



电机学

Electric Machinery




电机学

教材与参考书

- 《电机学》
孙旭东、王善铭 编著
清华大学出版社，2006版
- 《电机学学习指导》
孙旭东、王善铭 编著
清华大学出版社，2007版


2

电机学

课程考核评分方法

- 考试
 - 期中考试（30%）
 - 期末考试（70%）
 - 考试方式：笔试，闭卷。
- 作业

3

电机学

习题讨论课

- 四次习题讨论课（第1~4篇）
- 每次题目提前公布
- 鼓励同学自主解答讨论

电机学实验


- 精选三个典型实验
- 实验时间按二次选课，自行分组（3人一组）
- 购买《电机学实验指示书》

4

电机学

绪 论



绪 论

▼ 学习目标

- 了解电机在国民经济等领域中的作用
- 掌握电机的定义、基本分类
- 熟练掌握电机学中常用的电工定律
- 了解电机学课程的性质和要求，思考自己的课程学习计划和学习方法

6

绪 论

0.1 电机在国民经济中的作用

- 电能是现代社会最主要的能源，电能的发现与利用是人类文明发展史的一个重要里程碑，对人类文明的发展起到了重要的推动作用。

人力 → 畜力 → 自然力 → 热机 → 电机

- 电能是一种二次能源，需要人为地从一次能源转换得到。

7

0.1 电机在国民经济中的作用

电机作用概述

- 电机是与电能的生产、输送、变换和利用密切相关的能量转换装置，在国民经济和日常生活中应用极为广泛。

电机

一次能源 → 机械能 → 电能
电能 → 机械能 (⇔ 生产机械)
电能 → 电能

- 电机的主要类型
 - 发电机
 - 电动机
 - 变压器

8

0.1 电机在国民经济中的作用

发电机

发电机是将机械能转换成电能的能量转换装置。

- 用于发电厂
 - 火电厂：将燃料燃烧的热能转换为电能
 - 水电站：将水流的势能转换为电能
 - 核电站：将原子核能转换为电能
 - 风电场：将风能转换为电能
- 用于独立系统或储能系统

