

分段直线感应电动机起动性能的计算和分析

蒋映 石景波

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘要: 为了提高长初级直线感应电机的效率,节约电能,在实际应用中需要将其初级分段。以分段长初级直线感应电机为研究对象,采用有限元方法,建立了电机的电磁场计算模型,同时运用虚功法来计算电机的电磁力。通过 ANSOFT 仿真,研究了电机的空载启动、运行及堵转过程,得出了电机的推力、位移、速度曲线及电机内部电磁场的分布特点。最后,利用 Maxwell2D 软件的有限元法分析了长初级直线感应电机启动推力随气隙大小、分段间距以及启动位置的变化规律。所得到的计算方法与规律对分段长初级直线感应电机的优化设计和制造能提供有益帮助。

关键词: 直线感应电动机;长初级;有限元法;起动性能

中图分类号: TM301.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Calculation and analysis of starting performance in segmented long primary linear induction motor

Jiang Ying Shi Jingbo

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The significance is increasing efficiency and saving energy for segmenting the long primary linear motor into blocks. As the research object, the electromagnetic calculation model of the segmented long primary linear induction motor is established by using the finite element method (FEM), and the electromagnetic force computation of the motor is then derived from the virtual work method. The starting, operating and stalling process have been studied by ANSOFT, and the thrust, position and velocity curve are obtained coupled with the electromagnetic field distribution inside the motor. Finally, the change tendency of starting thrust is analyzed by using the FEM of Maxwell 2D, which is along with the variation of the air gap size, the interval of the primary and the starting position. The obtained calculation method can provide useful help for the optimal design and manufacture of the segmented long primary linear induction motor.

Keywords: linear induction motor; long primary; finite element method; starting performance

1 引言

直线感应电动机可以将电能直接转换成直线运动的机械能^[1],自20世纪70年代以来,就广泛应用于工业、交通和国防等领域。直线感应电动机在结构与工作原理上与旋转电机类似^[2]。两者的不同之处是直线感应电动机的铁心开断^[3]。边端效应是直线感应电动机初级铁心和次级开断所致的固有效应^[4-5]。由于运动时初次级之间要作相对运动,为了保持初次级间耦合始终保持不变,必须将初次级制造成不同的长度。根据直线感应电动机初次级的相对长度,直线感应电动机分为:长初级直线电动机和短初级直线电动机^[6]。目前,国内外主要集中在对短初级直线电动机

的工作原理、数学模型、参数计算和性能以及控制方法的研究^[7-10]。但是对于长初级,由于存在应用领域(磁悬浮列车和电磁发射与飞机电磁弹射)的局限性^[11]以及供电困难^[12]问题,研究的文献并不多。海军工程大学舰船综合电力技术国防重点实验室对双边分段式长初级直线感应电动机从边端效应^[13]、物理建模^[14]、控制方法^[15]和动态仿真^[6]进行了研究,而对于单边分段式长初级直线感应电动机本身以及起动性能方面研究很少。本文以分段式长初级直线感应电机为分析对象,并且利用 ANSOFT 仿真软件,在适度简化的基础上建立了电机电磁场动态仿真模型,通过对电机设计不同参数,比较仿真结果,同时分析电机起动性能。

2 有限元分析法

2.1 直线感应电动机的有限元模型

直线感应电动机中的电磁场是一个三维非线性场。从理论上讲,维数越高计算精度也就越高,但是相对的,处理的问题越复杂,计算时间越长。为了简化计算,这里作出以下几点假设^[16]来将其转化为二维场计算:1)初次级铁心的电导率为0、磁导率无限大,即忽略铁心磁阻与铁心损耗;2)电机在Z方向无限宽,即忽略电机的横向边端效应;3)次级仅在x方向移动。

根据麦克斯韦基本方程式,直线感应电动机的非线性气隙磁场方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + V \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - J_z \quad (1)$$

式中: μ 为磁导率, σ 为电导率, A_z 为矢量磁位, x 为次级运动方向(纵向或切向), y 为电机横向, J_z 为线圈电流密度, V 为次级的运动速度。

