

稀土永磁同步电动机磁路计算方法

米春亭 陆鹤庆 (西北工业大学)

【摘要】给出了稀土永磁同步电动机的等值磁路图,导出了磁路计算公式,提出含有非线性漏磁路的磁钢工作图的求解方法,并与场分析及试验结果进行了对比。该方法简便、实用,可满足工程设计的需要。

【叙 词】永磁电机 同步电动机 磁路 计算

1 引 言

为简化工艺和降低制造成本,自启动稀土永磁同步电动机大都设计成整体转子冲片结构。由于这种结构的漏磁路包含纯铁磁材料部分,因此漏磁路的计算比较复杂,也从某种程度上使磁钢工作图的求解复杂化,甚至较难精确求解。对此,多采用有限元法进行设计计算,这种方法虽然求解结果较为精确,但计算过程复杂,工作量大,而且必须借助计算机,一般设计人员比较难于接受。

本文给出一种简便的磁路计算方法,并与场分析结果及试验结果进行对比。对比可见,本文提供的方法完全可以满足工程设计的需要。

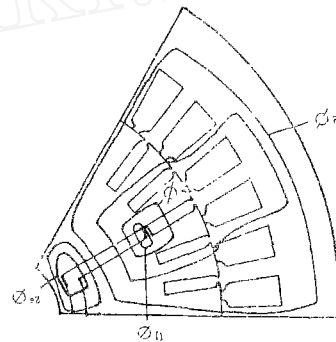


图1 磁力线分布图

Φ_a ---气隙有效磁通
 Φ_{s1} 、 Φ_{s2} ---通过空气隙的漏磁通
 Φ_{f1} ---只通过铁磁材料的漏磁通

2 等效磁路及其求解

在求解等效磁路时假设:

- a. 忽略端部漏磁。
- b. 铁磁材料中磁感应是均匀分布的,而磁场强度呈线性分布。
- c. 磁钢退磁曲线为直线。

首先将切向激磁结构的稀土永磁同步电动机的磁力线分布示意图绘于图1所示,据此可画出其等值磁路,如图2所示^[1]。

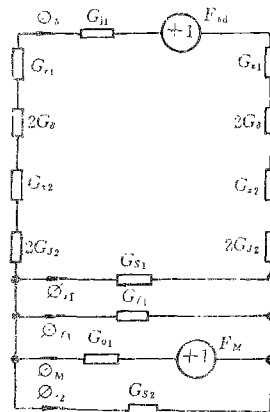


图2 等值磁路图

Φ_M ---磁钢总磁通

- G_{01} ——磁钢装配气隙的磁导
- G_{δ} ——气隙磁导
- G_{J1} 、 G_{J2} ——定、转子轭部磁导
- G_{Z1} 、 G_{Z2} ——定、转子齿部磁导
- G_{S1} 、 G_{S2} ——空气隙漏磁导
- G_{f1} ——铁磁材料部分漏磁导
- F_M ——磁钢提供的磁势
- F_{ad} ——直轴电枢反应磁势

由图 2 可画出空载时的等效磁路图如图

3 所示。

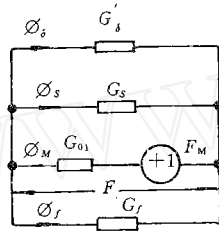


图 3 等效磁路图

G_s —空气隙部分漏磁导
 $G_s = G_{s1} + G_{s2}$ (1)

G_f —铁磁材料部分漏磁导, $G_f = G_{f1}$
 G'_δ —主磁路等效磁导 (2)

$$G'_\delta = \frac{1}{\frac{2}{G_{Z1}} + \frac{1}{G_{Z2}} + \frac{1}{G_{J1}} + \frac{1}{G_{J2}} + \frac{1}{G_\delta}}$$

令 $G'_0 = G_s + G_f + G'_\delta$ (3)

于是:

$$G_0 = \frac{1}{\frac{1}{G_{01}} + \frac{1}{G'_0}} \quad (4)$$

由图 3 可列出如下联立方程:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_M &= \Phi_\delta + \Phi_s + \Phi_f \\ \Phi_\delta &= FG'_\delta \\ \Phi_s &= FG_s \\ \Phi_f &= FG_f \\ F_M &= F + \Phi_M / G_{01} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式 (5) 中的 $F_M \sim \Phi_M$ 还应满足磁钢退磁曲线。稀土永磁材料的退磁曲线如图 4 所示。图中 Br ——磁钢剩磁, H_c ——磁钢矫顽力, l_M ——磁钢充磁方向长度, S_M ——磁钢截面积。