9

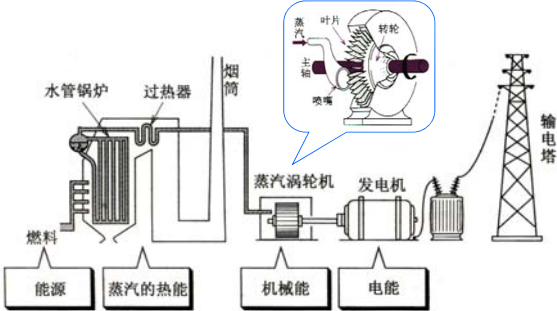
0.1 电机在国民经济中的作用



火力发电厂

10

0.1 电机在国民经济中的作用



火力发电原理图

11

0.1 电机在国民经济中的作用



汽轮发电机组

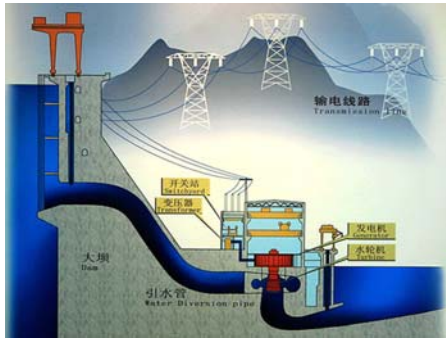
12

0.1 电机在国民经济中的作用



13


0.1 电机在国民经济中的作用



水力发电原理图

14

0.1 电机在国民经济中的作用



15

0.1 电机在国民经济中的作用



典型风电机组结构

16

0.1 电机在国民经济中的作用



17

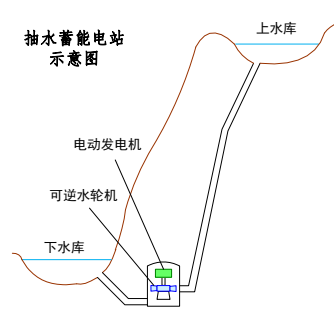
0.1 电机在国民经济中的作用



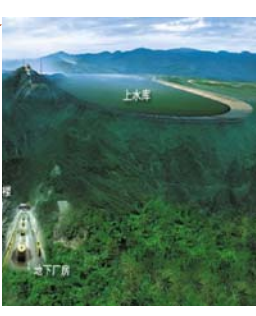
18

0.1 电机在国民经济中的作用

抽水蓄能电站示意图



上水库
下水库
电动发电机
可逆水轮机



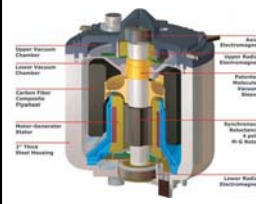
上水库
下水库
地下厂房

抽水蓄能电站

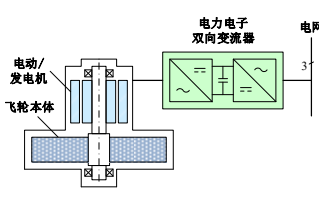
“削峰填谷”——白天发电（发电机），后半夜抽水（电动机）

19


0.1 电机在国民经济中的作用



一种飞轮装置结构示意图



飞轮储能系统构成示意图



采用飞轮储能系统的UPS应急电源车

飞轮储能系统

20

0.1 电机在国民经济中的作用

电动机

电动机是将**电能转换成机械能**的能量转换装置。

- 作为原动机，拖动各种机械设备。
- 电动机应用十分广泛。据统计，我国各类电动机的耗电量约占发电量的60%。

工业，农业，国防，日常生活，
交通运输，航海，航空，航天，
医疗卫生，文化教育，IT

21

0.1 电机在国民经济中的作用

电动机的应用举例

- 工业
鼓（排）风机、水泵、压缩机、各类机床、机器人/生产线、轧钢机、传送带、纺织机、造纸机、起重机、抽油机等。
- 农业
电力排灌设备、脱粒机、粉碎机、碾米机、榨油机等。
- 日常生活
电风扇、洗衣机、电冰箱、空调、吸尘器、净水器、空气净化器、料理机、按摩器、跑步机、电动工具、电梯等。
- 医疗设备
呼吸机、渗析机、人工心脏、X光机、CT、牙科手术工具等。

22


0.1 电机在国民经济中的作用




热连轧生产线

23

0.1 电机在国民经济中的作用



工业机器人



24

0.1 电机在国民经济中的作用

电动机的应用举例 (续)

- 可移动（独立）电力系统与装备
 - 陆地——电动汽车、电动自行车、高铁、地铁、轻轨、电气机车、磁悬浮列车、无轨电车、车载电源。
 - 海上——舰船、潜水器。
 - 航空——飞机、直升机、导弹。
 - 航天——载人飞船、空间站、卫星、洲际导弹。

25

0.1 电机在国民经济中的作用



高铁列车

磁悬浮列车

26

0.1 电机在国民经济中的作用



燃料电池电动轿车

电动汽车

轮毂电机



燃料电池电动大巴



纯电动轿车

27

0.1 电机在国民经济中的作用



舰船



28

0.1 电机在国民经济中的作用



蛟龙号载人潜水器

29

0.1 电机在国民经济中的作用



多电飞机

以电气系统部分取代传统的液压、气动和机械系统，飞机上次级功率的主要形式是电功率（不排除少量其他形式功率的使用）。



30

0.1 电机在国民经济中的作用

飞船
导弹



31

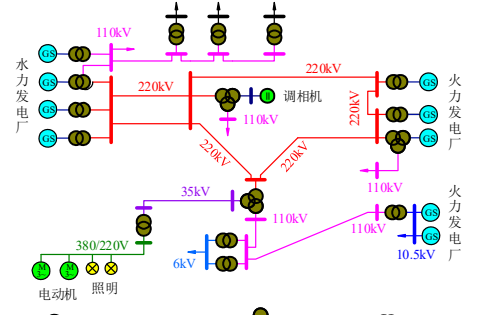
0.1 电机在国民经济中的作用

变压器

- 对交流电能的电压及电流进行变换的静止（无运动部件）能量变换装置。
- 在各级变电站中，改变交流电能的电压，实现交流电能的经济输送和合理分配（输电、配电）。
- 构建远距离分布大电网的关键设备。

