永磁直线同步电机出入端磁阻力齿槽分量分析

司纪凯[1,2], 汪旭东[1], 陈昊[2], 袁世鹰[1], 焦留成[3]
(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院 河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 信电学院 江苏 徐州 221008;
3. 河南师范大学 河南 新乡 453000)

摘 要:采用有限元法及间接法对 PMLSM的动子在出入端时的磁阻力的齿槽分量进行分析。实际物理模型的初级铁心被分解为不含齿槽和包含齿槽但不包括端部的两 FEA模型;采用间接法研究 PMLSM原始模型及改变 PMLSM的端部半填槽槽形后对电机动子在出入端处磁阻力齿槽分量的影响和变化规律。将分析结果与实验数据进行了比较,验证了方法的正确性及有效性,为 PMLSM的性能研究及电机设计提供了理论。

关键词:同步电机; 永磁直线同步电机 (PMLSM); 磁阻力齿槽分量; 间接法; 有限元法; 出入端; 端部半填槽槽形
中图分类号: TM351 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-449X(2008)05-0550-05

Analysis of the slot-teeth component in permanent magnet linear synchronous motor at the outlet end

SI Ji-kai[1,2], WANG Xu-dong[1], CHEN Hao[2], YUAN Shi-ying[1], JIAO Liu-cheng[3]
(1. College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 45400, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Henan Normal University, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The finite element method and indirect method were used to analyze the slot-teeth component of detent force in PMLSM at the outlet end. The primary iron-core in the actual physical prototype was composed of the slot-teeth component and the end component of detent force FEA model, in which the indirect method was proposed to investigate the effect and vary law of the slot-teeth component of detent force at the outlet end of the origin model and change the end half-filled slots shape of PMLSM. By the comparison of analysis results and experimental data, the effection and validation of the method is verified, which is benefited to the design, optimum and performances analysis of the motor.

Key words: synchronous motors; permanent magnet linear synchronous motor; the slot-teeth component of detent force; indirect method; finite element method; outlet end; the end half-filled slots shape

1 引 言

永磁直线同步电机 (PMLSM)因具有高可靠性、高效率、高密度、大推力、小时间常数等性能优势而逐渐受到青睐。然而 PMLSM磁阻力的存在将引起伺服系统震动和噪声,进而降低系统的控制性能[1-10]。

收稿日期: 2007-12-17
基金项目: 国家自然科学基金 (60474043);河南省高等学校创新人才培养工程 (2005126-23);河南省重点攻关 (0223025300)
作者简介: 司纪凯 (1973-),男,博士生,主要研究方向为直线电机电磁场、理论及应用;
汪旭东 (1967-),男,教授,博士,主要研究方向为直线电机电磁场、理论、控制及应用;
陈 昊 (1969-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为开关磁阻电机设计、控制及其优化;
袁世鹰 (1940-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为直线电机理论、控制及其优化设计;
焦留成 (1950-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为直线电机理论、控制及其优化设计。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在磁路开断的 PMLSM磁阻力中,存在两种分量,一种为磁阻力的齿槽分量,另一种是磁阻力的端部分量[4-6,9-10]。在短次级、长初级的 PMLSM中且次级完全在初级区域内,只存在磁阻力的齿槽分量,对于整距绕组电机齿槽分量以齿距为周期;在长次级、短初级 PMLSM中且初级完全在次级范围内,即存在磁阻力的齿槽分量又存在端部分量,端部分量以极距为周期且端部分量通常较齿槽分量大许多[5,9]。

国内外学者对 PMLSM磁阻力、最小化及其分析方法均有一定的研究。抑制磁阻力的方法有许多,总体而言可从电机本体设计和电机控制策略两方面考虑。在整距绕组电机设计中,最常见的是采用永磁体斜置或初级采用斜槽,且倾斜一个齿距以减小磁阻力的齿槽分量的基波成分[1,2,6,8];适当调整次级永磁体的位置,利用相邻永磁体产生磁阻力齿槽分量的相位相反以消除磁阻力[3];改变初级铁心的长度及端部形状以减小磁阻力的端部分量[4,5,8,10];合理选择永磁体的宽度(运动方向上)以减小磁阻力的齿槽分量[1,2,5];合理选择齿槽的形状、尺寸及每极每相槽数以减小磁阻力的齿槽分量,效果显著[1,8]。从控制角度出发,当电机低速运行时,可以认为磁阻力的主要谐波分量频率很低,容易辨识,根据这些特性,可以利用电流补偿的控制方法来削弱齿槽力扰动[2]。

