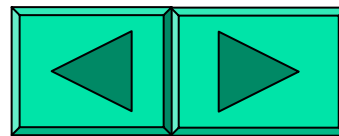


《电机学(Electrical Machinery)》

课程简介

- 电机学课程的内容
- 电机学课程的特点
- 电机学课程的学习方法
- 电机学课程的考核方法
- 参考书
- 任课教师



电机学 (Electrical Machinery)

电机学 I 和电机学 II

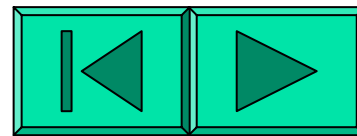
变压器 (Transformers)

交流绕组 (AC Winding)

感应电机 (Induction Machines)

同步电机 (Synchronous Machines)

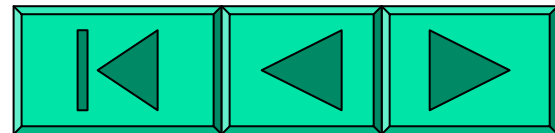
直流电机 (DC Electric Machines)



《电机学》

(Electrical Machinery)

课程的特点



一、研究的对象是实物，是一个电的、磁的、机械的综合体。则要求：

- 1.要清楚机械实物的具体结构(**Construction**)；
- 2.要弄清电机内主要电物理量和磁物理量的特性及相互关系，并能用方程式(**Equation**)、等效电路(**Equivalent Circuit**)和相量图(**Phasor Diagram**)这三种主要方式表示之；
- 3.要能运用这些特性和关系结合具体条件对电机的运行进行初步的分析 (**Analysis**)。

——这就是本课程的主要任务或总的要求

二、课程前后的连贯性强

各种电机都存在共性

例如，各种电机的原理都是以电磁感应定律和载流导体在磁场中受力作为基础。

则要求：

学生不但要掌握前面所学的基本理论，而且在学后续内容时要善于比较找出不同电机的共同处和不同点，以便更好地掌握各类电机的特点。

三、课程以定性分析为主 概念多，理论性强。要求：

改变以往以套公式算题就算完成学习任务的学习方法，而把学习重点放在课后

及时复习、钻研教材

在掌握电机中主要物理量的概念、特性及相互关系后，结合具体的条件，对电机的运行进行分析，即认真思考老师所布置的习题和思考题，培养分析问题和解决问题的能力，并且勤于总结。

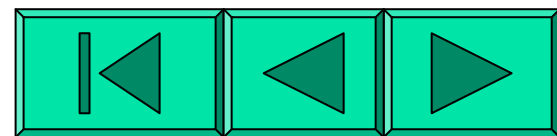
四、时空观强

- 电机内发生的电磁过程是很复杂的，
- 交流电流是一个时间的函数，
- 磁场分布是一个空间的函数，
- 交流电流产生的磁场既是时间函数，又是空间函数。
- 要求：
具有丰富的想象力和综合思考的能力。

《电机学》 (Electrical Machinery)

课程的特点

- 研究的对象是实物，是一个电的、磁的、机械的综合体，与工程实践联系非常紧密。
- 课程前后的连贯性强
- 课程以定性分析为主，概念多，理论性强。
- 时空观强



《电机学》

(Electrical Machinery)

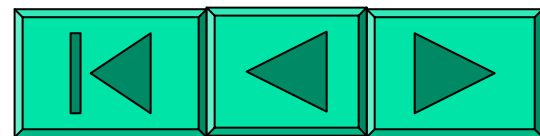
课程的学习方法

掌握电机的分析方法

理解、掌握各种电机的
基本概念、基本原理、
重点和难点

(听课、自学、
作业和实验)

总结出各种电机间的
共性和个性



基本工作原理(Fundamental Principles)

结构(Construction) ---- (电路、磁路的特点)
(The Feature of Electric and Magnetic circuit)

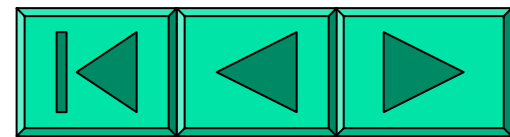
电磁物理过程分析

(导体与磁场相互作用产生
电磁转矩和感应电势)

基本方程式和等效电路

内部功率流程及损耗

运行分析

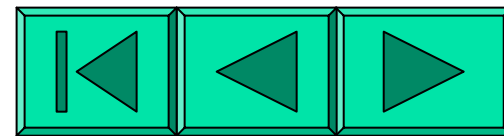


《电机学》

(Electrical Machinery)

考核方法

- 1、平时作业及考勤 10%
- 2、实验及操作 20% (操作10%)
- 3、变压器 20%
- 4、交流绕组 10%
- 5、感应电动机 20%
- 6、同步电机 20%



实验说明

变压器综合实验

（单相变压器参数测定

三相变压器极性与组别）

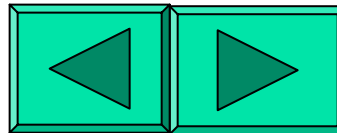
感应电动机综合实验

同步发电机的综合实验

直流电机综合实验。

先写预习实验报告，合格后，再做实验。

实验必须完成和参加，否则不能参加考试。



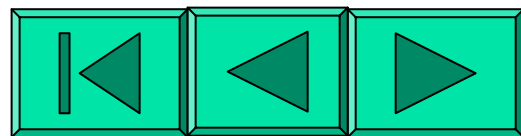
教材及参考书

- 1. 汤蕴璆等合编 《电机学》 普通高等教育“九五”国家重点教材 机械工业出版社 2000
- 2. 顾绳谷主编, 《电机及拖动基础》 (上、下册), 机械工业出版社, 1998, 第2版
- 3. 许实章主编, 《电机学》 (上、下册), 机械工业出版社, 1994, 修订版
- 4. 张松林主编, 《电机及拖动基础习题集与实验指导书》, 机械工业出版社, 1997
- 5. <ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS>

Stephen J.Capman

McGraw-Hill Book

Company



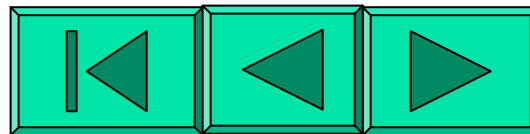
任课教师

- 武惠芳 郭芳
- 刘慧娟 张威

——电气工程学院电机与电器研究所

(电气楼203)

(电话：84831)

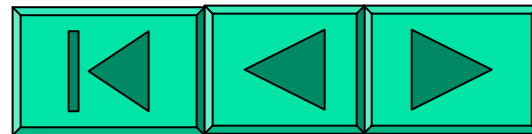


课程简介

- 电机学课程的内容
- 电机学课程的特点
- 电机学课程的学习方法
- 电机学课程的考核方法
- 参考书
- 任课教师

绪论

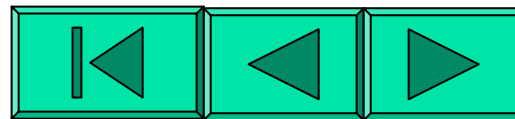
- ★ ■ 一、电机的分类及发展概况：
- ★ ■ 二、电机的应用：
- ★ ■ 三、电力拖动系统的发展概况：
- ★ ■ 四、本课程的性质和任务：
- ✦ ■ 五、磁路的基本知识



电机的分类及发展概况：

电机(Electrical Machinery)是以适当的有效材料（导电和导磁）构成的能互相进行电磁感应的磁路和电路(Electric and Magnetic circuit)，以产生电磁转矩和电磁功率(Electrical and magnetic Torque and Power)，达到转换能量(Energy)形式的目的。

- 电机是一种机电能量转换的装置
- 变压器是一种电能传递装置

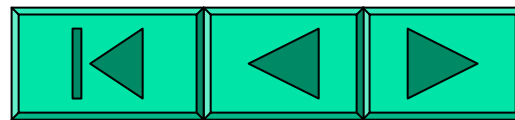


一般分类:

静止电机—— 变压器
电机 { 直流电机
旋转电机 { 同步电机
交流电机 { 异步电机
(感应电机)

电机是一种机电能量转换的装置

变压器是一种电能传递装置



按功能分

- 将机械能转换为电能——发电机(Generators)
- 将电能转换为机械能——电动机(Motors)
- 不以功率传递为主要职能，而在电气机械系统中起调节、放大和控制作用
- 电机——微型控制
- 将一种形式的电能转化为另一种形式的电能
——变压器、变流机、变频器、移相器
- 其共同的特点是：
根据电磁感应定律和电磁力定律进行能量转换。

电机的发展

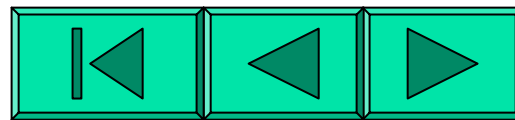
功率电子学等学科的渗透
使电机学得到了新的发展

高可靠性、高精度、
快速相应的控制电机

性能好、运行可靠、体积小
单机容量的重量轻

电机初步定型
电机理论形成
电机设计计算发展

电动机代替蒸汽机



电机的发展简史和发展趋势

电机的发展简史可分为两个时期

初级发展时期

- 从发现电磁感应现象开始到十九世纪末和本世纪初各种电机的基本型式已经具备为止。可分为四个阶段：
 - 1、电磁感应定律的发现：
 - 十八世纪中叶开始了第一次世界工业革命。主要是以机器大生产代替工场手工业。主要标志是蒸汽机的广泛使用。但由于蒸汽动力在输送和管理上的不便，不能满足生产力发展的需要，迫使人们寻找新的能源和动力。在此时代背景下，电磁学得到了兴起和发展。
 - **1821年**，法拉第表演了电流位于磁场中产生机械力的实验，发现了电动机的作用原理，不久制造了原始型式的电动机。
 - **1824年**，阿果拉发现了旋转磁场，**1831年**，法拉第提出了电磁感应定律，**1832年**，出现了原始型式的发电机。

- 2、直流电机的发展：
 - 电能的最早应用是供给照明和电化学工业的需要，所以最初发展的电机是直流电机。
 - 1845年，用电磁铁代替了永久磁铁。
 - 1867年，制成了自励发电机。
 - 1882年，建成了第一条直流输电线路。
 - 远距离输电需提高单机容量及运行电压，使其发展受到了限制。
- 3、单相交流电的应用：
 - 1876年交流电应用于照明装置，不久有了原始型式的同步发电机和变压器。

- 4、三相交流电的应用：
 - 在单相交流电源供电的情况下，单相交流电动机无法自行起动。
 - 不久，两相电流能产生**旋转磁场**的原理被发现，1885年制成了两相交流异步电机的模型。
 - 1889年，多里沃—多勃罗沃尔斯基提出了三相制的建议并设计和制造了第一台三相变压器和三相异步电动机。至1897年，建成了第一个三相交流输电系统。
 - 交流三相制发电厂的迅速发展，使高速运转的汽轮发电机代替了蒸汽机为原动机的发电机，把社会生产力推进到电力时代，第二次技术革命。

近代发展及今后发展的主要趋势

- 从本世纪初直到现在及将来。
- 1、单机容量不断提高；
- 单机容量大，单位容量的用料省、损耗小、造价低；同时电站机组少，工作人员少，厂房面积小，可节约基建投资及维护费用。
- 2、重量的不断减轻和外形尺寸的不断缩小；
- 3、应用范围不断扩大；
- 特定用途电机：潜水电机、防爆电机、船舶电机、纺织电机、矿用电机等。

电机初步定型。

建立了电机理论，

电机设计计算等得到发展。

要求性能良好、运行可靠、单机容量
重量 轻、体积小等。

而且发展出高可靠性、高精度

、
快速相应的控制电机，

控制电机已成为电机学科的一个独立分支

。

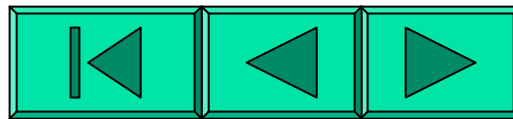
功率电子学等学科的渗透，

使电机学得到了新的发展。

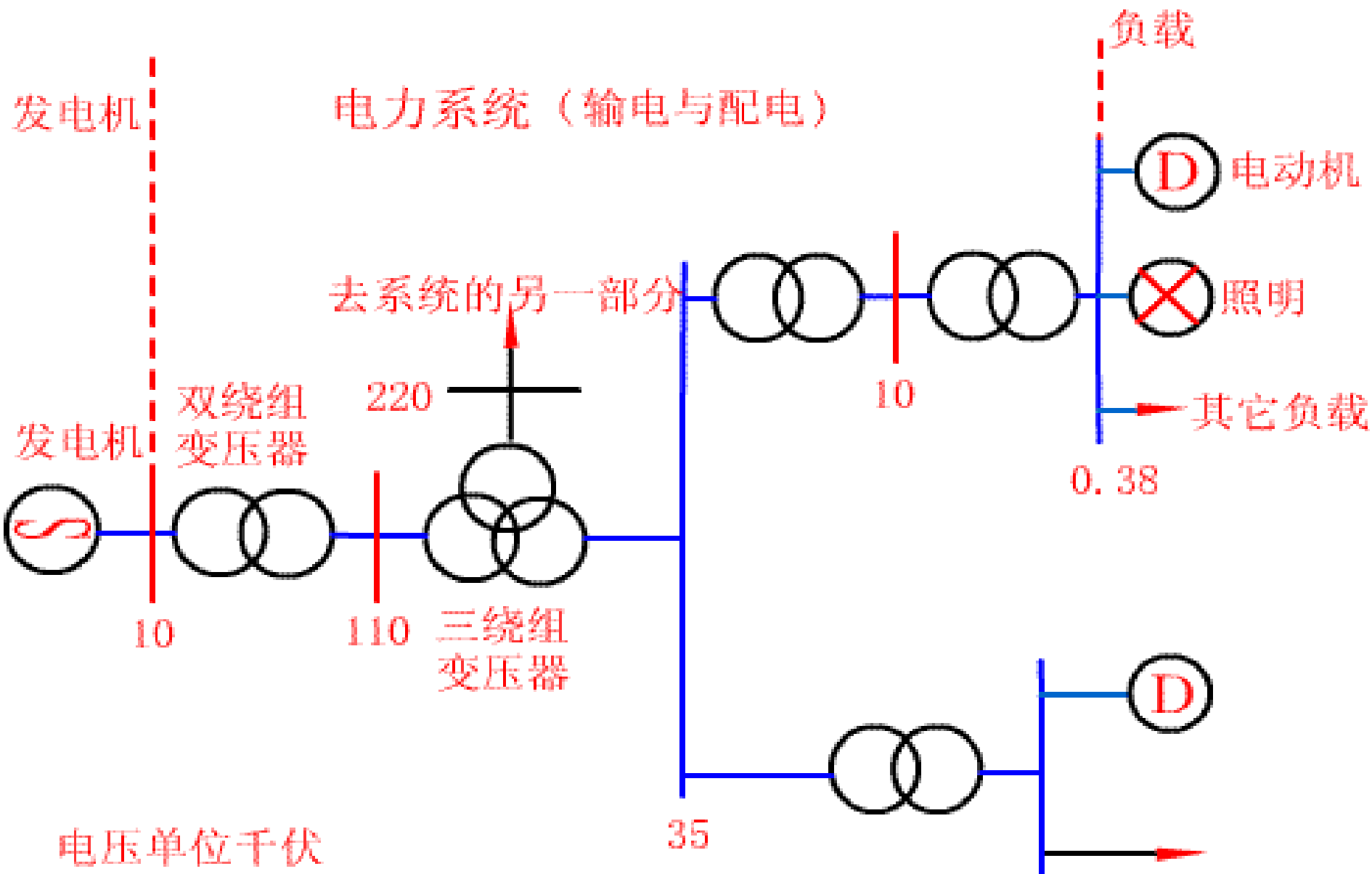
如开关磁阻电机等。

- 我国电机制造业发展简况：
- 解放前：200kW发电机、2000kVA变压器。
- 解放后：发展迅速，1955年：10000kW的水轮发电机；1956年：12000kW的汽轮发电机；1958~1960年：72500kW的水轮发电机，100MW的双水内冷汽轮发电机；1959年：220kV、120000kVA的三相变压器，6300kW的异步电动机和4500kW的直流电动机；1972年：300MW双水内冷汽轮发电机，360000KVA变压器。目前已能制造600MW。
- 值得一提的是**1958**年我国制成了世界上第一台用于生产的双水内冷汽轮发电机（**12000kW**）为电机制造工业继续发展开辟了一条新的道路。

我国从仿制进入
自行试验研究和自行设计，
建立了自己的电机工业体系，
统一的国家标准，统一的电机
和变压器系列，
能制造成套的大、
中型火力和水力发电设备。



电机的应用



课程性质、任务：

专业基础课

一座桥梁：工科大学公共基础课和专业技术课之间。

任务：掌握变压器和交、直流电机的基本结构、工作原理和运行性能，并对电机的运行进行初步的分析

提供基础知识：《自动控制系统》、《计算机控制技术》、《控制电机》、《变频调速》及电力系统相关课程。

作业、实验：

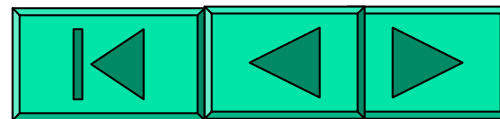
一定数量的作业和4个设计型实验：

变压器综合实验

三相异步电动机综合实验

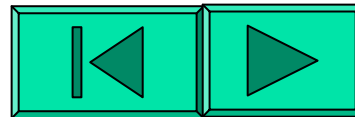
同步发电机的综合实验

直流电机综合实验



磁路基本知识

- 一、常用物理量
- 二、铁磁材料的性质
- 三、常用基本电磁定律
- 四、电磁感应定律



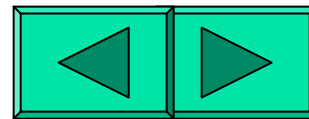
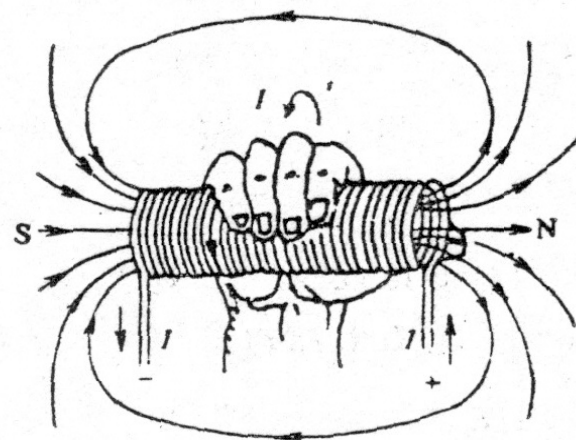
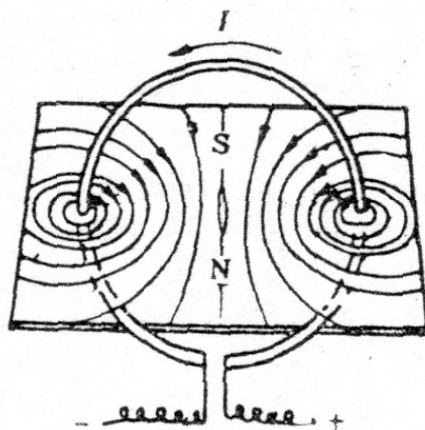
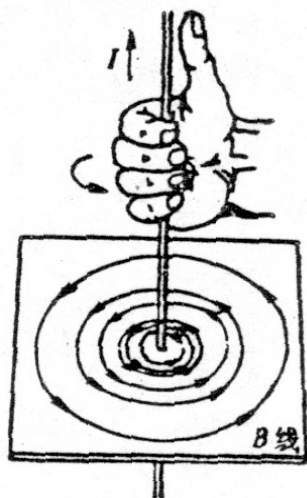
一、常用物理量：

1、磁感应强度 (magnetic flux density) \vec{B} (向量)

单位：特斯拉，T，或高斯。

描述磁场强弱和磁场方向的物理量。

磁力线是闭合曲线，其方向与产生磁场的
电流的方向满足右手螺旋关系。



2、磁通(magnetic flux) Φ : 单位: 韦伯, W b

表征磁介质或真空中磁场分布的物理量。

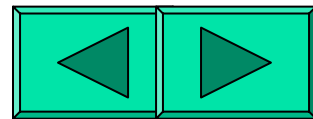
穿过某一截面的磁感应强度 \mathbf{B} 的通量。

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{s} \quad (\text{面积分})$$

电机的每极磁通，即穿过每个磁极横截面的全部磁通，是设计、计算电机的重要基础数据。

特别：在均匀磁场中，若 \vec{B} 与 \vec{S} 垂直，则 $\Phi = BS$ 。

$$1T = 1Wb / m^2$$



3、**磁场强度**(magnetic field intensity) \vec{H} (向量)

单位：安匝/米，At/m.

是描述磁场强弱和方向的辅助物理量。
在电机和变压器中常常使用该物理量。

它与磁感应强度的关系：

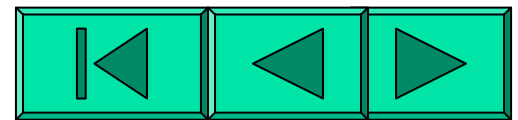
$\vec{B} = \mu \vec{H}$ ， μ 为磁导率(permeability)，单位为H/m，

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ 亨/米 (真空)

非磁性物质的 μ 为常数；铁磁材料的 μ 比真空的 μ_0
大数十至数千倍。

如铸钢的 μ 约为 μ_0 的1000倍；

各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的6000~7000倍。



4、**磁势**(magnetomotive force **MMF**)**F**:

(磁压降, 磁动势)

单位: 安匝, At。

$$F=NI$$

线圈匝数与励磁电流之积。

5、**磁阻**(reluctance of the magnetic circuit):

单位为: 1/亨 或 At/Wb

$$R_m = L / \mu s$$

L 为磁路长度, s 为磁路横截面积。

6、磁导

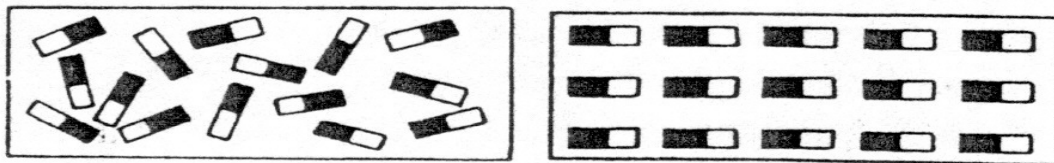
$$\lambda_m = 1 / R_m$$

单位为：亨。

7、磁链 (flux linkage) Ψ :

$\Psi = N \phi$ ， 线圈所交链的磁通。

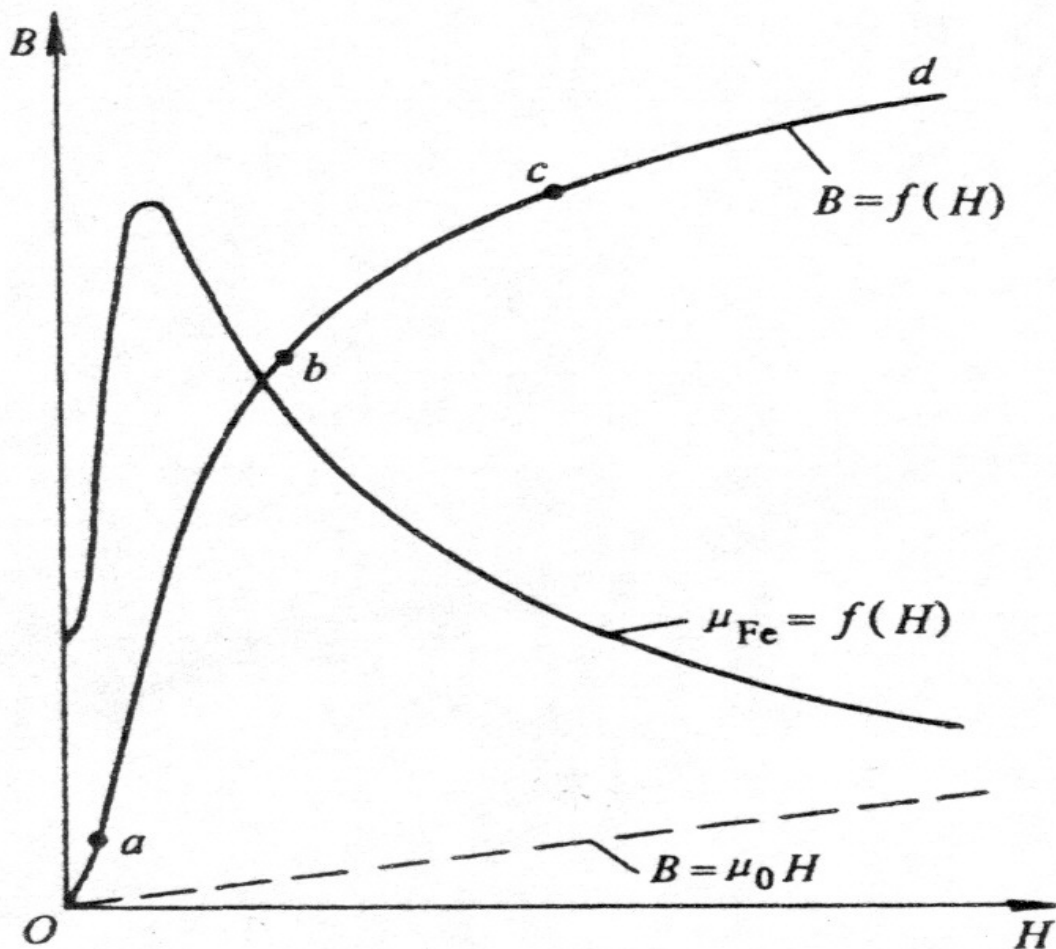
二、铁磁材料的性质 (磁化、磁滞和损耗)



1、起始磁化曲线:

非铁磁材料的
 B 与 H 成正比,
是线性关系。

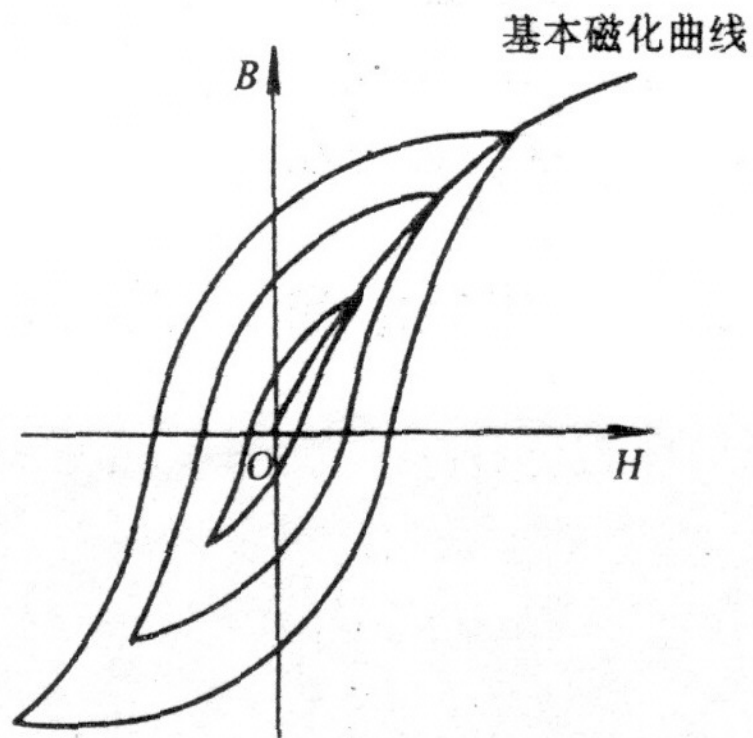
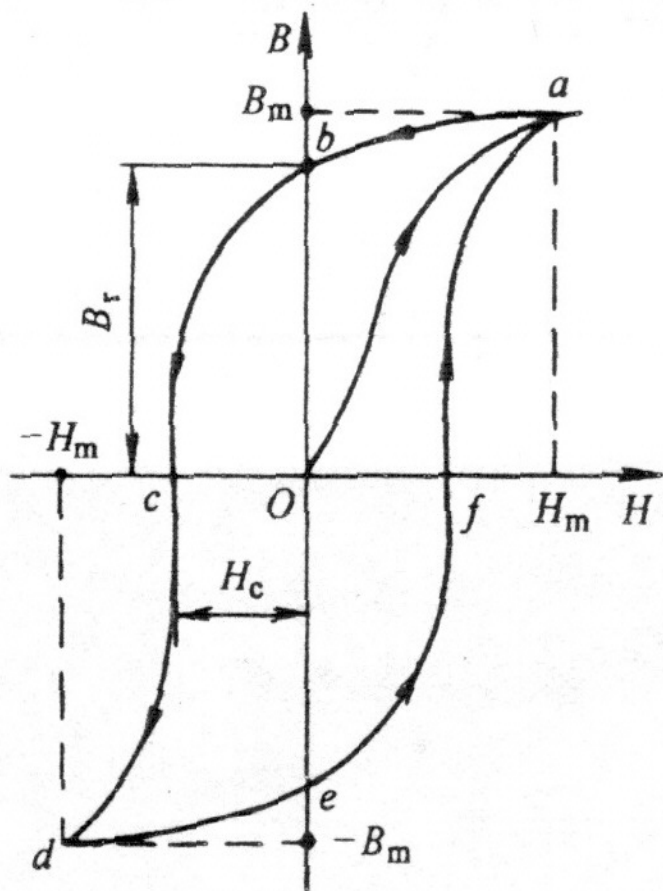
在铁磁材料中
 B 与 H 的关系
为非线性的



2、磁滯回线

B_r 为剩余磁感应强度。 H_c 称为矫顽力

3、基本磁化曲线



4、**铁心损耗**：指磁滞损耗和涡流损耗。

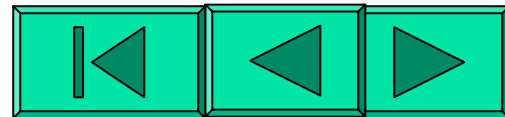
(1) 磁滞损耗

分析表明，磁滞损耗与磁场的交变频率、铁心的体积V和磁滞回线所包围的面积成正比。实验证明，磁滞回线所包围的面积与 B_m 的n次方成正比，故

$$P_h = C_h f B_m^n V$$

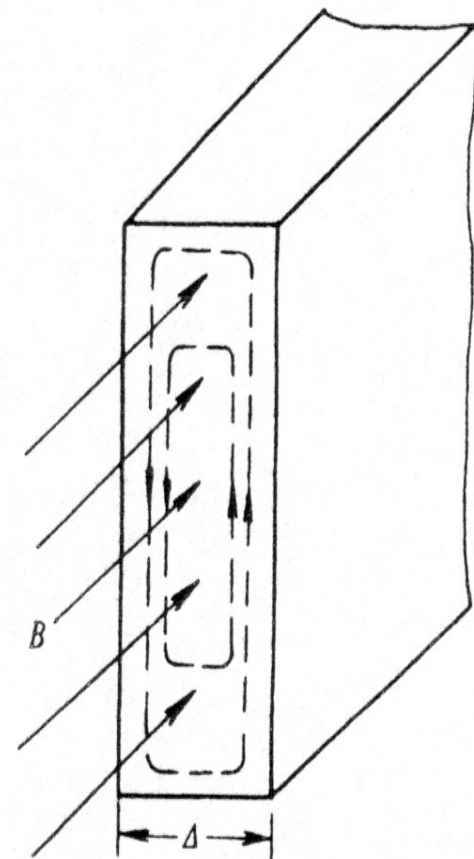
(2) 涡流损耗

当通过铁心的磁通随时间变化时，铁心中将产生感应电动势，并引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通做旋涡状流动，故称为涡流，涡流在铁心中引起的损耗为涡流损耗



分析表明，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也就越大；而铁心的电阻越大，涡流所流过的路径越长，涡流损耗就越小。对于由硅钢片叠成的铁心，经推导可知，涡流损耗为

$$b^6 = C^6 q_5 \tau_5 B_5^m \Lambda$$



三、常用基本电磁定律：

1、全电流定律(Ampere's law):

空间 n 根载流导体，电流分别为 I_1, I_2, I_3 ；
沿任一闭合路径 l ， \vec{H} 的线积分等于
闭合路径所包围的导体电流代数总和。

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

应用到磁路中，作用在磁路上的总磁势
等于各段磁路的磁压降之和。即：

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum I = NI$$

2、电磁感应定律(electromagnetic induction):

——(Faraday's law)

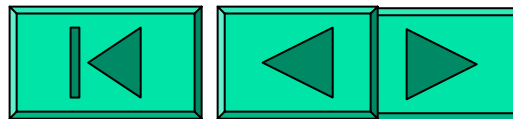
匝数为N的线圈在磁场中，若与线圈交链的磁通 Φ 发生变化时，线圈感应出电势(emf)，称为电磁感应。

e 的正方向与 Φ 的正方向符合右手螺旋法则

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Lenz's law}).$$

含义：电磁感应产生的电势与线圈匝数和磁通的变化率成正比。

负号：感应电势作用下线圈内流过电流，该电流产生的 Φ 逆着原 Φ 变化。



①、变压器电势(emf):

线圈与磁场相对静止，只有 Φ 变化。

②、运动电势(motional emf):

磁场恒定，线圈与磁场相对运动引起 Φ 变化。

当磁力线，导体，运动方向三者互相垂直时，

$$e = Blv$$

3、自感电势：与线圈的自感和电流变化率成正比。

线圈中有电流流过，产生与线圈自己交链的 Φ ，若电流变化， Φ 变化，因而感应出电势。

$$e_L = -N \frac{d\Phi_L}{dt} = -\frac{d\Psi_L}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

(self-inductance)

自感 $L = \Psi_i / i$ ， 即单位电流产生的磁链。单位为：亨

4、互感电势：

线圈1、2，1中有电流流过并变化时，产生交链2的磁通变化，在2中产生感应电势。

$$e_{M2} = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}$$

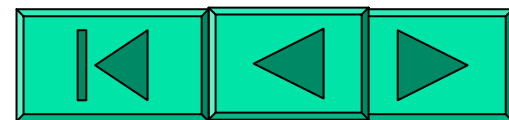
空心线圈 $\Psi = Mi$ ， M 为线圈1和2之间的互感系数，单位：亨。

同理，线圈2中电流也可在1中感应电势： $e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt}$

$$M = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{N_1 N_2}{R_{12}} = N_1 N_2 \lambda_{12}$$

(mutual inductance)

M的大小与两线圈匝数的乘积和互感磁通所经磁路的磁导成正比。



5、电磁力定律:

载流导体在磁场中受电磁力，
当磁场与导体互相垂直，
则 $f = Bli$ ，方向符合左手定则。

第二部分 变压器

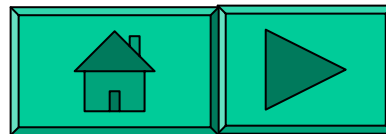
- 第二章 变压器

以电力变压器为研究对象，讲述变压器的工作原理、分类、结构。

重点讲述变压器的基本原理及运行特性。

对三相变压器特点加以探讨。

最后，对自耦及仪用互感器加以介绍。



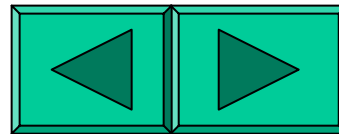
变压器是一种**静止**的电器，它利用电磁感应原理将一种等级电压和电流的交流电能**转换**成同频率的另一种等级的电压和电流的交流电能。



工作原理：**电磁感应和磁势平衡**



分析思路：**电磁物理过程——电路**

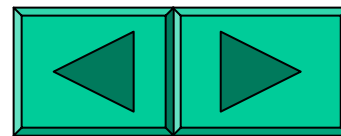


研究步骤：**实物模型**———**结构**

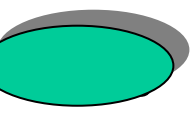
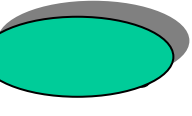
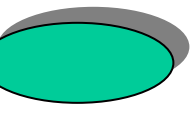
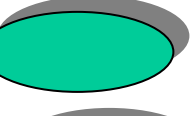
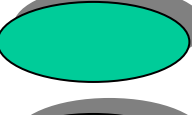



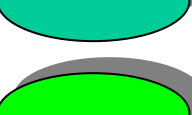
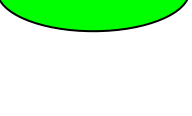
物理模型———电路、磁路、磁场特点。
空载、负载运行时的物理情况(电磁过程)

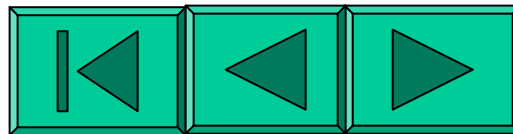
电路模型———基本方程式，
相量图和等效电路

稳态运行分析(单台及并联运行)



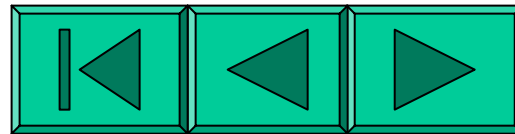
第二章 变压器

-  第一节 变压器的基本原理、分类及结构
-  第二节 变压器的空载运行
-  第三节 变压器的负载运行
-  第四节 变压器的基本方程式、等效电路及相量图
-  第五节 等效电路参数的测定
-  第六节 三相变压器
-  第七节 标幺值
-  第八节 变压器的运行特性
-  第九节 变压器的并联运行
-  第十节 三绕组变压器、自耦变压器与互感器

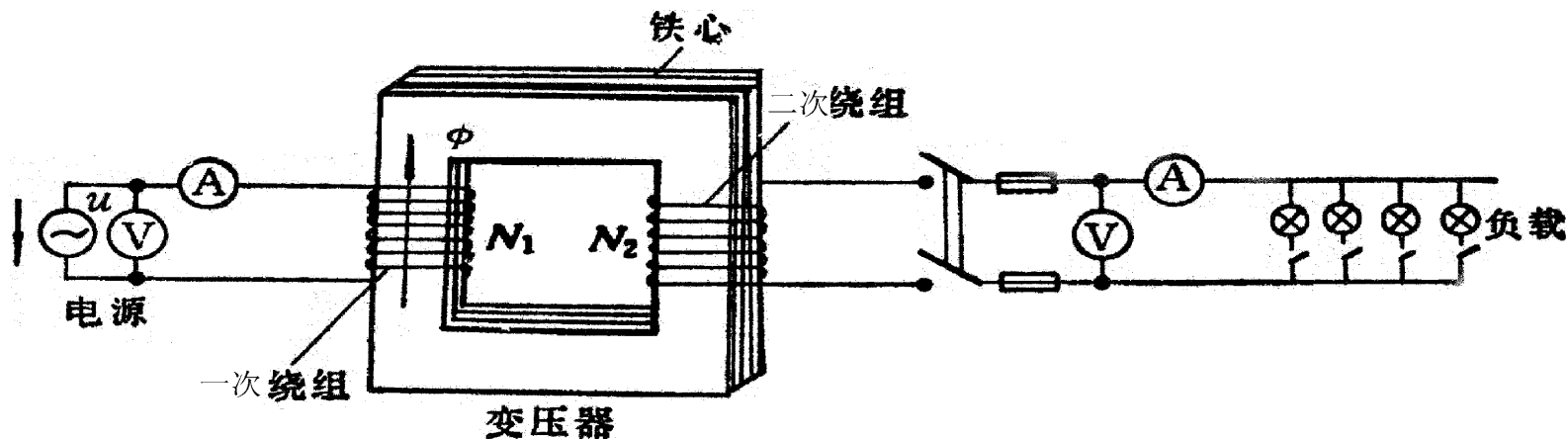


第一节 变压器的基本原理、 分类及结构

- 一、变压器的**基本原理**
- 二、变压器的**分类**
- 三、变压器的**结构**
- 四、变压器**铭牌**



一、变压器的基本原理



* 核心部件： 闭合铁芯与两个绕组

* 基本术语：

电源侧—— 一次绕组/一次侧/原绕组/原边

负载侧—— 二次绕组/二次侧/副绕组/副边

当负载增大，二次电流将如何变化？

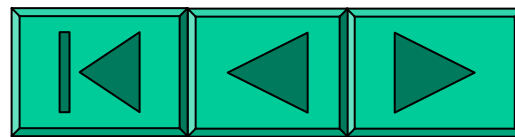
对于理想变压器，可不计绕组电阻及铁耗。
设原副边绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 ，
则原副边绕组的感应电势为：

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

若 $N_1 \neq N_2$ $e_1 \neq e_2$ $u_1 \neq u_2$

变压关键：

- (1) 交链一、二次绕组的磁通是交变的；
- (2) 一、二次绕组的匝数不同。



二、变压器的分类:

1、**电力变压器**: 电力系统中输配电力的主要设备。

升压, 降压, 配电, 联络, 厂用 (按用途分)

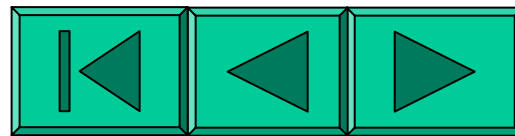
还可按线圈数: 自耦、双绕组、三绕组、多绕组

按相数: 单相、三相、多相。

还可按冷却介质, 冷却方式, 铁芯结构及调压方式分类

2、**特种变压器**: 整流, 电炉, 高压试验, 矿用, 船用,

小容量控制变压器, 互感器, 调压器, 电抗器等。



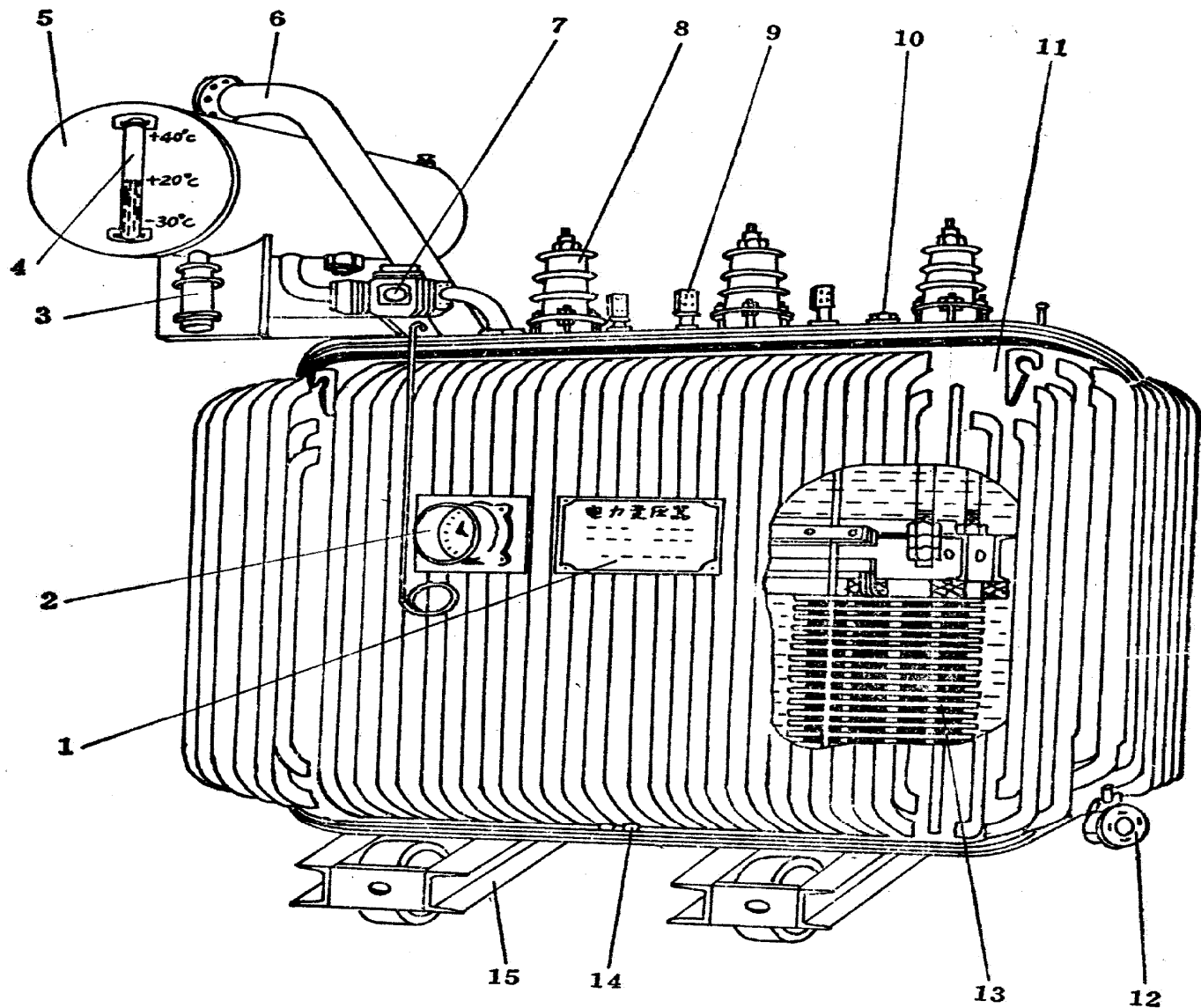


图 3-2 油浸式电力变压器

- 1—铭牌 2—讯号式温度计 3—吸湿器 4—油表 5—储油柜 6—安全气道 7—气体继电器
 8—高压套管 9—低压套管 10—分接开关 11—油箱 12—放油阀门 13—器身 14—接地
 板 15—小车

三、变压器的结构：

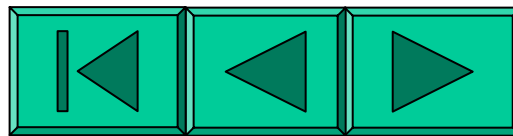
器身：铁心、绕组、绝缘和出线装置；

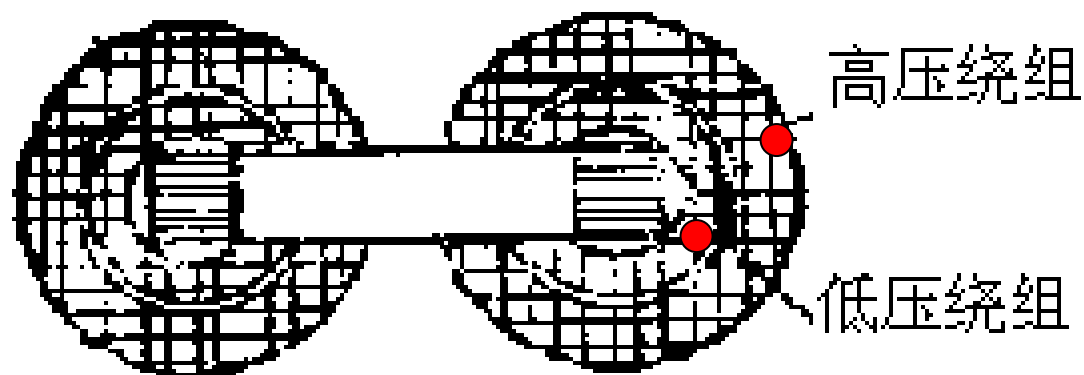
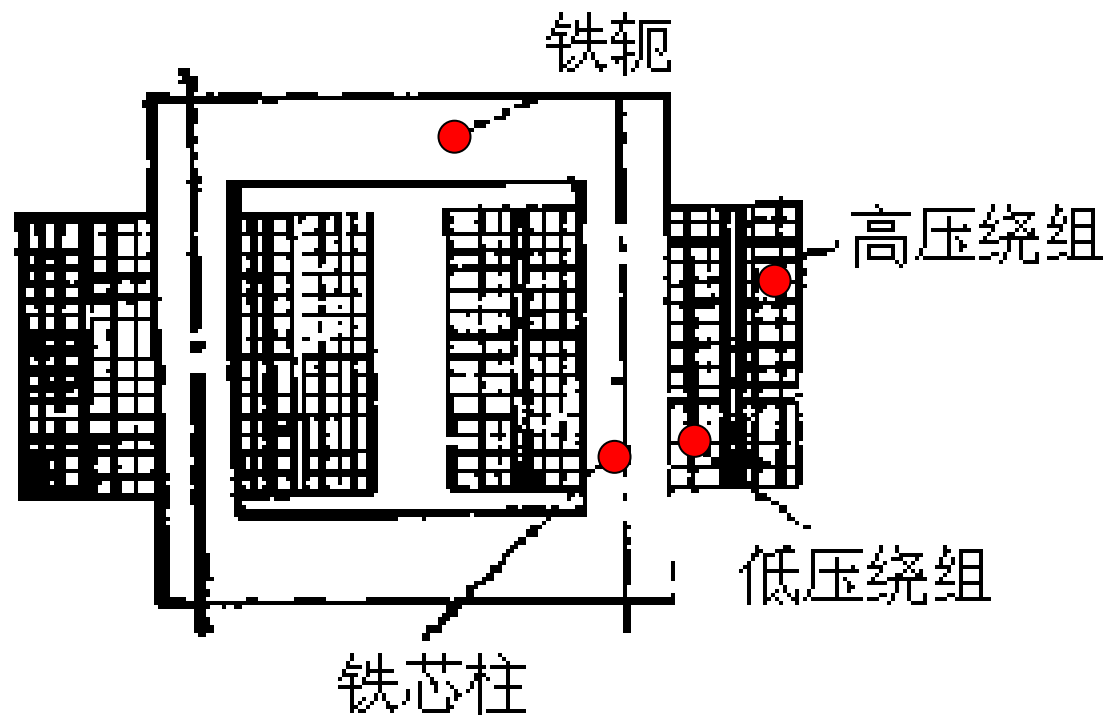
油箱； 冷却装置； 保护装置

（一）、铁芯：磁路部分。

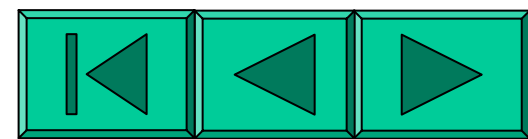
含硅量高的(0.35~0.5mm)厚硅钢片迭压而成。

（为减少磁滞，涡流损耗）分为铁芯柱和铁轭两部分结构的基本形式有芯式和壳式两种。





单相心式变压器



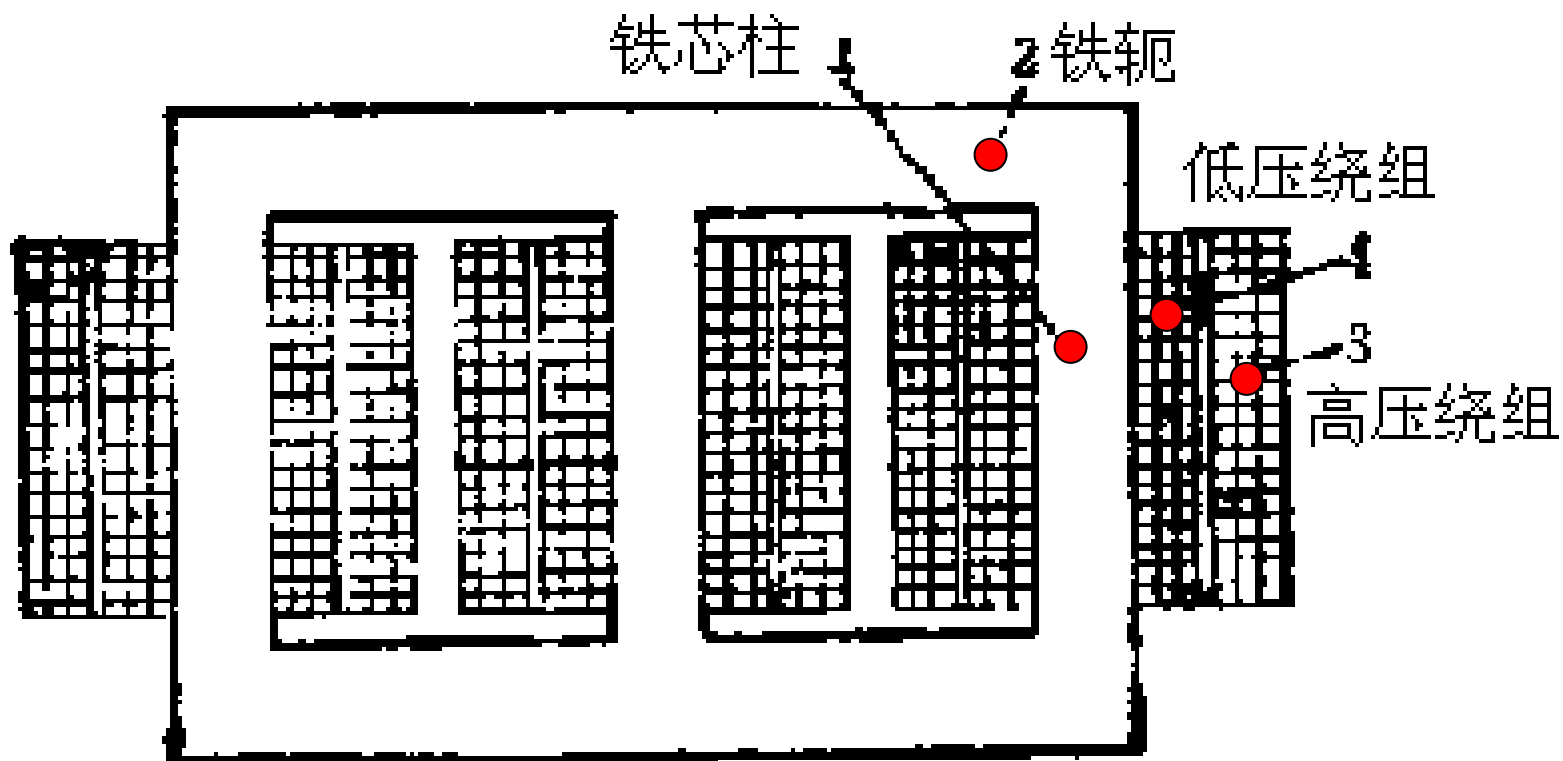
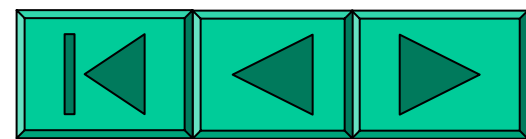
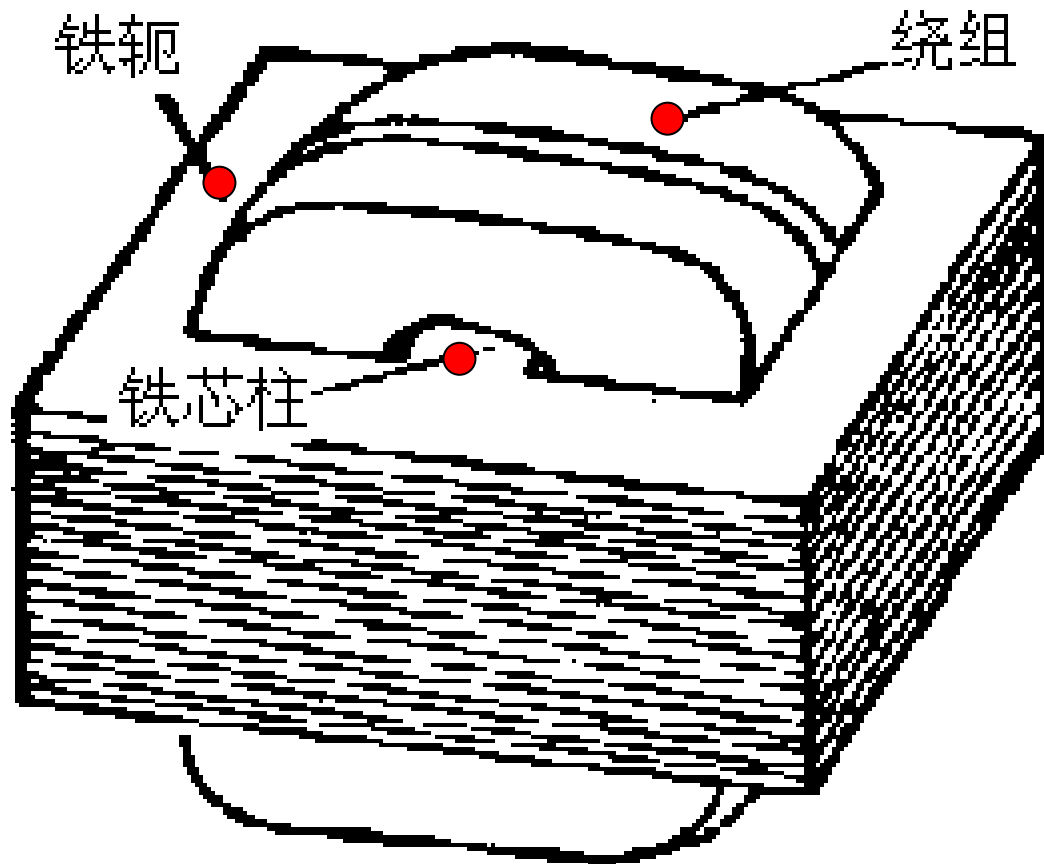
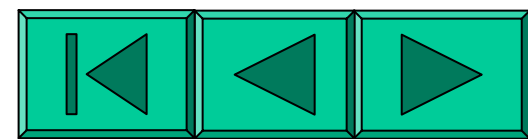
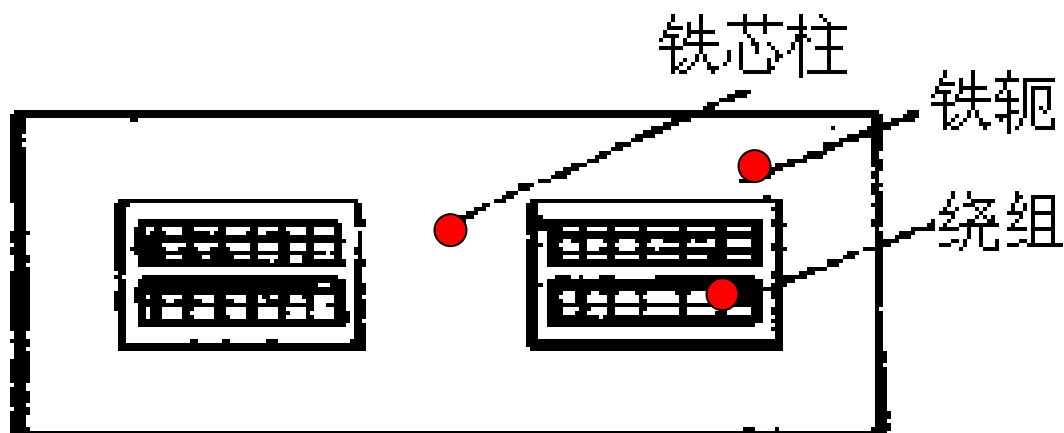


图2-3 三相芯式变压器





单相壳式
变压器



(二) **绕组**：电路部分。

高压绕组，低压绕组

同心式：高（外）、低（内）压绕组同心地套在铁心柱上。结构简单，制造方便。

交迭式：做成饼式，高低压绕组交迭放置，最上和最下为低压绕组。漏抗小，机械强度高，引线方便，特殊变压器用的多。

(三) **保护装置**：

包括储油柜（油枕）、吸湿器（呼吸器）、安全气道（防爆管）、气体继电器、净油器、温度计。

(四) **其它结构部件**：

储油箱，散热管，分接开关

四、变压器铭牌：

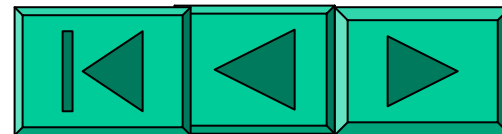
用以标明该设备的额定数据和使用条件。

额定值：保证设备能正常工作，且能保证一定寿命而规定的某量的限额。

1、**额定容量**： S_N

视在功率，伏安，千伏安，兆伏安。

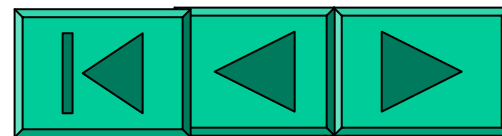
在稳定负载和额定使用条件下，加额定电压，额定频率时能输出额定电流而不超过温升限值的容量。对 **三相**变压器指三相容量之和。



2、**额定电压** U_N （对三相变压器指线电压）

原绕组的额定电压 U_{1N} 是指规定加到一次侧的电压；

副绕组的额定电压 U_{2N} 是指分接开关放在额定电压位置，一次侧加额定电压时二次侧的开路电压，单位kV。



3、**额定电流**：对三相变压器指线电流；单位A或kA。

4、**关系**：

单相
$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

三相
$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

（无论Y接或D接）

作业1：推导三相变压器额定值之间的关系。（ $U_{1N\phi}$ ）

5、**额定频率** f_e ：工频50赫。

6、**相数**： m 。

6、**接线图和联接组别**。

7、**漏电抗标么值或短路电压**。

8、**运行方式**。（长期的、短期的）

9、**冷却方式**。

还有变压器**总重量**、变压器**油重量**、**器身重量**等。

例如：一台三相变压器，其额定容量

$$S_N = 100 \text{ 千伏安} ,$$

原、付边额定电压 $U_{1N} / U_{2N} = 6000 / 400 \text{ 伏}$

则原、付边的额定电流为多少？

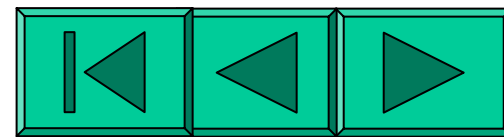
作业1：推导三相变压器额定值之间的关系。（ $U_{1N\phi}$ ）

作业2：P59 2-17 2-18

注意： 变压器实际使用时的功率与额定容量不相同。

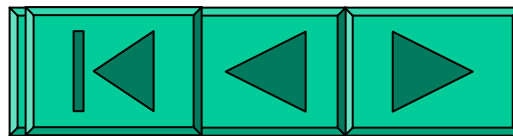
因为实际使用时，付边电流不一定是额定电流，它受负载性质的影响(容性、感性、纯电阻)。

付边的电压也不一定是额定电压。



第二节 变压器的空载运行

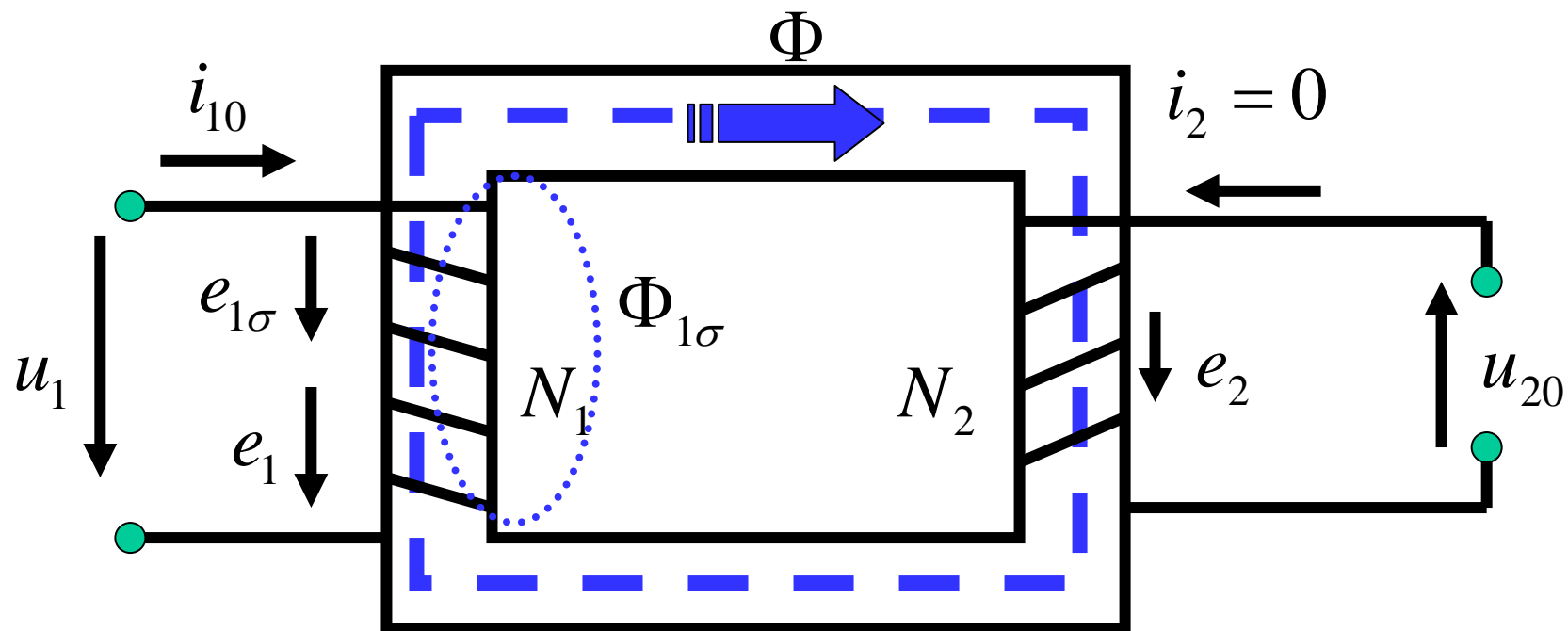
- 一、空载运行时物理情况
 - 1、参考正方向
 - 2、主、漏磁通
 - 3、方程式
- 二、各物理量的关系
 - 1、感应电势与主磁通的关系
 - 2、主磁通与激磁电流的关系
 - 3、感应电势与激磁电流的关系



