

电机CAD技术

试用讲义

一、概述

1.1 课程目的

- 1、掌握电机设计的实施过程
- 2、掌握电机性能分析的基本方法
- 3、初步掌握电机CAD软件编制
- 4、了解电机设计分析的相关软件
- 5、了解电机机械CAD相关软件

1.2 中小型电机发展趋势

- ◆ 调整产品结构，扩大派生产品规模
- ◆ 以节能、环保为目标更新产品
- ◆ 扩大产品出口
- ◆ 技术改造，组合兼并

1.3 电机种类

◆ 传统电机

- 1、三相电机（三相异步、同步、...）
- 2、单相电机（单相异步、串励、...）
- 3、直流电机（电磁式、永磁式、...）
- 4、低速电机

◆ 机电一体化电机

- 1、变频感应电机
- 2、无刷直流电机
- 3、步进电机
- 4、开关磁阻电机
- 5、低速大转矩调速电机
- 6、直线电机

◆ 新原理电机

1、超声波电机

2、无轴承电机

1.4 电机设计与制造现状

- ◆ 电机电磁CAD
- ◆ 电机机械CAD
- ◆ 电机制造

二、Visual Basic简介

2.1 Visual Basic概况

2.2 创建第一个程序

2.3 VB软件开发环境

2.4 VB的基本语言

2.4.1 数据类型

数据类型

存储空间大小

范围

Byte

1 个字节

0 到 255

Boolean

2 个字节

True 或 False

Integer

2 个字节

-32,768 到 32,767

Long

4 个字节

-2,147,483,648 到 2,147,483,648

(长整型)

Single

4 个字节 负数时从 $-3.402823E38$ 到 $-1.401298E-45$;

(单精度浮点型)

正数时从 $1.401298E-45$ 到 $3.402823E38$

Double

8 个字节

负数时从 $-1.79769313486232E308$ 到

(双精度浮点型)

 $-4.94065645841247E-324$;正数时从 $4.94065645841247E-324$ 到 $1.79769313486232E308$

Currency

变比整型)

8 个字节

从 -922,337,203,685,477.5808 到
922,337,203,685,477.5807

Decimal

14 个字节

没有小数点时为 +/-
79,228,162,514,264,337,593,543,950,335,
而小数点右边有 28 位数时为 +/-
7.9228162514264337593543950335;
最小的非零值为 +/-
0.00000000000000000000000000000001

Date

8 个字节

100 年 1 月 1 日到 9999 年 12 月 31 日

变长)

10 字节加字符串长度

0 到大约 20 亿

Object

4 个字节

任何 Object 引用

tring (变长)	10 字节加字符串长度	0 到大约 20 亿
tring (定长)	字符串长度	1 到大约 65,400
variant (数字)	16 个字节	任何数字值, 最大可达 Double 的范围
variant (字符)	22 个字节加字符串长度	与变长 String 有相同的范围
用户自定义 (利用 Type)	所有元素所需数目	每个元素的范围与它本身的数据类型的范围相同。

日期数据（Date）转换

小数点左边数据代表日期，基准日：1899年12月31日；小数点右边数据代表时间：0为午夜12点，0.5为中午12点

例：

Option Explicit

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    Dim TestDate1 As Date
```

```
    Dim TestDate2 As Date
```

```
    Dim TestDate3 As Date
```

```
    TestDate1 = 0
```

```
    TestDate2 = 1.5
```

```
    TestDate3 = -1.5
```

```
    Print "TestDate1 =" + Str(TestDate1)
```

```
    Print "TestDate2 =" + Str(TestDate2)
```

```
    Print TestDate3
```

```
End Sub
```

[Private | Public] Type 自定义类型名

元素名1 As 类型

元素名2 As 类型

.....

元素名n As 类型

End Type

例:

Type StateData

CityCode (1 To 100) As Integer

County As String * 30

End Type

2.4.2 常量与变量

例：

Public Const Poem as String=“书山有路勤为径，
学海无涯苦做舟”

Dim 变量名 As 类型

2.4.3 变量的作用域

- (1) 局部变量
- (2) 窗体和模块级变量
- (3) 全局变量

全局变量只能在模块中声明，用
Public。

2.4.3 运算符和表达式

- 1) ^、*、/、+ (&)、-、\、Mod
- 2) 关系运算符、逻辑运算符
- 3) 运算符和括号将运算对象连接的式子

例：

'解一元二次方程

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
Dim a!, b!, c!, x!
```

```
    a = 8.9: b = 14.56: c = -21
```

```
    x = (-b + Sqr(b ^ 2 - 4 * a * c)) / (2 * a)
```

```
    Debug.Print "x = " & x
```

```
End Sub
```

2.4.4 数组

(1) 静态数组

1) 一维数组

2) 多维数组 (最多60维)

默认数组下界为0, 可用Option Base n语句改变。

(2) 动态数组

例:

```
Dim A1() As Single, A2() As Single
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
    ReDim A1(10)
```

```
    ReDim A2(2, 5)
```

```
    .....
```

```
End Sub
```

(3) 控件数组

2.4.5 函数与过程

2.4.6 选择结构

if ... then ... else ... endif

select case ...

case ...

case ...

end case

2.4.7 循环语句

(1) For ...

(2) Do ..

三、电机的主要参数 之间的关系

3.1 电机设计流程

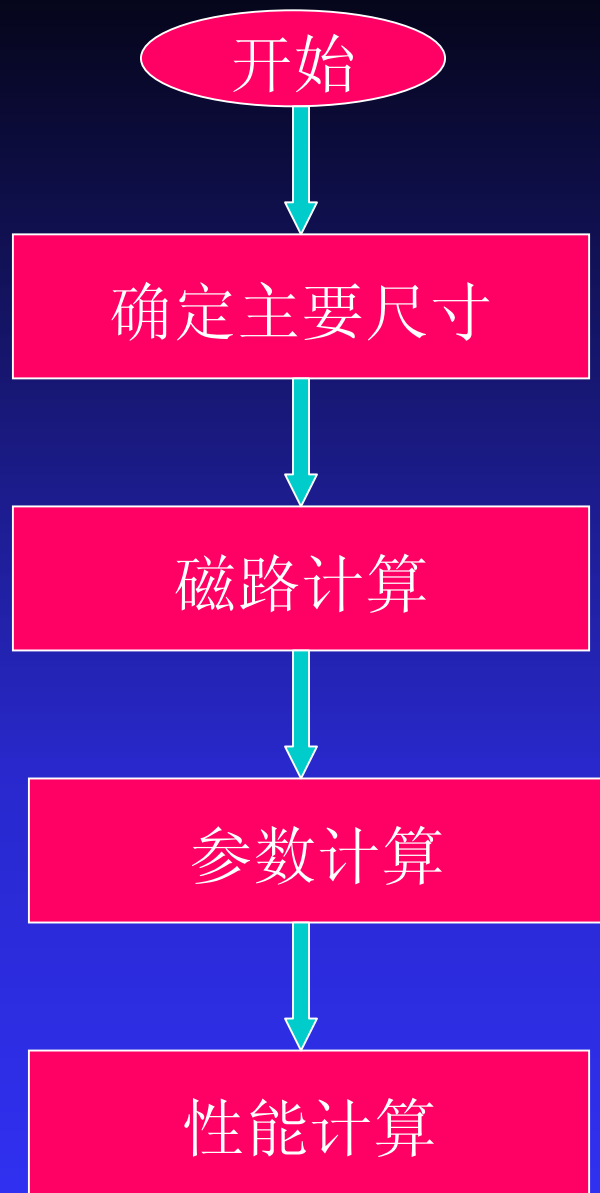
开始

确定主要尺寸

磁路计算

参数计算

性能计算



3.2 电机的主要参数之间的关系式

1、主要尺寸

2、关系式（输出方程）

建立主要尺寸与电磁参数之间的关系。

1) 直流电机

2) 交流电机

3.3 电磁负荷的选择

一、电磁负荷对电机性能和经济性的影响

(一) 线负荷A高，磁负荷 B_δ 不变

(1) 电机体积减小，节约材料

(2) B_δ 一定时，由于铁心重量减小，铁耗减小

(3) 绕组用铜量增加

(4) 增大电枢单位表面上铜耗，绕组温升增高

$$q_a = \rho AJ$$

(5) 影响电机参数和电机特性

(二) 磁负荷 B_{δ} 高，线负荷A不变

(1) 电机体积减小，节约材料

(2) 基本铁耗增大

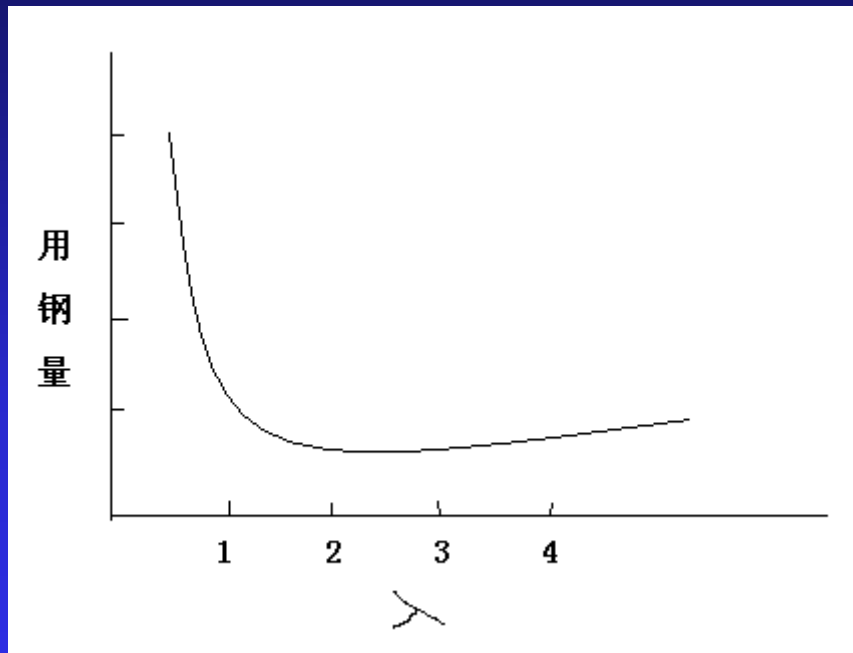
(3) 磁路饱和程度增大

(4) 影响电机参数和电机特性

二、线负荷A和磁负荷 B_{δ} 的选择

3.4 电机主要尺寸比的选择及确定主要尺寸的一般方法

一、主要尺寸比的选择

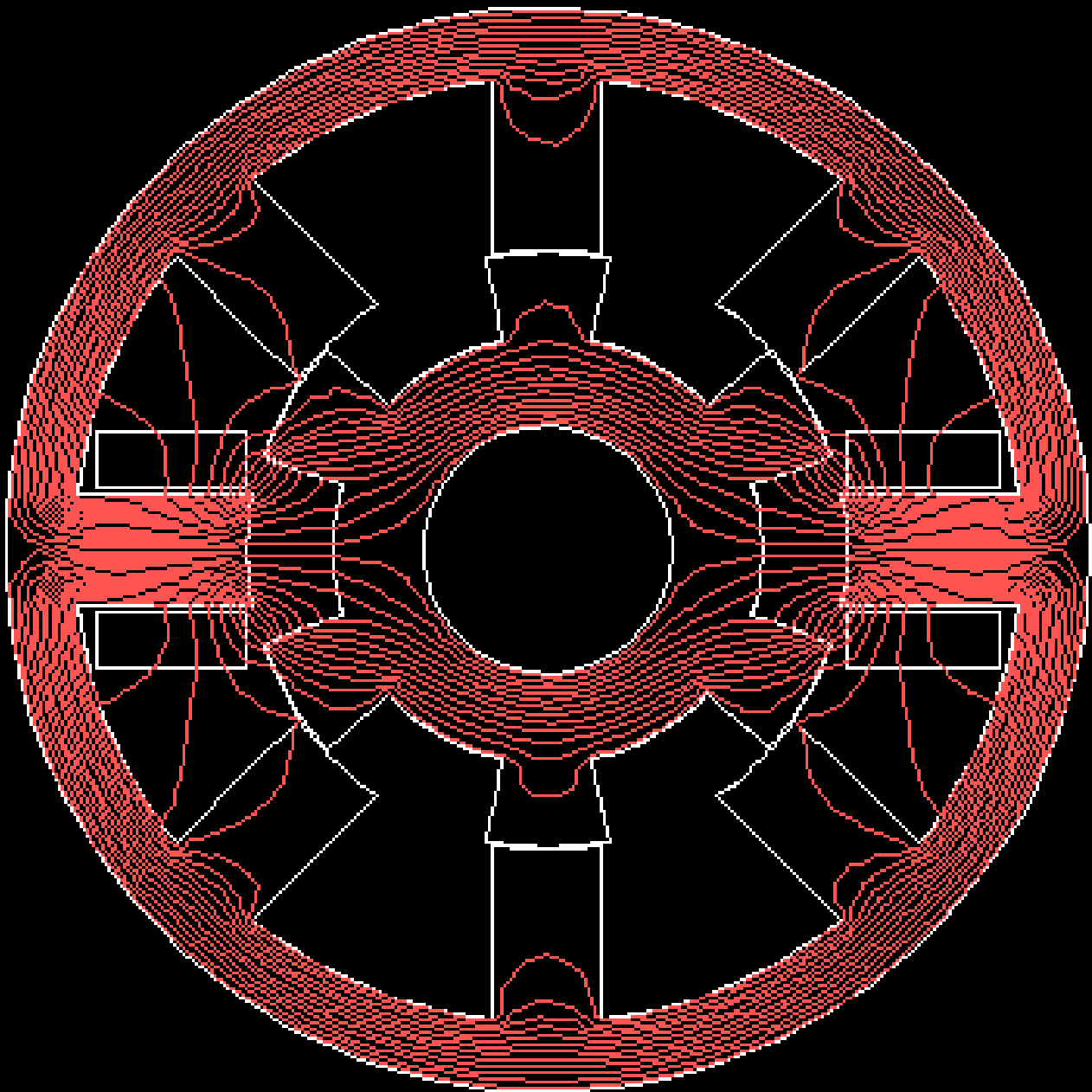


二、确定主要尺寸的一般方法

四、磁路计算

主要目的:

