

永磁驱动液态金属磁-电-流-热耦合特性

雷贤良, 郭汶沧, 李智宁

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对可靠、低成本的液态金属驱动方法仍十分缺乏的现状,利用旋转永磁本身磁场与导电液体中产生的错位感应磁场间的洛伦兹力来驱动液态金属,提出了磁-电-流-热的多物理场耦合计算的有限元仿真方法,构建了U型通道耦合分析模型,研究了气隙间距、磁体数量、剩余磁通密度、磁盘转速等参数对U型液态金属流道内磁场、感应电流、流动与传热的影响规律。仿真结果表明:气隙间距由6 mm增加至14 mm时,轴向扭矩显著衰减7.5倍;永磁体数量由4块增长2倍时,扭矩由波动达到稳定,由于周向单磁体作用于液态金属时间减小,感应电流峰值降低2.5倍,平均轴向扭矩降低5.2倍;高剩余磁通密度条件下输出扭矩非线性增加,2.0 T时产生的扭矩是1.0 T时的4.67倍;当磁盘转速由200 r/min增加至800 r/min时,产生的扭矩可提升2.52倍。该研究结果可为开发高效、稳定的永磁驱动装置提供参考。

关键词: 永磁驱动;液态金属;多物理场;洛伦兹力

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503007 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0067-10

Magneto-Electric-Liquid-Thermal Coupling Characteristics of Permanent Magnet-Driven Liquid Metal

LEI Xianliang, GUO Wencang, LI Zhining

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In response to the current scarcity of reliable and cost-effective liquid metal driving methods, a finite element simulation method for the multi-physics field coupling calculation of magneto-electric-liquid-thermal coupling is proposed. The approach leverages the Lorentz force between the magnetic field of the rotating permanent magnet and the induced magnetic field in the conductive fluid to propel the liquid metal. A coupled analysis model of the U-shaped channel is constructed to investigate the effects of parameters, such as gap distance, number of magnets, residual magnetic flux density, and disk rotation speed, on the magnetic field, induced currents, flow, and heat transfer within the U-shaped liquid metal channel. Simulation results show that when the gap distance increases from 6 mm to 14 mm, the axial torque significantly decreases by 7.5 times; with a doubling of the number of permanent magnets from 4 to 8, the torque stabilizes after fluctuation, and due to the reduced time of action of the circumferential single magnet on the

liquid metal, the peak induced current decreases by 2.5 times and the average axial torque decreases by 5.2 times; under high residual magnetic flux density conditions, the output torque nonlinearly increases, with the torque generated at 2.0 T being 4.67 times that at 1.0 T; when the disk rotation speed increases from 200 r/min to 800 r/min, the generated torque can be increased by 2.52 times. These research findings can provide reference for the development of efficient and stable permanent magnet-driven devices.

Keywords: permanent magnet drive; liquid metal; multiphysics fields; Lorentz force

液态金属是一种优良介质,具有良好的润滑性、导热性、导电性、可变形性、流动性、生物相容性等^[1],热输运能力远高于水、空气及许多非金属介质,将液态金属作为流体散热介质^[2-3],换热系数远高于现有液冷技术,将打破传统冷却技术的性能极限,有望在国防、航空航天^[4-5]、能源系统及民用电子设备等领域的冷却^[6]与热管理系统^[7]中发挥重要作用。第四代核电技术中,钠冷快堆和铅冷快堆分别使用液态金属钠或钠钾合金、液态金属铅或铅铋合金做冷却剂^[8]。高性能计算机的芯片也采用液态金属进行热量交换;流体机械的传动工质常采用液态金属作为润滑剂^[9-12],常见的液态金属有汞、镓^[13]、铷等。

早期斯拉达提出电磁驱动技术^[14],并逐步在核能和空间技术发展方面强化了磁耦合驱动技术。目前电磁驱动装置主要是通过正交的电场和磁场交替变换形成的洛伦兹力来驱动,例如永磁电机、电磁耦合器、磁制动器^[15-17]。按液态金属中电流产生的方式,可以将磁耦合驱动装置分为传导式电磁泵和感应式电磁泵^[18]。其中,传导式电磁泵由磁极、电极和泵沟组成。液态金属中直接使用电极通入电流,在外加恒定磁场 B_0 的作用下,带电流体内部产生洛伦兹力 F_l ,液态金属沿洛伦兹力作用方向流动。学者们多关注于此类泵的设计与优化^[19-22],由于传导式电磁泵供电需采用电极直接接触流体或管壁,因此长期运行条件下面临着电极腐蚀、发热量大的问题。

永磁驱动较为特殊,其驱动的原理示意如图1所示,与线圈感应式电磁驱动原理不同的是线圈感应式电磁泵采用励磁线圈产生行波磁场,而永磁驱动则采用旋转的永磁盘产生行波磁场。永磁驱动结构简单、部件易于更换、成本较低,是一种理想的液态金属驱动装置。如图1所示,按磁转盘的位置、结构的差别可分为碟形永磁泵和鼓形永磁泵。然而,目前关于此类驱动装置的研究却较为少见。

