

## 一、程序简介

1. 本程序适用于电动工具、家用电器等以输入功率或输入电流作为额定指标的串激电机设计,也可以作为机车牵引申激电机的设计参考。
2. 本程序适用于初学者手工设计的初步计算,设计时需要一定经验数据做参考,请结合最后所列参考资料同时使用。
3. 本程序追求的计算精度为 10%, 需要提高计算精度, 则应采用计算机软件计算。
4. 对本程序有任何疑问,请在 <http://www.MotorCAD.net> 论坛公开交流。突破个人经验的局限,播撒文明传承的火种,完成从“钻木取火”到“气体打火机”的跨越,需要我们共同努力。

## 二、电磁设计程序

### (一) 额定参数和工作条件

(核算时只要前面 1.2.4 项即可)

1 额定电压

$$U_H = \quad (\text{V})$$

2 额定频率

$$f_H = \quad (\text{Hz})$$

(直流串激电机可按频率为 0Hz 计算)

3 额定输入功率

$$P_1 = \quad (\text{W})$$

4 额定电流

$$I_H = \frac{P_1}{U_H \cos\phi} \quad (\text{A})$$

(其中 Cos 直流为 1, 交流取 0.9)

5 额定转速

$$n_H = \quad (\text{r/min})$$

(应按要求的转速提高 10%来设计)

6 额定输出功率

$$P_H = \quad (\text{W})$$

7 额定输出转矩

$$M_H = \frac{9.56 P_H}{n_H} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

(输出功率和转矩为最重要工作条件,有条件时应应对负载特性进行实际测试,作出曲线,负载特性曲线和电机特性曲线的交点,即为工作点。)

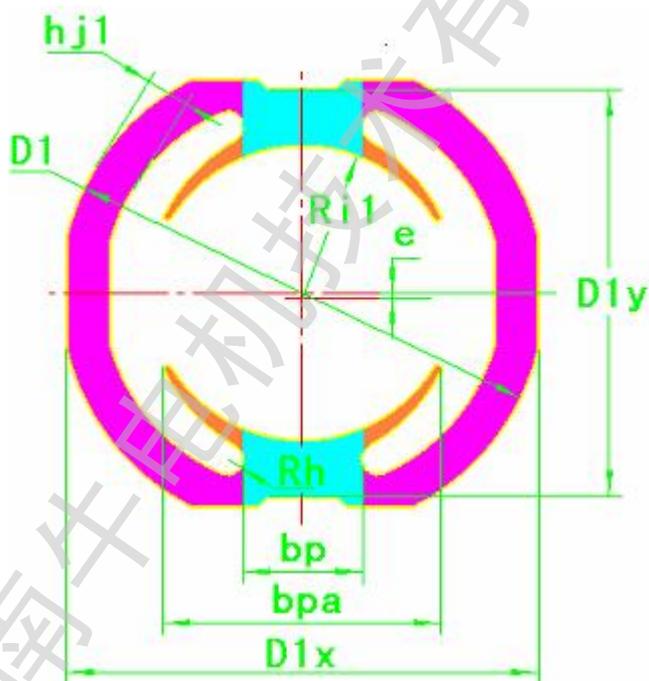
8 绝缘等级,工作制,使用环境等

(此相关项目与发热温升有关,非常重要,但对核算性能无影响。)

## (二) 定子冲片尺寸及计算

(设计新电机应尽可能的选择现有冲片，便于自动化生产；一般冲片一致工装模具可以通用。)

- 1 定子外径  
 $D_1 =$  (cm)
- 2 定子外形 X 方向  
 $D_{1x} =$  (cm)
- 3 定子外形 Y 方向  
 $D_{1y} =$  (cm)
- 4 定子轭高  
 $h_{j1} =$  (cm)
- 5 定子内圆半径  
 $R_{i1} =$  (cm)
- 6 定子内圆半径偏心距  
 $e =$  (cm)
- 7 定子极弧宽度  
 $b_{pa} =$  (cm)
- 8 定子极身宽度  
 $b_p =$  (cm)
- 9 线槽半径  
 $R_h =$  (cm)



计算:

$$10 \text{ 定子轭磁路长度 } l_{c1} = \frac{p(D_1 - h_{c1}) - b_p}{2} \quad (\text{cm})$$

