

国家级精品资源共享课程

《电机学》

主讲教师：马明晗

电 话：0312-7522490

邮 箱：471265705@qq.com



-1-

电力工程系

课程名称：电机学（1）

学 分：4

课程学时：64学时（课内56学时+实验8学时）

成绩构成：过程考核(实验10%、平时10%、期中考试20%) 40%+期末考试60%

教 材：李永刚等编著《电机学》

参 考 书：《电机学》上册，校内自编讲义

李发海等编著《电机学》第六版

许实章编著《电机学》

汤蕴璆、史乃编著《电机学》



-2-

电力工程系

引言



什么是电机？



-3-

电力工程系

引言

电机在日常生活中的应用



电动自行车



电风扇



剃须刀



照相机



手机



空调



微波炉



-4-

电力工程系

引言



CPU风扇



机器人



血管机器人



动车组



飞机



航母



-5-

电力工程系

引言

电机在电力系统中的应用



水轮发电机



汽轮发电机



风力发电机



电厂给水泵异步电机



三相升压变压器

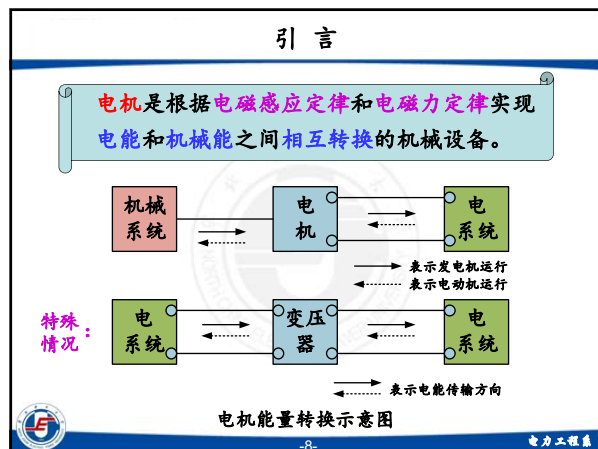
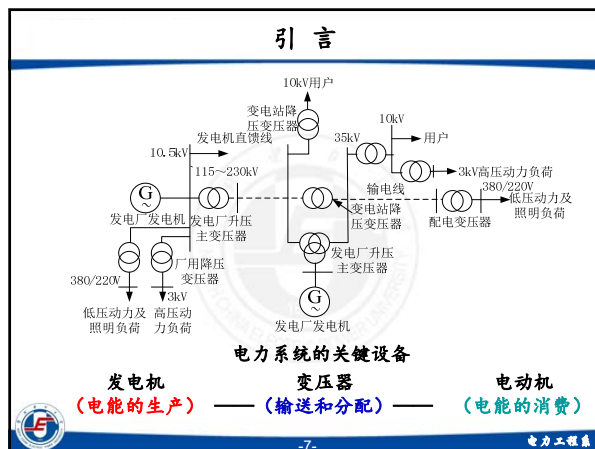


配电变压器



-6-

电力工程系



引言

电机的发展历程

法拉第

拓展链接: https://www.sohu.com/a/561020873_121124371

1821年 法拉第发现载流导体在磁场中受力的现象;

