

基于Maxwell的仿生电磁鱼鳍有限元分析

俞代卫

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年8月5日; 录用日期: 2024年8月30日; 发布日期: 2024年9月6日

摘要

电磁驱动器是一种利用电磁力进行运动控制的装置, 通过电流在线圈中产生的磁场与永磁体或其他铁磁材料相互作用, 实现精确的力和运动控制。本文利用SolidWorks建立一种仿生单线圈磁驱动鱼鳍的三维模型, 并将模型导入Maxwell中进行静磁场和瞬态电磁场分析。静磁场分析结果表明线圈产生的最大磁场强度为22.2 mTesla, 磁场呈轴对称分布。瞬态电磁场分析得出了不同激励下的磁力扭矩和空间角度关系, 随激励电流的增加, 扭矩力随着电流线性增大。

关键词

仿生电磁鱼鳍, 静磁场分析, 瞬态磁场分析

Finite Element Analysis of Bionic Electromagnetic Fish Fin Based on Maxwell

Daiwei Yu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 5th, 2024; accepted: Aug. 30th, 2024; published: Sep. 6th, 2024

Abstract

An electromagnetic actuator is a device that uses electromagnetic force for motion control, and the magnetic field generated in the coil through an electric current interacts with a permanent magnet or other ferromagnetic material to achieve precise force and motion control. In this paper, a three-dimensional model of a bionic single-coil magnetically driven fish fin is built by SolidWorks, and the model is imported into Maxwell for static magnetic field and transient electromagnetic field strength generated by the coil is 22.2 mTesla, and the magnetic field is axisymmetrically distributed. The transient electromagnetic field analysis obtains the relationship between the magnetic torque and the spatial angle under different excitations, and the torque force increases linearly with the

increase of the excitation current.

Keywords

Bionic Electromagnetic Fins, Static Magnetic Field Analysis, Transient Magnetic Field Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

水下机器人一直以来都是国际研究的热点内容[1]，目前，大多数水下机器人多是利用螺旋桨推进，会对水下环境和动物造成影响[2][3]，相对于传统基于螺旋桨的水下推进器，鱼类的游动具有高效率、机动性高、稳定性好及对环境扰动小等特点[4][5]。

随着仿生和柔性驱动器技术的发展，国内外科研人员研发了各种仿生智能驱动机器鱼样机。李国瑞等[6]使用介电弹性体执行器(DEA)驱动仿生狮子鱼的两侧鳍片产生拍打运动，从而推动软体机器人进行深海游泳；崔磊等[7]提出了电磁直驱式仿贝类驱动器，利用射流推动水下航行器；Daisuke等[8]通过用形状记忆合金线和刚体连杆替换鱼类红色肌肉结构来制造机器人，提高了软体机器鱼的游动速度和效率；李铁凤等[9]提出了一种果冻状人工肌肉设计，可以对电刺激做出反应并给仿生透明水母提供水下推力。

基于电磁感应原理和仿生结构设计，本文利用 SolidWorks 三维建模软件建立了一种单线圈磁驱动鱼鳍的结构模型，并导入 Ansys Maxwell 进行静磁场和三维瞬态磁场分析，以全面评估磁控鱼鳍的性能。这些分析结果为实际的磁控仿生鱼鳍结构设计及优化提供了重要参考，有助于进一步提升磁控仿生鱼鳍的性能和可靠性。