(为轭部中心之长度，此公式应按照实际适当修正。)

$$11 \text{ 定子极身高度 } h_p = \frac{(D_{1y} - 2R_{i1} + 2e)}{2} \quad (\text{cm})$$

$$12 \text{ 定子线槽有效面积 } S_{e1} = \quad (\text{mm}^2)$$

13 极弧系数

$$a = q/p \quad (q \text{ 为极弧宽度 } b_{pa} \text{ 在定子内圆所占角度})$$

## (三) 转子冲片尺寸及计算

- 1 转子外径  
 $D_2 =$  (cm)
- 2 转子内径  
 $D_{i2} =$  (cm)

3 转子槽数  
 $Q_2 =$  (cm)

4 转子槽口高度  
 $h_{r0} =$  (cm)

5 转子槽楔厚度  
 $h_{r1} =$  (cm)

6 转子槽深  
 $h_{r2} =$  (cm)

7 转子槽口宽度  
 $b_{02} =$  (cm)

8 转子槽上部宽  
 $b_{r1} =$  (cm)

9 转子槽底半径  
 $r_2 =$  (cm)

计算:

10 转子齿宽  
 $t =$  (cm)

(对非平行齿,  $t$  取靠近最狭处的 1/3 处的轭高)

11 转子齿磁路长度  
 $h_{t2} = h_{r1} + h_{r2} + r_2 / 3$  (cm)

12 转子轭高  
 $h_{c2} = \frac{D_2 - (2h_{t2} + yD_{i2})}{2} + \frac{1}{3}r_2$  (cm)

$y = 1$  (转轴复有绝缘层)

$y = 5/6$  (转轴不复绝缘层)

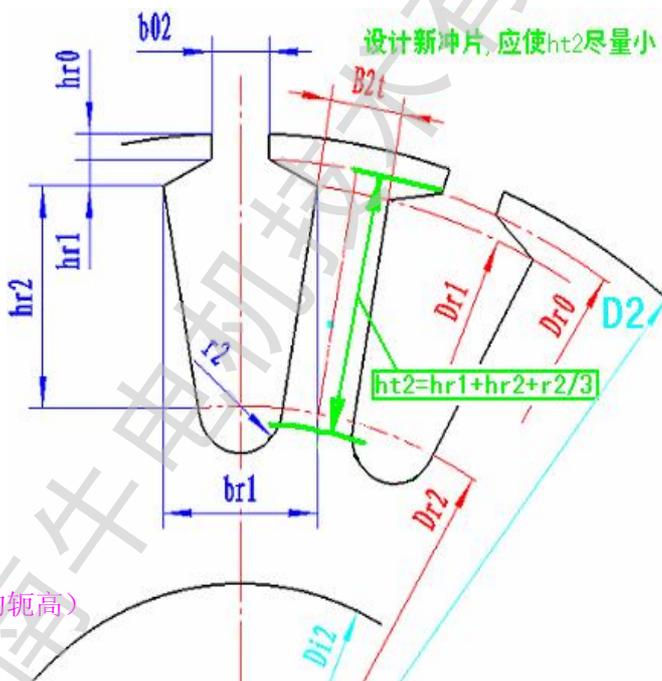
13 转子轭磁路长度  
 $l_{c2} = \frac{p(yD_{i2} + h_{c2})}{2}$  (cm)

14 转子槽有效面积  $S_{e2} =$  (mm<sup>2</sup>)  
 (应除去槽绝缘和槽楔所占面积)

15 转子齿距  
 $t_m = \frac{pD_2}{Q_2}$

16 转子外齿宽  
 $t_1 = t_m - b_{02}$  (cm)

17 转子槽宽



$$t_s = \frac{p(D_2 - 2h_{r0} - h_{r1})}{Q_2} - t \quad \text{平行齿} \quad (\text{cm})$$

$$t_s = p \left( D_2 - 2h_{r0} - \frac{4}{3}h_{t2} \right) - t \quad \text{非平行齿} \quad (\text{cm})$$

18 转子槽形系数

$$K_s = \frac{t_s}{0.96t}$$

19 气隙长度

$$d = \quad (\text{cm})$$

(气隙长度大可以适当减少气隙不平衡引起的振动)

