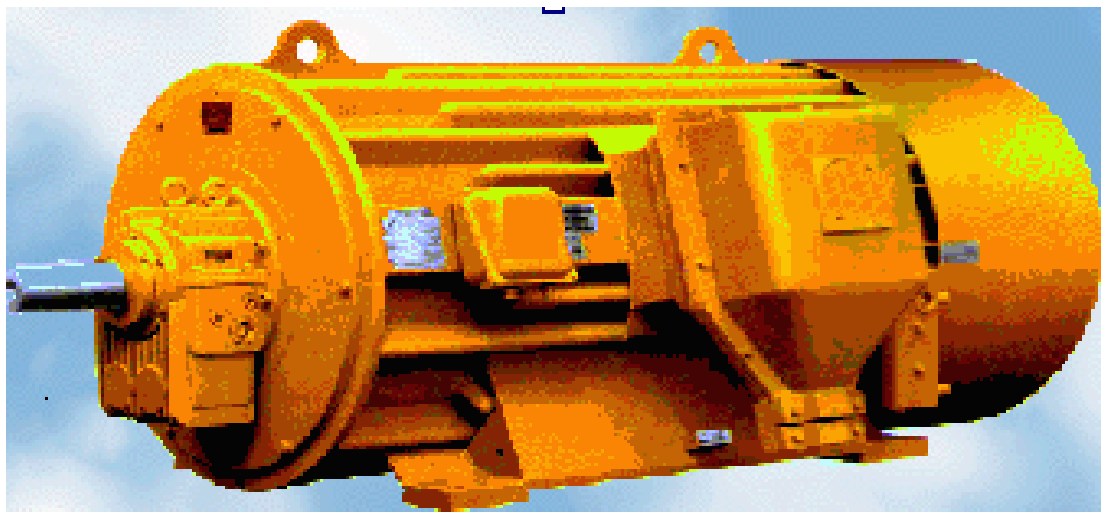


第五章

感应电机的稳态分析



1.本章主要研究定、转子间靠电磁感应作用，在转子内感生电动势，流通电流后实现机电能量转换的感应电机。

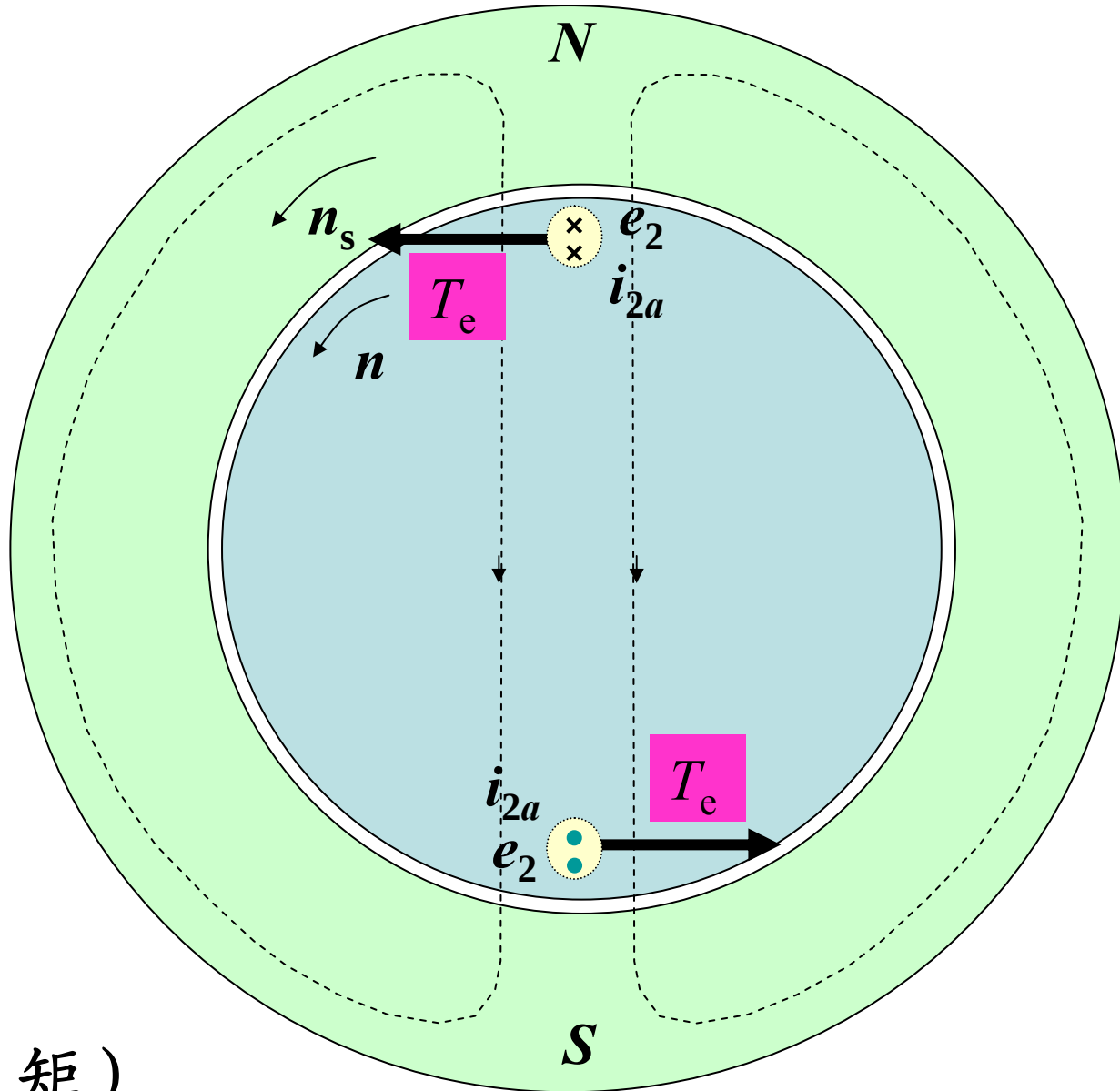
2.感应电机一般用作电动机，在少数场合下用作发电机

3.感应电机是异步电机，定义：凡是转子转速与所接交流电源的频率没有严格不变关系的交流电机称为异步电机

优点：具有结构简单运行可靠，效率高，制造容易，成本低而且坚固耐用等优点

缺点：不能经济地在较广范围内调速，必须从电网吸收滞后电流，使电网功率因数降低

感应电机的基本原理



- 1) 电生磁
- 2) 磁生电
- 3) 电磁力 (矩)

5.1 感应电机的结构和运行状态

一、感应电机的结构

感应电机

定子

定子铁心

定子绕组

机座

定子绕组主要作用是
通过电流产生空载旋
转磁场

转子

转子铁心

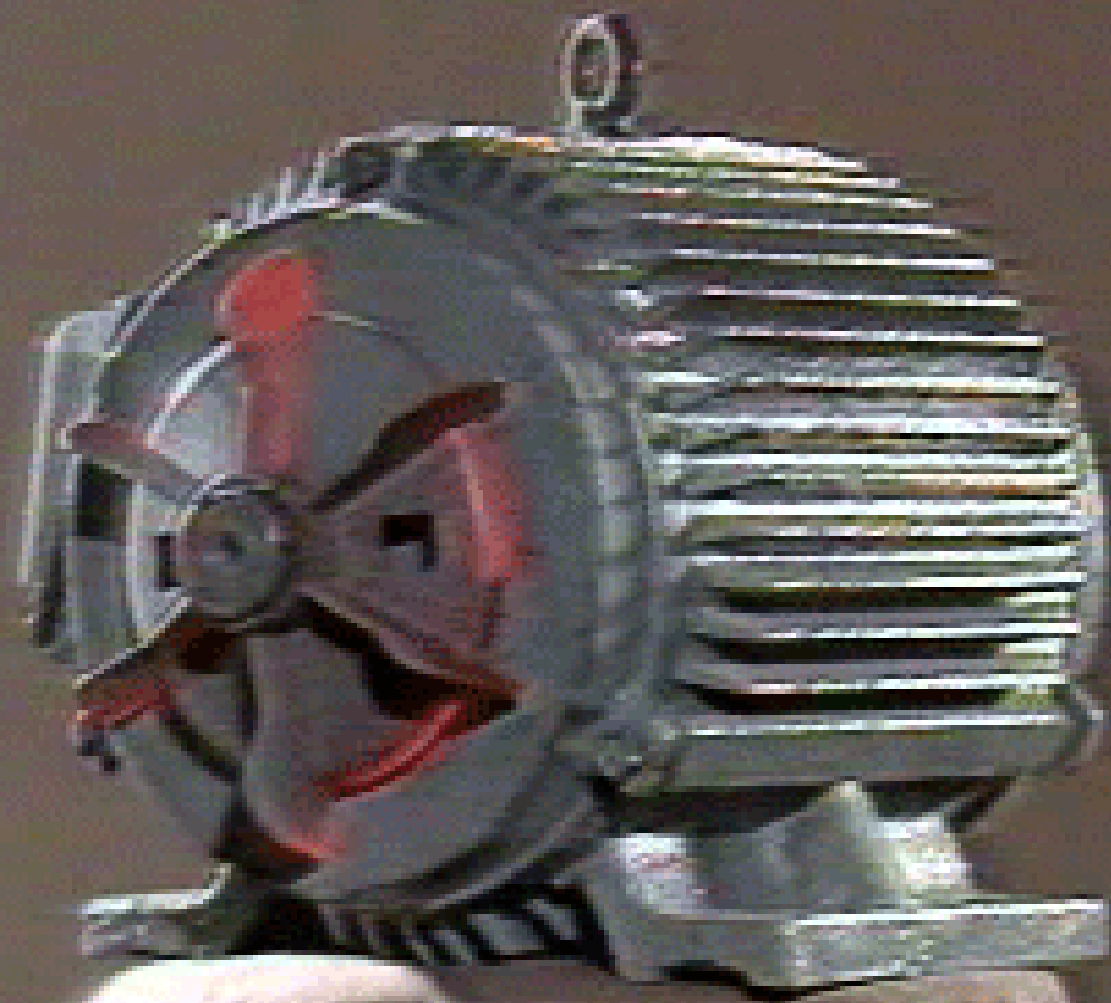
转子绕组

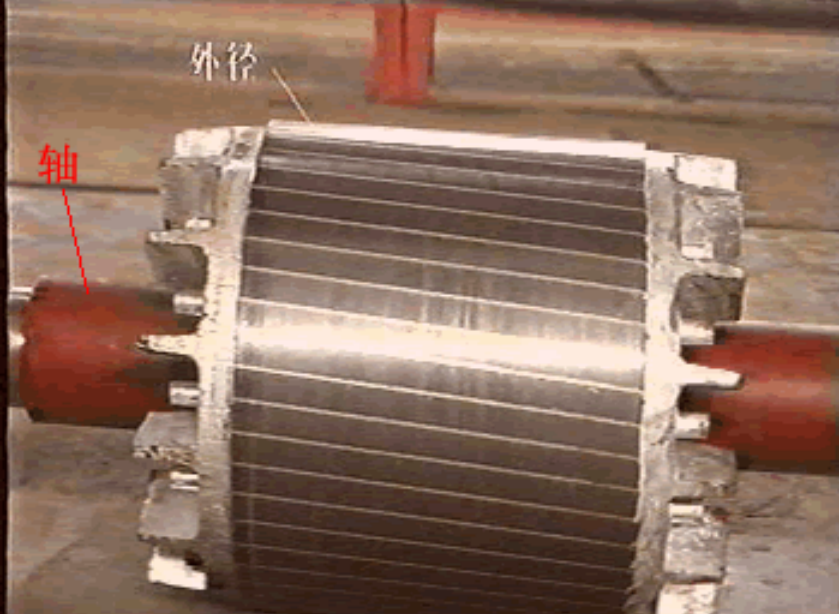
转轴

绕线型

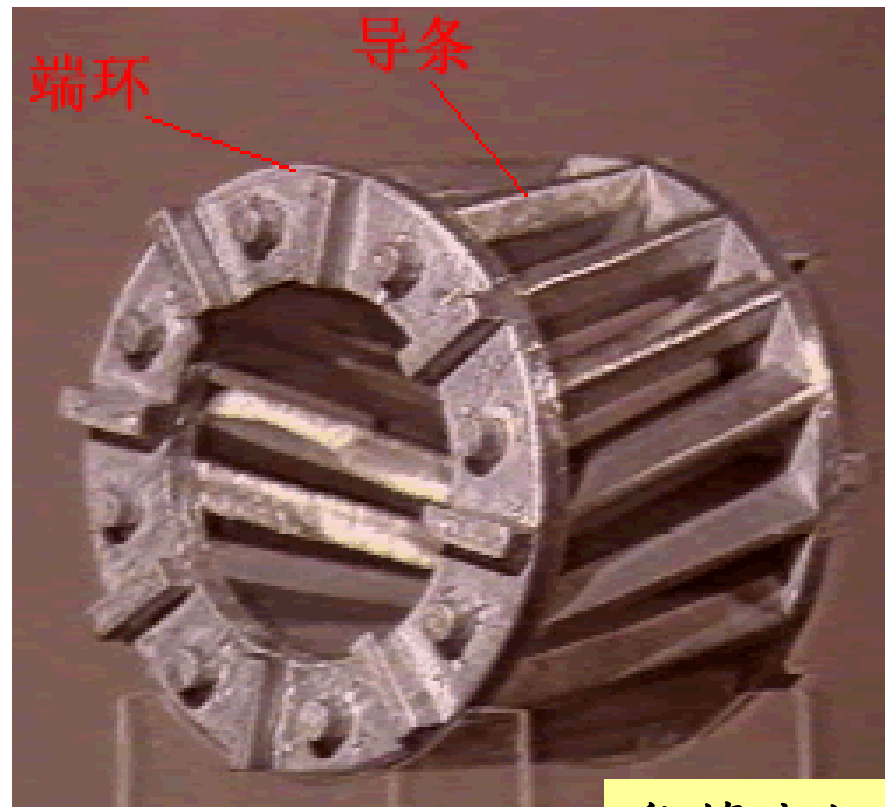
笼型







笼型转子



鼠笼绕组

笼型绕组：是一个端部自行闭合的绕组，它由插入每个转子槽中的导条和两端的环形端环构成，如果去掉铁心，整个绕组形如一个圆笼。

鼠笼绕组一般采用铸铝转子

绕线型转子

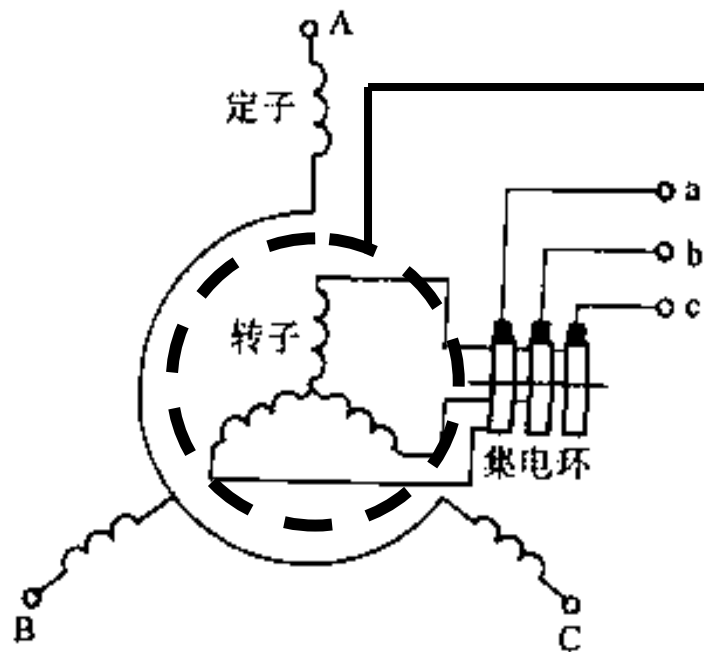
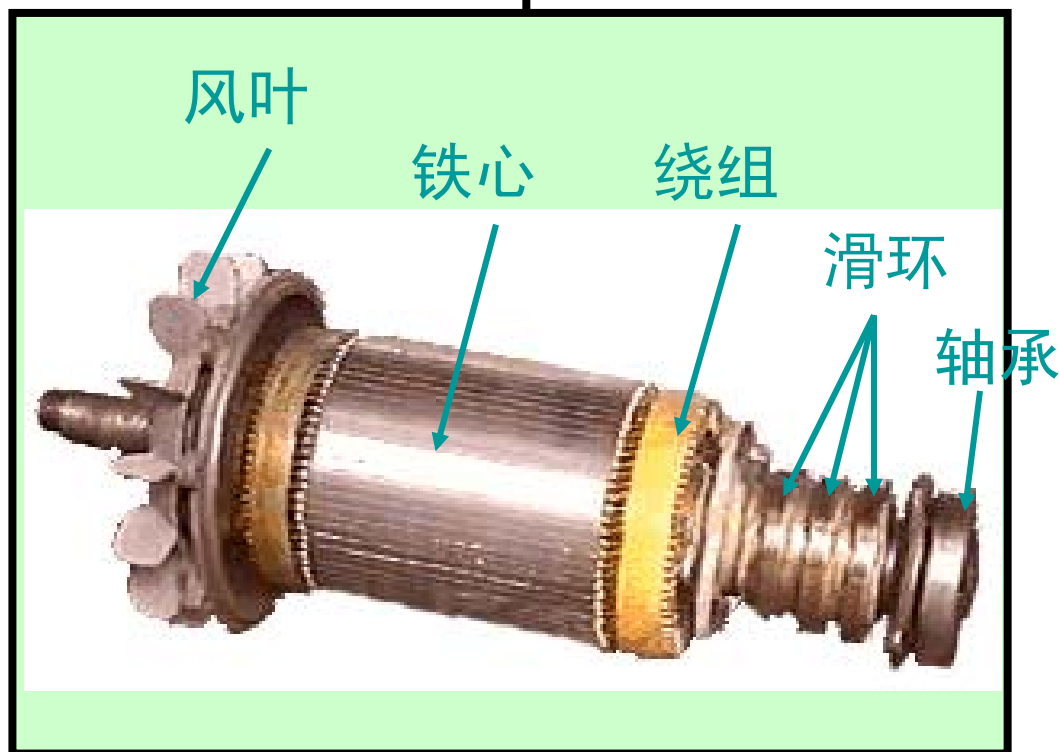


