

凸極同步電機的 計 算

卡西亞諾夫著

機械工業出版社

凸極同步電機的 計 算

卡西亞諾夫著

曹顯鈞、陳介合譯



機械工業出版社

1050

出版者的話

本書系根据以克路罗夫 (А. Н. Крылов) 命名的海軍武器和造船学院出版的卡西亞諾夫 (В. Т. Касьянов) 所著的“凸極同步电机的計算” (Расчет явнополюсных синхронных машин) 一書 1951 年版譯出。

本書敘述了凸極同步电机的計算理論，并附有三个具体的計算实例。在附录中关于同步电机励磁机在强行激磁时的激磁速度和峰值的計算与各种实验方法作了詳尽的介紹。

本書可供电机專業学校作为教材之用，也可作为工厂技术人員設計凸極电机的參考資料。

本書正文部分曾承王家燁、潘京嵩二同志协助翻譯，書中圖表由华生电机厂繪圖組复制。

苏联 В. Т. Касьянов 著 [Расчет явнополюсных синхронных машин] (Ленинград 1951 年第一版)

*

*

*

NO. 2735

1959 年 4 月第一版 1959 年 4 月第一版第一次印刷

32.7×1092¹/₃₂ 字数 102 千字 印張 4¹⁴/₁₆ 0,001—5,100 册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

中央民族印刷厂印刷

新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第 008 号 定价(11) 0.76 元

目 次

原序	5
凸極同步电机計算的論証和范例	7
任务	7
§1 定子电流和極數	8
§2 定子的內徑和長度	9
§3 定子繞組型式和槽數的選擇	18
§4 定子的扇片疊集和分拆	29
§5 定子繞組節距, 繞組系數和每相匝數	38
§6 定子繞組的經綫、导体和槽尺寸	41
§7 空載時和額定負載時的每極有效磁通	53
§8 定子的疊片段數和長度最終值的確定	54
§9 定子的軀高、鉄芯外徑和机壳外徑	60
§10 定子齿和軀的鉄重	63
§11 定子繞組的有效电阻和銅重	64
§12 气隙	66
§13 定子繞組的电抗	68
§14 磁極和阻尼籠的尺寸	72
§15 轉子輪緣尺寸	81
§16 磁路各部分的尺寸、磁感应和磁化安匝數	83
§17 磁化曲綫的計算	89
§18 磁势(M. П. C.)圖	93
§19 激磁繞組	97
§20 額定負載時的損耗和效率	113
§21 有效材料重量的概要	117
§22 电机發熱的計算	119

§23 冷却空气量	120
§24 一些机械计算[文献1]	121
附录1 凸极同步电机的暂态电抗和时间常数	127
附录2 作者在同步电机设计草案中所采用的一些近似公式的说明	132
附录3 同步电机的励磁机激磁速度和[峰值]的选择、测定与计算	134
参考文献	155

原 序

电机計算本身就是一个多少含有以近似的并与实际上等值的数据来作計算的課題。它的主要依据是一些推荐的比值，参数和尺寸。这些数据是从理論研究結果和已經制成并且运行良好的电机中研究获得的。当然在計算中可能与推荐的数据有不少出入，因为这些数据仅仅指出在选用比例和数值时应遵循的極限，可是他們是有助于寻求最好的方案，并能縮短所需計算的时间。

应当指出，甚至有經驗的职业設計师亦要通过逐步校正若干初步草案的方法来探求最好的結果，以确定最后工作設計。

在課程設計的情况下，限于時間不可能演算好几个方案来寻求其中最优良的設計，因此只得局限于編制一个足以令人滿意的方案。要得到这样的方案并避免增加过多的劳动量，有效材料應該采用适度的負担。必須指出使用高度資料的电机只能作为畢業設計或專門工作的目标。

本書对同步电机的計算公式仅作簡短解釋，其詳尽論証讀者可从括号內注脚查得或在指出的其他参考文献中查得。

本書主要算式和代号作者引自文献[9]，另一些算式的依据詳載附录[2]。

作者对协助誊写原稿的 Г. С. 馬夫路夫基，敬表謝忱，М. И. 阿利亞亦夫，Л. Н. 葛路查夫，А. С. 叶兰姆也夫，Н. П.

