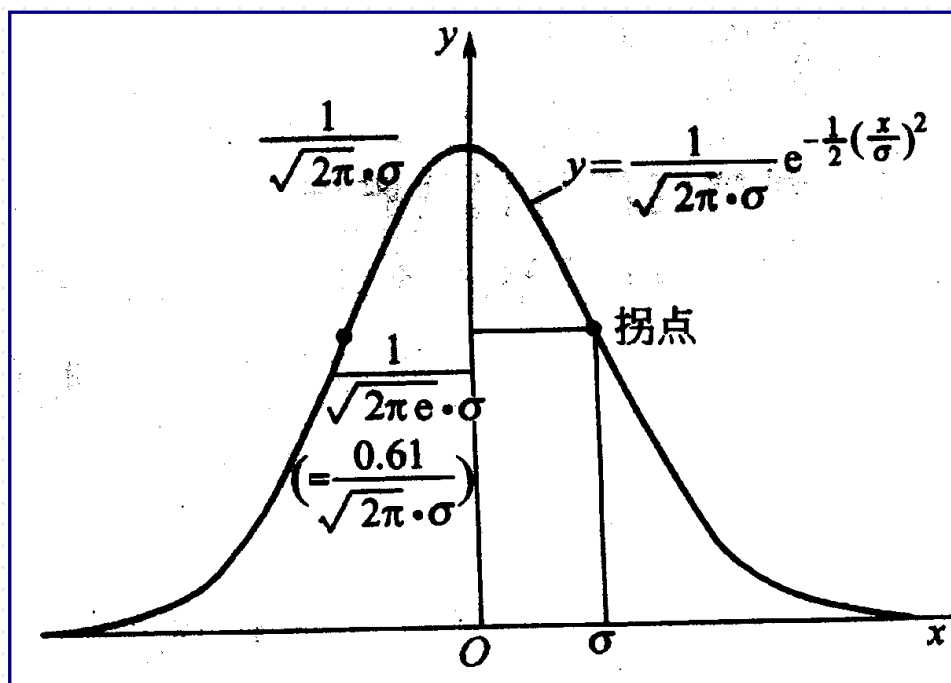
三. 随机误差的统计处理

误差

从统计的角度来看，**随机误差的概率密度服从正态分布。**

正态分布函数：

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



- ①对于所有的 x ，都有 $f(x)>0$ ；
- ② $f(x)$ 为偶函数，正负对称分布；
- ③ $x=0$ 时， $f(x)$ 取最大值；
- ④随 x 的值增大， $f(x)$ 单调减小；
- ⑤ $f(x)$ 曲线在 x 较小时呈上凸，在 x 较大时呈下凸。

标准偏差——表示**测量值偏离真值**的重要参数

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2}$$

标准偏差的估算（贝塞尔公式）：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

误差x发生的**概率密度**为：

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

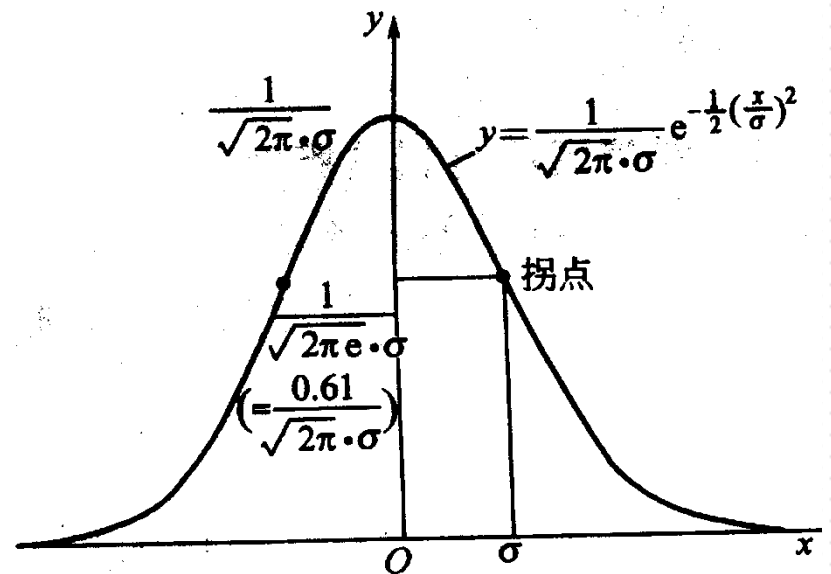
σ ——标准误差

误差为x的**概率**为：

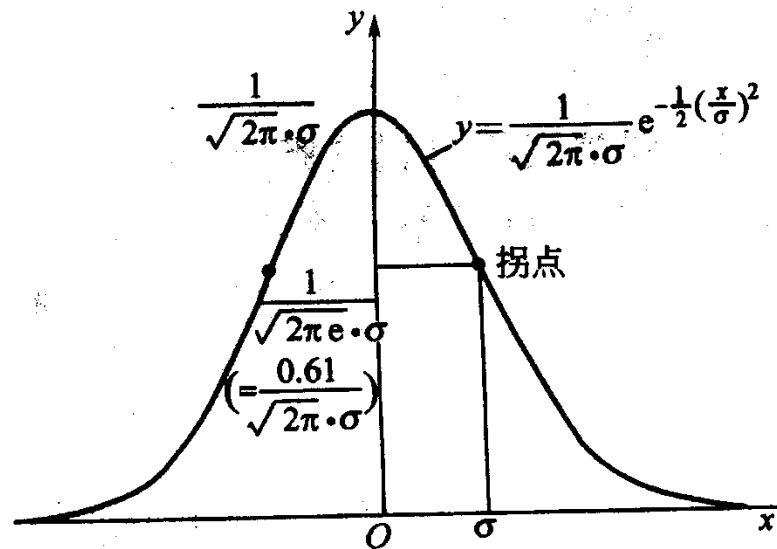
$$p(x) = f(x)dx$$

误差在a与b之间的**概率**为：

$$p(a < x < b) = \int_a^b f(x)dx$$



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



几个特征值：

① $x = 0$ 时, $f'(x) = 0$, $f(0) = f(x)_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma}$

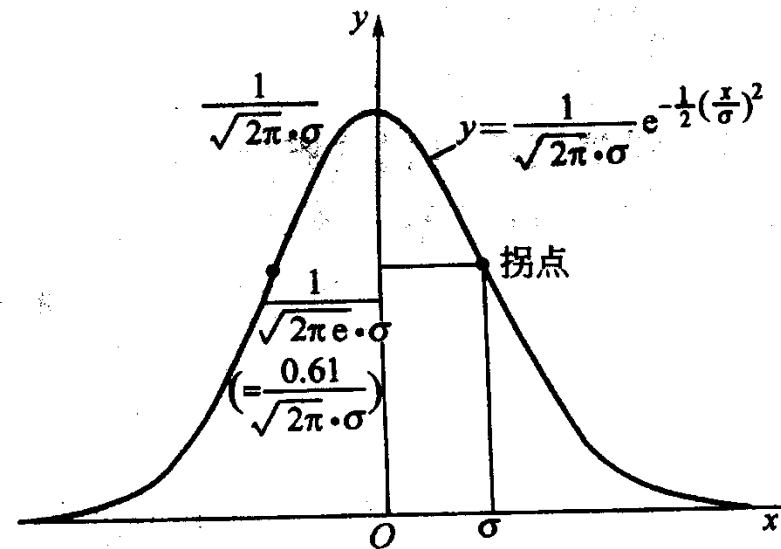
② $x = \pm\sigma$ 时, $f''(x) = 0$, $f(\pm\sigma)$ 为正态分布曲线的两个拐点

