



# 智能系统控制实践(I)

## — 绪 论



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



本课程学习微信群

群聊：2023 智能系统控制实践



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



# 目 录

## 1. 为什么要学习这门课程?

--课程背景、内容与意义

## 2. 如何学习这门课程?

--课程特点与学习指南

--控制元件发展趋势

## 3. 磁场/磁路基础知识

--磁场基本物理量

--磁路基本定律

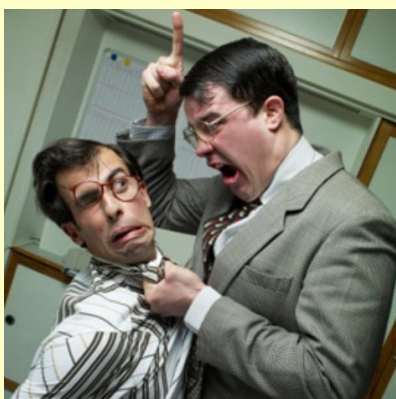
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程?

--课程背景、内容与意义

### • 什么是控制(Control)?



• **控制**: 主体按照给定的条件和目标, 对客体施加影响的过程和行为。即: 主体对客体施加影响, 按照希望的方式改变或保持装置或体系内的变量。

• **控制的要素**: 主体, 客体, 目标, 手段。

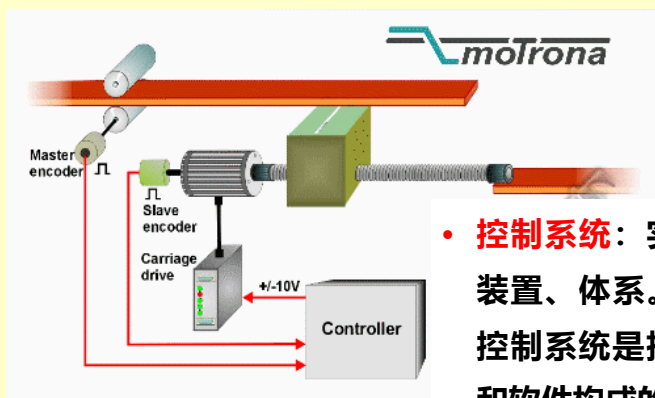
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

—课程背景、内容与意义

### • 什么是控制系统(Control system)?



- **控制系统**：实现控制过程的装置、体系。常见的自动化控制系统是指由相应的硬件和软件构成的机构、设备。



## 1. 为什么要学习这门课程？

—课程背景、内容与意义

### • 控制系统构成：

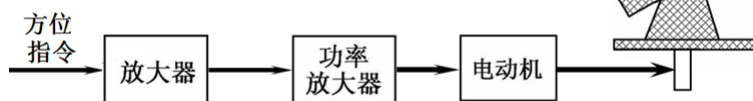
对目标方位/俯仰跟踪的弹/炮发射架系统。



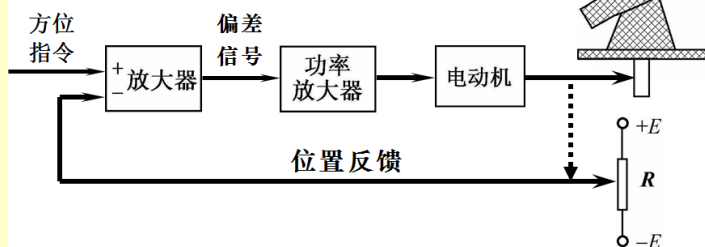
## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

方案1:



方案2:

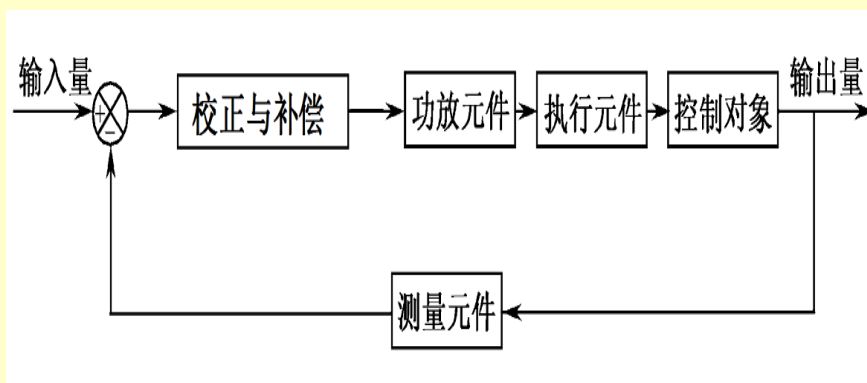


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义



控制系统功能框图

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 为什么要学习这门课程?

——课程背景、内容与意义

• 2. **执行元件:**

驱动控制对象, 改变被控量 (输出量)。

伺服控制系统: 直流电机、交流电机, 液压马达.....

过程控制系统: 电磁阀门、风机/泵、加温装置.....



1. 为什么要学习这门课程?

——课程背景、内容与意义

• 3. **功放元件:**

将控制信号幅值放大, 输出较大驱动功率以驱动执行  
元件动作。

线性功放/开关功放

整流、斩波、交交变换、逆变

驱动器、逆变器



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

### • 1. 测量元件:

将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量（最常见为：电压量）。

测量元件一般称为传感器，过程控制中又称为变送器。

物理传感：力传感器、接触传感器、视觉传感器.....

位置传感：光电编码器、电磁测角、电位器.....



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

### • 4. 校正元件（补偿元件）：

实现控制运算的硬件和软件。接收指令和测量信号，实现控制信号的运算并对功放环节输出驱动指令，确保系统达到预期响应。

模拟控制、数字控制、混合控制

PID控制, 自适应控制, 智能控制.....



