

电机与拖动基础



主讲教师：谢川

自动化工程学院



个人简介

谢川 博士/副教授 硕士生导师

- | | | | |
|--------------|------------|---------|------|
| ✓ 2003-2007年 | 电子科技大学 | 自动化专业 | 学士 |
| ✓ 2007-2012年 | 浙江大学 | 电力电子专业 | 博士 |
| ✓ 2014-2015年 | (丹麦) 奥尔堡大学 | 能源系 | 访问学者 |
| ✓ 2012年8月-今 | 电子科技大学 | 自动化工程学院 | |

主讲课程：《自控原理实验》、《电力电子技术》、《电机拖动》、
《运动控制系统》、《电网基础与新能源发电并网技术》等

主要研究方向：

- ⇒ 电力电子装置及其数字控制技术
- ⇒ 电力电子系统仿真
- ⇒ 电力电子在电力系统中的应用
- ⇒ 新能源分布式发电变流器控制



◆联系方式

- Email: c.xie@uestc.edu.cn
- Tel: 61830693/13683456237
- 地址: 电子科技大学（清水河校区）主教楼C2-114

◆课件下载:

- 地址: [**http://faculty.uestc.edu.cn/cxi**](http://faculty.uestc.edu.cn/cxi)

教学资源

[1] 《运动控制系统》2020版

[2] 《电网基础及新能源并网技术》2020版

[3] 电力电子技术基础2019版

[4] 运动控制系统课件2019版



一 课程介绍

运动控制（含电拖基础） **总课时：48，学分数：3**

1、课堂教学（40课时）

2、实验教学（8课时）

二 考核方式

平时成绩：10%（包括课堂考勤与课外作业）

中期考试：20%（采用**开卷考试**）

仿真实验：10%（包括实验报告完成情况）

期末考试：60%（采用**闭卷考试**或**一页纸开卷**考试）



第1章 绪论（3学时）

第2章 电力拖动系统动力学（1学时）

第3章 直流电机原理（8学时）

第4章 他励直流电动机的运行（4学时）

第5章 变压器（8学时）

第6章 交流电机电枢绕组的电动势与磁通势（4学时）

第7章 异步电动机原理（8学时）

第8章 三相异步电动机的启动与制动（4课时）



第1章 绪论

Chapter 1 Introduction

一. 课程性质

二. 常用物理概念与定律

一. 课程性质

本节学习要点：

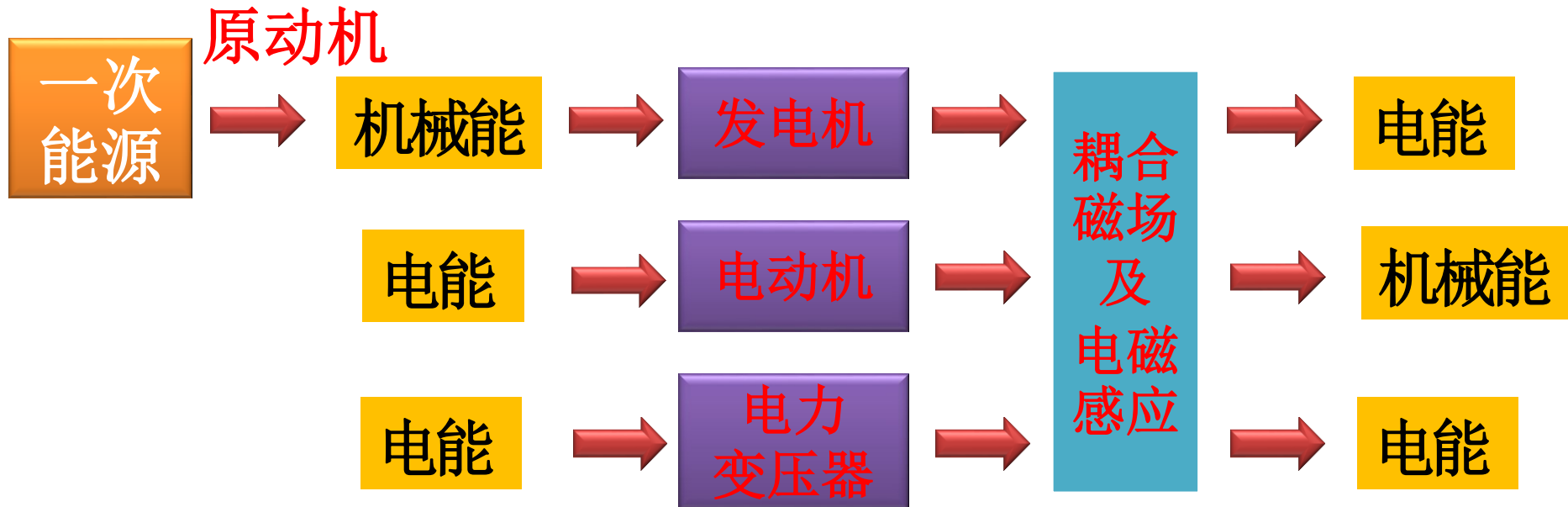
1. 掌握电机与电力拖动的**基本概念**
2. 了解电机和电动机**类型**
3. 了解**典型的**负载类型