图 5-3 绕线型感应电动机示意图

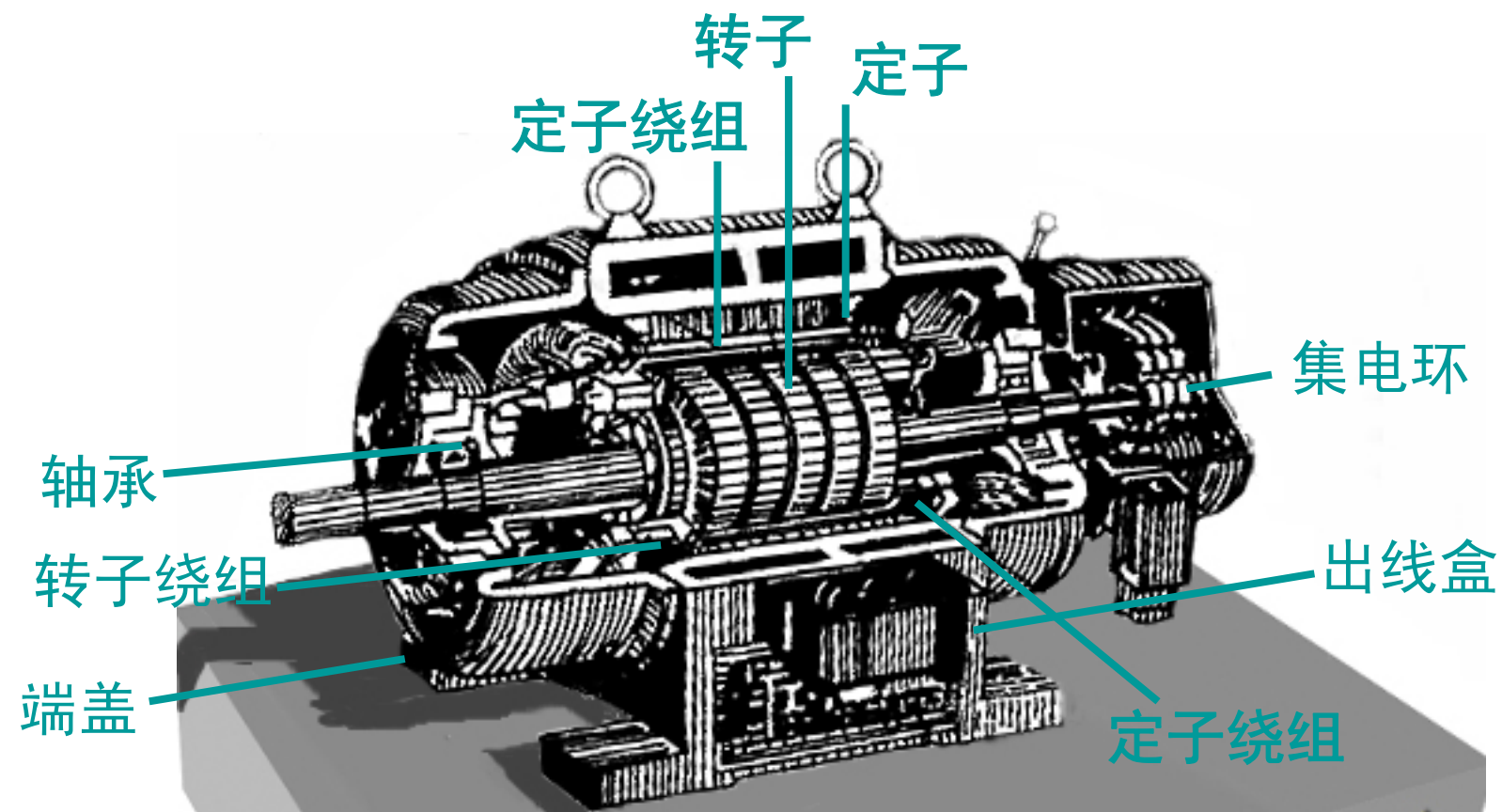


绕线型转子的槽内嵌有用绝缘导线组成的三相绕组，绕组的出线端通过滑环，再经过电刷引出。

特点：可在转子绕组中接入外加电阻，改善电动机起动和调速

气隙

- 磁路的一部分
- 为了减少激磁电流，提高电机的功率因数，感应电动机的气隙选得较小，中小型电机一般为 0.2-2mm
- $\delta \downarrow \rightarrow I_m \downarrow$ ，但易发生扫膛现象



绕线型感应电动机结构

二、感应电机的运行状态

- 旋转磁场的转速 n_s 与转子转速 n 之差称为转差。转差 Δn 与同步转速 n_s 的比值称为转差率，用 s 表示，即：

$$s = (n_s - n) / n_s$$

- 转差率是表征感应电机运行状态的一个基本变量。按照转差率的正负和大小，感应电机有电动机、发电机和电磁制动三种运行状态

转差率的含义

- 起动瞬间, $n=0, s=1$
- 理想空载运行时: $n=n_s, s=0$
- 作为电动机运行时, s 的范围在0---1之间。
- 转差率一般很小, 如 $s=0.03$ 。

特殊状态

- $s=0$ 即转子转速和同步转速相等

在感应电机中，此时转子和旋转磁场之间没有相对运动，因此没有感应电势，也没有能量转换。

切割磁力线是产生转子感应电势和电磁转矩的必要条件

转子必须与旋转磁场保持一定的速度差，才可能切割磁力线

- $s=1$ 即 $n=0$, 表示感应电机处于停转的状态

(1. 起动瞬间; 2. 工作时, 转子被堵住, 无法旋转)。

感应电机的运行状态

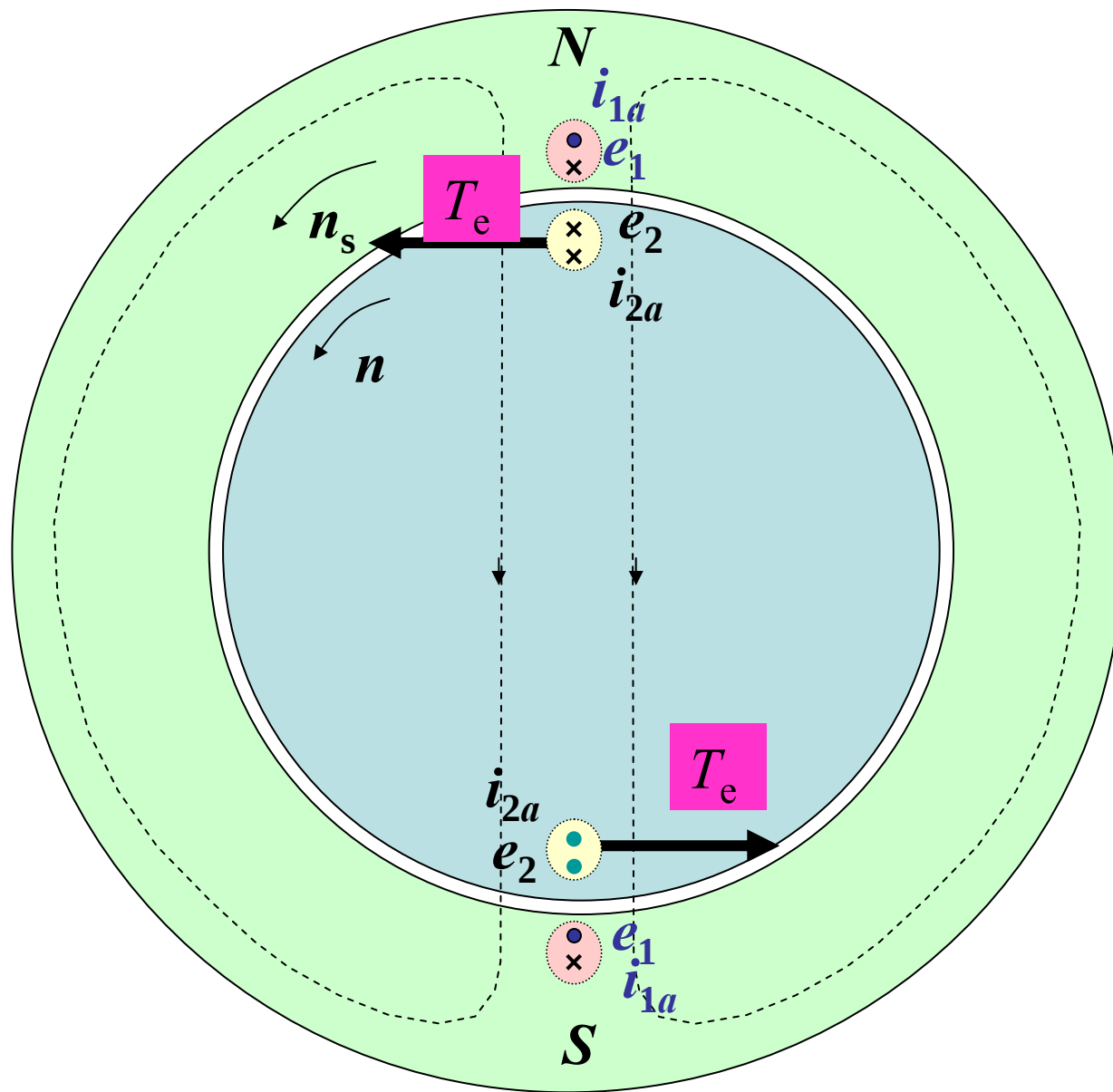
电动机状态: $0 < n < n_s$ ($0 < s < 1$)

(1) 定子三相对称绕组通入三相对称电流, 产生同步转速旋转的气隙磁场。

(2) 转子导体(相对磁场)切割磁力线, 产生感应电动势, 进而在闭合回路中产生电流。电流与气隙磁场的相互作用产生与转子转向相同的拖动转矩。

(3) 电机从电网吸收电功率, 经过气隙的耦合作用从轴上输出机械功率。

电动机状态: $0 < s < 1$ 、 $0 < n < n_s$



电动机工作状态

- 电动机的转速和电机的负载是相关的。
- 当空载时 $s \approx 0$ ， $n \approx n_s$ ，而不等于 n_s 。因为当 $s=0$ 时，定子和转子之间的相互作用就消失了。
- 负载增大时，转速应有所下降， s 增大

感应电机的运行状态

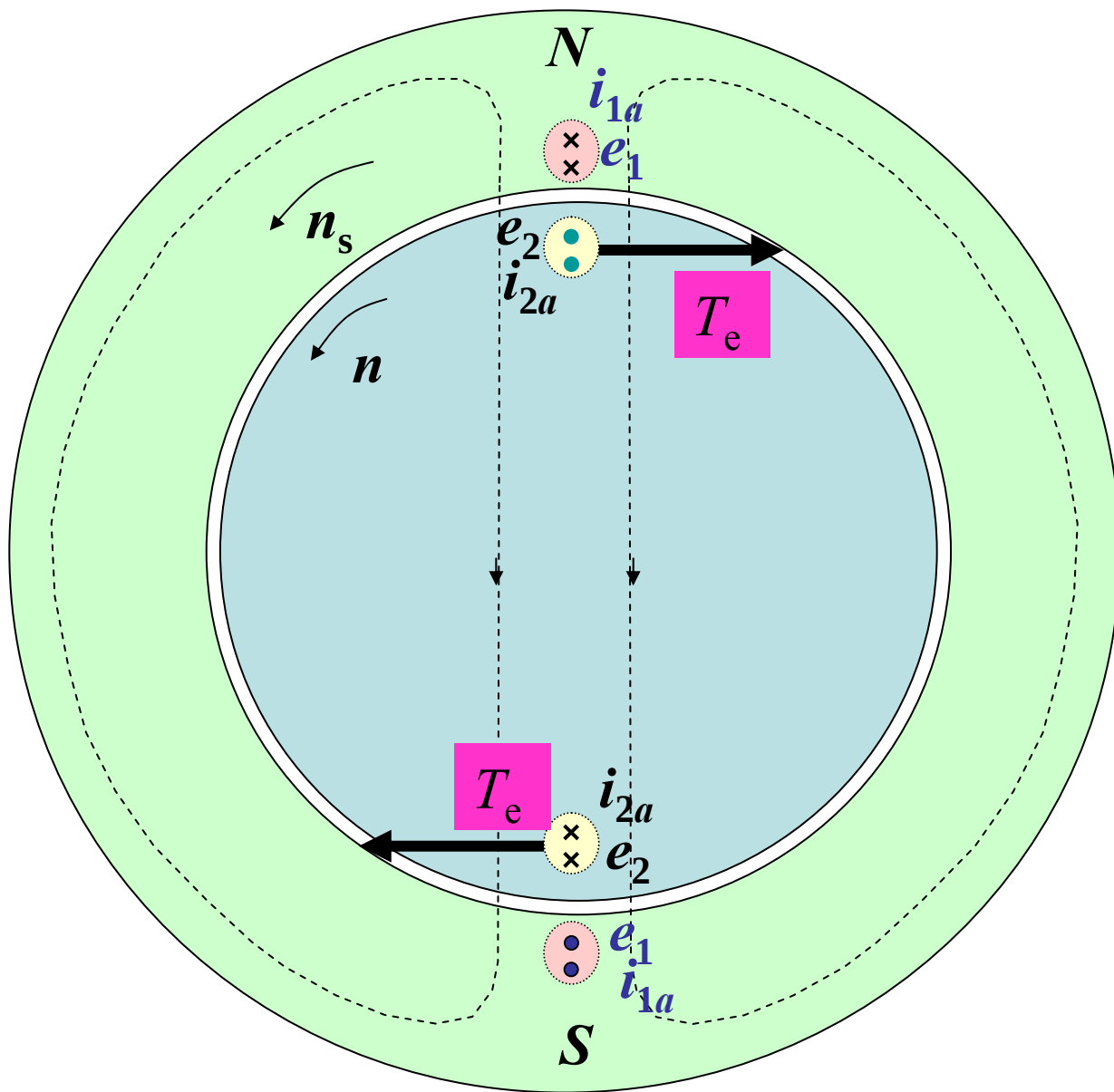
发电机状态: $-\infty < s < 0$ 、 $0 < n_s < n$

(1) 原动机拖动转子以 $n(>n_s)$ 转速旋转。

(2) 转子导体运动(相对磁场, 磁场转速慢)切割磁力线, 产生感应电动势, 进而在闭合回路中产生电流。电流与气隙磁场的相互作用产生与转子转向相反的制动转矩。

(3) 电机从轴上吸收机械功率, 经过气隙耦合再向电网输出电功率。

发电机状态: $-\infty < s < 0$ 、 $n > n_s$

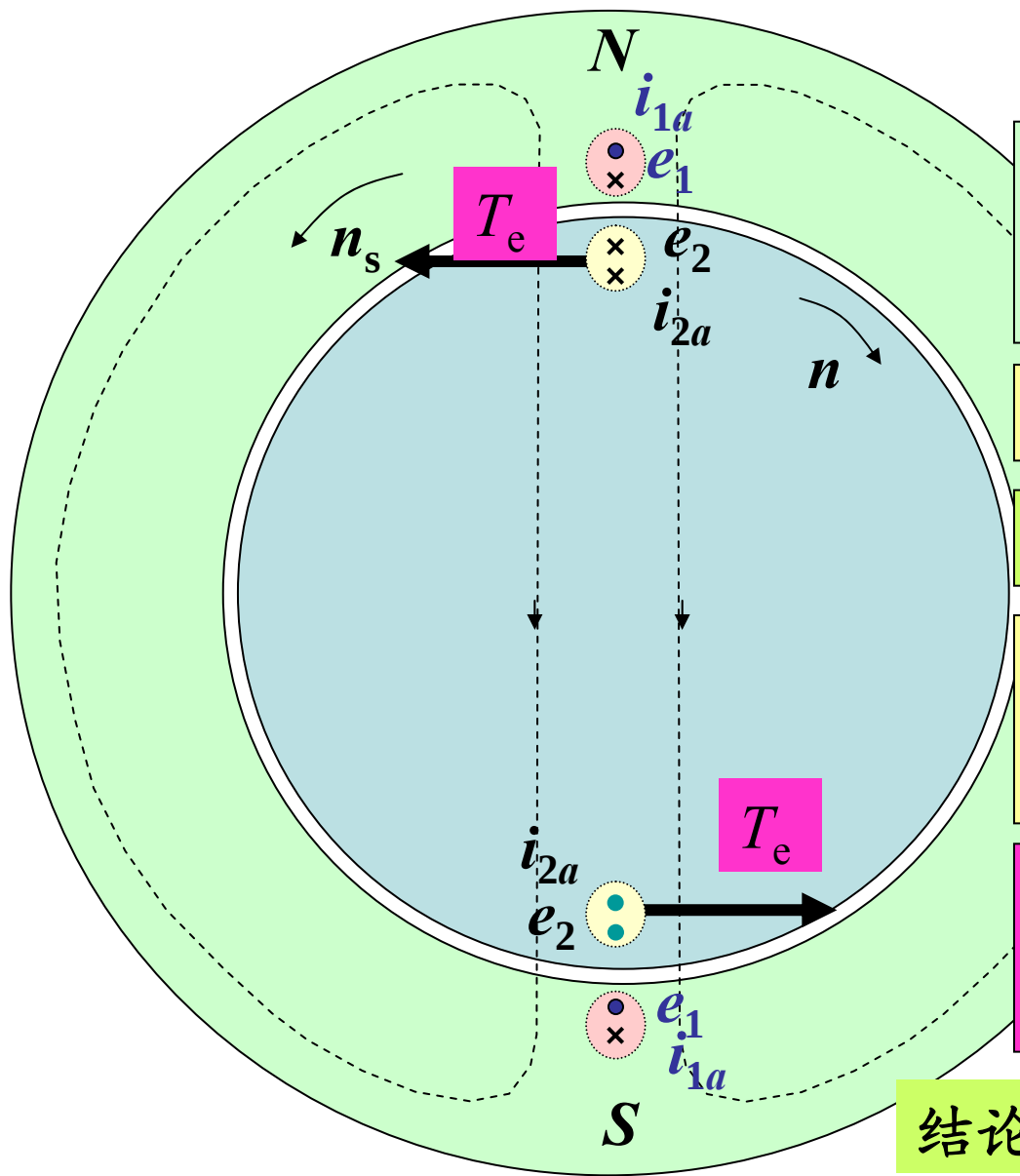


感应电机的运行状态

制动状态： $1 < s < +\infty$ 、 $-\infty < n < 0$

转子逆着磁场方向旋转，此时电机既从电网吸收电功率又从轴上吸收机械功率，它们都消耗在电机内部变成损耗。

制动状态: $1 < s < +\infty$ 、 $n < 0$



1. 定子导体和转子导体均相对磁场反方向相对运行, 判断 e_1 和 e_2 方向

2. i_{2a} 的方向同 e_2 的方向相同

3. i_{1a} 的方向与 i_{2a} 的方向相反

4. i_{1a} 的方向与 e_1 的方向相反, 电功率 $e_1 i_{1a}$ 是负值, 说明从电网吸收电功率

5. 电磁转矩的方向、性质和作用, 原动机从转子注入机械功率

结论: 电机处于电磁制动状态

感应电机的运行状态

状态	电动机	发电机	电磁制动
n 与 s 的关系	$0 < n < n_s, 0 < s < 1$	$n > n_s, s < 0$	n 与 n_s 反向, $n < 0, s > 1$
E_1	反电动势	电源电动势	反电动势
T_e	驱动	制动	制动
能量转换	电能 ↓ 机械能	机械能 ↓ 电能	电+机械能 ↓ 内部损耗

应用场合

- 感应电机可以在电动机、发电机和电磁制动三种状态下运行。
- 现代电机主要作为电动机运行；
- 电磁制动往往只是感应电动机在完成某一生产过程中而出现的短时运行状态。例如感应起重机放重物时，为限制下放速度，往往运行于电磁制动状态；
- 感应发电机则有时用于农村小型水电站和风力发电站中。

三、额定值

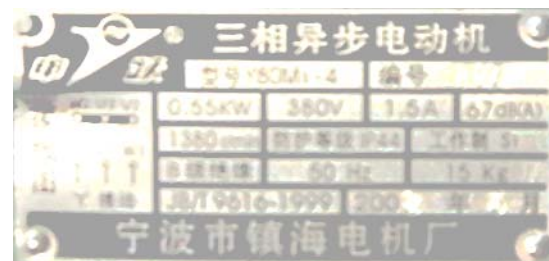
➡ 额定功率 P_N : 单位为千瓦(kW)

➡ 定子额定电压 U_N : 单位为伏(V)

➡ 定子额定电流 I_N : 单位为安(A)

➡ 额定频率 f_N : 我国工频规定为50赫兹(Hz)

➡ 额定转速 n_N : 单位为转 / 分($r / \min$)