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

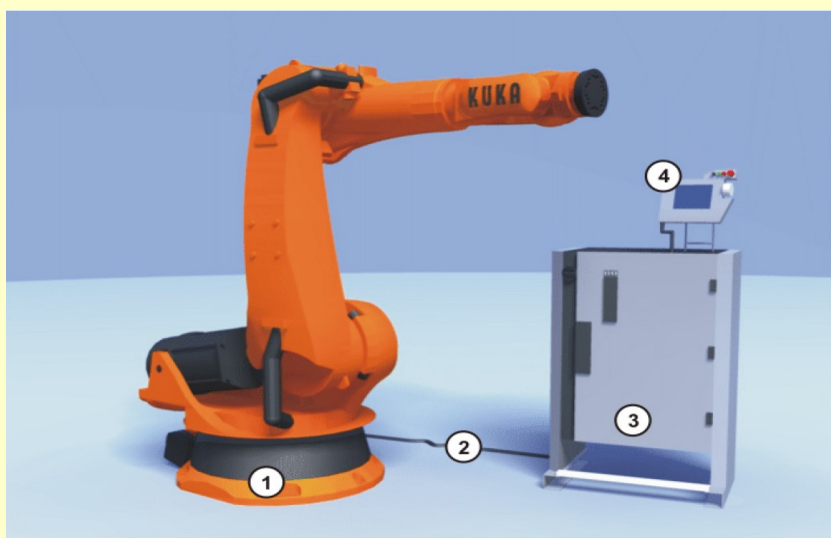


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

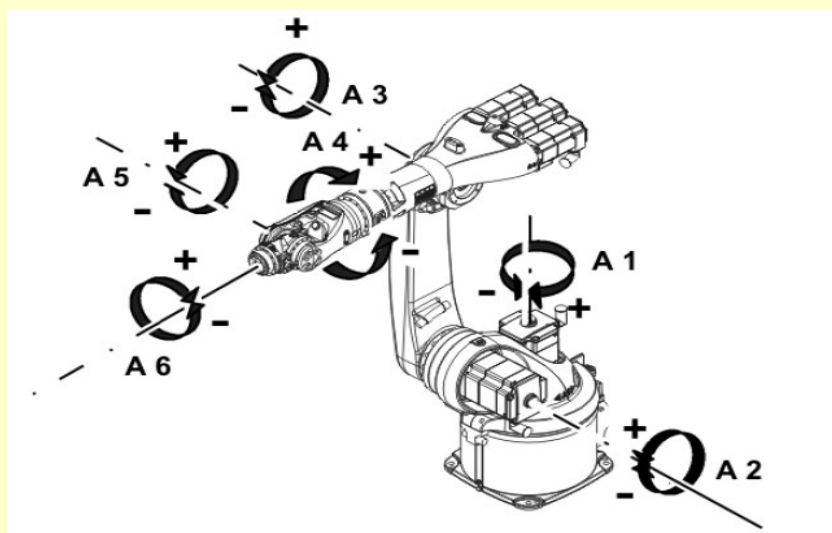


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

--课程背景、内容与意义



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

--课程背景、内容与意义



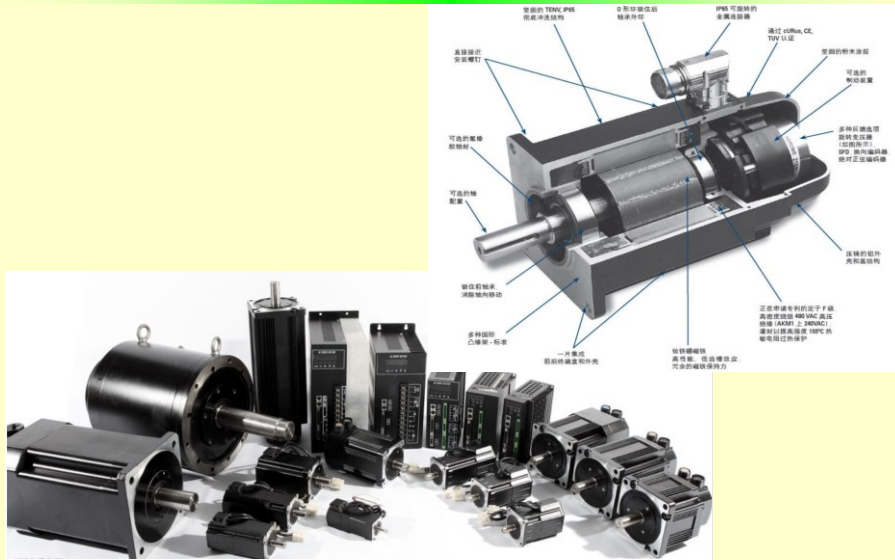
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





## 1. 为什么要学习这门课程？

### —课程背景、内容与意义

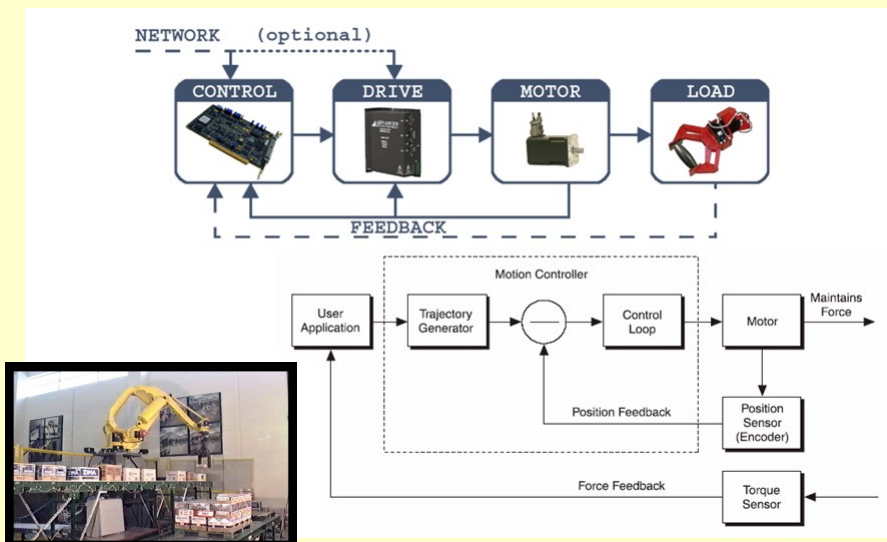


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

### —课程背景、内容与意义



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

**执行元件：** 直流电机、交流电机，液压马达.....

**测量元件：**

• 力传感器、接触传感器、视觉传感器.....

