

自动控制实践 测量元件概述

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 伊国兴



教学内容

1

学习重点

2

作用、定义、组成和分类

3

元件特性

4

讨论

学习重点

- ❖ 掌握常用测量元件的工作原理，了解其设计思想
- ❖ 熟悉常用测量元件的特点，关键技术指标，能够根据控制系统需要正确选择
- ❖ 熟悉常用测量元件使用方法，能够正确使用
 - 测量元件的作用
 - 测量元件的定义、组成和分类
 - 测量元件的特性（静态和动态）

Contents



学习重点



定义、作用、组成和分类

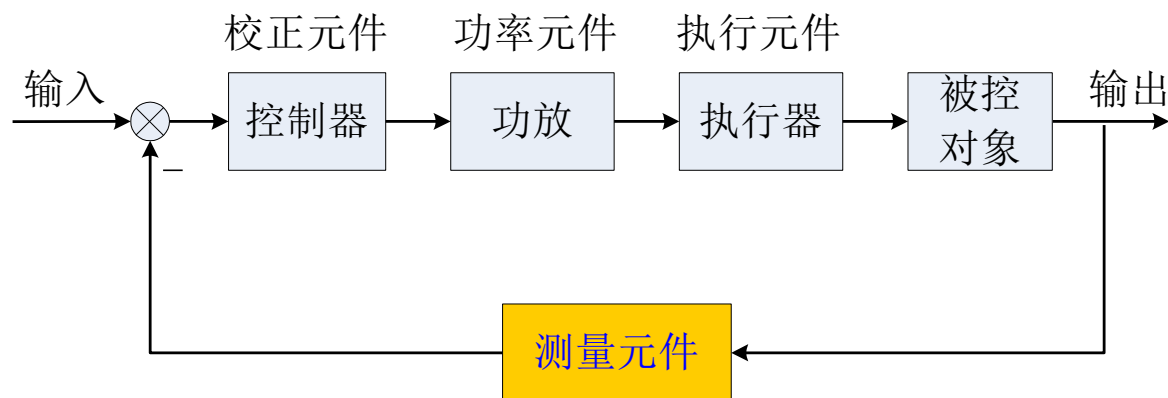


元件特性



讨论

测量元件在控制系统中的作用



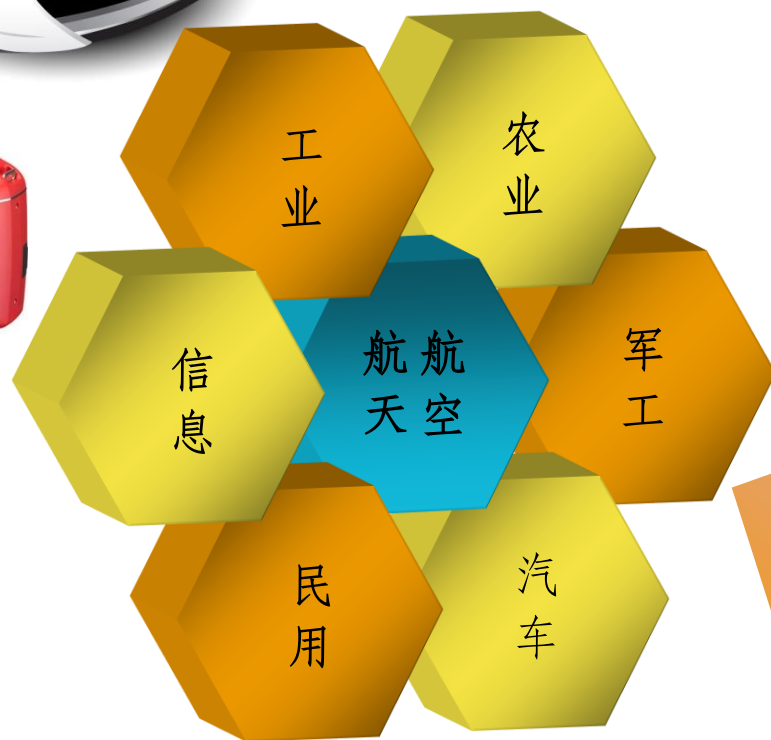
- ❖ **执行元件：**功能是驱动被控对象，控制或改变被控量
- ❖ **放大元件：**提供能量，将微弱控制信号放大驱动执行元件。
- ❖ **校正元件：**作用是改善系统的性能，使系统能正常可靠地工作并达到规定的性能指标
- ❖ **测量元件：**将一种量按照某种规律转换成容易处理的另一种量的元件。
（将外界输入信号变换为电信号的元件。）

测量元件定义

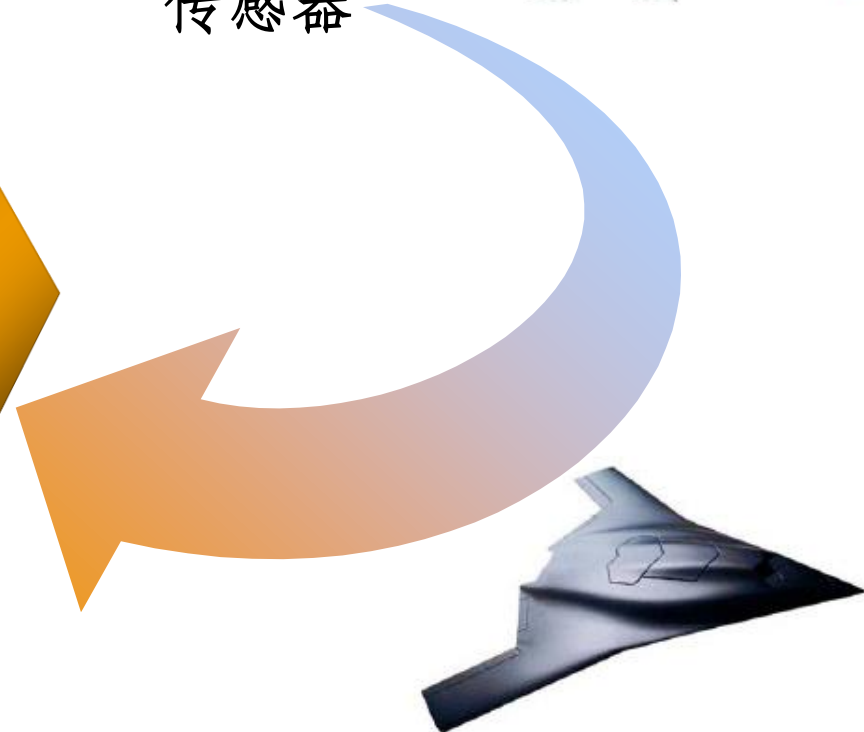


- ❖ 测量元件又叫传感器
- ❖ 传感器是一种能把物理量或化学量转变成便于利用的电信号的器件。
- ❖ 国际电工委员会(IEC:International Electrotechnical Committee)的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号”。
- ❖ 基本功能是检测和转换
- ❖ 输入量、输出量

传感器应用



传感器



传感器应用



传感器技术特点

- ❖ 内容的离散型
- ❖ 知识的密集性
- ❖ 技术（工艺）的复杂性
- ❖ 品种的多样性
- ❖ 用途的广泛性

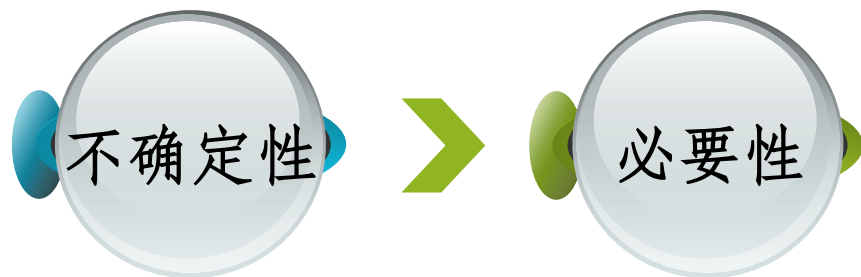


传感器技术发展趋势



- ❖ 开发新型传感器（新现象、新材料）
- ❖ 向高精度发展
- ❖ 向微型化发展
- ❖ 向低功耗、无源化发展
- ❖ 向传感器融合发展（冗余、互补、低成本）
- ❖ 向智能化发展
- ❖ 向高可靠性发展

