

Maxwell 仿真软件在直线振荡电机中的应用

邓伟峰

中科院上海技术物理研究所 200083

摘要: 本文基于 ANSYS Maxwell 电磁仿真软件, 对一台用于线性压缩机的直线振荡电机进行了 2D 建模与计算, 分析了软件在电机动态仿真中的优势, 研究了电机的静态比推力和不同工作频率下的电磁与动力学特性。针对仿真结果, 设计实验测量了电机在相同工况下的动态运行参数, 结果表明, 应用 Maxwell 软件建立的直线振荡电机模型修改性好, 观测性强, 仿真结果具有很高的精度, 对工程实践具有重要的指导意义。

关键词: Maxwell 软件; 直线振荡电机; 2D 建模; 动态仿真; 实验测量

Simulation of Linear Oscillating Motor Using Maxwell

Weifeng Deng

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083

Abstract: Based on ANSYS Maxwell, both two-dimensional and three-dimensional models have been built for a linear oscillating motor. Advantages of Maxwell in transient simulation are analyzed. A survey is made to investigate the static specified magnetic force as well as the transient characteristics of electromagnetism and dynamics for different frequencies. Accordingly, experimental measurements were conducted to verify the transient simulation. It's indicated that the model of linear oscillating motor based on Maxwell is convenient to adjust and observe. A good agreement has been obtained between simulation and measurement. The simulation has an important meaning on engineering practices.

Keyword: Maxwell; linear oscillating motor; 2D modeling; transient simulation; experimental measurement

1 前言

随着空间用多元线列和面阵红外焦平面探测器的广泛应用, 迫切需要高效、轻量化、大冷量的低温制冷机, 尤其在军事空间应用中, 需要在当前制冷技术的一些方面进行一些改进, 比如更大的制冷量、更小的体积重量、更高的效率、更加稳定的性能以及超过 10 年的寿命。而线

性压缩机技术决定着整机的性能和可靠性。近些年来，各国研究机构对低温制冷机用线性压缩机技术做了大量研究工作，有力推动了低温制冷机的发展。

到目前为止，国内外绝大多数线性压缩机研究中都采用了直线同步振荡电机作为线性压缩机的驱动器[1-6]。此类电机能够利用电磁力和弹簧共振原理，自动产生高频往复直线运动，可直接推动与动子连接的活塞往复运动。直线振荡电机作为线性压缩机的核心部件，采用高效的永磁材料，动子质量小，结构更加紧凑，机械效率更高。

目前依据传统的计算公式无法获取电机端部效应、磁饱和以及材料非线性性能所带来的影响，因此不能准确地计算直线电机性能。采用有限元方法对经典的麦克斯韦理论方程进行解析可以获得电磁场空间参数和电路参数，通过这些物理参数判定电机性能，进而为电机的结构优化设计提供理论指导。

本文利用 ANSYS Maxwell V15.0 对一台直线振荡电机静动态电磁特性和动力学特性进行了仿真模拟，给出了 43Hz、45 Hz、47 Hz 和 50 Hz 工频下电机的动态电流、反电势、动子位移的变化规律，与实验结果具有较好的吻合性，证明了模型的正确性，体现了软件在工程设计中的准确性和便捷性。

2 直线振荡电机模型建立与仿真

2.1 电机结构与原理简介

直线振荡电机基本结构如图 1 所示，其是利用通电导线在磁场中受到安培力作用的原理而设计的。电机的采用永磁体励磁，这样既可以使电机的结构更加简单紧凑，又有利于提高能量利用率和电机效率。通电线圈为电机的运动部件，当加载交流电时，通电线圈在磁场的作用下产生交变的轴向电磁推力，气隙磁密中的线圈带动压缩活塞在轴向做往复直线运动。