③ 极限误差 δ

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

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

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



标准误差 σ ——标准差的大小表征着测量误差的分散性。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

σ 越小，分布曲线越尖锐，意味着小误差出现的概率越大，而大误差出现的概率小，表明测量的精密度高，分散性小。

置信区间与置信概率

- 置信区间：

随机变量取值的范围，常用正态分布的标准误差的倍数来表示，即：

$$\text{置信区间} = \pm z\sigma \quad z \text{ —— 置信系数}$$

- 置信概率：

随机变量在置信区间内取值的概率，即：

$$\phi(z) = p\{|x| < z\sigma\} = \int_{-z\sigma}^{+z\sigma} f(x)dx = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \int_0^{z\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$$

- 置信水平：

表示随机变量在置信区间以外取值的概率，即：

$$\alpha(z) = 1 - \phi(z) = p\{|x| > z\sigma\}$$

正态分布的置信概率和置信水平数值表

置信系数 z	0.00	1.00	2.00	3.00	∞
置信概率 $\Phi(z)$	0.0000	0.6827	0.9545	0.9973	1.0000
置信水平 $\alpha(z)$	1.0000	0.3173	0.0455	0.0027	0.0000

结论：

置信系数越大，置信区间越宽，置信概率越大，随机误差的范围也越大。

习惯上认为， 3σ 是极限误差。

四. 粗大误差的判别

- 拉依达准则：

- 计算被测量的测量列的平均值：

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

- 使用贝塞尔公式计算标准差的估计值：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- 计算每个测量值的残差：

$$v_i = y_i - \bar{y}$$

- 如果某个测量值的残差满足以下公式，应剔除。

$$|v_k| > 3\sigma$$

拉依达准则的特点：

- 比较简单，使用方便。
- 当测量次数 $n < 10$ 时，即使存在粗大误差也可能判别不出来。

拉依达准则适合用于测量次数为30次以上的场合。

● 格罗布斯准则：

- 计算被测量的**测量列**的平均值：

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

- 使用**贝塞尔公式**计算标准差的估计值：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- 计算每个测量值的残差：

$$v_i = y_i - \bar{y}$$

- 计算残差与标准差的比值：

$$\lambda_i = v_i / \sigma$$

- 如果某个测量值的残差满足以下公式，**应剔除**。

$$|\lambda_k| > \lambda_n(\alpha)$$

$\lambda_n(\alpha)$ —— n 次测量下，置信水平为
 α 时的界限系数（查表）

- **格罗布斯准则的特点：**

理论推导严密，是较好的判别粗大误差的准则。

格罗布斯准则应用比较广泛。

举例：测量某个温度 7 次，试判断有无粗大误差。

i	t/°C	v_i	v_i^2
1	10.3	-0.2	0.04
2	10.4	-0.1	0.01
3	10.2	-0.3	0.09
4	10.4	-0.1	0.01
5	11.5	1.0	1
6	10.4	-0.1	0.01
7	10.3	-0.2	0.04

格
罗
布
斯
准
则

$$\bar{x} = 10.5$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 v_i^2}{7-1}} = 0.45$$