5.2 三相感应电动机的磁动势和磁场

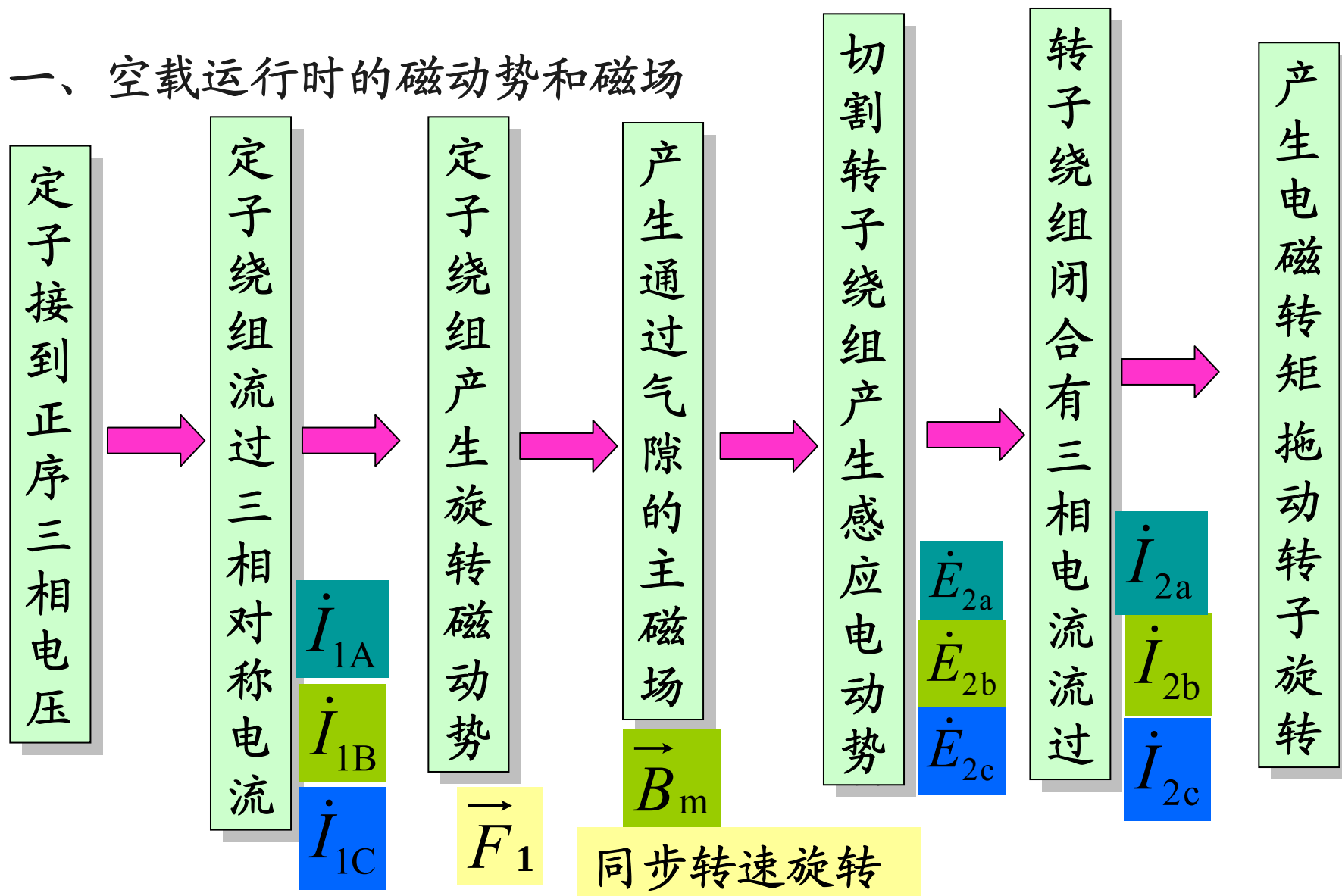
感应电动机是通过电磁感应作用把能量从定子传递到转子，所以从工作原理上讲，它和变压器类似

分析时利用这种相似性，以变压器运行理论为基础，分析感应电动机运行时的物理过程，导出磁动势和电动势平衡方程

通过绕组折算和频率折算而得到等效电路

5.2 三相感应电动机的磁动势和磁场

一、空载运行时的磁动势和磁场



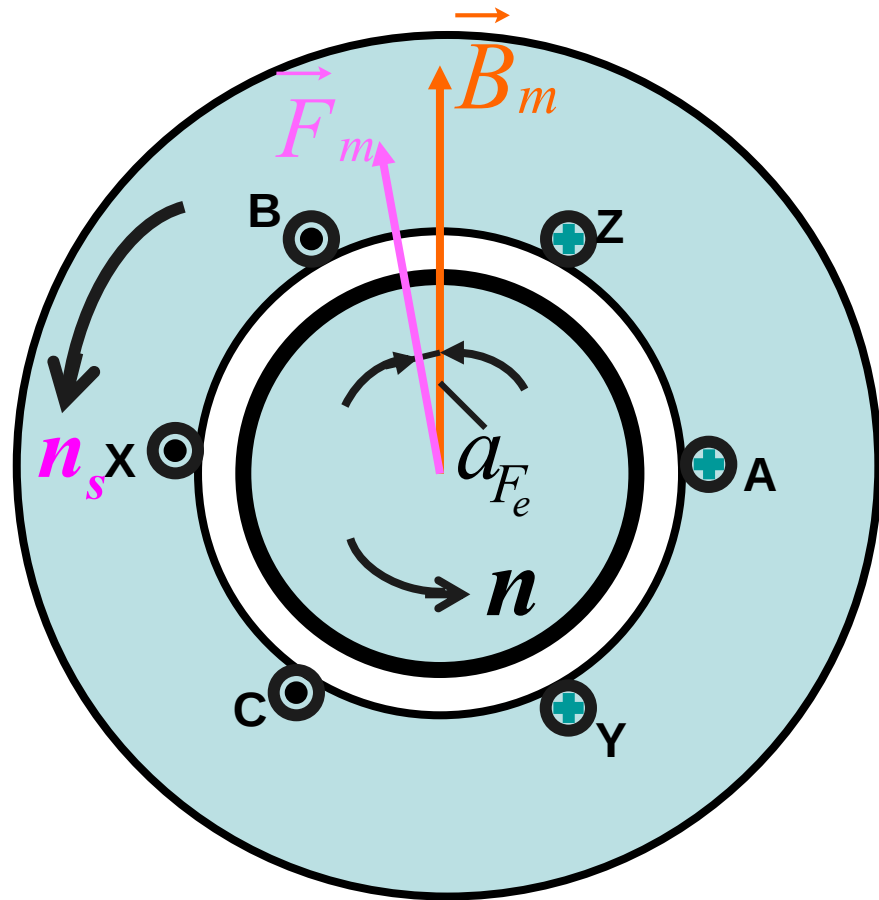
一、空载运行时的磁动势和磁场

$$\dot{I}_2 \approx 0$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_m$$

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_m$$

$\vec{B}_m$ 滞后 $\vec{F}_m$ 铁耗角 α_{Fe}



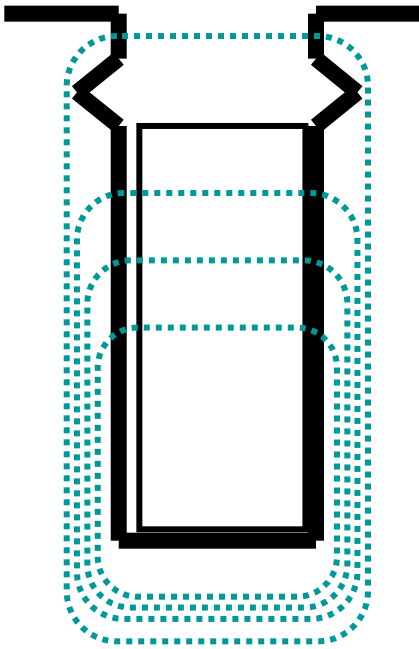
定子电流产生磁动势，而磁动势建立磁场。

一、空载运行时的磁动势和磁场

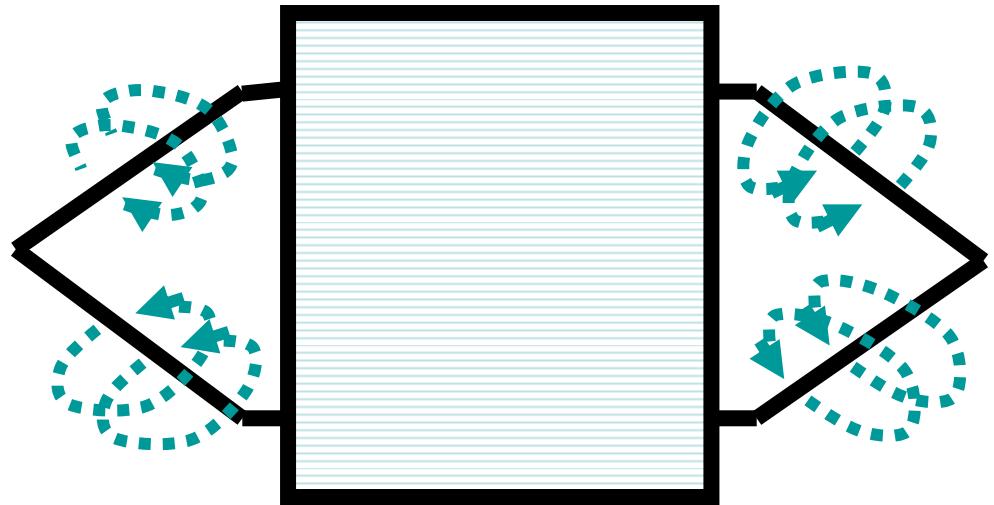
1. 根据磁通经过的路径及性质，把电机中的磁通分为主磁通和漏磁通。
2. 由基波旋转磁动势所产生的通过气隙、并与定、转子绕组同时交链的基波磁通称为主磁通。简单说：主磁通就是气隙中以同步转速旋转的基波磁通。主磁通用符号 Φ_m 表示，在数值上代表主磁通每极的磁通量。
3. 定子三相电流除产生主磁通外，还产生仅与定子绕组交链而不与转子绕组交链的磁通，这部分磁通称为定子漏磁通，用 Φ_{10} 表示。

定子漏磁通和漏抗

定子漏磁通又可分为槽漏磁、端部漏磁和谐波漏磁等三部分



槽漏磁



端部漏磁

谐波磁通通过气隙，但感生电动势频率互不相同，当漏磁处理

转子电流和转子漏磁通

1. 当转子绕组开路时，上述主磁通和漏磁通由定子绕组单独产生。此时主磁通在定、转子绕组中感应电势，但因转子绕组开路，因此转子没有电流。
2. 实际运行时，转子绕组是短路的，前述的感应电势便在转子绕组中产生电流，随之出现转子磁动势。这时气隙中的主磁通应由定子磁动势和转子磁动势的基波联合产生，此外转子磁动势还产生仅与转子绕组交链的转子漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 。

主磁通和漏磁通

1. 把感应电机中的磁通分为主磁通和漏磁通的分析方法和变压器中所用的一样。
2. 感应电机的主磁通 Φ_m 和变压器的 Φ_m 相对应。而异步电机的定、转子漏磁通和变压器中的一、二次绕组漏磁通相对应。
3. 但应注意，在变压器中，主磁通 Φ_m 是脉振磁通，在数值上代表该磁通的最大值(振幅)；而在感应电机中，主磁通 Φ_m 是旋转磁通，其磁密波沿气隙圆周按正弦规律分布并以同步转速旋转，在数值上 Φ_m 代表磁密波每半波(即每极)的磁通量。
4. 但从主磁通与定转子绕组相交链的磁链数来看，由于定子不动、转子转速不等于同步转速，这种磁链数是随时间而交变的， Φ_m 代表主磁通与整距线圈交链的磁通量的最大值。因此从绕组或线圈的磁链变化情况看，感应电机和变压器仍相似。

一、空载运行时的磁动势和磁场

气隙中的主磁场以同步转速旋转

旋转磁场与整距线圈交链的磁通量也称为主磁通。

用时间相量 $\dot{\Phi}_m$ 表示

$$\dot{\Phi}_m \text{ 在定子绕组中感生 } \dot{E}_1 \quad \dot{E}_1 = -j4.44 f_1 N k_{w1} \dot{\Phi}_m$$

与变压器类似，感应电动势可以写成阻抗压降的方式

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

定子漏磁通和漏抗

定子漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 将在定子绕组中感生漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。把 $\dot{E}_{1\sigma}$ 当做负漏抗压降来处理：

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

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

定子槽形越深越窄，槽漏磁磁导越大，槽漏抗越大

分主磁通和漏磁通的原因

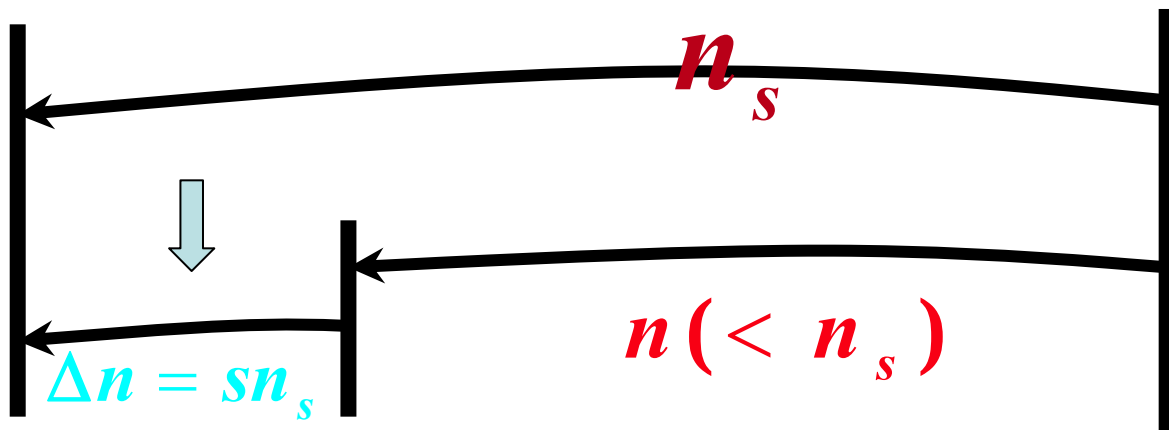
二、负载运行时的转子磁动势和磁动势方程

若定子旋转磁场为正向旋转，在转子感应电动势和电流是正向序，流有三相正序电流的转子绕组将产生正向旋转的转子磁动势 $\vec{F}_2$

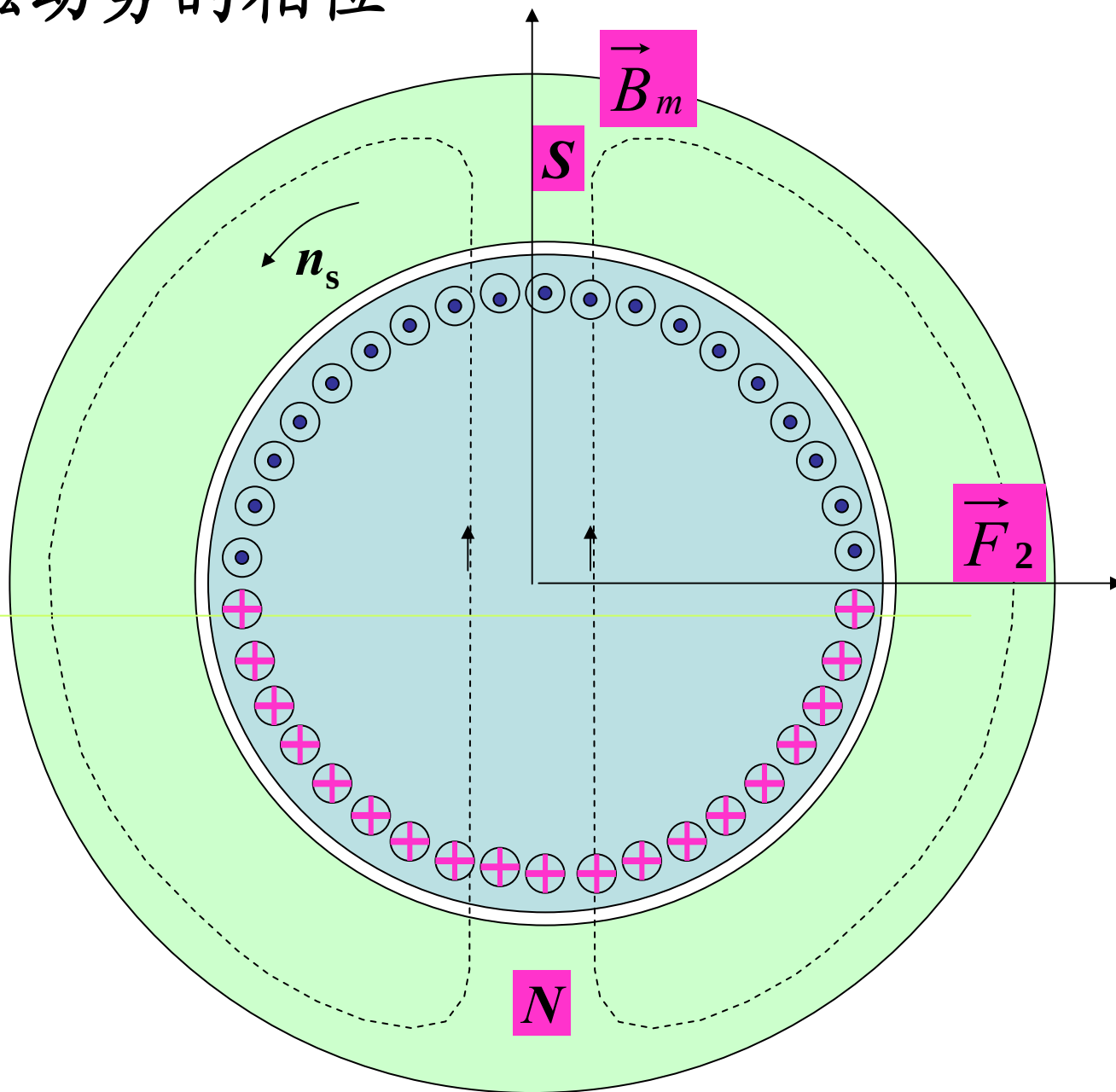
关注的问题

1. 磁动势的转速
2. 磁动势的相位

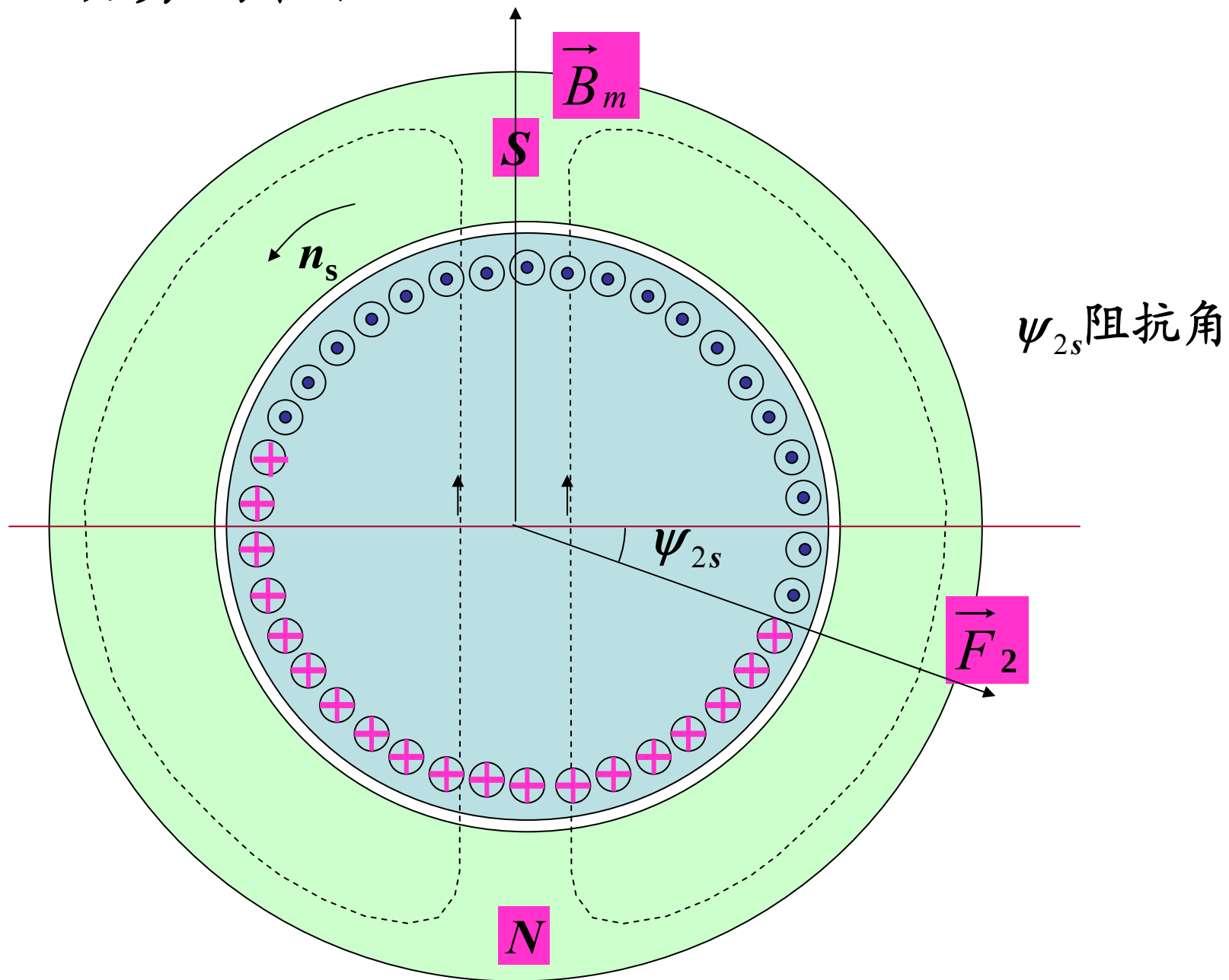
二、负载运行时的转子磁动势和磁动势方程



转子磁动势的相位



转子磁动势的相位



转子反应

使气隙磁场的大小和空间相位发生变化，从而引起定子感应电动势 E_1 和定子电流 I_1 变化

转子磁动势(电流)，与主磁场相互作用，产生所需要的电磁转矩，带动轴上的机械负载。

转子反应

激磁分量

负载分量

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

$$\vec{F}_{1L} = -\vec{F}_2$$

参考变压器！

负载时的磁动势方程

产生主磁通

抵消转子磁动势

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_m + \vec{F}_{1L} = \vec{F}_m + (-\vec{F}_2)$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_m$$