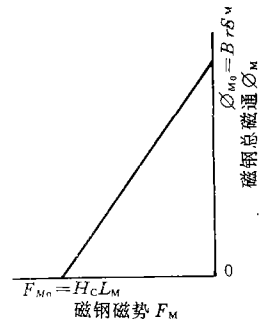


图 4 磁钢退磁曲线

满足退磁曲线的方程可表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_M &= \Phi_{M0} - F_M \frac{\Phi_{M0}}{F_{M0}} \\ &= \Phi_{M0} - F_M G_M \end{aligned} \quad (6)$$

式中 G_M ——磁钢等效磁导

$$G_M = \Phi_{M0} / F_{M0}$$

联立式 (5)、(6) 可求得:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_M &= \frac{1}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_M}} F_{M0} \\ F_M &= \frac{1}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_M}} F_{M0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

以及

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\delta &= \frac{G_0 G'_\delta}{(G_0 + G_M) G'_0} \Phi_{M0} \\ \Phi_s &= \frac{G_0 G_s}{(G_0 + G_M) G'_0} \Phi_{M0} \\ \Phi_f &= \frac{G_0 G_f}{(G_0 + G_M) G'_0} \Phi_{M0} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式 (7) 可画出磁钢的简化的等效磁路图如图 5 所示。

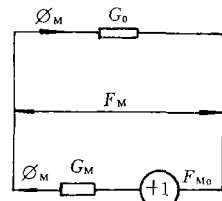


图 5 简化的等效磁路图

由式 (7)、(8) 可求出漏磁系数:

$$\sigma = \frac{\Phi_M}{\Phi_\delta} = \frac{G'_O}{G'_\delta} = 1 + \frac{G_S}{G'_\delta} + \frac{G_f}{G'_\delta} \quad (9)$$

3 磁钢工作图的求解^[2]

3.1 主磁路不饱和时的磁钢工作图

当主磁路不饱和时, 主磁路铁心部分磁阻可忽略, 即

$$G'_\delta = G_\delta = \frac{\alpha \tau l_{ej}}{1.6 \delta k_\delta} \quad (10)$$

式中 α ——极弧系数

τ ——极距

l_{ej} ——铁心有效长度

δ ——气隙宽度

K_δ ——气隙系数

此时若再忽略磁钢装配气隙的磁阻, 可得

$$G'_O = G'_O = G_S + G_f + G_\delta \quad (11)$$

据此, 可画出主磁路不饱和时电机等值磁路图, 如图6所示。

式(11)中, G_S 和 G_δ 均为常数, 而 G_f 与这部分漏磁路的饱和程度有关, 是变数。为求得气隙磁通, 必须用作图法, 具体步骤是:

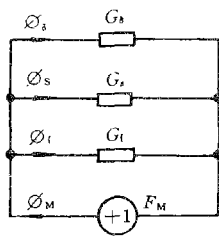


图6 主磁路不饱和时的等值磁路图

a. 假设一系列气隙磁通, 进而求出对应于每一气隙磁通下的气隙磁势 F_δ 及漏磁通 Φ_S 。

b. 根据铁磁材漏磁路部分的尺寸大小, 求出对应磁势下的磁场强度:

$$H_f = F/L_f \quad (12)$$

式中 L_f ——漏磁路长度

再查磁化曲线表, 可求出此磁场强度对应的磁密 B_f , 于是:

$$\Phi_f = B_f \cdot S_f \quad (13)$$

式中 S_f ——漏磁路截面积

c. 求出对应每一气隙磁通时的 Φ_M 。

d. 做 $\Phi_M \sim F_M$ 关系曲线, 该曲线与磁钢退磁曲线的交点就是磁钢工作点, 由磁钢工作图求出电机空载时的 Φ_M 和 F_M 值, 再由式(12)、(13) 求出 Φ_f , 利用下式求出 G_f :

$$G_f = \Phi_f / F_M \quad (14)$$

将 G_f 、 G_O 、 G_δ 、 Φ_{M0} 代入式(8)、(9), 可求出 Φ_δ 、 Φ_S 、 Φ_f 和 σ 。做图过程如图7所示。

3.2 考虑饱和时的磁钢工作图

式(8)、(9) 虽导出气隙磁通及漏磁系数的表达式, 但磁路饱和时, G'_δ 、 G_f 均为变数, 由式(8)、(9) 仍无法进行求解。为此, 必须采用做图法求取磁钢工作图, 步骤如下:

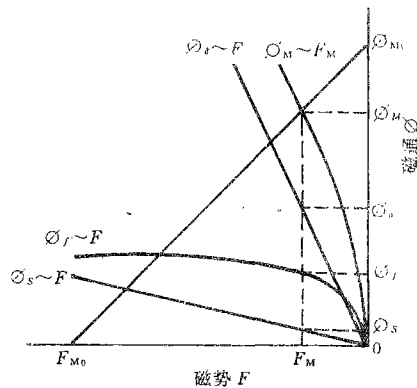


图7 不计饱和及附加气隙时的磁钢工作图

a. 假设一系列的 Φ_δ , 求出与之对应的主磁路总磁势 F 。

b. 由式(5)第三式, 求出 Φ_S 。

c. 由式(12)、(13) 求出 Φ_f 。

d. 由式(5)第一式求出 Φ_M 。

e. 再由式(5)第五式求出 F_{M0} 。

f. 作 $\Phi_M \sim F_M$ 曲线及 $F \sim \Phi_\delta$ 、 $F \sim \Phi_S$ 、 F

$\sim \Phi_f$ 曲线, $\Phi_M \sim F_M$ 曲线与磁钢退磁曲线的交点就是钢工作点, 求出 Φ_M 、 F_M 大小。

g. 利用 $F = F_M - \Phi_M / G_{01}$ 求出 F , 查 $F \sim \Phi_\delta$, $F \sim \Phi_s$, $F \sim \Phi_f$ 曲线上对应于 F 的交点, 即可求出 Φ_δ 、 Φ_s 和 Φ_f 。

h. 将 Φ_M 、 Φ_δ 代入式 (9), 求出漏磁系数 σ 。

以上做图过程如图 8 所示。

3.3 负载磁钢工作图

图 2 中, 电机负载时磁势 $F_{ad} \neq 0$, 此时的联立方程仍具式 (5) 的形式, 仅第二式不同:

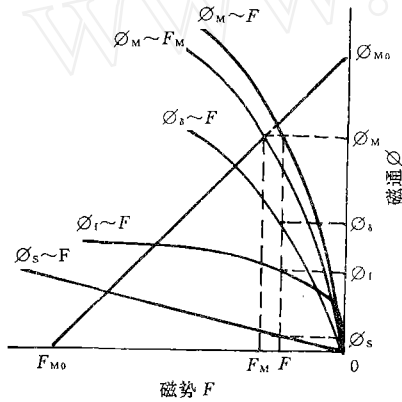


图 8 考虑饱和时磁钢工作图

$$\Phi_\delta = (F \pm F_{ad}) G'_\delta \quad (15)$$

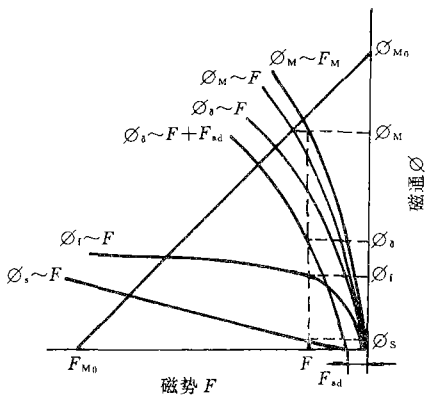


图 9 负载磁钢工作图

比较式 (5)、(6) 和式 (15) 可见, 仅第二式形式不同, 因此磁钢工作图的求解步骤

仍可参考上节方法, 只是 $\Phi_\delta \sim F$ 曲线应在空载磁化曲线的基础上平移 F_{ad} 距离即可, 如图 9 所示。

4 几点讨论

4.1 影响漏磁系数的因素

由式 (9) 可见, 漏磁系数 σ 与 G_s 、 G_f 和 G'_δ 有关, 由于 G_s 是常数, G_f 和 G'_δ 和磁路饱和程度有关, 因此影响漏磁系数 σ 的因素可归为如下几点:

a. 漏磁系数和主磁路的饱和程度有关, 随磁路饱和程度的增加, G'_δ 减少, 因而 σ 增大。

b. 这种电机的漏磁系数比普通电机增加一项 (G_f / G'_δ) , G_f 和这部分漏磁路的尺寸密切相关, 当该漏磁路变大时, (G_f / G'_δ) 增加较多, 使 σ 迅速增加。

c. 漏磁系数和附加气隙无关。这是因为主磁通和漏磁通都经过附加气隙的缘故。但不等于附加气隙对主磁通没有影响, 实际上, 附加气隙的存在, 使磁钢外磁路的磁阻增大, G_o 减小, 由式 (8) 可见, Φ_δ 减小。

4.2 铁磁材料部分漏磁导 G_f

G_f 是指电机纯铁磁材料漏磁路部分的磁导, 它和这部分的尺寸密切相关, 和主磁通大小也有一定关系, 下边分别讨论不同情况下 G_f 的变化情况, 讨论时, 认为主磁路不饱和, 并忽略附加气隙的影响。

4.2.1 漏磁路尺寸一定, 主磁通变化时, G_f 的变化

由式 (12)、(13)、(14) 得:

$$G_f = \frac{B_f S_f G_\delta}{\Phi_\delta} \quad (16)$$

式中, B_f 可由 H_f 查磁化曲线求得。实际上, 由式 (12) 可见, 因 l_f 很小, 即使 F_δ 较小时, H_f 仍具有很大的数值。因此, 当 Φ_δ 在较大范围变化时, 由 H_f 求出的 B_f 值变化并不大。可近似认为不变。于是由式 (16) 可看出,

G_f 与 Φ_δ 成反比例变化, 而由式(13)可见, 当 B_f 近似不变时, 纯铁磁材料部分的漏磁通也基本不变。由此可得出结论: 主磁通在一定范围变化时, 纯铁磁材料部分漏磁通基本不变, 因此, 随主磁通增大, 相应的漏磁系数减小。

4.2.2 漏磁路长度变化对 G_f 的影响

由式(12)可见, 当漏磁路长度增加时, H_f 成比例减小, 相应的 B_f 也减小, 因此由式(16)可知 G_f 减小, 由式(13)可知, Φ_f 减小。定量分析表明, 当 l_f 较小时, B_f 变化较大, 但当 l_f 足够大时, B_f 基本不变, 此时 G_f 和 Φ_f 也基本不变。因此, 设计电机时, 必须保证纯铁磁材料漏磁路有足够的长度。

4.2.3 漏磁路截面面积变化对 G_f 的影响

当 l_f 不变时, 一定主磁通下对应的 H_f 恒定, 即 B_f 恒定。由式(16)、(13)可见, 当

G_f 和 Φ_f 与 S_f 成比例变化。因此, 这部分漏磁电路截面积的增大将引起漏磁的增加, 因而设计电机时, 必须将其降到最低限度, 一般以满足电机机械强度要求为原则。

5 计算实例^[3]

用本文提供的方法设计了一台 FOXT52-6 型纺织专用稀土永磁同步电动机。该电机额定功率 0.6kW, 6 极。磁路计算数据为:

$$G_s = 117.7 \times 10^{-8} \text{Wb/A}$$

$$G_\delta = 539.5 \times 10^{-8} \text{Wb/A}$$

$$l_f = 0.4 \times 10^{-2} \text{m}$$

$$S_f = 0.9 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

磁路计算如表 1 如示。

表 1 磁路计算表

性能	计 算 值				
气隙磁密 $B_\delta / (\times 10^{-3} \text{T})$	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
气隙磁通 $\Phi_\delta / (\times 10^{-8} \text{Wb})$	80 926	121 389	161 852	202 315	242 778
气隙磁势 F_δ / A	150	210	300	375	400
空气隙漏磁通 $\Phi_\delta / (\times 10^{-8} \text{Wb})$	19 222	26 916	38 326	48 744	61 476
铁磁材料漏磁密 $B_f / (\times 10^{-3} \text{T})$	20 127	20 662	20 975	21 000	21 400
铁磁材料漏磁通 $\Phi_f / (\times 10^{-8} \text{Wb})$	36 228	37 192	37 752	37 800	38 320
磁钢总磁通 $\Phi_M / (\times 10^{-8} \text{Wb})$	136 376	185 397	237 930	288 859	342 574
漏磁系数 σ	1.69	1.53	1.47	1.43	1.41