取置信水平 $\alpha = 0.05$

查表得 $\lambda_7(\alpha) = 1.94$

$$\lambda \cdot \sigma = 1.94 \times 0.45 = 0.87$$

$$|v_5| = 1.0 > \lambda \cdot \sigma \quad x_5 \text{ 应剔除}$$

拉
依
达
准
则

$$3\sigma = 3 \times 0.45 = 1.35$$

$$|v_5| = 1.0 < 3 \cdot \sigma \quad x_5 \text{ 不应剔除}$$



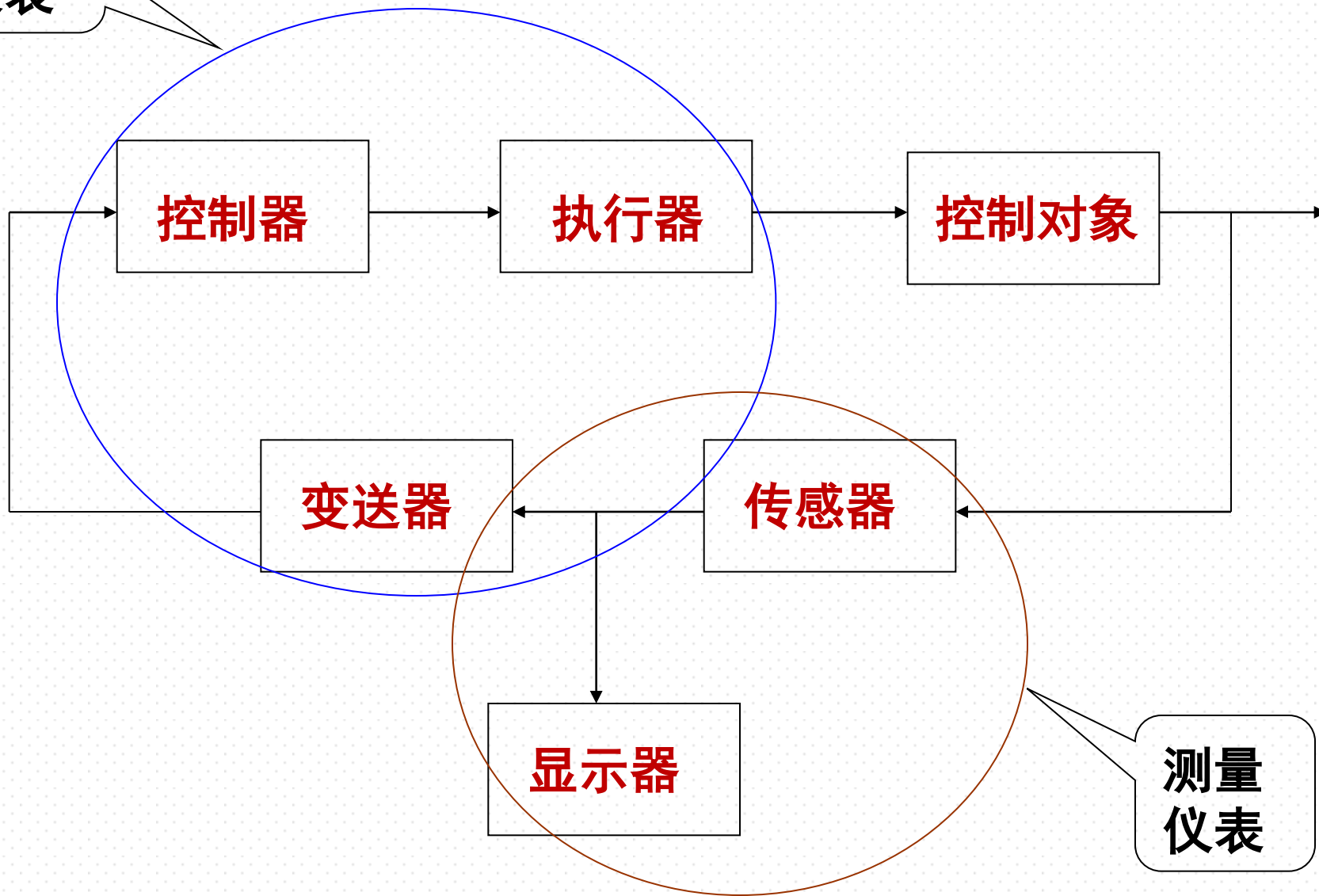
1.3 测控仪表主要相关基础知识

———控制仪表基础

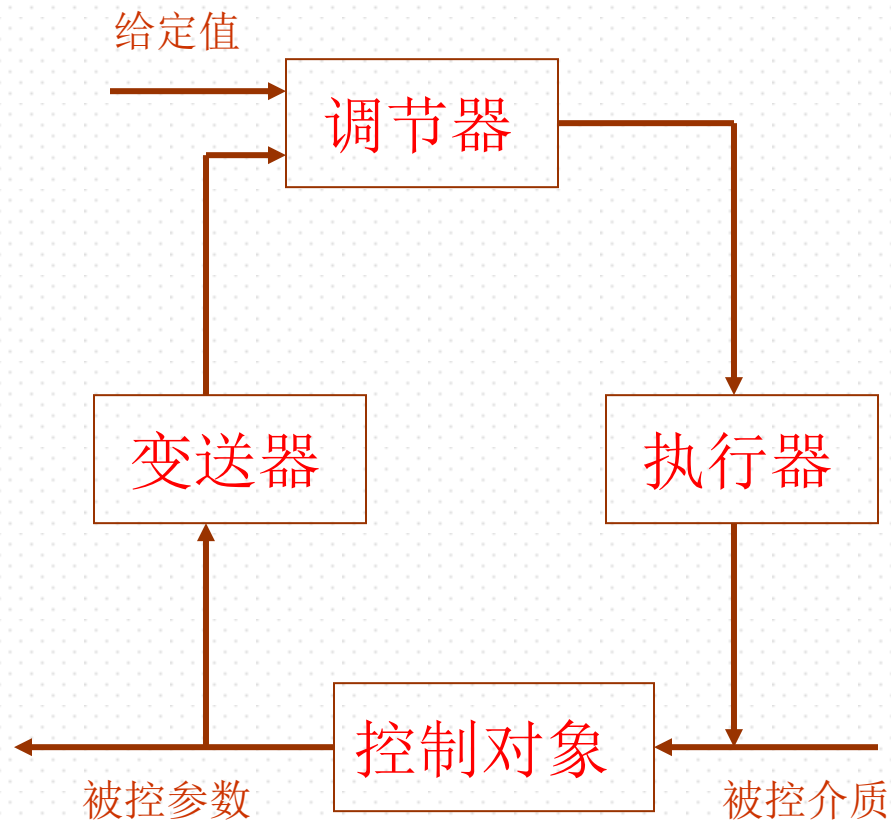
控制仪表是实现**生产过程自动化**的重要技术工具。

在简单自动控制系统中，除了将被控参数变换成易于传递的物理量的检测元件（如热电偶、热电阻、孔板等）外，完成其他任务的仪表都属于控制仪表。

控制
仪表



- **变送器**：把物理量转换成相应电信号
- **调节器**：按一定调节规律发出控制信号
- **执行器**：执行控制作用
- 控制仪表还包括图中未体现出的转换器、运算器、操作器等



1. 3. 1 控制仪表及装置的发展和分类

控制仪表及装置的发展方式和分类方式有以下几种：

1. 按能源形式分类
2. 按信号类型分类
3. 按结构形式分类

一. 按能源形式分类

- 工业上常用的控制仪表为气动控制仪表和电动控制仪表。
- 气动控制仪表发展和应用的时间较早，在二十世纪四十年代就已经广泛应用于工业生产了。

气动仪表的特点：

- 结构简单
- 价格便宜
- 性能稳定
- 可靠性高
- 本质上是安全防爆的，特别适用于石油及化工行业

电动控制仪表的问世要比**气动控制仪表**晚，但是由于其**信号的传递、放大及变换处理**要比**气动控制仪表**容易得多，又便于**远距离传送**，与**计算机联用**也很方便，而且通过采用**安全火花防爆措施**解决了防爆问题，因此使其得到迅速发展和大量使用。

本课程主要介绍**电动控制仪表**。

二. 按信号类型分类

电动控制仪表按**信号类型**可分为：

1. 模拟式控制仪表
2. 数字式控制仪表

模拟式控制仪表的传输信号为连续变化的模拟量。

模拟式控制仪表的特点是：

- ✓ 线路简单
- ✓ 操作方便
- ✓ 价格较低
- ✓ 经过多次升级换代，功能不断完善，更加满足生产的要求

长期以来，模拟式控制仪表被广泛应用于各工业部门。

- ❖ 数字式控制仪表是近二十年来，在微电子技术和计算机技术迅速发展的基础上发展起来的，其传输信号为**断续变化**的数字量。
- ❖ 由于以微型计算机为核心，数字式控制仪表的功能更加完善、性能更加优越，可以解决模拟式控制仪表无法解决的问题。
- ❖ 数字式控制仪表正越来越多地应用于工业生产过程自动化中，以满足高质量的控制要求。

三. 按结构形式分类

控制仪表按**结构形式**可分为四类：

1. 基地式控制仪表
2. 单元组合式控制仪表
3. 集散控制系统
4. 现场总线控制系统

基地式控制仪表

- ❖ 基地式控制仪表是最早发展起来的控制仪表。
- ❖ 这种类型的仪表以指示、记录为主体，附加控制机构，装在一个仪表壳内，故称之为基地式，通常安装在现场。

相当于把单元组合仪表的几个单元组合在一起构成一个仪表，仪表的所有部件之间以不可分离的机械结构相连接，装在一个箱壳之内。

- ❖ 这类仪表一般用于简单控制系统中，对被控参数实现指示、记录和控制。

单元组合式控制仪表

单元组合式控制仪表根据控制系统中各个组成环节的不同功能和使用要求，将整套仪表划分成能**独立实现某种功能的若干单元**，而各个单元之间用**统一的标准信号**来联系。

将各种独立仪表进行不同的组合，可以构成适用于各种不同场合的自动检测或控制系统。

这类仪表有电动单元组合仪表（**DDZ**）和气动单元组合仪表（**QDZ**）两大类。

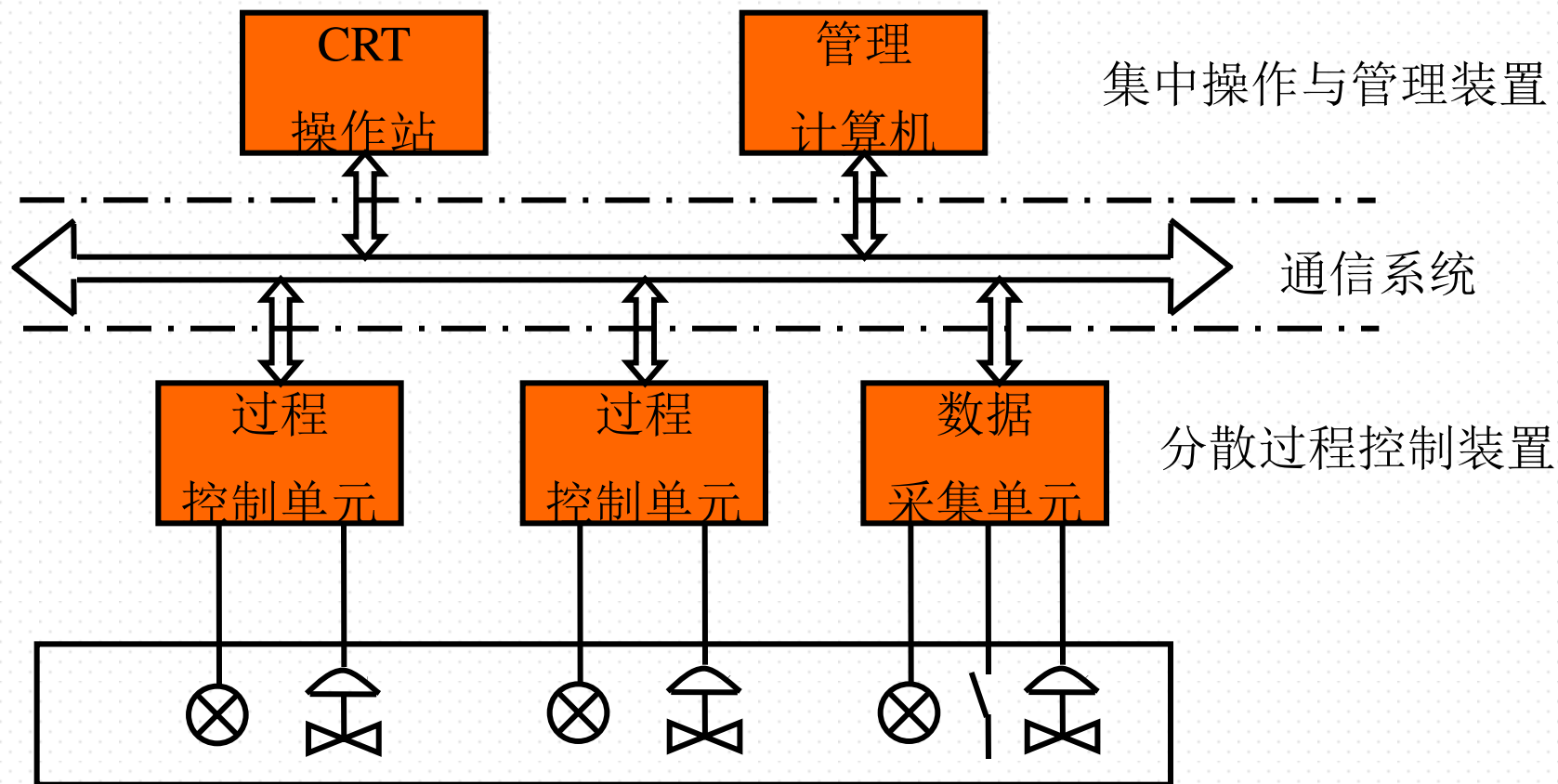
它们都经历了I型，II型和III型三个阶段。电动单元组合仪表中还有模拟和数字技术相结合的DDZ-S型系列仪表。

