

文章编号: 1001 - 2486(2003)04- 0076 - 03

高速磁悬浮列车电磁场的模拟计算*

陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路, 田武刚, 胡媛媛
(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 采用有限元法研究了高速磁悬浮列车的悬浮和推进电磁场, 重点研究了车辆在不同运行条件下悬浮力和推力的变化规律, 并得出了经验公式。分析和计算结果表明, 悬浮力和推力的大小与功角有关, 并且由于定子齿槽和材料不连续的影响, 悬浮力和推力都存在六倍频的波动。

关键词: 磁悬浮列车; 直线同步电机; 电磁场分析; 有限元法; 模拟计算

中图分类号: TM153+.1 文献标识码: A

The Simulated Calculation on Electromagnetic Fields of the High Speed Magnetic Levitation Vehicle

CHEN Di-xiang, PAN Meng-chun, LUO Fei-lu, TIAN Wu-gang, HU Yuan-yuan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The levitating and propulsive electromagnetic fields of the high speed magnetic levitation vehicle is studied by using the finite element method. The tide of the thrust and levitation force varying along under the running condition is highlighted and an experiential formula is derived. According to the analysis and the calculation, the thrust and levitation force are related to the power angle, and the sixfold frequency undulation is found in thrust and levitation force due to the influence of the discontinuousness of the stator grooves and the material.

Key words: magnetic levitation vehicle; linear synchronous motor; electromagnetic field analysis; finite element method; simulated calculation

常导高速吸浮型磁悬浮列车是一个典型的直线同步电机对象, 而且又有别于一般的直线同步电机。其长定子轨道上的初级线圈采用三相交流激磁, 悬浮电磁铁上的次级线圈采用直流激磁, 而且次级磁极上也有齿槽, 用于设置发电绕组, 因此其磁场分布极为复杂。其悬浮力和推力不仅受到转子电流、定子电流和气隙宽度的影响, 而且受到定子齿槽、发电齿槽、功角等因素的影响, 因此深入分析悬浮力和推力与这些因素的关系对于保证悬浮和推进的可靠性有着十分重要的意义。尽管国内外学者对于直线同步电机的磁场分布已作了许多研究^[5], 但是对于高速磁悬浮列车电磁场

分布的系统研究尚未见到详细的报道。为此我们应用大型有限元分析软件 ANSYS, 从分析气隙磁场的分布入手, 采用空间离散手段, 对常导高速磁悬浮列车的电磁场进行了比较全面的分析和计算, 获得了

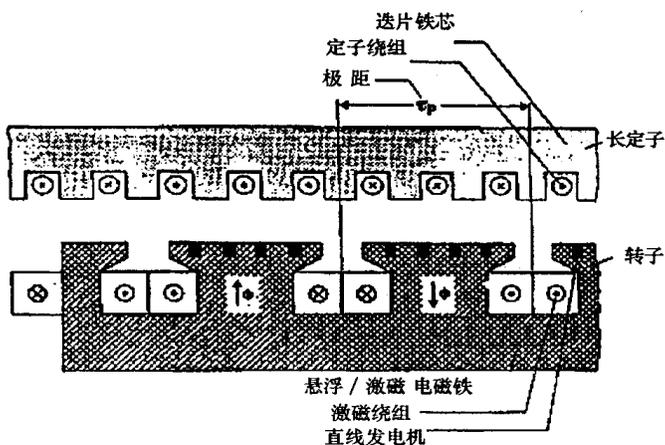


图 1 常导高速磁悬浮列车中直线同步电机的结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of linear synchronous motor in normal conducted high speed magnetic levitation vehicle

* 收稿日期: 2003 - 02 - 20
基金项目: 国家 863 高技术项目资助(G02-1-8a)
作者简介: 陈棣湘(1970 -), 男, 讲师, 博士生。

一些与文献报道和以往试验数据相符的结果^[1]。

1 常导吸浮型高速磁悬浮列车中直线同步电机的结构

常导磁悬浮列车所用的直线同步电机的结构如图 1, 它属于单边长定子直线同步凸极电动机。长定子由地面上的轨道构成, 转子由车载电磁铁构成。转子绕组中加有直流电流, 形成悬浮磁场, 与定子作用产生悬浮力。而长定子绕组中通有三相交流电, 形成行波磁场与车载电磁铁的磁极相互作用, 从而产生推力^[1]。

