

永磁感应子式步进电动机的场路 结合算法及其工程合理性*

窦 一平

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 永磁感应子式步进电动机具有轴向和径向磁路, 结构比较复杂, 采用场路结合的计算方法比较有效. 文章介绍了场路结合算法的基本概念, 采用二维磁场有限元算法分析了场路结合法中的关键模型“齿层单元”的工程合理性. 计算分析表明, 采用场路结合算法, 数学模型简单实用, 并能满足工程计算精度的要求.

[关键词] 步进电动机, 永磁式电动机, 电磁场数值分析

[中图分类号] TM 351; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002) 01- 0005- 06

0 引言

步进电动机作为各种数字控制系统中的执行元件, 随着电力电子技术和计算机技术的发展而不断得到推广应用. 步进电动机的特点是把电脉冲信号转变为相应的机械位移, 恰好符合数字系统的要求, 其涉足的应用领域很广, 对很多工业控制系统, 包括数控机床、计算机打印系统、测试仪表等都有很重要的影响, 国内外对步进电动机的研究方兴未艾.

步进电动机有不同类型多种结构, 应用最广泛的是反应式步进电动机和永磁感应子式步进电动机(混合式电动机). 与传统的电动机相比, 其作用机理和结构有显著的区别, 传统成熟的电机分析方法与计算模型无法直接应用. 分析步进电动机的特点与困难主要有下面几点:

(1) 步进电动机的定转子齿槽效应对电机的转矩和运行性能起着很大的作用, 不能像分析传统电机那样不计齿槽效应, 仅用气隙系数来近似考虑齿槽效应的影响.

(2) 步进电动机的气隙很小, 定转子的齿磁密往往很高, 主磁路通常都很饱和, 随着定转子相对位置的改变, 同一励磁下, 饱和程度也随之改变, 是非线性系统.

(3) 步进电动机齿层部分的结构和一般的电机不同, 它是定转子双开槽结构, 定转子齿内磁场分布不均匀, 且与定转子的相对位置有关.

(4) 步进电动机的磁场边界比较复杂, 且永磁感应子步进电动机还存在永磁体产生的轴向磁通, 更增加了分析的复杂性.

由于步进电动机以上的这些特点, 长期以来, 人们只能在一些简化的条件下用路的方法进行近似求解, 从而带来了较大的误差. 随着电磁场数值计算技术的发展, 一种结合场和路各自优点而采用的场路结合计算方法得到了应用, 这种方法的特点是, 用二维电磁场数值计算解决一个齿距范围内的齿层单元磁场问题, 再将其参数和电机其它部分构成一个非线性的磁网络, 这个磁网络能够较准确地反映电机内的电磁过程.

齿层单元模型的建立和数值计算是场路结合算法的关键, 本文将对该模型的建立及其工程合理

* 收稿日期: 2001- 09- 07.

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(2000DQY0002SJ1).

作者简介: 窦一平, 1964-, 博士研究生, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 主要从事特种电机的研究.

性进行研究.

1 齿层单元计算模型

取一个定子齿距宽,在定转子齿根后某一高度作一线与槽底平行,称这样的场计算模型为“齿层单元”,如图 1 所示.齿层单元是步进电机内场的分布和变化最为复杂也最关键的区域,采用电磁场数值计算的方法,考虑了定转子齿内磁场分布不均匀及变化的情况及材料的非线性,较准确地计及了饱和效应,使计算既简便又精确.齿层单元计算模型的两个基本假定条件为:

- (1) 认为定转子铁芯齿根后的 AB 和 CD 线为等位线.
- (2) 不计定子磁极两侧的边缘效应,即认为定子极下各个齿的磁场情况相同.

如图 1 所示的齿层单元, u_s 和 u_r 分别为定转子铁芯齿根后等位线的标量磁位值,齿层磁压降 F 为:

$$F = u_s - u_r \quad (1)$$

若设单位轴向厚度铁芯一个齿距内的磁通为 $\Phi(\alpha)$, α 为定转子齿的相对位置角,则齿层比磁导 G 为:

$$G = \frac{\Phi(\alpha)}{F} \quad (2)$$

显然, G 与磁位降 F 和铁芯饱和程度有关,并随位置角 α 而变.