集散控制系统 (DCS)

DCS系统是一种以微型计算机为核心的计算机控制装置。

DCS系统通常由分散过程控制装置、操作管理装置和通信系统三大部分组成。

DCS结构示意图



集散控制系统的基本结构

- ❖ **集散控制系统（DCS）** 是一种以微型计算机为核心，在控制技术、计算机技术、通信技术和屏幕显示技术迅速发展的基础上研制成的一种计算机控制装置。
- ❖ 集散控制系统**特点**是：**分散控制，集中管理。**
- ❖ **“分散”** 是指用多台控制仪表（**可编程调节器**和**可编程控制器**）分散地控制各个回路，并用通信电缆与上一级计算机相连，组成分散控制系统，从而使系统的运行安全可靠。
- ❖ **“集中”** 则是指集中监视、集中操作和管理整个生产过程，由上一级的监控、管理计算机及显示操作站来完成。

分散过程控制装置

是集散控制系统与生产过程间的界面，生产过程的各种过程变量通过分散过程控制装置转化为操作监视的数据，而操作的各种信息也通过分散过程控制装置送到执行机构。

在分散过程控制装置内，进行模拟量与数字量的相互转换，完成各种输入输出数据的处理和控制算法的运算。

操作管理装置

是操作管理人员与集散控制系统间的界面，生产过程的各种参数集中在操作管理装置上显示，操作管理人员通过操作管理装置了解生产过程的运行状况，还可操纵生产过程、组态回路、调整回路参数、检测故障和存储过程数据。

通信系统

是分散过程控制装置与操作管理装置之间的桥梁。集散控制系统各单元之间的数据传输由通信系统构成的网络来完成，该网络需遵循一定的通信协议。

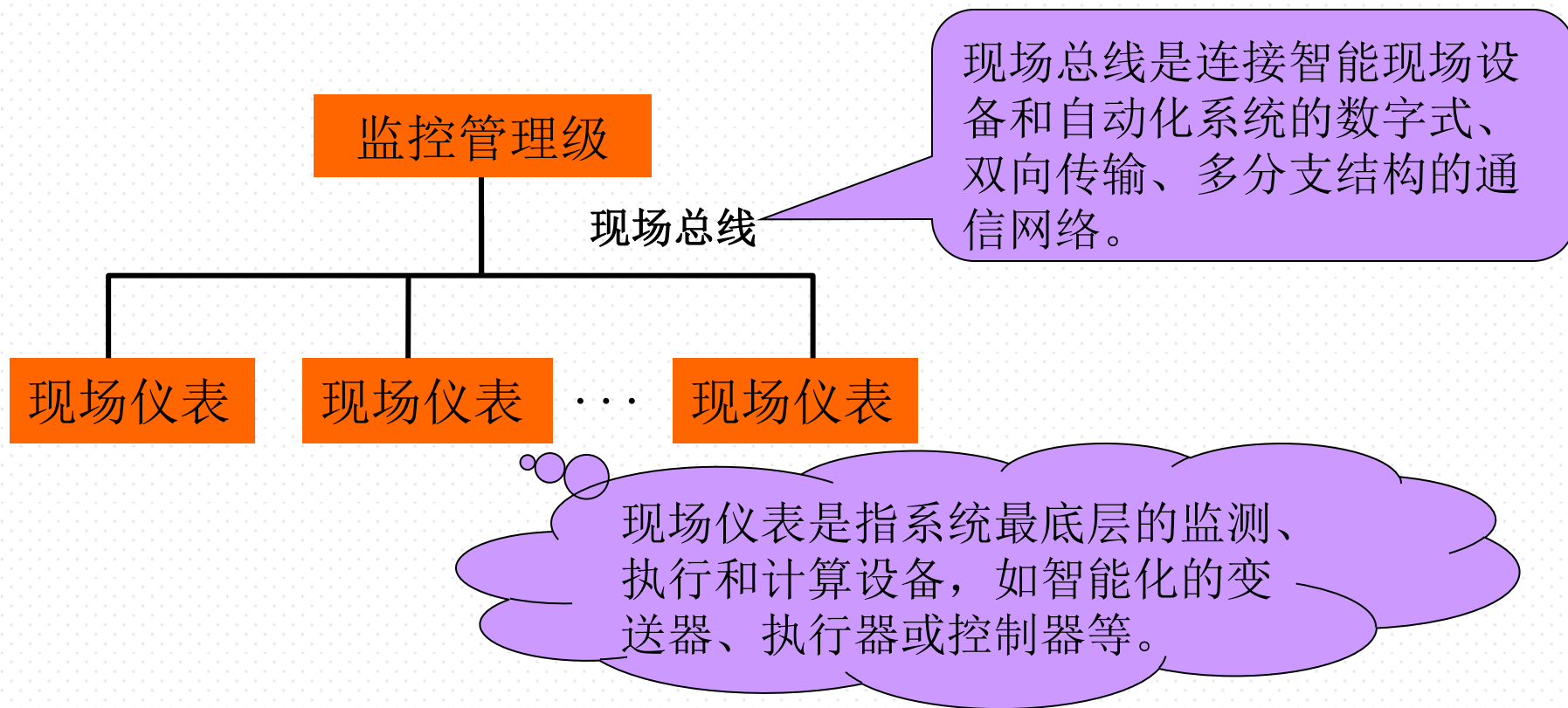
数字式控制器

（可与DCS配合使用）

1. 可编程调节器（单回路调节器）
2. 可编程控制器（PLC）

现场总线控制系统 (FCS)

FCS系统是基于现场总线技术的一种新型计算机控制装置。现场总线将**具有数字通信能力的现场仪表**相连接，并同上层监控管理级一起构成分布式控制网络。



现场总线控制系统 (FCS)