空载运行:

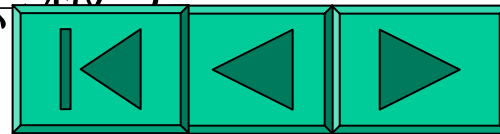
一次侧加额定电压, 二次侧开路的运行

一、空载运行时物理情况:



空载电流、磁动势、主磁通、漏磁通

(瞬时物理量的关系图—黑板)



1、参考正方向：

电源电压 \dot{U}_1 —— 习惯取由首端 A 指向尾端 X

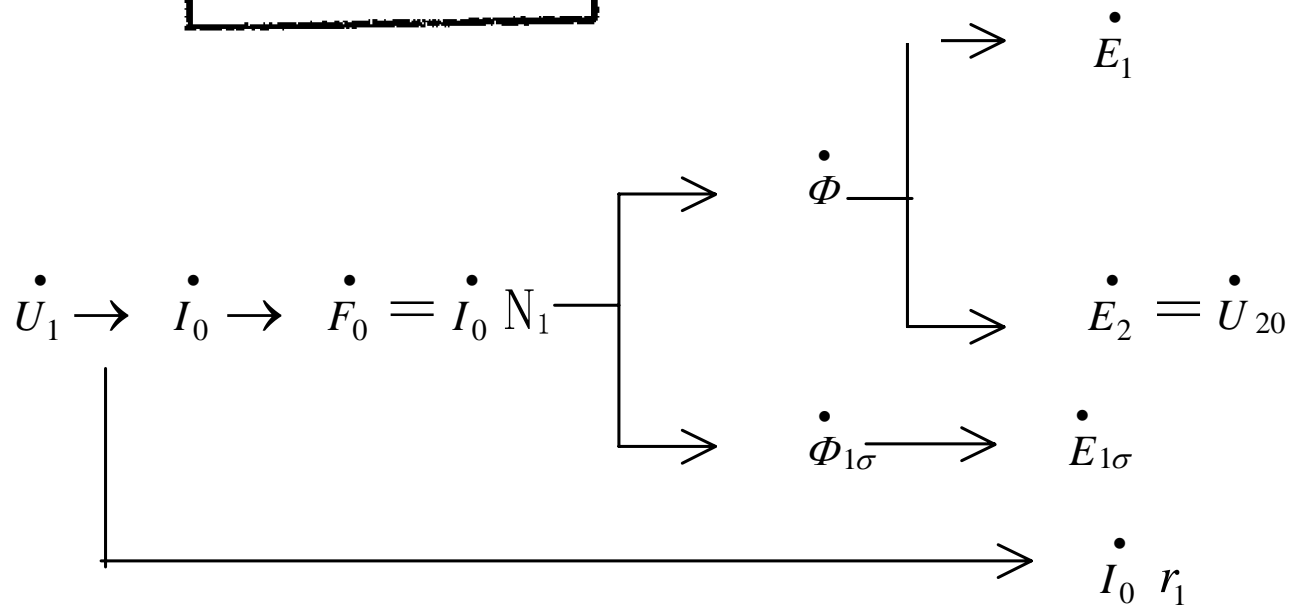
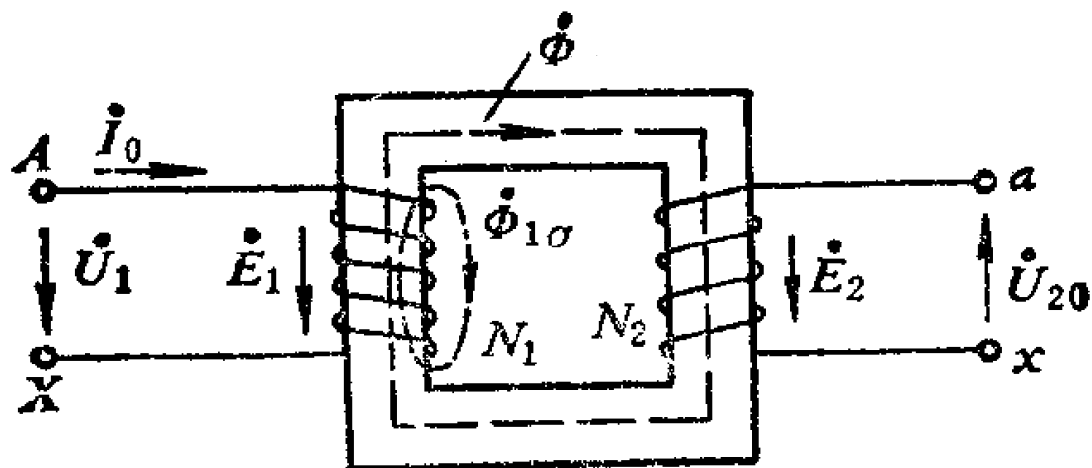
空载电流 \dot{I}^{I0} —— 习惯取参考正方向与电压 \dot{U}_1 一致

磁通 $\dot{\Phi}$ $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ —— 习惯取参考正方向与电流正方向符合“右手螺旋”定则

感应电动势 \dot{E}_1 \dot{E}^s 和 $\dot{E}_{1\sigma}$ —— 习惯取参考正方向与磁通正方向符合“右手螺旋”定则

二次电流 \dot{I}_2 —— 习惯取参考正方向与 \dot{E}_2 的正方向一致

二次开路电压 \dot{U}_{20} —— 习惯取参考正方向与 \dot{I}_2 的正方向一致



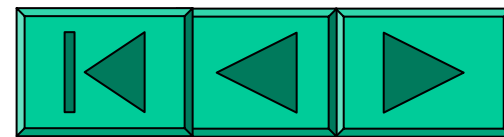
2、主、漏磁通：

主磁通 Φ (与原副绕组交链)，比例大， Φ 与 i_0 非线性。
 漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ (仅与原绕组交链)，比例小， $0.1\sim 0.2\%$ ，
 $\Phi_{1\sigma}$ 与 i_0 线性。

主磁通 $\Phi \rightarrow e_1, e_2$ ，传递能量

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

漏磁通 $\Phi_{1\sigma} \rightarrow e_{1\sigma}$ ，只起电压降作用

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt}$$


3、方程式

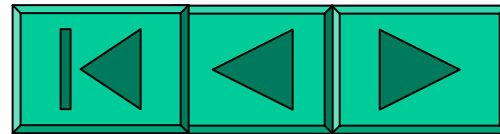
原付绕组电势平衡方程为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma}$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

若忽略原绕组电阻压降和漏磁通影响时，
由原边电压平衡方程式可得：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$



二、各物理量关系分析：

1、感应电势与主磁通的关系：若 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 有：

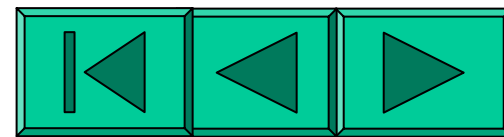
$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

感应电势有效值：

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = N_1 \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = N_2 \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 4.44 f N_2 \Phi_m$$



用相量表示：
$$\dot{E}_1 = -j4.44 fN_1 \dot{\Phi}_m$$

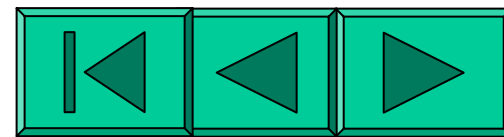
$$\dot{E}_2 = -j4.44 fN_2 \dot{\Phi}_m$$

同理，漏磁通感应的电势也有：

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} = -N_1 \omega \Phi_{1\sigma m} \cos \omega t = E_{1\sigma m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = N_1 \omega \Phi_{1\sigma m} / \sqrt{2} = 4.44 fN_1 \Phi_{1\sigma m}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 fN_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}$$



变压器变比:

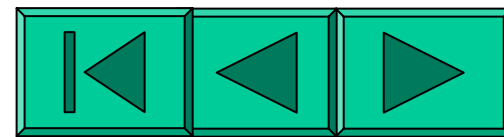
定义:相电势之比

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N\phi}}{U_{2N\phi}}$$

(习惯取 $K > 1$)

$k > 1$ 降压,

$k < 1$ 升压



若忽略原绕组电阻压降和漏磁通影响时，
由原边电压平衡方程式可得：

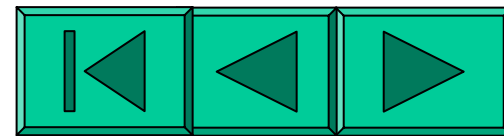
$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

重要结论：

变压器中，当频率和原绕组的匝数一定时，
主磁通 Φ 的大小和波形主要决定于电源电压的
大小和波形。

但主磁通 Φ 是由激磁磁磁势 (或激磁电流)产生的。

作业： P59 2-19 2-20



2、主磁通和空载电流 I_0 的关系

产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 的电流是激磁电流，用 \dot{I}_m 表示
空载电流就是激磁电流。激磁电流 \dot{I}_m 可分为

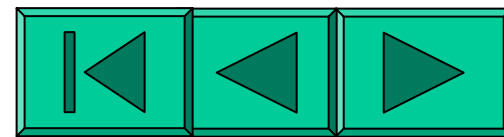
磁化电流 \dot{I}_μ ：以产生主磁通（磁化曲线）
（无功分量）

铁耗电流 \dot{I}_{Fe} ：产生损耗（有功分量）

故

$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

- 附：1、磁化电流波形分析（磁化曲线）
2、激磁电流波形分析（考虑磁滞损耗）
3、向量图



3、感应电势与激磁电流的关系：

主磁通所感应的电势与产生主磁通的磁化电流的关系为：

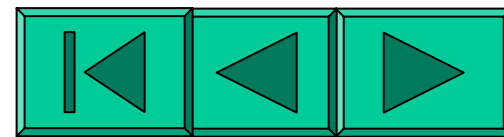
$$\phi = N_1 i_\mu \cdot \Lambda_m$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1^2 \Lambda_m \frac{di_\mu}{dt} = -L_{1\mu} \frac{di_\mu}{dt}$$

因此，可引入磁化电抗 X_μ ，且 $X_\mu = \omega L_{1\mu} = \omega N_1^2 \Lambda_m$
则

$$\dot{E}_1 = -j \dot{I}_\mu X_\mu$$

另外，铁耗电流 \dot{I}_{Fe} 与 $-\dot{E}_1$ 同相位，若引入铁耗电阻 R_{Fe} ，则有

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_{Fe} R_{Fe}$$


因此感应电势与激磁电流的关系为：

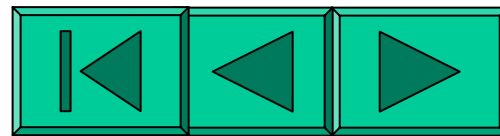
$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} = -\dot{E}_1 \left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} \right)$$

因此，可引入激磁阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$
则有

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_m (r_m + jx_m)$$

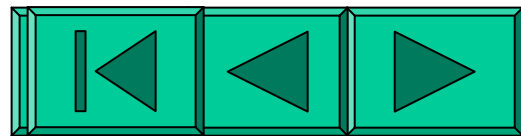
$$\text{或 } -\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jx_m)$$

(参阅书P28 图2-10)



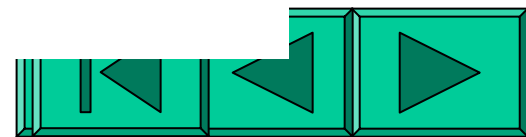
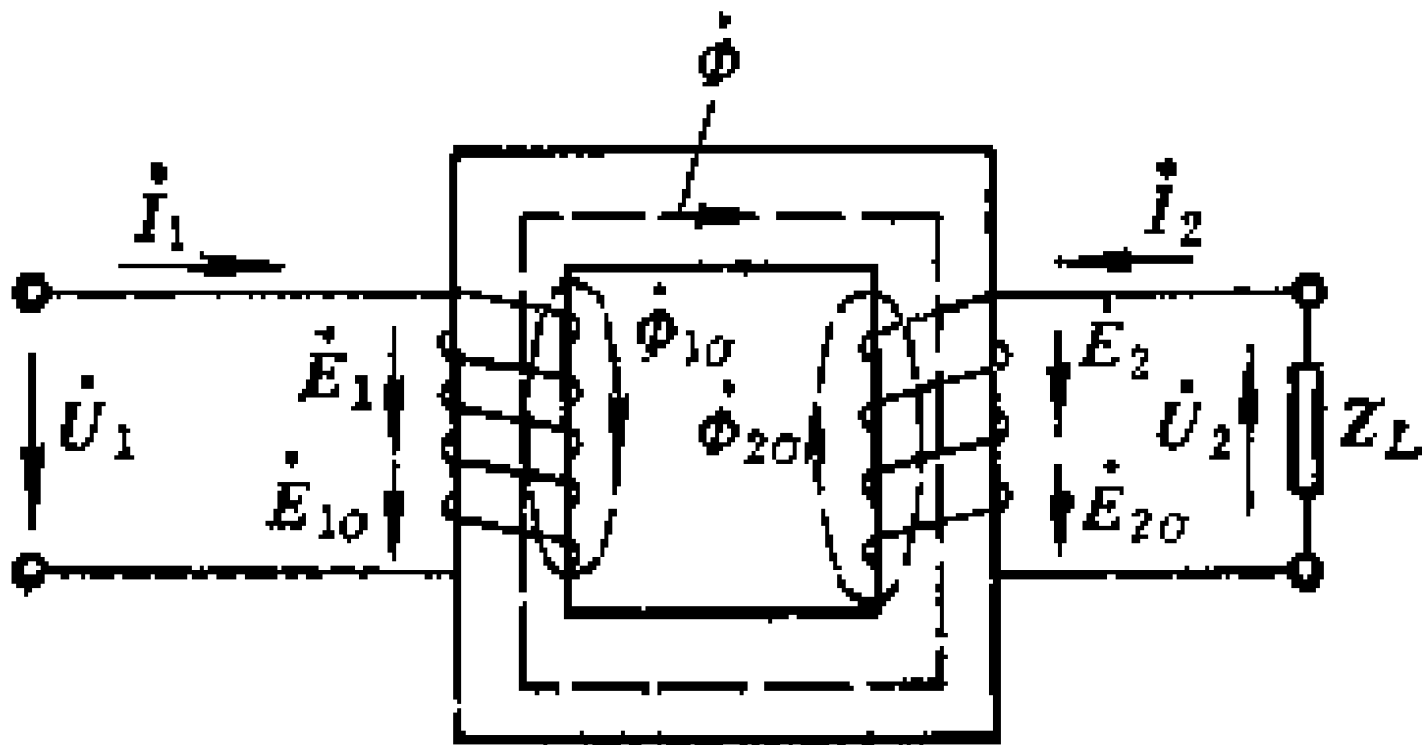
第三节 变压器的负载运行

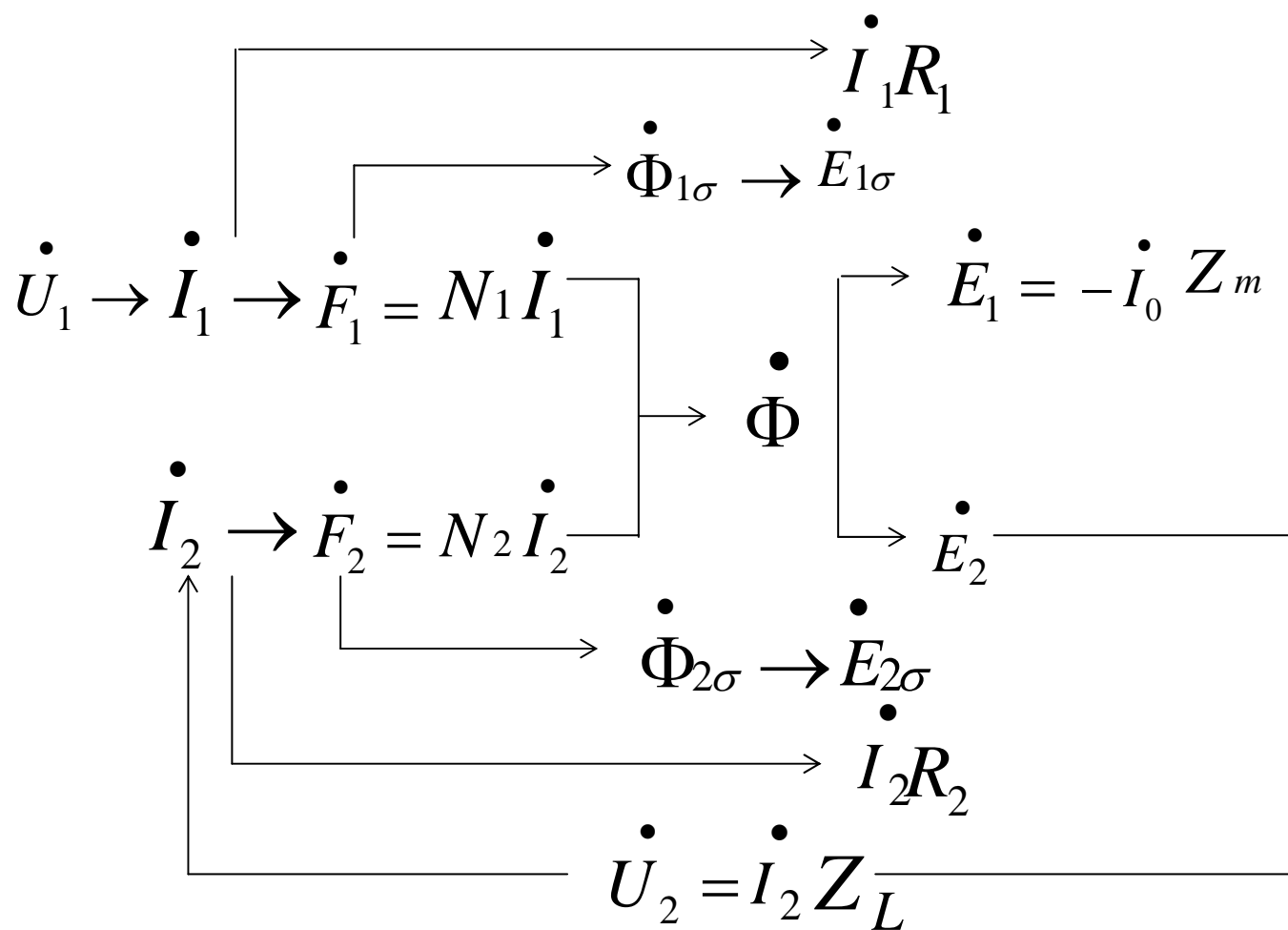
- 一、负载运行时物理情况
 - 1、物理过程分析
 - 2、磁动势平衡关系
- 二、各物理量的关系
 - 1、主磁通感应电势与电流的关系
 - 2、漏磁通感应电势与电流的关系



负载运行：一次侧加额定电压，二次侧加负载的运行

- 一、负载运行时物理情况
- 1、物理过程分析（复习参考正方向）





2、磁动势平衡关系:

负载时建立主磁通的磁动势为 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2$

空载时建立主磁通的磁动势为 \dot{F}_0

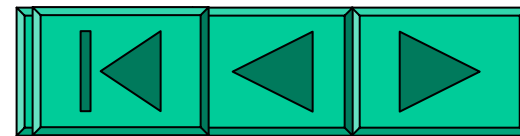
由空载到负载, 电源电压不变, 主磁通基本不变, 则建立主磁通的磁动势相等, 即

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

或
$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$$

可得
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k}\right) \dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$$

由此可知, 变压器负载运行时, 一次绕组电流包含两个分量, 一个是产生主磁通的激磁分量, 另一个是抵消二次电流建立的磁动势对主磁通影响的负载分量, 即供给二次负载功率的一次绕组电流的负载分量。



二、各物理量的关系

- 1、主磁通感应电势与电流的关系

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_m (r_m + jx_m)$$

- 2、漏磁通感应电势与电流的关系

$$\phi_{1\sigma} = N_1 i_1 \cdot \Lambda_{1\sigma} \qquad \phi_{2\sigma} = N_2 i_2 \cdot \Lambda_{2\sigma}$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} = -N_1^2 \Lambda_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt}$$

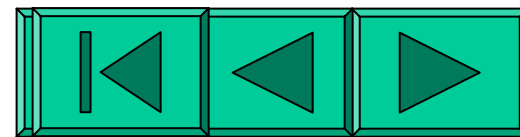
$$e_{2\sigma} = -N_2 \frac{d\phi_{2\sigma}}{dt} = -N_2^2 \Lambda_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} = -L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt}$$

$L_{1\sigma}$ 和 $L_{2\sigma}$ 分别称为一、二次绕组的漏感，且

$$L_{1\sigma} = \frac{N_1 \phi_{1\sigma}}{i_1} = N_1^2 \Lambda_{1\sigma}; \quad L_{2\sigma} = \frac{N_2 \phi_{2\sigma}}{i_2} = N_2^2 \Lambda_{2\sigma}$$

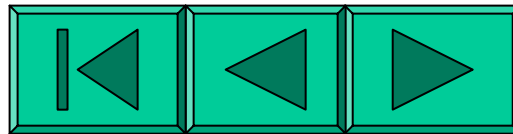
因此有： $\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_1 = -jX_{1\sigma} \dot{I}_1$

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\omega L_{2\sigma} \dot{I}_2 = -jX_{2\sigma} \dot{I}_2$$



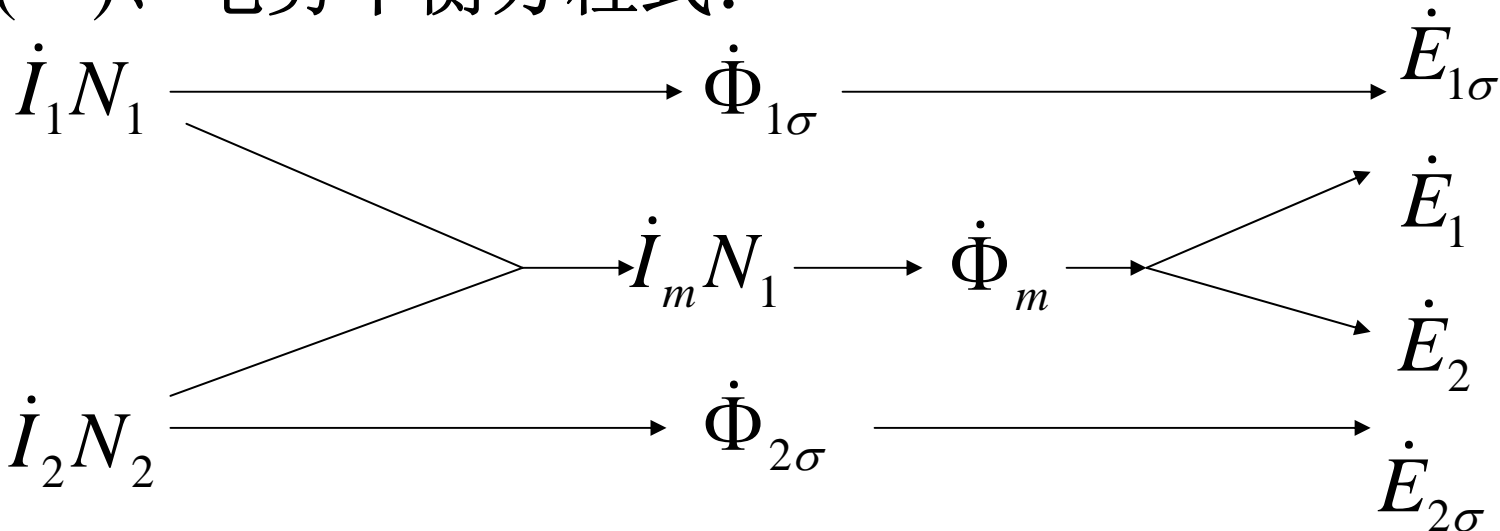
第四节 变压器的基本方程式、等值电路和相量图

- 一、基本方程式
- 二、绕组归算
- 三、T型等值电路和相量图
- 四、简化等值电路和相量图



一、基本方程式：

(一)、电势平衡方程式：

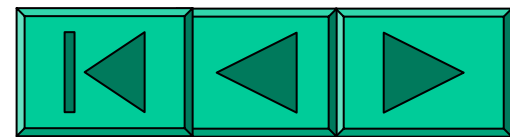


可写出原付绕组的电势方程：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma} = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_{2\sigma} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{2\sigma}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$



(二)、磁勢方程式：

$$N_1 \dot{I}_1 + \dot{I}_2 N_2 = N_1 \dot{I}_m$$

或 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \left(-\frac{1}{k}\right) \dot{I}_2 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$

(三)、基本方程式组为：

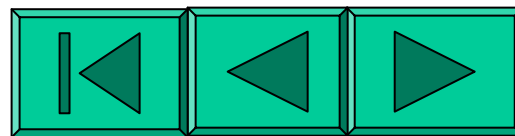
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{2\sigma}$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$



二、绕组归算：

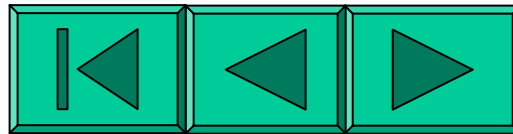
目的：用一个能正确反映变压器内部电磁过程又方便工程计算的单纯电路来代替没有电联系只有磁耦合的实际变压器，即等值电路。

习惯把二次绕组折算到一次绕组，即用一个与一次绕组匝数相等的假想二次绕组代替实际的二次绕组，习惯用原物理量右上角加一撇“'”来表示折算后的物理量

归算原则：一、二次绕组的电磁关系不变

即 保证归算前后磁势平衡关系、

各种能量关系不变



(一)、电势、电压归算：保证主漏磁场不变

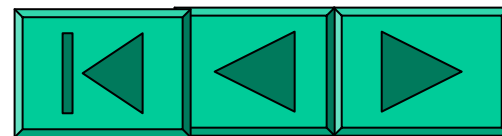
$$\frac{E_2'}{E_2} = \frac{N_2'}{N_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad \text{则有:}$$

$$E_2' = kE_2$$

$$\text{同理: } E_{2\sigma}' = kE_{2\sigma} \quad U_2' = kU_2$$

(二)、电流归算：保证付边磁势不变

$$\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_2' N_1 \quad I_2' = \frac{1}{k} I_2$$



(三)、阻抗归算： 保证铜耗和漏感储能不变

$$R_2' = k^2 R_2 \quad X_{2\sigma}' = k^2 X_{2\sigma}$$

折算后的基本方程式组为：

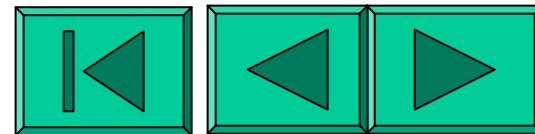
$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma} = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

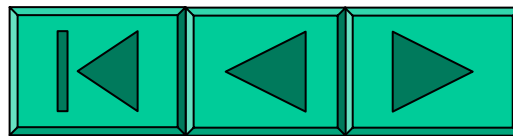
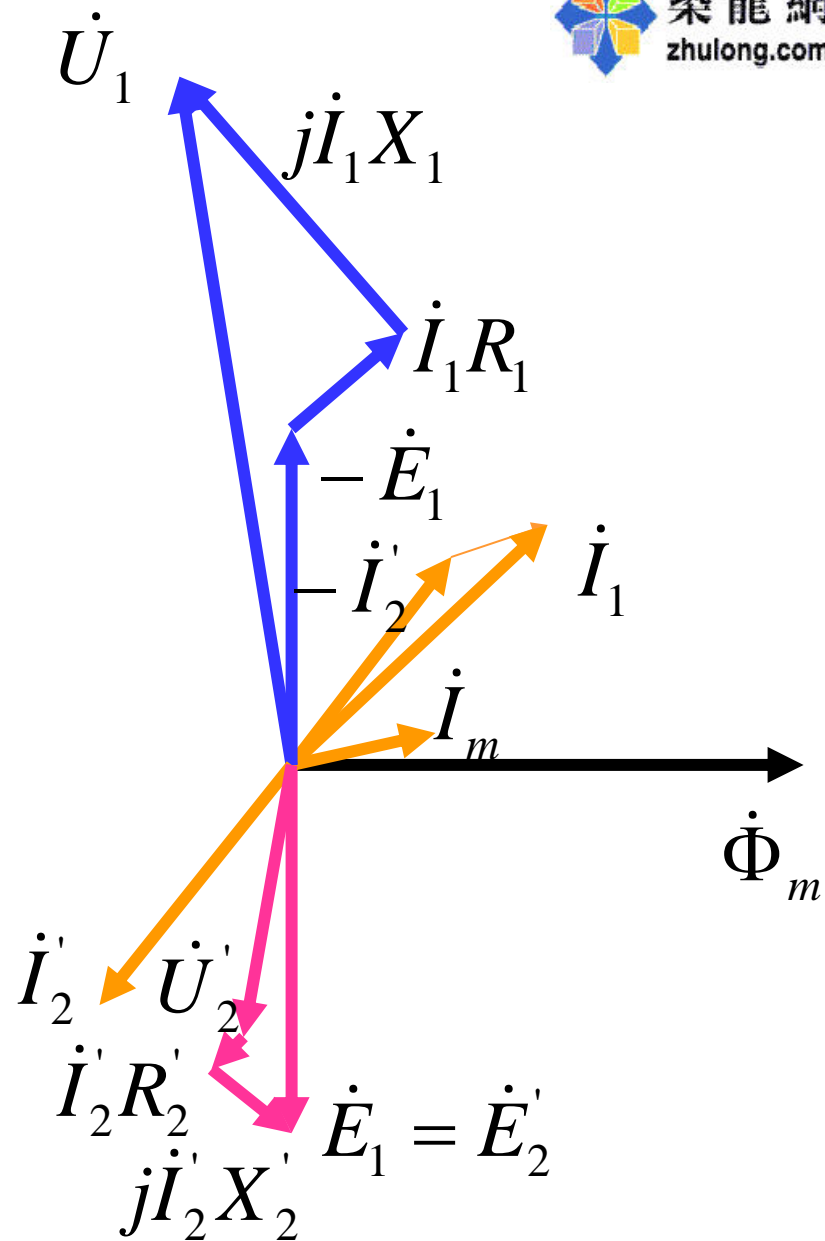
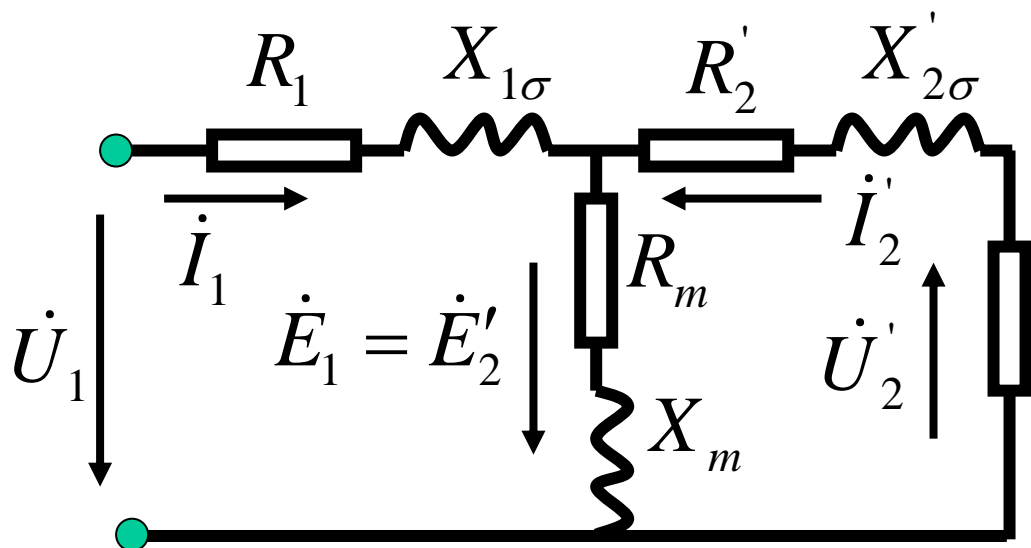
$$\dot{U}_2' = -\dot{I}_2' Z_{2\sigma}' + \dot{E}_2'$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L'$$



三、T 形等值电路和相量图



画图步骤:

1. 画出负载的电压 \dot{U}'_2 、电流 \dot{I}'_2 及其夹角 φ_2 ——功率因数角;

2. 在上依次迭加 $\dot{I}'_2 R'_2$ 和 $j\dot{I}'_2 X'_{2\sigma}$ (超前 90° ——逆时针转 90°) 得电动势 \dot{E}'_2 , 又 $\dot{E}'_1 = \dot{E}'_2$, 即得 \dot{E}'_1 ;

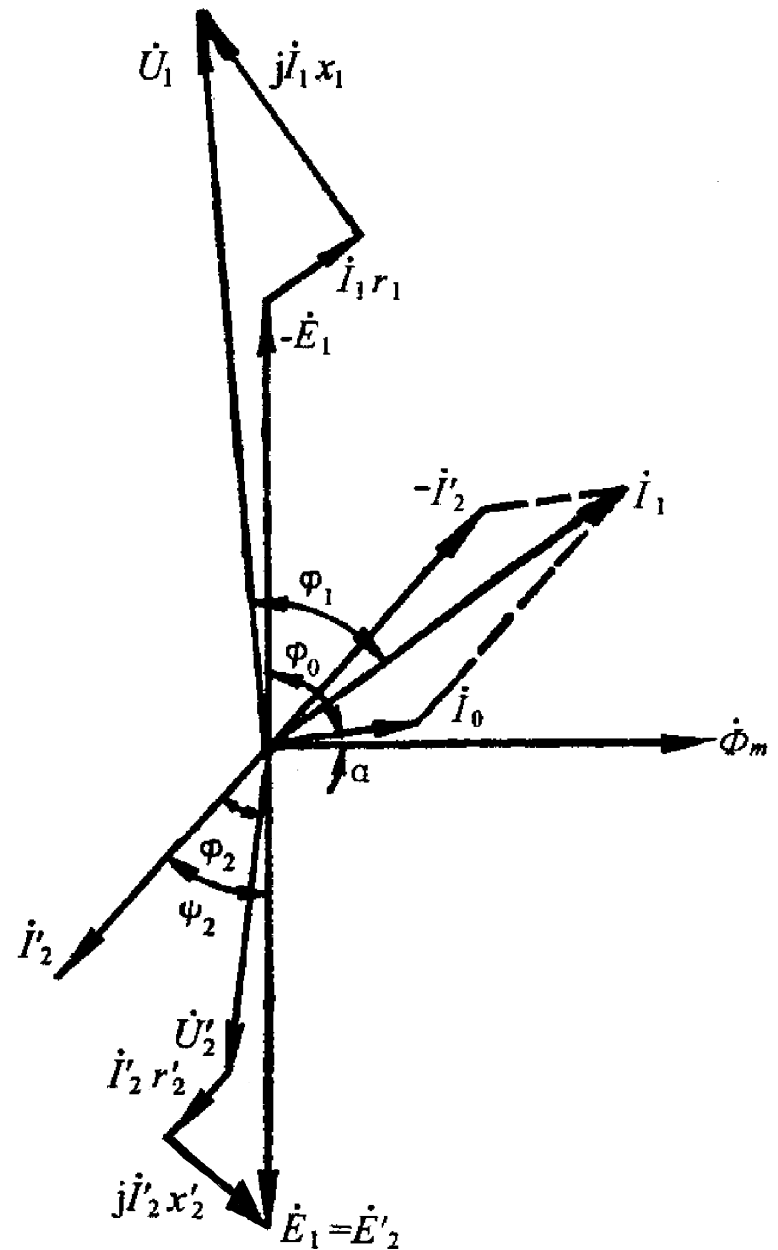
3. 据电动势公式, 可画出主磁通 $\dot{\Phi}_m$ (超前 90°);

4. 作激磁电流 \dot{I}_m , 超前一个铁损角 α ;

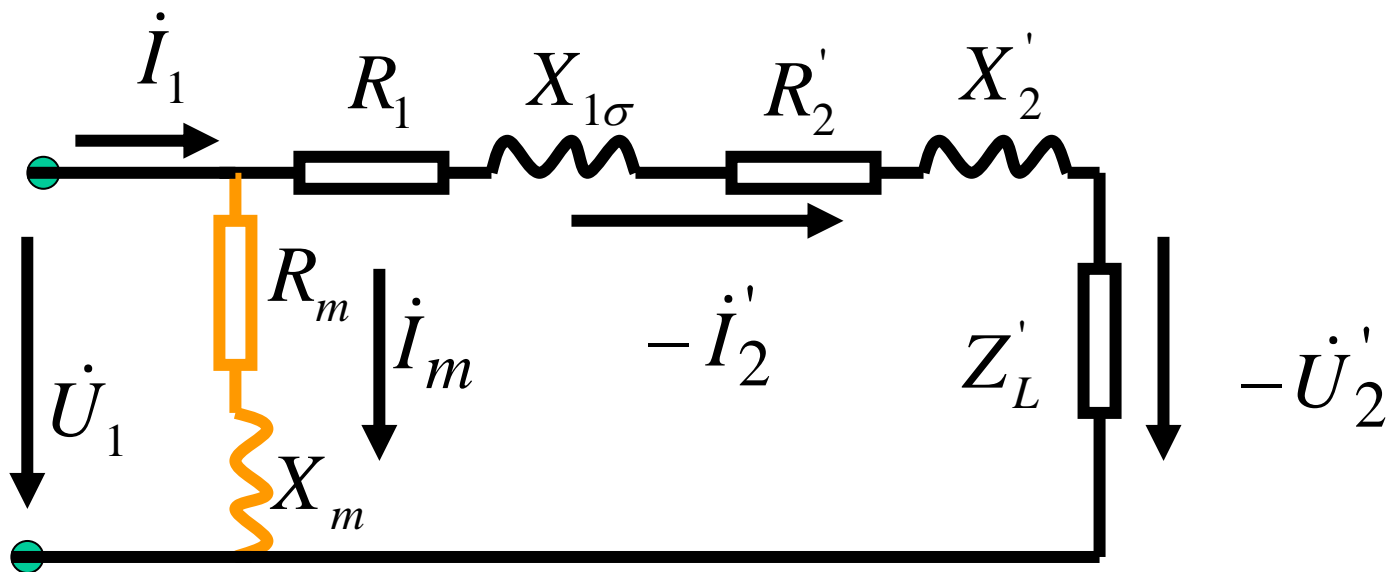
5. 作 $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_m$

6. 在 $-\dot{E}'_1$ 上依次迭加 $\dot{I}_1 R_1$ (与 \dot{I}_1 平行) 和 $j\dot{I}_1 X_{1\sigma}$ (超前 90° ——逆时

针转 90°) 得电源电压 \dot{U}_1 ;

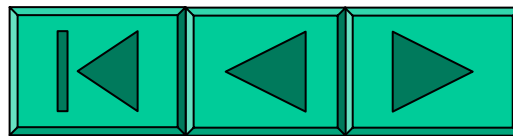


Γ 形等值电路

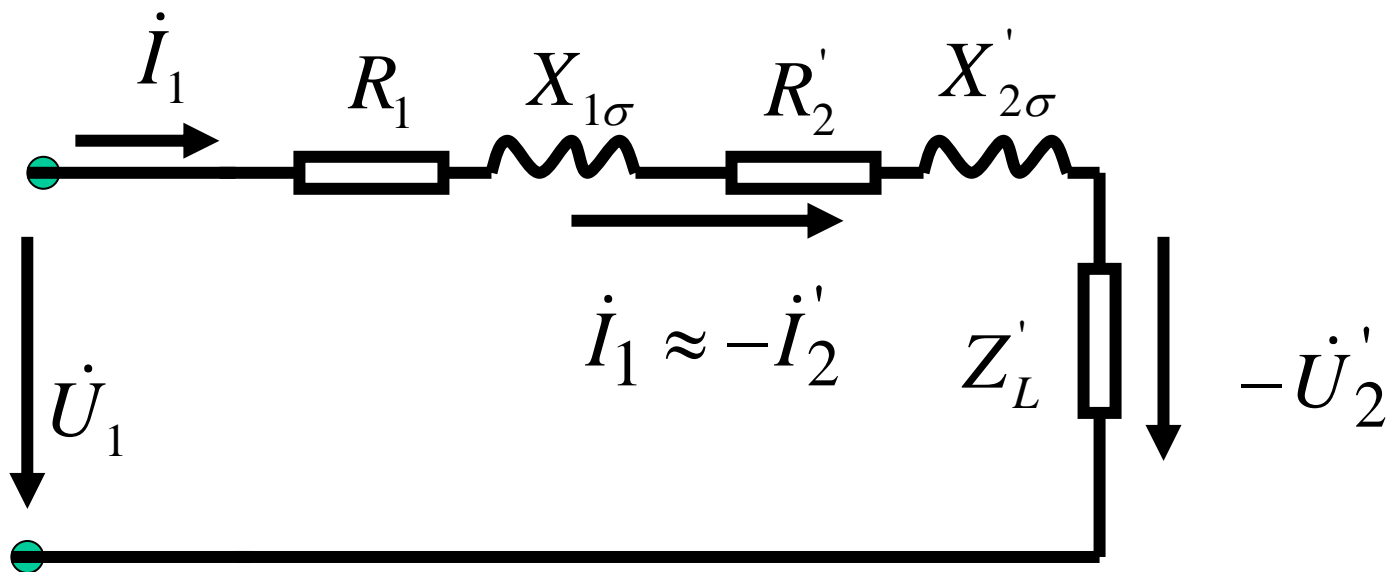


由于变压器的 $Z_m \gg Z_1$ ，将励磁支路前移，

这种电路称为 Γ 形等值电路。

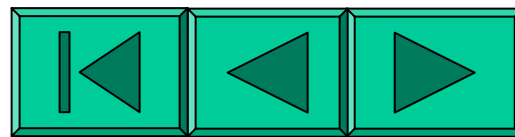


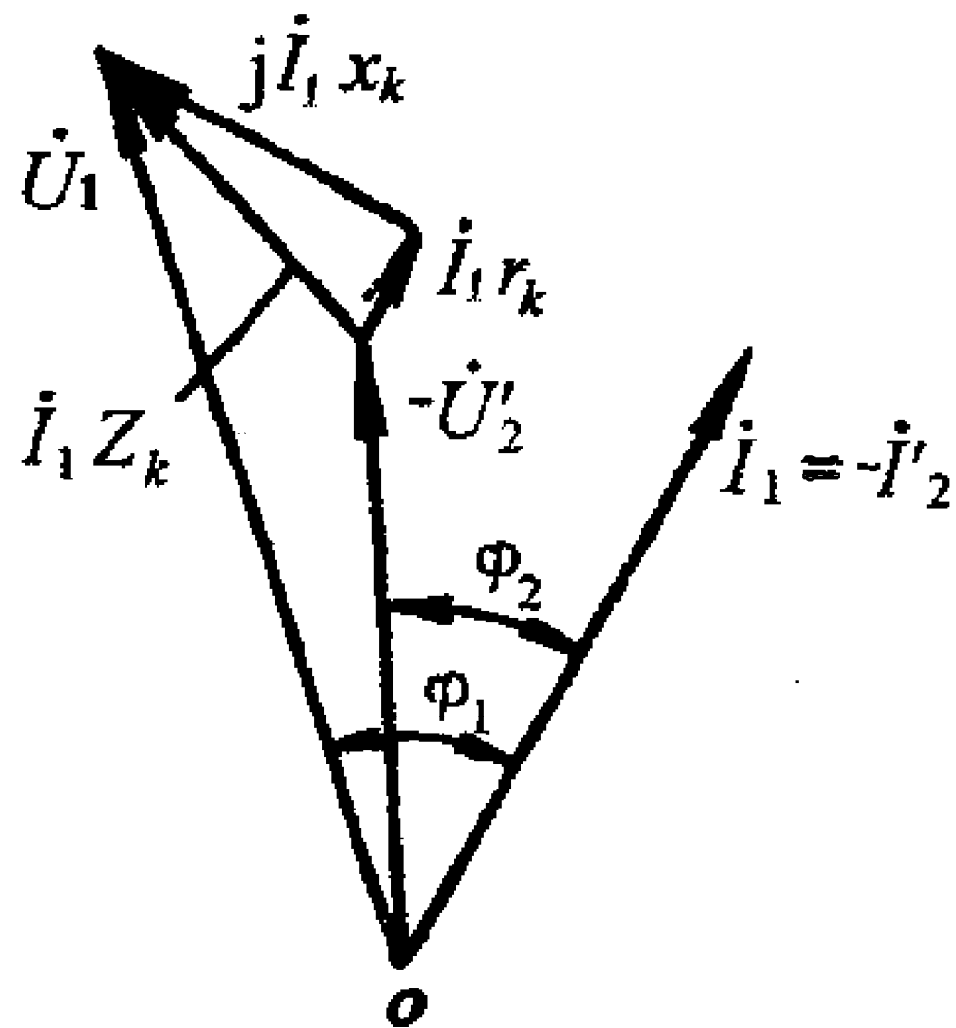
四、简化等值电路和相量图



由于一般变压器 $I_N \gg I_m$ ，可将励磁电流 \dot{i}_m

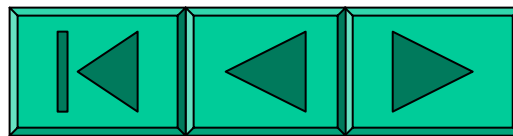
忽略不计，得到简化等值电路。



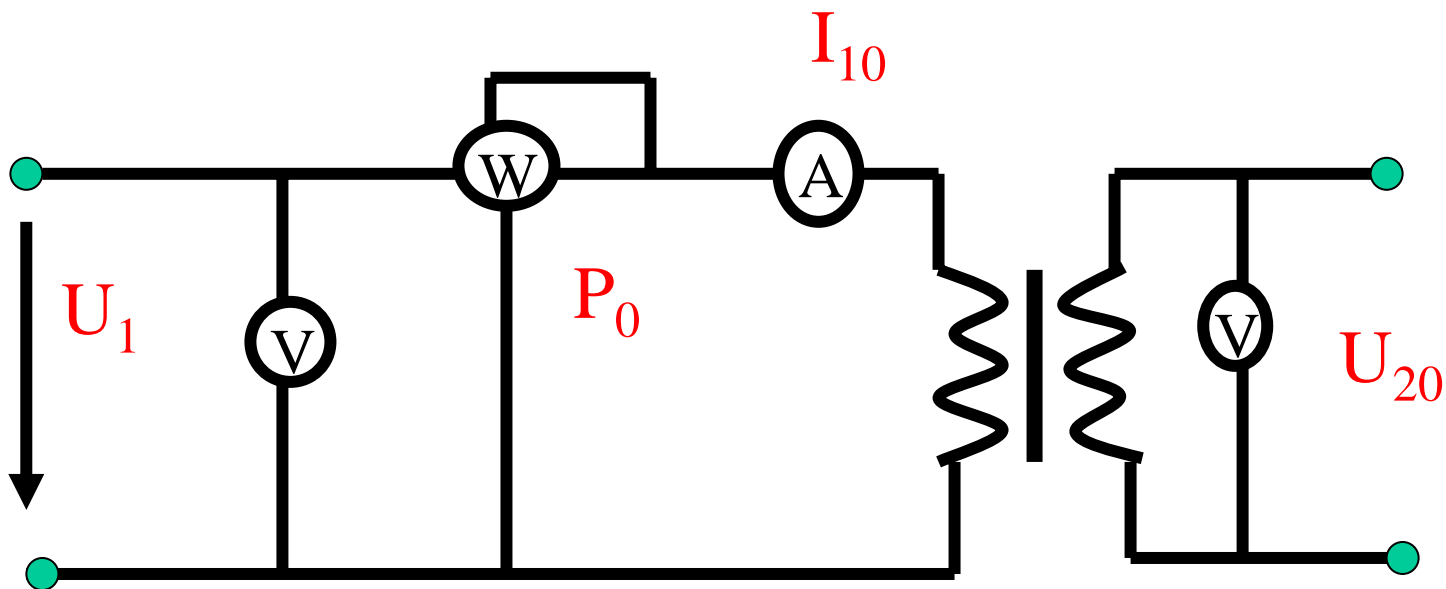


第五节 等值电路参数的测定

- 一、空载实验
 - 1、实验目的 2、实验接线
 - 3、参数计算 4、注意
- 二、短路实验
 - 1、实验目的 2、实验接线
 - 3、参数计算 4、注意



一、空载实验：



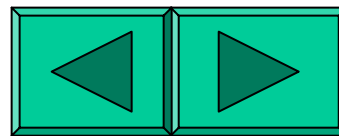
1、目的：测定变压器高、低压绕组的电压、空载电流和空载损耗求得变压器的变比 k 与激磁阻抗参数

2、接线：

$$Z_m = R_m + jX_m$$

(1)仪表的选择：功率表

(2)仪表的接线



3、参数计算

$P_0 \approx P_{Fe}$ ，从等值电路图可得：

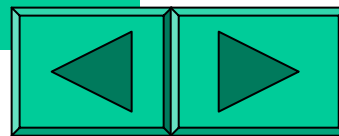
$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} = |Z_1 + Z_m| = \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_1 + X_m)^2}$$

因为，在电力变压器中： $Z_m \gg Z_1$

$R_m \gg R_1$ $X_m \gg X_1$ 故可认为：

$$Z_m \approx Z_0 = \frac{U_1}{I_{10}} \qquad R_m \approx R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}$$

$$X_m \approx X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \qquad k = \frac{U_1}{U_{20}}$$



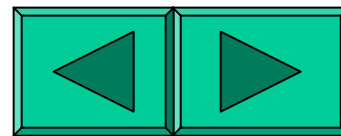
4、注意：

励磁参数与磁路饱和有关，即与电源电压有关

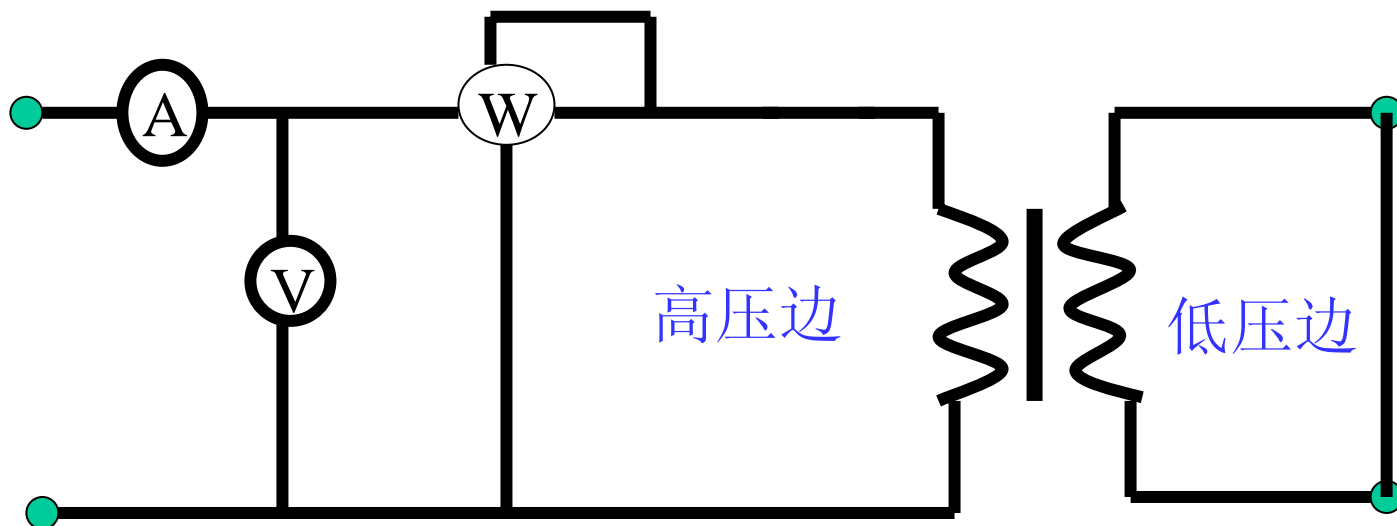
(1) 励磁参数应取**额定电压**下测读的数据计算。

(2) 试验一般在低压边进行， Z_m 要进行归算。

(3) 三相变压器，采用每相值才可运用上述公式
计算。（相损耗，相电流，相电压）

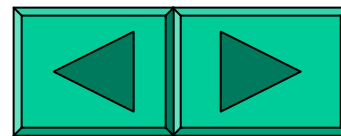


二、短路实验：



1、目的：测定一次绕组的短路电压、短路电流和短路损耗，求得短路阻抗参数 $Z_k = R_k + jX_k$ 和变压器的重要参数短路电压 U_{kN} 。

2、接线：(1)仪表的选择
(2)仪表的接线



3、参数计算： 由简化等效电路知

$$(1) Z_k \approx \frac{U_k}{I_k} \quad R_k \approx \frac{P_k}{I_k^2} \quad X_k \approx \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

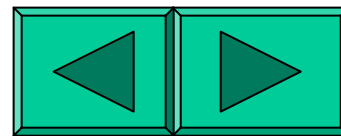
换算成75℃值：

$$R_{k75^\circ\text{C}} = R_{k\theta} \frac{T_0 + 75}{T_0 + \theta} \quad Z_{k75^\circ\text{C}} = \sqrt{R_{k75^\circ\text{C}}^2 + X_s^2}$$

θ 为试验时温度，

T_0 为常数 铜线为234.5度，铝线为228度。

若要求低压边参数，应折算到低压边。



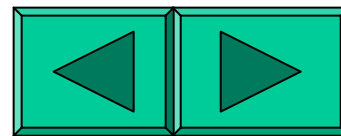
(2) 重要参数：阻抗电压或短路电压 U_{kN}

所谓短路电压是指变压器二次绕组短接，一次绕组流过额定电流时所加的电源电压。也称为阻抗电压。

$$U_{kN} = I_{1N} Z_{K75^{\circ}C}$$

用电压额定值的百分数表示：

$$U_k \% = \frac{U_{kN}}{U_{1N}} \times 100 \% = \frac{I_{1N} Z_{k75^{\circ}c}}{U_{1N}} \times 100 \%$$



4、注意：

对三相变压器进行参数计算，也应首先将测量数据换算为相值（相电压、相电流和一相的损耗），然后才能代入公式。

例题：

作业：P60 2-26（1）

第七节 标么值

一、定义：

所谓某物理量的标么值是指其实际值与选定的同单位的基值之比。

标么值是一个相对值，没有单位，习惯用各物理量原来的符号右下角加“*”号来表示。

二、基值的选择：

在电机学中，通常取各物理量本身的额定值作为基值

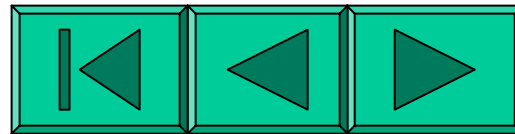
标么值的特点

1. 变压器中各物理量在本侧的标么值与其折算后在另一侧的标么值相等，即采用标么值计算时，无需折算。
2. 各物理量额定值的标么值均为1，使运算方便。
3. 某些物理量的标么值具有相同的数值，使公式简化。
4. 将标么值乘以100可得到以额定值表示的百分值，反之成立。

举例

第八节 变压器的运行特性

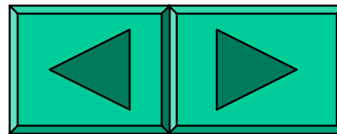
- 一、电压调整率和外特性：
 - 1、电压调整率
 - 2、外特性
- 二、效率和效率特性
 - 1、效率
 - 2、效率特性



一、电压调整率和外特性：

1、电压调整率：

所谓电压调整率 ΔU 是指变压器一次绕组接额定频率、额定电压的交流电源，二次绕组开路时的电压和二次绕组在给定功率因数下带负载时的实际电压之差，与二次绕组额定电压的比值，即



$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\%$$

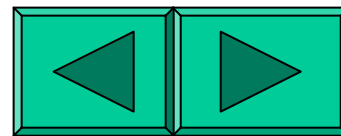
从简化等值电路的向量图，可推得的 $\Delta U\%$ 计算式：

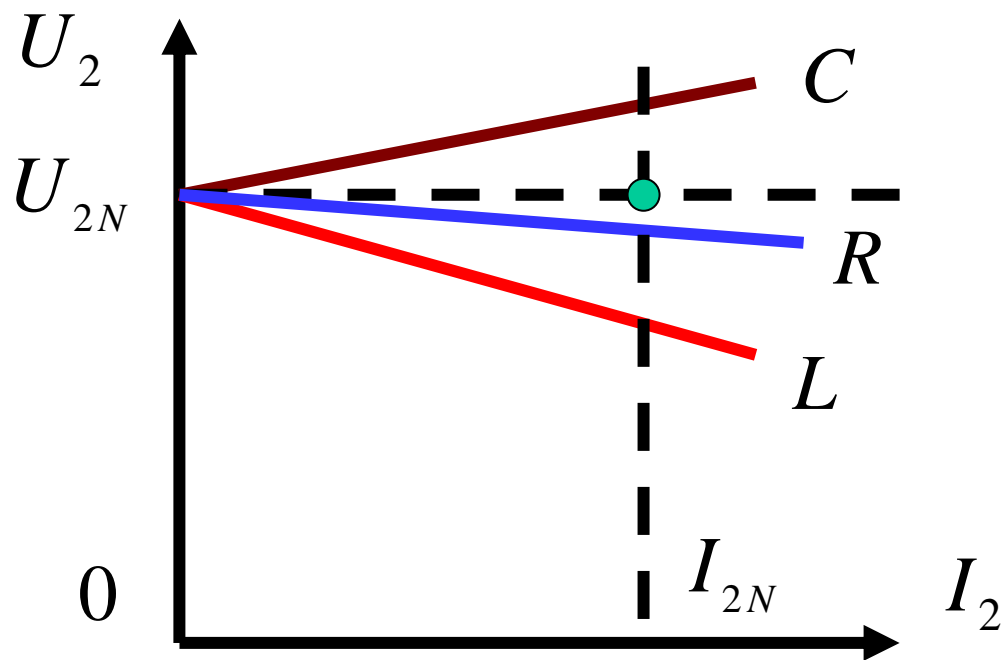
$$\Delta U \% = I_* \times (R_{k*} \cos \varphi_2 + X_{k*} \sin \varphi_2) \times 100\%$$

其中

$$I_* = I_{1*} = I_{2*}$$

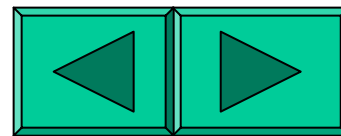
例题





2、外特性:

原边电压为额定值 $U_1 = U_{1N}$ ，负载功率因数 $\cos \Phi_2$ 一定，付边电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的关系曲线， $U_2 = f(I_2)$ 。



二、效率和效率特性：

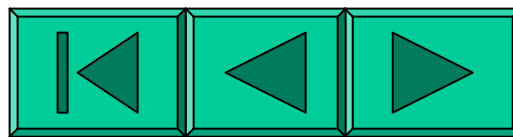
1、效率：输出功率和输入功率之比。

变压器在传递能量过程中有铁耗与铜耗。

基本铁耗是磁滞损耗与涡流损耗，近似等于空载损耗；基本铜耗是一、二侧绕组内电流引起的直流电阻损耗；可通过短路损耗求得。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} \times 100\%$$

$$\Sigma p = p_{Fe} + p_{cu}$$

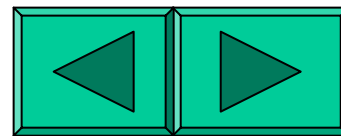


$$\begin{aligned} P_2 &= mU_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \beta m U_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 \\ &= \beta S_N \cos \varphi_2 \end{aligned}$$

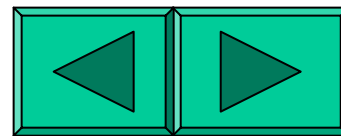
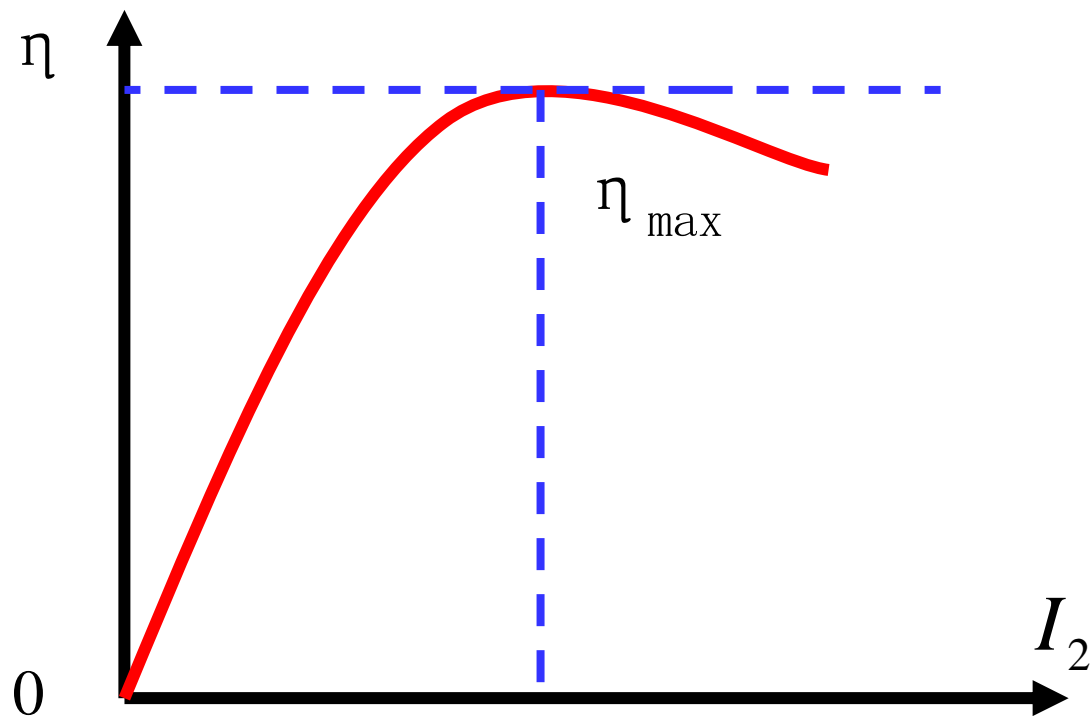
$$\eta = \left(\frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}} \right) \times 100 \%$$

作业：P60 2-28 (1) (3)


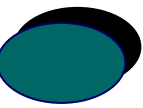
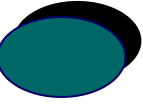

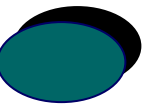

2-29

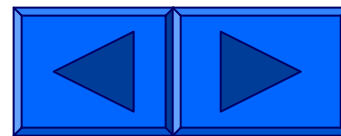


理论上：当 $\beta^2 P_{kN} = P_0$ 即 $\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$ 时，
 η 取得最大值。



第四章 交流绕阻及其电动势和磁动势

-  ⌘ 第一节 交流电机的工作原理
-  ⌘ 第二节 交流绕组的构成原则和分类
-  ⌘ 第三节 三相双层迭绕组
-  ⌘ 第四节 交流绕组的感应电动势
-  ⌘ 第五节 单相交流绕组的磁动势
-  ⌘ 第六节 三相交流绕组的磁动势