表1为本文所用到的单边长初级非磁性次级直线感应电动机的主要参数。

表 1 长初级直线感应电动机的主要参数

起动推力: 225 N	同步速率: 4.5 m/s
电压额定值: 380 V	电源频率: 50 Hz
相数: 3	极对数(计算值): 3.5/段
初级槽数: 24 /段	每极每槽数: 1
初级齿宽: 4 mm	初级齿距: 15 mm
极距: 45 mm	机械气隙: 2 mm
绕组型式: 双层叠绕式无补偿整距绕组,星形接法	
次级结构: 铜钢复合次级,铜板厚度为 2 mm、钢板厚度为 6 mm,长度为 370 mm,宽度为 110 mm	
初级结构: 总长为 1 844 mm,分为 5 段,每段长 364 mm,各段间距 6 mm,各段两边端采用半填充槽结构,各段初级槽数为 24	

将整个电机模型作为求解区域,采用最常见的基于模型单元边长的三角形网格剖分设置进行模型剖分。结合初级各段采用双层绕组半填充槽结构的实际,以及考虑到初级铁心纵向开断导致边端磁场分布不规则的影响,为了使分析结果更准确,初级纵向两端至少需要向外拓展一个极距的空气域。此时可在 ANSOFT 中设定边界条件为 Ballnoon,即边界条件转化为:

$$A|_{AB,BC,CD,DA} = 0 \quad (2)$$

长初级直线感应电动机的有限元求解模型如图 1 所示。

确定有限元求解区域边界后,对其进行运动选项的设置和网格剖分,采用三角元有限元法对上述方程(1)和(2)

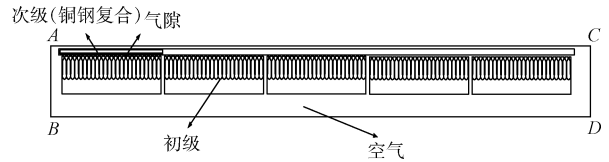


图 1 长初级直线感应电动机的有限元求解模型

进行离散求解,就可求得研究区域内电机的磁场分布情况。

2.2 直线感应电动机的电磁力计算

基于上述直线感应电动机的有限元建模,可以采用虚功法^[17]来计算电磁力,即将电机整个求解区域进行适当的网格剖分,形成一系列离散的三角形单元,然后将网格中各个三角形单元的能量相加就可得到总能量:

$$W = \sum_{i=1}^N \int_{S_i} \left[\int_0^{B_i} H_i dB_i \right] dS_i \quad (3)$$

式中: W 为各三角形的能量和, N 为所剖分的三角形个数, H_i 和 B_i 分别为第 i 个三角形单元内的磁场强度和磁感应强度。 S_i 为单个三角形面积。 S_i 为第 i 个三角形单元的面积。

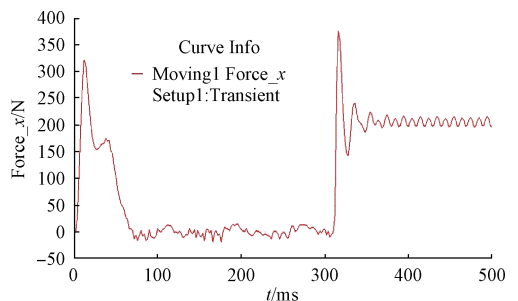
相比于不考虑非线性部分的电磁力计算,考虑非线性的计算结果与其相差不到 5%,所以为了简化计算,这里忽略二阶非线性部分。那么可以推出,电机沿着某方向的电磁力就是能量沿该方向对位移的变化率。即电磁力的表达式为:

$$F_x = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i}{\mu_i} \frac{\partial B_i^2}{\partial x} + \frac{\partial S_i}{\partial x} \frac{B_i^2}{\mu_i} \right) \quad (4)$$

式中: F_x 为沿 x 方向的电磁力即切向推力, μ_i 为第 i 个三角形单元的磁导率。

3 电机起动、运行、堵转

利用 ANSOFT 的 Maxwell 2D 进行仿真,建立 Band 模型来区分静止物体和运动物体。设定在 Band 内部的电机次级为运动部分,运动范围为 0~1 480 mm,仿真时间为 0.5 s,仿真步长为 0.001 s。考虑电机的机械瞬态,就可以得到如图 2 所示的电机从 0 m/s 起动加速到速度稳定 4.5 m/s 再到电机堵转速度突变为 0 m/s 整个过程的电磁力、位移和速度曲线。