• 光电编码器、电磁测角、电位器.....

**功放线路：** 驱动器、逆变器.....

**校正与补偿：** PID控制, 自适应控制, 智能控制.....

本  
课  
程  
学  
习  
内  
容

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

### 常见的驱动电机类型

#### 力矩/速度/位置控制用电机

- 直流伺服电机
- 感应伺服电机
- 无刷直流伺服电机
- 永磁同步伺服电机
- 步进电机



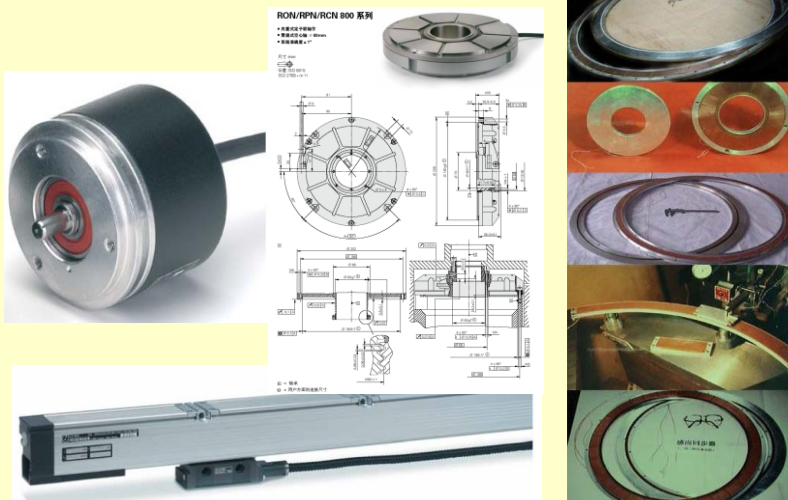
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

### • 自动控制中的位置传感器



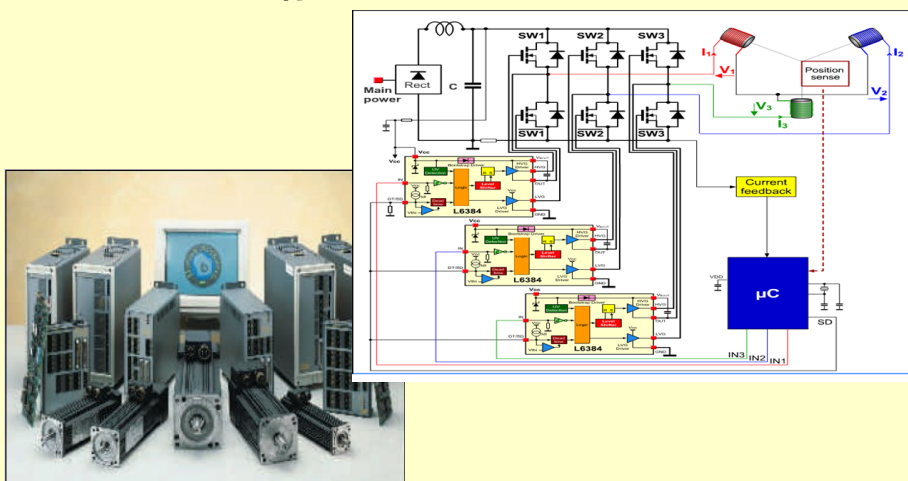
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

——课程背景、内容与意义

### • 电机与驱动控制电路

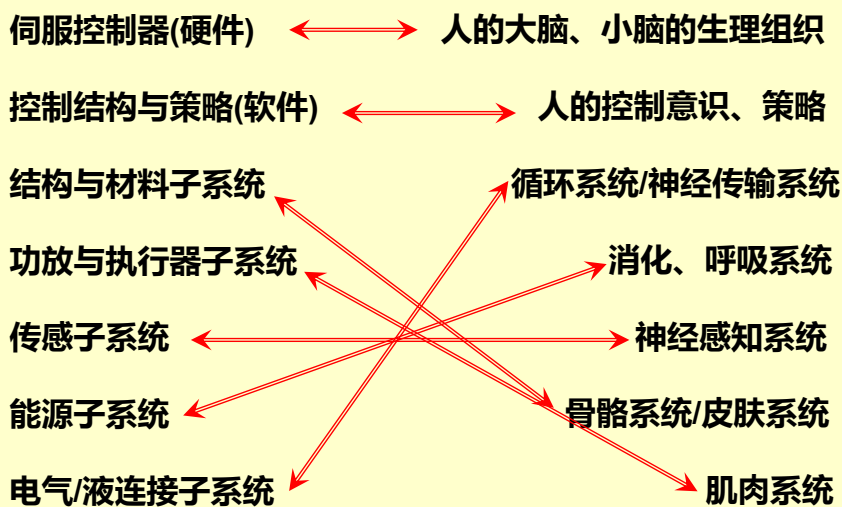


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程?