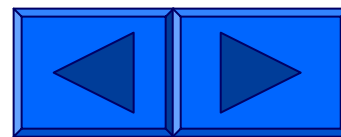
交流电机:

同步电机(凸极、隐极)

主要做发电机用;
也可做电动机和调相机用。

异步电机(鼠笼、绕线)

主要做电动机用
也可做发电机用。
分为单相异步和三相异步。



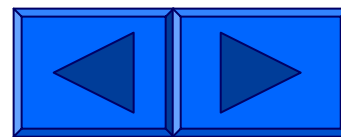
第一节 交流电机的工作原理

⌘一、同步发电机的工作原理

- 1、基本组成
- 2、工作原理

⌘二、三相异步电动机的工作原理

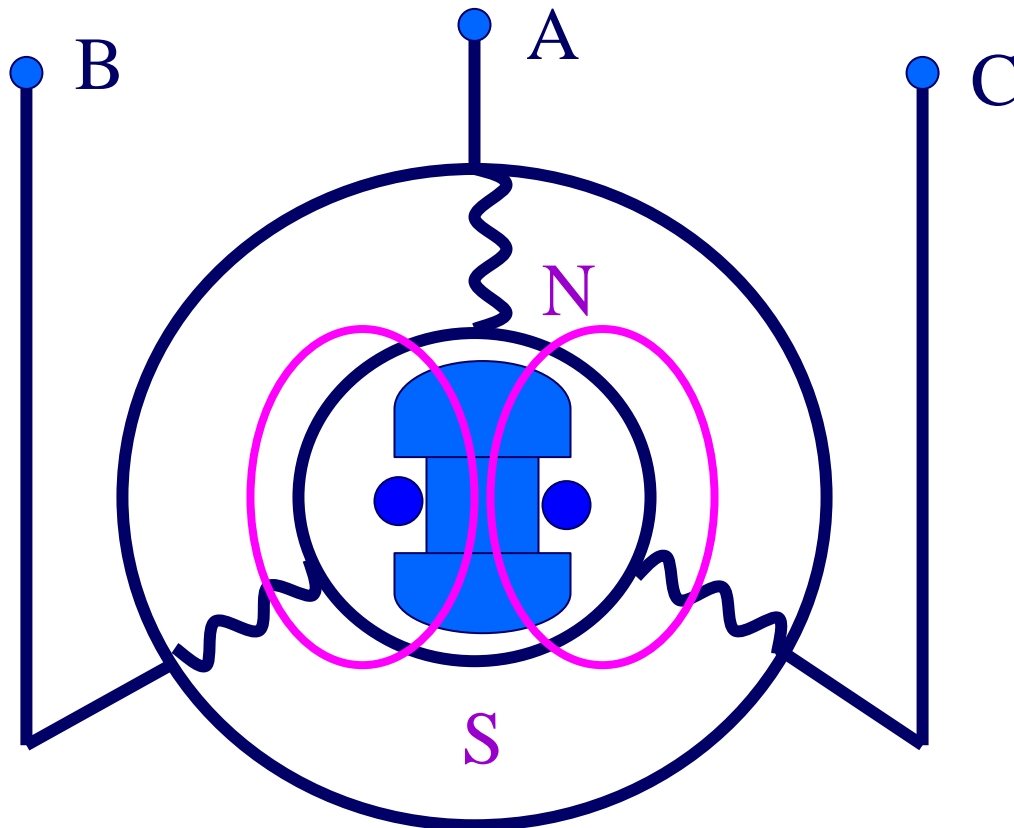
- 1、基本组成
- 2、工作原理



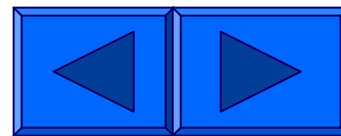
一、同步发电机的工作原理：

1、基本组成：

- 1) 定子：定子铁心和定子绕组——电枢绕组
(交流绕组)
- 2) 转子：转子铁心和转子绕组——励磁绕组
(直流绕组)



逆时针旋转



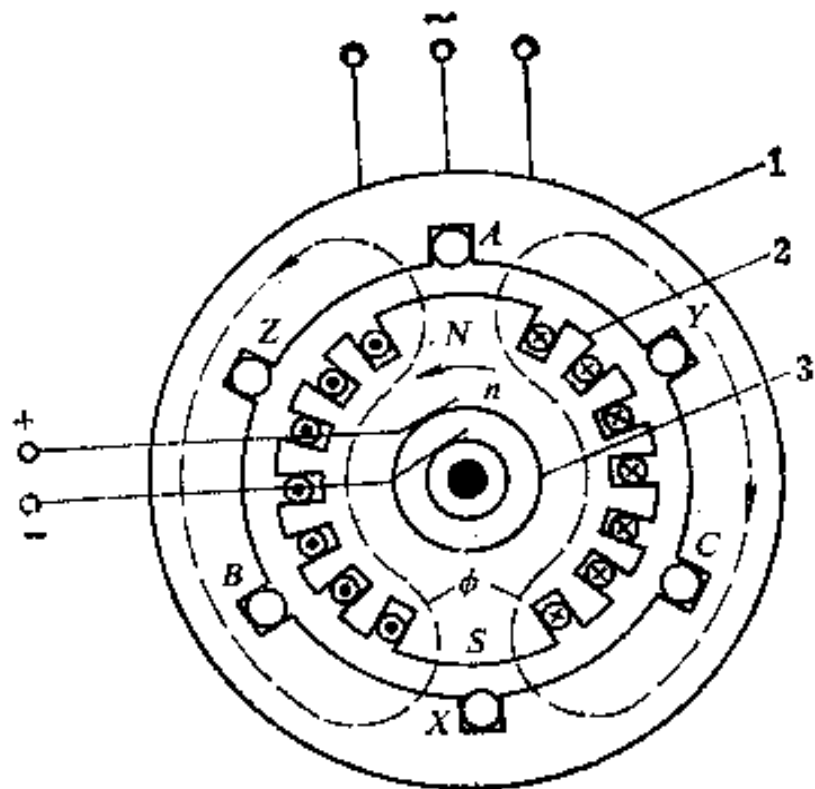


图 7-1 同步电机的工作原理图
1—定子；2—转子；3—滑环

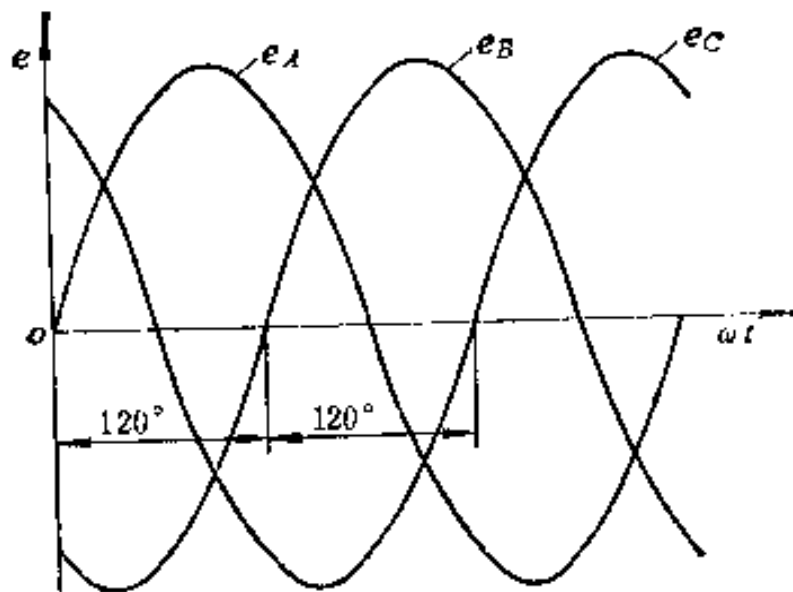


图 7-2 定子三相电动势波形

2、工作原理：

1) 原动机拖动转子旋转

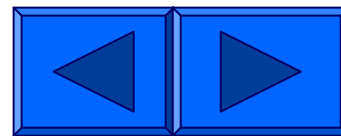
2) 转子通入直流励磁——产生恒定磁场，
随转子旋转形成机械旋转磁场

3) 电枢绕组切割转子旋转磁场感应电动势

——感应电动势的相序：与绕组沿定子内圆的空间分布和转子旋转磁场的方向有关

要求感应正序电势，即A—B—C

——感应电动势的频率：与转子磁场的极对数 p 和转速 n 有恒定关系。



当 $P=1$ ，转子转一周，电势交变一次

当 P 对极，转子转一周，电势交变 P 次

若每分钟转速为 n ，则电势频率为 $f=Pn/60$ 赫。

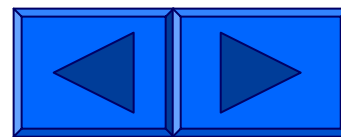
当 $f=50$ 赫，

汽轮机： $n=3000$ 转/分—— $P=1$ ；

$n=1500$ 转/分—— $P=2$ ；

水轮机： $n=100$ 转/分—— $P=30$ 。

同步电机的转速与电网频率有严格不变关系。
即当电网频率一定时，电机转速就一定。



——感应电势的大小和波形（交流绕组的电动势）

(1) 波形：与磁场沿空间的分布的波形有关，若磁场沿圆周按正弦分布，则电势随时间按正弦变化

$$e_c = B_a l v = B_m l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

三相定子绕组对称，因此三相电势大小相等，相位互差120度。设 E_m 为电势最大值，A相初相角为0，则：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

(2) 大小：

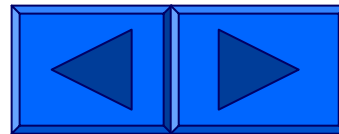
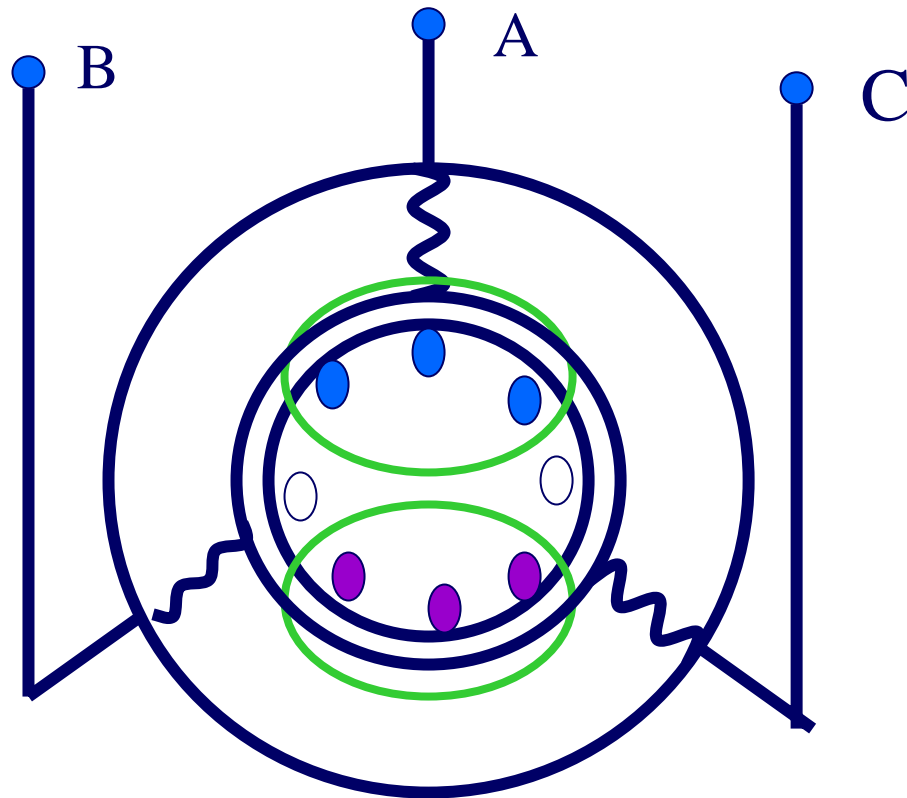
二、三相异步电动机的工作原理

1. 基本组成:

定子: 定子铁心和定子绕组——交流绕组

转子: 转子铁心和转子绕组 (自成闭合回路)

2. 转动原理: 以鼠笼式转子为例 (转子槽内有导条, 导条两端用短路环连接, 形成闭合绕组)



(1) 旋转磁场的产生:

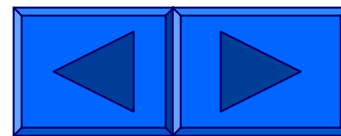
定子三相电流瞬时表达式:

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

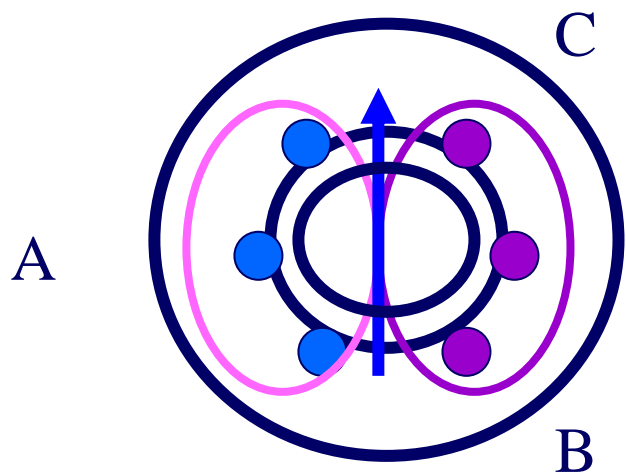
$$i_B = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

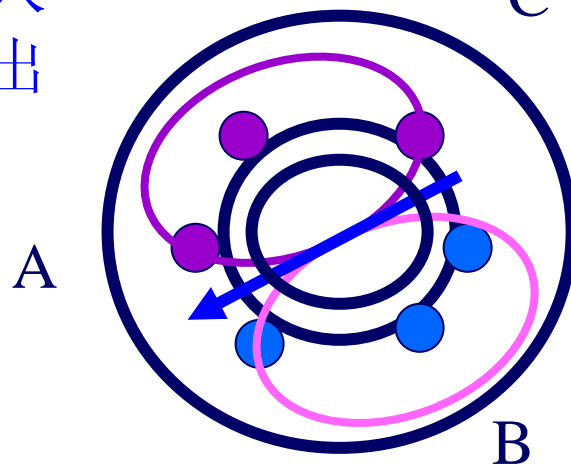
选择0度, 120度, 240度, 360度四个旋转瞬时分析, 规定电流为正时: 从首端ABC流出 \odot ;
电流为负时, 从首端ABC流入 \otimes 。



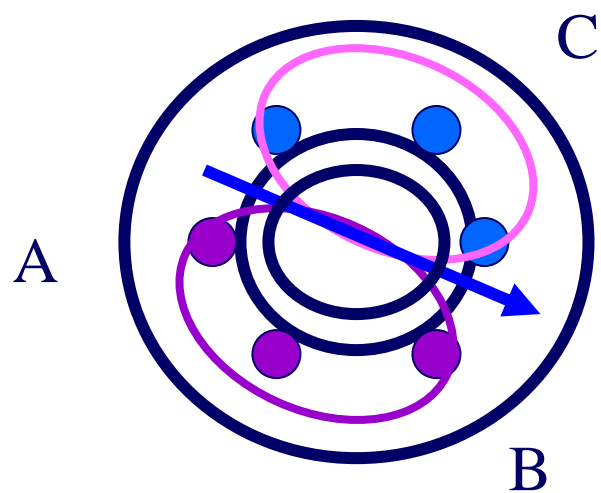
紫色为流入
蓝色为流出



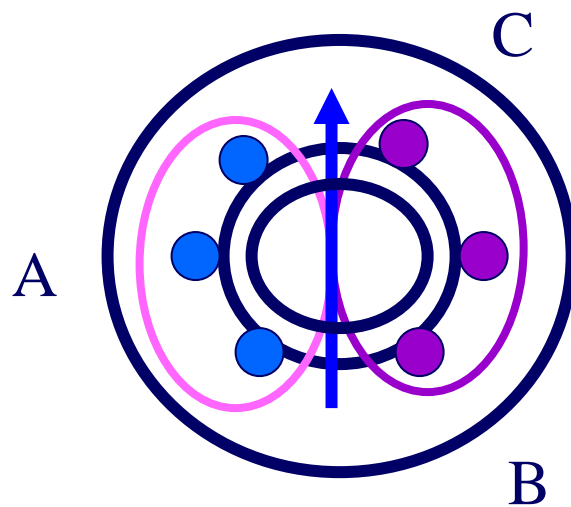
(1) 0度



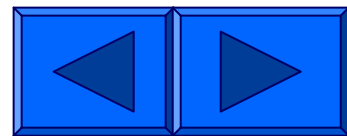
(2) 120度



(3) 240度



(4) 360度

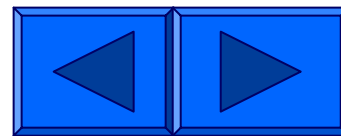


(2) 转动原理:

对称定子绕组外加**对称三相交流电压**，
定子绕组内有**对称三相交流电流**，
它们联合产生**旋转磁场**，

转子导条切割定子旋转磁场将**感应电势**，从而在
闭合的导条中有**电流**，则转子导条将**受到电磁力** f ，
并且形成**电磁转矩**，使转子**顺**旋转磁场的方向旋转，
若转子轴上有负载，电动机将输出机械功率。

异步电机的转速 n 小于同步转速。若二者相等，
异步机就不能旋转。

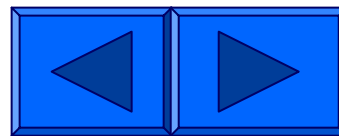


第二节 交流绕组的构成原则和分类

⌘一、构成原则：

电势最大 三相对称 正弦波

- ⌘1. 三相绕组对称，即每相绕组结构相同，阻抗相等，在空间相距 120° 电角度，以获得对称的三相感应电动
- ⌘2. 在导体数一定的情况下，力求产生较大的基波电动势和基波磁动势。
- ⌘3. 绕组的电动势和磁动势尽可能接近正弦波



二、定子绕组分类：

1、按相数：单相和三相；

2、按槽内层数：单层
 双层

3、按绕组端接部分的形状

 单层有同心式

 交叉式

 链式；

 双层有迭绕组

 波绕组

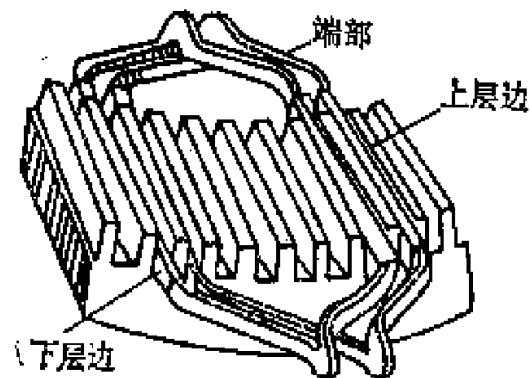


图 8-5 双层绕组图

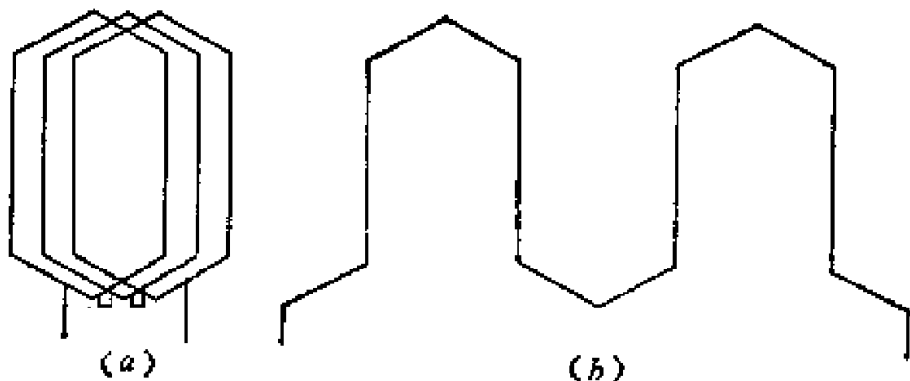


图 8-6 叠绕组和波绕组

(a) 叠绕组； (b) 波绕组

第三节 三相双层迭绕组

一、交流绕组的一些基本术语：

1、机械角度与电角度：

机械角度——一圆周360度；

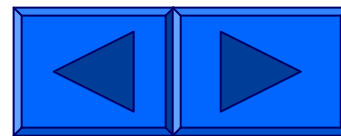
电角度——一对磁极占有的空间角度是360度电角度

关系： 电角度 = p * 机械角度 （ p 为极对数）

2、极距 τ ：

沿定子内圆每个磁极所占有的距离

$$\tau = Z / 2p \quad (\text{定子槽数})$$



3、线圈与节距 y_1 :

线圈: 由一匝或多匝导线串联而成, 有两个引出线, 一个称为首端, 一个称为末端。

节距 y_1 : 线圈两个有效边沿定子内圆的距离
整距 ($y_1 = \tau$)、短距 ($y_1 < \tau$)、长距 ($y_1 > \tau$)

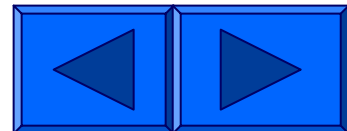
4. 槽距角 α :

相邻两槽之间的电角度 $\alpha = p * 360 / Z$

5. 每极每相槽数 q :

每相绕组在每一磁极下所占有的槽数

$$q = Z / 2pm \quad (\text{整数槽和分数槽})$$



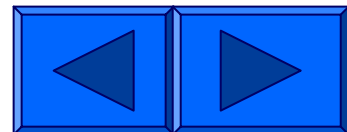
6. 相帶和極相組（線圈組）：

每一極下，每相繞組所占有的電角度（ $q\alpha$ ）

—— 60度分相法

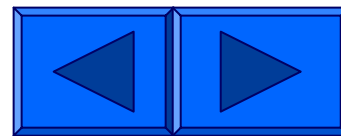
極相組：

每一極下屬於同一相的 q 個線圈相串聯。

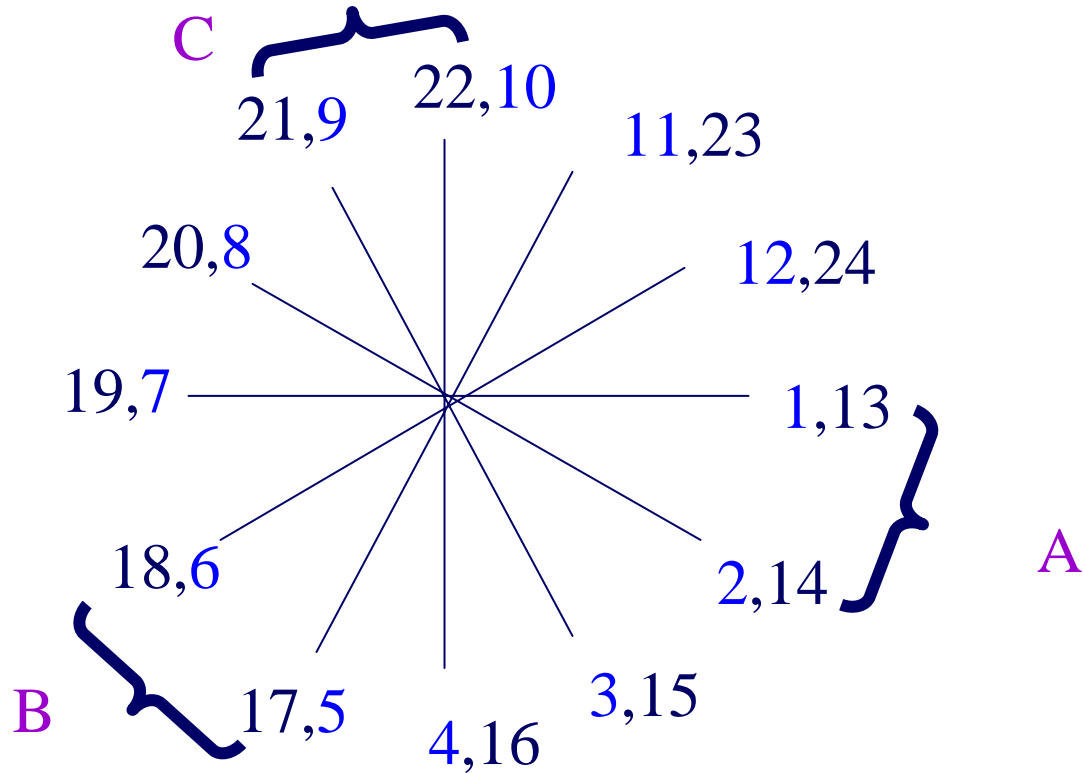


7、槽电势星形图：

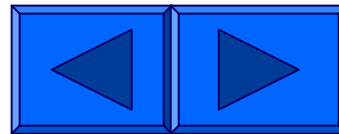
假设气隙磁密在圆周上按正弦规律分布，转子旋转——定子各槽内导体的感应电势也将随时间按正弦规律变化。当把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电势分别用矢量表示时，这些矢量构成一个辐射星形图。各槽内导体感应电势在时间相位上互差 α 电角度。



例如： $2P=4$ ， $Z=24$ 的槽电势星形图为：



一般说，当 P 和 Z 有最大公约数 t 时，
 则有 t 个重合的槽电势星形图。



二、三相双层迭绕组：

以 $2P=4$ ， $Z=36$ ，三相双层迭绕组为例：

1、极距：

$$\tau = Z / 2p = 36/4=9\text{槽}；$$

2、节距：

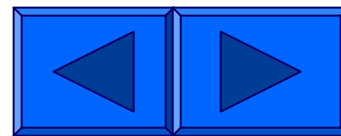
采用短距 $y_1 = 8\text{槽}$ ；

3、每极每相槽数：

$$q = Z / 2pm = 36 / (4*3) = 3\text{槽}$$

4、槽距角 α ：

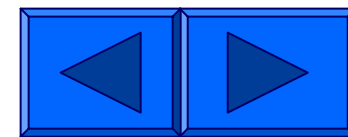
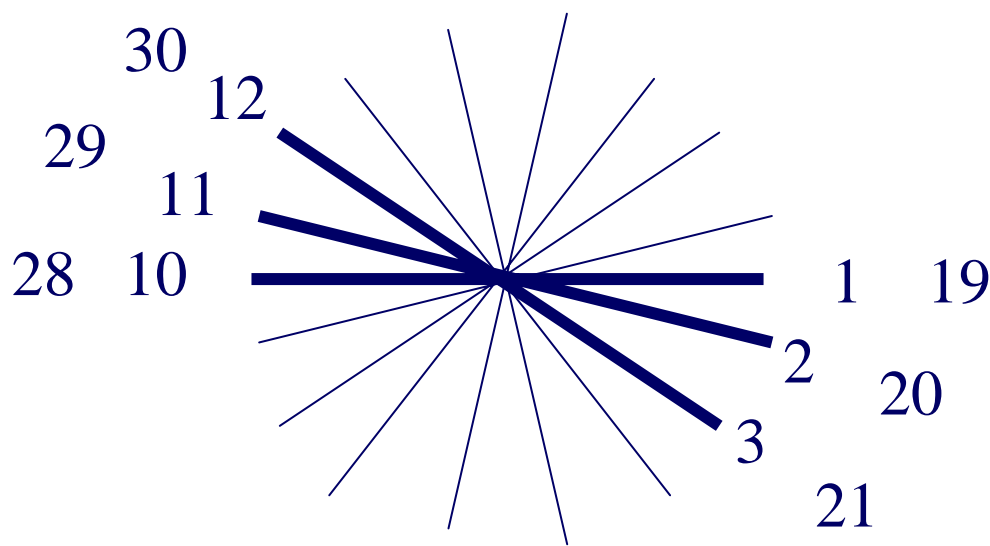
$$\alpha = p*360 / Z = 2*360/36=20\text{度}$$



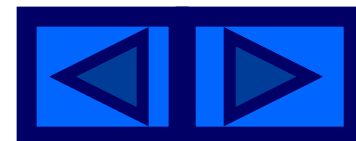
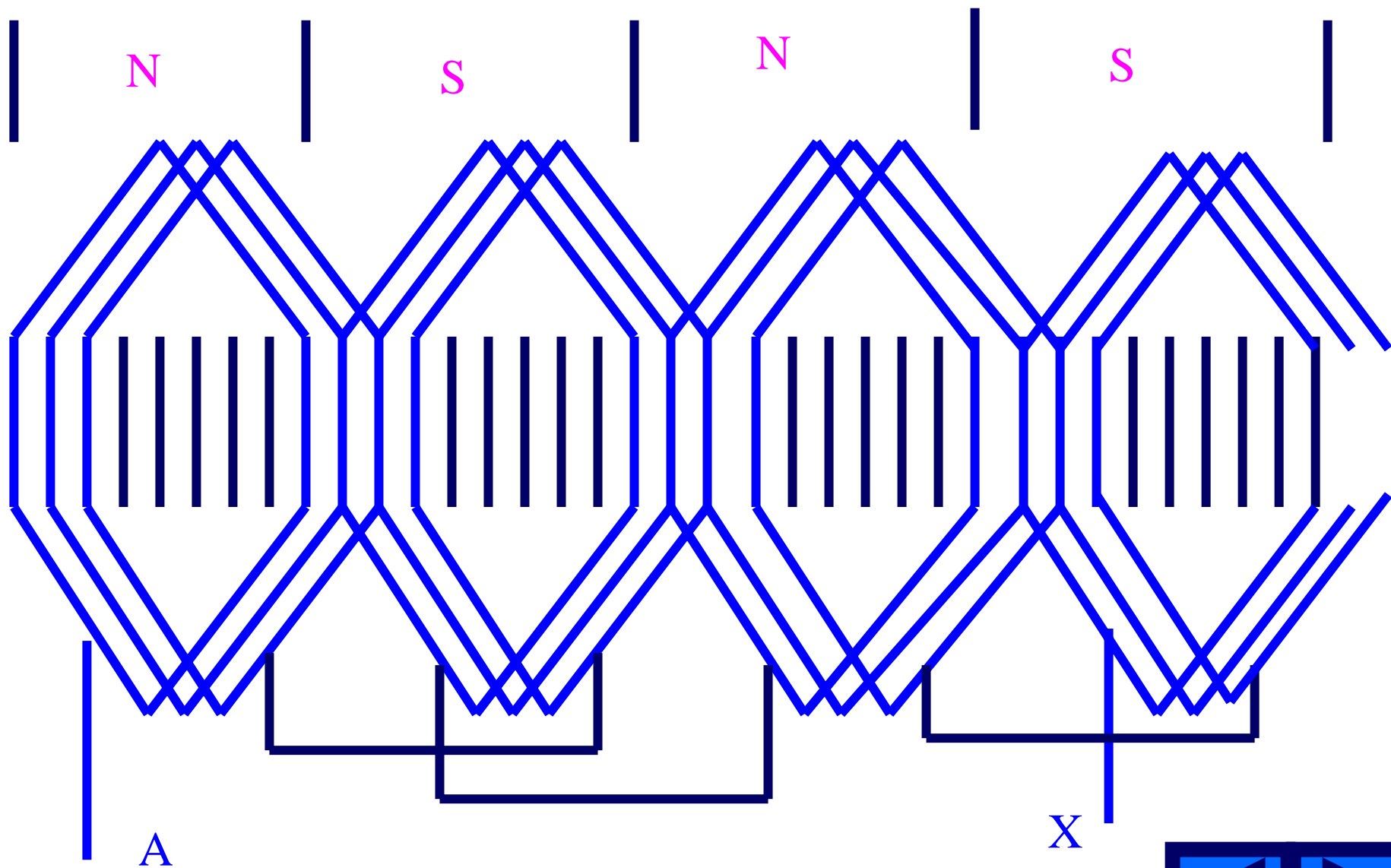
5、槽电势星形图和分相：

1,2,3; 10,11,12	7,8,9; 16,17,18	13,14,15; 4,5,6
19,20,21;28,29,30	25,26,27; 34,35,36	31,32,33; 22,23,24

A X B Y C Z



6、绕组连接图(A相):



第四节 交流绕组的感应电动势

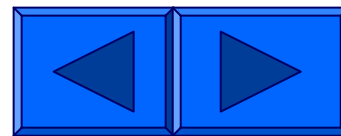
复习:

电枢绕组切割转子旋转磁场感应电动势

——感应电动势的相序：与绕组沿定子内圆的空间分布和转子旋转磁场的方向有关

要求感应正序电势，即A—B—C

——感应电动势的频率：与转子磁场的极对数 p 和转速 n 有恒定关系。 $f=Pn/60$



——感应电势的大小和波形（交流绕组的电动势）

#*波形：与磁场沿空间的分布的波形有关，若磁场沿圆周按**正弦分布**，则电势随时间按正弦变化

$$e_c = B_a l v = B_m l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

三相定子绕组对称，因此三相电势大小相等，相位互差120度。设 E_m 为电势最大值，A相初相角为0，则：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

转子磁场的分布:

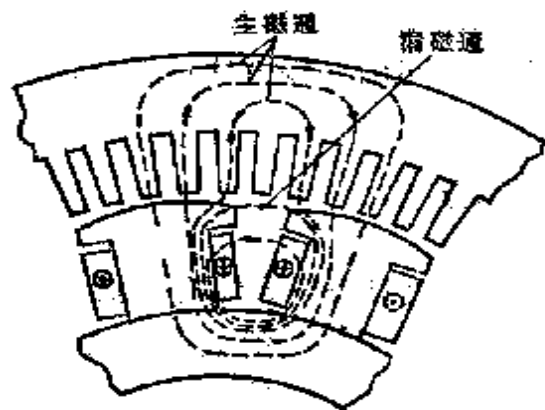


图 8-1 凸极同步电机转子磁通的磁路

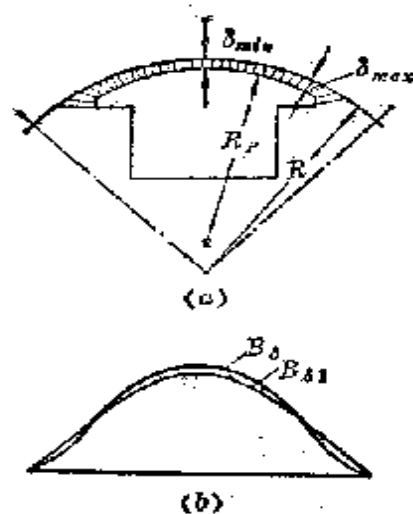


图 8-2 极弧形状和气隙磁通密度分布图
(a)极弧形状; (b)气隙磁通密度分布图

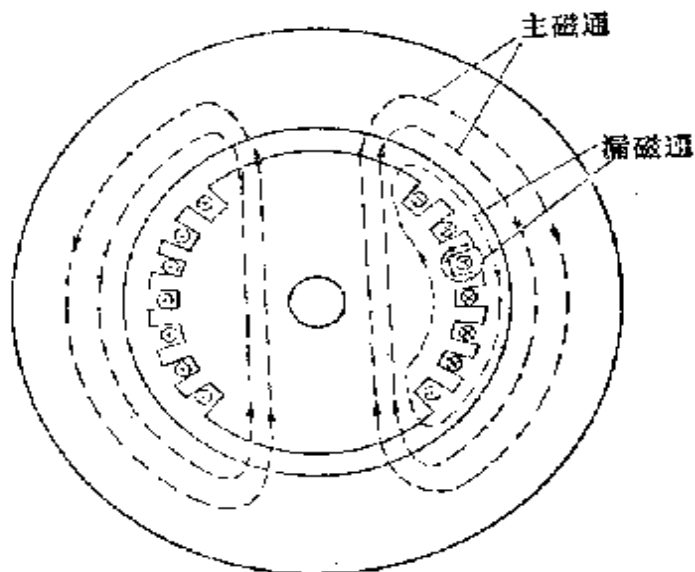


图 8-3 隐极同步电机转子磁通的磁路

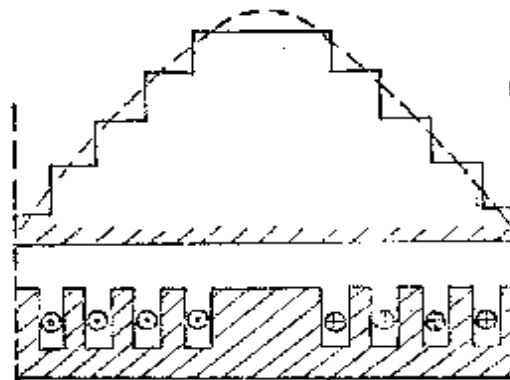


图 8-4 隐极机的励磁绕组布置和气隙磁通密度分布图

一、正弦磁场下的感应电势：

分析思路：

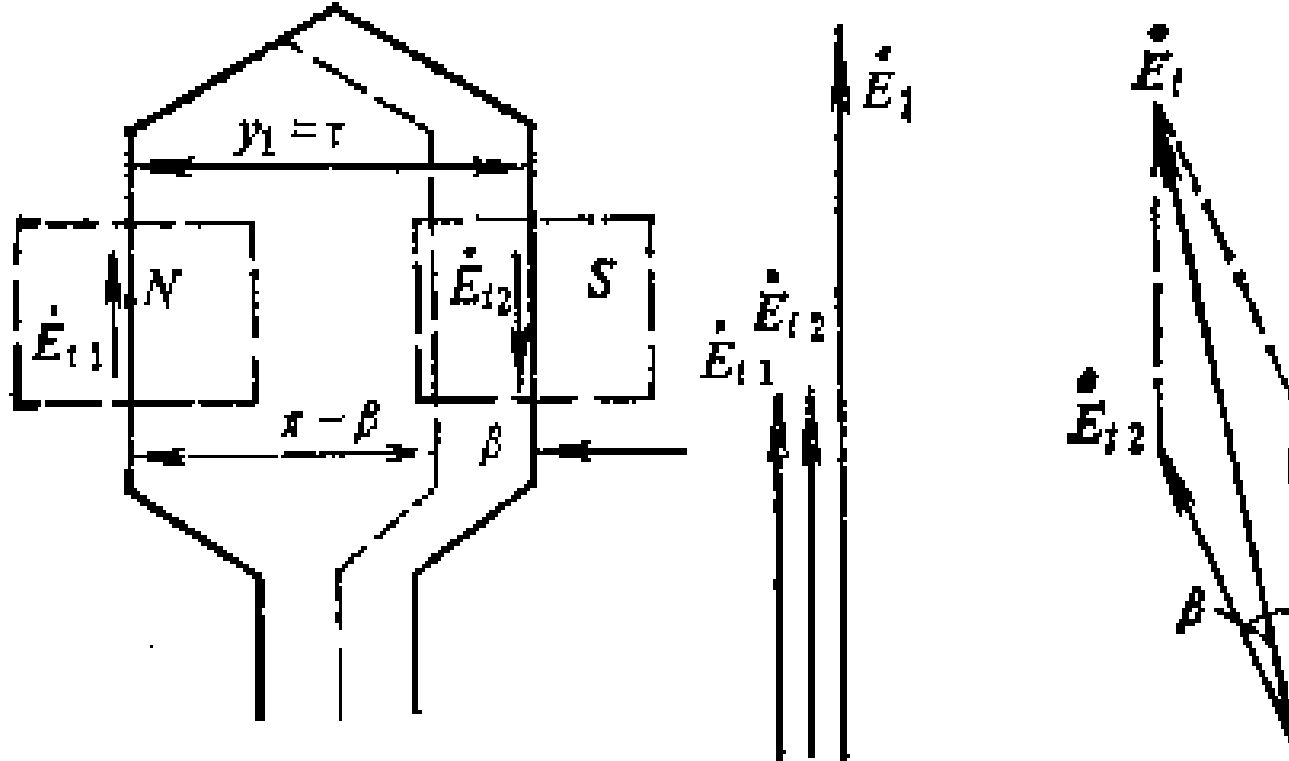
相绕组——线圈组——线圈——导体

1、导体电势：（平均值）

$$e_{t1} = B_{t1} l v = B_{1m} l v \cos \omega t = E_{t1m} \cos \omega t$$

$$E_{t1} = \frac{E_{t1m}}{\sqrt{2}} = \frac{B_{1m} l v}{\sqrt{2}} = \frac{l}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2} \Phi_1 \frac{1}{\tau} 2\tau f_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f_1 \Phi_1 = 2.22 f_1 \Phi_1$$

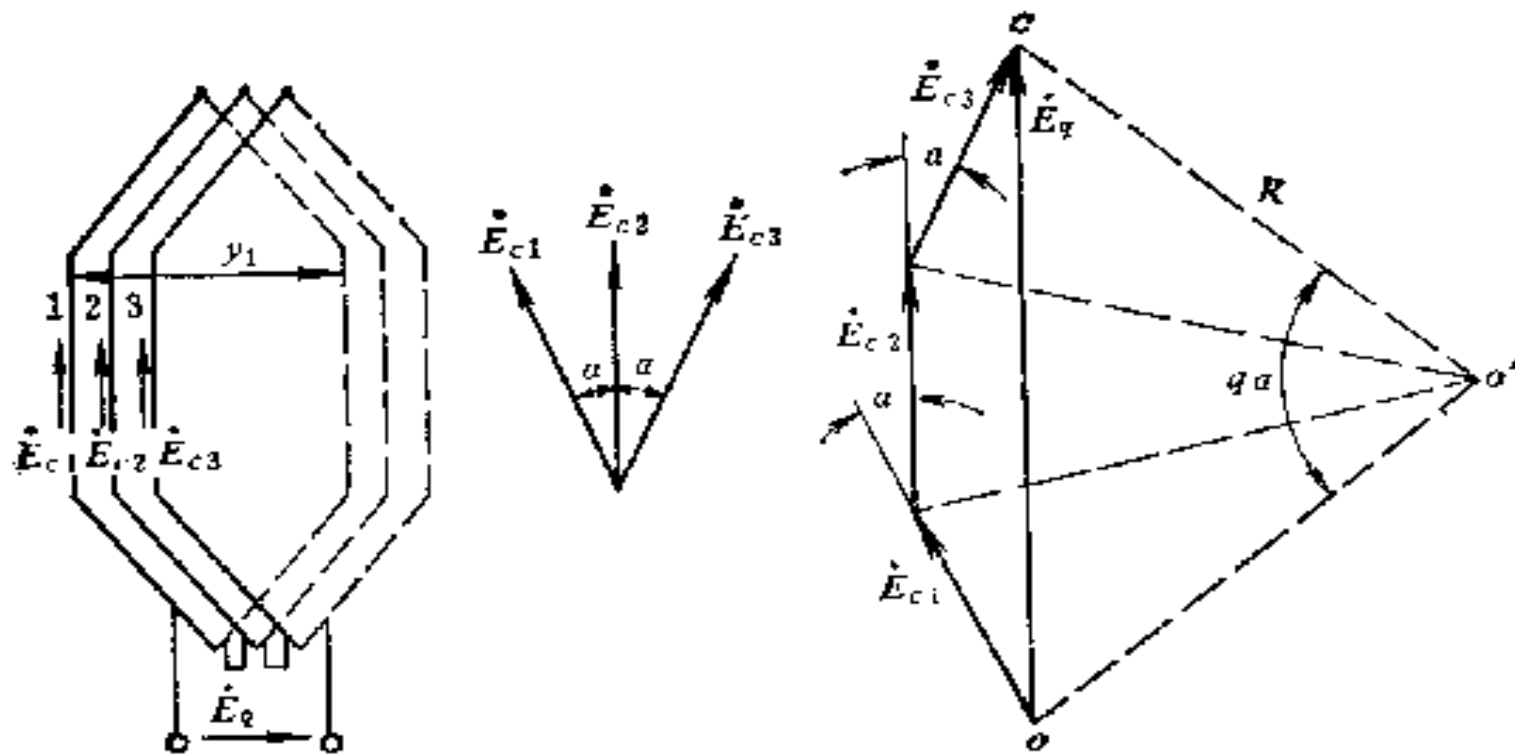
2、线圈电势及短距系数：



$$E_{c1} = N_c k_{y1} 2E_{t1} = 4.44 k_{y1} f_1 N_c \Phi_1$$

$$k_{y1} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ$$

3、线圈组的电势及分布系数：



$$E_{q1} = qk_{q1}E_{c1} = 4.44qk_{\omega 1}f_1N_c\Phi_1$$

$$k_{q1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad k_{w1} = k_{y1}k_{q1}$$

4、相电势和线电势:

$$E_{\varphi 1} = 4.44k_{\omega 1} f_1 N \Phi_1$$

$$N = \frac{p}{a} q N_c \quad \text{单层绕组}$$

$$N = \frac{2p}{a} q N_c \quad \text{双层绕组}$$

二、谐波电势的特点及其削弱方法

1、谐波磁场的特点：

$$p_v = \nu p$$

$$n_v = n$$

$$\tau_v = \frac{\tau}{\nu}$$

2、谐波电势的特点：

$$E_{\phi v} = 4.44 k_{\omega v} f_v N \Phi_v$$

$$f_v = \nu f$$

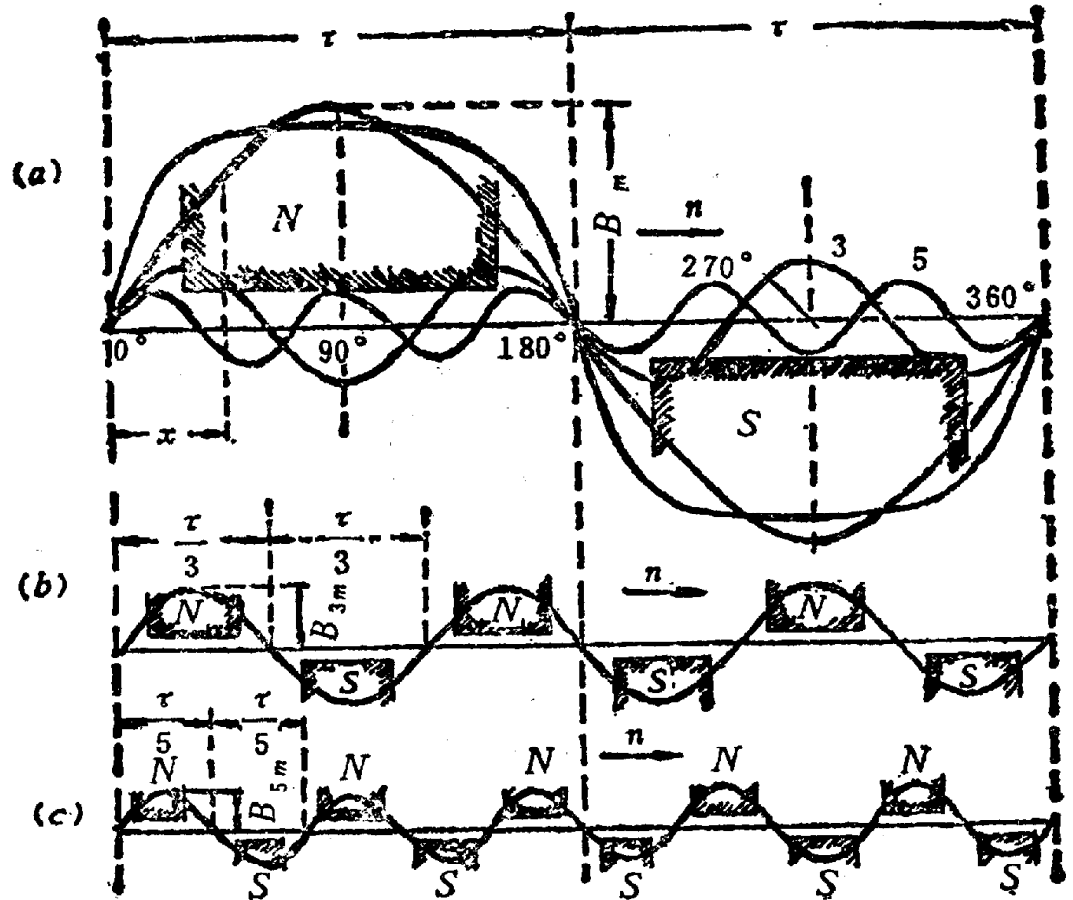


图 6-13 凸极机磁通密度分布曲线
(a)平顶波及各次谐波；(b) 3次谐波；(c) 5次谐波

3、谐波电势的削弱方法：

(1) 磁场分布接近正弦波；

(2) 三相采用Y接，消除线电势中3次及其倍数谐波；

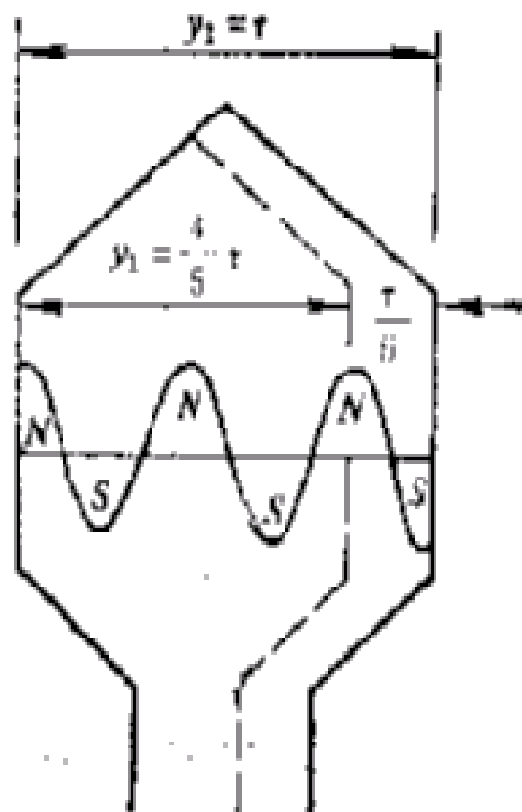
(3) 采用短距；

$$k_{\omega 1} = k_{y\nu} k_{q\nu}$$

$$k_{y\nu} = \sin \frac{y}{\tau} \nu 90^\circ = 0 \quad y = \frac{2k}{\nu} \tau$$

(4) 采用分布；

$$k_{q\nu} = \frac{\sin \frac{q \nu \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2}}$$



短距线圈能消除谐波电动势的原理图

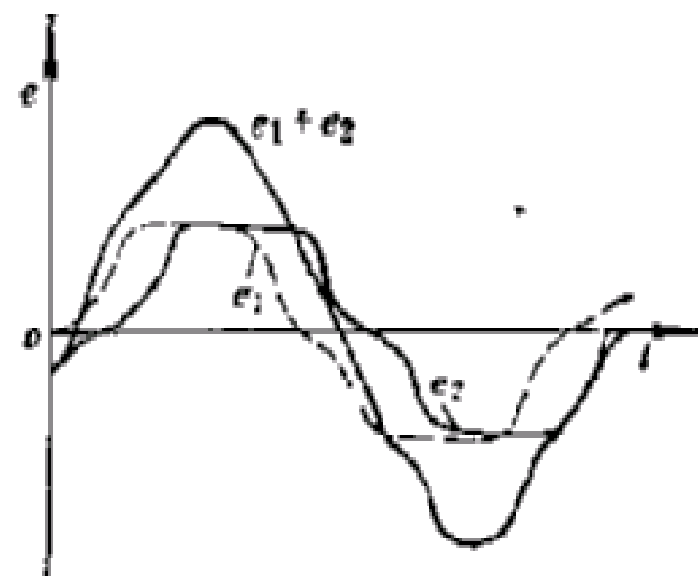


图 8-23 分布线圈电动势的合成波形

表 8-4

 基波和部分高次谐波的短距系数 $k_{y\nu}$

ν	$k_{y\nu}$	y_1/τ	1	8/9	5/6	4/5	7/9	2/3
			1	1	0.985	0.966	0.951	0.940
3	1	0.856	0.707	0.588	0.500	0		
5	1	0.634	0.259	0	0.174	0.866		
7	1	0.342	0.259	0.588	0.766	0.866		

表 8-5

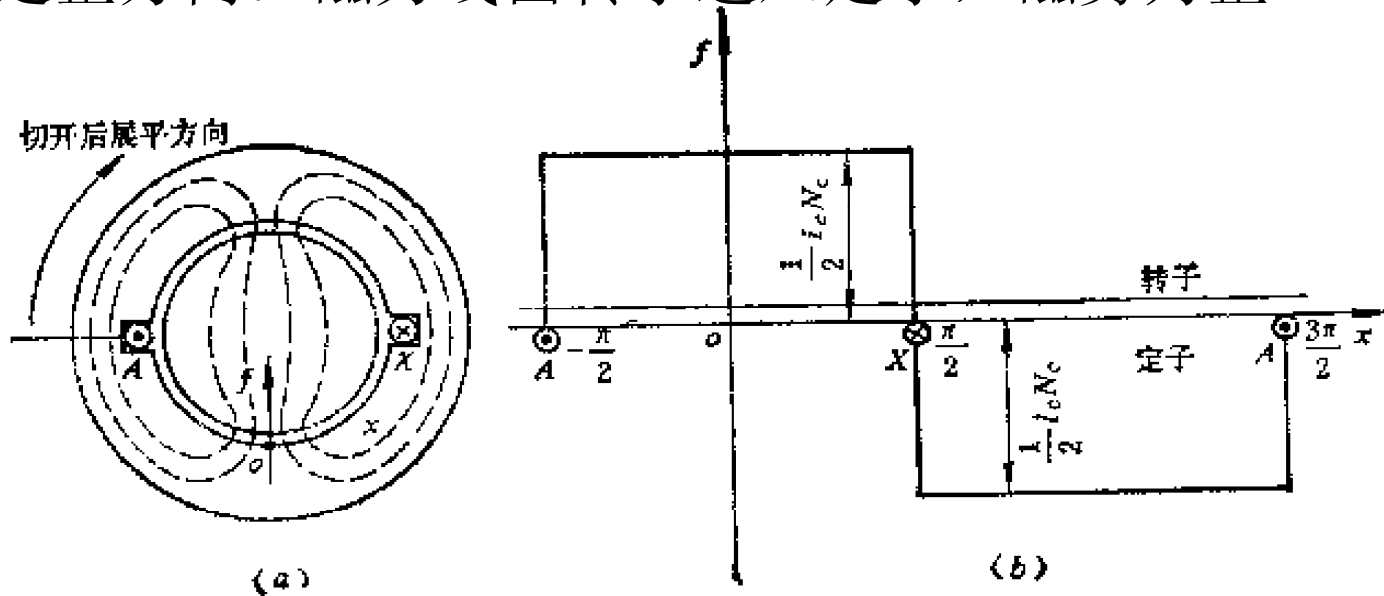
 不同 q 时基波和部分高次谐波的分布系数 $k_{q\nu}$ (绝对值)

q	k_{q1}	k_{q2}	k_{q3}	k_{q7}	k_{q5}	k_{q11}	k_{q17}
1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.986	0.707	0.259	0.259	0.707	0.986	0.986
3	0.960	0.667	0.217	0.177	0.333	0.177	0.217
4	0.958	0.654	0.216	0.158	0.270	0.126	0.126
5	0.957	0.646	0.200	0.149	0.247	0.210	0.102
6	0.957	0.644	0.197	0.145	0.236	0.102	0.092

第五节 单相交流绕组的磁动势

一、整距线圈的磁势：

假定正方向：磁力线由转子进入定子，磁势为正

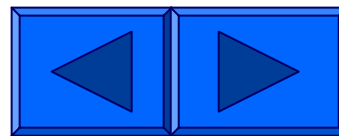


线圈匝数为 N_c ，通以电流 $i_c = \sqrt{2} I_c \cos \omega t$

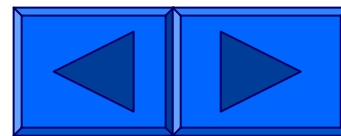
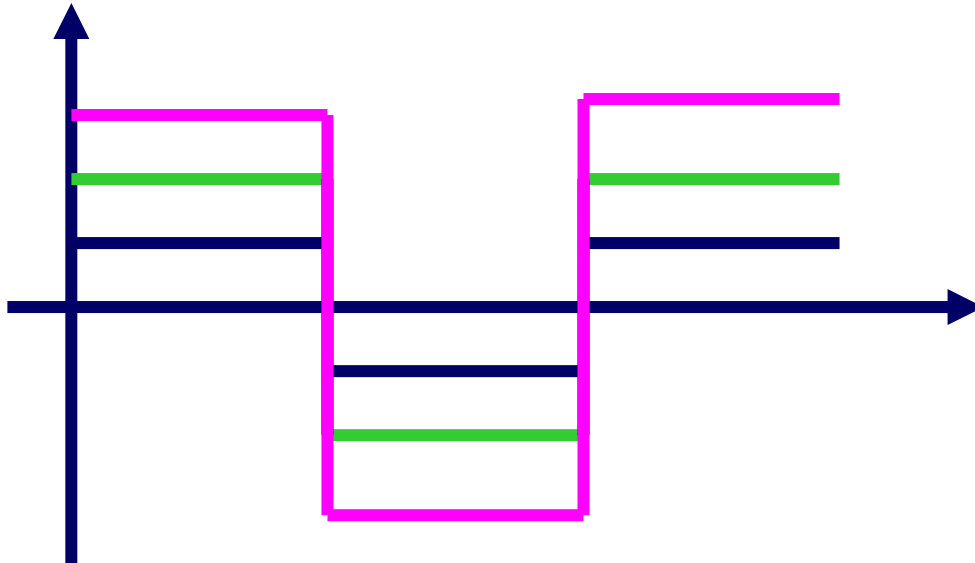
则

$$f_{cm} = \frac{1}{2} N_c i_c = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t$$

磁势的振幅



结论：单个线圈所产生的磁势在任何瞬时，其空间分布总是一个矩形波。而空间任意一点的大小是随电流而变化的，即矩形波的高度是时间的函数。这种在空间位置不动，波幅的大小和正负随时间而变化的磁势称为脉振磁势。当磁场极对数为 P 时，分布波的周期增加为 P 倍。



谐波磁势的特点:

$$p_v = \nu p \quad \tau_v = \frac{\tau}{\nu}$$

$$f_v = f$$

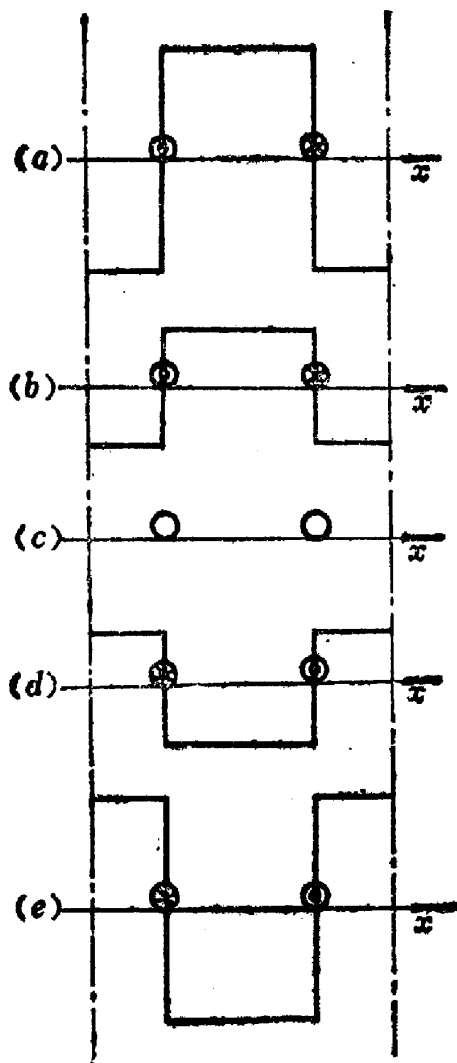


图 6-16 随时间按正弦规律变化的磁势波
 (a) $\sin\omega t = 1$; (b) $\sin\omega t = 0.5$; (c) $\sin\omega t = 0$;
 (d) $\sin\omega t = -0.5$; (e) $\sin\omega t = -1$

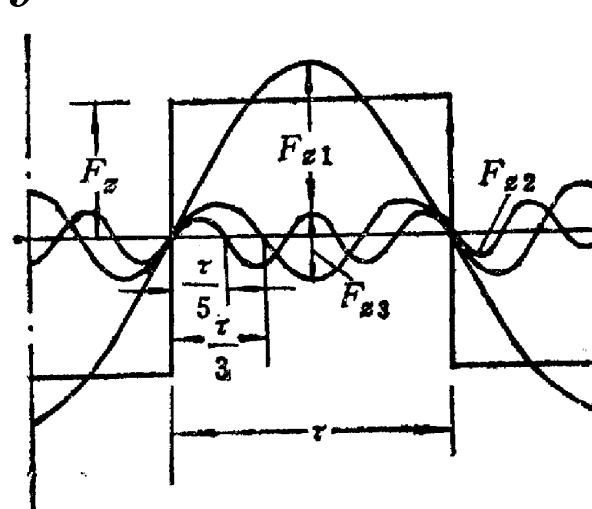


图 6-17 矩形波磁势及其分解后的谐波曲线

利用付氏级数展开，坐标原点在线圈的中心线上，
单个线圈的磁势分解为：

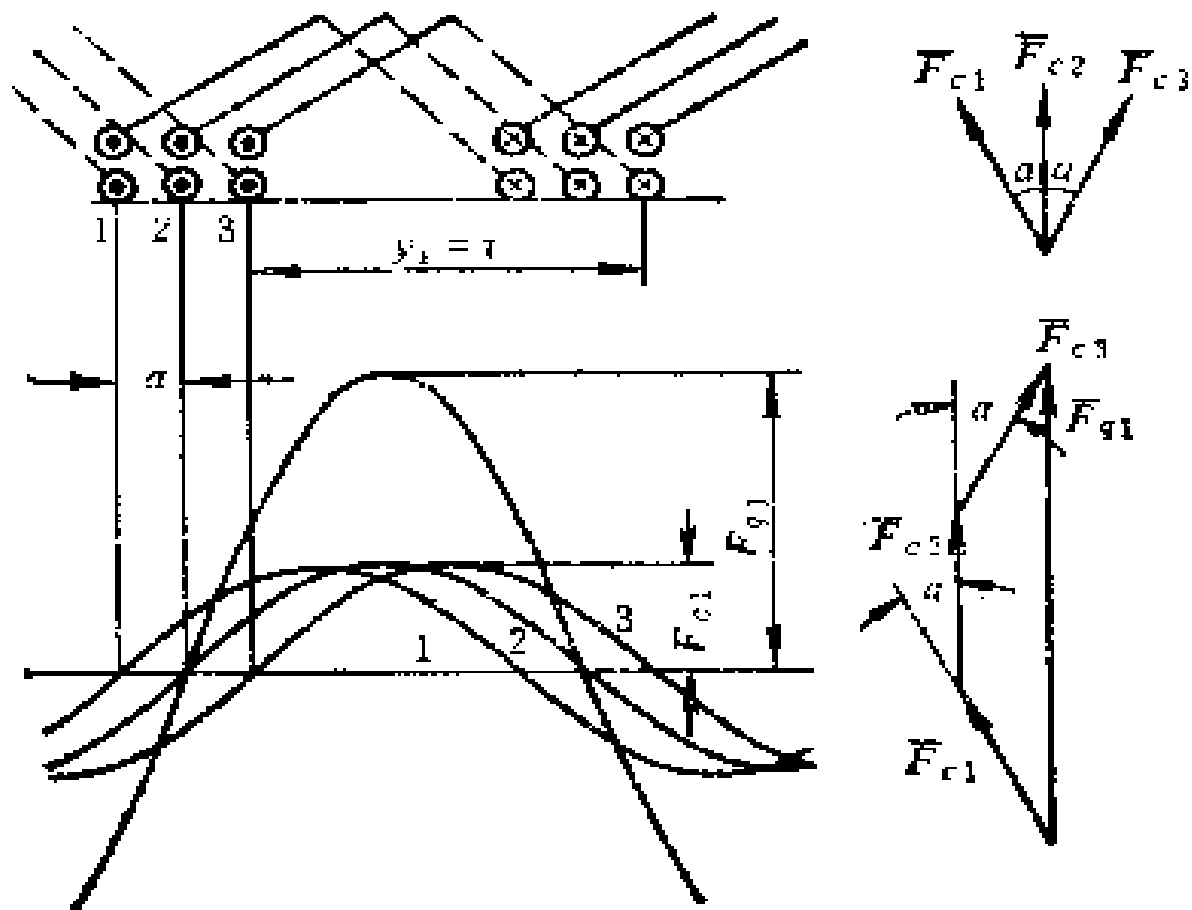
$$f_c(\theta, t) = (F_{c1} \cos \theta - F_{c3} \cos 3\theta + F_{c5} \cos 5\theta + \dots) \cos \omega t$$