确定产生主磁路所必须的磁化力或励磁磁动势（简称磁势），校核铁心各部分磁通密度的合理性，计算励磁电流以及电机的空载特性曲线。



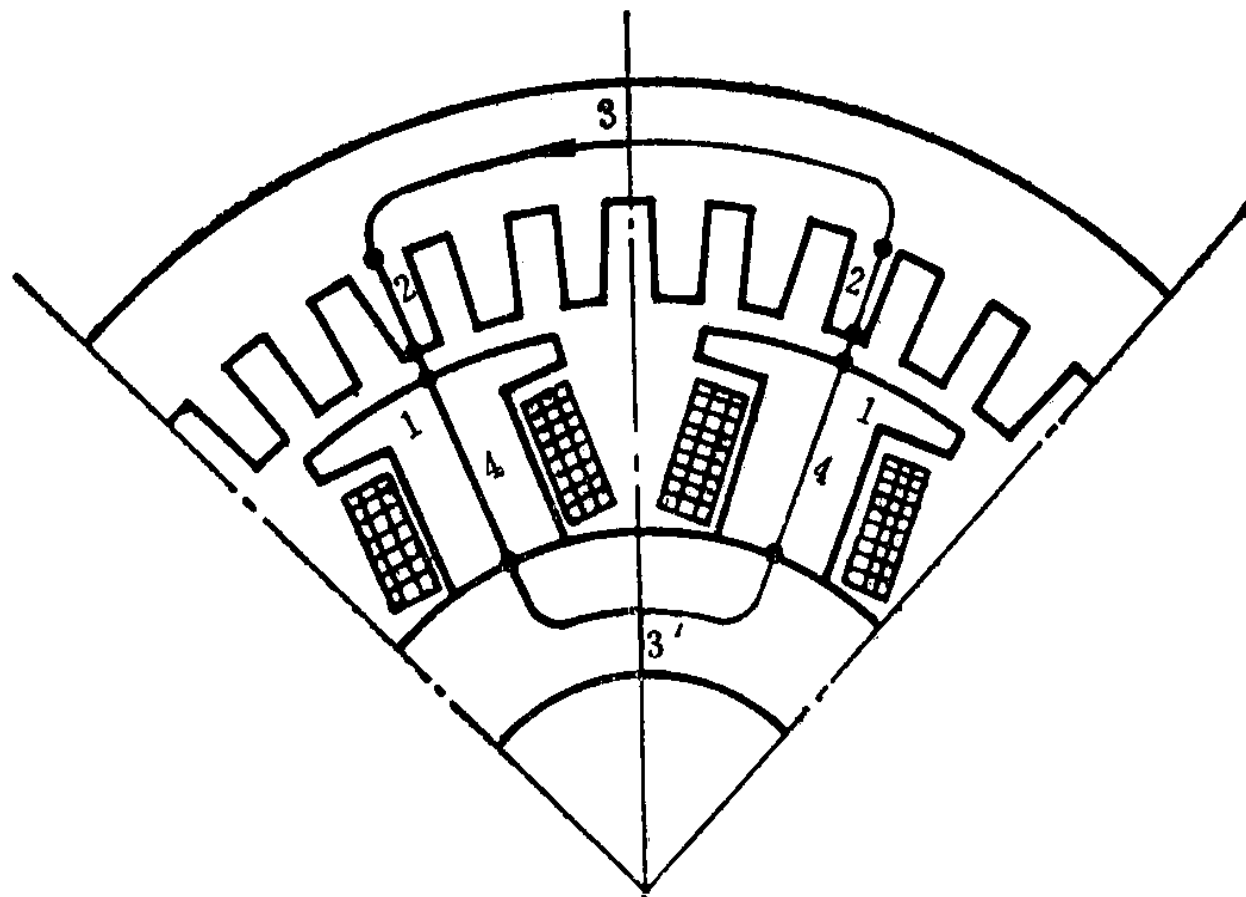


图3-1 电机的磁路

4.1 概述

4.1.1 磁路计算的基本原理

全电流定律（安培环路定律）：磁场强度向量沿任一闭合回路的线积分等于该回路所包围的全电流（电流代数和），

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

如果积分路径沿着磁场强度向量取向（即沿着磁力线），则

$$\oint_l H dl = \sum i$$

铁心各部分的磁场化为等效的各段磁路。各段磁路磁通沿截面均匀分布， $B=\text{Const}$ ，由 $B=\mu H$ ，
 \Rightarrow 各段中磁场强度 $H=\text{Const}$ ，故

$$H_1 L_1 + H_2 L_2 + \cdots + H_n L_n = F_0$$

即

$$F_1 + F_2 + \cdots + F_n = F_0$$

$$\sum F = F_0$$

各类电机磁路可分为5段：

空气隙；定子齿（或磁极）；转子齿（或磁极）；定子轭；转子轭

4.2 空气隙磁压降的计算

4.2.1 计算极弧系数 α_p' 的确定

4.2.2 电枢或气隙的轴向计算长度 l_{ef}

4.2.3 气隙系数 K_δ

4.2.4 极轭间隙气隙磁压降的计算

4.3 齿部磁压降的计算

4.3.1 齿磁密 B_t 的计算

1) $B_t < 1.8T$ 时

2) $B_t \geq 1.8T$ 时

4.4 轭部磁压降的计算

按所衔接的是齿或是磁极可分为极联轭和齿联轭两种。

4.4.1 极联轭磁压降的计算

1) 交流电机齿联轭磁压降

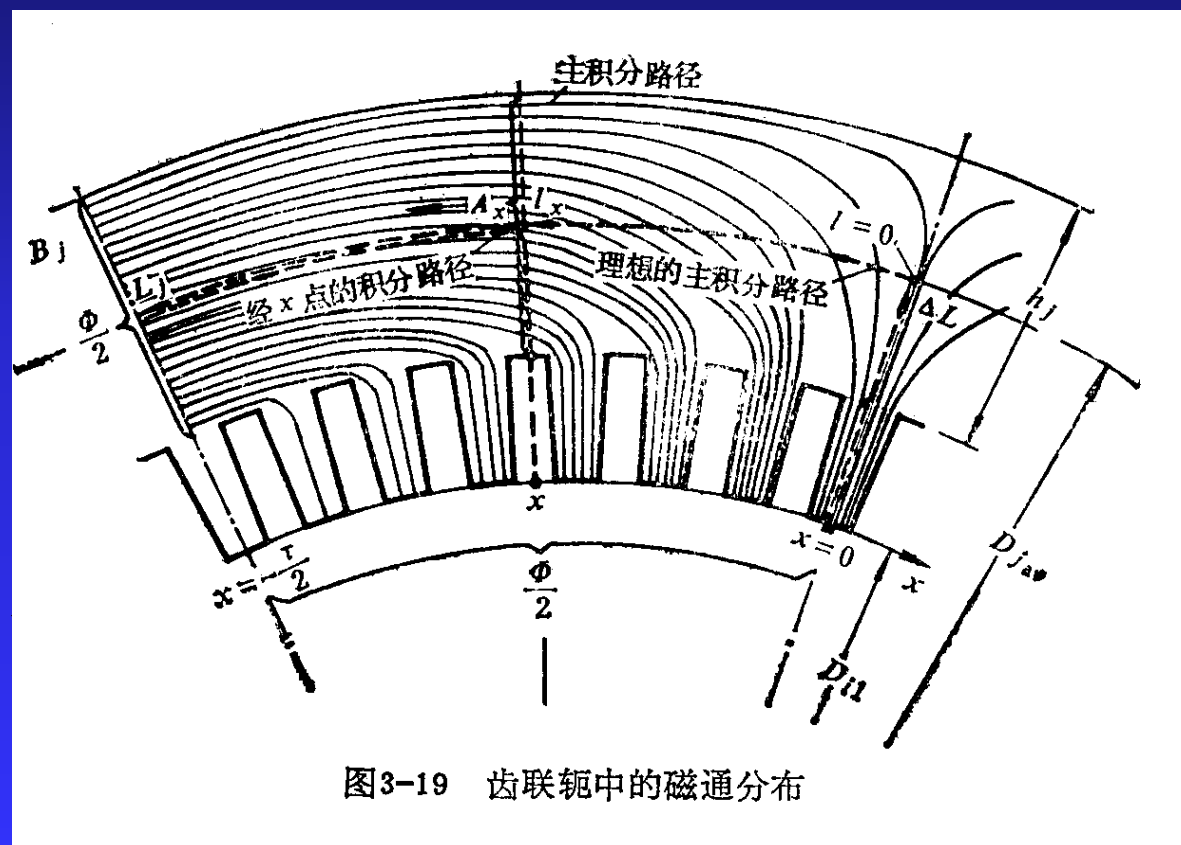


图3-19 齿联轭中的磁通分布

2) 直流电机齿联轭磁压降

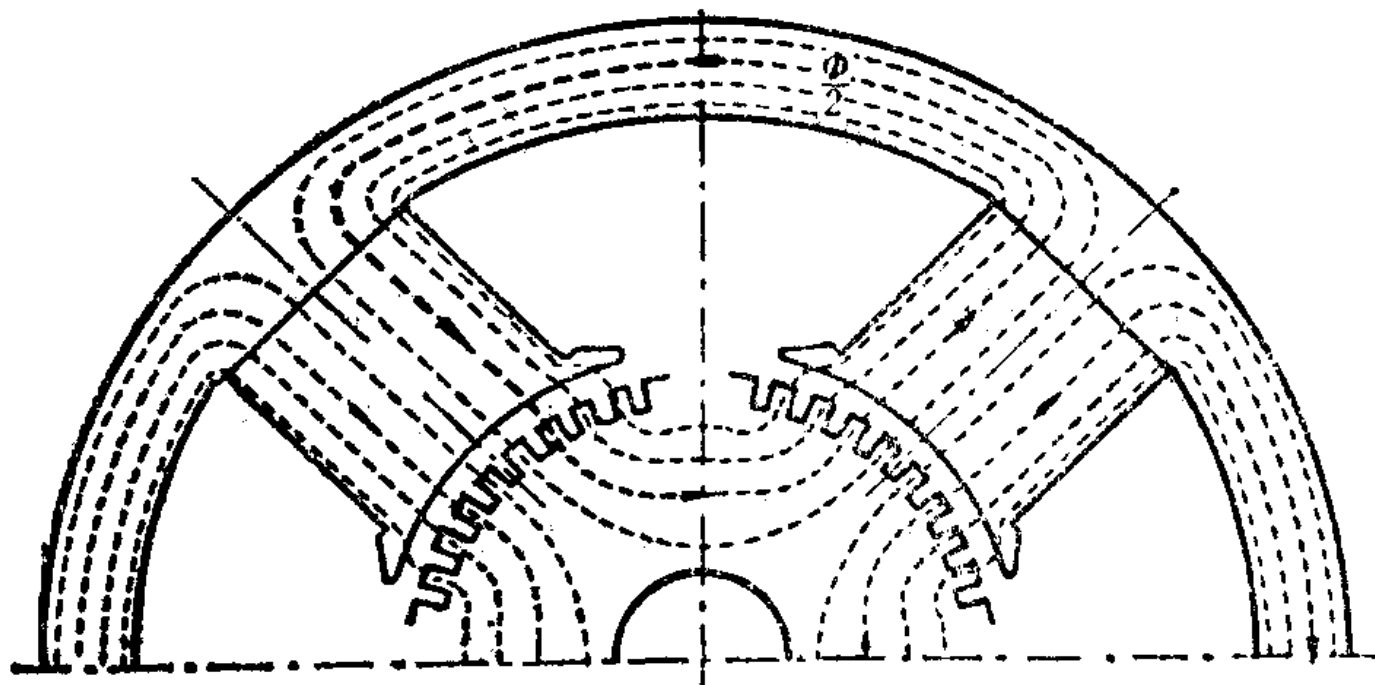
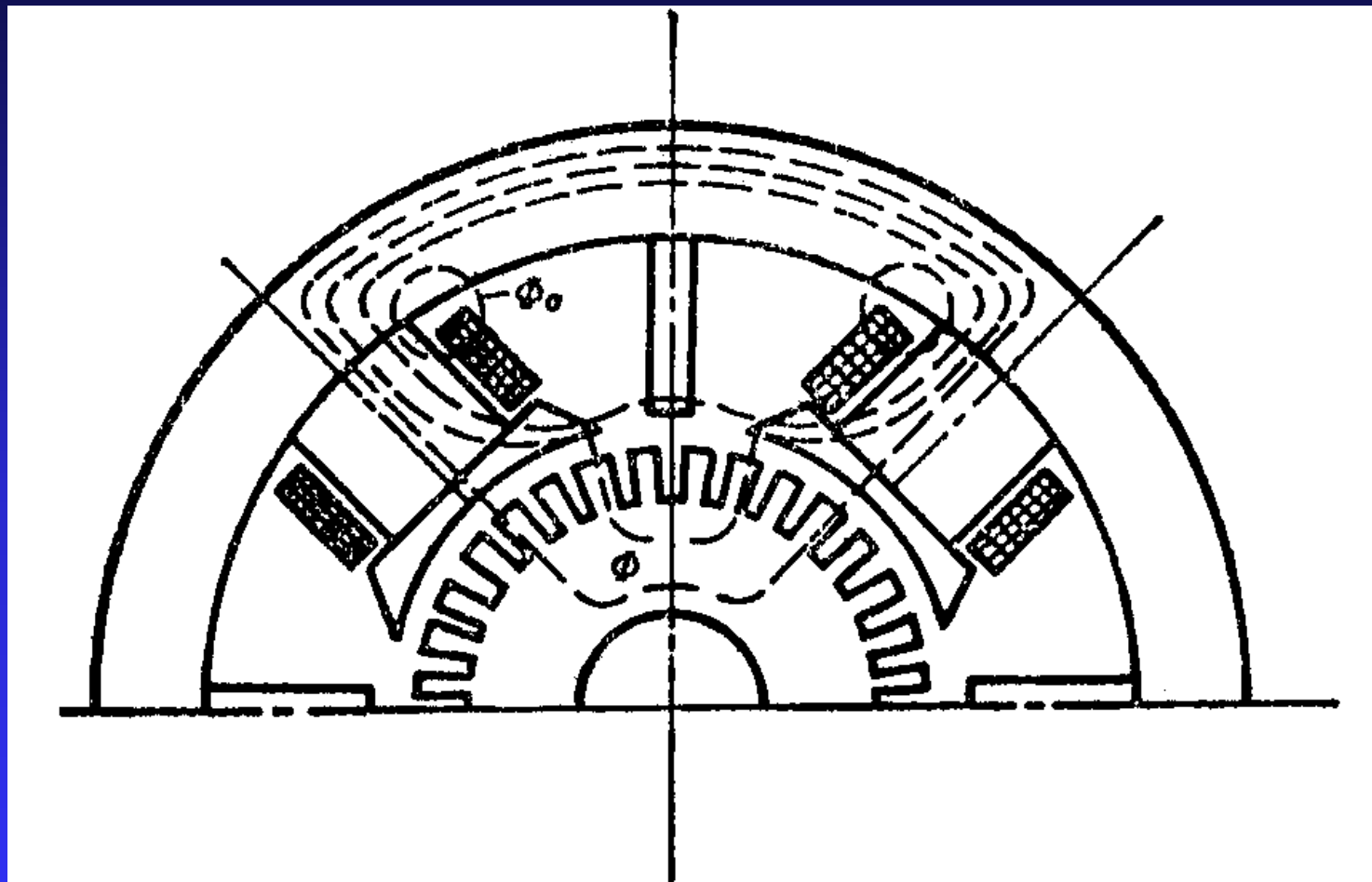


图3-21 直流电机电枢轭中磁通分布示意图
(换向极及励磁绕组未画出, 磁极漏磁通未画出)

4.5 磁极漏磁系数与磁极磁压降的计算

4.5.1 磁极漏磁系数 σ



磁极磁通

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi \left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}\right) = \sigma \Phi$$

其中，漏磁系数

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}$$

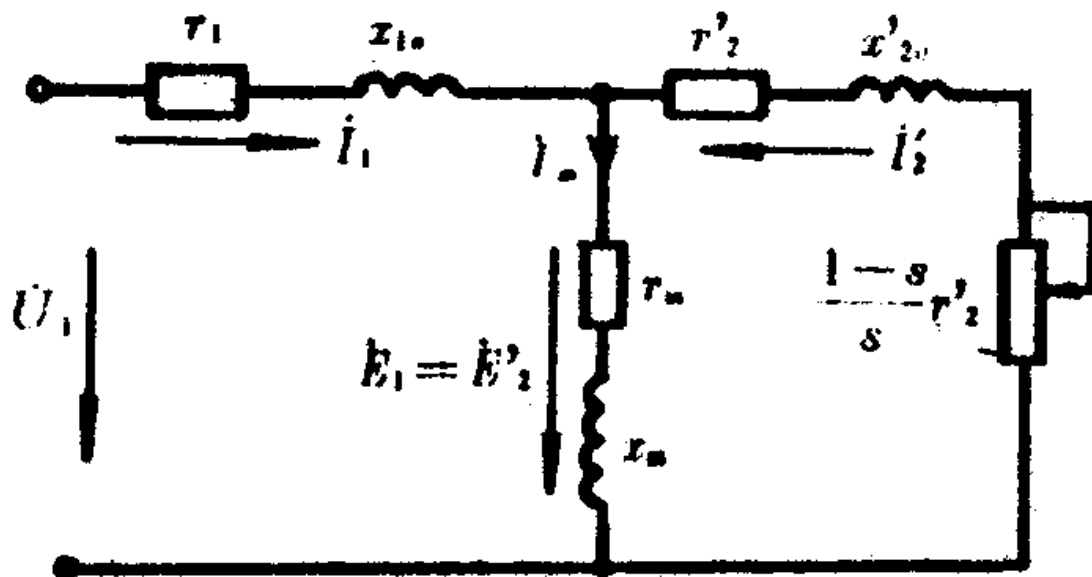
1) 凸极同步电机的磁极漏磁系数

$$\Phi_\sigma \approx 1.1(\Lambda_p + \Lambda_m)F_{\delta tj}$$

$$F_{\delta tj} = F_\delta + F_t + F_j$$

五、参数计算

计算电机的电阻、电抗，为性能计算作准备。
(仅计算稳态参数)