稀土材料选用 NdFeB₉, 其 $B_r = 9300 \times 10^{-3} \text{T}$, $H_C = 68 \times 10^4 \text{A/m}$, $l_M = 0.4 \times 10^{-2} \text{m}$, $S_M = 39 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 作磁钢工作图, 可求得空载时:

$$\Phi_{M0} = 296\ 000 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

$$\Phi_{\delta 0} = 208\ 450 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

$$\Phi_{\delta 0} + \Phi_{f 0} = 87\ 550 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

负载时, $F_{ad} = 142.7 \text{A}$, 由磁钢工作图可求得负载时

$$\Phi_M = 284\ 000 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

$$\Phi_p = 200\ 000 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

$$\Phi_s + \Phi_f = 84\ 000 \times 10^{-8} \text{Wb}$$

$$E_0 = 216 \text{V}$$

已知该电机 $W_1 = 510$ 匝, $K_{dp1} = 0.933$, $K_{WM} = 1.11$, $f = 50 \text{Hz}$ 于是反算出电机空载气隙磁通。

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta 0} &= \frac{E_0}{4fK_{WM}K_{dp1}W_1} \\ &= 204\ 479 \times 10^{-8} \text{Wb} \end{aligned}$$

与有限元法和磁路计算方法结果比较可见, 误差仅 1.2% 和 1.9%。

由此可得出结论: 本文提供的稀土永磁同步电动机的磁路计算方法是可行的、实用的, 能满足工程设计的需要。

6 数值分析和试验结果

利用有限元法对上述电机进行磁场数值计算, 可较精确求出磁场分布情况, 表 2 将其与空载时磁路计算结果进行对比。

表 2 磁路计算结果与有限元结果对比
(单位: $\times 10^{-8} \text{Wb}$)

性能	磁钢总磁通 Φ_{M0}	气隙磁通 $\Phi_{\delta 0}$	漏磁通 $\Phi_{s0} + \Phi_{f0}$
磁路法	29 6000	208 450	87 550
数值法	295 932	206 946	88 986
误差 (%)	0.02	0.7	1.6

电机制成后, 对电机进行了试验分析。利用一台原动机将上述电机拖至同步速度, 用电压表测出其空载相电势:

参 考 文 献

- 1 陈峻峰. 永磁电机. 机械工业出版社, 1985.
- 2 米春亭. 稀土永磁同步电机设计分析与涡流场计算. 硕士毕业论文, 1988.
- 3 陆鹤庆. 纺织用高效稀土永磁同步电动机设计. 毕业论文, 1991.

CALCULATING METHOD OF MAGNETIC CIRCUIT FOR RARE-EARTH PM SYNCHRONOUS MOTOR

[Abstract] The equivalent magnetic circuit figure of rare-earth PM synchronous motor is provided, calculating formula of magnetic circuit is derived the solution to PM operational figure of nonlinear leakage magnetic circuit is put forward, the method is compared with the result of field analysis and test. The method is convenient, practical and can also meet the need of engineering design.

[Keywords] permanent magnet motor, synchronous motor, magnetic circuit, calculation

无铁转子伺服电机

33VM 无铁转子伺服电机具有快速点动能力, 而且转矩与惯量比值较高。该电机可用于模拟转速设计的快速控制和光学编码器的定位控制。双回路伺服可使电机在极短的时间内实现精确的定位控制。该电机的设计特点是外径小、转子惯量低、外磁性强、低速时无齿槽效应、无滞后现象和涡流损耗。

高转矩步进电动机

MTR 系列高转矩步进电动机已应用于运动控制生产中。该电机可在迅速加速和减速时提供较高的转矩/惯量。输出转矩范围为 0.7~14N·m, 电机结构为立式轴伸式。主要用于编码器和要求防水结构的产品上, 通过 25 600 步/r 实现步进。

(杜宗濛译自《Machine Design》OCT24, 1991)