其中：

$$F_{c1} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi 2} N_c I_c = 0.9 N_c I_c$$

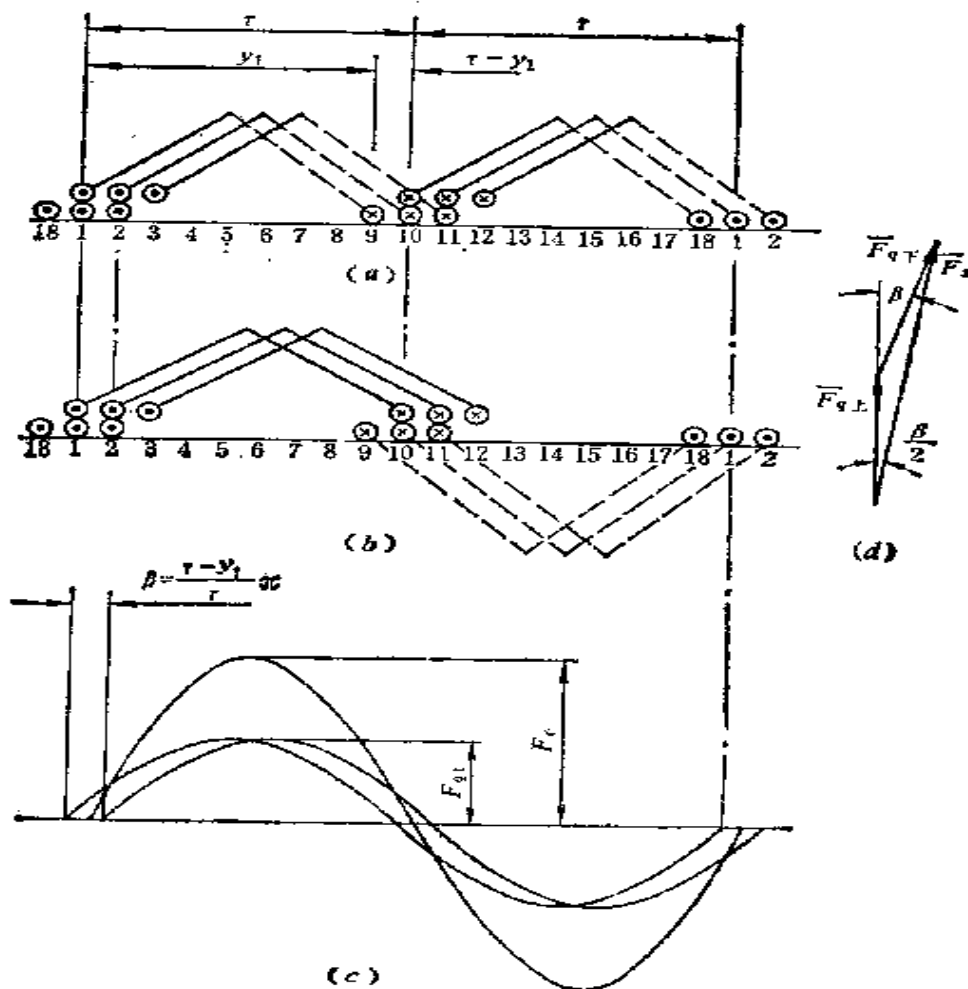
$$F_{cv} = \frac{1}{v} F_{c1}$$

二、整矩分布线圈组的磁动势和分布系数：



$$F_{q1} = 0.9 N_c I_c q k_{q1}$$

三、两个短距分布线圈组磁动势及短距系数：



$$F_{y1} = 0.9 N_c I_c 2q k_{q1} k_{d1} = 0.9 I_c 2q N_c k_{\omega 1}$$

四、单相磁动势:

1、磁场的分布特点:

2、单相磁动势

$$F_{\varphi 1} = 0.9 \frac{N}{p} k_{\omega 1} I$$

其中: N 为每相串联匝数

$I = aI_c$ 为相电流

$$f_{\varphi 1}(\theta, t) = F_{\varphi 1} \cos \theta \cos \omega t$$

其中:
$$F_{\varphi 1} = 0.9 \frac{N}{p} k_{\omega 1} I$$

$$f_{\varphi_1}(\theta, t) = 0.9 \frac{N}{p} k_{\omega_1} I \cos \theta \cos \omega t$$

3、单相磁动势的性质和特点：

*性质：单相脉动磁势

*特点：（1）单相绕组中流过交流电流建立脉动磁势；它既是时间函数，又是空间函数；它在空间上按余弦规律分布，各点大小又按余弦规律变化。

（2）单相脉动基波磁势最大幅值： $F_{\varphi_1} = 0.9 \frac{N}{p} k_{\omega_1} I$

幅值位置在相绕组的轴线上，其脉动频率为电流的频率。

（3）分布和短距对磁势幅值起削弱作用。由于各对极下磁势只作用在各自的磁路上，故每对极下某相线圈组的磁势也就是相磁势。

五、单相脉动磁动势的分解：

$$f_{\varphi 1}(\theta, t) = F_{\varphi 1} \cos \omega t \cos \theta \quad \text{特点：幅值大小随时间 变化}$$

$$= \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t + \theta)$$

$$f^+_{\varphi 1}(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta)$$

特点：幅值大小不变，但不同的时刻在不同的位置

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \text{ (rad / s)}$$

$$n = \frac{\omega}{p 2\pi} \text{ (r / s)} = \frac{60 f}{p} \text{ (r / min)} \quad \text{同步速}$$

结论:

单相脉动磁势可以分解为两个转速相同、旋转方向相反的旋转磁势，每个旋转磁势的幅值为脉动磁势为脉动磁势最大幅值的一半。

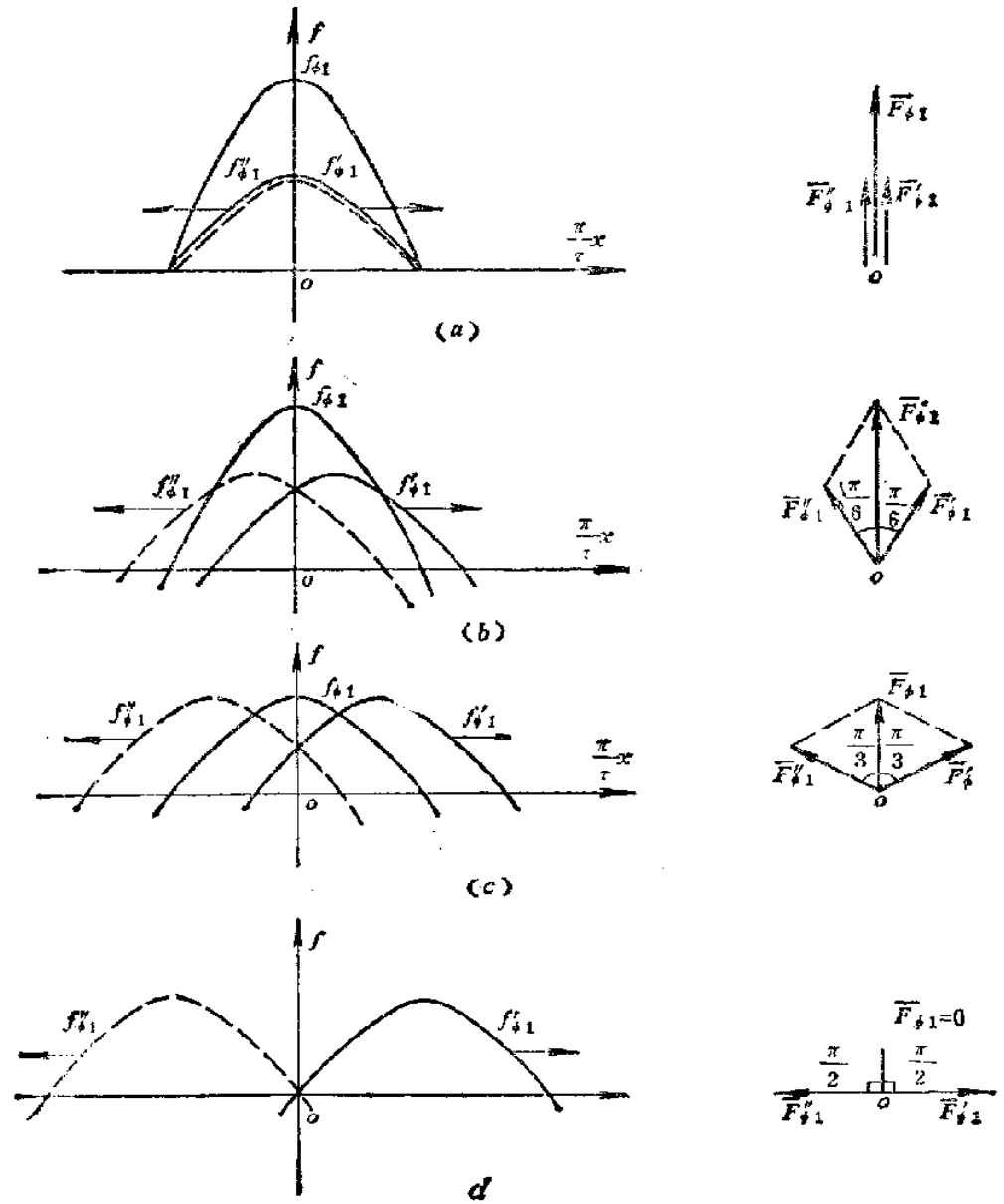


图 8-32 基波脉振磁动势分解为两个反向旋转的旋转磁动势

$$(a) \omega t = 0; (b) \omega t = \frac{\pi}{6}; (c) \omega t = \frac{\pi}{3}; (d) \omega t = \frac{\pi}{2}$$

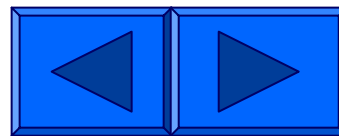
第六节 三相交流绕组的磁动势

一、解析法：

$$\begin{aligned} f_{\varphi A1}(\theta, t) &= F_{\varphi 1} \cos \omega t \cos \theta \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t + \theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi B1}(\theta, t) &= F_{\varphi 1} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi C1}(\theta, t) &= F_{\varphi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\theta - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} f_1(\theta, t) &= f_{\varphi A1}(\theta, t) + f_{\varphi B1}(\theta, t) + f_{\varphi C1}(\theta, t) \\ &= \frac{3}{2} F_{\varphi 1} \cos(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

结论:

三相合成磁势是一个幅值不变的旋转磁势，幅值为单相脉动磁势基波最大幅值的3/2倍。旋转速度为同步速。

二、图解法：

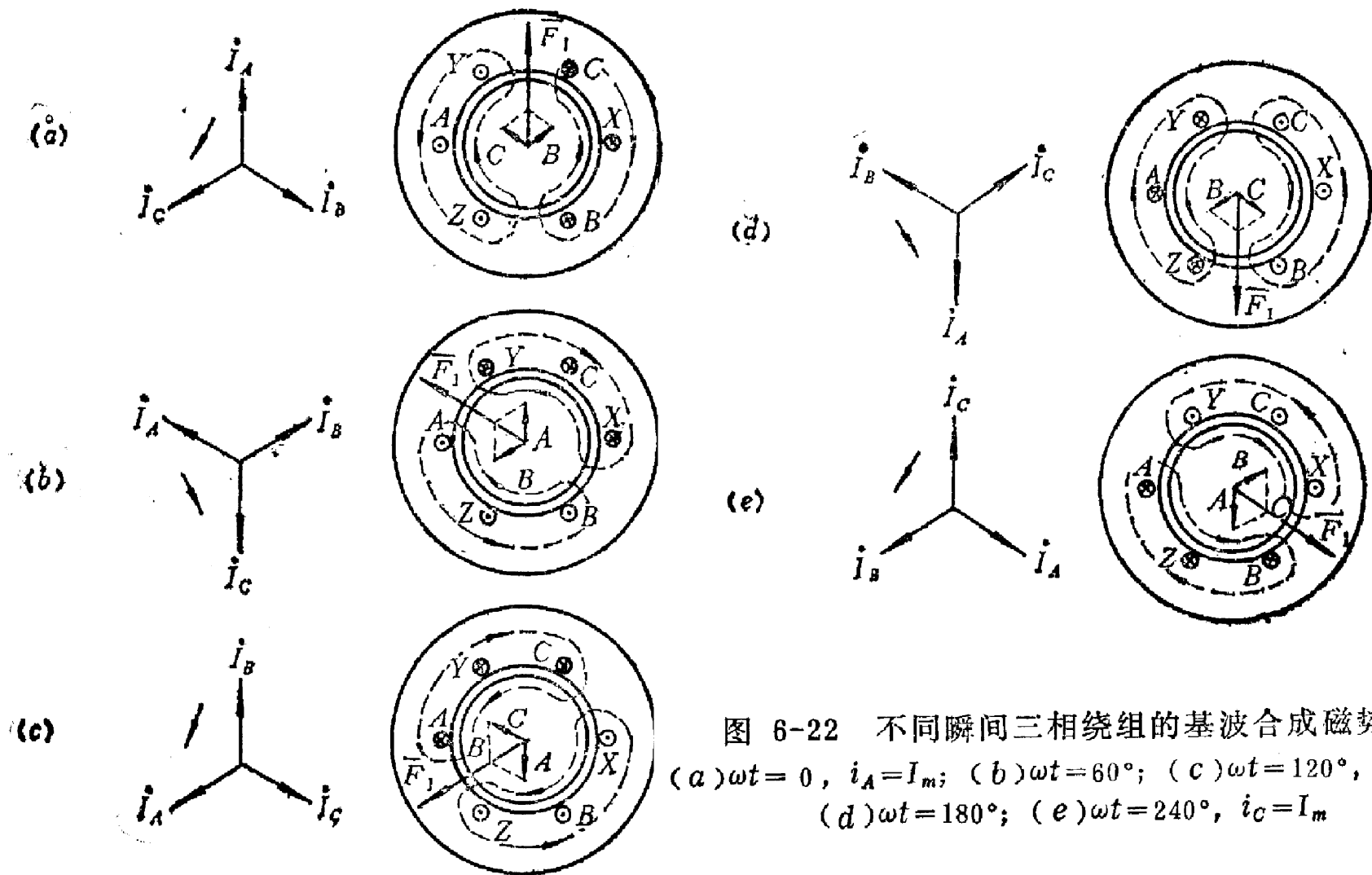


图 6-22 不同瞬间三相绕组的基波合成磁势
 (a) $\omega t = 0$, $i_A = I_m$; (b) $\omega t = 60^\circ$; (c) $\omega t = 120^\circ$, $i_B = I_m$;
 (d) $\omega t = 180^\circ$; (e) $\omega t = 240^\circ$, $i_C = I_m$

结论： 三相合成磁势的性质和特点

三相对称的电流流过三相对称的绕组所建立的合成磁势的基波是一个幅值不变的旋转磁势：

特点：

1. 三相基波合成磁动势的幅值等于单相基波磁动势最大幅值的 $3/2$ 倍。
2. 三相基波合成磁动势的幅值位置总是与电流达最大值的那一相绕组的轴线重合。
3. 三相基波合成磁动势的转向取决于电流的相序，即总是从超前电流相转向滞后电流相。
4. 三相基波合成磁动势的转速为同步转速

$$n = \frac{60f}{p}$$

三、谐波磁动势的分析：

1、三次谐波及其奇次倍数：

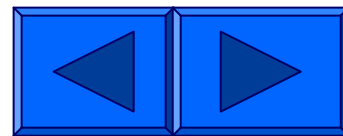
$$f_{\varphi A3}(\theta, t) = F_{\varphi3} \cos \omega t \cos(3\theta)$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi B3}(\theta, t) &= F_{\varphi3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 3(\theta - 120^\circ) \\ &= F_{\varphi3} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(3\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi C3}(\theta, t) &= F_{\varphi3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 3(\theta - 240^\circ) \\ &= F_{\varphi3} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(3\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_3(\theta, t) &= f_{\varphi A3}(\theta, t) + f_{\varphi B3}(\theta, t) + f_{\varphi C3}(\theta, t) \\ &= 0 \end{aligned}$$

结论：合成磁势为零

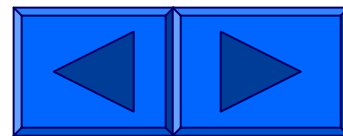


2、五次谐波及其 $(6k-1)$ 次奇数波:

$$\begin{aligned} f_{\varphi A5}(\theta, t) &= F_{\varphi 5} \cos \omega t \cos(5\theta) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 5\theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t + 5\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi B5}(\theta, t) &= F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 5(\theta - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 5\theta - 240^\circ) + \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t + 5\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi C5}(\theta, t) &= F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 5(\theta - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t - 5\theta - 120^\circ) + \frac{1}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t + 5\theta) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} f_5(\theta, t) &= f_{\varphi A5}(\theta, t) + f_{\varphi B5}(\theta, t) + f_{\varphi C5}(\theta, t) \\ &= \frac{3}{2} F_{\varphi 5} \cos(\omega t + 5\theta) \end{aligned}$$

结论:

五次谐波及其 $(6k-1)$ 次奇数波的三相合成磁势是一个幅值不变的反向旋转磁势，幅值为其单相脉动磁势基波最大幅值的 $3/2$ 倍。旋转速度为

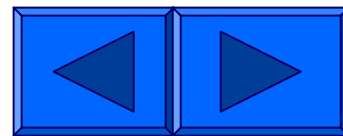
$$n_v = \frac{60 f_v}{p_v} = \frac{60 f}{vp} = \frac{n}{v}$$

3、七次谐波及其 $(6k+1)$ 次奇数波:

$$\begin{aligned} f_{\varphi A 7}(\theta, t) &= F_{\varphi 7} \cos \omega t \cos(7\theta) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t - 7\theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t + 7\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi B 7}(\theta, t) &= F_{\varphi 7} \cos(\omega t - 120^\circ) \cos 7(\theta - 120^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t - 7\theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t + 7\theta - 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{\varphi C 7}(\theta, t) &= F_{\varphi 7} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos 7(\theta - 240^\circ) \\ &= \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t - 7\theta) + \frac{1}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t + 7\theta - 120^\circ) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} f_7(\theta, t) &= f_{\varphi A7}(\theta, t) + f_{\varphi B7}(\theta, t) + f_{\varphi C7}(\theta, t) \\ &= \frac{3}{2} F_{\varphi 7} \cos(\omega t + 7\theta) \end{aligned}$$

结论:

七次谐波及其 $(6k+1)$ 次奇数波的三相合成磁势是一个幅值不变的正向旋转磁势，幅值为其单相脉动磁势基波最大幅值的 $3/2$ 倍。旋转速度为

$$n_v = \frac{60 f_v}{p_v} = \frac{60 f}{vp} = \frac{n}{v}$$

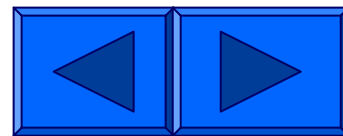
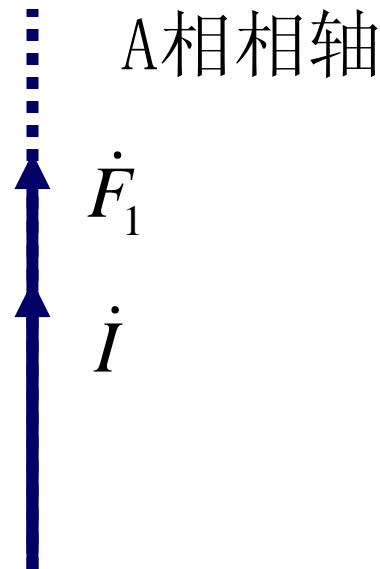
四、时空向量图：

空间向量：磁势（三相）

——空间参考轴：取A相相轴

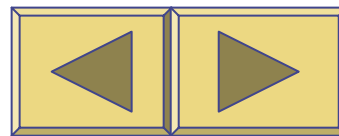
时间向量：电流（单相）——取A相

——时间参考轴：与空间参考轴重合



第五章 感应电机的稳态分析

- ◆ 第一节 感应电机的结构与运行状态
- ◆ 第二节 三相感应电动机的磁动势和磁场
- ◆ 第三节 三相感应电动机的电压方程和等效电路
- ◆ 第四节 感应电动机的功率方程和转矩方程
- ◆ 第五节 感应电动机的参数测定
- ◆ 第六节 感应电动机的转矩—转差率曲线
- ◆ 第七节 感应电动机的工作特性
- ◆ 第八节 感应电动机的启动
- ◆ 第九节 感应电动机的调速
- ◆ 第十节 单相感应电动机



第一节 感应电机的结构与运行状态

◆ 复习

三相感应电动机的工作原理

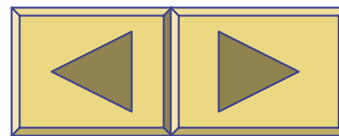
1、基本组成

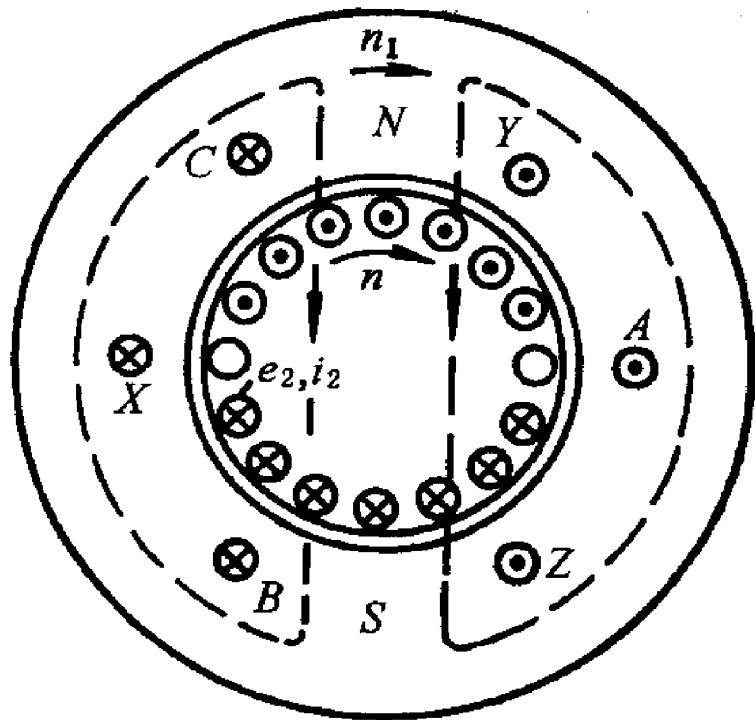
定子：定子铁心和定子绕组——交流绕

转子：转子铁心和转子绕组（自成闭合回路）

2、工作原理

(1) 对称定子绕组外加**对称三相交流电压**，定子绕组内有**对称三相交流电流**，它们联合产生**旋转磁场**



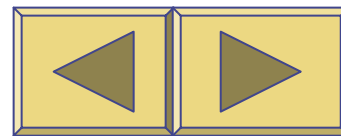


(2) 转子导条切割定子旋转磁场将感应电势，从而在闭合的导条中产生电流，则转子导条将受到电磁力的作用，并且形成电磁转矩，使转子顺旋转磁场的方向旋转，若

转子轴上有负载，电动机将输出机械功率。

感应电机的转速永远小于同步转速。

故又称为异步机。



一、感应电机的结构：

定子 转子 气隙。

(一)定子：定子铁芯、定子绕组和机座。

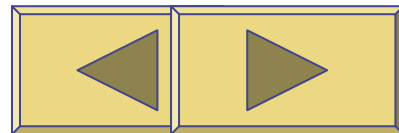
1、定子铁芯：主磁路的一部分

由0.5mm厚的硅钢片迭压而成

2、定子绕组：交流绕组，定子电路

由许多线圈按一定规律连接而成

3、机座：固定和支撑定子铁芯。



(二)转子：转子铁芯、转子绕组和转轴

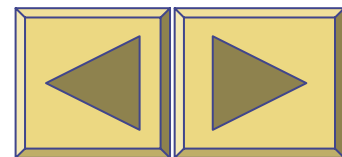
1、转子铁芯：主磁路的一部分

由0.5mm厚的硅钢片迭压而成。

2、转子绕组：分为鼠笼式和绕线式。

1)鼠笼式：一般采用铸铝转子或铜条转子。(斜槽)

2)绕线式：是对称三相绕组，接成星形，并接到
转轴上三个集电环上，再通过电刷与外电路接通。

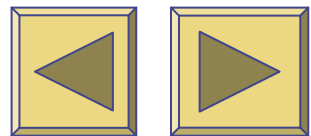


(三)气隙:

中小型电机一般为0.2~2mm,
它与电机性能关系极大。

- 1、气隙大——磁阻大——产生同样大小磁场需要较大的励磁电流——使电机的功率因数降低。
- 2、气隙小——装配困难和运转不安全。

结论：应综合考虑。



二、感应电机的转差率与运行状态：

1、转差率：同步转速与转子转速 n 之差与同步转速的比值，即

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

2、转差率的计算：

例：某台感应电动机额定转速为**1440r/s**，求额定转差率？（工频）

解：异步电动机的额定转速近似等于同步速，则

极对数	1	2	3	4	5	6
同步速	3000	1500	1000	750	600	500

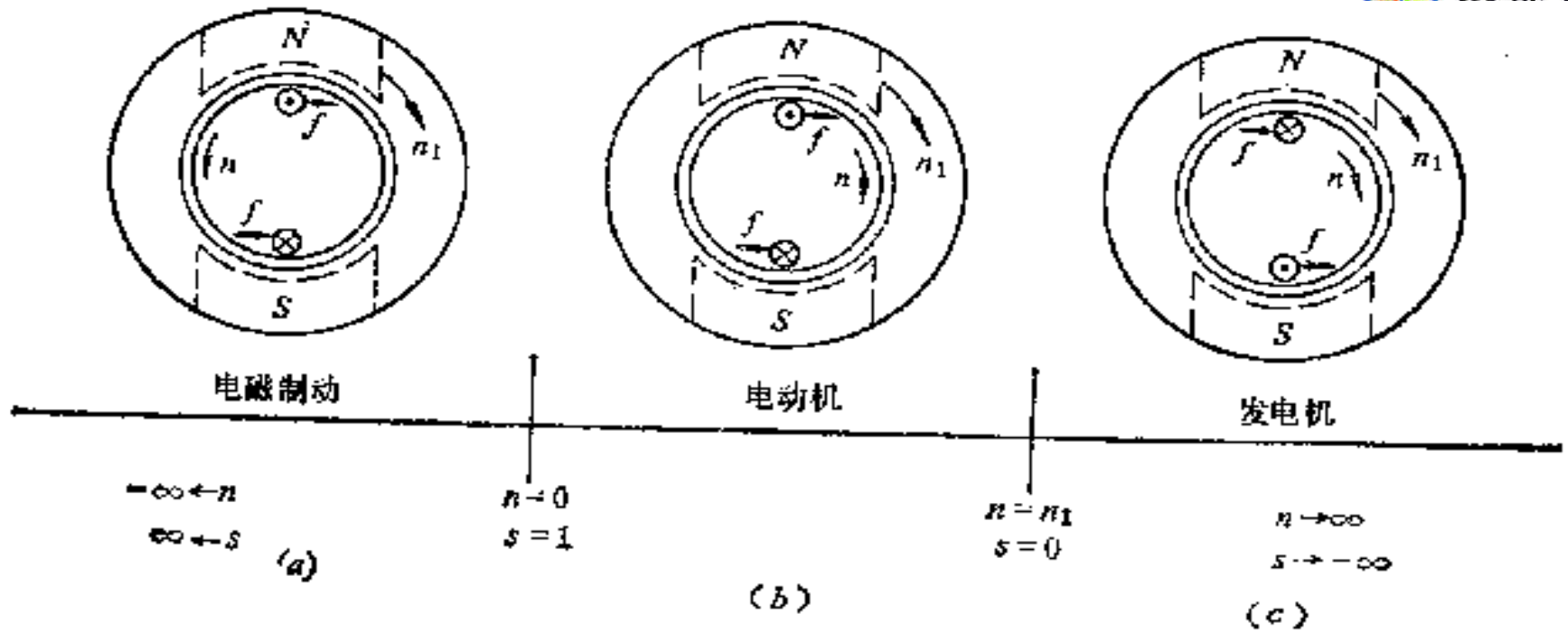


图 14-2 异步电机三种运行状态

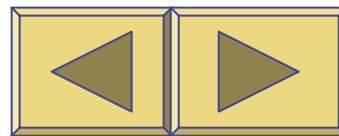
(a) 电磁制动状态; (b) 电动机状态; (c) 发电机状态

3、三种运行状态:

(1) 电动状态: $0 < n < n_s, \quad 0 < S < 1$

(2) 发电状态: $n > n_s, \quad S < 0$

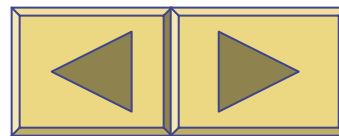
(3) 制动状态: $n < 0, \quad 1 < S$



三、感应电动机的额定值

- 1、**额定功率**：轴上输出的机械功率。千瓦。
- 2、**额定电压**：定子绕组的线电压，伏。
- 3、**额定电流**：电机在额定电压和功率下，定子绕组中流过的线电流，安。
- 4、**额定频率**：50赫。
- 5、**额定转速**：电机在额定电压、频率和功率下的转速，转/分。

还有绕组的相数与接法，绝缘等级及允许温升等；对绕线式转子，还标明转子的额定电势及额定电流。



接线

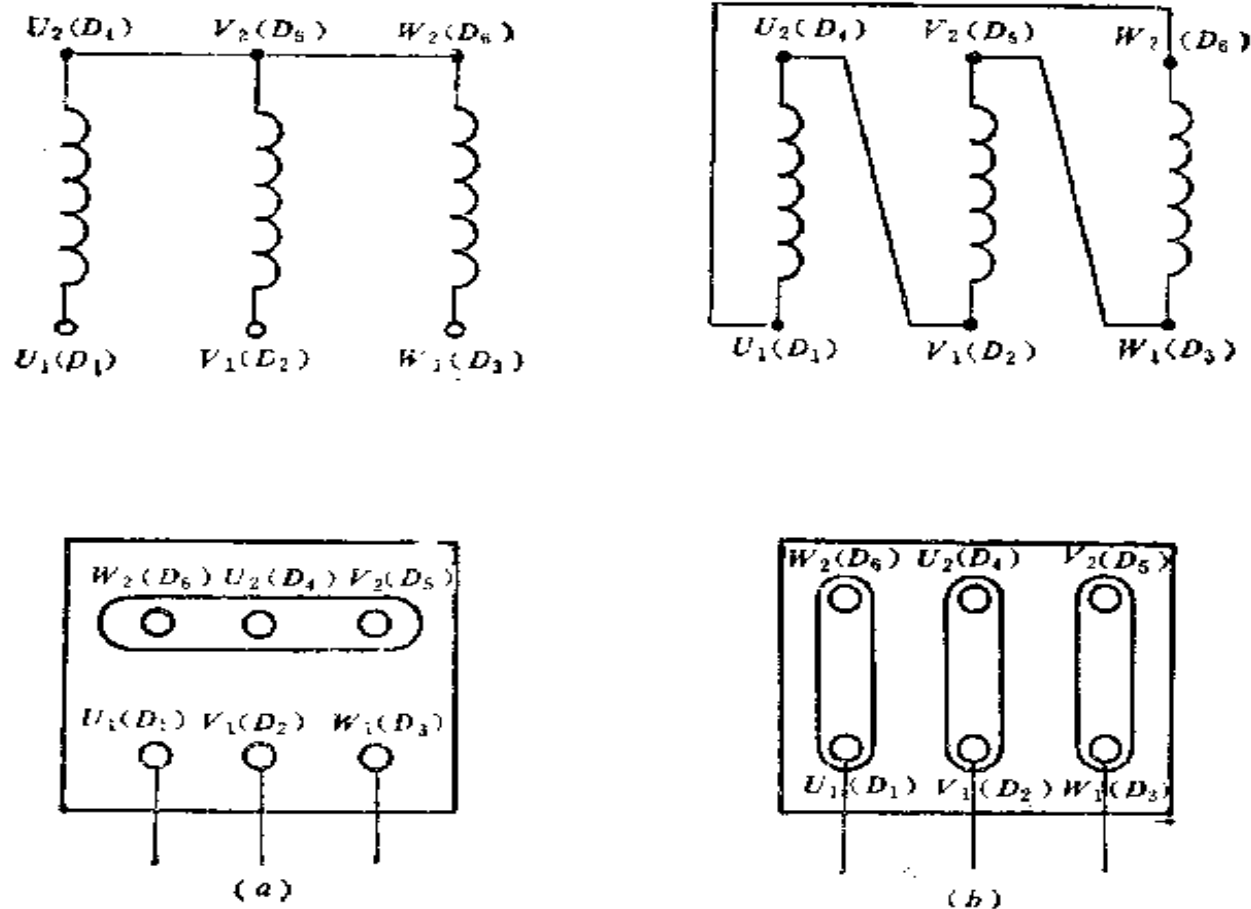


图 14-8 异步电动机引出线的接法
 (a) Y接法; (b) Δ接法

四、鼠笼式转子绕组分析

1. 相数: $m_2 = z_2/p$

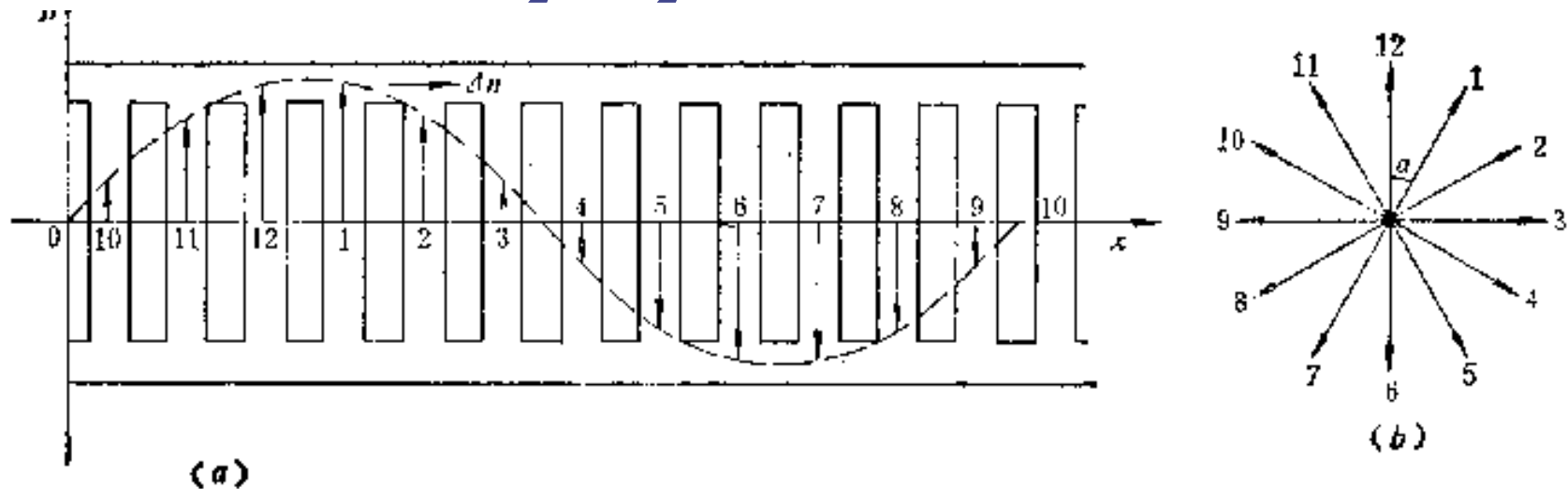


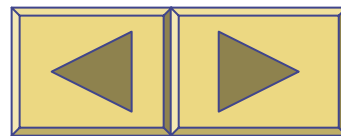
图 14-6 鼠笼绕组展开图中的磁密 B 、电动势 E 、电流 I 分布示意图
(a) 某一时刻的磁密波及 E 、 I 瞬时值分布; (b) 导条电动势 E 的相量图

2. 绕组系数: $N_2 = 1/2 \quad kw_2 = 1$

3. 极数: $p_2 = p$

第二节 三相感应电机的磁动势和磁场

- ◆一、空载运行时的磁动势和磁场
 - ◆1、空载运行时的磁动势
 - ◆2、主磁通和激磁阻抗
 - ◆3、定子漏磁通和漏抗
- ◆二、负载运行时的磁动势和磁场
 - ◆1、转子磁动势
 - ◆2、磁动势平衡



一、空载运行时的磁动势和磁场

◆ 1、空载运行时的磁动势

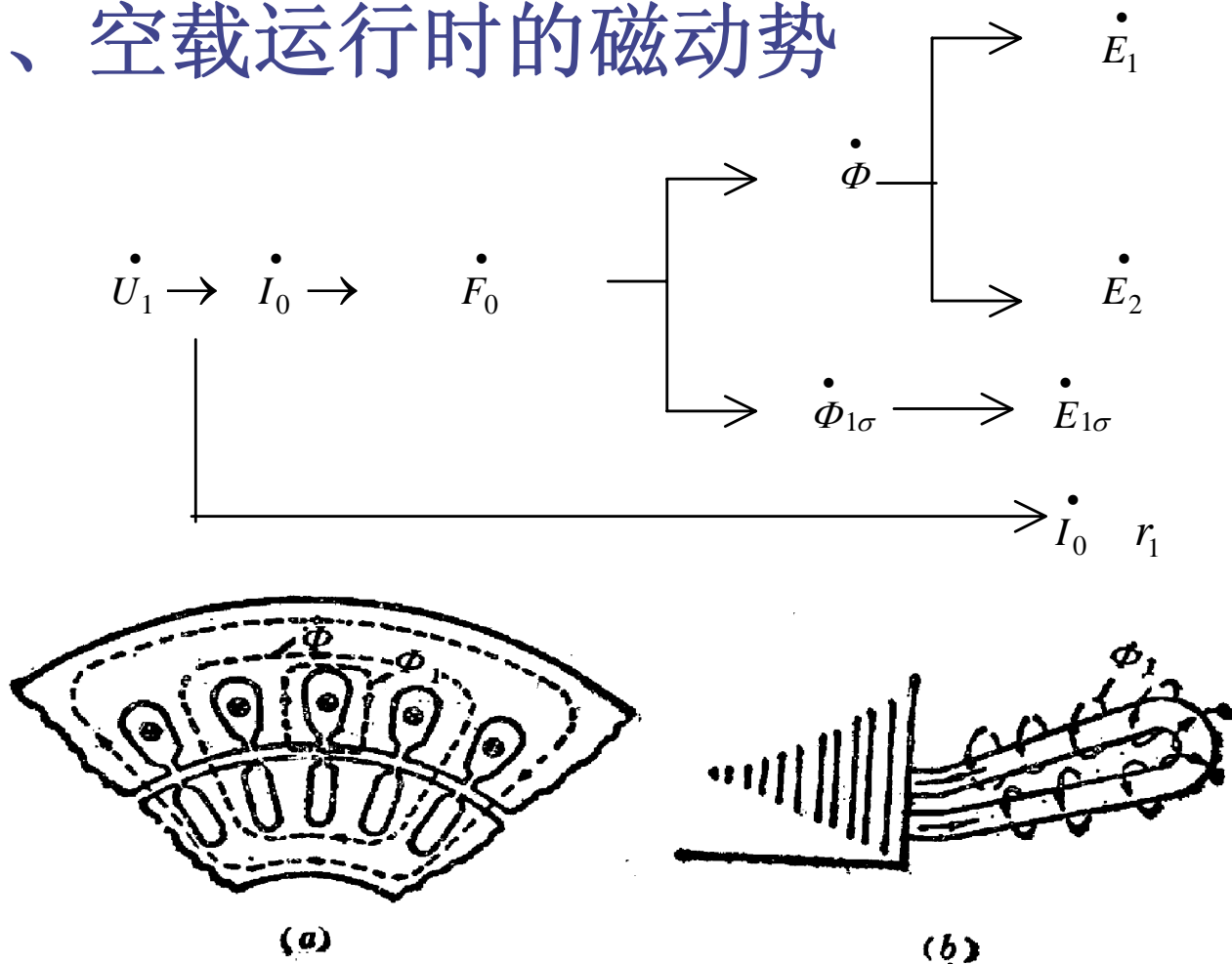


图 8-1 主磁通和漏磁通
 (a) 主磁通和槽漏磁通； (b) 端部漏磁通

结论:

空载运行时，定子磁动势基本为激磁磁动势；

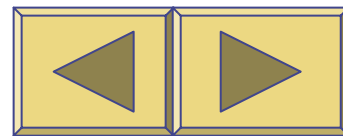
定子电流近似等于激磁电流。

◆2、主磁通和激磁阻抗

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f_1 N_1 k_{w1} \dot{\Phi}_1$$

与变压器类似，主磁通感应的电势与产生主磁通的激磁电流的关系为：

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m = -\dot{I}_m (R_m + jX_m)$$



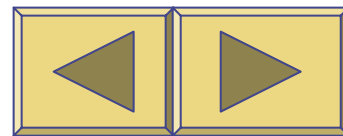
物理意义：

激磁阻抗是表征铁心磁化特性和铁耗的一个综合参数。

激磁电阻是表征铁心损耗的一个等效电阻；

激磁电抗是表征主磁路的等效电抗，且

$$X_m \propto f_1 N_1^2 \Lambda_m$$



◆ 3、定子漏磁通和漏抗

- (1) 漏磁通的分类：槽漏磁通
端部漏磁通
谐波漏磁通

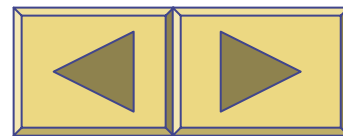
(2) 谐波漏磁通的分析：

高次谐波磁场对转子的作用与基波不同

(因其与转子的相对运动与基波不同)

但高次谐波磁场在定子绕组中感应电势的频率为：

$$f_v = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{vp \cancel{n} / \cancel{v}}{60} = \frac{pn}{60} = f_1$$



与漏磁通作用相同，因此将谐波磁场归为漏磁

(3) 漏磁通与漏电抗

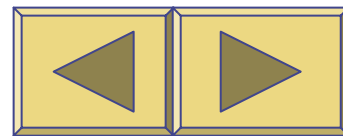
与变压器相同，漏磁通所感应的电势可写为：

$$\dot{E}_{1\sigma} = -jX_{1\sigma} \dot{I}_1$$

且
$$X_{1\sigma} = 2\pi f_1 N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$$

漏电抗的物理意义：

它是定子三相电流联合产生的漏磁场在定子一相电路中引起的电抗。



二、负载运行时的磁动势和磁场

◆1、转子磁动势

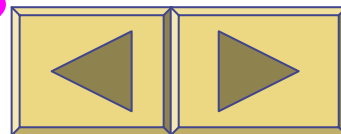
设转子转速为 n ，则定子旋转磁场切割转子的速度为： $\Delta n = n_s - n = sn_s$ ；此时转子感应电势和电流的频率为：

$$f_2 = \frac{p \Delta n}{60} = \frac{psn_s}{60} = sf_1$$

则转子电流建立的旋转磁动势的转速为：

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 sf_1}{p} = sn_s = \Delta n$$

相对于谁？旋转的转子？静止的定子？



转子磁动势相对于定子的转速为：

$$\Delta n + n = n_s - n + n = n_s$$

结论：无论转子实际转速为多少，转子磁动势和定子磁动势在空间始终保持相对静止。

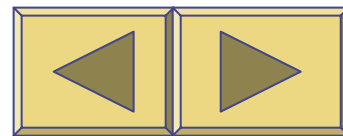
◆2、磁动势平衡

与变压器相似，感应电动机负载时，主磁通是由定、转子磁动势共同产生的，则有

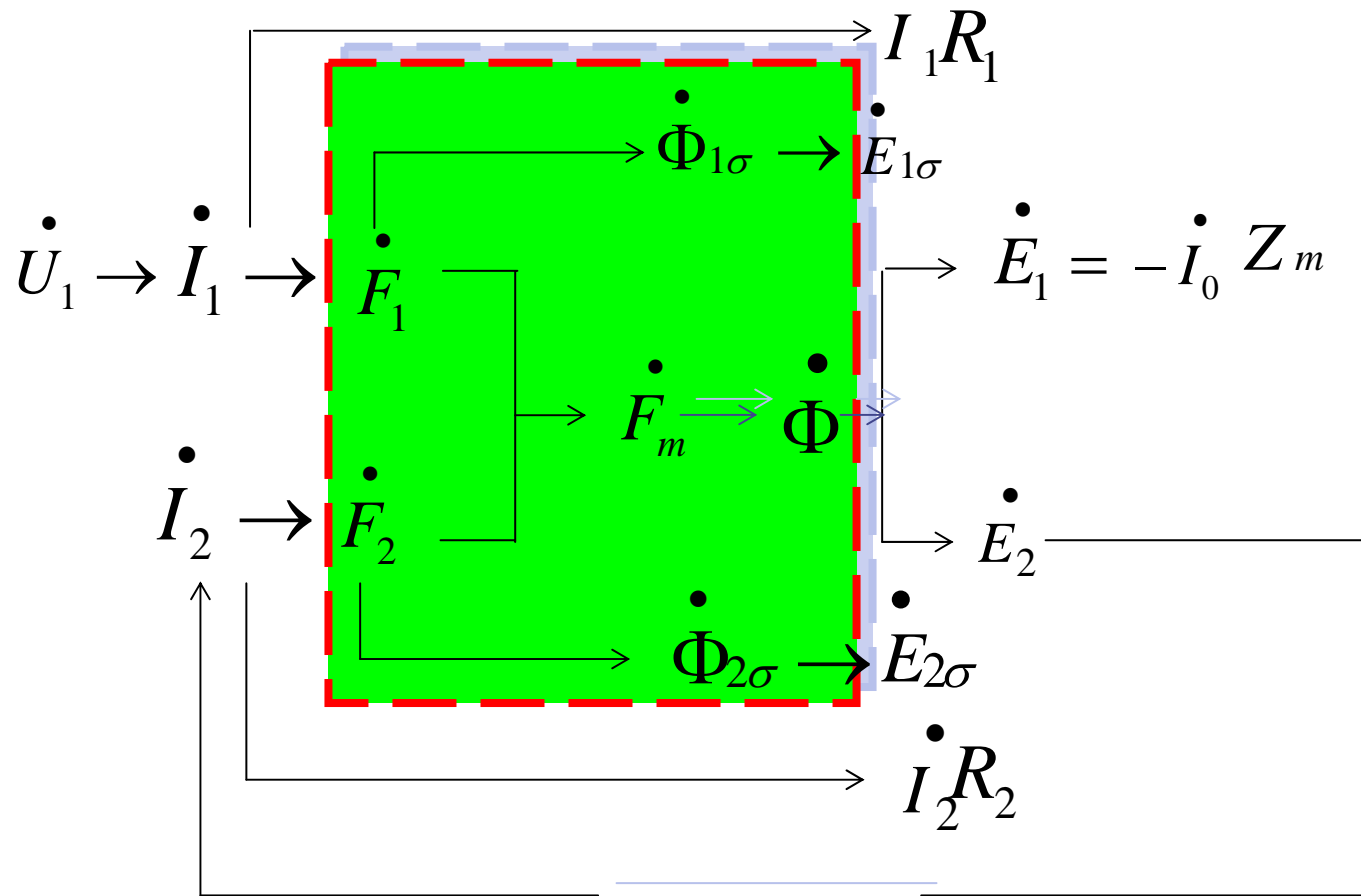
$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m = \dot{F}_0$$

或
$$I_1 + \frac{I_2}{k_i} = I_m$$

其中
$$k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$$



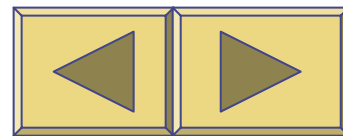
◆ 负载运行时的电磁物理过程



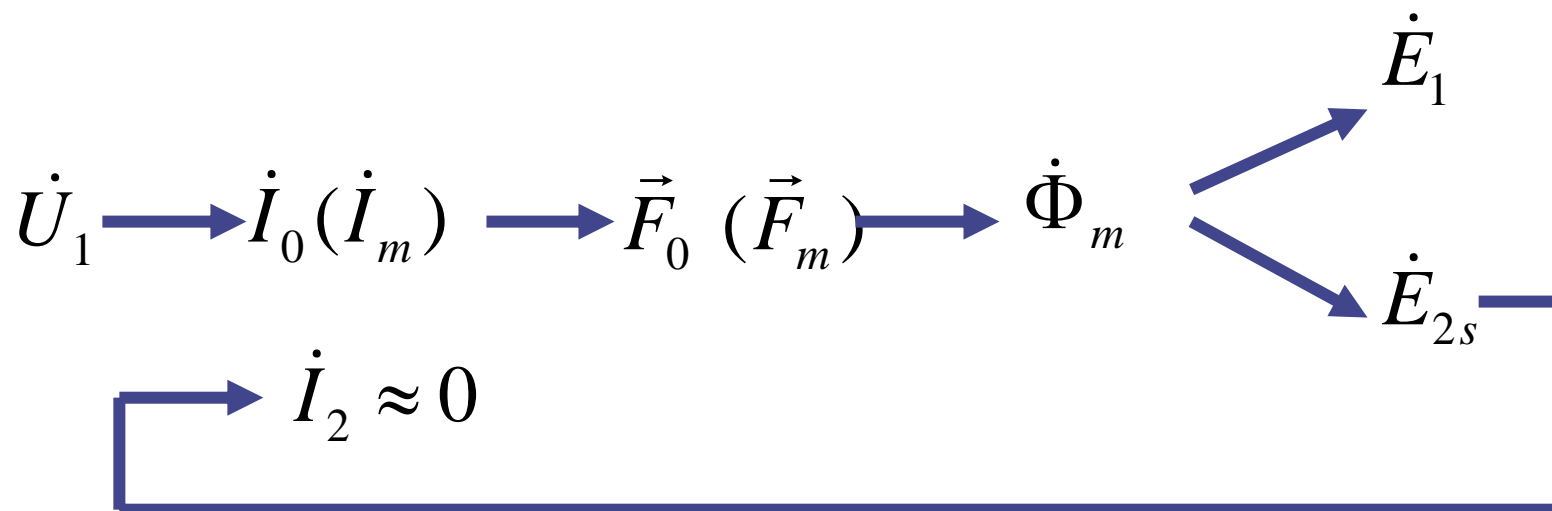
*注意：电路各量为一相的，磁路各量为三相的；
 定子各量为工频，转子各量为转差频率。

第三节 三相感应电动机的电压 方程和等效电路

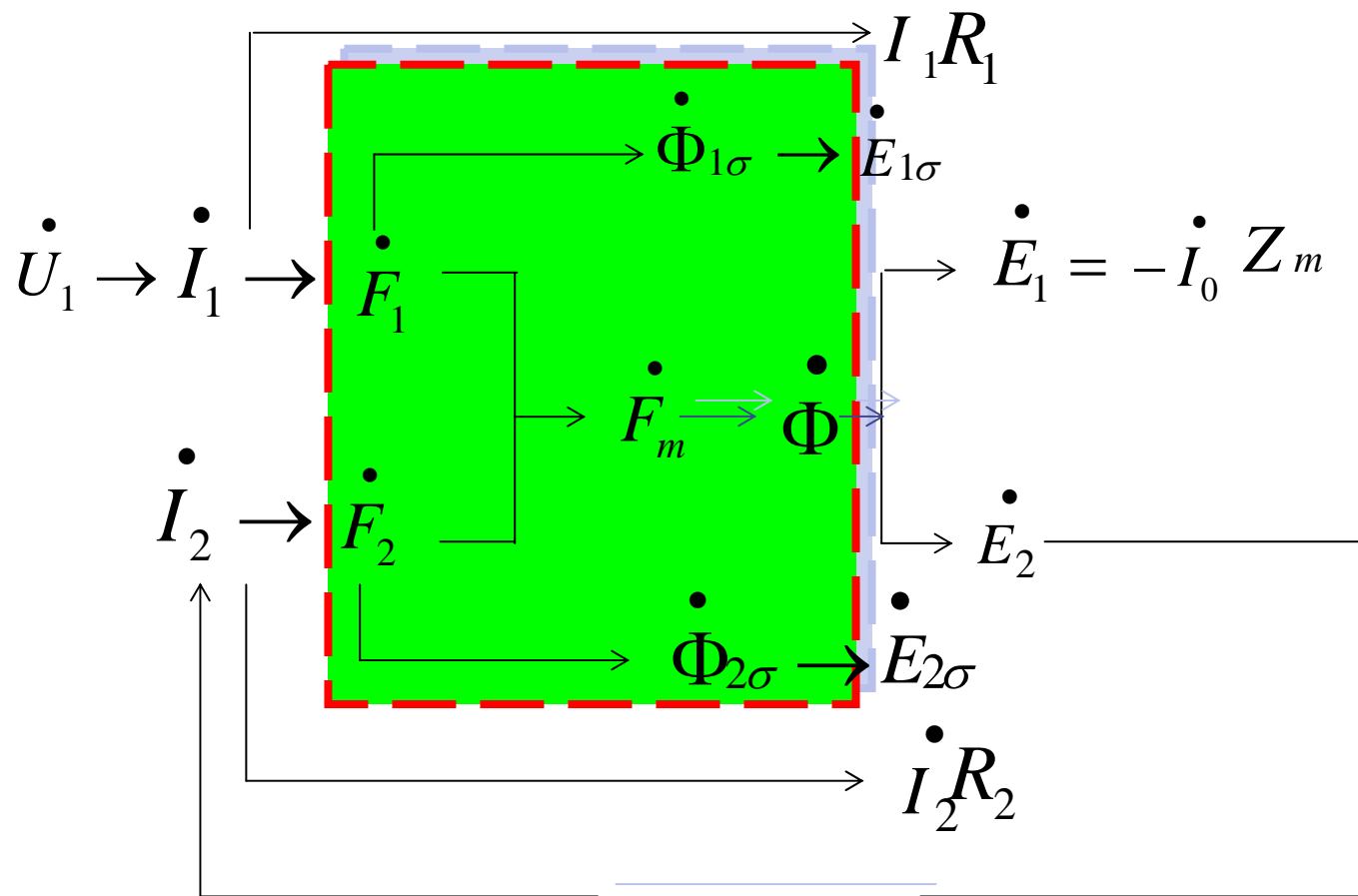
- ◆ 一、电压方程
 - ◆ 1、定子电压方程
 - ◆ 2、转子电压方程
- ◆ 二、等效电路
 - ◆ 1、频率折算
 - ◆ 2、绕组折算
 - ◆ 3、等效电路



空载时的电磁关系

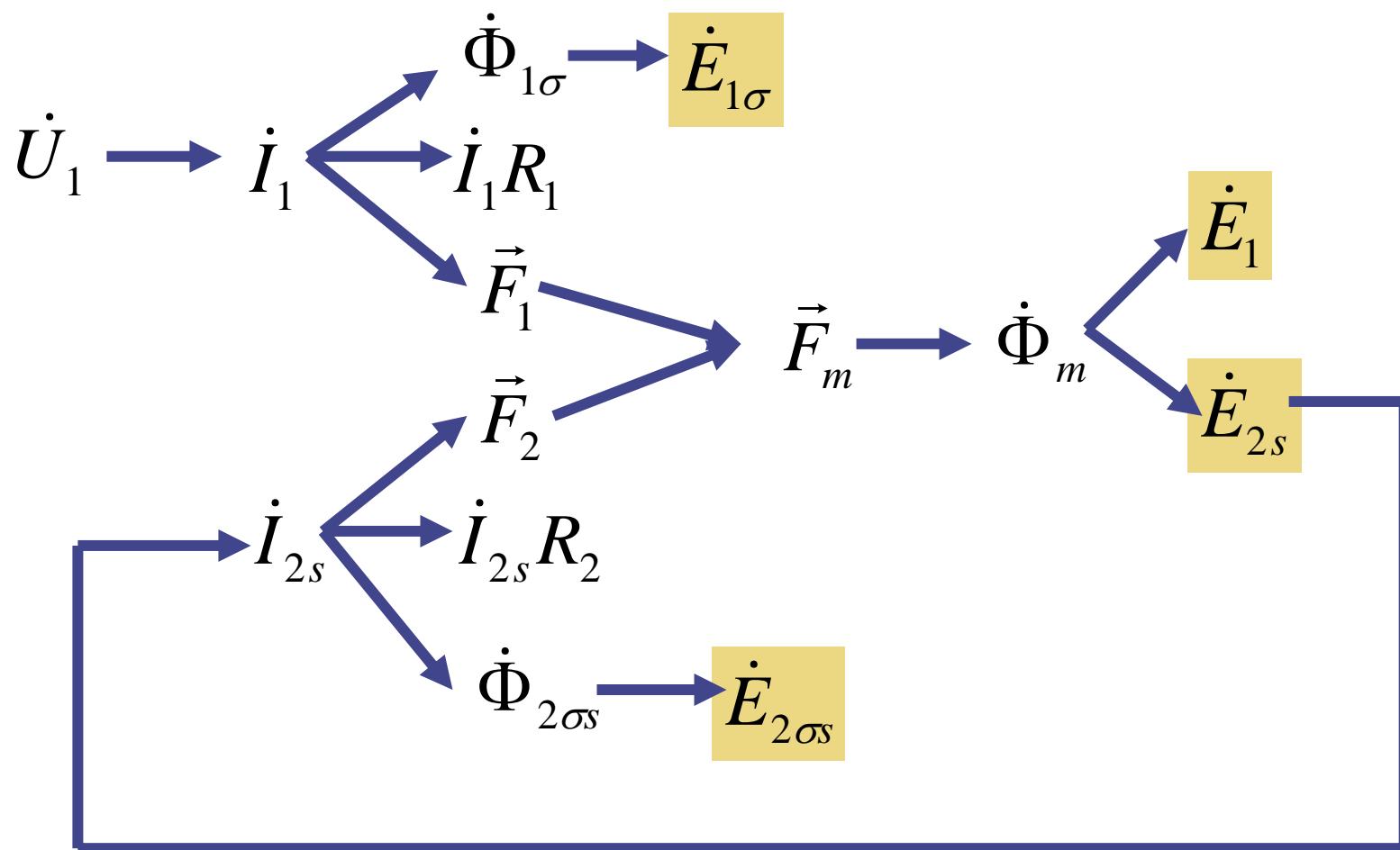


◆ 负载运行时的电磁物理过程



***注意：**电路各量为一相的，磁路各量为三相的；
 定子各量为工频，转子各量为转差频率。

负载运行时的电磁物理过程



一、电压方程

◆1、定子电压方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma} = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

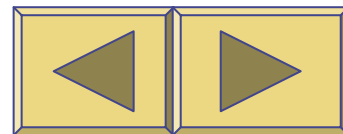
◆2、转子电压方程

转子感应电势和电流的频率为转差频率：

$$f_2 = sf_1$$

则转子每相感应电势为：

$$E_{2s} = 4.44 sf_1 N_2 k_{w2} \Phi_m = sE_2$$
$$(E_2 = 4.44 f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m)$$



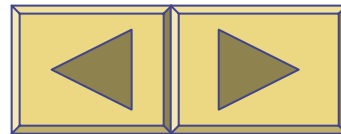
转子每相漏抗为：

$$X_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = sX_{2\sigma}$$

$$(X_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_{2\sigma})$$

则电压方程为：

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2\sigma s})$$



二、等效电路

感应电动机与变压器运行分析比较

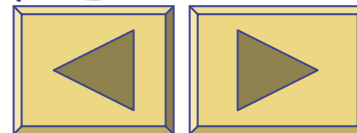
	变压器	感应电动机
频率	同频率	不同频率
功率	电功率传递	电功率—机械功率

◆ 1、频率的折算

方法：用静止的转子代替实际转动的转子。

静止的转子和旋转转子的运行分析比较

	静止转子	旋转转子
频率	工频	转差频率
功率	没有机械功率传递	有机械功率传递



结论：在静止的转子上用电路模型模拟机械功率输出，

机械功率为有功功率，因此只能用电阻模拟。
折算原则：“等效”——转子磁势不变

折算方法： $f_2 = sf_1 \rightarrow f_1$

由 $\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} (R_2 + jX_{2\sigma s})$

得 $\dot{I}_{2s} = \dot{E}_{2s} / (R_2 + jX_{2\sigma s})$

又 $\dot{E}_{2s} = s\dot{E}_2$ $X_{2\sigma s} = sX_{2\sigma}$

则 $\dot{I}_2 = s\dot{E}_2 / (R_2 + jsX_{2\sigma})$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_{2\sigma}} = \frac{\dot{E}_2}{R_2/s + jX_{2\sigma}} \\ &= \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_{2\sigma} + (1-s)R_2/s} \end{aligned}$$

即 $\dot{E}_2 = \dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma}) + \dot{I}_2\left(\frac{1-s}{s}\right)R_2$

则： $\left(\frac{1-s}{s}\right)R_2$ ——模拟机械功率输出的等效电阻

◆ 2、绕组的折算

感应电动机与变压器绕组的比较

	变压器	感应电动机
相数	一、二次侧相同 (三相)	定、转子侧不同 ($m_2 \rightarrow m_1$)
绕组	集中、整矩 ($N_2 \rightarrow N_1$)	分布、短矩 ($k_{w2}N_2 \rightarrow k_{w1}N_1$)

折算原则：“等效”

折算方法：

(1) 电流的折算：转子磁动势不变

$$F_2 = 0.9 \frac{m_2 N_2 k_{w1}}{2p} I_2 \quad F'_2 = 0.9 \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{2p} I'_2$$

$$\text{则：} I'_2 = \frac{1}{k_i} I_2 \quad k_i = \frac{m_1 N_1 k_{\omega 1}}{m_2 N_2 k_{\omega 2}} \quad \text{电流比}$$

(2) 电势的折算：主磁通不变

$$E'_2 = k_e E_2 = E_1 \quad k_e = \frac{N_1 k_{\omega 1}}{N_2 k_{\omega 2}} \quad \text{电压比}$$

(3) 阻抗的折算：损耗不变

$$R_2' = k_e k_i R_2 \quad X_{2\sigma}' = k_e k_i X_{2\sigma}$$

结论：绕组折算时，转子电势和电压乘 k_e ，转子电流除 k_i ，转子电阻和漏抗乘 $k_e k_i$ 。

归算后的基本方程式组为：

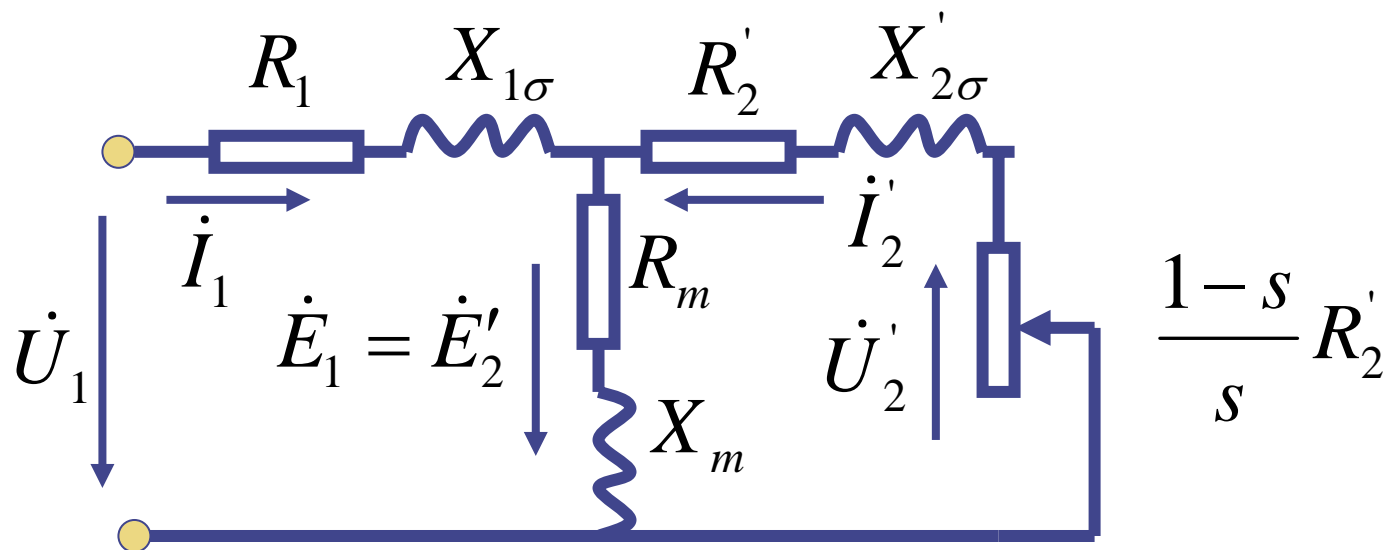
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + j\dot{I}_1 X_{1\sigma})$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) R_2' + \dot{I}_2' (R_2' + jX_{2\sigma}')$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m = \dot{E}_2'$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m$$

