

永磁无刷直流电机的转矩计算及 结构参数对转矩的影响

王凤翔, 郑柒拾

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 电磁转矩的准确计算对于电机及其控制系统的设计具有重要意义。本文以 ANSYS 软件为工具, 分析了永磁无刷直流电机不同定子结构对于转矩的影响, 论述了消除转矩脉动和提高电机输出的策略。

关键词: 永磁直流电机; 转矩计算; 结构

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1007-449X(2001)02-0107-04

Torque calculation of PM brushless DC motor and influence of structure parameter on torque

WANG Feng-xiang, ZHENG Qi-shi

(Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: Accurate calculation of electromagnetic torque has great significance for design of motor and its control system. The influence of different stator and rotor structures on the torque of PMDC brushless motor is analyzed by means of ANSYS software, and the strategy of minimizing torque pulsation and increasing output is discussed.

Key words: PMDC motor; torque calculation; structure

1 引言

永磁无刷直流电动机凭借其出力大、效率高和控制方便等优点, 应用范围不断扩大。舰艇推进器驱动系统、高精度数控机床伺服系统、生物医学工程中的人工心脏磁悬浮无轴承血泵电机驱动系统等, 不仅要求电机效率高和出力大, 而且要求转矩脉动小、噪声低和转动平衡, 这就对永磁无刷直流电机的设计提出了更高的要求。影响电机出力和效率, 特别是影响电机转矩脉动的因素很多, 而分析那些因素对电机性能的影响, 首先还得解决电机动态转矩的准确计算问题。显然, 电磁转矩的准确计算必须以磁场分析为基础。ANSYS 是一个近年来在国内外有较大影响的多功能有限元数值分析软件, 具有极强

的前后处理功能, 不仅可用于电机的电磁场分析, 而且可用于多种耦合场的分析计算。本文借助于 ANSYS 软件, 计算分析电机不同定子结构对转矩的影响, 论述消除转矩脉动及提高电机输出的策略。

2 基于 ANSYS 的转矩计算

旋转电机的电磁转矩等于电机转子表面承受的切向力与转子半径的乘积, 因此电磁转矩的计算实质上是电磁力的计算。

基于磁场分析的电磁力计算方法一般有三种^[1]。即罗伦兹力 (Lorenz Force) 法, 麦克斯韦应力张量 (Maxwell Stress Tensor) 法和虚位移 (Virtual Work) 法, 其中麦克斯韦应力张量法和虚位移法应用较为广泛。ANSYS 软件也重点提供了这两种电磁力的计

收稿日期: 2000-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59977014)

作者简介: 王凤翔 (1938-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为电机及其控制, 变流器供电系统检测与控制技术。

郑柒拾 (1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制, 变流器供电系统检测与控制技术。

算方法^[2]。

在二维磁场分析时可环绕电机转子表面取一薄的均匀气隙带,并沿径向进行均匀剖分以获得形状和面积相同的气隙单元。在用 ANSYS 进行磁场分析后,各气隙单元的磁通密度为已知,根据麦克斯韦应力张量法,电机转矩的计算式为

$$T_e = \frac{1}{\mu_0} \sum_{i=1}^n r^2(i) B_{\theta}(i) B_r(i) d_{\theta} \quad (1)$$

式中: $B_{\theta}(i)$ 和 $B_r(i)$ 分别为气隙第 i 个单元磁通密度的切向和径向分量; $r(i)$ 为第 i 个气隙单元的旋转半径; $d_{\theta} = 2\pi/n$ 为每个单元所占的机械角度; l 为电机铁心的轴向长度。

采用 ANSYS 虚位移法计算电磁力和电机转矩非常方便。如同麦克斯韦应力张量法,首先要确定需要计算区间的边界单元。如果计算铁心表面受力,需在铁心周围建立一层薄的均匀气隙单元带。在磁场计算前需要在电磁力计算区间界面设置磁虚位移标志。

