

稀土永磁同步电机磁路计算机辅助设计

米春亭 扶育红

(西安石油学院 西安 710061)

Computer Aided—design and Optimization of Rare—earth Permanent Magnet Synchronous Motor

Mi Chunting Fu Yuhong

(Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710061)

【摘要】 研究了稀土永磁同步电动机磁路的计算机辅助设计,给出了矩形磁钢、瓦形磁钢以及聚磁结构中磁钢的等效处理方法,考虑了温度对磁钢工作点的影响,研究并比较了求解磁钢工作点的几种优化方法的有效性。

【关键词】 永磁同步电动机 磁路计算 CAD 稀土永磁

【Abstract】 Magnetic circuit desing is the most complicated but crucial step in the designing of electrical machine. Due to the existence of magnetic bridge in the rotor of rare — earth permanent magnet (PM) synchronous motor, the computation of magnetic circuit is even more complicated than that of normal electrical machine. The paper concentrated on the computer aided magnetic circuit design of motor of this sort so as to simplify the designing process and shorten computing time. The computer aided design software suitable for the designing of either rectangle or tile or arc magnet. Temperature effects are also considered including reversible losses and irreversible losses. Some optimization methods are used in solving the magnet operating point and their effectiveness are compared.

【Keywords】 synchronous motor permanent magnet computer aided—design magnetic circuit

1 设计思想

稀土永磁同步电机的磁路计算是电机设计的关键环节,也是最为繁琐、重复次数最多的计算步骤^[1]。由于其磁路中包含有非线性漏磁(即磁桥^[2]),其磁路计算较普通电机更为复杂。作者在文献[1]中对其磁路计算方法进行了详细的研究,本文是在文献[1]基础上的深入研究。除用C语

言编制了通用化的CAD软件以外,还对磁钢的等效处理及求取磁钢工作点的几种优化方法的有效性进行研究。软件可区分空载和负载,并能求出漏磁系数、同步电抗等一系列参数,可在屏幕上以图形方式显示求解过程并绘制磁钢工作图。程序框图如图1所示。

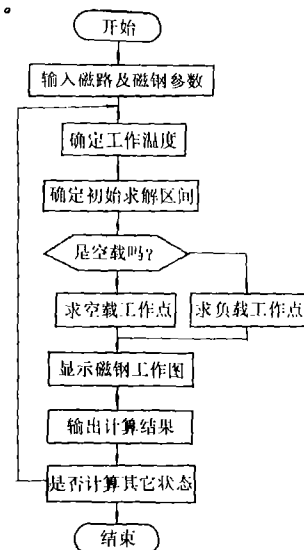


图1 程序流程图

2 磁钢等效处理

2.1 矩形磁钢

矩形磁钢等效较为简单。稀土永磁材料常温下退磁曲线为直线,因此退磁曲线可表述为(见图3):

$$\Phi = \Phi_r - F \cdot \Phi_r / F_r \quad (1)$$

式中: Φ_r 和 F_r —磁钢剩磁通和去磁磁势。

对串联磁路:

$$\Phi_r = B_r S_m \quad F_r = 2l_m H_c \quad (2)$$

对并联磁路:

$$\Phi_r = 2B_r S_m \quad F_r = l_m H_c \quad (3)$$

本文1995年10月24日收到

式(2)、(3)中: B_r, H_c —磁钢常温下(20℃)剩磁和矫顽力;

S_m, l_m —磁钢截面积和充磁方向长度。

2.2 瓦形磁钢

瓦形磁钢的充磁方向如图 2a 所示,平行充磁时,取 S_m 等于圆弧长度乘以轴向长度^[3]是不准确的,须折算至图 2b 所示的径向充磁方向。

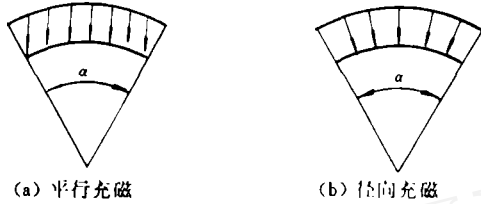


图 2 瓦形磁钢的充磁

实践证明,瓦形磁钢的等效截面积比实际截面积小,瓦形磁钢的等效剩磁通可表示为:

$$\Phi_r = \beta S_m B_r \quad (4)$$

式中: β —折算系数;

$$\beta = \sin(\alpha\pi/2\rho)/(\alpha\pi/2\rho); \quad (5)$$

α —磁钢板弧系数;