5.1 绕组电阻的计算

直流电阻:

$$R = \rho \frac{l}{A_c}$$

温度为t时的电阻率

$$\rho_t = \rho_{15} [1 + \alpha(t - t_{15})]$$

交流电阻

绕组中通以交流电时，由于集肤效应，使其电阻值比通直流时增大，

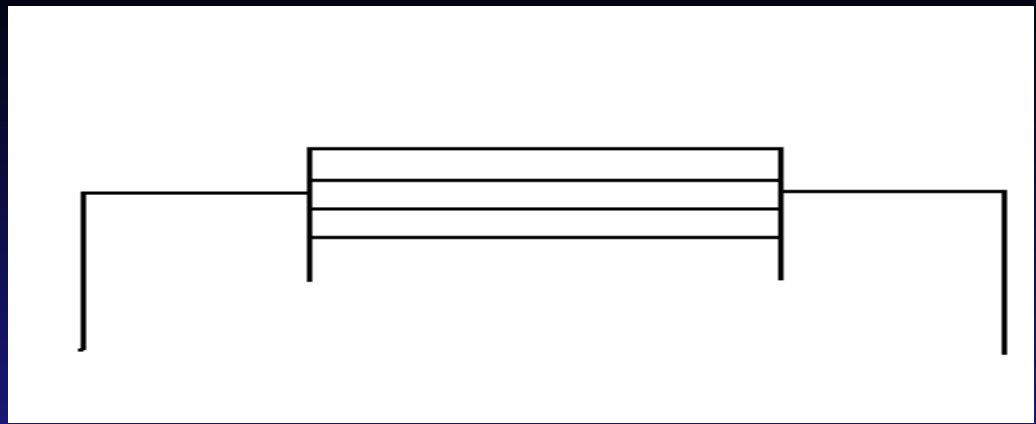
$$R_e = K'_F R$$

式中系数 K'_F 表示电阻增加系数。

额定参数	定子冲片	转子冲片	定子绕组	转子绕组	其它
安装形式	封闭式	转子轴向通风孔直径, cm	0.		
试验温度, C	75	径向通风形式	无		
自定义损耗					
<input type="checkbox"/> 机械损耗, W	21.3				
<input type="checkbox"/> 杂散损耗标么值	0.025				

图5.1 Visual EMCAD/VIM 温度设置

直流电机



设电枢绕组由 $2a$ 条支路组成，每条支路长度

$$\frac{N_a l_c}{2a}$$

$2a$ 条支路并联，故电枢绕组总电阻：

$$R_a = \rho_w \frac{N_a l_c / 2a}{A_c} / 2a = \rho_w \frac{N_a l_c}{A_c (2a)^2}$$

感应电机

定子每相电阻

N_1 为每相串联匝数（每相中每条支路串联匝数），则每相每条支路长度：

$$2 N_1 l_c$$

设每相绕组的并联支路数为 a ，故每相绕组总电阻：

$$R_1 = K'_F \rho_w \frac{2 N_1 l_c}{A_{c1}} / a_1 = K'_F \rho_w \frac{2 N_1 l_c}{A_{c1} a_1}$$

转子每相电阻

把鼠笼转子绕组当作一个对称多相绕组，其相数等于槽数，每相导体数等于1

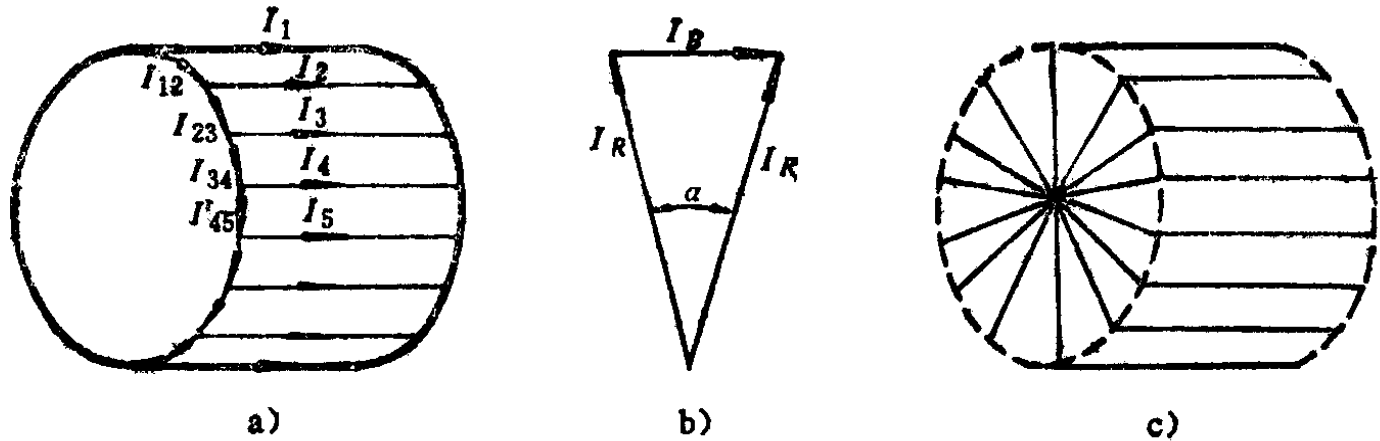


图4-1 笼型转子的等效绕组及电流相量图

各导条电流之间的相位差等于相邻两槽间的电角度 α

$$\alpha = p \frac{2\pi}{Z_2}$$

由图可得:

$$I_R = \frac{I_B}{2 \sin(\alpha / 2)}$$

等效绕组的电损耗等于原来鼠笼绕组的电损耗, 即:

$$I_B^2 R_2 = I_B^2 R_B + 2 I_R^2 R_R$$

故

$$R_2 = R_B + \frac{2 R_R}{\Delta^2}$$

其中

$$\Delta = \frac{I_B}{I_R} = 2 \sin \frac{p \pi}{Z_2} \approx \frac{2 \pi p}{Z_2}$$

如果端环与导条的材料相同，则

$$R_2 \approx \rho_w \left(\frac{l_B}{A_B} + \frac{Z_2 D_R}{2\pi p^2 A_R} \right)$$

要应用于等效电路，转子电阻须折算到定子，

$$R_2' = K R_2$$

折算系数K

$$K = k_u k_i = \frac{N_1 K_{dp1}}{N_2 K_{dp2}} \frac{m_1 N_1 K_{dp1}}{m_2 N_2 K_{dp2}} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 K_{dp1}}{N_2 K_{dp2}} \right)^2$$

对鼠笼转子，相数 m_2 等于槽数 Z_2 ，每相串联匝数 $N_2=1/2$ ，绕组系数 $K_{dp2}=1$

$$K = \frac{4m_1 (N_1 K_{dp1})^2}{Z_2}$$

5.2 绕组电抗的一般计算方法

绕组电抗大体上可分为：1) 主电抗；2) 漏电抗。
电抗可以采用两种方法计算：1) 磁链法；2) 能量法。

任何一个电路的电抗可写成

$$X = \omega L$$

$\omega = 2\pi f$ ，交变电流的角频率， L 电路的电感

$$L = \frac{\Delta \psi}{\Delta i}$$

当电路处于线性媒介时（磁链随电流正比变化），

$$L = \frac{\psi}{i}$$

5.3 主电抗计算

相应于基波磁场的电抗。 $\lambda_m = \frac{m}{\pi^2} K_{dp1}^2 \frac{q\tau}{\delta_{ef}}$

5.4 漏电抗计算

槽漏抗、谐波漏抗、齿顶漏抗、端部漏抗

$$\lambda_s = \frac{h_1}{3b_s} + \frac{h_0}{b_s}$$

$$\lambda_\delta = \frac{m}{\pi^2} \frac{q\tau}{\delta_{ef}} \sum \left(\frac{K_{dpv}}{v} \right)^2$$

$$\lambda_E = 0.47 \frac{q}{l_{ef}} (l_E - 0.64\tau)$$

六、损耗与效率

6.1 概述

电机的损耗一般分为：

电气损耗

基本铁耗

机械损耗

杂散损耗

6.2 基本铁耗

6.2.1 磁滞损耗

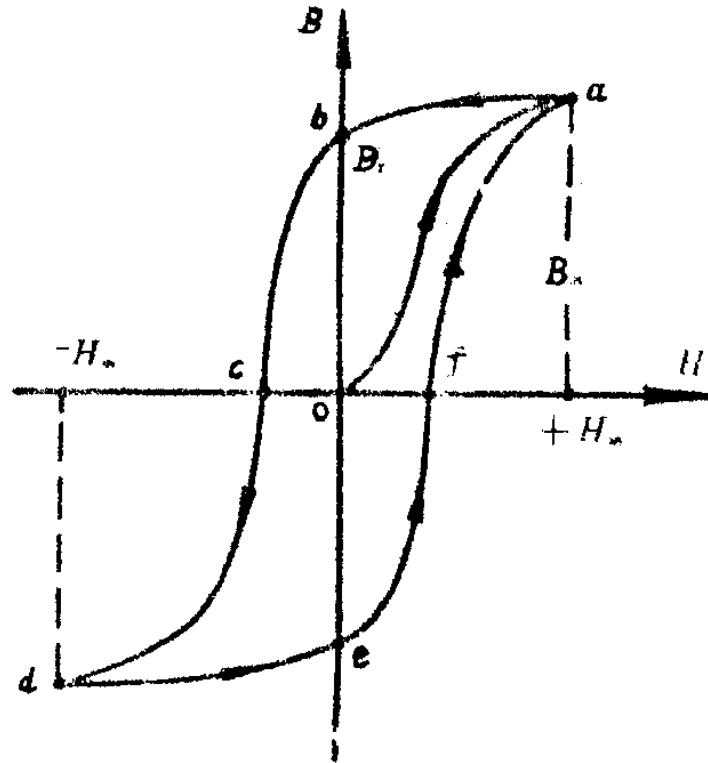


图 铁磁材料的磁滞回线

磁滞损耗系数

$$p_h = \sigma'_h f B^\alpha$$

磁滞损耗系数更准确的表达式

$$p_h = (aB + bB^2) f$$

当 $1.0\text{T} \leq B \leq 1.6\text{T}$ 时

$$p_h = \sigma_h f B^2$$

6.2.2 涡流损耗

涡流损耗系数

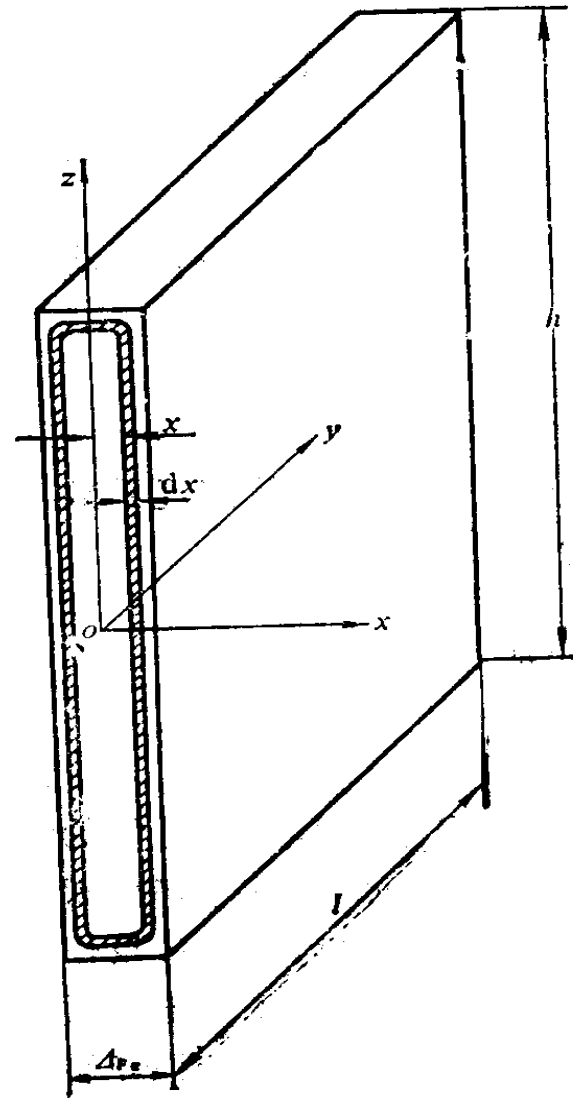


图5-2 钢片尺寸及涡流途径

间（见图5-2）。先研究钢片中离坐标原点 x 处的某回路（如图中阴影线所示）回路的宽度为 dx ，沿 y 方向尺寸为 l 。由于钢片较薄，可以忽略所取回路中的交流损耗。

应用电磁感应定律及欧姆定律于此回路，可得

$$dp_x = \frac{E_x^2}{R_x}$$

式中 R_x ——此回路之电阻， $R_x \approx \rho \frac{2h}{l dx}$ ；

E_x ——回路中之感应电势， $E_x = \pi \sqrt{2} f \Phi_{xm}$ ， Φ_{xm} 为回路所包围之磁通。

把式（5-5）及式（5-6）代入式（5-4），得

$$dp_x = \frac{\pi^2 f^2 \Phi_{xm}^2 l dx}{\rho h}$$

由于 $\Phi_{xm} = B2xh$ ，代入上式，得

$$dp_x = \frac{4\pi^2 f^2 B^2 l h x^2}{\rho} dx$$

因此，整个钢片内的涡流损耗为

$$p_e = \int_0^{\Delta_{F_0}} \frac{\Delta_{F_0}}{2} dp_x = \frac{\pi^2}{6\rho} (fB)^2 \Delta_{F_0}^3 l h$$

若把上式除以钢片之体积 $\Delta_{F_0} h l$ ，再除以钢片之密度 ρ_{F_0} ，即可得 p_e 为

$$p_e = \frac{\pi^2}{6\rho\rho_{F_0}} (\Delta_{F_0} B f)^2$$

由上式可知，涡流损耗系数与磁通密度、频率及材料的厚度的平方成正比，它等于

$$p_e = \sigma_e (Bf)^2$$

式中

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \Delta_{F_0}^2}{6\rho\rho_{F_0}}$$

6.2.3 轭部及齿部的基本铁耗 钢的损耗系数（比耗，W / kg）

$$P_{he} = \sigma_h f B^2 + \sigma_e (fB)^2$$

表5-1 常数 σ_h 和 σ_e

钢的种类	钢片厚度/mm	σ_h	σ_e	P _{10/50}	相当的国产钢号
		W/(kg·Hz·T ²)	W/(kg·Hz ² ·T ²)		
低含硅量硅钢片	0.5	0.045	0.00022	2.80	D12
中含硅量硅钢片	0.5	0.036	0.00016	2.2	D22
较高含硅量硅钢片	0.5	0.029	0.00022	2.0	D31

为方便计算

$$p_{he} \approx p_{10/50} B^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}$$