--课程背景、内容与意义



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目 录

### 1. 为什么要学习这门课程?

--课程背景、内容与意义

### 2. 如何学习这门课程?

--课程特点与学习指南

--控制元件发展趋势

### 3. 磁场/磁路基础知识

-磁场基本物理量

-磁路基本定律

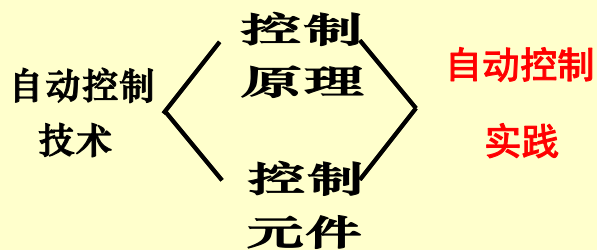
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. 如何学习这门课程？

- 自动控制技术：

自动控制原理 + 自动控制元件及线路



## 2. 如何学习这门课程？

### 目的：

在控制系统研制过程中，对自动控制系统的构成、所需传感、执行元件及驱动线路的选择和使用具备系统的分析能力。具备与电气、机械结构、计算机等其他专业技术人员进行交流与协作的能力。

### 任务：

掌握控制系统中主要的传感、执行部件和线路的原理、特点和应用注意事项。



## 2. 如何学习这门课程？

### 本课程特点

电子、信息技术迅速发展，信息的检测和信号的传输、变换都是以电压、电流的形式进行。在控制系统的检测控制和驱动环节中，信息绝大多数都是以电信号为载体。

在执行环节方面，相对于热机、液压、气动等运动执行器，电机执行器以其显著的优点而成为控制系统实现的首选，现代运动控制系统绝大多数为电机伺服系统。



## 2. 如何学习这门课程？

### 本课程特点

- 课程知识体系是多学科交叉，涉及知识面广；特别是与电气工程技术具有紧密的联系，要求具有良好的电路、电子学科知识基础，特别是电路理论的基础。
- 本课程核心是掌握不同自控元件及线路的原理、特点和应用方法，需要将所学的大学物理知识与本课程的知识融会贯通，用已有知识体系结合工程实践进行思考。



## 2. 如何学习这门课程？

### 本课程特点

- 课程学习思考举例：
  - 1, 运动控制的实质
  - 2, 系统运行中的物理原理



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. 如何学习这门课程？

### 本课程特点

- 有限的课时内要掌握大量的自控元件及线路的原理、特点和应用方法，需要在课外及时复习掌握所学知识，充分阅读课外资料，积极思考，才能跟上教学进度。
- 充分利用网络资源，针对学习过程中的各种疑问，专题检索获得答案；结合网络资源重点掌握关键的概念、应用特点。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. 如何学习这门课程？