叶莫利奴，A. П. 沙哈路夫，等同志在付样前校閱原稿，并提宝贵意見，一并致謝。

卡西亞諾夫

凸極同步电机計算的論証和范例

任务 1: 發電机 (或电动机)

綫端功率 (視在功率)	$P_N = 80$ 仟伏安
有功功率	$P_a = 64$ 仟瓦
电压	$\bar{U}_N = 400/230$ 伏
相間接法	星形/三角
功率因数	$\cos \varphi_N = 0.8$
轉速	$n_N = 1000$ 轉/分
短路比	$OK3 \geq 1.0$
逸速倍数	$k_y = 1.20$
自然通風	

任务 2: 發電机 (或电动机)

綫端功率 (視在功率)	$P_N = 90,000$ 仟伏安
有功功率	$P_a = 81,000$ 仟瓦
电压	$U_N = 13,800$ 伏
功率因数	$\cos \varphi_N = 0.9$
相間接法	星形
轉速	$n_N = 88.2$ 轉/分
短路比	$OK3 \geq 1.5$
逸速倍数	$k_y = 2.6$
飞輪力矩	$GD^2 = 33,000$ 噸·公尺 ²
閉合循环通風	

任务 3: 發電机 (帶有阻尼籠)

綫端功率 (視在功率)	$P_N = 550$ 仟伏安
有功功率	$P_a = 440$ 仟瓦
功率因數	$\cos \varphi_N = 0.8$
电压	$U_N = 400/230$ 伏
相間接法	星形/三角
轉速	$n_N = 1000$ 轉/分
短路比	$OK3 \geq 1.0$
逸速倍數	$\kappa_v = 1.20$
自然通風	

§ 1 定子电流和極數

發電机的綫电流:

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_N} \text{ (安)}. \quad (1)$$

电动机的視在輸入功率:

$$P_N = \frac{P_a \text{ (仟瓦)}}{\cos \varphi_N \times \eta} \text{ (仟伏安)}, \quad (2)$$

式中 η —— 电机的效率, 其数值与功率有关:

$$\eta = (0.87) \sim 0.92 \sim 0.97.$$

电动机的綫电流:

$$I_N = \frac{P_N \times 10^3}{\sqrt{3} U_N} \text{ (安)}. \quad (3)$$

極數 (頻率 $f = 50$ 赫芝时):

$$2p = \frac{120 \times f}{n_N} = \frac{6000}{n_N}. \quad (4)$$

例 1

$$I_N = \frac{80 \times 10^3}{400 / \sqrt{3}} = 115 \text{ 安}.$$

$$2p = \frac{120 \times 50}{1000} = 6.$$

例 2

$$I_N = \frac{90,000 \times 10^3}{13800 \times \sqrt{3}} = 3770 \text{ 安。}$$

$$2p = \frac{120 \times 50}{88.2} = 68。$$

例 3

$$I_N = \frac{550 \times 10^3}{400 \sqrt{3}} = 793 \text{ 安。}$$

$$2p = \frac{120 \times 50}{1000} = 6。$$

§ 2 定子的内徑和长度

定子内徑 D_i 与总长的初值 l_t (包括通风沟) 可借电机常数 C 加以确定:

$$C = \frac{6 \times 10^{11}}{k_B \times f_w \times \alpha AS \times B_{\delta N}} = \frac{D_i^2 \times l_t \times n_N}{P_o}, \quad (5)$$

式中

D_i 和 l_t ——以公分为单位;

n_N ——转速, 轉/分;