特点：现场控制和双向数字通讯。即将传统上集中于控制室的控制功能分散到现场仪表中，实现现场控制；而现场仪表与控制室内的仪表或装置之间为双向数字通讯。

FCS具有全数字化、全分散式、可互操作、开放式以及现场设备状态可控等优点。FCS中还可能出现以以太网技术和以无线通信技术为基础的计算机控制系统。

现场总线控制系统（FCS）是20世纪90年代发展起来的新一代工业控制系统。

现场总线将**具有数字通信能力的现场智能仪表**连成网络系统，并同上一级的监控级、管理级联系起来成为全分布式的新型控制网络。

现场总线控制系统的基本特征：

结构的网络化和全分散性；

系统的开放性；

现场仪表的互可操作性和功能自治性；

对环境的适应性。

随着现场总线技术的不断完善，FCS将逐步取代传统的控制系统。

1.3.2 联络信号和传输方式

一. 联络信号

在成套仪表系列中，仪表之间应由**统一的联络信号**来进行信号传输。

对于单元组合仪表，通常使用以下几种联络信号：

(1) 气动单元组合仪表

国际上统一使用 $20 \sim 100kPa$ 气压信号，作为气动仪表之间的联系信号。

(2) 电动单元组合仪表

DDZ-II型仪表采用 $0 \sim 10mA$ 的直流电流作为统一的联络信号。

DDZ-III型仪表采用国际上统一使用的 $4 \sim 20mA$ 的直流电流或 $1 \sim 5V$ 的直流电压作为仪表之间的联络信号。

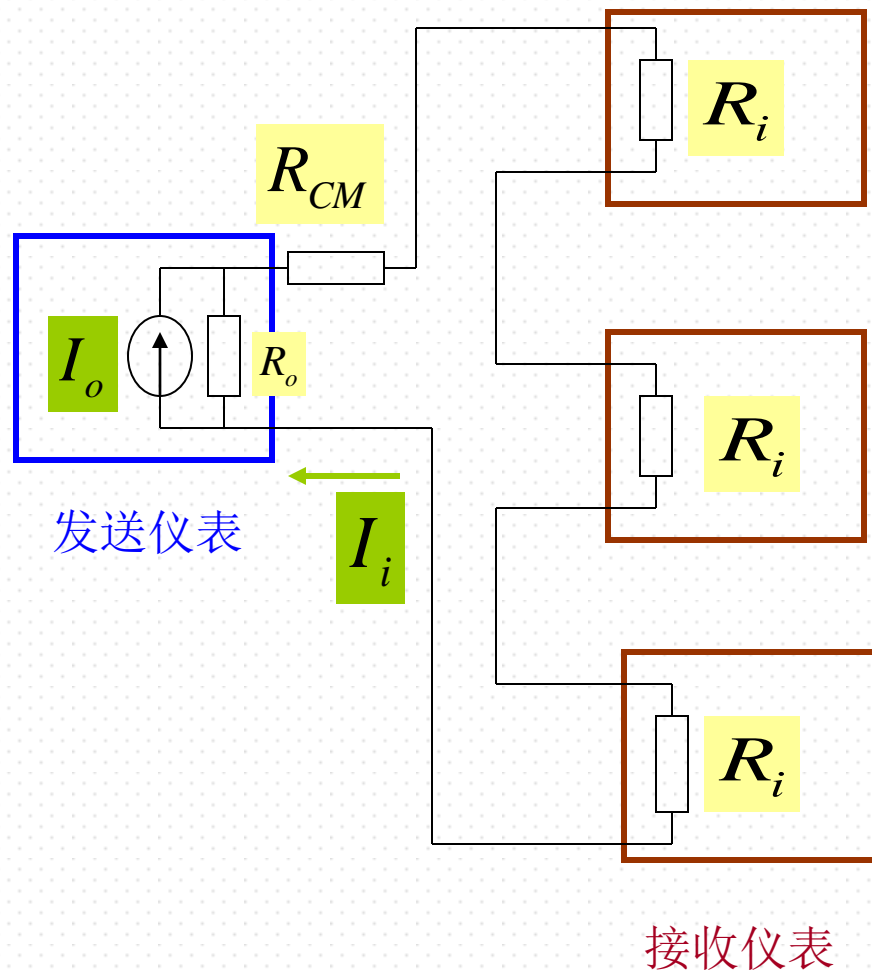
两种联络信号的特点：

- DDZ-II型仪表采用 $0 \sim 10mA$ 的联络信号。由于该信号下限从零开始，便于模拟量的加、减、乘、除、开方等数学运算，并能使用通用刻度的指示、记录仪表。
- DDZ-III型仪表采用 $4 \sim 20mA$ 或 $1 \sim 5V$ 的联络信号。由于该信号下限不是从零开始，使仪表的电气零点和机械零点得以分开，便于检验信号传输线有否断线以及仪表是否断电，并为现场变送器实现两线制（既是电源线，又是信号线）提供了可能性；另外，信号上限较大能产生较大的电磁平衡力，有利于力平衡差压变送器的设计。

二. 电信号的传输方式

1. 电流信号的传输

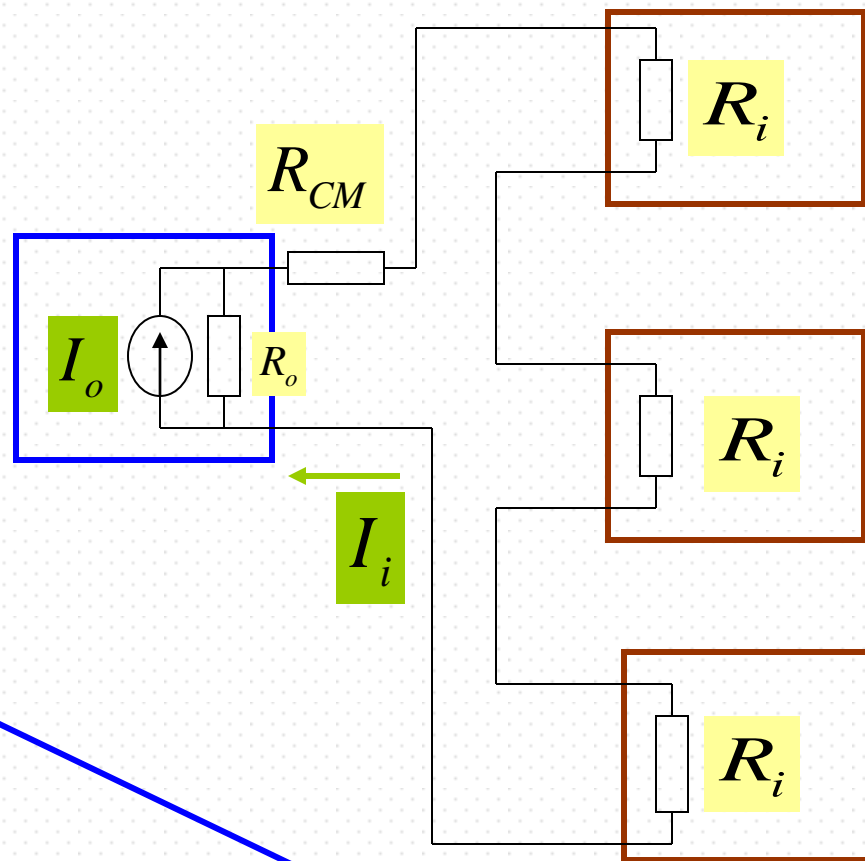
若一台发送仪表的**输出电流**要同时传输给几台接收仪表，这几台仪表的连接方式应该是**串联**。



传输误差可用公式表示为：

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{I_o - I_i}{I_o} \\ &= \frac{I_o - \frac{R_o}{R_o + (R_{cm} + nR_i)} \cdot I_o}{I_o} \\ &= \frac{R_{cm} + nR_i}{R_o + R_{cm} + nR_i} \times 100\%\end{aligned}$$