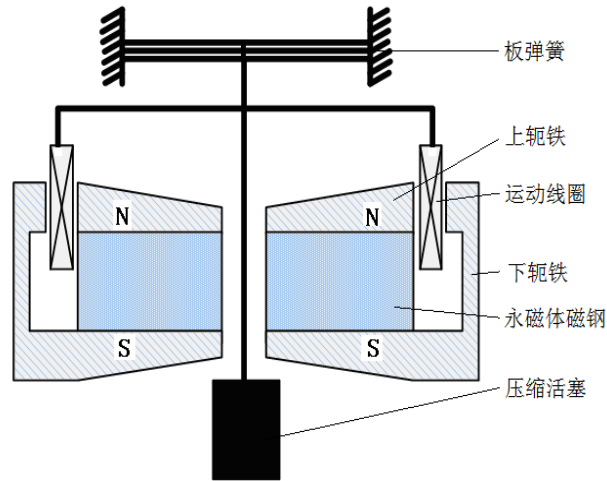


图1 直线振荡电机结构示意图

直线振荡电机是一个电-机械-声耦合系统，其控制方程如下：

$$u(t) = iR + L \frac{di}{dt} + K \frac{dx}{dt} \tag{1}$$

$$F_e = M \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k(x - x_0) + f \frac{1}{2} \tag{2}$$

式（1）为电参数方程，式（2）为动力学方程，将式（2）表示在复数坐标系下，如图2所示，可以将气体负载力等效分解到动子位移和速度两个垂直向量上。

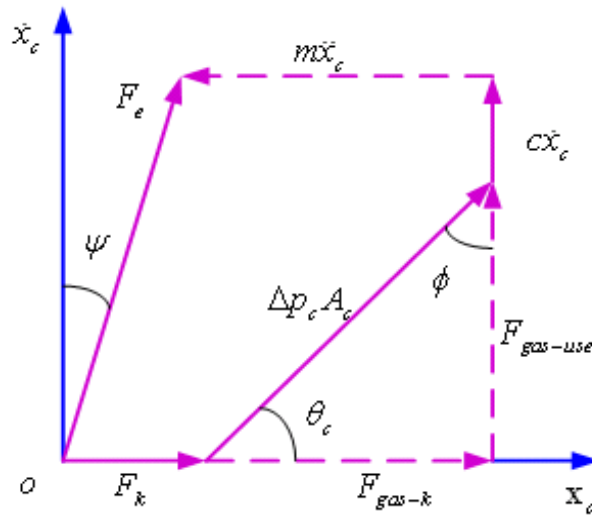


图2 电机力学方程在复平面上的表示关系

其中弹簧力 $F_k = k_s x_c$ ， k_s 为弹簧轴向刚度；气体力 $F_{gas} = \Delta p_c A_c$ ；机械阻尼力 $F_{re} = c_m \dot{x}_c$ ， c_m 为机械阻尼系数；电机驱动力 $F_e = Bli(t) = F_0 \sin(\omega t)$ ，电磁力的振幅 $F_0 = BI_0$ ， I_0 为电流的幅值， $I_0 = I\sqrt{2}$ ， I 为电流的有效值，即均方根值。

从活塞的受力分析可知其动力学特点：活塞所受的轴向力既随时间变化，又随位移变化，这主要是活塞的运动特性、速度特性以及弹簧的弹性所引起的。上述各力都是沿轴线方向分布的，都是位移和时间的函数，随时间做简谐变化，且彼此之间存在相位差。采用旋转矢量法可以清楚地表达彼此之间的相位关系，图中各个力矢量的长短表示振幅的大小，矢量与 x 轴的夹角表示各个力的方向。

这里将对压缩活塞所受的气体力在横轴（位移方向）和纵轴（速度方向）进行分解。气体力可以分解为与位移同相位的气体弹簧力和与速度同相位的气体阻尼力。他们的表达式如下所示：

$$F_{gas-k} = \Delta p_c A_c \cos \theta \quad (3)$$

$$F_{gas-use} = \Delta p_c A_c \sin \theta = \frac{\langle \dot{W}_{PV} \rangle_c}{\pi X_c f} \quad (4)$$

由于气体力在位移方向的分力效果与弹簧类似，在压缩机运行过程中只储存和释放能量，其本身并不消耗能量，故命名为气体弹簧力，根据胡克定律可知气体弹簧刚度为：

$$k_{gas} = \frac{|F_{gas-k}|}{X_c} = \frac{\Delta P_c A_c \cos \theta}{2X_c} \quad (5)$$