P_o ——內在的 (电磁的) 視在功率, 仟伏安;

k_B ——磁場波形系数;

f_w ——繞組系数;

α ——極抱系数;

AS ——綫負荷;

$B_{\delta N}$ ——額定負載时气隙中最大磁通密度。

附注: 为了比較电机的利用特性起見, 一般采用如下形式的电机

常数

$$C = \frac{D_i^2 \times l_t \times n_N}{F_N}, \quad (5a)$$

式中 P_N ——电机线端的视在功率，仟伏安。

有些作者[文献1, 2, 8]在计算(5a)的电机常数时,假定 $U \approx E$, 但是因此引入了6~18%的误差(例如,在同步补偿机的情况下)。由于在计算中采用了空载额定电压时的 B_s 值的这一假定,结果使额定负载时的实际 B_s 值将增大6~18%。为此,宜于使用(5)的 C 值以确定额定负载时的实际 B_{sN} 值。

对于发电机以及在相当于功率因数为0.8的正常过激情况下运行的电动机可折衷采用: $P_s \approx 1.08 \times P_N$ 。此外,设 $k_B = 1.11$; $f_w \approx 0.93$; $\alpha = 0.7$ 。此时,由(5)可得:

$$C = \frac{9 \times 10^{11}}{AS \times B_{sN}} = \frac{D_1^2 \times l_t \times n_N}{P_N} \quad (5b)$$

C 值处于 50×10^4 (对小型电机) ~ 17×10^4 (对大型电机) 的范围内。

从表1, 查得 AS 和 B_{sN} 的约值代入(5b), 求出所设计的电机的 C 值, 由此可以确定定子的内径和其长度的初值。定子长度的最终值要在计算绕组后 (§8) 再行确定。

同步电机的主要参数有极距 τ 、磁场周速 v (用定子内径来计算的转子速度) 和定子长度 l_t 与极距 τ 的比值 $\xi = \frac{l_t}{\tau}$ 。

在一般情况下50周率电机的极距与周速等于:

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi D_1 n_N}{120 \times f} = \frac{\pi D_1 n_N}{6000} \text{ 公分} \quad (6)$$

$$v = \frac{\pi D_1 n_N}{6000} = \frac{\tau f}{50} \text{ 公尺/秒} \quad (6a)$$

从(6)和(6a)可以看出当 $f = 50$ 赫时, 周速 v (公尺/秒) 和极距 τ (公分) 在数值上是相等的。

凸极电机额定转速的上限值:

表1 各种不同容量电机的线负载 AS , 槽电流 J_n
和间隙磁通密度 $B_{\delta N}$ (额定负载时) 的约值^①

P_N	50	100	200	300	450	600	800	1000
AS	300	330	350	365	380	390	410	420
$J_n \leq$	800			1000		1300		1800
$B_{\delta N}$	从6000~6500到7600							
P_N	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000	10000
AS	420	440	460	480	490	510	520	530
$J_n \leq$	1800			2000		2500		3000
$B_{\delta N}$	从7600到8200							
P_N	10000	15000	20000	30000	40000	60000	80000	100000及以上
AS	530	540	550	570	585	600	600	600
$J_n \leq$	3000			3300		3800		4500
$B_{\delta N}$	从8200到8500							

① 对于担任长距离输电工作的发电机, 为了要得到低值电抗, 表1所列的 AS 和 J_n 数数值应降低 20~25%, 但是此时电机尺寸和重量也相应加大。

$$v < (75 \sim 90) \text{公尺/秒。} \quad (6b)$$

一般 ξ 值的幅度变化较大, 即:

$$\xi = \frac{l_t}{\tau} = (0.4 \sim 6)。 \quad (6c)$$

但是最适宜的 (经济上最合理的) ξ_{opt} 在下列的范围内 [文献 2, 8]:

$$\xi_{opt} = \frac{l_{opt}}{\tau} = (1.3 \sim 1.6)。 \quad (6d)$$

确定了 (例如最理想的) 比值 ξ 并将 (6) 和 (6c) 代入 (5b), 消去定子长度 l_t 后, 就得出定子内径 D_i :

