

相关技术

自由活塞斯特林制冷机用直线电机性能仿真与测试

唐天雁¹, 轩 连², 梁伟青¹, 孙 轶¹, 刘 静¹

(1. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 介绍了自由活塞斯特林制冷机用动磁式直线电机结构。采用 Ansoft 软件对直线电机进行有限元仿真, 配合自由活塞制冷机整机仿真软件, 研究了直线电机性能及整机制冷性能。采用三组不同外气隙参数的直线电机进行试验验证, 结果表明: 直线电机性能对整机性能影响较大, 且直线电机的定位力会影响动子系统的固有频率, 降低自由活塞制冷机的制冷效率; 外气隙参数对直线电机性能影响较大, 经比较: 0.5 mm 为外气隙优选参数, 并且, 在生产过程中须保证直线电机的径向加工精度。

关键词: 自由活塞斯特林制冷机; 动磁式直线电机; 气隙; 性能

中图分类号: TB651⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)06-0052-04

Performance Simulation and Measurement of Linear Motors for Free-Piston Stirling Coolers

Tang Tianyan¹, Xuan Lian², Liang Weiqing¹, Sun Yi¹, Liu Jing¹

(1. Shanghai Micropowers Ltd., Shanghai 201203; 2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The structure of linear motor for free-piston Stirling cooler is introduced. FEM simulation was carried out on the linear motor with the Ansoft software, and matching with the simulation software for whole free-piston cooler, the performance of linear motor and whole cooler were studied. Test verification was carried out on three linear motors with different outer air gaps, and it showed that the linear motors have big effect on the whole cooler, and the motor's mass may influence the natural frequency of the rotor system, and reduce the cooling efficiency of the free-piston cooler. The outer air gap had a bigger influence on the linear motor, and 0.5mm was proved to be the optimal parameter by comparison. During the manufacturing, the machining accuracy of the radical direction must be maintained at a reasonable level.

Key words: free-piston Stirling cooler; moving magnet linear motor; air gap; performance

0 引言

随着空间和半导体技术的发展, 自由活塞斯特林制冷机 (Free-Piston Stirling Cooler, FPSC) 在卫星探测、遥感、红外及通信等领域有越来越多的应用。自由活塞斯特林制冷机采用直线电机驱动、板弹簧支撑、间隙密封、纯气动膨胀机等先进技术^[1], 其相对于其他结构形式的制冷机, 具有以下优点: (1) 制冷效率高, 在低温区节能优势显著; (2) 采用 He 作为制冷工质, 环境友好; (3)

制冷量调节范围宽, 在低温区的较宽温度范围具有良好的制冷特性; (4) 体积小、重量轻, 抗冲击、抗振动性能突出^[2]。作为制冷机的关键驱动部件, 直线电机的结构及性能极大地影响了 FPSC 的制冷效果。

1 直线电机结构

按照直线电机运动部件的不同, 可分为动圈式、动磁式等结构。经过多年的技术发展, 动磁式直线电机虽然存在设计难度高和单边推力较大的缺

收稿日期: 2018-12-28

作者简介: 唐天雁(1990-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为电磁仿真技术, ttybmk@126.com。