20 气隙系数

$$K_d = \frac{t_m + 10d}{t_1 + 10d}$$

21 极距

$$t = \frac{pD_2}{2} \quad (\text{cm})$$

22 计算极距

$$t_0 = at \quad (\text{cm})$$

## (四) 其它结构尺寸及计算

1 换向器外径

$$D_c = \quad (\text{cm})$$

2 换向器片数

$$K =$$

3 电刷长度

$$a_b = \quad (\text{cm})$$

电刷宽度

$$b_b = \quad (\text{cm})$$

4 电刷压降

$$\Delta u = \quad (\text{V})$$

5 电刷偏离几何中心线的角度

$$b = \quad (\text{弧度})$$

当采用接线借偏方式时,  $b = \frac{2ps_b}{K}$  (弧度)  $s_b$  为接线借偏片数

6 转子绕组端部长度系数

$$K_e = \quad (\text{cm})$$

推荐为  $K_e = 0.95$  (当  $D_2$  小于 4cm)

$K_e = 1$  (当  $D_2$  大于 4cm)

(应根据实际工艺情况取值)

7 铁芯长度

$$L = \quad (\text{cm})$$

计算:

8 换向器片距

$$t_c = \frac{pD_c}{K} \quad (\text{cm})$$

9 换向区域宽度

$$b_c = b_b' + \left( U_z + \frac{K}{2} - y_1 - 1 \right) t_c' \quad (\text{cm})$$

$$\text{式中: } U_z = \frac{K}{z} \quad b_b' = b_b \frac{D_2}{D_c} \quad t_c' = t_c \frac{D_2}{D_c}$$

应满足  $b_c < 1.2(t - t_0)$ , 否则重新设计相关项目

10 实槽节距

$$y_s = \frac{z}{2} - e$$

11 短距系数

$$K_p = \sin\left(\frac{y_s}{Q_2} \cdot 180^\circ\right)$$

12 虚槽节距

$$y_1 = \frac{K}{2} - \frac{K}{z} \cdot e$$

13 前节距

$$y_2 = y_1 - 1$$

14 转子单位漏磁导

$$l = \frac{1.2h_2}{b_1 + 2R} + K_e \frac{D_2}{L} + 0.92 \log \frac{pt_m}{b_{02}}$$

15 定子轭部质量

$$W_{c1} = 15.5(D_1 - h_{j1})h_{j1}L \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

16 定子极身质量

$$W_p = 14.8h_p b_p L \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

17 转子轭部质量

$$W_{e2} = 5.8(D_2 - h_{r2})^2 l_{c1} L \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

18 转子齿部质量

$$W_t = 7.4Q_2 t h_{t2} L \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

19 硅钢片质量

$$W_{Fe} = 7.41bDL \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$$

**(五) 转子参数及计算**

(核算时直接输入数据, 设计时选择电流密度确定线径, 根据槽满率确定匝数)

1 转子绕组线规

$$\frac{d_2'}{d_2} \quad (\text{mm/mm})$$

 $d_2'$  绝缘导线外径 $d_2$  铜线直径

2 转子导线截面

$$S_2 = \quad (\text{mm}^2)$$

3 每元件匝数  $W_2$ 

4 转子总导体数

$$N = W_2 \times 2K$$

5 转子每槽导体数

$$N_s = \frac{N}{Q_2}$$

8 转子槽满率

$$f_s = \frac{N_s d_2'^2 \cdot 10^{-2}}{S_{e2}}$$

(  $f_s$  应不大于 0.76, 如用自动绕线机绕制则不宜大于 0.65 )

9 转子绕组平均半匝长

$$l_2 = L + K_e D_2 \quad (\text{cm})$$

10 转子绕组电阻

$$R_2 = \frac{N^2 5.35 N l_2}{S_2} \cdot 10^{-5} \quad (\Omega)$$

11 最大工作电流估算

$$I_{max} = \frac{U - \Delta u}{8R_2} \quad (\text{A})$$

一般应满足  $I_H < I_{max}$ ，否则重新设计相关项目

12 转子绕组用铜量

$$W_{Cu2} = 9.35 N_s l_2 \cdot 10^{-5} \quad (\text{kg})$$

## (六) 磁路及换向计算

(核算时先算第七部分----定子参数，设计时先算磁路)

1 计算电流

$$I_H = \frac{P_1}{U_H \text{Cos}' } \quad (\text{A}) \quad (\text{其中 Cos 直流为 1, 交流取 0.9})$$