1831年 法拉第发现电磁感应定律。

1832年 出现直流电机

1876年 亚布洛契柯夫制成了世界第一台变压器

1885年 出现异步电动机

1889年 出现三相系统, 并制造出三相异步电动机

-9- 电力工程系



概论

本章基本要求

- 了解电机的作用、类型
- 掌握铁磁材料的磁化特性
- 掌握基本电磁定律
- 了解磁路的基本分析方法

-11- 电力工程系

概论

§ 0.1 电机的主要类型

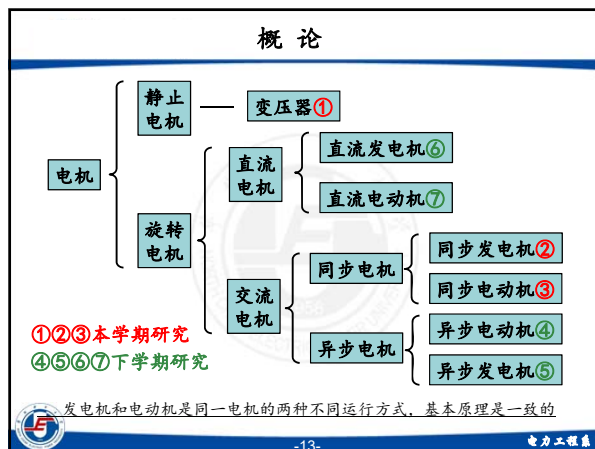
一、按实际用途分类

- (1) 发电机 — 将机械能转换成电能
- (2) 电动机 — 将电能转换成机械能
- (3) 变压器 — 交流电能传输过程中进行电压等级变换
- (4) 控制电机 — 作为自动控制系统的执行元件

二、按电流形式分类

- (1) 交流电机 — 电机输入或输出的能量为交流电能
- (2) 直流电机 — 电机输入或输出的能量为直流电能

-12- 电力工程系



概 论

§ 0.2 电机中所用材料

类型	作用	要求	构成材料
导电材料	构成电路	低电阻率	紫铜、铝
导磁材料	构成磁路	高磁导率、低损耗、兼具一定刚度	硅钢片、钢板、铸钢
绝缘材料	隔电作用	高介电强度、高耐热性	云母
冷却材料	带走热量	大热容量和导热率	气体：空气、氢气 液体：油、水
结构材料	支撑紧固	机械强度高	铸铁、铸钢、钢板、铝合金、塑料

概 论

§ 0.3 电机磁场来源

一、永磁体




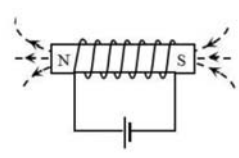
(1) **控制问题**：永磁电机不需外界能量即可维持其磁场，也使得其磁场的调节、控制困难。

(2) **不可逆退磁问题**：永磁电机在过高（钕铁硼永磁）或过低（铁氧体永磁）温度时，受冲击电流或振动可能产生不可逆退磁。

(3) **成本问题**：稀土永磁电机成本一般比电励磁电机高，需要用其高性能和运行费用的节省来补偿。永磁电机适于小功率的场合。

概 论

二、电励磁

电励磁电机评价：控制简单、不怕振动、装配容易，只要控制励磁电流就可控制磁场强度，而励磁电流远小于电枢电流，所以励磁控制器简单、可靠性高，成本也低，通常用于大功率场合，如大型发电机、电动机。

概 论

与电机磁路相关的几个重要物理量

- 磁通 Φ** ：可以直观地理解为磁路中所包含磁力线条数。
单位：Wb
- 磁通密度 B** ：磁通对面积的微分，即单位面积上磁力线条数，也叫**磁感应强度**。与磁通的关系 $\Phi=B \cdot S$ 。
单位：T
- 磁导率 μ** ：表示物质导磁能力的大小。
单位：H/m
- 磁场强度 H** ：它与磁通密度的关系 $B=\mu H$ 。
单位：A/m。

概 论

§ 0.4 铁磁材料的特性

一、磁导率很大（不是常数）

磁导率：表示物质导磁能力的大小，用 μ 表示。

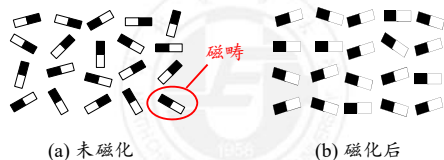
真空磁导率： $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}(\text{H/m})$

物质按导磁性能可分为两类：

- 非铁磁材料**：磁导率接近于真空磁导率。
顺磁性物质：磁导率略大于真空磁导率（铝、铬、锰、氧）
抗磁性物质：磁导率略小于真空磁导率（铜、银、铅、氢）
- 铁磁材料**：磁导率远大于非导磁材料的磁导率，如铁、钴、镍以及它们的合金。
 $\mu_{Fe}=(2000 \sim 6000)\mu_0$

