

一种基于场路结合计算模型的 步进电动机优化设计方法

窦一平

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 提出一种步进电动机的优化设计方法, 在步进电动机的场路结合计算模型基础上, 采用正多面体的优化方法, 对一台永磁感应子式步进电动机样机进行了齿层尺寸的优化设计. 计算和实测表明, 此种方法适合于在工厂工程实际中应用.

[关键词] 步进电动机, 优化设计, 场路结合

[中图分类号] TM302, [文献标识码] A, [文章编号] 1672- 1292(2003)03- 0011- 05

0 引言

采用场路结合的计算模型是目前分析步进电动机比较有效的方法, 通过事先对齿层单元的电磁场数值计算, 可以建立起齿层单元的电磁参数数据库, 这样可以使整个步进电动机的分析计算过程大大简化. 所谓齿层数据库是对一些常用导磁材料, 取一系列齿层尺寸的不同组合, 按确定的若干定转子齿距角, 对齿层部分场域进行大量场的数值计算, 计算出相应的比磁导和比磁能, 集合而形成齿层数据库. 有了数据库就可以在用场路结合的计算模型计算步进电动机时, 不必再进行局部场域的大量场计算, 而只要按给定材料、齿层尺寸和齿距角, 利用数据库进行插值计算, 就可以得到相应的比磁导和比磁能, 从而使计算简化成对磁网络的求解, 使计算工作量大大减小. 正多面体法属于优化方法中的直接法, 它具有直观、简单并能保证顺利达到优化点等特点, 本文将上述手段用于步进电动机的优化设计, 可以使设计变得快速、直观、简单和易于实现, 因而适合于在工厂工程实际中应用.

1 优化计算模型

1.1 优化变量

步进电动机“齿层单元”的磁场变化对电机静转矩的大小起着主要作用, 在其它因素相同的条件下, 合理的齿层尺寸将有益于静转矩的提高. “齿层单元”如图1所示, 计算步进电动机的静转矩首先要解决的问题是计算“齿层单元”的齿层比磁导和齿层比能量数据, 即通过对“齿层单元”二维非线性场的数值计算, 求出齿层比磁导和齿层比能量与定转子齿距角 θ 和齿层磁压降 u 的函数关系, 然后通过求解电机的非线性磁网络来计算静转矩, 这就是所谓的场路结合计算模型.

从图1可以看出, 如果取基准值为一个齿距长度 t , 并采用标么值, 则“齿层单元”有3个独立的结构尺寸, 分别为气隙长度 g , 齿宽 b 和齿高 h . 本文按工厂的要求, 齿层部分的气隙尺寸标么值取为 $g^* = 30^{-1}$, 把标么值 b^* 和 h^* 作为优化变量, 变量取值的约束范围是根据大量已经生产的产品统计数据所得出的经验范围, 该范围也是齿层数据库中齿层单元尺寸的取值范围.

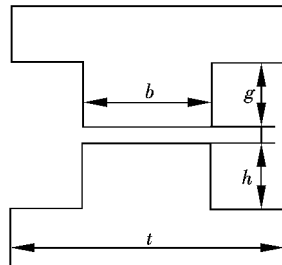


图1 $\theta=0$ 时齿层单元示意图

收稿日期: 2003- 03- 17.

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(00KJD47001).

作者简介: 窦一平, 1964-, 工学博士, 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.

在铁磁材料和电机的结构尺寸一定的情况下,对有限个齿距角 θ 和齿层磁压降 u ,通过二维电磁场的数值计算可以求出在该材料和尺寸时的齿层比磁导和比能量数据,再结合非线性磁网络的计算模型就可以求出电机的静转矩.这种计算方法适合于对已有电机或某个设计方案进行电磁核算,而要对方案进行优化设计,仅仅计算特定的齿层比磁导和比能量显然是不够的.本文采用的方法是先对一系列不同尺寸的“齿层单元”在不同齿距角时进行电磁场的数值计算,建立起“齿层单元”齿层比磁导和比能量的数据库,以后进行静转矩计算时,就不必再进行场的计算了.可以应用这样的数据库,通过插值的方法得到不同齿层尺寸的比磁导和比能量的数据,这样,不仅大大节约了计算时间,也使步进电动机的优化设计成为可能.图2是对样机“齿层单元”进行二维电磁场数值计算的两个不同齿距角的磁场等位线分布图.