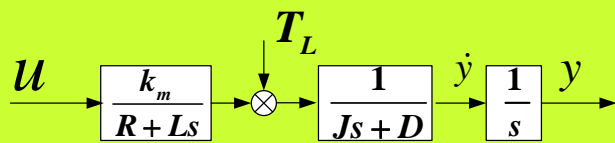
测量元件在控制系统中的必要性



$$G(s) = G_0(s) + \Delta G(s)$$

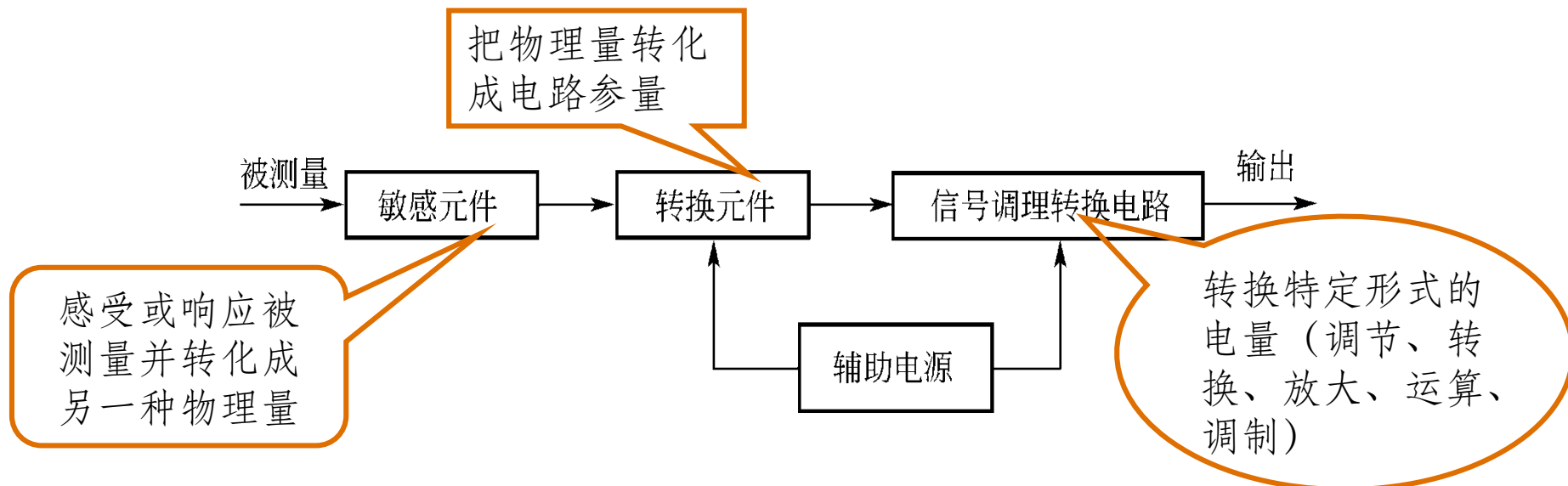
$$G(s) = \frac{K}{s(Ls + R)(Js + D)}$$

$$K + \Delta K, L + \Delta L, R + \Delta R, J + \Delta J, D + \Delta D$$



- ❖ 模型结构不确定性（假设、降阶、近似）
- ❖ 模型参数不确定性（老化、温度、工况、工艺）
- ❖ 各种外部扰动
- ❖ 控制系统要有效的抑制各种不确定性，保证一定的控制性能，就必须测量元件实现闭环控制

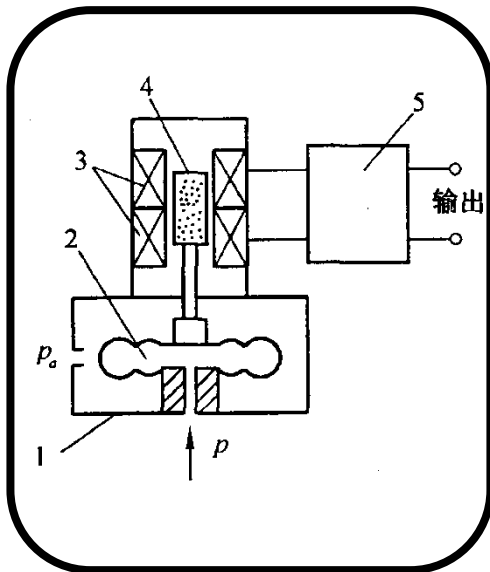
测量元件组成



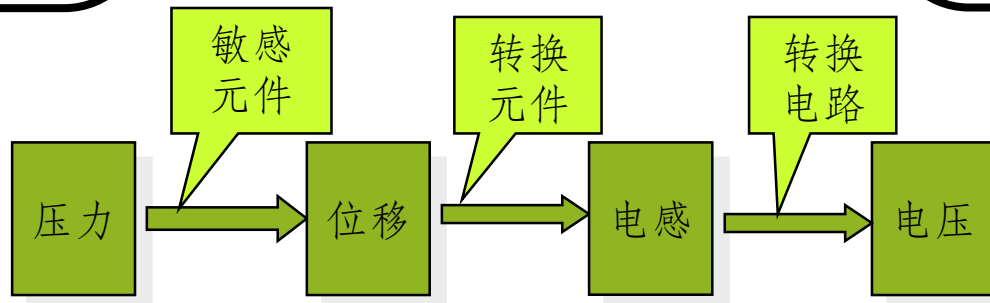
- ❖ 测量元件: 检测出一种量并转换成容易处理的另一种量。
- ❖ 功能: 检测和转换。
- ❖ 处理: 放大、加减、积分、微分、滤波、存储和传送。
- ❖ 容易处理的量: 主要指的是电信号。

测量元件组成举例

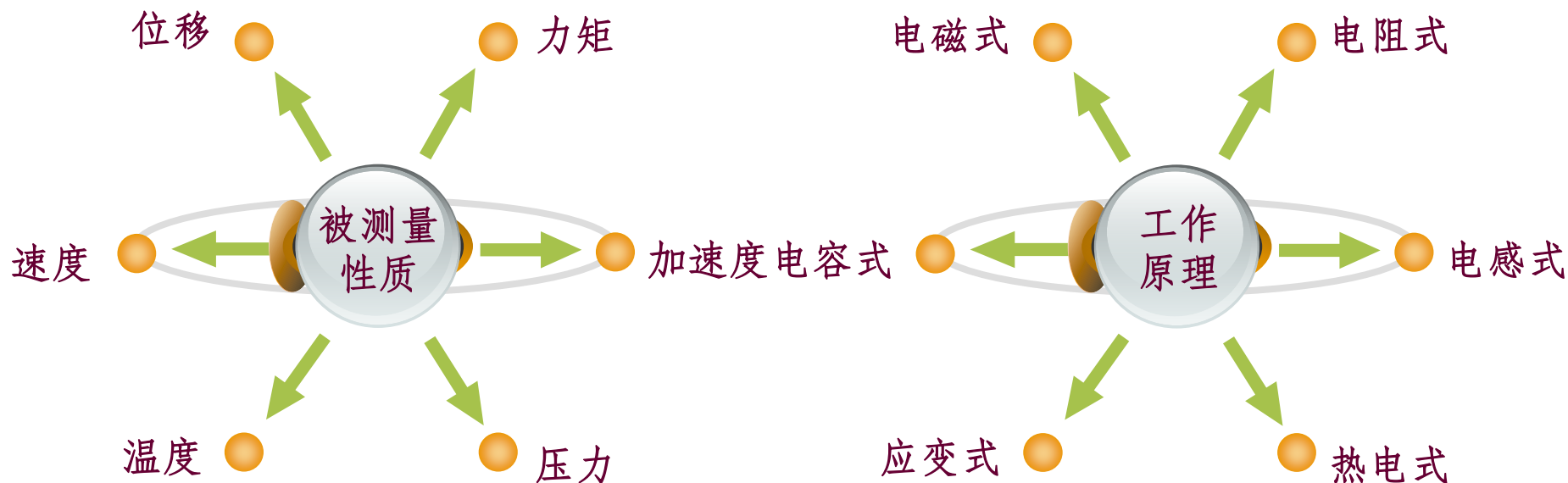
气体压力传感器



- 敏感元件—膜盒，把气压转换成位移
- 转换元件—可变电感3，把位移量转换成电感
- 转换电路—将电感转换成电压

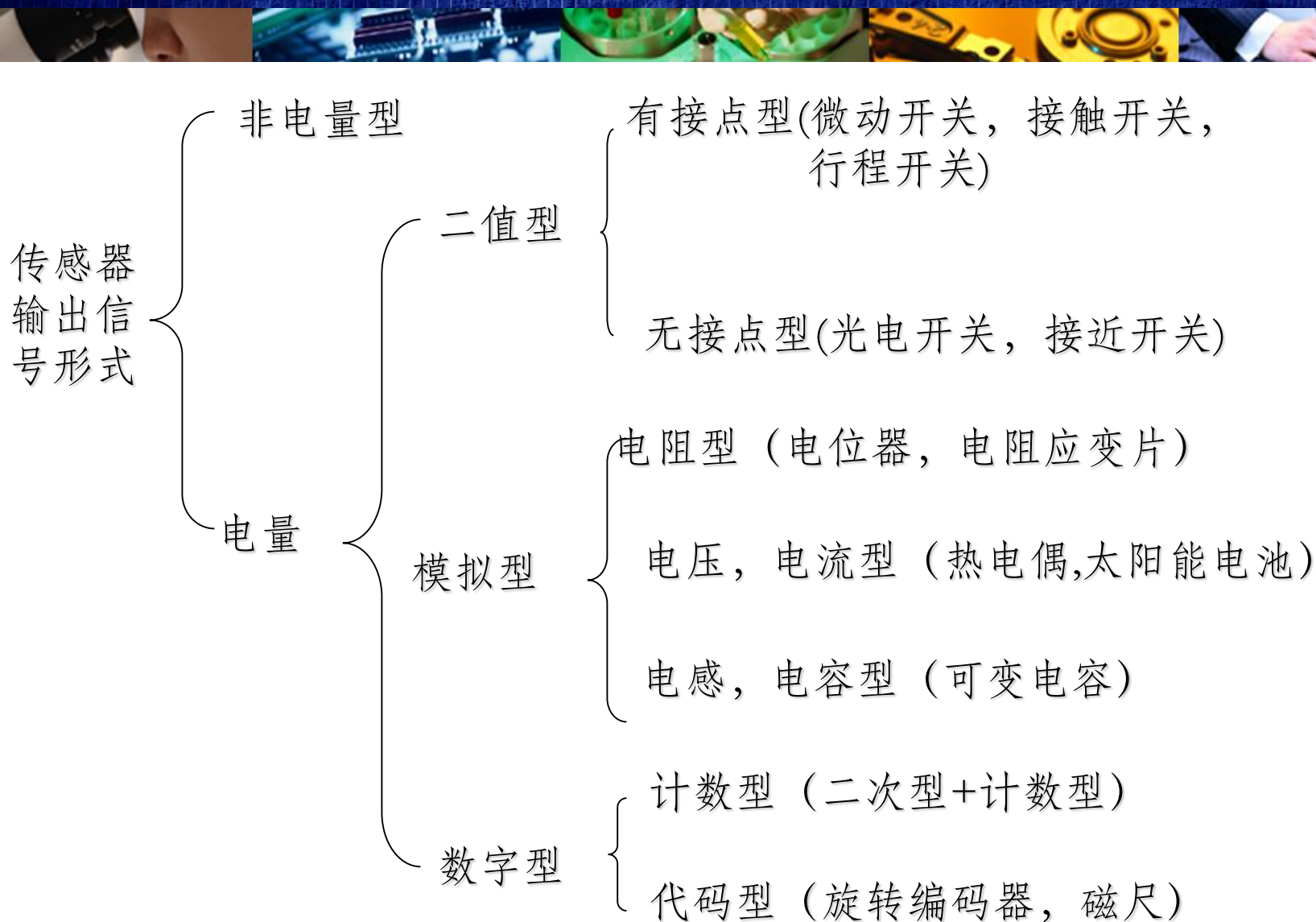


测量元件分类



- ❖ 根据结构可分为结构型、物性型和复合型传感器。
- ❖ 物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理性质变化来实现信号变换(热电偶)
- ❖ 结构型传感器是依靠传感器结构参数的变化实现信号变换(电容式传感器)