R_i —— 接收仪表的输入电阻
 R_o —— 发送仪表的输出电阻
 R_{cm} —— 连接导线的电阻
 n —— 连接仪表的个数



可以看出，要保证一定的传输精度，发送仪表的输出电阻相对于连接导线电阻和接收仪表输入电阻应足够大。

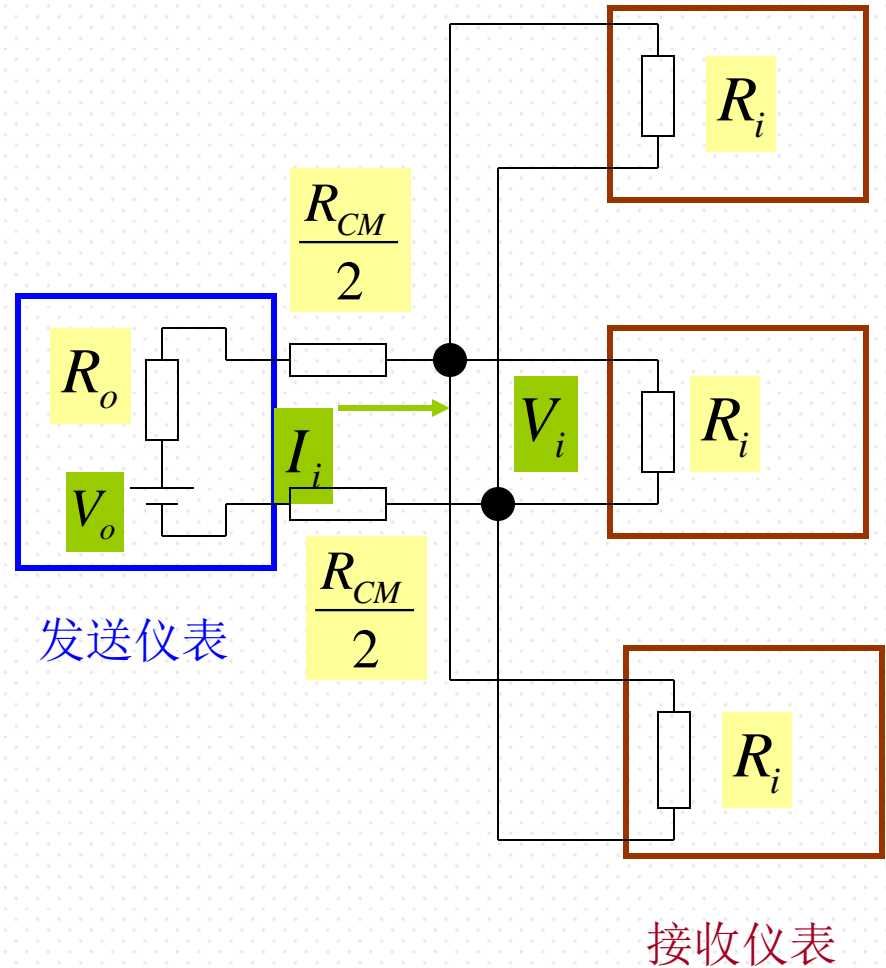
实际上，发送仪表的输出电阻 R_o 均很大，相当于一个恒流源(即 $R_o \rightarrow \infty$)，因此**电流信号是适合于远距离传送的。**

但是，这种**串联式的传输方式的缺点**也是明显的，即如果有一台仪表发生故障，其他仪表也将受到影响；而且各台接收仪表一般都应该浮空工作，不能接地。

DDZ-III仪表只能是电流输出，故仪表之间的信号传输均采用这种传输方式。

2. 电压信号的传输

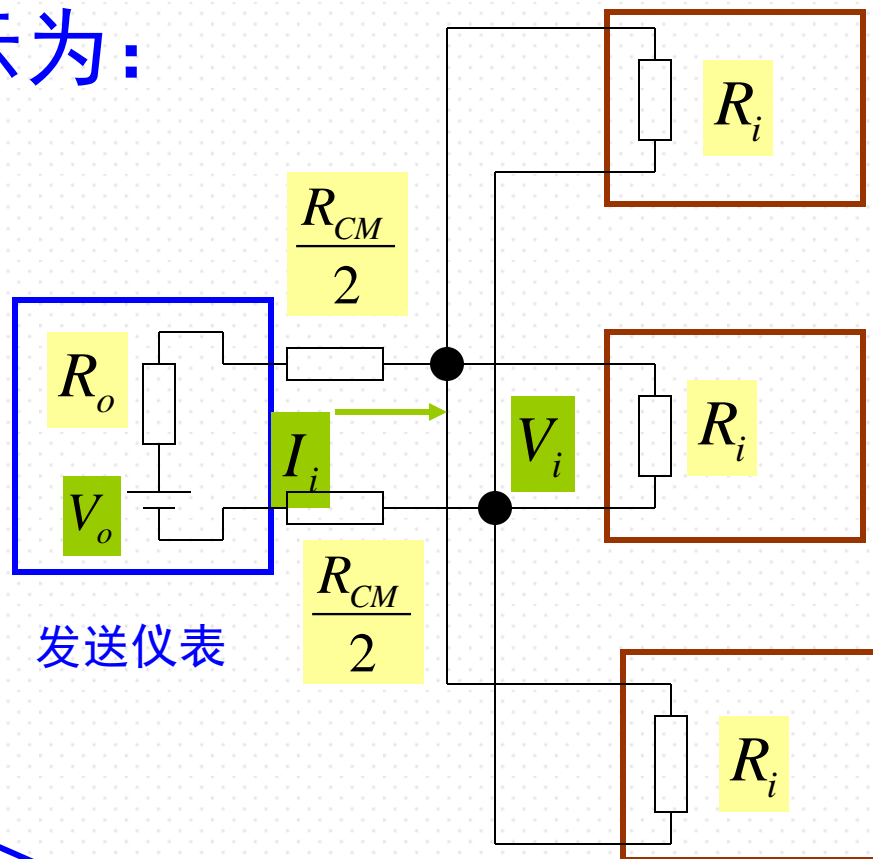
若一台发送仪表的输出电压要同时传输给几台接收仪表，这几台仪表的连接方式应该是**并联**的。



传输误差可用公式表示为：

$$\varepsilon = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{V_o - \frac{V_o}{R_o + R_{cm} + \frac{R_i}{n}} \cdot \frac{R_i}{n}}{V_o}$$

$$= \frac{R_{cm} + R_o}{R_o + R_{cm} + \frac{R_i}{n}} \times 100\%$$



R_i ——接收仪表的输入电阻
 R_o ——发送仪表的输出电阻
 R_{cm} ——连接导线的电阻
 n ——连接仪表的个数

可以看出，**要减小传输误差**，发送仪表的内阻电阻及连接导线电阻应尽量小，而**接收仪表的输入电阻应大一些**。

- 接收仪表是以并联的方式连接，增加或取消某个仪表就不会影响其他仪表的工作；而且，这些仪表也可以设置公共接地点，故而使设计安装上比较简单。
- 由于接收仪表的输入电阻都比较小，容易引入误差，因此**电压信号不适合于远距离传输。**

$$\varepsilon = \frac{R_{cm} + R_o}{R_o + R_{cm} + \frac{R_i}{n}} \times 100\%$$

DDZ-III 仪表有电流和电压两种输出

**在现场和控制室之间的信号传输
采用电流传输方式**

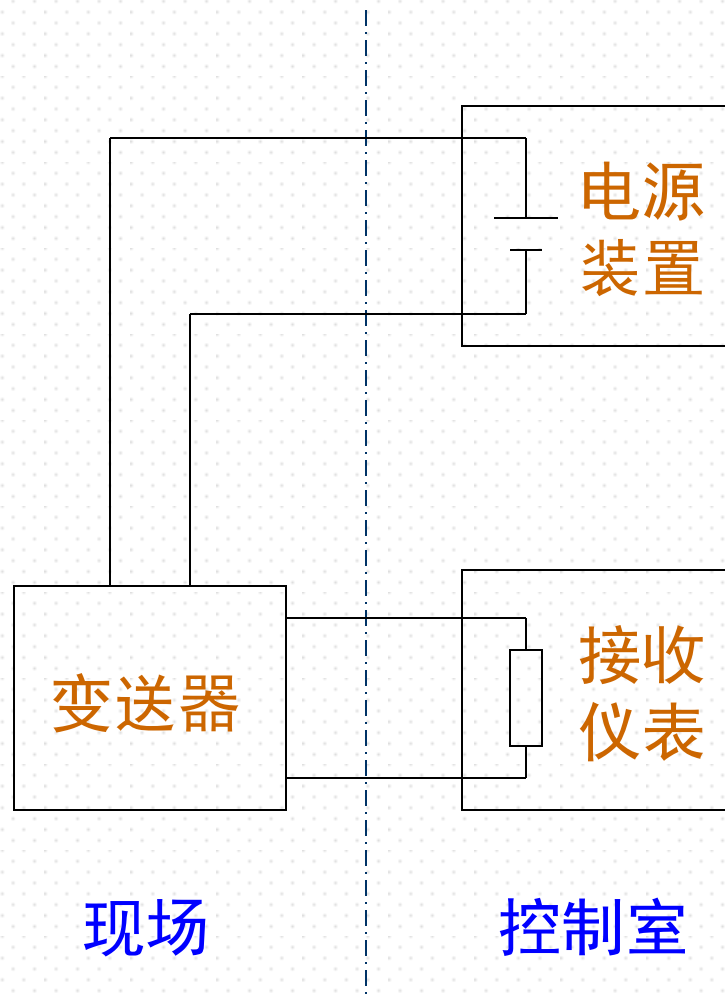
**在控制室内的仪表之间的信号传
输则采用电压传输方式。**

3. 变送器的信号传输

- 变送器属于现场仪表（温度变送器由于接收的电信号，其安装位置可以在现场，也可以在控制室），控制室既要给它供电，又要接收它的输出信号。
- 对于变送器的供电和信号传送方式有以下两种：
 - A. 四线制传输
 - B. 两线制传输

