

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.015

# 压缩机用直线振荡电机防失磁设计研究\*

赵 科<sup>1</sup>, 童水光<sup>2\*</sup>, 吕红兵<sup>3</sup>, 焦 磊<sup>4</sup>

(1. 浙江大学 常州工业技术研究院, 江苏 常州 213022; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027;  
3. 浙江大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027; 4. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

**摘要:**针对动磁式直线振荡电机中所用钕铁硼材料失磁的问题,对钕铁硼材料在高温和交变磁场环境中的防失磁设计进行了研究。修正了以往永磁体设计的最佳工作点准则;利用磁路法推导了永磁体在工作温度下的最大去磁工作点的数学表达式,定性地分析了电机的结构参数对最大去磁工作点的影响;利用常温下永磁材料的磁性能推导了工作温度下的拐点位置,给出了高温下直线振荡电机中的钕铁硼材料失磁的判定公式,为直线振荡电机的结构优化设计提供了一个必要的约束条件;对40 M和40 UH两种牌号的钕铁硼材料进行了失磁实验。研究结果表明:实验结果与理论计算结果相一致,该方法可用于钕铁硼永磁材料的选择和直线振荡电机的防失磁设计。

**关键词:**直线压缩机;直线振荡电机;动磁式;失磁

**中图分类号:**TH457;TM3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2018)05-0524-05

## Preventing irreversible demagnetization of linear oscillation actuator for compressor

ZHAO Ke<sup>1</sup>, TONG Shui-guang<sup>2</sup>, LV Hong-bing<sup>3</sup>, JIAO Lei<sup>4</sup>

(1. Changzhou Industrial Technology Research Institute, Zhejiang University, Changzhou 213022, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. College of  
Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
4. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of irreversible demagnetization of Nd-Fe-B permanent magnet material used in moving-magnet type linear oscillatory actuator, the design of preventing irreversible demagnetization of Nd-Fe-B permanent magnet, which is under the condition of high temperature and alternating magnetic field was studied. The permanent magnet's traditional design criteria of optimum working point was corrected. The mathematical expression of maximal demagnetizing working point at working temperature was deduced by means of equivalent magnetic circuit method, and the influences of actuator's structural parameters on maximal demagnetizing working point were qualitatively analyzed. The position of knee point at working temperature was deduced from the magnetic parameters at normal temperature, and the discriminant formula of excitation loss was given, which is a necessary security constraint related to the structural optimization of linear oscillation actuator. Two grade of Nd-Fe-B permanent magnet-40 M and 40 UH-were tested by experiment of excitation loss. The results indicate that the experimental results agree with the theoretical calculation, and this method can be used for the selection of Nd-Fe-B permanent magnet and preventing irreversible demagnetization of linear oscillatory actuator.

**Key words:** linear compressor; linear oscillation actuator; moving magnet; irreversible demagnetization

## 0 引 言

由于烧结钕铁硼永磁材料具有高矫顽力、高磁能

积以及线性退磁曲线等优异的磁性能,相对于传统的电励磁电机,采用钕铁硼材料的稀土永磁电机重量尺寸更小,更加高效节能。但是,钕铁硼材料也有热稳定

收稿日期:2017-09-12

基金项目:常州市应用基础研究计划资助项目(CJ20159010)

作者简介:赵 科(1976-),男,山东莱芜人,博士研究生,主要从事直线压缩机方面的研究。E-mail: zhaoker@zju.edu.cn

通信联系人:童水光,男,教授、博士生导师。E-mail: cetongsg@zju.edu.cn

性较差的缺点,磁性能随温度的升高而降低,甚至发生失磁<sup>[1]</sup>,这成为制约钕铁硼材料在电机中应用的一个主要因素。

采用动磁式直线振荡电机驱动的直线压缩机在封闭的机壳内运行,由于压缩气体做功以及电机的铜损、铁损、机械摩擦等各种损耗转化为热量,机体会处于温度较高的环境中。同时,电机的绕组中通以交流电工作,所以研究钕铁硼材料在高温和交变电磁场共同作用下的退磁规律,对于完善直线振荡电机的设计理论、保证压缩机稳定运行,有着重要的意义。目前,对于旋转式永磁电机所用永磁体的结构设计,已经有了一定的经验和计算公式<sup>[2-6]</sup>。林岩<sup>[7]</sup>针对永磁旋转电机运行过程中出现的高温失磁现象,对永磁材料的性能状况、合理选择以及磁性能对电机设计的影响等技术问题进行了研究,总结了永磁旋转电机防失磁的合理措施;李桂银<sup>[8]</sup>利用有限元法求解了动圈式直线压缩机的电磁-机械-热多场耦合模型,分析了压缩机稳定工作时压缩机内部的温度场分布以及压缩机性能与温度的关系。