多数电机磁阻力的研究普遍采用有限元法分析磁阻力及其最小化措施[1-7,10]。PMLSM特有的出入端(动子逐渐进入定子至完全耦合及动子逐渐退出定子的区域)磁阻力的研究较少。文献[8]采用有限元法研究了短次级、长初级分段式 PMLSM在出入端的总磁阻力变化规律及通过改变半填槽槽形来减小磁阻力的措施,但是对磁阻力的端部分量和齿槽分量没有分别研究,不能洞悉电机在出入端磁阻力变化的内因且磁阻力变化的趋势有待进一步分析。文献[9]中,作者提出了有限元和间接法相结合研究电机磁阻力的变化规律,但是对于磁阻力的齿槽分量在出入端的规律没有涉及。文献[11]只研究了 PMLSM的动子处于出入端时的磁阻力端部分量规律,并提出一种有效的减小方法。然而,对 PMLSM的动子从不耦合到次、初级完全耦合的过程中齿槽分量变化规律的研究目前还较少,磁阻力在 PMLSM出入端的存在,严重影响动子在出入端或分段式 PMLSM段间切换时的速度性能,导致定位及伺服能力差,甚至导致电机失步故障。本文采用有限元法和间接法研究 PMLSM的磁阻力齿槽分量在出入端的变化规律及改变端部半填槽槽形对磁阻力齿槽分量的影响。

2　有限元模型

采用二维有限元方法分析 PMLSM的磁场。永磁体采用等效的体电流密度,考虑其各向异性,更能接近实际情况。PMLSM动子所受的磁阻力的计算采用麦克斯韦张量法。磁场的有限元控制方程为

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}=-\mu J_s-\mu J_m, \tag{1}$$

$$J_m=\frac{1}{\mu_0}\nabla\times M, \tag{2}$$

$$F_{df}=\frac{L_1}{\mu_0}\int_0^{L_2}(-B_xB_y)\,dx。 \tag{3}$$

式中:A为矢量磁位;J_s为传导电流密度;J_m为永磁体等效面电流密度;M为永磁体磁化强度;μ为磁导率;μ_0为空气磁导率;L_1为绕组有效导体长度;L_2为积分区间;B_x为气隙磁场 x轴向磁密;B_y为气隙磁场 y轴向磁密;F_{df}为磁阻力。

初级具有 18槽,考虑端部半填槽;次级由 12块永磁体组成,永磁体采用隐极式;此电机属于短初级长次级 PMLSM,以次级的中心为坐标原点。电机参数如下:极距为 39 mm,每极每相槽数为 1,槽距为 13 mm,槽宽为 8 mm,槽深为永磁体在运动方向的长度为 27 mm,磁化高度为 7 mm,气隙为 5 mm。