概论

铁磁材料的磁化：铁磁材料放入磁场，材料内的磁场会显著增强，呈现很强的磁性。



磁化后磁畴产生的附加磁场要比非铁磁物质在同一外界磁场下所产生的强得多，所以铁磁物质的磁导率比非铁磁物质的要大很多。



-19-

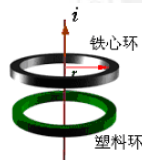
电力工程系

概论

二、磁感应强度 B 和磁场强度 H 呈饱和曲线关系（非线性）

磁场强度 H ：是描述磁场的一个辅助量，某些情况下并不能反映材料内磁场的强弱，单位：A/m

磁感应强度 B ：也被称为磁通量密度或磁通密度。在物理学中磁场的强弱通常使用磁感应强度来表示。单位：T



$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i$$

$$H \text{ 相同: } H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B \text{ 不同: } B = \mu H$$

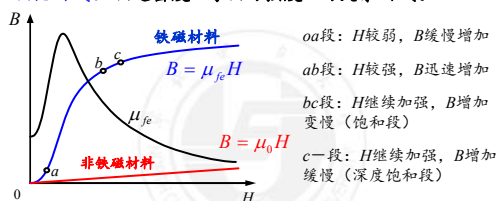


-20-

电力工程系

概论

磁化曲线：磁通密度 B 与磁场强度 H 的关系曲线。



铁磁材料：磁通密度 B 与磁场强度 H 呈非线性关系。随着磁密增加呈现出饱和现象，铁磁材料的磁导率 μ_{fe} 迅速变小，磁密 B 增加越来越慢；

非铁磁材料：磁通密度 B 与磁场强度 H 呈线性关系。

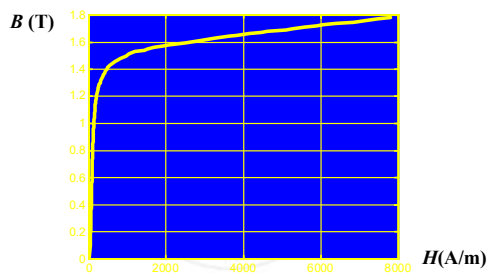


-21-

电力工程系

概论

DW450-50的实际磁化曲线



说明：D-电工钢片，W-冷轧无取向，即各个方向磁导率相等，450-50—在50Hz下铁心损耗4.5W/kg，厚度为0.5mm。



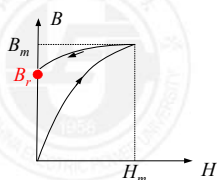
-22-

电力工程系

概论

三、存在磁滞现象

现象：铁磁物质被外界磁场磁化后，即使取消外界磁场，其余磁性仍会部分保留，称为剩磁。



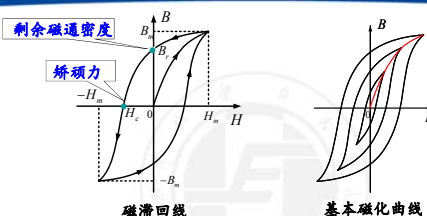
产生剩磁的原因：铁磁物质中的磁畴在经外界磁场的作用后，不能恢复原状，部分产生滞留。