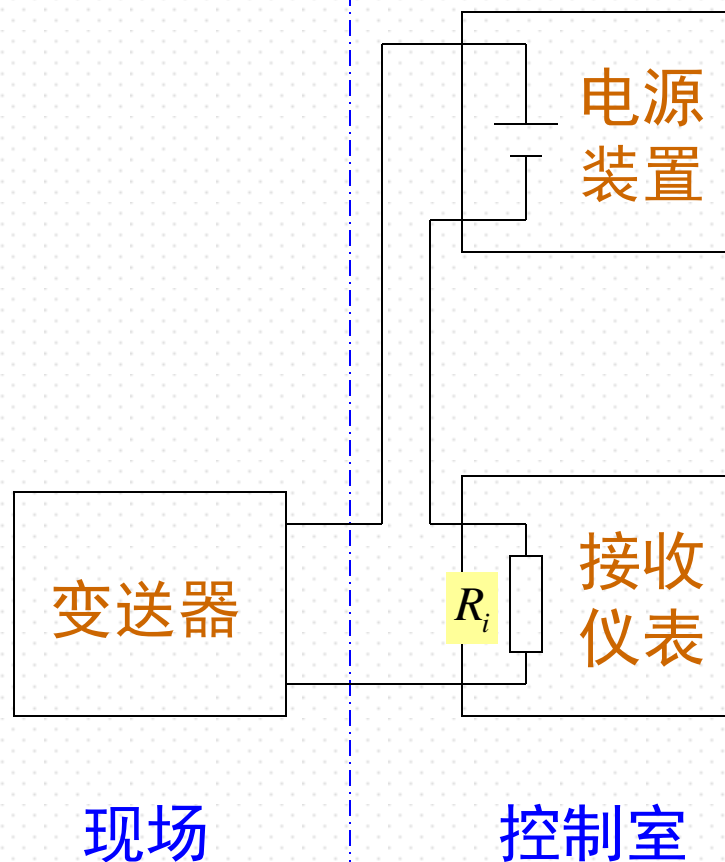
A. 四线制传输

- 供电电源和输出信号各用两根导线传输。
- 这种方式由于电源与信号分别传送，因此对电流信号的零点及元器件的功耗无严格要求。
- DDZ-II 仪表及安装在控制室的 DDZ-III 温度变送器均采用该种传输方式。

