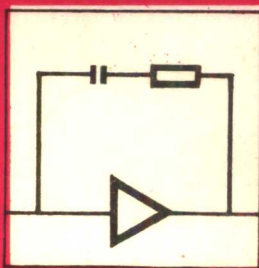
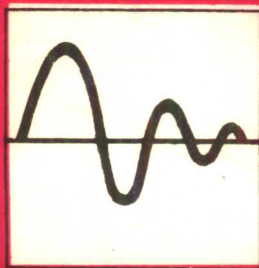
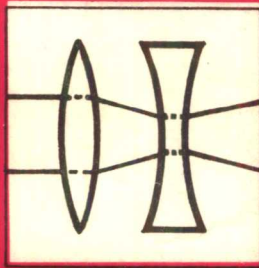
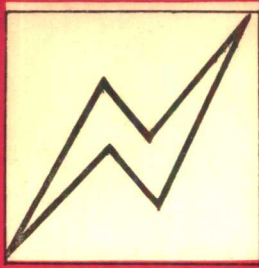


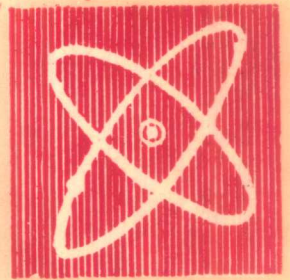
高等学校试用教材



电机设计

下册

西安交通大学陈世坤 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

电机设计

下册

西安交通大学陈世坤 主编



机械工业出版社

电机设计

(下 册)

西安交通大学陈世坤 主编

※

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证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

※

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 13 · 字数 321 千字

1982 年 6 月北京第一版 · 1982 年 11 月北京第二次印刷

印数 7,001—12,200 · 定价 1.40 元

※

统一书号: 15033 · 5114

目 录

第十一章 异步电机的电磁设计	7	§ 13-2 主要尺寸与气隙的决定	89
§ 11-1 概述	7	§ 13-3 定子槽和绕组的设计	95
§ 11-2 主要尺寸与气隙的确定	3	§ 13-4 转子本体与绕组的设计	97
§ 11-3 定子绕组与铁心的设计	7	§ 13-5 磁路计算特点	103
§ 11-4 转子绕组与铁心的设计	15	§ 13-6 参数及时间常数的计算	109
§ 11-5 起动性能的计算	26	§ 13-7 特性计算	111
§ 11-6 单绕组多速电机的设计特点	33	§ 13-8 损耗与效率	111
§ 11-7 铝线异步电机的设计特点	38	复习思考题	116
复习思考题	40	第十四章 直流电机的电磁设计	117
第十二章 凸极同步电机的电磁设计	42	§ 14-1 概述	117
§ 12-1 概述	42	§ 14-2 主要尺寸与气隙的确定	118
§ 12-2 设计任务书的主要内容及其简要说明	44	§ 14-3 极数的选择	122
§ 12-3 主要尺寸与气隙的确定	45	§ 14-4 电枢及其绕组的设计	124
§ 12-4 定子绕组与铁心的设计	49	§ 14-5 磁极与励磁绕组的设计	132
§ 12-5 转子磁极和磁轭尺寸的确定	54	§ 14-6 补偿绕组的设计	137
§ 12-6 空载磁路计算	57	§ 14-7 换向计算	139
§ 12-7 励磁绕组和阻尼(起动)绕组的设计	61	§ 14-8 运行特性计算	147
§ 12-8 同步电机的参数和特性计算	66	复习思考题	150
§ 12-9 柴油发电机的电磁设计特点	74	附录一 数值解法概要	151
§ 12-10 水轮发电机若干设计特点	76	附录二 大型交流电机定子线圈的换位	170
§ 12-11 同步电动机及调相机的起动性能计算	82	附录三 电机中作用于载流导体的电磁力	177
复习思考题	86	附录四 轴电流产生的原因及其防止措施	189
第十三章 隐极汽轮发电机的电磁设计	87	常用符号表	195
§ 13-1 概述	87	参考文献目录	200

第十一章 异步电机的电磁设计

§ 11-1 概 述

前面各章叙述了电机设计的基础理论。从本章开始，将分别讨论各种电机的具体设计或计算问题。这一章主要讨论中小型三相异步电动机电磁计算中的几个主要部分，包括：主要尺寸与气隙的选择；定转子绕组与冲片的设计；起动性能的计算；以及单绕组多速电机和铝线电机的设计特点。关于电磁计算中的磁路、参数和损耗的计算，在第三、四、五章中已作了详细介绍，关于运行特性的计算也已在《电机学》中详细叙述，这里都不再重复。

一、我国异步电机主要系列

我国目前生产的三相异步电动机约有 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 $H > 0.63$ 米，定子铁心外径 $D_1 > 1$ 米，16 号机座以上；功率范围在 400 千瓦以上，电压为 3000 伏和 6000 伏。

中型：中心高 $H = (0.355 \sim 0.63)$ 米，定子铁心外径 $D_1 = (0.5 \sim 1.0)$ 米，11~15 号机座；功率范围为 (45~1250) 千瓦，电压有 380 伏、3000 伏和 6000 伏。

小型：中心高 $H = (0.08 \sim 0.315)$ 米，定子铁心外径 $D_1 = (0.12 \sim 0.5)$ 米，9 号机座以下；功率范围为 (0.6~125) 千瓦，电压为 380 伏。

