

短初级单边型直线感应电机倒梯形次级结构电磁特性研究*

葛研军, 陈伟, 王鹏, 刘家铭

(大连交通大学机械工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 短初级单边型直线感应电机(SSLIM)的格栅型次级结构存在电磁推力小、法向吸力大等问题。为解决这类问题,提出一种倒梯形次级结构,将现有格栅导条矩形结构变为上表面积大而下表面积小的倒梯形结构,利用 SSLIM 大转差特性及由此产生的集肤效应,提高了次级感应板有效载流体积及气隙磁密。在初级结构不变的条件下,建立了倒梯形次级结构的 SSLIM 有限元模型,并与传统格栅型结构在稳态、起动、制动等 3 种运行状态下进行对比分析,验证了倒梯形结构具有电磁推力大、法向吸力小等优点。

关键词: 短初级单边型直线感应电机; 倒梯形次级结构; 电磁特性

中图分类号: TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)04-0032-07

doi: 10.12177/emca.2023.033

Study on Electromagnetic Characteristic of Inverted Trapezoidal Secondary Structure of Short-Primary Single-Sided Linear Induction Motor*

GE Yanjun, CHEN Wei, WANG Peng, LIU Jiaming

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The grille-type secondary structure of the short-primary single-sided linear induction motor (SSLIM) has problems such as small electromagnetic thrust and large normal suction. To solve these problems, an inverted trapezoidal secondary structure is proposed. The rectangular structure of the existing grid guide bar is changed into an inverted trapezoidal structure with a large upper surface area and a small lower surface area. The effective current-carrying volume and air gap magnetic density of the secondary induction plate are improved by using the large slip characteristics of the SSLIM and the resulting skin effect. Under the condition that the primary structure remains unchanged, the SSLIM finite element model of the inverted trapezoidal secondary structure is established, and compared with the traditional grille-type structure under three operating conditions of steady state, starting and braking, which verifies that the inverted trapezoidal structure has the advantages of large electromagnetic thrust and small normal suction.

Key words: short-primary single-sided linear induction motor (SSLIM); inverted trapezoidal secondary structure; electromagnetic characteristic

0 引言

随着城轨车辆以及磁悬浮列车等轨道交通工具的快速发展,作为其驱动部件的直线电机的应

用也越来越广泛。与传统轮轨式车辆采用的旋转电机相比,直线感应电机具有爬坡能力强、转弯半径小、选线灵活、噪声低、散热性好等优点^[1]。短初级单边型直线感应电机(SSLIM)的初级安装在

收稿日期: 2023-01-06; 收到修改稿日期: 2023-02-08

* 基金项目: 辽宁省教育厅自然科学研究重点攻关项目(JDL2020001)

作者简介: 葛研军(1964—),男,博士,教授,研究方向为磁力传动与驱动。

车辆上,由车载牵引变流器受电弓通过接触网供电,次级沿轨道铺设,其结构简单,制造成本低,已成为中低速磁悬浮列车的最佳选择^[2-3]。

现有 SSLIM 大多采用导磁实心背铁和导电感应板组成的复合次级结构^[4]。与旋转电机相比,该种结构气隙磁阻大、气隙磁密小、运行效率低。因此,可采用与鼠笼转子相似的格栅型结构^[5]。现有格栅型次级结构一般分为两种,即导条与背铁齐平的笼型结构及导条高于背铁的梯型结构,两种结构的导条均为矩形。格栅型结构的优点是机械结构简单、制造成本较低,缺点是电磁推力小而法向力较大,过大的法向力将使列车悬浮电流增大、运营成本提高,在远距离运行等方面有较大的局限性^[6-7]。

因此,本文提出一种倒梯形格栅次级导条结构,与现有的矩形格栅次级导条结构相比,所提出的倒梯形次级结构具有电磁推力大、法向吸力小及制动时间短等优点。

1 格栅型 SSLIM 结构与运行原理

1.1 格栅型 SSLIM 结构

图 1 为格栅型 SSLIM 结构的三维模型。图 1(c)及图 1(d)所示的两种次级结构的开槽长度均比初级铁心叠片厚度大,以此规范次级涡流路径,削弱 SSLIM 的端部效应。

