

稀土永磁同步电动机磁体用量的确定

米春亭 蒋宗荣

【摘要】 本文推导稀土永磁同步电动机磁体用量的计算公式及磁体尺寸的确定方法,用数值计算法进行编程,对设计进行验算和调整,并给出设计例题。

【关键词】 稀土永磁 同步电动机 磁钢体积 有限元 数值计算法

磁体用量的确定是稀土永磁同步电动机设计的主要内容之一,合理使用稀土永磁材料不仅可以得到较好的电机性能,还可降低电机成本,利于推广应用。

在磁体用量的计算方面,文献[1]提供的计算公式只适合于非线性退磁曲线的永磁材料,用于设计稀土永磁同步电动机时误差较大;文献[2]认为,应尽可能使磁钢工作点处在最大磁能积处,未考虑电枢反应磁场退磁的可能性;文献[3]提供的计算公式则十分近似。

一、磁体用量计算公式的推导

在推导磁体用量的计算公式时,假设

- (1) 不计凸极效应的影响;
- (2) 忽略定子电阻;
- (3) 不计饱和的影响。

根据以上假设,可知定子输入功率

$$P_i = mE_o I \cos\psi \quad (1)$$

式中 m ——相数

E_o ——定子空载电势

I ——定子电流

ψ —— E_o 与 I 的夹角

交流电机空载电势可表示为:

$$E_o = 4K_{wm}K_{dp1}fW\Phi \quad (2)$$

式中 K_{wm}, K_{dp1} ——分别为波形系数和绕组系数

f ——旋转磁场频率

W ——定子绕组匝数

Φ ——气隙磁通

定子电流与直轴电枢反应磁势的关系为:

$$I = F_{adm} \frac{p}{0.9mWK_{dp1}K_{ad}K_m \sin\psi} \quad (3)$$

式中 F_{adm} ——最大直轴电枢反应磁势

K_m ——最大电流倍数

K_{ad} ——直轴电枢反应折算系数

将式(2)、(3)代入式(1)并取 $\text{tg}\psi = 1$,得

$$P_i = \frac{\sqrt{2}\pi K_{wm}pf}{K_m K_{ad}} F_{adm} \Phi \quad (4)$$

最大去磁电流一般发生在堵转状态下,

此时磁钢两端的去磁磁势

$$F'_{adm} = F_{adm} + \Sigma F = C_F F_{adm} \quad (5)$$

式中 ΣF ——堵转时磁钢外磁路的磁势降

C_F ——系数

$$C_F = 1 + \frac{\Sigma F}{F_{adm}}$$

通常 $\Sigma F \ll F_{adm}$,所以 $C_F \approx 1$

$$\text{令 } \xi = \frac{\Phi_m F'_{adm}}{\Phi_{m0} F_{m0}} \quad (6)$$

式中 ξ ——磁钢利用系数

本文1992年4月27日收到。

· 设计分析 ·

Φ_{m0}, F_{m0} ——磁钢的剩磁通和剩磁势

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{m0} &= 2B_r S_m \\ F_{m0} &= H_o l_m \end{aligned} \right\} \text{并联磁路} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{m0} &= B_r S_m \\ F_{m0} &= 2H_o l_m \end{aligned} \right\} \text{串联磁路} \quad (8)$$

B_r, H_o ——磁钢的剩磁和矫顽力

S_m, l_m ——每极磁钢截面积和充磁方向长度

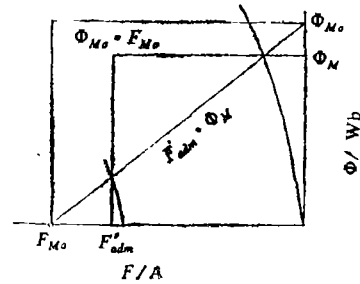


图1 磁钢工作图

设漏磁系数 $\sigma_o = \frac{\Phi_m}{\Phi}$ (9)

于是

$$F_{adm} \Phi = \frac{\Phi_m}{\sigma_o} \cdot \frac{F'_{adm}}{C_F} \approx \frac{\xi}{\sigma_o} \Phi_{m0} F_{m0} \quad (10)$$

将式(7)、(8)及式(10)代入式(4),得

$$P_i = \frac{\sqrt{2\pi K_m \xi f}}{K_m K_{ad} \sigma_o} B_r H_o S_m l_m \cdot 2p \quad (11)$$

计及 $V_m = 2pl_m S_m$, 得磁钢体积表达式为

$$V_m = \frac{K_m K_{ad} \sigma_o}{\sqrt{2\pi K_m \xi f}} \cdot \frac{P_i}{\xi B_r H_o} \quad (12)$$

由式(12)可见, 通常频率 f 为已知, P_i 可由额定功率算出:

$$P_i = \frac{P_N}{\eta \cos \varphi} \quad (13)$$

K_{ad} 可由下式确定

$$K_{ad} = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{4\sin(\alpha\pi/2)} \quad (14)$$