32

0.1 电机在国民经济中的作用



图例 发电机 双绕组变压器 三绕组变压器 自耦变压器

电力系统示意图

33

0.1 电机在国民经济中的作用



1000kV特高压变电站主变压器

34

0.1 电机在国民经济中的作用



电力变压器

35

0.1 电机在国民经济中的作用

电机的新发展

- 新原理、新结构、高性能的电机不断涌现。

例如：

- 永磁开关磁阻电机
- 横向磁场电机
- 超高速电机
- 直驱电机
- 高效电机


电力电子技术、永磁材料、蒸发冷却技术等

- 电机的应用领域和范围不断扩大。

例如：

- 传统的传动方式（液压、气动、机械等）改用电机传动；少电系统转向多电系统。
- 新能源利用和储能系统。
- 电机单机容量增大。
- 专业化、特殊化、个性化需求。

36




0.1 电机在国民经济中的作用

与电机相关的其他学科与技术

- **电力电子学**：大功率半导体技术、高频功率器件
- **微电子技术**：微处理器、嵌入式计算机
- **控制理论**：非线性控制、在线辨识
- **力学**：结构强度、变形、振动、噪声
- **材料学**：铁磁（永磁）材料、绝缘材料、超导材料
- **传热学**：通风冷却、液体冷却、蒸发冷却

37



绪 论

0.2 电机的定义与分类


1. 电机的定义

电机学中讨论的电机，是指依靠**电磁感应**作用而运行的电磁机械，用于机械能和电能之间的**转换**或者不同形式电能之间的**变换**。

- 性质1

电机本身不是能源，只是转换或传递能量的装置，其能量转换或传递过程遵从**能量守恒**定律。

38



1. 电机的定义


- 性质2

电机的输入或输出能量中，至少有一方须为**电能**，或者双方都是电能。

- 性质3

运行原理以**电磁感应定律**为基础。（利用其他物理原理，如光电效应、热电效应、电化效应等产生电能的装置通常不包括在电机的范围内）

39



0.2 电机的定义与分类

2. 电机的分类

- 按照能量转换或传递的功能及用途分类

电机

发电机

电动机

变压器

控制电机


—— 将机械能转换为电能的电机。

—— 将电能转换为机械能的电机。

—— 主要用于改变交流电能的电压的静止电气设备。

—— 主要不是传递能量，而是进行信号的传递和转换。常用于自动控制系统中，作为执行、检测、解算或转换元件。

40



2. 电机的分类

- 按照结构特点及电源种类

电机

变压器

旋转电机

直流电机

交流电机


同步电机

异步电机

包括直线电机

🔗 可在此基础上再按功能或用途分类，如：同步发电机、异步电动机、直流电动机。

41



绪 论

0.3 电机学课程性质与学习方法建议

1. 课程性质

(1) 课程地位

- 电气工程及其自动化专业学生必修的重要专业基础课；
- 担负着为后续相关专业核心课程及选修课程打下坚实理论基础的任务。

42

1. 课程性质

(2) 内容特点

- 分析的对象是工程**实际**中使用的**具体**电机（并非理论抽象）；
- 概念多，电磁关系较为复杂，有较强的理论性；
- 涉及到的实际条件和因素比较复杂，具有较强的专业性和综合性；
- 重在说理（物理概念、物理意义、电磁关系），而非单纯的数学公式和定量计算。

43

0.3 电机学课程性质与学习方法建议

2. 课程学习要求

- 抓住核心**：以电机稳态运行时的电磁关系为核心。
- 理解概念**：逐步建立并牢固掌握主要物理概念。
- 掌握方法**：熟悉和掌握电机学的理论体系和分析方法。
- 结合实际**：学习分析工程实际问题的一般思路和近似处理方法。
- 提高能力**：培养和提高自主学习能力和运用基本理论去分析解决实际问题的能力。

44

0.3 电机学课程性质与学习方法建议

3. 学习方法建议

- 理论联系实际；
- 学会抓住主要矛盾，培养工程观点；
- 注意学习方法，重视能力的培养；
- 重视实践环节，培养动手能力。

特别提示：

- 平时多下功夫，不要临时突击；
- 注重理解运用，切忌死记硬背；
- 及时归纳总结，尽快找好方法；
- 勤思考、多提问、常讨论、不刷题。

45

绪 论

0.4 电机学中常用的电工定律

- 电路定律
- 电磁定律**
 - 安培环路定律（磁动势、磁导）
 - 电磁感应定律
 - 电磁力定律（安培力）
- 磁路定律**以及**铁磁材料的基本特性**
- 能量守恒定律（有损系统，效率）