负载时电动机的激磁磁动势是定、转子绕组的合成磁动势

负载时的磁动势方程

$$F_1 = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1} I_1}{p}$$

定子绕组相数

$$F_2 = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{N_2 k_{w2} I_2}{p}$$

转子绕组相数

$$F_m = \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1} I_m}{p}$$

$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_m$ 在空间的相位差
等于 I_1, I_2, I_m 在时间上的相位差

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k_i} = \dot{I}_m \text{ 或者 } \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

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

转子漏磁通和漏电抗

$\vec{F}_2$ 产生 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$

$\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 产生 $\dot{E}_{2\sigma s}$

$$\dot{E}_{2\sigma s} = -j\dot{I}_2 2\pi s f_1 L_{2\sigma}$$

$$X_{2\sigma s} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = s \cdot 2\pi f_1 L_{2\sigma} = sX_{2\sigma}$$

5.3 三相感应电动机的电压方程和等效电路

一、电压方程

- 定子电压方程

$$\dot{U}_1 e^{j\omega_1 t} = \dot{I}_1 e^{j\omega_1 t} (R_1 + jX_{1\sigma}) - \dot{E}_1 e^{j\omega_1 t}$$

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

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

转子电压方程

$$E_{2s} = 4.44sf_1N_2k_{w2}\Phi_m$$

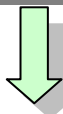
当转子不转时: $E_2 = 4.44f_1N_2k_{w2}\Phi_m$

$$E_{2s} = sE_2$$

转子的感应电动势与转差率成正比, s 越大, 主磁场切割转子绕组的相对速度就越大, E_{2s} 越大

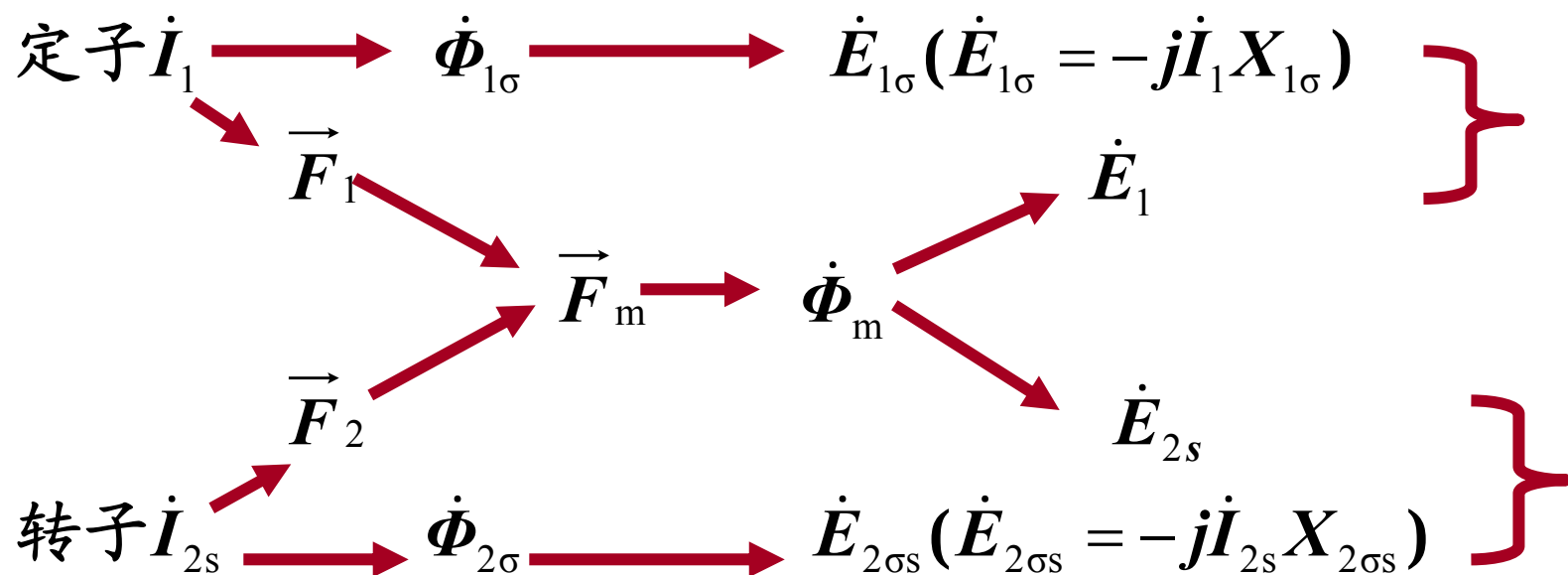
感应电机的转子绕组通常为短接, 即端电压为0

$$\dot{E}_{2s}e^{j\omega_2t} = \dot{I}_{2s}e^{j\omega_2t}(R_2 + jsX_{2\sigma})$$

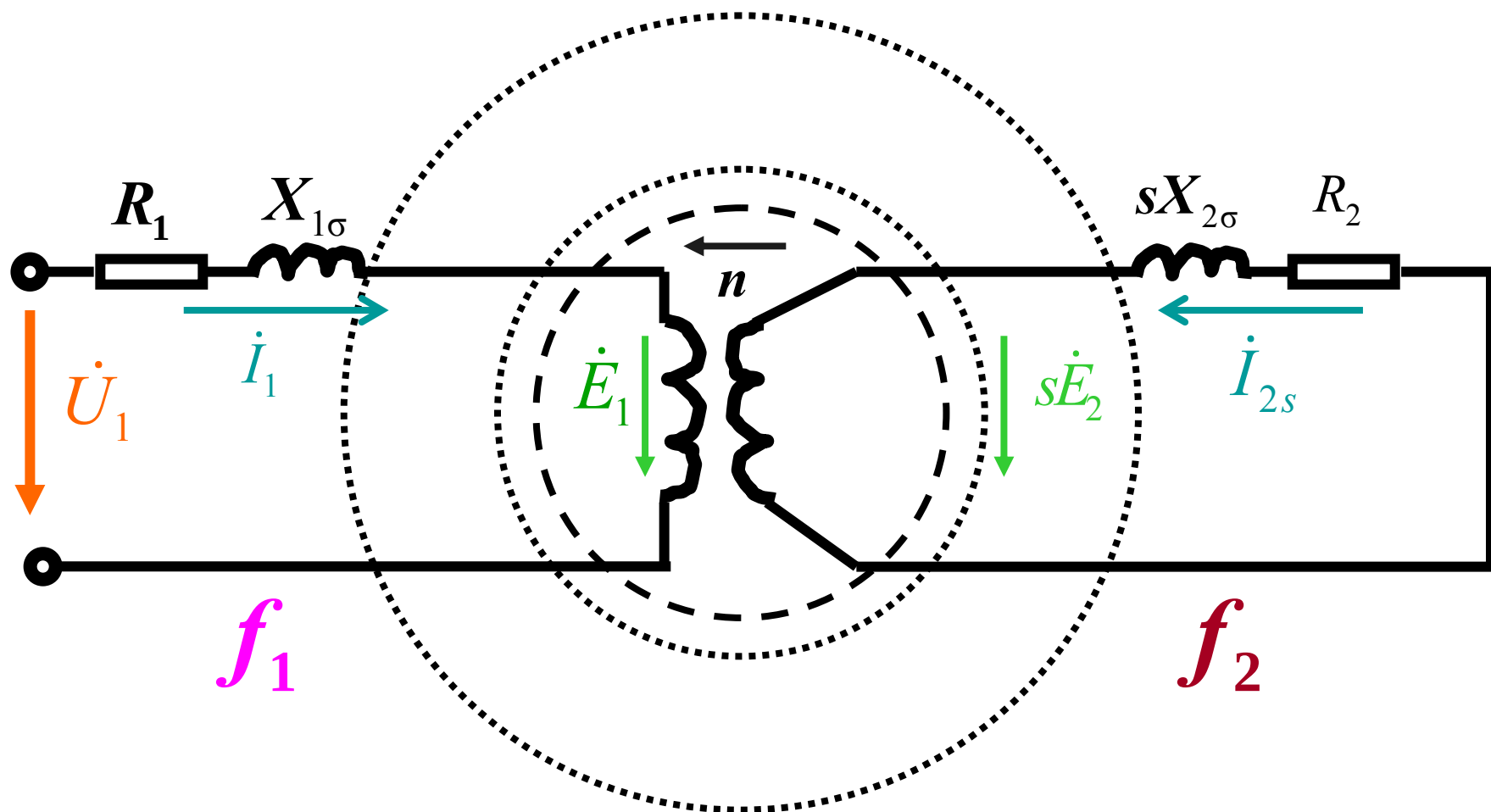


$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(R_2 + jsX_{2\sigma})$$

转子绕组相电压方程与 s 有关



感应电动机定、转子耦合电路图



定子绕组电路和转子绕组
电路属于不同的频率系统

定子绕组电路和转子绕组
电路通过气隙磁场耦合

二、等效电路

由于定转子频率不同，相数和有效匝数不同，故定转子不能直接联在一起

为了得到定、转子统一的等效电路：

1. 必须把转子频率变换为定子频率
2. 转子的相数、有效匝数变换为定子的相数、有效匝数



频率归算之后，转子静止！

二、等效电路

$$\dot{E}_{2s} e^{j\omega_2 t} = \dot{I}_{2s} e^{j\omega_2 t} (R_2 + jsX_{2\sigma})$$

$$s\dot{E}_2 e^{j\omega_2 t} \frac{e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}}{s} = \dot{I}_{2s} e^{j\omega_2 t} \frac{e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}}{s} (R_2 + jsX_{2\sigma})$$

$$\dot{E}_2 e^{j\omega_1 t} = \dot{I}_2 e^{j\omega_1 t} \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right)$$

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

频率归算之后，
转子静止！

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



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

频率归算的物理含义： 用一个静止的电阻为 $\frac{R_2}{s}$ 的等效转子去代替电阻为 R_2 的实际转子。等效转子 将与实际转子具有同样的转子 磁动势 $\vec{F}_2$ (同转速、同幅值、同相位)

满足了磁动势平衡条件

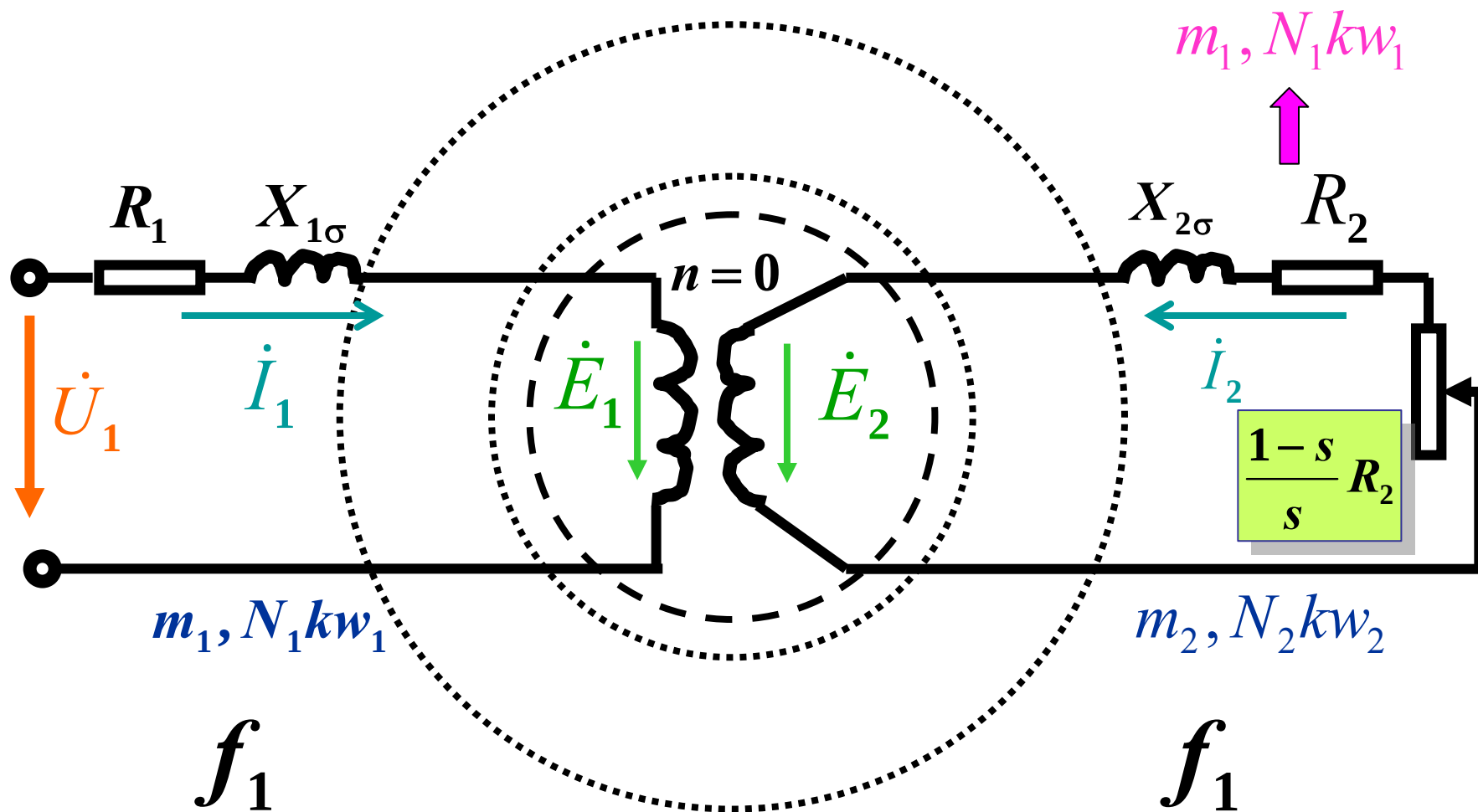
二、等效电路

R_2 就是转子本身的电阻

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2$$

$\frac{1-s}{s} R_2$ 代表与转子所产生的机械功率相对应的等效电阻，消耗在此电阻中的功率 $m_2 I_2^2 \frac{1-s}{s} R_2$ 将代表实际电机中所产生的总机械功率

频率归算后感应电动机的定、转子电路图



频率归算之后，转子静止！

绕组归算

所谓绕组归算，就是用一个与定子绕组的相数和有效匝数相同的等效转子绕组，去代替相数为 m_2 有效匝数为 $N_2 k_{w2}$ 的实际转子绕组。

绕组归算，保持转子绕组具有同样的磁动势

(1) 电流归算

$$\frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1} \dot{I}'_2}{p} = \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{N_2 k_{w2} \dot{I}_2}{p}$$

$$\dot{I}'_2 = \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_i}, k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$$

绕线型转子, $m_1 = m_2$

绕组归算

(2) 电势归算

$$\dot{E}'_2 = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \dot{E}_2 = k_e \dot{E}_2$$

电压比: $k_e = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}}$

绕线型转子, $k_i = k_e$

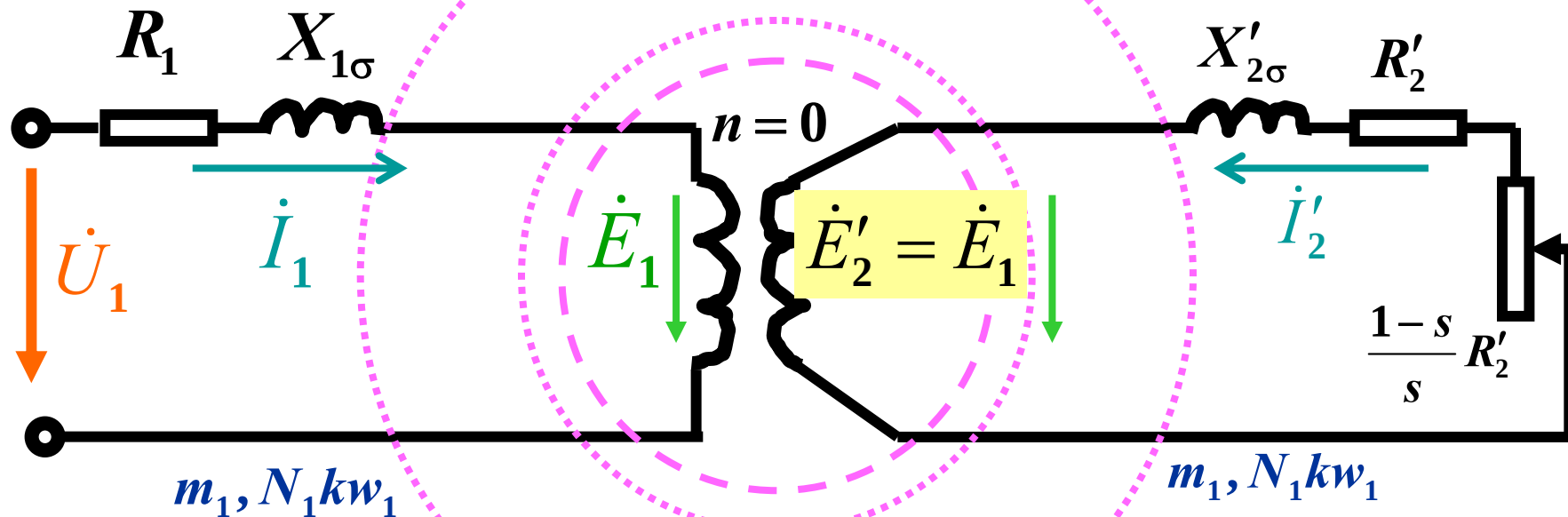
绕组归算

(3) 阻抗归算

$$R'_2 = k_e k_i R_2 = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \right)^2 R_2$$

$$X'_{2\sigma} = k_e k_i X_{2\sigma} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \right)^2 X_{2\sigma}$$