本文将针对钕铁硼永磁材料在 Redlich 型直线振荡电机中的退磁规律以及结构设计等问题进行研究,以确保直线压缩机能够安全运行,避免发生失磁。

## 1 动磁式直线振荡电机结构及工作原理

本文用于驱动压缩机的圆筒形直线振荡电机为 Redlich 型,电机的轴对称结构如图 1 所示。

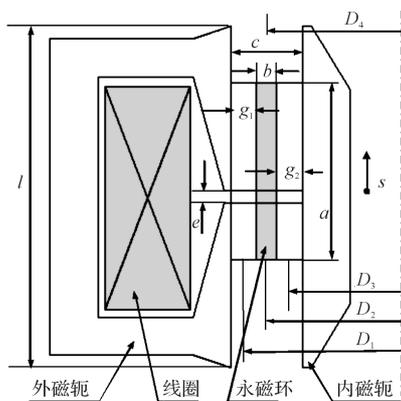


图1 直线振荡电机的轴对称结构示意图

$a$ —永磁环的轴向长度; $b$ —永磁环的径向充磁厚度; $l$ —内、外磁轭间气隙的轴向长度; $c$ —内、外磁轭间气隙的径向厚度; $g_1$ —永磁环与外磁轭的径向间距; $g_2$ —永磁环与内磁轭的径向间距; $D_1, D_2, D_3$ —厚度分别为  $g_1, c, g_2$  的环形气隙的中间层直径; $D_4$ —永磁环的中间层直径; $e$ —外磁轭线圈槽的开口长度

电机结构分为定子和转子两部分,定子包括绕组线圈和内、外磁轭,转子主要为钕铁硼永磁环。转子与电机外部的谐振弹簧组成一个振动系统。在线圈中产生的交变电磁场的作用下,永磁环产生轴向的电磁力。当电磁场的频率与振动系统的固有频率相近时,振动系统发生共振,使转子沿对称轴方向做直线往复运动。

## 2 永磁体最佳工作点准则的修正

为充分利用永磁材料,永磁电机设计理论的最佳工作点准则要求:永磁体的负载工作点应位于其退磁曲线上磁能积最大的地方,对钕铁硼材料来说,就是矫顽力曲线的中点。在直线压缩机的设计中,还必须考虑到钕铁硼材料的高温稳定性问题。黄浩<sup>[9]</sup>研究了钕铁硼材料表面的磁感应强度在交变的磁场作用下的变化情况,表明在交变频率 400 Hz 以下的磁场中,如果钕铁硼材料的工作点不超过其退磁曲线的拐点,则材料的磁感应强度在移除磁场后并不会发生退变。本文的直线振荡电机采用 50 Hz 民用电供电,所以对以往的永磁体设计准则作出以下修正:如果永磁体在工作温度下的退磁曲线上有拐点,则需要校核其最大去磁工作点位置,以确保当电机通以最大电流时,永磁体的最大去磁工作点要高于其拐点位置,即:

$$H_m \geq H_{ck} \quad (1)$$

式中: $H_{ck}$ —退磁曲线上拐点的磁场强度; $H_m$ —永磁体最大去磁工作点上的磁场强度。

## 3 永磁体最大去磁工作点的确定

通过采用磁路分析法推导求得永磁体最大去磁工作点的数学表达式,可以定性地说明永磁体的去磁工作点与电机的结构参数、材料性能参数之间的关系。首先本研究忽略漏磁通,将直线振荡电机内的电磁场简化为磁路模型,再利用磁路分析法列出磁路方程<sup>[10-11]</sup>,对交变磁场环境中永磁体的工作点进行分析。施加在永磁体上半部的磁场强度  $H_m$  为:

$$H_m = -\frac{Ni}{2\mu_r c} + \left(1 - \frac{b(l-a)}{\mu_r c(l-e)}\right)H_c \quad (2)$$