测量元件分类



测量元件分类



● 气体压力传感器 ●

- 压力传感器
- 电磁感应原理
- 结构型
- 模拟型



● 石英加速度计 ●

- 加速度传感器
- 电容感应原理
- 结构型
- 模拟型



● 光电编码器 ●

- 角位置传感器
- 光电原理
- 结构型
- 数字型

Contents



学习重点



作用、定义、组成和分类



元件特性



讨论

测量元件特性

- ❖ 理想特性：输入和输出一一对应。
- ❖ 静特性：输入量和输出量都为常量，或变化极慢时，输出和输入之间的关系。数学关系式中无变量对时间的微分。
- ❖ 动特性：输入量和输出量都随时间变化时的关系。数学关系式中有变量对时间的微分。

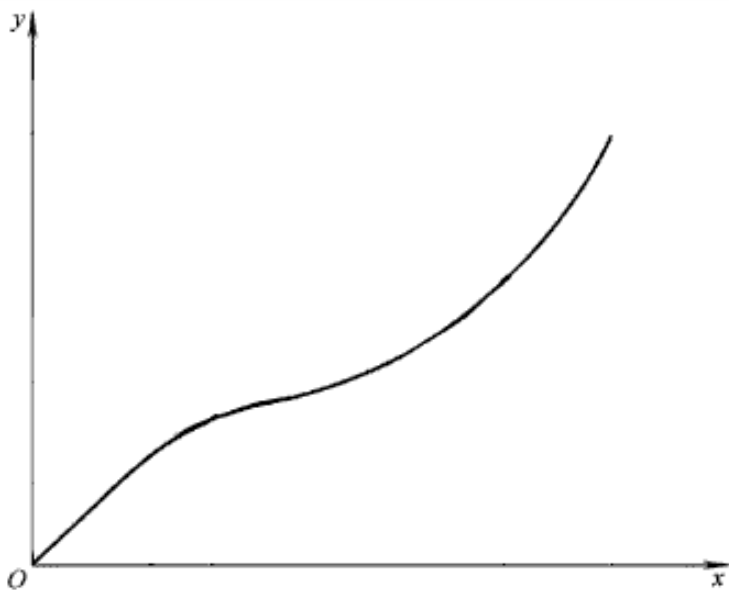
静特性

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中 y ——输出量;
 x ——输入量;
 a_0 ——零点输出;
 a_1 ——理论灵敏度;
 $a_2、a_3 \cdots a_n$ ——非线性项系数。

- ❖ 变换函数是描述静特性的数学方程（理论的、理想的）
- ❖ 结构和形式是在分析的基础上建立的
- ❖ 参数通过实际标定确定，统计分析、曲线拟合等
- ❖ 大多数测量元件： $y=kx$

灵敏度

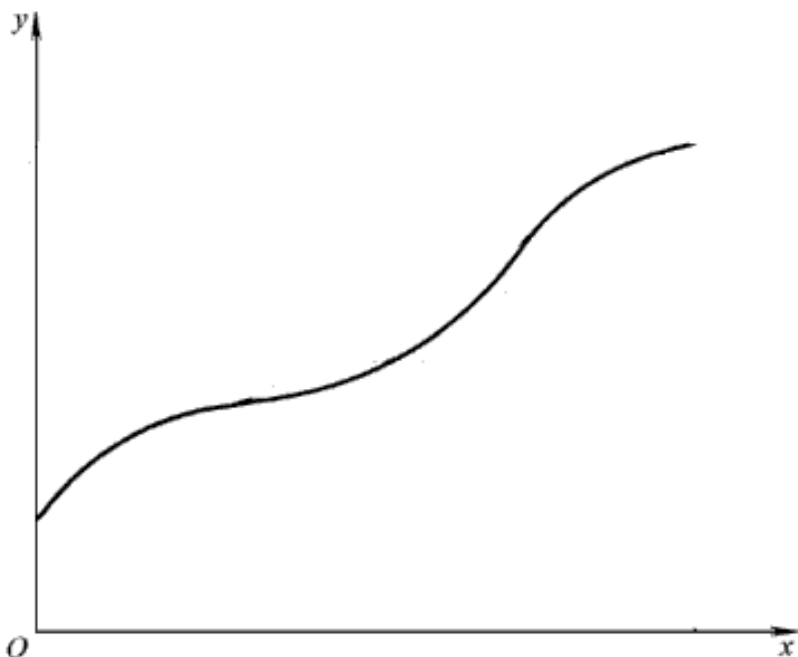


- ❖ 灵敏度：输出量的微小增量与输入量微小增量的比值，变换函数的一阶导数或静特性曲线的斜率。
- ❖ 非线性的，不同的点有不同的灵敏度。
- ❖ 线性的静特性，灵敏度不变。

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

线性度

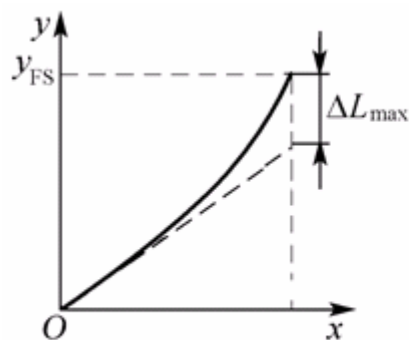
❖ 线性度或非线性误差：
静特性曲线偏离某种拟合直线或规定直线的程度。



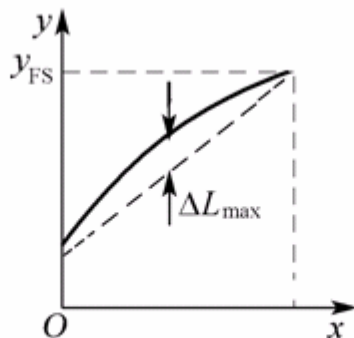
$$\epsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

线性度

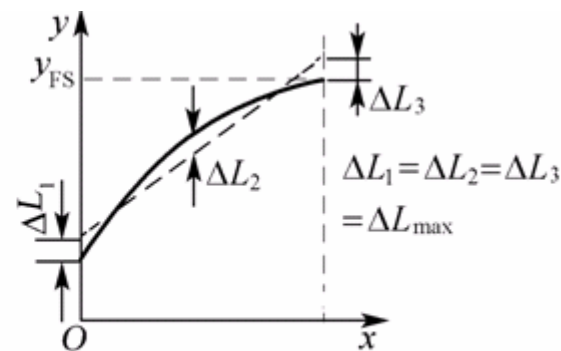
❖ 在非线性误差不太大的情况下，通常采用直线拟合的方法来线性化。常用的直线拟合方法有理论拟合、端点拟合和端点平移拟合等。采取不同的方法选取拟合直线，可以得到不同的线性度。



