

# 磁极开槽法抑制永磁电动机齿槽转矩研究

高强, 韩力

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 在简述齿槽转矩产生机理和抑制方法的基础上, 根据解析表达式讨论了磁场谐波对齿槽转矩的影响。在此基础上, 建立了时变运动电磁场有限元模型, 对不同程度开槽磁极对应的齿槽转矩进行了计算和对比分析。结果表明, 适当的磁极开槽可有效削弱永磁电动机的齿槽转矩。

**关键词:** 永磁电动机; 齿槽转矩; 磁极开槽; 有限元法

## Reducing Cogging Torque of Permanent Magnet Motor by Magnetic Poles Notching

GAO Qiang, HAN Li

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Reduction of cogging torque is one of the design and control focus in the research of permanent magnet motor. The mechanism and reduction methods of cogging torque were reviewed briefly. And then, the effects of electromagnetic filed harmonics on cogging torque were discussed by analytical expressions. In this foundation, the time-varying moving electro-magnetic field model was built up and the cogging torques for different magnetic poles notching were calculated and compared by finite element. The results showed that suitable magnet poles notching could reduce the cogging torque effectively.

**Key Words:** Permanent magnet motor; Cogging torque; Magnet poles notching; Finite element method

## 0 引言

永磁电机存在齿槽转矩, 引起电机的振动和噪声, 并影响在速度控制系统中的低速性能和在位置控制系统中的定位精度。齿槽转矩是永磁电机的一种固有现象, 它的产生来自于永磁体与电枢齿之间的切向力, 是永磁体与电枢齿槽相互作用的结果。如何有效削弱齿槽转矩成为近年来永磁电机研究的热点问题之一<sup>[1-11]</sup>。目前, 抑制永磁电机齿槽转矩的方法可归纳为3种: 一是改变磁极参数, 如磁极偏移、改变极弧系数、改变磁极磁化方向、磁极凿孔、磁极偏心、磁极削角以及本文中研究的磁极开槽等; 二是改变电枢结构, 如减小定子槽开口宽度、采用磁性槽楔、电枢齿冠开槽、斜槽、不等槽口宽配合、分数槽、改变定子齿槽比率等; 三是电枢槽数和极数的合理组合, 如增大每极槽数等。然而, 目前对采用磁极开槽

来抑制齿槽转矩的方法研究较少。文献[4]提出磁极开槽可以减小齿槽转矩, 但没有对如何开槽以及不同程度开槽对齿槽转矩的影响效果进行定量分析。本文以永磁同步电动机为例, 利用数值仿真原理, 通过模拟齿槽转矩的实际测量过程, 建立时变运动电磁场有限元模型, 对不同开槽磁极模型的齿槽转矩进行了分析计算, 并得出结论。

## 1 齿槽转矩的解析表达式

齿槽转矩是永磁电机不通电时永磁体和电枢齿槽之间相互作用产生的, 可以表示为:

$$T_{\text{cog}} = \frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中,  $W$  为磁共能;  $\alpha$  为某一指定电枢齿中心线与某一指定永磁体中心线之间的夹角。

假设电枢铁心磁导率无穷大, 则电机内存储的能量可近似为永磁体和电机气隙中的能量, 即:

$$W \approx W_{\text{pm}} + W_{\text{gap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2)$$

对于任意相对位置  $\alpha$ , 气隙磁通密度沿电枢表面的分布可表示为:

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta)G(\theta, \alpha) \quad (3)$$

则齿槽转矩可表示为:

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ \frac{1}{2\mu_0} \int V B_r^2(\theta) G^2(\theta, \alpha) dV \right] \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为位置角。

$G(\theta, \alpha)$  的表达式为:

$$G(\theta, \alpha) = \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \quad (5)$$

式中,  $h_m$  为永磁体厚度;  $g(\theta, \alpha)$  为沿圆周上不同位置的有效气隙长度。

将  $B_r^2(\theta)$  与  $G^2(\theta, \alpha)$  分别用傅里叶级数展开:

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(2np\theta) \quad (6)$$

$$G^2(\theta, \alpha) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos[nz(\theta + \alpha)] \quad (7)$$

式中,  $z$  为槽数;  $2p$  为极数。

将式(6)和式(7)代入式(4), 可得齿槽转矩的表达式:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r(nz/2p)} \sin(nz\alpha) \quad (8)$$

式中,  $L_a$  为铁心长度;  $R_1$  和  $R_2$  分别为定子外半径和内半径;  $n$  为使  $nz/2p$  为整数的整数。

由式(8)可以看出,  $B_r^2(\theta)$  的  $nz/2p$  次谐波分量才对齿槽转矩产生作用, 其它谐波分量对齿槽转矩没有影响。因此, 减小  $nz/2p$  次谐波分量, 即可削弱齿槽转矩。

## 2 齿槽转矩计算方法

现有文献对齿槽转矩的计算一般都采用解析法<sup>[1-3,9-11]</sup>。解析法物理概念清晰, 但针对不同的电机从结构, 需要进行不同的推导, 数学表达式往往比较复杂, 且一般都忽略了铁心饱和, 存在一定的局限性, 所以式(8)只能对齿槽转矩进行定性分析, 很难准确计算磁极开槽之后的齿槽转矩大小。为此, 本文利用数值仿真原理, 通过模拟齿槽转矩的标准测量法过程, 来计算齿槽转矩的大小。具体做法是: 让永磁电机以恒速缓慢旋转, 不考虑其机械摩擦转矩, 将电枢绕组的等效电阻设置为无限大, 使其电流为零, 在这种运行状态下, 利用时变运动电磁场有限元模型计算得出的电磁转矩, 即为齿槽转矩。只要运动有限元模型的时步取得足够小, 就可得到齿槽转矩随转子位置连续变化的光滑曲线。

考虑铁磁材料的非线性, 描述时变运动电磁场问题的偏微分方程为:

$$\nabla \times (v \nabla \times A) + \sigma \left[ \frac{\partial A}{\partial t} - V \times (\nabla \times A) \right] = J_s \quad (9)$$

式中,  $A$  为矢量磁位;  $V$  为媒质相对于参考坐标系的运动速度;  $J_s$  为外部强加的源电流密度;  $\sigma$  为媒质的电导率;  $v$  为媒质的磁阻率。

忽略端部效应, 设电流密度和矢量磁位只有  $z$  轴分量, 速度只有  $x$  轴分量, 引入库仑规范  $\nabla \cdot A = 0$ , 并加入边界条件, 便可得到描述永磁电机时变运动电磁场的定解问题:

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{sz} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma V_x \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ S_1: A_z = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $J_{sz}$  为永磁体的等效面电流密度;  $\Omega$  为求解区域;  $S_1$  为定子外圆边界线。

根据上述原理, 利用 Ansoft 中的 Maxwell 2D 分析模块, 建立有限元模型, 让永磁电机以  $90^\circ/\text{s}$  低速旋转, 仿真  $0 \text{ s} - 4 \text{ s}$  的时变过程, 就得到转子旋转  $360^\circ$  时的齿槽转矩波形。

## 3 磁极开槽方法

在永磁电机中, 如果每极下永磁体不对称, 将会导致磁动势的不对称, 从而使电机产生一些新的谐波转矩。为此, 本文提出, 磁极开槽方式应沿磁极中心线严格对称, 以保持每极磁动势对称, 如图 1 所示。其中, 图 1(a) 为 1 个完整的磁极; 图 1(b) 为在磁极中心处开 1 个槽的情况, 图 1(c)、(d) 分别为开 2 个槽、3 个槽的情况。相邻两个槽之间的夹角取为  $10^\circ$ 。下面, 以 1 台永磁同步电机为例, 设槽宽为  $a$ 、槽深为  $b$ , 分别针对不同的开槽个数和不同的开槽宽度、深度, 对齿槽转矩的削弱效果进行对比分析。