最大电流倍数 K_m 按设计书要求, 选定永磁材料以后, 查出相应的 B_r 和 H_o , 选取合适的利用系数 ξ 后, 利用式(12)就可求出所需的磁钢体积。

在使用式(12)时必须注意:

(1) 利用系数 ξ 的分子是空载工作点对应的磁钢磁通与最大去磁电流对应的磁钢磁势之积, 分母是矫顽力与剩磁之积, 如图1所示, 并非通常所指额定工作点磁钢磁能与最大磁能积之比。

(2) 选定磁体的 B_r 和 H_o 应计及温度的影响。

(3) 最大电流倍数 K_m 应在设计完成后

进行验算。

(4) 当 H_o 以 A/m, B_r 以 T 代入时, 式(12)求出的 V_m 的单位是 m^3 。

二、磁体尺寸的确定

通常情况下, 首先确定磁体的轴向长度, 一般取其转子(或定子)铁芯等长, 即

$$L_m = l_f \quad (15)$$

接下来确定充磁方向的长度 l_m 。对于 NdFeB 等温度系数较大的磁体, 首先根据电机的绝缘等级初步确定磁钢的工作温度, 并求出对应工作温度下磁钢的去磁曲线, 如图2所示, 求取对应于拐点处的磁势 H''_c ,

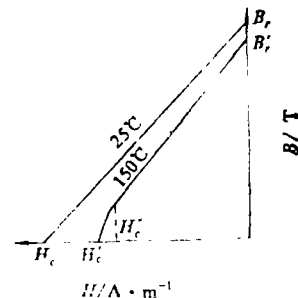


图2 去磁曲线

最大去磁时的工作点应位于该点以上, 故令 $l_m H''_c > K_m F_{ad}$ 得

$$l_m = \frac{K_m F_{ad}}{H''_c} K_A (\text{并联磁路}) \quad (16)$$

$$l_m = \frac{K_m F_{ad}}{2H''_c} K_A (\text{串联磁路}) \quad (17)$$

式中 K_A ——安全系数

取 $K_A = 1.1 \sim 1.2$ 磁钢的宽度可由下式确定 (矩形磁钢):

$$b_m = \frac{V_m}{2pl_mL_m} \quad (18)$$

磁钢的半径 (瓦片形磁钢):

$$R = \frac{V_m}{2\pi\alpha l_m L_m} \quad (19)$$

式中 α —— 极弧系数

三、磁体尺寸及体积的数值计算方法

利用数值解法可以求得磁场的精确分布, 但数值计算方法必须事先给定磁路结构和尺寸, 因而多用以校核和优化设计。

本文编制了一个简单的磁体尺寸及磁场数值计算的程序, 框图如图3所示。

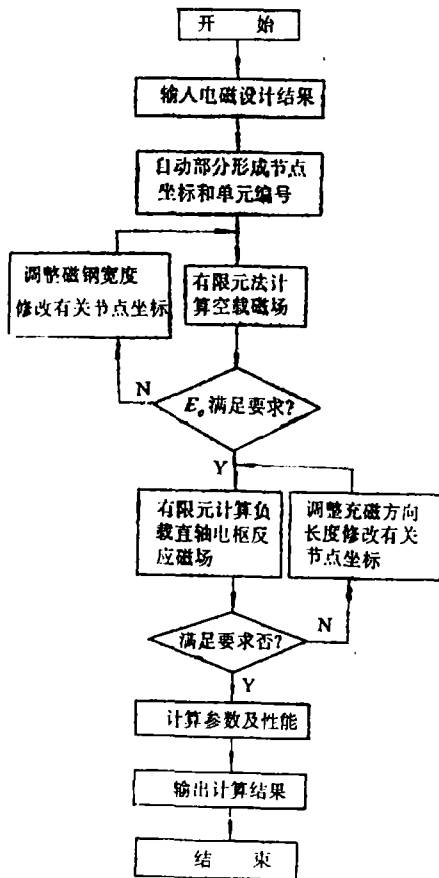


图3 数值计算框图

四、算例

作者使用本文提供的方法设计了 FXT

53-6型稀土永磁同步电动机, 该电机额定指标为: $P_N = 800\text{W}$, $I_N = 1.38\text{A}$, $2p = 6$, $f_N = 50\text{Hz}$, $\eta_N = 91\%$, $\cos\varphi_N = 0.96$, $K_m = 6.0$, $\alpha = 0.953$, E级绝缘, $W = 540$ 匝, $K_{dp1} = 0.966$ 。

由式(13)~(14)得 $P_i = 915.8\text{W}$, $K_{ad} = 0.7874$ 。

取 $K_{wm} = 1.03$, $\sigma_0 = 1.4$, $\zeta = 0.85 \times 0.85 = 0.7225$ 。

选用NdFeB磁钢, 120℃时 $B_r = 0.95\text{T}$, $H_c = 6.8 \times 10^5\text{A/m}$ 。由式(12)得 $V_m = 49 \times 10^{-6}\text{m}^3$ 。已知 $L_m = 52.5 \times 10^{-3}\text{m}$ 。