什么是电机？

电机是一种实现机电能量转换的电磁机械装置，以电磁感应原理为基础，以内部磁场作为耦合媒介，实现连续的机电能量的转换或电能的传递。

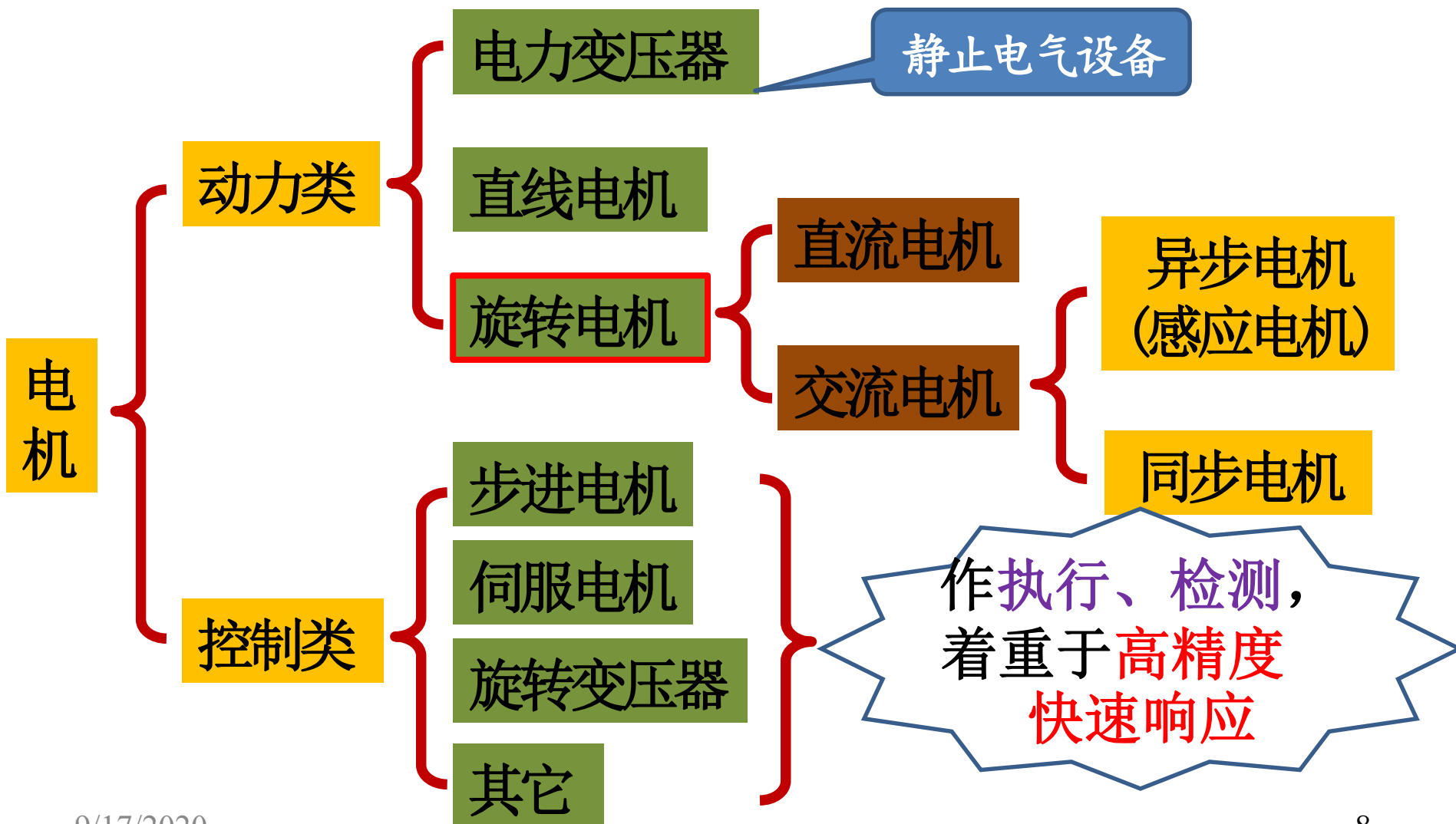


原动机





电机的主要类型



什么是电力拖动？

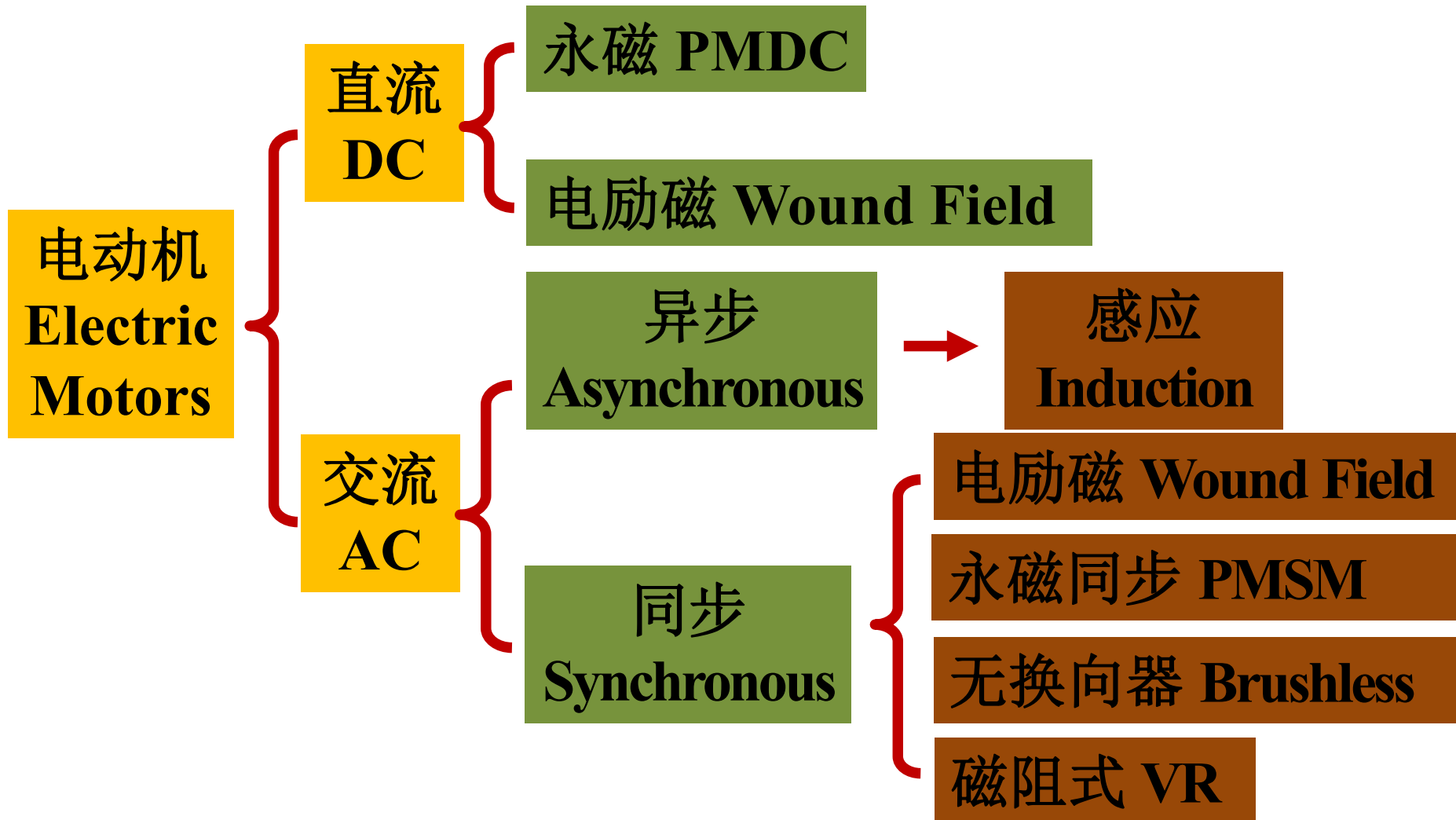
电力拖动(Electrical Drives)是利用**电动机**作为原动机将**电能**转换成**机械能**，来带动各种**工作机构**运转，完成既定的运动**控制目标**。