$p_{10/50}$ - 当 $B=1\text{T}$, $f=50\text{Hz}$ 时, 钢单位重量内的损耗, W/kg

钢中基本铁耗的一般表达式为

$$p_{Fe} = k_a p_{he} G_{Fe}$$

6.3 空载时铁心中的附加损耗（旋转铁耗）

表面损耗、脉振损耗，由气隙中的谐波磁场引起。

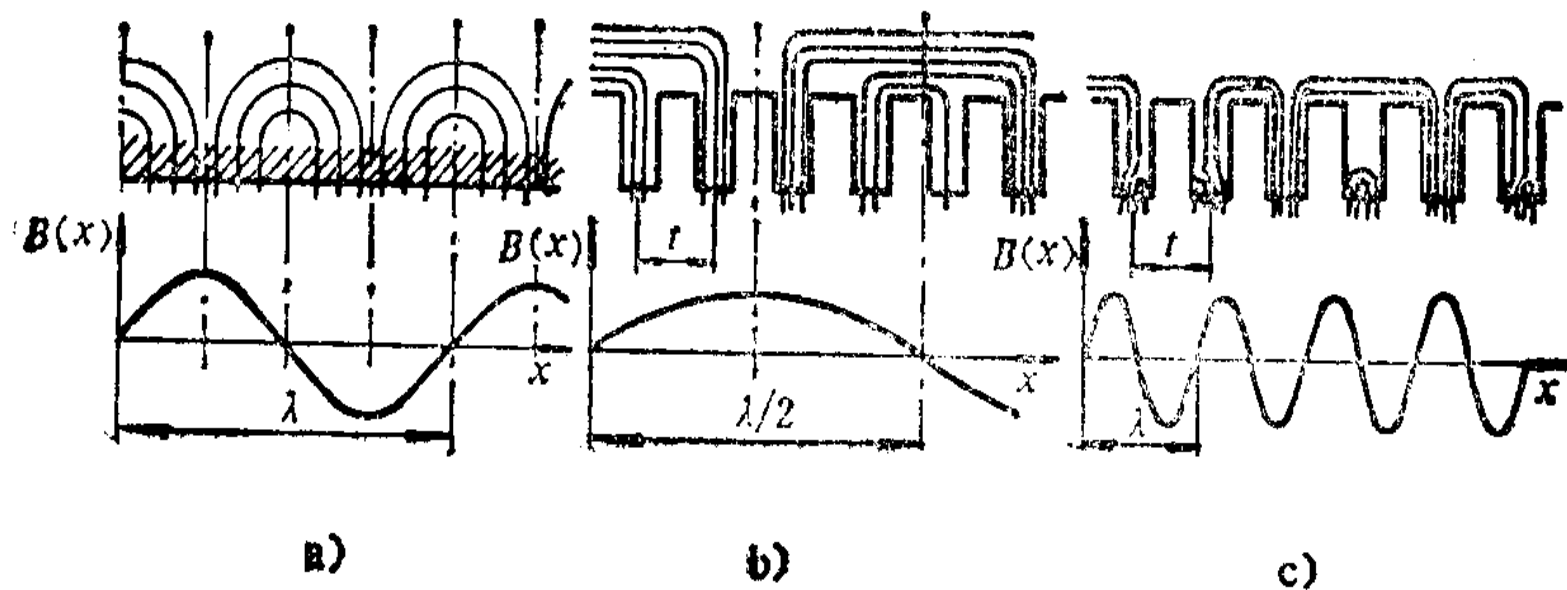


图5-3 气隙谐波磁通的路径

a) 在极弧表面 b) 深入齿部 c) 在表面及齿中

作业解答

	励磁电抗	定子槽漏抗	转子槽漏抗	定子谐波漏抗	转子谐波漏抗	定转子端部漏抗
定子每槽导体数增加	↑	↑	—	↑	—	↑、—
气隙增大	↓	—	—	↓	↓	—
槽口宽度减小	↑	↑	↑	↑	↑	—
槽口高度增大	—	↑	↑	—	—	—
槽形变宽变矮	—	↓	↓	—	—	—
铁心长度增加	↑	↑	↑	↑	↑	—
定子绕组由整距变短距	↓	↓	—	↓	—	—
定子槽数增加	↓	↓	—	↓	—	—
频率由50Hz变成60Hz	↑	↑	↑	↑	↑	↑
定子绕组Y变Δ	↓	↓	↓	↓	↓	—

七、感应电机的电磁设计

7.1 概述

一、我国感应电机主要系列

我国目前生产的三相感应电动机约有100个系列，500多个品种，5000多个规格。按电机尺寸分成大、中、小型。

大型：中心高 $H > 0.63\text{m}$ ，定子铁心外径 $D_1 > 1\text{m}$ ，功率范围在400kW以上，电压为3000V和6000V。

中型：中心高 $H = (0.355 \sim 0.63)\text{m}$ ，定子铁心外径 $D_1 = (0.5 \sim 1.0)\text{m}$ ；功率范围为(45~1250)kW，电压有380V、3000V和6000V。

小型：中心高 $H = (0.08 \sim 0.315)\text{m}$ ，定子铁心外径 $D_1 = (0.12 \sim 0.5)\text{m}$ ；功率范围为(0.55~132)kW，电压为380V。Y(IP44)系列的中心高 $H = (0.08 \sim 0.28)\text{m}$ ， $D_1 = (0.12 \sim 0.445)\text{m}$ ，共11个机座，功率范围为(0.55~90)kW，电压380V。

Y-132M-4、Y-315S-6、Y-801-2

我国基本系列主要技术参数：

型 号	产品名称	功率/kW	电压/V	效率 $\eta \times 100$	$\cos\varphi$	I_{st}/I_N	T_{st}/T_N	T_m/T_N	2p
Y(IP44)	小型三相感应电动机	0.55~90	380	72.5~93.5	0.70~0.89	5.5~7.0	1.7~2.2	2~2.2	2~8
J2、JO2	小型三相感应电动机	0.6~125	380	74~92.5	0.68~0.92	5.5~7.0	1.0~2.2	1.8~2.2	2~10
JS	三相笼型转子感应电动机(中型)	45~300	380	88~93.5	0.78~0.91	5.5~6.5	0.9	1.6	4~10
		75~1250	3000	88.5~94.5	0.74~0.89	5.5~6.5	0.9	1.6	4~12
		200~1050	6000	89~94	0.78~0.89	5.5~6.5	0.9	1.6	4~12
JR	三相绕线转子感应电动机(中型)	45~300	380	88~93.5	0.77~0.90			1.8	4~10
		75~1250	3000	88~94.5	0.76~0.90			1.8	4~12
		200~1050	6000	89~93.5	0.78~0.90			1.8	4~12
JS2、JSL2	三相感应电动机(中型、低压)	60~320	380	89.5~93.5	0.80~0.91	5.5~6.5	1.0	1.8~2.0	2~10
JR2、JRL2	三相感应电动机(中型、低压)	60~320	380	87.5~93.5	0.79~0.91			1.8~2.0	4~10

派生和专用系列:

系列型号	产品名称	主要用途及说明
YQ	高起动转矩感应电动机 (小型)	用于带负载起动、要求较大起动转矩的机械上,如压缩机、粉碎机
YH	高转差率感应电动机 (小型)	用于惯性矩较大并有冲击负载机械的驱动,如剪床、压力机、锻压机及小型起重机
YD	变极多速感应电动机	为派生系列 用于机床、印染机、印刷机等需要变速的设备上
YZ	起重及冶金用感应电动机	为派生系列 具有较高的起动转矩及过载能力,适用于冶金和一般起重设备
YQS	潜水感应电动机	为专用系列 与潜水泵配套组成潜水电泵,供灌溉提水之用
YLB	立式深井泵用感应电动机	为专用系列 与长轴深井泵配套组成深井电泵

注:其他派生和专用系列详见(2-1)。

感应电动机的主要性能指标和额定参数

1) 性能指标

效率

功率因数

最大转矩倍数

起动转矩倍数

起动电流倍数

绕组和铁心温升

起动过程中的最小转矩

2) 额定参数与标么值

额定功率

额定电压

额定频率

额定转速

基准值

电压基准值：额定相电压 $U_{N\Phi}$

功率基准值：额定功率 P_N

电流基准值：每相功电流 I_{KW}

阻抗基准值： $Z_{KW} = U_{N\Phi} / I_{KW}$

转矩基准值：额定转矩 T_N

7.2 主要尺寸与气隙的确定

7.2.1 主要尺寸和计算功率

定子铁心内径 D_{i1} 及有效长度 l_{e1} 是感应电动机的主要尺寸。在前面第二章中已经导出决定电机主要尺寸的基本关系式

$$D_{i1}^2 l_{e1} = \frac{6.1}{\alpha' K_{Nm} K_{dp1}} \frac{1}{AB_s} \frac{P'}{n} = C_A \frac{P'}{n}$$

其中感应电动机的计算功率 P' 为

$$P' = m_1 E_1 I_1$$

由于感应电动机额定功率为

$$P_N = m_1 U_{N\phi} I_1 \eta \cos \varphi$$

比较上两式，则有

$$P' = \frac{E_1}{U_{N\phi}} \frac{1}{\eta \cos \varphi} P_N$$

一般情况下可近似认为：

$$E_1 \approx U_{N\phi} - (I_{1p}R_1 + I_{1Q}X_{\sigma 1})$$

即

$$K_E \approx E_1 / U_{N\phi} \approx 1 - \frac{1}{U_{N\phi}} (I_{1p}R_1 + I_{1Q}X_{\sigma 1})$$
$$= 1 - (I_{1p}^* R_1^* + I_{1Q}^* X_{\sigma 1}^*) = 1 - \varepsilon_L$$

$(1-\varepsilon_L)$ 称为电势系数

$$P' = (1 - \varepsilon_L) \frac{1}{\eta \cos \varphi} P_N$$

开始设计时给一假定值，采用经验公式，对
2极小型电机

$$1 - \varepsilon'_L = 0.92 + 0.00866 \ln P_N$$

非2极小型电机

$$1 - \varepsilon'_L = 0.931 + 0.0108 \ln P_N - 0.013p$$

中型电机

$$1 - \varepsilon'_L = 0.892 + 0.0109 \ln P_N - 0.01p$$

7.2.2 电磁负荷的选择

7.2.3 主要尺寸比的选择

7.2.4 主要尺寸的确定

7.2.5 空气隙的确定

7.3 定子绕组与铁心的设计

7.3.1 定子槽数的选择

定子槽数 \Rightarrow 每极每相槽数 q_1 ， q_1 大小对电机的参数、附加损耗、温升及绝缘材料消耗等都有影响。

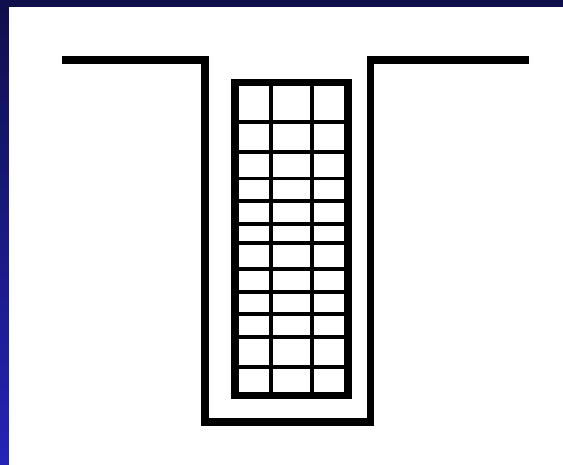
当采用较大的 q_1 值时:

- 1、定子谐波磁场减小，使附加损耗降低，谐波漏抗减小。
 - 2、每槽导体数减少，使漏抗减小；另一方面槽数增加，槽高与槽宽的比值相应增大，使槽漏抗增大，但这方面影响较小。
 - 3、槽中线圈边总散热面积增加，有利于散热。
 - 4、绝缘材料用量和加工工时增加，槽利用率降低
- 对一般感应电动机， q_1 可在2~6之间，极数少、功率大的电机， q_1 可取得大些。