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{1900 \times C \times P_N}{\xi \times n_N^2}} \text{公分。} \quad (7)$$

按(7)或根据其他方法(見后述)确定 D_i 后, 再从(5b) 求出定子长度:

$$l_i = \frac{C \times P_N}{D_i^2 \times n_N} \text{ 公分。} \quad (7a)$$

对不同类型的电机, 应研究选用 D_i 和 l_i 的特点。

A 正常凸極50周率电机, 逸速 $n_y = n_N + 20\%$

属于这一类的有小型、中型、大型的發电机、电动机、同步补偿机、柴油引擎發电机和低速电动机等等。

要确定基本尺寸 D_i 和 l_i 应先从(5b)和表1 求出电机常数 C , 再根据(6d)确定理想的比值 ξ 。将 C 和 ξ 代入(7) 求得定子内徑, 把它化成整数使等于适当尺寸或标准的(系列的)尺寸, 然后引用(7a)算出定子长度。最后根据(6) 計算 τ 和 ν , 并按(6c)和(6d)来核算 ξ 值。

若此时 $\tau > 75$ 公分, 也就是 $\nu > 75$ 公尺/秒 (在同步补偿机的計算中有这种情形), 則必須选用合适的 ν 值(在60~75 公尺/秒范围内), 从(6) 或(6a)另外找出一个較小的内徑 D_i , 再从(7a) 求出 l_i , 最后用(6c)来核算比值 ξ 。若 $\tau < 13$ 公分, 則必須选用合适的 $\tau_{\min}$ 值(假定: 对无阻尼籠的發电机, $\tau_{\min} = 13 \sim 15$ 公分, 对有阻尼籠的發电机或电动机, $\tau_{\min} = 15 \sim 17$ 公分), 从(6)和(6a) 另外找出一个較大的内徑 D_i , 再从(7a)算出 l_i 最后用(6c)来核算比值 ξ 。

B 水輪發电机

計算水輪發电机时, 任务書中所規定的逸速 n_y 和轉子的

● 对于 $P_N \leq 100 \sim 200$ 仟伏安的电机, 为了改善自然通風而又可能安放激磁繞組, 比值 ξ 应在0.6~0.8 范围内选取。

● 較高頻率凸極發电机的極距可采用8~9 公分。

轉動慣量 GD^2 對於定子內徑的選擇有着決定性的影響。

編制在技術任務書中的逸速 n_y 寫成額定轉速 n_N 的 k_y 倍：

$$k_y = \frac{n_y}{n_N} = (1.7 \sim 3)。 \quad (8)$$

此值取決於水輪機的类型。

技術條件中所規定的水輪發電機的轉動慣量一般與按下
列公式所確定的數值相近^②：

$$\left. \begin{aligned} n_N \leq 300 \text{ 轉/分時} &\rightarrow GD^2 \approx (3800 - 6n_N) \frac{P_N \times \cos \varphi_N}{n_N^2} \text{ 噸-公尺}^2 \\ n_N > 300 \text{ 轉/分時} &\rightarrow GD^2 \approx 1850 \frac{P_N \times \cos \varphi_N}{n_N^2} \text{ 噸-公尺}^2 \end{aligned} \right\}。 \quad (8a)$$

為經濟使用轉子輪緣的金屬來達到所規定的轉動慣量計，必須尽可能用最大的定子內徑，而此內徑應受最高飛逸周速 $v_{y\max}$ 的限制。50周率電機的定子內徑 D_i 和 v_y 的關係可以從(6)和(6a)推導出來：

$$D_i = \frac{v_y \times 6000}{\pi \times n_N \times k_y}。 \quad (8b)$$

取凸極電機的轉子的飛逸用速限值（以定子內徑計算）

$v_{y\max} = 115$ 公尺/秒，從(8b)得出定子的最大容許內徑：

$$D_{i\max} = \frac{v_{y\max} \times 6000}{\pi \times n_N \times k_y} = \frac{22 \times 10^4}{n_N \times k_y} \text{ 公分。} \quad (8c)$$