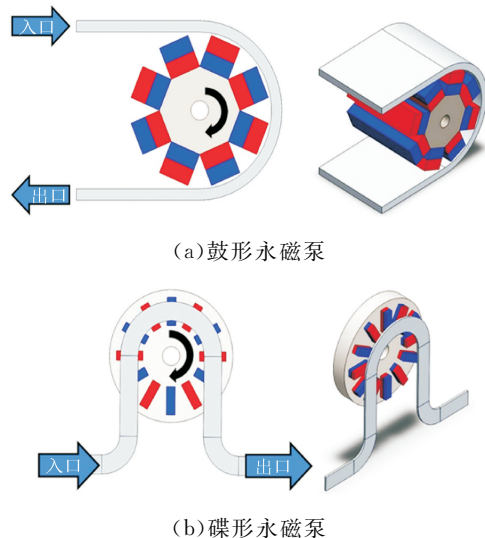


图1 鼓式永磁泵和碟式永磁泵驱动原理示意

Fig.1 Drum-style permanent magnet pump and disc-style permanent magnet pump drive schematics

部分学者曾针对磁力耦合方向开展了系列研究,主要针对永磁电机、永磁耦合器^[23]、磁制动器、电磁泵等方向。罗志伟等研究了不同流道阀体形状的直流传导平面式电磁泵^[24]。Hvasta等设计并搭建了磁泵实验装置,测试了泵性能^[19]。通过调整磁体材料种类、磁体数量和磁体排布间距,比较了不同条件下泵前后压差的变化,并提出了简单计算方法和修正因子来计算压差。

在流动与传热方面,液态金属作为各种能量系统中的传热工质。Qin等总结了液态金属在热管理中的研究进展^[7]。王彦利等研究了静态磁场作用下气-液金属两相流体的流动,发现洛伦兹力会阻碍液态金属的流动,降低气体对金属液滴的携带能力^[25]。雷天扬等通过实验测定了强磁场下镓铜锡合金的换热特性,发现在 $B_0 = 1.7$ T 的静态磁场的影响下,液态金属的流动受到较强的反向洛伦兹力,流量与磁场强度成线性关系^[26]。描述对流换热特征的 Nu 数随着表征电磁力和黏滞力之比的 Ha 数的增大而呈幂指数规律减小。

目前,针对液态金属在磁场下的流动特性研究主要是基于传导式电磁泵和线圈式感应电磁泵,或者关注永磁耦合器的磁力耦合作用,而对永磁驱动的研究相对较少。因此,本文着力构建适用于永磁驱动液态金属的磁-电-流-热多物理场方法,研究永磁体-流体耦合作用下液态金属电磁、流动与传热性能。采用 COMSOL Multiphysics 多物理场模拟仿真软件开展分析研究,探究气隙间距、剩余磁通密度、磁体数量、磁转盘转速等变量对磁场、电场、流场与温度场的影响规律,为开发高效、稳定的永磁驱动装置提供参考。

1 物理与数学模型

1.1 物理模型

参考 Hvasta 的实验^[19]设计结构,建立图 2 所示的仿真计算模型,其中 U 型液态钠流动和磁体等几何参数如表 1 所示。

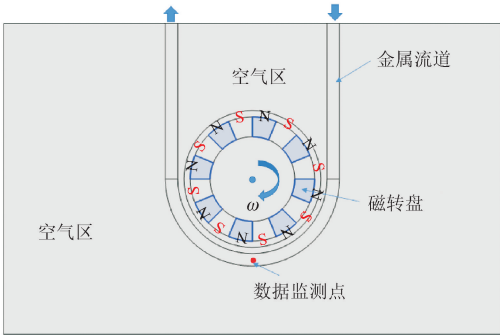


图 2 碟形永磁泵计算模型

Fig. 2 Computational model of disc-style permanent magnet pump

表 1 物理模型的几何参数

参数	数值
空间宽度/mm	400
空间高度/mm	250
流道宽度/mm	10
环形永磁盘外径/mm	50
环形永磁盘内径/mm	34
气隙宽度/mm	6~14
转盘圆心与流道壁面的距离/mm	70

选取液态金属钠作为研究介质,钠流道成 U 形,弧形内侧布置一个碟形的永磁转盘,如图 2 所示,磁转盘由连续多块永磁体组成,相邻磁体的极化方向相反,红色磁体的磁化方向为从圆心沿半径方向向外,蓝色磁体的磁化方向向内。

考虑到整个模型均受磁场影响,设定物理场“旋转机械、磁”的影响区域为所有域。空气区和液态金属流动区内电磁场由安培定律定义,即磁化模型为相对磁导率,传导模型为电导率,相对磁导率和电导率均来自材料。永磁转盘区同样由安培定律定义,磁化模型采用“剩余磁通密度”模型,对于 NdFeB 磁体,取剩余磁通密度 $B_r=1.42\text{ T}$,磁化方向为半弧形的半径方向。磁体、空气和金属钠的材料物性参数如表 2 所示。整个模型的外边界设置磁绝缘,耦合一致边界处亦设定为磁绝缘。

表 2 材料的物性参数

Table 2 Physical property parameters of materials		
参数	材料	数值或测量式
电导率/ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	N50	7.14×10^5
	空气	0
	钠	1×10^7
相对介 电常数	N50	1
	空气	1
	钠	1
相对 磁导率	N50	1
	空气	1
	钠	1
动力黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	N50	
	空气	1.81×10^{-5}
	钠	$\exp(46.44-19.959\ln T+2.457\ln T^2-0.10\ln T^3)$
密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	N50	7450
	空气	1.225
	钠	$998.83-0.17T-7.34\times10^{-5}T^2+4.13\times10^{-8}T^3-1.15\times10^{-11}T^4$
导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	N50	8~10
	空气	0.025
	钠	$111.57-0.07T+2.37\times10^{-5}T^2-8.56\times10^{-9}T^3+2.02\times10^{-12}T^4-2.16\times10^{-16}T^5$
恒压热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	N50	3.5~6.0
	空气	1 006
	钠	$1\,612.89-0.77T+4.21\times10^{-4}T^2$