-23-

电力工程系

概论



磁滞：对铁磁材料进行周期性磁化时磁密落后于磁场强度变化的现象。交变磁化过程中的磁化曲线称为磁滞回线。

基本磁化曲线（平均磁化曲线）：不同磁滞回线顶点的连线。我们工程上所用的磁化曲线就是这种曲线。



-24-

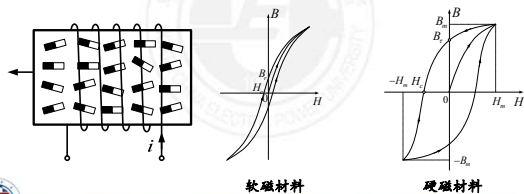
电力工程系

概论

四、在交变磁场中产生磁滞损耗和涡流损耗

磁滞损耗：铁磁材料被交变磁场反复磁化引起磁畴周期性转动，摩擦引起的**发热损耗**。

$$P_h = \sigma_h f \cdot B_m^\alpha \cdot G$$



-25-

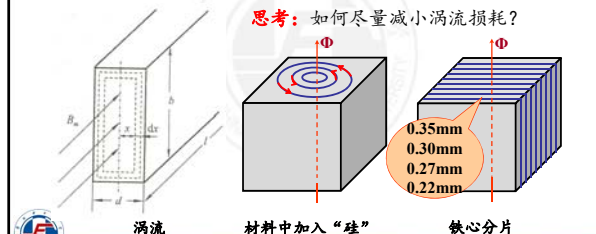
电力工程系

概论

涡流损耗：交变磁通在铁心内感应电势并形成漩涡状的涡流，涡流在铁磁物质电阻上的损耗。

$$P_e = \sigma_e f^2 \cdot B_m^2 \cdot G$$

思考：如何尽量减小涡流损耗？



-26-

电力工程系

概论

铁心损耗：当铁心中磁通交变时，产生的磁滞损耗与涡流损耗的总称。

$$P_{fe} = P_h + P_e = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_m^2 \cdot G_{fe}$$

式中： $p_{1/50}$ 表示 1kg 硅钢片，当 $B_m=1\text{T}$ (或 Wb/m^2)， $f=50\text{Hz}$ 时的铁耗—铁耗系数(比损耗)；
 f 为频率， B_m 为磁通密度的最大值， G_{fe} 为铁心重；
对于电机采用的硅钢片， $\beta=1.2\sim 1.6$ 之间。

$$p_{fe} \propto f^\beta B_m^2 G_{fe}$$

-27-

电力工程系

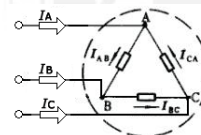
概论

§0.5 主要电磁定律复习

一、电路定律

(1) 基尔霍夫第一定律 (电流定律)

电路节点上电流瞬时值的代数和等于零。



直流: $\sum i = 0$ 正弦交流: $\sum \dot{i} = 0$

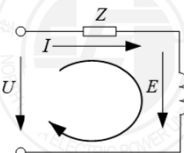
-28-

电力工程系

概论

(2) 基尔霍夫第二定律 (电压定律)

对于电路内任一闭合回路，若沿回路循环一周，回路内所有电压降之和等于所有电动势之和。



直流: $\sum u = \sum e$ 正弦交流: $\sum \dot{U} = \sum \dot{E}$

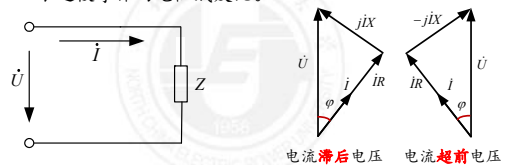
-29-

电力工程系

概论

(3) 电路欧姆定律

某段导体的电流跟这段导体两端的电压成正比，跟这段导体的电阻成反比。



电流**滞后**电压 电流**超前**电压

直流: $I = \frac{U}{R}$ 正弦交流: $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} \Rightarrow \varphi = \tan^{-1} \frac{X}{R} \Rightarrow \begin{cases} \text{感性负载 } X \text{ 为正, } \varphi > 0 \\ \text{容性负载 } X \text{ 为负, } \varphi < 0 \end{cases}$

-30-

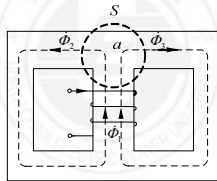
电力工程系

概论

二、磁路定律

(1) 基尔霍夫磁路第一定律

磁路节点(闭合面)上磁通的代数和等于零。



直流: $\sum \Phi = 0$ 正弦交流: $\sum \dot{\Phi} = 0$



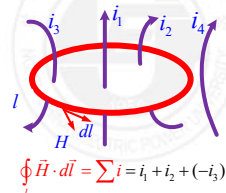
-31-

电力工程系

概论

(2) 全电流定律(安培环路定律)

