

本书为《控制微电机设计》的第三册。书中介绍了自动化装置用鼠笼转子两相交流伺服电动机的特点及有关电磁设计方面的基本原则，阐明了两相交流伺服电动机电磁设计计算方法。书中还介绍了电磁计算程序及应用举例。

本书可供控制微电机设计人员及其他从事控制微电机工作人员参考。

控制微电机设计

第三册 交流伺服电动机

西安微电机研究所编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 7 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

※

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $4 \frac{14}{16}$ · 字数 103 千字
1974 年 4 月北京第一版 · 1974 年 4 月北京第一次印刷
印数 00,001—17,500 · 定价 0.52 元

*

统一书号：15033 · 4211

目 录

前言

第一章	两相交流伺服电动机特点和设计的一般问题	1
§ 1-1	鼠笼转子两相交流伺服电动机结构特点	1
§ 1-2	控制系统对两相交流伺服电动机的技术要求	4
§ 1-3	电磁设计的一般问题	5

第二章 两相交流伺服电动机的基本设计原理

	及设计计算	11
§ 2-1	等值电路参数	11
§ 2-2	等值电路参数选择	17
§ 2-3	定子和转子的齿槽配合	36
§ 2-4	主要尺寸选择和冲片设计	40
§ 2-5	定子绕组和气隙	45
§ 2-6	磁路计算	48
§ 2-7	特性计算	49
§ 2-8	使用于单相电源时电容的配置	52

第三章 两相交流伺服电动机电磁计算程序

	及应用举例	59
§ 3-1	电磁计算程序	59
§ 3-2	应用举例及实验数据	79

附录

一	转子导条电阻系数 ρ_b 或端环电阻系数 ρ_R	121
二	常用圆铜线规格表	121
三	磁性材料磁化曲线表	123
四	磁性材料比重 γ_{Fe}	128
五	SL 系列两相交流伺服电动机技术数据	128

第一章 两相交流伺服电动机

特点和设计的一般问题

§ 1-1 鼠笼转子两相交流伺服电动机结构特点

交流伺服电动机是一类精密控制电机。它作为控制系统执行元件，广泛应用于各种自动化装置。其任务是将输入的电气信号(例如控制电压)转换为旋转轴上的机械传动，以达到预定目的。交流伺服电动机按转子结构划分为三种基本类型：鼠笼式、非磁性杯式及铁磁杯式。由于内部构造的差异，三种基本类型在设计制造、运行性能和使用场合均各有差别。

非磁性杯式主要特点在于转子惯性矩小。其结构简图如图 1-1 所示。在一定的条件下，它能保证控制系统快速工作。但其内定子和外定子之间气隙较大，一般大于 0.5 毫米，相对而言，励磁电流大，致使绕组铜线和槽截面积皆增大，从而增大了电动机的体积和重量，降低了电磁材料的利用率。由于它的转子上无齿和槽，所以定子和转子间无齿槽粘合现象。

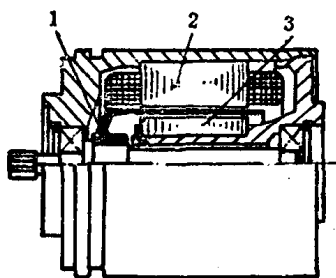


图 1-1

1—非磁性杯转子；2—外定子，
3—内定子

通常转矩不随轴的位置而发生变化。恒速旋转时，转轴一般不会有抖动现象。在某些特殊情况下，例如在积分式均衡网络的系统中，应用非磁性杯式较为适宜。

铁磁杯式因转子除导电外还起磁路的(导磁)作用，与

非磁性杯式相比，定子和转子之间的气隙可减小。电磁能量从定子通过气隙空间向转子传递时，由于电磁波穿入转子的深度较浅（频率高时尤甚），且铁磁材料电阻率较高，故转子阻抗相当大。同时，转子阻抗还与转速有关。这些因素使它具有线性度较高的机械特性和调节特性。但其起动转矩低，惯性矩大，并对气隙的不均匀程度很敏感。在定子内圆同转子外圆有偏心时，可能造成转子被吸住的现象。因此，在设计制造小气隙时有困难。此外，气隙磁通振荡，在转子上引起的表面损耗非常大，因而增加了电动机的发热。目前，磁性杯式在控制系统中应用得不多。一般在控制系统中作为辅助电动机，如带动风扇。