7.3.2 定子绕组形式和节距的选择

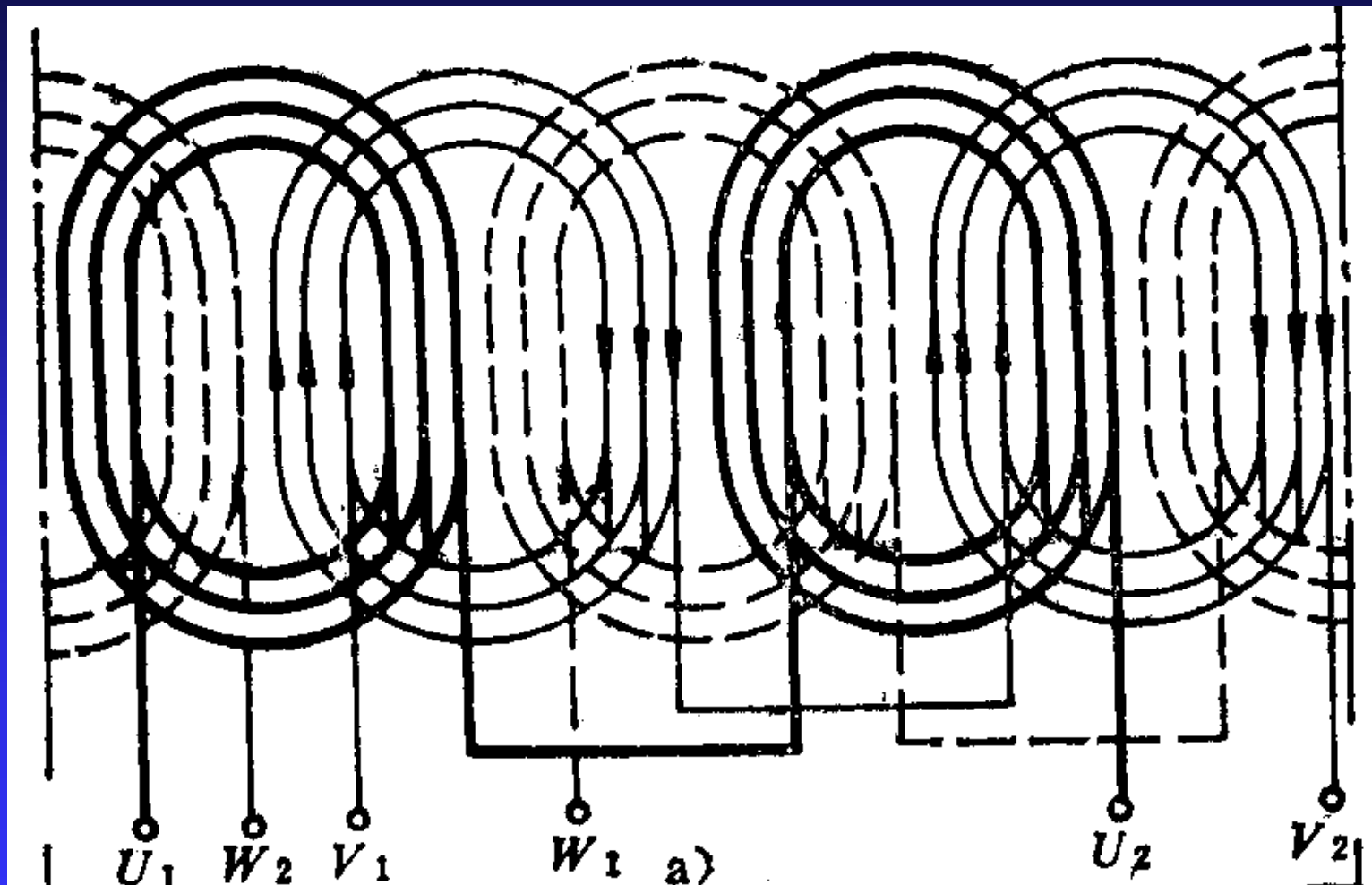
(一) 单层绕组

优点：槽利用率高；
嵌线方便；槽内不会相间击穿。

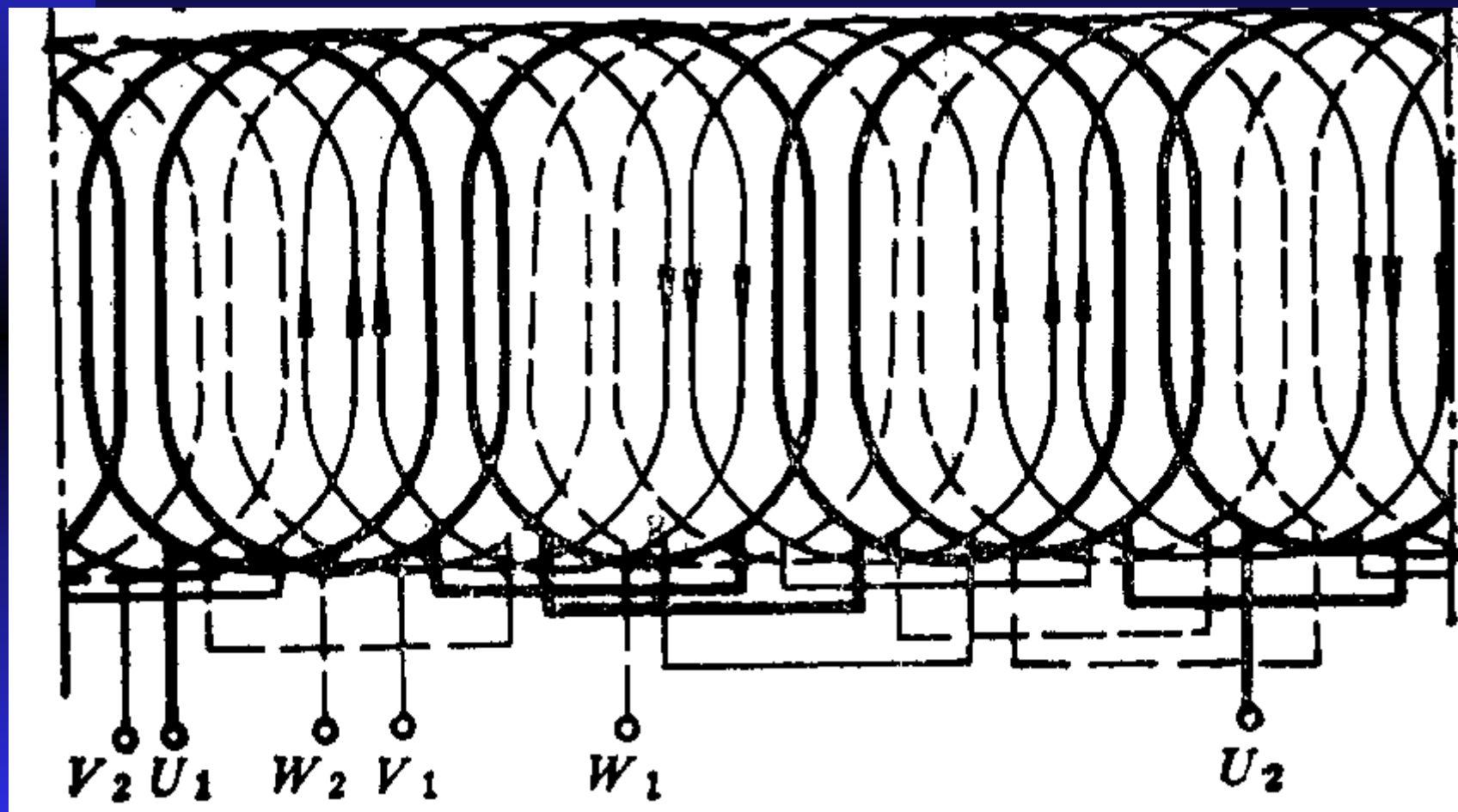


缺点：不易做成短距，
磁势波形较双层绕组差；嵌线困难。

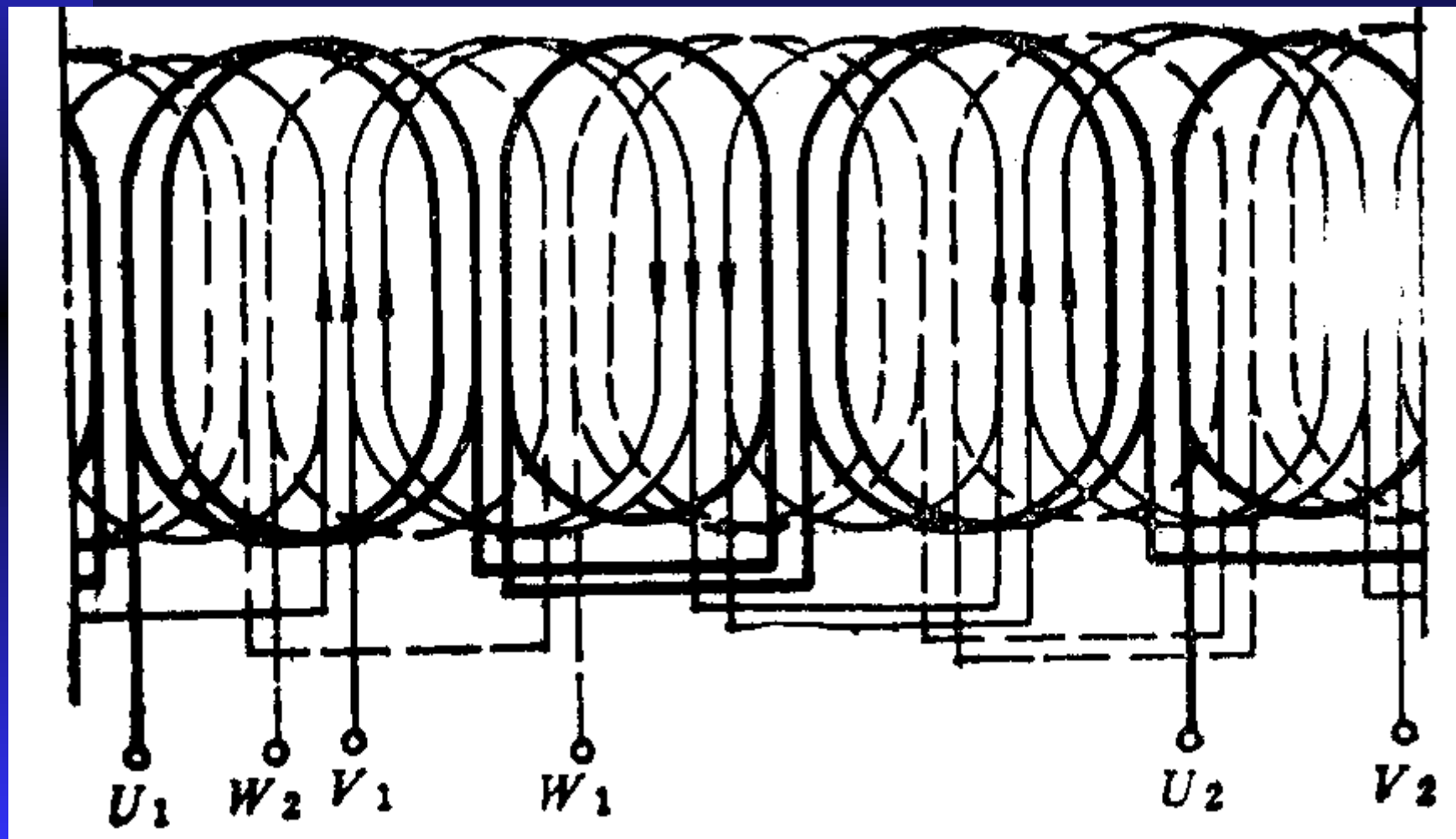
单层同心式



单层链式



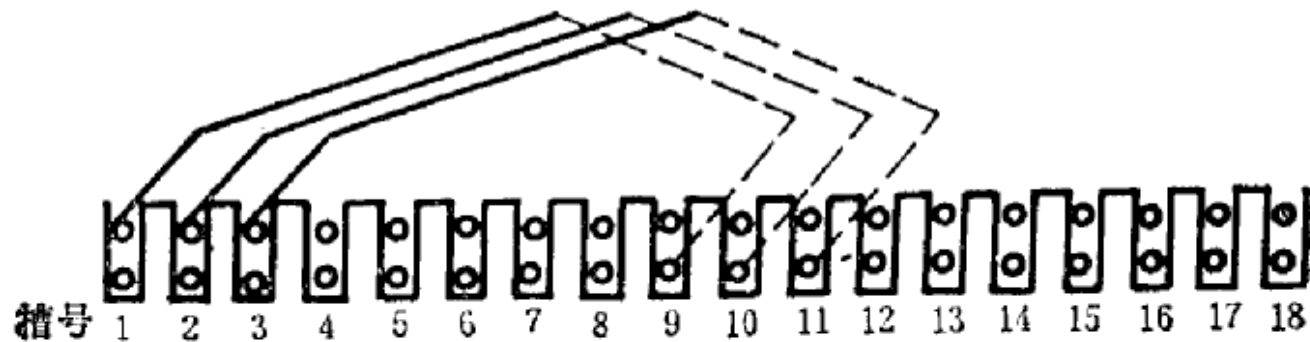
单层交叉式



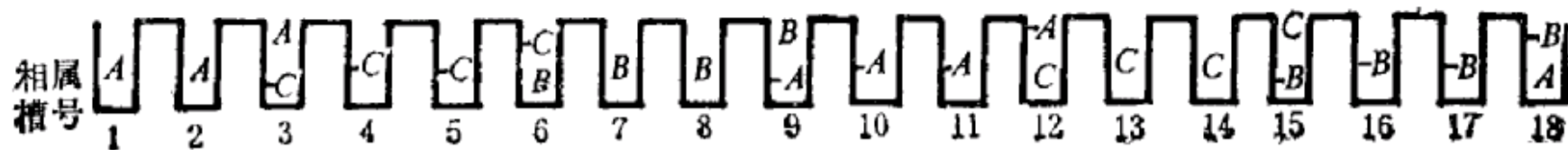
(二) 双层绕组

(三) 单双层绕组

$$q_1=3, p=1, y=8/9\tau=8$$



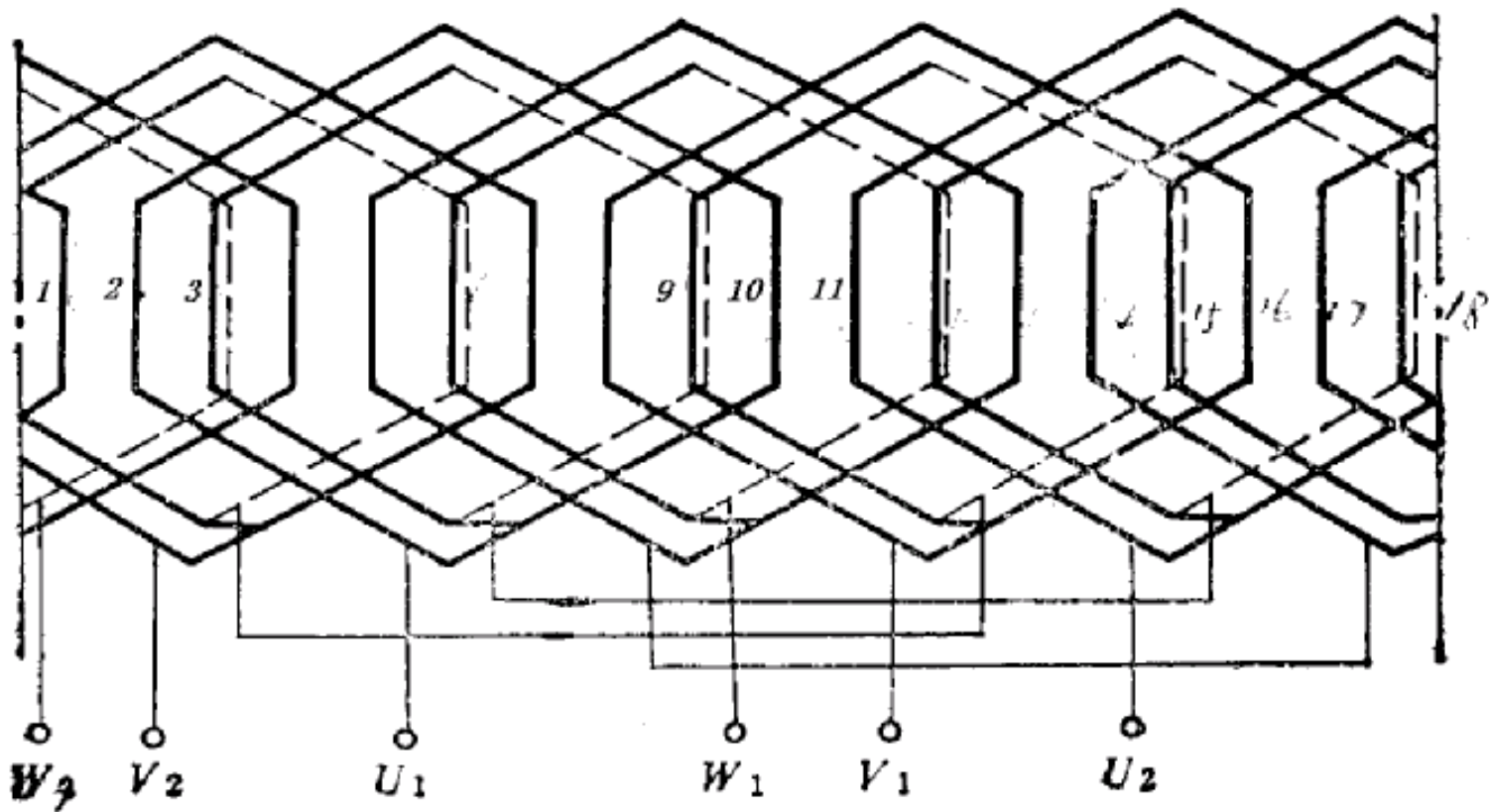
a)



b)