频率和绕组归算后感应电动机的定转子电路图



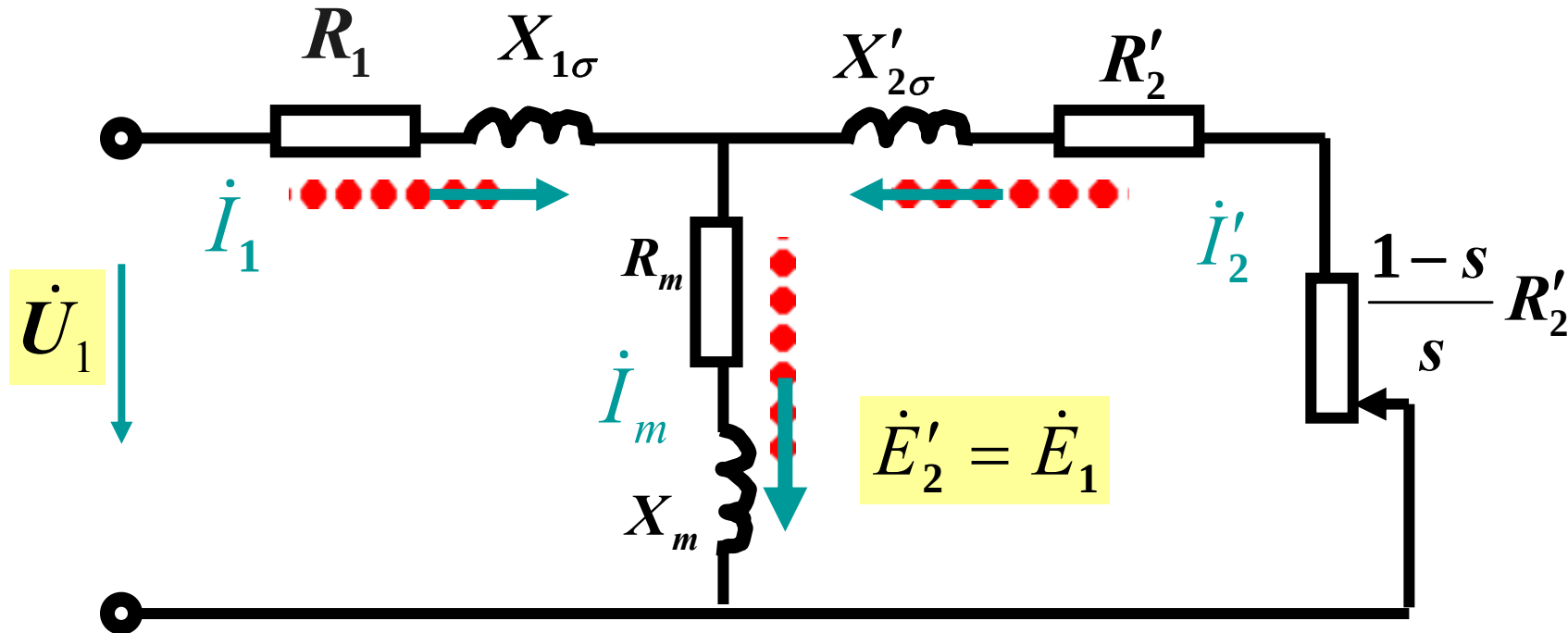
$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -\dot{I}_m Z_m$$

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

等效电路

转子静止

感应电动机的T形等效电路



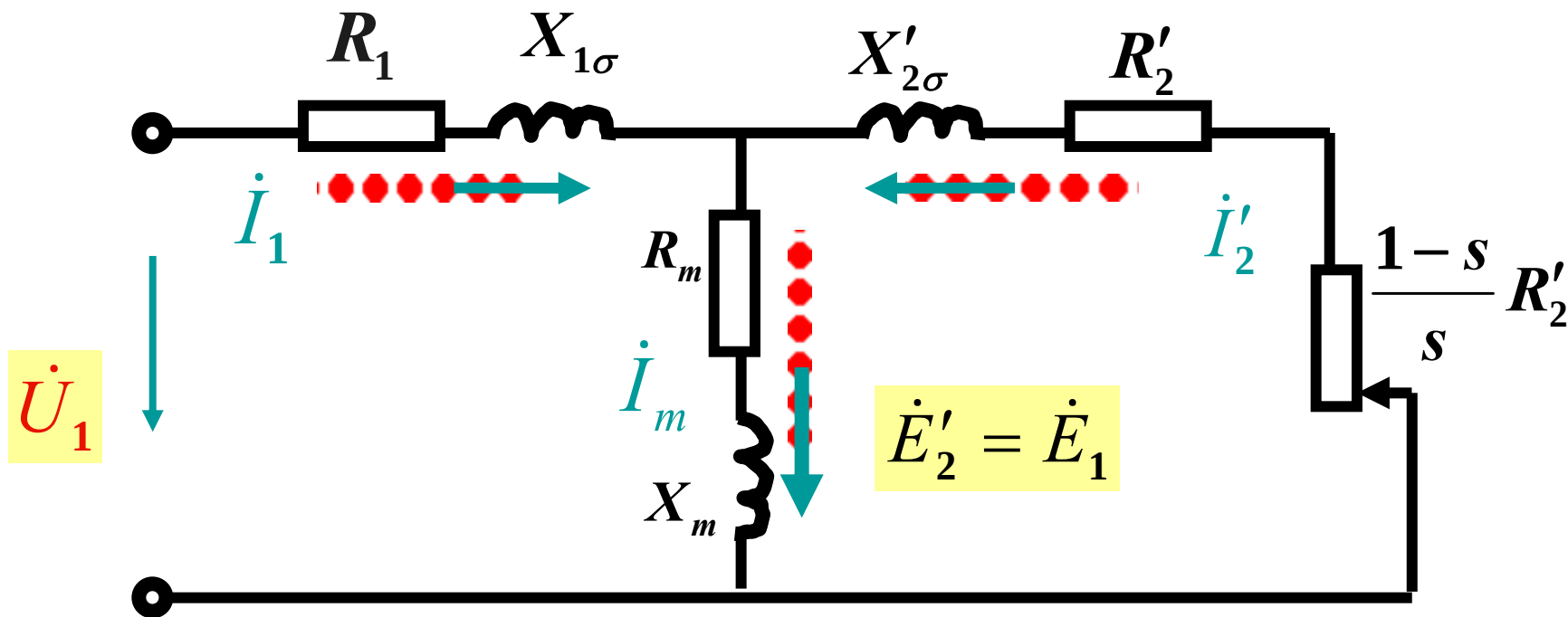
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) - \dot{E}_1$$

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

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

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

T型等效电路



(1) 空载时，转子相当于开路

(2) 负载时，转差率增大，转子和定子电流增大

(3) 负载时， E_1 和相应的主磁通比空载时略小

(4) 起动或者堵转时， E_1 和主磁通显著减小，仅为空载时60%

T型等效电路和相量图

I_1 总是滞后电源电压 $\dot{U}_1$,这是因为产生气隙中的主磁场与定、转子的漏磁场都要从电源输入一定的感性无功功率,磁化电流越大,定、转子漏抗越大,电机的功率因数就越低。

定转子电流

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1\sigma} + \frac{Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2}}$$

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1 \frac{Z_m}{Z_m + Z'_2} = -\frac{\dot{U}_1}{Z_{1\sigma} + \dot{c} Z'_2}$$

$$\dot{c} = 1 + \frac{Z_{1\sigma}}{Z_m}$$

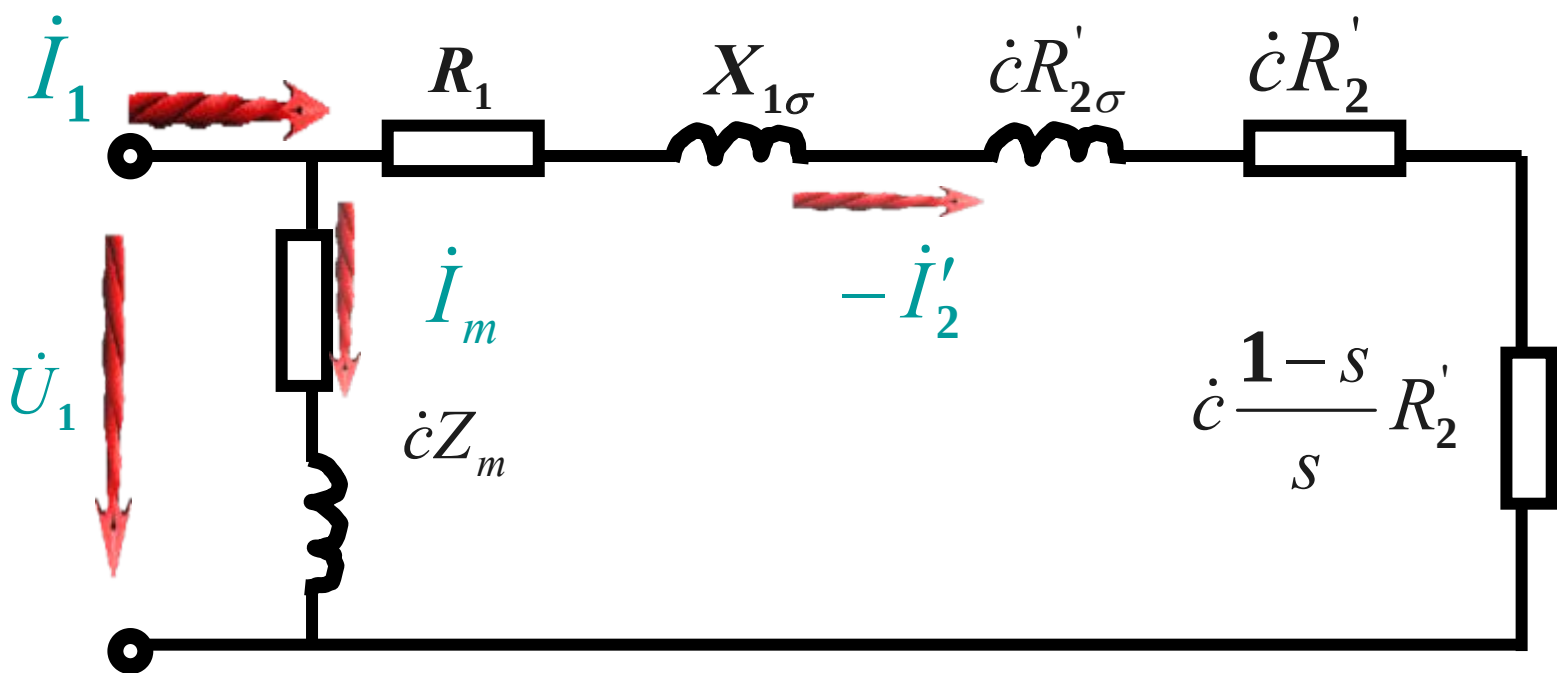
$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 \frac{Z'_2}{Z_m + Z'_2} = \frac{\dot{U}_1}{Z_m} \frac{1}{\dot{c} + \frac{Z_{1\sigma}}{Z'_2}}$$

正常工作时, $|Z_{1\sigma}| \ll |Z'_2|$, 近似取 $\frac{Z_{1\sigma}}{Z'_2} \approx 0$

$$\dot{I}_m \approx \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1\sigma} + Z_m}$$

$$-\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1\sigma} + \dot{Z}'_2}$$

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



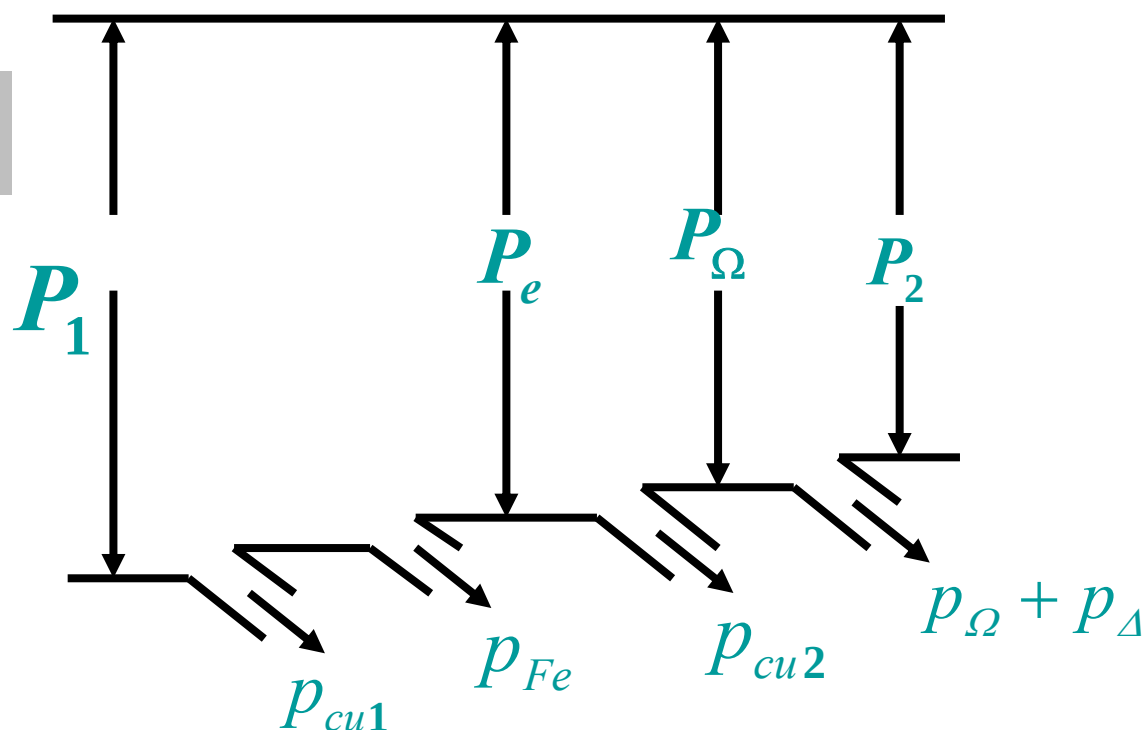
近似等效电路

5.4 感应电动机的功率方程和转矩方程

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

$$p_{cu1} = m_1 I_1^2 R_1$$

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



$$P_e = m_1 E'_2 I'_2 \cos \psi'_2 = m_1 I'^2_2 \frac{R'_2}{s} = T_e \Omega_s$$

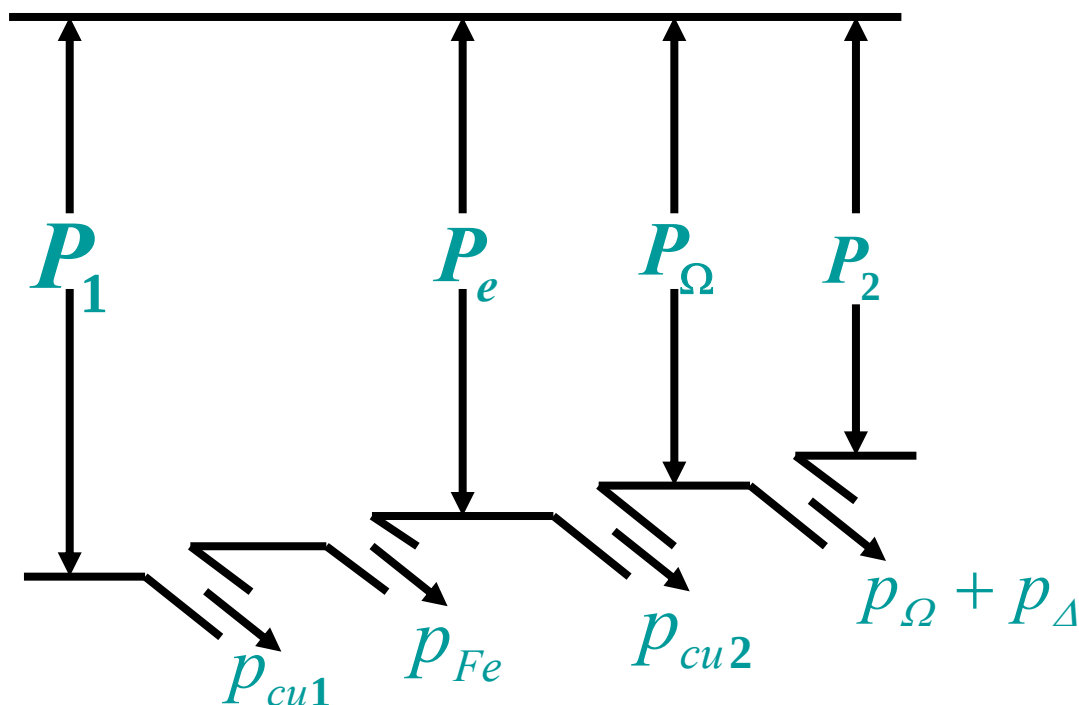
强调：对照等效电路

电磁功率：定子通过气隙传送到转子的功率

5.4 感应电动机的功率方程和转矩方程

$$p_{cu2} = m_1 I_2'^2 R_2' \\ = s P_e$$

转差功率

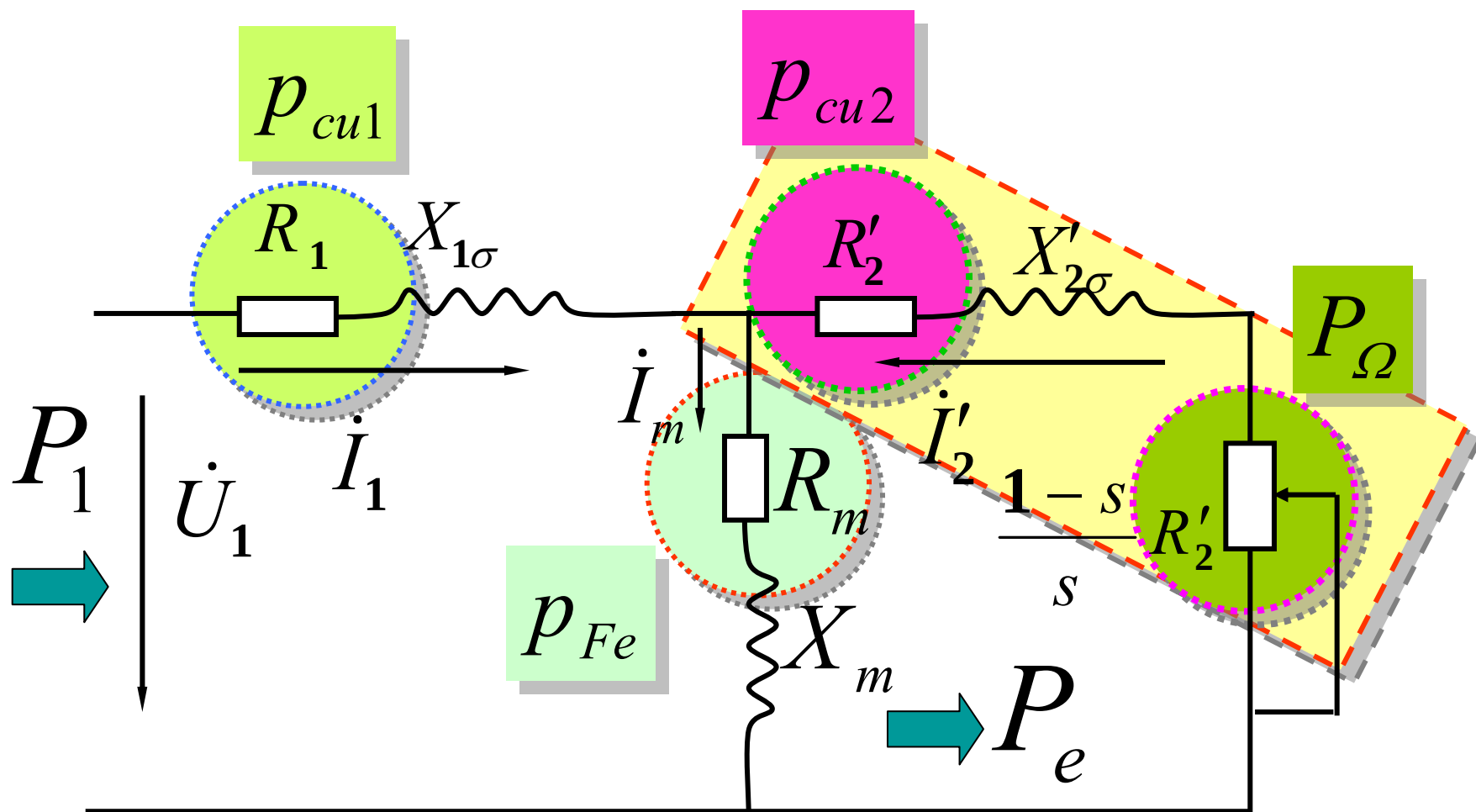


$$P_\Omega = P_e - p_{cu2} = m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2' = (1-s) P_e$$