由式(3)得 $F_{adm} = 2164\text{A}$ (取 $\psi = 65^\circ$)

由式(16)得 $I_m = 4 \times 10^{-3}\text{m}$ (取 $K_A = 1.1$)

由式(18)得 $b_m = 38.9 \times 10^{-3}\text{m}$

实际电机的有限元计算场域及磁力线分布如图4所示, 经数值计算得出 $V_m = b_m \times L_m \times I_m = 36.5 \times 52.5 \times 4 \times 10^{-9} = 46 \times 10^{-6}\text{m}^3$ 。

按数值计算结果制做的样机的实测结果列于下表。其性能指标完全满足设计要求。

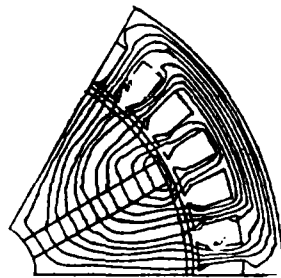


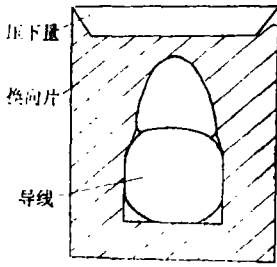
图4 剖分场域和磁力线分布

样机实测结果

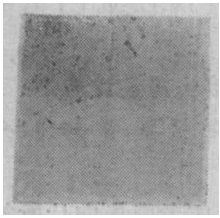
实验项目	U/V	I/A	P ₁ /W	P ₂ /W	η/%	cosφ	n/r _{min} ⁻¹
空载	380	0.125	54	0	0	0.656	1000
负载	380	1.38	880	810	92	0.969	1000
堵转	380	9.0	4740	—	—	0.8	0

五、结 语

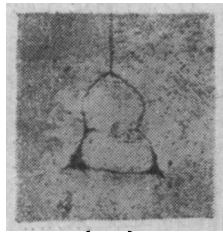
本文导出了稀土永磁同步电动机的磁体尺寸及体积的计算公式, 简(下转第34页)



(a)



(b)



(c)

图3 热压接图形

于电极的热压变形量，合适的变形量是获得高质量的保证。典型的热压接接头如图3所示。

槽口太深时下部的导线可能压不到底不能产生塑性变形。槽过宽时导线四面可能不接触，接头抗拉强度低还可能不导电。热量太大时导线易过热变形大而脆容易熔断。电极工作面太尖时导线易切断而且容易压偏，导线也容易切断。这些不正常的接头都会影响到电机的质量，应该防止。

(2) 接头变形量的大小是否适当，可根据上槽口的压下量来判断，压下量的大小应由接头金相分析和抗拉强度的结果来决定，这是极重要的。

(上接第16页)单、明确、使用方便，可供有关人员在设计此类电机时参考，文章提供的数值计算软件则对设计进一步验算和调整，以取得更为合理的结果。文章最后给出实例进行验证，证明了方法的正确性。

参考文献

[1] 陈峻峰. 永磁电机. 机械工业出版社, 1983.
 [2] 叶东, 施传立, 李和明. 稀土永磁同步电动机的功角特性及磁体尺寸和气隙的确定. 中小型电机, 1991, (3)

[3] 李革, 唐任远, 郭忠保. 稀土永磁电机的磁路设计与计算. 稀土永磁电机论文集, 沈阳工业大学, 1986.
 [4] 王京群. 永磁同步电动机设计中的有限元辅助计算软件. 中小型电机, 1991, (6)
 [5] M.A. Rahman, T.A. Little and G.R. Slemon. Analytical Models for Interior-type Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE, Vol. MAG-21, No.5, 1985.
 [6] N. Bonlesd and H. Web. Field Analysis of a High Power High speed Permanent Magnet Synchronous Machine of the Disc Construction-type. EME, Vol.5, 1980.

(上接第23页)

续表

性能测试	使用功率 P_1/W	710	715
	电流 I_a/A	3.30	3.28
	功率因数	0.978	0.990
	转速 $n/r/min$	23500	22600
	风压 p/P_a	15484	14896
	风量 $Q/m^3/min$	2.25	2.21

从表中可以看出，做成的样机性能与日本样机水平相当，说明了模糊优化数学模型基本正确，优化设计是成功的。

六、结论

本文把模糊数学中的模糊优化理论应用

到电机优化设计中，建立了电机模糊优化的数学模型，从满意度的观点，评价优化结果。由于考虑了电机存在的模糊因素，可多方面的把握电机的结构和性能，使优化结果更全面。

参考文献

[1] 王彩华, 宋连天. 模糊论方法学. 建筑工业出版社, 1988
 [2] 郭庆吉, 许瑞林. 模糊数学方法用于汽车永磁直流电机的优化设计. 微特电机, 1990, (2)
 [3] 周建华. 模糊数学应用于交流串励整流子电机的设计和优化. 硕士生论文