

单相及三相微型 感应电动机计算

上海科学技术出版社

〔苏联〕E. M. 洛普欣娜 T. C. 索米欣娜

广州电器科学研究所上海试验站

PDG

原 序

小功率电机在工业、农业、自动装置和計算机构、各种机械传动以及日用器具等方面的用途正在不断增长，促使作者們編写本书。

本书可作为高等学校学生課程設計和毕业設計的参考教材，也可供設計微电机的工程师和技术員使用。本书搜集了莫斯科动力学院微电机課程設計和毕业設計的經驗、全苏机电科学研究院(ВНИИЭМ)的計算方法、微型电动机統一系列的經驗以及苏联和国外的文献資料。本书包括了作者們在莫斯科动力学院微电机實驗室 Ю. С. 切切特教授领导下从事多年科学研究所得到的成果。切切特教授的工作在很多方面促进了微电机的理論和計算方法的发展。

作者們衷心感謝电机教研室主任 Г. Н. 彼德罗夫教授极寶貴的指示和建議。

作者們也感謝 Н. А. 穆士克多夫工程师帮助選擇資料和提出的許多寶貴意見，同时对帮助整理手稿的技术員 Т. П. 伊林娜表示謝意。

作者之間的分工如下：緒論、第 1、2、8、9 章和附录是共同写成的；第 4~7 章、第 12 章、第 13.2 和 13.5 节是 Е. М. 洛普欣娜写的；第 3、10、11 章、第 2.4、13.1 和 13.4 节是 Г. С. 索米欣娜写的。

本书總結和整理了一般用途微型电动机的計算資料，对于建立三相和单相电动机的統一計算方法作了初步嘗試，因此，书中可能有不少缺点，請讀者們指正。

作 者

目 录

原序

緒論	1
0.1 微型电动机的分类和类型的选择	2
0.2 設計任务书和計算程序图	9
第1章 主要尺寸的決定	11
1.1 “电机常数”和利用系数	11
1.2 电磁負載	16
1.3 定子外徑、內徑、計算长度和气隙	19
第2章 定子繞組、槽和軛	24
2.1 定子和轉子槽数的选择	24
2.2 繞組型式的选择	27
2.3 定子繞組的計算	36
2.4 “正弦”繞組的計算	43
2.5 定子的槽和軛	49
第3章 轉子槽、軛和鼠籠	53
3.1 轉子繞組参数的选择	53
3.2 轉子槽形的选择和計算	57
3.3 斜槽系数的計算	59
第4章 定子和轉子繞組的阻抗	60
4.1 定子的阻抗	60

4.2 轉子的阻抗	72
第5章 磁路計算	76
第6章 損耗計算	81
6.1 鉄耗	81
6.2 鉄耗对定子电流数值影响的計算	84
6.3 机械損耗	85
6.4 电損耗	86
6.5 附加損耗	87
第7章 主相的等值电路	88
第8章 輔相的計算	91
8.1 概述	91
8.2 輔繞組的阻抗	92
8.3 电容电动机的变比和移相元件的計算	94
8.4 单相电动机变比的选择和起动元件的計算	99
8.5 具有起动元件的单相电动机起动电流的圓图	107
第9章 工作特性和轉矩曲綫 $M=f(s)$ 的計算	112
9.1 在橢圓形、圓形和脉振磁場时电动机的特性, 能量图	112
9.2 空載轉差率的計算和額定轉差率的确定	120
第10章 三相感应电动机的单相接綫电路	122
10.1 概述	122
10.2 由三相电机派生的两相电机的等值电路参数	123
10.3 电容电动机	126
10.4 电容起动单相电动机	128
10.5 分相起动单相电动机	129
第11章 微型感应电动机結構的某些特点	130
第12章 封閉式微型感应电动机的热計算	141
12.1 热計算的方法	141