总机械功率

问题： $s=1$ 时

功率平衡关系



电磁功率的分配规律

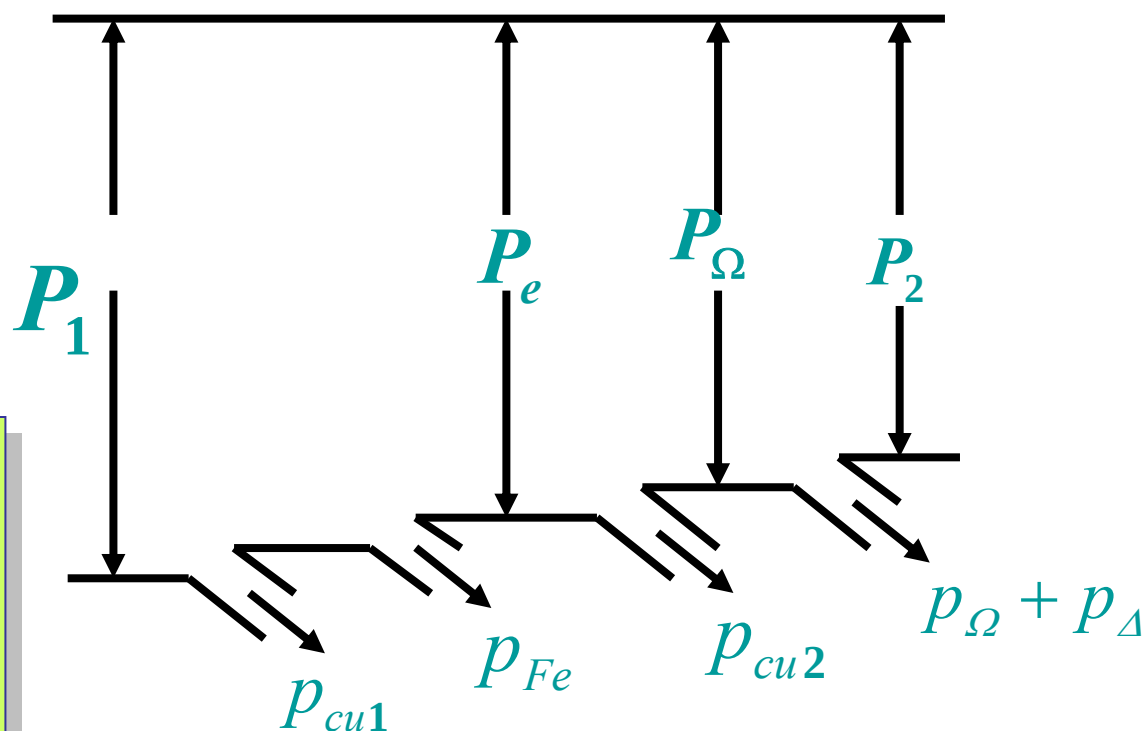
$$\frac{P_{cu2}}{P_e} = s$$

$$\frac{P_{\Omega}}{P_e} = 1 - s$$

可见，从气隙传递到转子的电磁功率分为两部分，一小部分变为转子铜损耗，绝大部分转变为总机械功率。转差率越大，转子铜损耗就越多，电机效率越低。

正常运行时电机的转差率均很小。

5.4 感应电动机的功率方程和转矩方程



从 P_Ω 中再扣除转子的机械损耗 p_Ω 和杂散损耗 p_Δ ，可得转子轴上输出的机械功率 P_2 ：

$$P_2 = P_\Omega - (p_\Omega + p_\Delta)$$

二、转矩方程和电磁转矩

转矩方程

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

电磁转矩

$$\mathbf{T}_e = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_2$$

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

$$T_e = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 N_2 k_{w2} \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = C_T \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

$$C_T = \frac{1}{\sqrt{2}} p m_2 N_2 k_{w2}$$

点评

- 功率和损耗， P 和 p 大小写符号的区别；
- 损耗是用电阻等效的，而不是电抗或者阻抗；
- 感应电机的功率图是逐渐变小的。

5.5 笼型转子的极数和相数

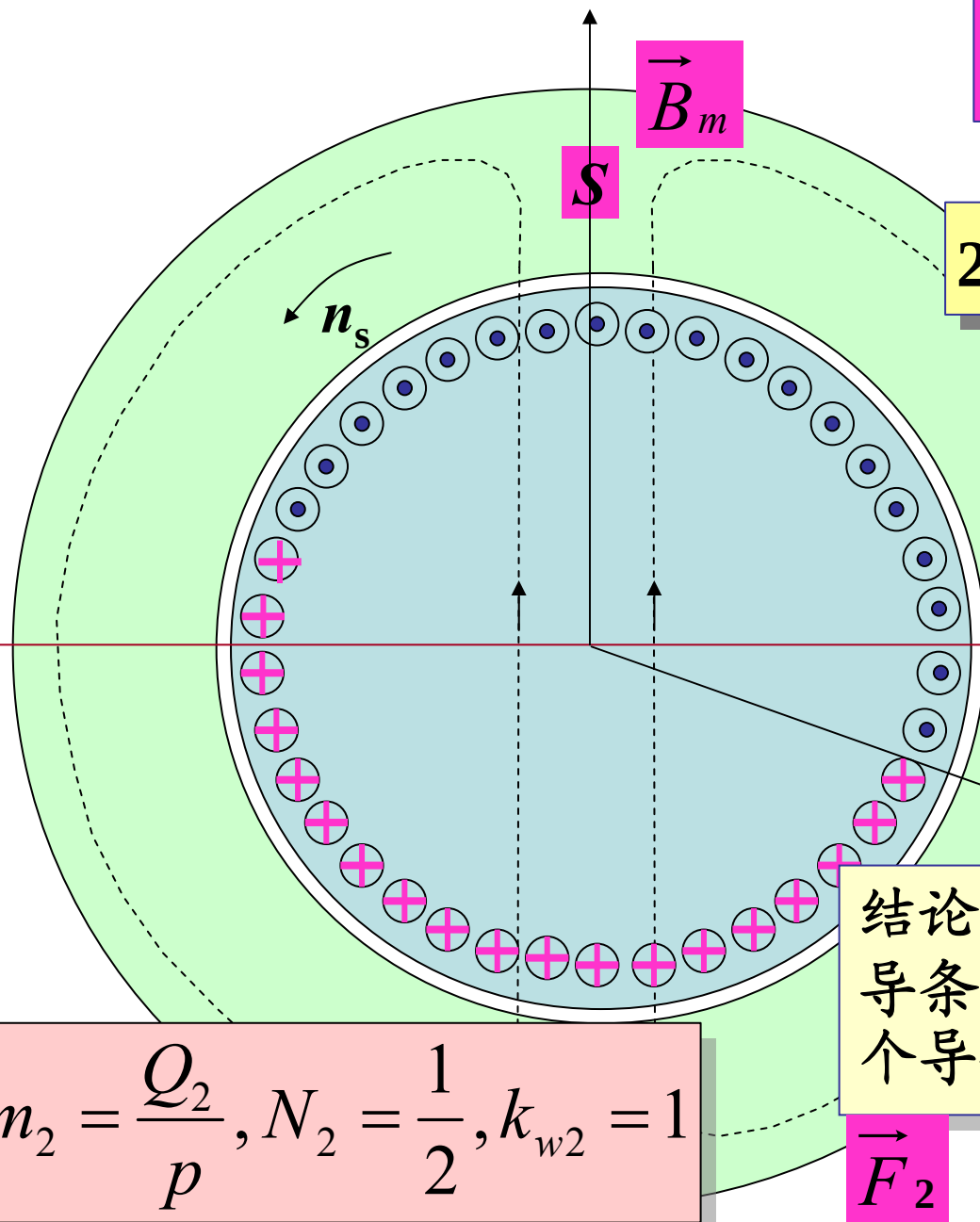
1. 实际转子漏抗 $X_{2\sigma} \neq 0$,
则电流滞后感应电动势 ψ_2

2. $\vec{B}_m$ 和 $\vec{F}_2$ 的夹角 $\delta = 90^\circ + \psi_2$

结论1: 笼型转子所生磁
动势极数和产生它的气隙
磁场的极数一致, 且定转
子磁势波相对静止

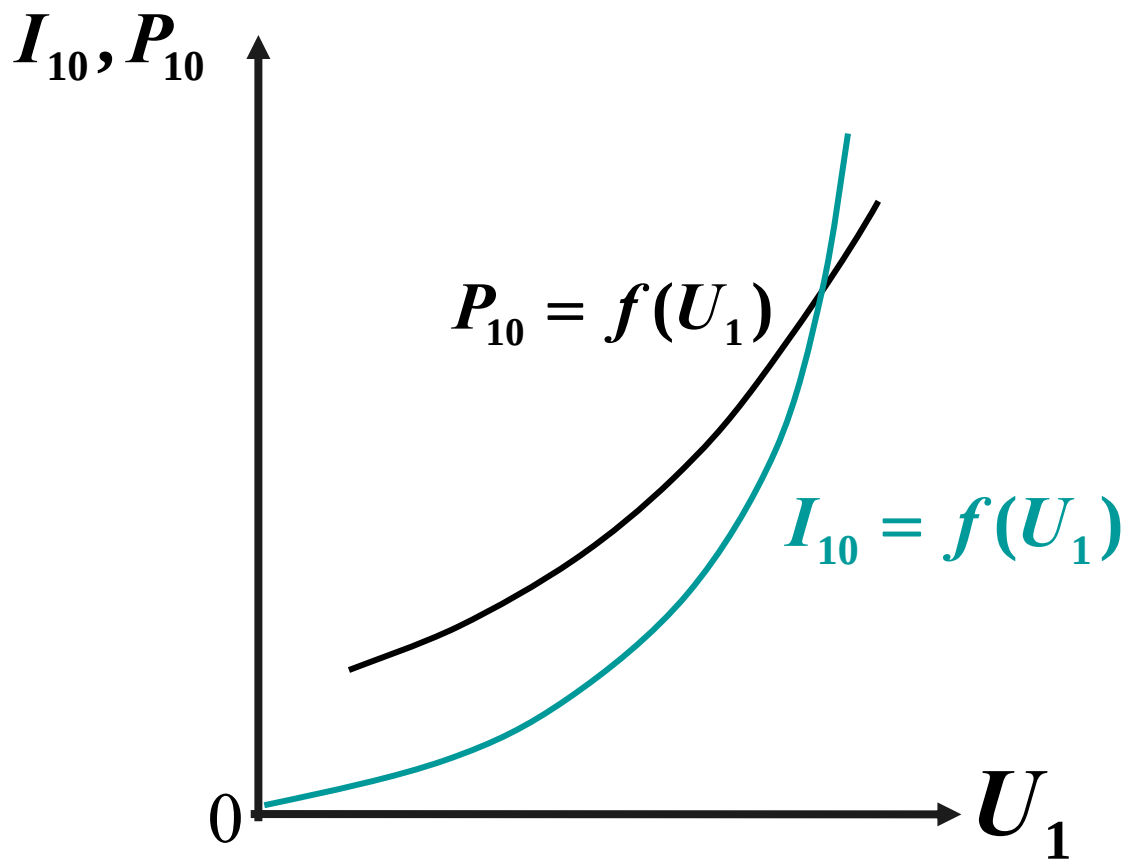
结论2: 笼型转子每对极下的每根
导条就构成一相, 因每相只有一个
导体, 不存在短距和分布

$$m_2 = \frac{Q_2}{p}, N_2 = \frac{1}{2}, k_{w2} = 1$$



一、空载试验

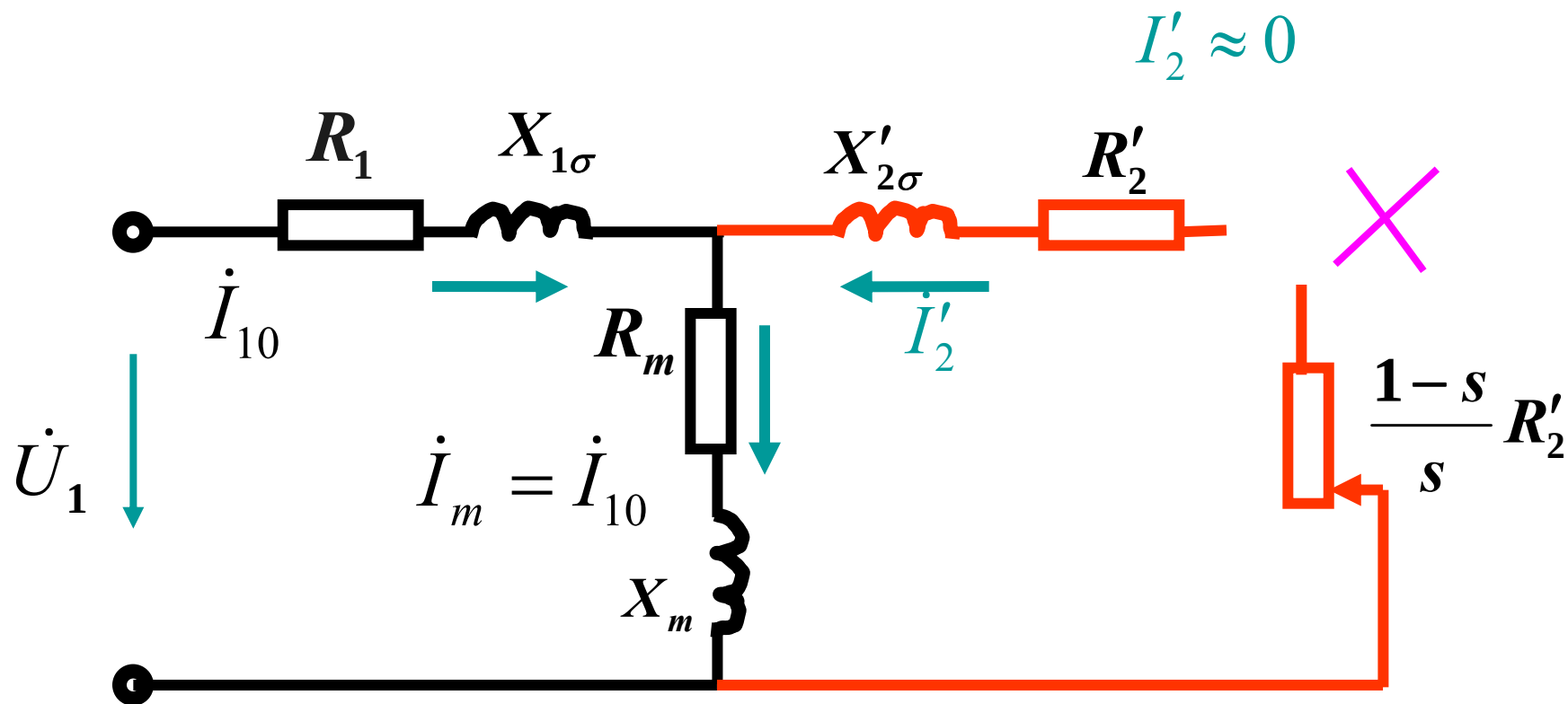
空载试验的目的是确定电动机的激磁参数 R_m 、 X_m ，以及铁耗 p_{Fe} 和机械损耗 p_{Ω} 。