如图 1 所示,在被求解铁心区内的节点设定 $MVDI=1$,而在区外单元的各节点上设置 $MVDI=0$ 。在磁场计算过程中不需要真正对铁心表面边界作移动,ANSYS 在进行磁场计算中根据上述磁虚位移标志的设置可同时将铁心表面各气隙单元的电磁力分量 $FMVX$ 和 $FMVY$ 求出。在后处理/POST1 中电机的电磁转矩的计算式为

$$T_e = l \sum_{i=1}^n [FMVX(i) \sin(\theta) - FMVY(i) \cos(\theta)] r(i) \quad (2)$$

式中: $FMVX(i)$ 和 $FMVY(i)$ 分别为气隙第 i 个单元 x, y 方向的磁分力; $r(i)$ 和 θ 分别为该单元距轴心的旋转半径和径向位置角坐标; n 为气隙带圆周上的总单元数; l 为电机铁心的轴向长度。

上述电磁转矩的计算是以气隙单元磁通密度和磁场强度的准确计算为基础的,为了提高转矩的计算精度,减小定子槽口和转子极尖等处局部磁场计

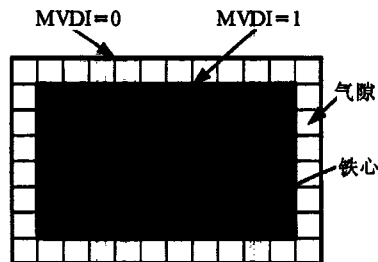


图 1 采用 ANSYS 进行虚位移法计算时虚位移标志 (MVDI) 的设置

Fig. 1 Setting of virtual displacement flag (MVDI) for ANSYS calculation

算误差的影响,在用虚位移法和麦克斯韦应力张量法时,电机气隙沿径向要多剖分成足够多的均匀单元。

3 减小电机转矩脉动的方法

减小转矩脉动是永磁无刷直流电机设计需要解决的难题。下面具体分析影响电机转矩脉动的因素,从中找出消除转矩脉动的有效方法。

3.1 采用磁性槽楔或闭口槽

采用磁性槽楔就是在电机的定子槽口涂压上一层磁性槽泥,固化后形成具有一定导磁性能的槽楔。磁性槽泥的主要成分是高纯度铁粉和高粘度树脂,其相对于空气的磁导率一般为 $2 \sim 5$ 。磁性槽楔减小了定子槽开口的影响,使定子和转子间的气隙磁导分布更加均匀,从而可减小由于齿槽引起的转矩脉动。图 2 是用虚位移法计算出的电动自行车用永磁无刷直流电机空载时的电机静转矩曲线。可以看出,采用磁性槽楔后转矩脉动明显减小。然而由于磁性槽楔材料导磁性能不是很好,因而对于转矩脉动的削弱程度有限。

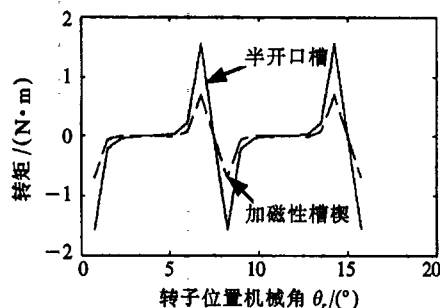


图 2 磁性槽楔对转矩脉动的影响
Fig. 2 Influence of magnetic slot wedge on torque pulsation

采用闭口槽即定子槽不开口,槽口材料与齿部材料相同。因槽口的导磁性能较好,故闭口槽比磁性槽楔能更有效地消除转矩脉动。半开口槽与闭口槽电机空载转矩脉动的对比如图 3 所示。闭口槽虽然

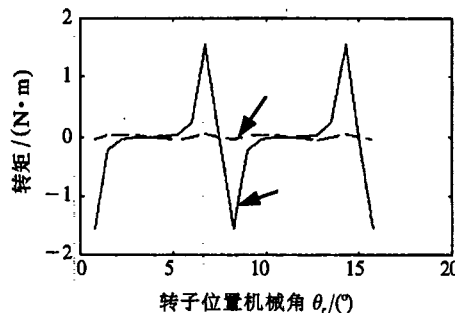


图 3 闭口槽对转矩脉动的影响
Fig. 3 Influence of close slot on torque pulsation

可消除转矩脉动,然而却给绕组嵌线带来极大不便,大量生产的电机难以采用闭口槽。同时采用闭口槽后大大增加了槽漏电抗,增大了电路的时间常数,将影响电机控制系统的动态特性。