### 课程教学

#### - 本课程学习方式：

课堂讲授

课程实验

作业与报告

闭卷考试

#### - 考试要求：采用累加式考核方式

**总成绩100分：**

**考试 60分；课程实验 15分；作业与报告25分。**

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 1. 为什么要学习这门课程？

—本课程的目的与任务

#### 本课程学习的其它功效：

**锻炼学生对复杂系统的分析能力**



姓名：朱镕基

清华大学电机系电机制造专业毕业



姓名：江泽民

上海交通大学电机系毕业

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





## 1. 为什么要学习这门课程？

——本课程的目的与任务

本课程学习的其它功效：

**显著促进学生团结协作**



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 2. 如何学习这门课程？

**将课程所学与自己接触到的自动化实践相结合**

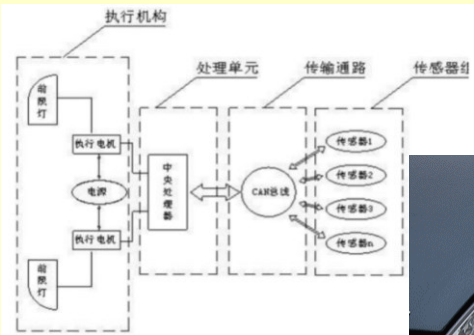


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 如何学习这门课程？

汽车自动转向灯控制：



原理、特点、应用



2. 如何学习这门课程？

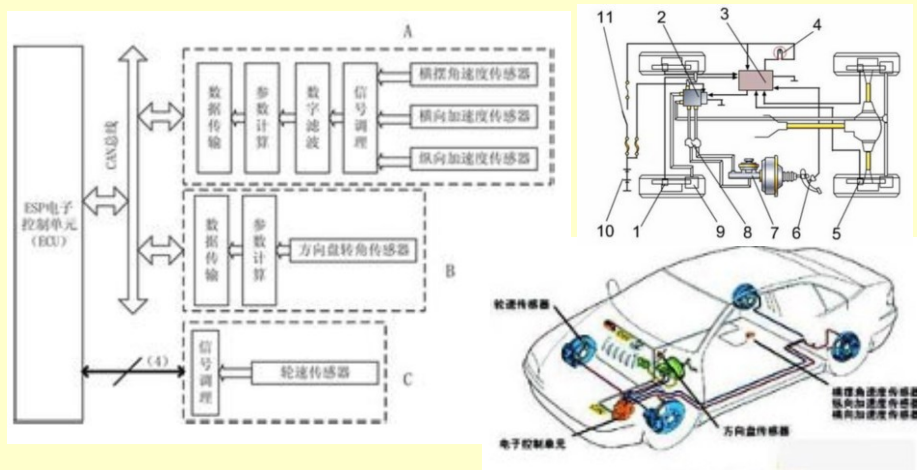
ESP (Electronic Stability Program) 控制：

原理、特点、应用



## 2. 如何学习这门课程？

### ESP (Electronic Stability Program) 控制:



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目 录

### 1. 为什么要学习这门课程？

--课程背景、内容与意义

### 2. 如何学习这门课程？

--课程特点与学习指南

--控制元件发展趋势

### 3. 磁场/磁路基础知识

-磁场基本物理量

-磁路基本定律

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 如何学习这门课程？——控制元件的发展趋势

伴随材料、电子、光学等等学科的发展，新原理、新材料的控制元件不断出现，性能指标不断提升

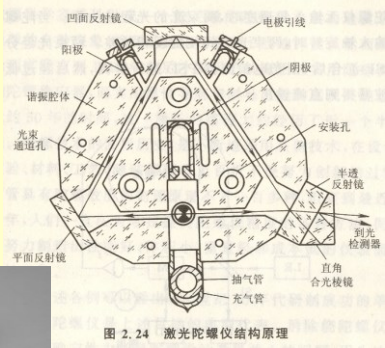
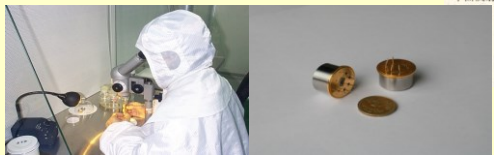
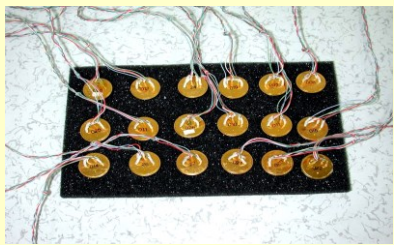


图 2.24 激光陀螺仪结构原理



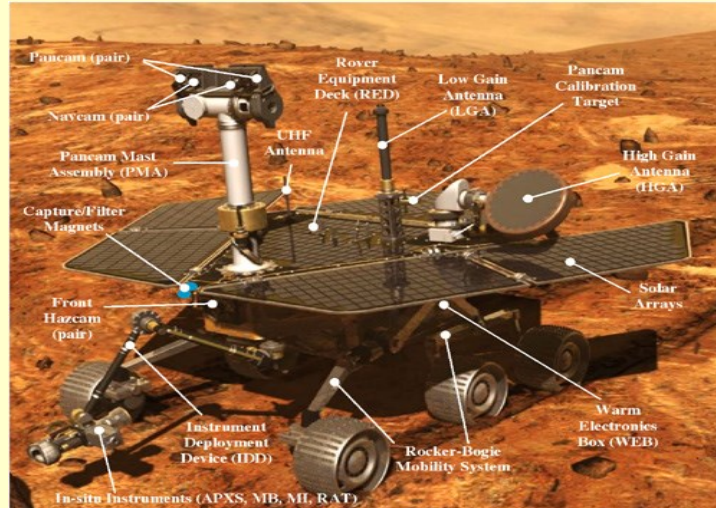
2. 如何学习这门课程？——控制元件的发展趋势

自动控制元件向高度集成化的方向迅速发展



## 2. 如何学习这门课程？——控制元件的发展趋势

### 自动控制元件向多信息融合的自主智能发展



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目 录

### 1. 为什么要学习这门课程？

--课程背景、内容与意义

### 2. 如何学习这门课程？

--课程特点与学习指南

--控制元件发展趋势

### 3. 磁场/磁路基础知识

-磁场基本物理量

-磁路基本定律

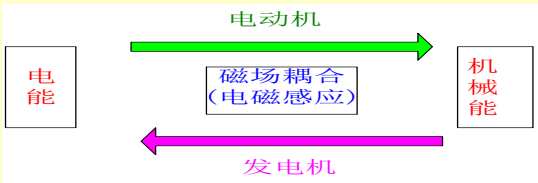
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





3. 磁场基本理论

电磁元件是利用磁场做媒介来实现能量（或信息）转换（或传递）的装置。

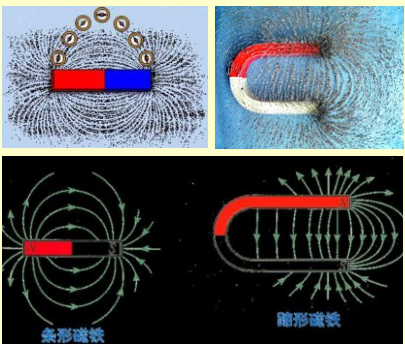
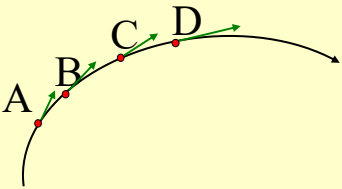


- 磁场产生: { 由永久磁铁产生  
                  由电流产生
- 磁场分类: { 直流磁场  
                  交流磁场



3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

一、磁力线



磁力线（或称磁感线）是用来形象描述磁场分布的假想曲线。磁力线是三维的封闭曲线；磁力线上任一点的切线方向即该点磁场的方向。



### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

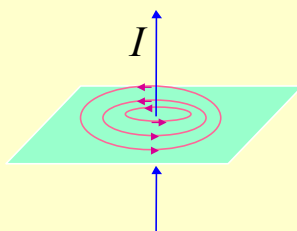
#### 磁力线基本特征：

- 1) 所有磁力线都不交叉；磁力线的相对疏密表示磁场的相对强弱；
- 2) 任何磁场中每一条磁力线都是环绕电流的无头无尾的闭合曲线，即没有起点也没有终点；
- 3) 在任何磁场中，每一条闭合的磁力线的回转方向和该闭合磁力线所包围的电流方向符合右手螺旋法则。

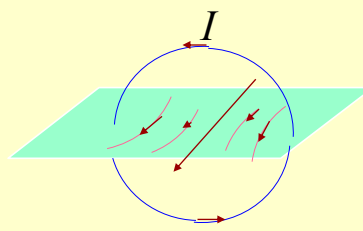
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



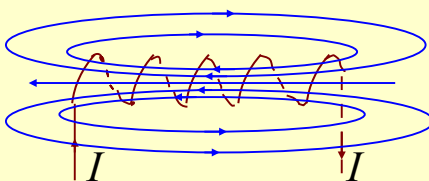
### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量