金属流道区的流体动力学场采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,作用区域为中间的 U 型液态钠流道。流体属性设置为不可压缩流动,管壁采用无滑移边界条件。考虑到磁转盘逆时针旋转,带动液态钠从右向左流动,故左侧设置为压力入口,设置为 0 Pa,右侧设置为流速入口,根据驱动力的大小进行调整,并添加抑制回流等控制条件,避免出现回流。

为实现磁体转盘的匀速转动,在 U 型流道中产生演变的行波磁场,结合动网格技术对转盘和其周边的空气区进行约束,如图 2 所示,对永磁转盘及其周边空气区设定恒定的角速度 ω ,旋转方向为逆时针,旋转轴基点为圆形空气区圆心。

1.2 数学模型

1.2.1 电磁学方程

对于永磁转盘驱动导电液态金属流体流动的问题,首先分析并求解永磁转盘因旋转而产生的电磁场。根据电磁学基本理论,对永磁转盘中电磁场的分析应用安培定律、磁通量守恒及其相应的本构关系。

安培定律表达式如下

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{A}}{dt} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁通密度; $\mathbf{A}$ 为磁矢势; $\mathbf{E}$ 为电场强度; σ 为电导率。

磁通量守恒式为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

本构关系为

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; $\mathbf{B}_r$ 为剩余磁通密度。

1.2.2 流体动力学方程

根据流体动力学理论,求解连续性方程、动量方程、能量方程、湍流方程。其中动量方程中应加入外力源项、耦合电磁感应中洛伦兹力的变化;在能量方程中耦合热源项,考虑电磁感应过程中生成的热源。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla p = \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为洛伦兹力; ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为流速; μ 为流体动力黏度; p 为压力。

能量方程为

$$\nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \mathbf{u} + S \quad (9)$$

式中: h 为总比焓; S 为电磁感应生成热形成的源项; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量; λ 为导热系数。

Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b - C_1 \rho S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + S_\epsilon \quad (11)$$

式中: k 为湍流动能; ϵ 为耗散率; u_i 为速度分量; μ_{eff} 为有效动力黏度; G_k 为由于平均速度梯度产生的湍流动能生成项; G_b 为浮力引起的湍流动能生成项; ν 为运动黏度; α_k 和 α_ϵ 为湍流普朗特数,分别对应 k 和 ϵ ; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的贡献; C_1 、 $C_{1\epsilon}$ 、 C_2 、 $C_{3\epsilon}$ 为常数; S_k 和 S_ϵ 为自定义的源项。

U 型流道结构存在明显旋转, Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在旋转、强逆压梯度下的边界层、分离流中具有更优越的湍流捕捉性能。

1.3 网格划分与模型验证

对计算模型进行了细致的网格划分,如图 3 所示,其中空气区仅考虑磁通变化,采用较粗的三角形网格即可,而 U 型液态金属流道内金属流动对网格要求高,采用指数渐变的四边形网格,在流动边界进行了加密处理,用于更好地捕捉边界层内大的速度和温度梯度变化。磁转盘中磁通曲线沿径向方向扩展,为了方便基本电磁学方程的求解,该区域采用四边形网格划分。

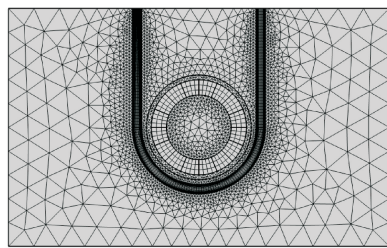


图 3 模型整体网格划分

Fig. 3 Overall grid division of the model

分别采用 3 种不同类型的网格对仿真模型进行网格划分,并比较了网格独立性验证。由于普通物理学求解对网格的依赖度较弱,因此流道外区域网格对求解的影响非常小,可忽略不计,且磁场的分布有数据作为参考,故仅对 U 型流道部分网格采用了不同粗细的网格划分。结果表明,在网格单元总数为 162 000 时,磁通密度、电流密度、压差相较于更高网格单元数(如总网格单元数为 240 100)计算结

果的相对误差都很小,小于 3%。因此,后续研究采用 162 000 网格数进行计算。

由于实验数据与相关驱动液态金属研究缺乏,为校验本研究中所使用计算模型的准确性,选取文献[23]中磁耦合器的仿真结果对本研究中的计算方法进行了校验,如图 4 所示,由图 4 可见,在不同磁通密度下的扭矩与文献[23]中的扭矩吻合良好,表明该模型具有较好的准确性,可深入开展后续研究。

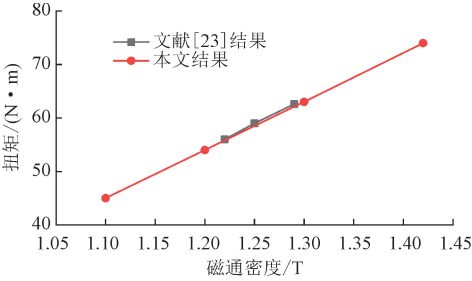


图 4 碟形永磁泵模型验证结果

Fig. 4 Modelling validation of disc-style permanent magnet pump

2 数值计算结果与分析

2.1 液态金属流道内的多物理场参数分布

图 5 给出了当剩余磁通密度为 1.4 T、磁体数为 16、转速为 800 r/min、气隙间距为 10 mm 时,磁通密度、电流密度、流速与温度在磁转盘与流道截面的分布云图。