特点：

- ☺ 效率高，经济性好；
- ☺ 具有良好的起动、制动、调速、反转性能；
- ☺ 易于实现自动控制。

电动机的主要类型



负载的主要类型

负载
Load

恒转矩
Constant Torque



恒功率
Constant Power



风机/泵类
Fan/Pump





第1章 绪论

一、课程性质

二、常用物理概念与定律

二、常用物理概念与定律

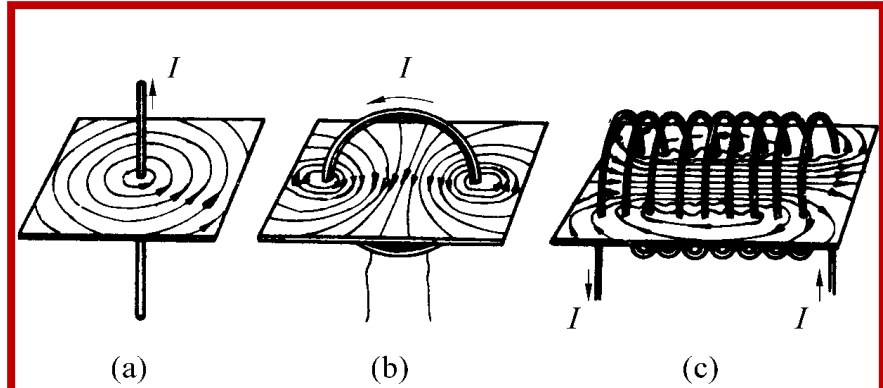
本节学习要点：

1. 掌握常用的物理概念：磁感应强度、磁通量、磁场强度、磁路、磁动势
2. 掌握基本电磁定律：安培环路定律、电磁力定律、电磁感应定律
3. 了解电机中的材料及铁磁材料的特性
4. 了解电力拖动系统的应用领域与发展动力

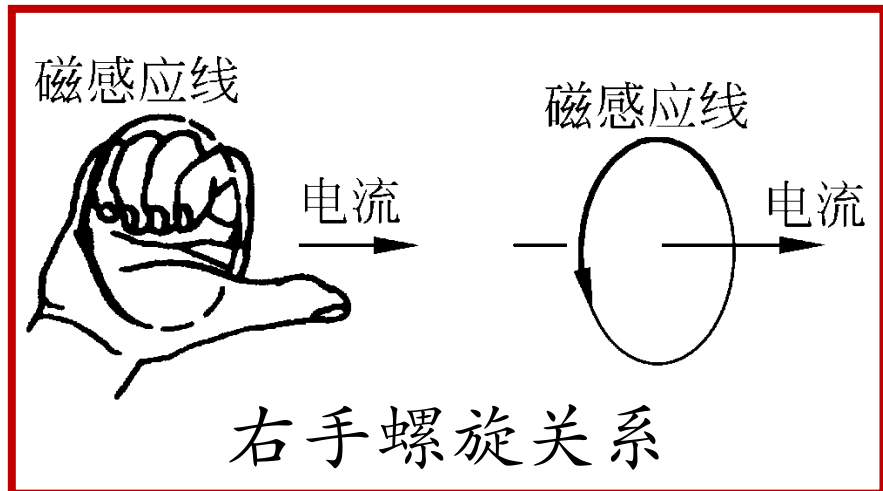
1、常用的物理概念

① 磁感应强度(磁通密度) B

- ▶ 描述磁场 强弱 和 方向 的物理量。
- ▶ 磁感应强度 B 与产生它的电流之间满足 毕尔-萨伐尔定律 $\leftrightarrow$ 右手螺旋关系。
- ▶ 单位: 特斯拉 (T)



电流磁场中的磁力线



右手螺旋关系

② 磁通量(或磁通) Φ

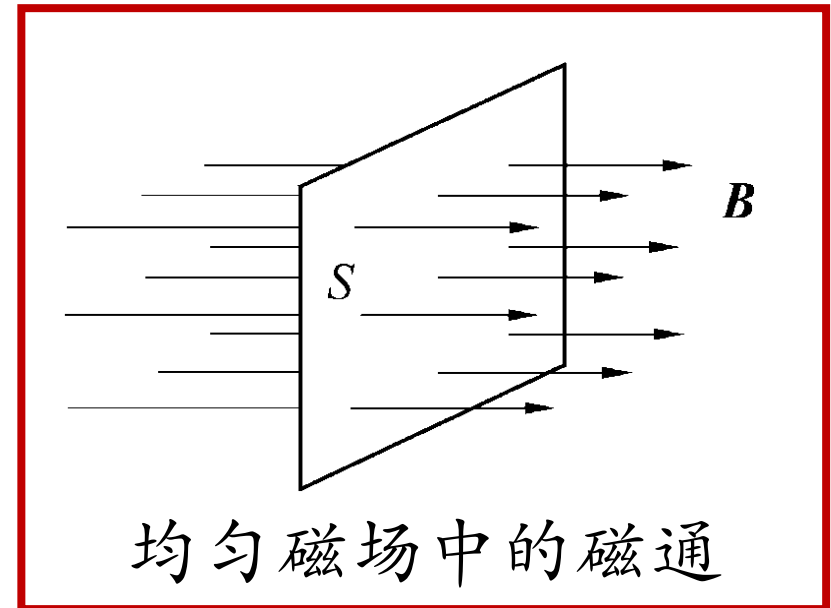
▶ 穿过截面磁力线的根数称为磁通量。

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{S}$$

▶ 如右图所示，在均匀磁场中，如果S与B垂直，则：

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \Phi/S$$

▶ Φ 的单位为韦伯(Wb)





③ 磁场强度 H

- ▶ 导磁物质中的磁场用磁场强度 H 表示，它与磁密 B 的关系为：

$$B = \mu H$$

μ 为导磁物质的磁导率。

单位：安培/米(A/m)

④ 磁动势 (Magnetic Motive Force, mmf) F

- ▶ 磁路中磁场的源，即安培-匝数之积。

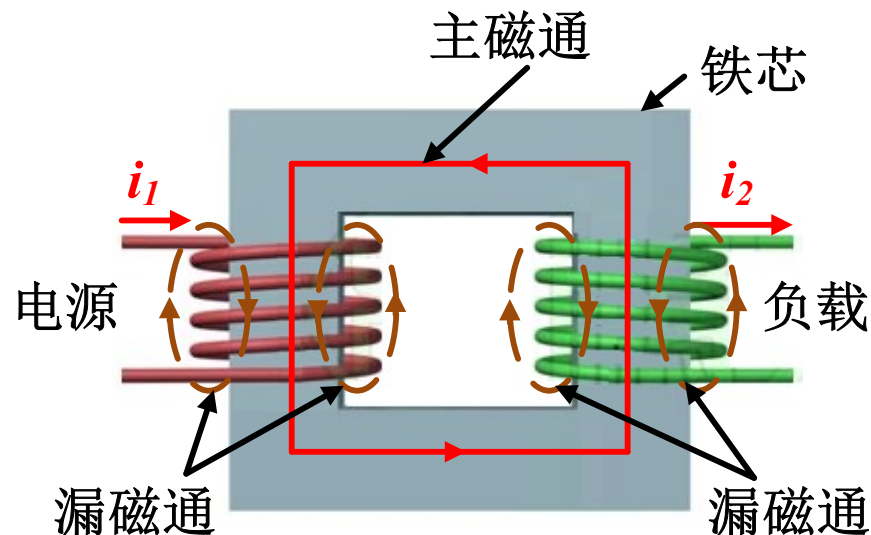
$$F = N \cdot i$$

单位：安匝 **A**mpere **T**urns

⑤ 磁路

► **磁力线**所通过的**路径**称为**磁路**。

利用磁场的机电装置常采用**铁磁材料**来**导向**和**集束磁场**。铁心采用铁磁材料构成，**其磁导率**可达**周围空间磁导率**的**几千甚至几万倍**，大部分**磁通被限制在铁心中**，**磁力线**沿铁心的几何形状所确定的路径闭合，只有**很小的一部分磁通**“**泄漏**”到周围空间中。



