

小型双活塞对置动磁式直线电机的设计及模拟

何韩军,陈曦,刘振,宋佳星,昌庆航,张建辉,葛寅飞
(上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:直线压缩机与传统往复活塞式压缩机相比,具有结构紧凑、体积小、能效低、效率高等特点。在确定动磁式直线压缩机设计工况后,进行了热力学计算,得到了压缩机理论输气量、活塞行程、活塞直径、等效刚度和动子质量等参数,对动磁式直线电机进行了初步设计,并使用 Ansoft Maxwell 二维瞬态模拟软件分析了动磁式直线电机的动子质量、等效刚度等设计参数对其性能的影响,得到了电机电流、铜损、铁损、位移振幅、耗功、电磁力、比推力、功率因子和电机效率的变化曲线,结果显示,直线电机的动子质量和等效刚度在设计值时电机效率较高。

关键词:动磁式;直线电机;设计;模拟

图分类号:TB64

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2019)05-0307-06

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2019.05.004

Design and Simulation of Small Double-piston Opposed Moving-magnet Linear Motor

HE Hanjun, CHEN Xi, LIU Zhen, SONG Jiaxing, CHANG Qinghang, ZHANG Jianhui, GE Yinfēi

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Compared with traditional reciprocating compressor, linear compressor is characterized by compact structure, small volume, low energy efficiency and high efficiency. The application of linear compressor gradually turns to refrigerator, air conditioning and civilian refrigeration equipment from aerospace and military areas. The design condition of moving-magnet linear compressor is determined. The theoretical capacity, piston stroke, piston diameter, equivalent stiffness and mass of motor are obtained. And the influence of design parameters, such as the mass of moving magnet linear motor and equivalent stiffness, is analyzed based on Ansoft Maxwell 2D. The change curves of current, copper loss, iron loss, stroke of piston, input power, electromagnetic force, specific force, power factor and motor efficiency are obtained. The results show that the efficiency of the linear motor is highest when the mass of the motor and the equivalent stiffness are at the design values.

Key words: moving-magnet; linear motor; design; simulation

0 引言

压缩式制冷循环是制冷的主要方式之一,在冰箱、冷冻冷藏及空调系统中有着广泛的应用,压缩机被比作制冷空调系统的心脏。制冷空调压缩机工作时要消耗大量的电能,其用电量大约占居民全部用电量的一半以上^[1]。直线压缩机与传统往复活塞式压缩机相比,具有结构紧凑、体积小、能效低、效率高等特点^[2],其应用逐渐从航空航天等军事领域转向冰箱、空调等民用制冷设备。20世纪90年代

后期,美国 Sunpower 掌握了斯特林制冷机用直线压缩机的技术,韩国 LGE 公司有生产制造家用冰箱的技术优势,两家公司开始合作研发家用冰箱用直线压缩机。2003年,LGE 的直线压缩机首次实现了商业化,在 DIOS 冰箱中采用 R600a 为工质,压缩机使用动磁式结构。2006年,LGE 将开发的第二代直线压缩机投向市场。2009年,LGE 拥有了包括韩国和国际上超过 700 项直线压缩机专利^[3-6]。

对直线压缩机性能的分析主要通过建立数学

收稿日期:2019-03-08

作者简介:何韩军(1995-),男,四州人,硕士研究生,主要从事线性压缩机技术研究。E-mail:hehanjun_nsst@163.com。

通信作者:陈曦(1977-),男,上海人,博士,副教授,主要从事小型低温制冷机,低温传热技术,天然气液化及冷能利用的研究。

E-mail:chenxistudy@163.com。

模型和有限元分析的方法。Ansoft软件既可以用来分析电场,也可以用来分析静磁场和涡流磁场^[7],近年来,Ansoft被广泛应用于电机设计和电机内电磁场的分析。2009年,赵科等^[8]为了研究直线压缩机的动态特性,建立了多物理场耦合的动力学模型,利用电磁场的三维有限元参数化分析,精确计算了在不同位置和电流下的电磁力和磁链。2015年,杨磊等^[9]推导了动磁式直线压缩机电磁力的表达式,并利用简化分析式和Ansoft Maxwell有限元软件模拟分析了直线电机主要结构参数对电磁力的影响,结果表明,电磁力随直线电机气隙高度的增大而减小,随着环状永磁体的半径和厚度的增大而增大。南京理工大学的李桂银等^[10]利用Maxwell 2D对动圈式永磁直线双缸压缩机的谐振频率特性、0.8MPa负载下的压缩机运动特性进行求解,证明,直线压缩机系统的固有谐振频率随着负载压力的增加而升高,加载的激励电流与系统的谐振频率一致时,压缩机处于谐振工作状态,运行特性最佳。