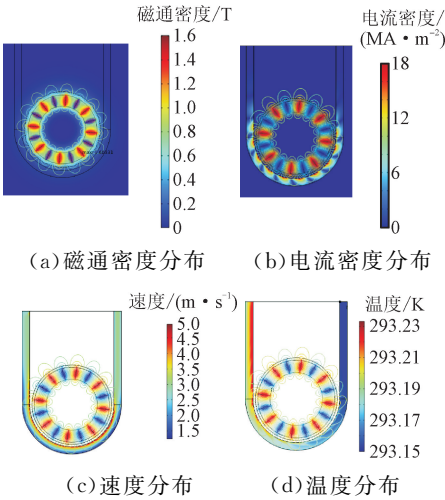


图 5 磁-电-流-热多物理场耦合计算结果

Fig. 5 Magneto-electric-thermal-flow multiphysics coupling results

由图 5(a)可知,磁通密度在周向方向分布较为均匀,磁转盘旋转过程中,在液态金属流道中产生感应

涡流,感应涡流又产生一个与源磁场相互作用的反向磁场,变化的磁场产生电流,形成一个偏转的电流分布场,如图 5(b)所示。在电场与磁场共同作用下产生洛伦兹力,流道内产生压力梯度,驱动液态金属沿旋转方向流动,如图 5(c)所示。受洛伦兹力影响,弧形流道的速度分布极不均匀,弧形内侧速度远高于外侧速度分布。同时,由于电磁感应作用时会产生一定的能量损耗并转变为热量,因此由于体积损耗密度较高,弧形流道内侧下游区域温度偏高,如图 5(d)所示。

图 6 给出了监测点(弧形流道中心点位置)磁通密度 B 和电流密度 I_z 随时间的变化。由图 6 可以看出,磁通密度与电流密度呈周期性变化,其中磁通密度类似于正弦变化,磁通密度与电流密度有一定的相位差,这是由于磁转盘由 16 个磁体组成,相邻磁体间磁化方向相反,故磁盘每旋转一圈,磁场变化 16 个周期。磁盘转速为 800 r/min,磁场周期则为 4.68 ms,电流密度的周期由磁通量的变化决定,为 4.68 ms,但两者相错的位差为 1 ms。永磁铁的磁场与流动通道内产生的感应磁场相互错位形成一定的扭矩,磁通密度正弦变化的峰值达到 0.145 T,而电流密度的峰值为 19.5 MA/m²。

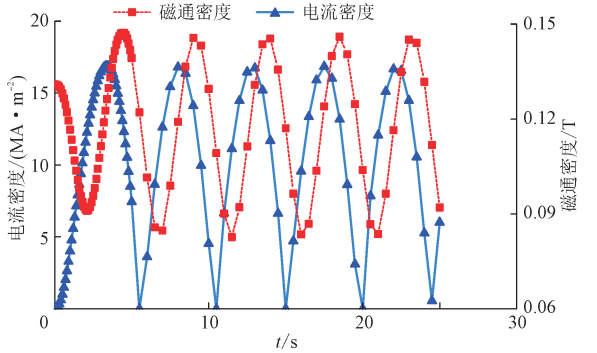


图 6 监测位置处磁通密度和电流密度随时间的变化

Fig. 6 Variation of magnetic flux density and current density with time at the monitoring location

图 7 给出了金属流道中心点位置处温度与速度随时间的变化。由图 7 可以看出,流道内速度由初始的低速增加较快,经历一个明显峰值后逐步降低达到平衡状态,这是由于启动过程中新磁场的不稳定性所致。当转盘启动稳定后(约 40 ms),速度与温度达到平衡。在磁力驱动力下,速度达到了 0.45 m/s,而相应的温度则以一定幅值上升,但仅为 0.07 K。这是因为电磁感应中的体积损耗密度约为 10⁶~10⁷ 数量级,折算成热源仅为 10¹~10² 数量级,该热量传递给液态金属带来的温升基本可忽略,因此后续能量损耗分析中仅探讨体积损耗密度的变化规律。

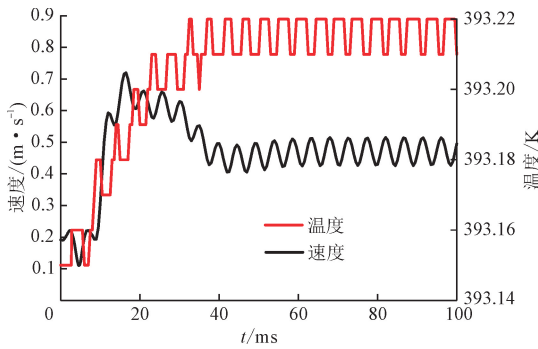


图 7 通道中心点处速度和温度随时间的变化
Fig. 7 Velocity and temperature changes with time at the monitoring location

2.2 空气间隙对流动特性的影响

磁通密度随气隙间距增加快速衰减,如图 8 所示,当磁铁尺寸为 20 mm×20 mm 时,随着气隙间距增大,磁通密度减小,产生的感应电流及其驱动扭矩减弱,呈非线性变化。

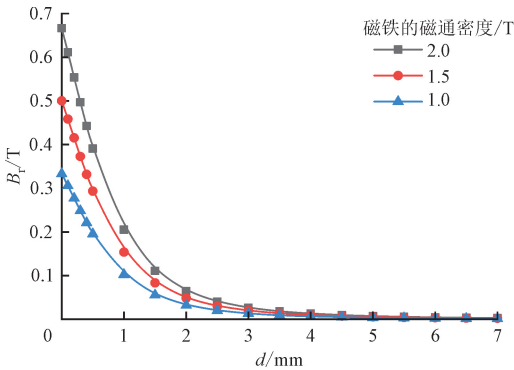


图 8 磁铁尺寸保持不变时剩余磁通密度随气隙间距的变化
Fig. 8 Variation of residual flux density with air gaps when magnet size held constant