ρ —磁钢板对数。

板弧越大时,系数 β 越小,磁钢折合的有效面积亦越小,表 1 列出 $\rho=1\sim 3$ 及 $\alpha=0.6\sim 0.9$ 时的 β 值。

表 1 瓦形磁钢等效面积折算系数 β

α	0.60	0.65	0.67	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
$\rho=1$	0.858	0.835	0.825	0.810	0.784	0.757	0.728	0.699
$\rho=2$	0.963	0.957	0.954	0.950	0.943	0.935	0.927	0.919
$\rho=3$	0.984	0.980	0.978	0.978	0.974	0.971	0.967	0.963

2.3 聚磁结构

通常主极与侧极采用并联磁路,为使主侧极具有相同的抗去磁能力,应使主侧极具有相同的去磁磁势,如图 3a 所示。当出于其它考虑时,主侧极去磁磁势也可能不等,有两种可能,分别如图 3b、c 所示。合成去磁曲线应按相同磁势时的磁通迭加构成,如图 3 中曲线 3 所示。

合成去磁曲线可表示为:

$$\Phi = \Phi_r - F\Phi_r/F_r \quad (6)$$

式中: $\Phi_r = \Phi_{r1} + \Phi_{r2}$ (7)

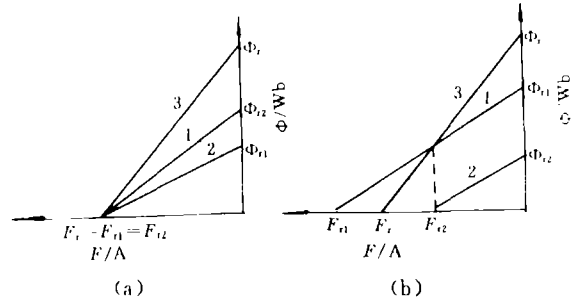
$$F_r = F_{r2} + \frac{F_{r1} - F_{r2}}{\Phi_r F_{r1} - (F_{r1} - F_{r2})\Phi_{r2}} \Phi_{r2} F_{r2} \quad (8)$$

Φ_{r1}, Φ_{r2} —主侧极剩磁通;

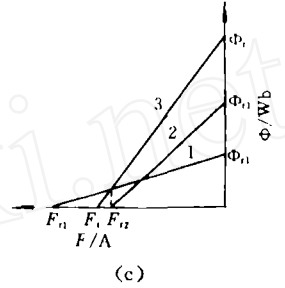
F_{r1}, F_{r2} —主侧极去磁磁势;

Φ_r, F_r —合成剩磁通和去磁磁势。

稀土永磁同步电机磁路计算机辅助设计



(a) (b)



(c)

1—主极去磁曲线 2—侧极去磁曲线 3—合成去磁曲线

图 3 聚磁结构合成去磁曲线

2.4 温度对工作点的影响

温度对工作点的影响可以考虑在去磁曲线中。NdFeB 的温度系数较大,在求取工作点时必须考虑温度的影响,温度的影响可分为可逆去磁和不可逆去磁分别考虑。

以并联磁路为例,求负载工作点时可取:

$$\Phi_r = 2B_r S_m [1 - \alpha_{Br0} - \alpha_{Br}(T - 20)] \quad (9)$$

$$F_r = L_m H_c [1 - \alpha_{Hc}(T - 20)] \quad (10)$$

式中: α_{Br0} —磁钢不可逆温度系数,对 NdFeB—30H,可取 $\alpha_{Br0} = 4\%$;

α_{Br} —磁钢可逆剩磁温度系数;

α_{Hc} —磁钢可逆矫顽力温度系数;

T —磁钢工作温度。

当温度超过一定限度时,NdFeB 磁体的退磁曲线将出现弯曲,如图 4 所示。通常工作点仍位于直线段,因此应使用等效矫顽力 H'_c ,其值可通过产品手册查得。

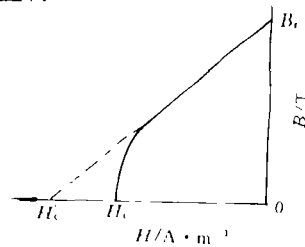


图 4 高温时 NdFeB 去磁曲线

3 磁钢工作点的求解

3.1 问题的等效

根据文献[1],求取磁钢工作点就是求解式

(1)与下式构成的方程组:

$$F = F_1 + \Phi/G_{01} \quad (11)$$

式中: G_{01} —磁钢装配气隙的磁导;

F_1 —主磁路消耗的磁势,是气隙磁通的非线性函数。

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 + G_s F_1 \quad (12)$$

式中: G_s —线性漏磁导;