改为单双层后

$$y = \frac{2 \times 8 + 6}{3} = 7.333$$



(四) 绕组节距的选择

7.3.3 每相串联导体数，每槽导体数的计算

7.3.4 电流密度、线规、并绕根数、并联支路对数的确定

7.3.5 定子冲片的设计

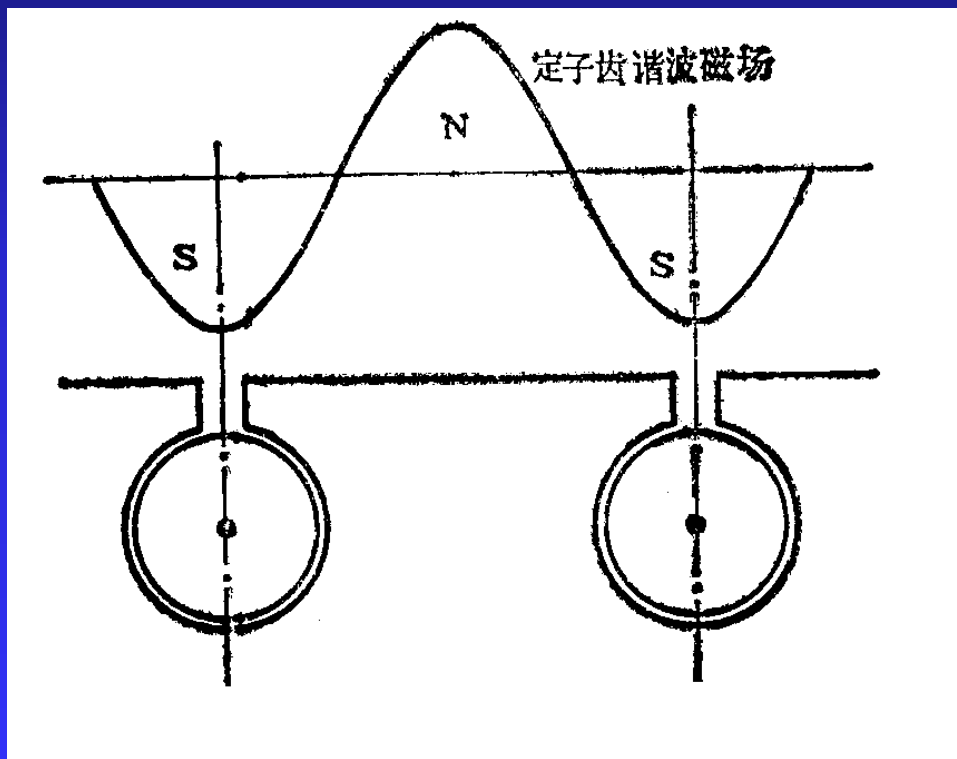
7.4 转子绕组与铁心的设计

7.4.1 笼型转子的设计计算

(一) 转子槽数选择及定转子槽配合问题

(1) 槽配合对附加损耗的影响

感应电机附加损耗主要由气隙谐波磁通引起，在定转子铁心中产生高频损耗（表面损耗和齿部脉振损耗），在笼型转子中产生高频电流损耗。其中以定转子齿谐波的作用最为显著。



- 直槽
- 斜槽

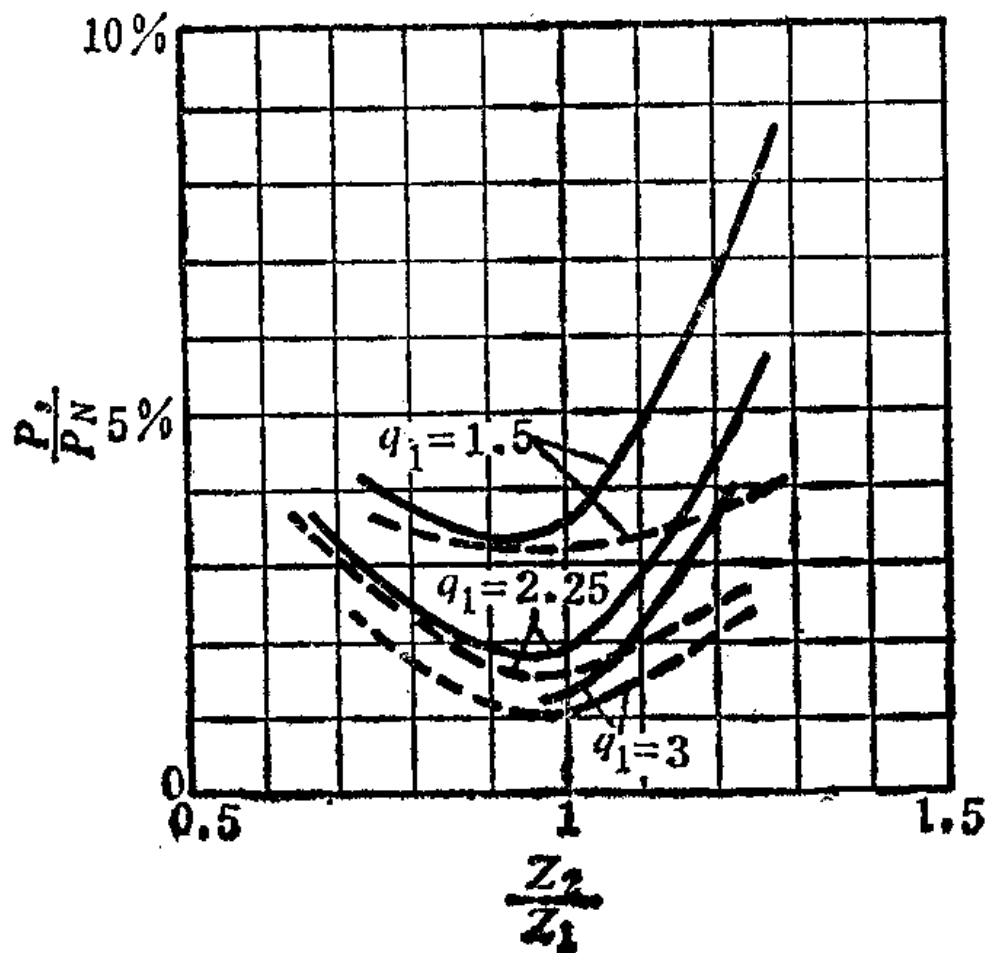


图10-10 一台8极感应电机的附加损耗与槽配合的关系曲线

实线—转子槽斜一个齿距；虚线—直槽转子

(2) 槽配合对异步附加转矩的影响

异步附加转矩是某一极对数的定子谐波磁场与由它感应于转子中的电流所建立的同一极对数的谐波磁场相互作用而产生的。这两个磁场之间有直接的依赖关系。

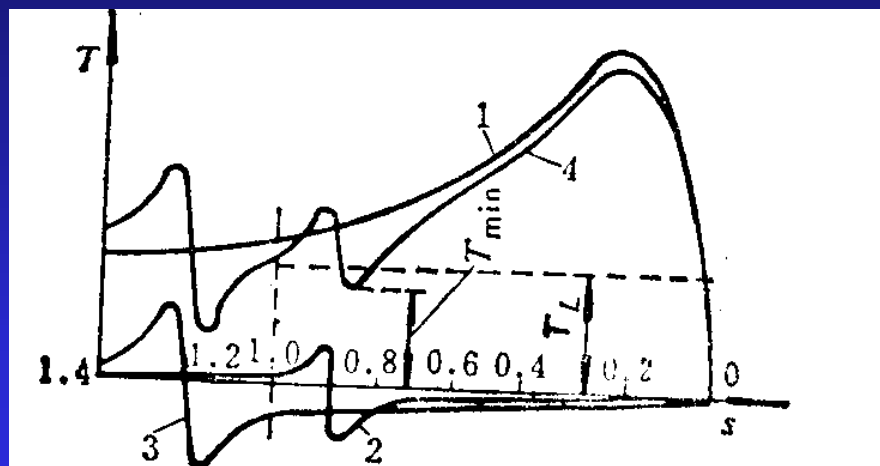
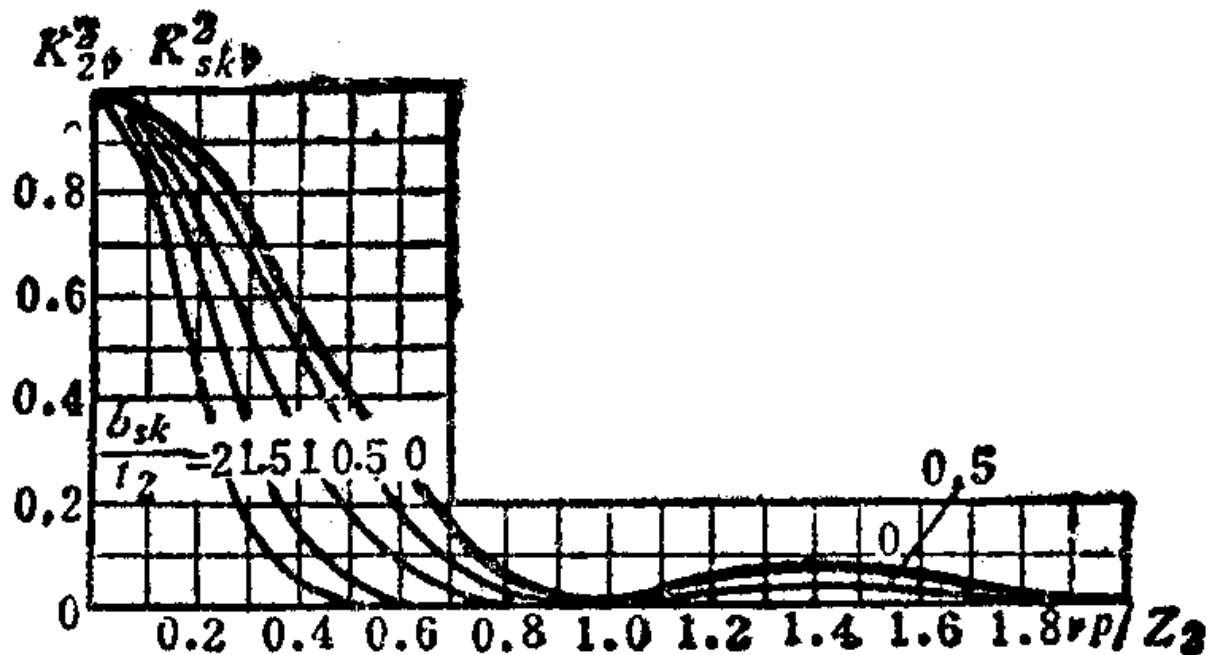


图10-11 异步附加转矩对转矩
曲线的影响

1—基波转矩 2—7次谐波转矩 3—5
次谐波转矩 4—合成转矩

定子 ν 次谐波磁势产生的异步附加转矩最大值与基波磁势产生的起动转矩之比:

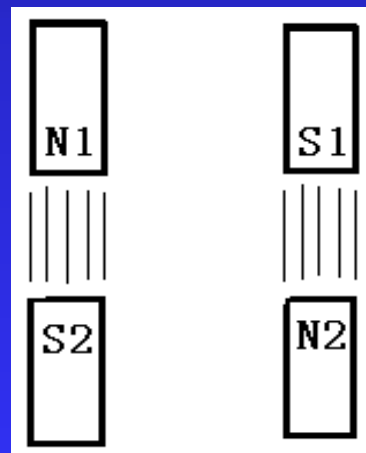
$$\frac{T_{\nu \max}}{T_{st}} \approx \frac{1}{2\nu} \frac{X_m}{R_2''} \left(\frac{K_{2\nu} K_{sk\nu}}{K_{21} K_{sk1}} \right)^2$$



(3) 槽配合对同步附加转矩的影响

如果定子某一个谐波磁场感应于转子中的电流所建立的某一谐波磁场的极对数，等于另一个定子谐波磁场的极对数，则在某一转速下，这两个极对数相等的定转子磁场可以在空间上同步旋转而相对静止，因此它们相互作用而产生一个象同步电机一样的转矩，称为同步附加转矩。同步附加转矩迭加在电动机的异步转矩上，使电机的转矩特性曲线发生畸变，影响电机的起动性能。

其中，由定子齿谐波磁场和转子齿谐波磁场所构成的附加同步转矩最严重。



(二)转子槽形的选择和槽形尺寸的确定

(1) 转子槽形

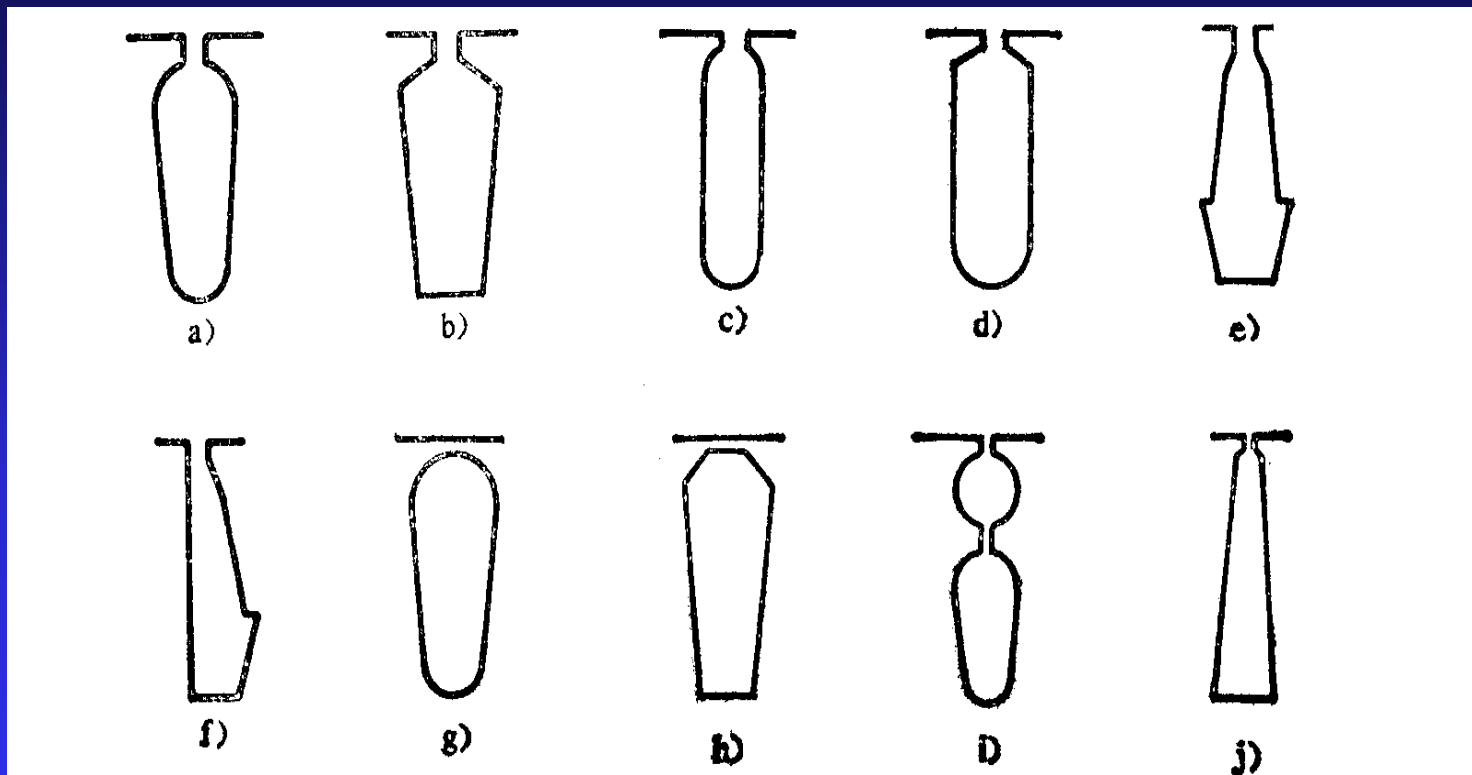


图10-14 感应电动机笼型转子常用槽形

a)、b) 平行齿 c)、d) 平行槽 e) 凸形槽 f) 刀形槽 g)、h) 闭口槽 i) 双笼转子槽 j) 梯形槽

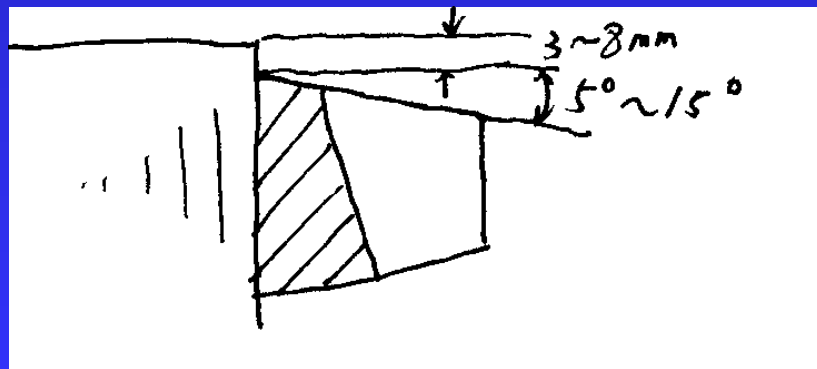
(2) 转子槽形尺寸的确定

要重点考虑起动性能的要求

- 1) 估算转子导条电流
- 2) 初步给定导条电流密度
- 3) 计算导条截面积
- 4) 由导条截面积、槽形以及转子齿、轭磁密，确定转子槽具体尺寸，槽口部分主要由工艺确定