3.2 采用分数槽

下面举例说明采用分数槽绕组对电机转矩脉动的削弱作用。一台三相四极的人工心脏血泵驱动永磁无刷直流电机,原设计定子铁心为12槽,绕组每极每相槽数为1,是整数槽。现将电机槽数改为15,定子绕组每极每相槽数为 $5/4$,每极槽数为 $15/4$,皆为分数。图4给出了采用麦克斯韦应力张量法计算的上述两种设计方案人工心脏电机稳态运行时的转矩曲线。可以看出,采用分数槽后电机转矩脉动量减小了约60%。然而,与此同时电机的平均转矩也相应减小了许多,这是因为采用分数槽后各极下绕组分布不对称而使电机的有效转矩分量也被抵消掉一部分。图4中的1和2两直线分别是采用整数槽和分数槽时电机的平均转矩。

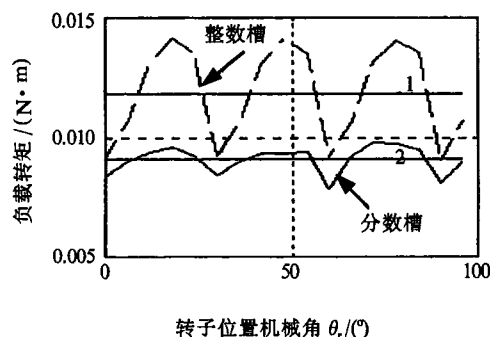


图4 分数槽对转矩的影响

Fig. 4 Influence of fractional slots/pole/phase on torque pulsation

3.3 采用斜槽

将定子槽沿轴向扭斜一个定子槽距,也是一种有效的消除由于齿槽引起的转矩脉动方法,其机理与采用分数槽相类似。该方法主要用于定子槽数较

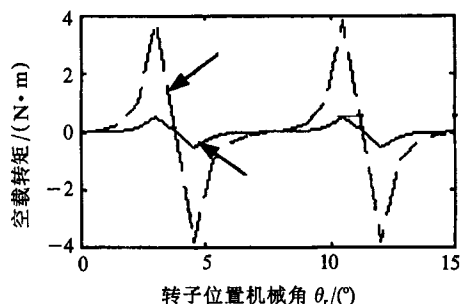


图5 斜槽对转矩的影响

Fig. 5 Influence of skewing stator slots on torque pulsation

多且轴向较长的电机,而对于槽数较少铁心较短的电机,斜槽的扭角过大,不仅工艺性差,而且电机的有效转矩将因斜槽而损失过大。图5给出的是电动自行车机电采用直槽和斜槽时空载转矩曲线的对比。可以看出,斜槽后由于齿槽引起的转矩脉动比直槽时减小了约6倍,可见采用斜槽消除转矩脉动的效果较好。

4 Halbach 永磁阵列对电机转矩与出力的影响

提高永磁无刷直流电机的效率和出力,除了选用性能优良的永磁材料外,尚需对永磁体的尺寸和结构进行优化设计,采用新型 Halbach 永磁阵列就是一种行之有效的磁性结构优化技术^[3]。一般的永磁电机设计,永磁体多采用径向充磁阵列或切向充磁阵列排列方式,如图6(a)和(b)所示,所产生的磁场在永磁体两边是对称的。如果将径向和切向永磁阵列组合在一起,便可构成一种新型的 Halbach 永磁阵列结构。由图6(c)可以看出, Halbach 阵列使得永磁体一边的磁场增强而另一边的磁场减弱。至少要使永磁体哪一边的磁场增强,则需根据电机定转子结构而定,但最终总是要使电机气隙磁场增强而转子轭部磁场减弱。

