

基于次级错齿的 C 型铁心双边直线 永磁开关磁链电机 *

郝雯娟^{1,2}, 王宇²

(1. 南京航空航天大学金城学院, 江苏南京 211156;

2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 211156)

摘要: 直线永磁开关磁链电机(LFSPM)适合长次级直线驱动场合,这是由于永磁体和电枢绕组都在短初级,而长次级结构简单可靠性高。很多应用场合都要求电机具有高推力,但往往也需要低的推力脉动。为此,对1台双边C型铁心的直线永磁开关磁链电机(DSLFSPM-C)进行研究和改进。利用有限元软件先对电机进行推力优化,然后为了在不影响平均推力的情况下有效地减小推力脉动,分别利用次级错齿和端部永磁体两种结构对电机进行了改进。分析结果表明,改进后的DSLSPM-C具有相对较低的法向力、高的推力输出以及较低的推力脉动。

关键词: 双边直线永磁开关磁链电机; 次级错齿; 端部永磁体; 推力脉动

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)08-0063-05

A Staggered Secondary Teeth Based on C-Core Flux-Switching Permanent Magnet Linear Machine

HAO Wenjuan^{1,2}, WANG Yu¹

(1. College of Jincheng, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211156, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211156, China)

Abstract: The linear flux switching permanent magnet (LFSPM) motor were capable for long secondary application due to that both the PMs and armature winding were on the short primary, in addition, the secondary was simple and robust. For this kind of machine, high average thrust force was highly desirable, however, low thrust force ripples were also required. A double-sided C-core LFSPM (DSSLFSPM-C) motor was investigated and improved. After being optimized for optimal thrust force using Maxwell 2D, this machine was improved to suppress the thrust force ripple without the decrease of the average thrust force based on a staggered secondary teeth structure and two end PMs. The analysis results showed that the improved DSSLFSPM-C machine exhibits relatively low normal force and high thrust force as well as low thrust ripple, indicating that they were suitable for long-stroke applications.

Key words: double-sided linear flux switching permanent magnet motor; staggered secondary teeth; end PMs; thrust force ripple

0 引言

与旋转结构相比,直线电机具有动态响应快、可靠性强、维护成本低、污染小等优点,广泛应用于城市轨道交通、智能电梯等直线驱动场合^[1-3]。

作为初级永磁式电机,直线永磁开关磁链(Linear Flux Switching Permanent Magnet, LFSPM)电机近几年受到了很多研究人员的关注,与传统的直线永磁电机相比,该类电机具有如下优点^[4-6]:

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51741705)

作者简介: 郝雯娟(1982—),女,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动。

(1) 次级为凸极铁心,无永磁体或绕组,结构简单可靠性高。

(2) 永磁体在初级,散热性能良好。

(3) 电枢磁场与永磁磁场平行,电枢磁场对永磁场的影响不大。

综上所述,LFSPM 电机非常适合应用于长次级短初级的场合。

LFSPM 电机也可以做成双边结构,即双边直线永磁开关磁链(Double-Sided Linear Flux Switching Permanent Magnet, DSLFSPM)电机,这可以抵消法向力,提高系统稳定性。一般来说,有两种 DSLFSPM 电机,分别为中间初级结构和中间次级结构。文献[7]对这两类结构衍生的无轭结构进行了分析和比较。许多文献对 DSLFSPM 电机有研究^[8-11]。文献[11]针对 DSLFSPM 电机的边端定位力、磁阻力和容错控制运行状态下永磁谐波分量引起的推力波动,分别提出了采用楔形边端设计、绕组电感互补、电流谐波注入和次级错极等方法进行了优化和补偿,优化效果显著。文献[8]研究了一种次级无轭结构的 DSLFSPM 电机,该结构通过实现上下双边初级磁路串联来减小次级轭部厚度,从而减小体积提高推力密度。