空载功率组成：
定子铜耗
铁耗
机械损耗

忽略部分：
转子铜耗
杂散损耗

一、空载试验等效电路



$$R_0 = R_1 + R_m$$

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



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

铁耗和机械损耗 分离

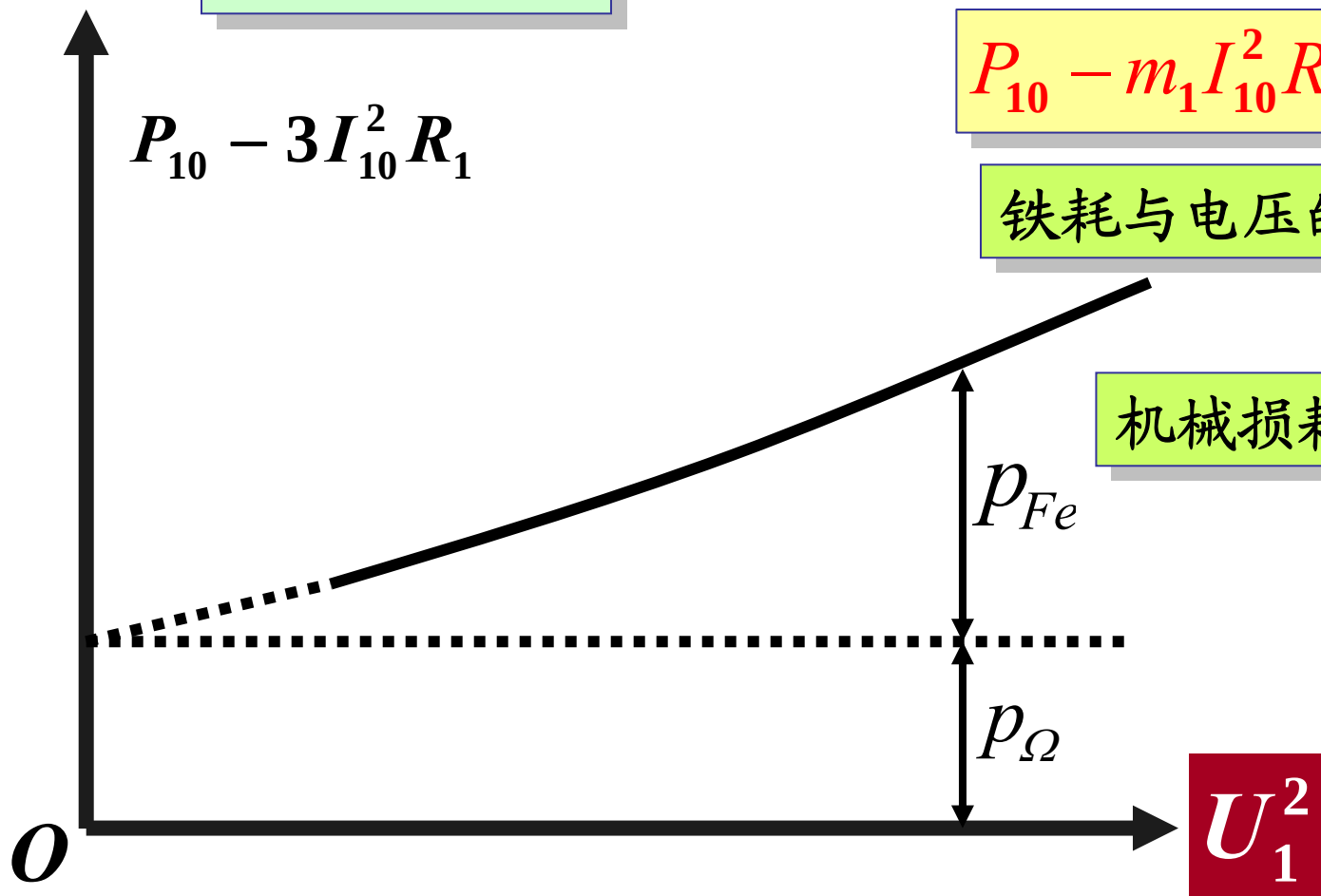
R_1 用万用表测

空载功率减去定子铜耗，即得铁耗和机械损耗两项之和

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

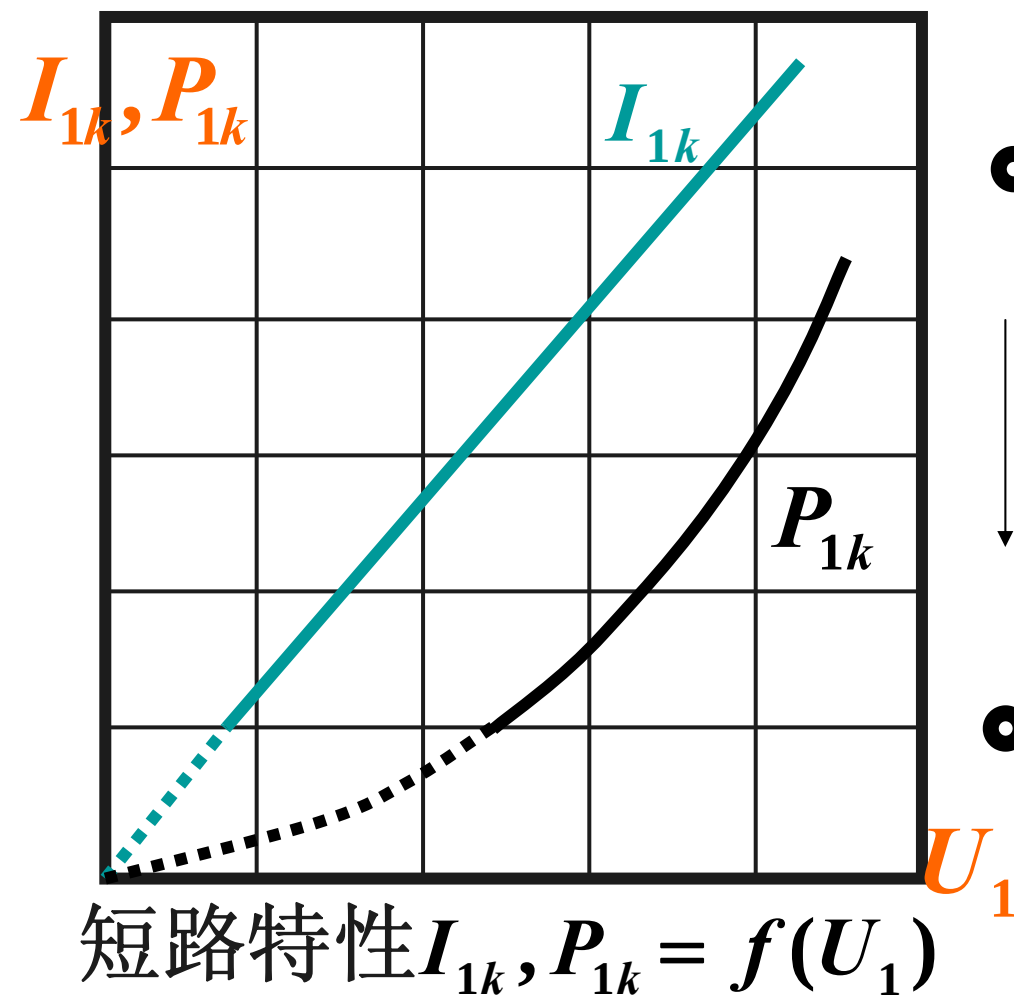
铁耗与电压的平方成正比

机械损耗与电压无关

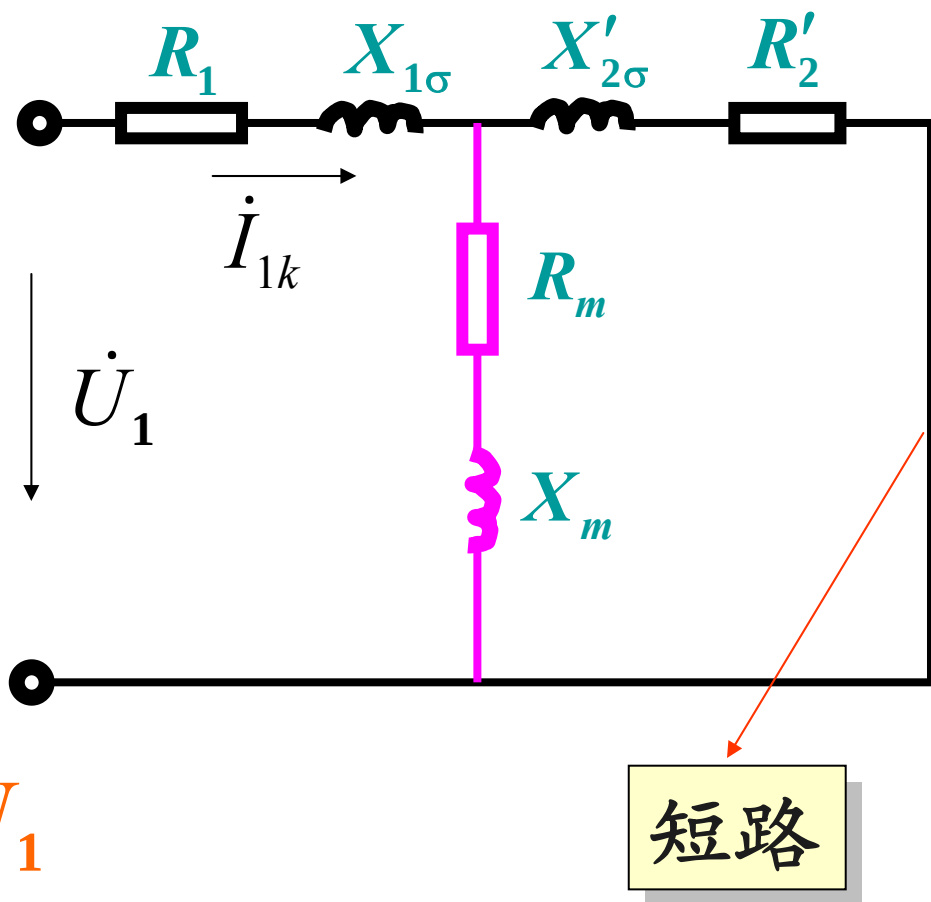


二、堵转试验

- 短路特性



堵转实验等效电路



计算所采用的值是在额定电流下的值

注意!

- 在正常工作范围内，定、转子的漏抗基本为一常值。
- 但当高转差时（例如在起动时），定、转子电流将比额定值大得多，此时漏磁路中的铁磁部分将达到饱和，从而使总的漏磁磁阻变大、漏抗变小。
- 起动时定转子的漏抗值（饱和值）将比正常时小于15%-35%左右。

5.7 感应电机的转矩—转差率曲线

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

当恒转矩时 $T_e = \text{const}$ ，保持 U_1 不变， R_1 、 $X_{1\sigma}$ 、 $X'_{2\sigma}$ 不变，

当调节 R'_2 引起转速变化时， $\frac{R'_2}{s}$ 不变

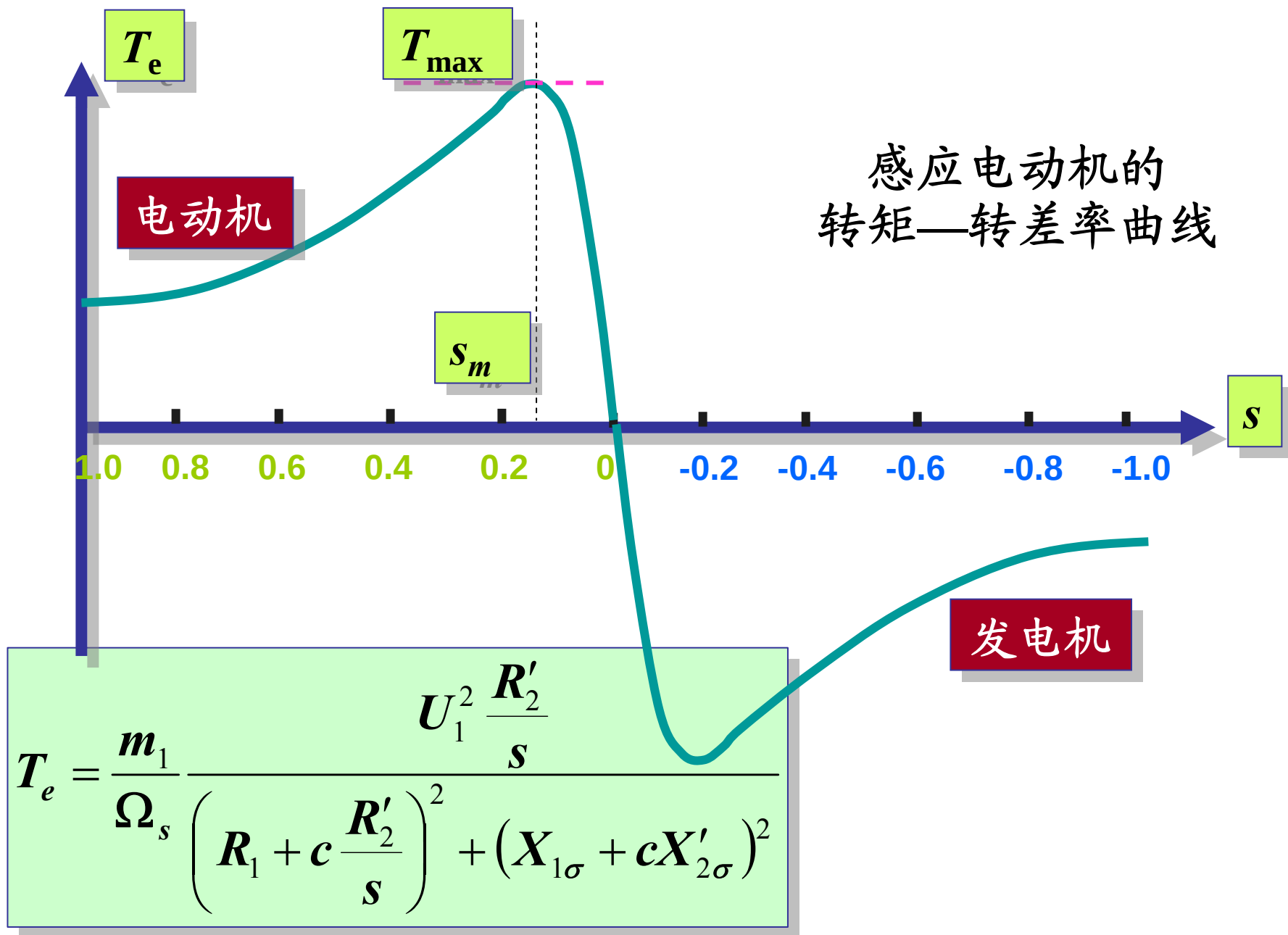
问题1：恒转矩时增大转子回路串电阻，转子转速

(1) 增大； (2) 减小； (3) 不变

问题2：恒转矩时增大转子回路串电阻，定转子电流

(1) 增大； (2) 减小； (3) 不变

感应电动机的
转矩—转差率曲线



二、最大转矩和起动转矩

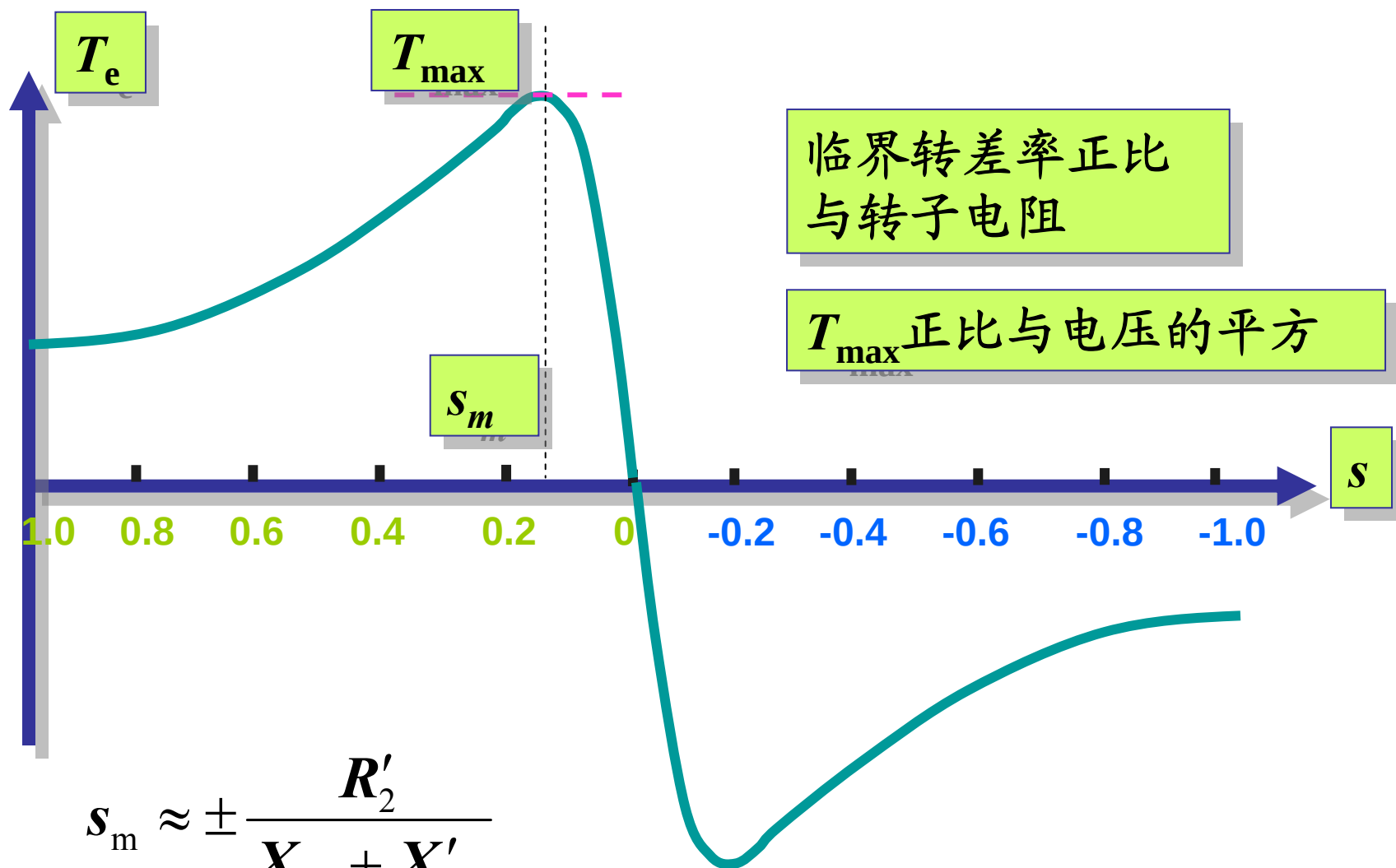
最大转矩

$$s_m = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}} \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}$$