3、等效电路



等效电路的分析:

(1) 空载运行: $n \approx n_s$ $s \approx 0$ $\frac{1-s}{s}R_2' \approx \infty$

(2) 短路运行: $n = 0$ $s = 1$ $\frac{1-s}{s}R_2' = 0$

等效电路参数的名称和物理意义：

R_1 —— 定子绕组的电阻；

$X_{1\sigma}$ —— 定子绕组的漏抗，三相定子电流联合产生的漏磁场在一相电路中引起的电抗；

R_2' —— 折算到定子侧转子绕组的电阻；

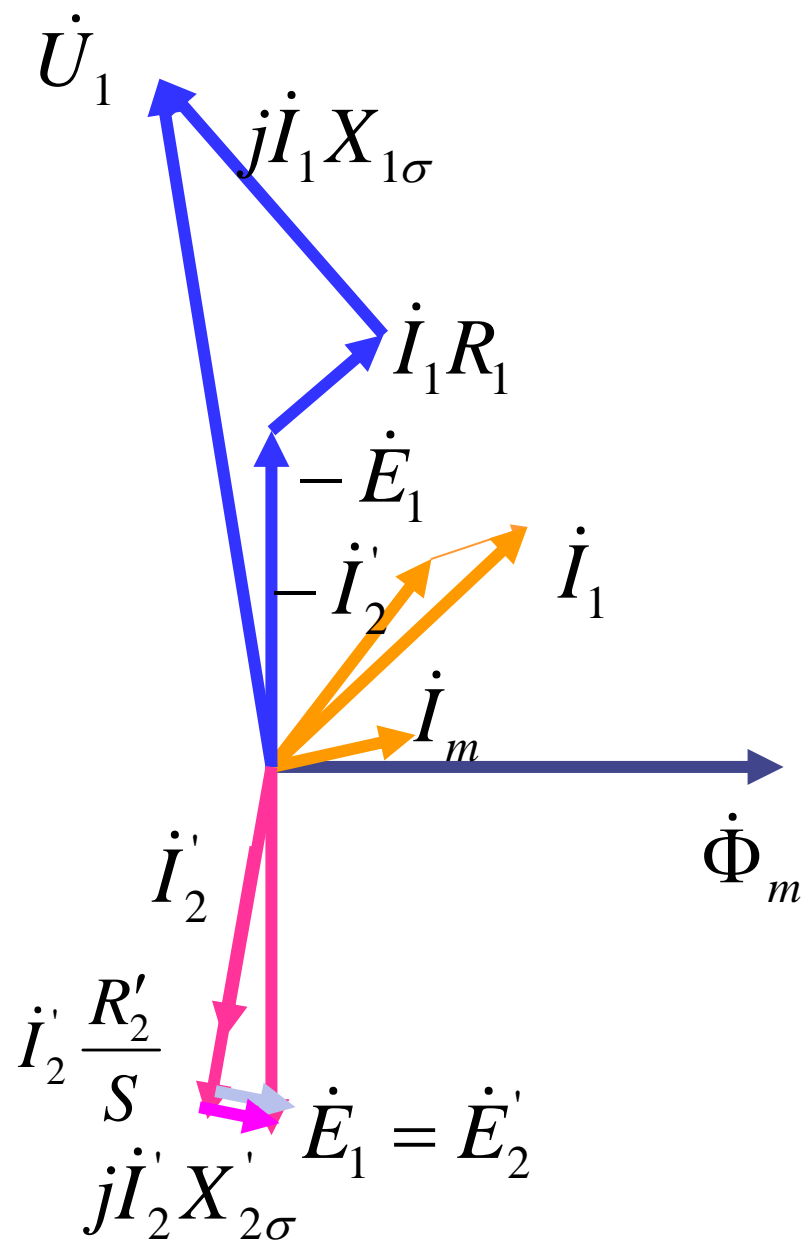
$X_{2\sigma}'$ —— 折算到定子侧转子绕组的漏抗，转子多相电流联合产生的漏磁场在一相电路中引起的电抗；

R_m —— 激磁电阻，代表铁损的等效电阻；

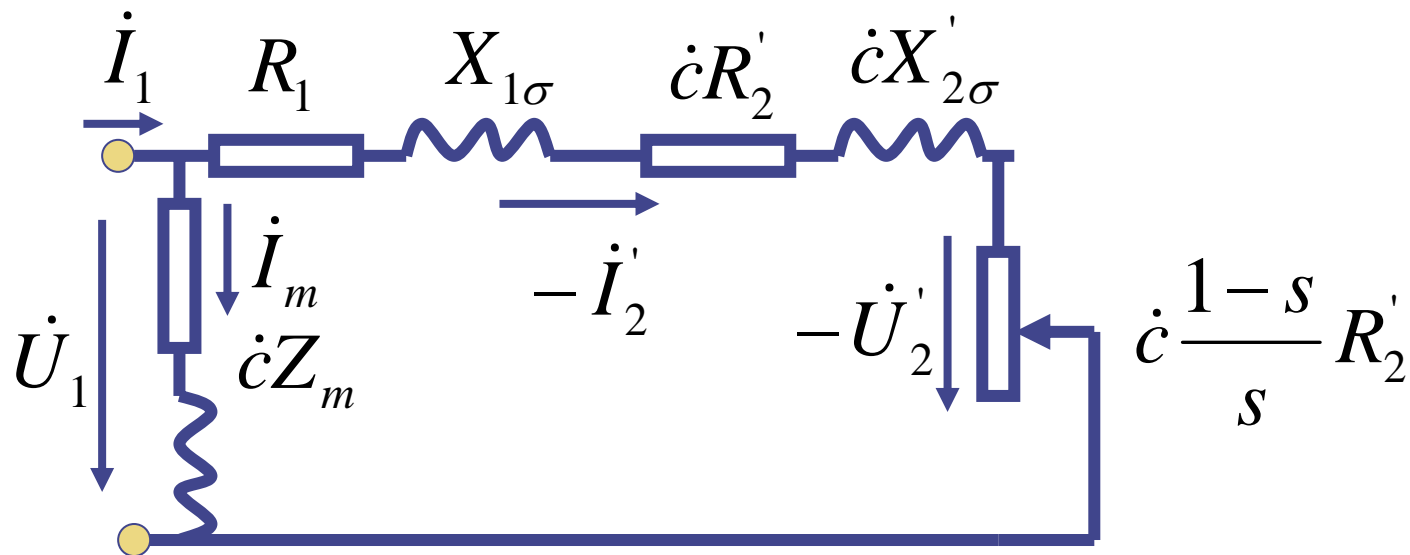
X_m —— 激磁电抗，与主磁通对应的电抗；

$\frac{1-s}{s} R_2'$ —— 折算定子侧转子侧的负载模拟电阻，模拟轴上总的机械功率输出；

相量图



近似等效电路

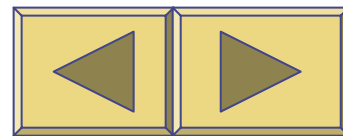


其中：
$$\dot{c} = 1 + \frac{Z_{1\sigma}}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m}$$

若令 $\dot{c} = 1$ 为简化等效电路

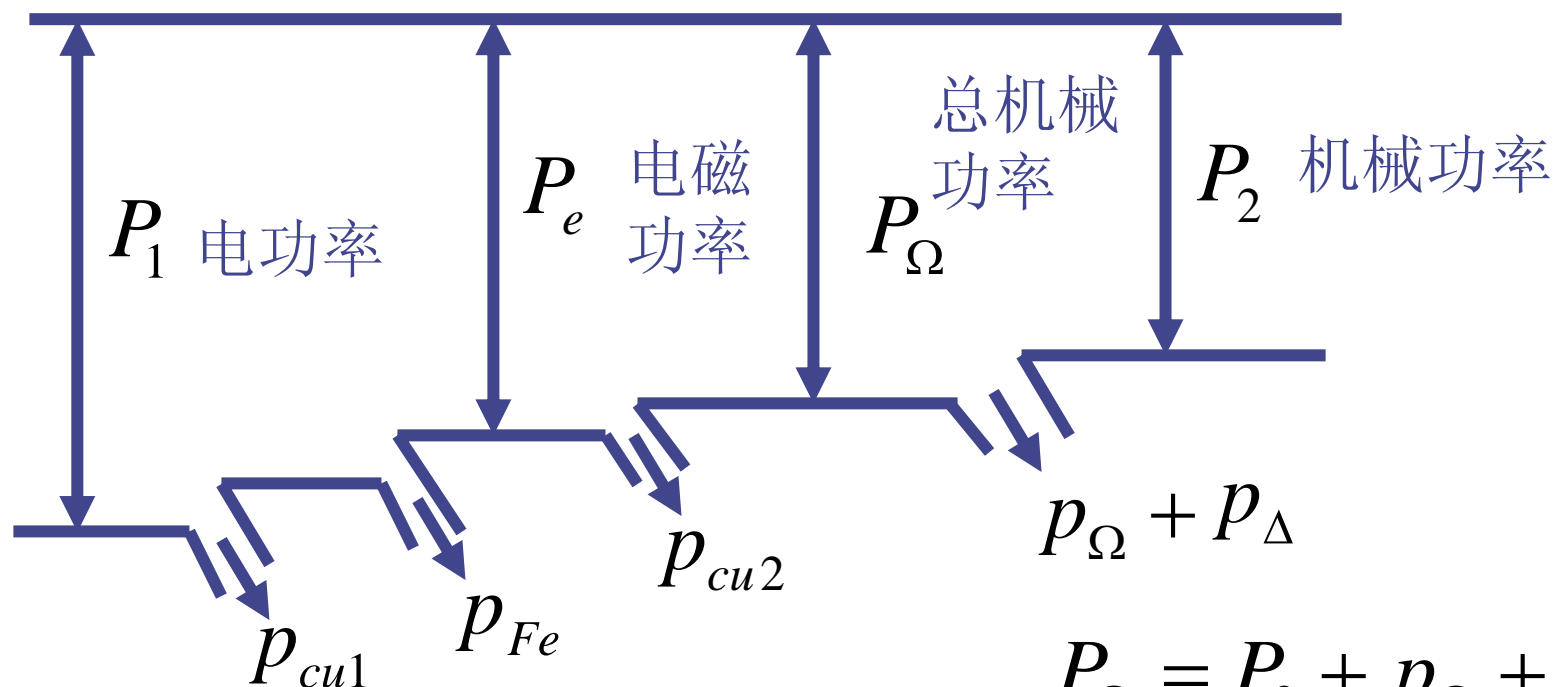
第四节 感应电动机的功率方程 和转矩方程

- ◆ 一、功率方程、电磁功率和转换功率
 - ◆ 1、功率方程
 - ◆ 2、电磁功率
 - ◆ 3、转换功率
- ◆ 二、转矩方程和电磁转矩
 - ◆ 1、转矩方程
 - ◆ 2、电磁转矩



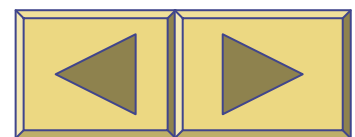
一、功率方程、电磁功率和转换功率

◆1、功率方程

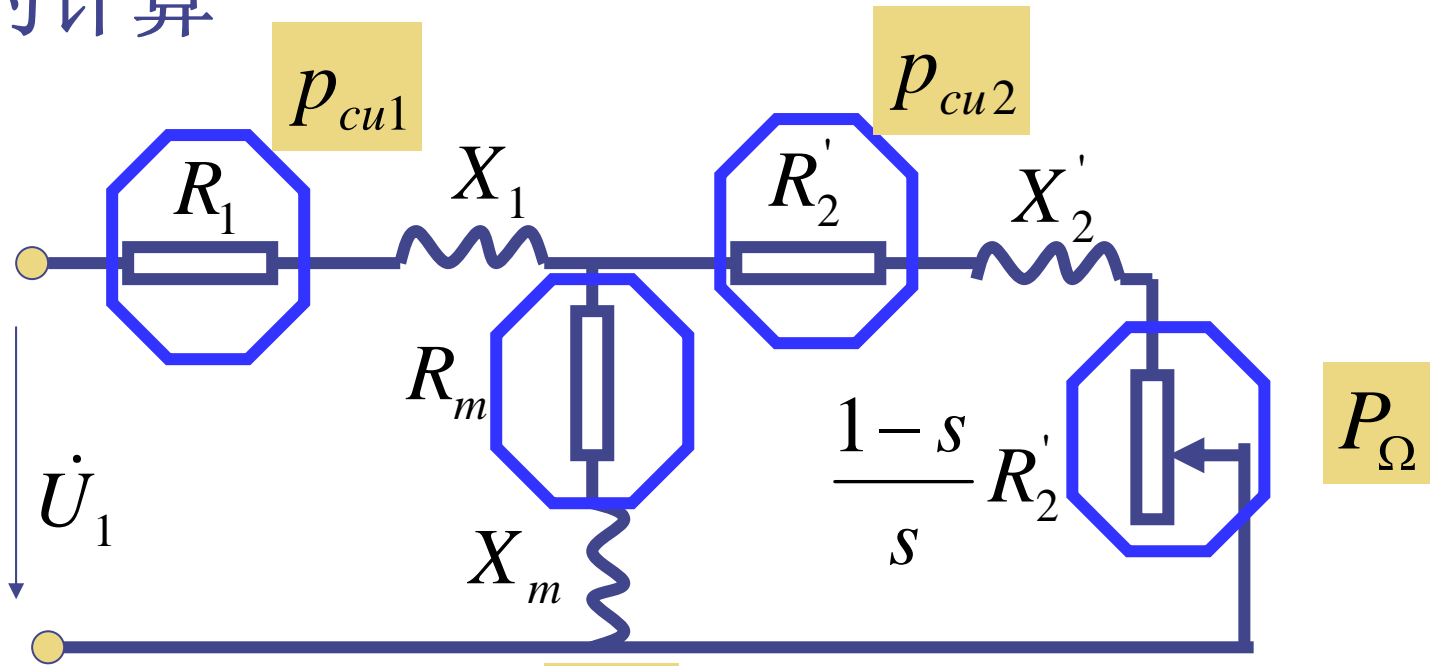


$$P_{\Omega} = P_2 + p_{\Omega} + p_{\Delta}$$

$$P_1 = P_e + p_{Cu1} + p_{Fe} \quad P_e = P_{\Omega} + p_{Cu2}$$



功率的计算



$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1$$

$$P_{Fe}$$

$$P_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R_2'$$

$$P_{Fe} = m_1 I_m^2 R_m$$

$$P_{\Omega} = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2'$$

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$P_e = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

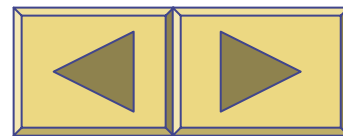
2、电磁功率：

$$P_e = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{S}$$

3、转换功率：

$$P_\Omega = m_1 I_2'^2 \frac{1-S}{S} R_2' = (1-s)P_e$$

结论：转换功率不等于电磁功率，电磁功率中，**(1-s)** 部分转换为机械功率为转换功率，则**s**部分变为转子铜损，因此又称 sP_e 为转差功率。



二、转矩方程和电磁转矩

◆ 1、转矩方程

由功率方程 $P_{\Omega} = P_2 + p_{\Omega} + p_{\Delta}$

得转矩方程 $T_e = T_2 + T_0$

◆ 2、电磁转矩

$$T_e = \frac{P_{\Omega}}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega_s}$$

又 $P_e = m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2$ $\Omega_s = 2\pi f_1 / p$

$$T_e = \frac{p}{2\pi f_1} m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2 = \frac{p m_2 N_2 k_{\omega 2}}{\sqrt{2}} \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

$$= C_T \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

物理意义



第六节 感应电动机的参数测定

◆一、空载实验求激磁参数

◆1、实验目的 2、实验接线

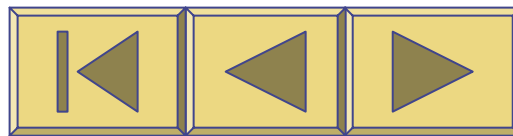
◆3、确定铁耗和机械损耗

4、参数计算

◆二、堵转实验求漏阻抗参数

◆1、实验目的 2、实验接线

◆3、参数计算



一、空载实验：

1、目的：确定感应电动机的激磁阻抗参数 $Z_m = R_m + jX_m$
以及铁耗 p_{Fe} 和机械损耗 P_Ω

2、接线：

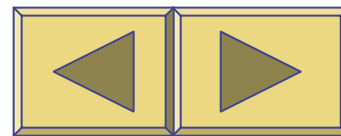
(1)仪表的选择：功率表

(2)仪表的接线

(3)转子不带负载，工频，转速接近同步速

改变实验电压，测量空载电压、空载电流和空载损耗，得

$$I_{10} = f(U_1) \quad p_0 = f(U_1)$$



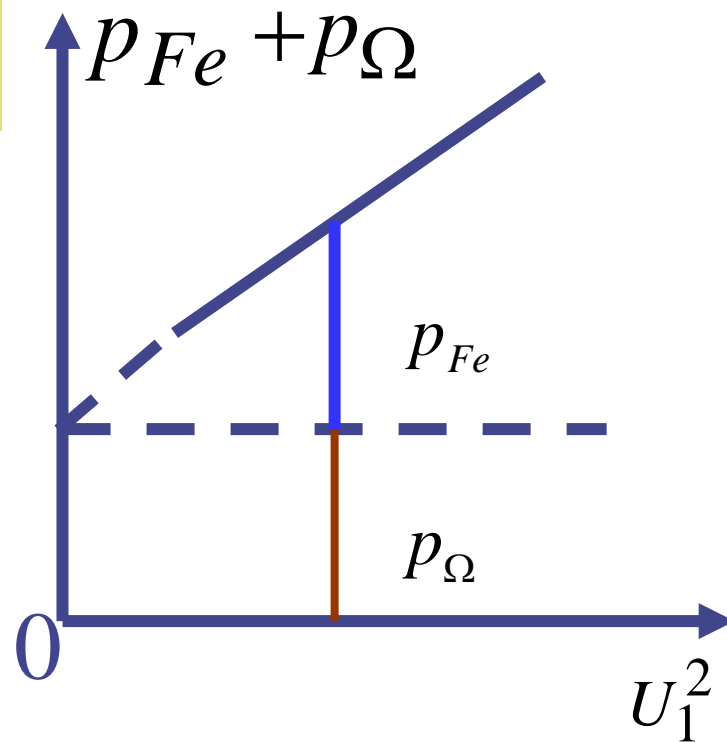
3、确定铁耗和机械损耗

据
$$p_{10} \approx m_1 I_{10}^2 R_1 + p_{Fe} + p_{\Omega}$$

得
$$p_{10} - m_1 I_{10}^2 R_1 = p_{Fe} + p_{\Omega}$$

又
$$p_{Fe} \propto U_1^2 \quad p_{\Omega} \propto n$$

则做
$$p_{Fe} + p_{\Omega} = f(U_1^2)$$



4、参数计算

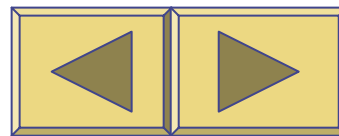
$$Z_0 = \frac{U_1}{I_{10}}$$

$$R_m = \frac{P_{Fe}}{m_1 I_{10}^2}$$

$$R_0 = R_1 + R_m$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

$$X_m = X_0 - X_{1\sigma}$$



二、堵转（短路）实验：

- 1、目的：确定感应电动机的漏阻抗参数
- 2、接线：
 - (1)仪表的选择
 - (2)仪表的接线
 - (3)转子堵转

改变实验电压（ $<0.4U_{1N}$ ），测量定子端电压、定子电流 I_{1k} 和损耗 P_{1k} ，得

$$I_{1k} = f(U_1) \quad P_{1k} = f(U_1)$$

三组数据： $I_{1k} = I_{1N}$ $I_{1k} = (2 \sim 3)I_{1N}$ $U_{1k} = U_{1N}$

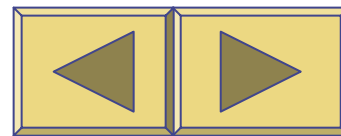
3、参数计算:

$$Z_k \approx \frac{U_k}{I_{1k}} \quad R_k \approx \frac{p_{1k}}{m_1 I_{1k}^2} \quad X_k \approx \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$$R'_2 = (R_k - R_1) \frac{X_0}{X_0 - X_k}$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_{ki}}{1 + \sqrt{\frac{X_0 - X_{ki}}{X_0}}}$$

$$\text{式中: } X_{ki} = X_k - R_2'^2 \frac{X_0 - X_k}{X_0^2}$$





第七节 感应电动机的转矩-转差率曲线

◆一、转矩-转差率特性

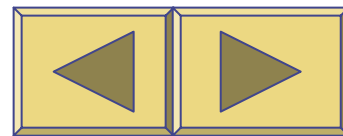
◆1、表达式

◆2、最大转矩

◆3、启动转矩

◆4、机械特性

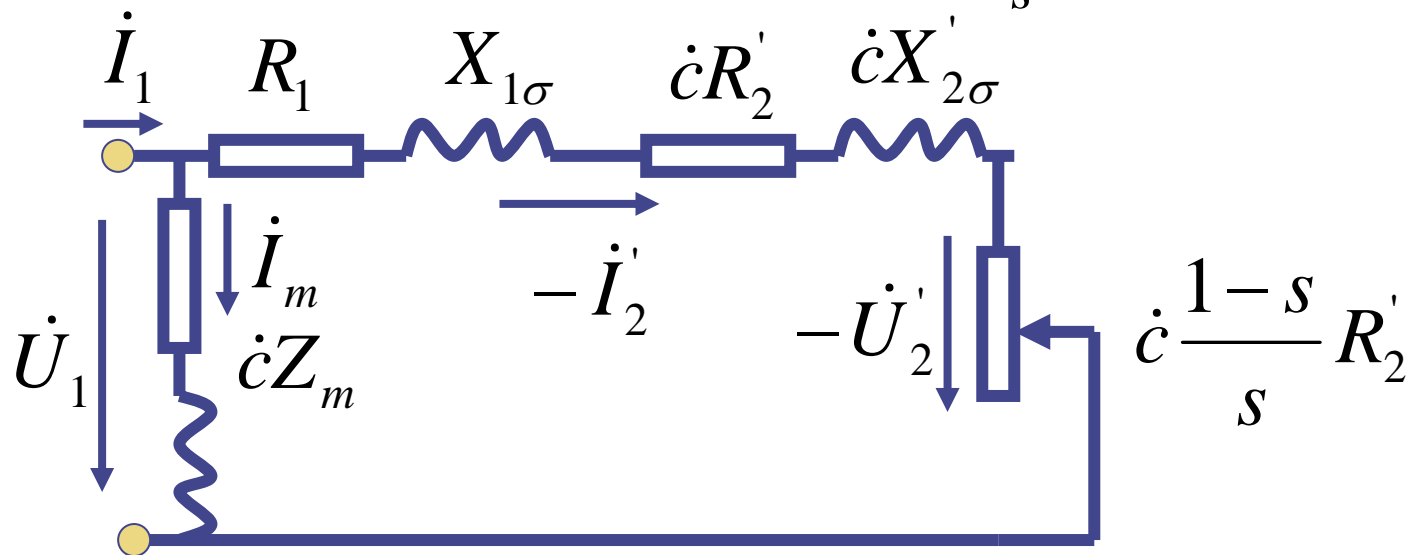
◆二、归一化转矩-转差率表达式



一、转矩-转差率特性

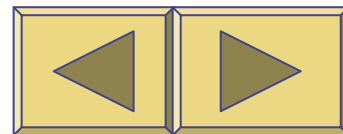
1、表达式

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{m_1}{\Omega_s} I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

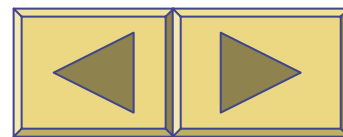
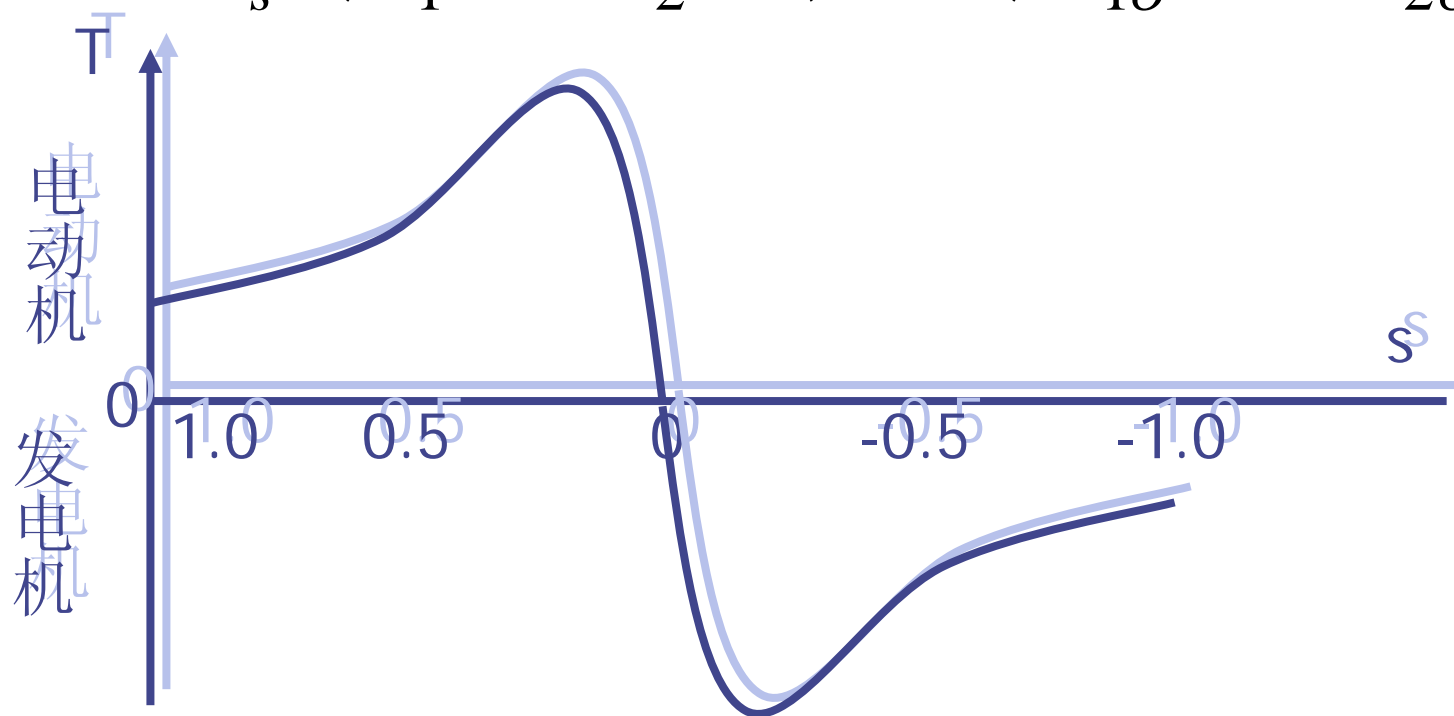


$$I_2' = \frac{-\dot{U}_1}{Z_{1\sigma} + \dot{c}Z_2'} \approx \frac{-\dot{U}_1}{(R_1 + c \frac{R_2'}{s}) + j(X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')}$$

其中： $c = |\dot{c}| \approx 1 + X_{1\sigma} / X_m$



$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2 / s}{(R_1 + cR'_2 / s)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$



2、最大转矩

$$\frac{dT_e}{ds} = 0 \quad s_m = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}}$$

$$T_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_s [2c(\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2})]}$$

“+”对应电动机；“-”对应发电机

近似公式

$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}} \quad T_{\max} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_s (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})}$$

结论:

(1) 当电源频率与电机参数不变时, 电机的最大转矩与电源电压的平方成正比;

(2) 当电源电压和频率一定时, 最大转矩近似与定、转子漏抗之和成反比;

(3) 最大转矩的大小与转子电阻大小无关; 但临界转差率与转子电阻成正比。

(曲线)

$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}} \quad T_{\max} \approx \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_s (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})}$$

过载能力: $k_T = \frac{T_{\max}}{T_N} \quad (1.6 \sim 2.5)$

3、启动转矩

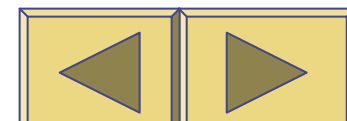
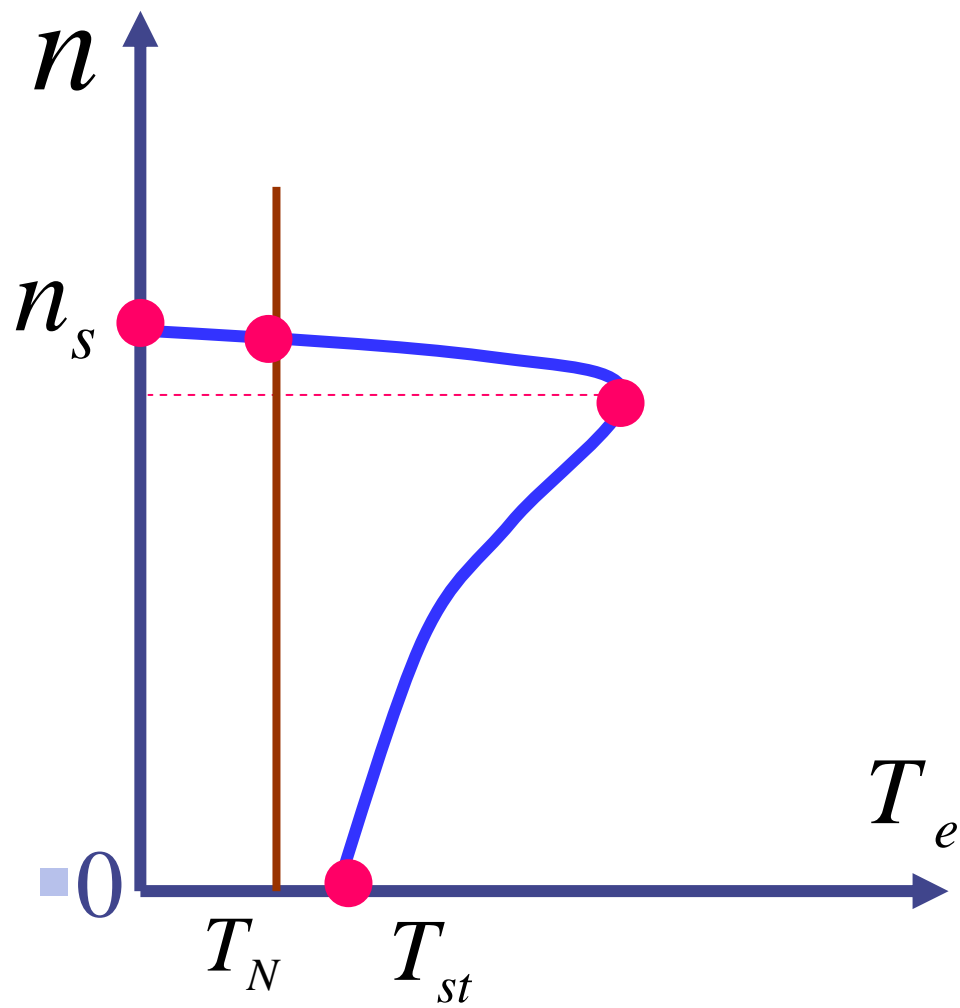
$$s = 1$$

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

$$s_m = 1 \quad T_{st} = T_{\max}$$

$$R'_2 = \frac{1}{c} \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

4、机械特性 $n = f(T_e)$



二、归一化的转矩-转差率表达式:

$$\frac{T_e}{T_{\max}} = \frac{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]R'_2 / s}{(R_1 + cR'_2 / s)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

$$\text{又} \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} = \frac{cR'_2}{s_m}$$

$$\frac{T_e}{T_{\max}} = \frac{2\left(\frac{R_1}{cR'_2} s_m + 1\right)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2\frac{R_1}{cR'_2} s_m} \approx \frac{2(1 + s_m)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2s_m} \approx \frac{T_e}{T_{\max}}$$

电磁转矩的表达式:

$$T_e = C_T \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R'_2 / s}{(R_1 + cR'_2 / s)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}$$

$$\frac{T_e}{T_{\max}} \approx \frac{2(1 + s_m)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2s_m}$$

第八节 感应电动机的工作特性

◆一、工作特性

◆1、转速特性

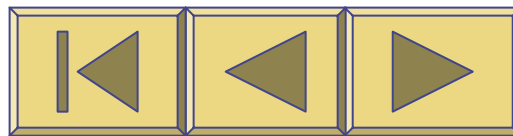
◆2、定子电流特性

◆3、功率因数特性

◆4、转矩特性

◆5、效率特性

◆二、用直接负载法求取工作特性

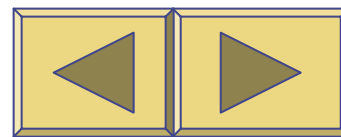
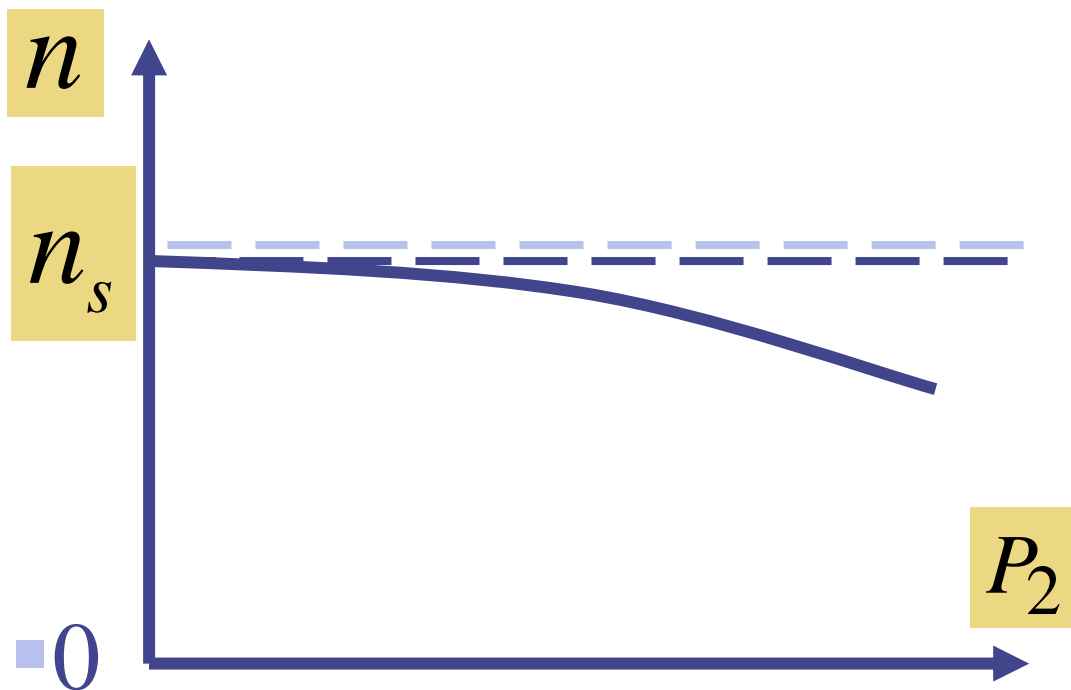


一、工作特性:

在 $U_1=U_N, f=f_N$ 时, $n, I_1, \cos\varphi_1, T_e, \eta=f(P_2)$

1、转速特性 在 $U_1=U_N, f=f_N$ 时, $n=f(P_2)$

空载时, 转子转速接近于同步转速; 随着负载的增大, 转速降低, 是一条稍微向下倾斜的曲线。

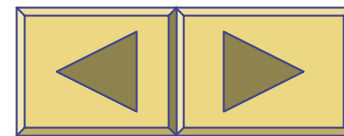
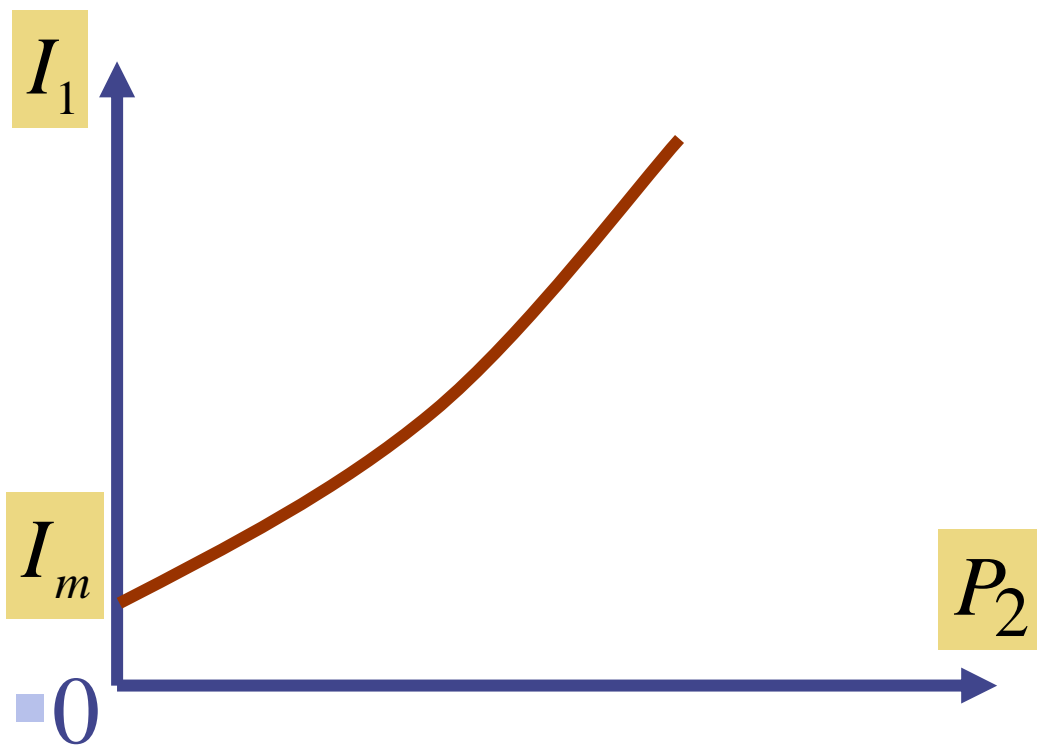


2、定子电流特性

在 $U_1 = U_N, f = f_N$ 时, $I_1 = f(P_2)$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2)$$

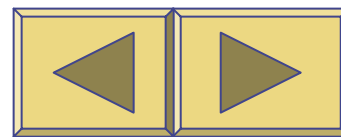
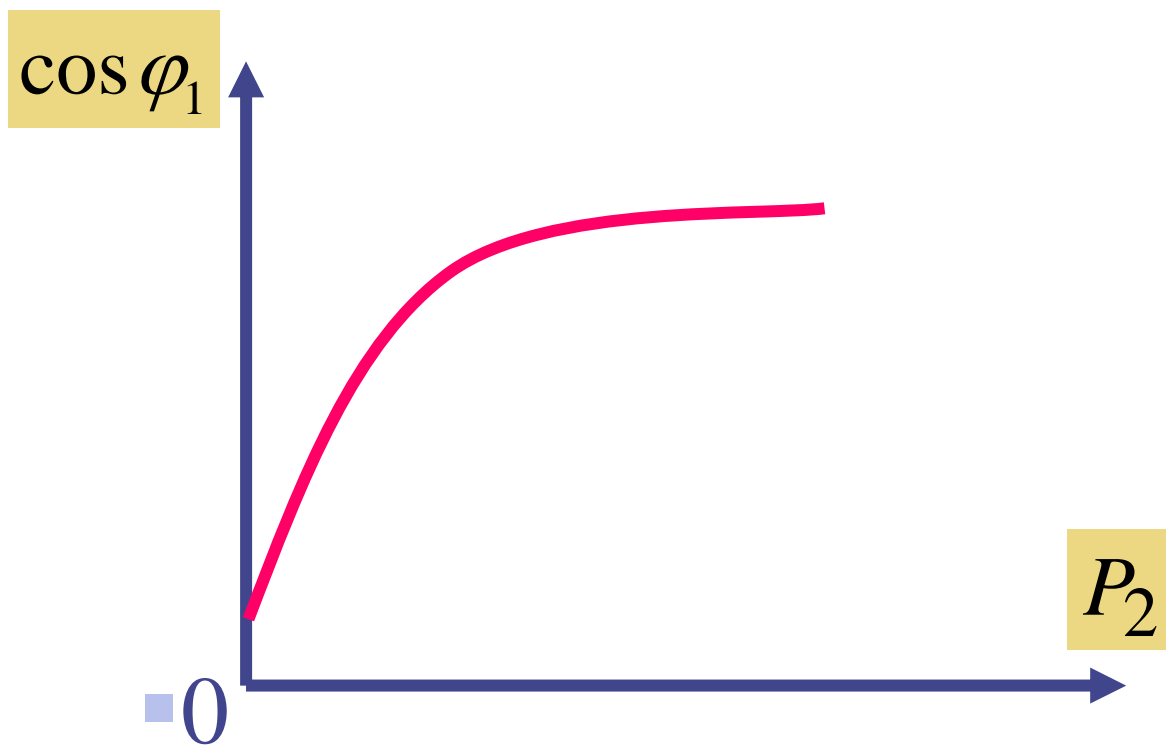
空载时, 定子电流接近于激磁电流; 随着负载的增大, 转速降低, 转子电流增大, 定子电流也随之增大。



3、功率因数特性

在 $U_1 = U_N, f = f_N$ 时, $\cos \varphi_1 = f(P_2)$

空载时, 定子电流接近于激磁电流, 功率因数很低, 0.1~0.2; 随着负载的增大, 有功分量增大, 功率因数随之增大。通常在额定负载达到最大。



为什么异步电动机的功率因数总是滞后的？

首先，异步电动机的输出功率是机械功率，属有功功率，相当于纯电阻负载；

其次，异步电动机需要感性的无功功率激磁，有感性无功分量电流；

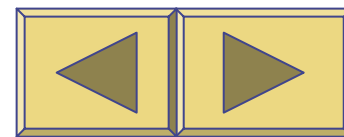
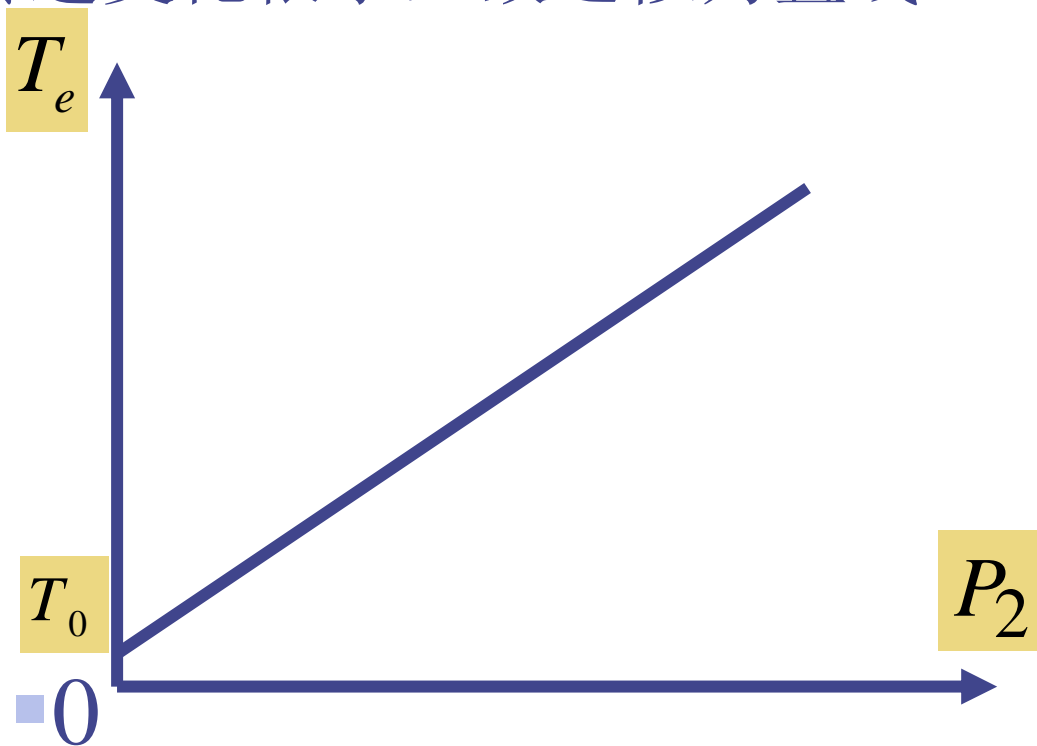
因此，异步电动机的功率因数总是滞后的。

4、转矩特性

在 $U_1 = U_N, f = f_N$ 时, $T_e = f(P_2)$

$$T_e = T_0 + T_2 = T_0 + \frac{P_2}{\Omega}$$

空载时, 电磁转矩等于空载转矩; 随着负载的增大, 转速变化很小, 故近似为直线。

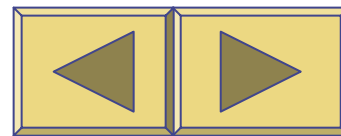
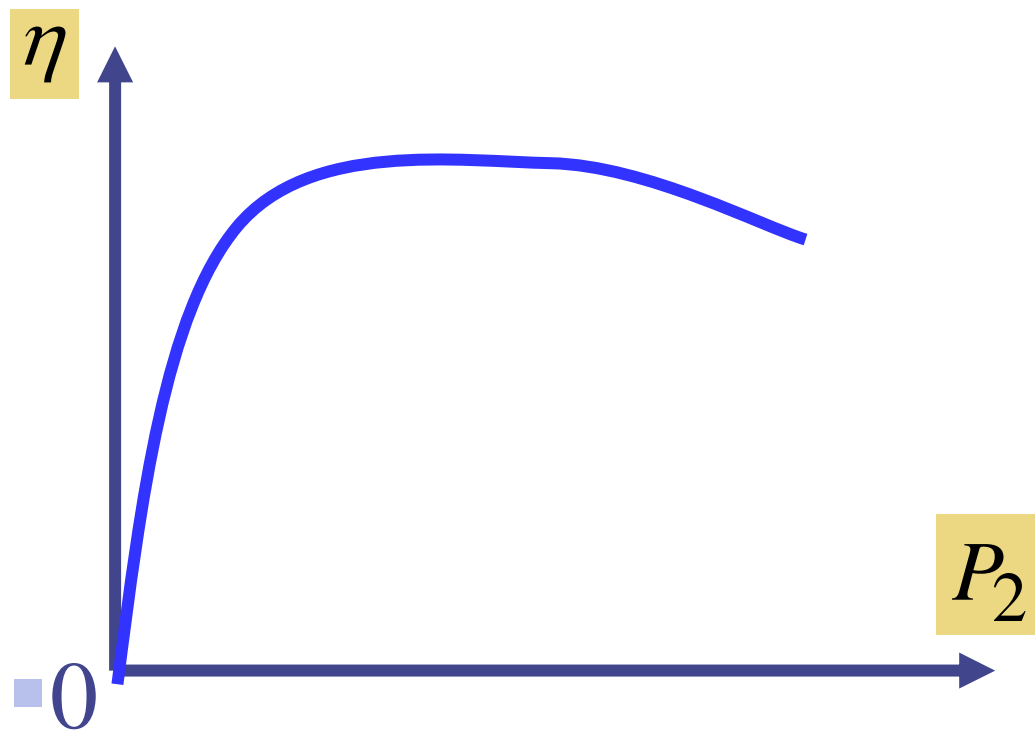


5、效率特性

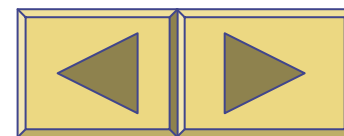
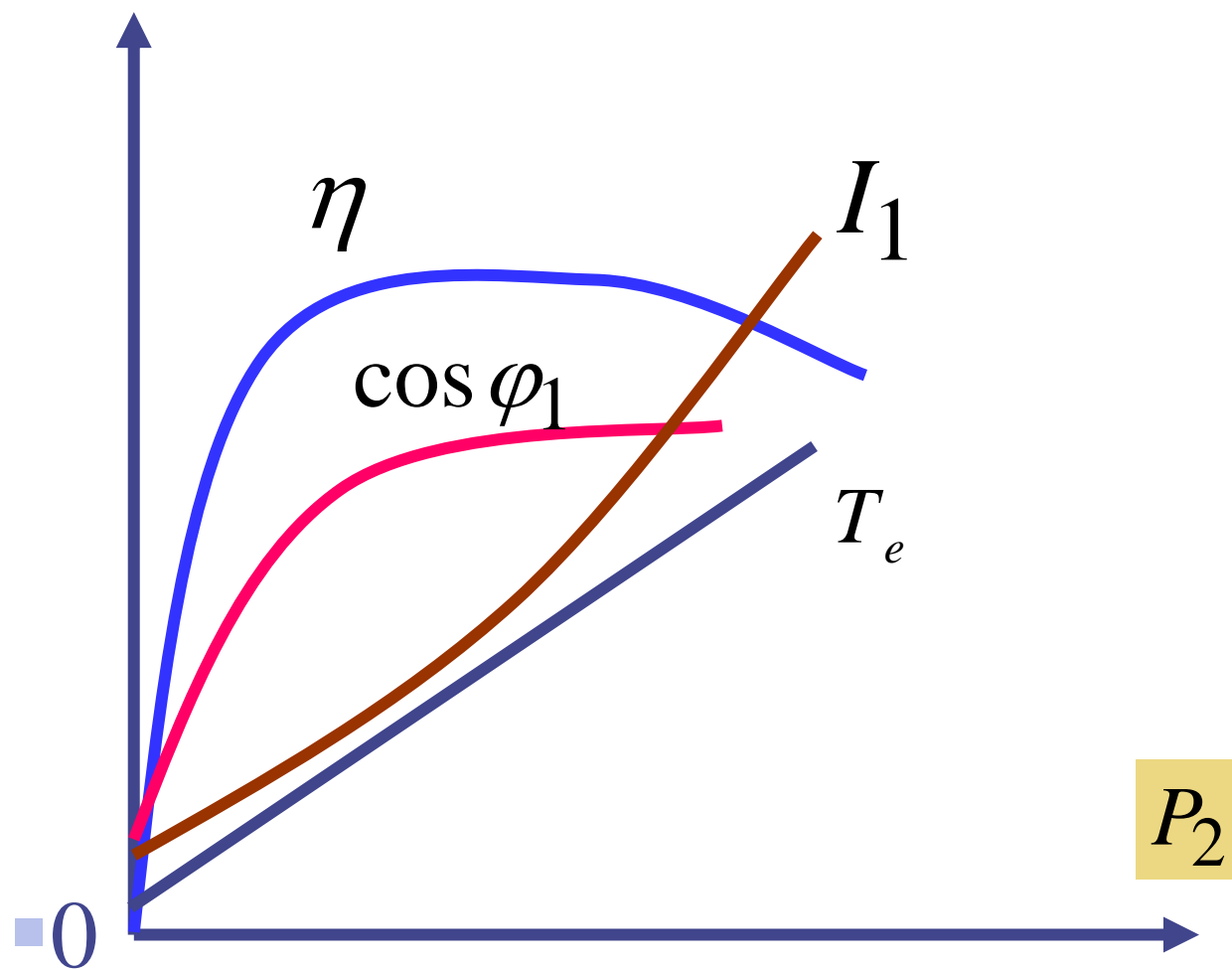
在 $U_1 = U_N, f = f_N$ 时, $\eta = f(P_2)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$$

空载时, 效率等于零; 随着负载的增大, 效率逐渐增大, 到某一值, 达到最大效率。



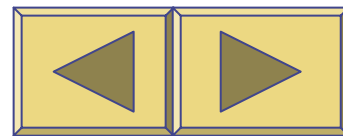
$I_1, \cos \varphi_1, T_e, \eta$



第九节 感应电动机启动

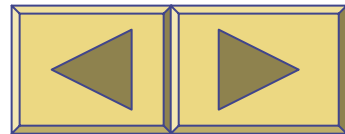
深槽和双鼠笼式电动机

- ◆一、笼型感应电动机的启动
 - ◆1、直接启动
 - ◆2、降压启动
- ◆二、绕线型感应电动机的启动
- ◆三、深槽和双笼感应电动机



启动性能指标:

- 1、启动电流倍数: I_{st} / I_N 越小越好
- 2、启动转矩倍数: T_{st} / T_N 越大越好
- 3、启动时间 t_{st} : 越短越好
- 4、启动设备: 简单、经济、可靠



一、笼型感应电动机的启动

1、直接启动

启动特点：启动电流大

$$I_{st} / I_N = 5 \sim 7$$

原因分析：启动转矩并不大

$$T_{st} / T_N = 1 \sim 2$$

(1) 启动电流大：启动时， $n=0$ ， $s=1$ ，转子切割定子旋转磁场的速度最大，转子感应电势最大，其感生电流也最大，

据磁动势平衡关系，定子电流也最大。或根据简化等效电路：

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad \text{仅受定、转子漏阻抗的限制}$$

$$\text{而正常运行时，（} \mathbf{S} \text{很小）} I_1 \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}$$

故启动电流比正常电流大得多。

原因分析:

(2) 启动转矩并不大:

因启动转矩与转子侧启动电流的有功分量成正比, 而启动时, 转子侧的频率较大(工频50赫兹), 转子漏电抗远大于转子电阻, 使转子的内功率因数角接近90度, 即内功率因数很低, 故启动电流大, 而启动电流的有功分量并不大;

另外, 由于启动电流大, 定子绕组的漏阻抗压降增大, 使感应电势减小, 相应的主磁通也减小。

所以, 尽管启动电流大, 但启动转矩并不大。

起动电流大的危害：

- （1）电网电压降低，影响同网的其它电机正常运行；
- （2）电磁力的危害：定子绕组端部变形，鼠笼条断裂；
- （3）电动机绕组过热，引起绝缘老化。

2、降压启动——限制启动电流

(1) 星三角启动:

方法：启动时将定子绕组接成星形连接，当转速接近于稳定时，再改接成三角形连接。

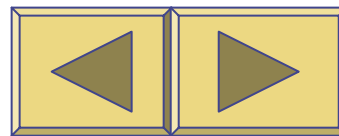
适用于正常运行时定子绕组采用三角形连接的电动机。

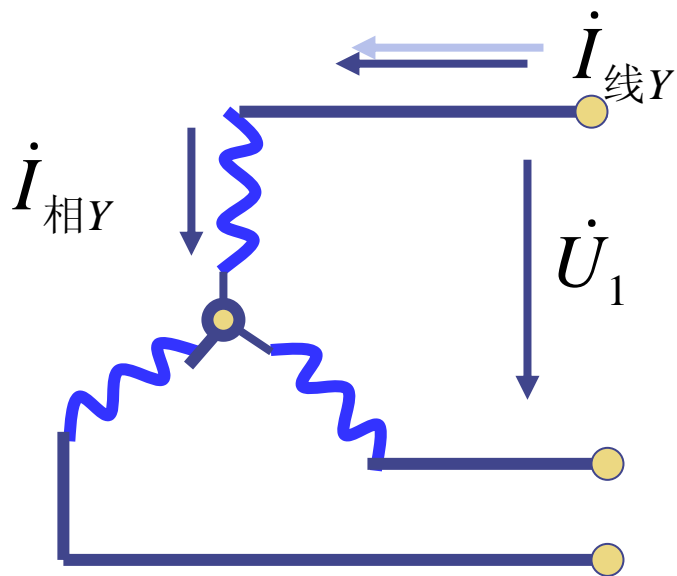
特点：启动电压降到原来的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$

但线路中提供的启动电流可以减小为直接启动时的1/3；

注意：启动转矩也相应降低到原来的1/3。

适合于空载或轻载启动。



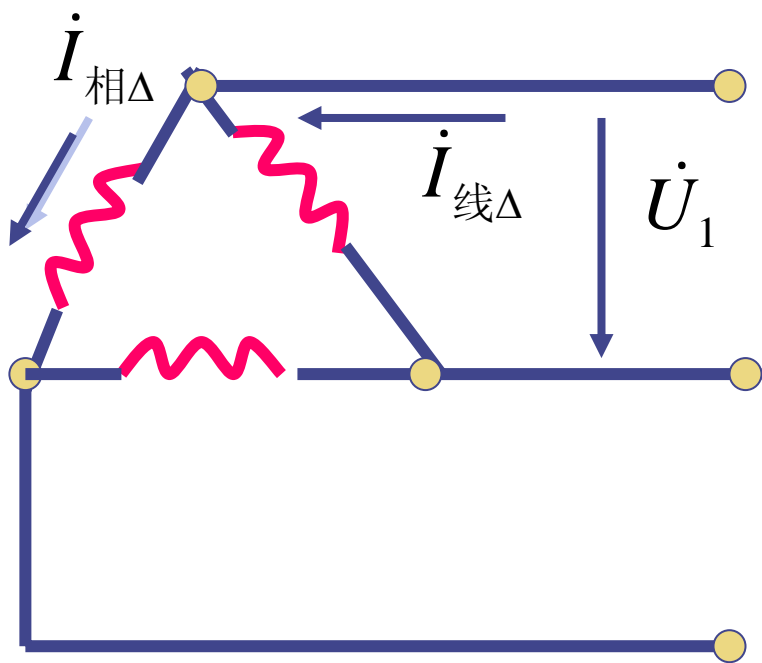


$$I_{\text{线}Y} = I_{\text{相}Y}$$

$$U_{\text{线}Y} = \sqrt{3}U_{\text{相}Y}$$

$$I_{\text{相}\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}}I_{\text{线}\Delta}$$

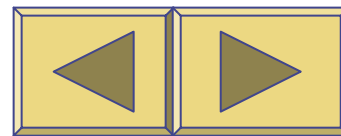
$$U_{\text{相}\Delta} = U_{\text{线}\Delta}$$



$$I_{\text{线}Y} = I_{\text{相}Y} = \frac{U_{\text{相}Y}}{Z_{\text{相}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}U_1}{Z_{\text{相}}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}}I_{\text{相}\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{3}}I_{\text{线}\Delta}$$

$$= \frac{1}{3}I_{\text{线}\Delta}$$



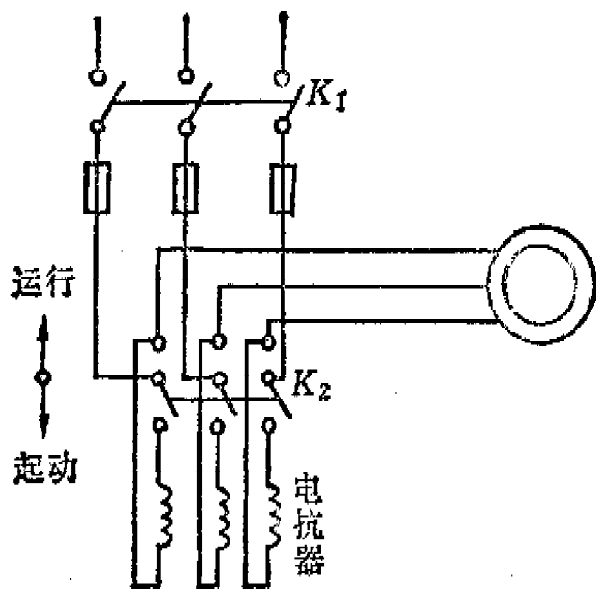


图 18-2 电抗降压起动

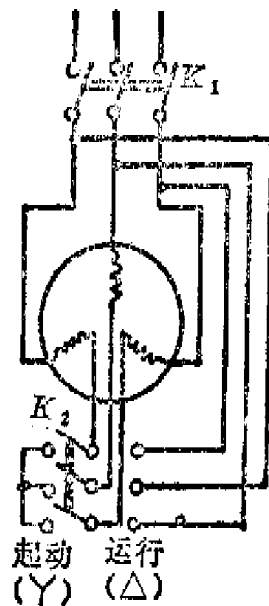


图 18-3 星形三角形降压起动原理接线图

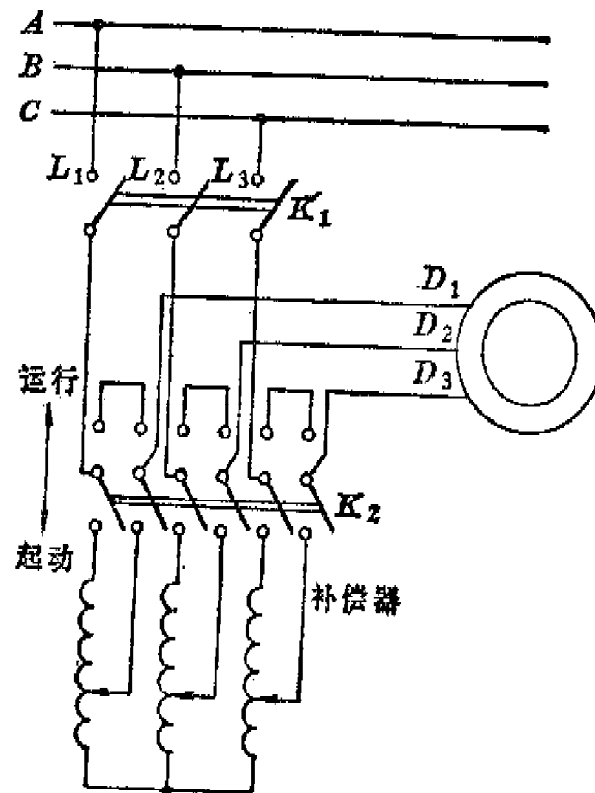


图 18-5 自耦降压起动原理图

(2) 自耦变压器启动:

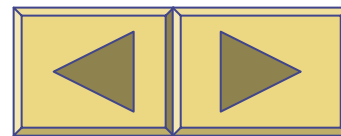
特点: 启动电压降到原来的 $\frac{1}{k_a}$

但线路中提供的启动电流可以减小为直接启动时的 $\frac{1}{k_a^2}$
的
注意: 启动转矩也相应降低到原来的 $\frac{1}{k_a^2}$ 。

自耦变压器的二次绕组一般有不同的抽头, 能满足不同负载启动要求。

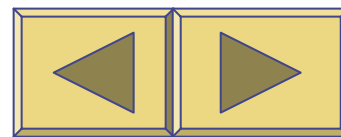
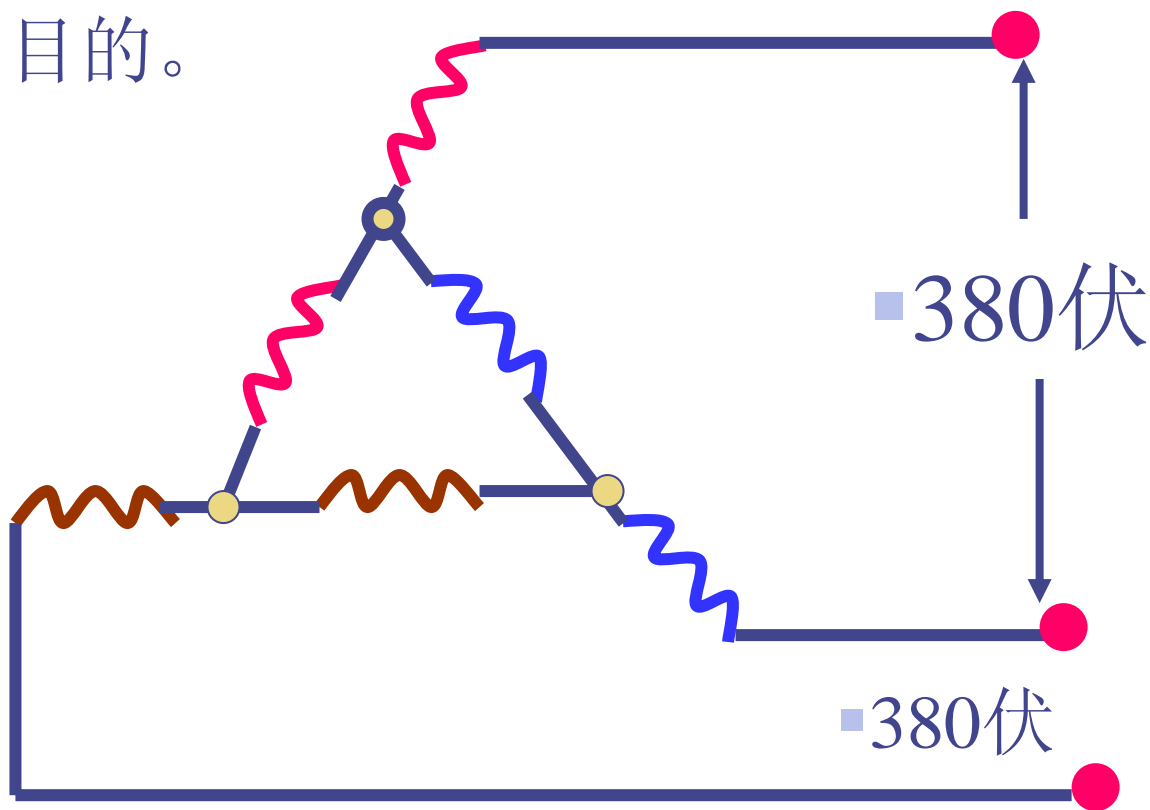
适用于容量较大的低压电动机启动。应用广泛。

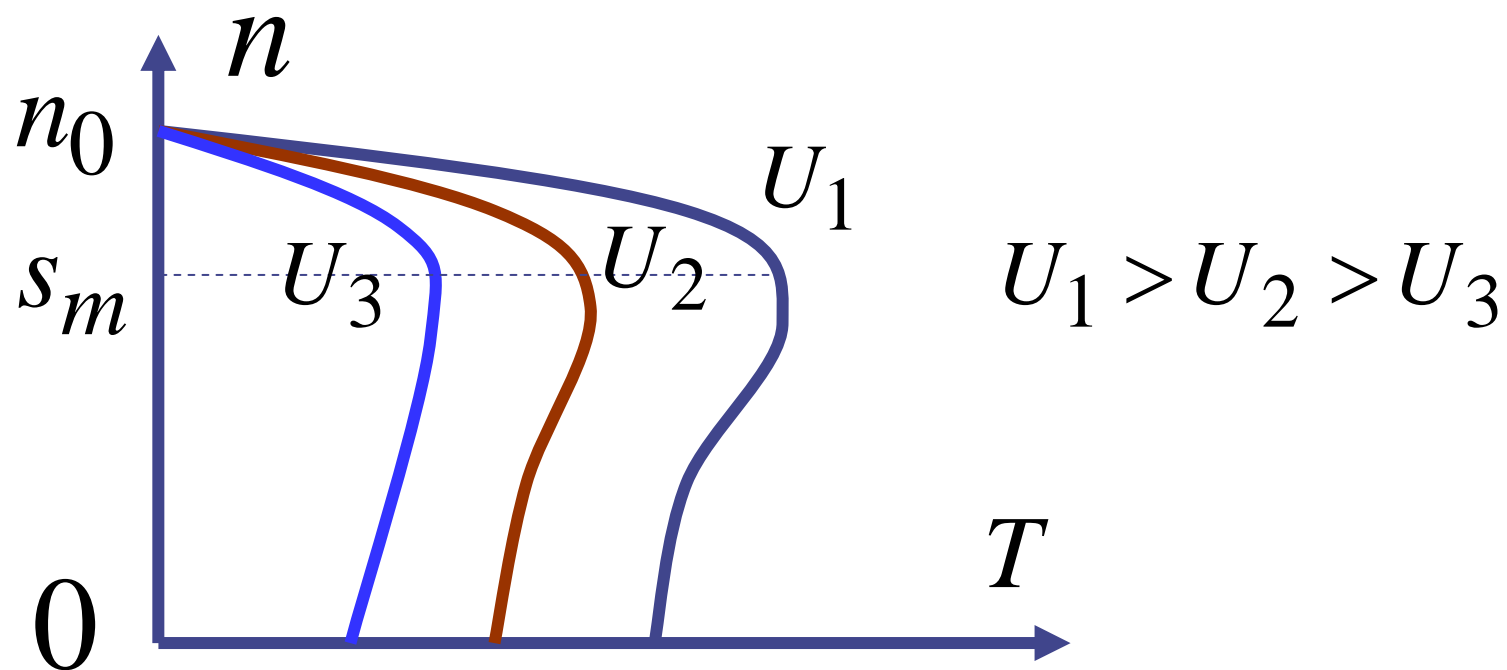
但体积大, 重量大, 价格高, 需维护检修。



延边三角形启动:

利用电动机的九个出线头的一种联接法, 达到降压启动的目的。





二、绕线型感应电动机的启动

1、启动方法：转子回路串联电阻

2、优点：可以减少启动电流，同时提高功率因数，

3、方法：从而增大启动转矩。

(1) 启动变阻器：串入多大的启动电阻？

$$R'_{st} = \frac{1}{ck_i k_e} \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} - R_2$$
$$\approx \frac{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}{k_i k_e} - R_2$$

串联电阻是否越大越

好？
实际要逐级切除，启动结束举刷。

(2) 频敏变阻器：——自动切除电阻

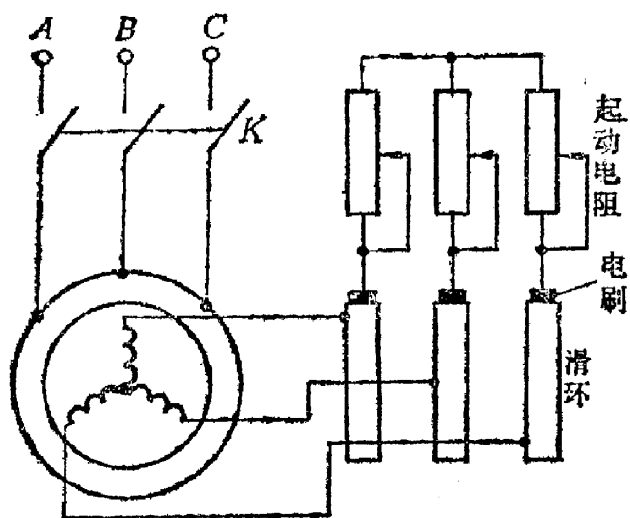


图 9-1 用起动变阻器起动的接线原理图

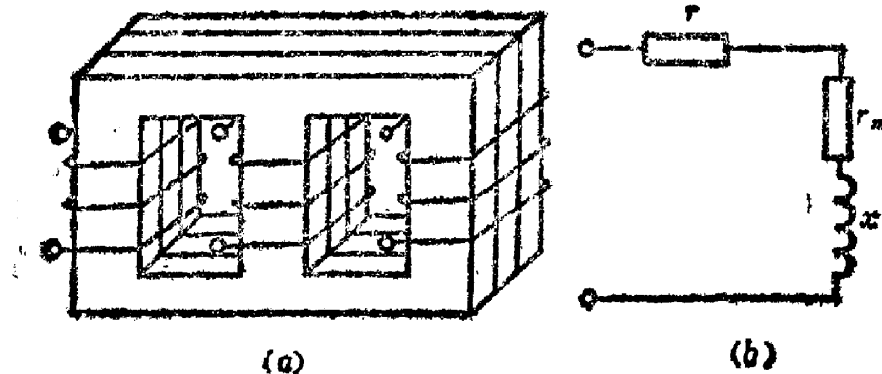
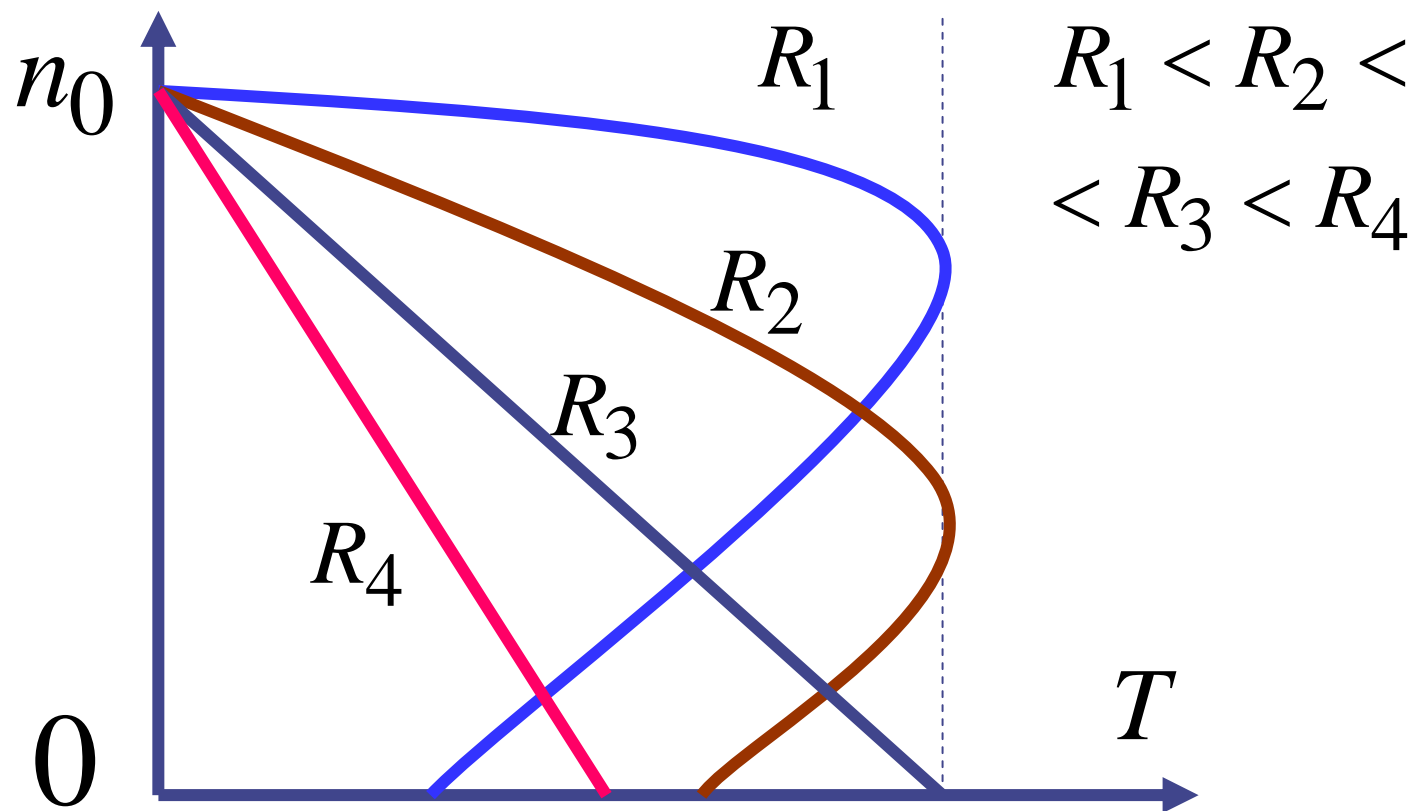


图 9-2 频敏变阻器
(a)结构原理图；(b)等效电路图

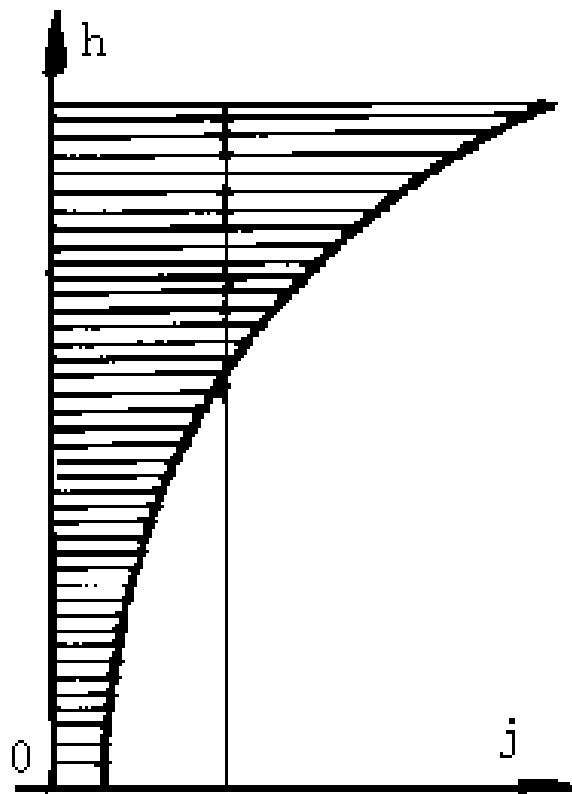
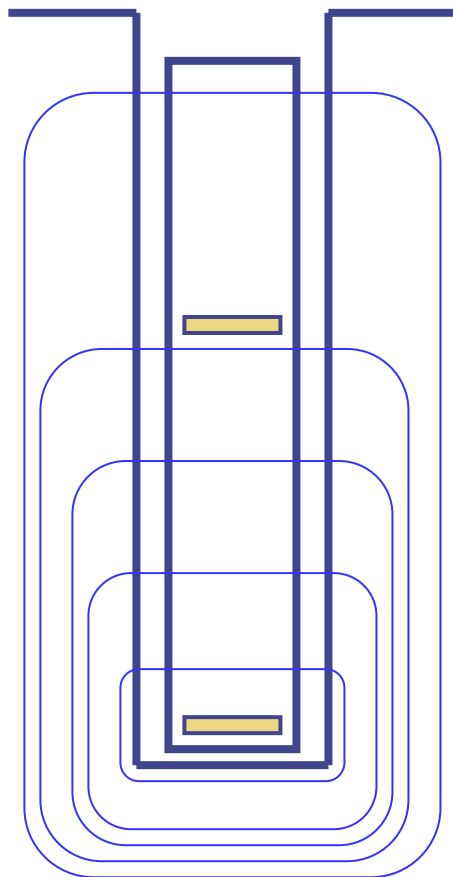


三、深槽和双笼感应电动机

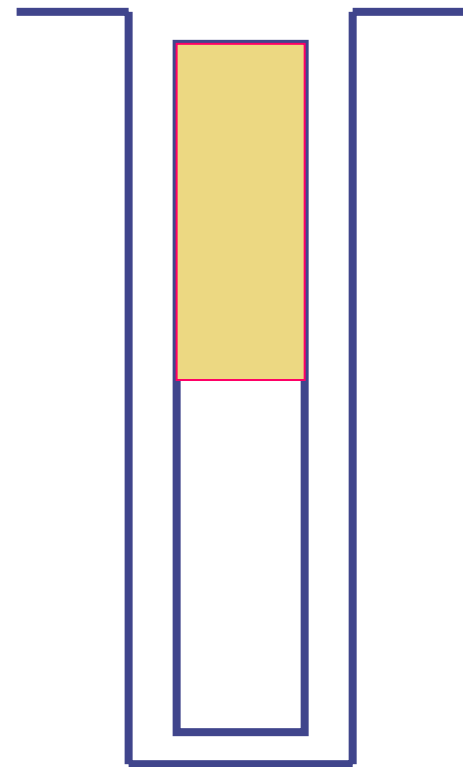
1、深槽感应电动机：

结构特点：槽窄而深 $1:(10 \sim 12)$

原理：



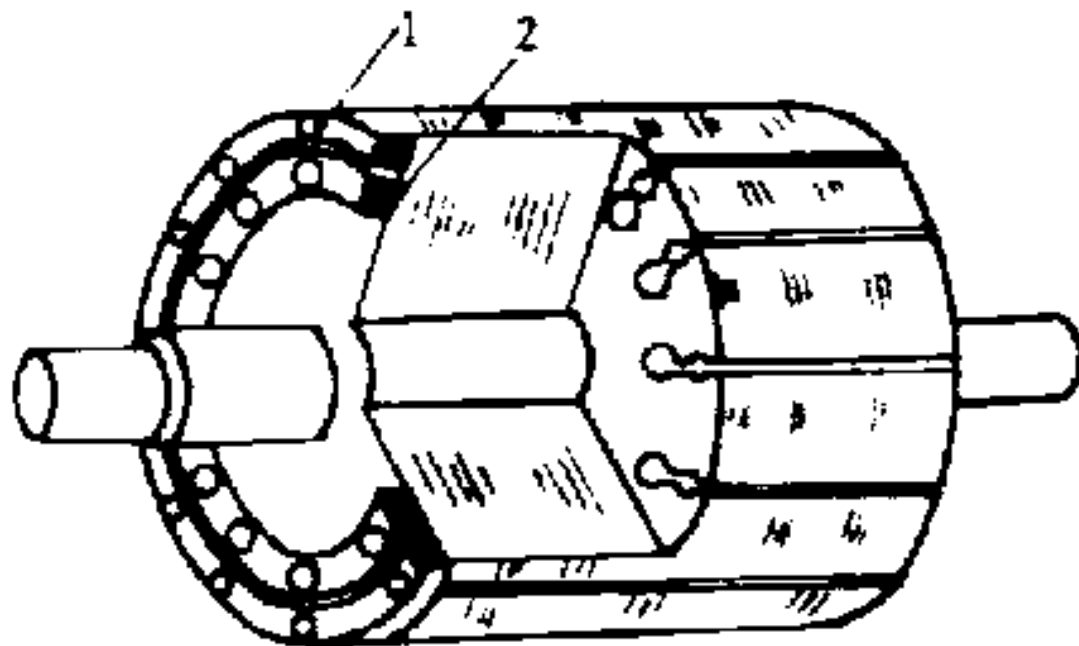
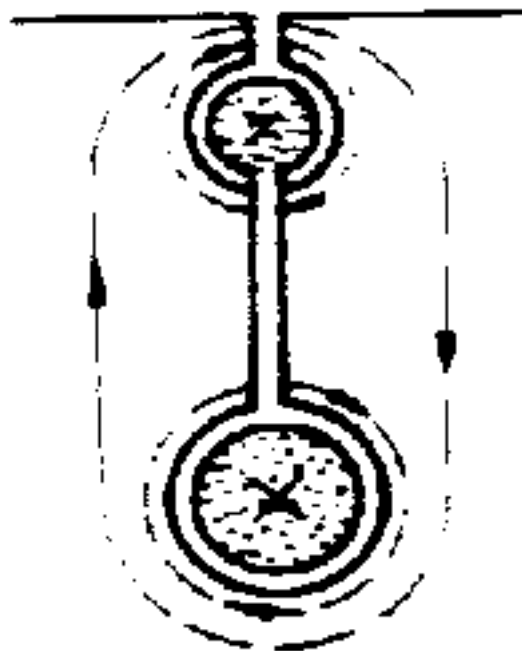
集肤效应



■ 电流密度

2、双笼感应电动机：

结构特点：内、外两个笼与窄缝



原理：

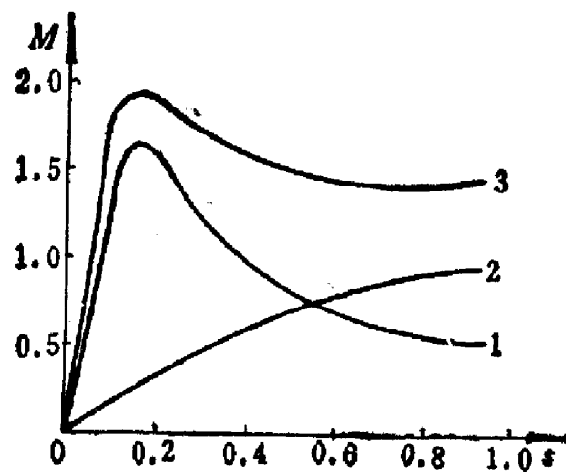
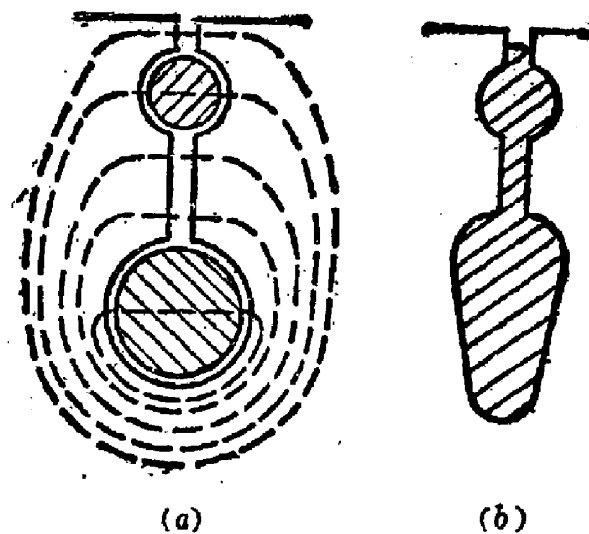
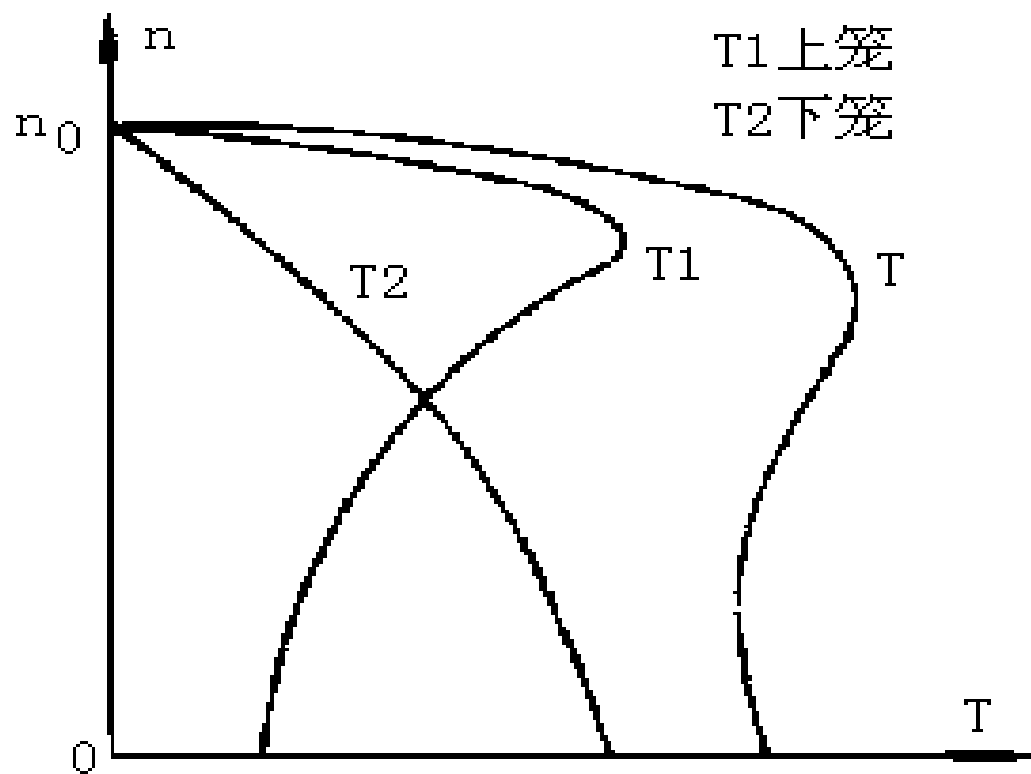


图 9-4 双鼠笼电动机的转子槽部剖面 图 9-5 双鼠笼式电动机的 $M=f(s)$ 曲线
(a)铜鼠笼；(b)铸铝鼠笼



二、用直接负载法求取工作特性：

在 $U_1 = U_N, f = f_N$ 时， $n, I_1, \cos \varphi_1, T_e, \eta = f(P_2)$

先用空载实验测出电动机的铁耗 P_{Fe} 、机械损耗 P_{Ω} 和定子电阻 R_1 。

负载实验是在额定电压、额定频率下进行。改变电动机的负载，测定定子输入功率 P_1 、定子电流和转速。

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad P_e = P_1 - p_{Cu1} - P_{Fe}$$

$$p_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_{1(75^\circ C)} \quad T_e = \frac{P_e}{\Omega_s} \quad p_{Cu2} = s P_e$$

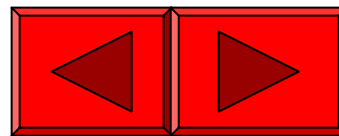
$$P_2 = P_e - p_{Cu2} - P_{\Omega} - P_{\Delta} \quad p_{\Delta} \approx (0.5 \sim 2.0)\% P_N \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2$$

$$\sum p = p_{Cu1} + P_{Fe} + p_{Cu2} + P_{\Omega} + P_{\Delta}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} \quad \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 I_1}$$

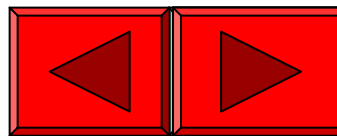
第六章 同步电机的稳态分析

- 同步电机和感应电机同属于交流电机，与感应电机的区别是同步电机的转子转速 n 与电网频率 f 之间具有固定不变的关系 $n = n_s = \frac{60f}{p}$ ，而感应电机的转子转速 $n < n_s$ 。
- 本章主要讲述同步发电机的工作原理、电磁关系，导出基本方程、等效电路和相量图；
- 分析同步发电机的运行特性，以及与电网的并联运行和功率调节问题。
- 最后介绍同步电动机和同步补偿机。



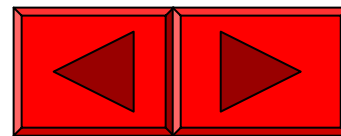
第六章 同步电机的稳态分析

- 第一节 同步电机的结构、工作原理和运行状态
- 第二节 同步发电机的空载和负载运行
- 第三节 隐极同步发电机电压方程、相量图和等效电路
- 第四节 凸极同步发电机电压方程和相量图
- 第五节 同步发电机的功率和转矩方程
- 第六节 同步电机参数的测定
- 第七节 同步发电机的运行特性
- 第八节 同步发电机与电网的并联运行
- 第九节 同步电动机与同步补偿机



第一节 同步电机的结构、 工作原理和运行状态

- 一、同步电机的基本类型
- 二、同步电机的基本结构
- 三、同步发电机的工作原理
- 四、同步电机的运行状态
- 五、同步电机的励磁方式
- 六、同步电机的铭牌数据



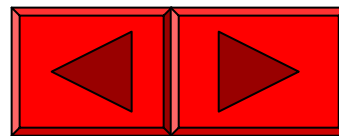
一、同步电机的基本类型

■按结构形式分 { 转枢式：用于小容量同步电机
转极式：用于高压、大容量同步电机

■按磁极形状分 { 隐极式：转子圆柱形，气隙均匀
凸极式：转子有明显凸出的磁极，气隙不均匀

■发电机按原动机不同分 { 汽轮发电机：高速，转子隐极式，细长形
水轮发电机：低速，转子凸极式，短粗形

■按冷却介质和冷却方式分 { 空冷—外冷：空气自然循环或风扇吹风强迫冷却
水冷—内冷：需进水管、出水管等
氢冷—外冷或内冷：需密封系统，防爆防漏



二、同步电机的基本结构

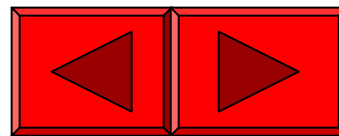
(一)、隐极同步电机（卧式）

1、**定子**：包括定子铁心、定子绕组、机座、端盖等。

1)、**定子铁心**：由0.5mm厚的硅钢片叠成，沿轴向分成好几叠，每叠3~6cm，叠与叠之间留有宽0.8~1cm的通风沟。

2)、**定子绕组**：由许多线圈按一定规律连接而成。大容量电机由于尺寸大，制成半匝式（线棒），每个线棒由若干铜线并在一起，分成一排或两排，两个线棒的一端焊在一起，即成一个线圈。

3)、**机座**：固定和支撑定子铁心，并形成风道。

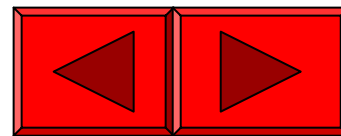


2、**转子**：包括转子铁心、励磁绕组、护环、风扇等。

1)、**转子铁心**：一般用整块的导磁性好的高强度合金钢锻成，转子表面约 $2/3$ 部分铣有轴向凹槽，用于嵌放励磁绕组，不铣槽的约 $1/3$ 部分形成大齿，即磁极。

2)、**励磁绕组**：用扁铜线绕成同心式线圈，嵌放在大齿两侧的转子槽中，并用非磁性硬铝槽楔压紧。

3)、**护环**：为使励磁绕组可靠地固定在转子上，绕组端部还要套上用高强度非磁性钢锻成的护环。



(二)、凸极同步电机（卧式或立式）

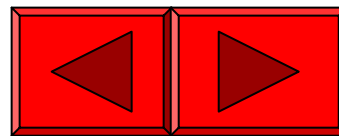
- ⎧ 卧式：同步电动机、同步补偿机和用内燃机或冲击式水轮机拖动的同步发电机。
- ⎩ 立式：低速、大容量水轮发电机和大型水泵用同步电动机。

1、**定子**：包括定子铁心、定子绕组、机座等。

1)、**定子铁心**：由0.5mm厚硅钢片叠成，因直径大，一般采用几片扇形硅钢片拼成一个圆形。

2)、**定子绕组**：大、中容量凸极电机采用波绕组，小容量凸极电机采用叠绕组。

3)、**机座**：固定和支撑定子铁心，并形成风道。因直径大，通常采用分瓣机座。

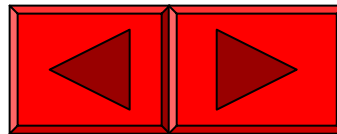


2、**转子**：包括转子铁心、转轴、励磁绕组、阻尼绕组等。

1)、**转子铁心**：即磁极，采用T尾或鸠尾与磁轭连接，磁轭与转轴间用转子支架支撑着，转子支架固定在转轴上。

2)、**转轴**：用高强度钢锻成。因转速低，转子铁心与转轴分开锻造。

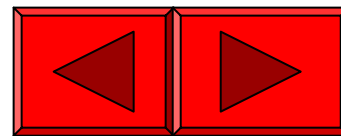
3)、**阻尼绕组**：由插入磁极极靴槽中的铜条和两端的端环焊成一个闭合绕组。在发电机不对称运行时，起削弱负序旋转磁场，抑制转子机械振荡的作用。



4)、推力轴承：

悬式：推力轴承装在转子上面的上机架上，整个转子悬吊着。机械稳定性好，但机组的轴向高度大，转速较高的电机(150r/min以上)采用。

伞式：推力轴承装在转子下面的下机架上，整个转子被托架着。机械稳定性差，但机组的轴向高度小，转速较低的电机(125r/min以下)采用。



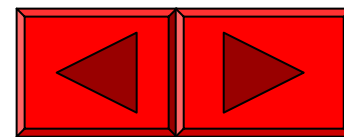
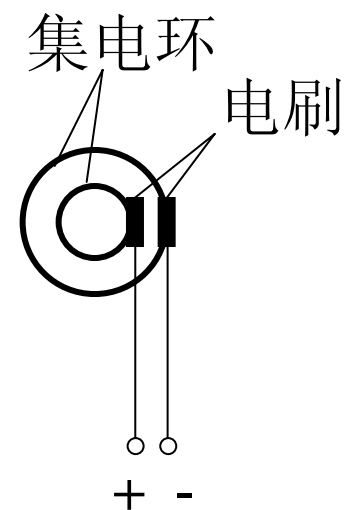
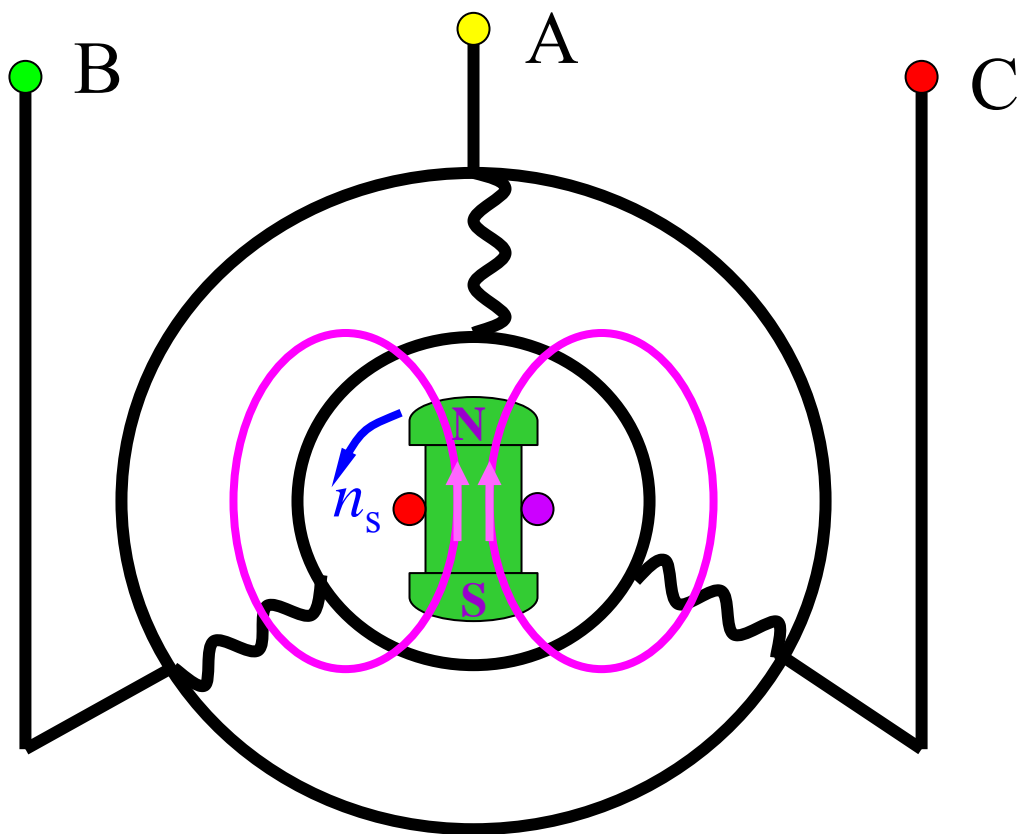
三、同步发电机的工作原理

定子上装有三相对称绕组互差 120° 电角度。

转子上安放直流励磁绕组。

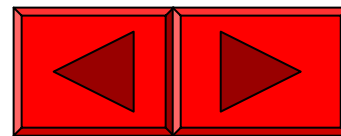
紫色为流入
红色为流出

设转子
顺时针旋转



当同步发电机被原动机拖动以同步转速旋转，转子励磁绕组通入直流励磁电流时，转子将产生主极磁动势及相应的主极磁场（包括在气隙中以同步转速旋转的主磁场和主极漏磁场）。

主磁场通过气隙并与定子绕组交链，在定子绕组中感应出三相交流电动势，若定子绕组带有负载，发电机将输出电功率。



1、电动势的波形

若主磁场的气隙磁密沿圆周按正弦规律分布，
则定子导体感应电动势随时间按正弦规律变化：

$$e_1 = blv = B_1 lv \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$$

2、电动势的大小

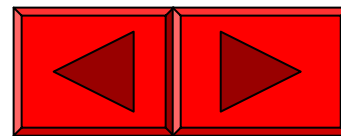
三相定子绕组对称，因此三相电动势大小相等，
相位互差 120° 电角度。

设 E_m 为相电动势幅值，A相初相角为 0° ，则：

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$



3、电动势的频率

当 $p=1$ ，转子转一周，电动势交变一次；

当 p 对极，转子转一周，电动势交变 p 次；

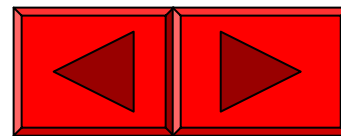
若转子每分钟转速为 n ，电动势频率为 $f = \frac{pn}{60}$

当 $f=50\text{Hz}$ 时， $n=3000/p$ 。

汽轮发电机： $p=1$ —— $n=3000\text{r/min}$ ；

水轮发电机：例 $p=30$ —— $n=100\text{r/min}$ 。

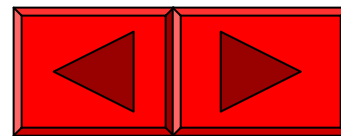
同步电机的转速与电网频率有严格不变关系，
即当电网频率一定时，电机转速不变。



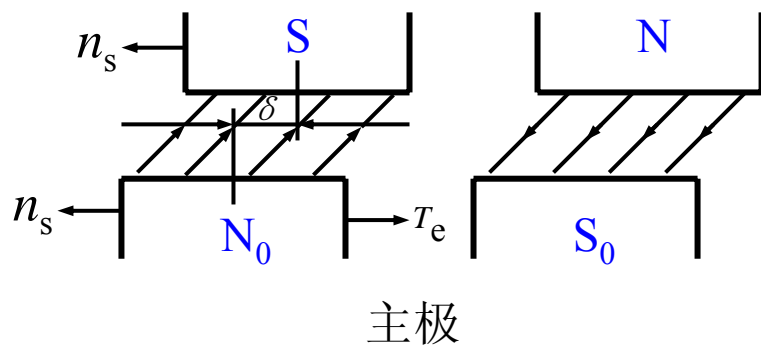
四、同步电机的运行状态

当定子（电枢）绕组中流过**对称三相电流**时，定子将产生**电枢磁动势**及相应的**电枢磁场**（包括在气隙中以**同步转速**旋转的**电枢反应磁场**和**电枢漏磁场**）。

在气隙中均以**同步转速**旋转的**主磁场**和**电枢反应磁场**共同合成为**气隙磁场**。气隙磁场在转子内部深处沿着主极轴线然后逐渐扭斜，在进入定子时其轴线已偏离主极轴线一个角度，再加上电枢漏磁场，**电枢合成磁场**（包括**主磁场**、**电枢反应磁场**和**电枢漏磁场**）与主磁场之间的夹角为 δ ，称为功率角。它越大，则磁场所产生的切向力及电磁转矩和电磁功率也越大。

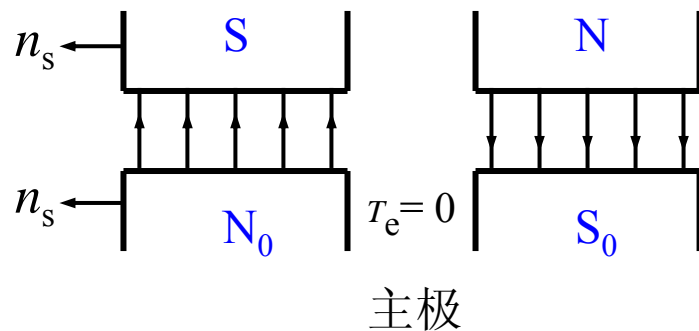


表征电枢合成磁场的等效磁极



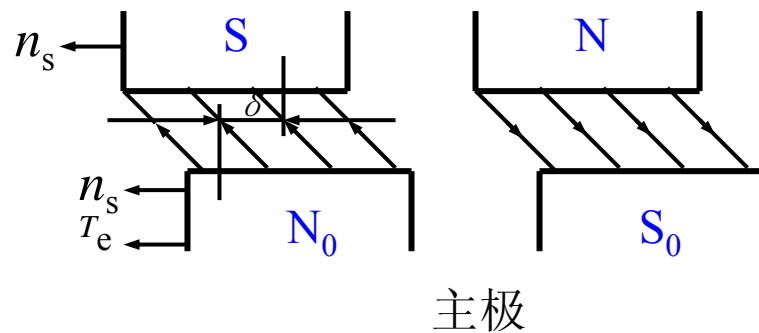
(a) 发电机

表征电枢合成磁场的等效磁极

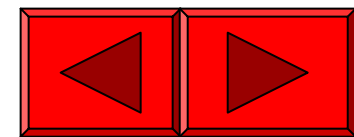


(b) 补偿机

表征电枢合成磁场的等效磁极



(c) 电动机



五、同步电机的励磁方式

指同步电机获得直流励磁电流的方式；

而供给励磁电流的整个系统，称为励磁系统。

(一)、**直流励磁机励磁系统**：用同轴直流发电机供给励磁。

(二)、**整流器励磁系统**：(用晶闸管取代直流发电机电刷和换向器)

1、**静止整流器励磁系统**：

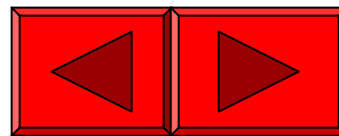
1)、**他励式**：用同轴交流主励磁机发出交流电，经静止半导体整流器整流后供给励磁。

2)、**自励式**：(取消了交流励磁机)

取自同步发电机输出的交流电，经晶闸管整流后供给励磁。

2、**旋转整流器励磁系统**：(取消了同步发电机集电环和电刷)

用同轴转枢式交流主励磁机发出交流电，经同步发电机转子上的半导体整流器整流后供给励磁，称为无刷励磁系统。



六、同步电机的额定值

1、**额定容量 S_N** (或**额定功率 P_N**)：额定运行时电机的输出功率。

同步发电机 S_N (kVA)或 P_N (kW)；同步电动机 P_N (kW)；
同步补偿机 S_N (kvar)。

2、**额定电压 U_N** ：额定运行时定子绕组的线电压，单位为伏(V)。

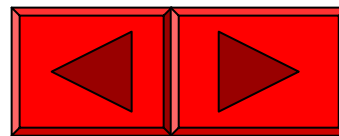
3、**额定电流 I_N** ：额定运行时定子绕组中的线电流，单位为安(A)。

4、**额定功率因数 $\cos\varphi_N$** ：额定运行时电机的功率因数。

5、**额定频率 f_N** ：额定运行时电枢的频率，我国工频为50赫(Hz)。

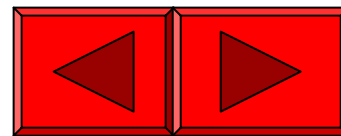
6、**额定转速 n_N** ：额定运行时电机的转速，为同步转速 n_s ；
单位为转/分(r/min)。

还有绝缘等级、允许温升、额定励磁电压和额定励磁电流等。



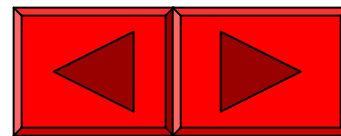
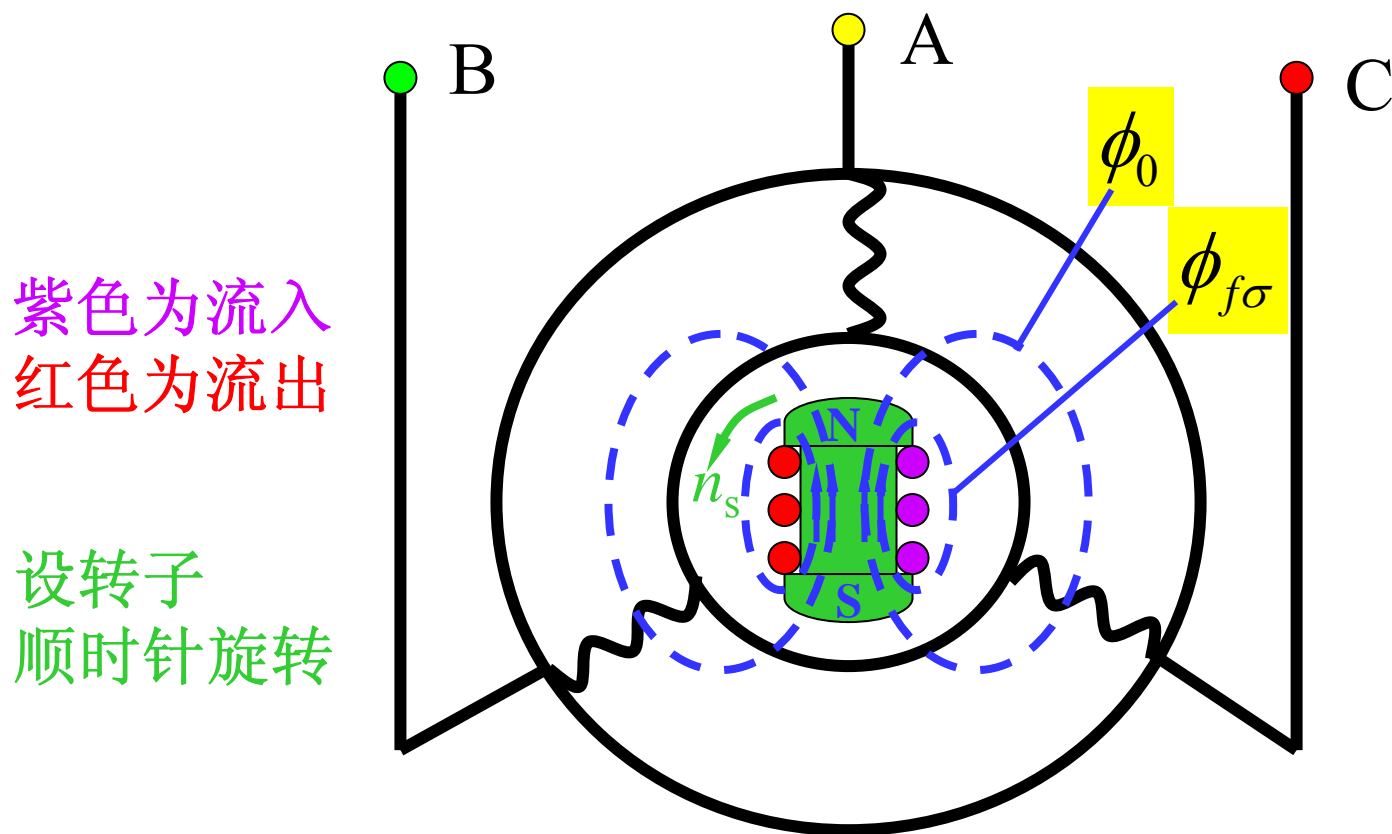
第二节 同步发电机的 空载和负载运行

- 一、同步发电机的空载运行——空载特性
- 二、同步发电机的负载运行——电枢反应



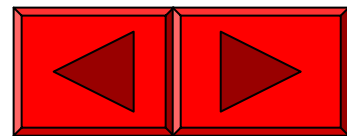
一、同步发电机的空载运行

同步发电机被原动机拖动以同步转速旋转，励磁绕组通入直流励磁电流，电枢绕组开路或电枢电流为零的情况。



$$\text{主极磁通} \begin{cases} \text{主磁通 } \phi_0 \\ \text{主极漏磁通 } \phi_{f\sigma} \end{cases} \quad \left(\frac{\phi_{f\sigma}}{\phi_0} = 0.1 \sim 0.2 \right)$$

主磁路包括气隙、电枢齿、电枢轭、磁极极身和转子轭五部分。



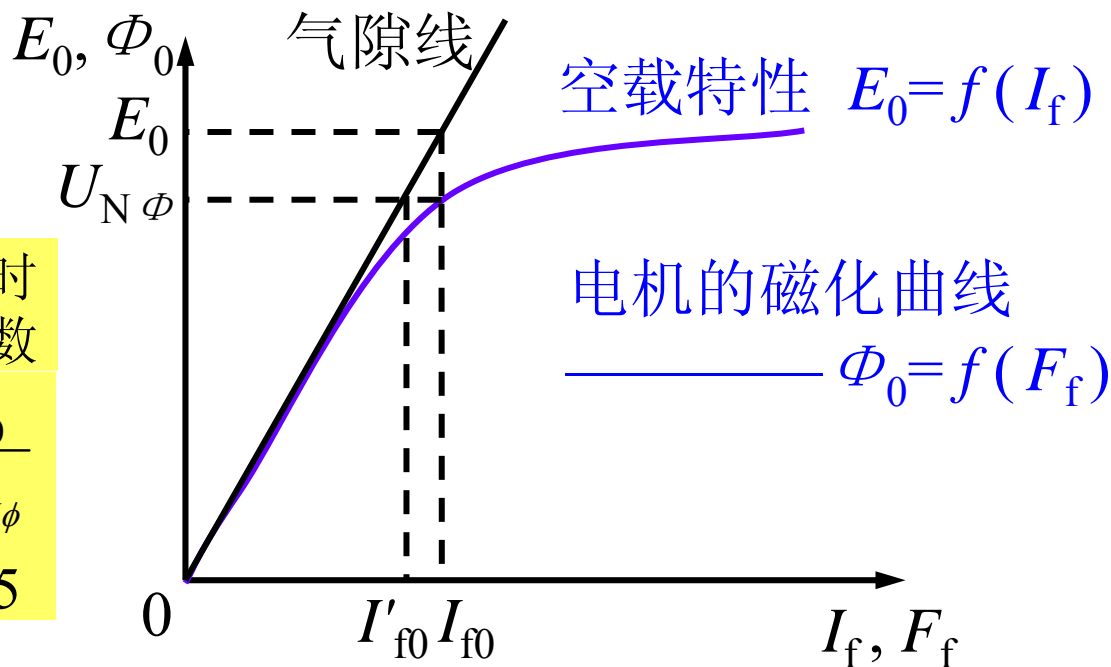
1、空载时的电磁关系

$$I_f \longrightarrow \vec{F}_{f1} \longrightarrow \vec{B}_0 \longrightarrow \dot{\Phi}_0 \longrightarrow \dot{E}_0$$

激磁电动势的有效值 $E_0 = 4.44 f N_1 k_{w1} \Phi_0$

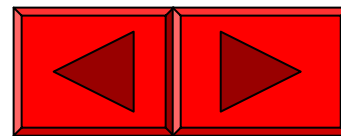
2、空载特性

在同步转速下，激磁电动势 E_0 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线 $E_0=f(I_f)$ ，称为同步电机的空载特性。



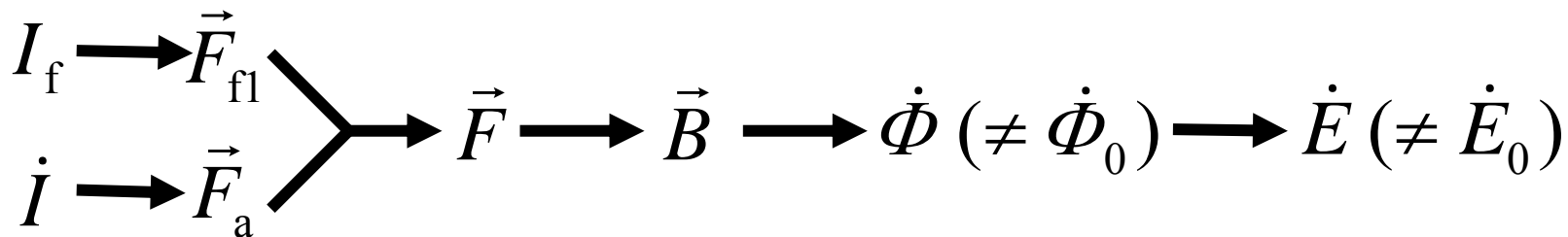
空载额定电压时
主磁路饱和系数

$$k_\mu = \frac{I_{f0}}{I'_{f0}} = \frac{E_0}{U_{N\phi}} \approx 1.1 \sim 1.25$$



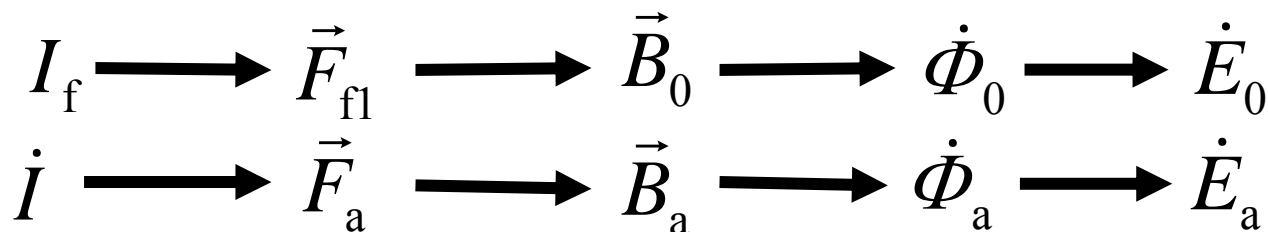
二、同步发电机的负载运行

1、负载时的电磁关系

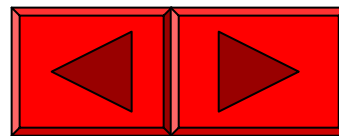


对称负载时电枢磁动势的基波对主磁场基波的影响称为电枢反应。

不计饱和时：



把主磁场 \vec{B}_0 和电枢反应磁场 \vec{B}_a 叠加，即可得到负载时的气隙合成磁场 \vec{B} 。（教材中——把电枢磁动势的基波在气隙中所产生的磁场称为电枢反应）



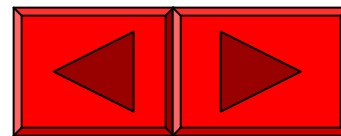
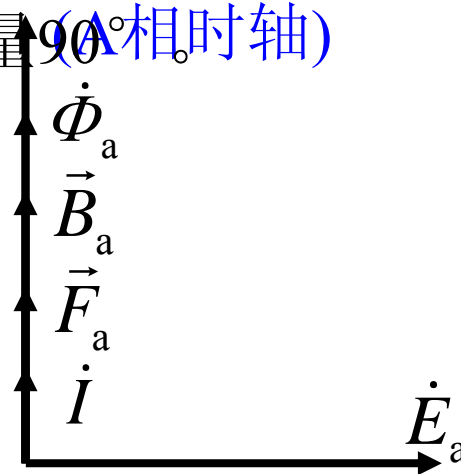
复习时空矢量图:

把时间相量图和空间矢量图画在一起, 称为时空矢量图。

对于对称多相系统, 在时空矢量图中, 若每一相都取自己的相轴作为时轴, 则存在下列关系:

- (1)、任一相的电流相量与该电流系统产生的合成磁动势矢量重合;
- (2)、旋转磁场与任一相绕组交链的磁通相量与旋转磁场的磁密波矢量重合;
- 再加上(3)、忽略磁滞、涡流影响时, 旋转磁场的磁密波矢量与产生它的磁动势矢量重合;
- (4)、磁通与其感应电动势的正方向符合右手螺旋定则时, 电动势相量滞后于产生它的磁通相量 90° 。

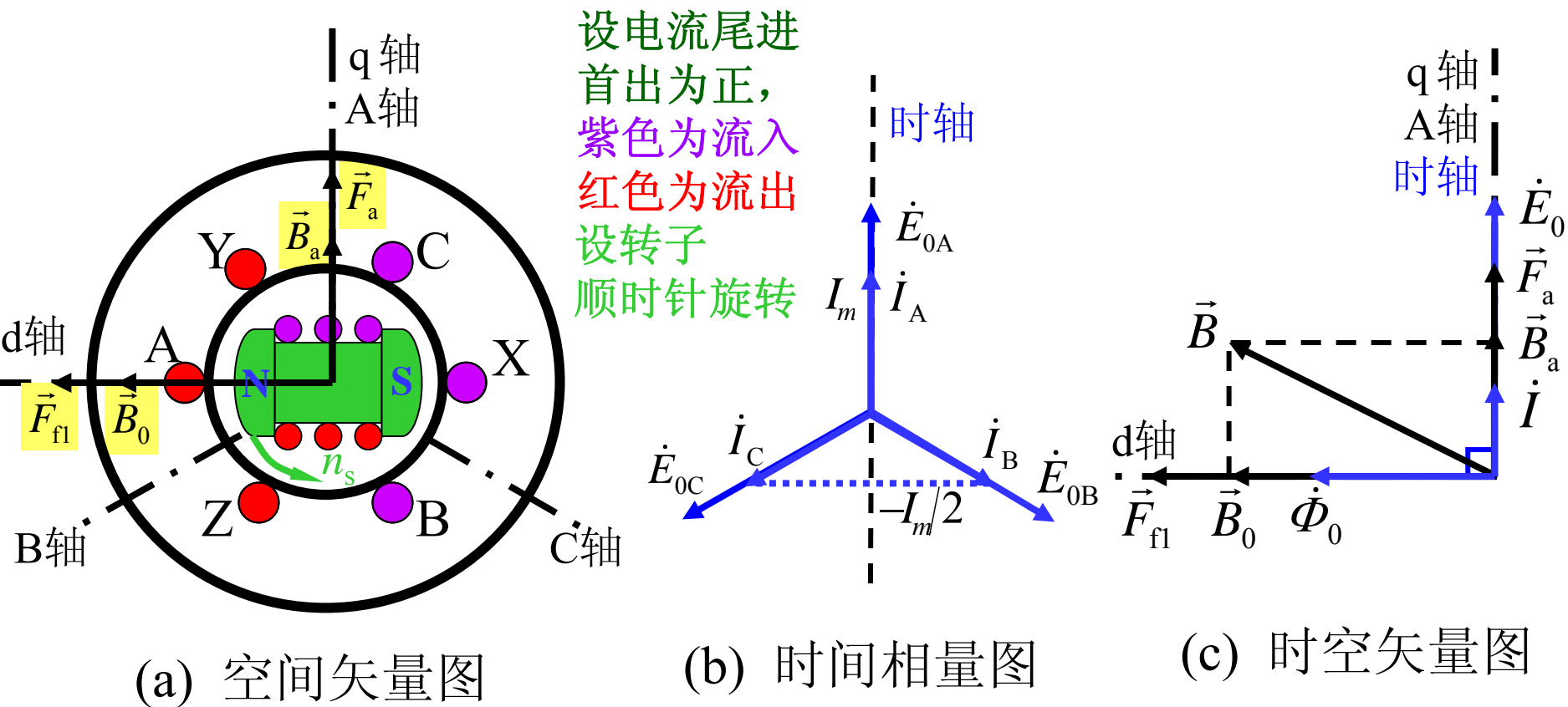
同步发电机A相电流
达最大值时的
时空矢量图



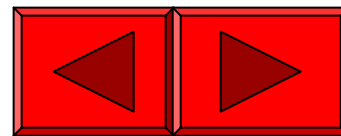
2、对称负载时的电枢反应

取主极轴线超前A相轴线 90° 的时刻绘图

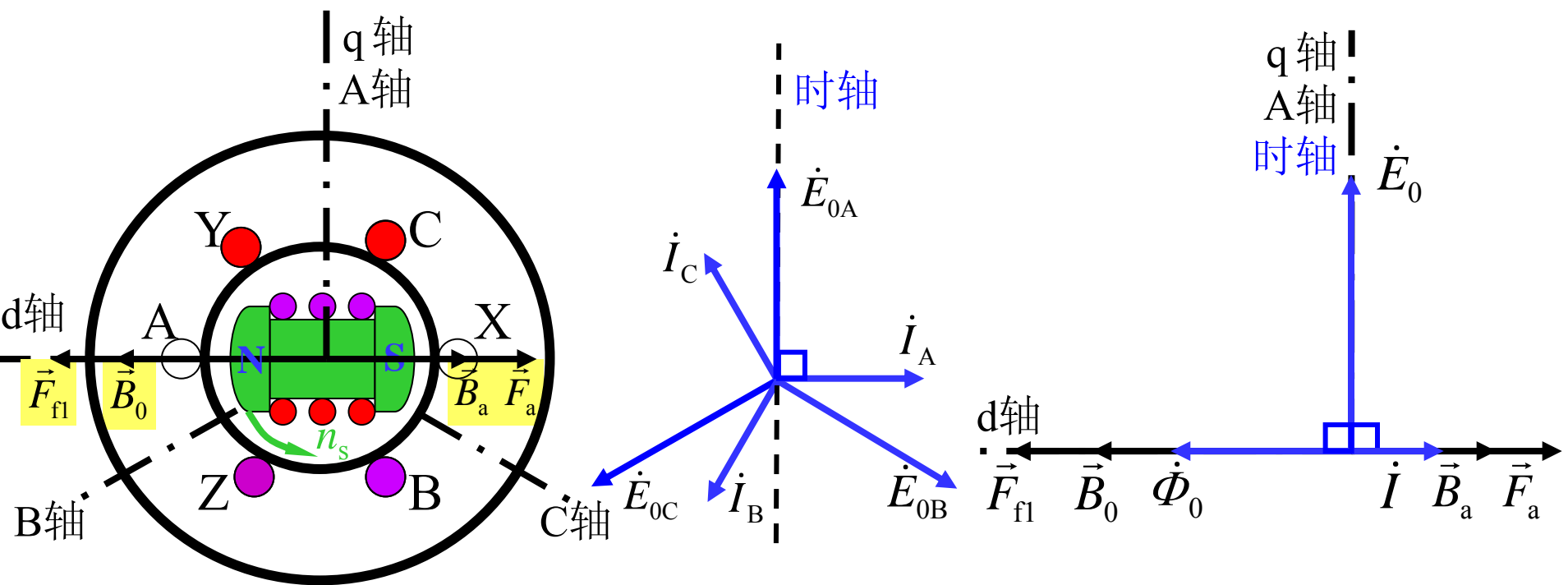
(1)、电枢电流 \dot{I} 与激磁电动势 \dot{E}_0 同相时 ($\psi_0=0^\circ$)



$\psi_0 = 0^\circ$, 交轴电枢反应



(2)、电枢电流 i 滞后激磁电动势 \dot{E}_0 90° 时 ($\psi_0=90^\circ$)



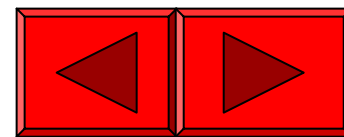
(a) 空间矢量图

(b) 时间相量图

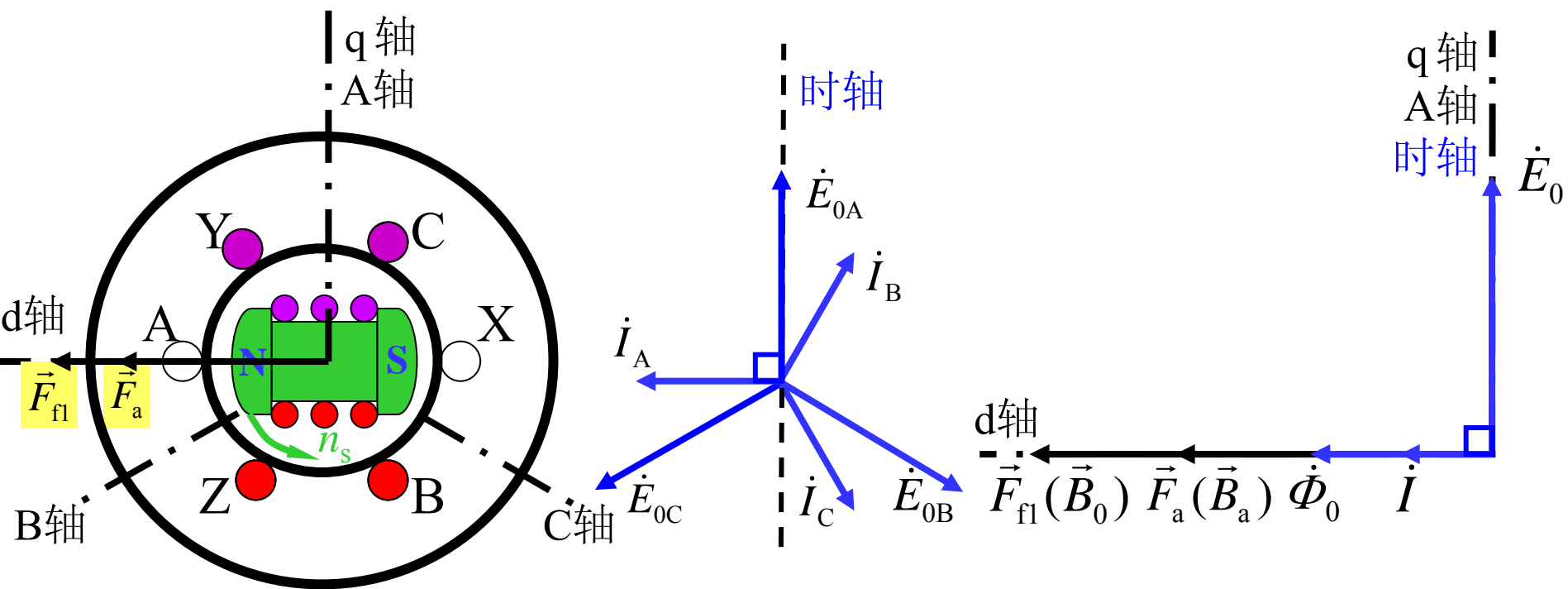
(c) 时空矢量图

$\psi_0 = 90^\circ$, 直轴去磁电枢反应

请同学们取A相电流达最大值的时刻绘图



(3)、电枢电流 i 超前励磁电动势 \dot{E}_0 90° 时 ($\psi_0 = -90^\circ$)