沿空间任意一条闭合回路, 磁场强度H的线积分等于该闭合回路所包围的电流的代数和。



注: 若i与l符合右手螺旋关系, 取正号, 否则取负。

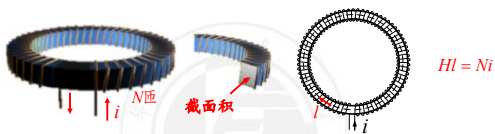


-32-

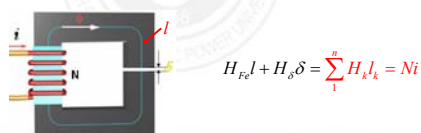
电力工程系

概论

例1: 均匀密绕螺管线圈的全电流定律



例2: 分段均匀磁路的全电流定律

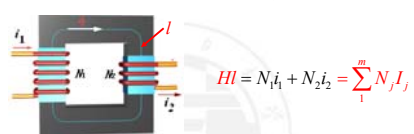


-33-

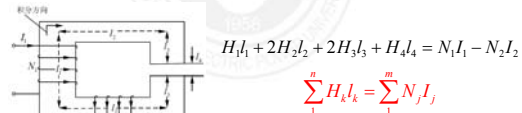
电力工程系

概论

例3: 均匀磁路包含多个线圈的全电流定律



例4: 分段均匀磁路包含多个线圈的全电流定律



-34-

电力工程系

概论

基尔霍夫磁路第二定律: 作用在闭合磁路上的总的磁动势等于各段磁路上的磁压降之和, 表达式如下:

$$\sum H_k l_k = \sum N_j I_j$$

其中: 每一段HI称为该段磁路上的**磁压降**;

$\sum NI$ 是作用在整个磁路上的**磁动势**(用F表示)。



-35-

电力工程系

概论

(3) 磁路欧姆定律

作用于磁路上的磁动势等于磁阻乘以磁通。

$$F = \sum H_k l_k = \sum \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \sum \frac{\Phi / S_k}{\mu_k} l_k = \Phi \sum \frac{l_k}{\mu_k S_k} = \Phi \sum R_{mk}$$

其中: $R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k S_k}$ 为第k段磁路的磁阻;

$$\Phi = \frac{F}{\sum R_{mk}} = F \Lambda_m = F \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{m1}} + \frac{1}{\Lambda_{m2}} + \dots + \frac{1}{\Lambda_{mk}}}$$

其中: Λ_m 为磁路的总磁导;

$$\Lambda_{mk} = \frac{1}{R_{mk}} = \frac{\mu_k S_k}{l_k} \text{ 为第k段磁路的磁导。}$$



-36-

电力工程系

磁路与电路的相似点	
电路	磁路
电流 I [A]	磁通 Φ [Wb]
电流密度 J [A/m ²]	磁通密度 B [$T=Wb/m^2$]
电动势 E [V]	磁动势 F [A]
电阻 $R=\rho\frac{l}{S}$ [Ω]	磁阻 $R_m=\frac{l}{\mu S}$ [1/H]
电导 $G=\frac{1}{R}$ [S]	磁导 $\Lambda_m=\frac{1}{R_m}$ [H]
基尔霍夫第一定律 $\sum i=0$	基尔霍夫磁路第一定律 $\sum \Phi=0$
基尔霍夫第二定律 $\sum u=\sum e$	基尔霍夫磁路第二定律 $\sum Hl=\sum Ni$
电路欧姆定律 $E=I\cdot R$	磁路欧姆定律 $F=\Phi\cdot R_m$

磁路与电路的主要区别	
电路	磁路
通过恒定电流有损耗	通过恒定磁通无损耗
电流全部流过导体	铁心外有漏磁通
电阻率在一定温度下恒定	铁磁材料磁导率随磁通密度变化