2 转子绕组电密

$$\Delta_2 = \frac{I_H}{2S_2} \quad (\text{A/mm}^2)$$

3 转子线负荷

$$A = \frac{I_H N}{2pD_2} \quad (\text{A/cm})$$

4 转子热负荷

$$AJ_2 = \Delta_2 A$$

一般应满足  $AJ_2 < \text{经验数值}$ ，和工作条件有关，以实际经验为准

5 电刷电密

$$\Delta_b = \frac{I}{a_b b_b} \quad (\text{A/cm}^2)$$

6 旋转电势

$$E_H = U_H \text{Cos}' - (R_1 + R_2) I_H - \Delta u \quad (\text{V})$$

——设计时定子电阻 R1 可先假定和 R2 相等，然后返回进行修正计算——

7 假定气隙磁密

----核算时从此开始返工迭代计算磁路，设计时取 0.4-0.6T----

8 每极磁通幅值

$$f_d = t_0 L B_g \quad (\text{Wb})$$

9 转速

$$\text{交流: } n_H = \frac{60\sqrt{2}E_H \times 10^4}{K_p f_d N} \quad (\text{r/min})$$

$$\text{直流: } n_H = \frac{60E_H \times 10^4}{K_p f_d N} \quad (\text{r/min})$$

(设计时如果转速不符合要求，可调整转子匝数、铁芯长度、气隙磁密重算有关项目)

10 转子旋转频率

$$f_2 = \frac{n_H}{60}$$

11 换向器线速度

$$v_c = \frac{pD_c n_H}{60} \cdot 10^{-2} \quad (\text{m/s})$$

12 转子线速度

$$v_a = \frac{pD_2 n_H}{60} \cdot 10^{-2} \quad (\text{cm})$$

13 换向元件中电抗电势

$$e_x = 2W_2 L I A v_a \cdot 10^{-6} \quad (\text{V})$$

14 换向元件中变压器电势

$$e_t = 4.44 f_H W_2 f_d \quad (\text{V})$$

15 换向元件中电枢反应电势

$$e_a = \frac{0.8pW_2 A t L v_a}{t - t_0} \cdot 10^{-6} \quad (\text{V})$$

16 定子轭部磁密

$$B_{c1} = \frac{1.07 f_d}{1.92 h_{c1} L} \cdot 10^4 \quad (\text{T})$$

17 电枢轭部磁密

$$B_{c2} = \frac{f_d}{1.92 h_{c2} L} \cdot 10^4 \quad (\text{T})$$

18 定子极身磁密

$$B_p = \frac{1.08 f_d}{0.96 b_p L} \cdot 10^4 \quad (\text{T})$$

19 气隙磁密

$$B_d = \frac{f_d}{t_0 L} \cdot 10^4 \quad (\text{T})$$

20 电枢齿部磁密

$$B_t = \frac{B_d t_m}{0.96 t} \cdot 10^4 \quad (\text{T})$$

21 定子轭磁场强度

$$at_{c1} = \quad (\text{A/cm})$$

(按  $B_{c1}$  查相应材料的 50Hz 磁化曲线)

22 定子极磁场强度

$$at_p = \quad (\text{A/cm})$$

(按  $B_p$  查相应材料的 50Hz 磁化曲线)

23 转子轭磁场强度

$$at_{c2} = \quad (\text{A/cm})$$

(按  $B_{c2}$  查相应材料的 50Hz 磁化曲线, 如果  $f_2 > 100$  则乘以  $f_2/100$  进行修正)

23 转子齿磁场强度

$$at_c = \quad \quad \quad (A/cm)$$

(按  $B_i$  查相应材料的 50Hz 磁化曲线, 如果  $f_2 > 100$  则乘以  $f_2/100$  进行修正。当  $B_i > 1.8T$  时按转子片计算部分的第 18 项槽形系数  $K_s$  进行修正)

(磁路计算误差是最大的误差来源, 按上面的办法, 在计算精度要求不高时可以适用)

24 气隙激磁磁势

$$AT_d = 1.6B_d K_d d \cdot 10^4 \quad (A)$$

25 定子轭激磁磁势

$$AT_{c1} = at_{c1} l_{c1} \quad (A)$$

26 定子极激磁磁势

$$AT_p = 2at_p h_p \quad (A)$$

27 转子轭激磁磁势

$$AT_{c2} = at_{c2} l_{c2} \quad (A)$$

28 转子齿激磁磁势

$$AT_c = at_c l_t \quad (A)$$

29 借偏去磁磁势

$$AT_b = K_b D_2 bA \quad (A)$$

$$K_b = 0.33 \text{ (虚三槽电机)}$$

$$K_b = 0.625 \text{ (虚两槽电机)}$$

30 换向增磁磁势

$$AT_c = 0.069 \left( \frac{b_b}{t_c} \right)^2 (e_x + e_a) W_2 I \quad (A)$$

31 电枢反应磁势

$$AT_a = (AT_g + AT_{c2} + t_0 A / 2) \frac{(0.10688 - 0.000286 AT_{c2}) t_0 A}{AT_g} \quad (A)$$