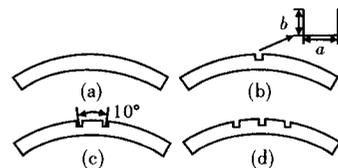


图 1 磁极开槽方式

## 4 计算实例

为了说明磁极开槽对齿槽转矩的影响, 本文以 1 台 4 极、24 槽、极弧系数为 0.7 的永磁同步电动机为基本模型, 磁极为瓦片形表面式结构, 径向充磁, 具体参数如表 1 所示。

表1 计算模型参数

参数	取值	参数	取值
定子外径/mm	120	铁心长度/mm	65
定子内径/mm	75	磁钢厚度/mm	3.5
转子外径/mm	74	矫顽力/ $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$	716.2
转子内径/mm	26	剩磁密度/T	0.96

分别选取不同的槽数以及不同的  $a$ 、 $b$  值对其磁极进行开槽, 建立开槽磁极模型并分析计算各自的  $B_r(\theta)$ 。本文共建立了 17 个开槽磁极模型, 从两方面对其进行了计算和对比分析, 一方面是从开槽宽度  $a$  和开槽深度  $b$  的不同进行对比分析, 另一方面是从开槽数的不同进行对比分析。建立的电机完整磁极模型如图 2 所示。

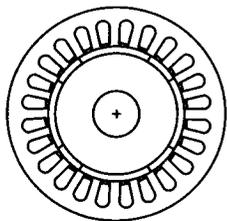


图2 4极24槽永磁同步电动机模型

由式(8)可知, 4极、24槽电机对齿槽转矩起主要作用的是  $B_r^2(\theta)$  的  $6n$  次谐波分量。计算出各种开槽情况下磁极的剩磁分布  $B_r(\theta)$ , 并通过对  $B_r^2(\theta)$  进行傅里叶分解, 得到其各次谐波分量。

分析不同模型  $B_r^2(\theta)$  的各次谐波幅值, 发现磁极开槽后对  $B_r^2(\theta)$  的 6 次、12 次和 18 次谐波分量的影响很大, 而对其它 6 的倍数次谐波的影响却较小。随着开槽深度和宽度的增大, 6 次谐波分量幅值减小, 12 次谐波分量幅值持续增大, 而 18 次谐波分量幅值先减小后增大。因此, 齿槽转矩的变化情况由 6 次、12 次和 18 次谐波分量的变化情况来决定。下面 4 个表分别列出了 17 种情况下,  $B_r^2(\theta)$  的 6 次谐波、12 次谐波和 18 次谐波的幅值。

表2 开槽数为 1 时,  $a$ 、 $b$  值不同情况下  $B_r^2(\theta)$  的 6 次、12 次和 18 次谐波分量

模型序号	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	6 次谐波分量幅值	12 次谐波分量幅值	18 次谐波分量幅值
1	0	0	8.734	8.657	9.193
2	0.7	0.7	7.936	9.758	8.333
3	0.9	0.9	7.496	10.23	8.064
4	1.1	1.1	7.024	10.68	7.927
5	1.3	1.3	6.540	11.08	7.868
6	1.4	1.4	6.294	11.25	7.877
7	1.5	1.5	6.046	11.40	7.909

表3 槽宽  $a=1.3\text{ mm}$  时, 槽深  $b$  不同情况下  $B_r^2(\theta)$  的 6 次、12 次和 18 次谐波分量

模型序号	$b/\text{mm}$	6 次谐波分量幅值	12 次谐波分量幅值	18 次谐波分量幅值
8	0.9	6.985	10.79	7.878
9	1.1	6.746	10.96	7.859
5	1.3	6.540	11.08	7.868
10	1.5	6.362	11.16	7.894
11	1.7	6.207	11.21	7.931