(a)理论拟合

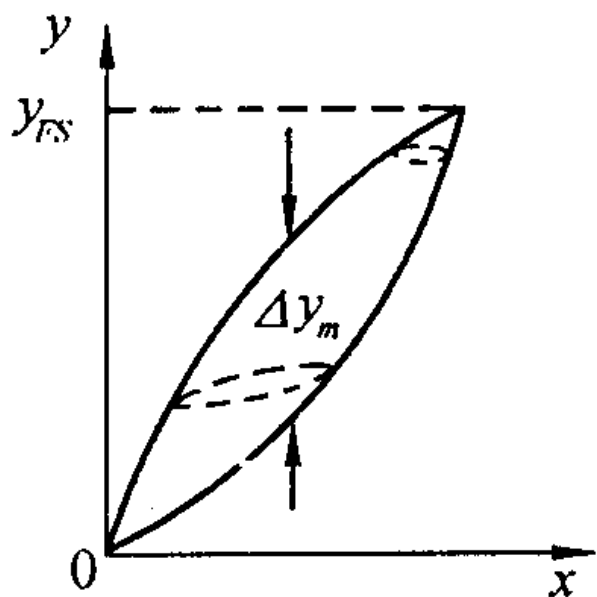


(b)端点拟合



(c)端点平移拟合

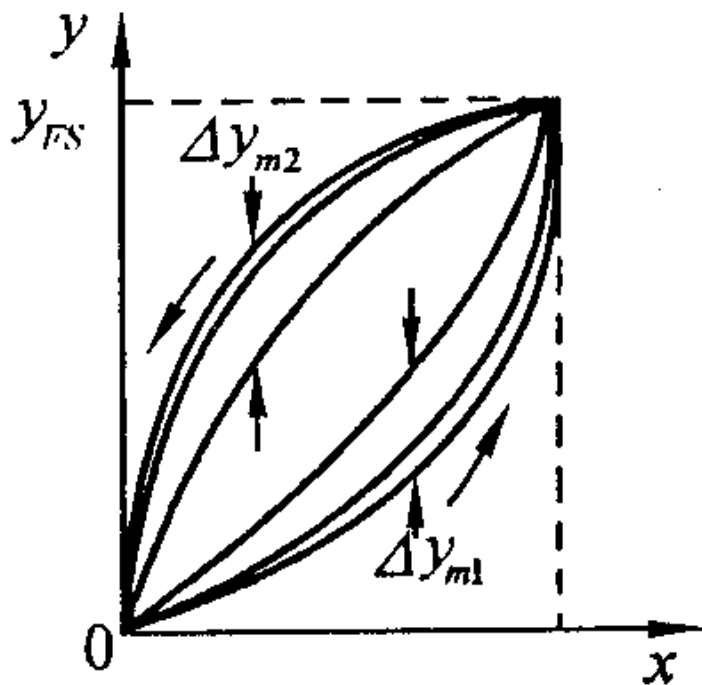
滞环



$$\epsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

- ❖ 测量元件正反行程中输入输出曲线不重合的现象称为滞环特性或迟滞，它由上升分支和下降分支组成。对应同一输入量，两个分支所对应的输出不同。滞环误差的计算同上。
- ❖ 机械部分摩擦和间隙，敏感材料结构缺陷，磁性材料磁滞

重复性误差



$$\epsilon_R = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

❖ 输入按同一方向作全量程连续多次变化时的误差

静态误差

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

- ❖ 全量程范围内，测量元件的输出值与理论值的偏离误差
- ❖ 求取方法：测试数据与理论输出值的标准偏差
- ❖ 取 2σ 或 3σ 作为测量元件的静态误差
- ❖ 静态误差是一项综合性指标，包括了：非线性误差、迟滞误差、重复性误差等单项误差。
- ❖ 精度：测量的精确程度。真实值与测量值之差
- ❖ 绝对误差：测量值与被测量真值之差：测量值-真实值，有单位、有正负
- ❖ 相对误差： $|\text{测量值}-\text{真实值}|/|\text{测量值}| \times 100\%$ ，表示测量结果的准确程度

其它静态参数

❖ 测量范围和量程

- 测量元件能够满足规定精度时检测到的最小输入量和最大输入量，成为测量范围
- 测量元件能够满足规定精度时检测到的最大输入量和最小输入量之差，称为量程
- 如果被测量最小输入量为零，可以不做区分，如力矩、速度等

其它静态参数

❖ 分辨率和分辨力

- 分辨率和分辨力都是表示传感器能检测被测量的最小值的性能指标。
- 分辨率是以满量程的百分数来表示，无量纲；分辨力是以最小量程的单位值来表示，有量纲。
- 在最小输入处的分辨力被称为阈值
- 机械运动的摩擦、电路中的储能元件、AD位数

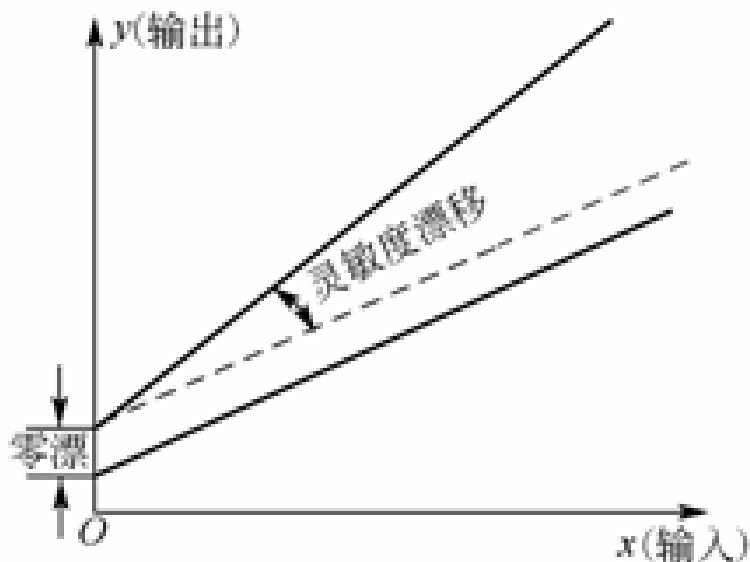
其它静态参数

❖ 稳定性

- 稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。

❖ 漂移

- 漂移是指在外界的干扰下，在一定时间间隔内，传感器输出量发生与输入量无关的或不需要的变化。
- 漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。



静态参数

- ❖ 灵敏度
- ❖ 线性度
- ❖ 滞环
- ❖ 重复性误差
- ❖ 静态误差
- ❖ 测量范围和量程
- ❖ 分辨率和分辨力
- ❖ 稳定性
- ❖ 漂移

测量元件的动特性

❖ 测量元件的输入量由一个数值变到另一个数值的过程中呈现的特性就是动特性。数学式中含有变量对时间的导数。

描述

微分方程

传递函数

频率特性

方法

瞬态响应法

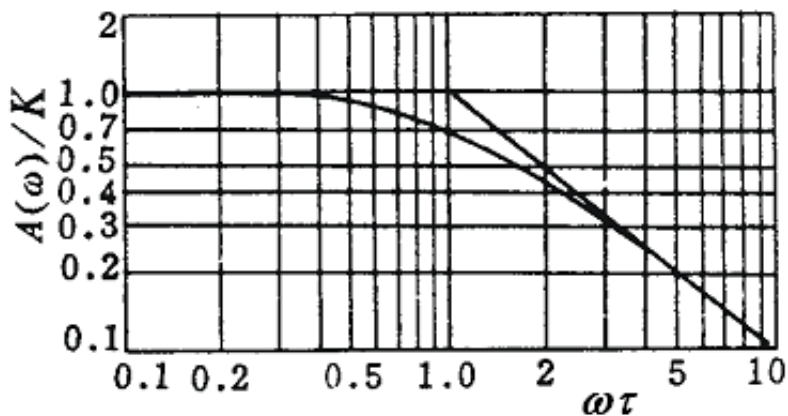
频率响应法

冲击响应法

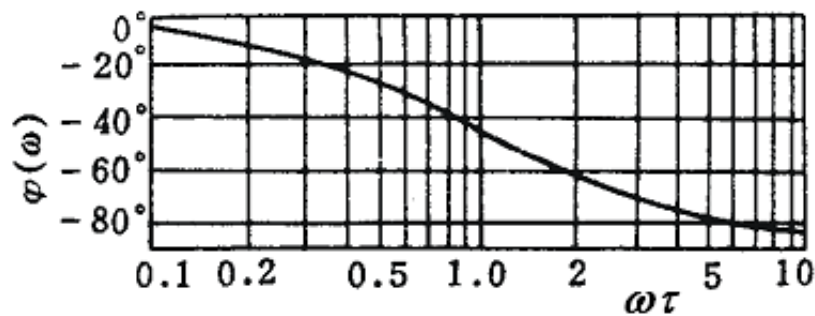
测量元件的动特性

- ❖ 一阶测量元件（惯性环节）
- ❖ T 为时间常数， T 越小，响应速度越快。

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T}$$



(a)



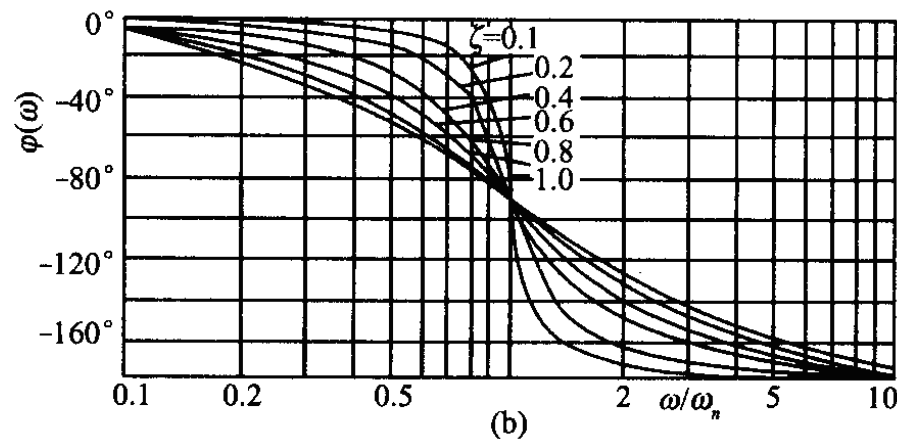
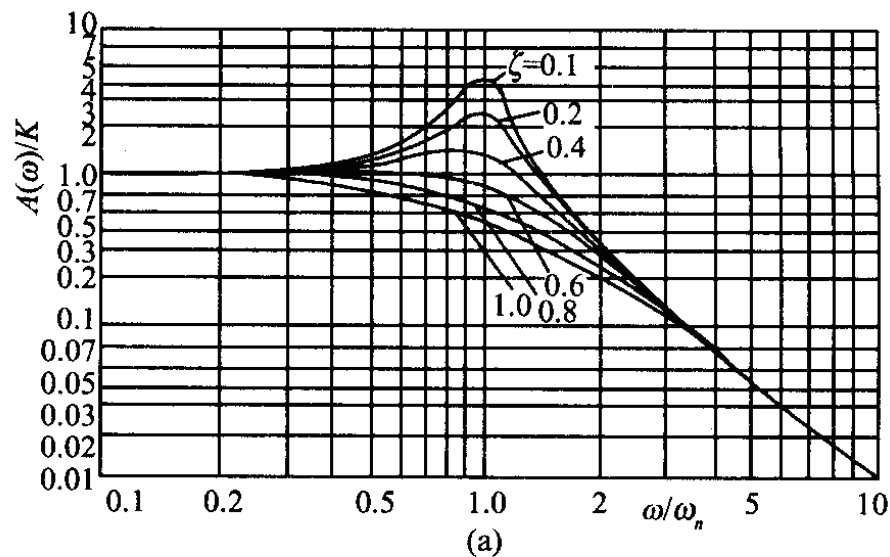
(b)