现将基本系列以及主要派生和专用系列产品简单介绍如下。

系列型号	产品名称	主要用途及说明
J2 JO2	三相笼型转子异步电动机 (小型)	用于驱动对起动、调速等均无特殊要求的负载，如水泵、一般机床及某些矿山机械；封闭型 (JO2) 可用于灰尘较多，水土飞溅的场所
JR	绕线转子异步电动机(中、小型)	用于馈电线路容量不能供笼型转子异步电动机起动的场合(起动时转子回路中接有外加起动电阻)，起动转矩较大，并能在小范围内调速
JS	笼型转子异步电动机(中、小型)	用于驱动各种机械，如通风机、压缩机、水泵、切削机床和运输机械等
JR2 JRL2	绕线转子异步电动机(中、小型)	与JR同 JRL2为立式，用于驱动立式水泵、立式机械
JS2 JSL2	笼型转子异步电动机(中、小型)	同JS JSL2为立式，用以驱动立式水泵与机械
Y	笼型转子异步电动机(大型)	驱动通风机、水泵及组成电动发电机组
YR	绕线转子异步电动机(大型)	驱动卷扬机、通风机、水泵及组成电动发电机组
YK	大型高速异步电动机	用于电力、冶金、炼焦、化工及煤矿等工业部门作为驱动鼓风机、水泵等机械之用

系列型号	产品名称	主要用途及说明
YQ	高起动转矩异步电动机 (小型)	用于带负荷起动, 要求较大起动转矩的机械上。如压缩机、粉碎机
YH	高转差率异步电动机 (小型)	用于惯性矩较大并有冲击性负荷机械的驱动, 如剪床、压力机、锻压机及小型起重機
YD	变极多速异步电动机	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	起重及冶金用异步电动机	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上
YQS	潜水异步电动机	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	深井泵用异步电动机	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参考资料[2-1]。

二、异步电动机的主要性能指标和额定数据

(一) 异步电动机的主要性能指标

电机设计时应满足设计任务书规定的各项技术要求。对一般三相异步电动机下列各项主要性能应达到一定指标:

1. 效率 η ;
2. 功率因数 $\cos \varphi$;
3. 最大转矩倍数 T_M/T_N ;
4. 起动转矩倍数 T_{st}/T_N ;
5. 起动电流倍数 I_{st}/I_N ;
6. 绕组和铁心温升 θ_{cu} 和 θ_{Fe} ;
7. 起动过程中的最小转矩 T_{min} 。(对笼型转子电动机而言)。

(二) 异步电动机的额定数据与标么值

三相异步电动机的设计任务书中通常给出下列额定数据:

1. 额定功率 P_N : 指电动机在额定运行时转轴上输出的机械功率 (瓦或千瓦);
2. 额定电压 U_N : 电动机在额定运行时所接的电源电压 (伏或千伏);
3. 额定频率 f_N : 电动机在额定运行时的电源频率 (赫兹);
4. 额定转速 n_N : 电动机在额定运行时的转速 (转/分), 通常给出同步转速。

在电机设计中, 广泛采用标么值, 标么值是相对单位, 因此必须选定一个物理量的某一数值作为基准值。在目前工厂通常使用的“中小型三相异步电动机电磁计算程序”中, 选用的基准值是:

1. 电压基准值为电动机额定相电压 $U_{N\phi}$ (伏);
2. 功率基准值为电动机的额定功率 P_N (千瓦);
3. 电流基准值为每相的功电流 I_{KW} (安);
4. 阻抗基准值为 $Z_{KW} = U_{N\phi}/I_{KW}$ (欧);

5. 转矩基准值为电动机的额定转矩 T_N (牛顿·米)。

以上五个基准值中只有两个是选定的, 其他三个是通过这五个物理量之间的相互关系来规定的。一般, 设计异步电动机时, 电动机的额定输出功率 P_N 和额定电压 U_N 都是设计任务书规定的, 因而选用它们作为功率基准值和电压基准值就较为方便, 于是其他几项基准值便可求出。

$$I_{kw} = \frac{P_N \times 10^3}{m_1 U_{N\phi}} \quad (\text{安}) \quad (11-1)$$

$$Z_{kw} = \frac{U_{N\phi}}{I_{kw}} = \frac{m_1 U_{N\phi}^2}{P_N \times 10^3} \quad (\text{欧}) \quad (11-2)$$

$$T_N = \frac{P_N \times 10^3}{2\pi n_N / 60} = 9549 \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{牛顿·米}) \quad (11-3)$$

必须指出, 功电流不同于电动机的额定电流。额定电流对应于输入的额定视在功率, 而功电流对应于额定输出功率。但设计开始时额定电流还不能确定, 功电流却可根据额定功率求出。

标么值用右上角加“*”的相应符号来表示。如 i_m^* , i_1^* , R_1^* , x_{s2}^* , P_c^* ……等。

§ 11-2 主要尺寸与气隙的确定

一、主要尺寸和计算功率

定子铁心内径 D_{i1} 及有效长度 l_{ef} 是异步电动机的主要尺寸。

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

$$D_{i1}^2 l_{ef} = \frac{6.1 \times 10^3}{\alpha_p' K_{wm} K_{d\rho_1}} \frac{1}{AB_\delta} \frac{P'}{n} \quad (11-4)$$

其中异步电动机的计算功率 P' 为

$$P' = m E_1 I_1 \times 10^{-3} \quad (\text{千伏安})$$

由于异步电动机额定功率为

$$P_N = m U_{N\phi} I_1 \cos\varphi \eta \times 10^{-3} \quad (\text{千瓦})$$

比较上两式, 则有

$$P' = \frac{E_1}{U_{N\phi}} \frac{1}{\eta \cos\varphi} P_N \quad (11-5)$$

其中 $E_1/U_{N\phi}$ 为异步电动机定子绕组“满载电势”的标么值。由异步电机的基本方程可知

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N\phi} &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + (\dot{I}_{1p} + \dot{I}_{1o})(R_1 + jx_{o1}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_{1p} R_1 + j\dot{I}_{1p} x_{o1} + \dot{I}_{1o} R_1 + j\dot{I}_{1o} x_{o1} \end{aligned}$$