2 有限元模型的建立

所研究磁悬浮列车的每节车厢上有 7 个悬浮电磁铁组合, 分布在车厢的两侧。每个悬浮电磁铁组合由 6 对悬浮电磁铁构成。定子(轨道) 的厚度为 90mm, 极距 $\tau = 258\text{mm}$ 。定子轨道上的线圈匝数为 1, 通三相交流电; 悬浮电磁铁上的线圈匝数为 270, 通直流电。由于在实际情况下, 定子(轨道) 的长度远大于转子(悬浮电磁铁) 的长度, 并且定子(轨道) 和转子(悬浮电磁铁) 沿垂直于车辆运动方向(z 方向) 的每一横截面的形状均相同, 因此我们采用 2-D 长定子模型进行分析。

分析常导高速磁悬浮列车电磁场时, 既要模拟恒定磁场, 又要模拟时变磁场, 这是特别困难的。而且由于定子和转子上均有齿槽, 材料不具有连续性, 定子和转子运转到不同位置时磁路结构不同, 磁场分布也不相同。为了在有限元分析中体现出这种不同, 我们采用了空间离散的方法, 即通过离散电机转子的位置, 建立若干个不同位置的模型进行分析。只要相邻模型之间位置的差距足够小, 这种方法的精度就足够高。此时每个模型内的磁场都可以看成是恒定磁场。在分析过程中, 通过设定周期性边界条件克服了直线电机的纵向边端效应的影响, 并且对于每极槽数为整数的直线同步电动机来说, 由于其结构具有对称性, 转子模拟一对磁极就可以了。

3 结论

3.1 磁感应强度的分布情况

如图 2、图 3 中, 图中幅值大者为垂直分量 B_y , 幅值小者为水平分量 B_x 。从图中可以看出, 齿槽的存在对磁感应强度的分布影响很大。该结论已得到实验验证, 详细情况将在后续文章中介绍。

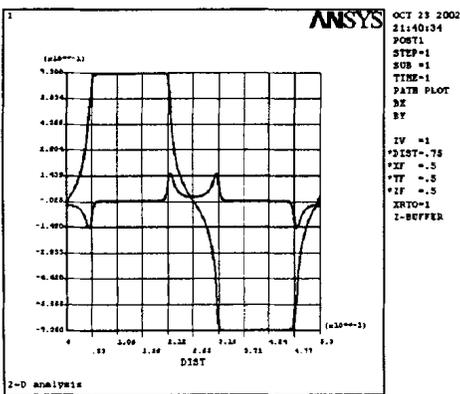


图 2 没有齿槽时气隙中央的磁感应强度分布
Fig. 2 The magnetic induction intensity distribution in the center of air gap without grooves

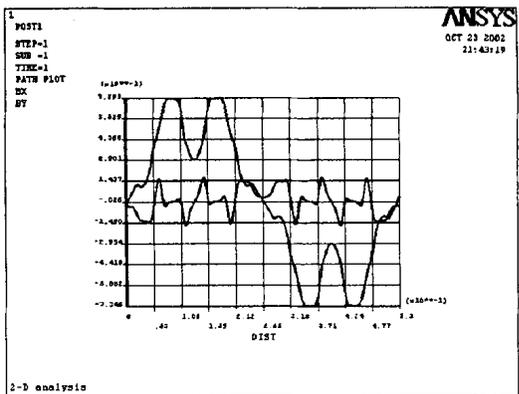


图 3 有齿槽时气隙中央的磁感应强度分布
Fig. 3 The magnetic induction intensity distribution in the center of air gap with grooves

3.2 功角对推力和悬浮力的影响^[5]

从图 4 中可以看出, 推力在功角为 90° 时取得最大值, 悬浮力在 90° 时取得平均值。

3.3 电磁力的波动情况^[2~4]