鼠笼转子两相交流伺服电动机的快速性能，可保证控制系统快速工作，主要是由于它可设计制造成较小的气隙。目前气隙最小可达 0.025 毫米。因此，单位输入功率的起动转矩较大。为了减小转子惯性矩，转子可设计成细而长。为了提高装配精度，保证制造小气隙，通常采用“一刀通”结构。所谓“一刀通”结构是使定子铁心内圆和轴承座内圆为同一尺寸，便于一次夹装同时加工，以提高定子内圆和转子外圆的同心度。鼠笼式因为气隙小，相对而言，励磁电流小，可提高电磁材料的利用率，减小电动机的体积和重量。在相同的性能指标下，鼠笼式比非磁性杯式体积和重量均小。由于鼠笼式转子有齿和槽，而有反应力矩，因此，定子和转子之间会产生齿槽粘合现象，使起动电压有所增大。但是，采取斜槽转子可在很大程度上减少齿槽粘合现象的影响。同非磁性杯式相比，鼠笼转子式机械强度好，并能在恶劣的气候和环境可靠地工作。鼠笼材料通常是采用纯铝。鼠笼是用压力铸造而成。力能指标高的（例如高起动转矩）及快速反应

性能好的电动机，鼠笼材料一般采用紫铜。

鼠笼式“一刀通”结构如图1-2所示。通常在*36机座及*36机座以下均采用“一刀通”结构。在*36机座以上可以采用“装配式”结构。“装配式”结构如图1-3所示。*45机座鼠笼转子两相交流伺服电动机及零、部件如图1-4所示。

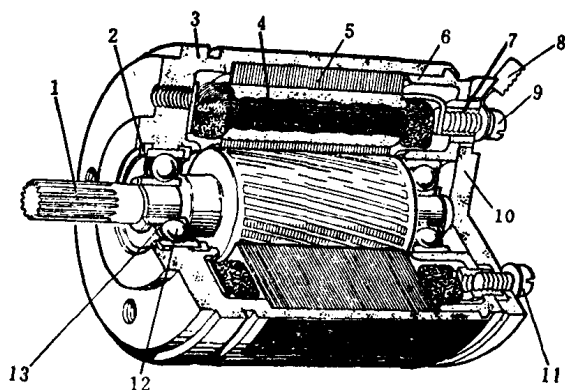


图1-2 “一刀通”结构

1—转子，2—挡圈，3—机壳，4—定子绕组，5—定子铁心，6—端盖，
7—接线柱，8—接线片，9—接线螺钉，10—接线板，11—固紧螺钉，
12—轴承，13—密封垫圈