其中 \dot{I}_{1p} 和 \dot{I}_{1o} 分别表示定子电流的有功分量和无功分量。在一般情况下, 相量图(见图 11-1)所示的 $\dot{U}_{N\phi}$ 与 \dot{E}_1 两相量间夹角 $\alpha \approx 0$, 因此, 可以近似地认为定子绕组满载相电势 E_1 和外施相电压 $U_{N\phi}$ 之间存在着下列关系:

$$E_1 \approx U_{N\phi} - (I_{1p} R_1 + I_{1o} x_{o1})$$

两边除以 $U_{N\phi}$, 得

$$\begin{aligned}
 K_E &= E_1 / U_{N\phi} \approx 1 - \frac{1}{U_{N\phi}} (I_{1p} R_1 + I_{1Q} x_{\sigma 1}) \\
 &= 1 - (i_{1p}^* R_1^* + i_{1Q}^* x_{\sigma 1}^*) \\
 &= 1 - \varepsilon_L
 \end{aligned}
 \tag{11-6}$$

式中 ε_L 等于 $(i_{1p}^* R_1^* + i_{1Q}^* x_{\sigma 1}^*)$ ，即定子绕组的漏阻抗压降标么值，而 $(1 - \varepsilon_L)$ 则表示满载电势的标么值。

代入式 (11-5)，则有

$$P' = (1 - \varepsilon_L) \frac{1}{\eta \cos \varphi} P_N
 \tag{11-7}$$

在给定异步电动机额定功率 P_N 之后，可以根据上式求出计算功率 P' 。此时式中效率 η 和功率因数 $\cos \varphi$ 可取设计任务书中规定的数值。但是在电机设计计算之前，定子绕组的电阻与漏抗均为未知数，因而 $(1 - \varepsilon_L)$ 还不能按式 (11-6) 算出；此时可以近似假定一个 $(1 - \varepsilon_L)$ 值（见 § 3-6）。

二、电磁负荷的选择

式 (11-4) 中， P' 可由前述方法求出， α'_p 、 K_{wm} 、 $K_{d\rho 1}$ 等各量一般只在较小的范围内变化，因此对功率和转速一定的电机，其主要尺寸 D_{i1} 和 l_{ef} 基本上将由电磁负荷 A 和 B_s 值的大小来确定。电磁负荷对电机性能和经济性的影响在 § 2-3 中已作了详细分析。

由式 (3-57) 可知励磁电流 $I_m = \frac{2pF_0}{0.9mW K_{d\rho}}$ ，每极磁势 F_0 主要用来克服气隙磁位降 F_s ，也即 I_m 主要决定于 B_s ，因此励磁电流的标么值 I_m / I_{Kw} 正比于 B_s / A ，选取较高的 B_s 或较低的 A ，则 i_m^* 增大，使 $\cos \varphi$ 降低；漏抗标么值 $x_{\sigma}^* = \frac{I_{Kw} x_{\sigma}}{U_{N\phi}}$ 正比于 A / B_s ，选取较高的 B_s 或较低的 A ，则 x_{σ}^* 减小，电机的起动转矩、最大转矩和起动电流将增加。

设计异步电动机时，电磁负荷 A 和 B_s 值是依据制造和运行经验所积累的数据来选取的。对于中小型异步电动机通常取电负荷 A 在 $15 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3$ 安/米 (150~500 安/厘米)、气隙磁密 B_s 在 0.5~0.8 特斯拉范围内；大型异步电动机的 A 和 B_s 可略高。具体选取时，与所用电工材料的性能、绝缘等级以及极对数、功率、冷却条件、性能要求和运转情况等多种因素有关。图 11-2 和表 11-1 分别是根据我国大量生产的中小型异步电动机的 A 和 B_s 数值，按不同极数制作的曲线和图表。

三、主要尺寸比 λ 的选择

在 § 2-4 中对主要尺寸比 λ 已作了详细

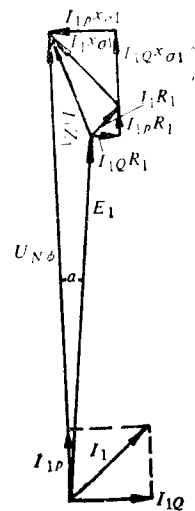


图11-1 异步电动机的相量图

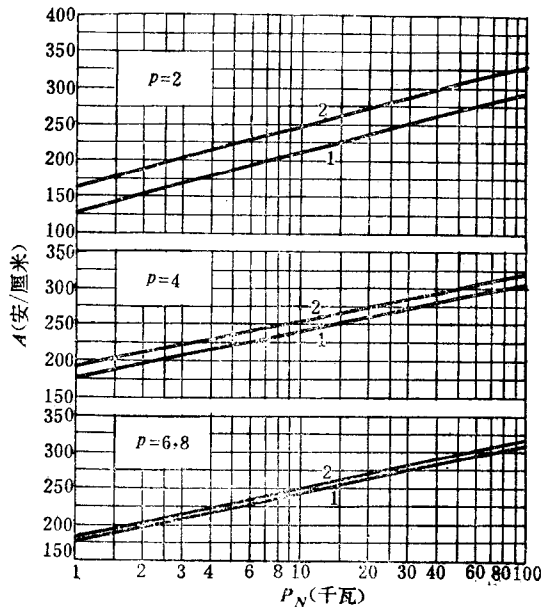


图11-2 电负荷与额定功率之关系

1—JO系列 2—JO2系列

表11-1 中小型异步电动机气隙磁密

单位: 特斯拉

系 列 \ 极 数	2	4	6、8	备 注
JO2	0.50~0.63	0.55~0.75	0.60~0.70	防护式的比封闭式的可增加15%左右
JS、JR (中型)	—	0.65~0.83	0.60~0.79	

叙述, 同时给出了大致的数值范围。表 11-2 列出了我国目前生产的 J2、JO2、JS、JR、Y、YR 系列三相异步电动机主要尺寸比 λ 值的范围。

表11-2 三相异步电动机主要尺寸比 λ 值的范围

系 列 \ 极 数	2	4	6	8
J2	0.44~0.63	0.82~1.20	1.30~1.80	1.72~2.40
JO2	0.54~0.84	0.93~1.70	1.40~2.40	1.90~3.00
JS、JR	0.40~0.60	0.60~1.20	0.8~2.0	
Y、YR	0.70~1.10	—	0.8~2.1	

