

DOI: 10.3901/JME.2014.20.175

大间隙磁性液体与迷宫交替式组合密封的 数值及试验研究*

杨小龙 李德才 何新智 张惠涛

(北京交通大学机械电子与控制工程学院 北京 100044)

摘要: 为了提高大间隙磁性液体密封的耐压能力,在多级磁源磁性液体密封的基础上提出一种新型的磁性液体与迷宫交替式组合密封结构并设计一种普通的具有二级磁源的磁性液体与迷宫交替式组合密封结构。试验研究 0.3 mm 到 0.7 mm 间隙下具有机油基、煤油基和酯基磁性液体的交替式组合密封耐压能力,数值模拟该交替式组合密封中密封间隙内的磁场强度,由磁性液体密封耐压理论计算出该交替式组合密封中磁性液体密封的理论耐压值,对交替式组合密封的试验结果与该交替式组合密封中磁性液体密封的理论耐压值进行比较和分析。结果表明,与多级磁源磁性液体密封相比,该交替式组合密封显示良好的密封能力;当密封间隙大于 0.4 mm 时,该交替式组合密封的耐压能力随着间隙的增大而减小。

关键词: 大间隙; 磁性液体; 迷宫; 组合密封

中图分类号: TP212

Numerical and Experimental Studies of Alternative Combined Magnetic Fluid and Labyrinth Seal with Large Gap

YANG Xiaolong LI Decai HE Xinzhi ZHANG Huitao

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To improve the pressure capability of magnetic fluid seal with a large gap, a new type of alternative combined magnetic fluid and labyrinth sealing structure is proposed on the basis of magnetic fluid seal with the multiple magnetic sources and a usual magnetic fluid sealing structure with two permanent magnets is designed. The pressure capabilities of the alternative combined seal with lubricating oil-based magnetic fluid, kerosene-based magnetic fluid and ester-based magnetic fluid under 0.3 mm to 0.7 mm sealing gap have been investigated by experimental methods. The magnetic field intensity is calculated by numerical method and the theoretical pressure capability of the magnetic fluid seal in the alternative combined seal is obtained according to the theoretical pressure formula of the magnetic fluid seal. The obtained experimental values of the combined seal have been compared and analyzed with the theoretical values of the magnetic fluid seal in the alternative combined seal. The results indicate that the alternative combined magnetic fluid and labyrinth seal shows good performance compared with the multiple magnetic sources and when the height of the sealing gap is larger than 0.4 mm, the pressure capability of the alternative combined seal decreases with the increase of the height of the sealing gap.

Key words: large gap; magnetic fluid; labyrinth; combined seal

0 前言

对于密封间隙小于 0.3 mm 时磁性液体密封而言,由于它具有零泄漏、寿命长、无污染等优点,因此已广泛应用于机械、化工、石油、环境、仪器

和仪表等领域中^[1-3]。然而,对于军工领域中船舶等主轴直径大于 500 mm 的情况下,低速转轴的径向跳动会导致转轴与极靴之间的磨损从而使磁性液体密封失效,所以要求密封间隙高度一般不小于 0.4 mm。李德才等^[4-7]研究发现大间隙条件下磁性液体密封的耐压能力随着密封间隙高度的增大而显著减小。因此提高大间隙条件下磁性液体密封的耐压能力具有重要的意义。

* 国家自然科学基金资助项目(50875017)。20130918 收到初稿,20140507 收到修改稿

为了提高大间隙条件下磁性液体密封的耐压能力,本文在多级磁源磁性液体密封的基础上提出了一种新型的磁性液体与迷宫交替式组合密封,并试验研究了不同间隙高度下磁性液体与迷宫交替式组合密封和普通的磁性液体密封的耐压能力,数值计算了该交替式组合密封中磁性液体密封的理论耐压能力,并将交替式组合密封的试验结果与计算得到的交替式组合密封中磁性液体密封的理论耐压值进行了分析和讨论。结果表明与多级磁源磁性液体密封相比,大间隙磁性液体与迷宫交替式组合密封具有良好的密封性能。

1 磁性液体与迷宫交替式组合密封结构及磁性液体密封理论

1.1 磁性液体与迷宫交替式组合密封结构

图 1 为具有二级磁源的磁性液体与迷宫交替式组合密封结构。交替式组合密封与多级磁源磁性液体密封的区别在于将轴设计为阶梯轴,极靴与轴之间的间隙保持不变,同时将相邻两个极靴,转轴及永磁体围成的空间设计为迷宫密封腔,因此当气体泄漏时通过多级磁源磁性液体密封与阶梯迷宫密封交替工作从而实现磁性液体与迷宫交替式组合密封的功能。该交替式组合密封结构不仅能实现阶梯迷宫密封无法实现的零泄漏功能,同时还具有结构简单、易于安装等优点。

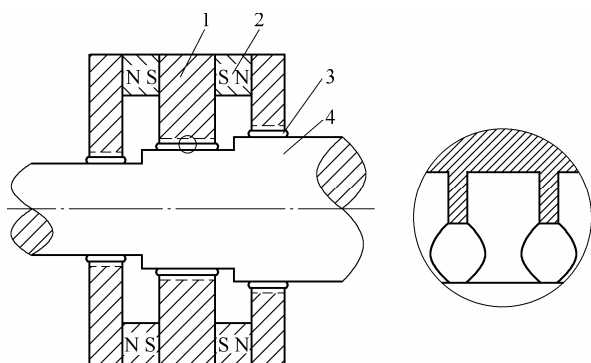


图 1 磁性液体与迷宫交替式组合密封的示意图

1. 极靴 2. 永久磁铁 3. 磁性液体 4. 轴

1.2 磁性液体密封理论

一般情况下磁性液体静密封的耐压公式为^[8-10]

$$\Delta p = \int_{H_{i\min}}^{H_{i\max}} \mu_0 M dH \approx \sum_{i=1}^N M_s (B_{i\max} - B_{i\min}) \quad (1)$$

式中 $H_{i\min}$ ——第 i 齿下最小磁场强度;
 $H_{i\max}$ ——第 i 齿下最大的磁场强度;
 $B_{i\min}$ ——第 i 齿下最小磁通量密度;

$B_{i\max}$ ——第 i 齿下最大的磁通量密度;

μ_0 ——真空磁导率;

M ——磁性液体密封极齿下磁性液体的磁化强度;

M_s ——磁性液体密封极齿下磁性液体的饱和磁化强度;

N ——极齿的数量。

从式(1)可以看出,计算出每个极齿下最大磁场强度和最小磁场强度即可计算出磁性液体密封耐压能力。

2 磁场有限元分析与试验

2.1 数值分析

设计如图 1 所示的双磁源供磁的磁性液体与迷宫交替式组合密封结构。在 ANSYS 有限元分析软件的前处理器中创建磁性液体密封的物理环境。根据磁性液体密封结构的对称性,可以将磁性液体密封的三维轴对称问题简化为二维平面问题。由于每一极靴下密封间隙内的永磁体产生的磁场强度远大于磁性液体饱和磁化强度,被饱和磁化后的磁性液体的磁导率与空气的磁导率相差不大,因此可以将磁性液体当作空气来处理。

对于该交替式组合密封而言,它的左侧第一极靴的内径、外径和轴向长度分别为 33.2 mm、62.0 mm、6.0 mm。中间极靴的内径、外径和轴向长度分别为 36.2 mm、62.0 mm、10.0 mm。它的右侧第一极靴的内径、外径和轴向长度分别为 39.2 mm、62.0 mm、6.0 mm。与第一极靴对应的阶梯的外径为 29.6 mm,与第二极靴对应的阶梯的外径为 32.6 mm,与第三极靴对应的阶梯的外径为 38.6 mm。两块永磁体的内径、外径和轴向长度分别为 48 mm、60 mm、5 mm。

密封间隙高度从 0.3 mm 变化到 0.7 mm,它们的左侧第一极靴和右侧第一极靴上有五个极齿和四个槽,中间极靴上均有 8 个极齿 7 个槽,所有极齿的宽度均为 0.2 mm,所有槽的宽度均为 0.8 mm,所有极齿的径向高度均为 0.7 mm。轴的材料为 2Cr13,永磁体的材料为钕铁硼,极靴的材料为 1Cr13,选用的磁性液体分别为机油基,煤油基和酯基磁性液体,其饱和磁化强度分别为 30.2 kA/m、31.5 kA/m 和 41.6 kA/m。

根据以上的结构参数以及材料特性,建立该交替式组合密封结构的二维模型并将永磁材料的矫顽力 M_{GXX} 、 M_{GYY} 、 M_{GZZ} 分别设为 0, 1.356×10^6 A/m, 0; 0, -1.356×10^6 A/m, 0, 给各零部件赋予相应的材料属性,选择智能网格划分,网格的精度为 4 级,

然后给模型边界施加磁力线平行的边界条件, 通过求解器进行求解。

2.2 试验方法

将设计组装好的磁性液体与迷宫交替式组合密封结构安装在图 2 所示的试验台上。通过氮气瓶以 0.02 MPa/min 给密封腔内加压, 直到氮质谱检漏仪检测到泄漏停止试验并记下泄漏时的压力值。试验完, 更换磁性液体, 并重复以上步骤, 即可得到同一间隙下不同磁性液体的密封耐压值。

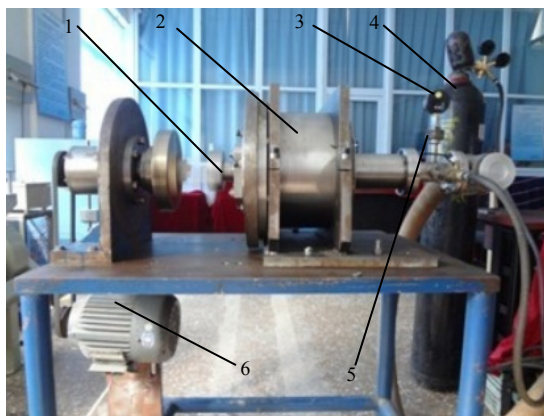


图 2 试验台

1. 密封装置 2. 密封腔 3. 压力表 4. 氮气瓶 5. 阀门 6. 电动机

3 结果分析与比较

图 3~7 为 0.3 mm 到 0.7 mm 密封间隙内的磁场分布。从图 3~7 不难发现当间隙值从 0.3 mm 增大到 0.7 mm 时, 组合密封结构中密封间隙内的最大磁通密度逐渐减小, 这是因为间隙越大, 密封间隙的磁阻越大, 在磁源不变的情况下, 密封间隙内的磁场强度越小, 磁通密度也随之减小。而且在任一密封间隙下, 中间极靴极齿上的磁通密度大于两侧极靴极齿上的磁通密度, 这是由于中间极靴由两个永磁体供磁, 而两侧的极靴由单个永磁体供磁造成的。

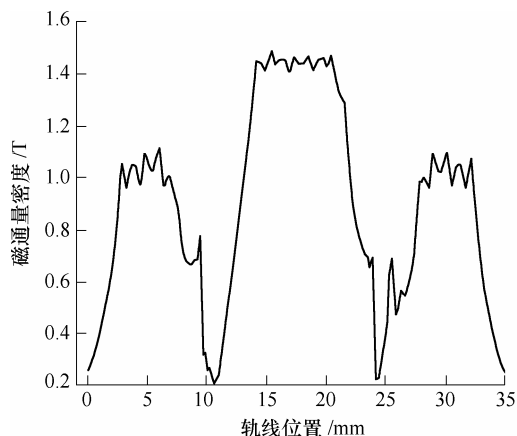


图 3 0.3 mm 密封间隙内的磁场分布

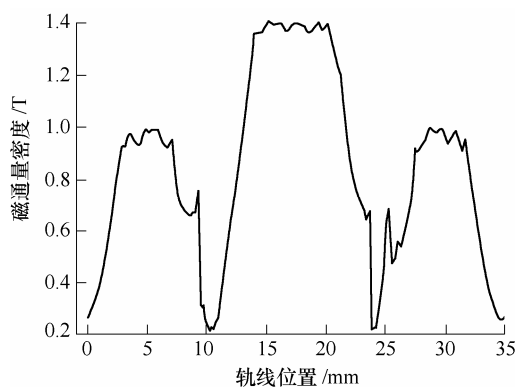


图 4 0.4 mm 密封间隙内的磁场分布

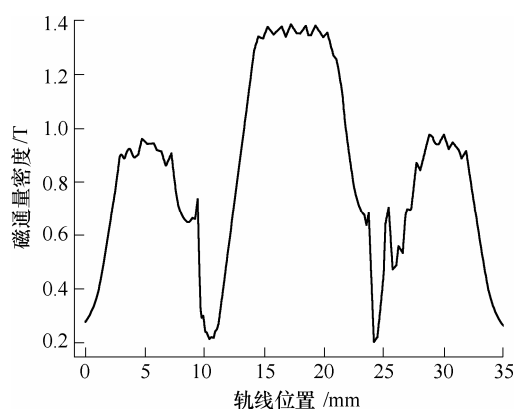


图 5 0.5 mm 密封间隙内的磁场分布

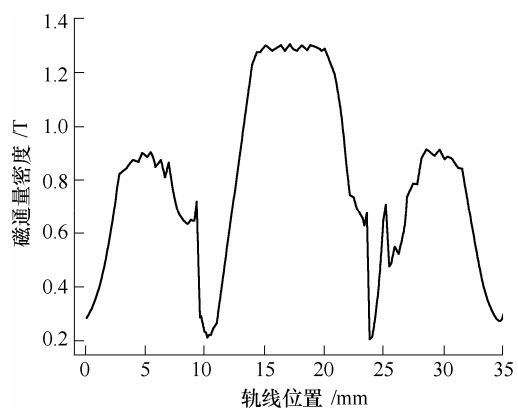


图 6 0.6 mm 密封间隙内的磁场分布

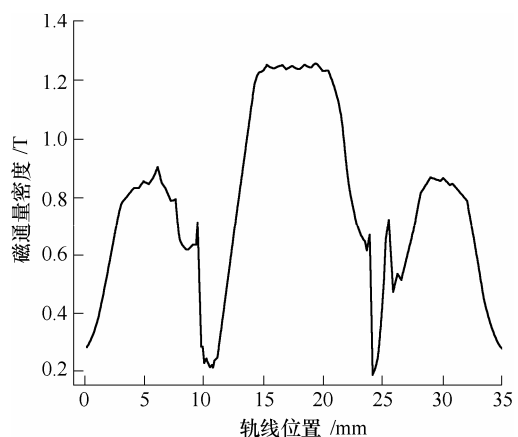


图 7 0.7 mm 密封间隙内的磁场分布

由图 3~7 所示的磁场分布以及磁性液体密封耐压公式(1)即可计算出磁性液体与迷宫交替式组合密封中磁性液体密封的理论耐压值。图 8~10 分别为 0.3~0.7 mm 间隙下具有机油基磁性液体、煤油基磁性液体和酯基磁性液体的组合密封的试验值及其磁性液体密封部分的理论耐压值。组合密封的试验值与其磁性液体密封部分的理论耐压值的差值近似为迷宫密封的耐压值。

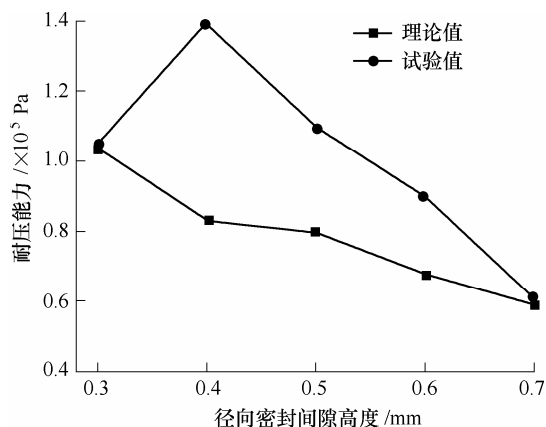


图 8 不同间隙下具有机油基磁性液体的交替式组合密封的试验值与其磁性液体密封的理论值

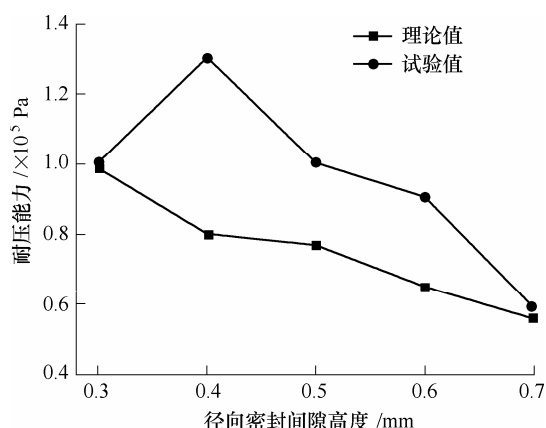


图 9 不同间隙下具有煤油基磁性液体的交替式组合密封的试验值与其磁性液体密封的理论值

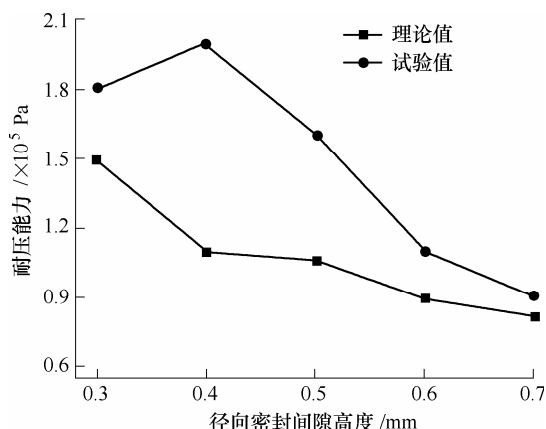


图 10 不同间隙下具有酯基磁性液体的交替式组合密封的试验值与其磁性液体密封的理论值

从图 8~10 中不难发现,对于磁性液体与迷宫交替式组合密封中的磁性液体密封部分而言,随着间隙的增大,磁性液体密封的耐压能力逐渐下降,其随间隙的变化规律与磁场随间隙变化规律一致。

从具有三种磁性液体的组合密封的试验结果可以发现,当间隙从 0.3 mm 增加到 0.4 mm 时,具有机油基、煤油基和酯基磁性液体的组合密封耐压值分别增加了 30%、33%和 11%,磁性液体与迷宫交替式组合密封的耐压能力不但没有减少反而增加,这是因为当间隙为 0.3 mm 时,磁性液体受到的磁场力较大,尤其是中间极靴下的磁性液体受到的磁场力最大,因此当组合密封中迷宫密封的泄漏通道打开时,受到较强磁场力作用的部分磁性液体会大量滞留在密封间隙内,而具有大量磁性液体的较小密封间隙不利于阶梯迷宫密封发挥作用;当间隙为 0.4 mm 时,磁性液体受到的磁场力开始减小,因此当泄漏通道打开时,一方面滞留在密封间隙内的磁性液体量也开始减少,其对被密封介质的阻碍作用开始减少,另一方面减少的磁性液体使得密封间隙通道更加畅通,有利于迷宫密封发挥作用,因此当间隙从 0.3 mm 增加到 0.4 mm 时,组合密封的耐压能力不降反升。

当间隙 0.4 mm 增加到 0.7 mm 时,具有机油基、煤油基和酯基三种磁性液体的组合密封耐压能力分别下降了 54%、56%和 55%。这是因为当间隙大于 0.4 mm 时,密封间隙内的磁性液体受到的磁场力越来越弱,因此当泄漏通道打开时密封间隙内的磁性液体量也越来越少,密封通道畅通,此时组合密封中的磁性液体密封和阶梯迷宫密封的作用均随密封间隙的增加而减小,因此这两种密封的耐压能力之和即磁性液体与迷宫交替式组合密封的耐压能力随着密封间隙的增大而减小。

从图 8~10 中不难发现,当密封间隙分别为 0.3 mm 和 0.7 mm 时,具有机油基与煤油基磁性液体的磁性液体与迷宫交替式组合密封耐压能力试验值略大于该组合密封中的磁性液体密封耐压能力理论值,而对于具有酯基磁性液体的交替式组合密封而言,其组合密封的试验值比该组合密封中磁性液体密封的理论值大 0.1 个大气压,这表明当间隙过小或过大时,具有低饱和磁化强度磁性液体组合密封的作用低于高饱和磁化强度磁性液体组合密封的作用。这是因为当密封间隙过小时,具有较高饱和磁化强度的磁性液体受到的磁场力作用更大,而受到较强磁场力的磁性液体对被密封介质的阻碍作用更强;而当密封间隙较大时,具有高饱和磁化强度的磁性液体在磁场力作用下滞留在密封间隙内的量比

低饱和磁化强度的磁性液体量较多, 因此当密封间隙分别为 0.3 mm 和 0.7 mm 时, 具有较高饱和磁化强度酯基磁性液体的组合密封作用更强。

当间隙从 0.4 mm 增加到 0.6 mm 时, 具有三种磁性液体的磁性液体与迷宫交替式组合密封耐压能力的试验值显著大于该交替式组合密封中磁性液体密封耐压能力的理论值, 这表明 0.4 mm 到 0.6 mm 范围内的密封间隙, 有利于组合密封中的迷宫密封发挥作用, 也表明与多级磁源磁性液体密封相比, 磁性液体与迷宫交替式组合密封显示了良好的密封性能, 这是因为当密封间隙在 0.4 mm 到 0.6 mm 范围内变化时, 磁性液体与迷宫交替式组合密封中密封间隙内的磁性液体量以及含有磁性液体量的泄漏通道有利于迷宫密封发挥作用。

从图 8~10 中还不难发现, 当密封间隙为 0.4 mm 时, 具有机油基、煤油基和酯基磁性液体的组合密封耐压能力试验值比该交替式组合密封中的磁性液体密封的理论值分别高 0.05 MPa、0.057 MPa 和 0.09 MPa, 即三种磁性液体的迷宫密封耐压值分别为 0.05 MPa、0.057 MPa 和 0.09 MPa, 此时组合密封中阶梯迷宫密封作用最强, 这是由密封间隙为 0.4 mm 时密封间隙内滞留磁性液体的泄漏通道最有利于迷宫密封发挥作用造成的。

4 结论

(1) 与多级磁源磁性液体密封相比, 磁性液体与迷宫交替式组合密封显示了良好的密封性能。

(2) 该交替式组合密封结构不仅能实现阶梯迷宫密封无法实现的零泄漏功能, 也提高了磁性液体密封的耐压能力。

(3) 当间隙大于 0.4 mm 时磁性液体与迷宫交替式组合密封的耐压能力随着密封间隙的增加而减小。

参 考 文 献

[1] ZOU Jibin, ZOU Jiming, HU Jiahui. Design and pressure control of high-pressure differential magnetic fluid seals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 2651-2653.

- [2] MATUSZEWSKI L. Multi-stage magnetic-fluid seals for operating in water-life test procedure, test stand and research results[J]. Polish Maritime Research, 2012, 19(4): 62-70.
- [3] KRAKOV M S, NIKIFOROV I V. Influence of the meridional flow and thermomagnetic convection on characteristics of magnetic fluid seal technical physics[J]. Technical Physics, 2011, 56(12): 1745-1753.
- [4] 李德才, 张秀敏, 高欣. 大间隙磁性液体静密封研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 193-198.
LI Decai, ZHANG Xiumin, GAO Xin. Study on magnetic fluid static seal of large gap[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 193-198.
- [5] ZHAO Meng, ZOU Jibin, HU Jiahui. An analysis on the magnetic fluid seal capacity[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 303(2): 428-431.
- [6] SZYDLO Z, OCHOŃSI W, ZACHARA B. Experiments on magnetic fluid rotary seals operating under vacuum conditions[J]. Tribology Test, 2005, 11(4): 345-354.
- [7] YANG Xiaolong, ZHANG Zhili, LI Decai. Numerical and experimental study of magnetic fluid seal with large sealing gap and multiple magnetic sources[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (11): 2865-2869.
- [8] 池长青, 王之珊, 赵丕智. 铁磁流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.
CHI Changqing, WANG Zhishan, ZHAO Pizhi. Ferrohydrodynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1993.
- [9] 李德才. 磁性液体的理论及应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2006.
LI Decai. The theory and application of magnetic fluid[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] ROSENWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. New York: Dover Publications Inc., 2002.

作者简介: 杨小龙, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电液磁一体化的理论及应用。

E-mail: 09116324@bjtu.edu.cn

李德才(通信作者), 男, 1966 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电液磁一体化的理论及应用。

E-mail: dcli@bjtu.edu.cn