初级与次级中心对称时的有限元模型如图 1(a)所示。在初级渐渐与次级相耦合的过程中,初

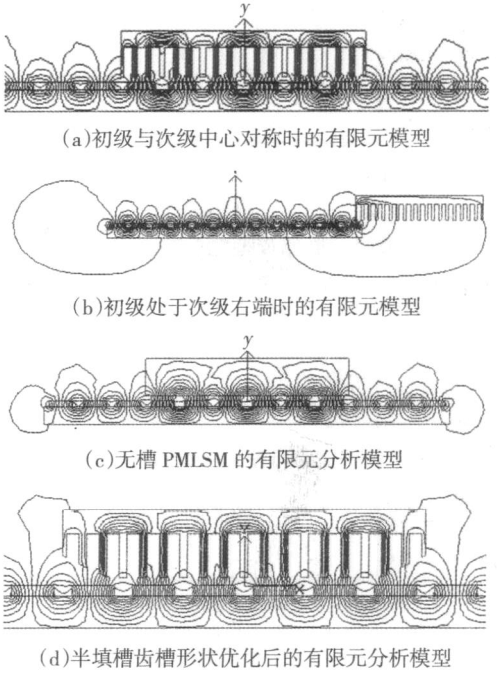

图 1　有限元分析模型

Fig. 1　Finite element analysis models

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

级受到的磁阻力包括端部分量与齿槽分量,二者都随着初次极相对位置的改变而发生变化,其中初级从次级的左端逐渐进入与初级从次级区域逐渐向右端退出时,磁阻力的波形关于次级中心对称[8,9],因此只需考虑初级从次级中心逐渐退出次级到过程中的磁阻力变化规律即可。电机初级从坐标原点逐渐退出次级的有限元模型见图 1(b)。图 1(a)和图 1(b)分别为原始物理模型在不同位置的有限元分析模型。图 1(c)为无槽的 PMLSM的有限元分析模型。为了减小磁阻力的影响,采用改变初级铁芯端部半填槽的齿槽形状措施以减小 PMLSM的磁阻力。图 1(d)为 PMLSM的半填槽齿槽形状优化后的有限元分析模型。

3 仿真及实验结果分析

采用有限元软件 MAGNET完成 PMLSM磁阻力的建模、求解及其分析。空间步长为 0.25 mm,共 1 600步即初、次级之间的相对位移为 400 mm。磁阻力的计算采用麦克斯韦张量法完成,其中磁阻力的齿槽分量采用间接法获得,即由总磁阻力的有限元分析结果去掉无槽的初级铁芯的端部分量所得。

3.1 原始模型的仿真结果及分析

原始模型总的磁阻力如图 2。图 3为不考虑开槽的初级铁心的磁阻力的端部分量。采用间接法,

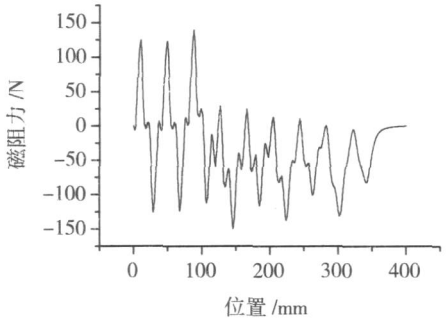

图 2 原始模型的总磁阻力

Fig. 2 Total detent force of the origin model

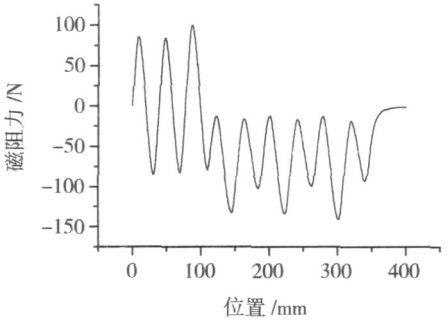

图 3 原始模型的磁阻力的端部分量

Fig. 3 The end component of the origin model

利用图 2结果减去图 3结果可得不考虑端部分量的齿槽分量,即图 4。

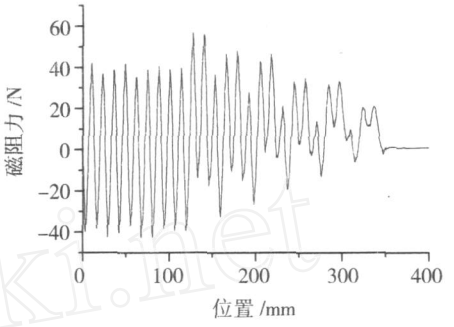

图 4 原始模型的磁阻力齿槽分量

Fig. 4 The slot-teeth component of the origin model

由图 2～图 4可知:

1) 0～117 mm范围内,短初级与次级完全耦合,此区域称为完全耦合区;117～351 mm区域内,初级向次级右端逐渐退出过程,此区域称为出入端区域;351～400 mm完全退出,此区域称为非耦合区。

2)原始模型中总磁阻力与磁阻力的端部分量波形相近,只不过总磁阻力波形包含谐波成分较磁阻力的端部分量丰富,两者的周期相同为极距(在完全耦合区域),在退出过程中,磁阻力阻碍初级退出,磁阻力的端部分量表现为负值,不具有周期性。由于 PMLSM的磁阻力的端部分量峰-峰值为 170 N,齿槽分量的峰峰值为 80 N,齿槽分量的周期为齿矩(在初、次极完全耦合区域)且波形的正弦度较好,端部分量与齿槽分量的叠加为总磁阻力,因此总磁阻力表现为端部分量的性质较明显。

