

跑道型磁流体动力泵流体运动仿真与实验分析

徐梦洁^{1,2}, 夏晨艳^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 莫佳辉^{1,2}, 李醒飞³

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009;

2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009;

3. 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室 天津 300072)

Email: xumj@hfut.edu.cn

摘要: 磁流体动力泵是一种直接驱动的非机械泵, 其利用洛伦兹力对磁流体进行径向泵送, 可实现流体的无接触连续驱动和控制, 具有无磨损、易微型化等优势, 可用于生物微流体中药液的驱动, 也可用于各种 MHD 加速度传感器中提高测量频率范围及测量精度。本文设计并实现了一种跑道型磁流体动力泵结构, 在流体通道两侧构建了一个均匀磁场, 并优化了壳体结构, 提供连续稳定的外驱流动。本文对该磁流体动力泵进行了仿真, 以模拟其实际流动效果。为验证仿真结果, 对磁流体动力泵样机进行测试实验。该跑道型磁流体泵可在 200-700mA 及 0.1V-1.2V 范围内对铟镓锡流体进行连续稳定的驱动, 其输出结果线性度可达 97.0%。分析实验及仿真结果可得, 设计的跑道型磁流体动力泵的实际输入输出曲线与仿真结果的拟合度达到 96.9%。

关键词: 跑道型磁流体动力泵; 磁流体动力学; 单磁流体泵结构; 流体仿真

Motion simulation and experimental analysis of fluid in runway-type MHD pump

Xu Mengjie^{1,2}, Xia Chenyan^{1,2}, Yang Tao^{1,2}, Mo Jiahui^{1,2}, Li Xingfei³

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. State Key Laboratory of Precise Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The Magnetohydrodynamics(MHD) pump is a direct-driven non-mechanical pump, which utilizes the Lorentz force to pump the magnetic fluid in the radial direction, which can realize the contactless continuous driving and controlling of the fluid, and has the advantages of no wear and easy miniaturization, which can be used for the driving of medicinal fluids in the bio-microfluid, and also can be used to improve the measuring frequency range and the measuring accuracy in various MHD acceleration sensors. In this paper, a runway-type MHD pump structure is designed and implemented to construct

a uniform magnetic field on both sides of the fluid channel and optimize the casing structure to provide continuous and stable externally driven flow. The runway-type MHD pump is simulated to model its actual flow effect. To verify the simulation results, test experiments are conducted on the prototype of the MHD pump. The runway-type MHD pump can continuously and stably drive the indium gallium tin fluid in the range of 200-700mA and 0.1V-1.2V, and the linearity of its output results can reach 97.0%. Analyzing the experimental and simulation results, it can be obtained that the actual input and output curves of the designed runway-type magnetohydrodynamic pump fit the simulation results by 96.9%.

Keywords: runway-type MHD pump; magnetohydrodynamics; single magnetohydrodynamic pump structure; motion simulation of fluid

1、研究背景

磁流体动力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 加速度传感器是一种新兴的加速度传感器, 能够检测航天器运行时的振动、倾角等信息, 从而进行平台的姿态稳定性控制。磁流体动力泵的工作原理是利用通入电流后的磁性流体所产生的与电磁场相互垂直的洛伦兹力推动流体流动。磁流体动力泵可为 MHD 加速度传感器提供稳定的外驱流动增强 MHD 加速度传感器对低频信号的检测效率, 具有较大的研究价值。

常见的磁流体动力泵一般分为直流磁流体 (AC MHD) 泵与交流磁流体 (DC MHD) 泵。直流磁流体泵结构简单可靠、功耗低。交流磁流体泵磁场为电磁体所产生的交流磁场, 这使得电场和磁场的相位可被精确控制, 从而产生连续可控的流动。其具有电极腐蚀慢、使用寿命长等优势。另一方面, 磁流体动力泵有开放式与封闭式之分, 开放式磁流体动力泵具有流体不易断流、结构简单等优点, 但难以用于实际测量场景。封闭式磁流体动力泵具有较强的抗干扰性, 但内部易产生气泡、受涡流影响。目前, 对磁流体动力泵的研究主要集中于环形与直线型泵上, 对跑道型封闭式磁流体动力泵的研究还稍显不足。

2、研究内容

本文设计的跑道型磁流体动力泵为直流驱动, 结构相对简单, 主要由永磁体和充满液态铟镓锡 (InGaSn) 的全封闭跑道型流体通道组成。根据洛伦兹力与磁流体动力学理论, 磁流体动力泵主要遵循以下方程组:

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = \mu J \quad (3)$$

其中， J 为电流密度， B 为磁感应强度， E 为电场强度。 σ 和 μ 分别代表的是流体的电导率和磁导率。

在壳体左右两侧放置 1mm 厚的矩形永磁体以构建永磁场，并在壳体上下两侧装配与内部磁流体直接接触的纯铜电极，分别使用直流电流源和电压源向磁流体和放大采集电路供电。