32 总激磁安匝

$$\text{交流: } AT = \frac{AT_d + AT_{c1} + AT_{c2} + AT_t + AT_p}{\sqrt{2}} + AT_b + AT_a - AT_c$$

$$\text{直流: } AT = AT_d + AT_{c1} + AT_{c2} + AT_t + AT_p + AT_b + AT_a - AT_c$$

## (七) 定子参数及计算

1 定子每极匝数

$$W_1 = \frac{AT}{2I_H} \quad (\text{取整数})$$

----设计时以此计算定子, 核算时重新假定气隙磁密返工迭代计算, 直到两边相差小于 5%----

2 定子线圈线规

$$\frac{d_1'}{d_1} \quad (\text{mm/mm})$$

$d_1'$  绝缘导线外径

$d_1$  铜线直径

(结合下步要计算的电流密度  $\Delta_1$  或定子铜耗的限值要求, 核对定子线圈宽度  $b_m$  在定子槽内安放的可能性, 按设计计算程序附表一可初步选定导线线规。)

3 定子导线截面

$$s_1 = \quad (\text{mm}^2)$$

4 定子线圈电密

$$\Delta_1 = \frac{I}{s_1} \quad (\text{A/mm}^2)$$

5 定转子安匝比

$$f_w = \frac{8W_1}{N}$$

6 定子线圈线模宽

$$a_m = (10D_{12} + K_m) \sin(90^\circ \cdot a) \quad (\text{mm}) \text{取整数}$$

$$K_m = 3 \quad (\text{当 } D_{12} \text{ 小于 } 3\text{cm})$$

$$K_m = 5 \quad (\text{当 } D_{12} \text{ 大于 } 3\text{cm})$$

7 定子线圈线模长

$$L_m = 10L + 2r - 2 \quad (\text{mm})$$

铜线标称直径 $d_1$ (mm)	$r$ (mm)
小于 0.45	3
0.45~0.5	4
大于 0.5	5

8 定子线圈线模高

$$H = 10H' - 1 \quad (\text{mm})$$

9 定子线模每层匝数

$$W' = \frac{H}{d_1' + e} - 0.5 \quad (\text{取 } 0.5 \text{ 的整数})$$

$e$  取 0.05, 当  $d_1' > 0.5$

$e$  取 0.03, 当  $d_1' < 0.5$

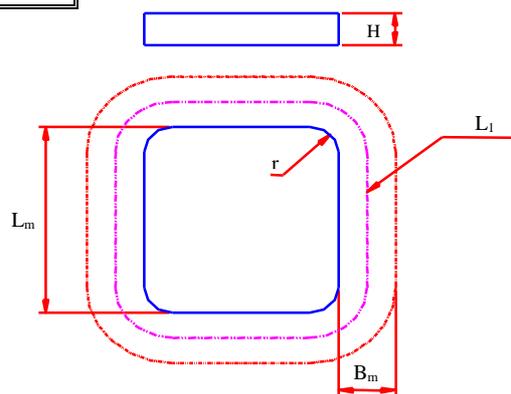
10 定子线圈宽度

$$b_m = \frac{W_1 + 1}{W'} (d_1' + e) \quad (\text{mm})$$

(检验定子窗口能否安放)

11 定子线圈平均每匝长度

$$l_1 = 2(a_m + L_m - 4r) + p(2r + b_m) \quad (\text{mm})$$



12 定子绕组电阻

$$R_1 = \frac{4.28W_1l_1}{s_1} \cdot 10^{-5} \quad (\Omega)$$

(此部分应根据实际工艺情况取值计算, 只要电阻计算正确即可)