测量元件的动特性

❖ 二阶测量元件

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t)$$

$$H(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$



测量元件的动特性



- ❖ 零阶测量元件：传递函数是常数 K 。
- ❖ 通常情况下，控制系统中，测量元件都可看成是零阶测量元件——比例环节。
- ❖ 从时域角度看，测量元件的动态特性应具有足够快的响应速度和适当的阻尼比。从频域角度看，测量元件应当具有足够宽的频带宽度。
- ❖ 最大超调量、上升时间、调整时间、频率响应范围、临界频率、带宽等

选择测量元件时的注意事项

- ❖ 静态精度要求
 - 量程、精度、分辨率
- ❖ 动态性能要求
 - 频域：测量的带宽高于系统带宽的3-5倍
 - 时域：延时短、响应快，输出更新频率
- ❖ 环境要求
 - 温度、湿度、化学度、冲击振动等
- ❖ 接口要求
 - 信号形式，外形结构尺寸
- ❖ 熟悉程度
 - 尽量使用熟悉的元件
- ❖ 其它要求
 - 价格、可靠性、维护等
- ❖ **原则：满足指标要求的前提下用最成熟的测量元件**

Contents



学习重点



作用、定义、组成和分类

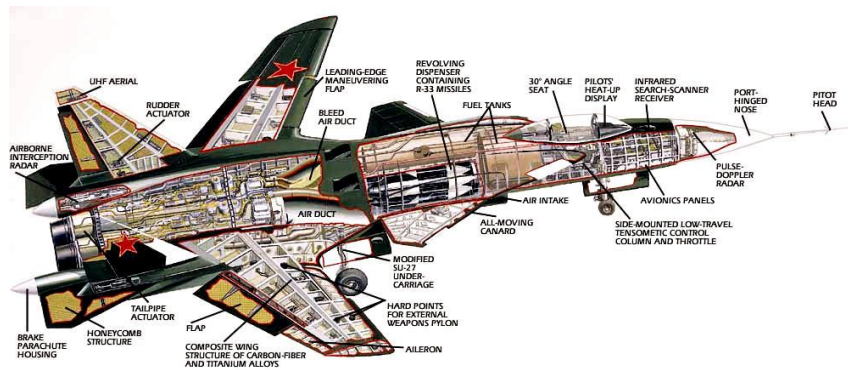


元件特性

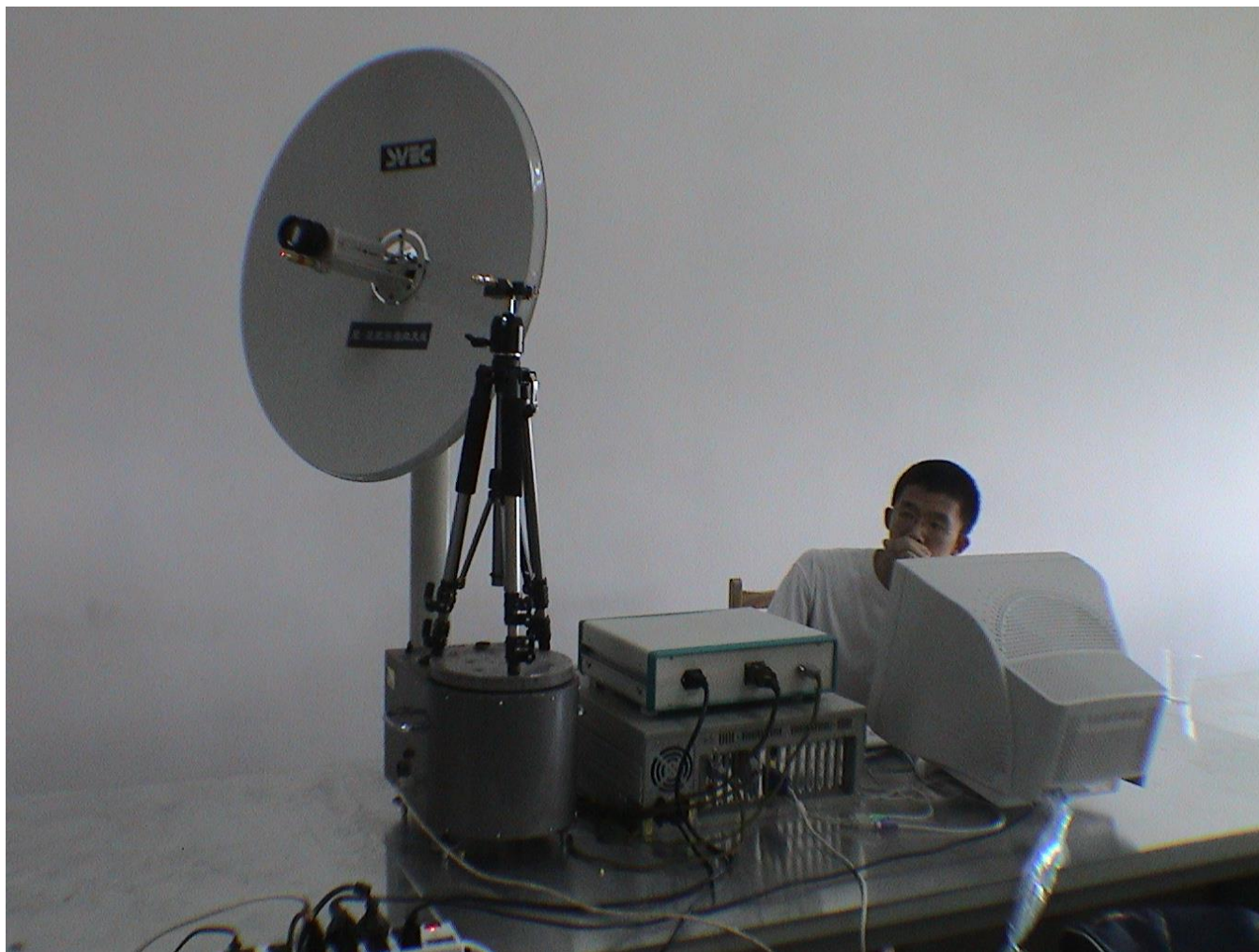


讨论

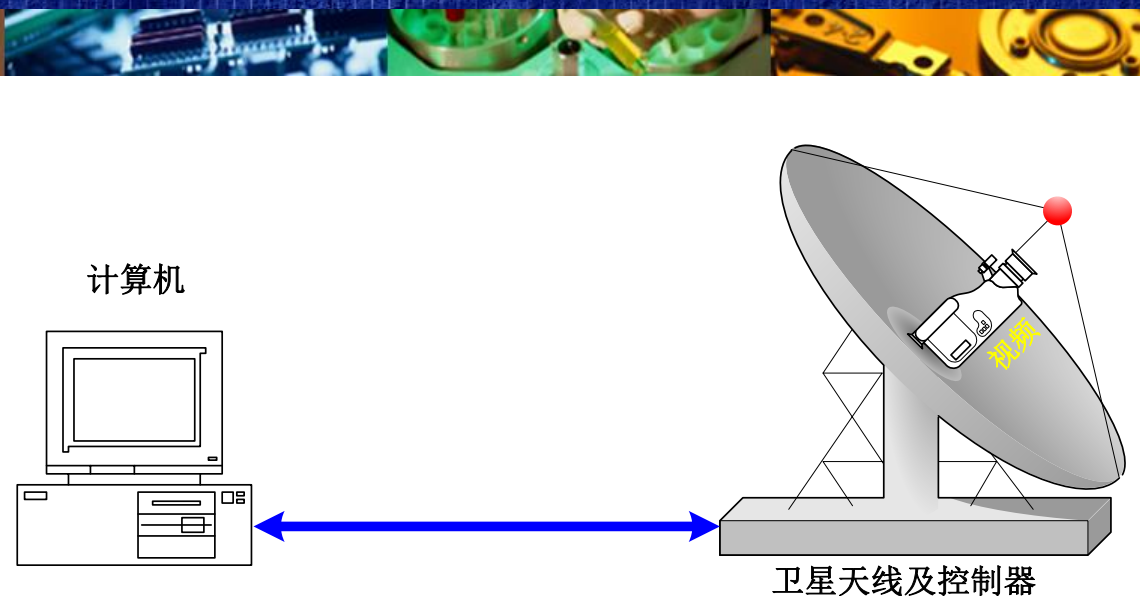
讨论：系统中的测量元件



星星跟踪指向天线系统

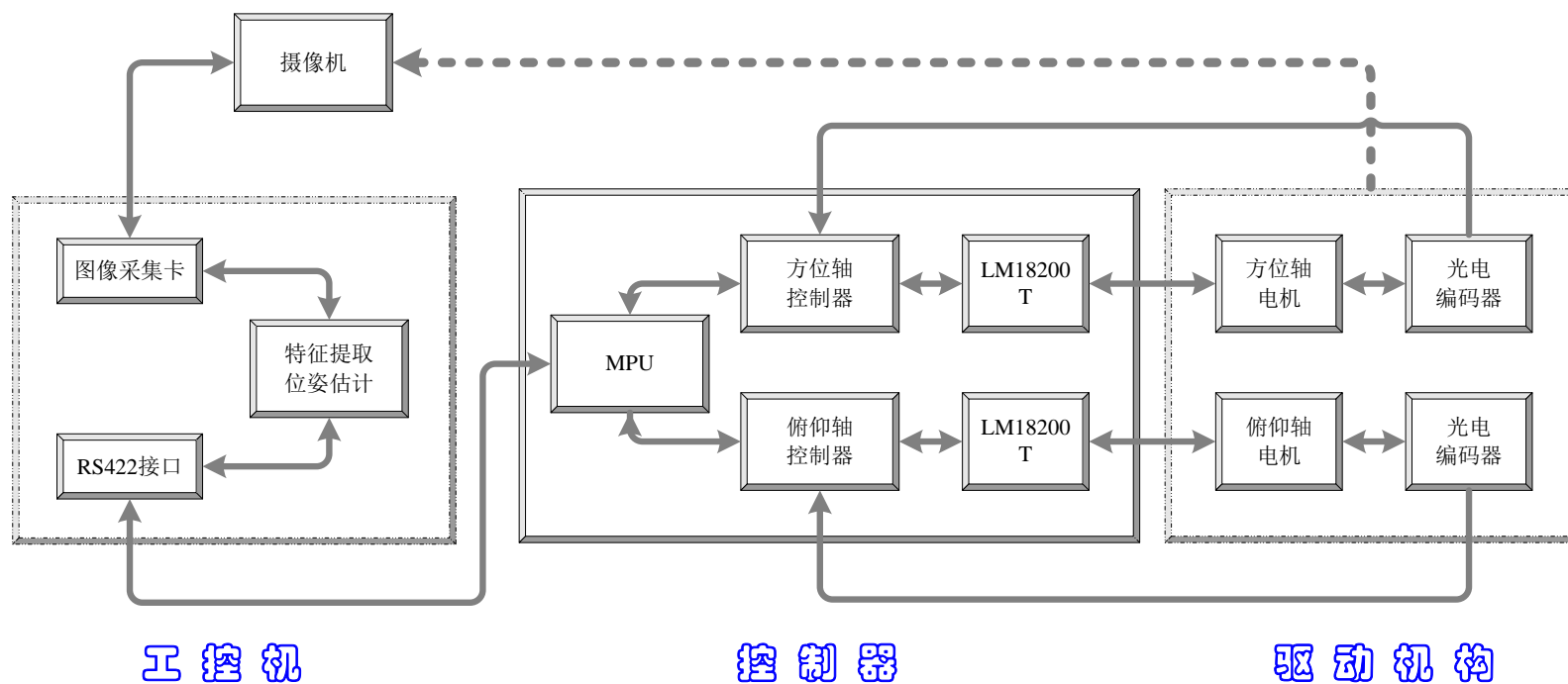