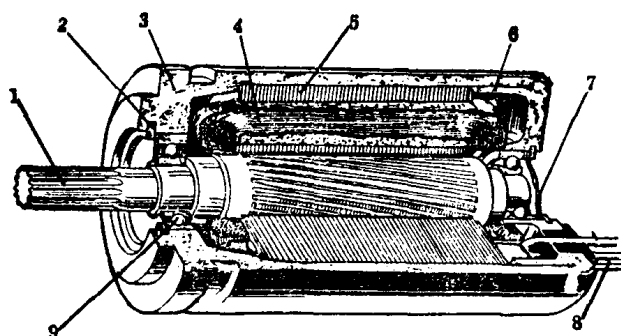


图1-3 “装配式”结构

1—转子，2—挡圈，3—机壳，4—定子绕组，5—定子铁心，6—端盖，
7—密封垫圈，8—引出线，9—轴承

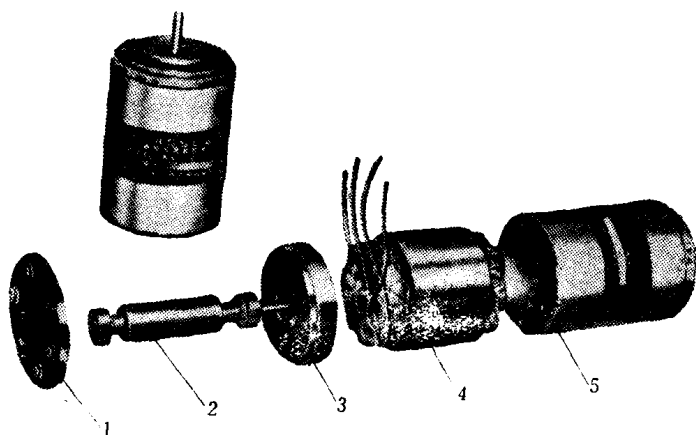


图1-4 *45机座鼠笼转子两相交流伺服电动机及零、部件

1—接线板；2—转子；3—端盖；4—定子；5—机壳

§ 1-2 控制系统对两相交流 伺服电动机的技术要求

设计两相交流伺服电动机，首先应考虑控制系统对该类电机的技术要求。这些要求通常分为基本的和特殊的。

基本要求是：

1. 机械特性应是稳定的。电压不变时应保证从零转速到空载转速范围内能平滑、稳定调速。
2. 大的起动转矩 T_{st} 。
3. 具有在一定的环境温度、湿度和海拔高度等气候条件下的工作能力。
4. 具有在一定的振动、冲击条件下的工作能力。
5. 使用寿命要长。
6. 体积小、重量轻。
7. 在给定工作状态下绕组的温升，不超过允许温升限

度。

8. 结构简单、运行可靠。

特殊要求主要是：

1. 不产生自转现象。按照输入信号取消时的具体条件，例如，控制相定子绕组开路或短路，在设计时必须明确空载下是否产生自转的要求。换言之，必须明确单相供电自制动能力的要求。

2. 机械、调节特性和起动转矩特性应接近线性关系。在精密控制系统中，通常机械特性非线性度 Δf 不大于 10~15%，起动转矩特性非线性度不大于 5%。在一般控制系统中，机械特性非线性度 Δf 不大于 15~25%、起动转矩特性非线性度不大于 5~10%。

3. 控制相单位输入功率的起动转矩要大。

4. 机电时间常数 τ 要求小。

5. 转子惯性矩 J 要求小。

6. 起动电压要求低。通常要求不大于额定控制电压的 3%；使用于精密仪器仪表中的两相交流伺服电动机，特别是军用品，有时要求不大于额定控制电压的 1%。

§ 1-3 电磁设计的一般问题

设计交流伺服电动机是根据使用和制造条件将电路、磁路和热路等方面的问题统一考虑，得出一个合理的方案。

按标准化、系列化要求，目前我国自行设计的控制微电机有下列机座号：

*12; (*16); *20; (*24); *28; (*32); *36; (*40);
*45; *55; *70; *90; *110; *130.*

* 带有括号者尽量不采用。

使用和设计制造表明，并非所有机座号都必须采用。适当地选用若干机座号，有利于组织生产、发展品种。产品规格繁多主要表现于电压等级和容量等级，并不表现在机座号上。根据统计，一般品种数集中在几个所谓“常用机座号”。例如，*20机座的产品约占17%，*28约占18.5%，*36约占16%，*45约占24%，这四种机座号的品种规格几乎占75%以上。

按输出功率从0.1瓦~30瓦的分配范围，可采用*12 *20*28*36*45*55*70等7种机座号（参考附录五）。

目前，我国规定控制微电机频率标准为：400赫和50赫。电动机的供电频率和极数一般是事先给定的。如没有给定，建议如下选取：

*12机座选取400周/秒、4极或6极；*20机座选取400周/秒、6极或4极；*28机座选取400周/秒、6极和50周/秒、2极；*36机座选取400周/秒、8极或4极和50周/秒、2极；*45机座选取400周/秒、8极或4极和50周/秒、2极或4极；*55机座选取50周/秒、2极和400周/秒、4极或8极；*70机座选取50周/秒、2极和400周/秒、4极。

众所周知，一般工业用驱动电动机的电磁设计计算对额定工作状态是相当重视的。但是，对于交流伺服电动机，由于其用途和特性等原因，起动状态比额定工作状态具有更重要的意义。所以，一般是对幅控圆形旋转磁场的起动状态进行电磁设计计算。

伺服电动机的发热和温升，在设计时必须予以重视。端面安装且为封闭式自然冷却的电动机，则不必进行发热和温升计算。可事先根据相应机座号机壳外径 D_k （毫米），在发热方面校验所要求的输出功率 P_2 （瓦）或起动转矩 T_{st} 。

(克·厘米)是否合理。我们用起动状态的电机热负荷 θ_{st} (瓦/厘米²) 限制电机的发热和温升。

按下列公式进行校验:

$$\theta_{st} = \frac{0.318 \times 10^2 K_t K_s P_2}{\eta_{st} (1 - S_H) K_{st} D_K^2 (0.5 + \beta)} \quad (1-1)$$