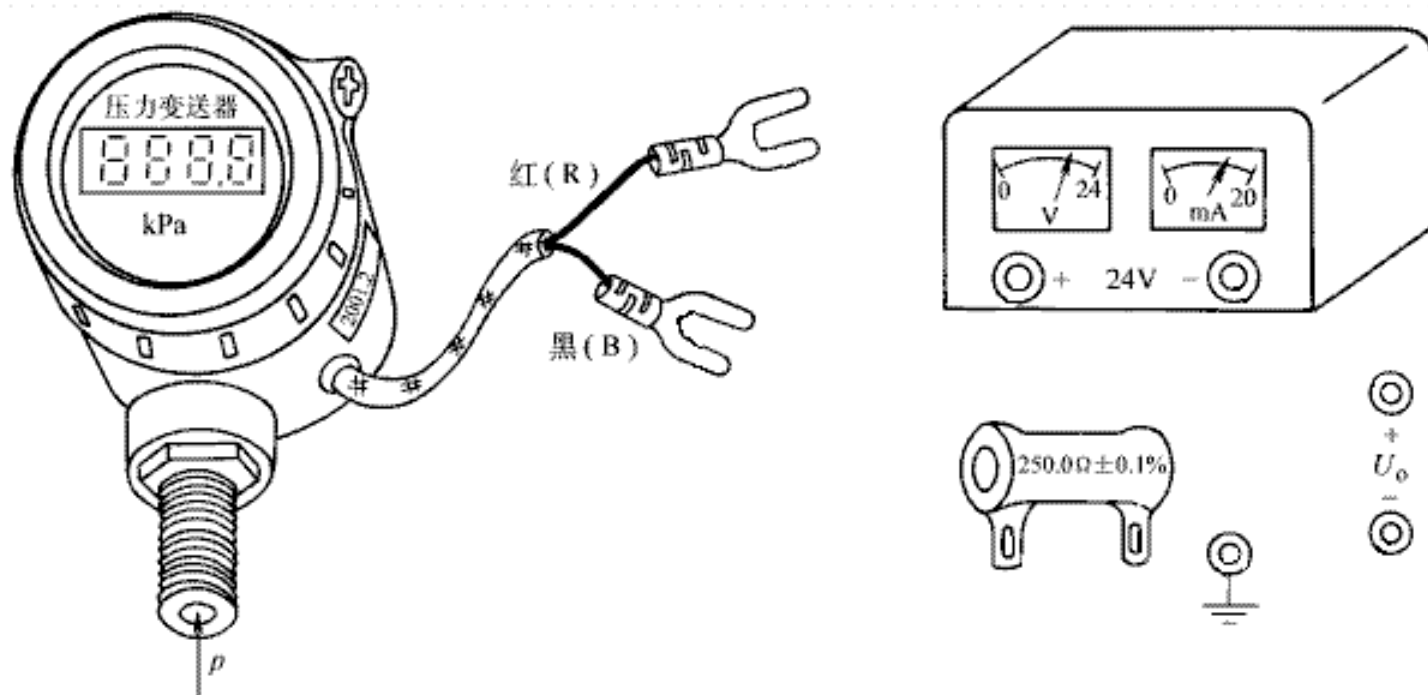


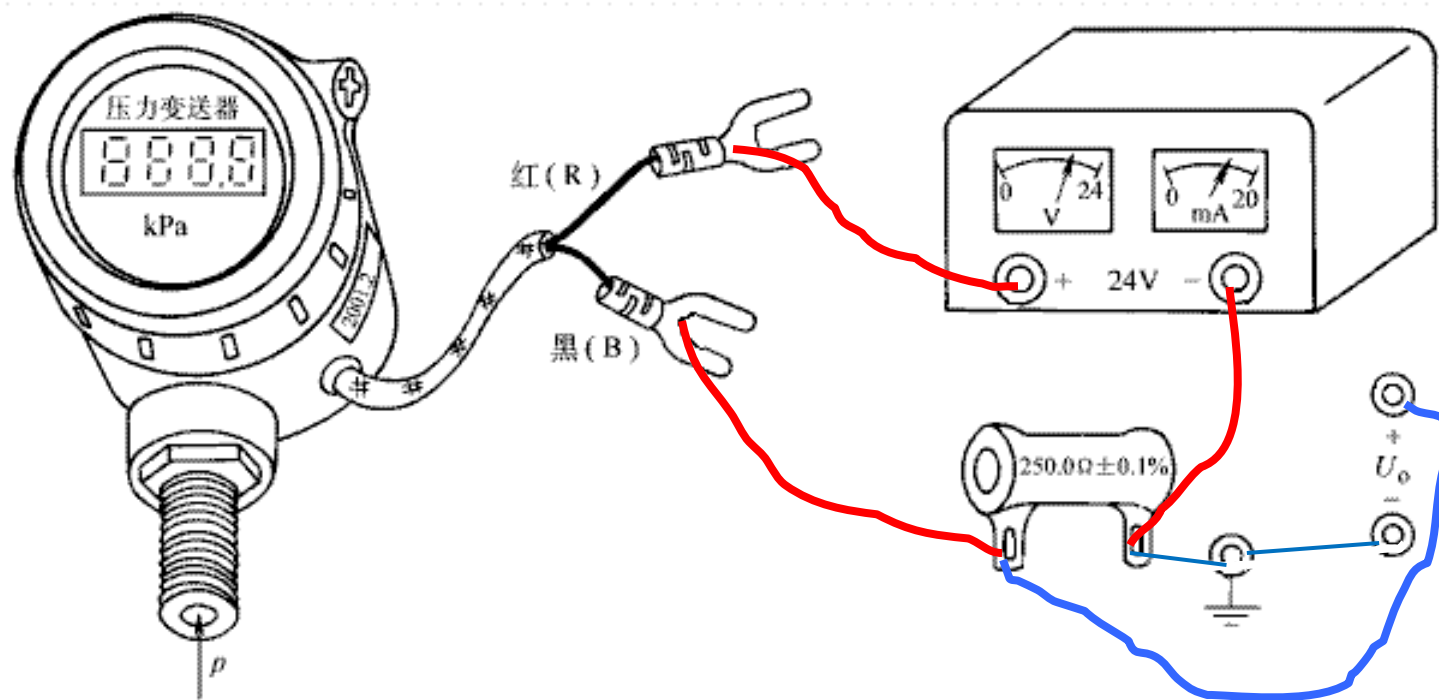
B. 两线制传输

- 变送器与控制室中的仪表之间只有两根传输导线，既是电源线，又是信号线。
- 这种传输方式不仅可以节省大量电缆线和安装费用，而且有利于安全防爆。
- 要采用这种传输方式，电流信号的下限不能为零，否则在电流下限时，变送器无法正常工作。
- DDZ-III仪表的变送器可以用两线制传输，而DDZ-II仪表则不能。



思考：二线制仪表的连接





1.3.3 DDZ-III单元组合仪表概述

一. 仪表的特点

- 元件采用线性集成电路，简化了线路，提高了可靠性，扩大了应用功能；
- 仪表采用**国际标准信号制**，**进出控制室**的传输信号为**电流信号**，**控制室各仪表之间**则采用**电压传输方式**；
- 仪表的供电集中统一，即统一由电源箱供给各单元直流电源，从而使各单元省掉了电源变压器；
- 整套仪表可构成安全火花型防爆系统。

二. 仪表的主要性能指标

统一标准信号 $4\sim 20\text{mA}$, $1\sim 5\text{V}$

基本误差 $\pm 0.5\%$

响应时间 $\leq 1\text{S}$

负载电阻 $250\sim 750\Omega$

电源电压 24VDC

防爆等级 i—本质安全型

三. 仪表的种类

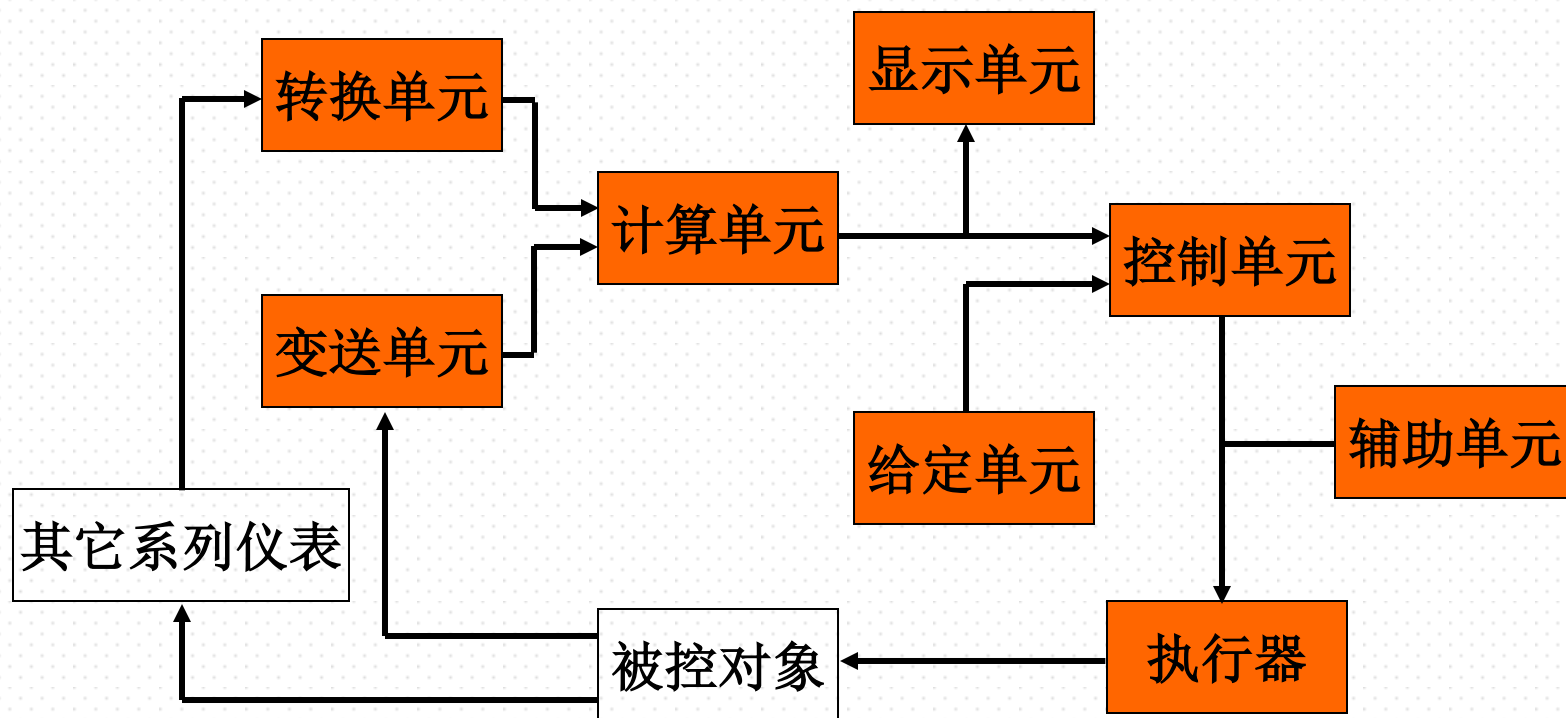
➤ 单元组合仪表可分为现场安装仪表和控制室安装仪表两大部分，共有八大类：

1. 变送单元类；
2. 运算单元类；
3. 执行单元类；
4. 显示单元类；
5. 调节单元类；
6. 给定单元类；
7. 转换单元类；
8. 辅助单元类。

- **变送单元类**：包括与被测参数对应的各种变送器，其输出信号作为调节单元、运算单元或显示单元的输入。
- **执行单元类**：包括电动执行器及电气转换器、阀门定位器。
- **调节单元类**：不同功能的调节器，其输出信号作为执行单元的输入。
- **转换单元类**：气电转换器、电流转换器、频率转换器、毫伏转换器、脉冲-电压转换器等，其输出信号作为调节单元或显示单元的输入。

- **运算单元类**：包括加法器、乘法器、开方器、函数发生器等，其输出信号作为调节单元的输入。
- **显示单元类**：包括比例积算器、开方积算器、各种指示记录仪、报警器等。
- **给定单元类**：包括恒流给定器、比值给定器、时间程序给定器、参数程序给定器等，其输出信号作为调节单元的输入。
- **辅助单元类**：包括信号限制器、信号选择器、安全栅、配电器、隔离器、直流稳压电源等。

单元组合仪表各类单元的相互关系



END