星星跟踪指向天线系统



- ❖ 开环指向精度 优于 0.2°
- ❖ 闭环跟踪指向精度 优于 $0.03^\circ(38)$
- ❖ 最大跟踪角速率 $\pm 2^\circ/\text{s}$
- ❖ 最大转向速率 $\pm 4^\circ/\text{s}$
- ❖ 稳态功耗 $\leq 40\text{W}$
- ❖ 驱动机构具有位置保持能力，单轴在任意时刻不加外力时可以保持位置不变，同时系统有足够静刚度抵御外来干扰的能力。

星星跟踪指向天线系统

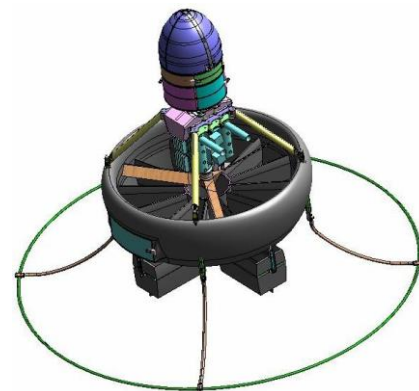


无人机控制系统

涵道式旋翼无人机功能与指标

❖ 无人机功能

- 快速部署的低成本无人通信中继平台
- 体积小、重量轻，便于多种形式的运输
- 操控简捷，利于快速部署
- 适应多种战场环境，抗风扰能力强
- 具备垂直起降功能，适合复杂地形部署
- 机动能力强，指控作用距离长
- 具备高精度巡航和定位悬停功能
- 多种控制模式，具备自主飞行能力

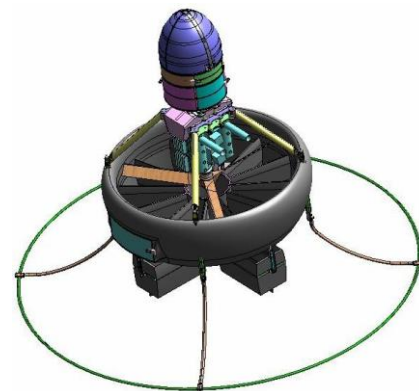


无人机控制系统结构

涵道式旋翼无人机功能与指标

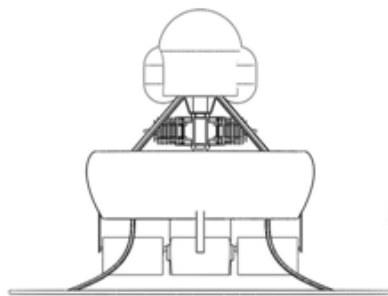
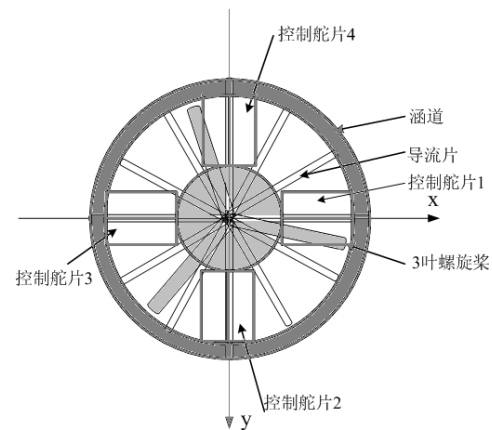
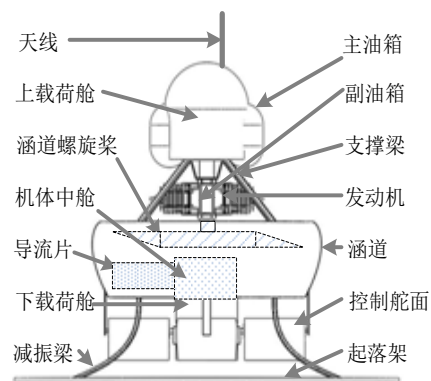
❖ 技术指标

- 航线精度：50m
- 着陆精度：5m
- 作战半径：10km
- 续航时间：60min
- 最大飞行速度：70km/h
- 最高飞行高度：1300m
- 任务载荷：20kg
- 指挥作用距离：10km
- 抗风能力：12m/s