本文确定了动磁式直线压缩机的设计工况,进行了热力学计算,得到了压缩机理论输气量、活塞行程、活塞直径、等效刚度和动子质量等参数,对动磁式直线电机进行了初步设计,并利用Ansoft Maxwell电机模拟软件分析了动磁式直线电机的动子质量、等效刚度等设计参数对直线电机性能的影响。

1 动磁式直线电机的设计

Natick单兵中心的研究表明,士兵的工作负荷在100~500 W之间,而制冷量为300 W时即可满足士兵在炎热环境下的冷负荷需求^[11],针对用于人体空调服的小型空调系统,制冷量设定为300 W,动磁式直线压缩机的设计工况如表1所列。

表1 动磁式直线压缩机的设计工况

Tab. 1 The design conditions of moving-magnet linear compressor

制冷量/W	制冷剂	蒸发温度/℃	吸气温度/℃	冷凝温度/℃	过冷温度/℃
300	R134a	7	18	60	55

根据动磁式直线压缩机的设计工况与蒸气压缩制冷循环的热力学计算,可以得到压缩机的实际输气量 $q_v=0.467 \text{ m}^3/\text{h}$ 。压缩机气缸内的实际循环过程是很复杂的,实际循环输气量与理论循环输气量的比值称为压缩机的容积效率,其表达式为:

$$\eta_v = \frac{q_v}{q_{vs}} \quad (1)$$

经计算,压缩机的容积效率 $\eta_v=0.61$,则压缩机设计所需理论输气量为:

$$q_{vs} = \frac{q_v}{\eta_v} = 0.766 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

当直线压缩机运行频率采用 $f=100 \text{ Hz}$,气体工作容积为:

$$V_p = \frac{q_{vs}}{3600f} = 2.127 \text{ cm}^3 \quad (3)$$

气缸直径采用 $D=14\text{mm}$,可得单个活塞行程

$$S_{\text{single}} = \frac{V_p}{\frac{\pi}{4}D^2} \times \frac{1}{2} = 6.91 \text{ mm} \quad (4)$$

本文采用对置式压缩机结构,在压缩机的设计过程中,引用了一些经验系数,为满足压缩机制冷量300 W的需求,并放大一定的余量,最终确定气缸直径为14 mm,单个活塞行程为9 mm,反推得到直线压缩机制冷量为390.7 W。

由气缸内外压力差所形成的作用于活塞上的力可由线性负荷模型代表,气体的等效刚度是压缩机P-V图上压缩和膨胀过程的两个起点连线的斜率^[12]。气体的等效刚度 k_g 可表示为:

$$k_g = \frac{A_p}{S_{\text{single}}} (p_k - p_0) = 22.370 \text{ kN/m} \quad (5)$$

式中: A_p 为活塞的截面积; S_{single} 为单个活塞行程; p_k 为压缩机排气压力; p_0 为压缩机吸气压力。

由于直线压缩机是谐振机器,质量弹簧系统的设计要使压缩机的固有频率接近运行频率。直线电机的固有频率与系统等效刚度和动子质量相关,共振频率与固有频率有直接关系,压缩机的工作频率等于电机共振频率时,电机铜损、铁损最小,电机效率最高。压缩机的动子是弹簧系统的质量部件,弹簧系统包括机械弹簧部件工作介质在压缩或膨胀过程中对活塞表面的作用力。在运行工况大范围变化时,保持压缩机固有频率不变非常重要,因此板弹簧刚度必须大于气体弹簧刚度^[13]。设计的板弹簧刚度为:

$$k_m = 1.05k_g = 23.489 \text{ kN/m} \quad (6)$$

系统等效刚度是气体等效刚度与板弹簧刚度之和,即:

$$k_A = k_g + k_m = 45.859 \text{ kN/m} \quad (7)$$

根据谐振计算公式:

$$k_A = m_d \omega^2 = m_d (2\pi f)^2 \quad (8)$$

可得动子质量为:

$$m_d = \frac{k_A}{(2\pi f)^2} = 116 \text{ g} \quad (9)$$

动子质量包括活塞、永磁体、永磁体支架、连接件的质量及1/3弹簧质量。

2 电机结构与二维 Ansoft Maxwell 模型

动磁式直线电机的结构与尺寸如图1和表2所示, 动磁式直线电机包括内轭铁、外轭铁、永磁体及线圈等, 动磁式直线电机励磁由线圈通入交流电产生。线圈产生的变化磁场与永磁体产生的恒定磁场相互作用, 使永磁体受到轴向的驱动力, 推动动子往复直线运动。直线电机的电磁推力可用式(10)表示:

$$F_e = K_0 i \quad (10)$$

式中: F_e 为电磁推力; K_0 为电磁力系数; i 为线圈电流, 电磁力系数与直线电机的结构尺寸和材料特性相关, 线圈电流由压缩机电源输入及线圈绕组决定。

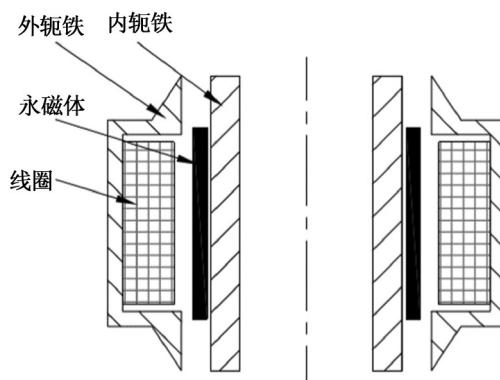


图1 动磁式直线电机结构图

Fig. 1 Structure of moving-magnet linear motor

表2 动磁式直线电机尺寸

Tab. 2 The size of moving-magnet linear motor

项目	尺寸/mm
内轭铁长度	40
永磁体长度	26
线圈长度	22
内轭铁厚度	4
永磁体厚度	2
线圈厚度	7

Maxwell有静态场、涡流场和瞬态场等多种求解器。在动磁式直线电机中, 线圈磁场和永磁体位置均

随时间变化(如图2、3所示), 因而使用Maxwell的瞬态场求解器。直线电机模型的截面是轴对称的, 当使用圆柱坐标系时, 电机模型只需要建立模型截面的一半。将Maxwell软件设置为圆柱坐标系, 并绘制直线电机的二维瞬态分析模型, 如图4所示。