气体阻尼系数的大小与压缩机出口压差、活塞截面积、压力波与位移波间的相位角、运行频率和行程有关，如式（6）所示，

$$c_{gas} = \frac{|F_{gas-use}|}{|\dot{x}_c|} = \frac{\Delta P_c A_c \sin \theta}{4\pi f X_c} \quad (6)$$

上述关于直线振荡电机的气体弹簧刚度和气体阻尼系数将在后面整机运行特性数值模拟中得到应用，并得以证明。

由此可见，与旋转电机不同，电机动子受负载影响较大，Maxwell 软件不仅可以对电机的电磁部分进行模拟，同时也可以将负载特性等效的加载如运动属性的设置中，进而更为精准的模拟电机的静动态特性。

2.2 仿真模型建立

静磁场 Magnetostatic 可以对动子磁钢在某一直流电激励下的不同位置处电磁力进行仿真模拟；瞬态场 Transient 项可以对电机在稳态运行下的电参数和运动参数进行仿真模拟。因此，本文进行了 2D 下的静态电磁力和动态动力学特性的仿真模拟。

2.3 仿真结果分析

2.3.1 2D 下静态电磁力仿真

将电机动子偏离平衡位置的位移进行参数化设置，对电机静态比推力进行模拟，得到如图 3 所示的结果，可以看出在动子的有效行程范围内，比推力值基本是恒定的，约为 19.5N/A。

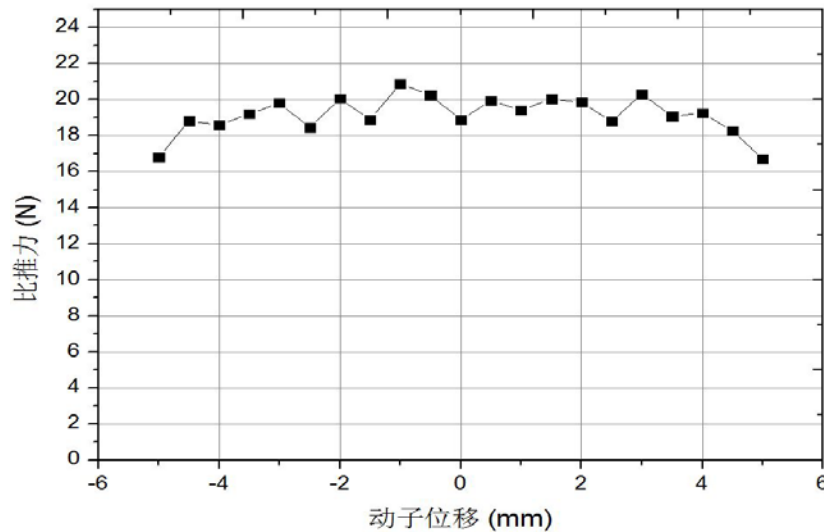


图3 电机动子在不同位移下的电机静态比推力模拟结果

2.3.2 2D 下动态动力学特性仿真

对直线振荡电机动态运行下的电磁与动力特性进行仿真可以实时反映电机实际工作状态，模型采用电压源激励，将计算得到的等效气体弹簧刚度和气体阻尼系数加载入软件的运动属性设置中，在 50Hz 频率下仿真得到的输出电流、反电动势、动子位移和电磁力结果依次如图 4~7 所示。可以看出，电机在五个周期后基本处于稳定运行状态，输出电流、反电动势和动子位移均为波形较规整的正弦波，电磁力在峰值处出现高次谐波扰动。