12.2 連續工作制的三相微型感应电动机的热計算	144
第13章 計算例题	151
13.1 分相起动单相电动机的計算	151
13.2 电容起动单相电动机的計算	182
13.3 电容运转电动机的計算	188
13.4 “正弦”繞組的計算	203
13.5 封閉扇冷式微型感应电动机的热計算	210
参考文献	217
附录	221
1. 911 和 912 牌号电机級硅鋼片的 $H=f(B)$ 关系	221
2. 电磁圓鋼綫的标准直径 d 、截面 S 和每公里的重量 G	222
3. 电磁綫的絕緣厚度(毫米)	223
4. 統一系列电动机定子散下綫繞組的絕緣(A 級絕緣标准)电压 500 伏以下	224
5. 計算轉子鉄耗用的数据	225
6. (6.1~6.7) 統一系列零号、一号、二号和三号机座微型感应电 动机的技术数据和繞組数据	226
(6.8~6.9) 統一系列零号、一号、二号和三号机座微型感应电 动机的主要尺寸	256
7. (7.1~7.2) 統一系列零号、一号和二号机座微型感应电动机 的安装尺寸	264
8. (8.1~8.2) 工作电容器和起动电容器	266
9. AB 和 ABE 系列三相和单相的小功率感应电动机	268
10. 具有鼠籠轉子的分相起动单相微型感应电动机	270
11. 具有鼠籠轉子的单相微型电容电动机	276
12. 主要符号	282

緒 論

微型电机在电机制造业中是一个較新的部門，苏联大概是在 20 年前出現的，現已得到蓬勃的发展。

微型电机的功率从分数瓦到 600 瓦^①，可分为两大类：(1)一般用途的微型电机；(2)自动装置、航空、船舶以及其他控制机构用途的特殊微型电机。

一般用途微型电机主要用于輕工业(紡織、制革等)、食品工业、医疗企业、农业、公共飲食业和日常生活等方面，也用在各种自动装置中作为輔助的驱动电机。

微型三相和单相鼠籠轉子感应电动机在交流电机中是最普遍的，可用来驱动小型机床、离心机、压缩机、泵、風扇、記帳机、录音机、电唱机、剪羊毛机、挤奶机、冷冻机、洗衣机、榨汁机和干燥器等。

由于单相感应电动机由单相公用电网供电，因此使用特別广泛。

微型感应电动机与其他类型电机，特别是与整流子电机相比較，具有下列优点：

- (1) 結構简单，成本低廉；
- (2) 不产生无綫电干扰；
- (3) 噪音較小；
- (4) 使用簡便可靠。

普通鼠籠轉子电动机的缺点是調节特性較差。具有空心非磁性和空心磁性轉子、实心轉子和高电阻鼠籠轉子的特殊感应电动机，則具有很大的調速范围。单相和三相多速电动机則采用分段

^① 原文为 500 瓦。

調速。

本書介紹一般普通鼠籠轉子的微型感應電動機的設計和計算方法。

目前在蘇聯生產着各種一般用途的微型感應電動機(表0·1),且已有統一系列。統一系列包括三相(АОЛ)和單相(АОЛБ),功率自18~600瓦,二極和四極的微型電機。在系列改型以及各種派生系列的設計方面,亦作了大量的工作,如低速電動機、低噪音電動機、中頻(高速)電動機、裝入式電動機等等。尤其是全蘇電機科學研究院(ВНИИ ЭМ)已完成了裝入式電動機的两个系列的設計方案:三相電動機AB系列,功率自30~600瓦;單相電容電動機ABE系列,功率自10~400瓦。

0·1 微型電動機的分類和類型的選擇

根據供電網路的相數和起動元件的特徵,微型感應電動機可以分為下列幾種:

1. 三相電動機($m=3$);

2. 在輔相內接起動元件的單相電動機($m=1$):

(1) 分相電動機,輔繞組中接有起動電阻(內在的或外接的);
提高輔繞組電阻的電動機也可稱為高起動電阻的電動機;

(2) 電容起動電動機,輔繞組中接有起動電容;