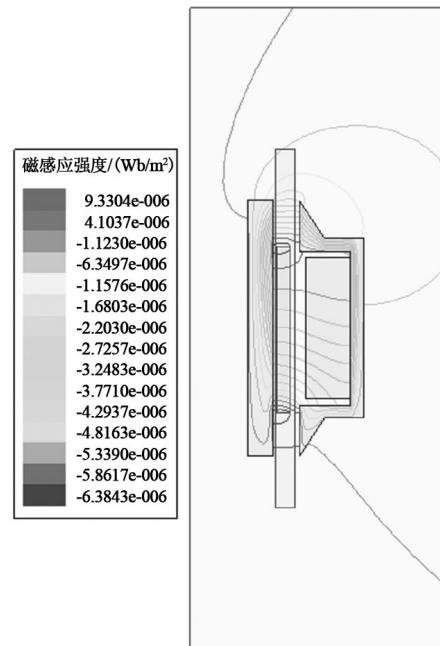


图2 直线电机磁力线分布图

Fig. 2 The distribution of magnetic field lines

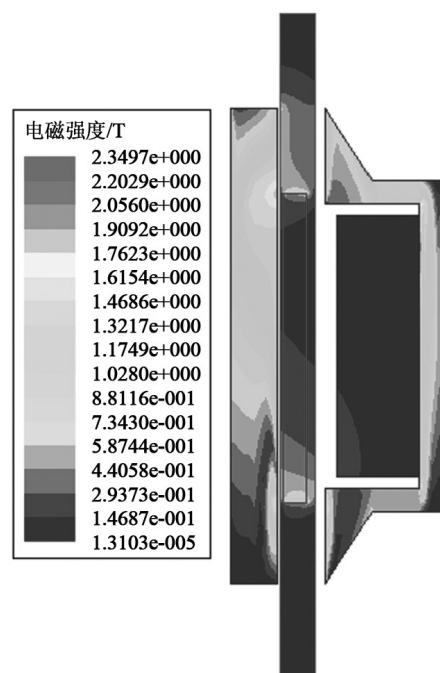


图3 直线电机磁感应强度云图

Fig. 3 The cloud-picture of magnetic induction intensity

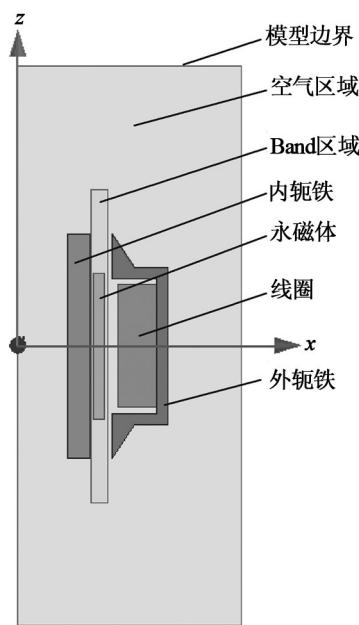


图4 动磁式直线电机的二维瞬态分析模型图

Fig. 4 Two-dimensional transient analysis model of moving-magnet linear motor

内、外轭铁使用牌号为35W400的冷轧无取向硅钢材料,厚度为0.35 mm。冷轧硅钢片的磁饱和点高,磁通密度在1.9 T时达到饱和。线圈采用系统材料库中的Copper材料,即电机中常用的漆包铜线。永磁体包括铁氧体、稀土钴及钕铁硼等材料。铁氧体属于非金属永磁材料,剩磁较低,导致电机体积较大。钕铁硼材料的磁性能高于稀土钴,矫顽力大,是目前磁性能最高的永磁材料。不足之处是最高可工作温度较低,一般为80~200 °C,因此在高温下较容易去磁。本文使用牌号为N42H的钕铁硼永磁材料,电机模型材料如表3所列。

表3 电机模型材料

Tab. 3 The material of motor model

模型区域	材料
内轭铁	35W400
外轭铁	35W400
空气区域	空气
线圈	Copper
永磁体	钕铁硼N42H
Band区域	空气

3 电机设计参数对电机性能的影响

对动磁式直线电机的设计,得到了压缩机的动

子质量和等效刚度等设计参数。由于材料差异等因素实际加工出来的动子质量与板弹簧轴向刚度同设计值可能存在偏差,因此需要模拟不同动子质量和等效刚度对电机性能的影响。

3.1 动子质量对电机性能的影响

在Maxwell中修改机械运动设置中的运动质量,保持其他参数不变,当电压峰值为34 V,并联0.4 mF电容时,模拟不同电机的性能参数。图5是电流、铜损及铁损随动子质量变化曲线。本文设计的动子质量为116 g,当动子质量小于该值时,电流及铜损均减小。当动子质量大于该值时,电流及铜损均上升,而且上升速度较快。随着动子质量增大,电流基本呈直线变化,也就是说,动子质量偏差越大,与设计电流值相差越大。铜损失先缓慢增大后迅速增大,当动子质量为116 g时,铜损为20 W,当动子质量减少15 g时,铜损为15.8 W,但当动子质量增加10 g时,铜损上升至28.8 W。铁损基本不发生变化,仅在动子质量增大较多时稍有下降。

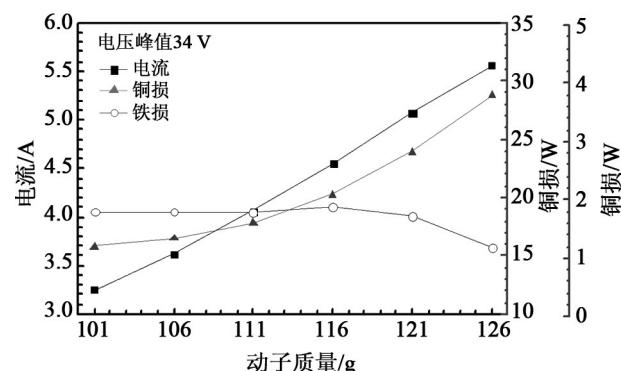


图5 电流、铜损及铁损随动子质量变化曲线

Fig. 5 The change curves of current, copper loss and iron loss with mass change

位移振幅、耗功及电磁力随动子质量变化曲线如图6所示。位移振幅、耗功及电磁力随动子质量增加而增大,位移振幅增加逐渐缓慢,而电磁力随着动子质量的增大,上升程度逐渐增大,耗功的变化接近线性。在相同电压下,动子质量越小时,位移振幅、耗功及电磁力越小。故当动子质量小于设计值时,需要增大电压使位移振幅达到设计要求。