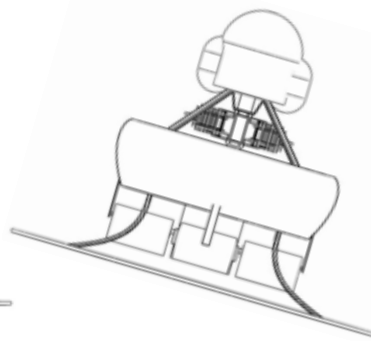


无人机控制系统结构

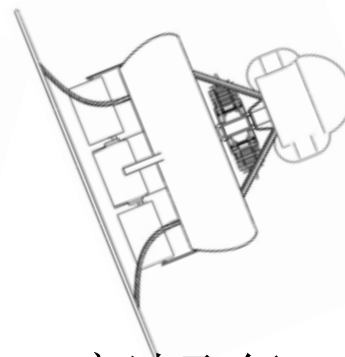
无人机结构



悬停

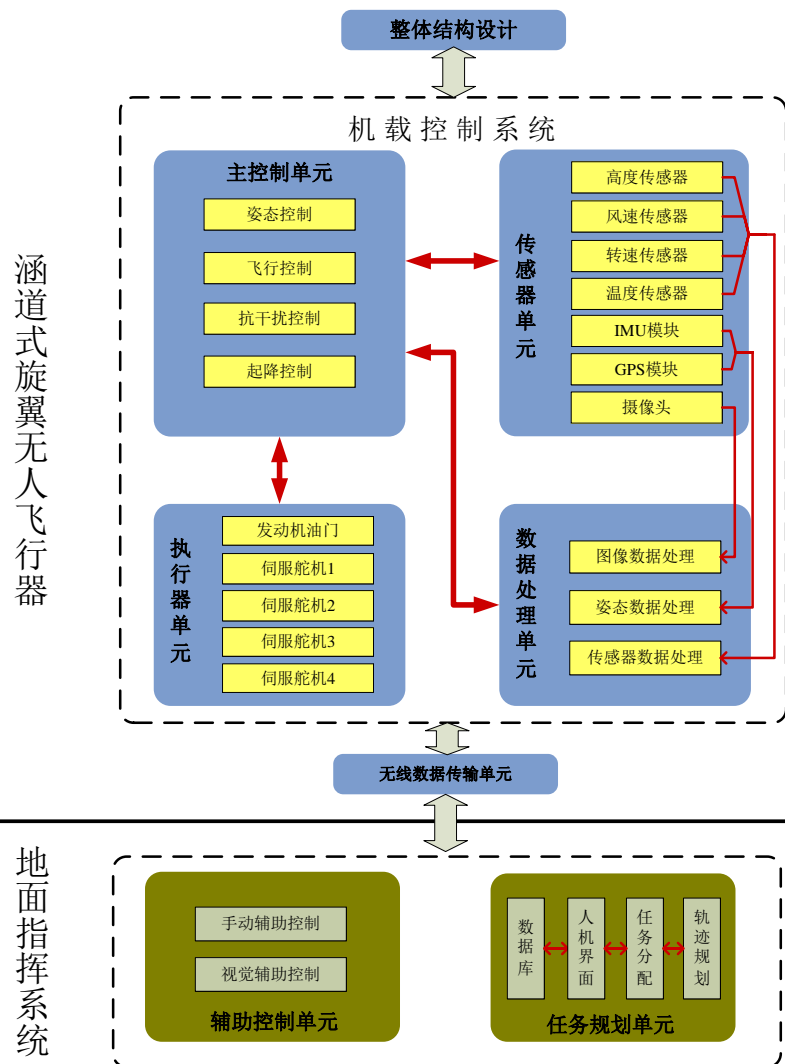


巡航飞行



高速飞行

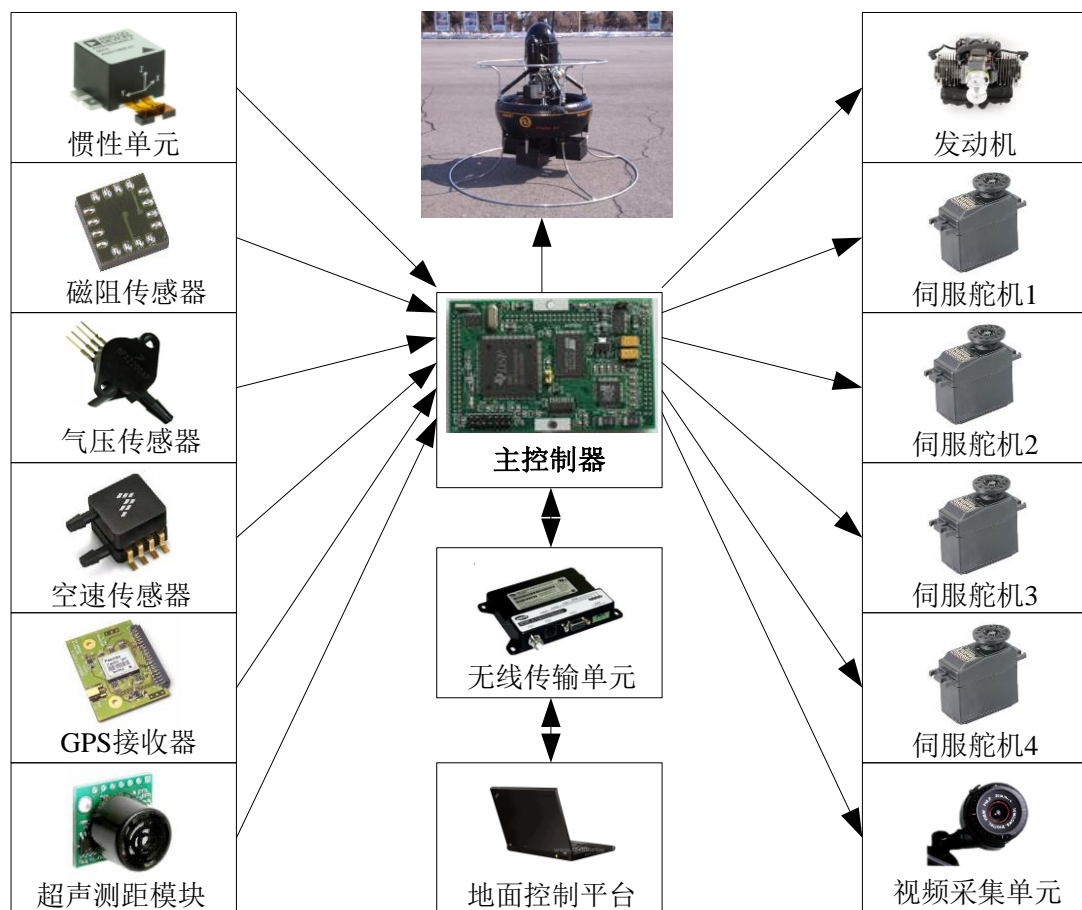
无人机控制系统结构



无人机控制系统结构

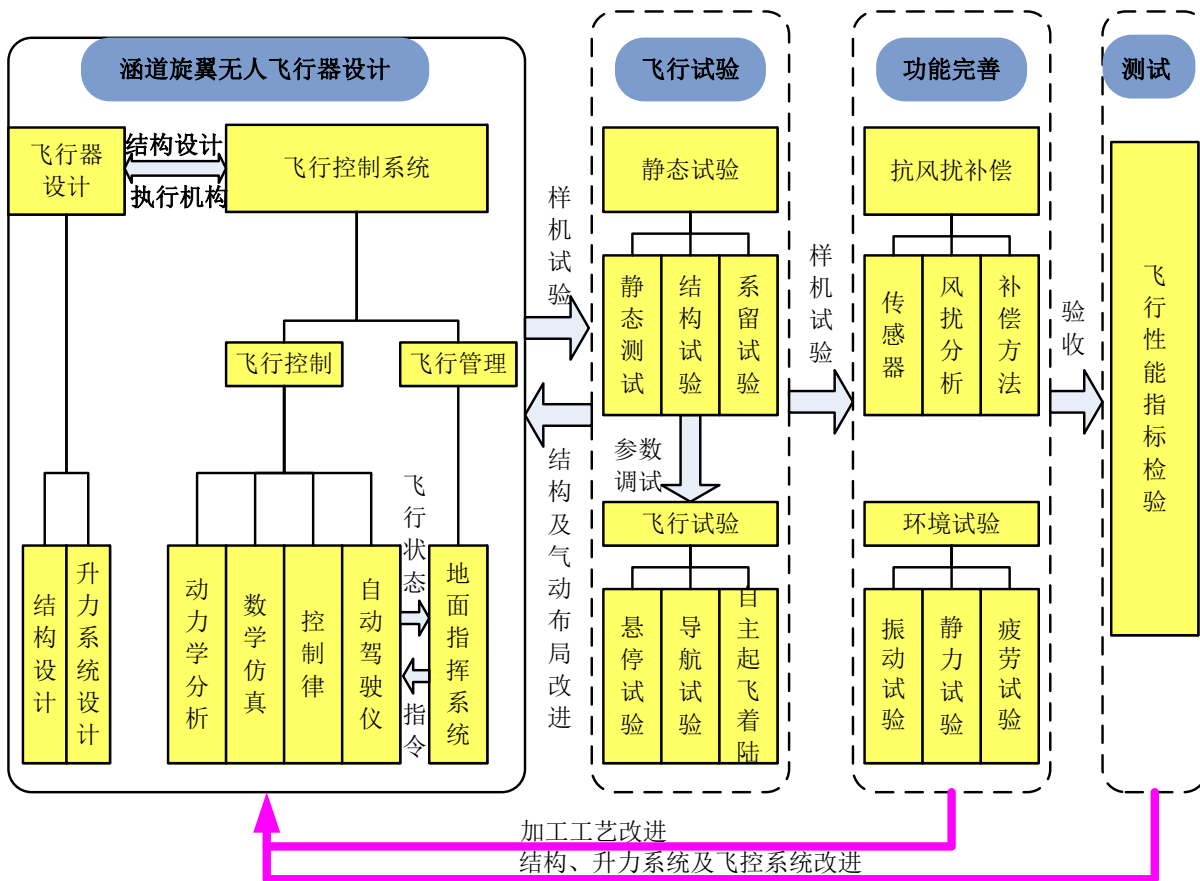
- ❖ 控制单元
- ❖ 传感器单元
- ❖ 执行器单元
- ❖ 数据处理单元
- ❖ 数据传输单元
- ❖ 任务规划单元
- ❖ 辅助控制单元