3. 電容電動機($m=2$):

(1) 電容起動和運轉電動機;

(2) 電容運轉電動機。

按供電方式,電容電動機屬於單相電機。由於兩個定子繞組均參與電動機的工作,因此在所有計算公式中取相數 $m=2$ 。

4. 罩極電動機或大小氣隙電動機,後者在部分磁極下具有增大的空氣隙,而不用短路環。

三相電動機、接起動元件的單相電動機和電容電動機都可以製成單速的和多速的。

此外,感应电动机根据轉子的形式可分为:

- (1) 鼠籠轉子电动机;
- (2) 繞繞轉子电动机;
- (3) 整体轉子电动机: a. 由鉄磁材料制成实心轉子; b. 由非磁性或鉄磁材料制成的空心轉子。

一般用途微电机的分类、接綫图以及特性曲綫列于表 0.1 内。

除了装入式电动机和多速电动机以外,上述电动机的容量等级均已經标准化。根据苏联国家标准 ГОСТ 6435-52 的規定,电动机应按下列額定功率制造: 5、10、18、30、50、80、120、180、270、400 和 600 瓦。

电动机的类型可根据其工作、起动和調节特性来选择,这些特性都列于表 0.1 内。

根据起动条件,单相电动机可以分为三种:

(一)輕载起动 起动轉矩 $M_K \leq 0.5 M_N$ (單极式、电容運轉电动机);

(二)正常起动 $M_K = 1 \sim 1.2 M_N$ (分相起动、电容起动和運轉、电容運轉和單极电动机);

(三)重载起动 $M_K = 1.5 \sim 3.5 M_N$ (电容起动电动机)。

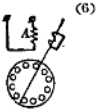
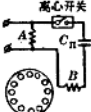
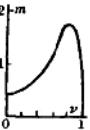
上述按起动轉矩倍数的分类可用以正确地选择单相电动机的类型。必須指出,單极电动机采用大小气隙和双單极后,可使起动轉矩增加。对于电容運轉电动机,应适当地选择电容,以保証得到所規定的起动轉矩,但其工作特性将稍差。

分相起动电动机的起动轉矩倍数有时达到 $m_K = 2$, 而电容起动电动机的起动轉矩特別大,可达到 $m_K = 3.5$ 。在很多場合下,为了保証电动机的均匀運轉和减小振动,在电容運轉电动机的輔相内接入电阻(参看第 8.2 节);这时起动轉矩倍数可提高到 $m_K = 1 \sim 1.2$ 。

三相电动机和电容电动机具有最优良的运行指标,后者的功

① 自此以后,“起动轉矩”的意思是指 $s=1$ 时的初始起动轉矩。——原注

表 0.1 一般用途微型感应

电动机类型 电动机特性	三相电动机	单相	
		罩极式	电容启动 ^①
电动机的接线图			
机械特性曲线(5) $m = f(\nu)$, $m = \frac{M}{M_K}$, $\nu = \frac{n}{n_c}$ (实心转子电动机除外, 它们的 $m = \frac{M}{M_K}$);			
转子结构	鼠籠	鼠籠	鼠籠
起动装置	不需要	不需要	离心开关
功率范围(瓦)	10~600	0.5~120	18~600
电压(伏)	127/220、 220/380(7)	127、220	127、220、380
同步转速 n_c (轉/分)	1500、3000	1500、3000	1500、3000
速度调节	不能调节	不能调节	不能调节
适用范围	机床传动	电风扇、榨油机、 烘箱、留声机、电 唱机、商业用器 具、洗衣机等	是目前最普遍的一种单相电动机, 用于洗衣机、 冰箱、电影放映机、医疗器械等