图 5、图 6 中表示的是一个周期内 (0.02s) 悬浮力和推力的波动情况, 从图中可以明显地看到六倍频

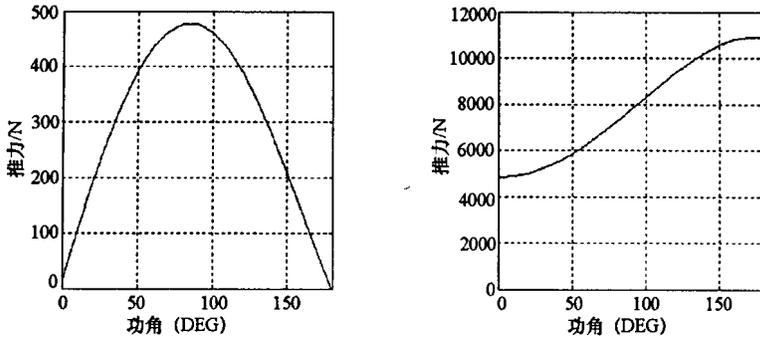


图 4 推力和悬浮力随功角的变化情况

Fig. 4 The variety of thrust and levitation force according to power angle

的波动。

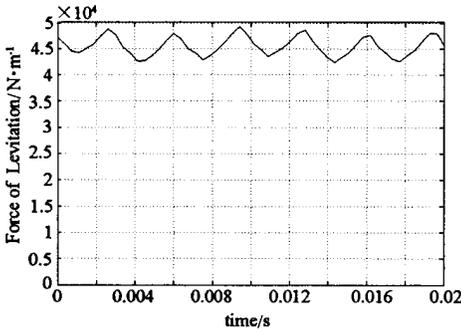


图 5 悬浮力的计算结果

Fig. 5 The calculation solution of levitation force

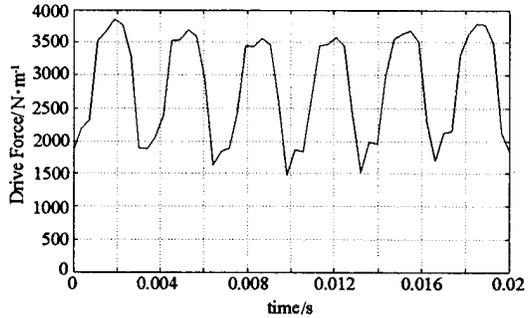


图 6 推力的计算结果

Fig. 6 The calculation solution of thrust

3.4 不同运行条件下电磁力计算的经验公式

当气隙宽度在 6mm 至 14mm、定子电流在 600A 至 1400A、转子电流在 14A 至 30A 范围内变化时,采用有限元方法对多个模型进行了电磁场的分析和电磁力的计算,并采用最小二乘法对上述数据进行曲线拟合,得出了不同运行条件下电磁力计算的经验公式(针对一对悬浮电磁铁):

$$FX = (- 3.27x^3 + 130.08x^2 - 1880.58x + 11852.2) \cdot (407.29y^3 - 1138.96y^2 + 3743.75y - 218.2) \cdot (0.014z^3 - 0.928z^2 + 150.24z - 197.09) / 2796^2 \tag{1}$$

$$FY = (- 167.41x^3 + 6413.73x^2 - 85566.6x + 426015) \cdot (- 83.33y^3 + 1695.83y^2 - 205.83y + 44154) \cdot (- 0.043z^3 + 87.95z^2 + 76.08z + 866.72) / 45143^2 \tag{2}$$

式中 FX 代表推力(单位: N/m), FY 代表悬浮力(单位: N/m), x 代表气隙宽度(单位: mm), y 代表定子电流(单位: kA), z 代表转子电流(单位: A)。

利用该经验公式得到的电磁力的计算结果与有限元分析结果之间的平均误差小于 2%, 可为电磁力的工程计算提供重要依据。

参考文献:

[1] Meins J, Miller L, Mayer M J. The High Speed Maglev Transportation System Transrapid[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1998, 24(2): 808-811.

[2] 李庆雷, 王先逵, 等. 永磁同步直线电机推力及垂直力的有限元计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 5: 20-23.

[3] 李庆雷, 王先逵, 等. 永磁同步直线电机推力波动分析及改善措施[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 5: 33-36.

[4] 陈宇明, 金能强. 直线同步电机的磁场与力特性分析[J]. 电工电能新技术, 2002, 1: 26-32.

[5] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.