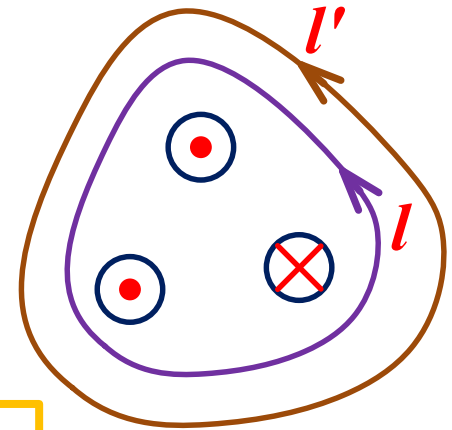
2、基本电磁定律

① 安培环路定律（全电流定律）

► 在磁场中，沿任意一个闭合回路的磁场强度线积分等于该回路所环链的所有电流代数和，即

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$\sum I$ 为该电路所包围的全部电流，
故该定律称全电流定律。



推论一：磁路Kirchhoff第一定律

推论二：磁路Kirchhoff第二定律

推论三：磁路欧姆定律

▶ 带有并联分支的分支磁路，
对于任意闭合面**A**，有

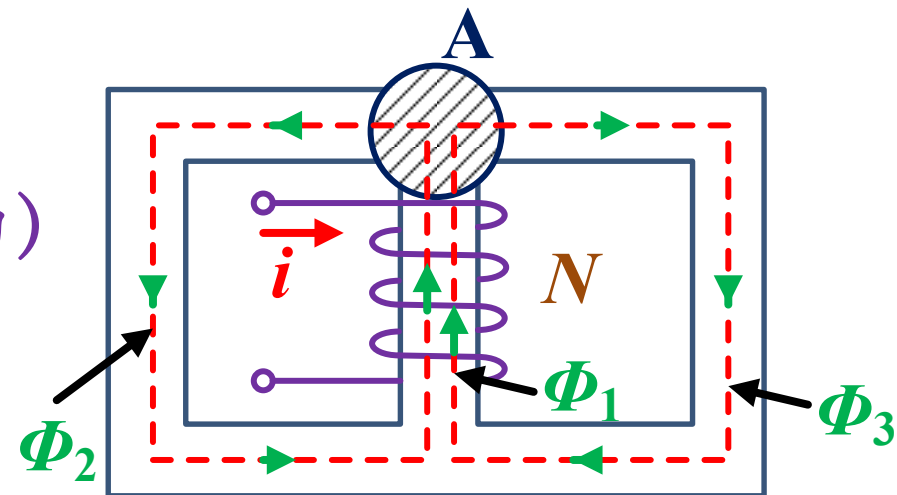
$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

或 $\sum \Phi = 0$ （磁通是连续的）

结论！

穿出（或进入）任一闭合面的**总磁通量恒等于零**。

--磁路Kirchhoff第一定律



► 实际计算中，常把**磁路简化成几段**。几何形状相同的为一段，找出平均磁场强度再乘以该段磁路的平均长度，得**磁位差（磁通势）**。将各段磁通势相加得**总磁通势**，即，

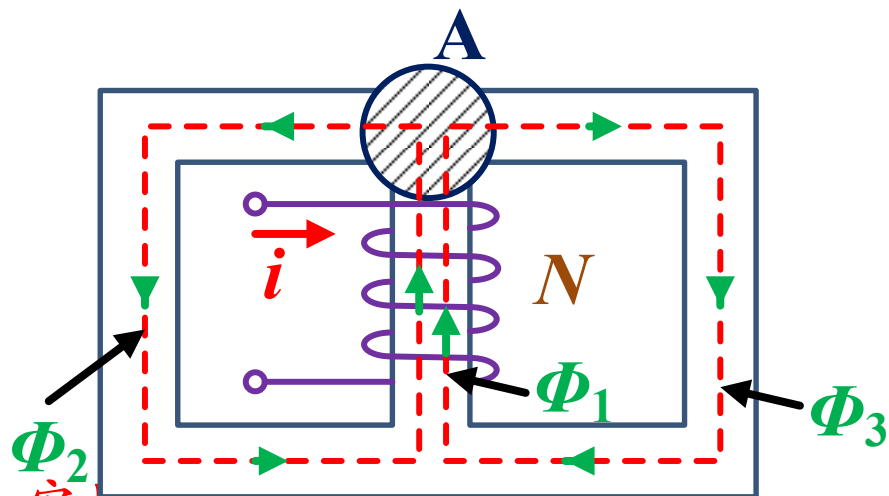
$$\sum_k^n H_k l_k = \sum I = IN$$

式中： H_k 为 k 段磁路的场强，A/m

l_k 为 k 段磁路的平均长度，m

IN 为整个磁路上的**总磁通势**，安匝

N 为励磁线圈的**匝数**



结论！

在闭合磁回路中，**磁路各段磁压降代数和恒等于**作用于该磁路上的**总磁动势**。--磁路Kirchhoff第二定律

▶ 第 k 短磁路的磁压降:

$$H_k l_k = \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \frac{1}{\mu_k} \frac{\Phi}{S_k} l_k = \Phi \frac{l_k}{\mu_k S_k} = \Phi \cdot R_{mk}$$

磁阻

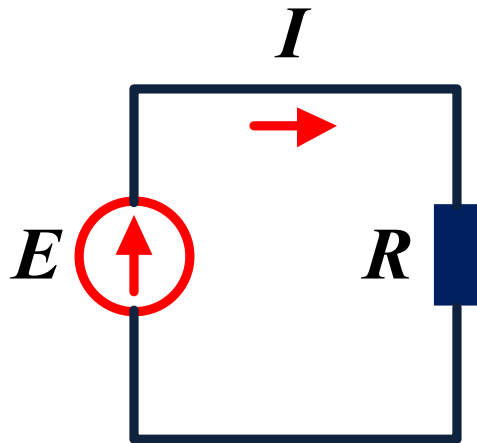
▶ 总的磁通势:

$$IN = \sum_k^n H_k l_k = \Phi \sum_k^n R_{mk}$$

结论!