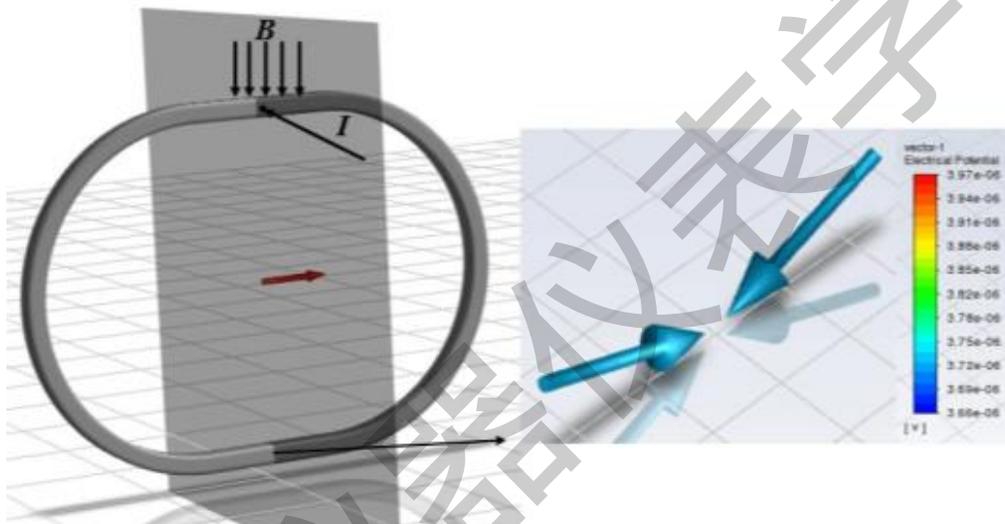


图 1 跑道型磁流体动力泵等效图及 120A/m² 电流输入时的输出电压

Fig. 1 Equivalent diagram of a runway-type MHD pump and output voltage at 120A/m² current input

对于理论仿真部分，本文首先建立流体通道的理想模型，对其进行网格化，后施加 1T 的恒定磁场，并在流体壁面上施加与实验等效的直流电流，变化范围为 120-400A/m²。磁流体等效模型及电压矢量图如图 1 所示。

磁流体动力泵样机测试实验采用 200-700mA 的直流电流作为激励，多次重复实验，记录施加输入电流值与实际电流值，并对结果进行低通滤波，以达到去噪的目的。实验所得的输入电流与降噪后的输出峰峰值对应关系如图 2 所示，其平均线性度为 97.0%，二者显示出较大的线性相关性。

1002003004000.40.60.81.00.40.60.81.0 实际输出电压 (V) 输入电流密度 (A/m²) 实际输出电压 仿真输出电压 仿真输出电压 (×10⁻⁶V) 数值仿真得到的输出曲线亦如图 2 所示，当外加电流在 200-220A/m² 范围时，流体壁面输出电压有微小偏移，但整体线性度达 99.9%。

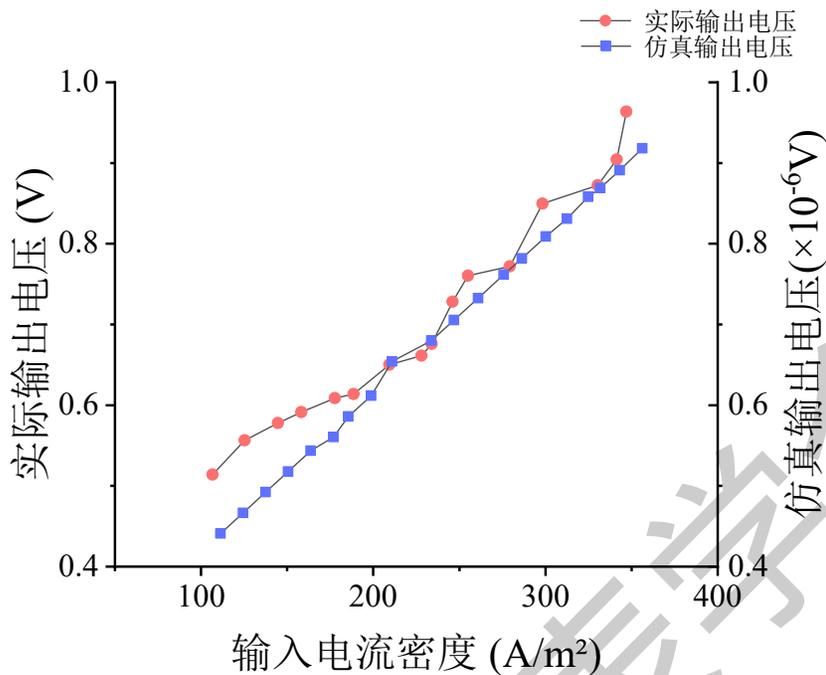


图 2 不同输入电流下跑道型磁流体动力泵仿真及实验输出电压

Fig. 2 Output voltage of runway-type MHD pump at different input currents

跑道型磁流体动力泵的静态误差主要来源有标度因数误差 ΔK_0 、偏值误差 ΔK_b 、加工误差、装配误差。实验过程中的动态误差主要来源于无法完全水平放置造成的重力影响、夹具使流体泵产生位移。即使有上述误差的存在，但实际实验所得的输入输出曲线与仿真所得曲线线性拟合度仍可达 96.9%。

3、结论

本文设计并实现了一种跑道型磁流体动力泵结构，在流体通道两侧均匀构建了一个磁场，以提供连续稳定的外驱流动。此外，本文对跑道型磁流体动力泵进行物理仿真，并对其进行实验验证。实验及仿真结果表明，设计的跑道型磁流体动力泵的实际输入输出曲线与仿真结果的拟合度达到 96.9%。实际测试中，该跑道型磁流体泵可在 200–700mA 及 0.1V–1.2V 范围内对铟镓锡流体进行连续稳定的驱动，其线性度可达 97.0%。

但目前的研究仅使用直流电流及电压作为输入源，后续可使用交流电流及电压作为输入源，拓展研究跑道型磁流体动力泵的使用场景。

参考文献

略