式中: $i$ —线圈内的电流; $N$ —线圈的匝数; $\mu_r$ —永磁体的相对磁导率; $H_c$ —永磁体的矫顽力。

其他结构参数定义参见图 1。

式(2)表示的是永磁体在电机工作过程中磁场强度振荡变化的范围。当电流  $i$  为最大时,磁场强度也为最大值,则此数值就是永磁体上半部的最大去磁工作点。通过对式(2)的分析,可知:

(1) 式(2) 右侧的第一项为永磁体的去磁工作点振荡变化的振幅,由安匝数  $Ni$  和内、外轭铁间的气隙宽度  $c$  所决定,第二项为永磁体去磁工作点振荡变化的平衡位置,由矫顽力  $H_c$  和两个比值  $b/c$ 、 $(l - a)/(l - e)$  所决定;

(2) 比值  $b/c$  越接近于 1,则永磁体的抗去磁能力越强,因此,采取增大永磁体厚度  $b$ 、减小轭铁间的气隙宽度  $c$  的措施,可以显著提高电机的抗去磁能力;

(3) 比值  $(l - a)/(l - e)$  越大,则永磁体的抗去磁能力越强,由于永磁体轴向长度  $a$  已经由动子行程所决定,可以通过增大气隙轴向长度  $l$ 、减小绕组槽开口尺寸  $e$  的措施来提高电机的抗去磁能力。

利用电磁场的有限元法,可以更精确地对电机所用永磁材料的抗去磁性能进行计算。永磁环由 12 片磁瓦拼接而成,因此,取电机结构的 1/12 建立静态电磁场有限元模型进行分析。当动子位于静止平衡位置时,有限元法计算所得 1 片磁瓦上的磁场强度分布云图如图 2 所示。

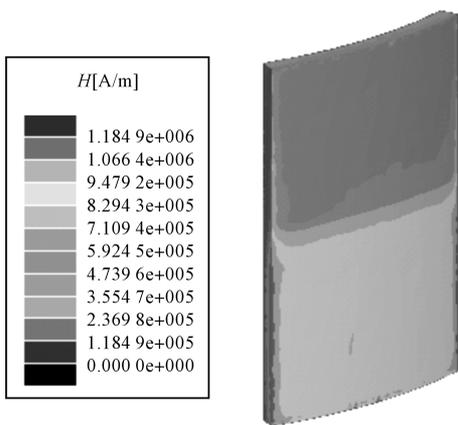


图 2 最大去磁情况下永磁体的磁场强度分布

在同样的计算条件设置下,利用有限元法与磁路分析法计算得到的最大去磁工作点数值相近,有限元法计算值略高于磁路法 5% 左右,因此,在根据磁路法的计算值来设计永磁体厚度时,需要留有一定的余量。

### 4 永磁体高温下性能参数的确定

钕铁硼材料的退磁曲线有两条:矫顽力曲线和内禀矫顽力曲线,如图 3 所示。

磁性能随温度  $t$  的升高而降低,当温度  $t$  升高到一定程度时,矫顽力曲线上甚至会出现拐点,矫顽力曲线由近似于直线变为折线。永磁材料生产厂家往往不会直接提供出电机工作温度下的磁性能曲线。但是,大量对钕铁硼材料磁性能的实验测试结果表明<sup>[12]</sup>:

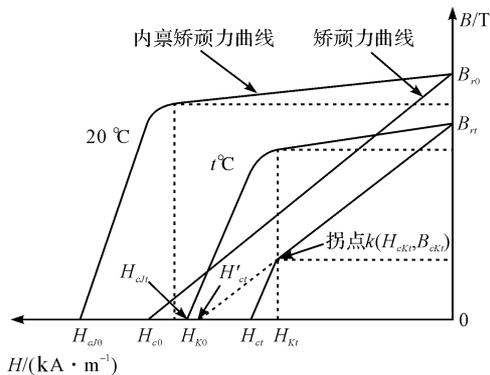


图 3 烧结钕铁硼不同温度下的退磁曲线示意图

$B_{0}$ —20 °C 时的剩磁; $H_{c0}$ —20 °C 时的矫顽力; $H_{c0}$ —20 °C 时的内禀矫顽力; $H_{k0}$ —20 °C 时的临界场强; $H_{ck0}$ —20 °C 时的拐点处场强; $B_{tr}$ —温度  $t$  时的剩磁; $H_{ct}$ —温度  $t$  时的矫顽力; $H_{cj}$ —温度  $t$  时的内禀矫顽力; $H_{kt}$ —温度  $t$  时的临界场强; $H_{ckt}$ —温度  $t$  时的拐点处场强; $H_{ct}$ —当退磁曲线有拐点、温度  $t$  时的计算矫顽力