图 9 给出了气隙间距 d 分别为 6、10、14 mm 时中心点磁通密度 B_y 和电流密度 I_z 随时间的变化。图 10 为该工况下监测点位置轴向扭矩随时间的变化曲线。

由图 9 可见,当气隙间距增加时,磁通密度和电流密度的周期和相位不变,但强度减小。当气隙间距为 6 mm 时,电流密度为 16.8 MA/m²,磁通密度为 0.14 T;而当间距为 14 mm 时,电流密度降低至 5.3 MA/m²,磁通密度降低至 0.03 T。显然,间距的等值变化,其对应的磁场强度与感应电流的强度呈非等值变化,非线性特征显著。从图 10 中轴向扭矩的变化可以看出,当气隙间距从 6 mm 变化至 14 mm 时,扭矩从 172.8 N·m 变化至 23 N·m,轴向扭矩显著衰减

7.5 倍,表明气隙间距会极大地影响液态金属的驱动力大小。

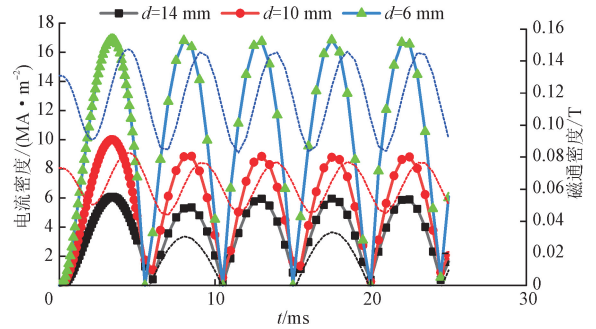


图 9 不同气隙间距时电流密度与磁通密度随时间的变化
Fig. 9 Changes in current density and magnetic flux with time at different air gaps

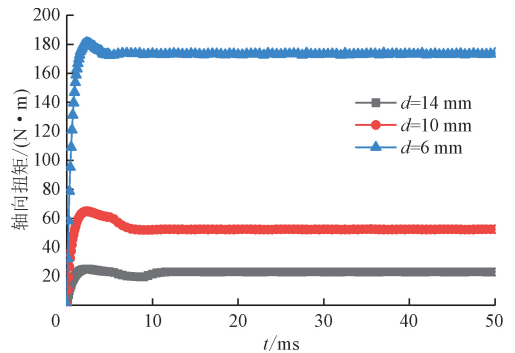


图 10 不同气隙间距时轴向扭矩随时间的变化
Fig. 10 Variation of axial torque with time at different air gaps

2.3 磁体数对流动特性的影响

保持结构参数和边界条件不变,剩余磁通密度为 1.42 T,转速为 800 r/min,气隙间距为 10 mm,改变磁体数 n ,分析永磁体数对液态金属流动与换热特性的影响。磁体数改变的方法是调整扇形磁铁对应的圆心角 θ 来形成不同构型的磁转盘,如图 5 和图 11 所示。磁转盘相邻磁体仍采用相反的磁化方向,分别设置磁体数为 4、8、16 时进行了仿真计算,得到不同磁体数下液态金属内电磁、流动与传热特性,其中图 11 中给出了磁体数为 4 和 8 时的结果,图 5 则对应磁体数为 16 时的结果。

从图 11 可以看出,当磁体数为 4 时,磁矢量曲线的分布较宽且分散,感应电流的区域较宽;而当磁体数为 8 时,磁矢量曲线则相对密集,感应电流区的数量增多,但强度降低,进一步增加磁体数为 16 时,磁矢量等值线扩展区域变小,感应电流变小。

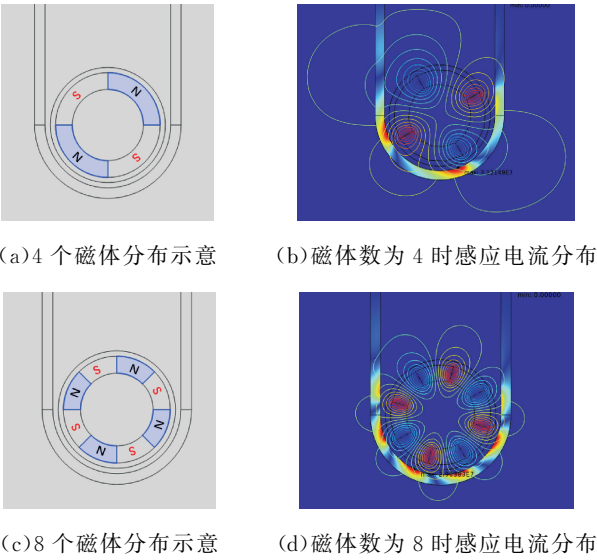


图 11 不同磁体数时感应电流分布

Fig. 11 Distribution of induced current at different numbers of magnets

图 12 给出了不同磁体数下感应电流密度随时间的变化结果。磁体数 n 为 4 时,感应电流密度峰值 I_{zm} 比 n 为 8 时和 n 为 16 时高,峰值达 25 MA/m^2 。由于磁体数变化导致旋转作用时间的改变,磁体数为 4 时的变化周期 T_B 约为磁体数为 8 时的两倍,约为磁体数为 16 时的 4 倍,如图 12 所示。由于磁化方向相反磁铁的相互作用影响,当磁体数为 4 时,电流密度随时间的变化在前 $3/4$ 周期内增加,后 $1/4$ 周期内迅速从峰值降低至 0,呈后尖峰的畸形分布。磁体数越多,电流密度随时间的变化畸变度越小,更趋近于正弦曲线,但感应电流峰值显著降低,磁体数 n 为 16 比 n 为 4 时的感应电流峰值降低约 2.5 倍。