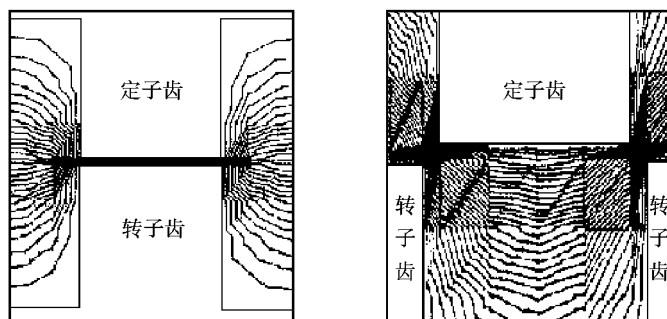
(a) $\theta = 0, u = 180 \text{ A}$ (b) $\theta = \pi, u = 180 \text{ A}$

图2 电磁场数值计算的齿层单元等位线分布图

在优化设计的搜索寻优过程中,齿层尺寸不断变化,因而齿层比磁导和比磁能曲线也不断变化,有了齿层数据库,只要在优化程序中采用插值的方法,就可以随时计算出变化着的齿层尺寸所对应的齿层电磁参数和相应的基波静转矩.

1.2 目标函数

本文选择一定电流下的基波最大静转矩作为目标函数.目标函数的选取是这样考虑的,首先,因为齿层尺寸的变化相对整个电机其它尺寸是很小的,这种变化对重量和惯量等影响可以忽略不计,对电机价格的影响也很小,但这种变化对电磁转矩却有不容忽视的影响;第二,最大静转矩值是步进电动机的一项基本技术指标,在通常的设计中,它在很大程度上决定了步进电动机运行性能的好坏;第三,步进电动机的实际矩角特性,多少接近正弦波,因而实际最大静转矩的值与它的基波分量最大值差别不大.基波最大静转矩的值可以方便地由静转矩的平均值求取,而静转矩的平均值则从磁共能随转角的变化求出.齿距角 θ 从0到 π 的磁共能变化为:

$$\Delta W = W_{\pi} - W_0 \quad (1)$$

其中 W_{π} 和 W_0 分别为对应齿距角为 π 和0时电机的总磁共能.齿距角的增量用机械角度表示为:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{Z_r} \quad (2)$$

其中为 Z_r 为转子齿数,则平均静转矩 T_{av} 为:

$$T_{av} = \frac{\Delta W}{\Delta\theta} \quad (3)$$

基波最大静转矩 T_{max} 为:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} T_{av} \quad (4)$$

本文采用了场路结合的数学模型来计算步进电动机最大静转矩,场路结合的数学模型结合了场和路各自的优点,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,对通常的齿层尺寸范围和材料,先计算出相应的齿层比磁导和比磁能数据,再将齿层单元的磁导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,通过求解磁网络便可以计算出电机的特性.有关场路结合的数学模型详细内容将另文介绍(参见文献[2]).

1.3 优化数学模型

本文选择通常步进电动机设计的齿层尺寸范围作为优化变量的约束界限, 该范围也是齿层数据库的变量取值范围. 设目标函数为:

$$F = -T_{\max} \quad (5)$$

则原来的最大值问题就转化为最小值问题了. 整个电机的优化数学模型为:

$$\begin{cases} \min [F(b^*, h^*)] \\ 0.3 \leq b^* \leq 0.48 \\ 0.4 \leq h^* \leq 0.8 \\ g^* = 30^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

2 正多面体优化方法

正多面体法的思想来自多因素选优方法中的模式法, 是由正规单纯形法经过一些改进而来, 特点是使用方便、收敛速度快和容易顺利达到最优. 简单地说, 正多面体法就是利用了一个 N 维欧氏空间中的多面体, 让它按一定规则移动、翻转和收缩, 去解决各种类型的优化问题, 包括具有普遍意义的带约束的非线性最优化问题. 电机的优化设计就属于这一类非线性优化问题, 和通常人们熟悉的序列无约束优化方法相比, 正多面体法是直接处理约束, 并利用约束条件控制最优点的搜索, 因而正多面体法是一种适合于步进电动机的优化设计方法.

2.1 正多面体法

正多面体即二维平面中的正三角形, 三维空间的正四面体, 在 N 维欧氏空间推广, 正多面体的中心称为形心, 它与各顶点之间的距离相等, 正多面体的顶点个数等于维数 $N + 1$. 把满足约束条件的变量集合称为可行域, 正多面体法就是先在可行域内(包括边界上)选择一点 A_0 作为初始形心, 其对应的目标函数为 F_0 , 选择一个适当的长度 l 作为初始边长, 按一定的顶点计算公式, 确定一个 N 维欧氏空间(N 为设计变量数)中以 A_0 为形心, l 为边长的初始正多面体, 然后将正多面体在 N 维欧氏空间中按一定规则变动, 包括平移、翻转和收缩, 每次变动就是进行一次优化点的搜寻. 正多面体的变动满足下列条件:

- (1) 变动过程中正多面体的性质不变.
- (2) 正多面体的形心作为逼近最优点的动点, 必须始终落在可行域内.
- (3) 每次形心的移动, 形心的目标函数都在减小.