(a) 切向推力

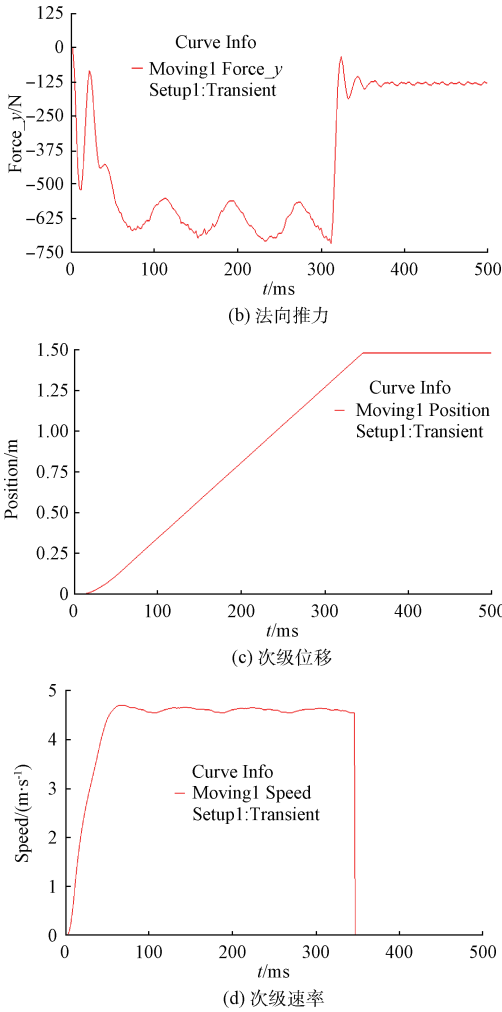


图 2 电机机械瞬态运行曲线

由图 2 可见,在起动时(0~0.07 s)电磁力(切向和法向推力)波动比较大,主要是因为通电的瞬间有一个气隙磁场建立的暂态过程,磁场的变化比较明显。切向推力是牵引电机向前运行的动力,而法向推力是由初级铁心和次级铁轭之间的吸引力与初级电流和次级感应电流之间的推斥力综合作用的结果。电机在空载稳定(0.7~0.345 s)运行时,切向推力和法向推力均呈周期性的波动。且波动周期 $T=0.081$ s,由 $\Delta=TV=36.45$ cm $\approx L$ 可知,波动周期与初级分段长度几乎相同。堵转推力稳定后也有幅度不大的波动;在 0.35 s 左右,电机运行达到设定的边界处,出现堵转,即次级位移在此时达到恒定。直线电机由于推力较大,次级板较轻,导致加速过程非常快,约 0.057 s 即可加速到最大运行速度。图 2(d)显示电机运行速度偶尔会超过同步速度,这是由于电机空载时,切向推力不稳定,具有一定的波动性,以及物理中力的惯性作用,使得电机偶尔呈现发电机的状态。

利用 ANSOFT,经过后处理,可以得到电机不同时刻的磁场分布图,选取电机起动时刻 $t=0.03$ s 和电机稳态运

行时刻 $t=0.025$ s 时的磁场分布图来做分析。

从图 3 和 4 可以看出电机两端的电磁场分布不规则,磁力线稀疏有漏磁,可见由直线感应电动机铁心开断引起的端部效应对其电磁场的分布也是有一定的影响。对比两图可见,直线电机的磁场随着次级位置的变化而变化,电机的槽漏磁比较多,可见漏抗对电机性能的影响不能忽略。

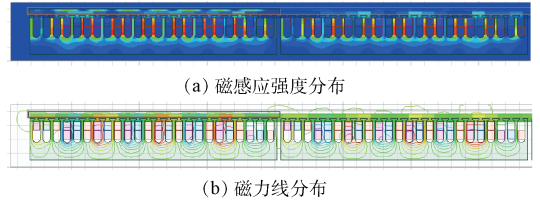


图 3 0.03 s 时的磁场分布

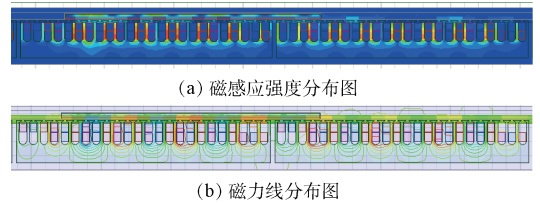


图 4 0.025 s 时的磁场分布

图 5(a)为电机堵转时的气隙磁密,呈近似的正弦分布,图 5(b)是对其进行的空间傅里叶分析,从中可以看出直线感应电动机采用星形接法,基本可以消除气隙磁密中的 3 次谐波,但是 5 次、7 次、11 次的谐波含量比较大。这里计算直线感应电机的气隙径向磁密的基波的方法采用了基于 Ansoft Maxwell 的旋转电机气隙径向磁密求取的方法^[18]。