对于中小型异步电动机, 定子外径 D_1 也是较重要的尺寸。 D_1 的确定要考虑整张硅钢片的利用。根据我国目前生产的硅钢片规格, 规定了标准外径, 如表 2-1 所示。当 D_1 大于 0.99 米时, 必须采用扇形冲片。

对于一定的极数, 定子铁心外径 D_1 与内径 D_{i1} 之间存在着一定的比例关系, 表 11-3 列出了三相异步电动机的 D_{i1}/D_1 值, 比值的变动范围大约在 $\pm 5\%$ 左右。

表11-3 三相异步电动机 D_{i1}/D_1 值

比 值 \ 极 数	2	4	6	8	10
J2、JO2	0.56	0.64	0.70	0.73	0.75
JS、JR	0.54	0.63	0.69~0.77		
Y、YR	0.50	—	0.68~0.78		

四、主要尺寸的确定

通过上面的分析, 根据电机的计算功率 P' 和转速 n , 在充分考虑设计中采用的材料、结构、工艺等因素后, 参考图 11-2、表 11-1 和工厂实际生产经验, 选择电磁负荷 A 和 B_s 值, 从公式 (11-4) 可算出

$$D_{i1}^2 l_{ef} = \frac{6.1 \times 10^8}{\alpha'_p K_{wm} K_{dp1}} \frac{1}{AB_s} \frac{P'}{n} = K$$

式中 K_{wm} ——气隙磁场波形系数, 在一般的情况下, 气隙磁场的波形决定了电势的波形, 因此有时也称电势波形系数。当气隙磁场波形为正弦波时, $K_{wm} = 1.11$; 当气隙磁场波形因铁心饱和而呈非正弦时, 定子绕组中也感应出非正弦的电势, 此时波形系数为 $1.11 \times \sqrt{1 + \left(\frac{K_{dp3} B_s}{K_{dp1} B_1}\right)^2 + \left(\frac{K_{dp5} B_s}{K_{dp1} B_1}\right)^2 + \dots}$ (其中 K_{dp1} 、 K_{dp3} 、 K_{dp5} 、 \dots 为奇次谐波的绕组系数, B_1 、 B_3 、 B_5 、 \dots 为奇次谐波磁密幅值), 在一般的情况下, 仍可视作 1.11;

α'_p ——计算极弧系数, 由定义看 $\alpha'_p = \frac{\Phi}{B_s \tau l_{ef}} = \frac{B_{\delta wv}}{B_s}$, 是气隙磁密平均值与其最

大值之比, 因此计算极弧系数实为波幅系数之倒数。若电机铁心不饱和, 气隙磁密分布呈正弦形时, $\alpha'_p = \frac{2}{\pi} = 0.637$, 考虑到一般电机铁心稍有饱和, 设计时 α'_p 可初步取为 $0.66 \sim 0.71$;

K_{dp1} ——定子基波绕组系数, 可根据选定的绕组型式、槽数和节距算出; 在绕组设计前, 对双层短距绕组, 可先假定 $K_{dp1} = 0.92$, 对于单层绕组, 可先假定 $K_{dp1} = 0.96$ 。

其次, 参考表 11-2 选择适当的 λ 值, 因 $l_{ef} = \lambda \tau$, $\tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p}$, 则有

$$D_{i1}^2 l_{ef} = D_{i1}^2 \lambda \tau = \frac{\lambda \pi}{2p} D_{i1}^3 = K$$

便可求出

$$D_{i1} = \sqrt[3]{\frac{2p}{\lambda \pi} K} \quad (\text{米}) \quad (11-8)$$

这是初步计算出的定子铁心内径, 参考表 11-3 的 D_{i1}/D_1 比值算出 D_1 , 再按照标准外径调整 D_{i1} 。

最后, 根据调整的 D_{i1} 求出 l_{ef}

$$l_{ef} = K/D_{i1}^2 \quad (\text{米})$$

上面是确定电机主要尺寸的一般过程。在生产实际中, 对于异步电动机已经积累了丰富的实践经验, 设计时往往只需参考已经制成的同类型、相近规格电机的尺寸, 针对所设计电机的结构、材料、工艺特点等因素, 直接初选其定子铁心外径、内径和长度, 进行核算调整, 最后加以确定。

五、空气隙的确定

通常气隙 δ 选取得尽可能的小, 以降低空载电流, 因为异步电动机的功率因数 $\cos \varphi$ 主要决定于空载电流。但是气隙不能过小, 否则除影响机械可靠性外, 还会使谐波磁场及谐波漏抗增大, 导致起动转矩和最大转矩减小, 谐波转矩和附加损耗增加, 进而造成较高温升和较大噪声。

气隙 δ 的数值基本上决定于定子内径、轴的直径和轴承间的转子长度。因为机座、端盖、铁心等在加工和装配时都允许一定偏差; 而轴的直径和轴承间的距离决定了轴的挠度; 定转子装配在一起后, 定子铁心内圆和转子外圆的不同心度决定了气隙的不均匀度, 其值对电机运行性能有很大影响。

气隙的大小要综合上述两个方面, 并根据生产制造经验和所设计电机的特点加以确定。表 11-4 列出了 J2、JO2、JS、JR 系列异步电动机的气隙大小。

对于功率较小的电机, 也可用经验公式来求 δ ;

$$\delta = 0.3(0.4 + 7\sqrt{D_{i1}l_i}) \times 10^{-3} \quad (\text{米})$$

式中 D_{i1} ——定子内径 (米);

l_i ——铁心长度 (米)。

对于大、中型电机, $2p = 2 \sim 16$, 可用下列经验公式求出 δ ;

$$\delta \approx D_{i1} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) \times 10^{-3} \quad (\text{米})$$