比推力、功率因子及电机效率随动子质量变化曲线如图7所示。随着动子质量的增加,比推力先迅速下降后缓慢下降。功率因子逐渐增加,在动子质量为111~121 g之间,功率因子变化较为明显。

电机效率先增大后减小,当动子质量为设计值时有最大值。

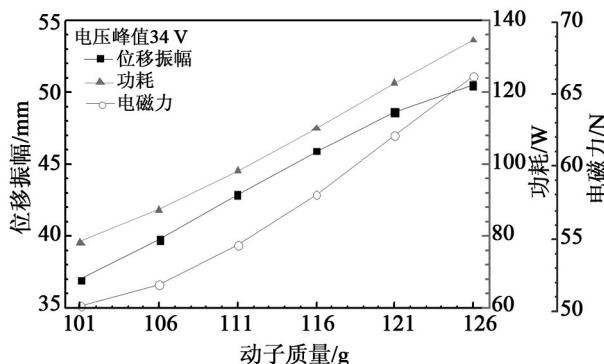


图6 位移振幅、耗功及电磁力随动子质量变化曲线

Fig. 6 The change curves of stroke, input power and electromagnetic force with mass change

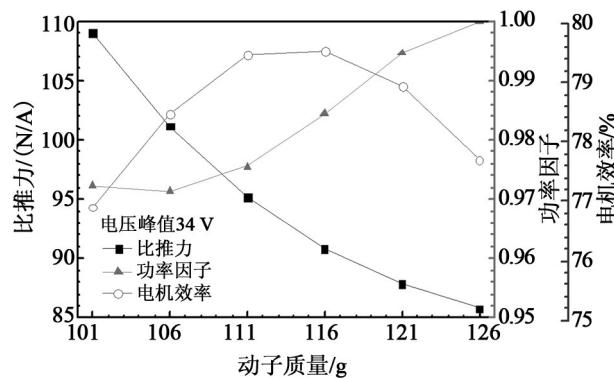


图7 比推力、功率因子及电机效率随动子质量变化曲线

Fig. 7 The change curves of specific force, power factor and motor efficiency with mass change

3.2 等效刚度对电机性能的影响

直线压缩机的板弹簧径向刚度为压缩机振动系统的动子活塞提供支撑,而轴向刚度为活塞运动提供一定的弹性往复力,压缩机的系统等效刚度为板弹簧轴向刚度与气体弹簧刚度之和。设计的板弹簧轴向刚度为 23.489 kN/m ,等效刚度为 45.859 kN/m ,在电压峰值为 34 V ,并联 0.4 mF 电容时,保持其他参数相同,模拟得到电流、铜损及铁损随系统等效刚度差值变化曲线,如图8所示。随着系统等效刚度增大,电流接近线性迅速减小,铜损先迅速减小后缓慢减小,铁损存在波动,但是变化不大,绝对值在 1 W 以内。从负刚度差值到正刚度差值变化时,电流几乎沿直线减小,从 5.8 A 下降到 3.4 A ,铜损从 32 W 下降到 16 W 。

图9是比推力、功率因子及电机效率随系统等效刚度差值变化曲线。比推力随着系统等效刚度的增

大先缓慢增大后迅速增大,从 8.5 N/A 增大到 10.5 N/A 。功率因子从 99.9% 下降到 97.1% 。电机效率先增加后减小,在系统等效刚度差值为 1000 N/m 时,有最大值 79.7% 。系统等效刚度偏离设计值越大,电机效率减小越多。当系统等效刚度为 40.859 kN/m 和 50.859 kN/m 时,电机效率分别为 76.5% 和 77.6% 。

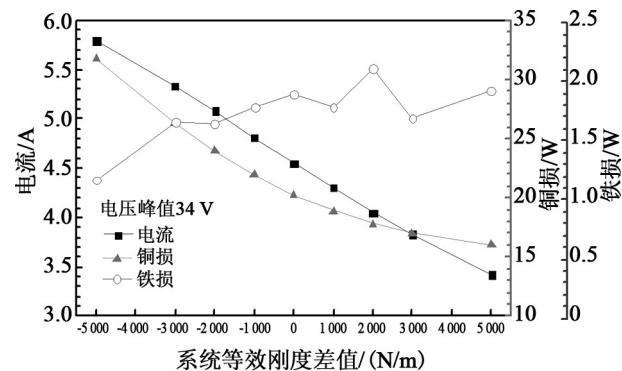


图8 电流、铜损及铁损随系统等效刚度差值变化曲线

Fig. 8 The change curves of current, copper loss and iron loss with difference in equivalent stiffness