由图 1 可知,笼型及梯型格栅 SSLIM 的初级结构完全相同,次级铝板和背铁厚度也相同。其中,笼型次级结构是在传统平板型次级结构的铝板和背铁上分别开镂空槽,使次级铝板完全嵌入背铁中,同时对铝板侧杆进行焊接,因此其制造成本比传统平板型次级结构高很多^[8]。而梯型次级结构背铁不变,只在次级铝板上开镂空槽,其制造成本较低。

1.2 格栅型 SSLIM 运行原理

图 2 为格栅型 SSLIM 的工作原理。图 2 中,初级绕组接通三相电源时将在气隙中产生行波磁场,次级导体在行波磁场的作用下会产生感应电动势、感应电流及相应的洛伦兹力。当次级保持不动时,初级将受到与行波磁场相反的洛伦兹力进而推动电机及车辆直线运行。

设 SSLIM 行波磁场同步速度为 v_N ,滑差为 s ,初级运行速度为 v ,则有:

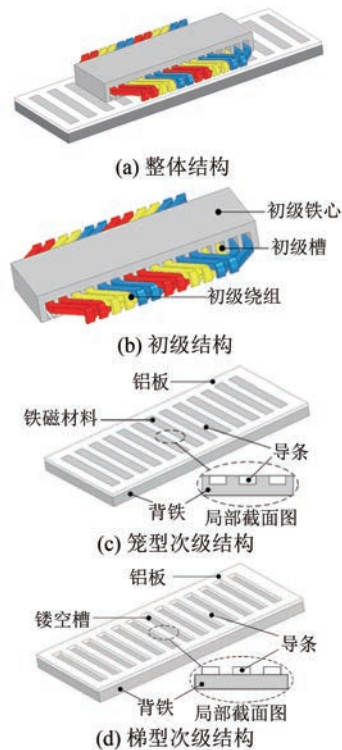


图 1 格栅型 SSLIM 结构的三维模型

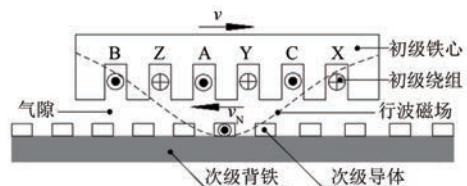


图 2 格栅型 SSLIM 工作原理

$$v = (1 - s)v_N \tag{1}$$

$$v_N = 2f\tau \tag{2}$$

式中: f 为电源频率; τ 为极距,且有 $\tau = \frac{Z_1}{2p}$,其中, Z_1 为初级槽数, p 为极对数。

由式(1)及式(2)可知,增加初级槽数 Z_1 、电源频率 f 或减少极对数 p 均可使行波磁场同步速度 v_N 增大,进而初级运行速度 v 也随之增大。

直线电机运行时,初级运行速度 v 与行波磁场同步速度 v_N 之间的差值再与行波磁场同步速度 v_N 做比即为 SSLIM 的滑差 s 。改变 SSLIM 三相电源相序,行波磁场及电磁力方向也随之发生变化。

1.3 倒梯形次级结构

为解决现有格栅型次级结构电磁推力小而法

向吸力大等缺陷,本文提出一种如图3所示的倒梯形次级结构。

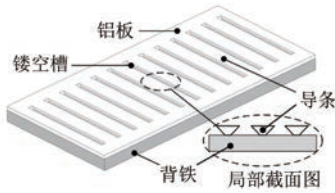


图3 倒梯形次级结构三维模型

图4为本文提出的倒梯形次级结构与现有梯形次级结构的横截面对比图。图中 l_1 为梯型次级导条宽度, l_2 、 l_3 分别为倒梯形次级上表面和下表面的导条宽度。