作用在磁路上的磁通势 F 等于磁路内的磁通量乘以磁阻--磁路欧姆定律

磁路与电路的类比



电路

磁路

$$I \longleftrightarrow \Phi$$



$$\Phi$$

$$E \longleftrightarrow F$$



$$F$$

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot S}$$



$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$G = \frac{1}{R}$$



$$\Lambda = \frac{1}{R_m}$$

$$\sum i = 0$$



$$\sum \Phi = 0$$

$$\sum u = \sum e$$

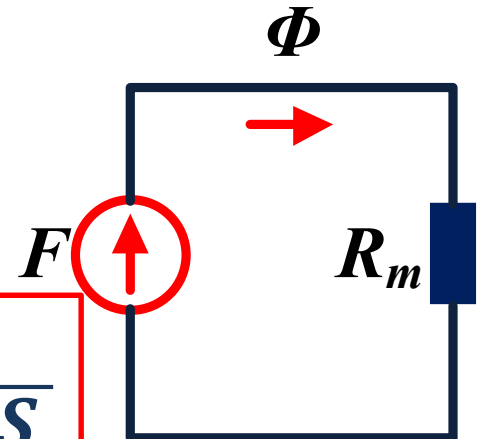


$$\sum H \cdot l = \sum N \cdot i$$

$$I = \frac{E}{R}$$



$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$



磁路与电路的类比

注意!

铁磁材料 $\mu \neq \text{const} \rightarrow R_m \neq \text{const}$ 磁路非线性

非铁磁材料

及气隙 $\mu_0 = \text{const} \rightarrow R_{m\delta} = \text{const}$ 磁路线性

电路和磁路只是形式上相似，本质不同：

- 1、电路中有真正带电粒子作定向运动，磁路中没有；
- 2、存在电的绝缘体，不存在磁的绝缘体。

磁路的处理方法是磁场问题的简化 😊

简单磁路的计算方法

已知：铁芯截面积： S ；铁芯长度： l ；气隙长度： δ ；磁通量 Φ 或铁芯场强： H ；

求：磁动势{励磁线圈： N 匝；励磁电流： I ；}

► 据安培环路定律，有：

$$H \cdot l + H_{\delta} \cdot \delta = NI$$

已知磁路
磁通量 Φ

已知磁路
截面积 S

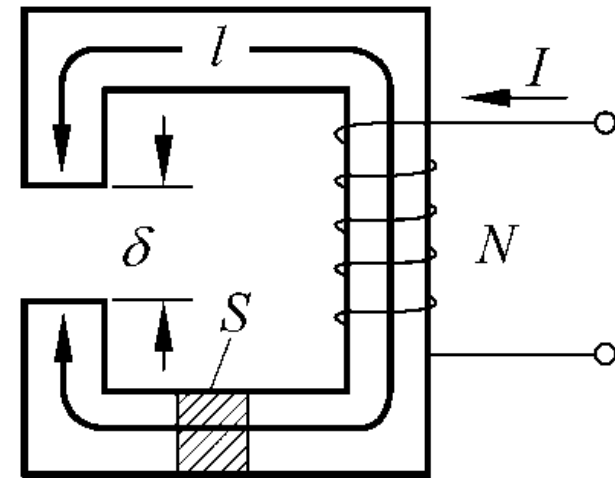
已知磁
导率 μ

磁通
密度 B

磁场
强度 H

已知磁
芯尺寸 l

求出 NI



简单磁路

② 电磁力定律

► 磁场对场中载流导体的作用力称为安培力：

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

式中： $d\mathbf{f}$ 为磁场对电流元的作用力， $\mathbf{B}$ 为磁感应强度， $d\mathbf{l}$ 为一小段导体， i 为电流。

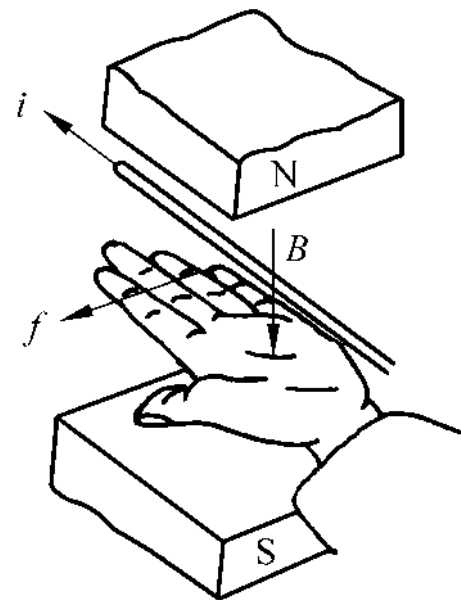
在均匀磁场中，若载流直导体与 $\mathbf{B}$ 的方向垂直，则载流直导体受力大小为：