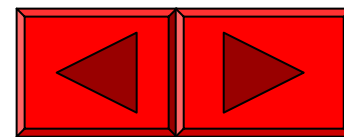
(a) 空间矢量图

(b) 时间相量图

(c) 时空矢量图

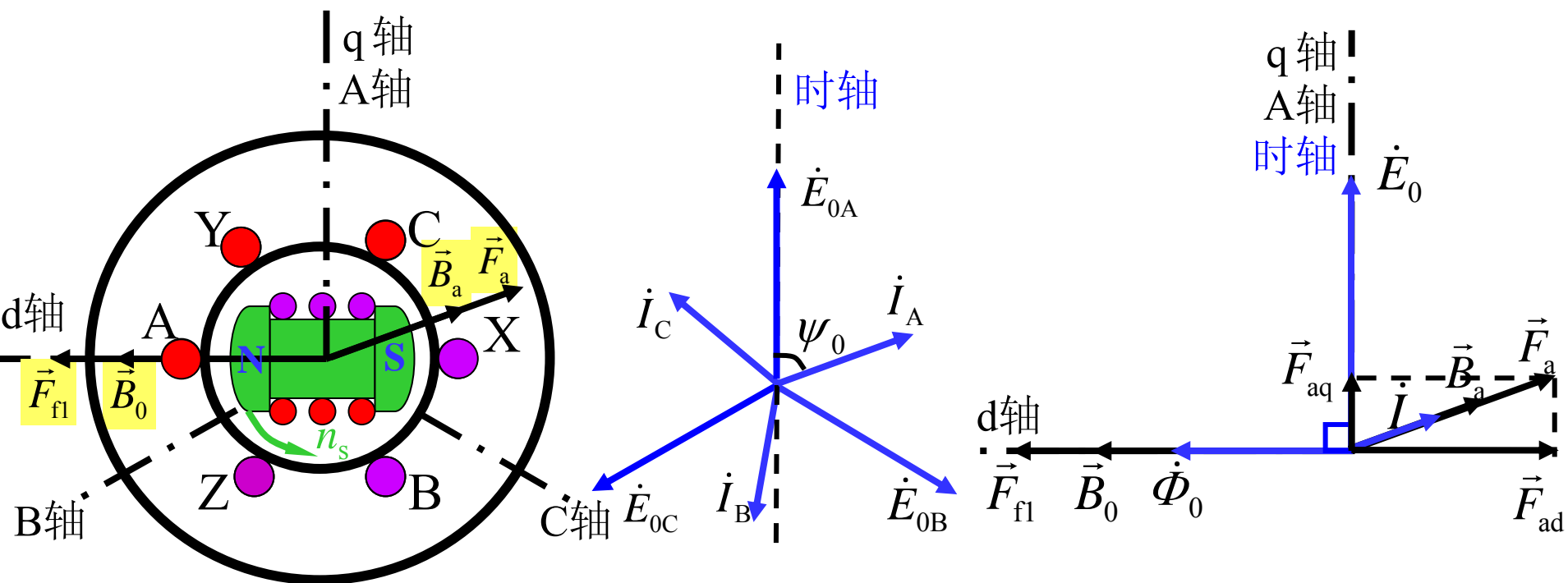
$\psi_0 = -90^\circ$, 直轴增磁电枢反应

请同学们取A相电流达最大值的时刻绘图



(4)、一般情况下的电枢反应

电枢电流 I 滞后励磁电动势 \dot{E}_0 一个锐角 ($0^\circ < \psi_0 < 90^\circ$)

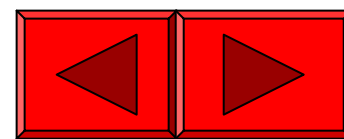


(a) 空间矢量图

(b) 时间相量图

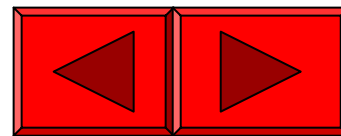
(c) 时空矢量图

$0^\circ < \psi_0 < 90^\circ$, 兼有交轴和直轴去磁 电枢反应



小结:

- (1)、电枢反应的性质与激磁电动势 E_0 和电枢电流 I 的夹角 ψ_0 (即内功率因数角) 有关。
- (2)、电枢反应的性质有交磁、去磁、增磁三种。
- (3)、交轴电枢反应是实现机电能量转换的关键，因为只有交轴电枢反应才产生制动性质的电磁转矩，原动机必须克服制动电磁转矩做功，从而将机械能转变成电能。

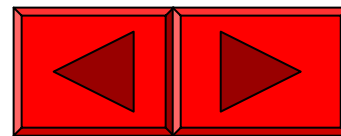


$\psi_0=0^\circ$ 、 90° 和 -90° 时电枢反应的性质、作用和对电机功率传递的影响？

(1) $\psi_0=0^\circ$ 时，为交轴电枢反应，作用是使气隙磁场轴线从空载时的直轴处逆转向后移了一个锐角，主磁场超前气隙磁场，主极上受到制动性质的电磁转矩，使发电机转速降低，影响发电机有功功率的输出。

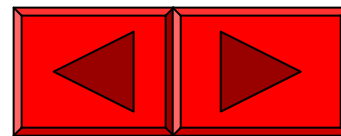
(2) $\psi_0=90^\circ$ 时，为直轴去磁电枢反应，作用是使气隙磁场削弱，发电机端电压下降，影响发电机无功功率的输出。

(3) $\psi_0=-90^\circ$ 时，为直轴增磁电枢反应，作用是使气隙磁场增强，发电机端电压上升，影响发电机无功功率的输出。



同步发电机的电压方程、 相量图和等效电路

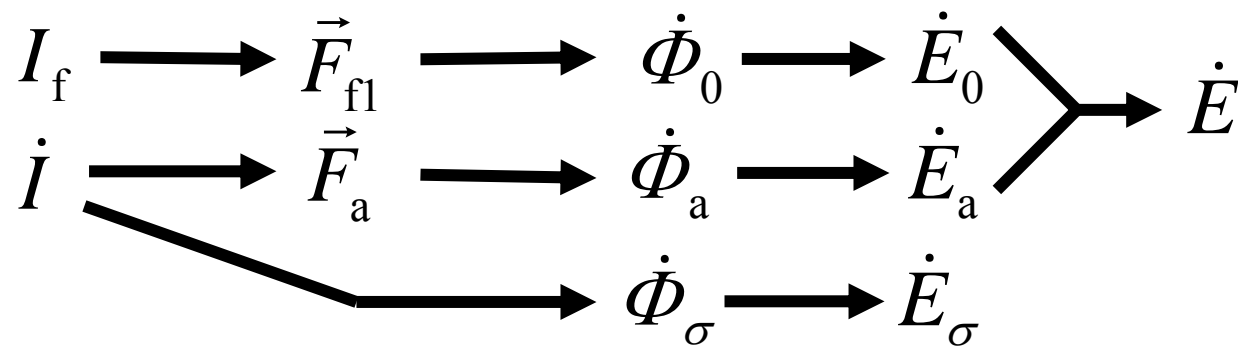
- 一、隐极同步发电机的电压方程、
相量图和等效电路
- 二、凸极同步发电机的电压方程
和相量图



第三节 隐极同步发电机的 电压方程、相量图和等效电路

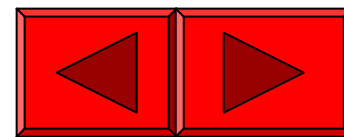
一、不考虑饱和（磁路线性，可应用叠加原理）

1、电压方程



$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma - iR_a = \dot{U}$$

$$\begin{cases} \dot{E}_a = -j4.44 fN_1 k_{w1} \dot{\Phi}_a \\ \dot{E}_\sigma = -j4.44 fN_1 k_{w1} \dot{\Phi}_\sigma \end{cases}$$



为分析方便，引入一个反映电枢反应磁通的参数，

将电枢反应电动势与电枢电流直接联系起来。

不计饱和

$$E_a \propto \Phi_a \propto F_a \propto I$$

不计定子铁耗， \vec{B}_a 与 \vec{F}_a 同相 \rightarrow $\dot{\Phi}_a$ 与 \dot{I} 同相

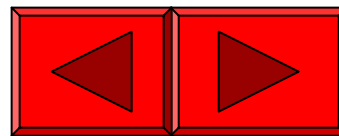
$$\dot{E}_a = -jIX_a$$

X_a — 电枢反应电抗 $X_a = \frac{E_a}{I}$

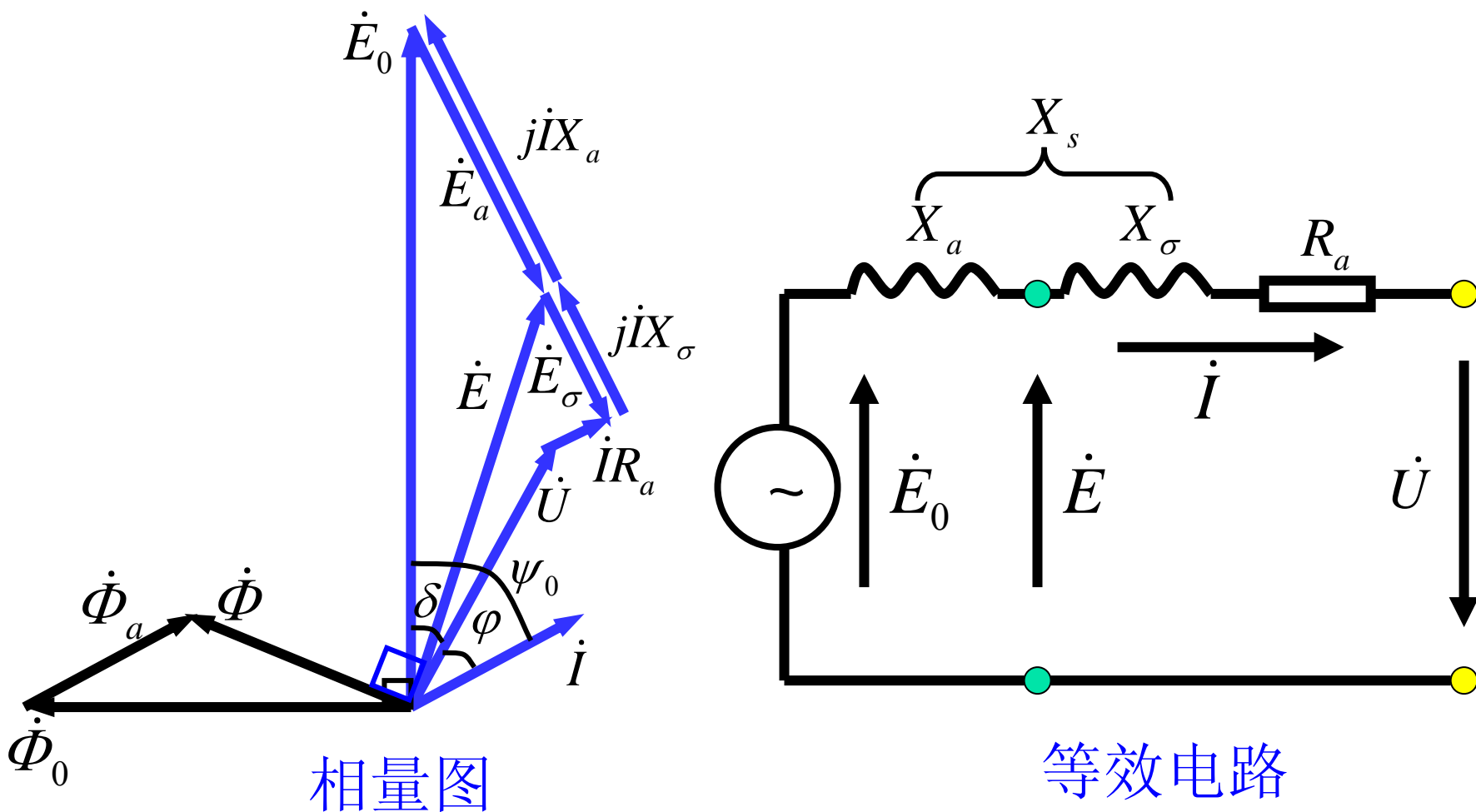
同理 $\dot{E}_\sigma = -jIX_\sigma$ X_σ — 电枢绕组漏电抗

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + jIX_a + jIX_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R_a + jIX_s$$

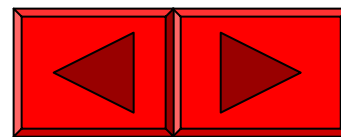
X_s — 同步电抗 $X_s = X_a + X_\sigma$



2、相量图和等效电路

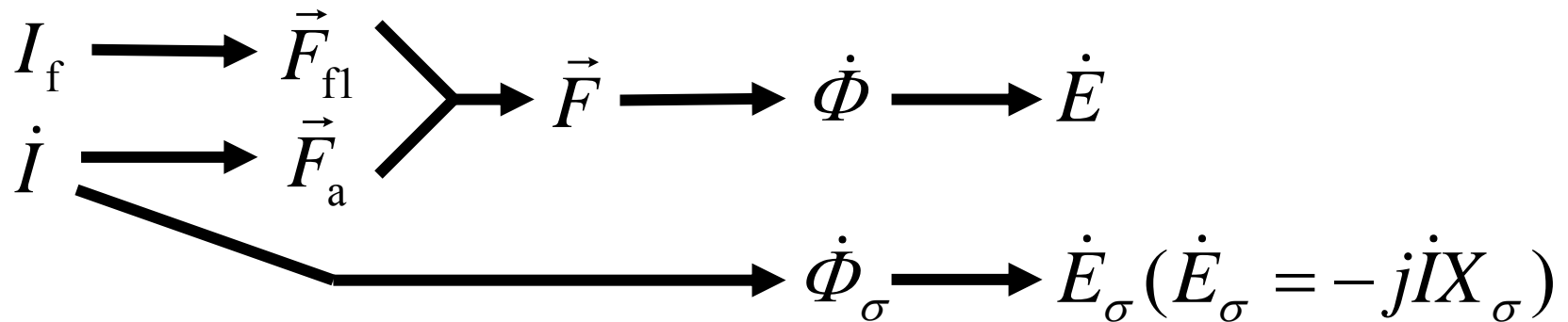


激磁电动势 \dot{E}_0 与端电压 \dot{U} 的夹角称为功率角 δ



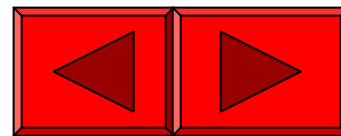
二、考虑饱和（磁路非线性，不能应用叠加原理）

1、电压方程



$$\dot{E} + \dot{E}_\sigma - \dot{I}R_a = \dot{U}$$

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}(R_a + jX_\sigma)$$



2、磁动势—电动势矢量图

具体计算时利用空载特性可直接求出气隙合成磁动势建立的气隙电动势，为此需要把基波电枢磁动势换算到阶梯形波的主极磁动势上，即乘以电枢磁动势的换算系数 k_a 。

$$\vec{F}'_a = k_a \vec{F}_a$$

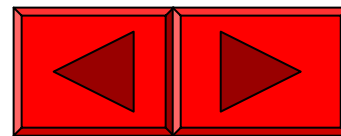
k_a 的意义是：产生同样大小的基波气隙磁场时，一安匝基波电枢磁动势相当于多少安匝阶梯形波主极磁动势。

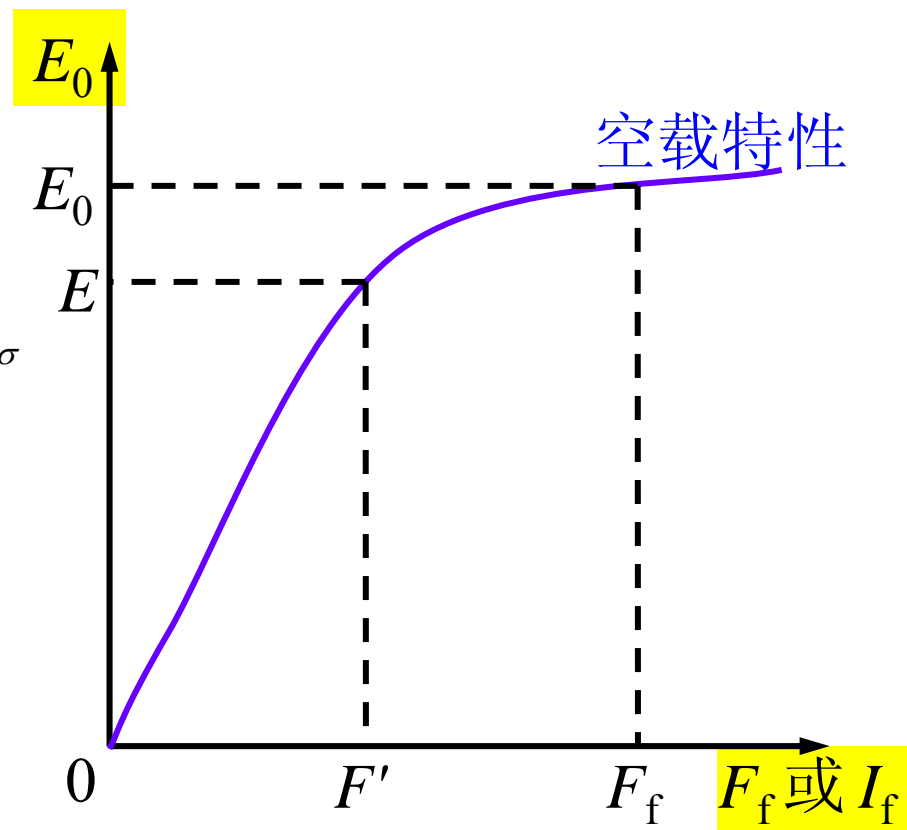
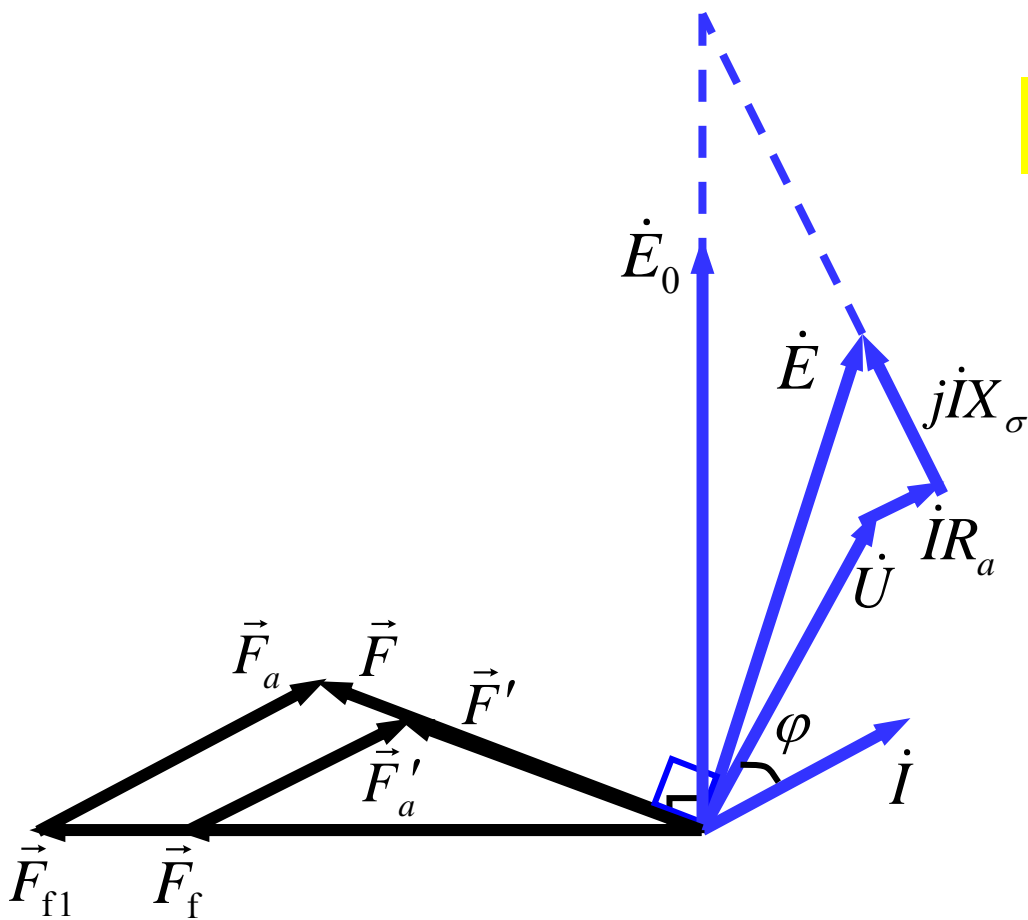
$$\vec{F}_{f1} = \frac{\vec{F}_f}{k_a} = \frac{N_f I_f}{k_a}$$

正弦波： $\vec{F}_{f1} + \vec{F}_a = \vec{F} \longrightarrow \vec{B} \longrightarrow \dot{\Phi} \longrightarrow \dot{E}$

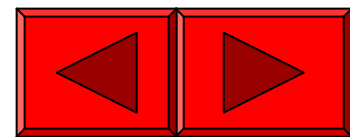
$$k_a \vec{F}_{f1} + k_a \vec{F}_a = k_a \vec{F}$$

阶梯形波： $\vec{F}_f + \vec{F}'_a = \vec{F}' \xrightarrow{\text{空载特性}} \dot{E}$





磁动势—电动势矢量图

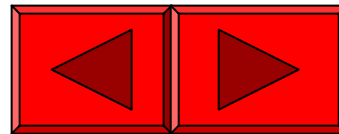
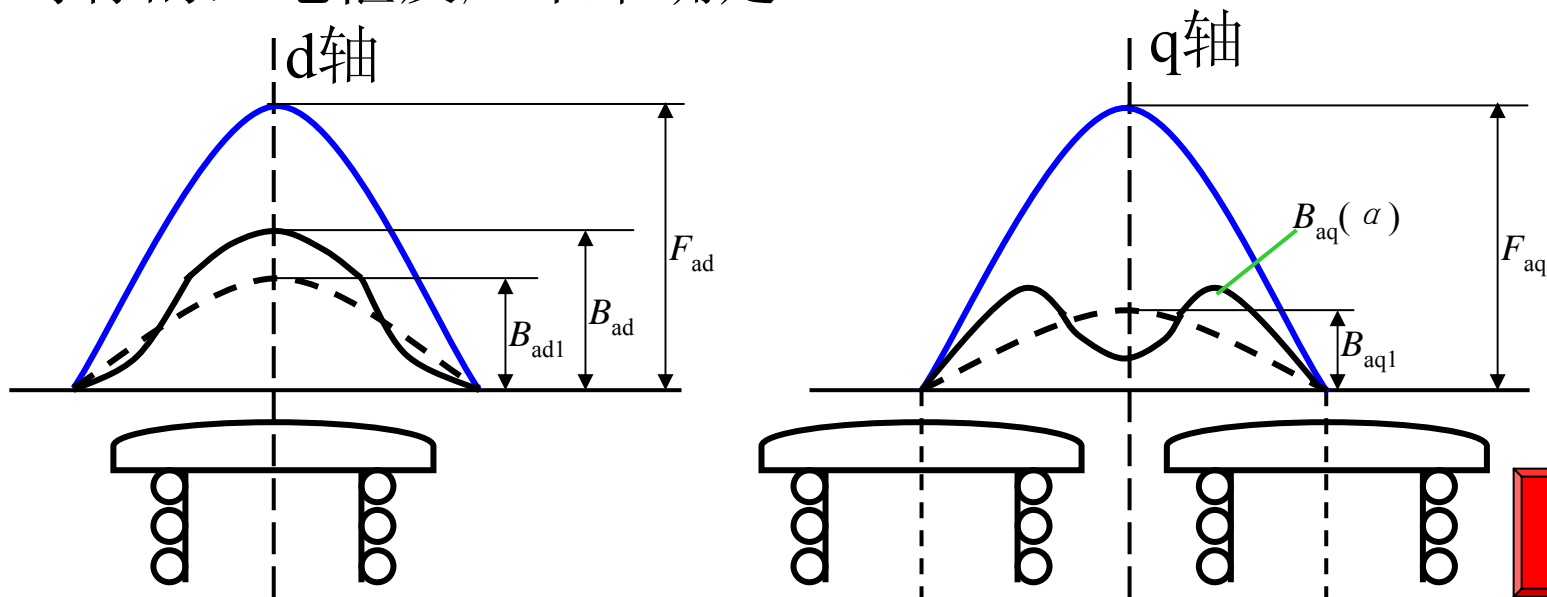


第四节 凸极同步发电机的 电压方程和相量图

一、双反应理论

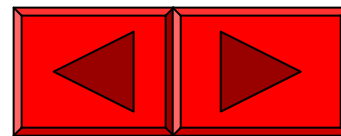
凸极同步电机的气隙是不均匀的，极弧下气隙较小，极间气隙较大，即气隙磁导是变化的，同样大小的电枢磁动势作用在不同位置时电枢反应将不相同。

当电枢磁动势恰好作用在直轴或交轴位置时，电枢磁场波形是对称的，电枢反应不难确定。



一般情况下，电枢反应既不作用在直轴也不作用在交轴，此时电枢磁场分布是不对称的，且无法用解析式来表达，电枢反应难于直接确定。

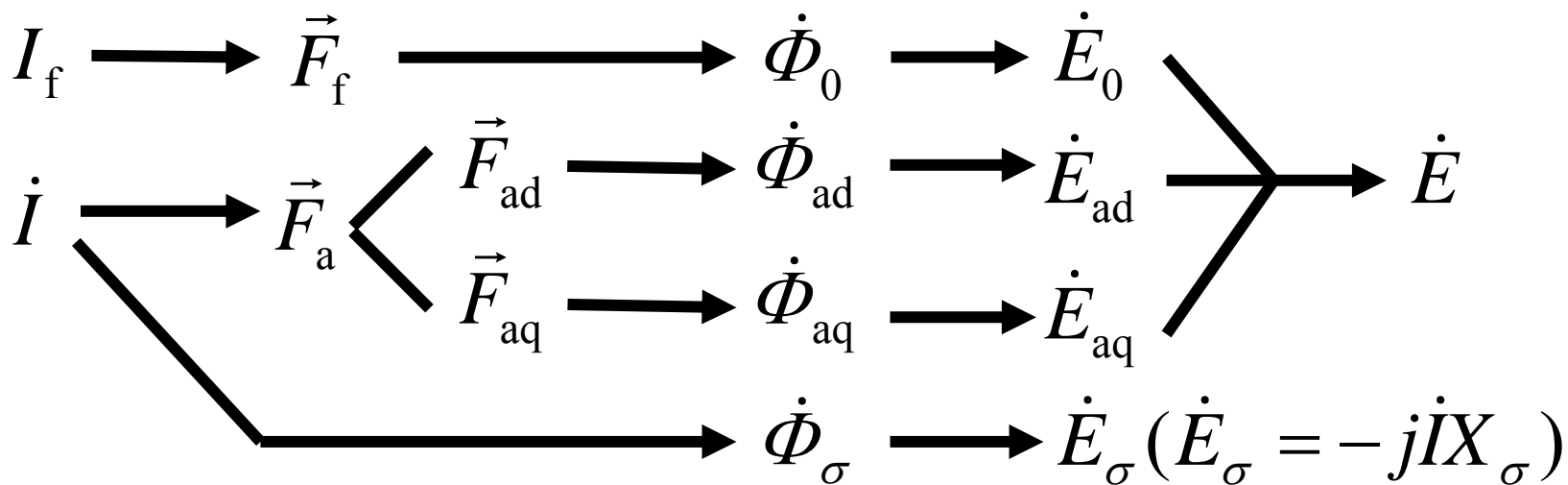
当电枢磁动势既不作用在直轴也不作用在交轴时，可把电枢磁动势分解成直轴和交轴两个分量，然后分别求出直轴和交轴电枢磁动势的电枢反应，最后再把它们的效果叠加起来。——称为双反应理论



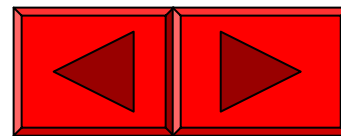
二、凸极同步发电机的电压方程和相量图

1、不考虑饱和（磁路线性，可应用叠加原理）

(1)、电压方程



$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma - \dot{I}R_a = \dot{U}$$



不计饱和

$$E_{ad} \propto \Phi_{ad} \propto F_{ad} \propto I_d \quad (I_d = I \sin \psi_0)$$

不计定子铁耗, \vec{B}_{ad} 与 \vec{F}_{ad} 同相 $\rightarrow \dot{\Phi}_{ad}$ 与 \dot{I}_d 同相

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}$$

X_{ad} — 一直轴电枢反应电抗 $X_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d}$

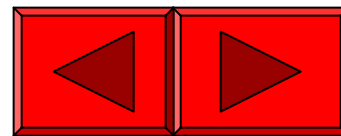
同理 $\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$

X_{aq} — 交轴电枢反应电抗 $X_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q}$

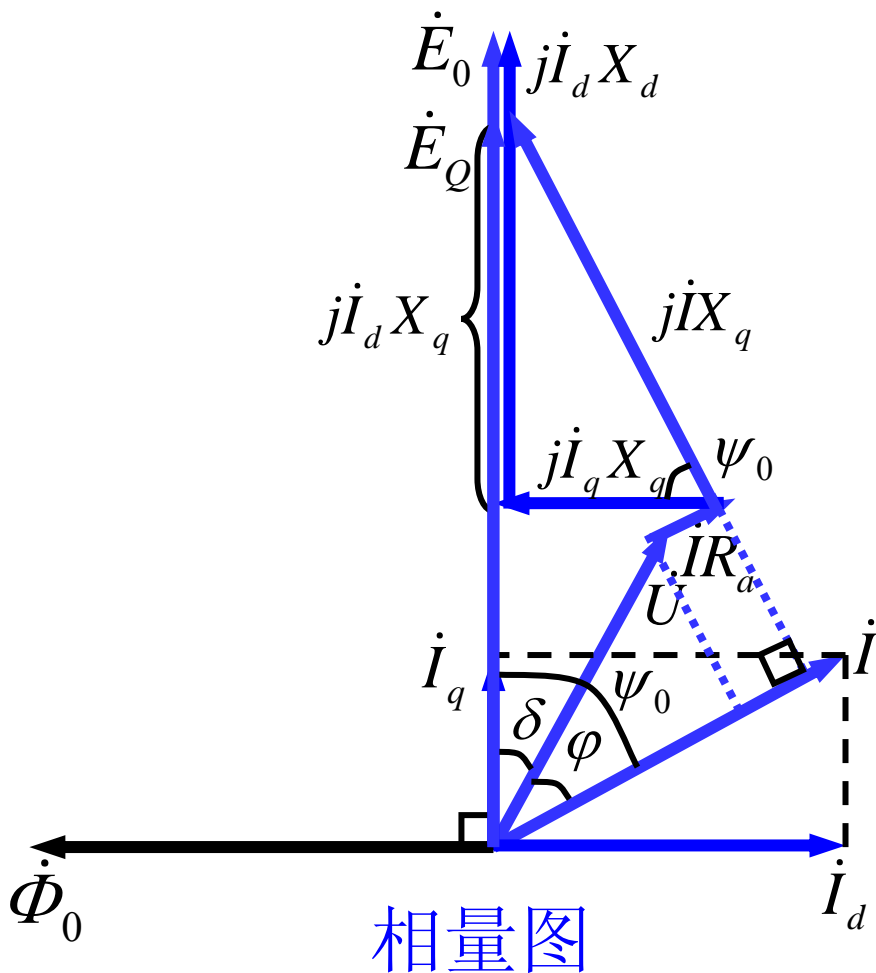
$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} + jX_\sigma \\ &= \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d (X_{ad} + X_\sigma) + j\dot{I}_q (X_{aq} + X_\sigma) \\ &= \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \end{aligned}$$

X_d — 一直轴同步电抗 $X_d = X_{ad} + X_\sigma$

X_q — 交轴同步电抗 $X_q = X_{aq} + X_\sigma$



(2)、相量图



$$\dot{E}_0 = \dot{E}_Q + j\dot{I}_d(X_d - X_q)$$

设 $\dot{U} = U \angle 0^\circ$ ，求激磁电动势 \dot{E}_0

①、相量法

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_q = E_Q \angle \delta$$

$$\psi_0 = \delta + \varphi$$

$$I_d = I \sin \psi_0, \quad I_q = I \cos \psi_0$$

$$E_0 = E_Q + I_d(X_d - X_q)$$

$$\dot{E}_0 = E_0 \angle \delta$$

②、有效值法

$$E_Q = \sqrt{(U \sin \varphi + IX_q)^2 + (U \cos \varphi + IR_a)^2}$$

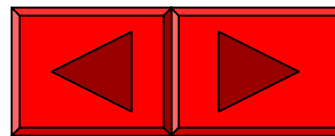
$$\psi_0 = \text{tg}^{-1} \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi + IR_a}$$

$$I_d = I \sin \psi_0, \quad I_q = I \cos \psi_0$$

$$E_0 = E_Q + I_d(X_d - X_q)$$

$$\delta = \psi_0 - \varphi$$

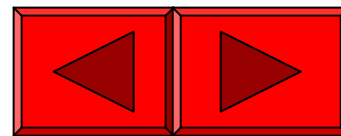
$$\dot{E}_0 = E_0 \angle \delta$$



注意：

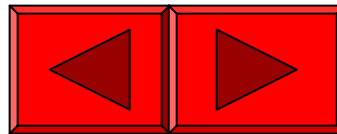
$$I_d = I \sin \psi_0 \quad I_q = I \cos \psi_0$$

ψ_0 角是 \dot{E}_0 与 i 的夹角，画相量图须先确定 ψ_0 角。
 \dot{E}_0 与 i 不能同时存在， ψ_0 角是无法测出的。



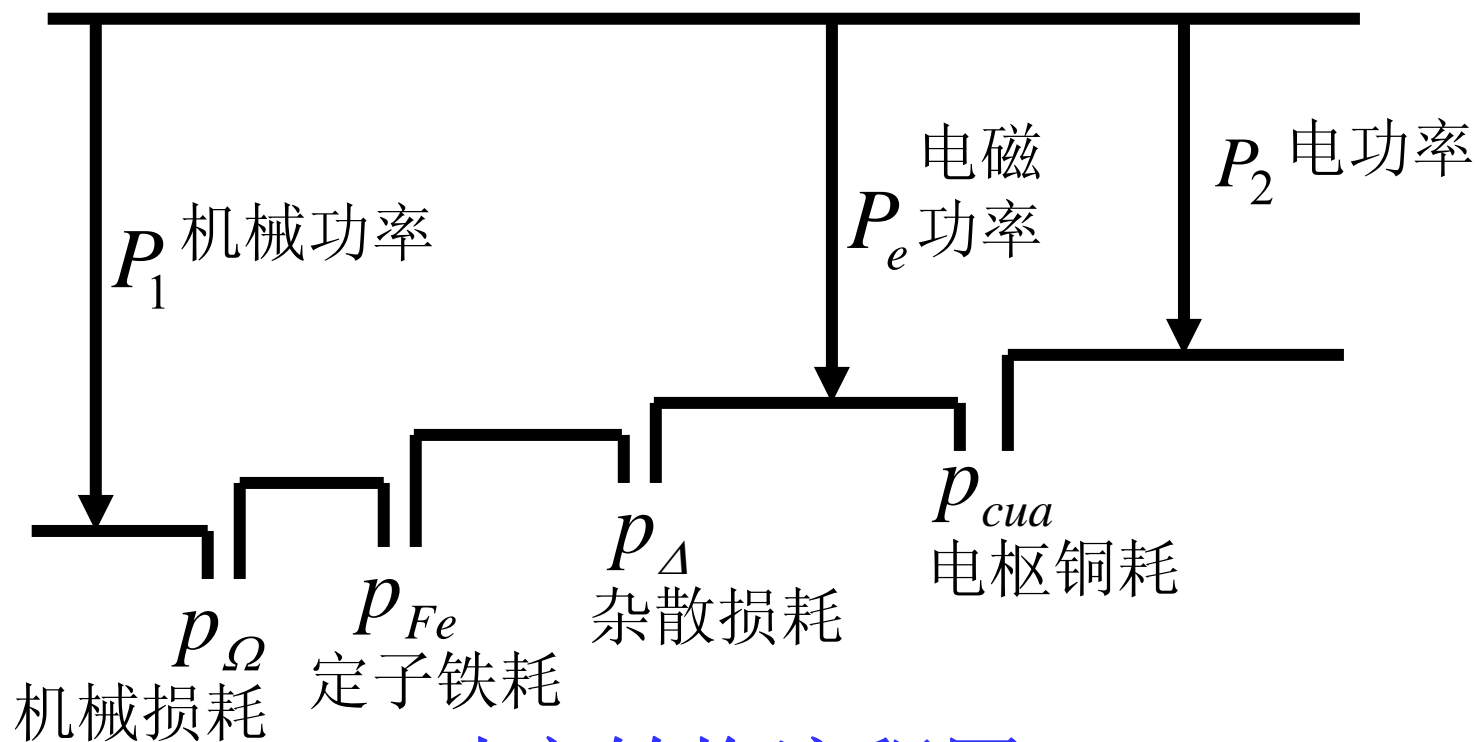
第五节 同步发电机的 功率和转矩方程

- 一、功率方程
- 二、电磁功率
- 三、转矩方程



一、功率方程

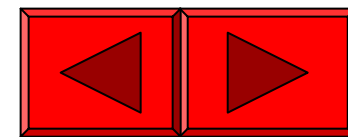
设转子励磁损耗由独立的直流电源供给



功率转换流程图

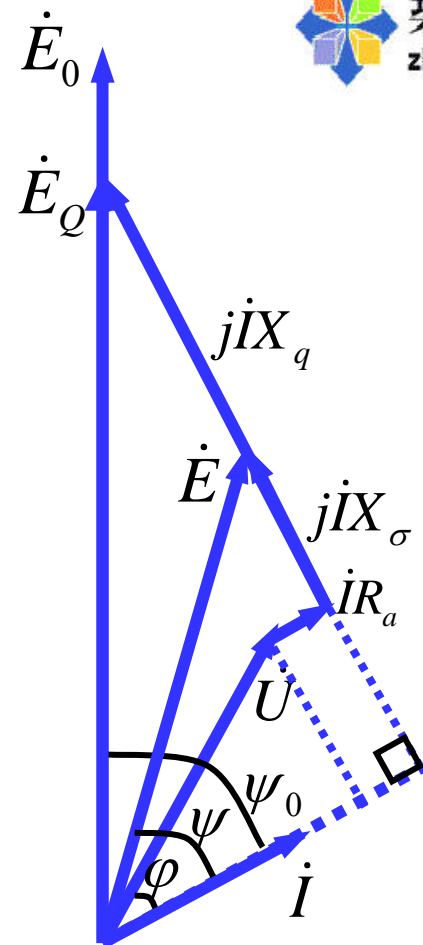
$$P_e = P_1 - p_{\Omega} - p_{Fe} - p_{\Delta} \quad (1)$$

$$P_2 = P_e - P_{cua} \quad (2)$$



二、电磁功率

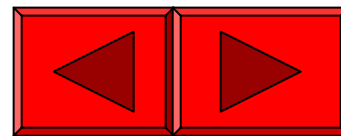
$$\begin{aligned}
 P_e &= P_2 + p_{cua} = mUI \cos \varphi + mI^2 R_a \\
 &= mI(U \cos \varphi + IR_a) \\
 &= mEI \cos \psi \\
 &= mE_Q I \cos \psi_0 \\
 &= mE_Q I_q
 \end{aligned}$$



相量图

ψ 是气隙电动势 \dot{E} 与电枢电流 \dot{I} 的夹角

$$U \cos \varphi + IR_a = E \cos \psi = E_Q \cos \psi_0$$



三、转矩方程

$$P_1 = P_e + (p_{\Omega} + p_{Fe} + p_{\Delta})$$

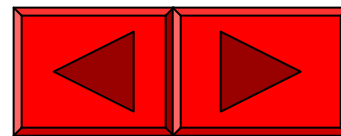
$$\frac{P_1}{\Omega_s} = \frac{P_e}{\Omega_s} + \frac{(p_{\Omega} + p_{Fe} + p_{\Delta})}{\Omega_s}$$

$$T_1 = T_e + T_0$$

空载制动转矩

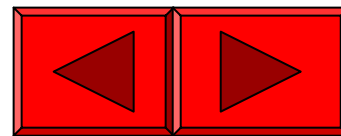
原动机驱动转矩

电磁转矩



第六节 同步电机参数的测定

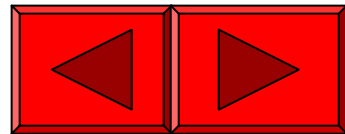
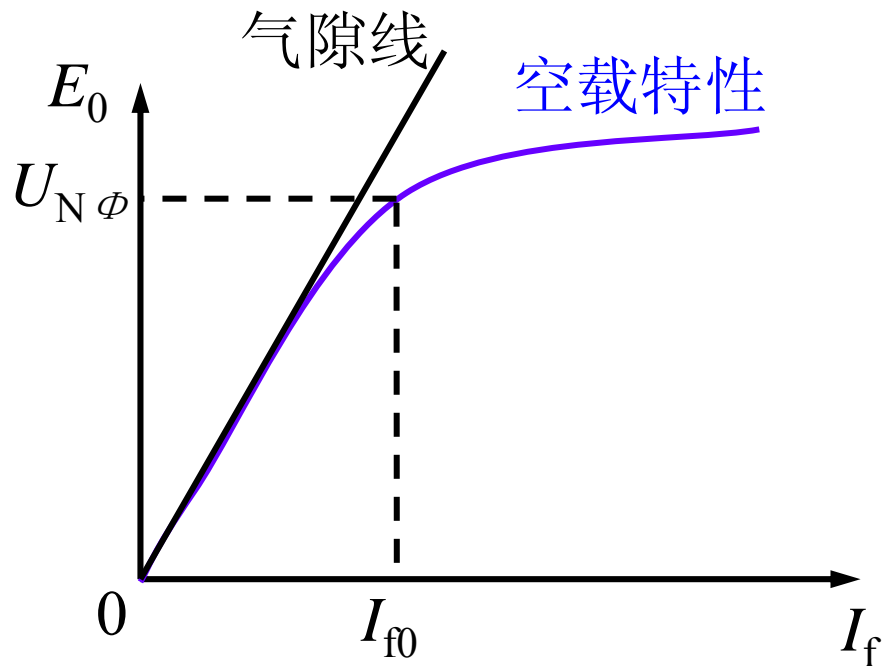
- 一、直轴同步电抗 X_d 的测定
- 二、短路比
- 三、定子漏抗 X_σ 的测定
- 四、直轴电枢等效磁动势



一、用空载特性和短路特性确定 X_d

1、空载特性

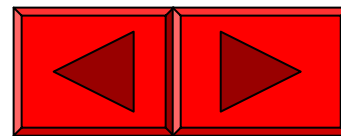
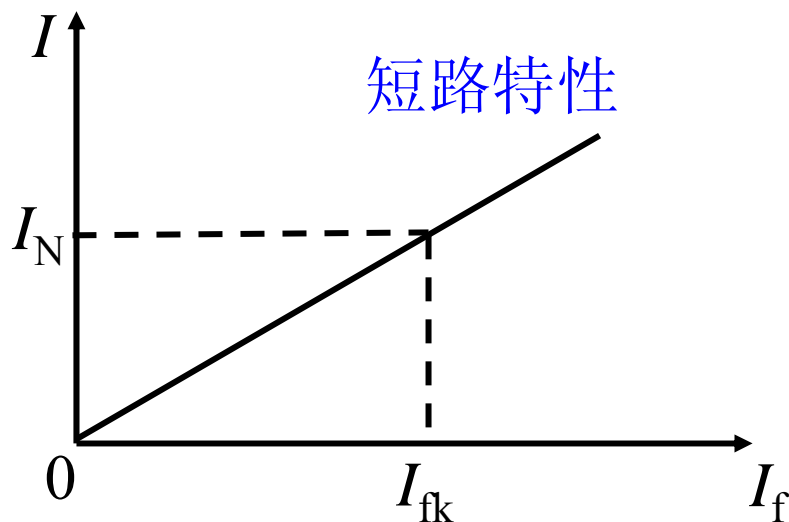
将电枢绕组开路，在同步转速下，测得激磁电动势 E_0 随励磁电流 I_f 变化的关系曲线 $E_0=f(I_f)$ ，称为同步电机的空载特性。
(即 $n = n_s$ ， $I = 0$ 时， $E_0=f(I_f)$ 曲线)



2、短路特性

将电枢绕组三相端头短接，在同步转速下，测得电枢稳态短路电流 I 随励磁电流 I_f 变化的关系曲线 $I=f(I_f)$ ，称为同步电机的短路特性。

（即 $n = n_s$ ， $U = 0$ 时， $I = f(I_f)$ 曲线）

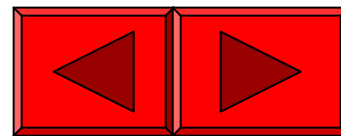


为什么短路特性是一条直线？

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

短路时，端电压 $U=0$ ，短路电流仅受电机本身阻抗的限制，一般电枢电阻远小于同步电抗，因此短路电流可认为是纯感性的，即 $\psi_0 \approx 90^\circ$ ，电枢磁动势基本上是纯去磁的直轴磁动势，因此 $\dot{I}_q = 0$ ， $\dot{I} = \dot{I}_d$ ，于是 $\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \approx j\dot{I}X_d$ ，可得 $I \propto E_0$ 。

气隙电动势 $\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_\sigma \approx j\dot{I}X_\sigma$ ，可见气隙电动势很小，仅等于电枢漏抗压降，因此其对应的气隙合成磁通很小，电机磁路处于不饱和状态，于是 $E_0 \propto I_f$ ，而短路电流 $I \propto E_0$ ，因此 $I \propto I_f$ ，短路特性为一条直线。

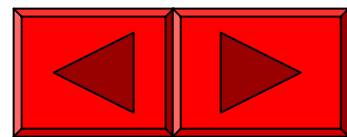
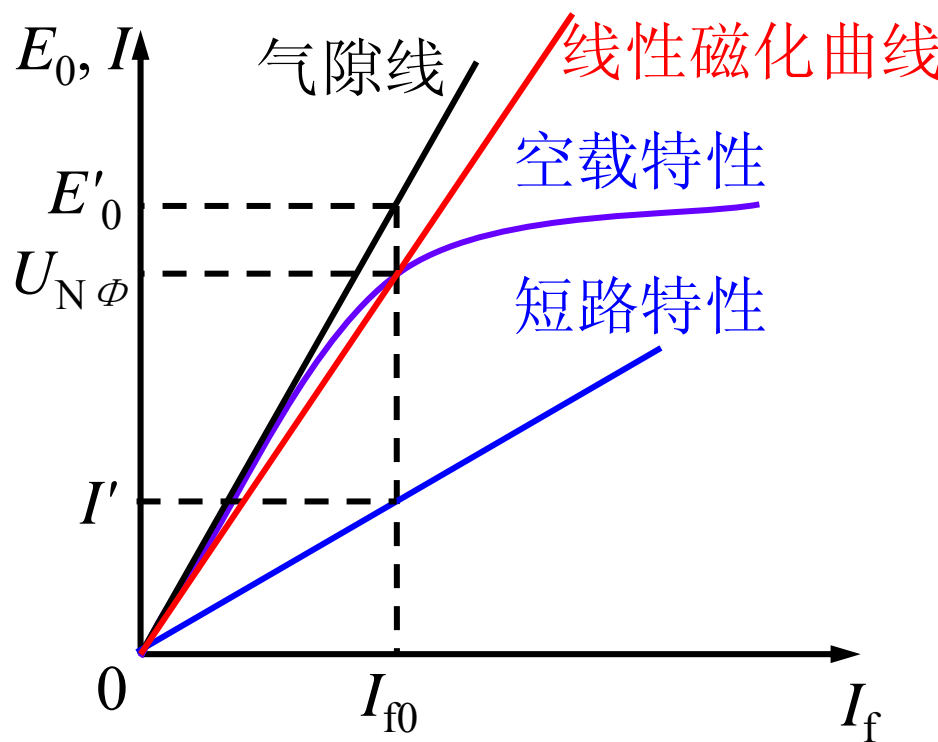
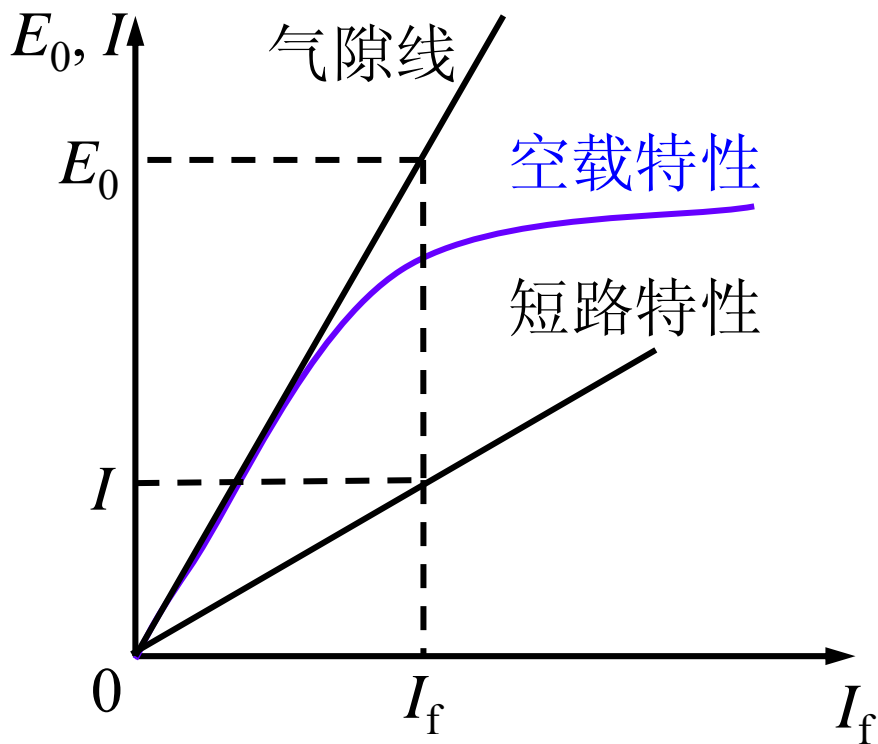


3、直轴同步电抗的确定

$$X_d = \frac{E_0}{I}$$

E_0 应从气隙线上查出

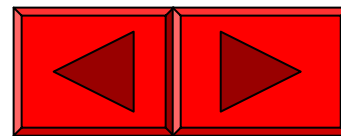
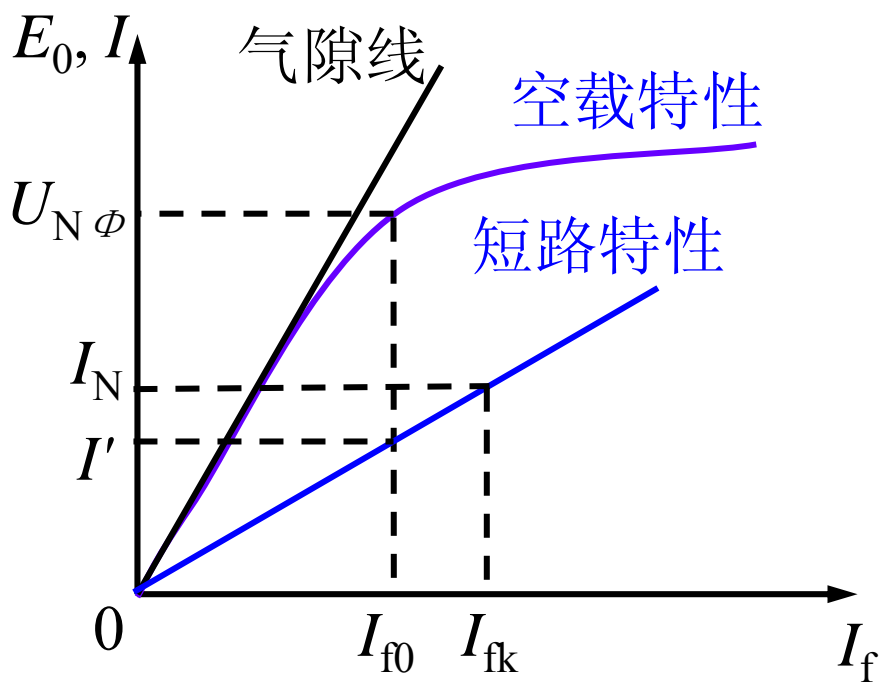
$$\begin{aligned} X_{d(\text{饱和})} &\approx \frac{U_{N\phi}}{I'} \\ &= \frac{U_{N\phi}}{E'_0} \cdot \frac{E'_0}{I'} = \frac{X_d}{k_\mu} \end{aligned}$$



二、短路比 K_c

$$K_c = \frac{I_{f0}(U=U_{N\phi})}{I_{fk}(I=I_N)}$$

$$= \frac{I'}{I_N} = \frac{I'}{U_{N\phi}} \cdot \frac{U_{N\phi}}{I_N} \approx \frac{Z_b}{X_{d(\text{饱和})}} = \frac{1}{X_{d(\text{饱和})}^*} = k_\mu \frac{1}{X_d^*}$$

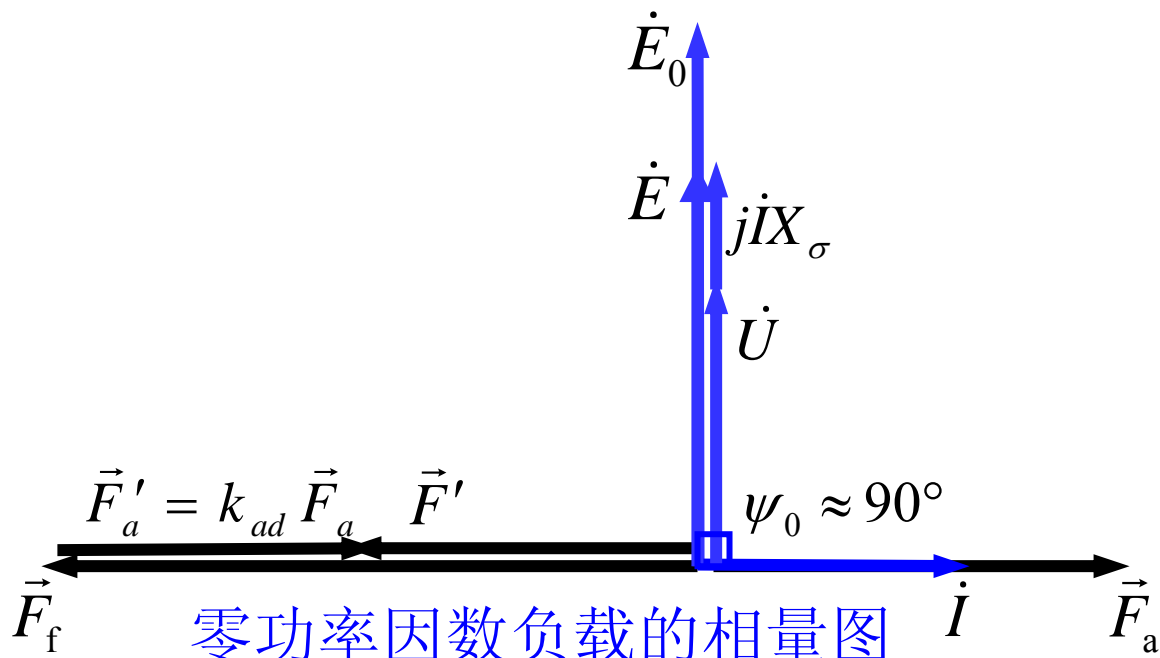


三、用零功率因数负载特性确定定子漏抗 X_σ 电枢等效磁动势

1、零功率因数负载特性

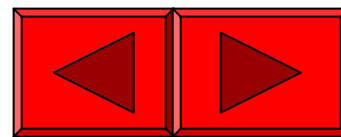
将电枢接到一个可调的三相对称纯感性负载上，使 $\cos \varphi \approx 0$ ，在同步转速下，保持电枢电流为常值(例如 $I = I_N$)，测得同步电机端电压 U 随励磁电流 I_f 变化的关系曲线 $U = f(I_f)$ ，称为同步电机的零功率因数负载特性。

(即 $n = n_s$ ， $I = \text{常值}$ ， $\cos \varphi \approx 0$ 时， $U = f(I_f)$ 曲线)

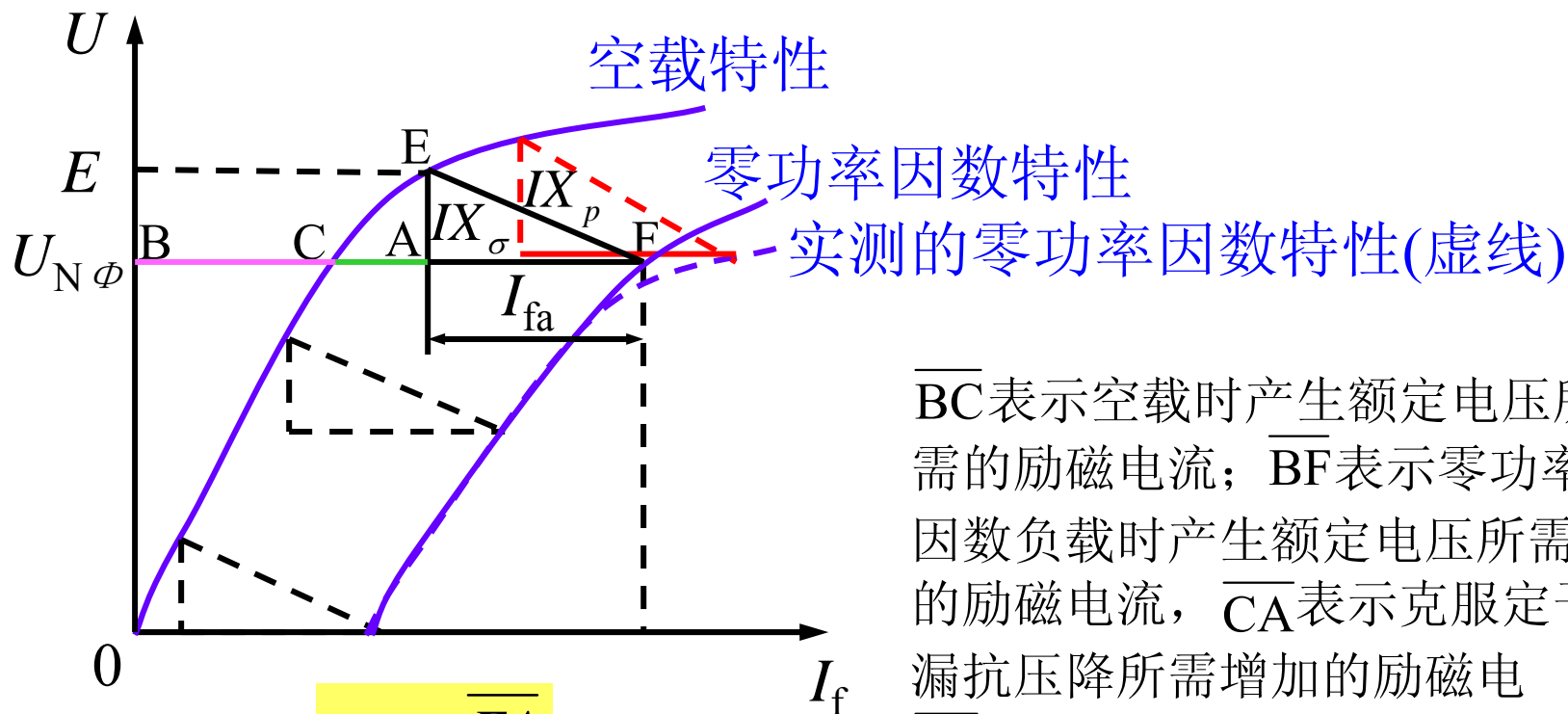


$$F_f \approx F' + k_{ad} F_a$$

$$E \approx U + IX_\sigma$$



零功率因数负载特性的分析

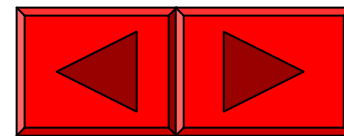


$$X_\sigma = \frac{\overline{EA}}{I}$$

$$k_{ad} F_a = F'_a = I_{fa} N_f = \overline{AF} \cdot N_f$$

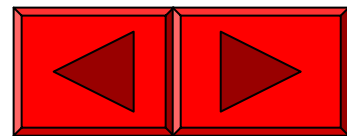
\overline{BC} 表示空载时产生额定电压所需的励磁电流； \overline{BF} 表示零功率因数负载时产生额定电压所需的励磁电流， \overline{CA} 表示克服定子漏抗压降所需增加的励磁电流