控制系统关键部件



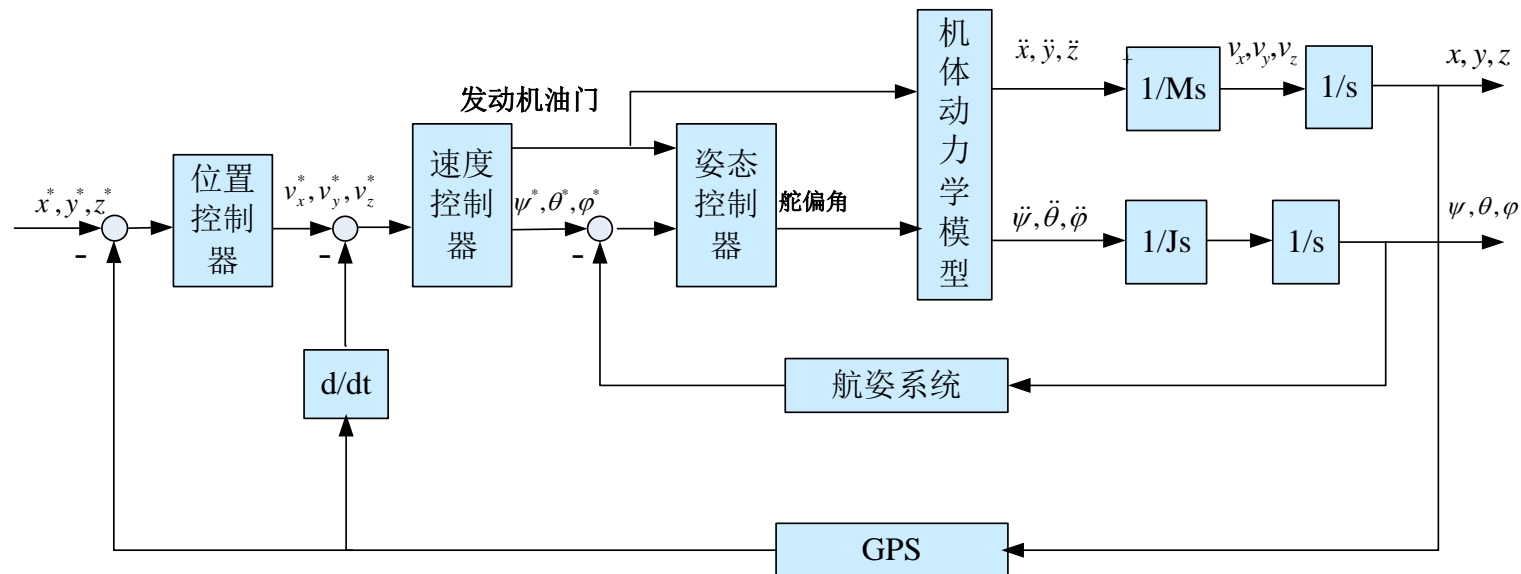
飞控系统简介

系统实施步骤

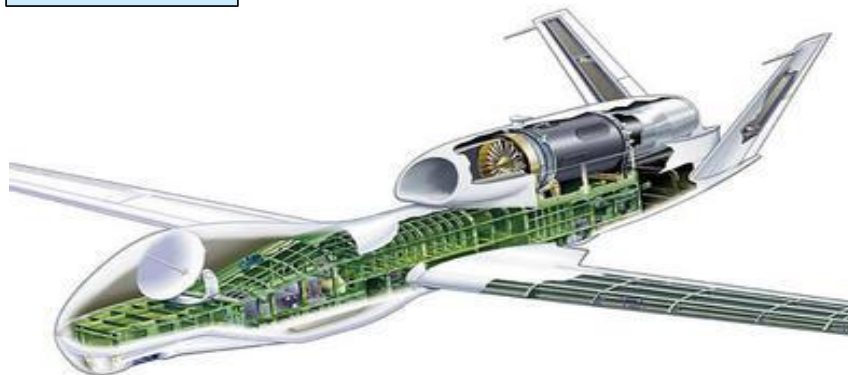


飞控系统简介

控制回路



- ❖ 姿态控制回路
- ❖ 速度控制回路
- ❖ 位置控制回路



飞控系统简介

系统中的不确定性

- ❖ 飞行器实际系统的设计普遍存在不确定性问题。
- ❖ 综合考虑各种不确定性对无人机的影响，以获得稳定的飞行性能。
- ❖ 为了保证涵道旋翼飞行器控制效果，设计反馈控制器使得在参数变化和阵风干扰时，姿态系统仍能保持稳定。

- 建模误差
- 工况变化
- 环境干扰

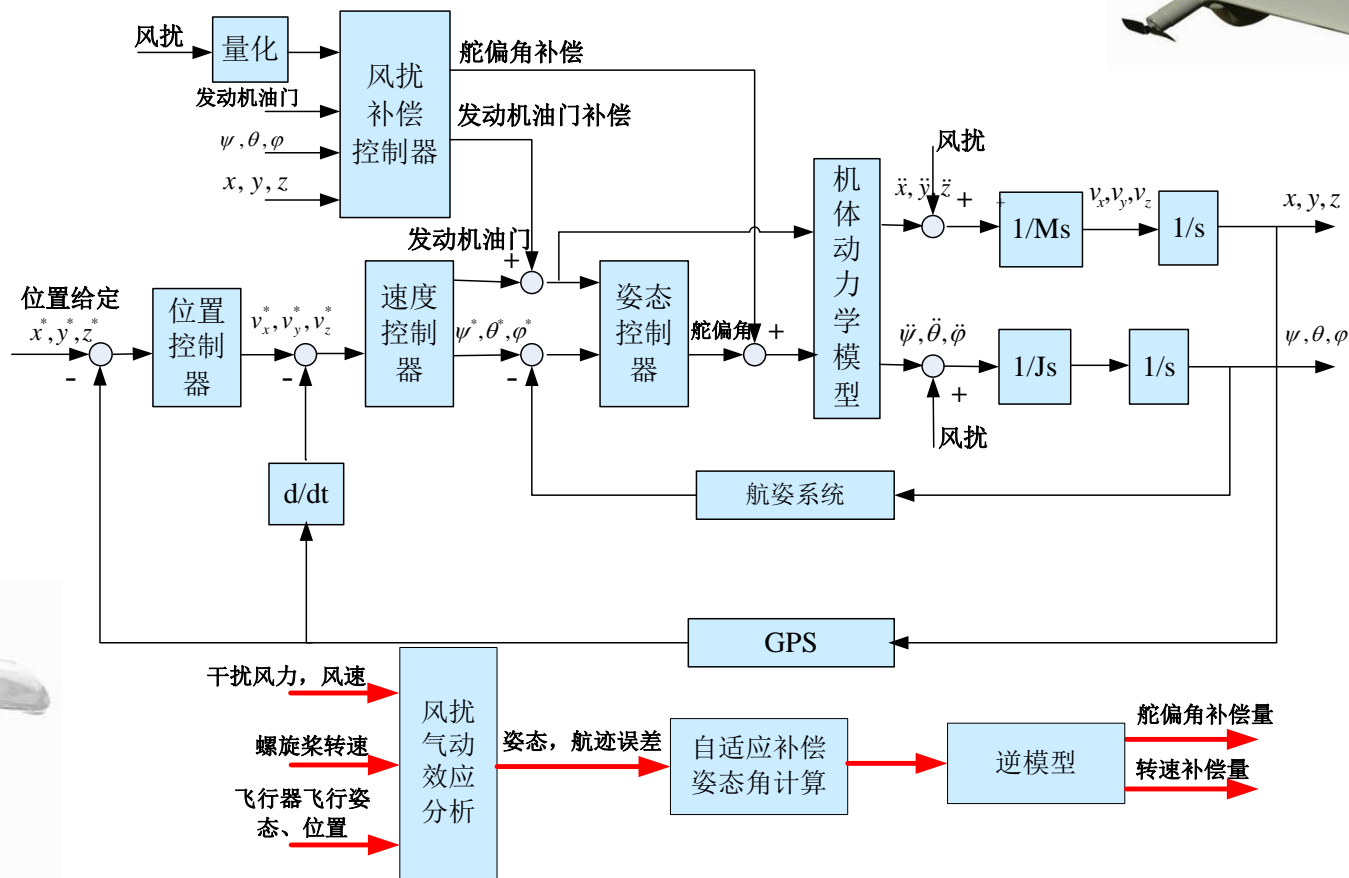


$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u + \Delta X_u & 0 & -g \\ M_u + \Delta M_u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_\delta + \Delta X_\delta \\ M_\delta + \Delta M_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_q$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & 0 & -g \\ M_u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_\delta \\ M_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_q + \begin{bmatrix} X_w \\ M_w \\ 0 \end{bmatrix} w$$

飞控系统简介

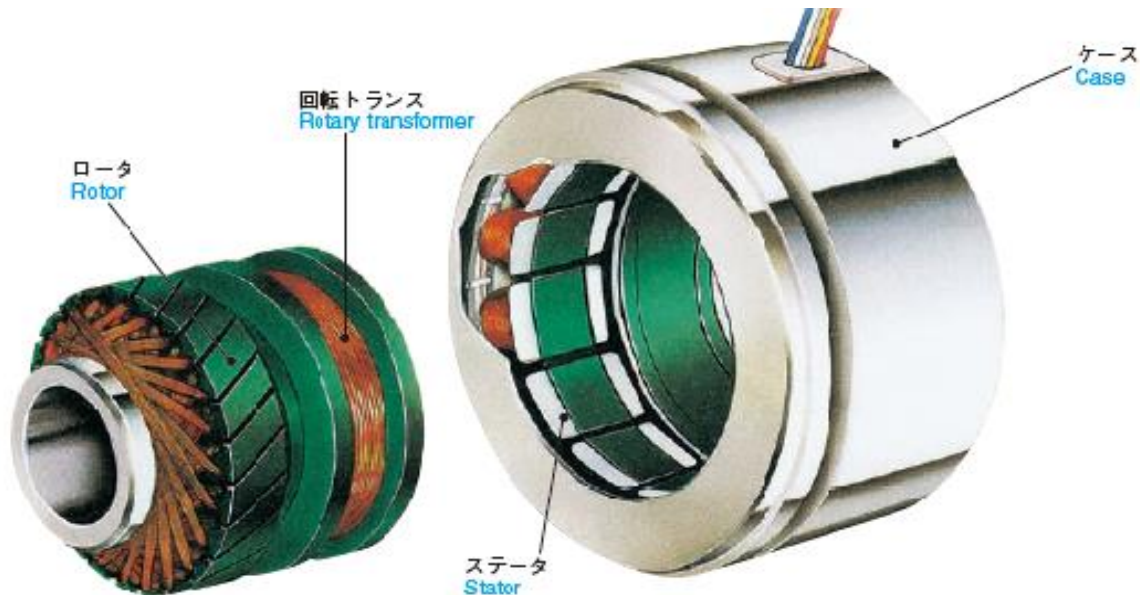
侧风干扰补偿



下节课内容

旋转变压器

请复习变压器
器相关知识



Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