然而,由于初级和次级都是凸极结构,DSLFSPM 电机的定位力较大,从而引起较大的推力脉动。针对中间次级结构的 DSLFSPM 电机,本文研究了一种次级错齿结构。该结构在不减小电机平均推力的情况下可以有效地减小电机定位力。此外,本文还采用了一种初级端部永磁体的方法来平衡电机三相反电动势幅值,可以进一步减小由反电动势幅值不平衡引起的推力脉动。

本文以 1 台双边 C 型铁心 6/13 极单边 LFSPM 电机为研究对象,重点研究其推力输出能力和推力脉动减小方法。

1 电机推力优化

1 台 C 型铁心 6/13 极单边 LFSPM 电机(6/13LFSPM-C)如图 1(a)所示。研究发现,与传统结构相比,由于具有较大的槽面积,C 型铁心 6/13 极单边 LFSPM 电机具有更高的推力密度^[12]。将 2 个传统的单边 LFSPM 电机相对放置,可以得到 DSLFSPM 电机。图 1(b)所示为 1 台双边 C 型铁心 6/13 极 LFSPM 电机(6/13DSLFSPM-C)。

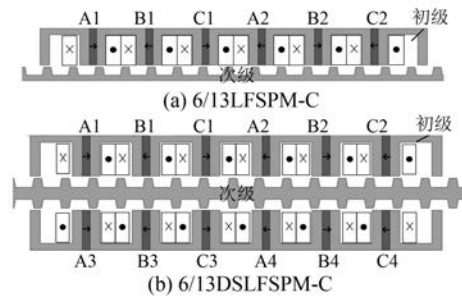


图 1 LFSPM 电机基本结构

面对该电机进行推力优化。

在铜耗不变及 $I_d=0$ 控制算法下,利用有限元软件对 6/13DSLFSPM-C 进行推力优化。6/13 DSLFSPM-C 设计参数如图 2 所示。优化参数的定义、符号、初始值以及优化顺序如表 1 所示。采用独立参数优化法,即每个参数按照顺序独立优化,上一个优化好的参数直接用于下一个参数的优化^[12]。在优化过程中,铜耗为初始结构时额定电流下的铜耗,保持该铜耗不变。同时,表 1 也给出了每个参数的优化结果。优化后主要设计参数如表 2 所示。

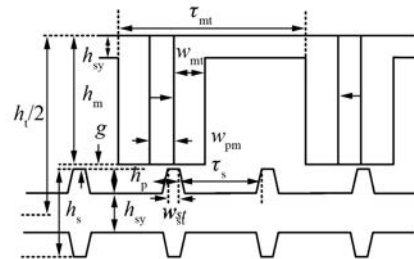


图 2 6/13DSLFSPM-C 设计参数

表 1 优化变量和优化结果

顺序	参数和符号	初始值	范围	结果
1	裂比 $A_s(h_s/h_t)$	0.26	0.2~0.3	0.26
2	次级极宽比 $w_{st-ratio}(w_{st}/\tau_s)$	0.3	0.2~0.4	0.28
3	次级极高比 $h_{p-ratio}(h_p/h_s)$	0.55	0.5~0.7	0.6
4	定子轭厚度比 $h_{my-ratio}(h_{my}/h_m)$	0.15	0.1~0.2	0.17
5	永磁体宽度 w_{pm}/mm	4	3~5	3

电机优化后的结果如图 3 所示。基于优化后的结构,图 3(a)给出了 6/13DSLFSPM-C 在不同电流下的推力平均值;图 3(b)给出了电机的定位力波形,图 3(c)给出了电机空载反电动势波形。可以发现,由于电机的双凸极结构,以及在推

表 2 优化后电机尺寸参数

参数名称	参数值
气隙 g/mm	1
电机总高 h_t/mm	50
电机厚度 D/mm	100
初级极距 t_m/mm	24
次级极高 h_p/mm	3.9
次级极宽 w_{st}/mm	3.1
初级极高 h_m/mm	17.5
初级轭厚度 h_{my}/mm	3
次级极距 t_s/mm	11.08
永磁体宽度 w_{pm}/mm	3
初级齿宽 w_{ml}/mm	4.1
永磁体剩磁 B_r/T	1.2
永磁体磁导率 μ_r	1.034
相数	3
相绕组数	200
额定电流幅值/A	8
额定速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4