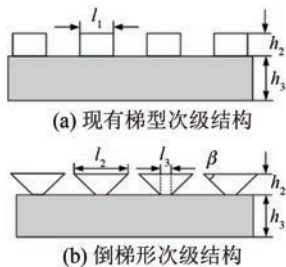


图4 格栅型次级导条结构横截面对比图

图4中,为保证次级导条横截面积不变,即次级铝制材料用量与原结构相等,倒梯形次级结构需满足:

$$l_2 + l_3 = 2l_1 \quad (3)$$

2 格栅型 SSLIM 槽配合

由旋转电机初、次级槽配合关系可知,当格栅型 SSLIM 初、次级槽配合关系满足下式时将引起同步附加电磁力:

$$\begin{cases} Z_2 = Z_1 \\ Z_2 = Z_1 \pm 1 \\ Z_2 = Z_1 \pm p \\ Z_2 = Z_1 \pm 2p \\ Z_2 = 2m_1pk \pm 2p \end{cases} \quad (4)$$

式中: Z_2 为次级槽数; m_1 为相数; k 为任意正整数。

为避免式(4)引起的电磁力波动,文献[9]给出一种较为合理的初、次级槽配合关系:

$$\frac{m_1 p}{Z_2} = \frac{p}{Z_2} \left(\frac{Z_1}{p} + 1 \right) \geq 0.8 \quad (5)$$

另外,式(5)所示的关系还可避免由电机启动引起的齿谐波磁动势增加而产生较强的异步附加电磁力。

3 梯型与倒梯形次级结构运行状态对比

为避免初、次级槽配合选取不当,使电机产生电磁力波动及异步附加电磁力,进而对其运行状态对比产生影响,参照式(4)及式(5),分别选取53-40少槽、53-47少槽近槽、53-58多槽近槽和53-67多槽等4种初、次级槽配合关系,对现有梯型次级结构和本文提出的倒梯形次级结构进行稳态、启动及制动等3种运行状态的有限元分析。表1为倒梯形次级结构的主要参数。

表1 倒梯形次级结构主要参数

参数名称	参数值
初级铁心长度/mm	1 740
初级铁心高度/mm	100
初级铁心叠厚/mm	207
初级槽数 Z_1	53
极距 τ /mm	196
极对数 p	4
气隙长度/mm	10
次级导体高度 h_2 /mm	10
次级背铁高度 h_3 /mm	25
同步速度 $v_N/(m \cdot s^{-1})$	1.96
额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
额定负载/N	1 000

由式(5)可知,当初级槽数为53时,所对应的次级槽数应小于71。为保证对比的有效性,本文设两种结构的初级不变,梯型次级结构的齿槽比为1:1,倒梯形次级结构的导条角度 $\beta=45^\circ$ 。当初、次级槽配合发生变化时,次级导条的 l_1 、 l_2 及 l_3 也随之发生变化,如表2所示。

表2 4种槽配合下次级导条参数

槽配合	l_1 /mm	l_2 /mm	l_3 /mm
53-40	21.75	31.75	11.75
53-47	18.51	28.51	8.51
53-58	15	25	5
53-67	12.985	22.985	2.985

3.1 电磁推力及法向力对比

两种结构的法向力 F_y 均可由下式表示^[10]：

$$\begin{cases} F_y = F_r - F_a \\ F_a = \frac{B_y^2}{4\mu_0} A \end{cases} \quad (6)$$

式中： F_a 为初级铁心与次级背铁间的吸引力； F_r 为次级感应板涡流与初级电流之间的排斥力； B_y 为气隙磁密的法向分量； A 为初级铁心表面积； μ_0 为真空磁导率。

由于 F_a 与 B_y 平方成正比， F_r 与次级感应板中的涡流平方成正比，而倒梯形结构可产生更大的感应涡流，其所产生的排斥力 F_r 也较大，因此在相同的 B_y 及横截面积条件下，其法向吸力小于梯型结构。

图 5 为滑差 $s=0.2$ 时，两种结构的 4 种槽配合对电磁推力及法向力的影响。

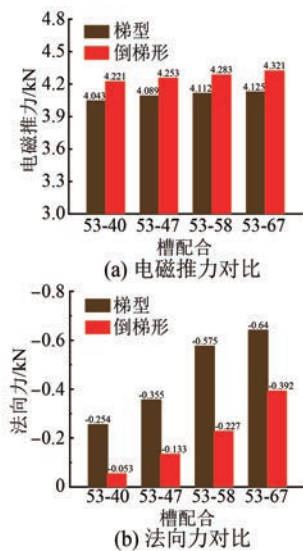


图 5 4 种槽配合对电磁推力及法向力的影响

由图 5(a) 可知，随着次级槽数的增加，梯型和倒梯形结构的电磁推力均逐渐增大，其提升幅度分别为 1.13%、0.56%、0.32% 与 0.76%、0.70%、0.88%，即两种结构的提升幅度均相对较小，这是因为电源频率为 50 Hz 时，梯型和倒梯形结构的感生电流路径已较为规范，次级开槽数对其路径的影响相对较小。