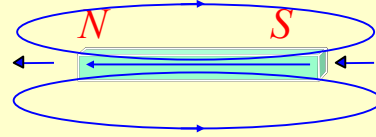
(a) 直线电流磁力线



(b) 圆电流磁力线



(c) 螺线管电流的磁力线



(d) 永久磁铁的磁力线

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

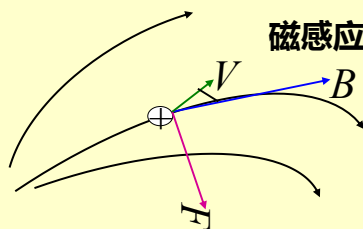


### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

#### 二、磁感应强度 $B$

定义：表示在空间某点磁场强弱和方向的物理量，是一个空间矢量。

通俗的说，磁感应强度为通过某单位面积的磁力线的条数。所以磁感应强度也称为磁密(磁通密度)。



磁感应强度的方向：为该点磁场的方向。

磁感应强度的单位为T（特斯拉）



### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

#### 三、磁通 $\Phi$

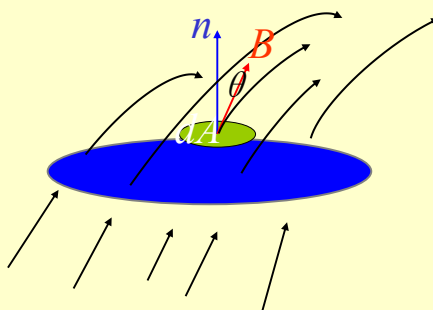
定义：通过磁场中一个给定面  $A$  的磁力线的条数，简称磁通。通过面积  $A$  的磁通量为：

$$\begin{aligned}\Phi &= \int_A B \cos \theta dA \\ &= \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}\end{aligned}$$

在均匀的磁场中磁通量：

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$$

磁通单位：Wb(韦伯)

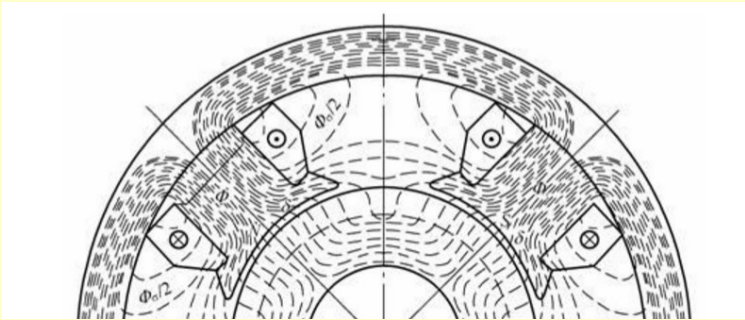




### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

**磁路:** 电磁元件中, 磁通所经过的闭合回路称为磁路。

通过电磁元件工作磁路路径的磁通称为主磁通,  
另外还有少量的磁通不在此路径通过, 称为漏磁通。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

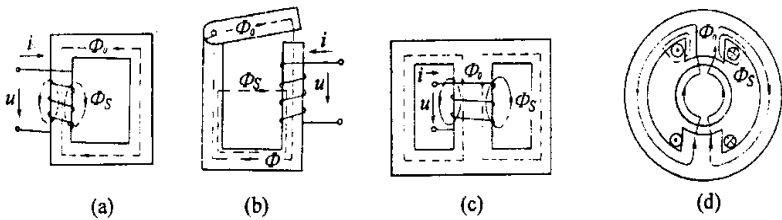


图 1-1-1 典型电磁元件的磁路

(a) 无气隙简单磁路; (b) 变气隙简单磁路; (c) 无气隙分支磁路;  
(d) 有气隙分支磁路

常见的铁心磁路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

#### 四、磁场强度 $H$

定义：在任何介质磁场中，某一点的磁感应强度  $B$   
和同一点上介质磁导率  $\mu$  的比值，即：

$$H = B / \mu$$

单位：  $H$  — 安每米 (A/m) 或安每厘米 (A/cm)



### 3. 磁场基本理论——磁场的基本物理量

#### 五、磁导率 $\mu$

定义：用来表示物质导磁能力大小的物理量,称为导磁系数或磁导率。单位： 亨每米 (H/m)

真空的磁导率为：  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)

空气的磁导率： 近似等于真空磁导率。

相对磁导率：  $\mu_r = \mu / \mu_0$  (无单位)

其中：  $\mu$  — 物质的实际磁导率。



# 目 录

## 1. 为什么要学习这门课程?

--课程背景、内容与意义

## 2. 如何学习这门课程?

--课程特点与学习指南

--控制元件发展趋势

## 3. 磁场/磁路基础知识

-磁场基本物理量

-磁路基本定律

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

### 一、高斯定律 (磁通连续性定律)

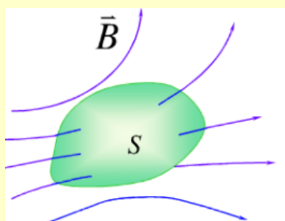
通过磁场中封闭曲面的总磁通量为零

(1) 假设: 磁场中有一个封闭的曲面

(2) 规定: 垂直于曲面而向外的方向为正方向

(3) 公式:  $\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint_A B \cos \theta dA = 0$

(4) 图示:

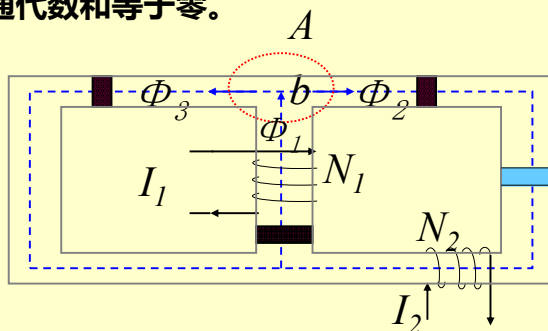


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

根据高斯定律可得到：汇集在一点的多条磁路（分支磁路）中的磁通代数和等于零。



**磁路基尔霍夫第一定律：**

$$\Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 = 0$$

$$\text{即: } \sum \Phi_i = 0$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