式中 D_{i1} 单位为米。

表11-4 J2、JO2、JS、JR系列电机气隙6

单位：毫米

机座号 \ 极数	2	4	6	8	10
J2、JO2 系 列					
1	0.3	0.25			
2	0.4	0.25	0.25		
3	0.45	0.3	0.3		
4	0.5	0.35	0.35	0.35	
5	0.6	0.4	0.35	0.35	
6	0.8	0.45	0.4	0.4	
7	0.8	0.5	0.45	0.45	
8	1.2	0.65	0.5	0.5	0.45
9	1.6	0.85	0.5 0.6	0.5 0.6	0.5
JS、JR 系 列					
11		0.8	0.75	0.75	0.75
12		0.95	0.8	0.8	0.8
13		1.05	0.95	0.95	0.8

§ 11-3 定子绕组与铁心的设计

一、定子槽数的选择

在极数、相数既定的情况下，定子槽数的多少决定于每极每相槽数 q_1 。 q_1 值的大小对电机的参数、附加损耗、温升及绝缘材料消耗量等都有影响。当采用较大的 q_1 值时：

1. 由于定子谐波磁场减小，使附加损耗降低，谐波漏抗减小。
2. 一方面每槽导体数减少，使槽漏抗减小；另一方面槽数多了，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. 槽中线圈边的总散热面积增加，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。

因此选择槽数时应对各方面的因素进行综合考虑。对于一般异步电动机， q_1 可在 2~6 间选取，而且尽量选取整数，因分数槽绕组容易引起振动和噪声（见第九章）。对极数少、功率大的电机， q_1 可取得大些（功率较大的二极电机 q_1 可达 6~9）；对于极数多的电机，则 q_1 需取得小些。

二、定子绕组型式和节距的选择

三相异步电动机定子绕组的型式很多，常用的有单层同心式、单层链式、单层交叉式、双层叠绕组等。简单介绍如下：

（一）单层绕组的优点是：1. 槽内无层间绝缘，槽的利用率高；2. 同一槽内的导线都属于同一相，在槽内不会发生相间击穿；3. 线圈总数比双层的少一半，嵌线比较方便。其主要缺点是：1. 在一般情况下不易做成短距，因而其磁势波形较双层绕组的为差；2. 电机导线较粗时，绕组的嵌放和端部的整形都比较困难。因此，一般只用在功率较小的异步电动机

中(如 JO2 系列 5 号机座以下)。

单层同心式、链式和交叉式绕组的端接部分形状、线圈节距和线圈之间的连接顺序互不相同。这几种绕组各有不同的使用范围和优缺点: 1. 同心式绕组的线圈两边可以同时嵌入槽内, 嵌线容易, 便于实现机械化。一般适用于 $q_1 = 4、6、8$ 的两极电机中。其缺点是端部用铜较多, 一极相组中各线圈尺寸不同, 制作稍复杂。2. 单层链式绕组各线圈大小相同, 但嵌线较困难, 一般用于 $q_1 = 2$ 的四、六、八极电机中。3. 单层交叉式绕组可以节省端部接线, 主要用于 q_1 为奇数的电机中 (q_1 为偶数的电机绕组也能做成交叉式, 但比起同心式或链式来并没有优越性, 故很少采用)。图 11-3 是三种单层绕组的展开图。

(二) 双层叠绕组通常用于功率较大的异步电动机, 如 JO2 系列 6 号机座以上的电机。其主要优点是: 1. 可以选择有利的节距以改善磁势与电势波形, 使电机的电气性能较好; 2. 端部排列方便; 3. 线圈尺寸相同, 便于制造。缺点是多用了绝缘材料, 嵌线也较为麻烦。

(三) 近几年来, 我国某些工厂采用了单双层绕组和星形—三角形混合连接绕组, 分别介绍如下。

1. 单双层绕组

双层绕组采用短距时, 某些槽内上下层的导体属于同一相, 而某些槽内上下层导体则不属于同一相。如果把属于同一相的上下层导体合起来, 用单层绕组来代替, 而上下层导体不属于同一相的仍保持原来的双层绕组, 并按同心式绕组原理将其端部连接起来, 这种绕组就是单双层绕组。举例说明如下:

定子每极每相槽数 $q_1 = 3$, $p = 1$, $y = \frac{8}{9}Z_{p1}$, 即节距为 $1 \sim 9$ 的双层绕组, 式中 Z_{p1} 为每极槽数。

图 11-4(a) 是双层绕组的排列示意图。上层边按相带 $A、-C、B、-A、C、-B$ 进行排列, 下层边则由节距 $y = 8/9Z_{p1}$ 来确定。如槽 1、2、3 上层边为相带 A 的导体, 则构成此线圈的下层边应在槽 9、10、11 的下层。从图中可以看出, 槽 1、2、4、5、7、8、10、11、13、14、16、17 的上层和下层导体同属一相, 因此, 可以合在一起成单层。单

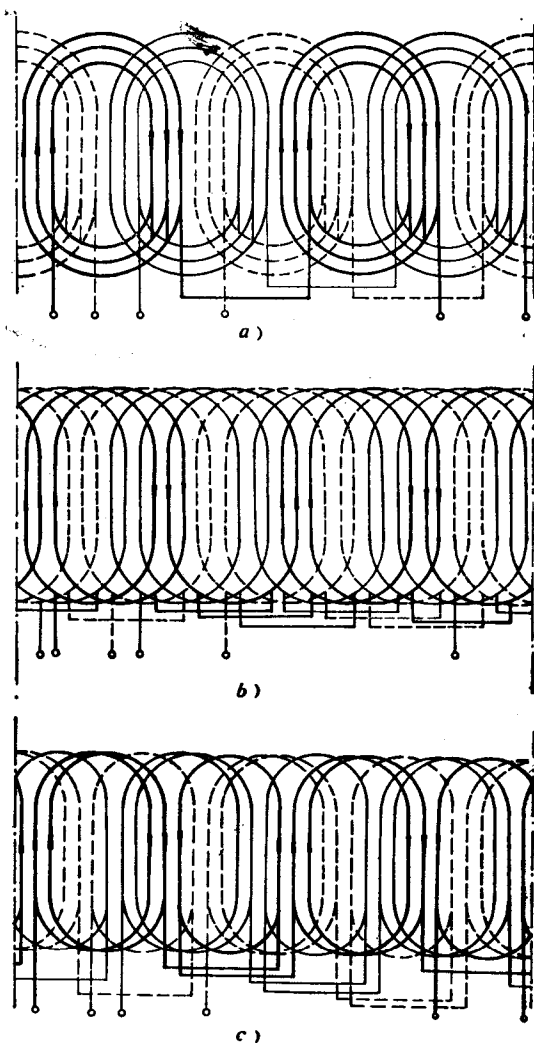


图 11-3 单层绕组展开图
a—同心式 b—链式 c—交叉式
 $Z_1 = 36, 2p = 4, m = 3$

层占有12个槽，相应有6个线圈；双层只占有6个槽，也有6个线圈。不论槽内是放单层还是双层绕组，每槽总导体数都应基本相等。图11-5是它的展开图。此例说明单双层绕组相当于一双层绕组。