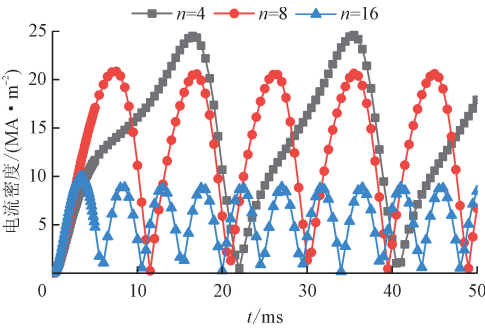


图 12 不同磁体数时电流密度随时间的变化

Fig. 12 Temporal variation of current density magnitude with time at different numbers of magnets

图 13 显示了不同磁体数时中心轴向扭矩随时间的变化。

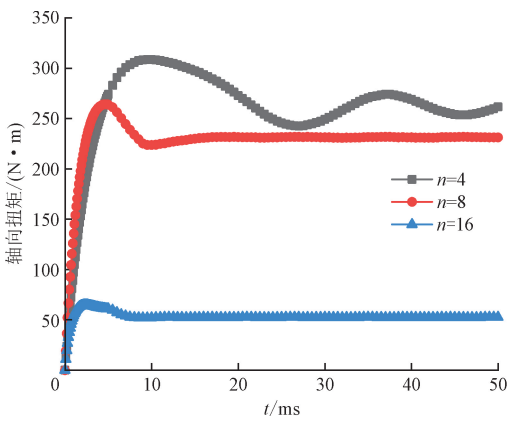


图 13 不同磁体数时轴向扭矩随时间的变化

Fig. 13 Variation of axial torque with time at different numbers of magnets

从图 13 可看出,当磁体数为 4 时,扭矩明显波动,最大轴向扭矩可达 $274.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。当磁体数增加至 16 时,轴向扭矩变化平稳,稳定时的轴向扭矩为 $52.4 \text{ N} \cdot \text{m}$,平均轴向扭矩降低 5.2 倍,显然,增加磁体数会缩短磁体交替作用时间,弱化轴向扭矩,驱动力减弱。

图 14 给出了不同磁体数时体积损耗密度随时间的变化规律。从图 14 可以看出,磁体数越小,产生的体积损耗密度越高,这是由于此时的感应电流较高,导致损耗增加,温度上升更为显著。

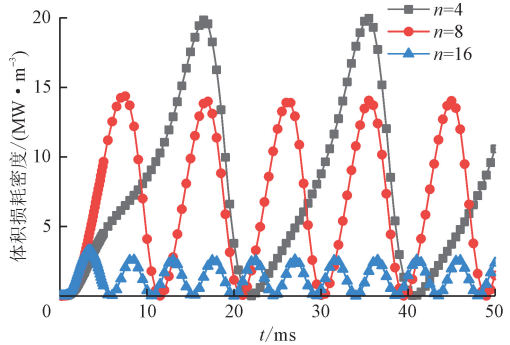


图 14 不同磁体数时的体积损耗密度随时间的变化

Fig. 14 Volumetric loss density with time at different numbers of magnets

2.4 磁体剩余磁通密度对流动特性的影响

典型磁体 NdFeB 的剩余磁通密度约为 $1.17 \sim 1.42 \text{ T}$ 。保持几何参数和物理参数不变,改变磁体的剩余磁通密度,取为 $0.5, 1.0, 1.4, 2.0 \text{ T}$,研究磁体剩余磁通密度 B_r 对液态金属电磁、流动与传热特性的影响。图 15 给出了不同剩余磁通密度时监测点位置处电流密度 I_z 、轴向扭矩、体积损耗密度及

压差随时间的变化。显然,随着剩余磁通密度的增加,轴向扭矩和压差呈现出较为明显的非线性变化,剩余磁通密度越高,两者增加越快。如当永磁体的剩余磁通密度由 0.5 T 增加至 1.0 T 时,轴向扭矩增加了 19.4 N·m,电流密度增加了 2.99 MA/m²,而当剩余磁通密度由 1.5 T 增加至 2.0 T 时,轴向扭矩增加了 51.7 N·m,电流密度增加了 3.61 MA/m²,轴向扭矩增加了 2.66 倍,电流密度增加了 1.2 倍;磁通密度为 2.0 T 时产生的轴向扭矩是 1.0 T 时产生的轴向扭矩的 4.67 倍。压差、体积损耗密度呈非线性单调增加。

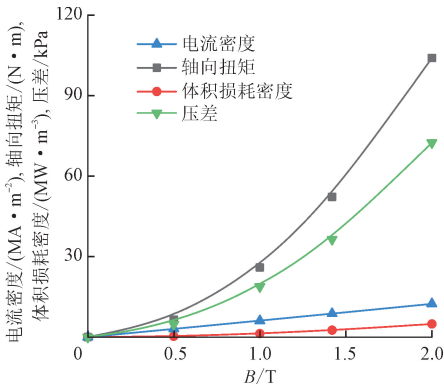


图 15 不同剩余磁通密度时监测点位置处电流密度、轴向扭矩、体积损耗密度及压差随时间的变化

Fig. 15 Variation of current density, axial torque, volume loss density and differential pressure with time at monitoring point positions for different residual flux density densities