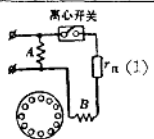
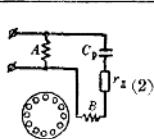
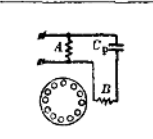
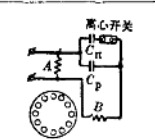
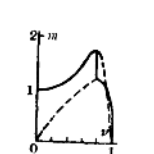
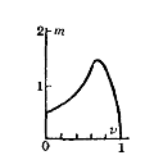
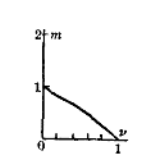
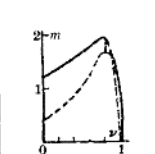
[注] (1) r_n —輔助組的外接起動電阻。(2) r_A —在某些場合, 例如在錄音機電動機中應用的附加電阻。

(3) 起動時的功率。

(4) 也可製成多速電動機(通常是雙速的)。

① 原文誤為分相起動。——譯注

电动机的分类及其特性

电动机			
分相启动①	电 容 式		
	电 容 运 转	电容启动和运转	
			
			
鼠籠	鼠籠	实心铁磁性	鼠籠
离心开关	不需要	不需要	离心开关
18~600	5~600	50~100(3)	5~600
127, 220, 380	127, 220, 380	110, 127, 220	127, 220, 380
1500, 3000	750, 1000, 1500, 3000	在 1500 左右变动	1500, 3000
不能调节	不能调节(4)	能调节	不能调节
活塞泵、压缩机、泵、冷冻机	录音机(主导电动机)、家用电器泵、空载启动的小机床、电风扇	录音机(重绕式电动机)、牙科钻孔机	家用电器、泵、小机床

(5) 曲线 $m=f(v)$ 是对基波磁场作出的。

(6) 目前罩极电动机和大小气隙(无短路环)的电动机均有生产,在这些电动机中,启动转矩提高很大($m_K=1$),使用在洗衣机中。

(7) 在个别情况下,电动机可制成一种电压。

① 原文誤为电容启动。——譯注

表 0.2 统一系列微型电动机的运用指标

电动机 类型	功率 P_H (瓦)	转 速 (同 步)						转/分			备 注	
		3000	1500	3000	1500	3000	1500	3000	1500	3000		1500
η		$\cos \varphi$		起动转矩倍数 m_{sc}		起动电流倍数 i_{sc}		最大转矩倍数 m_m				
AOJ 型 三相电动机	30~600 18~400	0.54~0.75 —	— 0.22~0.70	0.85 —	— 0.50~0.76	1.3~2 —	— 1.3~1.8	4~5 —	— 3~4	1.5~2.2 —	— 1.5~2	ГОСТ 8212-56
AJ 型三 相电动机	18~400 10~270	0.54~0.79 —	— 0.24~0.73	0.87 —	— 0.52~0.74	1.3~2 —	— 1.3~1.6	4~6.5 —	— 3~5	1.5~2.2 —	— 1.5~2	ГОСТ 8212-56
AOJA 型 电容起动 和运转电 动机	50~600 30~400	0.41~0.78 —	— 0.32~0.67	0.98 —	— 0.82~0.88	1~1.2 —	— 1~1.2	4~5.5 —	— 2.5~4.5	1.6~2.2 —	— 1.6~2.2	
AOJT 型 电容起动 电动机	30~600 18~400	0.41~0.69 —	— 0.22~0.67	0.72 —	— 0.62	2 —	— 2~2.5	4~6 —	— 3~4.5	1.9~2.2 —	— 1.5~1.9	
AOJB 型 分相起动 电动机	30~600 18~400	0.41~0.69 —	— 0.22~0.67	0.72 —	— 0.62	1 —	— 1~1.2	7.5~9 —	— 6.5~8.0	1.4~2.2 —	— 1.4~1.9	苏联电机 工业部产 品目录 №1641

[注] 由于已有小尺寸的电容器生产, AOJA 型和 AOJT 型电动机将在最近期间内生产。

率因数 $\cos \varphi$ 甚至比前者为高。

利用統一系列的综合数据(表 0.2), 可以比較各种类型感应电动机的性能, 表 0.2 中列入了封閉扇冷式三相电动机(AO.I)的数据。三相电动机也制成封閉自冷式(A.I)。此时同一功率的电动机采用大一号的机座, 电能指标(η 和 $\cos \varphi$)将有一些改善。