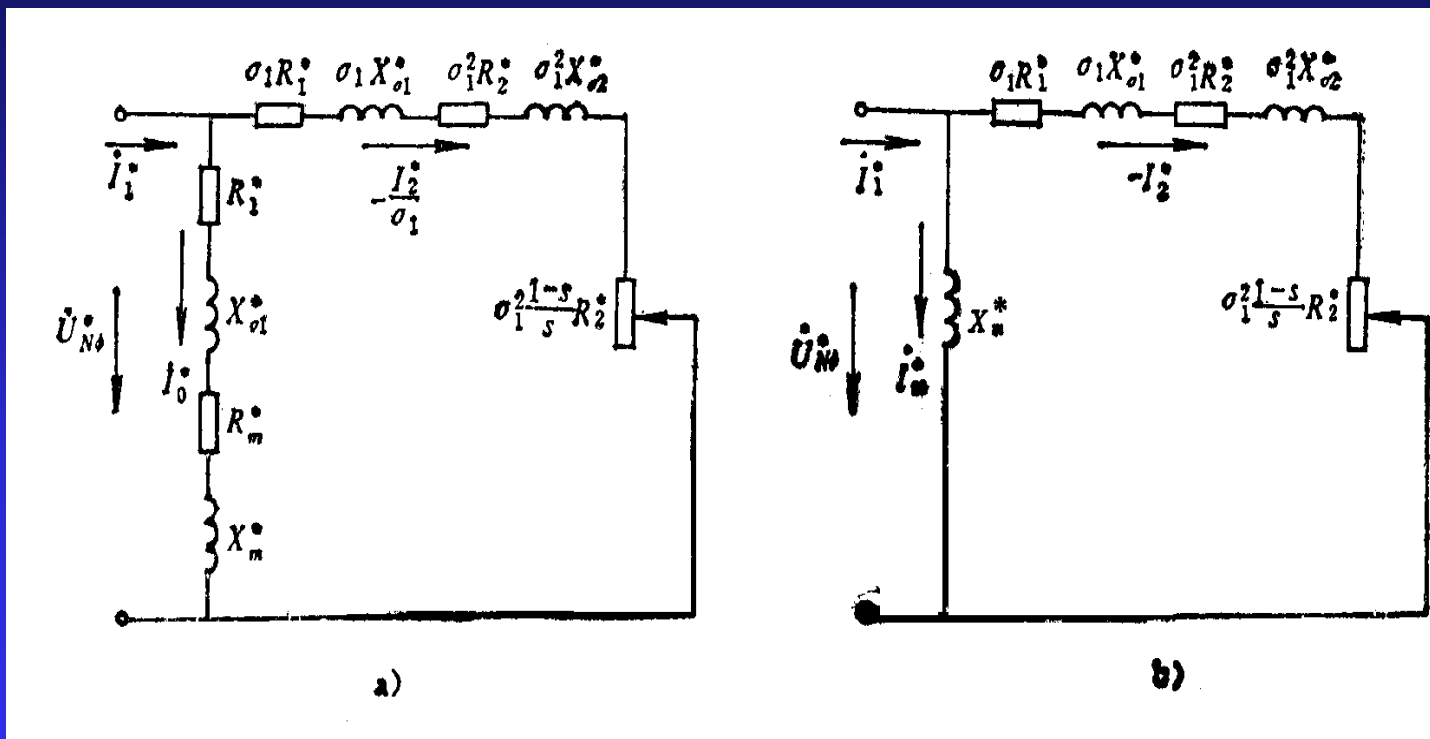
(3) 端环的设计

- 1) 类似槽形尺寸确定
- 2) 为利于散热，电流密度低于导条电密



7.5 工作性能计算

设计参数确定，就要进行工作性能的计算和起动性能的计算，以便与设计任务书或技术条件中规定的性能指标相比较。



感应电机的等效电路

通常三相异步电动机工作性能的计算只需计算额定数据：额定电流、额定功率因数、额定效率、额定转差率和最大转矩倍数。

7.5.1 定子电流 I_1 的计算

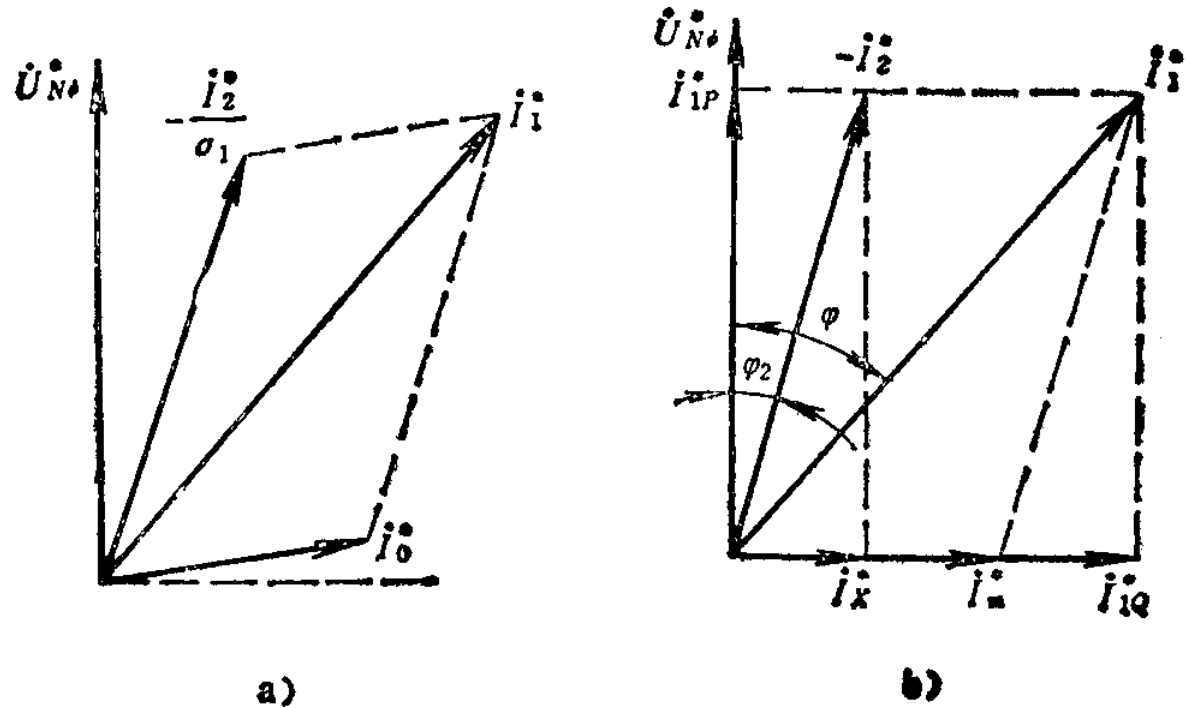


图10-16 感应电机电流相量图

定子电流

$$I_1^* = \sqrt{I_{1p}^{*2} + I_{1Q}^{*2}}$$

定子电流有功分量的标么值：

$$I_{1p}^* = \frac{I_{1p}}{I_{KW}} = \frac{I_{1p}}{I_{KW}} \left(\frac{m_1 U_{N\phi}}{m_1 U_{N\phi}} \right) = \frac{P_1}{P_N} = \frac{1}{\eta}$$

在计算开始时，先假定一个效率值 η' 。

定子电流无功分量的标么值：

$$I_{1Q}^* = I_X^* + I_m^*$$

转子电流无功分量标么值

$$I_X^* = I_2^* \sin \varphi_2 = I_2^* \frac{X'^*}{Z'^*}$$

X'^* 为负载支路的总电抗标么值

$$X'^* \approx \sigma_1 (X_{\sigma_1}^* + X_{\sigma_2}^*) = \sigma_1 X_{\sigma}^*$$

Z'^* 为负载支路的总阻抗标么值

$$Z'^* = \frac{Z'}{Z_{KW}} = \frac{I_{KW}}{U_{N\phi}} Z' = \frac{I_{KW}}{I_2} = \frac{1}{I_2^*}$$

故

$$I_X^* = I_2^{*2} X'^* = (I_{1p}^{*2} + I_X^{*2}) X'^*$$

进一步整理，得

$$I_X^* = \sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^{*2} \left[1 + \left(\frac{I_X^*}{I_{1p}^*} \right)^2 \right]$$

这是一个二次代数方程，为方便求解，采用近似算法——迭代法，并忽略高次项，于是

$$\begin{aligned} I_X^* &= \sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^{*2} \left\{ 1 + \frac{1}{I_{1p}^{*2}} \left[\sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^{*2} \left(1 + \frac{I_X^{*2}}{I_{1p}^{*2}} \right) \right]^2 \right\} \\ &= \sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^{*2} \left\{ 1 + (\sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^*)^2 \left[1 + 2 \left(\frac{I_X^*}{I_{1p}^*} \right)^2 + \left(\frac{I_X^*}{I_{1p}^*} \right)^4 \right] \right\} \\ &\approx \sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^{*2} [1 + (\sigma_1 X_\sigma^* I_{1p}^*)^2] \end{aligned} \quad (10-49b)$$

这样在假设了电机的效率 η' 以后，便可求出 I_1 ，于是

于是

$$I_1 = I_1^* I_{KW}$$

7.5.2 功率因数 $\cos\varphi$ 的计算

$$\cos \varphi = \frac{I_{1p}^*}{I_1^*} = \frac{I_{1p}^*}{\sqrt{I_{1p}^{*2} + I_{1Q}^{*2}}}$$

7.5.3 效率 η 的计算

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P^*}{P_{N1}^*}\right) \times 100\%$$

7.5.4 额定转差率的计算

感应电机的额定转差率是转子铜（铝）耗与电磁功率之比：

$$s_N = \frac{P_{cu2}^*}{P_{em}^*} = \frac{P_{cu2}^*}{1 + P_{cu2}^* + P_{fw}^* + P_s^*}$$

7.5.5 最大转矩倍数的计算

$$T_m^* = \frac{1 - s_N}{2(R_1^* + \sqrt{R_1^{*2} + X_\sigma^{*2}})}$$

一般中小型感应电机， X_σ^* 远大于 R_1^* ，因而影响最大转矩倍数的主要因数是漏抗 X_σ^* 。

7.6 起动性能的计算

与正常运行比较，感应电动机起动时有两个显著的特点：一是起动电流很大，使定转子磁路高度饱和；二是转子电流频率等于电源频率，使转子导条中的电流产生集肤现象。

7.6.1 磁路饱和效应及其对漏抗的影响

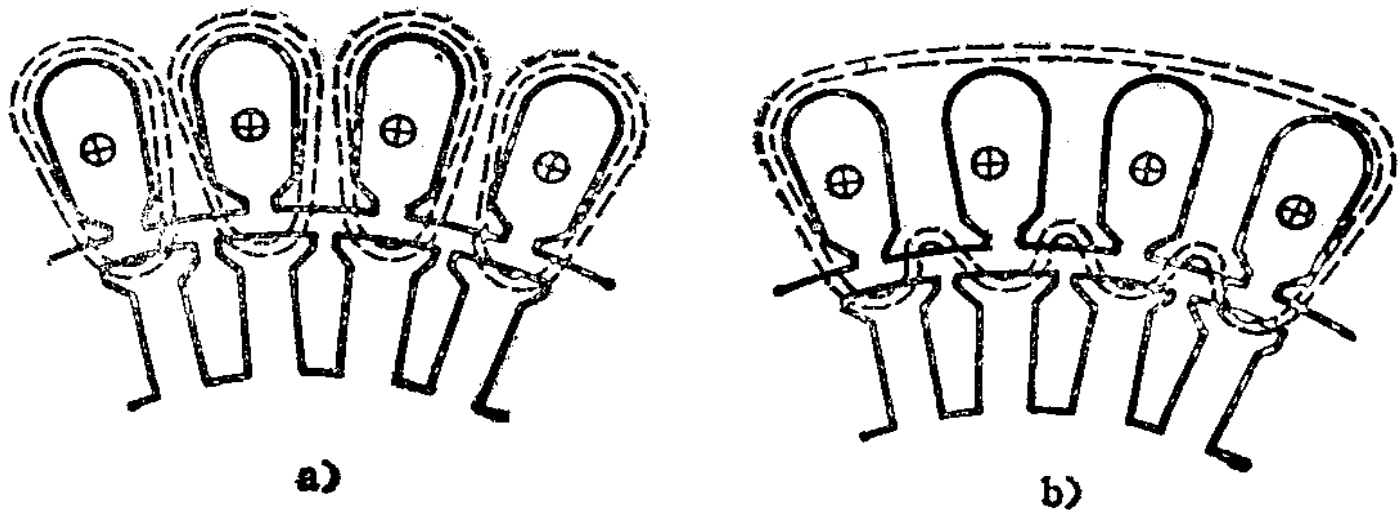


图10-17 漏磁通回路

八、电机计算机辅助工程制图 (二维工程制图)