2.5 转速对流动特性的影响

保持磁体的剩余磁通密度 B_r 为 1.42 T,磁体数 n 为 16, d 为 10 mm,改变永磁转盘的转速,设置转速 ω 为 200、400、800 r/min 时进行计算,获得转速对液态金属电磁、流动与传热特性的影响,如图 16 所示。

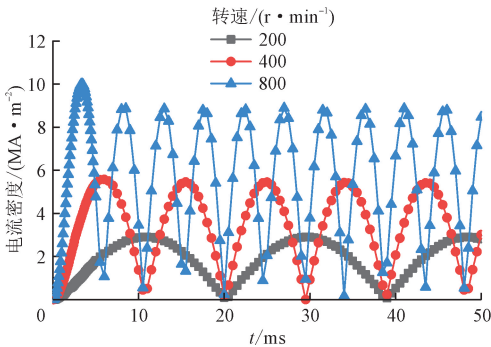


图 16 不同转速时电流密度随时间的变化

Fig. 16 Variation of current density with time at different rotational speeds

由图 16 可知,当转速发生改变时,感应电流密度的波动周期和强度均发生变化。当磁转盘转速增加时磁通 B_y 随时间变化的频率增加,感应电流的变化频率增加,电流密度峰值 I_{em} 明显增加。电流密度随转速呈非线性增加,当转速为 400 r/min 时,电流密度达到 5.4 MA/m²;当转速为 800 r/min 时,电流密度达到 8.8 MA/m²。

图 17 给出了不同转速时监测位置处各参变量随时间的变化。

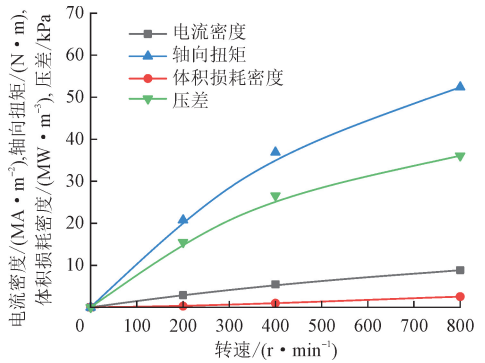


图 17 不同转速下监测位置处各参变量随时间的变化
Fig. 17 Variation of various variables at different with time rotational speeds

从图 17 可以看出,增加转速将提升电流密度、轴向扭矩、热损和压差,但增加的幅度随着转速的提高并没有显著的增大,而更趋于平稳。当磁盘转速由 200 r/min 增加至 800 r/min 时产生的扭矩仅提升 2.52 倍,这是因为当转速增加时,磁感线扫过监测点的频率成比例增加,电场强度与磁通量的变化速度快速增加,故电流随转速迅速增加。当感应电流密度 I_e 增大时,二次磁场增强,对磁场的变化起到更强的拮抗作用,使磁通密度的峰值小幅度下降,使各参量亦呈非线性增大。转速越高,频率越高,但其作用于液态金属的时间越短,因此转速达到一定数值时,其增加量反而减缓。比较图 15 可发现,成倍增加转速提升驱动的能力小于成倍增加磁通密度的作用。

3 结 论

本研究针对鼓形永磁驱动液态金属的研究仍不清晰的现状,通过构建永磁驱动液态金属的磁-电-流-热多物理场方法,研究了旋转磁体-流体耦合作用下液态金属电磁、流动与传热性能,比较分析了气隙间距、剩余磁通密度、磁体数、磁转盘转速等对磁场、电场、流场与温度场的影响规律,主要结论如下。

(1)永磁转盘旋转过程中,在 U 型液态金属流道中产生感应涡流,涡流作用下产生错位磁场,错位磁场和涡流共同作用产生洛伦兹力驱动磁体流动,形成越靠近磁极流体流速越高的非均匀速度场分布,电磁感应产生一定能量损耗,引起温度小幅升高。

(2)气隙间距对驱动产生显著影响。磁场随着距离的增加快速衰减,感应电流强度、轴向扭矩、压差均呈非线性降低,气隙间距由 6 mm 增加至 14 mm 时,轴向扭矩显著衰减 7.5 倍。

(3)相邻磁体对流道中磁场具有强化与抵消作用。磁体数越多,抵消作用越明显,电流密度峰值 I_{cm} 越低,产生的扭矩越平稳。当永磁体数由 4 增加 2 倍时,扭矩由大幅波动转至平稳,周向单磁体作用于液态金属时间减小,感应电流峰值降低 2.5 倍,平均轴向扭矩降低 5.2 倍,驱动性能大幅降低。因此,磁体数要兼顾驱动力大小与稳定性。

(4)增大磁体的剩余磁通密度 B_r 和增加转速 ω 可增加流道中心的电流密度 I_z , 均可提升液态金属的前后压差,并增加驱动力。高剩余磁通密度条件下输出扭矩非线性增加,2.0 T 时产生的扭矩是 1.0 T 时的 4.67 倍;而当磁盘转速由 200 r/min 增加至 800 r/min 时,产生的扭矩可提升 2.52 倍。

参考文献:

[1] 李安敏,杨树靖,惠佳琪,等. 液态金属的多功能化 [J]. 材料导报, 2023, 37(1): 135-146.
LI Anmin, YANG Shujing, HUI Jiaqi, et al. Multifunctionalization of liquid metals [J]. Materials Reports, 2023, 37(1): 135-146.

[2] XU Jing, YU Haoming, DANG Chaolei, et al. Comparison of heat transfer performance between liquid metal and aviation kerosene in the wall cooling channel of aero-engine [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 222: 125159.

[3] AN Kang, SU Zhengyu, ZHANG Manman, et al. Liquid metal-based micro/mini-channel heat transfer: progress, challenges, and opportunities [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 250: 123551.