单双层绕组与单层绕组相比，有双层绕组的特性，即具有较好的气隙磁场波形，较好的起动性能和较低的附加损耗等一系列优点。从结构上看，单双层绕组比之双层绕组在较短的实际节距下，可以得到较大的有效节距，从而使基波绕组系数提高。当电机的有效匝数相等时，可以减少实际匝数；当有效节距相同时，实际节距可以缩短，从而节省绕组用铜，铜损耗也相应减小，效率相应提高。其缺点是线圈的几何尺寸和节距不等，单层和双层线圈的匝数也不相同，制作稍复杂。

单双层绕组主要用于二、四极电机中。根据一些工厂的经验，在6号以上机座中可用以取代双层绕组；

对于5号以下机座，可用以取代单层绕组，其中二极电机用单双层绕组来提高绕组短距系数、削弱5次和7次谐波磁势效果最为显著。

2. 星形—三角形混合连接绕组

星形—三角形混合连接绕组是把普通的60°相带三相绕组分成两套三相绕组：这两套绕组之间在空间相位上彼此相差30°电角度，其中一套采用三角形接法，一套采用星形接法。两套绕组中的电流在时间相位上也相差30°。星形—三角形混合连接绕组的两套绕组之间有两种连接方式：其一为Y接法，又称星形—三角形串联绕组；其二为Δ接法，又称星形—三角形并联绕组。如图11-6所示。

根据与一般三相绕组建立气隙磁场相似的分析，在采用星形—三角形混合连接绕组时，若能满足：（1）绕组Y接部分的相带中心滞后于Δ接部分的相带中心30°电角度，（2）绕组Y接部分的相电流在时间相位上滞后于Δ接部分的相电流30°电角度，（3）绕组两部分产生的磁势幅值相等，便可以大大削弱甚至几乎完全消除5次和7次谐波磁势；从而改善气隙磁场波形，并使谐波引起的附加损耗下降。另外，采用星形—三角形混合连接绕组可使基波绕组系数提高（因为星形—三角形混合连接绕组的Y部分与Δ部分绕组是按30°相带排

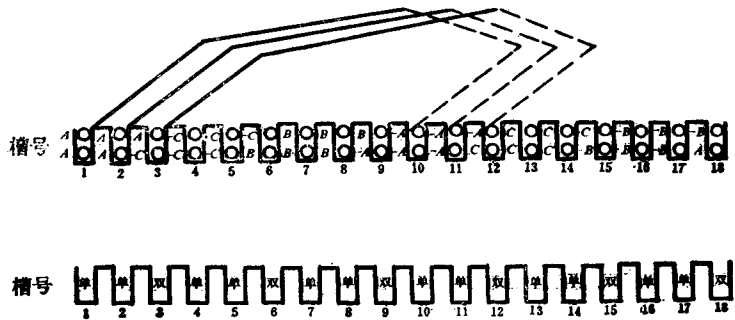


图11-4 单双层绕组原理图

$$q_1 = 3, 2p = 2, m = 3, y = \frac{8}{9} Z_{p1}$$

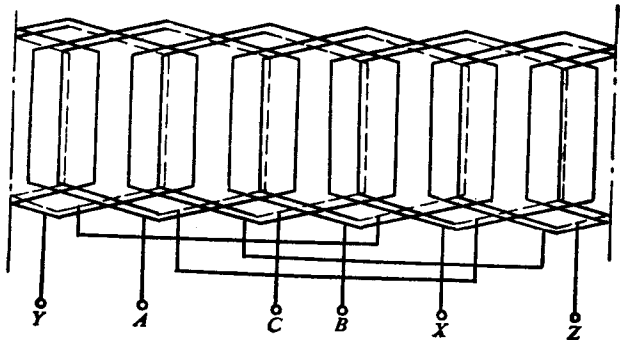


图11-5 单双层绕组展开图

$$q_1 = 3, 2p = 2, m = 3$$

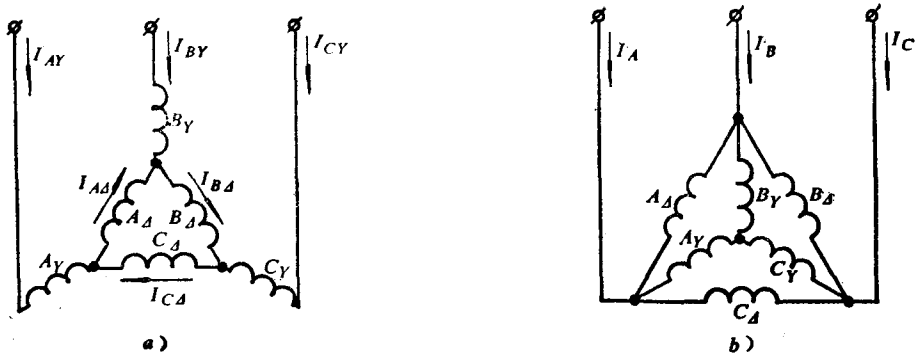


图11-6 星形—三角形混合连接绕组的接法
a—Y接法 b—Δ接法

列的，所以其分布系数提高了；又在确定线圈节距时，主要考虑削弱 11 次 13 次谐波，所以节距 $y = \frac{11}{12} \tau$ ，接近于整距，因此短距系数也提高了），也就是绕组的利用程度得到提高。基波绕组系数的提高意味着线圈的实际匝数可以按比例地减少，从而使铜耗下降，漏抗下降。另一方面，在匝数不变的情况下，当外施电压不变时，气隙磁密 B_g 可以降低，这将使铁耗下降，励磁电流下降。总之，采用星形—三角形混合连接绕组可以提高电机的出力，改善功率因数，而一系列谐波的消除将减少运行中的振动和噪声，并改善电机转矩转速曲线下凹的不良现象，使电机性能得到多方面的改善。其主要缺点是：（1）前述三条件不能完全满足时，绕组内部将产生环流，引起额外的损耗，这在 Δ 接法时尤为严重；（2）制造工艺上嵌线和接线都比较复杂。