由图 5(a) 还可知，4 种槽配合的倒梯形结构的电磁推力均比梯型结构大，其提升幅度分别为 5.19%、3.47%、4.16%、4.75%，这是因为直线电机

的滑差较大，次级导条中的感生电流由于集肤效应均集中在表层，倒梯形结构的表层面积比梯型结构大，能产生更大的感应电流，从而形成更大的电磁推力。

定义法向力方向为“+”时，初、次级间表现为法向斥力；而法向力方向为“-”时，初、次级间表现为法向吸力。

由图 5(b) 可知，两种结构 4 种槽配合稳定运行时初、次级间均为法向吸力，且随着次级槽数的减少，两种结构的法向吸力均逐渐减小，减小幅度分别为 10.15%、38.20%、28.45% 与 42.09%、41.40%、60.15%。不同于图 5(a) 的电磁推力，图 5(b) 所示的两种结构的法向力减幅均相对较大，且倒梯形结构的减少幅度远大于梯型结构。这是因为不同槽配合下的气隙磁密法向分量 B_y 接近，由式(6)可知，此时初、次级间的吸引力 F_a 相近，而法向力 F_y 既与 F_a 相关，同时还与初、次级间排斥力 F_r 相关。由于倒梯形结构的导条宽度较大，由集肤效应形成的感生电流及反向磁场也较大，使其产生的排斥力 F_r 变大，进而法向吸力减幅相对较大。

3.2 起动特性对比

图 6 为两种结构在 4 种槽配合关系下的起动特性曲线。图 6(a) 中，相同槽配合下，倒梯形结构的电磁推力峰值均大于梯型结构，且达到稳定运行的时间更短，这种效果在 53-40 少槽配合时表现更为明显，说明倒梯形结构对次级少槽配合下电磁推力的改进效果更优。随着次级槽数的增多，两种结构的电磁推力起动时间均相应变长，这是因为次级槽数增加时导条宽度变窄，槽漏抗及次级电阻变大，损耗增加。

图 6(b) 中，相同槽配合下，两种结构法向力曲线具有与图 6(a) 相似的规律，即倒梯形结构的法向力 F_y 峰值均比梯型结构大且能更快达到稳定运行状态。随着次级槽数的增多，两种结构的法向力在整个起动过程中逐渐增大，且达到稳定的时间也增加。图 6(b) 中的 53-67 槽配合梯型结构的曲线在各条曲线的最下方，说明此种槽配合下梯型结构起动时的法向力最大。