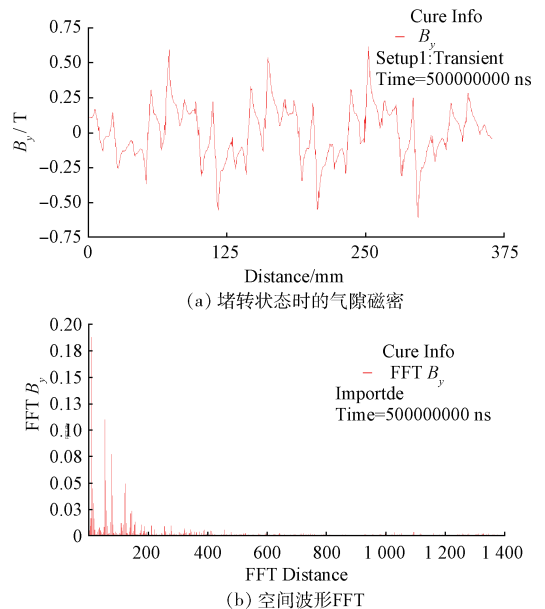


图 5 气隙磁密及其谐波分析图

由图 5(b)空间波形 FFT 分析可以得到基波 $B_y = 0.1898T$, $B_x = 0.0456T$, 而由解析法计算得到的基波值 $B_y = 0.1908T$, $B_x = 0.0581T$; 可见在误差范围内, 验证了直线感应电动机有限元模型和电磁力计算的准确性。

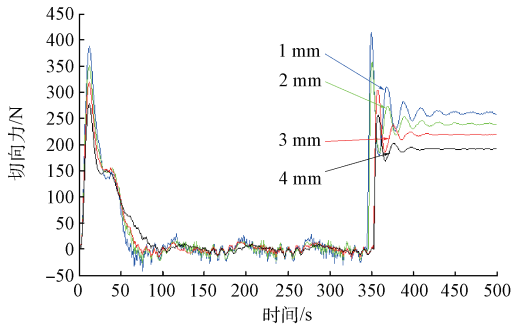
4 电机起动性能分析

4.1 气隙变化时起动性能分析

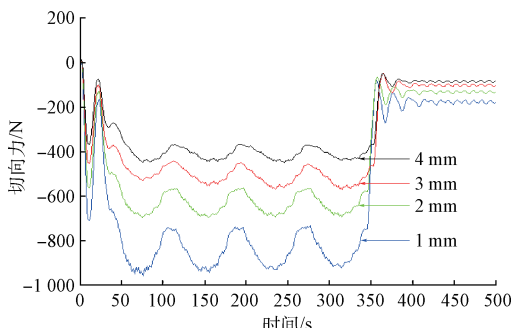
相比于旋转电机直线电机的气隙要大得多, 通常在 2 mm 左右。一般气隙的大小会影响气隙磁压降、磁化电流以及漏抗的大小, 从而影响电机性能。为此, 通常需要选择合适的气隙大小来使得气隙磁密符合电机设计要求。

文中直线感应电动机的机械气隙设定为 2 mm, 这里还要引入电磁气隙的概念。由于非磁性(铜或铝)次级的导磁性能和空气相同, 所以总的气隙应由机械气隙加上铜或铝板的厚度。保持次级铜板厚度不变, 通过改变电机的机械气隙来改变电磁气隙。分别计算气隙 δ 为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 时电机空载起动过程中的受力变化。

由图 6 可见, 电机气隙越大时, 切向推力和法向推力在起动瞬间的波动峰值越小, 但是达到稳态的调节时间越长。在稳态运行时, 由于只改变了气隙大小没有改变次级长度, 所以切向推力和法向推力的波动周期也不会因此改变。只是气隙较大时, 可以明显看到, 法向推力在幅值减小的同时, 波动的幅度也在减小。这一结论为城市交通系统选择大气隙电机提供了有利的证据。