齿层比磁导 G 用磁场数值算法求出,求解的区域为图 1 中的 $ABCD$ 区域,其中 AB 、 CD 线为等磁位线, AC 、 BD 线满足周期性边界条件,即认为磁场分布每经一个齿距而重复.整个求解区域内的磁场为无旋场,在直角坐标系中,齿层单元的场定解问题如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial y}) = 0 \\ \varphi|_{CD} = 0 \\ \varphi|_{AB} = F \\ \varphi(x, y)|_{AC} = \varphi(x + \lambda, y)|_{BD} \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ 为标量磁位; μ 为磁导率; λ 为齿距.

对一定的位置角 α , 给定若干个 F , 用有限元法求出不同 α 和 F 时场的位值分布和各剖分单元的场量 B 和 H , 从而求出齿层的磁共能和比磁导, 单位轴向厚度铁芯的磁共能 W'_f 为:

$$W'_f = \sum_{k=1}^{k_2} \int_0^{H_e} S_e B_e dH + \frac{1}{2} \sum_1^{k_1} \frac{S_e B_e^2}{\mu_0} \quad (4)$$

式中: B_e 、 H_e 为三角单元 e 的磁密、场强; S_e 为单元 e 的面积; K_1 、 K_2 为空气媒质最后单元编号和总单元编号.

单位轴向厚度齿层磁通表达式为:

$$\Phi(\alpha, F) = \sum B_e \overline{(jm)_e} \quad (5)$$

式中: e 为节点 j 、 m 在 AB 边界上的单元; $\overline{(jm)_e}$ 为节点 j 、 m 在边界 AB 上的单元 e 的边长.

比磁导 G 用于整个电机的非线性磁网络方程的求解, 而磁共能则用于以后电机总磁共能和电磁转矩的计算.

2 论证齿层单元合理性的数学模型

步进电动机场路结合算法的基本数学模型是“齿层单元”, 该单元虽然简单, 却包含了一些近似因数, 齿层单元模型是在一些基本的假定条件下建立的, 这些假定条件是否和实际相符合, 产生的误差是

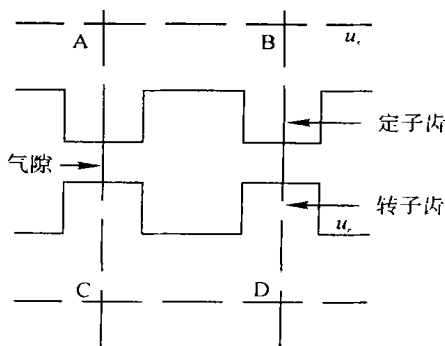


图 1 齿层单元

否可以从工程的角度忽略不计, 即基本假定条件是否具有工程合理性, 这是本文重点要研究的问题. 以下将针对上节提出的两个基本假定条件进行分析.

本文选择了一台实际的感应子式步进电动机样机进行分析, 该样机定子有 8 个极, 6 段转子铁芯, 3 块 AlNiCo_5 磁钢, 磁钢轴向充磁. 样机的主要结构参数如表 1 所示:

表 1 样机的主要结构参数

定子总极数	定子每极齿数	定子铁芯外径	定子铁芯内径	机壳外径	定子铁芯长
8	5	101.80/mm	59.36/mm	106.52/mm	110/mm
转子齿数	转子每段长	每相绕组匝数	磁钢外径	磁钢内径	磁钢长度
50	15.26/mm	21	42/mm	17.4/mm	16.56/mm

根据电机的对称性, 本文选择半个极距的区域作为电磁场数值计算的剖分场域(如图 2 所示), 该场域包含了定转子非线性的铁芯材料和励磁电流区域. 考虑到了定子的磁极边缘效应和定转子铁芯表面圆弧曲率的影响. 求解图 2 的场域, 计算出定转子齿根后一系列平行线上的标量磁位的实际分布以及误差大小, 就可以说明齿层模型基本假定条件的工程合理性. 图 2 所示的场域, 电流只有轴向分量, 矢量磁位 A_z 满足准泊松方程, 边值问题如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial y}) = -J_z, & \text{域内 } ABCDA \\ A_z = 0, & \text{折线 } CDAB \\ \gamma \frac{\partial A_z}{\partial n} = 0, & \overline{BC} \end{cases} \quad (6)$$

式中: J_z 为电流密度; γ 为磁阻率; n 为 \overline{BC} 的法线方向.