Φ_0 —非线性漏磁通,是 F_1 的非线性函数。

由于 Φ_1 和 F_1 为 Φ_0 的非线性函数,因此式(1)与(11)是无法直接求解的。为此可将其归纳为一维无约束非线性优化问题进行求解,如图5所示。即求

$$\min f(\Phi_0) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } f(\Phi_0) = & F_1 + (\Phi_0 + \Phi_1 + G_s F_1)/G_{01} \\ & - [\Phi_0 - (\Phi_0 + \Phi_1 + G_s F_1)] F_1 / \Phi_0 \end{aligned} \quad (14)$$

且 F_1 及 Φ_1 均为 Φ_0 的函数。

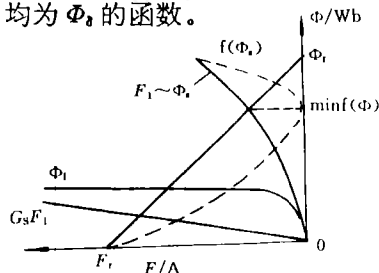


图5 问题的等效

求解上述优化问题的方法有迭代法、二分法、黄金分割法和抛物线插值法,现就其初始区间的确定及上述几种优化方法的有效性阐述如下。

3.2 初始求解区间的确定

如果初始求解区间确定不当,可能造成计算量增加或者工作点不在求解区间之内,造成计算错误。正确的方法有两种:

(1) 取 $[0, \Phi_r]$ 作为 Φ_0 的初始求解区域,则工作点必然包含在求解区域之内,但求解区域较宽,计算量略大。

(2) 取 $[0, \Phi_{01}]$ 作为初始求解区间,其中 Φ_{01} 按下列步骤求取:

$$(a) \Phi_1 = B_1 S_1 \quad (15)$$

式中: B_1 —铁芯饱和磁感应强度;

S_1 —磁桥截面积。

$$(b) F_1 = (\Phi_r - \Phi_1) / (G_0 + G_s) \quad (16)$$

式中: G_0 —气隙磁导。

$$(c) \Phi_{01} = F_1 G_s \quad (17)$$

按上述步骤求出的初始求解区间大为缩小,而且计算步骤十分简单。

3.3 循环迭代法

循环迭代法就是在确定初始求解区域以后,每次将求解区域分成若干等分,逐个比较每个点上的函数值,发现最小点后,即停止本次搜索,并将该相邻两点取为新的求解区间,进行下一轮搜索,直至满足收敛准则,程序框图如图6所示。这种方法简单直观,但循环次数较多,计算时间长。

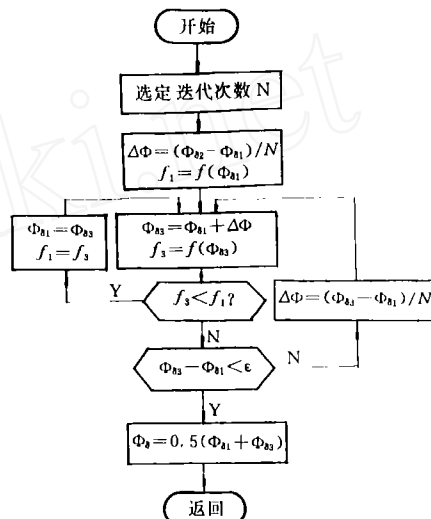


图6 循环迭代法

3.4 二分法

二分法实际上是上述迭代法中取 $N=2$ 的一种方法,它每次将搜索区间缩短一半,如图7所示。其缺点是每次搜索均需 Φ_{03} 附近的 Φ_{04} 对应的 f_4 值以求其在该点的导数 f' 。

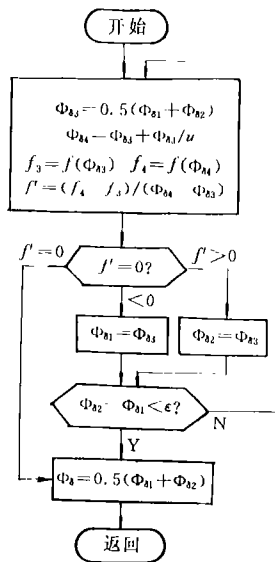


图7 二分法

3.5 黄金分割法

黄金分割法是循环迭代法中取 $N=3$ 的一种方法,分割比例正好为 $0.618 : 0.382$,程序框图

如图 8 所示。

3.6 抛物线插值法

抛物线插值法是先取初始搜索区间端点及区间内任意一点构造抛物线,并求其极值点(Φ_{04} , f_4),然后缩小搜索区间并进行下一轮插值,直至满足终止准则,程序框图如图 9 所示。其中, Φ_{04} 下式求取^[4]:

$$\Phi_{04} = \frac{(\Phi_{02}^2 - \Phi_{03}^2)f_1 + (\Phi_{03}^2 - \Phi_{01}^2)f_2 + (\Phi_{01}^2 - \Phi_{02}^2)f_3}{2[(\Phi_{02} - \Phi_{03})f_1 + (\Phi_{03} - \Phi_{01})f_2 + (\Phi_{01} - \Phi_{02})f_3]} \quad (18)$$