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

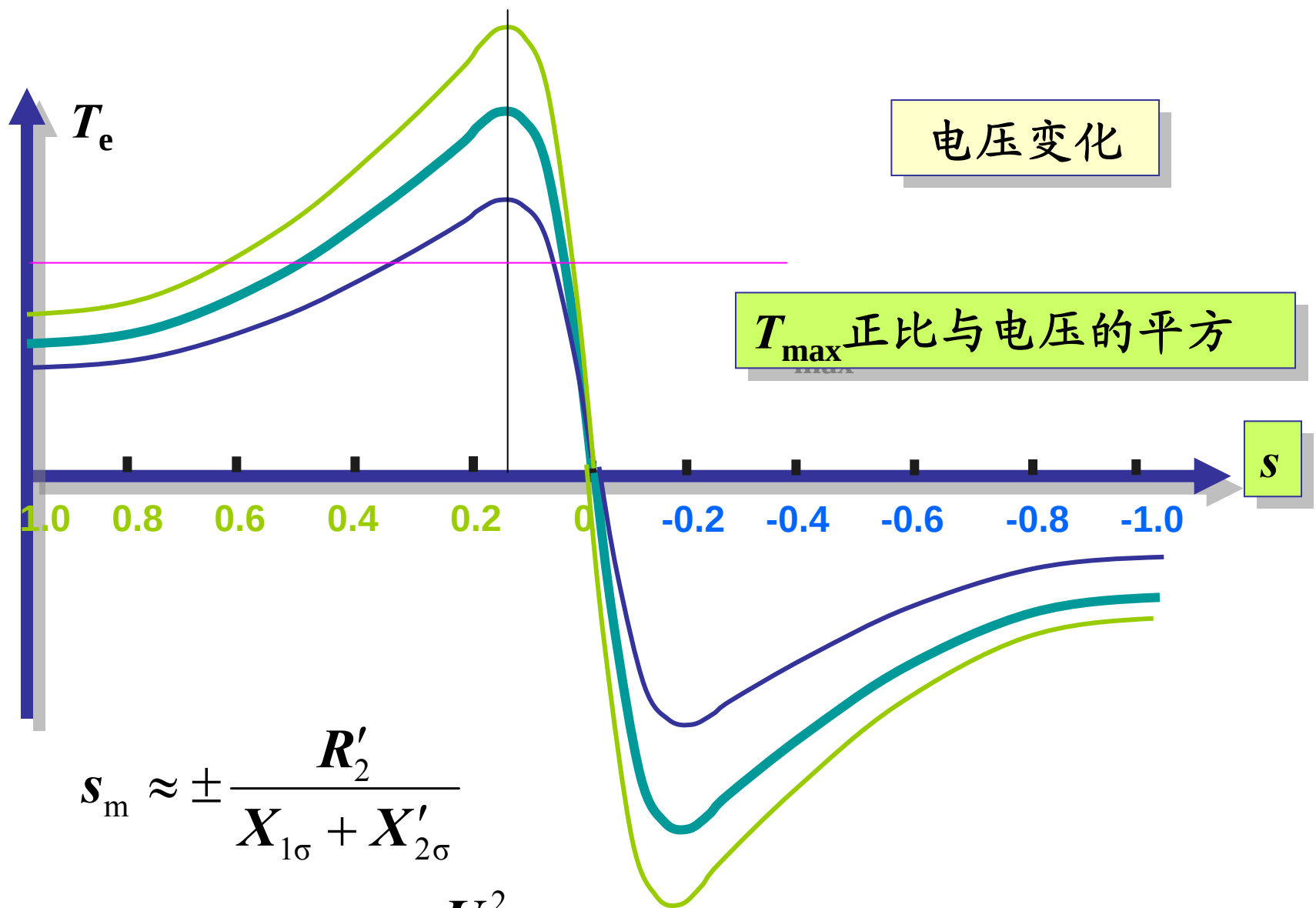
起动转矩

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



$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}$$

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

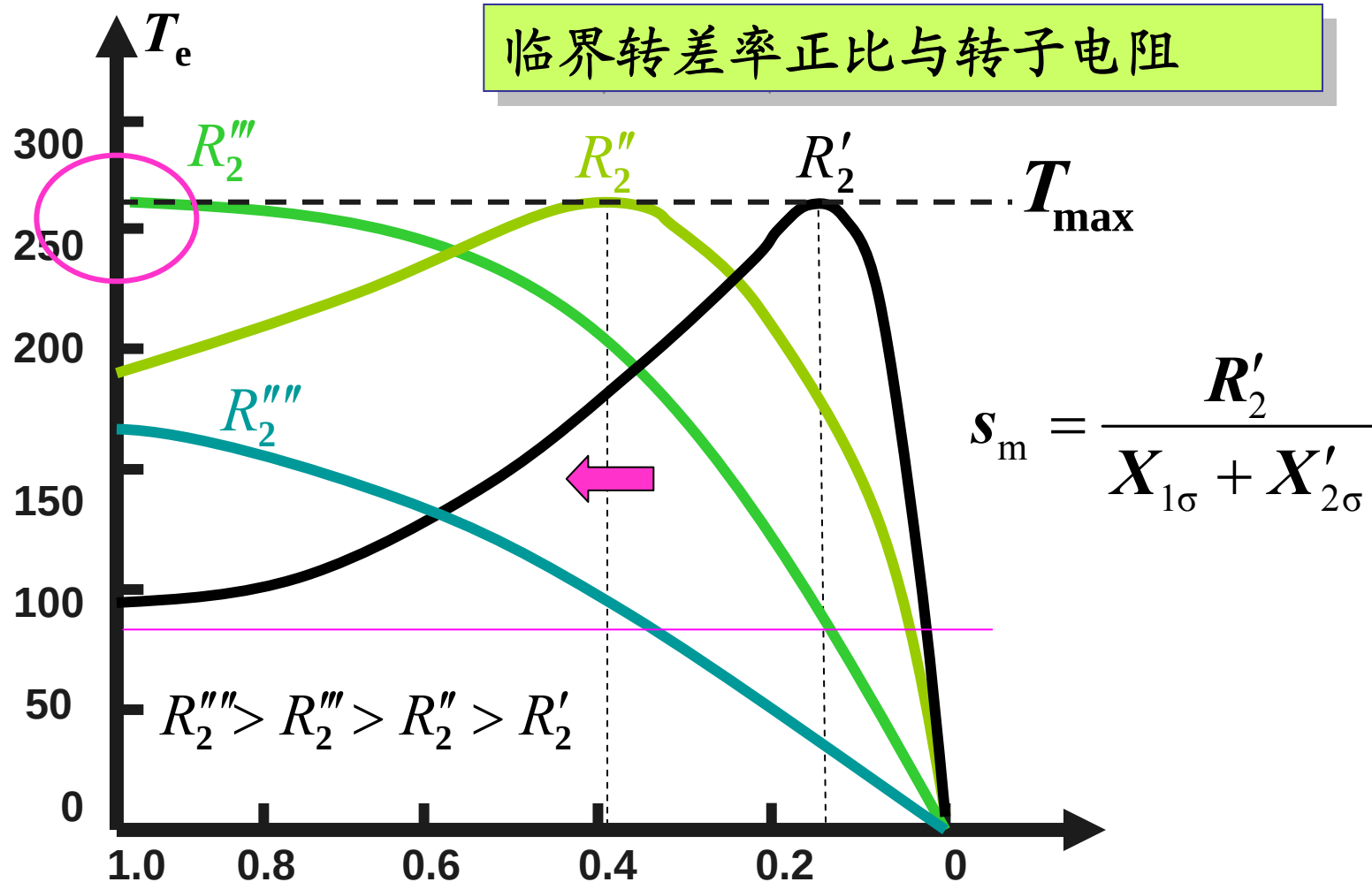


$$s_m \approx \pm \frac{R'_2}{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}$$

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

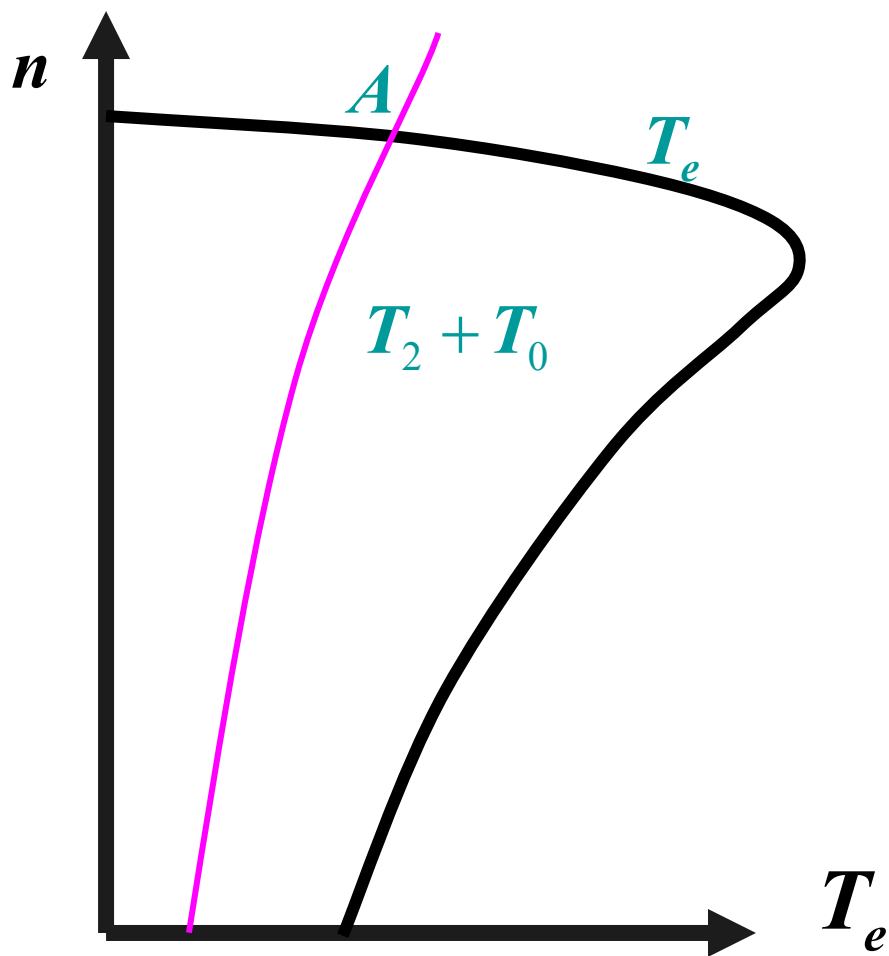
转子电阻变化时的 T_e -s 曲线

$s=1$ 时的转矩 - 起动转矩



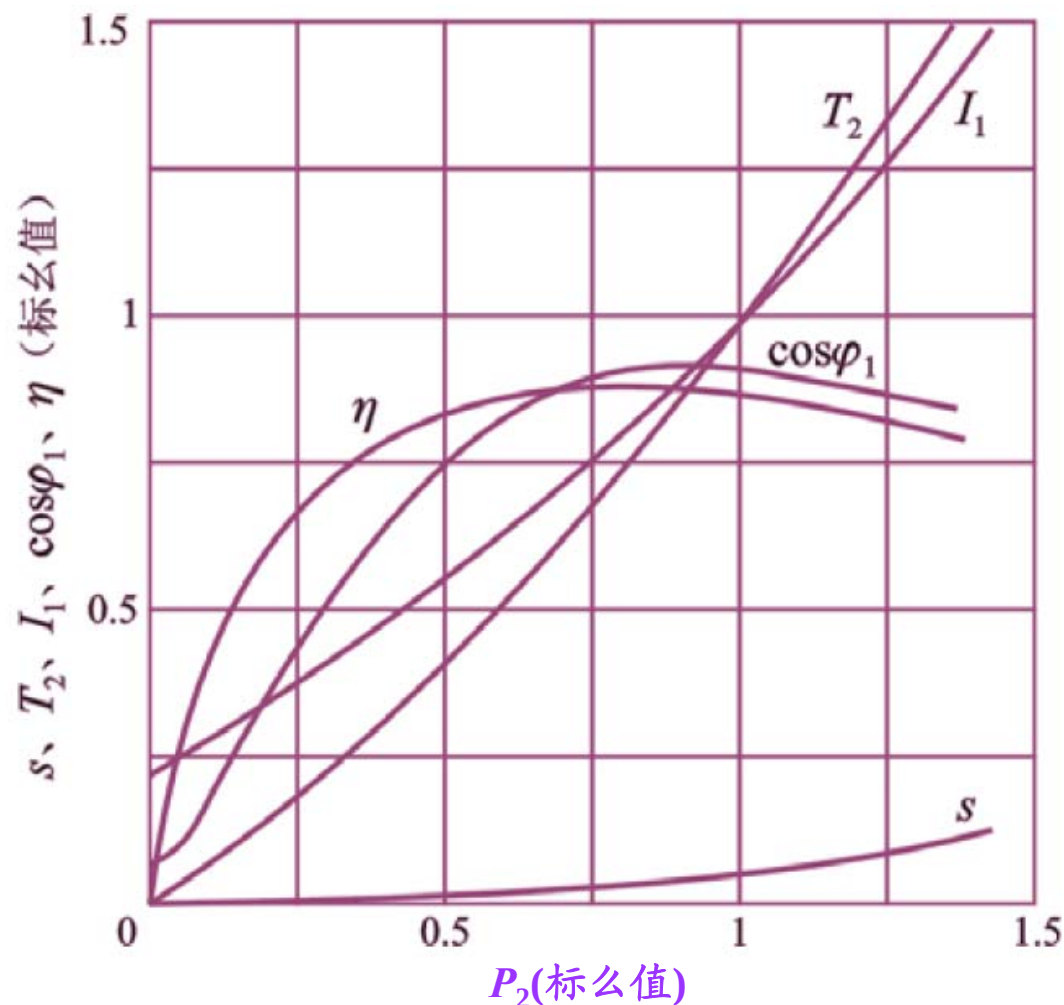
当转子电阻为 R_2'' 起动转矩等于最大转矩

三、转矩-转速特性(机械特性)



5.8 感应电动机的工作特性

在额定电压和额定频率下，电动机的转速 n 、电磁转矩 T_e 、定子电流 I_1 、功率因数 $\cos\varphi_1$ 效率 η 与输出功率 P_2 的关系曲线，称为感应电动机的工作特性。



掌握重点

- 定子电流的变化特点
- 功率因数恒小于1且为滞后：从等效电路可见，感应电动机是一个感性电路，所以感应电动机的功率因数恒小于1，且为滞后。
- 在空载运行时，功率因数很低，约为0.1~0.2
- 在额定负载附近，功率因数将达到最大值

5.9 感应电动机的起动

1. 笼型感应电机的起动

- 直接起动
- 降压起动

A. 星三角起动，起动电流是原来的 $1/3$

B. 自耦变压器起动，起动电流是原来的 $1/k_a^2$

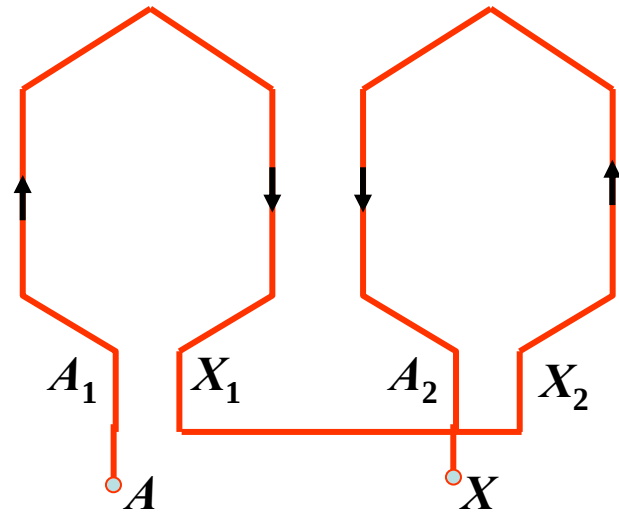
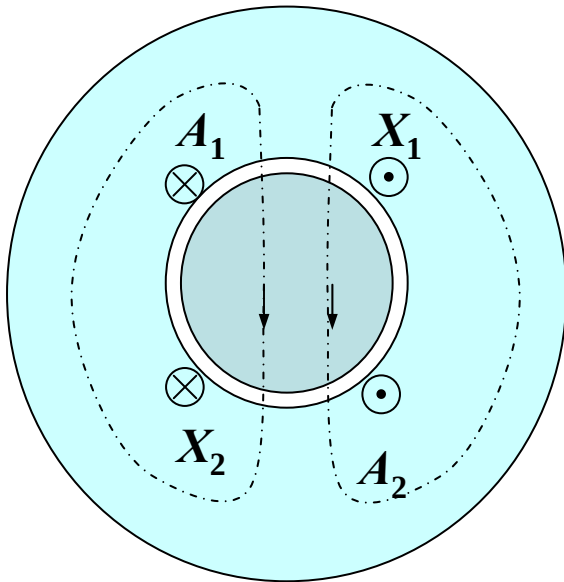
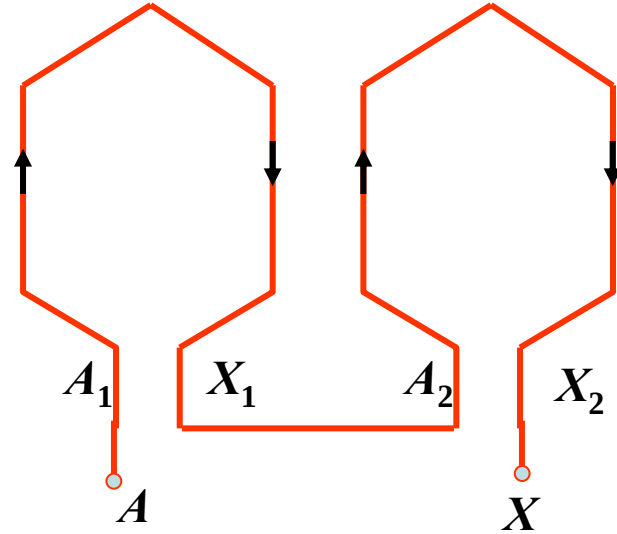
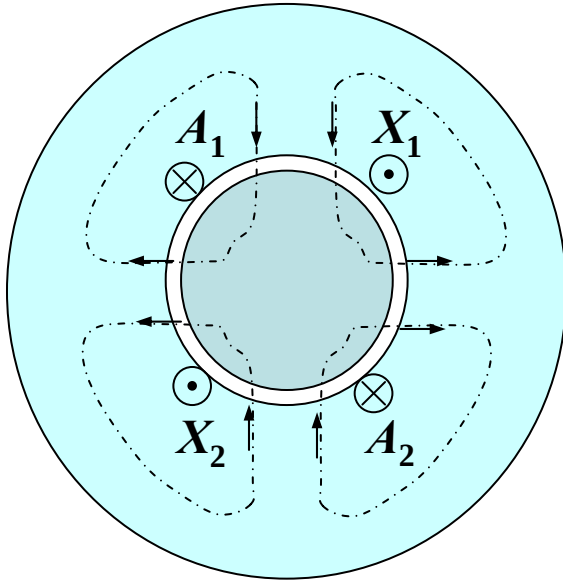
2. 绕线型感应电动机的起动

5.10 感应电动机的调速

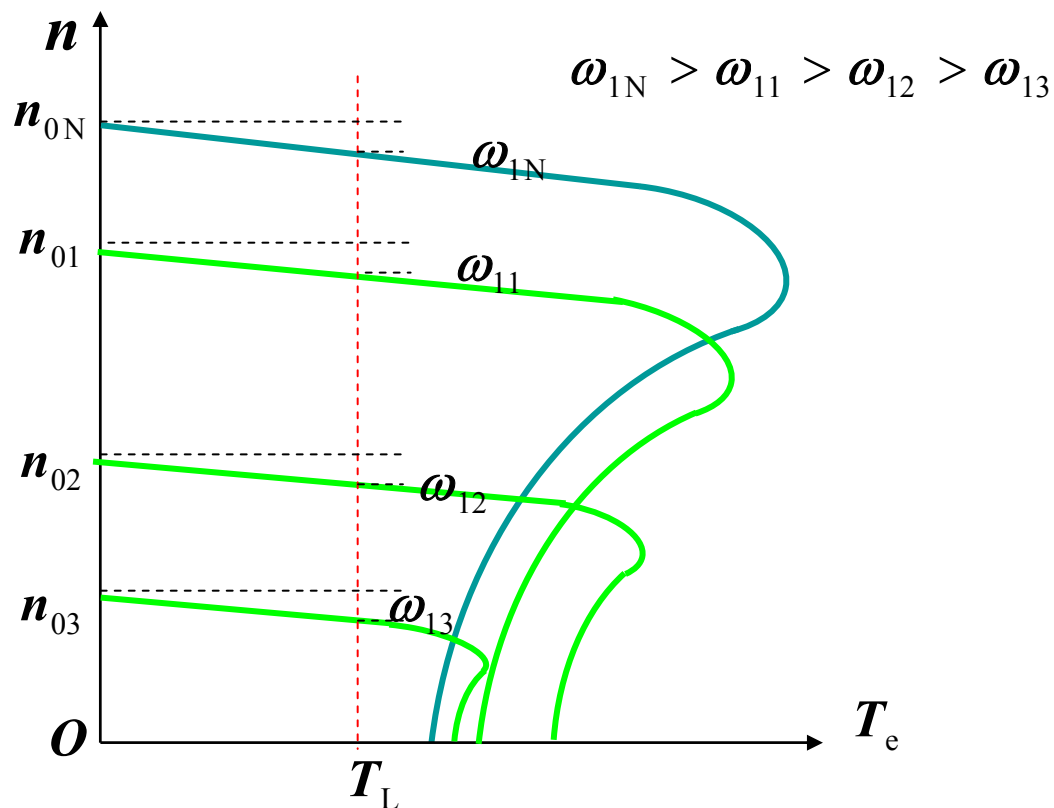
$$n = \frac{60 f_1}{p} (1 - s)$$

1. 变极调速
2. 变频调速
3. 改变转差

变极对数调速

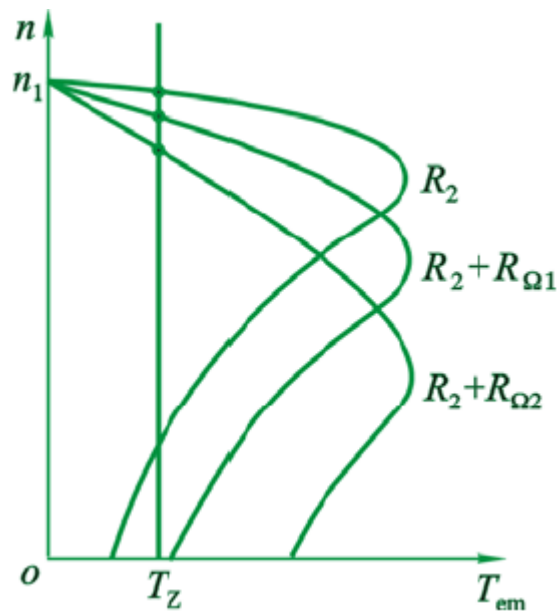


变频调速



- 在恒压频比条件下，改变频率时，机械特性曲线基本上是平行下移动的。
- 它们和直流他励电机变压调速时的情况基本相似。

改变转子回路串电阻调速



作业

**5-6 , 5-8, 5-9, 5-14, 5-15,
5-17, 5-18, 5-20, 5-22**