46

0.4 电机学中常用的电工定律

1. 电路定律

- 欧姆定律
- 基尔霍夫电流定律
$$\sum i = 0 \qquad \sum \dot{I} = 0$$
- 基尔霍夫电压定律
$$\sum u = 0 \qquad \sum \dot{U} = 0$$

或
$$\sum u = \sum e \qquad \sum \dot{U} = \sum \dot{E}$$

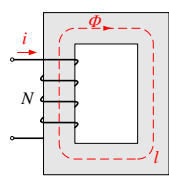
注意：电路定律中各物理量的**参考方向**及其正负号。

47

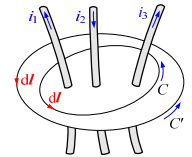
0.4 电机学中常用的电工定律

2. 电磁定律

■ 安培环路定律
$$\oint \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum i$$



- 闭合铁心磁路
 - 环路 l 包围的所有电流 Ni 共同产生铁心中的磁场；作用于铁心磁路的安匝数即磁动势 $F = Ni$ 。
 - 环路积分代表磁通路径上的磁位降 $U = Hl$ 。
 - ⇒ 磁路欧姆定律
$$F = Hl = \frac{B}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu A} l = \Phi R_m$$



48

2. 电磁定律

■ 电磁感应定律

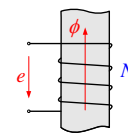
- 磁链：磁通 ϕ 与线圈全部的 N 匝都交链时，线圈磁链 $\psi=N\phi$ 。
- 感应电动势：
$$e=-\frac{d\psi}{dt}=-N\frac{d\phi}{dt}$$

当 e 与 ϕ 的参考方向不满足右手螺旋定则时，等号右侧无“-”号。
- 全微分：
$$\frac{d\phi}{dt}=\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{\partial\phi}{\partial x}\frac{dx}{dt}=\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{\partial\phi}{\partial x}v$$

(速度 $v=\frac{dx}{dt}$)

变压器电动势 运动电动势
(方向判断：右手定则)

思考：切割电动势表达式 $e=Blv$ 的由来



2. 电磁定律

■ 电磁力定律

- 电磁力计算公式 $F=Bl i$
- 物理量及其单位：
 - F —— 电磁力 (N·m)；
 - i —— 导体中的电流 (A)；
 - l —— 导体长度 (m)；
 - B —— 导体所处磁场的磁通密度 (T)。
- 公式的使用条件：均匀磁场，且导体长度方向与磁通密度方向垂直。
- 电磁力方向判断
左手定则

0.4 电机学中常用的电工定律

3. 铁磁材料的基本特性

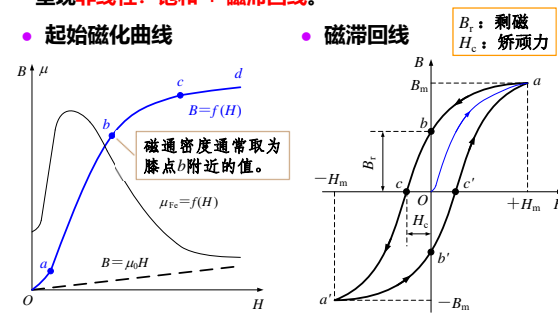
- 铁磁材料放入磁场后，磁场会大大增强，其磁导率 μ_{Fe} 为真空磁导率 μ_0 ($\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m) 的数十倍乃至数万倍。
- 在电机中，要求产生较强的磁场，需要采用磁导率大的铁磁材料。电机中常用的铁磁材料的相对磁导率 (μ_{Fe}/μ_0) 在2000~6000之间。
- 铁磁性物质的磁导率 μ_{Fe} 与它所在磁场的强弱及物质磁状态的历史有关，不是常数。