(1) 钕铁硼材料的相对磁导率  $\mu_r$  几乎不随温度而变化,近似等于 20 °C 室温下的相对磁导率;

(2) 不同温度下,钕铁硼材料内禀矫顽力曲线的矩形度几乎不变,近似等于 20 °C 室温下的矩形度。矩形度用  $q$  表示, $q = H_{k0}/H_{c0}$ ;

(3) 不同温度下,钕铁硼材料拐点处的场强  $H_{ck}$  均近似等于临界场强  $H_k$ 。

基于以上 3 个近似,在没有精确的高温退磁曲线的情况下,可以利用钕铁硼常温下的磁性能参数间接推算高温下的临界磁场强度  $H_{kt}$ 、拐点位置  $H_{ckt}$  等性能参数。通过推算,可得工作温度为  $t$  时,永磁体剩余磁感应强度为:

$$B_{tr} = \left[ 1 + \alpha_{(B_r)}(t - t_0) \right] B_{r0} \quad (3)$$

内禀矫顽力:

$$H_{cj} = \left[ 1 + \alpha_{(H_{cj})}(t - t_0) \right] H_{cj0} \quad (4)$$

如果存在拐点,分析时需要用计算矫顽力  $H_c$  代替矫顽力  $H_{c0}$ :

$$H'_{ct} = - \frac{B_{tr}}{\mu_r \mu_0} = - \frac{\left[ 1 + \alpha_{(B_r)}(t - t_0) \right] B_{r0}}{\mu_r \mu_0} \quad (5)$$

拐点处的场强  $H_{ck}$  约等于临界磁场强度  $H_k$ :

$$H_{ckt} \approx H_{kt} = q \left[ 1 + \alpha_{(H_{cj})}(t - t_0) \right] H_{cj0} \quad (6)$$

式中: $t$ —工作温度; $t_0$ —室温 20 °C; $\alpha_{(B_r)}$ —剩磁温度系数; $\alpha_{(H_{cj})}$ —内禀矫顽力温度系数; $\mu_0$ —空气磁导

率; $\mu_r$ —永磁体的相对磁导率。

其他参数见图3。

式(3~6)可用于高温下钕铁硼材料磁性能的估算,从而能够对材料的热稳定性进行分析。

### 5 直线振荡电机中钕铁硼失磁的判定

由图1电机结构可知: $c = b + g_1 + g_2$ ,将式(2,5,6)代入式(1),可以推得高温环境下 Redlich 型直线振荡电机中钕铁硼材料是否失磁的判定公式:

$$-\frac{Ni}{2\mu_r(b + g_1 + g_2)} + \left(1 - \frac{b(l - a)}{\mu_r(b + g_1 + g_2)(l - e)}\right) H'_{ct} \geq q[1 + \alpha_{(H_{cj})}(t - t_0)]H_{cj0} \quad (7)$$

式(7)表明了匝数  $Ni$ 、钕铁硼的充磁方向厚度  $b$  以及其他电机结构和性能参数之间的制约关系,对于后续的电机结构优化设计,可以作为一个必要的、避免电机失效的安全约束条件。

### 6 热稳定性分析和选择算例

本研究利用以上方法,对 40M、40H 和 40UH 等多种牌号的钕铁硼材料进行热稳定性分析,判断其在温度  $t = 110\text{ }^\circ\text{C}$ 、电流  $i = 1.43\text{ A}$  的工作环境下是否会失磁。电机的各个结构参数分别为:绕组匝数  $N = 700$  圈,永磁体长度  $a = 28\text{ mm}$ ,永磁体厚度  $b = 1.5\text{ mm}$ ,气隙长度  $l = 50\text{ mm}$ ,气隙宽度  $g_1 = 0.6\text{ mm}$ , $g_2 = 0\text{ mm}$ ,线圈槽的开口宽度  $e = 3\text{ mm}$ 。钕铁硼材料的内禀矫顽力温度系数  $\alpha(H_{cj})$  为  $-0.6\%/K$ ,剩磁温度系数  $\alpha(B_r)$  为  $-0.11\%/K$ 。