表 3 为图 6(b) 所示的起动曲线达到稳定运行时的法向力 F_y 。

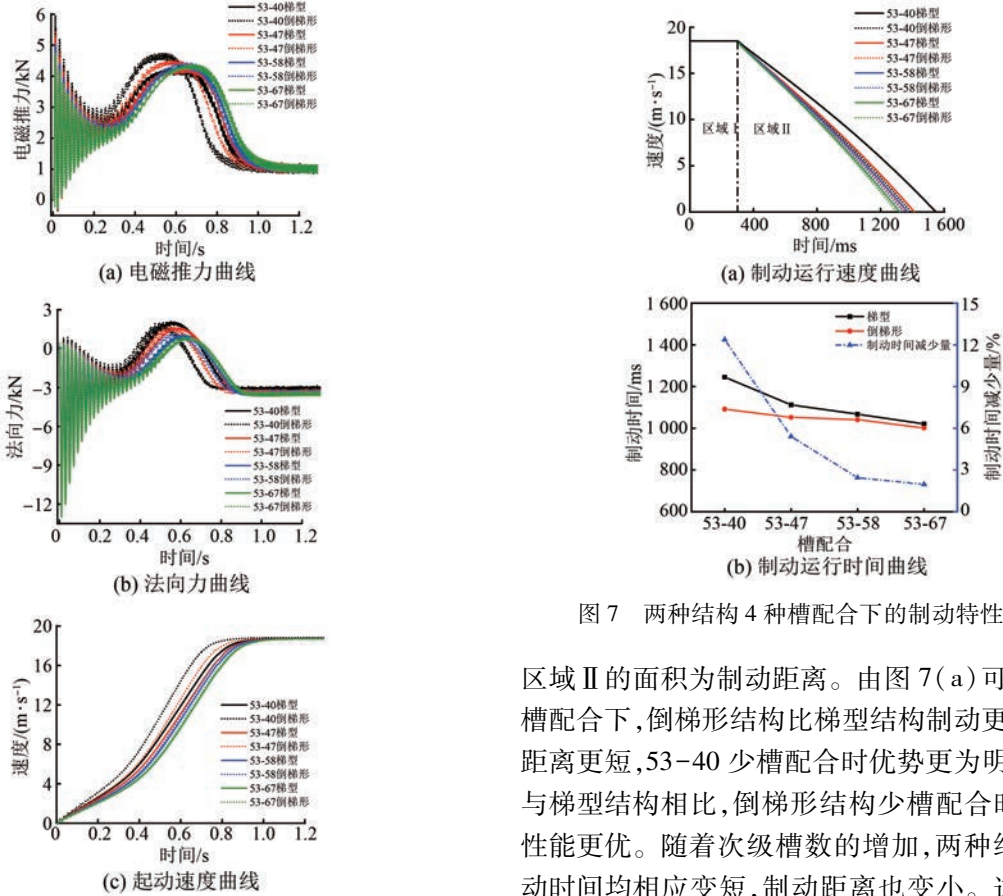


图6 两种结构4种槽配合下的起动特性曲线

表3 两种结构4种槽配合下稳定运行时的法向力/kN

	53-40	53-47	53-58	53-67
梯型	-3.333	-3.396	-3.454	-3.512
倒梯形	-3.197	-3.284	-3.367	-3.457

由表3可知,当法向力起动曲线达到稳定时,4种槽配合中的倒梯形结构的法向力均比梯型结构小,其减幅分别为4.08%、3.29%、2.51%、1.56%。

由图6(c)可知,负载与阻力一定时,两种结构起动速度曲线的相似性随次级槽数的增加而增加,即随次级槽数的增加,倒梯形结构起动性能的提升幅度变小。

3.3 制动特性对比

图7为SSLIM初速度和质量相同时,两种结构4种槽配合的制动特性曲线。图7(a)中,当两种结构在稳定运行区域I内达300ms时,其对初级进行反接制动,使其进入制动区域II内运行,且

图7 两种结构4种槽配合下的制动特性曲线

区域II的面积为制动距离。由图7(a)可知,相同槽配合下,倒梯形结构比梯型结构制动更快、制动距离更短,53-40少槽配合时优势更为明显,说明与梯型结构相比,倒梯形结构少槽配合时的制动性能更优。随着次级槽数的增加,两种结构的制动时间均相应变短,制动距离也变小。这是因为次级槽数的增加能够进一步规范次级感生电流路径,削弱其纵向电流分量,减小电机横向端部效应,使电磁制动力更大。

由图7(b)可知,4种槽配合下,倒梯形结构的制动运行时间均比梯型结构短。随着次级槽数的增多,制动时间及其减少量也分别随之减小。其中,倒梯形结构分别比梯型结构减少了12.37%、5.40%、2.44%、1.96%,说明53-40少槽配合时的制动时间减少量最大,与之对应的梯型及倒梯形结构制动运行时间分别为1245ms和1091ms,即倒梯形结构的制动时间为梯型结构的87.63%。

4 少槽配合时的电磁力分析

SSLIM电磁力指其所受的电磁推力及法向力之和。综上分析可知,无论是梯型还是倒梯形结构,53-40少槽配合时SSLIM在稳态、起动及制动等3种运行状态下均具有最优性能,因此本节仅对53-40少槽配合时的电磁力做进一步分析。