——设计时返回磁路计算的第 6 项旋转电势, 对转速进行修正计算——

13 定子绕组用铜量

$$W_{Cu1} = 18.7W_1s_1l_1 \cdot 10^{-6} \quad (\text{kg})$$

## (八) 性能计算

1 定子漏抗压降

$$Ix_1 = 0.5f_H W_1 f_d \quad (\text{V})$$

2 转子漏抗压降

$$Ix_2 = \frac{pf_H N^2 l l_1}{2z} \cdot 10^{-8} \quad (\text{V})$$

3 定子绕组自感电势

$$E_d = 8.88f_H W_1 f_d \quad (\text{V})$$

4 电枢绕组自感电势

$$E_q = \frac{0.0472f_H t L I N^2 a^2}{K_d d} \cdot 10^{-8} \quad (\text{V})$$

5 端电压无功分量

$$U_x = Ix_1 + Ix_2 + E_q + E_d \quad (\text{V})$$

6 端电压有功分量

$$U_r = \sqrt{U_H^2 - U_x^2} \quad (\text{V})$$

7 修正旋转电势

$$E_w = U_r - (R_1 + R_2)I_H - \Delta u \quad (\text{V})$$

8 电磁功率

$$P_\Omega = I_H E_w \quad (\text{W})$$

9 定子铁耗

$$P_{Fe1} = P_{cl} + P_p$$

$$\text{定子轭和极身单位铁耗 } p_{cl} = 2e \left( \frac{f_H}{100} \right) + 2.5r \left( \frac{f_H}{100} \right)^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$\text{定子极身铁耗 } P_p = p_{cl} B_p^2 W_p \quad (\text{W})$$

$$\text{定子轭部铁耗 } P_{cl} = p_{cl} B_{cl}^2 W_{cl} \quad (\text{W})$$

10 转子铁耗

$$P_{Fe2} = P_{c2} + P_t$$

$$\text{转子齿单位铁耗 } p_t = 1.5e \left( \frac{f_2}{100} \right) + 3r \left( \frac{f_2}{100} \right)^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$\text{转子轭单位铁耗 } p_{c2} = 2e \left( \frac{f_2}{100} \right) + 2.5r \left( \frac{f_2}{100} \right)^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$\text{转子轭部铁耗 } P_{c2} = p_{c1} B_{c2}^2 W_{c2} \quad (\text{W})$$

$$\text{转子齿部铁耗 } P_t = p_t B_t^2 W_t \quad (\text{W})$$

11 换向电气损耗

$$P_{kc} = Kc(P_{Fe1} + P_{Fe2})$$

$$K_c = 0.2 \quad \text{当 } n_H \leq 10000r/\text{min}$$

$$K_c = 0.15 \quad \text{当 } n_H > 10000r/\text{min}$$

12 换向压降损耗

$$P_{\Delta u} = I_H \Delta u \quad (\text{W})$$

13 定子铜耗

$$P_{Cu1} = I^2 r_1 \quad (\text{W})$$

14 转子铜耗

$$P_{Cu2} = I^2 r_2 \quad (\text{W})$$

15 风摩机械耗

$$P_m = \quad (\text{W})$$

(采用轴流式风扇时, 可根据风扇外径  $D_v$  按计算程序附图一查取。当采用离心式风扇时, 应将查的数乘以 1.2)

16 输入功率

$$P1 = P_{\Omega} + P_{Fe1} + P_{KC} + P_{\Delta u} + P_{cu1} + P_{cu2} \quad (\text{W})$$