从表 0.2 可以看出, 分相起动电动机(AO.IB)的起动电流倍数很高, $i_{\text{к}}=6.5\sim 9$, 远远大于所有其他类型的电动机。从起动轉矩倍数出发, 分相起动电动机(AO.IB)和电容电动机(AO.IA)适用于正常起动; 而电容起动电动机(AO.II)则适用于重载起动。关于統一系列电动机的更詳細的技术数据列于附录 6 內。

所有帶起动元件的单相电动机都必须有专用的起动装置。在起动时期內, 起动装置使輔相(起动相)和起动元件(电阻 $r_{\text{н}}$ 或电容 $C_{\text{н}}$)接通; 在达到一定的轉速后(同步轉速的 $0.75\sim 0.8$) 将起动相切断, 电动机仅以一个工作相(主相)工作。在此轉速下, 由一个工作相所产生的轉矩一般比接入两相时大。在电容起动和运转电动机中, 起动装置在起动期內(从 $s=1$ 到 $s=0.25\sim 0.2$)使起电容 $C_{\text{н}}$ 接通。起动装置可采用: 离心开关、按扭、过电流继电器等等。其中最普遍的是采用离心开关。

为了降低成本、简化生产和运用方便, 有时将微电机制成結構和繞組数据不变的同一电机, 即三相和单相(具有各种起动元件)通用的电动机; 称为通用微型感应电动机。对于这类电动机, 应保証所有派生电动机的起动特性和工作特性不逊于專門設計的单相电动机。

苏联莫斯科动力学院(МЭИ)电机教研組所进行的試驗研究証明[12], 从技术观点和电能指标来看, 把三相微型感应电动机用作三相和单相通用的电动机是非常合理的。

当三相微型感应电动机作为单相电动机使用时, 通常将两相繞組串联作为工作相(主相); 而第三相則作为輔相, 起动元件接在輔相內, 如图 0.1 所示。

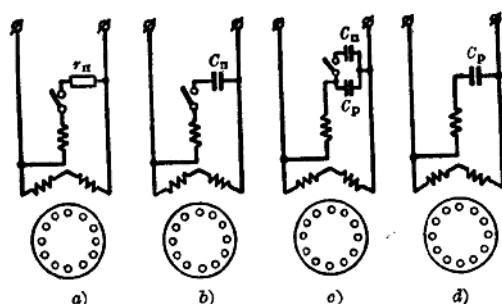


图 0.1 三相电动机的单相接线图

a—分相起动；b—电容起动；c—电容起动和运转；d—电容运转

此外，亦可采用图 0.2 所示的接线。其中 b~d 的接线仅能用于电容起动、电容起动和运转以及电容运转电动机。

图 0.2a 和 b 的接线用于三相绕组为星形联结的场合，而图 0.2c 则用于三相绕组为三角形联结的场合。

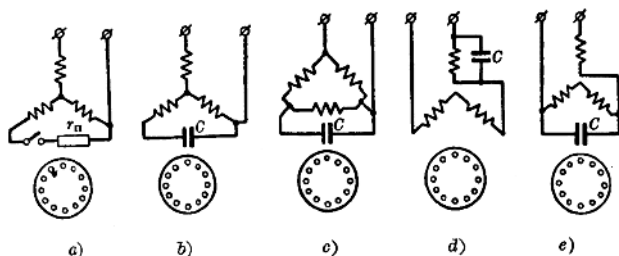


图 0.2 三相电动机的单相接线图

如果三相电机外面有六个出线头，则大多采用图 0.1 的接线。

图 0.1a 的接线与类似的 0.2a 相比较，若起动电阻相同，则起动转矩要大得多。图 0.1b 和 c 的接线与图 0.2c~e 的接线相比较，则也有同样的优点。图 0.1b 的接线与类似的图 0.2b 的接线相比较，则前者能得到最大的起动转矩，并能保证大的过载能力。