上述条件保证了正多面体的特点. 正多面体的基本搜索规则如下:

2.1.1 平移

先找出正多面体顶点函数值中最好的顶点 A_m , 其函数值为 F_m , 若 F_m 小于 F_0 , 则沿 A_0A_m 方向进行一维搜索, 寻找可行域内比 A_m 更好的点 A_m' ; 如果没有比 A_m 更好的点, 则令 $A_0 = A_m$, $F_0 = F_m$, 并以 A_m 为新的形心, 将原来的正多面体沿 A_0A_m 方向平移, 形成一个新的正多面体, 为下一次搜索作准备. 图 3 是二维空间的平移示意图.

若 F_m 大于 F_0 , 说明当前正多面体各个顶点都不是下降方向的点, 这时改用第 2 种搜索规则.

2.1.2 翻转

正多面体的翻转是指相对某一顶点 A_u 的翻转, 就是除该顶点 A_u 外的所有其它 N 个顶点均不动, 将 A_u 的关于其它 N 个顶点决定的超平面(广义的平面, 二维中指直线)的对称点 A_w 来代替 A_u , 形成一个新的正多面体. 这个新正多面体的形心 A_n 称为翻转前的那个正多面体的旁心, 显然, $N + 1$ 个顶点的

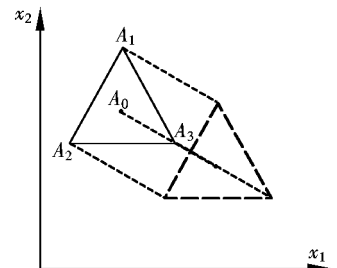


图 3 二维空间的平移

正多面体有 $N+1$ 个旁心, 可以有 $N+1$ 种不同的翻转. 图4是二维空间的翻转示意图.

为了确定最理想的翻转方向, 首先要在所有可行的旁心中找一个函数最小的旁心 A_n , 其函数值为 F_n . 若 F_n 小于 F_0 , 则进行翻转, 使 A_n 成为新正多面体的形心, 且令 $A_0 = A_n$, $F_0 = F_n$. 若 F_n 大于或等于 F_0 , 或者旁心不落在可行域内, 则进行第3种基本搜索.

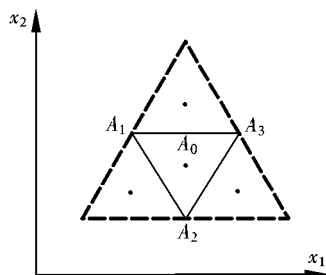


图4 二维空间的翻转

2.1.3 收缩

将正多面体的各顶点向形心收缩移动相同的距离, 使正多面体的边长按一定比例缩小, 即令 $l = l^* \lambda$, λ 为比例因子, 满足 $0 < \lambda < 1$, 这样形成了新的正多面体, 并准备平移.

反复施行上述3种基本策略, 使正多面体的形心逐步逼近最优.

正多面体搜索的终止条件有以下3种:

- (1) 当两次变动的目标函数值之差小于给定的精度时, 终止搜索, 并认为已经搜索到最优.
- (2) 当正多面体逐渐缩小, 边长 l 小于给定的精度时, 终止搜索, 并认为已经搜索到最优.
- (3) 人为控制正多面体变动次数, 当变动次数大于给定值时, 终止搜索, 这样可以避免无限次的迭代.

2.2 齿层尺寸优化程序流程

本文应用上述的正多面体方法, 在步进电动机的场路结合数学模型基础上, 编制了相应的齿层尺寸优化程序, 并对文献[1]提到的一台永磁感应子式步进电动机样机进行了优化计算, 优化计算的数学模型如式(6)所示, 计算程序的流程简图如图5所示.