$$f = Bli$$

注意！

在旋转电机中，就是利用通电线圈在磁场中受到电磁力的作用，从而产生电磁转矩，使电机旋转。

在电机学中，习惯上用左手定则确定 f 的方向。



③ 电磁感应定律

► 切割电动势（旋转电动势）

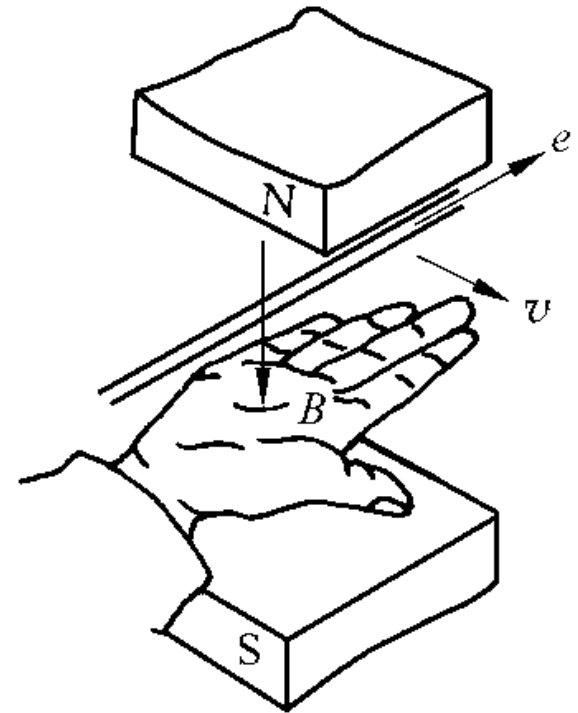
导体与磁场**相对运动**，导体切割磁力线产生感应电动势。

旋转电机中，**线圈切割气隙磁场**，从而在线圈中产生感应电动势。

在均匀场中，当直导体 l 、磁感应强度 B 、导体相对运动方向 v **三者相互垂直**时，导体中的感应电动势为

$$e = Blv$$

在电机学中，习惯上用右手定则确定电动势 e 的方向。





► 变压器电动势

线圈与磁场**相对静止**，穿过线圈的**磁通**本身发生**变化**产生的**感应电动势 e** 。

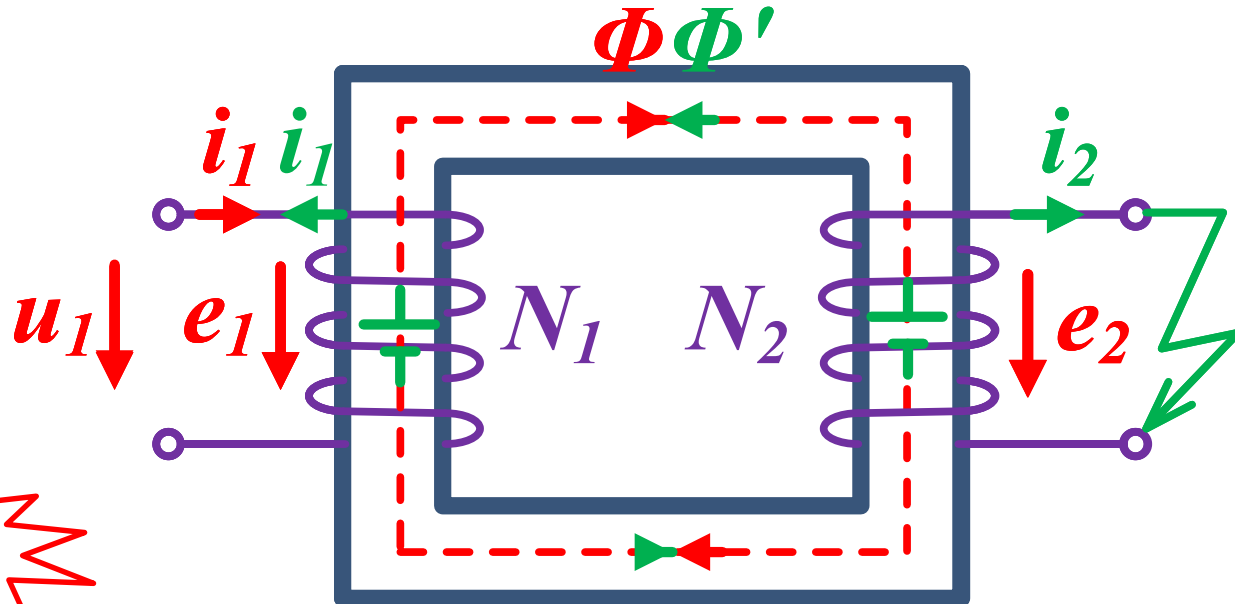
感应电动势大小：与**线圈匝数**及**磁通的变化率**成**正比**；

感应电动势方向：由**楞次定律**决定。



感应电动势的实际方向总是企图在线圈内产生感应电流，感应电流所建立的磁通**阻止**线圈中原磁通的变化。

✓ 按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向

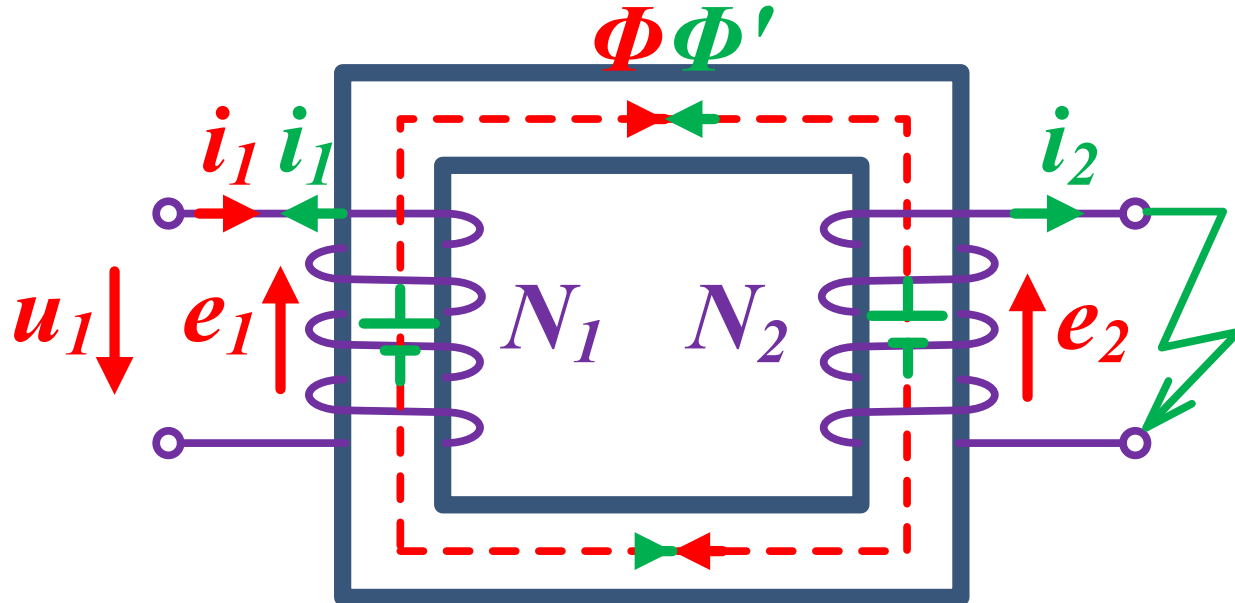


注意!

感应电动势 e 的参考方向：从低电位指向高电位。
交流电压源 u 的参考方向：从高电位指向低电位。

交变 $u_1 \rightarrow$ 交变 $i_1 \rightarrow$ 交变 Φ $\left\{ \begin{array}{l} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ 自感电动势} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ 互感电动势} \end{array} \right.$

✓ 按左手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向



交变 $u_1 \Rightarrow$ 交变 $i_1 \Rightarrow$ 交变 Φ $\left\{ \begin{array}{l} e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{array} \right.$

自感电动势
互感电动势

3、电机中的材料及铁磁材料的特性

● 导电材料

用于制造绕组，要求导电性能好，电阻率 ρ 小，则损耗 I^2R 小。常用铜、铝。

● 导磁材料（铁磁材料）

为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场，电机和变压器的磁路都是用导磁性能良好的铁磁材料构成。铁磁材料主要包括：铁、钴、镍及其合金（硅钢片）。

