

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.004

液压缸磁流体密封的有限元分析及实验研究

郝付祥, 穆安乐

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本论文为了解决工程机械液压缸的外泄漏问题, 设计出了一种4级磁源的磁流体密封结构, 通过ANSYS有限元分析法对该密封结构间隙内的磁场分析, 研究了极齿长度和极靴高度两个关键参数对磁流体密封耐压能力的影响规律, 并且计算出每个参数对应的磁流体密封耐压能力。然后在设计的液压缸实验中研究了液压缸往复轴的往复速度、往复行程和保压时间对于磁流体密封能力的影响。最终的结果表明: 密封耐压能力随着极齿长度的增加先增大后减小; 密封耐压能力值随着极靴高度的增加而减小; 密封耐压能力随往复速度增加而减小; 随着往复行程与保压时间的增加, 密封耐压能力没有明显的改变。通过对磁流体密封结构进行有限元分析和实验研究, 对研制出适用于液压缸的高密封性能装置具有重要的意义。

关键词: 液压缸; 磁流体; 密封; 有限元分析; 实验研究

中图分类号: TH17; TH112 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2022)01-0027-05

Finite element analysis and experimental study of magnetic fluid seal of hydraulic cylinder

HAO Fuxiang, MU Anle

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to solve the leakage problem of the hydraulic cylinder of construction machinery, a 4 level magnetic source magnetic fluid seal structure is designed. The magnetic field of the seal structure is analyzed by the ANSYS finite element magnetic field analysis method. The influence of two key parameters such as pole tooth length, permanent magnet height length ratio on the pressure resistance of the magnetic fluid seal is studied; the influence of each parameter on the pressure capability is calculated; the influence of reciprocating speed, reciprocating distance and holding time of piston rod on the pressure seal is investigated in the designed hydraulic cylinder experiment. The final results show that the sealing pressure capacity decreases with the increase of the length of the pole teeth, that the sealing pressure capacity increases firstly and then decreases with the increase of the height of the permanent magnet, that the sealing pressure capacity decreases with the increase of the reciprocating speed, and that the sealing pressure capacity increases with the increase of the reciprocating distance and the holding time, with no obvious change in sealing pressure capacity. By the finite element analysis of and the experimental research on the magnetic fluid seal structure, it is of great significance to develop a highly suitable sealing performance device for hydraulic cylinder.

Key words: hydraulic cylinder; magnetic fluid; seal; finite element analysis; experimental study

液压缸是一种做往复直线运动的液压装置, 它能够将液压能转化为机械能而很好地用于工程机械中^[1]。然而液压缸存在着液压油的外泄漏问题, 尤其局部外泄漏是长期难以解决的问题^[2]。这将会大

大降低液压缸的工作效率, 从而缩短液压缸的寿命, 因此降低液压缸的外泄漏具有十分重要的意义。

田俊等^[3]对O型密封圈进行了失效的分析与研究, 梅钰^[4]通过Abaqus对密封圈的接触应力进

收稿日期: 2021-03-22; 网络出版日期: 2021-07-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210719.1627.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075326)

第一作者: 郝付祥, 男, 博士生, 研究方向为压缩空气储能及磁流体密封。E-mail: haofuxianghfx@163.com

通信作者: 穆安乐, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为风力机动力学分析与自适应控制。E-mail: muanle@xaut.edu.cn

行了特性研究,唐颖达等^[5-6]对液压缸往复密封性能试验方法标准进行了研究。以上均是采用传统的密封方式,随着液压缸活塞杆的往复运动,会对密封圈造成严重的磨损,降低工作寿命。因此,传统的密封方式很难达到零泄漏的目的。

磁流体密封技术是一种新型的密封技术,具有零泄漏、寿命长、可靠性高而且结构简单,能够承受低温和高速载荷^[7-11]。现在普遍应用于航空航天、机械和石油等领域^[12-13]。杨小龙等^[14-15]提出大间隙阶梯式磁流体旋转密封的理论,并进行了仿真与实验,孙明礼等^[16]对磁流体旋转密封进行了仿真与优化。

然而目前研究的均是磁流体旋转密封,而对于液压缸的磁流体往复密封的研究内容较少。目前只有李德才教授^[17]通过理论研究了往复运动时拖拽出磁流体的体积。本文设计了一种用于液压缸的4级磁源磁流体往复密封结构,针对该结构进行仿真与实验研究,为设计出应用于液压缸高性能的磁流体密封结构提供重要的参考依据。