然而, 在不需要得到高的起動轉矩倍数时, 建議采用图 0.2b 的接綫, 这样能保証起動时各相内有較均匀的电流分布, 而其工作特性却与图 0.1b 接綫的一样, 并且电容器上的电压也較低。如电机采用单层整矩繞組, 則这种接綫同样能获得沒有陡降的轉矩曲綫 $M=f(s)$ 。当电机的 $\cos \varphi$ 为一定时, 图 0.2b 的接綫能产生与图 0.1b 的接綫相同的起動轉矩[18]。

在电机单相連接的情况下, 如供电电压为三相电动机額定电压的两倍, 則采用图 0.2d 和 e 的接綫。

图 0.1 接綫图的缺点是电机必須采用双层短矩繞組, 以避免由三次諧波所引起的轉矩曲綫的陡降。

0.2 設計任务书和計算程序图

在設計电动机时应給出:

(一) 額定数据

額定有效功率 P_n , 瓦;

轉速(同步) n_c , 轉/分;

相数, m ;

电源頻率 f , 赫;

額定电压 U_n , 伏;

(二) 工作制度 連續的、重复短时的、短时的;

(三) 工作条件 周圍空气温度的变化范围、湿度;

(四) 特殊条件 其中可以包括轉矩随轉速变化的特性、調节特性、起動特性(起動轉矩倍数 m_k 、起動电流倍数 i_k), 过载能力(即最大轉矩倍数 m_m)和低噪音等。

此外, 还应說明軸的工作位置——臥式的或立式的。臥式的电机占多数。立式的电机用于离心机、洗衣机、磁性录音机等設備中。

电动机的类型和結構型式按照設計任务书和用途来選擇(可参考緒論和第 11 章)。而主要尺寸則按額定数据来决定(第 1 章)。在選擇电磁負載、計算轉子和輔相以及解决与結構有关的一系列

問題時,都需考慮到特殊條件。

微型感應電動機的計算建議按照圖 0.3 的程序進行。對於三相電動機應除去其中輔相的計算。為使三相電動機和所有類型的單相電動機的計算方法統一,在決定單相電動機的主要尺寸時引進了利用係數 β_s (與三相電動機的比) (參看第 1.1 節)。

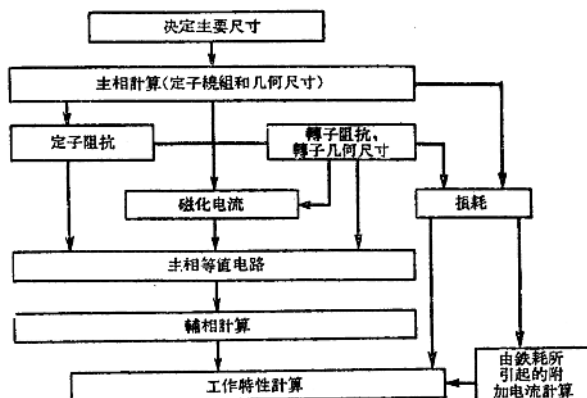


圖 0.3 微型感應電動機的計算程序圖

圖 0.3 所列計算程序有下列特點：

- (1) 工作特性按等值電路計算；
- (2) 按照能夠保證符合特殊條件的參數（尤其是給定的最大轉矩倍數）合理地設計轉子；
- (3) 利用附加電流來計算鐵耗。

此外,對於單相電動機尚包括：

- (1) 主相的計算:對於電容電動機,其主相按照對稱的兩相電動機的條件設計,對於具有起動元件的電動機,則按單相工作方式(僅接通工作相)的條件來設計；
- (2) 輔相的設計；
- (3) 計算橢圓形和脈振磁場的工作特性。