● 绝缘材料

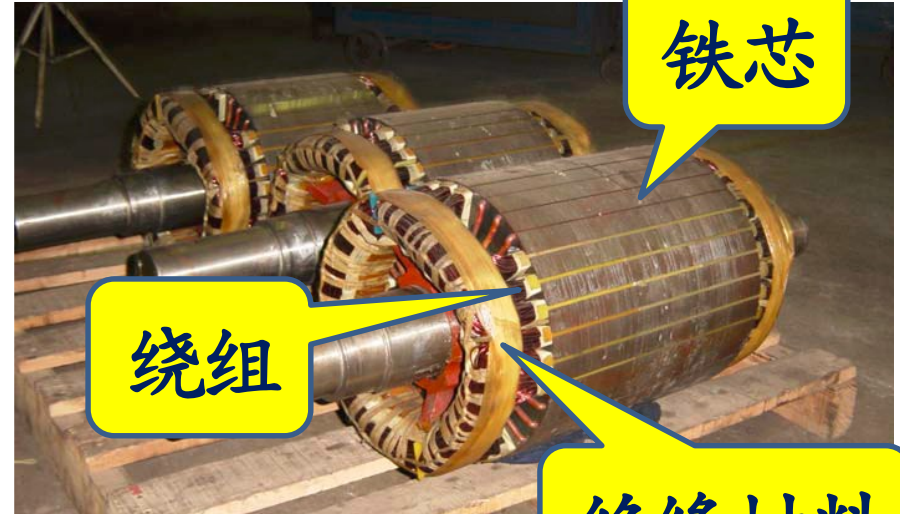
主要包括绝缘漆、薄膜、纤维编织带、环氧树脂等

绝缘等级：

A	E	B	F	H	C
105°	120°	130°	155°	180°	>180°



绕组



铁芯

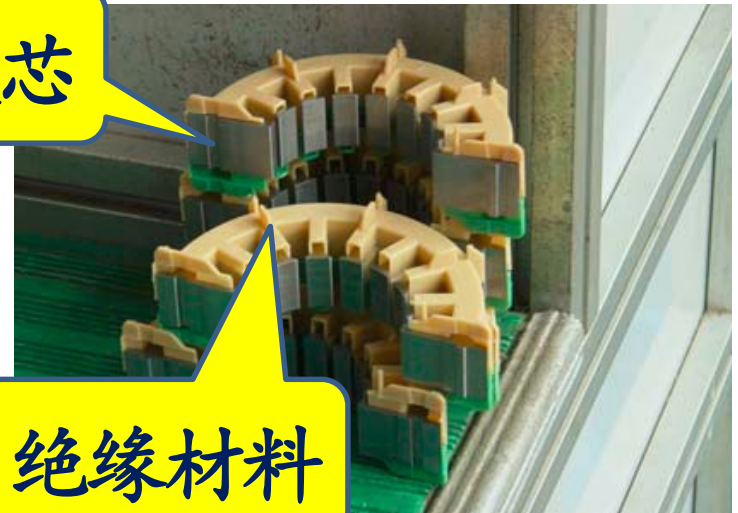
绕组

绝缘材料



硅钢片

铁芯



绝缘材料



铁磁材料的特性

- 👉 良好的**导电性**与**高导磁性**
- 👉 磁化曲线的非线性
- 👉 磁滞现象和磁滞损耗
- 👉 涡流损耗
- 👉 铁心损耗

👉 良好的导电性与高导磁性

铁磁材料是导电的。铁磁材料电阻率较常用导电材料（铜和铝）大，但仍具良好的导电性。

铁磁材料具有高导磁性。

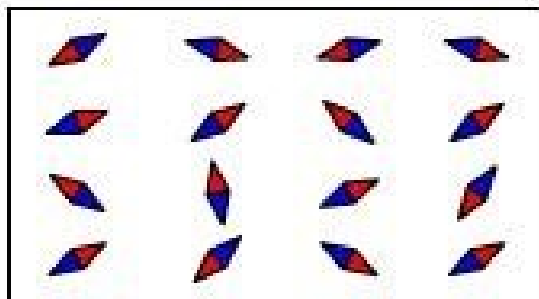
真空磁导率： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$ 空气、非铁磁材料