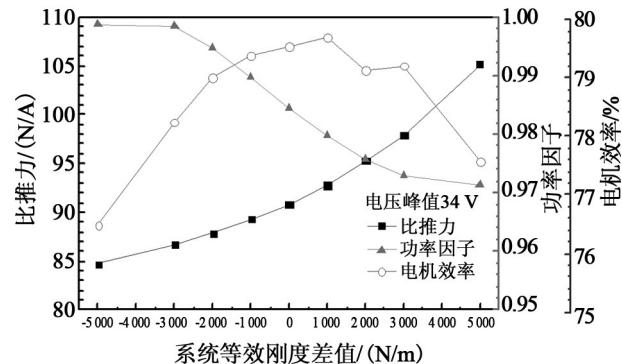


图9 比推力、功率因子及电机效率随系统等效刚度差值变化曲线

Fig. 9 The change curves of specific force, power factor and efficiency with difference in equivalent stiffness

4 结论

本文确定了动磁式直线压缩机的设计工况,进行了热力学计算,得到了压缩机理论输气量、活塞行程、活塞直径、等效刚度和动子质量等参数,对动磁式直线电机进行了初步设计,并使用 Ansoft Maxwell 二维瞬态模拟软件分析了动磁式直线电机的动子质量、等效刚度等设计参数对其性能的影响。获得以下研究结论:

(1) 从模拟结果可知,在直线电动机动子质量为 116 g ,系统等效刚度为 45.859 kN/m ,电压峰值为

34 V,并联0.4 mF电容时,永磁体位移振幅4.59 mm,满足压缩机活塞设计的行程振幅要求,直线压缩机制冷量398.4 W,满足压缩机300 W的制冷量需求。

(2) 随着动子质量增大,电流、铜损、位移振幅、耗功以及电磁力都随之增大,铁损基本没有变化,电机电流基本呈线性变化。当动子质量小于设计值时,需要增大电压使位移振幅达到设计要求,动子质量为116 g时,电机耗功最小、效率最高。

(3) 随着系统等效刚度增大,电流迅速减小,铜损先迅速减小后缓慢减小,铁损变化不大,系统等效刚度偏离设计值越大,电机效率减小越多。

参考文献:

- [1] 何志龙,李连生,束鹏程.冰箱用直线压缩机研究[J].西安交通大学学报,2003,37(11):1120-1123.
- [2] 金涛,郑水英,谢洁飞,等.直线压缩机的研究现状与发展[J].中国机械工程,2004,15(15):1405-1409.
- [3] Kim J W, Heo J T, Kim J D, et al. Linear compressor for natural refrigerant[C]//Imeché Conference Transactions. Professional Engineering Publishing, 2003, 4:483-492.
- [4] Babyak R J. Linear launch[R]. Proceedings Appliance Manufacturer Conference & Expo, 2001.
- [5] Song G, Lee H K, Park J Y, et al. Development of the linear compressor for a household refrigerator[C]//Proceedings Appliance Manufacturer Conference & Expo, 2000.
- [6] Kim J W, Heo J T, Kim J D, et al. Linear compressor for natural refrigerant[C]//International Conference on compressor and their Systems, London, 2003.
- [7] 徐锦康,机械设计[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 赵科,金涛,童水光,等.冰箱用动磁式直线压缩机的动态特性仿真[J].浙江大学学报,2009,43(1):139-142.
- [9] 杨磊,张晓青.动磁式直线压缩机的电磁力及其等效电路模型[J].低温工程,2015(1):18-22.
- [10] 李桂银,时岩,陈皎,等.基于Maxwell 2D的永磁直线压缩机运动特性分析[J].机械制造,2015,44(4):20-22.
- [11] 张行周,钟晓晖,吴玉庭,等.单兵空调系统研究[J].兵工学报,2007,28(6):749-752.
- [12] 郁永章,刘勇.压缩机-特种压缩机:动力化工及制冷用[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [13] Unger R, Novotny S. A high performance linear compressor for CPU cooling [C]//Proc Intl Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette, 2002.