8.1 AutoCAD 2000用户界面

8.2 设置图层、线型及颜色

8.3 绘图基础

8.3.1 绘制直线

(1) 输入点的坐标画线

采用绝对坐标（直角坐标、极坐标）

采用相对坐标（直角坐标、极坐标）

(2) 使用对象捕捉精确画线

(3) 利用正交模式辅助画线

8.3.2 作平行线

- (1) 用OFFSET命令绘制平行线
- (2) 用平行捕捉“PAR”绘制平行线

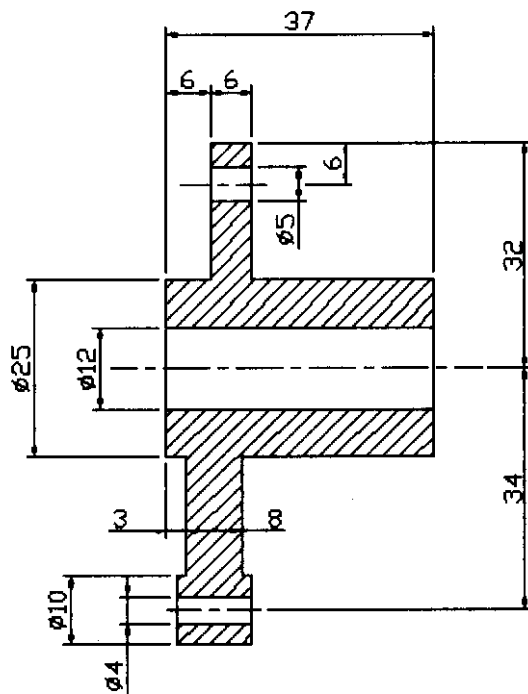


图3-26 画挂轮架主视图

8.3.3 环行阵列

8.3.4 镜象对象

8.3.5 倒角（圆角、斜角）

8.3.6 绘制样条曲线

8.3.7 画剖面线

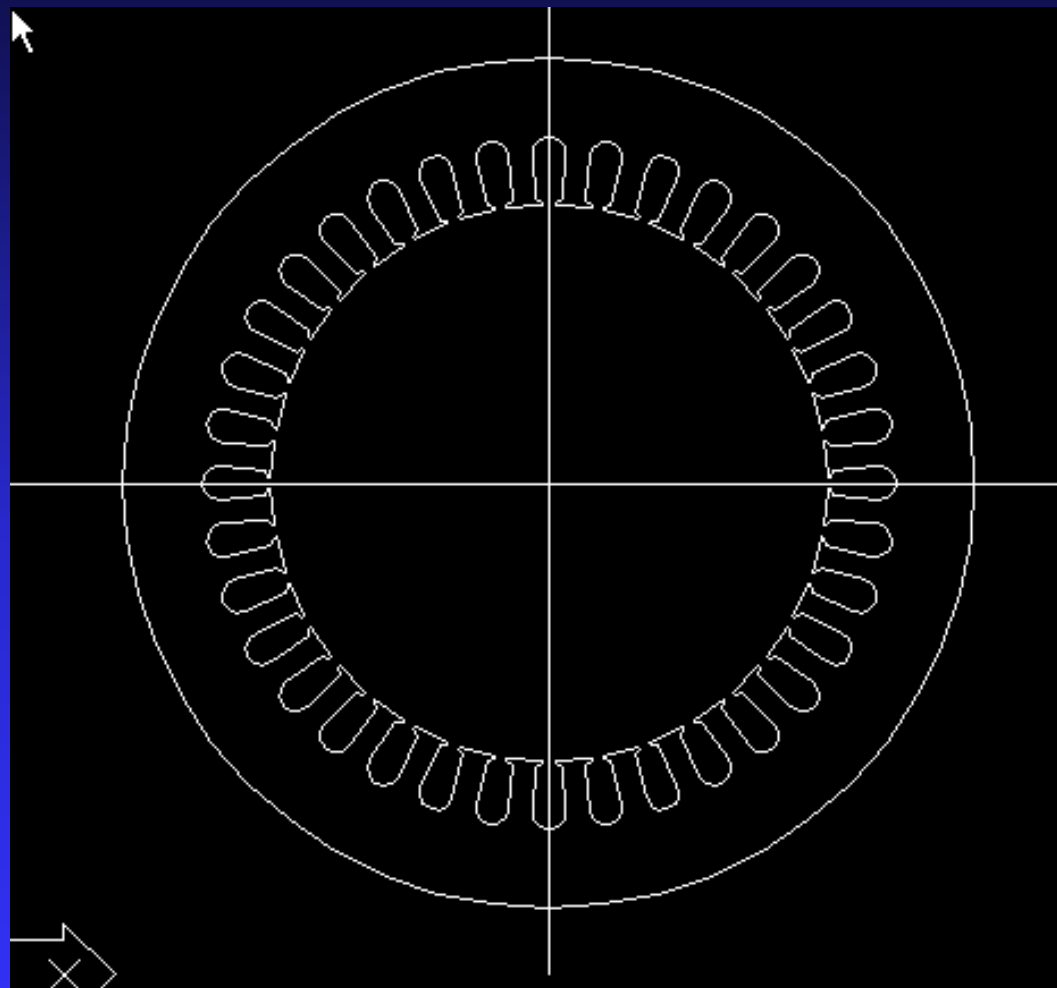
8.4 编辑及显示图形

8.4.1 选择实体

8.4.2 移动及复制对象

8.4.3 旋转及对齐图形（例）

8.5 冲片图绘制

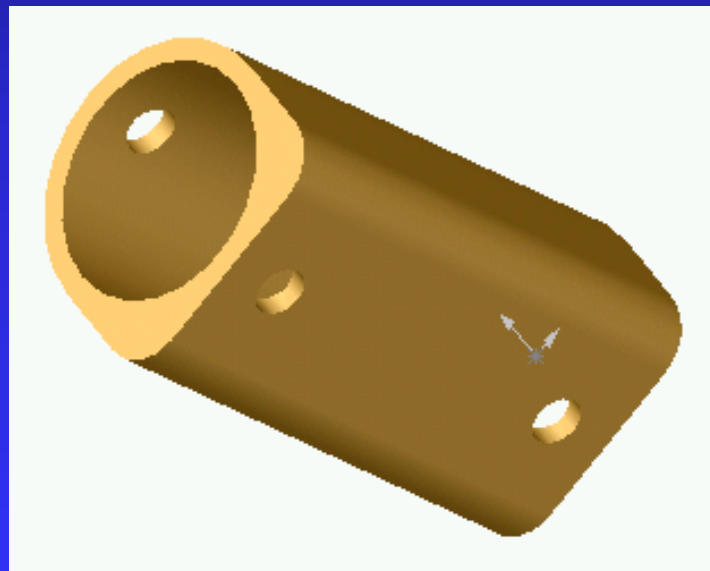
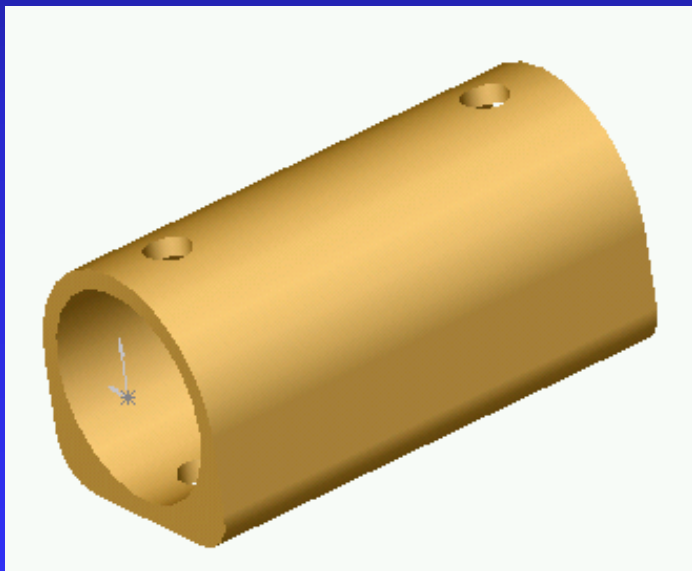


九、电机计算机辅助工程制图 (三维建模)

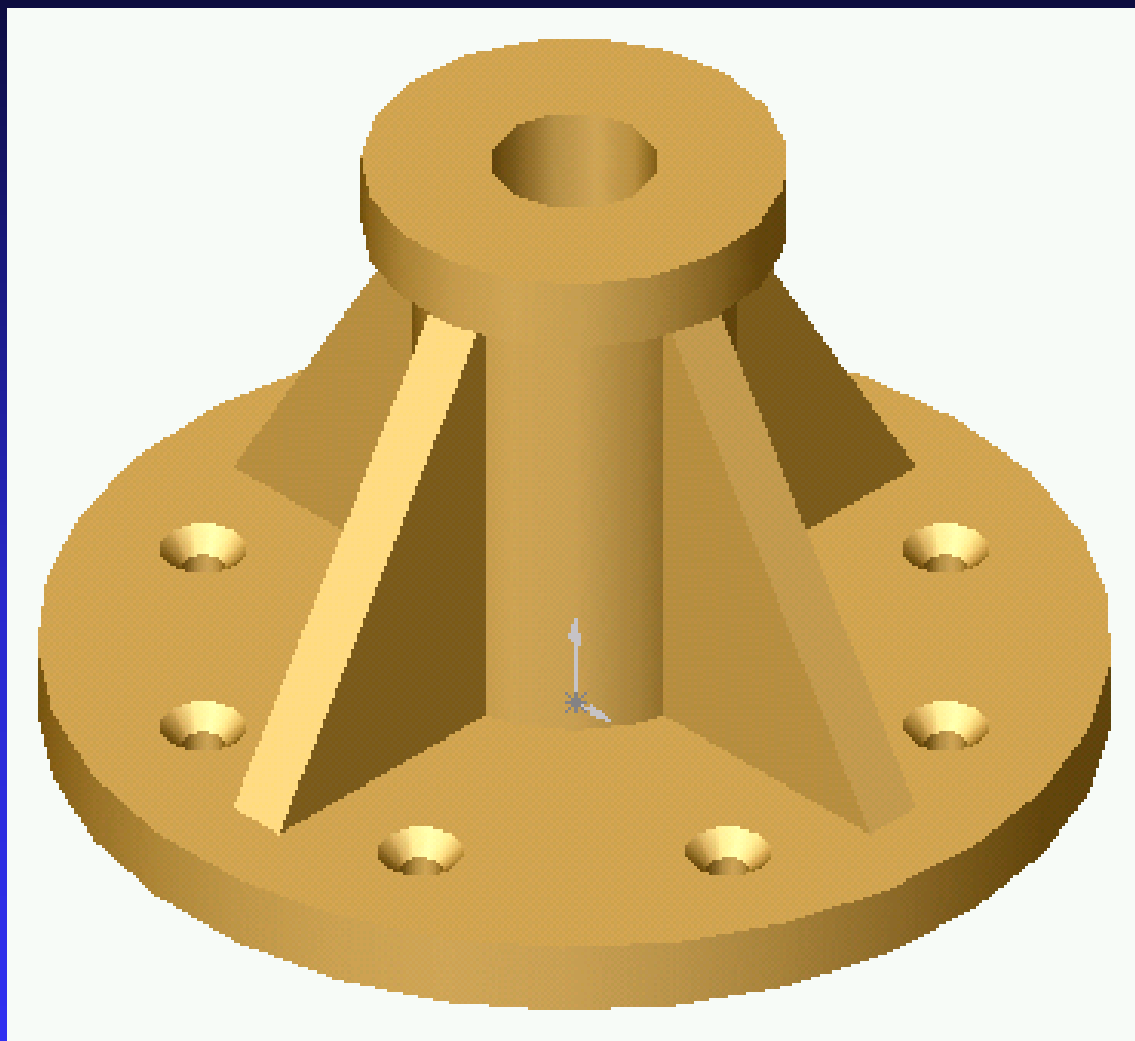
9.1 SolidWorks 2001用户界面

9.2 实例

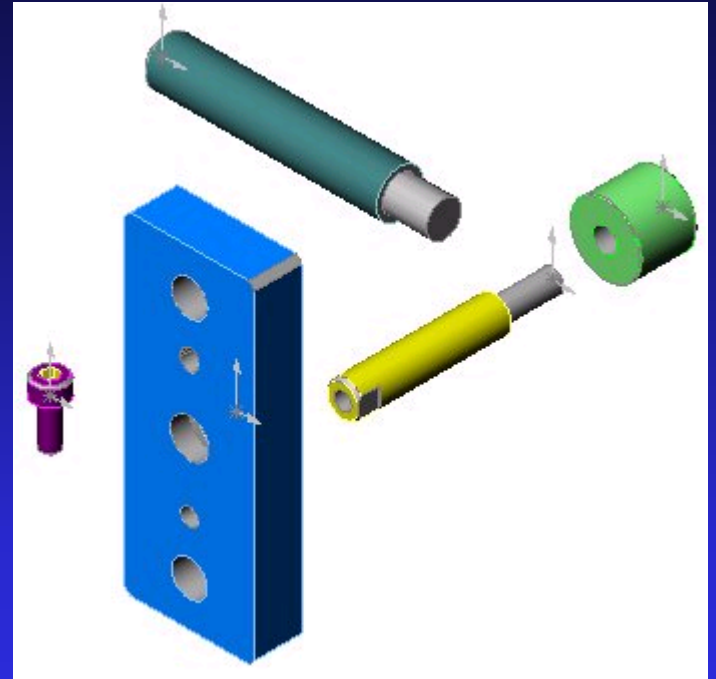
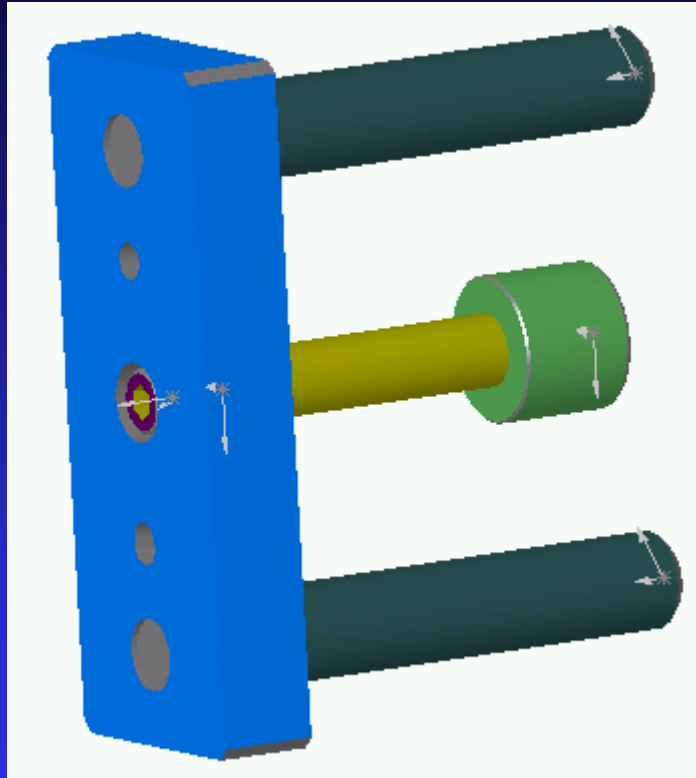
9.2.1 例题1：拉伸简单零件



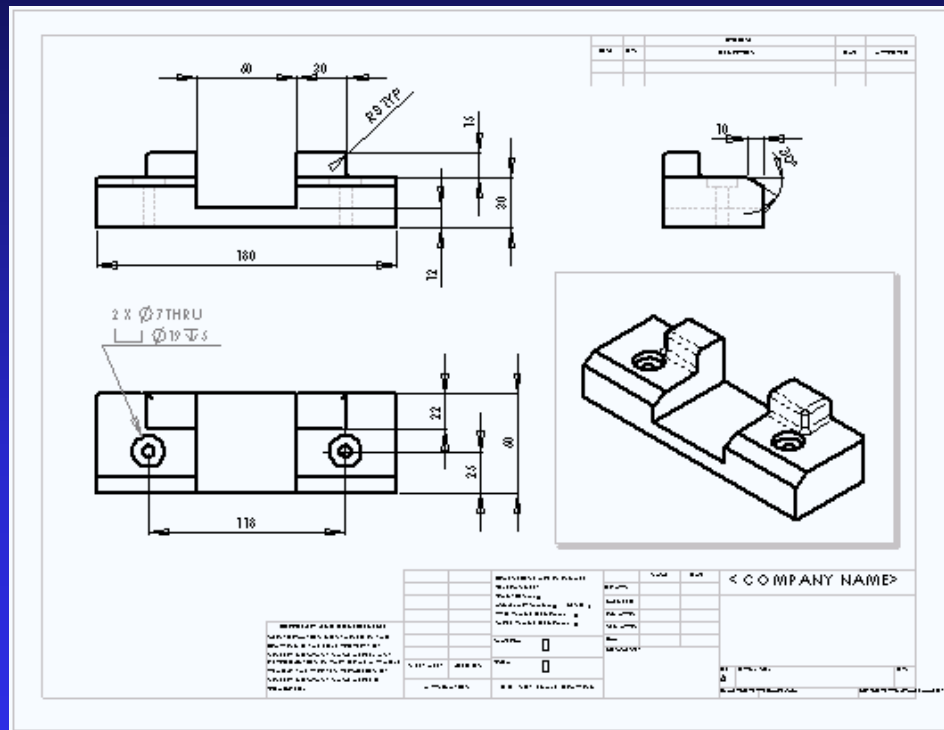
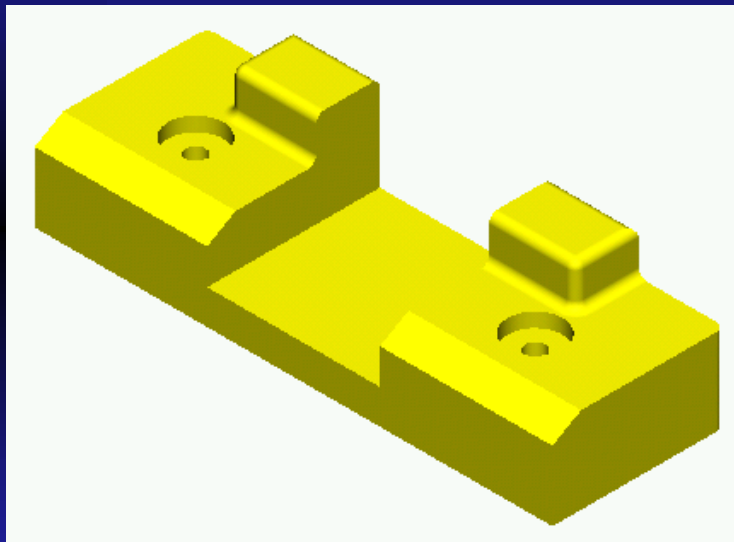
9.2.2 例题2：生成旋转零件



9.2.3 例题3：装配零件



9.2.4 例题4：生成工程图



9.2.5 例题5：端盖