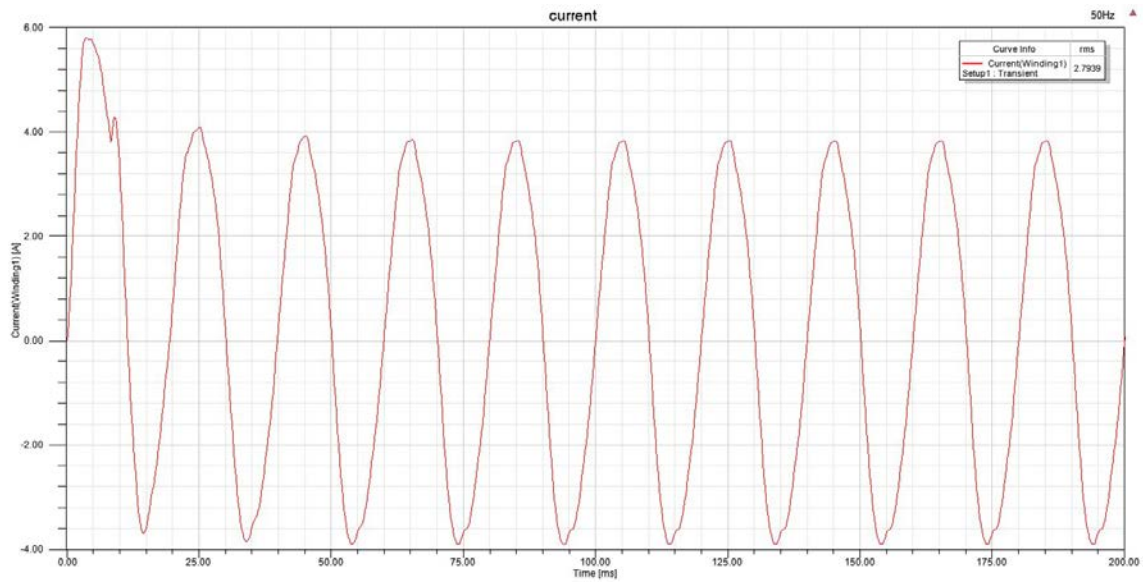


图4 电机在50Hz下的输出电流模拟结果

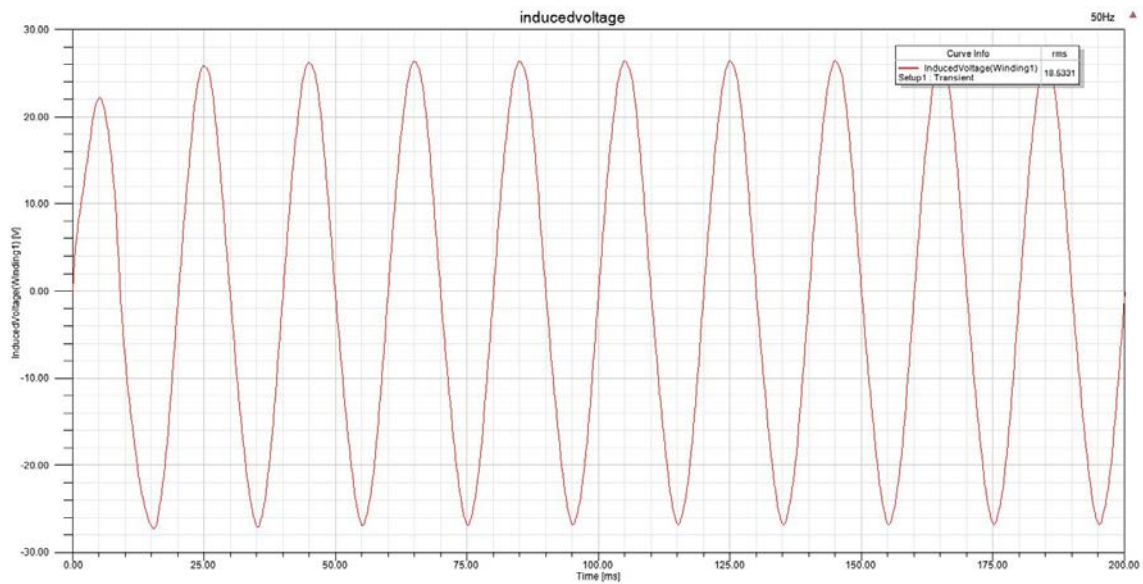


图5 电机在50Hz下的反电动势的模拟结果

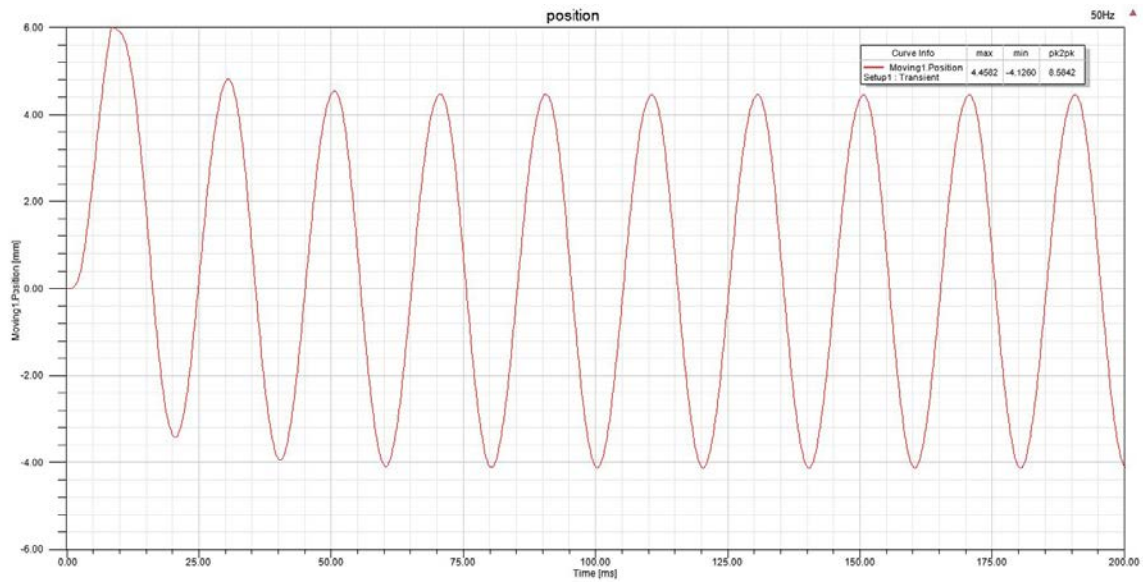


图 6 电机在 50Hz 下的转子位移模拟结果

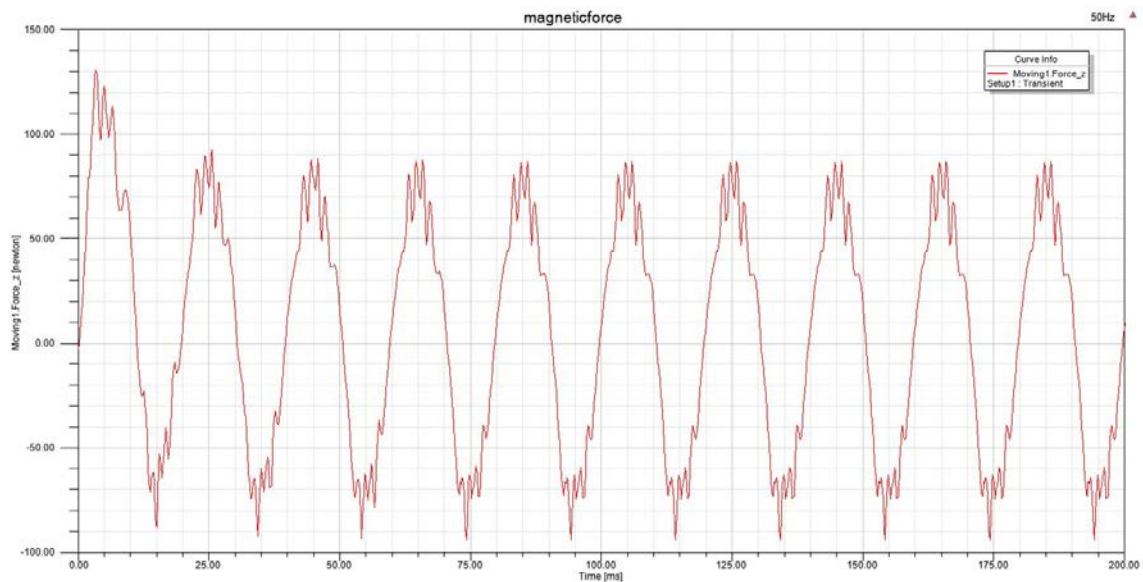


图 7 电机在 50Hz 下的电磁力模拟结果

接着改变模型的工频为 43Hz、45 Hz 和 47 Hz，电机的动态电流、反电势、转子位移变化规律的仿真模拟结果如表 1 所示：

表 1 电机在不同工作频率下的输出参数模拟结果

工作频率 f (Hz)	激励电压 U_{rms} (V)	电流 I_{rms} (A)	反电势 U_{rms} (V)	位移振幅 X_{amp} (mm)
43	21.233	2.5450	15.4171	4.01
45	21.405	2.4569	15.8141	3.97