铁磁材料磁导率： $\mu_{Fe} = (2000 \sim 6000) \mu_0$

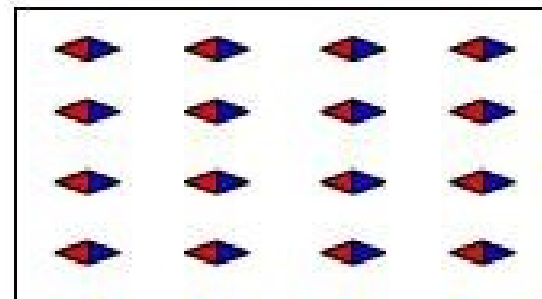
原因

“磁畴”磁化理论

未磁化



磁化

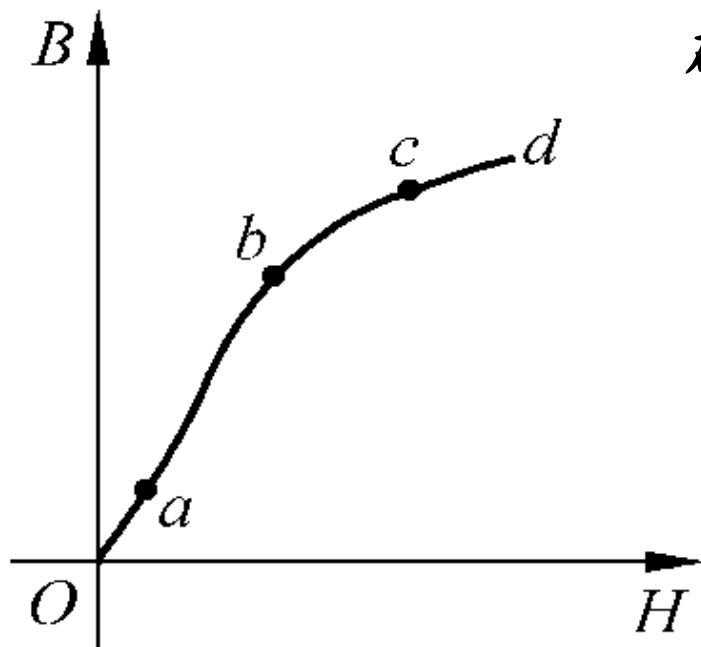


☞ 磁化曲线 $B=f(H)$ 的非线性

非导磁材料: $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} = \text{const}$

磁化曲线 $B = \mu_0 H$ 为线性

铁磁材料: $\mu \approx \frac{B}{H} \neq \text{const}$



磁化曲线为非线性

oa: 开始磁化, H 较小, B 缓慢 ↑

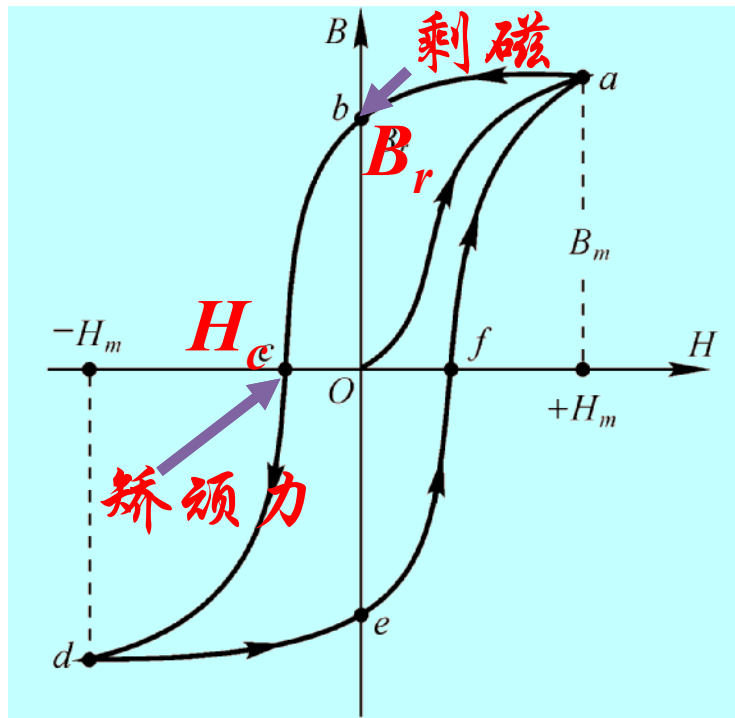
ab: B 与 H 几乎成 正比变化

bc: 过 b 点, B 缓慢 ↑, 磁化曲线开始拐弯, b 称为 膝点。

cd: 过 c 点, 随着 H ↑, B 几乎不增加, c 为 饱和点。

☞ 磁滞现象和磁滞损耗

上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合。下降时 B 的变化总是滞后于 H 的变化，这种现象称为“磁滞现象”，呈现磁滞现象的 B - H 闭合曲线称为“磁滞回线”。



两个重要参数

剩磁 B_r

矫顽力 H_c

B_r 大，表示没有外加磁场的作用下，铁磁材料仍有很强的磁感应强度。

H_c 大，表示材料一经磁化就很难退磁，抗退磁能力强。



☞ 磁滞损耗

产生原因：铁磁材料在反复磁化过程中，磁畴倒转摩擦引起能量损耗。

大小： $p_h \propto f \cdot B_m^\alpha$

对于常用硅钢片： $B_m = 1 \sim 1.6T$, $\alpha = 2$

☞ 涡流损耗

产生原因：铁心是导电的，当其中磁通交变时，将产生感应电势和感应电流，此感应电流称为涡流，它将在铁心电阻上产生损耗。

大小：

$$p_w \propto f^2 \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 / r_w$$

硅钢片电阻率

硅钢片厚度

👉 铁心损耗

铁心损耗 = 磁滞损耗 + 涡流损耗

$$p_{Fe} = p_h + p_w$$

$$\propto f^{\beta} \cdot B_m^2 \cdot G_{Fe}$$

$$\beta = 1.2 \sim 1.6$$

铁心重量

4. 电力拖动系统的应用领域与发展动力

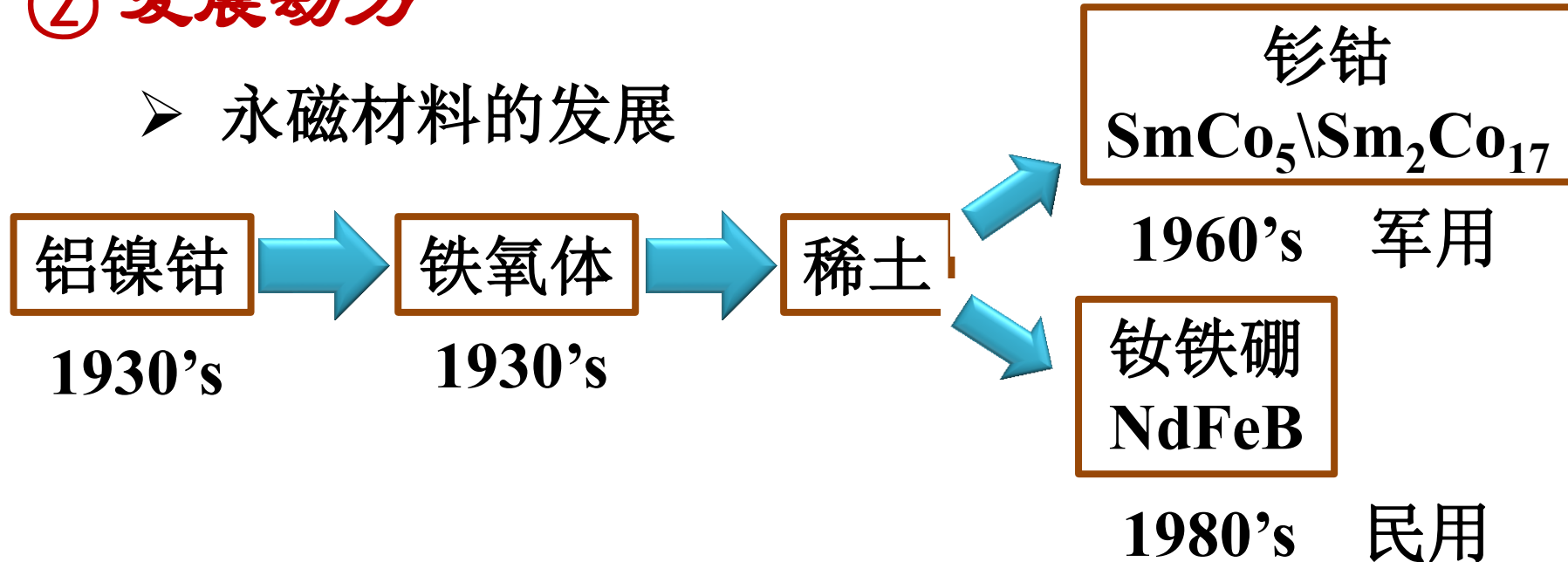
① 应用领域





② 发展动力

➤ 永磁材料的发展



永磁材料的发展大大提高了电机的性能，实现高效、节能、环保 😊



➤ 电力电子器件的发展

SCR GTO

GTR

MOSFET

600V/70A, 高速开关特性, 1 MHz以内

IGBT

高压, 大电流; 1200V/500A, 100 kHz以内

IPM

智能功率模块, 集功率器件、驱动、保护、检测、传感器于一体

发展趋势: 高耐压、大容量、集成化、模块化😊



➤ 控制技术的发展

PWM技术:

交流调速的核心，任何控制算法最终以各种PWM方式实现。

- ✓ **SPWM**
- ✓ 快速电流跟踪PWM
- ✓ 磁路跟踪PWM (SV-PWM)
- ✓ 直接转矩PWM

控制理论:

- ✓ **矢量控制 (Vector Control)**
- ✓ **直接转矩控制 (DTC)**
- ✓ 模糊控制 (Fuzzy Logic)
- ✓ 神经网络 (Neural Networks)



本章结束

作业： 1.4