17 输出功率

$$P2 = P_{\Omega} - P_{Fe2} - P_m \quad (\text{W})$$

19 效率

$$h = \frac{P2}{P1} \times 100\%$$

20 功率因数

$$\cos j = \frac{P1}{U_H I_H}$$

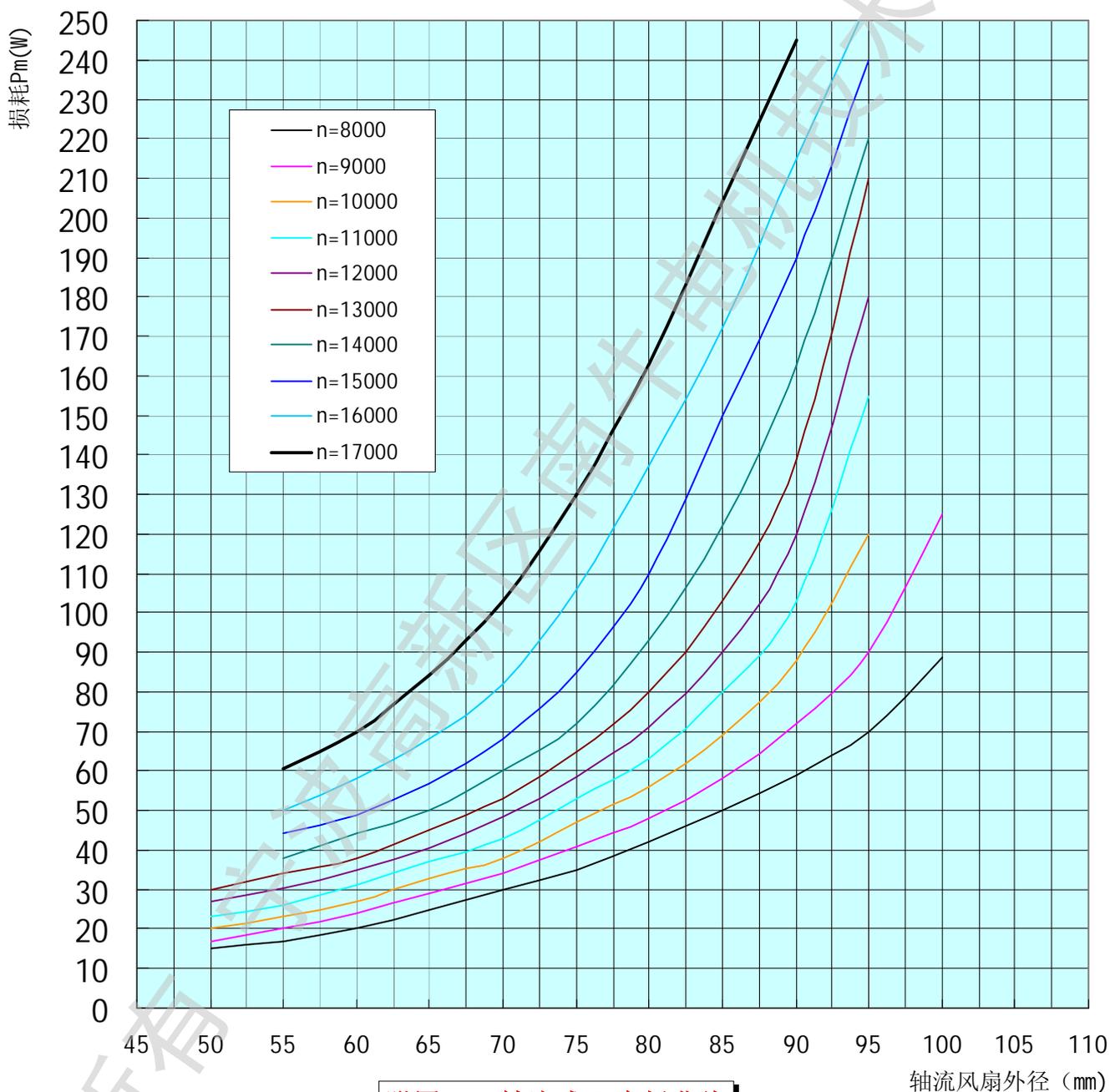
21 输出转矩

$$M_H = \frac{9.55P2}{n_H} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

计算说明: 本程序忽略铁耗造成的磁通相角(一般额定工作时磁通相角余弦值为 0.995 左右, 不会带来太大的误差)从而避免了多次调整原始参数返工迭代计算、不但繁复、且十分容易出错的问题。先假定功率因素(=0.9 或 1)计算旋转电势, 以此确定磁通和转速, 最后对旋转电势进行修正, 得到电机功率, 返工迭代大为减少, 因此较适合于手工计算。当然, 如果要提高计算精度, 则需要编制软件对相关参数进行返工迭代计算。

## 三、参考资料

- 1 汪镇国《单相串激电动机的原理设计制造》上海科学技术文献出版社, 1991. 2
- 2 汪国梁《单相串激电动机》陕西科学技术出版社, 1980. 12
- 3 何松波, 施进浩《微特电机设计程序---- 第十章串励电动机》信息产业部 21 研究所(供稿: 周士宣)
- 4 [美] Jimmie J. Cathey 著 南昌大学. 戴文进译《电机原理与设计的 MATLAB 分析---- 第 5 章直流电机》电子工业出版社. 2006. 7



附图——轴流式风摩耗曲线