三、电磁感应定律

法拉第电磁感应定律：任何封闭电路**感应电动势**的大小，等于穿过这一电路磁通量的变化率。

大小：与磁链（磁通）随时间的变化率 $\frac{d\psi}{dt}$ 成正比。

方向： e 实际方向由楞次定律决定。

楞次定律：电流的方向趋于抵消产生此感应电动势的磁通的变化。

e 与 Φ 的规定正方向符合右手螺旋定则

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

(1) 变压器电动势

磁链的变化是由空间固定且**时变的磁场**，穿过**静止**且匝数恒定的**线圈**所引起的电动势。

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

(a) 自感电动势

线圈中磁链的变化是由线圈**自身**中时变电流引起的。定义单位电流产生的磁链为**自感系数（自感）**。

$$L = \frac{\psi_L}{i} \Rightarrow \psi_L = Li$$

$$\text{自感电动势 } e_L = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L\frac{di}{dt}$$

$$L = \frac{\psi_L}{i} = \frac{N(Ni/R_m)}{i} = N^2\Lambda_m = N^2\frac{\mu S}{l}$$

$$x = \omega L = \omega N^2\Lambda_m = \omega N^2\frac{\mu S}{l}$$

(b) 互感电动势

穿过线圈磁链的变化是由其相邻的**另一线圈**中时变电流引起的。定义单位电流产生的磁链为**互感系数（互感）**。

$$M = \frac{\psi_{21}}{i_1} \Rightarrow \psi_{21} = Mi_1$$

$$\text{互感电动势 } e_{M2} = -M\frac{di_1}{dt}$$

$$M = \frac{\psi_{21}}{i_1} = \frac{N_2(N_1i_1/R_{m12})}{i_1} = N_1N_2\Lambda_{m12}$$

$$x_{12} = \omega M = \omega N_1N_2\Lambda_{m12} = \omega N_1N_2\frac{\mu S}{l}$$

概论

(2) 运动 (位移、切割) 电动势

磁链的变化是幅值**恒定的磁场**与匝数恒定的**线圈**之间存在**相对运动**而引起的电动势。



$$e = -\frac{d\psi}{dt} = \frac{B(lv)}{dt} = Blv$$

“右手定则”



-43-

电力工程系

概论

四、电磁力 (安培力) 定律

毕奥-萨伐尔电磁力定律: 载流导体在磁场中受到力的作用。



$$f = Bli$$

“左手定则”

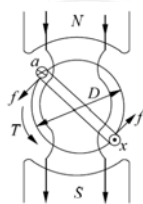


-44-

电力工程系

概论

电磁力矩 (电磁转矩): 电磁力作用下所产生的力矩。



$$T = 2fr = 2Blir$$



-45-

电力工程系

概论

§ 0.6 电机中的能量守恒及效率

一、电机中的主要能量形式

(1) 磁场储能

电机在对称稳态运行时, 磁场储能恒定不变。因此, 认为磁场并未参与能量转换, 仅起到**能量传递媒介**的作用。

(2) 电能

(3) 机械能

在旋转电机中二者进行转换

(4) 热能

- ① 绕组通过电流在其电阻上产生的损耗
- ② 耦合磁场在铁心中引起的铁心损耗
- ③ 旋转电机轴承的摩擦损耗以及通风损耗

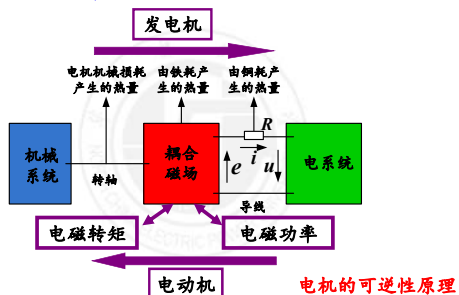


-46-

电力工程系

概论

电机中的机电能量转换过程



注意: 发电机、电动机 (调相机) 各有特点, 没有特殊情况不互换使用!

-47-

电力工程系

概论

二、电机中能量转换的效率

(1) 输入功率 P_1

(2) 输出功率 P_2

(3) 总损耗 $\Sigma p = P_1 - P_2$

(4) 运行效率 η

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}\right) \times 100\%$$



-48-

电力工程系