(a) 切向推力



(b) 法向推力

图 6 气隙不同时电磁力的变化曲线

如图 7 所示, 切向推力和法向推力均随着气隙的增加而变小, 且法向推力大小约为切向推力值的一半。同时, 在

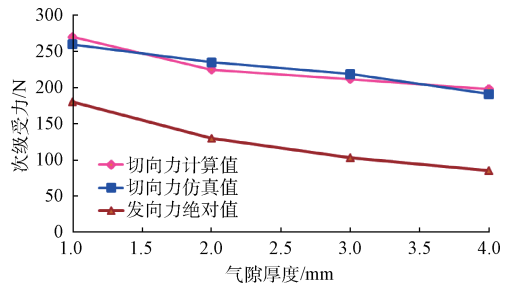


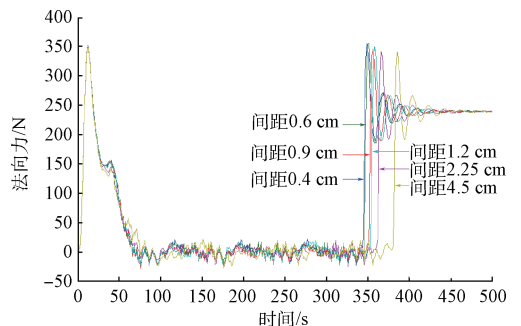
图 7 气隙不同的切向推力及法向推力

误差容许的范围内, 解析法计算得到的切向推力值与有限元仿真值基本相同, 再次验证了前文有限元法的准确性, 为上述理论研究提供了实验依据。

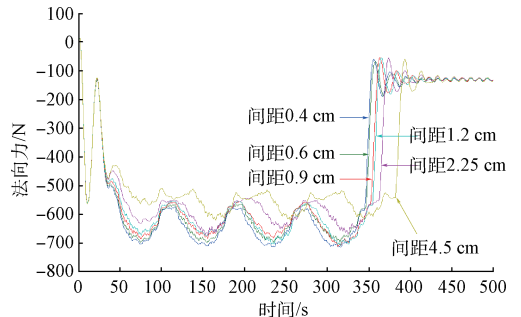
4.2 间距变化时起动性能分析

前面考虑的电机推力随气隙大小变化而变化是基于初级结构不变, 且各段初级冲片间距 0.6 cm。在分段长初级直线感应电机中, 一般设计次级长度为初级以及间距之和的整数倍, 这有利于切换供电过程中电磁推力稳定。若初级冲片长度确定, 间距变化时次级板长度也随之同步改变, 使其满足 $L_2 = L_1 + L_3$, 其中 L_1 为单段初级长度、 L_2 为次级长度、 L_3 为初级间隙。那么当 L_3 足够大时, $L_2 \gg L_1$, 这样就可以将分段长初级电机直接看作是多个短初级电机串联运行。所以, 在不改变其他条件的情况下, 可以研究初级间距变化对电机空载起动过程的受力影响。

现设定初级各段间距分别为 0.4 cm、0.6 cm、0.9 cm、1.2 cm、2.25 cm、4.5 cm, 与此同时保持次级长度和气隙不变, 分析电机次级受力的变化趋势如图 8 和 9 为间距不同



(a) 切向推力



(b) 法向推力

图 8 不同间距时电磁力的变化曲线

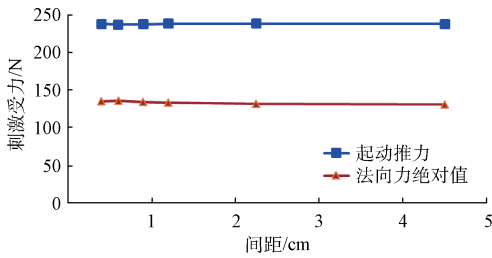


图 9 不同间距时的切向推力及法向推力

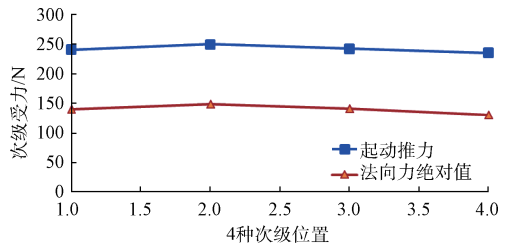


图 11 起动位置不同时切向推力及法向推力

时电机起动推力的大小。

由图 8 可见,当间距增大时,起动过程中次级的切向推力和法向推力在起动瞬间的波动峰值略微减小。在稳态运行时,明显可以看出随着初级间距的拉大,次级受力的波动周期加长,达到堵转的时间也明显往后推移。由此可以判断,改变初级间距的长度在某种程度上相当于改变了初级各段的等效长度。图 9 则表示初级间距大小的改变不影响电机的电磁力大小。