\overline{AF} 表示克服去磁电枢反应所需增加的励磁电流。



第七节 同步发电机的运行特性

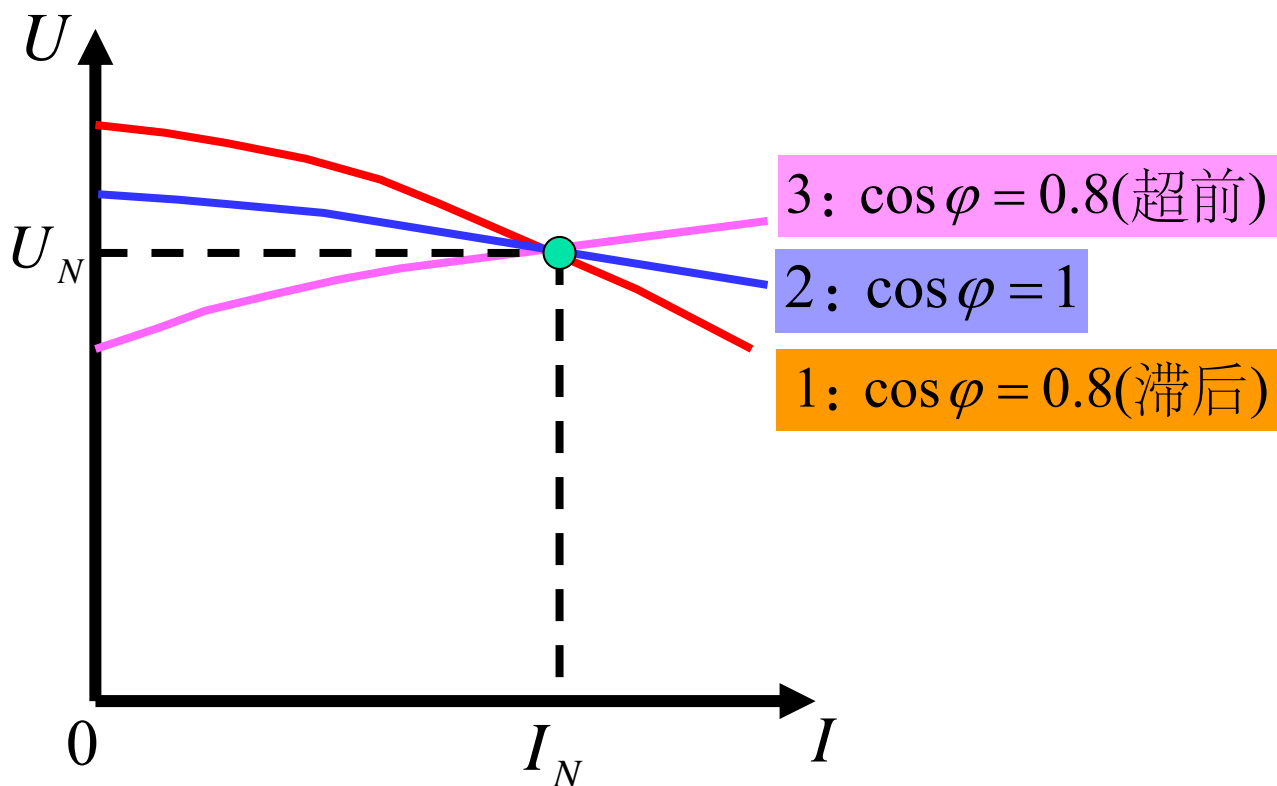
- 一、外特性
- 二、调整特性
- 三、效率特性



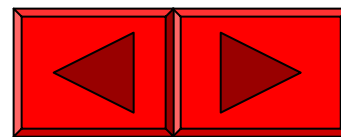
一、外特性

在同步转速下，保持励磁电流和负载功率因数为常值，测得同步发电机端电压 U 随电枢电流 I 变化的关系曲线 $U=f(I)$ ，称为同步发电机的外特性。

(即 $n = n_s$ ， $I_f = \text{常值}$ ， $\cos \varphi = \text{常值}$ 时， $U = f(I)$ 曲线)



不同功率因数时同步发电机的外特性



曲线1: $\cos \varphi = 0.8$ (滞后), 曲线下降, 原因:

(1) $I \uparrow \rightarrow$ 电枢反应去磁作用 $\uparrow \rightarrow U \downarrow$

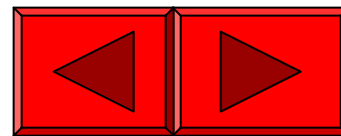
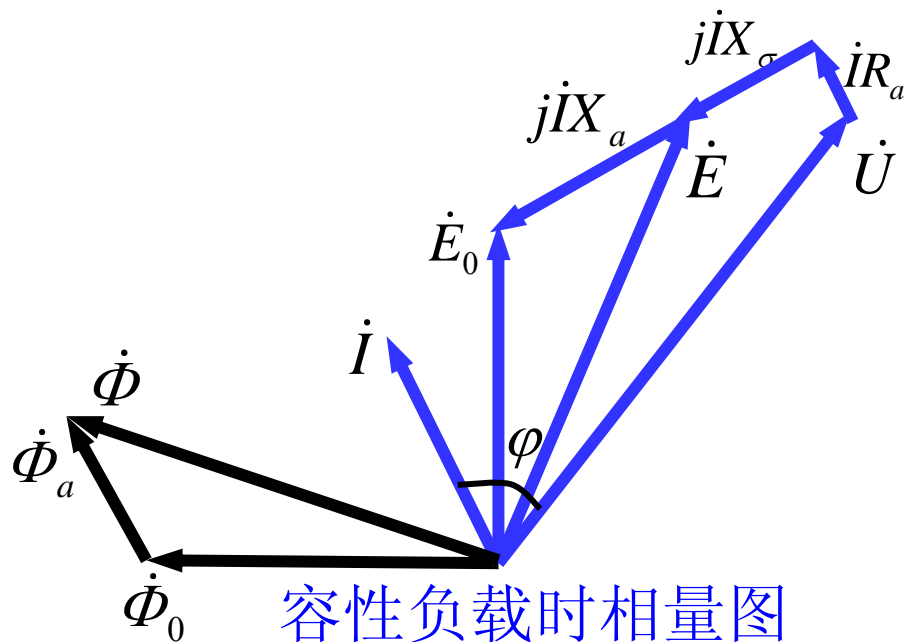
(2) $I \uparrow \rightarrow$ 漏阻抗压降 $\uparrow \rightarrow U \downarrow$

曲线2: $\cos \varphi = 1$, 曲线下降, 原因:

$\varphi = 0$, $\psi_0 \neq 0$, 原因同上。

曲线3: $\cos \varphi = 0.8$ (超前), 曲线上升, 原因:

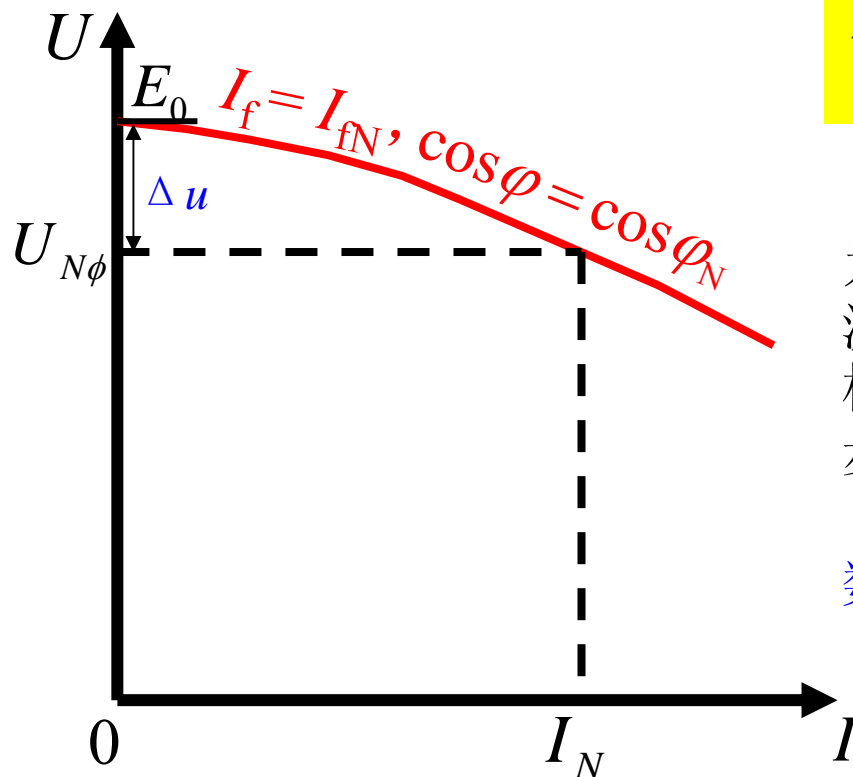
电枢反应增磁作用和容性电流的漏抗电压引起端电压 $U \uparrow$



从外特性求电压调整率 Δu

调节发电机的励磁电流，使电枢电流为额定电流，功率因数为额定功率因数，端电压为额定电压，此励磁电流称为发电机的额定励磁电流 I_{fN} 。

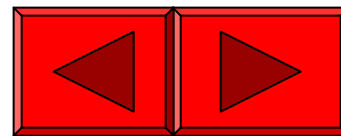
保持励磁电流为 I_{fN} ，转速为同步转速 n_s 不变，卸去负载(即 $I = 0$)，此时端电压升高的百分值称为同步发电机的电压调整率。



$$\Delta u = \frac{E_0 - U_{N\phi}}{U_{N\phi}} \times 100\%$$

为使电网电压不致有太大波动，要求凸极同步发电机 $\Delta u = 18\% \sim 30\%$ ，隐极同步发电机 $\Delta u = 30\% \sim 48\%$ 。

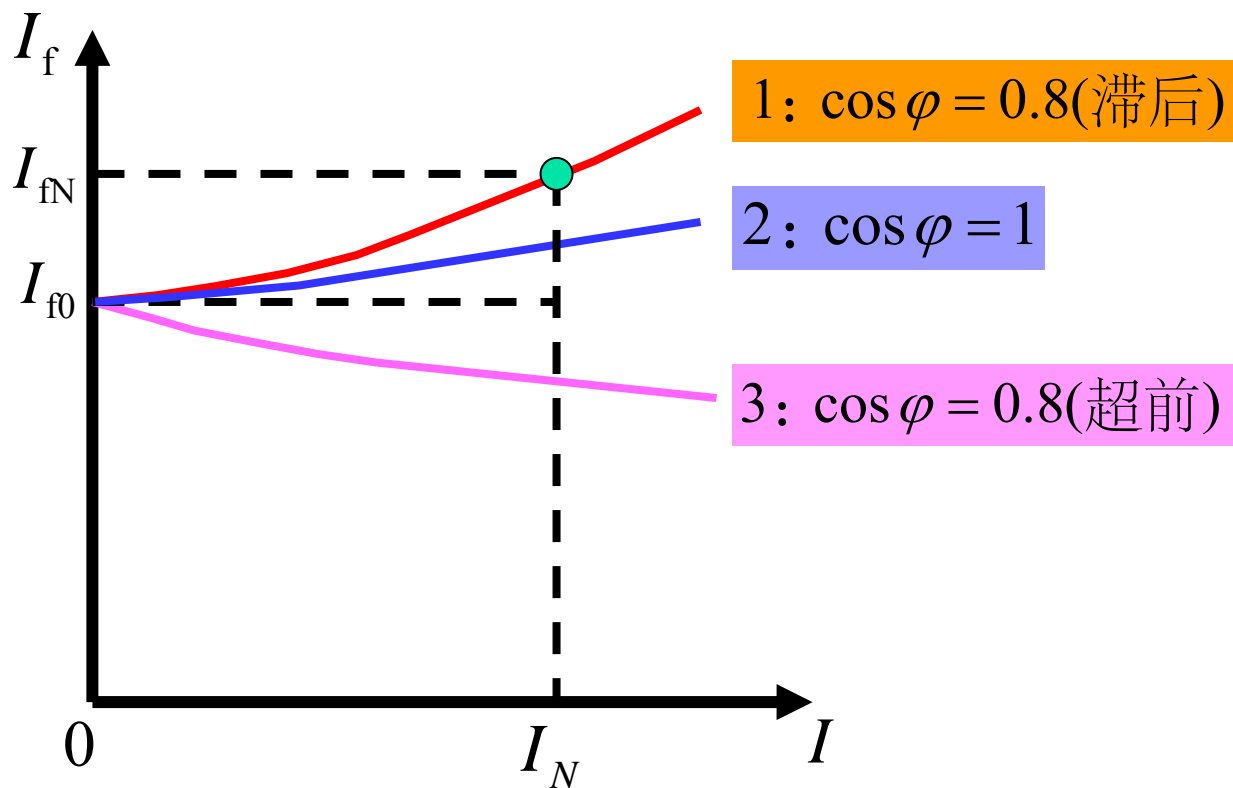
(均为 $\cos\phi = 0.8$ 滞后时的数值)



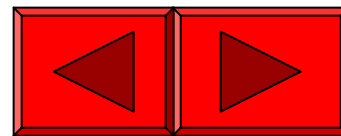
二、调整特性

在同步转速下，保持端电压为额定电压，功率因数为常值时，励磁电流 I_f 与电枢电流 I 的关系曲线 $I_f = f(I)$ ，称为同步发电机的调整特性。

(即 $n = n_s$, $U = U_N$, $\cos\varphi = \text{常值}$ 时, $I_f = f(I)$ 曲线)



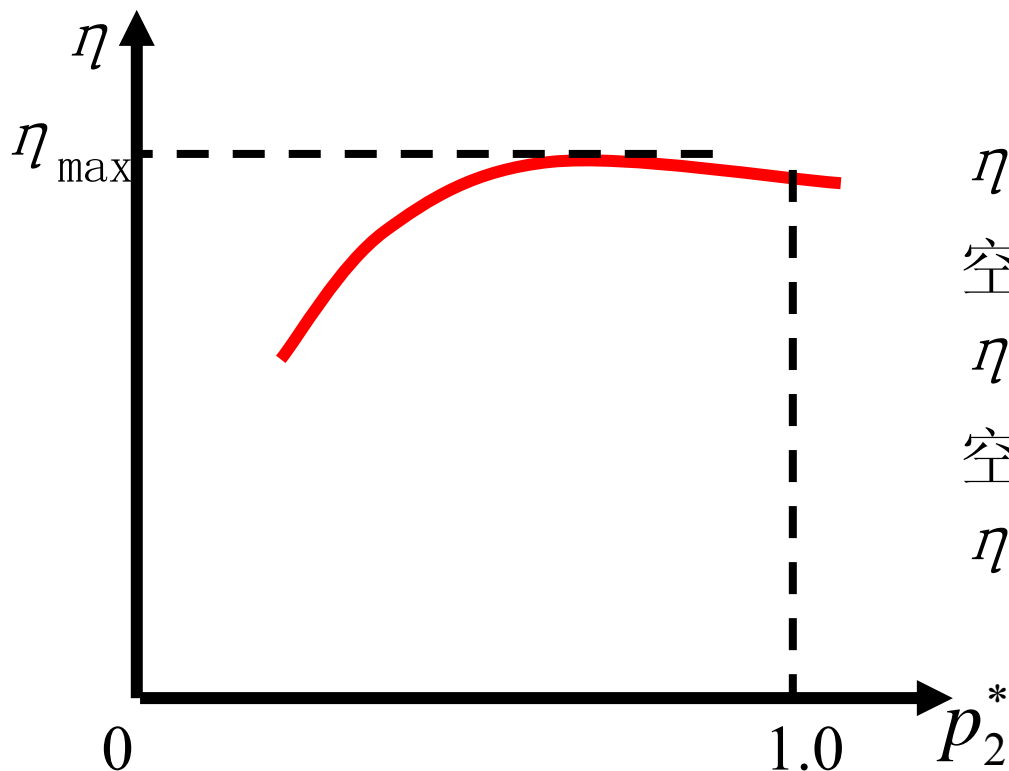
不同功率因数时同步发电机的调整特性



三、效率特性

在同步转速下，保持端电压为额定电压，功率因数为额定功率因数时，同步发电机的效率 η 与输出功率 P_2 的关系曲线 $\eta=f(P_2)$ ，称为同步发电机的效率特性。

(即 $n = n_s$, $U = U_N$, $\cos\varphi = \cos\varphi_N$ 时, $\eta = f(p_2)$ 曲线)



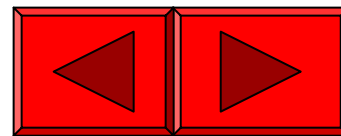
η_{\max} 发生在 $(0.7 \sim 1.1)P_N$

空冷大型水轮发电机:

$\eta_N = 96\% \sim 98.5\%$

空冷汽轮发电机:

$\eta_N = 94\% \sim 97.8\%$



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

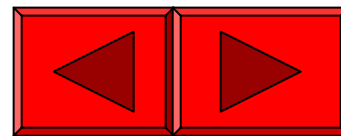
电机效率比变压器效率低，可用直接负载法：
测量 P_1 、 P_2 来计算效率。

也可用间接法（损耗分析法）：

先测出损耗 $\Sigma p = p_{Fe} + p_{cua} + p_{cuf} + p_{\Omega} + p_{\Delta}$ ，再计算效率。

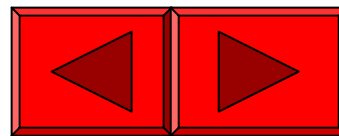
同轴励磁机：励磁损耗 p_{cuf} 由 P_1 供给；

单独拖动的电动机—励磁机组：励磁损耗 p_{cuf} 由励磁机组供给，而与 P_1 无关。



第八节 同步发电机与电网的 并联运行

- 一、并联运行
- 二、功角特性
- 三、有功功率调节和静态稳定
- 四、无功功率调节

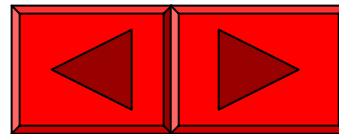


一、并联运行

发电厂通常采用发电机并联运行方式，即两台或两台以上发电机的三相绕组分别接在公用三相母线上，共同向用户提供有功、无功功率。许多发电厂再并联起来组成强大电网。

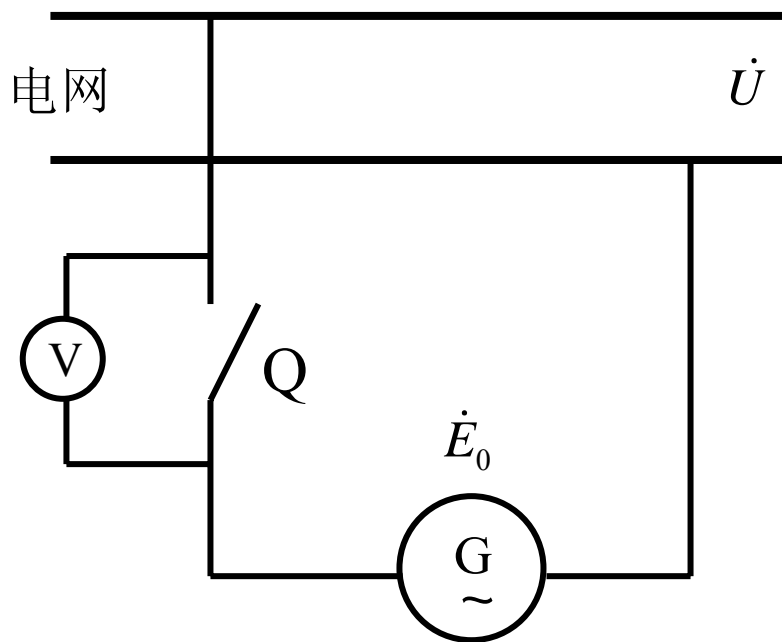
并联运行优点：

- (1)、提高发电厂运行效率；
- (2)、提高供电可靠性；
- (3)、提高供电质量；
- (4)、合理利用能源，提高经济效益。

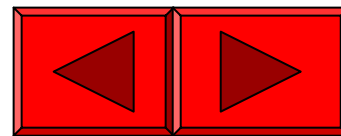


1、投入并联的条件

- (1)、发电机相序应与电网一致；
- (2)、发电机频率应与电网相同；
- (3)、发电机激磁电动势 \dot{E}_0 应与电网电压 \dot{U} 大小相等、相位相同，即 $\dot{E}_0 = \dot{U}$ 。

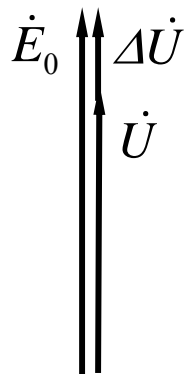


投入并联示意图

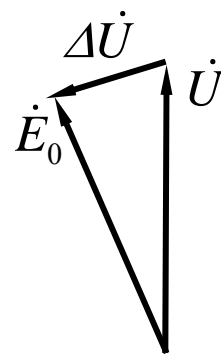


不满足并联条件的后果:

(1)、 \dot{E}_0 与 \dot{U} 大小不等



(2)、 \dot{E}_0 与 \dot{U} 相位不同

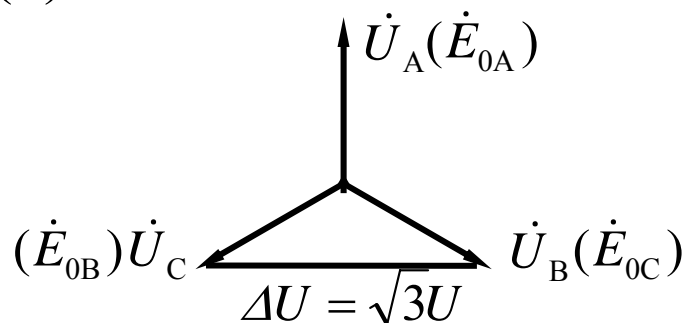


电压差 → 强大环流 → 巨大电磁力(破坏绕组)和冲击力矩(转轴受冲击)

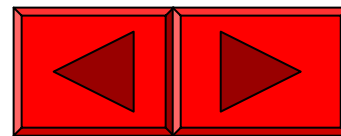
(3)、频率不等

变化电压差(拍振电压)
→ 拍振电流 → 交变力矩
(发电机振动)和功率振荡

(4)、相序不同



绝不允许并联



2、投入并联的方法

(1)、准确整步法（准确同步法、准确同期法）

把发电机调整到完全合乎并联条件，然后投入电网，称为准确整步。

准确整步法**优点**：无冲击电流；**缺点**：操作复杂。

(2)、自整步法（自同步法、自同期法）

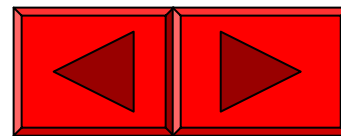
电力系统发生故障时，电压、频率均在变化，很难调整到完全合乎并联条件，为把发电机迅速投入电网，采用自整步法，事故后能迅速合闸，但冲击电流大。

自整步法**优点**：操作简单、迅速；**缺点**：有冲击电流。

为了投入并联所进行的调节和操作过程，称为整步过程。

将发电机调整到符合并联条件时，称发电机达到同步或同期。

将发电机投入电网，称为并网、并列、或并车。



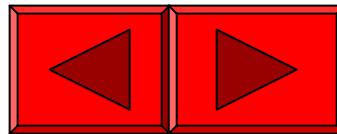
(1)、准确整步法

判断是否满足并联条件常采用同步指示器（包括同步指示灯、电压表、频率表、整步表等），最简单的同步指示器由三组同步指示灯组成。

检查是否满足并联条件的方法：灯光法和整步表法。

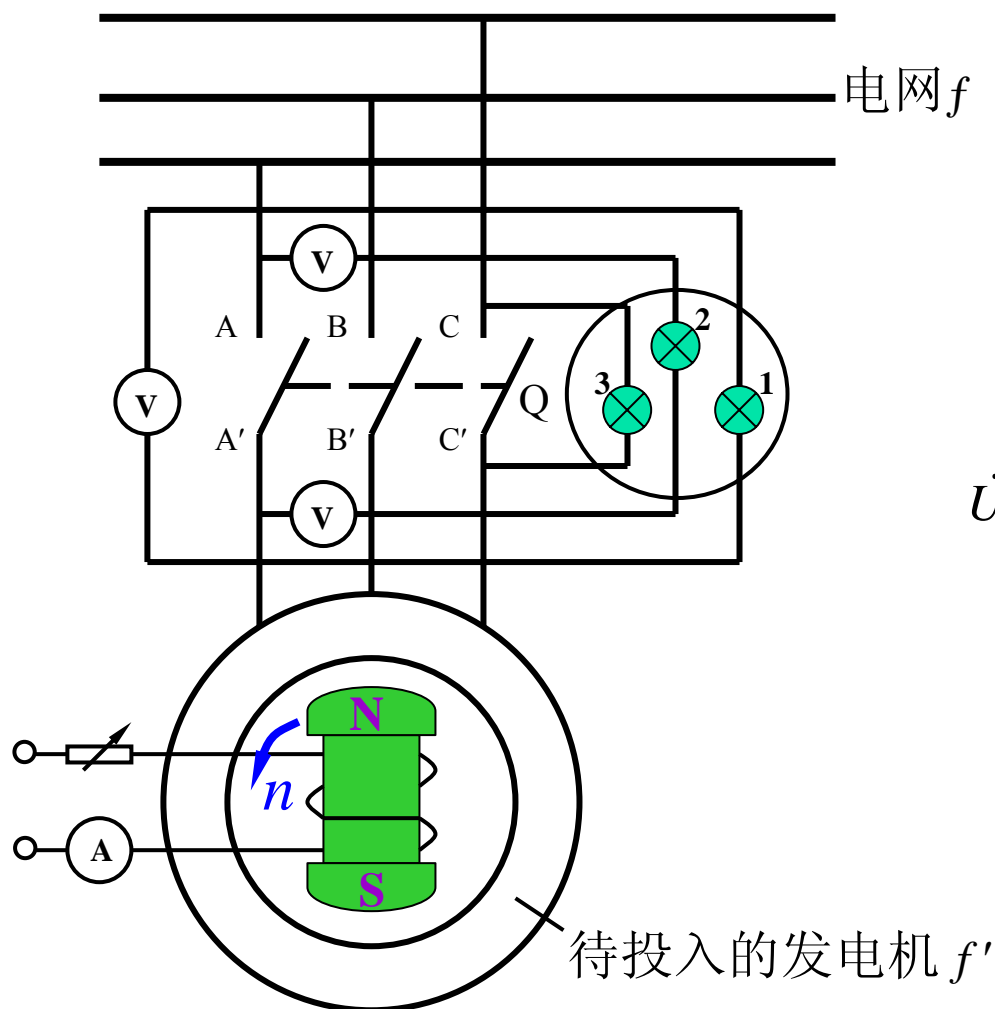
灯光法有两种接法：直接接法（灯光熄灭法）

交叉接法（灯光旋转法）

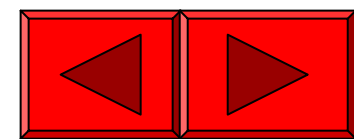
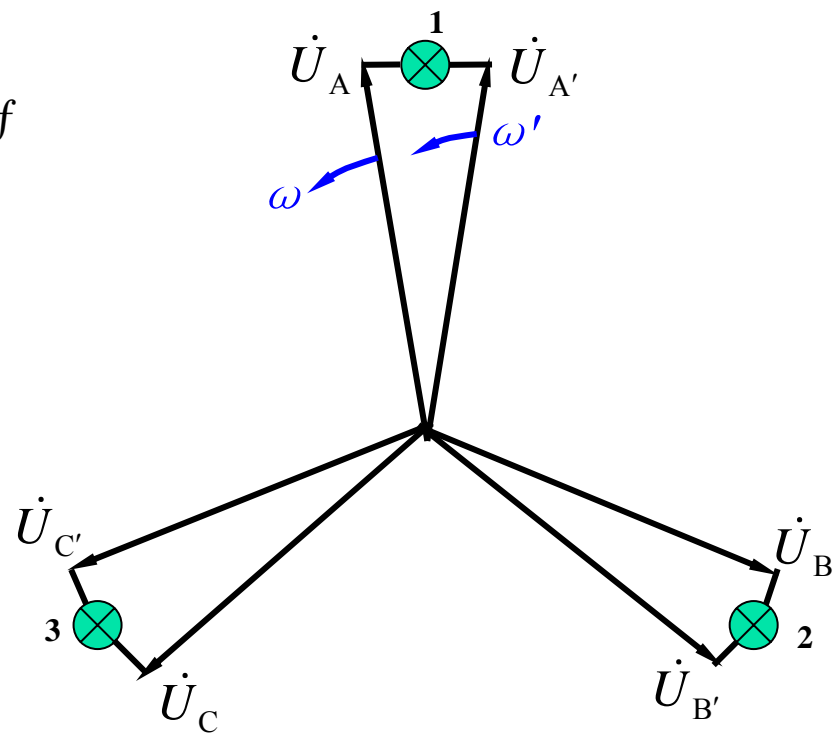


直接接法的接线图和相量图

(a) 接线图

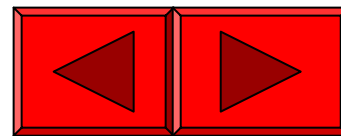


(b) 相量图



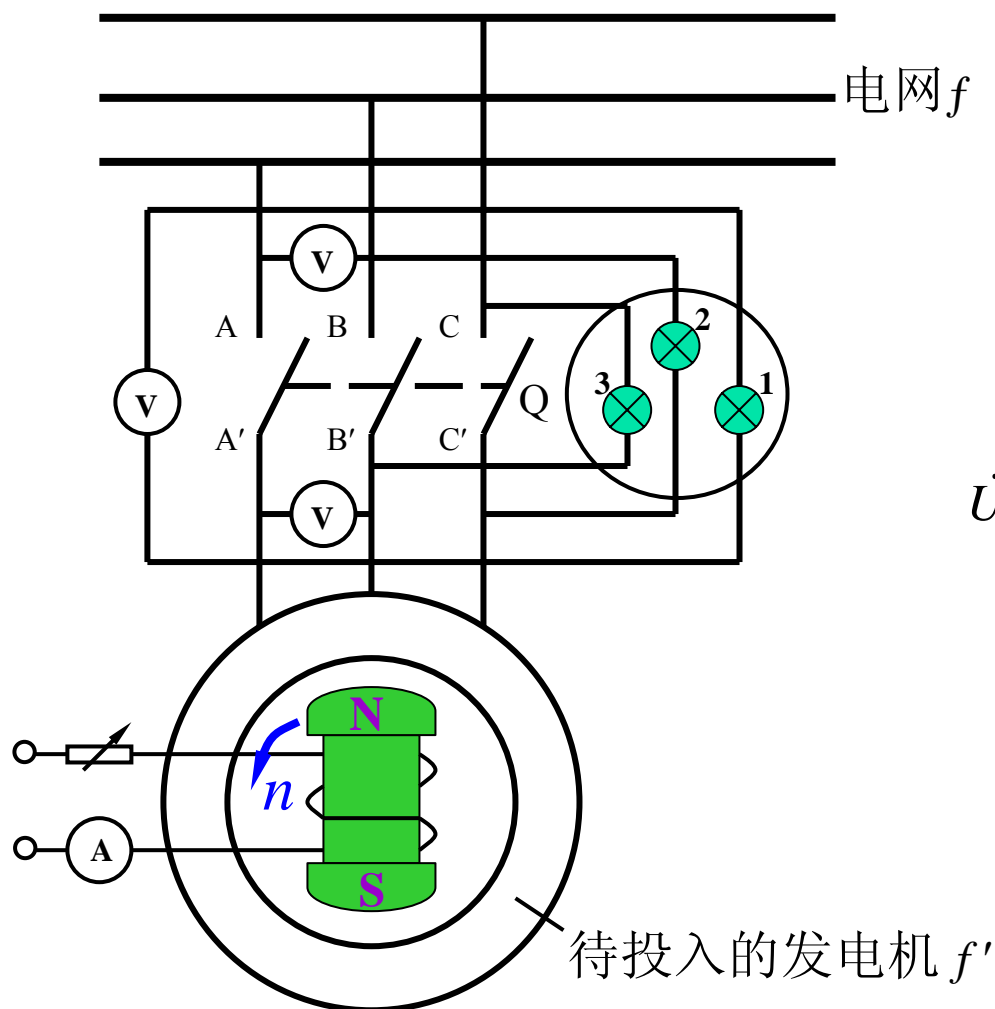
直接接法

- (a)、频率不等：三组灯同时忽亮忽暗，灯光闪烁；
 - (b)、电压大小或相位不等：长亮不闪；
 - (c)、相序不同且频率不等时：三组灯轮流亮暗，灯光旋转。
- 在三组灯同时熄灭，且A'与A之间的电压表指示为零时的瞬间，合闸投入并联。

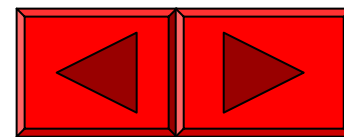
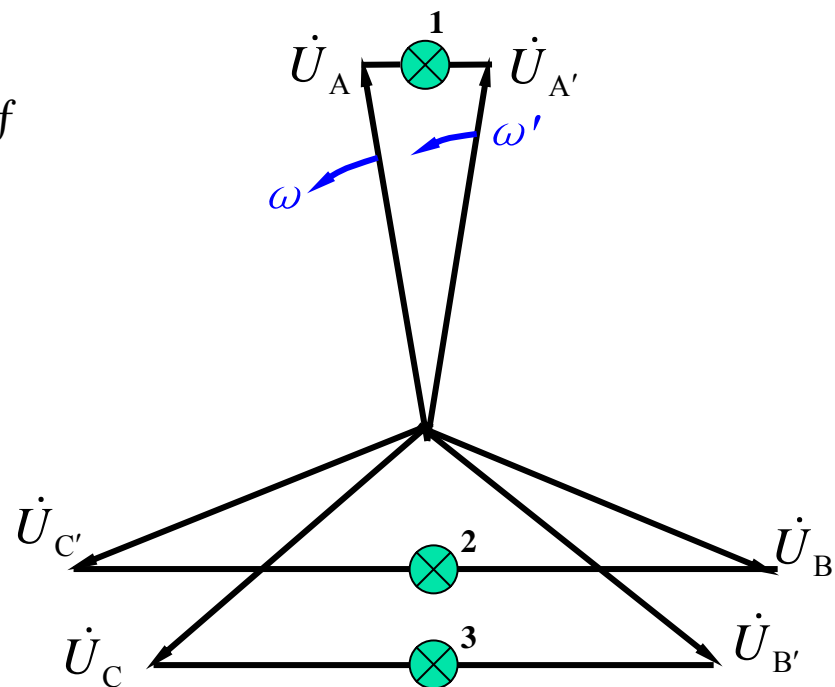


交叉接法的接线图和相量图

(a) 接线图



(b) 相量图



交叉接法

(a)、频率不等：三组灯轮流亮暗，灯光旋转；

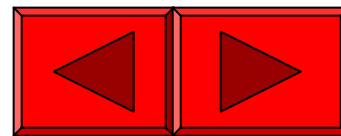
$f' > f$ ，灯光按逆时针方向旋转；

$f' < f$ ，灯光按顺时针方向旋转。

(b)、电压大小或相位不等：长亮不闪；

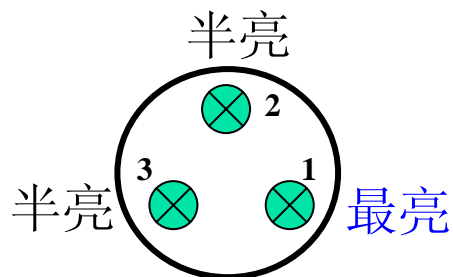
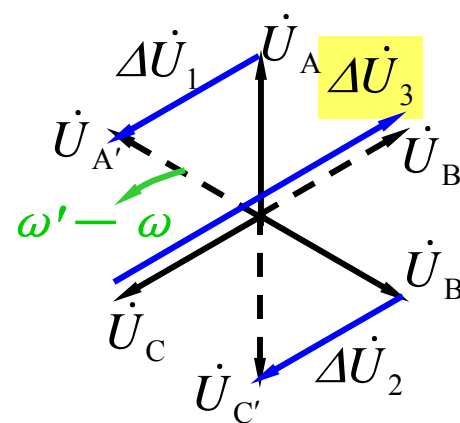
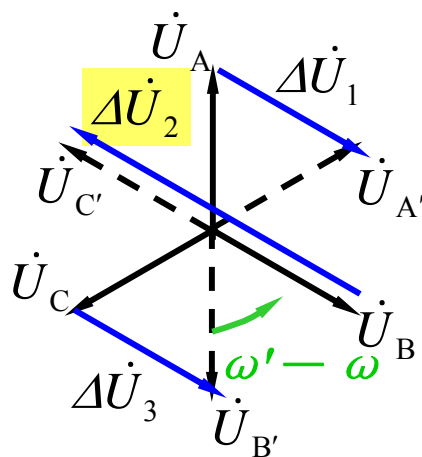
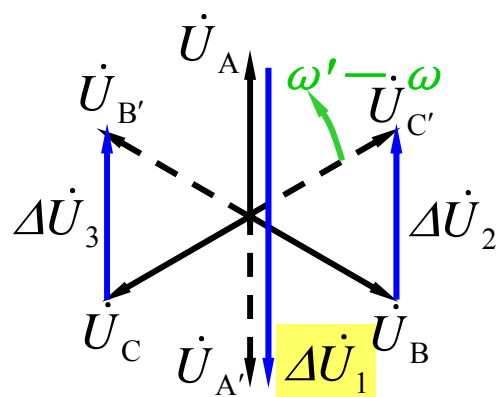
(c)、相序不同且频率不等时：三组灯同时忽亮忽暗，灯光闪烁。

在灯1熄灭，灯2和灯3亮度相同，且A'与A之间的电压表指示为零时的瞬间，合闸投入并联。

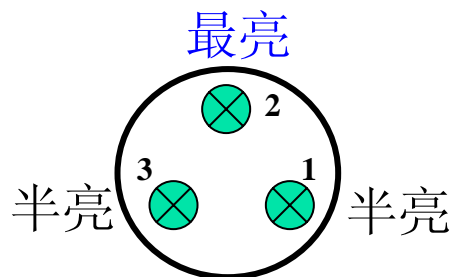


交叉接法灯光旋转的分析

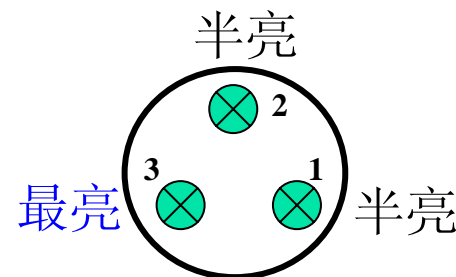
(假设 $f' > f$)



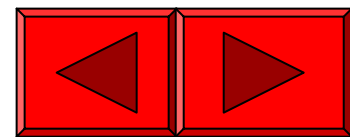
(a)



(b)

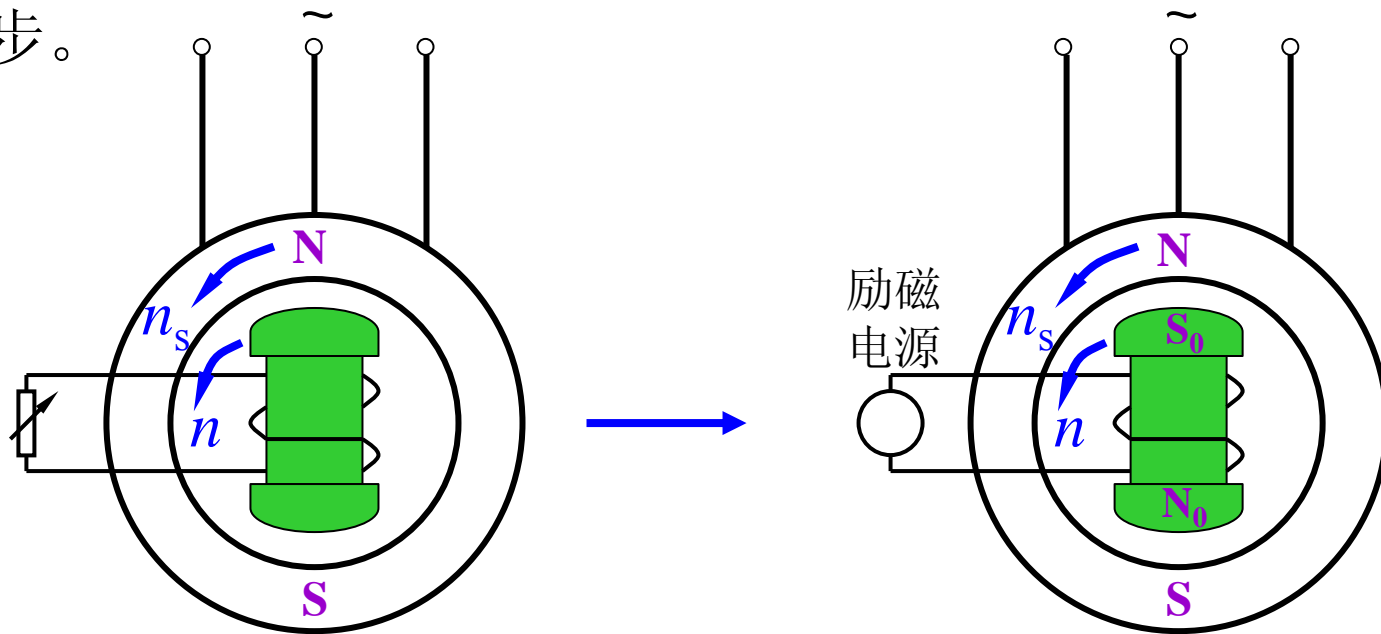


(c)

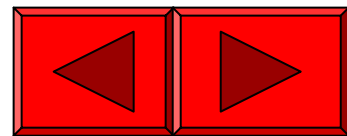


(2)、自整步法

首先校验发电机相序，然后将励磁绕组经限流电阻短路，用原动机将发电机拖动到接近同步转速时，将发电机投入电网，再立即加上直流励磁，利用定、转子磁场间形成的电磁转矩的“自整步作用”，迅速将发电机牵入同步。

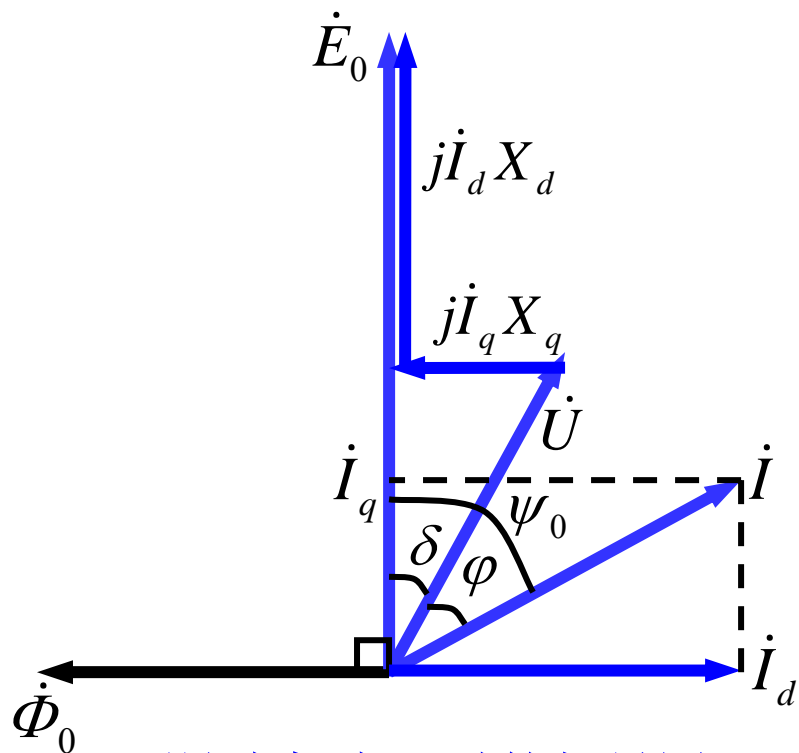


自整步法的接线示意图



二、功角特性

同步发电机接在电网上稳态对称运行时，在恒定励磁和恒定电网电压下（即 $E_0 = \text{常值}$ ， $U = \text{常值}$ ），发电机发出的电磁功率 P_e 与功率角 δ 之间的关系曲线 $P_e = f(\delta)$ ，称为同步发电机的功角特性。



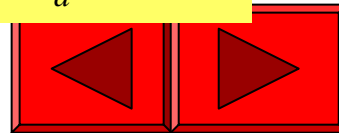
不计电枢电阻时的相量图

$$\begin{aligned}
 P_e &\approx mUI \cos \varphi && \text{（忽略电枢电阻）} \\
 &\approx mUI \cos(\psi_0 - \delta) \\
 &= mUI(\cos \psi_0 \cos \delta + \sin \psi_0 \sin \delta) \\
 &= mU(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta)
 \end{aligned}$$

$$I_q X_q = U \sin \delta \quad I_d X_d = E_0 - U \cos \delta$$

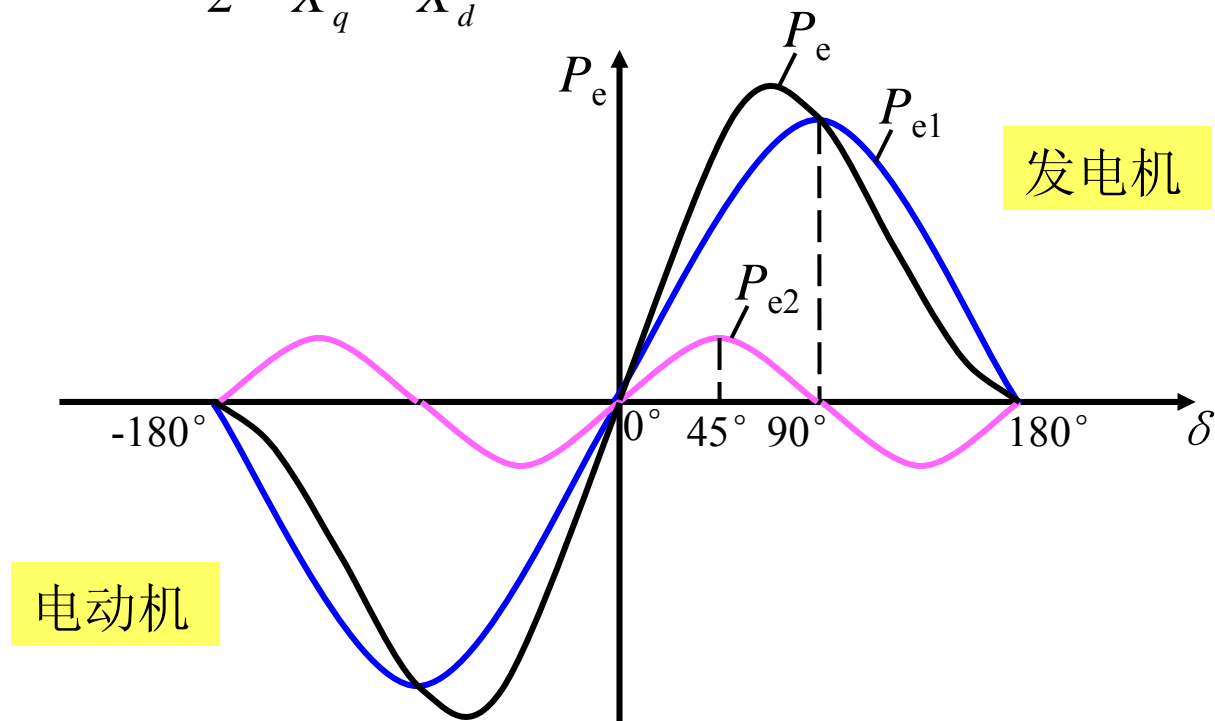
$$I_q = \frac{U \sin \delta}{X_q} \quad I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}$$

$$P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$



$$P_{e1} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta \quad \text{— 基本电磁功率}$$

$$P_{e2} = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad \text{— 附加电磁功率, 或磁阻功率}$$



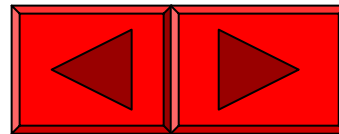
同步电机功角特性

$$\delta = 90^\circ \text{ 时, } P_{e1\max} = m \frac{E_0 U}{X_d}$$

$$\delta = 45^\circ \text{ 时, } P_{e2\max} = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

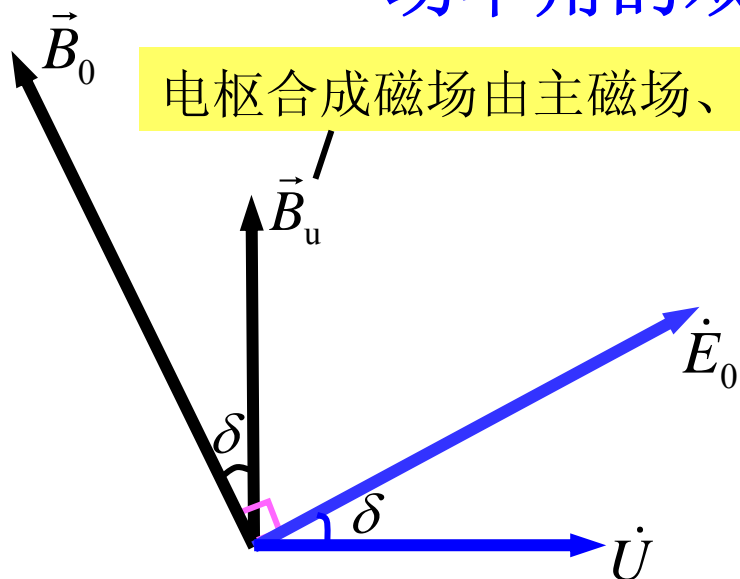
$$45^\circ < \delta < 90^\circ \text{ 时}$$

$$P_{e\max} \neq P_{e1\max} + P_{e2\max}$$



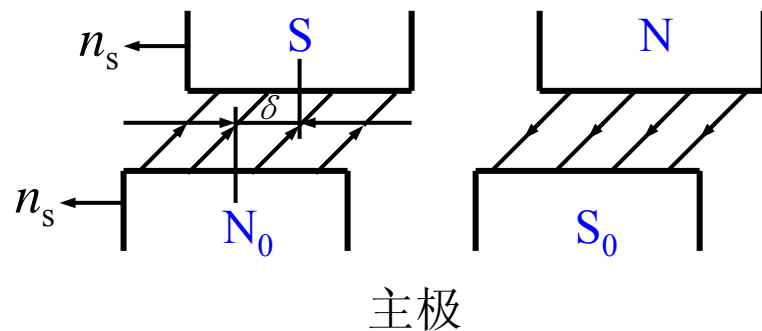
功率角的双重物理意义

电枢合成磁场由主磁场、电枢反应磁场和电枢漏磁场合成



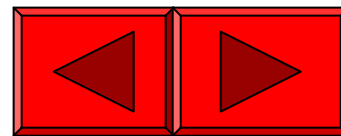
(a) 时空矢量图

表征电枢合成磁场的等效磁极



(b) 功率角的近似空间表达

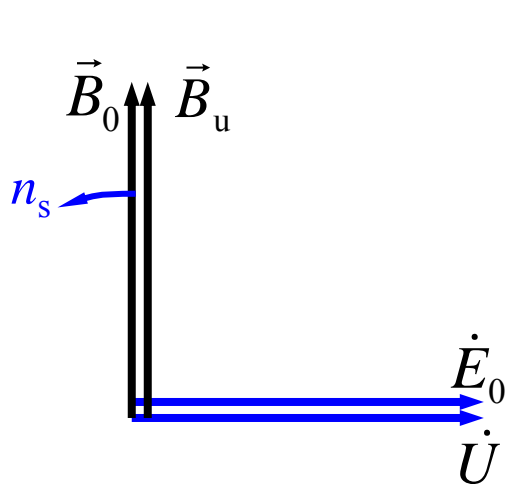
激磁电动势 \dot{E}_0 由主磁场 \vec{B}_0 感应产生，电枢端电压 \dot{U} 由电枢合成磁场 \vec{B}_u 感应产生，因此功率角 δ 既是激磁电动势 \dot{E}_0 和电枢端电压 \dot{U} 的时间相位差，也是主磁场 \vec{B}_0 与电枢合成磁场 \vec{B}_u 的空间相位差。



三、有功功率调节和静态稳定

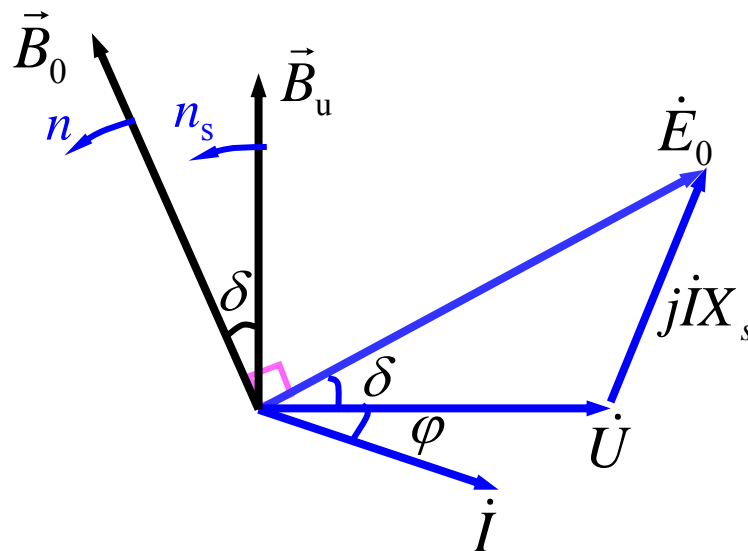
1、有功功率调节（设保持 $I_f = \text{常值}$ ）

分析前提：设发电机为隐极机，不计磁路饱和，忽略电枢电阻，电网为“无穷大电网”（即 $U = \text{常值}$ ， $f = \text{常值}$ ）。



功率角 $\delta = 0$ 时的相量图

$$P_2 \approx P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta = 0$$

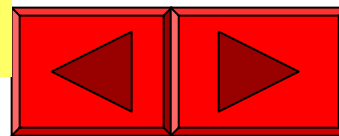


功率角为 δ 时的相量图

$$P_2 \approx P_e = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta$$

$$P_{2\max} \approx P_{e\max} = m \frac{E_0 U}{X_d}$$

调节原动机输入功率就可以调节同步发电机输出的有功功率

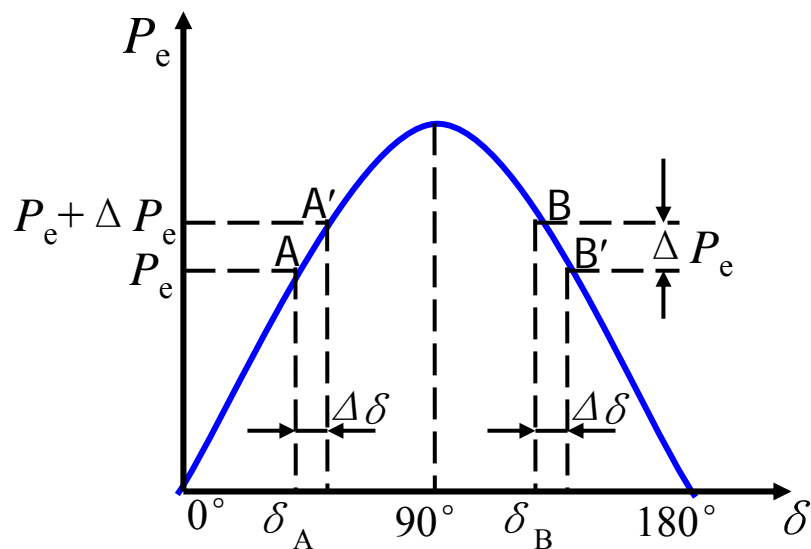


2、静态稳定

与电网并联、在某一工作点运行的同步发电机，当外界（电网或原动机）发生微小的扰动，在扰动消失后，发电机能否回复到原先的状态下稳定运行，此问题称为同步发电机的静态稳定问题。如能回复，则是静态稳定的，反之，则不是静态稳定的。

A点是静态稳定点

B点不是静态稳定点



$0^\circ < \delta < 90^\circ$ 时， $\frac{dP_e}{d\delta} > 0$ ，是静态稳定的；

$\delta = 90^\circ$ 时， $\frac{dP_e}{d\delta} = 0$ ，为静态稳定极限；

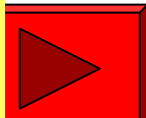
$90^\circ < \delta < 180^\circ$ 时， $\frac{dP_e}{d\delta} < 0$ ，不是静态稳定的。

$$\text{过载能力 } k_P = \frac{P_{e\max}}{P_N} \approx \frac{m \frac{E_0 U}{X_s}}{m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta_N} = \frac{1}{\sin \delta_N}$$

在 $0^\circ < \delta < 90^\circ$ 稳定运行区内，

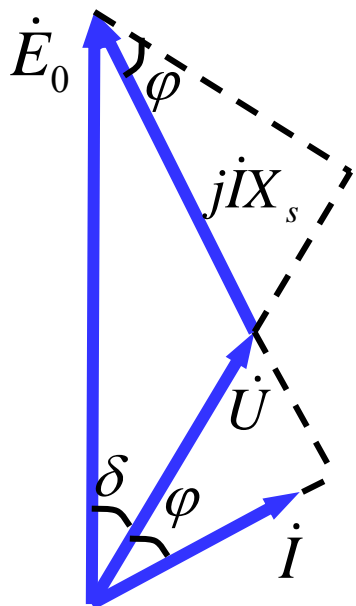
δ 越小， $\frac{dP_e}{d\delta}$ 越大，

电机的稳定性越好。



四、无功功率调节

1、无功功率功角特性（以隐极同步发电机为例）



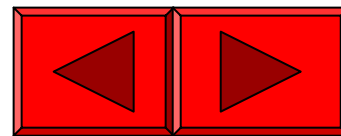
不计电枢电阻时的相量图

$$Q = mUI \sin \varphi$$

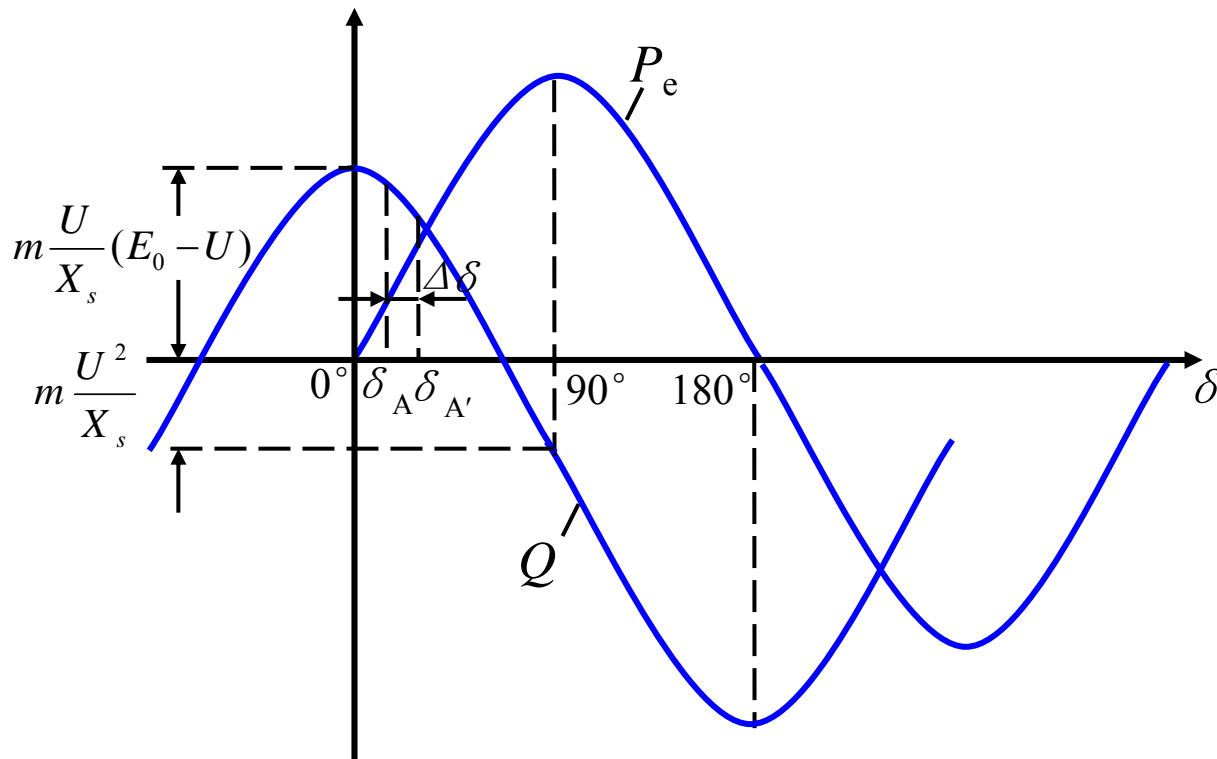
$$IX_s \sin \varphi = E_0 \cos \delta - U$$

$$I \sin \varphi = \frac{E_0 \cos \delta - U}{X_s}$$

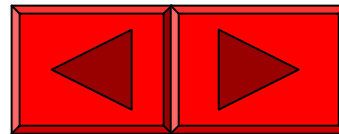
$$Q = m \frac{E_0 U}{X_s} \cos \delta - m \frac{U^2}{X_s}$$



$I_f = \text{常值}$ 时，增加原动机输入功率， $\delta_A \rightarrow \delta_{A'}$ ，功率角增大， P_2 增加，而 Q 减少。因此 $I_f = \text{常值}$ 时调节有功功率，会影响无功功率大小；反之 $I_f = \text{常值}$ 时调节无功功率，也会影响有功功率大小。



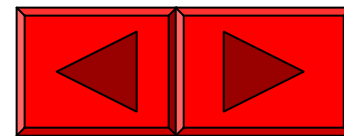
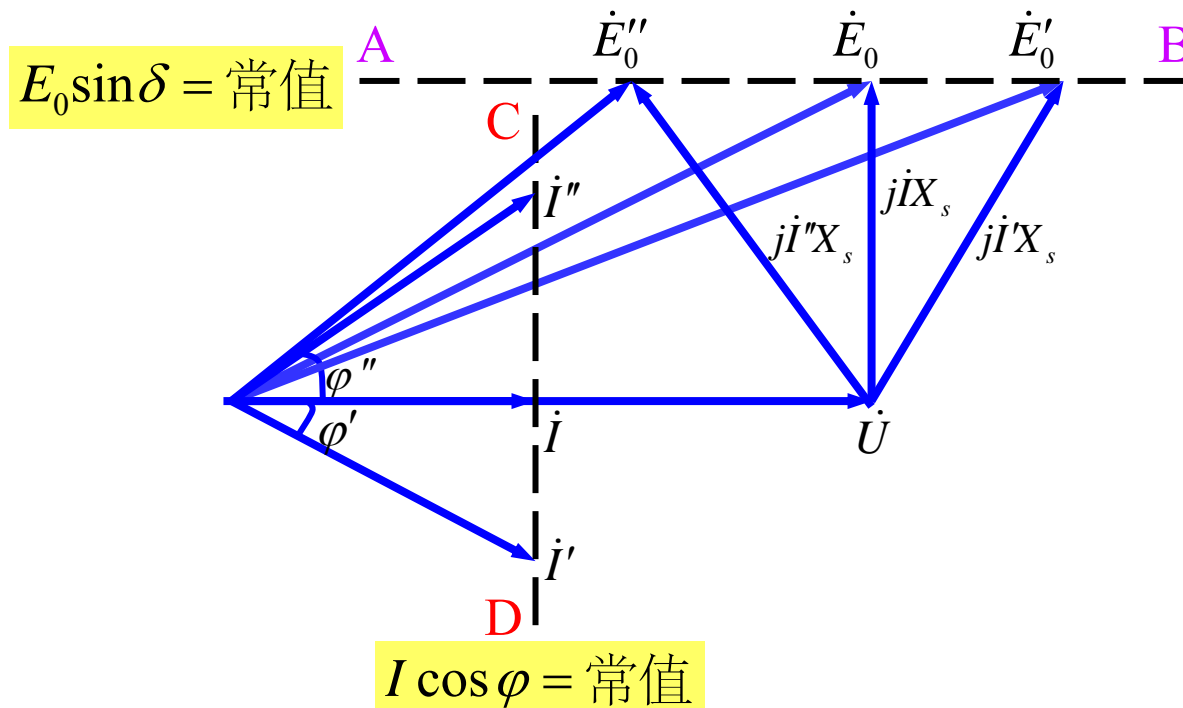
隐极同步电机有功、无功功角特性



2、无功功率调节（设保持 $P_2 = \text{常值}$ ）

分析前提： 设发电机为隐极机，不计磁路饱和，忽略电枢电阻，电网为“无穷大电网”（即 $U = \text{常值}$ ， $f = \text{常值}$ ）。

$$\left. \begin{aligned} P_2 \approx P_e = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \delta = \text{常值} \\ P_2 = m U I \cos \varphi = \text{常值} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E_0 \sin \delta = \text{常值} \\ I \cos \varphi = \text{常值} \end{aligned}$$



$\cos\varphi=1$ 时的励磁电流 I_f 称为正常励磁电流。

I_f 时正常励磁状态：只输出有功功率；

$I'_f > I_f$ ，过励状态：输出有功功率和感性无功功率；

$I''_f < I_f$ ，欠励状态：输出有功功率和容性无功功率。

可见，调节励磁电流就可以调节同步发电机的无功功率。

三种状态相比，欠励状态下功率角 δ 较大，同步电机稳定性差， $\delta > 90^\circ$ 时为不稳定区，欠励区域靠近不稳定区，因此同步电机一般不宜在欠励状态下运行。