表4 槽深  $b=1.3\text{ mm}$  时, 槽宽  $a$  不同情况下  $B_r^2(\theta)$  的 6 次、12 次和 18 次谐波分量

模型序号	$a/\text{mm}$	6 次谐波分量幅值	12 次谐波分量幅值	18 次谐波分量幅值
12	0.9	7.151	10.48	8.042
13	1.1	6.841	10.79	7.928
5	1.3	6.540	11.08	7.868
14	1.5	6.240	11.33	7.869
15	1.7	5.951	11.53	7.926

表5  $a=1.3\text{ mm}$ 、 $b=1.3\text{ mm}$  时, 开槽数不同情况下  $B_r^2(\theta)$  的 6 次、12 次和 18 次谐波分量

模型序号	开槽数	6 次谐波分量幅值	12 次谐波分量幅值	18 次谐波分量幅值
5	1	6.540	11.08	7.868
16	2	11.59	6.272	6.024
17	3	9.247	8.625	4.724

## 5 对比分析

用本文上述方法计算出不同开槽磁极模型的齿槽转矩波动。取 1 个齿距相比较。图 3 为开槽数为 1、开槽位置选在磁极中心处时,  $a$ 、 $b$  值不同情况下, 各开槽磁极模型齿槽转矩比较。

比较图 3(a) 中的 5 条曲线, 可见开 1 个槽时, 随着磁极开槽宽度和深度的不断增大, 齿槽转矩的幅值不断减小, 从未开槽时的  $0.682\text{ N}\cdot\text{m}$  减小到  $a=1.3\text{ mm}$ 、 $b=1.3\text{ mm}$  时的  $0.216\text{ N}\cdot\text{m}$ , 削弱了 68.3%。比较图 3(b) 中的 3 条曲线, 可知随着磁极开槽宽度和深度的再次不断增大时, 齿槽转矩的幅值反而增大。

上面是  $a$ 、 $b$  值一起变化时各开槽磁极模型齿槽转矩比较图。图 4 表示的是其中一个值变化时的齿槽转矩比较。

图 5 为  $a=1.3\text{ mm}$ 、 $b=1.3\text{ mm}$ 、开槽数为 1、2、3 的情况下, 各开槽磁极模型齿槽转矩比较。

由图 3、图 4 可看出, 齿槽转矩并不是随着磁极开槽程度增大一直减小, 而是存在一个临界的开槽宽度和深度。在该位置,  $B_r^2(\theta)$  的 12 次谐波分