星形—三角形混合连接绕组所涉及的问题比较多，这里只作了简单的介绍，读者可以参阅有关资料[11-1]。

（四）绕组节距的选择

对双层绕组应从电机具有良好的电气性能和节约导线材料两方面来考虑节距的选择。在正常三相异步电机中，通常选 $y = \frac{5}{6} \tau$ 以便削弱磁势的 5 次和 7 次谐波分量。对于两极电机，为了便于嵌线和缩短端部长度，除铁心长度很长的以外，一般取 $y = \frac{2}{3} \tau$ 左右。单层绕组则一般都用整距。选定每极每相槽数和节距后，可按下列公式或查表求出基波绕组系数 $K_{d, p, 1}$ 。

$$\text{分布系数} \quad K_{d, 1} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2} q_1}{q_1 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (11-9)$$

其中 $\alpha = \frac{2p\pi}{Z_1}$ 为用电角度表示的槽距角。

$$\text{短距系数} \quad K_{p, 1} = \sin \frac{\beta\pi}{2} \quad (11-10)$$

其中 $\beta = \frac{y}{Z_{p1}} = \frac{y}{m_1 q_1}$, y 为以槽数表示的绕组节距。

$$K_{d\beta 1} = K_{d1} K_{\beta 1} \quad (11-11)$$

单双层绕组和星形—三角形混合连接绕组节距的选择和绕组系数的计算方法可参阅有关资料[11-2][11-1]。

三、每相串联导体数，每槽导体数的计算

异步电动机的电负荷 A 及定子电流 I_1 的表达式分别为：

$$A = \frac{m_1 N_{\phi 1} I_1}{\pi D_{i1}} \quad (\text{安/米}) \quad (11-12)$$

$$I_1 = \frac{I_{KW}}{\eta \cos \varphi} \quad (\text{安}) \quad (11-13)$$

式中 $N_{\phi 1}$ ——定子绕组每相串联导体数；

I_{KW} ——异步电动机的每相功电流；

$\eta, \cos \varphi$ ——设计任务书给定的效率及功率因数；

A ——初步选定的电负荷。

合并整理上述两式得

$$N_{\phi 1} = \frac{\eta \cos \varphi \pi D_{i1} A}{m_1 I_{KW}} \quad (11-14)$$

在确定电机的定子内径 D_{i1} 后，从上式可以求出定子绕组的每相串联导体数 $N_{\phi 1}$ 。

从式 (11-14) 可以看出， $N_{\phi 1}$ 的大小必然影响电机电磁负荷 A 和 B_s 的数值。当电机的主要尺寸确定后， AB_s 的乘积就确定了，因此如果 $N_{\phi 1}$ 减小， A 值就降低而 B_s 值就增大，这一般地使功率因数降低，最大转矩、起动转矩和起动电流倍数都有所增加。因此设计时常通过改动 $N_{\phi 1}$ 来取得若干不同设计方案和进行选优。

如果定子绕组采用的并联支路数为 a_1 ，则每槽导体数 N_{s1} 为

$$N_{s1} = \frac{m_1 a_1 N_{\phi 1}}{Z_1} \quad (11-15)$$

对单层绕组， N_{s1} 应圆整为整数，而每线圈匝数 $W_s = N_{s1}$ 。

对双层绕组， N_{s1} 应取偶数，此时每个线圈匝数 $W_s = \frac{N_{s1}}{2}$ 。

最后可算出定子绕组每相串联匝数

$$W_1 = \frac{N_{\phi 1}}{2} \quad (11-16)$$

上面计算出的是初步数据，待磁路、参数、性能计算后，如必要还须进一步调整。

四、电流密度的选择及线规、并绕根数和并联支路数的确定

电流密度 J_1 的选择对电机的性能及成本影响极大，所以必须全面考虑电机的具体情况：效率、制造成本、使用寿命、运行费用、散热条件、绝缘等级、导线材料……等，然后选取适当的 J_1 值。选用较大的 J_1 值，则导体截面减小，一方面可节省材料、降低成本，但另一方面却导致了损耗增大、效率降低，同时电机的温升增高。

一般对大、中、小型铜线电机， J_1 可在 $4 \times 10^6 \sim 6.5 \times 10^6$ 安/米² ($4 \sim 6.5$ 安/毫米²) 范围内选用。表 11-5 列出了中小型三相异步电动机一般采用的定子电流密度。

表11-5 中小型异步电动机定子电流密度 J_1 单位: 安/毫米²

系 列	机 座 号	1~5	6~9	11 以上	备 注
J2		—	5.0~6.5	—	E级绝缘, 防滴式
JO2		4.5~6.5	4.0~6.0	—	E级绝缘, 封闭式
JS, JR		—	—	4.5~6.5	B级绝缘, 防护式

工厂中常用控制 A_1 和 J_1 的乘积(称为热负荷)来控制电机的温升,所以在选择 J_1 时要注意到前面所选用的 A 值。

对大型电机,常参考其极距 τ 的大小来选择 AJ_1 ,因为 τ 大意味着转子圆周速度较高,通风冷却效果较好,因而可选较大的热负荷 AJ_1 值。例如对B级绝缘的电机