在以下各章中,將詳細討論各道計算程序和計算特點。

主要尺寸的决定

1.1 “电机常数”和利用系数

对微型感应电机所提出的各种要求，往往是互相矛盾的。由于对已生产的电机还没有总结出系统的计算资料和经验数据，因而使选择主要尺寸的工作变得复杂。主要尺寸是定子内径 D (外径 D_a) 和计算长度 l 。

微型感应电动机与一般感应电机不同，它们的类型较多(三相的、单相的、电容的)，并有各种结构型式(封闭式、防护式、开启式)，这也使上述问题的解决变得复杂。

在一般感应电动机的设计方面，根据已有电动机的设计和制造资料，得到了确定主要尺寸、电磁负载与功率的关系曲线： $D=f(P_s)$ ， $\tau=f(P_n)$ ， $B_d, A=f(\tau)$ ；并导出了一系列的经验公式[1、3 和 5]。利用这些曲线和公式，能比较简单地求得电机的主要尺寸。多年使用证明，已有电动机的技术经济指标是高的。

对于微型电动机，目前还没有象一般电机那样多的经验和系统的研究。

本章收集了已生产的微型感应电机的资料，作为选择主要尺寸的根据。

电机各主要尺寸之间的关系通常用“电机常数”或其倒数(利用系数)来表达。这两个数值是有充分条件的。目前已有各种“电机常数”；适用于微型感应电动机的则有阿尔诺利特“电机常数”

$$C_A = \frac{D^2 l}{P_s} n_c = \frac{8.6 \times 10^8}{B_d A} \beta_1 \beta_2 = \frac{8.6 \times 10^8}{B_d A} \beta_s \left(\frac{\text{厘米}^3 \cdot \text{转}}{\text{伏安} \cdot \text{分}} \right) \quad (1.1)$$

式中 D ——定子内径, 厘米; l ——定子铁心迭片长度, 厘米;
 n_s ——同步转速, 转/分; P_s ——计算功率(电动机取自电网的视在功率), 伏安; B_s ——气隙磁感应, 高斯; A ——定子的线负载, 安/厘米; $\beta_s = \beta_1 \beta_2$; β_1 ——系数, 等于三相电机与所设计的同尺寸电机的有效功率之比; β_2 ——系数, 等于单相电机(电容的或具有起动元件的)与三相电动机的效率和功率因数的乘积之比

$$\beta_2 = \frac{\eta_I \cos \varphi_I}{\eta_{III} \cos \varphi_{III}}$$

由于在公式(1.1)内引入了系数 β_2 , 因而使其能通用于决定单相和三相微型电动机的主要尺寸。

对于三相电机

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_s = 1$$

根据统一系列电动机和国外制造的电动机的数据, 电容电动机的系数 β_1 在 1.25 到 1.7 之间, 可取平均值为 1.5。对于具有起动元件的单相电动机, β_1 在 2.2 到 2.78 之间, 平均值为 2.5。因此, 当外形尺寸相同时, 电容电动机的有效功率平均约为三相电动机的 67%, 而单相电动机则为 40%。

单相和电容电动机的系数 $\beta_2 = \frac{\eta_I \cos \varphi_I}{\eta_{III} \cos \varphi_{III}}$ 可按照图 1.1~

1.3 的曲线得到。

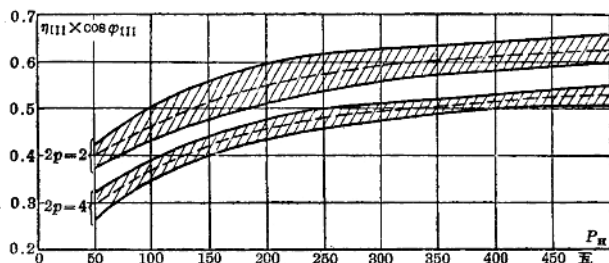


图 1.1 三相微型感应电动机的电能效率曲线 $\eta_{III} \cos \varphi_{III} = f(P_n)$