3. 铁磁材料的基本特性

■ 铁磁材料的磁化曲线

呈现非线性：饱和 + 磁滞回线。

- 起始磁化曲线
- 磁滞回线

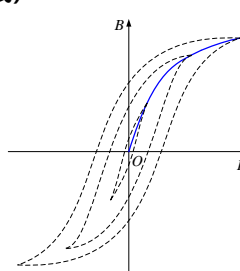


3. 铁磁材料的基本特性

■ 铁磁材料的磁化曲线 (续)

- 正常磁化曲线 (基本磁化曲线)

- 各磁滞回线在第一象限中的顶点的连线。
- 对软磁材料 (磁滞回线很窄、 B_r 和 H_c 值均较小)，工程计算中常采用该曲线代替磁滞回线 (误差通常是工程计算所允许的)。



3. 铁磁材料的基本特性

■ 铁磁材料的损耗

- 铁耗
 - 在交变磁场作用下，铁磁材料中磁滞和涡流现象同时存在。
 - 铁耗=磁滞损耗+涡流损耗。
- 硅钢片
 - 为减小铁耗，电机中使用的铁磁材料绝大多数是硅钢，并制成薄的片状，称为硅钢片。
 - 电机中使用的一般硅钢片，在磁通密度 B_m 为正常工作值范围内 ($1T<B_m<1.8T$) 时，铁耗可近似表示为
$$p_{Fe}\approx C_{Fe}Gf^{1.3}B_m^2$$
其中， f 为磁场交变频率； C_{Fe} 为铁耗系数，与硅钢片材料有关； G 为硅钢片重量。

0.4 电机学中常用的电工定律

4. 磁路定律

- 磁路欧姆定律

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

其中, Φ 为磁通, F 为磁动势, R_m 为磁阻, Λ_m 为磁导。

$$R_m = \frac{1}{\Lambda_m} = \frac{l}{\mu A}$$
- 磁路的基尔霍夫第一定律
$$\sum \Phi = 0$$
- 磁路的基尔霍夫第二定律
$$\sum F = \sum HI$$

单位

磁动势: A
磁导: H
磁阻: H⁻¹

55

4. 磁路定律

- 磁路与电路的类比关系及区别

| 物理量及其单位 | | 基本定律 | | |
|-----------------------------|------------------------------|----------|---|--|
| 磁路 | 电路 | 定律 | 磁路 | 电路 |
| 磁动势 F [A] | 电动势 E [V] | 欧姆定律 | $\Phi = \frac{F}{R_m}$ | $I = \frac{U}{R}$ |
| 磁通 Φ [Wb] | 电流 I [A] | | $(R_m = \frac{1}{\Lambda_m} = \frac{l}{\mu A})$ | $(R = \frac{1}{G} = \rho \frac{l}{A})$ |
| 磁阻 R_m [H ⁻¹] | 电阻 R [Ω] | 基尔霍夫第一定律 | $\sum \Phi = 0$ | $\sum i = 0$ |
| 磁导 Λ_m [H] | 电导 G [S] | | | |
| 磁通密度 B [T] | 电流密度 J [A/m ²] | 基尔霍夫第二定律 | $\sum HI = \sum Ni$ | $\sum u = \sum e$ |
| $(B = \frac{\Phi}{A})$ | $(J = \frac{I}{A})$ | | | |

不同之处: 电阻与磁阻、电流与磁通、损耗。

56

0.4 电机学中常用的电工定律

5. 能量守恒定律

- 能量守恒定律
输入能量 = 输出能量 + 内部损耗
- 电机中能量守恒定律的表达形式
 - 电机运行中存在四种能量形式: 电能、机械能、磁场储能、热能。
 - 能量平衡关系:
输入的机械能或电能 = 输出的电能或机械能 + 磁场储能增量 + 热能
 - 电机分析中, 通常将能量守恒定律用功率平衡方程式表示。
稳态时, 磁场储能增量为零, 则有
输入功率 P_1 = 输出功率 P_2 + 损耗 Σp

57

绪论

小结

- 电机的作用、定义和基本分类。
- 电机学中常用的电工定律
 - 电路定律、磁路欧姆定律 (包括磁导或磁阻的表达式);
 - 电磁定律: 安培环路定律、电磁感应定律、电磁力定律;
 - 铁磁材料的基本特性 (磁化曲线, 铁耗及其近似公式);
 - 能量守恒定律在电机中的功率表达形式。
- 电机学课程特点、学习要求和学习方法。

58