3 实例计算结果

本文在一相通电, 绕组电流为 6.1 A 时, 分别选取了两组齿层尺寸初始值来进行优化设计, 计算结果如表1所示. 第一次取初始值为 $b^* = 0.45$, $h^* = 0.45$, 得到的优点方案最大静转矩为 75.8859 kg·cm, 第二次取初始值为 $b^* = 0.38$, $h^* = 0.5$, 得到的优点方案最大静转矩为 76.1068 kg·cm, 优点方案都比初始方案和原样机方案的最大静转矩大. 要说明的是, 本文优化得到的方案, 是在气隙标么值 $g^* = 30^{-1}$ 下的结果, 这一数值是根据工厂工艺要求选取的, 比原样机的实际值大, 本文没有对气隙加以优化, 否则, 计算的最大静转矩还可能提高.

样机经过了实验验证, 计算与实测的比较以及与优化方案的比较如表1所示, 计算和实测的相对误差为 4.4%, 满足工程精度要求; 从表1可以看出, 静转矩实测值要大于计算值, 这是因为计算值是基波最大值, 而实测的是实际最大值.

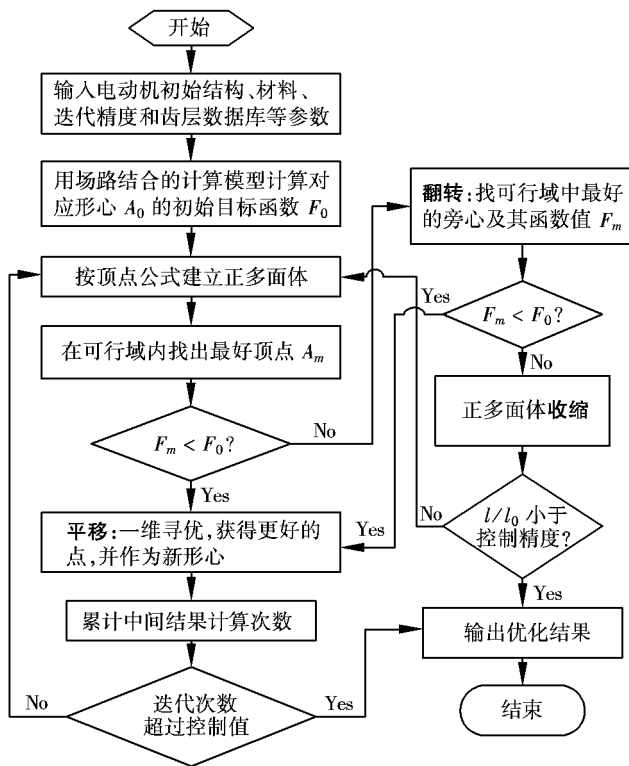


图5 齿层尺寸优化程序流程简图

表 1 原样机计算和实测以及不同齿层尺寸方案的比较

方案说明	b^*	h^*	g^*	$T_{\max}/(\text{kg} \cdot \text{cm})$
原样机计算	0.4032	0.3871	0.0282	72.0622
原样机实测	0.4032	0.3871	0.0282	75.3800
初始值方案 1	0.4500	0.4500	0.0333	61.5191
优化方案 1	0.3669	0.4020	0.0333	75.8859
初始值方案 2	0.3800	0.5000	0.0333	74.4316
优化方案 2	0.3891	0.4048	0.0333	76.1068

另外,在不同的齿高、齿宽比下,得到的静转矩值相差很大,表 1 中“优化方案 2”和“初始值方案 1”的静转矩差值达到 $14.59 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, 约占最优方案值的 19%, 因此合理选择齿层尺寸对步进电动机的设计具有重要意义.

4 结束语

目前, 虽然对电机的电磁场数值分析已较为成熟, 但对于工厂工程实际, 要同时进行复杂的场的数值计算和大量方案比较的优化设计还很困难. 建立步进电动机场路结合的计算模型, 使得在满足工程精度要求的前提下进行优化设计成为可能. 正多面体方法是一种行之有效的优化方法, 本文提出的基于场路结合的步进电动机优化设计方法, 对于工厂工程实际具有实用的意义.

[参考文献]

[1] 窦一平. 永磁感应子式步进电动机的场路结合计算法及其工程合理性[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2002, (1): 5~ 10.
[2] 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.

Optimum Design Method on the Basis of the Calculation Model
Combining Field with Circuit of Stepping Motor

Dou Yiping

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

Abstract: On the basis of the calculation model combining field with circuit of the stepping motor, an optimum design method has been presented in this paper. An optimum algorithm with regular polyhedron has been used in the method to design the size of the tooth layer unit of the prototype motor. The test and the calculation results show that the method can be applied to the engineering in the factory.

Key words: stepping motor, optimum design method, combination of field with circuit

[责任编辑: 严海琳]