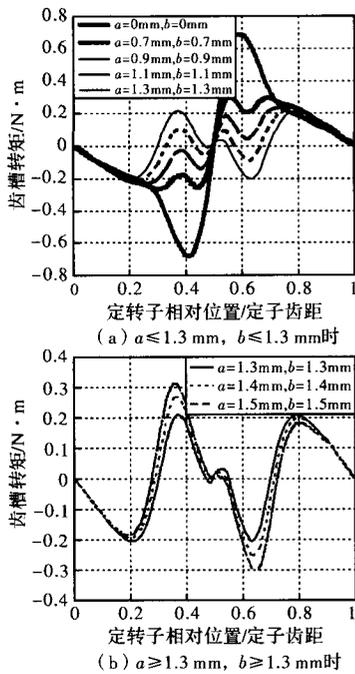


图3 开槽数为1,  $a$ 、 $b$ 值不同情况下齿槽转矩比较图

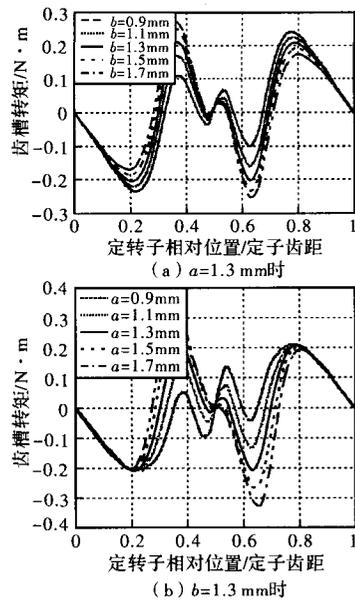


图4 开槽数为1,  $a$ 、 $b$ 值只变其中一个的情况下齿槽转矩比较图

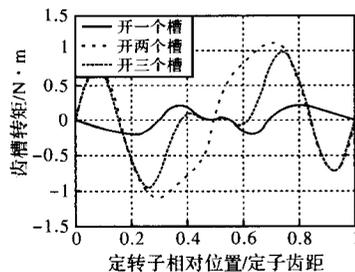


图5  $a = 1.3 \text{ mm}$ 、 $b = 1.3 \text{ mm}$  时开槽数不同情况下齿槽转矩比较图

量增大使齿槽转矩上升的效果与6次谐波分量、18次谐波分量减小使齿槽转矩下降的效果相互抵消,

齿槽转矩达到最小。当开槽宽度和深度大于临界值时, 12次谐波分量增强, 而且18次谐波分量也开始增大, 这两者使齿槽转矩上升的作用大于6次谐波分量对齿槽转矩下降的作用, 因此齿槽转矩重新升高。而且从图4还可看出当槽宽和槽深的比例为1:1时, 对齿槽转矩的削弱效果最好。从图5可看出并不是开槽越多越好, 开1个槽的效果就非常好, 而且开槽多了会给工艺制造上带来很多麻烦。

## 6 结论与展望

通过对永磁同步电动机多种不同磁极开槽模型的计算与比较, 可以得到以下结论: (1) 合理进行磁极开槽, 可以有效削弱齿槽转矩; (2) 开槽数不宜过多, 开1个槽即可; (3) 为保持磁极对称性, 开槽位置应在磁极中心处; (4) 开槽宽度和深度之比以1:1为宜, 开槽程度有个临界值, 若开槽程度超过此临界宽度和深度, 则齿槽转矩反而会升高。

在磁极表面开矩形槽, 除了可抑制齿槽转矩, 还可以增大磁极表面积, 改善其散热性能。对于磁极开槽法适用范围的确定, 以及开槽临界宽度和深度的自动寻优, 还有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] 杨玉波, 王秀和, 张鑫, 等. 磁极偏移削弱永磁电机齿槽转矩方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 23-25.
- [2] 王秀和, 杨玉波, 丁婷婷. 基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 146-149.
- [3] 杨玉波, 王秀和, 丁婷婷, 等. 极弧系数组合优化的永磁电机磁槽转矩削弱方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 7-11.
- [4] 柴凤, 李小鹏, 程树康. 永磁电动机齿槽转矩的抑制方法[J]. 微电机, 2001, 34(6): 52-54.
- [5] 宋伟, 王秀和, 杨玉波. 削弱永磁电机齿槽转矩的一种新方法[J]. 电机及控制学报, 2004, 8(3): 214-217.
- [6] 王兴华, 励庆孚, 石山. 永磁电机磁阻转矩的抑制方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(2): 576-579.
- [7] Bianchi. N, Bolognani. S. Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-mounted PM Motors[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36(5): 179-185.
- [8] 陈霞, 邹继斌, 胡建辉. 采用齿冠开槽法有效抑制永磁电机齿槽力矩[J]. 微特电机, 2006, 34(11): 9-10.
- [9] 杨玉波, 王秀和, 陈谢杰, 等. 基于不等槽口宽配合的永磁电动机齿槽转矩削弱方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 40-44.
- [10] Ishikawa. T, Slemon. G. R. A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors Without Skewing[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1993, 29(2): 2028-2031.
- [11] 王秀和, 丁婷婷, 杨玉波, 等. 自启动永磁同步电动机齿槽转矩的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 167-170.

作者简介: 高强(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机。

韩力(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电机优化设计, 电机电磁场。