4.3 起动位置变化时起动性能分析

由于长初级直线感应电动机是分段供电的,并且 $L_2 = L_1 + L_3$,保证了任何时刻初次级耦合的面积不变。但考虑到各段初级铁心开断,其两端端还存在着半填充槽的结构,因此,有必要分析一下次级初始位置不同时,对电机起动推力的影响。现分别考虑 4 种情况下电机起动推力的变化: 1)次级覆盖前一段初级 3/4 及后一段初级 1/4; 2)覆盖前后两段初级各 1/2; 3)覆盖前一段初级的 1/4 及后一段初级的 3/4; 4)覆盖一整段初级。此时,仍然保持初级结构不变,次级板的长度不变。图 10 和 11 为次级处于不同位置

时的电机切向推力和法向推力。

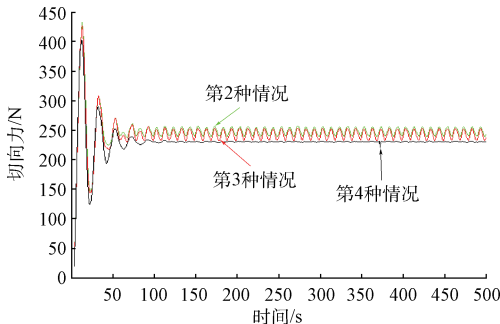
由图 10 和 11 可知,次级覆盖单段初级比例为 1 时,起动推力最小;而次级覆盖前后两段初级的比例各为 1/2 时,起动推力最大;次级覆盖覆盖前后两段初级比例为 3/4 和 1/4 或者是 1/4 和 3/4 时,起动推力基本相同。可见,电机起动时,也可以根据需求来选定次级起动位置。

5 结 论

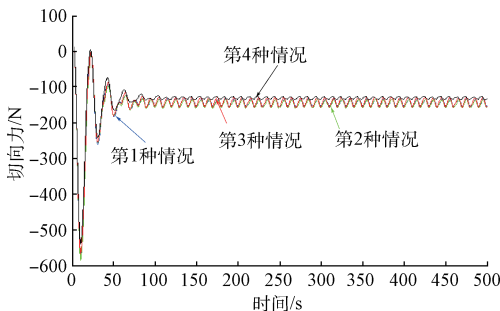
本文将分段长初级直线感应电机经过适度的简化和假设,将三维模型转化为二维模型,建立了直线感应电机电磁场动态仿真模型,在此基础上采用虚功法对电机电磁力进行了分析计算。然后利用 ANSOFT 软件对电机进行了仿真,得到了电机空载起动、运行和堵转整个过程的推力、速度与位置变化曲线,推出了推力波动周期与初级分段长度相关。而后对于电机起动和运行时的磁场分析表明,边端效应和绕组半填充槽结构影响电机的磁场分布。堵转气隙磁密与空间 FFT 分析,验证了磁场理论计算的正确性。最后,从气隙大小、分段间距以及启动位置对电机推力的影响,可以看出推力随气隙的增大而减小,但是波动性稳定增强,切向推力仿真值与计算值几乎相同进一步验证电磁力理论计算的准确;初级间距变大,稳定运行时次级受力的波动周期相应增大,法向力变小;而启动位置变化也影响着次级的受力。由此可推断气隙长度的改变结合分段间距的调整可以调节电机电磁受力。本文的仿真结果将为直线感应电动机的在实际中的电磁设计及控制系统的优化设计提供参考。

参考文献

- [1] 王海霞, 颜桂定, 李宝辉, 等. 直线电机运动控制系统的软件设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 264-269.
- [2] 李志宏, 强雄, 计丽霞, 等. 直线感应电动机磁场气隙的分析及试验设计[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(8): 86-88.
- [3] 陈红艳, 张昆仑. 直线电动机电磁场的有限元计算[J]. 电气制造, 2008, 43(4): 20-21.
- [4] 鲁军勇, 马伟明, 孙兆龙, 等. 多段初级直线感应电机静态纵向边端效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 95-101.



(a) 切向推力



(b) 法向推力

图 10 起动位置不同时电磁力的变化曲线