對應於這一內徑的極距：

$$\tau_{\max} = \frac{v_{y\max} \times 50}{fk_y} = \frac{115}{k_y} \text{ 公分。} \quad (8d)$$

附注：若採取平均值： $AS=560$ ， $B_{sN}=8000$ ， D_i 和 l_i 以公尺為單位，則從(5b)可求得水輪發電機額定容量的算式：

$$P_N \approx 5D_i^2 l_i n_N \text{ 仟伏安。} \quad (A)$$

將(8c)代入(A)，消去直徑 D_i ，可得水輪發電機極限容量的算式：

② 擔任長距離輸電工作的大型水輪發電機的轉動慣量可以是(8a)數值的1.5~1.8倍。

$$P_{N\max} \approx 5 \left(\frac{60}{\pi} \right)^2 \frac{v_{y\max}^3 \times l_t}{n \times k_y^2} \text{ 仟伏安。} \quad (B)$$

如轉子系用優質鋼片集疊而成，可允許 $v_{y\max} = 135$ 公尺/秒 [文献 15]；同时，取 $l_{t\max} = 4$ 公尺，从 (B) 得：

$$P_{N\max} \approx \frac{1.33 \times 10^8}{n \times k_y^2} \text{ 仟伏安。} \quad (C)$$

如轉子是以整塊薄鋼板制成 ($D_{i\max}$ 可能做到 4.8 公尺)，可允許 $v_{y\max} = 160$ 公尺/秒 [文献 15]；同时取 $l_{t\max} = 4$ 公尺，从 (B) 得：

$$P_{N\max} \approx \frac{1.86 \times 10^8}{n \times k_y^2} \text{ 仟伏安。} \quad (D)$$

疊片轉子的轉動慣量和重量 (計入輪輻和軸套，但不計入軸和水輪機) 在結構設計之前，可按照精確度為 $\pm 10\%$ 的近似公式 [見附录 2] 來確定：

$$\left. \begin{aligned} GD^2 &\approx 19(D_i - h_m^1)^3 h_m^1 \times l_t + 27(D_i - 2h_m^1 - b_0)^3 b_0 l_0 \text{ 吨公尺}^2 \\ G &\approx 19(D_i - h_m^1) h_m^1 l_t + 27(D_i - 2h_m^1 - b_0) b_0 l_0 \text{ 吨} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

叶列米也夫 (A. C. Еремеев) 介紹了以下的公式作為初步計算。

$$GD^2 \approx 3l_t [D_i^4 - (D_i - 2h_m^1 - 2b_0)^4] \text{ 吨-公尺}^2。 \quad (9A)$$

在 (9) 和 (9A) 中：

D_i 和 l_t ——定子的內徑和長度，公尺；

h_m^1 ——磁極總高 (包括極掌在內)，公尺；

b_0 和 l_0 ——轉子輪緣的徑向寬度和軸向長度 (包括通風溝在內)，公尺。

對正規結構的疊片轉子，初步計算可折衷取用：

$$h_m^1 = 0.3 \text{ 公尺}$$

$$b_0 = 0.6 \text{ 公尺在 } v_y = 115 \text{ 公尺/秒時}$$

$$b_0 = 0.52 \text{ 公尺在 } v_y = 100 \text{ 公尺/秒時}$$

$$b_0 = 0.45 \text{ 公尺在 } v_y = 80 \text{ 公尺/秒時}$$

} (9a)

由上列数据可以編

半和長度的

程序如下:

根据技术任务書的数据并考虑公式(8a)以后,由(8c)确定定子內徑的最大容許值 D_{imax} (化成适当的整数尺寸);再从表1及(7a)求出定子長度 l_1 ,然后根据(9)算出轉子的轉動慣量和重量,假設 $l_0=l_1$, $b_0=0.6$ 公尺。

若求得的轉動慣量小于規定数值(在逸速倍数 k ,較大时会遇到这种情形),那么要放長轉子輪緣至下列数值以增大轉動慣量:

$$l_0 = l_1 + 0.2 \sim 0.6 \text{ 公尺。}$$

若 $l_0=l_1$ 时的轉動慣量大於規定数值,則可按(8b)和(7a)算出逸速为100和80公尺/秒时的定子尺寸 D_1 和 l_1 。再根据(9)計算相应的轉動慣量和重量,此时假設 $l_0=l_1$,并由(9a)中取 b_0 ;然后将求出的答案列成方案表。

用內插法可以很方便的从表中挑选一个能获得所需的轉動慣量的最小定子內徑。在大多数情况下,为了减少轉子重量(与直徑的立方成比例)起見,可以将最小定子內徑再减小10~15%;同时,为使轉動慣量达到規定数值,必須增加輪緣長度到 $l_0=l_1+(0.2\sim0.5)$ 公尺(有时亦可加厚輪緣的寬度 b_0)来相应地加重轉子。

这样确定了定子內徑和長度以后,用(6a), (6b)和(6c)来核算周速、極距和比值 ξ 。至于所需的轉動慣量数值應該在水輪发电机的結構設計时重新加以校正和計算。

例1 从表1选取最大气隙磁通密度 $B_{\delta N}$ 和綫負載 AS 的初值。

取: $B_{\delta N}=6500$, $AS=320$,

則

$$C = \frac{9 \times 10^{11}}{6500 \times 320} = 43.2 \times 10^4。$$

依照A节注解，取：

$$\xi = \frac{l_t}{\tau} = 0.7，$$

則：

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{1900 \times C \times P_N}{\xi \times n_N^2}} = \sqrt[3]{\frac{1900 \times 43.2 \times 10^4 \times 80}{0.7 \times 1000^2}} \\ = 45.4 \text{ 公分} \approx 45 \text{ 公分}。$$

$$l_t = \frac{C \times P_N}{D_i^2 \times n_N} = \frac{43.2 \times 10^4 \times 80}{45^2 \times 1000} = 17.1 \text{ 公分} \approx 17 \text{ 公分}。$$

于是取： $D_i = 45$ 公分； $l_t = 17$ 公分。

同时，根据(6)和(6a)得：

$$\tau = \frac{\pi \times 45}{6} = 23.6 \text{ 公分}。$$

$$v = 23.6 \text{ 公尺/秒}。$$

$$\xi = \frac{l_t}{\tau} = \frac{17}{23.6} = 0.72。$$

例2 設 $v_{y\max} = 115$ 公尺/秒；从(8c)，得：

$$D_{i\max} = \frac{22 \times 10^4}{88.2 \times 2.6} = 958 \approx 960 \text{ 公分}。$$

从表1取： $AS \approx 600$ ， $B_{0N} = 8200$ ，

代入(5b)和(7a)得：

$$C = \frac{9 \times 10^{11}}{600 \times 8200} = 18.3 \times 10^4。$$

$$l_t = \frac{18.3 \times 10^4 \times 90000}{960^2 \times 88.2} = 203 \approx 200 \text{ 公分}。$$

从(8a)和(9)得：

$$1) \quad GD^2 = (3800 - 6 \times 88.2) \times \frac{90000 \times 0.9}{88.2^2} = 34000 \text{ 吨-公尺}^2 \text{ (规定值-33000)}。$$

$$2) \quad GD^2 = 19(9.6 - 0.3)^3 \times 0.3 \times 2 + 27(9.6 - 0.6 -$$