3)在退出过程中,磁阻力齿槽分量不具有周期性,幅值偏向于 y轴正半轴,并逐渐过渡到正值。

4)当初级右移到第三个极距时,总磁阻力与端部分量的正半周期向上偏移;负半周期也向上偏移,而齿槽分量不发生变化。

5)在 PMLSM的出入端,磁阻力的变化规律性不强,且造成推力波动较大,因此非常有必要研究在 PMLSM出入端磁阻力减小技术。

3.2 改变端部槽形后的磁阻力仿真及分析

对于磁路开断的 PMLSM,一般采用调整初级铁心长度或改变端部形状减小磁阻力的端部分量[4,5,8]。本文采用一种新型端部半填槽齿槽形状减小磁阻力的影响。图 5为改变端部槽形后 PMLSM的总磁阻力。图 6利用间接法获得改变槽形后磁阻力的齿槽分量。

由图 5、图 6可知,采用减小磁阻力的端部分量的措施非常显著,在完全耦合区域,总磁阻力降低到 15.6%。由图 2、图 5可知,PMLSM磁阻力优化前主

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

要表现为端部分量的性质;在优化后,端部分量在很大程度上减小,总磁阻力表现为齿槽分量的性质,主要体现在磁阻力的周期与幅值两方面。在出入端,优化后的磁阻力包含较丰富的谐波分量,波形与优化前显然不同,其主要原因在于 PMLSM磁阻力由端部分量和齿槽分量组成,两者的周期和幅值在完全耦合区域与出入端不同。由图 6可知,PMLSM端部半填槽齿槽形状的改变对齿槽分量在耦合区域与出入端都受到影响。在耦合区,初级动子从坐标原点出发经历第 1、4、7齿距时,齿槽分量波形负半周达到优化前的齿槽分量幅值;经历第 1.5、4.5、7.5齿距时,齿槽分量波形正半周达到优化前的齿槽分量幅值;其他位置的幅值较优化前小。在出入端区域,250～351 mm范围内,齿槽分量在 y轴的正半轴上方,幅值较优化前小 48.5%。由图 4与图 6可知,改变电枢铁心端部半填槽槽形后,完全耦合区的齿槽分量周期性没有发生变化,但是幅值发生了变化。在第一个齿距中,磁阻力的齿槽分量峰值降低了 18 N,第二个齿距中,正幅值没有变化,但在第二与第三齿距中间,幅值也降低了 18 N,此趋势以极距为周期重复发生。

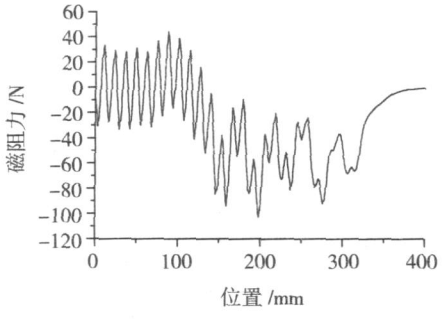

图 5　改变端部槽形后总磁阻力

Fig. 5　Total detent force changed the end slot shape

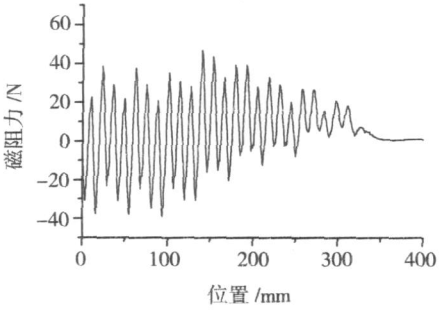

图 6　改变槽形后磁阻力的齿槽分量

Fig. 6　The slot-teeth component changed the end slot shape

3.3　实验结果及分析

磁阻力测量采用 BK-2Y型电阻应变式测力传感器,此传感器可以把测量的电气信号转换为力信号。动子位置检测采用输出脉冲数为 2 000个 /转的 E6B2-CWZ6C型光电编码器。图 7、图 8分别为原始模型与端部半填槽齿槽形优化后总磁阻力的实验波形。