几种不同牌号的材料在  $20\text{ }^\circ\text{C}$  室温下的矫顽力  $H_c$ 、内禀矫顽力  $H_{cj}$ 、剩磁  $B_r$ 、矩形度  $q$ 、最大磁能积  $(BH)_{\max}$  和最高工作温度  $T_{\max}$  等磁性能参数如表 1 所示。

表 1 各种牌号钕铁硼材料的磁性能参数

牌号	$B_r/T$	$H_{cj}/(kA \cdot m^{-1})$	$H_c/(kA \cdot m^{-1})$	$q$	$(BH)_{\max}/(kA \cdot m^{-3})$	$T_{\max}/(^\circ\text{C})$
40M	1.28	-1 024	-963	0.93	312	$\leq 100$
40H	1.29	-1 354	-996	0.95	319	$\leq 120$
40SH	1.29	-1 593	-908	0.95	319	$\leq 150$
40UH	1.27	-2 027	-992	0.96	313	$\leq 180$
38EH	1.26	-2 389	-908	0.96	303	$\leq 200$

利用式(1~7)计算可得以上各种材料在  $110\text{ }^\circ\text{C}$  温度下的剩磁  $B_r$ 、拐点处场强  $H_{c,kt}$ 、计算矫顽力  $H_{ct}$ 、最大去磁能工作点场强  $H_m$  等数据,计算结果如表 2 所示。

表 2 各种牌号钕铁硼材料的分析计算结果

牌号	$B_r/T$	$H_{ct}/(kA \cdot m^{-1})$	$H_m/(kA \cdot m^{-1})$	$H_{c,kt}/(kA \cdot m^{-1})$	$H_m > H_{c,kt}$
40M	1.15	-873	-822	-438	否
40H	1.17	-881	-828	-592	否
40SH	1.17	-881	-828	-696	否
40UH	1.15	-868	-819	-895	是
38EH	1.14	-861	-814	-1 055	是

由表 2 可知:在  $110\text{ }^\circ\text{C}$  的温度下,40M、40H 和 40SH 的最大去磁工作点均低于其拐点位置,会发生失磁故障。虽然 40SH 牌号的最高工作温度参数为  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,但在  $110\text{ }^\circ\text{C}$  下也会失磁。这说明仅根据最高工作温度这一参数,并不能保证永磁材料在温度低于最高工作温度时就一定安全。38EH 和 40UH 具有更大的内禀矫顽力,温度稳定性更好,则不会失磁。因此,本文可以选用 40UH 或 38EH 来制造电机。

### 7 实验及结果分析

直线压缩机的失磁实验测试系统配置如图 4 所示。

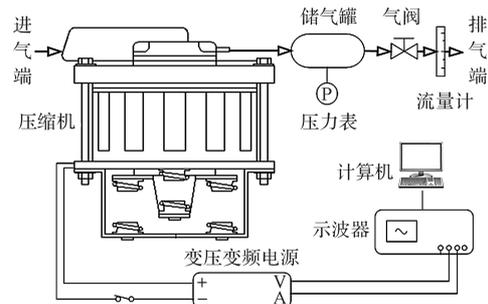


图 4 压缩机失磁实验测试系统示意图

失磁实验的目的是检验不同牌号的钕铁硼在压缩机的设计工况条件下,是否会发生失磁。实验利用可调节的变频变压电源为压缩机供电,并通过气阀调节排气压力,使得压缩机在电流有效值为  $1\text{ A}$ 、排气压力(表压)为  $0.5\text{ MPa}$  的工况下稳定工作。此时,压缩机的输入电压为  $188\text{ V}$ ,功率为  $120\text{ W}$ 。失磁实验过程如下:

- (1)分别利用 40M 和 40UH 两种牌号的钕铁硼制造电机定子,实验前在室温下里利用 HT20 型特斯拉计测量每片磁瓦外表面中心的磁感应强度  $B$ ;
- (2)直线压缩机分别安装不同的定子,并置于密闭机壳内,以空气为压缩介质,在设计工况下稳定运行  $1\text{ h}$ ;
- (3)压缩机停机后完全冷却至室温,拆卸定子,再次测量磁瓦表面的磁感应强度  $B$ ,并与实验前的初始

测量值作对比。

测试结果如下:失磁实验前,12片40M磁瓦的表面磁感应强度的初始测量值在85 mT~90 mT之间,40UH的表面磁感应强度的初始测量值在80 mT~85 mT之间;实验后,40M的表面磁感应强度在40 mT~50 mT之间,下降了50%左右,而40UH的表面磁感应强度则没有明显变化。

实验结果表明:在设计工况条件下,40M发生了严重的失磁,不能满足直线压缩机的设计要求;而40UH没有发生明显的失磁,适于制造电机定子。实验结果与前文算例的计算结果相一致,说明本文的防失磁设计方法是有效的。

由于实验条件所限,实验未能对实验中永磁体的自身温度和周围的环境温度进行精确测量,且仅对2种牌号的钕铁硼进行了验证。根据经验,功率相近的旋转式冰箱压缩机机体温度在100℃~110℃左右,本文实验和计算以该温度值作为参考依据。今后有待于进一步完善实验条件,以便能够更精确地对理论计算和实验结果进行分析对比。

## 8 结束语

本文针对Redlich型直线振荡电机中所用烧结钕铁硼材料的防失磁问题进行了研究:

(1)根据烧结钕铁硼材料在高温下的退磁特性,对传统的永磁体设计准则—最佳工作点准则进行了修正;

(2)利用磁路分析法得出了永磁体在工作温度下的最大去磁工作点的数学表达式,并定性地分析了电机的各个结构参数对工作点的影响;

(3)利用永磁材料常温下的性能参数推算了永磁体在高温下的性能参数,为正确地选择钕铁硼材料的牌号,防止高温失磁提供了数值依据;

(4)推导了Redlich型直线振荡电机中钕铁硼材料在高温下是否失磁的判定公式,为电机的结构设计

和优化提供了一个必要的安全约束条件;

(5)对两种牌号的钕铁硼材料进行了失磁实验,实验结果与理论分析计算结果相一致,说明本文的防失磁设计方法是有效的。

## 参考文献(References):

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 孔 汉,刘景林. 永磁体失磁对永磁伺服电机性能的影响研究[J]. 微特电机,2015,43(6):24-29.
- [3] 张志艳,曹祥红,马宏忠,等. 永磁同步电机均匀失磁故障性能分析[J]. 微电机,2014,47(9):9-13.
- [4] 龚天明,祝令帅,李 华. 2.5 MW 高速永磁同步风力发电机防失磁分析[J]. 电机与控制技术,2012,39(12):56-60.
- [5] 赵 强,赵争鸣,高徐娇. 永磁电机中永磁体尺寸优化设计[J]. 电机电器技术,2001(3):2-5.
- [6] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [7] 林 岩,周广旭,唐任远,等. 烧结钕铁硼材料的热稳定性对电机设计的影响及合理选择[J]. 沈阳工业大学学报,2007,29(6):618-622.
- [8] 李桂银. 新能源汽车用永磁直线压缩机性能热衰退研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2014.
- [9] 黄 浩,柴建云,姜忠良,等. 钕铁硼稀土永磁材料交流失磁[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(6):721-724.
- [10] 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:工学版,2009,43(1):138-142.
- [11] 李 顺,蔺绍江,戴亮雄,等. 冰箱压缩机活塞运动的模拟仿真分析[J]. 流体机械,2017(12):18-21,26.
- [12] 林 岩. 钕铁硼永磁电机防高温失磁技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学机械工程学院,2006.

[编辑:李 辉]

### 本文引用格式:

赵 科,童水光,吕红兵,等. 压缩机用直线振荡电机防失磁设计研究[J]. 机电工程,2018,35(5):524-528.

ZHAO Ke, TONG Shui-guang, LV Hong-bing, et al. Preventing irreversible demagnetization of linear oscillation actuator for compressor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(5):524-528.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn