

文章编号: 1006-3080(2025)06-0850-07

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20250305002

新型磁流体密封极齿齿形结构及有限元分析

王美乔, 高磊, 过常乐, 安琦

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:本文提出了一种新型磁流体密封极齿齿形结构, 通过沿轴向移动轴套改变密封间隙, 便于在实际应用中调节密封间隙和密封能力。推导了磁流体密封的耐压公式, 利用 ANSYS Electronics Desktop 软件进行有限元分析, 结果表明本文所提出的新型极齿齿形结构能够有效提升磁流体密封性能。结合具体的算例深入研究了各结构参数对密封性能的影响规律, 绘制了相关的影响规律的曲线, 并对影响规律进行了说明和分析。研究结果表明, 在一定范围内, 倾斜角度越小、密封间隙越小、齿厚越小、齿槽宽度越大, 则密封能力越强。永磁体位置对密封效果影响不显著。通过回归分析可知, 在实际工程设计中应优先优化密封间隙及齿厚, 以达到最佳密封效果。

关键词:磁流体密封; 新型极齿齿形; 密封性能; 有限元分析; 耐压理论

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

磁流体密封是利用永磁体的磁场作用将磁流体约束在密封间隙中, 从而实现密封的效果, 具有摩擦小、寿命长、零泄漏等诸多优点。磁流体的密封性能与密封齿形的齿形有很大关系, 目前磁流体常用的密封齿形为矩形、三角形与梯形等, 但从实际应用看, 这些齿形所能产生的密封效果仍待进一步提升, 开发新型的极齿齿形十分必要。

Lutest 等^[1]通过试验证明, 将极齿设置在转轴上, 磁流体密封的耐压能力较好。Kimio 等^[2]提出了一种多级磁源磁流体密封结构, 采用相邻永磁体磁极相反的方法, 提升磁流体密封耐压能力。霍丽萍等^[3]试验研究了不同磁极的组合方式、磁极的级数、磁源的磁场方向和密封间隙对密封性能的影响。刘同冈等^[4]在旋转轴的表面增加了高导磁套筒, 降低了沿轴向的漏磁。李松晶等^[5]采用径向极齿设计了一种用于气动系统的新型磁流体密封圈。李保锋等^[6]用变齿宽的方法提高密封承压能力。王栋梁等^[7]将部分密封极齿置于垂直于被密封轴的端面上, 形成端面密封。左英杰等^[8]利用毛细现象将密封液体与

磁流体分隔开来, 阻止二者直接接触以避免对磁流体的干扰。张禹等^[9]提出一种柔性极靴磁流体密封, 用磁性材料制作的柔性极靴代替传统的硬极靴。杨小龙等^[10]提出了一种磁源交错式套筒型磁流体密封装置, 提升了密封装置的耐压性能。王虎军等^[11]在被密封液体与磁流体界面处设计了一种挡板, 使磁流体密封性能明显提高。杨峻涛^[12]设计了一种磁体内嵌型磁流体密封装置, 能够节约磁流体密封安装空间。刘嘉伟等^[13]提出了一种磁流体密封, 使极靴环与轴或者外壳作为一个整体, 摆脱了橡胶密封圈的限制。王俊勇等^[14]通过有限元分析, 对比 3 种不同形状极齿的磁场分布。赵国伟等^[15]研究了密封极齿结构参数对密封性能的影响, 发现了密封间隙、极齿厚度、极齿高度等参数对密封能力的影响规律。王瑞金等^[16]试验研究了密封间隙对磁性液体密封耐压性能的影响。杨逢瑜等^[17]试验得到一定轴径下磁性流体密封中磁隙、倒角、齿宽和齿高的选择范围。陈方誉^[18]通过有限元的方法分析了 4 种极齿结构对磁流体密封性能的影响。吴朝军等^[19]提出一种新型变

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 王美乔(2001—), 女, 陕西汉中, 硕士生, 主要研究方向为机械设计及理论。E-mail: Wangmq0301@163.com

通信联系人: 安琦, E-mail: anqi@ecust.edu.cn

引用本文: 王美乔, 高磊, 过常乐, 等. 新型磁流体密封极齿齿形结构及有限元分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 850-856.

Citation: WANG Meiqiao, GAO Lei, GUO Changle, *et al.* Structure and Finite Element Analysis of a New Type of Magnetic Fluid Seal Pole Tooth Profile[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(6): 850-856.

齿磁流体密封结构, 利用 ANSYS Maxwell 软件对该结构密封间隙内磁感应强度大小分布进行研究。龚佳成^[20]利用 ANSYS 仿真软件研究了结构参数变化对密封性能的影响规律。

综上所述, 目前提出的极齿齿形仍然有局限性, 密封间隙调整困难, 磁流体密封所能实现的密封压力仍然较低, 对极齿结构进行创新性研究十分必要。本文运用磁流体密封理论提出新的磁流体密封极齿齿形, 并在此基础上对该新型极齿结构进行有限元建模及仿真分析。

1 新型磁流体密封结构

1.1 磁流体密封原理

如图 1(a) 所示, 磁流体密封装置主要由永磁铁、极靴、旋转轴、磁流体、外壳等组成。由于磁流体兼具流体特性及磁响应特性, 永磁铁提供的磁场能够

使密封间隙中注入的磁流体汇聚在极靴与导磁轴套之间的密封间隙, 并形成多个“O”形密封圈, 从而达到密封的目的。目前常见的极齿齿形主要为三角形齿、矩形齿、梯形齿, 如图 1(b) 所示。这 3 种齿形结构虽然在应用中取得了良好的效果, 但仍然存在密封间隙调整困难、密封压力有待进一步提升的问题。

1.2 新型极齿齿形结构的提出

本文提出了一种新型极齿齿形结构, 其示意图如图 2 所示。该结构由矩形齿极演变而来, 在旋转密封轴上设置了带锥度的导磁轴套。轴套与轴采用紧配合形成一个整体并一起旋转, 两者之间通过 O 形圈密封。极齿内表面带有与轴套外表面相同的斜度, 形成平行的密封间隙。该新型结构的优点包括: (1) 可以通过沿轴向移动轴套改变密封间隙, 便于在实际应用中调节密封间隙和密封能力; (2) 密封介质的压力由下至上, 倾斜的密封间隙将有利于磁流体在间隙中的固定, 并有利于提升密封能力。

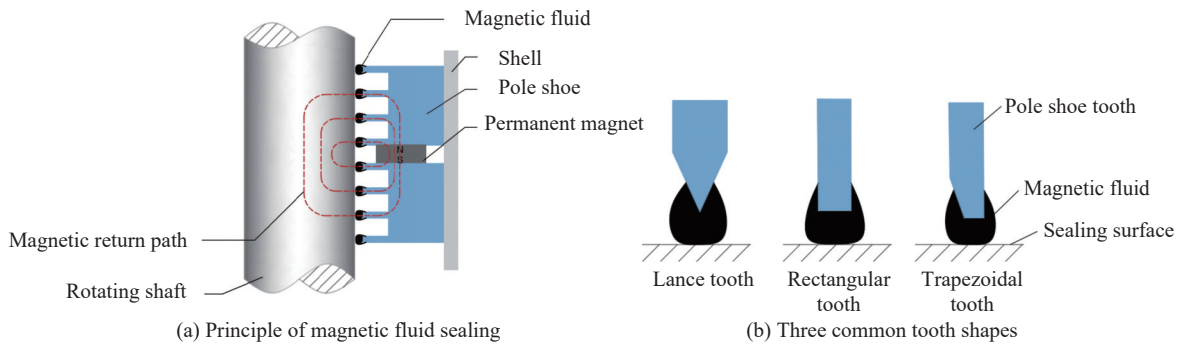


图 1 常见磁流体密封装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of common magnetic fluid sealing device structure

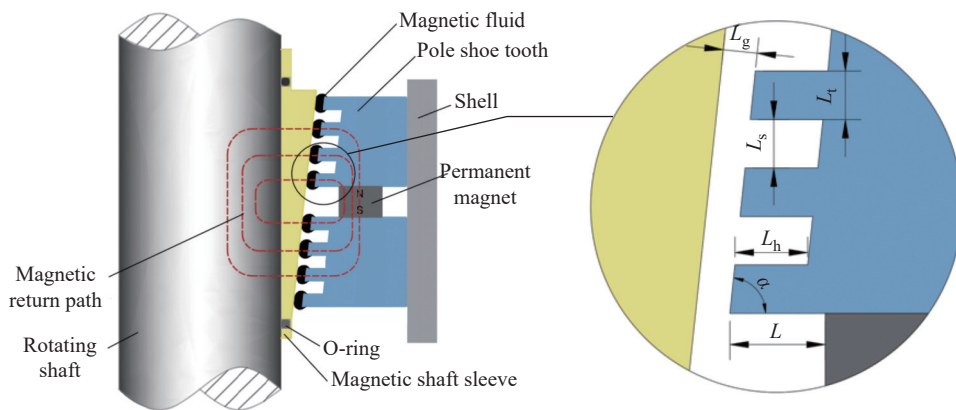


图 2 新型磁流体密封极齿齿形结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the new magnetic fluid seal pole tooth profile structure

1.3 磁流体密封理论

在外磁场作用下, 磁流体在转轴和极齿之间形成环状液膜。当一侧压力升高时, 磁流体受到挤压, 向低压侧变形; 当压力过大时, 液膜会破裂, 密封介

质产生泄漏, 密封失效, 失效前的最大压力称为临界压力, 临界压力值的大小反映了磁流体密封能力的大小。由伯努利方程可以得到磁流体液膜的最大耐压值。

在一般情况下,磁流体液膜遵守伯努利方程,可表示为:

$$p + \frac{1}{2}\rho_f v^2 + \rho_f g h - \mu_0 \int_0^H M dH = C \quad (1)$$

式中: p 为磁流体的复合压力, Pa; ρ_f 为磁流体密度, kg/m^3 ; v 为磁流体速度, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为磁流体参考高度, m ; μ_0 为真空磁导率; M 为磁流磁化强度, A/m ; H 为外磁场强度, A/m ; C 为常数。

由于磁流体的重力远小于磁场力,可以忽略不计,同时忽略磁流体的表面张力,则磁流体静密封的耐压可表示为:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \mu_0 \int_{H_2}^{H_1} M dH = \mu_0 M_s \sum_{i=1}^N (H_{\max}^i - H_{\min}^i) = M_s \sum_{i=1}^N (B_{\max}^i - B_{\min}^i) \quad (2)$$

式中: M_s 为磁流体的饱和磁化强度, A/m ; H_{\max}^i 和 H_{\min}^i 分别为密封结构中工作间隙内第 i 级极齿下磁场强度的最大值和最小值, A/m ; B_{\max}^i 和 B_{\min}^i 分别为密封结构中工作间隙内第 i 级极齿下磁通密度的最大值和最小值, T ; N 为总的密封级数。

2 有限元分析

针对新型磁流体密封结构,结合前述理论,采用有限元方法对该结构进行研究。根据实际应用需求,本文研究的磁流体密封元件结构参数如表 1 所示。

极齿结构主要参数为齿厚 L_t 、齿高 L_h 、齿槽宽 L_s 、倾斜角 α 、密封间隙 L_g 、永磁体到极齿距离 L 、总密封级数 N ,初始值如表 2 所示。

2.1 模型建立

Ansys Electronics Desktop 是一个综合性的电子设计自动化(EDA)平台,用于电磁场仿真、热分析、信号完整性分析等,其中 Maxwell 模块专用于低频电磁场仿真,在各个工程电磁领域都得到了广泛应用。

由于磁流体密封装置具有轴对称特性,本研究采用 Maxwell 2D 轴对称模型进行仿真以提高计算效率。在建模过程中,将旋转轴与导磁轴套视为一体以简化分析,同时依据表 2 的结构参数设置了 10 级密封结构,其中极齿斜面 and 旋转轴之间的密封间隙尺寸严格按设计值建模。考虑到静密封结构对主密封区磁场影响较小,在模型中对该部分作了适当简化。将区域 $ABCD$ 设为空气域, AB 、 BC 、 CD 设置为 Balloon 边界,以模拟无限远磁场衰减。永磁体充磁方向设为 $+X$ 方向,磁力线平行于轴。如图 3(a) 所

表 1 密封元件参数

Parameter	Inside diameter	Outside diameter	Width
Permanent magnet	132	172	7
Rotating axis	110	—	—
Shell	180	190	—

表 2 主要尺寸参数

L_t/mm	L_h/mm	L_s/mm	$\alpha/(\text{°})$	L_g/mm	L/mm	N
1	2.5	2.5	85	0.5	6	5

示,采用自适应三角形网格并重点对磁场梯度变化显著的极齿斜面与气隙区域进行局部加密,设置最大单元边长为 0.1 mm 以确保计算精度,同时对永磁体 NdFe35(矫顽力 $H_c=8.9 \times 10^5 \text{ A/m}$, 相对磁导率 $\mu_r=1.099 \text{ H/m}$) 和导磁极靴(10 钢)等关键部件采用较密网格以准确捕捉材料特性。通过 Validation Check 确保几何和参数设置正确,并进行了网格独立性验证,设置计算参数为最大迭代次数 30、误差小于 1%。同时,在密封间隙中间位置定义了一条平行于极齿斜面的轨线 MN ,用于分析密封间隙内磁场的分布特性,其具体位置如图 3(b) 所示。

为了验证该有限元方法的可靠性,根据文献 [19] 中所述新型变齿磁流体密封结构,即 4 个极齿中每相邻极齿的齿厚 L_t 按照一定比例递增,定义变齿厚系数 $\lambda = \frac{L_{t3}}{L_{t2}} = \frac{L_{t2}}{L_{t1}} = \frac{L_{t1}}{L_t}$,取 $\lambda=1$ 构造对应的模型,利用上述步骤进行有限元分析,可得到如图 4 所示轨线 MN 轴向距离 L_{MN} 上的磁感应强度曲线,与原文献中曲线进行对比,结果表明,两条曲线在整体趋势上高度吻合,仅在局部存在微小偏差。这种差异可能是由于本文采用的网格密度或边界层处理方式与原文献存在细微差别,导致局部磁场计算结果的微小波动,且原文献未明确给出软磁材料的精确磁化曲线,因而本文采用的参数可能导致局部磁感应强度的轻微偏移。这种偏差的幅值($<2\%$)远低于工程允许误差范围,验证了本文模型的适用性。

2.2 计算结果

图 5(a) 所示为通过有限元计算得出的磁场强度分布云图,图 5(b) 所示为计算出的磁力线分布图。结合二者可知,磁力线集中经过极齿部分,极齿与其他位置的磁场强度分布存在明显差异,在极齿与旋转轴之间的密封间隙处磁场强度最大,其余区域较小且分布较为均匀。磁流体具有磁场响应特性,磁

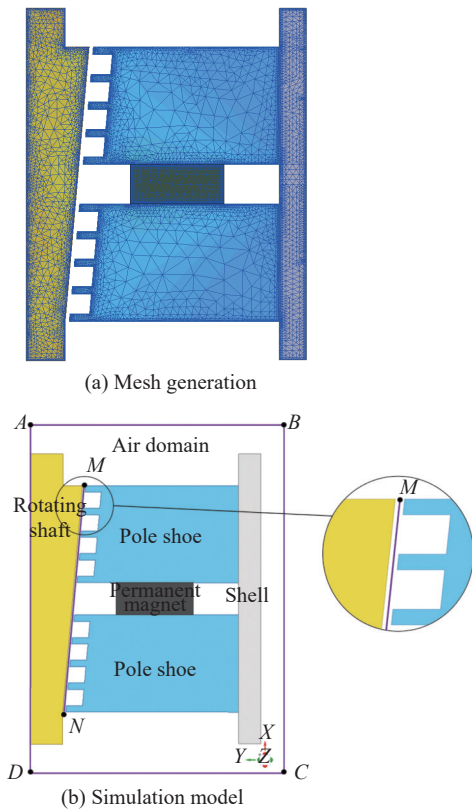


图 3 计算模型
Fig. 3 Calculation model

流体会聚集在密封间隙中磁场强度大的区域, 形成磁液密封圈起到密封作用。

图 6 所示为磁感应强度在 MN 轨线上的规律性波动, 每条曲线具有 10 个波峰及 9 个波谷, 其中最小的波谷对应永磁体在轨线 MN 上的投影位置, 为无效密封区域, 其余波峰对应极齿处磁感应强度, 波谷对应齿槽位置的磁感应强度为有效密封区域, 相邻波峰和波谷的振幅差即为该齿处的磁感应强度差。由此可知, 密封间隙内的磁感应强度在极齿处最大, 齿

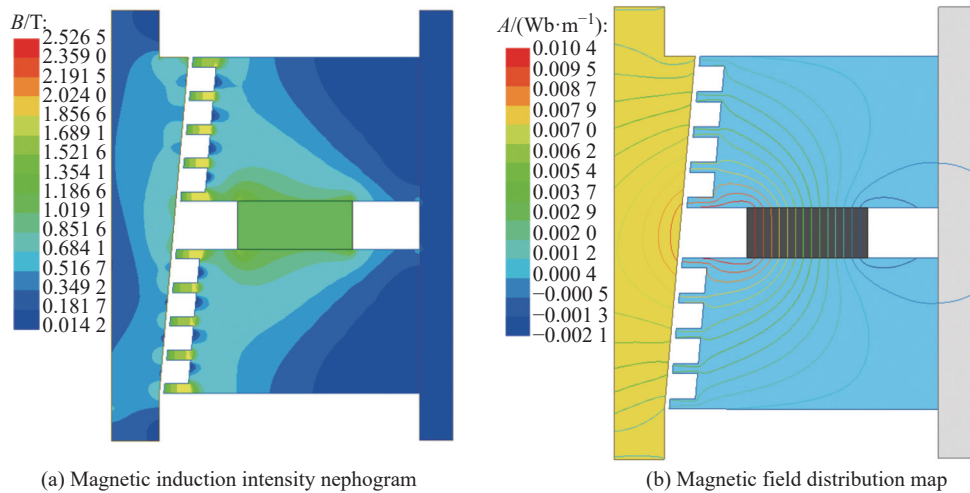


图 5 仿真结果示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation results

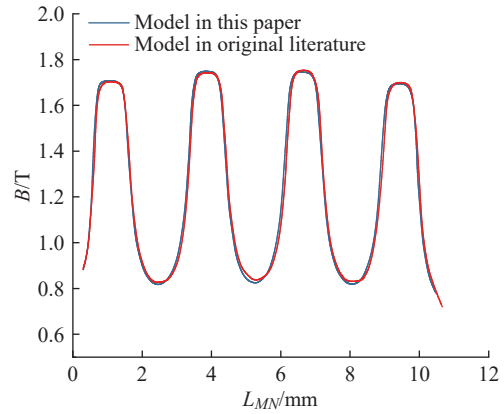


图 4 变齿磁流体密封装置有限元分析结果

Fig. 4 Finite element analysis results of variable tooth magnetic fluid sealing device

槽处有明显下降但不为零, 能够产生磁感应强度差, 符合式(2), 因此能够产生较好的密封效果。

本文构建的新型极齿齿形与传统矩形齿磁流体密封装置的主要区别在于极齿具有一定的倾斜角度, 因此研究倾斜角度对密封性能的影响十分必要。作者分别对 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的极齿倾斜角度 α 进行研究, 当倾斜角度为 90° 时即为矩形齿磁流体密封。

以轨线 MN 方向的磁感应强度曲线最低谷处作为相对位置起点, 将各倾斜角度对应的磁感应强度曲线对齐后可得到如图 7(a) 所示的不同倾斜角度下轨线 MN 上的磁感应强度分布图。

将各倾斜角度的磁感应强度曲线振幅取均值, 作为该角度磁感应强度差, 可得到如图 7(b) 所示不同倾斜角度下轨线 MN 上磁感应强度差 (ΔB) 的曲线。由图 7(b) 可知, 当倾斜角度为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时, 随着极齿倾斜角度逐渐增大, 磁感应强度差逐渐减小, 即密封效果逐渐降低, 且在倾斜角度为 $85^\circ \sim 90^\circ$ 处有明显下降。由于倾斜角度越大, 轴套与极齿之间的相

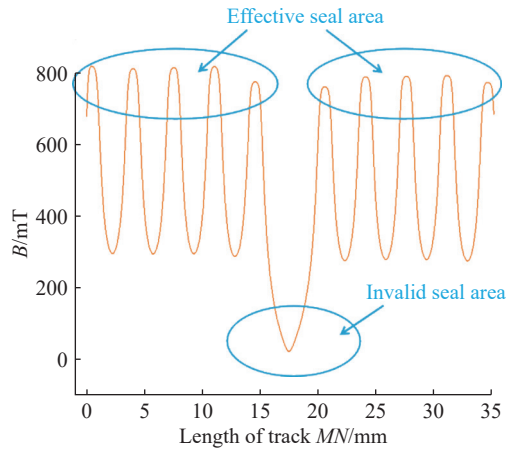
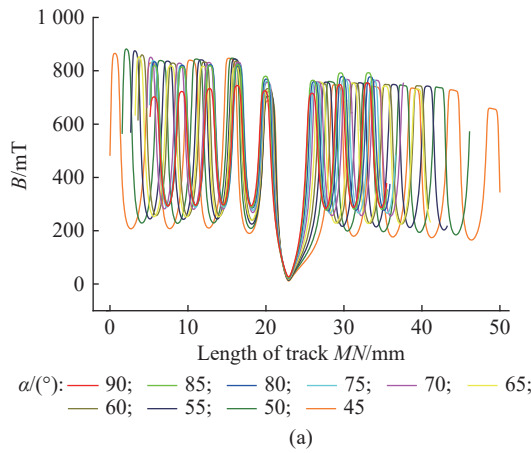


图 6 沿轨线 MN 磁感应强度波形图

Fig. 6 Waveform of magnetic induction intensity along the track MN



$\alpha(^{\circ})$: — 90; — 85; — 80; — 75; — 70; — 65;
— 60; — 55; — 50; — 45

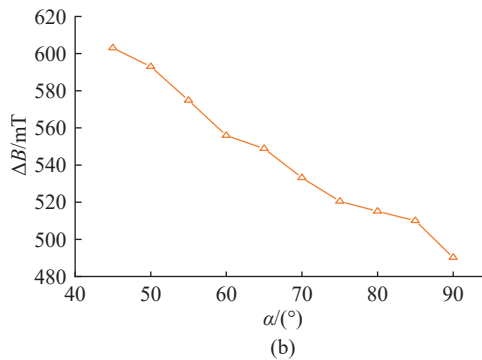


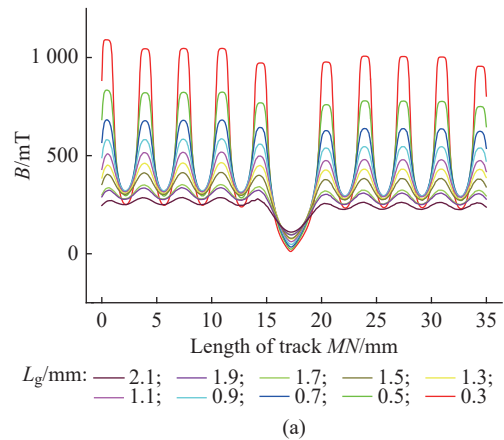
图 7 不同倾斜角度下磁感应强度变化情况

Fig. 7 Changes of magnetic induction intensity at different tilt angles

对接触面积越大,磁感应强度差也越大,因此,具有一定倾斜角度的极齿比矩形极齿密封效果更好。同时由图 7(a)可见,当倾斜角度较小时,有效密封区域较大,有利于提高密封效果。

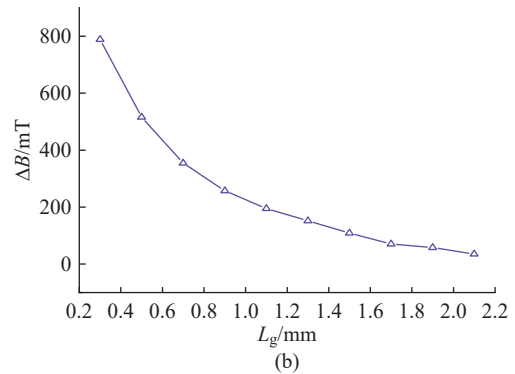
图 8 所示为不同密封间隙下轨线 MN 上磁感应强度的变化情况,随着密封间隙 L_g 的增大,磁感应强度差 ΔB 显著下降。然而在实际应用时,过小的密封间隙意味着加工精度及对安装技术的要求提高,同

时摩擦发热也会增加,因此在设计磁流体密封产品时不能一味追求过小的密封间隙,应考虑实际情况从而合理选取密封间隙参数。



L_g/mm : — 2.1; — 1.9; — 1.7; — 1.5; — 1.3;
— 1.1; — 0.9; — 0.7; — 0.5; — 0.3

(a)



(b)

图 8 不同密封间隙下磁感应强度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of magnetic induction intensity at different sealing clearances

图 9 所示为不同齿厚 L_t 下轨线 MN 上磁感应强度的变化情况,其中图 9(a)中将轨线 MN 方向的磁感应强度曲线最低谷处作为相对位置起点,使各齿厚对应的磁感应强度曲线对齐。由图 9 可知,随着极齿厚度 L_t 增大,有效密封区域增大,无效密封区域始终不变,密封区域内的磁感应强度谷值和峰值呈周期性变化且周期数和齿数相同,磁感应强度差 ΔB 不断减小,密封效果逐渐减弱。

图 10 所示为不同齿槽宽度 L_s 下轨线 MN 上磁感应强度变化情况,图 10(a)仍以沿轨线 MN 方向的磁感应强度曲线最低谷处作为相对位置起点进行对齐修正。由图 10 可知,随着齿槽宽度 L_s 增大,有效密封区域增大,磁感应强度差 ΔB 逐渐增大,密封效果逐渐增强。

图 11 所示为不同永磁体到极齿距离 L 下轨线 MN 上磁感应强度 B 的变化曲线。可见 4 条曲线几乎完全重合,因此永磁体位置对密封效果的影响较小。但在实际应用中,还应考虑永磁体的经济效益及是否便于加工等因素。

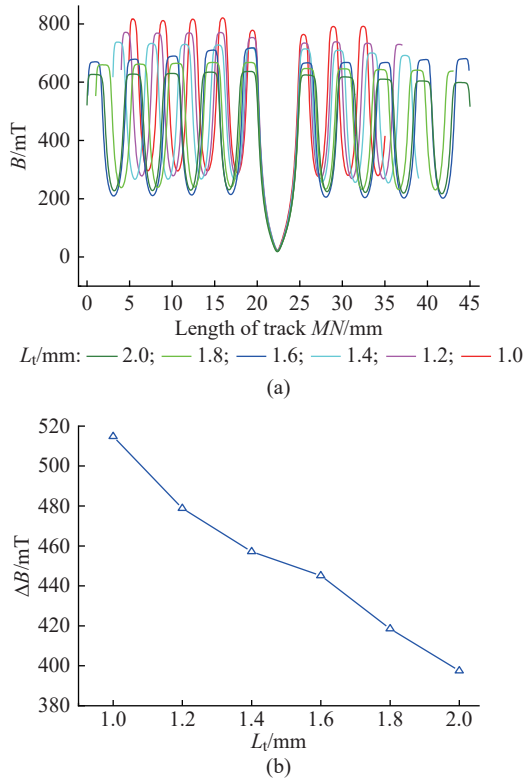


图 9 不同齿厚下磁感应强度变化情况

Fig. 9 Changes in magnetic induction intensity at different tooth thicknesses

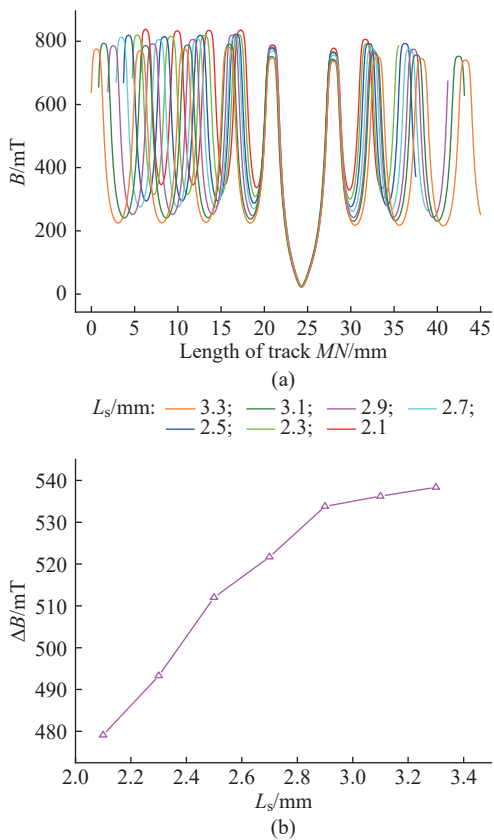


图 10 不同齿槽宽度下磁感应强度曲线

Fig. 10 Magnetic induction intensity curve at different tooth slot widths

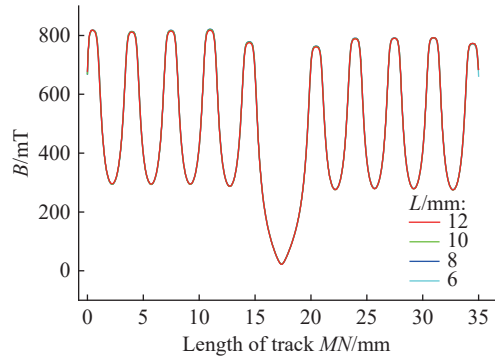


图 11 不同永磁体位置下磁感应强度变化曲线

Fig. 11 Variation curve of magnetic induction intensity at different positions of permanent magnets

为避免各参数样本量差异干扰, 采用单变量线性回归与效应量标准化的方法考察各参数对磁感应强度差 ΔB 的影响效果, 并以标准化系数 (β') 和效应量 (Cohen's f^2) 量化影响大小, 确保不同参数间的可比性, 得到如表 3 所示结果。

表 3 单变量线性回归结果

Table 3 Results of univariate linear regression

Parameter	β'	R^2	Cohen's f^2	p
L_g	-0.98	0.960	24.00	<0.001
L_t	-0.99	0.980	49.00	0.008
L_s	0.94	0.880	7.33	0.042
α	-0.82	0.670	2.03	0.012

上述结果表明, 各参数对 ΔB 的影响程度由高到低依次为齿厚、密封间隙、齿槽宽、倾斜角度, 其中密封间隙与齿厚呈现显著负向影响, 齿槽宽具有正向调节作用。因此在实际工程中应优先优化密封间隙和齿厚, 其次调整齿槽宽大小, 以达到最佳密封效果。

3 结 论

(1) 基于磁流体密封原理, 设计新型极齿齿形结构, 即在旋转密封轴处设带有锥度的导磁轴套, 极齿内表面倾斜角度相同, 与轴套外表面形成平行密封间隙, 该结构可通过轴向移动轴套调节间隙。此外, 倾斜间隙有利于磁流体固定以提升密封能力。将装置简化为二维模型, 用 Ansys Maxwell 2D 模块分析密封性能, 通过文献比对验证有限元计算的可信性, 进而研究结构参数对密封性能的影响规律。

(2) 有限元分析结果表明, 新型极齿结构可有效提升密封性能。当倾斜角度为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时, 角度增大使密封间隙磁感应强度差减小、密封效果减弱, 但斜