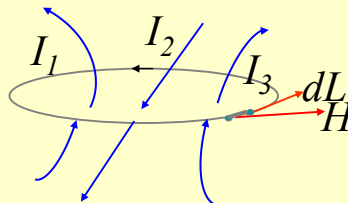


### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

#### **二、安培环路定律（全电流定律）**

空间中磁场强度  $H$  沿任意一条闭合路径  $L$  的线积分，等于这个闭合路径所包围的各传导电流的代数和。

$$\oint_L H \cdot dL = \sum_i I_i$$

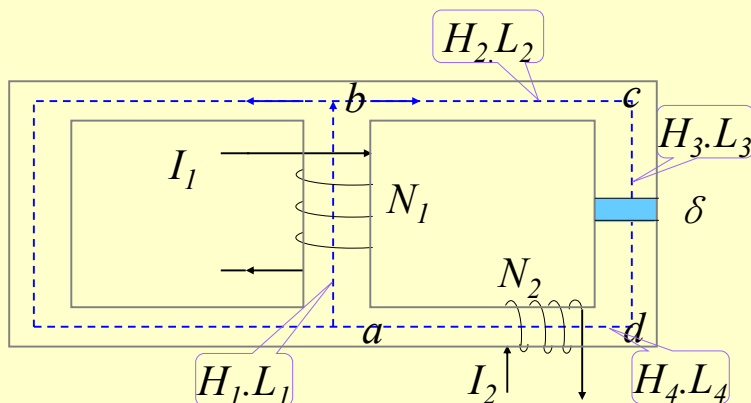


方向: 电流方向和闭合路径方向符合右手定则为正，否则为负。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律



$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = H_1 L_{ab} + H_2 L_{bc} + H_3 (L_{cd} - \delta) + H_\delta L_\delta + H_4 L_{ad}$$

$$= I_1 N_1 - I_2 N_2$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

$$\sum_i H_i L_i = \sum_k I_k N_k$$

定义：

**磁路磁压降**  $U_{mi} = H_i L_i$ ，其方向与磁场方向相同。

**磁路磁动势**  $F_{mk} = I_k N_k$ ，其方向与电流方向一致。

**磁路基尔霍夫第二定律：**

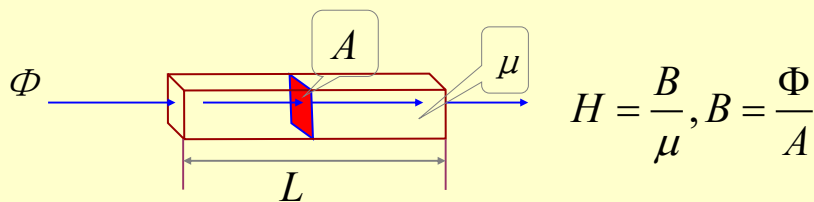
$$\sum_i U_{mi} = \sum_k F_{mk}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

三、磁路欧姆定律



磁路的欧姆定律：
$$U_m = HL = \frac{\Phi}{\mu A} L = \Phi R_m$$

其中： $R_m = L / (\mu A)$  称为该段磁路的**磁阻**，单位为  $1/H$   
或  $A/Wb$ ；  
 $\Lambda = 1/R_m$  称为**磁导**，单位为  $H$  (亨)



3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

对比： 电路和磁路

电路	磁路
电动势 $E$ [V]	
电流 $I$ [A]	
电导率 $\gamma$ [S/m]	
电阻 $R(R=L/(\gamma S))$ [ $\Omega$ ]	
电导 $G(1/R)$ [1/S]	
欧姆定律 $U=IR$	
基尔霍夫第一定律 $\sum I=0$	
基尔霍夫第二定律 $\sum E=\sum U$	



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

#### 磁路与电路的差别：

- 1) 直流磁路无损耗，直流电路有 $i^2R$ 的损耗；
- 2) 磁路中的漏磁比电路中严重得多，电磁机构中，一般主磁通约占全部磁通的80%，气隙磁压降约占磁动势的80%。
- 3) 对常用的铁磁材料，磁导率 $\mu$ 由B-H曲线决定，呈显著的非线性，而电阻率 $\rho$ 一般可近似为常值；
- 4) 对线性电路可应用叠加定律，磁路一般呈显著的饱和非线性，一般不能应用叠加定律。



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

#### 四、法拉第定律（电磁感应定律）

当通过闭合导电回路所包围的面积内的磁通量 $\Phi$ 发生变化时，在回路上产生的感应电动势 $e_i$ 总是与磁通量对时间 $t$ 的变化率的负值成正比。

$$e_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

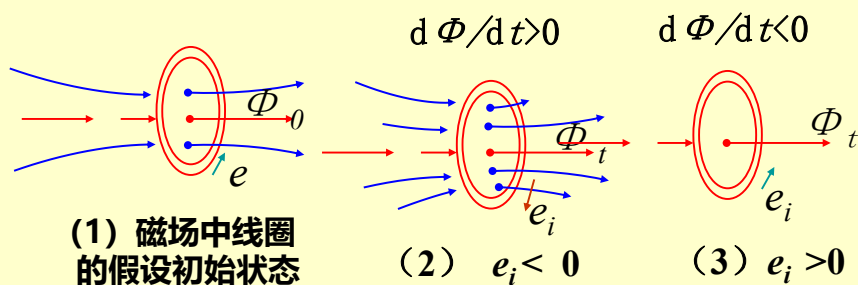
其中：磁通 —— 单位为韦伯（符号：Wb）

时间 —— 单位为秒（符号：S）

电动势 —— 单位为伏（符号：V）



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律



线圈的总磁链  $\Psi = \sum W_i \Phi_i$

感应电势  $e = -\frac{d\Psi}{dt}$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