点,但其效率高、结构紧凑、可靠性高、无污染的优点^[3]推动着动磁式直线电机逐渐代替动圈式直线电机,成为自由活塞斯特林制冷机主流的直线驱动机构。

动磁式直线电机一般由内外铁芯、线圈和磁钢构成。图 1 为动磁式直线电机的结构示意图,其结构中定子部分为外铁芯、线圈和内铁芯,动子部分为磁钢。

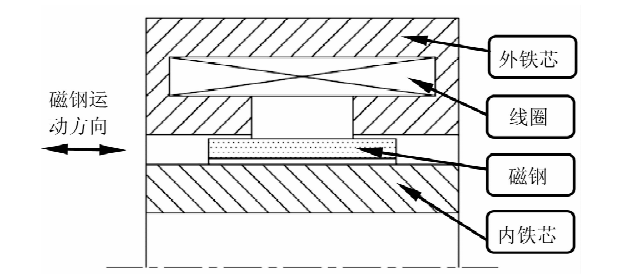


图 1 直线电机结构图

2 直线电机有限元分析

2.1 直线电机整机仿真

在制冷机整机设计阶段,直线电机性能必须满足自由活塞斯特林制冷机性能需求,因此必须对直线电机的关键性能进行计算分析。随着有限元技术的不断发展,有限元电磁仿真的准确性和精度不断提高。Ansoft 公司的 Maxwell 软件是应用广泛的电磁分析软件,已经在通用电气、Rockwell、西门子、NASA 等世界知名企业与机构得到应用和验证^[5]。本文对某型直线电机建立有限元模型,利用直线电机的轴对称特性,选择 Maxwell 2D 模块,建立了如图 2 所示的柱坐标系下平面求解模型。

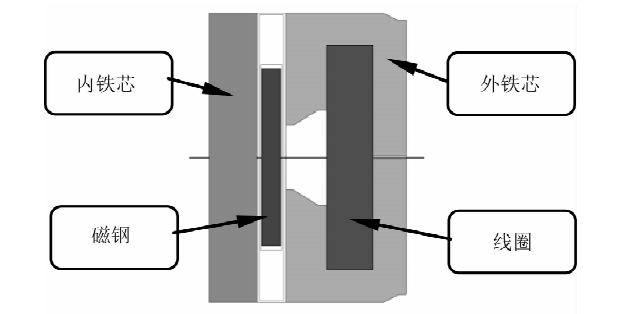


图 2 直线电机有限元模型

铁芯采用软磁复合材料(SMC)制成。该材料具有较低的高频涡流损耗和较高的饱和磁感应强度,且易于加工,可以有效缩小直线电机体积,提高电机效率^[4]。磁钢则选用烧结钕铁硼永磁体,为适配自由活塞斯特林制冷机的结构形式,采用径向充磁。磁性材料参数见表 1 和表 2。

表 1 常用软磁材料性能对比

性能	SMC	硅钢片	电工软铁
磁通密度/T	1.56	2.0	2.15
电阻率/($\mu\Omega\cdot m$)	400	0.45	0.11
最大磁导率	540	30 000	8 000

表 2 常用永磁材料性能对比

性能	铝镍钴	铁氧体	烧结钕铁硼 N40
剩磁/mT	1 150	440	1 265
矫顽力/($kA\cdot m^{-1}$)	127.36	222.88	907
最大磁能积/($kJ\cdot m^{-3}$)	87.6	36.6	314

图 3 为电机的磁感应强度密度云图。从中可知:该直线电机最高磁场强度为 1.8 T,磁感应强度值合理,且分布均匀,不会产生较大的电涡流损耗。图 4 是电机的磁力线分布图,从图中可以看出:气隙磁场尤其是永磁体运动区域磁力线基本沿水平方向,会产生较大侧向力,但动子永磁体为轴对称结构,使得这一侧向力被抵消。因此对本机气隙部分的加工精度要求较高。

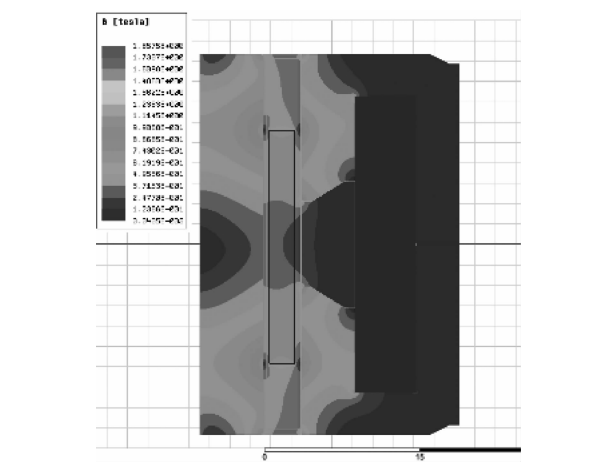


图 3 直线电机磁密云图

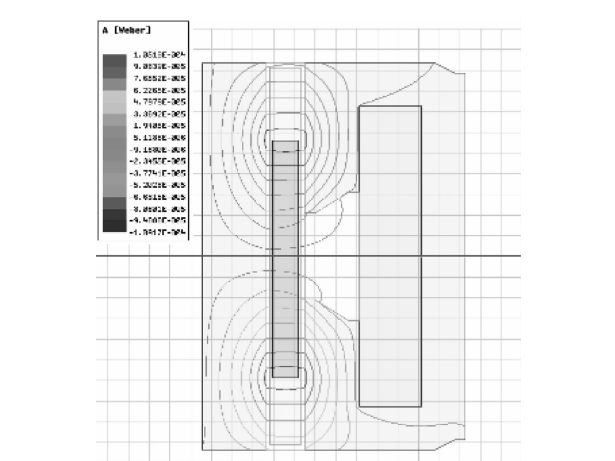


图 4 直线电机磁力线分布图

由于系统采用 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 控制方法对自由活塞斯特林制冷样机进行控制, 其控制信号的高频分量会对直线电机的性能产生较大影响, 会降低电机的效率。因此另对直线电机进行瞬态仿真, 计算其真实运行状态下的动子推力及效率。瞬态仿真结果见表 3。

表 3 直线电机仿真结果

输入参数	电压/Vrms	8.5
	基波频率/Hz	70
	载波频率/kHz	20
输出结果	电流/A	10.2
	动子峰值速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.6
	效率/%	84.7

根据以上仿真结果并结合自由活塞斯特林制冷机整机性能仿真结果, 可以看出: 该结构形式的直线电机性能满足要求; 在 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冷温度下, 可产生 68 W 的制冷量。也即, 使用该型直线电机的 FPSC 能够满足特定的低温制冷需求。

2.2 气隙影响仿真

气隙是指磁钢与内外定子间的间隙。较大的气隙会降低动子与定子绕组之间的匝链, 降低永磁磁链、反电动势和所产生的拉力。作为整个磁路上最大的磁阻, 气隙的大小决定着电机的性能。气隙过大会导致直线电机推力不足, 功率减小; 气隙过小, 会造成电机零部件加工困难, 精度无法保证。从电机的磁力线分布图可以看出: 直线电机气隙必须保证较高的精度, 才能消除侧向力的影响。为保证直线电机的性能和工艺性, 必须选取适合大小的气隙。本文选取三组外气隙参数, 对比仿真计算结果, 并结合具体试验, 最终选择最优参数, 为后续型号直线电机的设计提供参考。

选取外气隙分别为 0.5 、 0.8 和 1.0 mm , 计算直线电机动子推力, 结果见表 4。可看出: 0.8 mm 试验组和 1.0 mm 试验组的峰值推力分别比 0.5 mm 试验组降低了 11.5% 和 17.8% , 性能下降明显。在推力仿真结果的基础上, 使用 Sage 整机仿真软件计算得到对应制冷机的制冷量。

表 4 不同外气隙电机仿真结果

气隙/mm	动子峰值推力/N	制冷量 ($-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)/W
0.5	82.2	68
0.8	72.6	55.5
1.0	67.4	48.8

3 直线电机性能试验

3.1 性能试验平台

基于自由活塞斯特林制冷机的固有特性, 直线电机的动态载荷会随着冷端温度的降低而增大, 且自由活塞斯特林制冷机和直线电机为耦合系统, 整机系统的稳定运行要求两者具备匹配性。本文将直线电机装配至自由活塞斯特林制冷机中, 再配合外围辅助系统, 搭建了直线电机性能测试平台, 如图 5 所示。

该测试平台运用热平衡原理, 使用加热棒模拟冷端热负荷; 真空泵在冷端附近产生高真空环境, 杜绝空气自然对流影响; 冷却系统保持热端温度恒定。将安装有直线电机的自由活塞斯特林制冷机安装至减振缓冲架上, 加载固定电压, 监控系统监测制冷机各项运行参数, 验证直线电机性能。测试平台结构见图 6。



图 5 直线电机性能测试平台

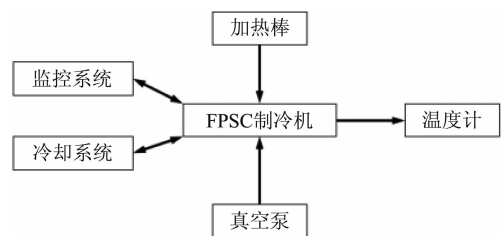


图 6 测试平台结构图

3.2 整机性能试验

运行过程中, 直线电机工作状态平稳, 无摩擦及异常发热现象, 冷端温度稳定下降, 最终制冷机达到 $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的目标低温。通过热平衡法, 冷端温度平衡至 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 加热棒的功率为 65 W , 故制冷机在此温度下的制冷量为 65 W 。降温曲线见图 7, 热平衡时制冷机性能参数见表 5。与仿真结果对比, 制冷量误差为 4.4% , 证明制冷机 Sage 整机仿真方法参数选择合理, 计算结果准确可靠。

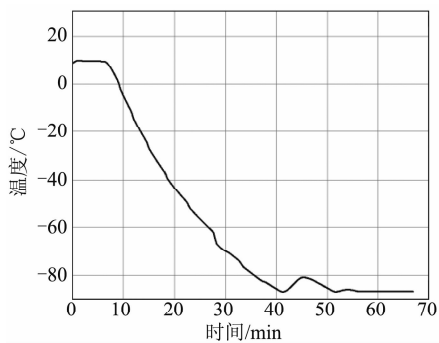


图 7 冷头降温曲线

表 5 制冷机性能参数

电压/V	8.5
电流/A	10.0
功率/W	85
制冷温区/℃	-86 ~ 0
制冷量（-23.3℃）/W	65
制冷机效率（-23.3℃）	0.765

3.3 气隙对试验结果的影响

使用具有不同外气隙的直线电机对制冷机整体进行制冷量测试，试验结果见表 6。与 0.5 mm 组相比，0.8 mm 组性能下降 19.2%，1.0 mm 组性能下降 35.7%。

表 6 气隙对试验结果的影响

气隙/mm	0.5	0.8	1.0
电压/V	8.5	8.5	8.5
电流/A	10.0	8.6	7.9
功率/W	85	73	67
制冷量（-23.3℃）/W	65	52.5	40.6
制冷机效率（-23.3℃）	0.765	0.719	0.605

分析认为：由于动磁式直线电机的定位力较大，会对自由活塞动子系统的固有频率产生较大影响。当直线电机的外气隙较大时，磁场回路中的磁

阻过大，导致电机动子受到的定位力大幅减小，从而影响动子系统的等效刚度，使系统固有频率产生偏差，无法在运行频率产生共振，最终导致制冷机效率下降。

4 结语

采用 Ansoft 软件，对直线电机进行有限元仿真，配合自由活塞制冷机整机仿真软件，研究了直线电机性能及整机制冷性能，并进行试验验证。研究表明：直线电机性能对整机性能影响较大，且动磁式直线电机的定位力会影响动子系统的固有频率，进一步降低自由活塞制冷机制冷效率。外气隙参数对直线电机的性能有较大影响。经比较从三组不同外气隙参数中，选取 0.5 mm 为外气隙优选参数，并且在生产过程中须保证直线电机的径向加工精度。

参考文献

[1] 陈曦, 武卫东, 张华, 等. 自由活塞斯特林制冷机的研究概述 [A]. 中国制冷学会 2007 学术年会论文集 [C]. 2009.

[2] 陈曦, 吴亦农, 王维扬. 斯特林制冷机用于冰箱技术的发展优势 [J]. 制冷学报, 2004 (4): 49-53.

[3] 郑文鹏, 张洲, 苏伟, 等. 斯特林制冷机用直线电机设计与测试 [J]. 电机与控制应用, 2010, 37 (5): 61-64.

[4] 邓秋玲, 黄守道, 许志伟, 等. 软磁复合材料在轴向磁场永磁风力发电机中的应用 [J]. 微特电机, 2010 (1): 21-23.

[5] 张文君, 王铁军, 杨海明, 等. 斯特林制冷机直线电机磁性材料模拟分析与应用 [J]. 低温与超导, 2010, 38 (8): 14-17.