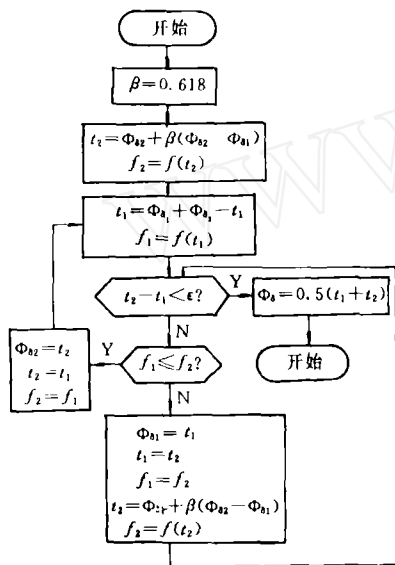


图 8 黄金分割法

4 算例

现以某 1.5kW、1000r/min 径向激磁结构的稀土永磁同步电动机为例,列出计算与实测结果。其中,表 2 是空载磁通和负载磁通使用 CAD 软件与作图法和有限元法及实测结果的对比,表 3 是几种优化方法的循环次数和计算时间的对比(计算均使用同一台 386DX33)。

表 2 计算值与实测值对比 (单位 $\times 10^{-4}$ Wb)

	CAD 软件	作图法	有限元法	实测值
空载磁通	9.25	9.83	9.58	9.44
负载磁通	5.71	5.38	5.43	5.65

(上接第 3 页)这说明计算模型的简化和单元划分是合理的。而且我们用 NLBT 耦合振子已作成了一些试用的驻波超声电动机,其运行较 LBT 型的稳定。我们将进一步改进 NLBT 耦合振子的尺寸和形状,使这种超声电动机具有高的效率和稳定性。

稀土永磁同步电机磁路计算机辅助设计

表 3 四种优化方法对比,精度 $\epsilon = 10^{-6}$

	迭代法	二分法	黄金分割法	抛物线法	有限元法
总迭代次数	86	47	36	27	/
总计算时间	3'48"	2'03"	1'30"	1'19"	31'24"

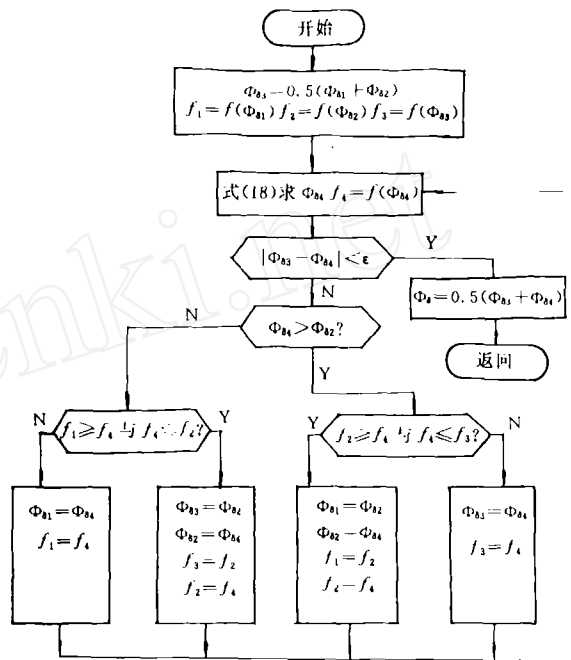


图 9 抛物线插值法

5 结论

由表 2、3 可以看出,本 CAD 软件具有较高的计算精度,而且比有限元法计算时间大为缩短,其中以黄金分割法和抛物线插值法为最优。软件考虑了不同形式磁钢的等效处理及温度的影响,且有较强的通用性。

参考文献

- 米春亭. 稀土永磁同步电动机磁路计算方法. 微电机, 1992, (3), 25
- Honsinger VB. The Fields and Parameters of Interior Type AC Permanent Machines. IEEE T-PAS, 1992, 101(4).
- Sebastian T. Modelling of Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE T-MAG, 1986, 22(5).
- 薛嘉庆. 最优化原理与方法, 冶金工业出版社, 1986.

参考文献

- 上羽贞行, 富川义朗. 新版超声波モーター. 昭和印刷社, 1991, 12.
- 周铁英, 董蜀湘, 刘呈贵. 压电超声电动机简介. 物理学报, 1991, 20(5): 298-302.
- 郑兆昌. 机械振动. 北京, 机械工业出版社, 1980.
- 王勋成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1988.