引起磁链变化的原因：

- (1) 磁通由交流电流产生，空间中任一点的磁通随时间变化；
- (2) 空间中各点磁通不变化，但线圈位置变化，磁链相应变化。

因此磁链可以看成是时间和位移的函数，即  $\Psi = \Psi(t, x)$ ，  
所以有

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx$$

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = e_T + e_R$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial t} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = e_T + e_R$$

变压器电势/感生电动势  $e_T = -\frac{\partial\psi}{\partial t}$

旋转(速度)电势/动生电动势

$$e_R = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = -V \frac{\partial\psi}{\partial x}$$



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

对于电磁元件的速度/动生电势: 感应电动势方向  
由右手定则确定。并且:

导线切割磁力线产生电势  $e = Blv$

单位: 磁感应强度 —— 特斯拉 (符号: T)

长度 —— 米 (符号: m)

速度 —— 米每秒 (符号: m/s)

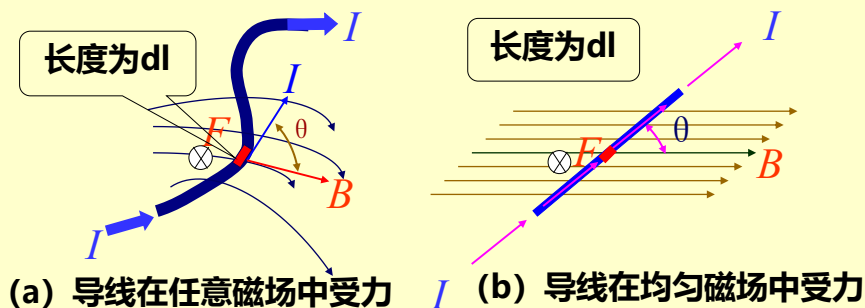
感应电势 —— 伏 (符号: V)

对电感不变的静止线圈  $e = -L \frac{dI}{dt}$



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

#### 五、安培电磁力定律



$$dF = Idl \times B = IdlB \sin \theta \quad (\text{空间磁场中的导线受力})$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

(均匀磁场中的导线受力)

$$F = BIL \sin \theta$$

电磁力方向由左手定则确定。

单位:

$B$  —— 单位为特斯拉 (符号: T)

$I$  —— 单位为安培 (符号: A)

$L$  —— 长度单位为米 (符号: m)

$F$  —— 单位为牛顿 (符号: N)

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

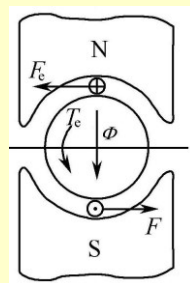


### 3. 磁场基本理论——磁路的基本定律

#### 电磁力与电磁转矩

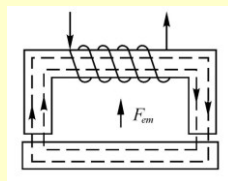
- 1) 磁场中的载流导体所受的电磁力和力矩为

$$F_e = BIl \quad T_e = BIlr$$



- 2) 铁心表面的磁力

$$F_{em} = \frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR_\delta}{d\delta} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 S}{\delta^2} I^2 N^2$$



- 3) 磁极间的力

同性相斥，异性相吸，与距离平方成反比。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 本节小结

伺服控制器(硬件)---人的大脑、小脑的生理组织

控制结构与策略(软件)--- 人的控制意识、策略

电气/液连接子系统---循环系统/神经传输系统

结构与材料子系统---骨骼系统/皮肤系统

功放与执行器子系统--- 肌肉系统

传感子系统---神经感知系统

能源子系统---消化、呼吸系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 本节小结

对磁路应掌握:

1) 基本关系/定义:

$$B = \mu H \quad \phi = Bs \quad F = Ni \quad U_m = Hl = \phi R_m \quad R_m = \frac{l}{\mu s}$$

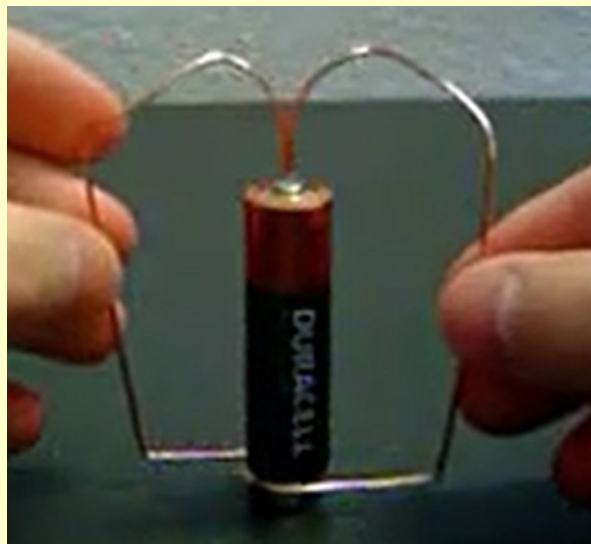
2) 磁场/磁路基本定理:

$$\sum \phi_i = 0 \quad \sum H_i l_i = \sum Ni \quad e = -\frac{d\phi}{dt} = Blv \quad F = qv \times B = Bil$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 作业 原型电机分析



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 作业 原型电机分析

仔细观察录像中制作的简易旋转电机，根据电路课程已学知识，分析其原理。

提示：1) 碱性干电池的外筒是钢质材料

2) 圆筒磁钢可以导电，且磁钢的电阻率较大。



## 致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