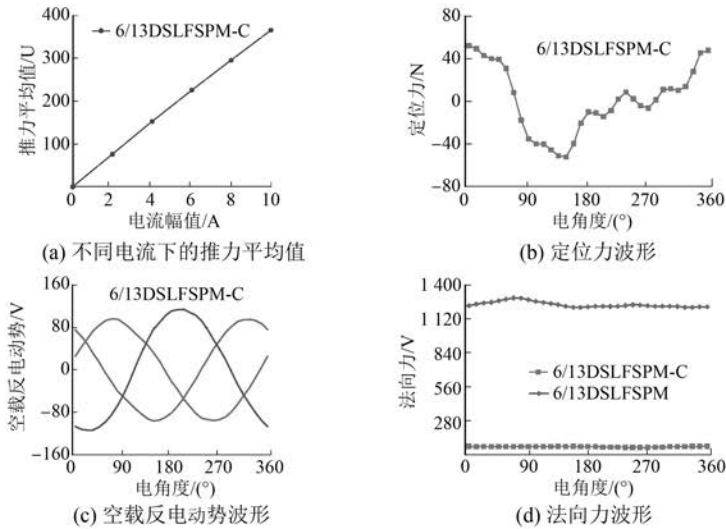


图 3 电机优化后结果

为了在减小定位力的同时不削弱推力平均值,本文提出了一种次级错齿结构,如图 4 所示。将带次级错齿结构的 6/13DSLFSM-C 命名为 6/13DSLFSM-CST。图 4 中,上下次级齿前后错开一定距离,设 θ_s 为错开齿距所对应的电角度。对于初级而言,使上下初级位置对应的永磁体充

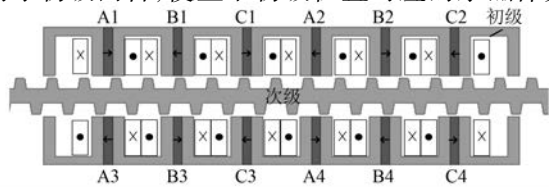


图 4 6/13DSLFSM-CST 结构

力优化过程中没有考虑定位力的大小,优化后电机定位力脉动较大。此外,由于直线电机特有的端部效应,三相反电动势幅值不平衡,中间线圈反电势幅值高于端部线圈。同时,图 3(d) 给出了该电机单边和双边结构法向力的比较,可以看出双边结构有效地减小了直线电机的法向力。

2 电机的改进

2.1 采用次级错齿结构减小定位力

对于直线电机,定位力和幅值不平衡的三相反电动势都会引起电机推力脉动,推力脉动会严重影响直线电机的控制性能。因此,本文对所研究电机进行结构改进,来减小定位力和平衡三相反电动势。

磁方向相反。

对于 6/13DSLFSM-CST,图 5 给出了随 θ_s 变化的定位力峰值(标么值),其中标么值的参考值为 6/13DSLFSM-C 的定位力峰值。从图 5

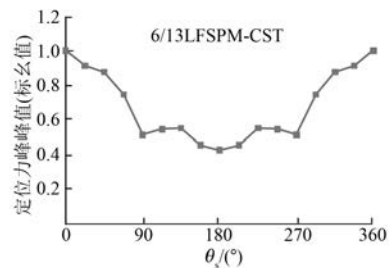


图 5 随 θ_s 变化的定位力峰值(标么值)

中可以看出,当 $\theta_s = 180^\circ$ 时,定位力峰峰值达到其最小值。该值小于 6/13DSLFSM-C 定位力峰峰值的 45%。

图 6 给出了 6/13DSLFSM-C 和 6/13DSLFSM-CST($\theta_s = 180^\circ$) 在额定电流下的推力平均值比较和定位力比较,可以发现,改进前后电机推力平均值基本相等,而 6/13DSLFSM-CST($\theta_s = 180^\circ$) 的定位力较 6/13DSLFSM-C 大幅度减小,因此,对于 6/13DSLFSM-CST,上下次级齿的错开角度选择 180° 电角度,即上下次级齿错开半个次级齿距。