47	23.407	2.7053	16.0545	4.19
50	24.935	2.7939	18.5332	4.29

对实验样机在相应频率下的输出电流和定子位移进行实验测量，结果如图 8 所示。可以看出，仿真计算与实验测量结果基本吻合，电流与位移的最大误差分别为 14.9% 和 1.8%。

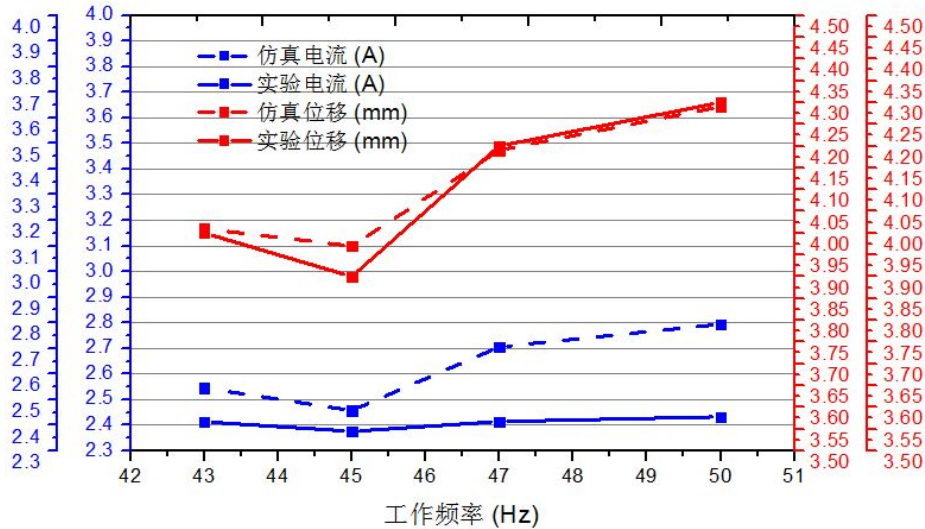


图 8 电机在不同频率下的模拟结果与实验比较

3 结论

本文利用 Maxwell 电磁仿真软件对一台直线振荡电机进行了静态和动态仿真，结果表明：

- (1) 电机定子在不同位移下的静态比推力基本不变，为 19.5N/A。
- (2) Maxwell 能够对电机在气体负载力作用下的动态特性，如输入电流、反电动势和定子位移等进行实时仿真与监测，仿真结果与实验结果有很高的吻合性。

(3) 在模型得到正确验证的基础上，可以进一步的完成后续工程样机的设计与优化。

参考文献

- [1] T. Davis, B.J. Tomlinson, J. Ledbetter. Military space cryogenic cooling requirements for the 21st century[C]// Cryocoolers 11, 2001:1-9
- [2] T. Nast, J. Olson, P. Champagne. Overview of Lockheed Martin Cryocoolers [J]// Cryogenics, 2006, 46: 164-168
- [3] K.B. Wilson, D.R. Gedeon. Status of Pulse Tube Cryocooler Development at Sunpower[C]// Cryocoolers 13, 2005: 31-40
- [4] T. Benschop, et al. Development of High Reliability Cryogenic Coolers at Thales Cryogenics[C]// International Cryocooler Engineering Conference, 2002: 1-4

- [5] Matsumoto, N, et al. Development of a Compressor for a Miniature Pulse Tube Cryocooler of 2.5 W at 65 K for Telecommunication Applications[C]// Advances in Cryogenic Engineering, 2008, 53(985): 1100-1107
- [6] 王晓涛, 朱建, 陈帅, 等. 液氮温区高效紧凑制冷机运行特性研究[C]// 第十一届全国低温工程大会. 遵义, 2013: 71-74