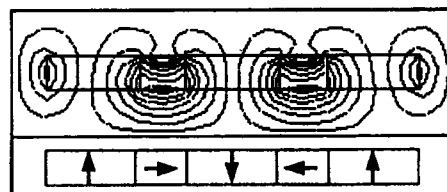
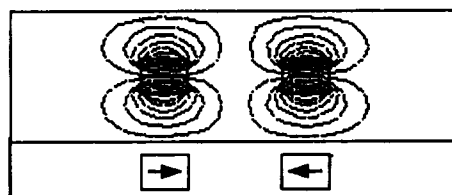
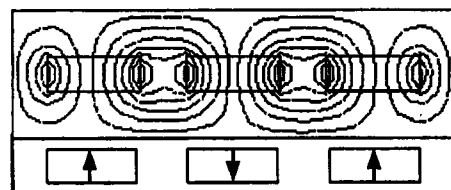


图6 永磁体排列方式及其磁场分布

Fig. 6 Arrangement and their magnetic field of permanent magnet arrays

图7是一台外转子结构电动自行车电机当保持电机尺寸及绕组电流和匝数不变时,永磁体采用Halbach阵列与采用传统径向阵列结构时转矩曲线的对比。由图看出,采用Halbach阵列后电机转矩明显增大。其中最大转矩增大31%,最小转矩增大15%,而平均转矩增大9%。显然,电机的出力将随转矩的增大而增大。如果保持电机出力不变,采用Halbach阵列后则可减小绕组电流或匝数,电机的效率将因绕组铜耗的减小而提高。同时由于采用Halbach阵列后转子轭部磁通减小,则可相应地减小转子轭的厚度,从而减小电机的体积和质量。

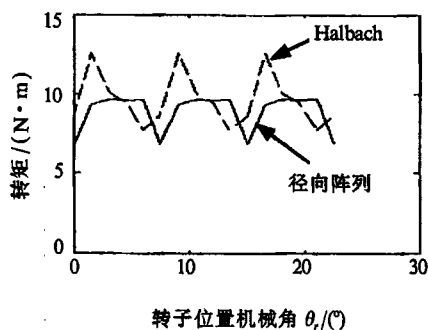


图7 永磁体排列方式对转矩的影响

Fig. 7 Influence of PM arrangement on torque

5 转矩计算的试验验证

上述分析是建立在转矩计算基础上的,因而需要对转矩计算结果的准确性进行验证。本文对一台三相16极外转子结构电动自行车用永磁无刷直流电机的空载最大转矩脉动进行了测试。计算值与测试结果的对比如图8所示。可以看出,测量值与计算值相吻合,说明上述转矩计算方法是可信的,计算结果是准确的。

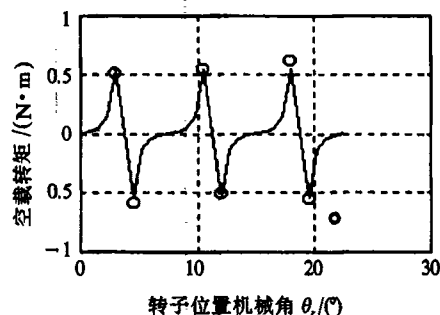


图8 转矩计算值与测试值的比较

Fig. 8 Comparison of calculated torque with tested value

6 结论

1) ANSYS 是一种功能齐全的有限元数值分析软件,采用麦克斯韦应力张量法或虚位移法可准确而方便地计算不同结构电机各种运行方式下的动态转矩,该软件是电机设计和特性仿真的重要工具。

2) 采用分数槽或斜槽是减小电机转矩脉动的有效方法,然而在减小脉动转矩的同时电机的有效转矩也将得到一定程度的削弱。磁性槽楔也是减小转矩脉动的可取措施。闭口槽消除转矩脉动的效果最为显著,但其工艺性差,嵌线困难。

3) 采用Halbach永磁阵列,可提高电机的力能密度,对于高效高力能密度永磁电机的设计具有重要意义。

参考文献:

- [1] 汤蕴璆. 电机内的电磁场, 第2版[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] ANSYS GUI Help Manual[R]. ANSYS Release 5.4, 1997.
- [3] WANG F X, XU L Y. Design and analysis of a permanent magnet motor integrated with journal bearing [J]. IEEE-IAS Conference Record, 1997 (1): 24-28.

(编辑: 刘玉成)