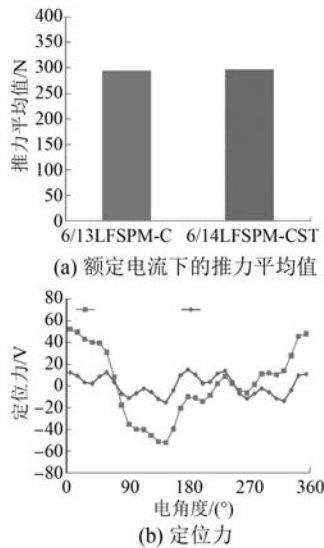


图 6 6/13DSLFSM-CST($\theta_s = 180^\circ$) 在额定电流下的推力平均值比较和定位力

需要说明的是,该改进如果只使上下次级齿错开半个次级齿距,而上下初级位置对应的永磁体充磁方向不变,则会削弱推力平均值。故错齿结构需要使上下初级位置对应的永磁体充磁方向相反。

2.2 基于端部永磁体的反电动势幅值平衡

为了平衡三相反电动势幅值,本文在原有的端部辅助齿基础上加上了端部永磁体,如图 7 所示。通过有限元软件来设计端部永磁体的宽度,通过优化最终宽度选择为 4 mm。加了端部反电动势后的电机命名为 6/13DSLFSM-CST1。图 8 给出了 6/13DSLFSM-CST1 的三相空载反电动势波形,可以发现,其幅值基本相等,实现了三相空载反电动势的幅值平衡。

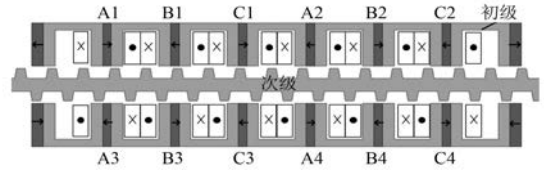


图 7 6/13DSLFSM-CST1 结构

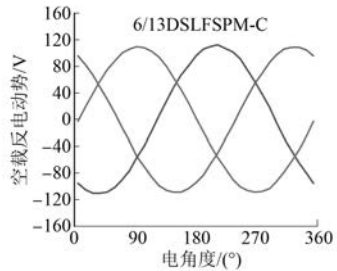


图 8 6/13DSLFSM-CST1 空载反电动势

3 电机改进前后比较

为了验证前面改进的效果,下文对改进前后的电机推力和推力脉动进行比较。

图 9 所示为电机改进前后额定电流下推力平均值、推力波形以及推力脉动所占比例的比较,其中图 9(c) 是推力脉动峰峰值和额定电流下推力平均值的比值。从图 9(a) 可以看出,

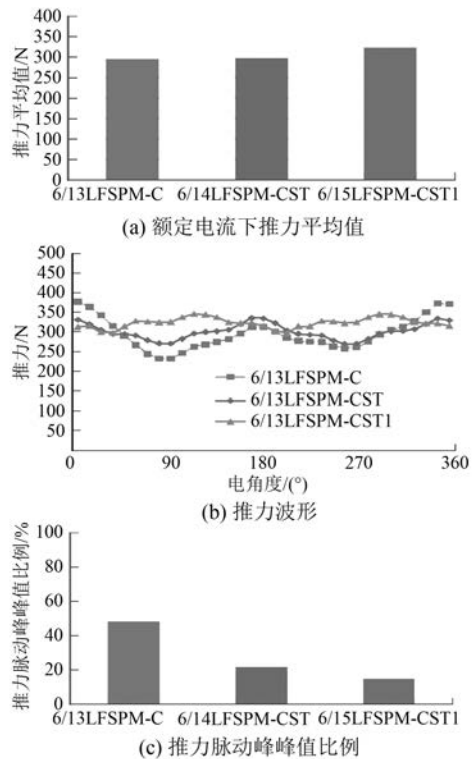


图 9 电机改进前后结果比较

6/13DSLFSM-CST1的推力平均值最大,这是由于三相反电动势的平衡可以增强电机的推力输出能力。从图 9 (b) 和图 9 (c) 可以发现,6/13DSLFSM-CST1 的推力脉动最小,约为 14.8%,这由于三相反电动势的平衡不但可以提高推力输出能力,还可以减小推力脉动。