1 磁流体往复密封理论研究

本文设计了一种用于液压缸的4级磁源磁流体往复密封结构,见图1。

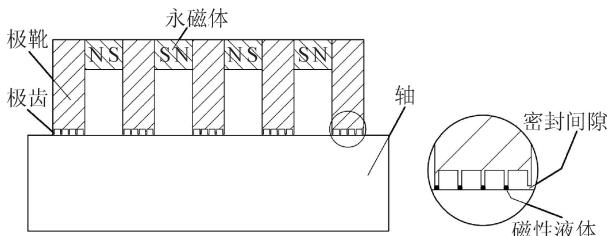


图1 4级磁源磁流体密封结构

Fig. 1 Magnetic fluid seal structure with four magnetic sources

当液压缸的往复轴在一定的运动速度下时,密封间隙内的磁性液体膜从开始运动一直到某一位置处停下,这时候处于一种新的平衡,见图2中虚线所示的位置。

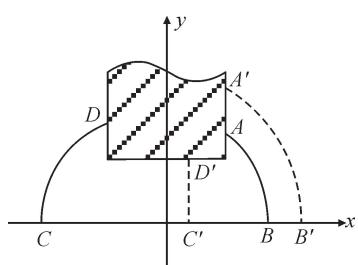


图2 往复轴磁流体密封耐压物理模型

Fig. 2 Physical model of pressure resistance of magnetic fluid seal for reciprocating shaft

于是磁流体往复密封的理论公式^[17]为:

$$\Delta P = P_h - P_0 = [H(X_C) - H(X_B)]\mu_0 M_s + \eta 6V \left\{ \frac{1}{h_{(x_C)}^2} x_C - \frac{1}{[0.66D(6V/\sigma)^{2/3}]^2} x_B \right\} \quad (1)$$

式中: P_h 为高压侧的压力; P_0 为大气压力; $H(X_C)$ 与 $H(X_B)$ 分别为 C、B 点的磁场强度; μ_0 为空气磁导率; M_s 为磁性液体的饱和磁化强度; η 为磁性液体的动力粘度; V 为往复轴的速度; $h_{(x_C)}$ 为 C 点对应的磁性液体的膜厚; D 为密封齿间往复轴的间隙; σ 为磁性液体的表面张力。

实验表明^[4],当磁性液体量比较充足且往复轴运动速度不大时,可以忽略速度对磁流变密封的影响,也可以忽略磁流变表面张力及粘度的作用,因此单个极齿密封耐压能力简化为:

$$\Delta P = P_h - P_0 = [H_{(x_C)} - H_{(x_D)}]\mu_0 M \quad (2)$$

因此水平方向的第 i 级极齿密封耐压过程见图3。得到了第 i 级磁流变密封压力平衡公式:

$$\Delta P_i = P_1 - P_2 = \int_{H_2}^{H_1} M_s dH \quad (3)$$

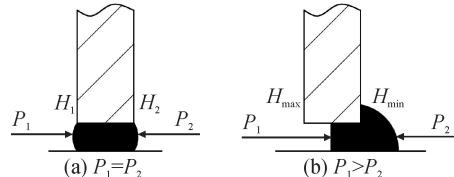


图3 第 i 级极齿密封过程图

Fig. 3 Sealing process diagram of stage i pole tooth

当 $P_1 = P_2$ 时,磁流变往复密封耐压能力为零。当 $P_1 > P_2$ 时,则在新的压力平衡下,密封间隙中的磁流体将沿着压力梯度方向被拉向合适的位置。考虑磁流体的饱和磁化强度远小于外磁场,因此,式(3)可简化为:

$$\Delta P_i = P_1 - P_2 = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M_s dH \quad (4)$$

2 磁流体密封结构参数的确定

为研究液压缸磁流体密封结构参数对密封耐压能力的影响,结构参数尺寸见表1。

表1 4级磁源并联型磁路结构的参数

Tab. 1 Parameters of parallel magnetic circuit structure with four magnetic sources

参数	数值	参数	数值
极靴的极齿个数/个	5	极靴内半径/mm	25.3
极靴外半径/mm	40.3	极靴轴向长度/mm	5
极齿的轴向宽度/mm	0.2	永磁体轴向长度/mm	5
密封间隙/mm	0.3	轴半径/mm	25
齿槽宽/m	1	极齿长度/mm	0.7

在 ANSYS 有限元分析软件中,赋予极靴和轴的材料属性均为 2Cr13。采用 ANSYS 磁场有限元方法研究了极齿长度、极靴高度与往复轴直径之比对应的临界压力的影响。由于密封结构关于 Y 轴对称,因此三维磁流体密封的轴对称问题可以简化为二维模型来处理。本文中选用的永磁体材料为矫顽力为 1.356×10^6 A/m 的钕铁硼,磁流体选用的是磁化饱和强度为 307 kA/m 的磁流变液。构建 4 级磁源磁流体密封结构的二维模型,给各部分赋予相应的材料属性,选用智能网格划分,网格精度为 1 级,网格的划分是采用四个结点,生成如图 4 所示的网格,最后用求解器求解。

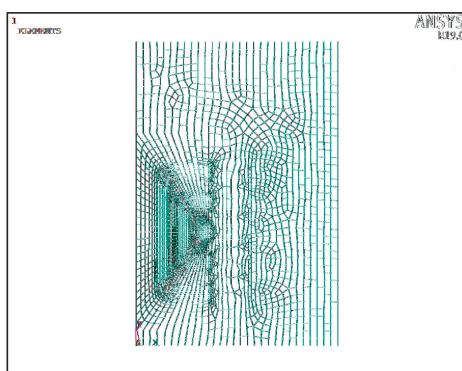


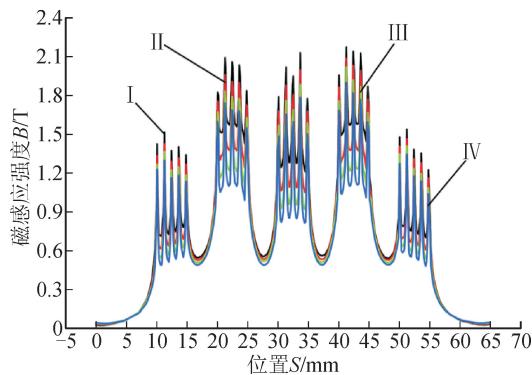
图 4 ANSYS 分析模型网格划分

Fig. 4 ANSYS analysis model meshing

3 磁场有限元分析及结果计算

3.1 极齿长度对磁流体密封耐压能力的影响

极齿长度是影响磁流体密封耐压能力的重要参数之一,本文研究极齿长度的变化规律对于研制出高密封性能的磁流变密封装置具有重要的意义。不同的极齿长度所对应的磁流体密封耐压能力见图 5。



I—0.9 mm; II—0.8 mm; III—0.7 mm; IV—0.6 mm。

图 5 不同极齿长度下磁场分布状态

Fig. 5 Magnetic field distributions under different pole teeth conditions

从图 5 所示的磁场分布状态图中可以清晰的看出,4 级磁源磁流体密封结构的极齿长度越长,对应的磁感应强度就会越大。极齿的长度为 0.9 mm 时,最大的磁感应强度到达 2.15 T,而极齿长度为 0.6 mm 时,所对应的的最大磁感应强度为 1.8 T。这其中的主要原因是各个参数都不变的情况下,极齿长度越长,则对应的磁场梯度差就越大,聚磁效果就更佳,于是磁感应强度就越大。

根据图 5 所示的磁感应强度分布图以及磁流体密封耐压公式,可以计算出不同的极齿长度所对应的密封耐压能力值,其结果见图 6。

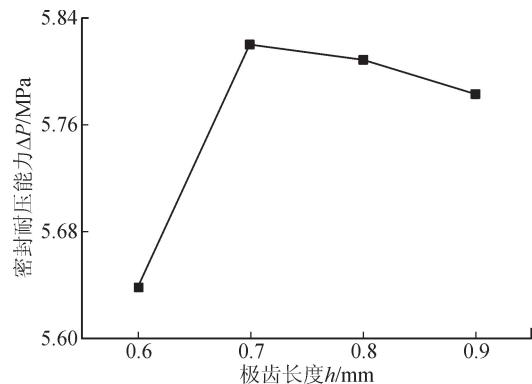


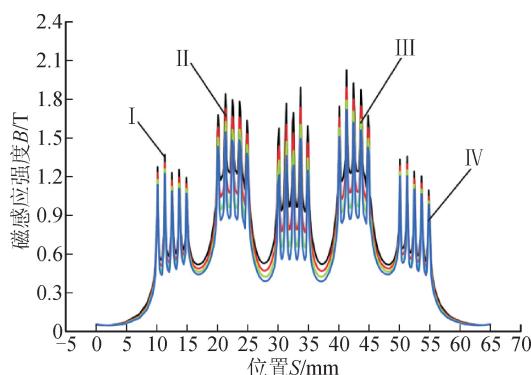
图 6 极齿长度与密封耐压能力关系图

Fig. 6 Relationship between length of pole teeth and sealing pressure capability

从图 6 中不难看出,磁流体密封耐压能力随极齿长度的增加先增大而后减小,极齿长度为 0.7 mm 时,出现了拐点,即此时的密封能力值最大。原因是极齿长度 0.7 mm 左右时,恰好达到磁回路的最大磁能积,此时极齿长度再增加,使得回路中通过的磁通量减少,从而导致耐压能力值下降。

3.2 极靴高度与轴径之比对磁流体密封耐压能力的影响

极靴与永磁体直接接触,因此极靴高度与轴径之比是影响磁流体密封的一个重要参数。当密封间隙为 0.1 mm 时,采用控制单一变量法,在不改变其他参数的情况下,只改变极靴高度极靴高度与轴径之比,从而得到不同密封间隙内的磁场分布状态,见图 7。在图 7 中可以看出,磁场强度随着极靴高度与往复轴径之比的增大而减小,这是因为往复轴半径不变,随着极靴的高度增加,导致极靴内部的磁阻增大,从而磁场强度减小。此外从图 7 中还可以明显看出,两侧极靴的磁感应强度明显低于中间极靴的磁感应强度,因为两侧极靴中的磁通量是由单个永磁体产生的,而中间极靴的磁通量是由两个永磁体产生的。



I—0.6; II—0.8; III—1.0; IV—1.2。

图 7 不同极靴高度与轴径之比的磁感应强度

Fig. 7 Magnetic flux densities at the different ratio of pole piece height to the shaft radius

根据图 7 所示的磁场分布图以及磁流体密封理论公式,计算得到不同的极靴高度与轴径之比所对应的密封耐压能力值,见图 8。

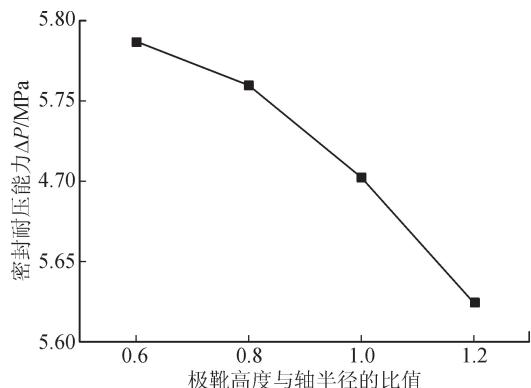


图 8 极靴高度与轴径之比对密封耐压能力关系图

Fig. 8 Effect of the ratio of pole piece height to the shaft radius on MRF sealing pressure capability

在图 8 中清楚的看到密封耐压能力随着极靴高度与轴径之比的增加而减小。根据磁路定律可以知道,极靴高度与轴径之比增加,极靴内部的磁阻就会增大,于是磁通密度降低,穿过的磁通量减少,导致密封能力下降。

4 磁流体往复密封实验研究

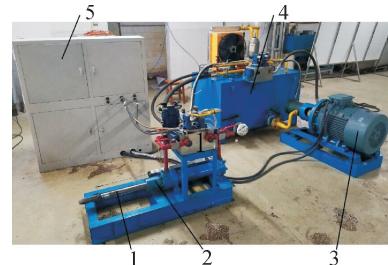
将设计的磁流体密封结构安装在如图 9 所示的液压缸实验台上。

4.1 往复轴速度对密封能力的影响

液压缸往复轴的速度对于磁流体密封能力会有很大的影响,在本次实验中,固定液压缸往复轴的行程为 100 mm,分别实验研究了往复轴的速度为 0 mm/s、1 mm/s、2 mm/s、3 mm/s、4 mm/s 和 5 mm/s 时对应的密封能力,其结果见图 10。

在图 10 中看到,往复速度为 0 mm/s 时,磁流

体的密封能力最大,当速度为 5 mm/s 时,磁流体的密封能力减小了 1.7 MPa。其中的原因是往复轴的速度越大,则拖拽出磁流体的体积量就越多,导致参与密封作用的磁流体量减少,造成密封能力下降。



1—液压缸往复轴;2—密封结构组件;3—液压油泵;4—液压油箱;5—带有显示器的控制台。

图 9 液压缸密封实验台

Fig. 9 Hydraulic cylinder seal test bench

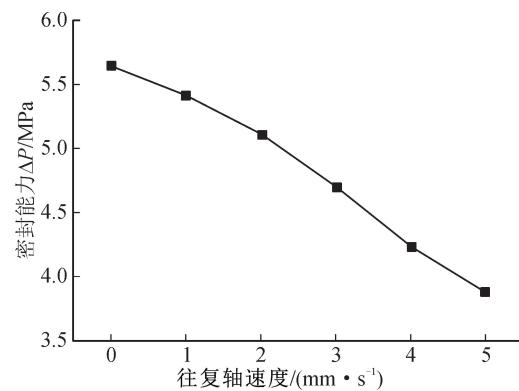


图 10 往复轴速度对磁流体密封能力的影响

Fig. 10 Influence of reciprocating shaft speed on magnetic fluid sealing ability

4.2 往复轴行程对密封能力的影响

液压缸往复轴的速度固定为 3 mm/s 不变,研究当往复轴的行程为 40 mm、80 mm、120 mm、160 mm、200 mm 和 240 mm 时所对应的磁流体密封能力,其结果见图 11。

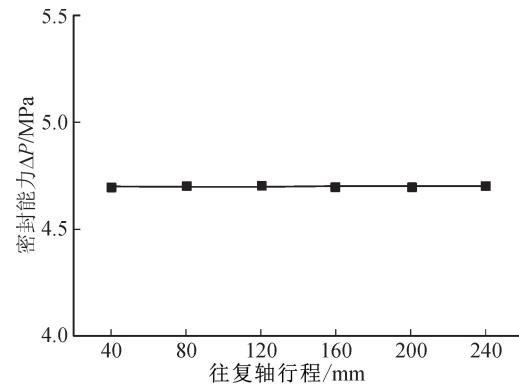


图 11 往复轴行程对磁流体密封能力的影响

Fig. 11 Influence of reciprocating shaft distance on magnetic fluid sealing ability

从图 11 中可以清楚的看出,速度不变时,改变往复轴的运动行程,其密封能力是不变的。这说明往复行程对磁流体密封能力的影响不明显。

4.3 保压时间对密封能力的影响

保压时间对磁流体密封结构的效果起到一个很好的检验效果,因此对保压时间的实验研究是很有必要的。当液压缸往复轴的速度为 0 时,实验研究了保压时间为 4 h、8 h、12 h、16 h 和 20 h 时对磁流体密封能力的影响,结果见图 12。

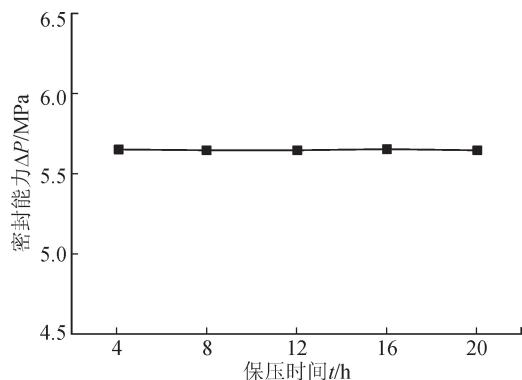


图 12 保压时间对磁流体密封能力的影响

Fig. 12 Influence of holding time on magnetic fluid sealing ability

通过静态保压时间的实验证明了用于液压缸的 4 级磁源磁流体密封结构的有效性,可以有效地防止液压缸的泄漏问题,为提高液压缸的工作效率提供有利的保障。

5 结 论

本文设计了用于液压缸的 4 级磁源磁流体密封结构,用有限元法分析了极齿长度和极靴高度对磁流体密封能力的影响,用实验法分析了往复轴的速度、往复轴的行程以及保压时间对磁流体密封能力的影响,其结果为如下。

1) 随着极齿长度的增加,磁流体密封能力先增大后减小,并且当极齿长度为 0.7 mm 时,密封能力值达到最佳。随着极靴高度的增加,磁流体密封耐压能力值减小。

2) 随着液压缸往复轴速度增大,磁流体密封能力下降。随着液压缸往复轴行程的增大,磁流体密封耐压能力的变化不大。往复轴速度为零时,随着保压时间的增加,磁流体密封耐压能力的变化几乎无变化。

3) 通过实验研究,证明了设计的 4 级磁源磁流体密封结构的可靠性,这为研制出适合液压缸的密封装置提供了基础。

参考文献:

- 陈帆. 工程机械液压缸磁流体密封的数值分析与试验验证[D]. 柳州:广西科技大学,2019.
- CHEN Fan. Numerical analysis and experimental verification of magnetic fluid seal of engineering machinery hydraulic cylinder[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2019.
- 王星. 浅析机械密封的泄漏及改进[J]. 科学技术创新, 2019(15): 167-168.
- WANG Xing. Analysis of mechanical seal leakage and improvement[J]. Science and Technology Innovation, 2019(15): 167-168.
- 田俊,潘平述. 某型机转向活门 O 型橡胶圈密封失效分析与研究[J]. 金属热处理, 2019, 44(增刊 1): 214-217.
- 梅钰. 小型汽车起重机液压缸的泄漏特性研究[J]. 液压与气压传动, 2021, 41(3): 73-76.
- MEI Yu. Study on leakage characteristics of hydraulic cylinder for small truck crane[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021, 41(3):73-76.
- 唐颖达. 液压缸密封技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- 唐颖达,刘尧,顾海涛,等. 评定液压往复运动密封件性能试验方法标准的研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(22): 29-38.
- TANG Yingda, LIU Yao, GU Haitao, et al. Study on standard test methods to assess the performance of seals used in oil hydraulic reciprocating applications[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(22): 29-38.
- ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. New York : Dover, 1997.
- DE VOLDER M, REYNAERTS D. Development of a hybrid ferrofluid seal technology for miniature pneumatic and hydraulic actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 152(2): 234-240.
- PATHAK S, JAIN K, NOORJAHAN, et al. Magnetic fluid based high precision temperature sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2017,17(9): 2670-2675.
- SUN Peng, YANG Xiaolong, HAO Fuxiang. Magnetic field finite element analysis of a novel diverging stepped magnetic fluid seal[M]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- 刘颖,王全胜,王建华. 磁流体密封自修复的试验研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(3): 72-76.
- LIU Ying, WANG Quansheng, WANG Jianhua. Experimental research on self restoring of magnetic fluid seal[J]. Tribology, 1998, 18(3): 72-76.

(下转第 47 页)

[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11 (5): 331-338.

[13] AMINIAN A, BENI M S. Face detection using color segmentation and RHT[C]//3rd International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (IPRIA), 2017, 128-132.

[14] BOUKHAROUBA A. A new algorithm for skew correction and baseline detection based on the randomized Hough transform[J]. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2017, 29(1): 29-38.

[15] HUANG Zhipeng, LIN Zhifeng, ZHU Ziran, et al. An improved simulated annealing algorithm with excessive length penalty for fixed-outline floorplanning [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:50911-50920.

[16] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, et al. Eqviation of State calculations by fast computing machines[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6):1087-1092.

[17] KIRKPATRICK S, JR GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598):671-680.

[18] 陈华根,吴健生,王家林,等. 模拟退火算法机理研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 802-805.

CHEN Huagen, WU Jiansheng, WANG Jialin, et al. Mechanism study of simulated annealing algorithm[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2004, 32(6):802-805.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 31 页)

[12] SZCZECH M, HORAK W. Numerical simulation and experimental validation of the critical pressure value in ferromagnetic fluid seals[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(7):2-6.

[13] 杨小龙, 谌炎辉, 孙浩祥. 发散型阶梯式磁性液体密封的磁路设计及试验验证[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(3): 50-54.

YANG Xiaolong, CHEN Yanhui, SUN Haoxiang. Magnetic circuit design and experimental verification of diverging stepped magnetic fluid seal[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2016, 40(3): 50-54.

[14] 杨小龙, 陆文丽, 孙康康, 等. 发散型阶梯式磁流体密封的磁场有限元分析[J]. 广西科技大学学报, 2016, 27(2): 75-80.

YANG Xiaolong, LU Wenli, SUN Kangkang, et al. Magnetic field element finite analysis of diverging stepped magnetic fluid seals[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2016, 27(2): 75-80.

[15] YANG Xiaolong, ZHANG Ruibo, WANG Guohong. Magnetic circuit design and numerical study of diverging stepped magnetofluid seal with small clearance[J]. *Journal of Magnetics*, 2020, 25(2): 181-189.

[16] 孙明礼, 李德才, 何新智, 等. 磁流体密封的磁场数值分析及优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(3): 269-272.

SUN Mingli, LI Decai, HE Xinzhi, et al. Simulation and design of magnetic fluid sealing devices[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2007, 27(3): 269-272.

[17] 李德才. 磁性液体密封理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2010.

(责任编辑 王绪迪)