用二维有限元法求解方程(6), 这里仅作为一个计算方法和工具加以应用. 求出矢量磁位 A_z 后, 便可以求出单元的场量 B 、 H , 公式如下:

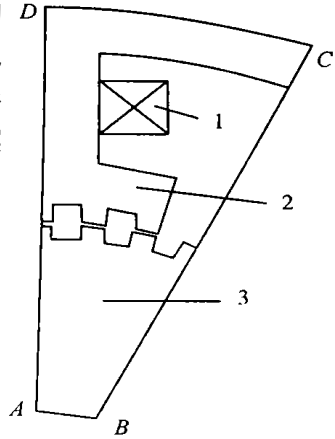
$$\begin{cases} \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{b_i A_{zi} + b_j A_{zj} + b_m A_{zm}}{2\Delta} \\ \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{c_i A_{zi} + c_j A_{zj} + c_m A_{zm}}{2\Delta} \\ B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δ 为剖分的三角单元面积; $b_{i,j,m}$ 和 $c_{i,j,m}$ 为剖分单元的单元信息参数.

在齿根后不同的高度作与齿根平行的几组线, 其线上的标量磁位 φ 可以用积分的方法求出:
$$\begin{cases} H = \gamma B \\ \varphi = \varphi_0 + \int_e \vec{H} \cdot d\vec{l} \end{cases} \quad (8)$$

3 数值计算结果分析

图 2 是定转子齿对齿的情况, 是可能出现最大饱和现象的位置, 这种情况下得出的等位线结论适合其它位置角的情况, 本文在微机上用自编的程序对不同电流密度即不同饱和程度下的场进行了计算, 图 3 是电流密度为 1 000



1- 电流域; 2- 定子铁芯
3- 转子铁芯
图 2 剖分场域

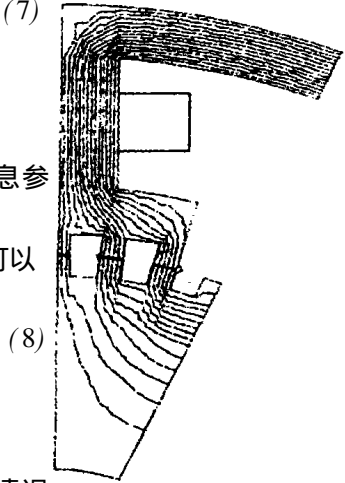


图 3 $J = 1000/(\text{A}/\text{cm}^2)$ 时
磁力线分布图

(A/cm²) 时的磁力线分布图. 下面将分别从等位线、磁密和磁通等方面来分析基本假定条件的合理性.

3.1 等位线的分析

图 2 中, 分别在定转子齿根后作一系列平行于齿根的线, 在每根线上取若干点, 以每根线上各点磁位的平均值为等位线磁位标称值, 计算各点磁位和标称值的差值, 以说明这些线为等位线的误差. 计算结果表明:

定子方面, 线距齿根越近, 则线上磁位差值越大, 而越接近极身底部, 则差值越小. 这是可以理解的, 从图 3 可以看出, 通过极身的磁力线几乎是平行于极中心线的, 而等标量磁位线是与磁力线相垂直的, 故极身部分的等标量磁位线都几乎与槽底平行. 设齿根后某一平行线上的最大差值为 $\Delta \varphi_m$, 标称磁位为 φ_m , 相对差值为 $\varepsilon = \Delta \varphi_m / \varphi_m$, 经过计算, 在齿根后 1 倍定子齿高的线上, $\varepsilon < 1.5\%$, 认为该线为等位线, 在工程上是合理的. 取齿根后大于 1 倍定子齿高的线, 其相对误差更小, 但场的区域变大, 场的数值计算工作量也将增加.

转子方面, 经过计算, 在转子齿根后 1 倍齿高处的线上, 不同磁饱和程度下, 其相对差值 $\varepsilon < 1\%$, 且距齿根越远, 相对差值越小.

根据上面的计算分析, 大于定转子齿根后 1 倍齿高处的平行线可以认为是等磁位线, 前面假定条件(1) 是合理的. 一般工程计算, 可以取 1 倍定转子齿高处作平行线构成齿层单元.

3.2 磁密的分析

图 4 是定转子齿部的局部图, 分别在极中部和极边缘取 4 个局部对应单元, 比较极中部与极边缘的齿磁密的大小, 分析前面假定条件(2) 的合理性.

设两部分对应磁密的差值为, $\Delta B = |B_n - B_n'|$, 相对差值为 $\varepsilon = \Delta B / B_{av}$, B_{av} 为对应单元磁密的平均值. 取不同的电流密度计算, 结果见表 2.

从表 2 中可以看出, 中部和边缘磁密的相对差值不大于 3.0%, 因此可以近似认为定子极下各个齿的磁场分布相同, 这样就可以把求解场域减小到一个齿距的范围, 认为磁场分布每经一个齿距而重复, 即前面假定条件(2) 是合理的.

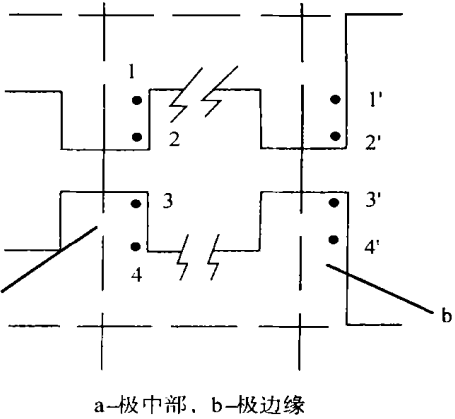


图 4 定转子齿局部磁密比较图

表 2 局部磁密的比较				单位: 电流密度 $J/(A/cm^2)$, 磁密 $B(GS)$	
单元标号	J	250	800	1000	2 000
1	B	7 681. 43	14 142. 81	14 656. 16	17 216. 76
	B'	7 863. 67	14 366. 24	14 691. 43	17 278. 78
	$\gamma(\%)$	2. 3	1. 6	0. 24	0. 36
2	B	7 612. 35	13 875. 90	14 394. 98	16 976. 04
	B'	7 655. 30	13 754. 86	14 324. 00	16 823. 44
	$\gamma(\%)$	1. 5	0. 88	0. 49	0. 9
3	B	7 315. 59	13 249. 36	13 746. 94	16 241. 41
	B'	7 285. 41	13 032. 98	13 571. 10	15 950. 06
	$\gamma(\%)$	0. 02	1. 6	1. 3	1. 8
4	B	7 765. 21	14 111. 36	14 622. 71	17 191. 00
	B'	7 737. 78	13 749. 16	14 298. 61	16 695. 68
	$\gamma(\%)$	0. 4	2. 6	2. 2	2. 9

3.3 磁通的分析

用场路结合法计算步进电动机时, 需要计算每极磁通量, 按假定条件(2), 不计边缘效应时的计算公式为:

$$\Phi = Z_s \times \Phi_0 \quad (9)$$

式中: Φ 为每极磁通; Z_s 为每极定子齿数; Φ_0 为一个齿层单元的磁通. 由此每极齿层磁导 Λ 可以用以下公式计算:

$$\Lambda = Z_s \times l \times G \quad (10)$$

式中: l 为铁芯长度; G 为比磁导.

现把用公式(9) 算出的结果与解算图 2 场的每极磁通值进行比较, 结果如表 3.

表 3 中, Φ_A 为通过极中部一个齿距范围,

单位铁芯迭厚的磁通; Φ_B 按公式(9) 计算的每极磁通; Φ_C 为用矢量磁位解场得出的每极磁通; Φ_D 为极边缘漏磁通; Φ_E 通过极身的每极磁通; γ 为相对差值: $\gamma = |\Phi_C - \Phi_B| / \Phi_E$.

从表 3 中看到, 极边缘的漏磁通占总磁通的比重很小, 不超过 2. 5%, 因此极边缘的漏磁通可以忽略不计; 用公式(9) 计算的相对差值小于 1%, 在工程要求的误差范围内.

通过等位线、磁密和磁通的计算分析, 可以说齿层单元模型能满足工程计算的精度要求, 是合理的.

4 其它参数的计算

场路结合的计算方法是先对齿层单元进行磁场数值计算, 求出齿层比磁导参数 G , 然后, 将 G 和整个电机磁路的其它部分一起, 构成一个非线性磁网络模型, 在这个模型中的其它部分, 用集中参数的磁路考虑, 最后通过求解整个磁网络来计算电机的特性.

磁网络参数包括磁导和磁势源, 除齿层单元外其它部分的磁导 G_i 的计算和一般电机一样, 分为线性磁导和非线性磁导两部分, 计算公式为:

$$G_i = \mu_i \frac{A_i}{l_i} \quad (11)$$

式中: μ_i 为磁导率, 线性磁路部分 μ_i 为常数, 非线性磁路部分的 μ_i 要通过求解非线性磁网络方程来确定; A_i 为磁路有效截面积; l_i 为磁路计算长度.

磁势源包括每极电励磁绕组的集中磁势源和永磁体的等效磁势源. 每极电励磁绕组的磁势 F_i 为:

$$F_i = N \times I_i \quad (12)$$

式中: N 为每极每相绕组匝数; I_i 为第 i 相的电流.

永磁体的等效磁势 F_m 为:

$$F_m = H_c \times l_m \quad (13)$$

式中 H_c 为永磁材料去磁曲线的等效磁感应矫顽力; l_m 为永磁体磁化方向的有效长度.

5 结论

根据以上的分析, 我们可以得出下面的结论:

①取一个定子齿距范围的场域, 分别在定转子齿根后一个齿高处作平行线, 可以认为该平行线为等磁位线. ②定子极下各个齿的磁场分布情况可以认为相同. ③每极磁通可以用式(9) 计算, 由此每极齿层磁导可以用公式(10) 计算, 为以后的磁网络构成和计算打下了基础. ④齿层单元用场的数值计算来求参数, 而其它部分用路的方法求参数. 这种场路结合的方法, 把场的计算精确性和路的计算简明性结合在一起, 计算方法简单, 计算工作量小, 并能满足工程计算的误差精度要求, 是分析计算步进电动机的有效方法.

表 3 磁通值的比较

单位: 磁通 $\Phi(\text{Mx})$

$J/(A/\text{cm}^2)$	250	800	1000	2000
Φ_A	1 344. 93	2 415. 58	2 516. 40	2 978. 52
Φ_B	6 724. 65	12 077. 88	12 582. 01	14 892. 59
Φ_C	6 617. 02	11 828. 41	12 329. 60	14 555. 77
Φ_D	152. 70	277. 63	293. 45	377. 81
Φ_E	7 128. 27	12 771. 09	13 346. 27	15 982. 23
Φ_D / Φ_E	2. 14%	2. 17%	2. 2%	2. 36%
γ	0. 63%	0. 22%	0. 31%	0. 26%

[参考文献]

- [1] 哈尔滨工业大学, 成都电机厂. 步进电动机[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 陈丕璋. 电机电磁场理论与计算[M]. 北京: 科技出版社, 1986.

On The Calculation Model and Its Engineering Rationality of Permanent Magnet Induction Stepping Motor

Dou Yiping

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The permanent magnet induction stepping motor is complicated in structure with the axial and radial magnetic circuits made. The more effective method for the calculation is to combine the magnetic field with the magnetic circuit. The basic idea on the method is discussed in this paper. The key calculation model of the method, the Tooth Layer Unit, and its engineering rationality are analyzed with the 2-D finite element algorithm adopted. The result shows that the method is simple and practicable and that the calculation model can meet the precision requirements in engineering.

Key words: stepping motor, permanent magnet motor, electrical and magnetic numerical algorithm

[责任编辑: 刘健]

(上接第4页)

The Model of Distance and Position Sensor Based on Inverse Study

Liu Qing

(College of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, PRC)

Abstract: The paper introduces a new method to build the inverse module for the non-linear sensors by inverse study. The method involves a linear table composed of input samples and its desired outputs of a sensor. The position of the measured point is calculated inversely from the table in conjunction with table searching and value insertion. The module can improve the precision of the measurement system and correct the non-linearity of the sensors effectively.

Key words: non-linear, inverse study, inverse output, linear table, value insertion, error

[责任编辑: 刘健]