4.1 滑差对电磁力的影响

SSLIM 运行时的滑差不同,其所受的电磁力大小和方向也不同。图 8 为梯型和倒梯形两种结构在 53-40 少槽配合下电磁力随滑差变化的曲线。

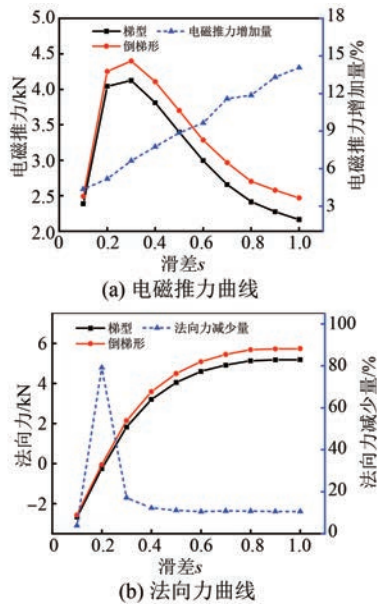


图 8 两种结构 53-40 少槽配合下的电磁力与滑差关系曲线

由图 8(a)可知,两种结构的电磁推力随滑差的变大呈先增大后减小的趋势。这是因为启动时滑差较大,次级感应电流的集肤效应较明显,从而形成的电磁推力也较大。当滑差 $s=1$ 时,梯型结构的启动推力为 2.16 kN,倒梯形结构为 2.47 kN,即梯型结构的电磁推力为倒梯形结构的 87.45%,其电磁推力升幅为 14.35%。随着 SSLIM 运行速度的提升,初、次级之间的滑差在逐渐减小,电磁推力的提升幅度也逐渐变小,当滑差 $s=0.3$ 时,两种结构的电磁推力均达到最大值,其中,梯型结构为 4.12 kN,倒梯形结构为 4.40 kN,即倒梯形结构电磁推力的最大值为梯型结构的 1.07 倍。

由图 8(b)可知,两种结构的法向力均随滑差的增大呈逐渐增大趋势。当滑差较小时,法向力为负值,表现为吸力;滑差较大时,法向力为正值,表现为斥力。表明不同滑差下,倒梯形结构吸力降低、斥力增大。随着滑差 s 的减小,倒梯形结构的法向力减少量呈先增大后减小的趋势。这是因为滑差较大时,梯型结构利用集肤效应的能力已较为明显,采用倒梯形结构对法向力的减少幅度

并不大。随着滑差逐渐减小,两种结构利用集肤效应的能力均减弱,但倒梯形结构上表面积比梯型结构大,利用集肤效应的能力衰减较慢,因此法向力减少量呈增大趋势,当滑差为 0.2 时,减幅最大,为 79.13%;当滑差为 0.1 左右时,电机的运行速度趋于稳定,两种结构利用集肤效应的能力均较小,因此法向力减少量呈减小趋势。

4.2 导条上表面宽度 l_2 对电磁力的影响

由图 4 可知,次级导条的 l_2 决定其有效载流体积,进而影响初、次级之间气隙磁密及电磁力的大小。由式(3)可知,若保持 l_1 不变, l_2 变大,则 l_3 减小,可通过改变 l_2 长度,分析其对倒梯形结构电磁力的影响。

图 9 为滑差 $s=0.2$ 时, l_2 以 2 mm 增加时的倒梯形结构的电磁推力及法向力。

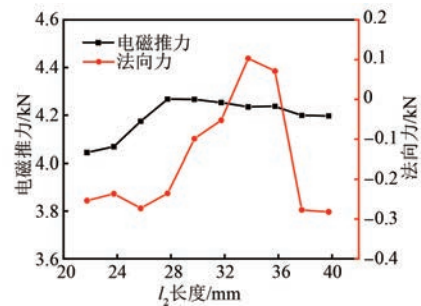


图 9 l_2 与电磁力关系曲线

由图 9 可知,电机产生的电磁推力随 l_2 的增加呈先增大后逐渐减小的趋势,并在 $l_2=29.75$ mm 时达到最大值 4.266 kN。而法向吸力则呈先减小后增大的趋势,并在 $l_2=33.75$ mm 处达到最大值 0.1 kN(表现为斥力)。