当 $\tau = 0.2 \sim 0.4$ 米时,可选 $AJ_1 = 2000 \times 10^8 \sim 2400 \times 10^8$ 安²/米³(2000~2400安²/厘米·毫米²)。

当 $\tau = 0.4 \sim 0.6$ 米时,选 $AJ_1 = 2400 \times 10^8 \sim 3000 \times 10^8$ 安²/米³(2400~3000安²/厘米·毫米²)。

J_1 选定后,便可按下式估算导线截面积

$$s_{c1} = \frac{I_1}{a_1 N_{11} J_1} \quad (\text{米}^2) \quad (11-17)$$

式中 I_1 ——定子绕组额定相电流(安),按式(11-13)计算;

N_{11} ——导线并绕根数;

a_1 ——绕组并联支路数。

当 I_1 较大时,为了避免采用截面太大的导线,一般常把定子绕组接成 a_1 路并联,以使每支路的电流减为 $\frac{I_1}{a_1}$,或者采用 N_{11} 根截面相同的导线并绕(也可采用几根截面差别不大的导线并绕),使每根导线所通过的电流减为 $\frac{I_1}{N_{11}}$,或者既采用 a_1 路并联,又采用 N_{11} 根并绕。选择时主要根据工艺条件考虑。一般说来,小型电机的支路数 a_1 应少些,以免极间连线太多,而大、中型电机有时为了得到合适的每槽导体数 N_{11} ,常采用较多的支路数 a_1 。

双层整数槽绕组的并联支路数最多为 $2p$,而且 $\frac{2p}{a_1}$ 应为整数;单层绕组当 q_1 为偶数时,并联支路数最多为 $2p$,当 q_1 为奇数时,并联支路数最多为 p 。

考虑到嵌线的方便,采用圆形导线的小型异步电动机,其单根圆导线的线径最好不超过1.56~1.68毫米。但导线太细时绕制与嵌线也不方便。在通常的情况下,导线并绕根数可达8根,极数较少的电机可取更大的 N_{11} 值。

对功率较大的电机,则选用扁导线。这时应注意:

(1) b/a 在1.5~4.0范围内,式中尺寸 b 和 a 如图11-7所示,并要与电机的槽口、槽宽和槽高尺寸相配合;

(2) 每根导线的截面最好小于15毫米²,导线截面太大会引起较大的涡流损耗,并且在制造线圈时,较难于胀形及整形。

根据式(11-17)算出导线截面积,查标准线规表,选用截面相近的标准导线,得到圆形导线的直径或扁导线的高和宽。

五、定子冲片的设计

(一) 槽形

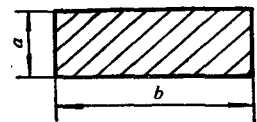


图11-7 扁导线

异步电动机的定子槽形最常用的有四种，如图 11-8 所示。

梨形槽和梯形槽是半闭口槽，槽的底部比顶部宽，使齿壁基本上平行。这两种槽形一般用于功率在 100 千瓦以下，电压为 500 伏以下的异步电动机中，因为这些电机通常采用由圆导线绕成的散嵌绕组。采用半闭口槽可以减少铁心表面损耗和齿内脉振损耗，并使有效气隙长度 δ_{ef} 减小，功率因数得到改善。梨形槽与梯形槽相比，它的槽面积利用率较高，冲模寿命较长，而且槽绝缘的弯曲程度较小，不易损伤，所以用得较为广泛。

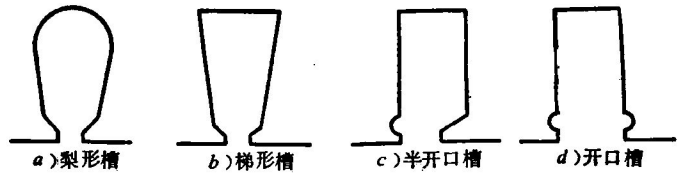


图11-8 异步电机定子常用槽形

低压中型异步电动机常采用半开口槽，这时绕组应为分开的成型绕组，见图 11-9；中型高压（3000 伏及以上）电机则应采用开口槽，这是因为线圈的主绝缘需要在线圈以前包扎及进行浸烘处理。这两种槽形的槽壁都是平行的，因此称平行槽。开口槽增大了气隙磁场中的磁导齿谐波分量，为了避免因此引起较大的空载附加损耗，可采用磁性槽楔，但此时槽漏抗将增大。

(二) 槽满率

定子槽必须有足够大的截面积，使每槽所有导体不太困难地嵌进去。在采用圆导线的半闭口槽中，用槽满率来表示槽内导线的填充程度。槽满率是导线有规则排列时所占的面积与槽的有效面积之比，即

$$S_f = \frac{N_{11} N_{s1} d^2}{S_e} \times 100\% \quad (11-18)$$

式中 d —— 绝缘导线的直径；
 S_e —— 槽有效面积。

$$S_e = S_s - S_i$$

式中 S_s —— 槽面积，以图 11-10 的梨形槽为例，

$$S_s = \frac{2r_{21} + b_{11}}{2} (h'_s - h) + \frac{\pi r_{21}^2}{2}$$

S_i —— 槽绝缘所占面积，

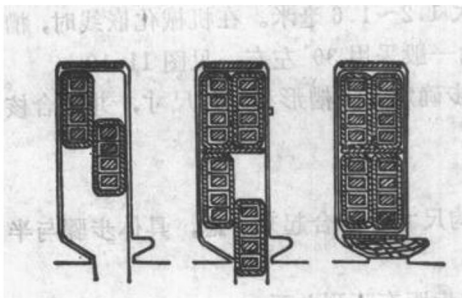


图11-9 半开口槽与成型绕组

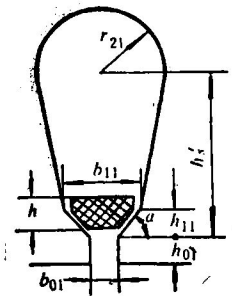


图11-10 梨形槽