或
$$\theta_{st} = \frac{1.955 \times 10^{-2} K_s f T_{st}}{\eta_{st} K_{st} p D_K^2 (0.5 + \beta)} \quad (1-1')$$

式中 f —— 频率 (赫);

p —— 极对数;

S_H —— 额定转差率;

K_t —— 起动转矩倍数, 参考表 1-1 选取;

K_s 和 K_{st} —— 分别考虑起动工作状态时铁耗、附加损耗和附加力矩影响的系数, 参考表 1-2 选取;

η_{st} —— 起动工作状态利用系数, 参考图 1-5 a)、b) 选取;

β —— 机身长度 L_K 同机壳外径 D_K 之比, 一般

$$\beta = \frac{L_K}{D_K} = 1 \sim 2;$$

θ_{st} —— 电机热负荷 (瓦/厘米²), 参考图 1-6。对某相应机座号所要求的输出功率或起动转矩不应使起动状态热负荷高于图中数值。一般应偏低于平均值为宜。

表 1-1

P_2 (瓦)	K_t	S_H
0.1~0.5	2.5~1.8	0.55
0.5~10	2~1.6	0.5
10~100	1.8~1.4	0.48

表 1-2

q^*	1	1 < 分数 < 2	≥ 2	备注
K_s	1.1~1.25	1.1~1.2	1.05~1.15	
K_{st}	0.93	0.96	0.98	

* q 为每极每相定子槽数。

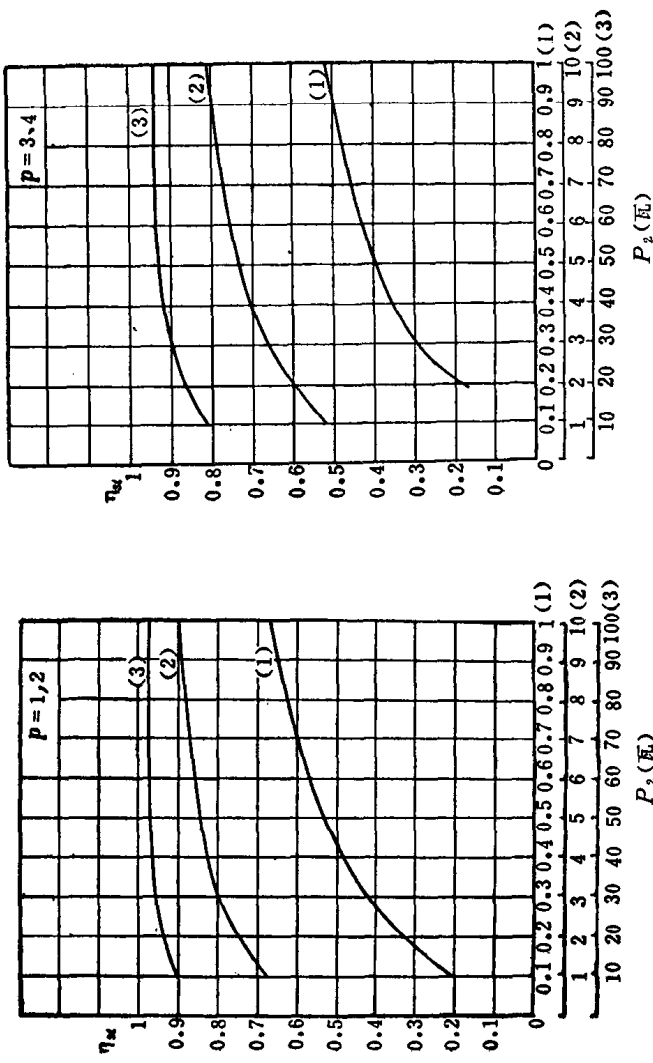


图1-5 b) 起动工作状态利用系数 η_r 同输出功率 P_2 的关系曲线

图1-5 a) 起动工作状态利用系数 η_r 同输出功率 P_2 的关系曲线

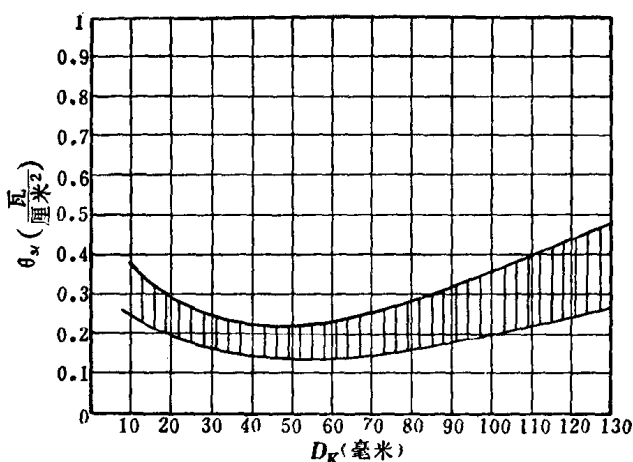


图1-6 电机热负荷 θ_{α} 同机座号机壳外径 D_K 的关系曲线

大家知道，设计交流伺服电动机同设计一般工业用驱动电动机在参数选择等等方面是有很大差别的。设计时首先应将§1-2节所列举的技术要求作为电磁设计的主要依据。其次，考虑同力能指标有关的电磁负荷（例如，气隙磁通密度 B_0 、线负荷 AS 、电流密度 Δ 等等）。

根据我国目前自行设计制造的鼠笼转子两相交流伺服电动机统计分析表明：

频率为400周/秒时，气隙磁通密度一般为3000~5000高斯；定子、转子齿磁通密度为8000~12000高斯；

频率为50周/秒时，气隙磁通密度一般为4000~6500高斯；定子、转子齿磁通密度为11000~13000高斯。

控制系统对两相交流伺服电动机的技术要求，同电动机等值电路各参数密切相关。所以电磁设计计算的任务是：对选定了的机座号，在允许的发热和温升下，合理地选择电动机等值电路参数和主要尺寸；权衡磁路、热路、电路和制造工

艺等有关因素，确定电机定子绕组串联匝数及线规；以满足对电机的技术要求为前提，力求得到较大的输出功率。

在伺服电动机中，定子内圆同转子外圆间的偏心以及它们的椭圆度和锥度，槽和齿的存在以及定转子齿槽配合，磁路饱和，摩擦，轴承配合，轴承润滑剂，定子铁心外圆同机壳内圆间的配合，总装配时的清洁与否等诸因素均对起动电压有极大的影响。因此，在制造时必须给予重视。

第二章 两相交流伺服电动机的基本设计原理及设计计算

§ 2-1 等值电路参数

交流伺服电动机除以普通异步电动机原理为基础外，尚有其一定的特点。

两相交流伺服电动机在控制系统中工作时，加在其定子绕组两相的电压和电流，通常不对称。对各相绕组折算到同一匝数的数值不相等，相位移也不是 90° ，故两相定子绕组磁势产生的旋转磁场，在一般情况下不是圆形，而是椭圆形。故通常采用对称分量法对该二相系统进行分析。

大家知道，电机的定子电阻、定子漏抗、互感抗，以及折算到定子方的转子的电阻和漏抗，均与定子绕组的匝数有关。在电磁设计中定子绕组匝数的调整，往往需要较多的返算，费时较多。因此，为了计算方便，等值电路参数采用以控制相互感抗为基值的相对值。它们基本上与定子绕组的匝数无关，称之为相对参数。为了简化，在进行各种分析时暂不考虑铁耗和谐波磁场对参数及性能的影响。

用相对参数表示的控制相正序和逆序 T 型等值电路，如图 2-1 a)、b) 所示。

图中 $\bar{r}_{sk}$ ——定子电阻相对值；
 $\bar{x}_{sk}$ ——定子漏抗相对值；
 $\bar{x}_{rk}$ ——转子漏抗相对值；
 $\bar{r}_{rk}$ ——转子电阻相对值；

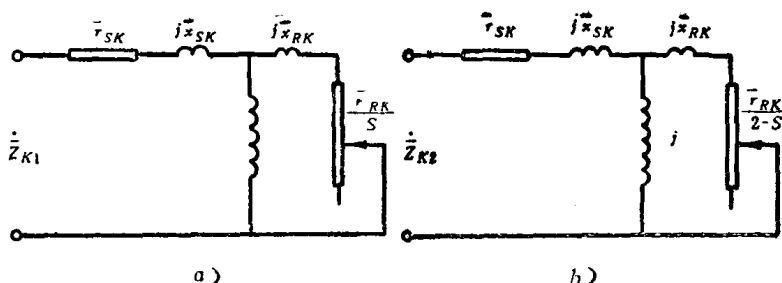


图 2-1

a—正序； b—逆序

 $\bar{Z}_{K1}$ ——正序阻抗相对值（复数）； $\bar{Z}_{K2}$ ——逆序阻抗相对值（复数）； $\bar{x}_{mK}$ ——互感抗 x_{mK} 的相对值，其值为 1； S ——转差率。

计算各个相对参数的公式如下：

$$\text{系数} \quad A = \frac{1.99 \times 10^8 p^2 K_\mu K_\delta \delta}{K_{ws}^2 f D_{is} L_s} \quad (2-1)$$

式中 K_μ ——磁路饱和系数； K_δ ——卡氏系数； δ ——气隙长度（毫米）； K_{ws} ——定子绕组系数； D_{is} ——定子铁心内径（毫米）； L_s ——定子铁心长度（毫米）。

$$\text{互感抗} \quad x_{mh} = \frac{W_K^2}{A} \text{ (欧姆)} \quad (2-2)$$

式中 W_K ——控制相定子绕组串联匝数。

$$\text{定子电阻相对值} \quad \bar{r}_{sK} = A r'_{sK} \quad (2-3)$$

$$\text{式中} \quad r'_{sK} = \frac{4 p_s L_{cus}}{f_0 S_{os} \bar{Z}_s} \quad (2-3')$$

ρ_s ——定子绕组铜线电阻系数 (欧姆·毫米);

L_{cus} ——定子绕组平均匝长 (毫米);

f_0 ——定子绕组裸铜线槽满率;

S_{os} ——定子铁心槽面积 (毫米²);

Z_s ——定子槽数。

$$\text{定子漏抗相对值} \quad \bar{x}_{sK} = Ax'_{sK} \quad (2-4)$$

$$\text{式中} \quad x'_{sK} = \frac{1.58 \times 10^{-8} f L_s \Sigma \lambda_s}{pq} \quad (2-4')$$

q ——每极每相定子槽数;

$\Sigma \lambda_s$ ——定子总漏磁导系数;

$$\text{转子漏抗相对值} \quad \bar{x}_{rK} = Ax'_{rK} \quad (2-5)$$

$$\text{式中} \quad x'_{rK} = x'_{sK} \frac{\Sigma \lambda'_r}{\Sigma \lambda_s} \quad (2-5')$$

折算到定子方的转子总漏磁导系数

$$\Sigma \lambda'_r = \Sigma \lambda_r \frac{L'_r Z_s}{L_s Z_r} \left(\frac{K_{ws}}{K_{sK}} \right)^2 \quad (2-5'')$$

式中 $\Sigma \lambda_r$ ——转子总漏磁导系数;

L'_r ——转子铁心长度 (毫米);

Z_r ——转子槽数;

K_{sK} ——转子斜槽系数。

$$\text{转子电阻相对值} \quad \bar{r}_{rK} = Ar'_{rK} \quad (2-6)$$

$$\text{式中} \quad r'_{rK} = \frac{8K_{ws}^2 \rho_B L'_r}{Z_r K_{sK}^2 S'_B} K_{pK} \quad (2-6')$$

ρ_B ——转子导条电阻系数 (欧姆·毫米);

S'_B ——转子导条截面积 (毫米²);

考虑端环电阻的系数 K_{pK} :

$$K_{pK} = 1 + \frac{1.57 S'_B \rho_B D'_r}{ab \delta_{is} Z_r \sin^2 \frac{\pi p}{Z_r} \rho_B D_{is}} \quad (2-6'')$$

式中 a ——端环轴向宽度 (毫米);
 b ——端环径向宽度 (毫米);
 ρ_R ——端环电阻系数 (欧姆·毫米);

$$\beta_{is} = \frac{L_s}{D_{is}};$$

端环平均直径 $D'_R = D_R - b$ (毫米);