齿极靴比传统矩形极靴密封性能显著提升;密封间隙增大,密封效果明显下降;极齿厚度增大,密封效果减弱;齿槽宽度增大,密封效果增强;永磁体位置对磁感应强度差影响小。回归分析表明,实际工程中应优先优化密封间隙和齿厚,其次调整齿槽宽以达到最佳密封效果。

参考文献:

- [1] LUTEST M Q, STAROVOITOV V A. Experimental studies of high-speed cryogenic magnetic fluid seal[J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1980, 16(2): 343-346.
- [2] KIMIO S. Magnetic fluid sealing device: US4605233[P]. 1986-08-12.
- [3] 霍丽萍,安琦,蔡仁良.磁极结构对磁流体密封性能的影响[J].*化工机械*,1999,26(3):14-16,63.
- [4] 刘同冈,刘玉斌,杨志伊.磁流体用于旋转轴液体密封的研究[J].*润滑与密封*,2001,26(1):29-31.
- [5] 李松晶,王广怀.新型磁流体密封圈的特性分析[J].*哈尔滨工业大学学报*,2001,26(5):685-688.
- [6] 李保锋,刘颖,余智勇.磁性流体密封的新思路——变磁极齿宽结构[J].*润滑与密封*,2004,29(6):104-112.
- [7] 王栋梁,赵修臣,刘颖,等.两种新型磁流体密封水结构的试验研究[J].*润滑与密封*,2006,31(8):87-90.
- [8] 左英杰,姚新港,刘同冈,等.磁流体离心密封结构的改进设计[J].*润滑与密封*,2011,36(5):86-88.
- [9] 张禹,李双喜,蔡纪宁,等.柔性极靴磁流体密封性能数值研究[J].*润滑与密封*,2016,41(7):59-64.
- [10] 杨小龙,郝付祥,宾仕博,等.一种磁源交错式套筒型磁流体密封装置:CN201811068685.8[P].2018-09-24.
- [11] 王虎军,张永昌,何新智.气体隔离式磁流体液体旋转密封的耐压能力研究[J].*真空科学与技术学报*,2020,40(6):519-523.
- [12] 杨峻涛.磁体内嵌型磁流体密封装置磁力特性数值研究[J].*中国测试*,2023,49(7):162-169.
- [13] 刘嘉伟,李德才.一种磁流体密封:CN202310363980.0[P].2023-04-07.
- [14] 王俊勇,蒋生发.用有限元方法合理设计磁流体密封结构[J].*润滑与密封*,1999,24(5):15-17.
- [15] 赵国伟,池长青,王之珊,等.磁流体密封结构参数对密封能力的影响[J].*航空动力学报*,2000,15(3):255-259.
- [16] 王瑞金,楼允洪,朱鸣.密封间隙对磁流体耐压能力的影响[J].*真空*,2001,38(2):42-44.
- [17] 杨逢瑜,齐学义,李桂花,等.磁流体密封压力与结构参数的确定[J].*甘肃科学学报*,2002,14(3):1-6.
- [18] 陈方誉.搅拌反应器旋转轴磁流体密封性能研究[D].西安:西安石油大学,2010.
- [19] 吴朝军,朱维兵,颜招强,等.新型变齿磁流体密封结构设计及性能研究[J].*润滑与密封*,2022,47(1):120-126.
- [20] 龚佳成.梯形极齿磁流体密封可视化研究及优化设计[D].成都:西华大学,2023.

Structure and Finite Element Analysis of a New Type of Magnetic Fluid Seal Pole Tooth Profile

WANG Meiqiao, GAO Lei, GUO Changle, AN Qi

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: This paper proposes a new type of magnetic fluid seal pole tooth profile structure. By moving the shaft sleeve along the axial direction, the sealing gap can be adjusted, which facilitates the regulation of both the sealing gap and sealing ability in practical applications. The pressure resistance formula for magnetic fluid seals was derived, and finite element analysis was performed using Ansys Electronics Desktop software. The results show that the proposed new pole tooth structure can effectively enhance the performance of magnetic fluid seals. Specific examples were used to investigate the influences of various structural parameters on sealing performance, and relevant curves reflecting the influence laws were obtained, followed by explanation and analysis. The research results indicate that within a certain range, the smaller the tilt angle, the smaller the sealing gap, the narrower the tooth thickness, and the wider the tooth slot width, the stronger the sealing ability. The position and tooth height of the permanent magnet have no significant impact on the sealing effect. Through regression analysis, it is concluded that in practical engineering design, priority should be given to optimizing the sealing gap and tooth thickness to achieve the optimal sealing effect.

Key words: magnetic fluid seal; new type of polar tooth profile; sealing performance; finite element analysis; voltage theory

(责任编辑:张欣)