[4] XU Jing, LI Weikang, DANG Chaolei, et al. Structure effect of wall cooling channel on liquid metal heat transfer in aero-engines [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 51: 102651.

[5] 刘凯旋,余国瑶,解家春,等. 空间用液态金属传热式斯特林发电机换热结构研究 [J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(2): 106-112.
LIU Kaixuan, YU Guoyao, XIE Jiachun, et al. Re-

search on heat transfer structure of space-used Stirling generator with liquid metal [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(2): 106-112.

[6] ZHANG Mingkuan, GAO Qi, ZHAO Zhiyuan, et al. Liquid metal manifold microchannel heat sink for ultra-high heat flux cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248(Part A): 123117.

[7] QIN Chenyu, SONG Panpan, SUN Xin, et al. Actuation technique of liquid metal in thermal management: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248(Part B): 123290.

[8] LIANG Zhenhui. Experimental analysis on hydraulic characteristics of electromagnetic pump by using LBE as working fluid [J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 401: 112097.

[9] XIANG Dinghan, SHAN Kunlun. Friction and wear behavior of self-lubricating and heavily loaded metal-PTFE composites [J]. Wear, 2006, 260(9/10): 1112-1118.

[10] 程军,于源,朱圣宇,等. 多功能室温液态金属在不同摩擦副条件下的润滑性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2017, 37(4): 435-441.
CHENG Jun, YU Yuan, ZHU Shengyu, et al. Lubrication characteristics of multifunctional liquid-state metal materials under different sliding-pairs [J]. Tribology, 2017, 37(4): 435-441.

[11] LI Xing, LI Yihong, TONG Zhe, et al. Enhanced lubrication effect of gallium-based liquid metal with laser textured surface [J]. Tribology International, 2019, 129: 407-415.

[12] XIAO Rongzhen, YAO Mingjun, CHENG Jun, et al. Lubrication properties of gallium-based liquid metals by doping bismuth [J]. Tribology International, 2024, 195: 109653.

[13] 王曦宇,李科,王源升,等. 聚合物/镓基液态金属复合材料的研究及应用进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(1): 327-334.
WANG Xiyu, LI Ke, WANG Yuansheng, et al. Progress of polymer/gallium-based liquid metal composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(1): 327-334.

[14] 侯击波,刘云. 电磁泵铸造技术的回顾及发展 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(17): 64-67.
HOU Jibo, LIU Yun. Retrospect and development of electromagnetic pump casting technology [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(17): 64-67.

[15] LEE G H, KIM H R. Numerical analysis of the electromagnetic force for design optimization of a rectangu-

- lar direct current electromagnetic pump [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2018, 50(6): 869-876.
- [16] WANG Liu, HOU Yandong, SHI Leitai, et al. Experimental study and optimized design on electromagnetic pump for liquid sodium [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 124: 426-440.
- [17] YAO Liang, LI Xiaobin, ZHANG Hongna, et al. A novel Halbach array electromagnetic pump for liquid metal flow: design proposal and performance analysis [J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 183: 109641.
- [18] 王冲, 徐帅, 陈树明, 等. 某圆柱型感应电磁泵设计与验证 [J]. 核科学与工程, 2022, 42(2): 461-467.
- WANG Chong, XU Shuai, CHEN Shuming, et al. Design and verification of a cylindrical induction electromagnetic pump [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(2): 461-467.
- [19] HVAITA M G, NOLLET W K, ANDERSON M H. Designing moving magnet pumps for high-temperature, liquid-metal systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 327: 228-237.
- [20] SHUTAYFI M, RAJ A, EAPEN J, et al. Design, modeling, and analysis of a compact-external electromagnetic pumping system for pool-type liquid metal-cooled fast reactors [J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 193: 109997.
- [21] TERAOKA Y, FUCHINO S, MAWATARI Y, et al. Electromagnetic design of ultra-high speed superconducting motors applied to electric pumps in liquid-propellant rockets [J]. Physica: C Superconductivity and Its Applications, 2023, 612: 1354320.
- [22] XIANG Liujin, YANG Shuo, WANG Qi, et al. Design and testing of a direct current electromagnetic pump for liquid metal [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 50: 102560.
- [23] 王昭, 南江萍, 张培培, 等. 盘式永磁耦合器传动机理有限元仿真研究 [J]. 微电机, 2019, 52(11): 31-35.
- WANG Zhao, NAN Jiangping, ZHANG Peipei, et al. FEM simulation study on transmission mechanism of disc type permanent magnet coupler [J]. Micromotors, 2019, 52(11): 31-35.
- [24] 罗志伟, 陈宝森, 邵伟明, 等. 电磁泵中液态金属流体行为规律分析与流道阀体优化 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(4): 500-508.
- LUO Zhiwei, CHEN Baosen, SHAO Weiming, et al. Behavior law analysis of liquid metal fluid and valve body optimization of flow channel in electromagnetic pump [J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2023, 62(4): 500-508.
- [25] 王彦利, 黄护林, 方日亮. 磁场作用下气液两相混合流动的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42(9): 2367-2377.
- WANG Yanli, HUANG Hulin, FANG Riliang. Numerical simulation of gas-liquid metal two-phase mixing flow under magnetic field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(9): 2367-2377.
- [26] 雷天扬, 孟旭, 王增辉, 等. 强磁场下液态金属微槽道流动与换热实验研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(4): 459-466.
- LEI Tianyang, MENG Xu, WANG Zenghui, et al. Experimental study of flow pattern and heat transfer of liquid metal in microchannel under the magnetic field [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(4): 459-466.

(编辑 武红江)