D_R ——转子铁心外径 (毫米)。

为了实际应用的方便, 用一个等值阻抗代替与转子并联的磁化支路, 将图 2-1 a)、b) 的等值电路变换为如图 2-1' a)、b) 所示的形式。

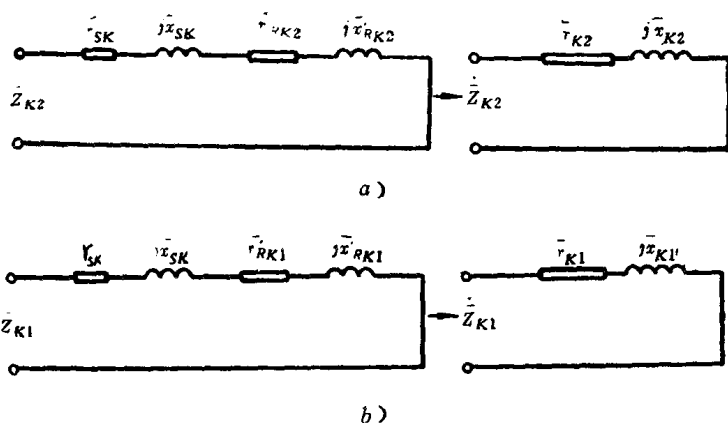


图 2-1'

a — 正序; b — 逆序

图中
$$\bar{r}'_{RK1} = \frac{\bar{r}_{RK} S}{\bar{r}_{RK}^2 + S^2 (1 + \bar{x}_{RK})^2};$$

$$\bar{x}'_{RK1} = \frac{\bar{r}_{RK}^2 + \bar{x}_{RK} (1 + \bar{x}_{RK}) S^2}{\bar{r}_{RK}^2 + S^2 (1 + \bar{x}_{RK})^2};$$

$$\bar{r}_{K1} = \bar{r}_{SK} + \bar{r}'_{RK1};$$

$$\bar{x}_{K1} = \bar{x}_{SK} + \bar{x}'_{RK1};$$

$$\begin{aligned}\dot{\bar{Z}}_{K1} &= \bar{r}_{K1} + j\bar{x}_{K1} \\ \bar{Z}_{K1} &= \sqrt{\bar{r}_{K1}^2 + \bar{x}_{K1}^2} \\ \bar{r}'_{RK2} &= \frac{\bar{r}_{RK}(2-S)}{\bar{r}_{RK}^2 + (2-S)^2(1+\bar{x}_{RK})^2} \\ \bar{x}'_{RK2} &= \frac{\bar{r}_{RK}^2 + \bar{x}_{RK}(1+\bar{x}_{RK})(2-S)^2}{\bar{r}_{RK}^2 + (2-S)^2(1+\bar{x}_{RK})^2} \\ \bar{r}_{K2} &= \bar{r}_{SK} + \bar{r}'_{RK2} \\ \bar{x}_{K2} &= \bar{x}_{SK} + \bar{x}'_{RK2} \\ \dot{\bar{Z}}_{K2} &= \bar{r}_{K2} + j\bar{x}_{K2} \\ \bar{Z}_{K2} &= \sqrt{\bar{r}_{K2}^2 + \bar{x}_{K2}^2} \quad \circ\end{aligned}$$

当 $S = 1$ 时:

$$\begin{aligned}\bar{r}'_{RK0} &= \bar{r}'_{RK1} = \bar{r}'_{RK2} = \frac{\bar{r}_{RK}}{\bar{r}_{RK}^2 + (1+\bar{x}_{RK})^2} \\ \bar{x}'_{RK0} &= \bar{x}'_{RK1} = \bar{x}'_{RK2} = \frac{\bar{r}_{RK}^2 + \bar{x}_{RK}(1+\bar{x}_{RK})}{\bar{r}_{RK}^2 + (1+\bar{x}_{RK})^2} \\ \bar{r}_{K0} &= \bar{r}_{K1} = \bar{r}_{K2} = \bar{r}_{SK} + \bar{r}'_{RK0} \\ \bar{x}_{K0} &= \bar{x}_{K1} = \bar{x}_{K2} = \bar{x}_{SK} + \bar{x}'_{RK0} \\ \dot{\bar{Z}}_{K0} &= \dot{\bar{Z}}_{K1} = \dot{\bar{Z}}_{K2} = \bar{r}_{K0} + j\bar{x}_{K0} \\ \bar{Z}_{K0} &= \bar{Z}_{K1} = \bar{Z}_{K2} = \sqrt{\bar{r}_{K0}^2 + \bar{x}_{K0}^2} \quad \circ\end{aligned}$$

当圆形旋转磁场时逆序分量为零, 则仅有正序分量。注脚 1、2 予以取消。

在某些场合下, 控制电压同励磁电压的额定值不相等。例如, 采用晶体管伺服放大器时, 控制电压往往比励磁电压低。在这种情况下, 为了获得圆形旋转磁场, 设计时应使控制相定子绕组串联有效匝数 (即串联匝数乘以绕组系数) 同