造成上述现象的原因是,当 l_2 逐渐增加时,次级导条可形成更大的感应电动势和感应电流,并与气隙中的行波磁场耦合,使电机电磁推力增大而法向吸力减小;当 l_2 继续增大时,由图 4 可知次级导条间的间隙逐渐减小,此时初、次级间的气隙磁阻增大,导致气隙磁密降低,进而使次级感应电流及其与行波磁场的耦合能力减小,导致电机电磁力性能下降。

5 结 语

针对 SSLIM 格栅型次级结构电磁推力小而法向吸力大等问题,提出一种上表面积大而下面积小的倒梯形次级结构,并对其启动特性、制动

特性及电磁力进行了深入分析与研究,得到如下结论。

(1) 相同初、次级槽配合下,相比于梯型结构,倒梯形结构具有电磁推力大、法向吸力小、起动速度快及制动时间短等优点。

(2) 与现有的梯型结构相比,倒梯形结构在少槽配合时的电机性能更优,稳定运行时,其电磁推力提升 5.19%,起动并达到稳态时,其法向吸力减小 4.08%,而制动运行时,其制动时间减幅为 12.37%。

(3) 滑差增大时,梯型结构与倒梯形结构所产生的电磁力变化趋势相同;当滑差为 0.3 时,倒梯形结构的电磁推力达到最大值并为梯型结构的 1.07 倍;当滑差为 0.2 时,倒梯形结构的法向吸力减幅最大,为 79.13%。

(4) 倒梯形结构导条的上表面宽度 l_2 对 SSLIM 气隙磁密影响显著,需选取合适的长度,才能获得更好的电磁力性能。

【参考文献】

- [1] 崔霆锐,宗立明,李熙. 直线电机地铁车辆牵引系统国产化应用研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(4): 61.
- [2] 李庆来,方晓春,杨中平,等. 直线感应电机在轨道交通中的应用与控制技术综述[J]. 微特电机, 2021, 49(8): 39.
- [3] LU Q, LI Y, YE Y, et al. Investigation of forces in linear induction motor under different slip frequency for low-speed maglev application [J]. IEEE Transactions on energy conversion, 2013, 28(1): 145.
- [4] 张德伟,郭小舟,孔令星,等. 中低速磁浮车用直线感应电机次级电导率变化对控制转差频率的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(7): 16.
- [5] 叶云岳,卢琴芬,张高圣. 直线电机轨道交通用栅形直线电机次级装置: CN104348328A [P]. 2015-02-11.
- [6] 吕刚. 直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5665.
- [7] 朱金凯,吴峻. 直线感应电机梯形槽次级结构的有限元分析[J]. 微电机, 2010, 43(6): 36.
- [8] 张贤. 格栅型次级感应板设计与直线感应牵引电机性能提升研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [9] 张志华,史黎明,李耀华. 栅格次级双边直线感应电机特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 103.
- [10] 吕刚,张贤. 不同槽配合格栅型直线感应电机电磁特性研究[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 18.
- [9] 崔霆锐,宗立明,李熙. 直线电机地铁车辆牵引系统国产化应用研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(4): 61.
- [10] 李庆来,方晓春,杨中平,等. 直线感应电机在轨道交通中的应用与控制技术综述[J]. 微特电机, 2018, 45(4): 61.
- [11] YANG L, YANG J Y. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865.
- [12] WANG Z, LI Q, LI S R. Adaptive integral-type terminal sliding mode fault tolerant control for spacecraft attitude tracking[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35195.
- [13] 杨永乐,杨明发. 基于负载观测的永磁同步电机非奇异快速终端滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(8): 24.
- [14] KHOO S, XIE L, MAN Z. Integral terminal sliding mode cooperative control of multi-robot networks[C] //IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2009.
- [15] 金鹏飞,谢源,王杰,等. 基于负载转矩观测器的永磁同步电机积分滑模控制[J]. 微特电机, 2018, 46(8): 62.
- [16] 张智鑫,刘旭东. 基于 ESO 的永磁同步电机伺服系统快速终端滑模控制[J/OL]. 控制理论与应用: 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20221107.1006.008.html>.
- [17] WANG H, SHI L H, MAN Z, et al. Continuous fast nonsingular terminal sliding mode control of automotive electronic throttle systems using finite-time exact observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7160.
- [18] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.

(上接第 31 页)