4 结 语

与单边 LFSPM 电机相比,DSLFSM 电机不但可以继承其推力输出能力,而且具有较小的法向力。本文研究的基于次级错齿的 C 型铁心 DSLFSM 电机具有如下优点:(1)与单边结构一样,具有较高的推力输出能力。(2)通过次级错齿结构有效地减小了电机的定位力,从而减小了电机推力脉动。(3)通过端部永磁体结构有效地平衡三相反电动势,从而提高了电机推力输出能力并进一步减小了推力脉动。综上所述,该电机具有较高的推力输出能力和较低的脉动,适用于长次级场合,如智能电梯、轨道交通等。

【参考文献】

- [1] 徐月同,傅建中,陈子辰.永磁直线同步电机推力波动优化及实验研究[J].中国电机工程学报,2005,25(12): 122-127.
- [2] MA W Z, ZHANG H M, SUN J Y, et al. Research on the design of linear drive motor of new pumping unit [J].Adv Mater Res,2011(383/390): 1391-1398.
- [3] KYOUNG K Y, GWAM G B, SPIMG J I, et al. Analysis and design of slotted tubular linear actuator for the eco-pedal system of a vehicle[J].IEEE Trans Magn,2012,48(2): 939-942.
- [4] WANG C, SHEN J, WANG Y. A novel permanent magnet flux-switching linear motor [C] // 4th IET

Conference on Power Electronics, Machines and Drives,2008:116-119.

- [5] 郝雯娟,邓智泉.一种基于分段定子的直线永磁磁通切换电机结构及其优化方法[J].电机与控制应用,2015,42(12): 1-6.
- [6] 吉敬华,刘文庆,赵文祥.模块化开关磁链永磁直线电机的分析与控制[J].电机与控制应用,2014,41(1): 5-7.
- [7] HAO W J, WANG Y, DENG Z Q. Study of two kinds of double-sided yokeless linear flux-switching permanent magnet machines [C] // Presented at the 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Hangzhou, 2016: 1-6.
- [8] CAO R W, HUANG W X, CHENG M. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary [C] // Int Conf Electrical Machines and Systems (ICEMS' 2014), Hangzhou, 2014: 3648-3652.
- [9] LIU Q, YU H T, HU M Q, et al. Cogging force reduction of double sided linear flux-switching permanent magnet machine for direct drives [J]. IEEE Trans Magn, 2013, 49(5): 2275-2278.
- [10] KROP D, ENCICA L, LOMONOVA E. Analysis of a novel double sided flux switching linear motor topology [C] // XIX International Conference on Electrical Machines, 2010: 1-5.
- [11] 黄磊,胡敏强,刘静,等.双边长初级磁通切换永磁直线电机推力波动分析及抑制[J].电工技术学报,2014,29(11): 10-19.
- [12] MIN W, CHEN J T, ZHU Z Q, et al. Optimization and comparison of novel e-core and c-core linear switched flux PM machines [J]. IEEE Trans Magn, 2011, 47(8): 2134-2141.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 49 页)

装配锁制器时,每台锁制器通过检测和调整各种气隙,可以保证各种气隙在可控范围内,保证锁制器可靠解锁和制动。

5 结 语

锁销式锁制器各零部件通过优化设计和通过结构改进、细节优化、细节控制后明显提高了锁制器在恶劣环境条件下的可靠性。该成果应用在某舵机上,取得了良好的效果,对类似结构锁制器设计具有借鉴作用。

【参考文献】

- [1] 电机工程手册编委会.电机工程手册[M].北京:机械工业出版社,1979.
- [2] 于惠利,潘承怡,向敬忠,等.机械零部件设计禁忌[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 张子忠.微电机结构工艺学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

收稿日期: 2018-03-25