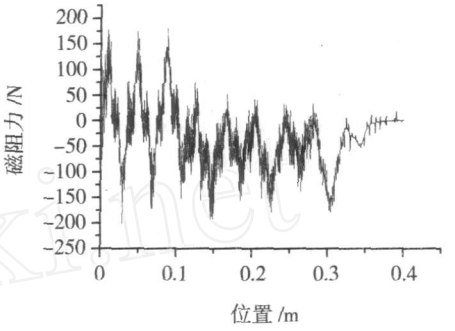

图 7　原始模型的总磁阻力实验波形

Fig. 7　Experimental total detent force of the origin model

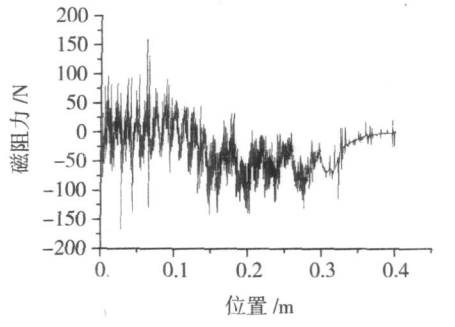

图 8　改变端部槽形后总磁阻力实验波形

Fig. 8　Experimental total detent force changed the end slot shape

从图 3、图 8可以看出,原始模型的 FEA分析和实验波形吻合;由图 5、图 8可知,优化后模型的 FEA分析和实验波形接近。比较图 7和图 8可知,改变端部半填槽槽形前后,磁阻力在幅值和波形上区别是很大的,图 7中的磁阻力波形谐波含量少,周期性明显,幅值是图 8幅值的 4.25倍。其原因为总磁阻力中端部分量起主要作用,采用改变端部半填槽槽形的措施在很大程度上减小了端部分量的影响,因此,采用此措施后的磁阻力齿槽分量占据了优势,在磁阻力波形上区别特别明显。

4　结　语

由于 PMLSM初级铁心长度有限,磁阻力的端部分量较齿槽分量大,严重影响电机动子在出入端的速度和定位性能。本文采用有限元和间接法相结合的手段,研究了磁阻力的齿槽分量随着初、次级之间相对位置而变化的规律,并提出通过改变初级铁芯端部形状来减小磁阻力的端部分量措施,深刻分析此措施对齿槽分量影响,更清楚磁阻力的两分量间的周期和幅值关系。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献:

[1] JUNG I, HUR J, HYUN D. Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37 (5): 3653 - 3657.

[2] MARTINEZ G, ATENCIA J, MARTINEZ-ITURRALDE M, *et al*. Reduction of detent force in flat permanent magnet linear synchronous machines by means of three different methods[C]//*Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Madison, June 1 - 4, 2003, 2: 1105 - 1110.

[3] YOSHIMURA T, KIM H J, WATADA M, *et al*. Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor magnetics [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31 (6): 3728 - 3730.

[4] INOUE M, SATO K. An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36 (4): 1890 - 1893.

[5] JUNG I S, YOON S B, SHIM J H, *et al*. Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14 (4): 1265 - 1270.

[6] ZHU Z Q, HOR P J, HOWE D, *et al*. Calculation of cogging force in a novel slotted linear tubular brushless permanent magnet motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33 (5): 4098 - 4100.

[7] LIM K C, WOO J K, KANG G H, *et al*. Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38 (2): 1157 - 1160.

[8] KIM Y, WATADA M, DOHMEKI H. Reduction of the cogging force at the outlet edge of a stationary discontinuous primary linear synchronous motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43 (1): 40 - 45.

[9] SHANGGUAN Xuanfeng, YUAN Shiying, LI Qingfu. Study on cogging force of permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2005 (1): 89 - 92.

[10] ZHU Z Q, XIA Z P, HOWE D, *et al*. Reduction of cogging force in slotless linear permanent magnet motors [J]. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1997, 144 (4): 277 - 282.

[11] **司纪凯,汪旭东,陈昊,等. 永磁直线同步电机磁阻力的端部分量分析及减小方法** [J]. **中国电机工程学报**, 2007, 27 (**增刊**): 132 - 136.
SI Jikai, WANG Xudong, CHEN Hao, *et al*. Analysis and reduction technique of the end component of detent force in flat permanent magnet linear synchronous machine. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27 (Supplement): 132 - 136.

(编辑:张诗阁)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net