2. 仿生电磁鱼鳍结构模型的建立

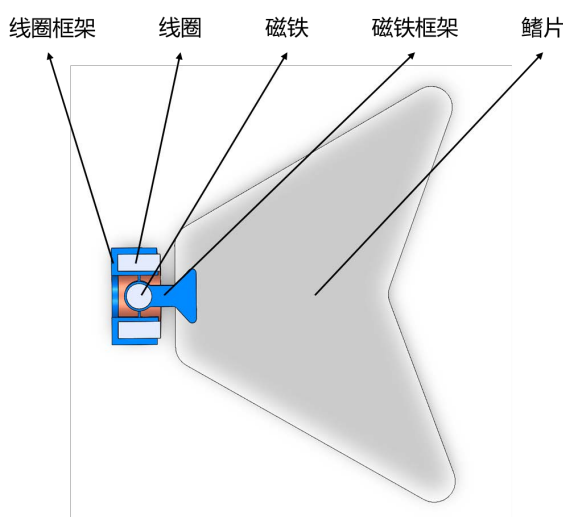


Figure 1. Section view of biomimetic electromagnetic fin model diagram

图 1. 仿生电磁鱼鳍模型剖视图

建立好的仿生电磁鱼鳍模型如图 1。该模型由五个部分组成，线圈框架作为基座，将驱动器与水下机器人本体连接起来，磁铁框架充当铰链作用，使被包裹的圆柱磁铁能够绕轴线旋转运动，框架均由 3D 打印而成，铜线圈的内径为 12 mm，厚度 10 mm，外径 20 mm，电阻为 32 欧姆，线圈匝数为 1080 圈，圆柱磁铁的半径为 3 mm，高度为 6 mm，鳍片由聚氯乙烯薄片通过机器切割而成，尾长约 50 mm。

3. 静磁场分析

3.1. 材料设置和网格划分

完成建模后(如图 1)，由于 3D 打印的树脂框架和聚氯乙烯鳍片与磁场不发生作用，为节省建模和求解资源在有限元模型中将其忽略，只考虑将线圈和磁铁模型导入 ANSYS Maxwell 中，然后设置线圈和磁铁的材料属性。线圈材料选择 copper，磁铁材料设置为 NdFe35，剩磁方向 Z 改为 1，其他方向设置为 0。材料选定完成后，考虑到后续的三维瞬态磁场分析操作，网格过大可能会使气隙处的磁场分析不精确，而网格过细会导致计算效率低下[10]，于是将线圈的体网格最大尺寸设置为 1 mm，面网格为 0.5 mm，磁铁的体网格最大尺寸设置为 0.4 mm，面网格为 0.2 mm。

3.2. 施加激励和边界条件

采用角线圈型的电流作为激励源，由于通电电流为 0.25 A，那么总的安匝数为 270 A，静磁场中主要分析的是工作时铜线圈的磁场现象，于是暂时先删去磁铁实体模型，采用纽曼边界条件，默认为 H 平行边界，空气域设置为模型的最大尺寸向外部偏移扩展 200% 范围。

3.3. 结果后处理

通过对通电磁线圈的静磁场分析，从图 2~图 5 可以看出，该磁场呈轴对称分布，线圈中间内径处的磁场强度最大，最大磁场强度为 22.2 mTesla。在使得磁铁所受驱动力尽量大的条件下，动磁铁的位置应该在线圈中心，因此本文给出的电磁驱动器模型是合理的。

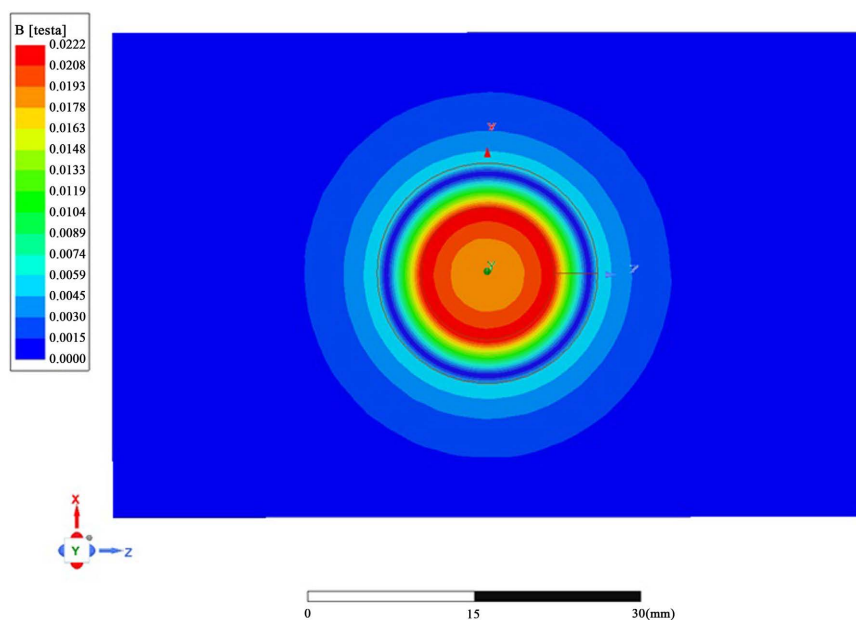


Figure 2. XZ plane magnetic field intensity diagram
图 2. XZ 平面磁场强度图

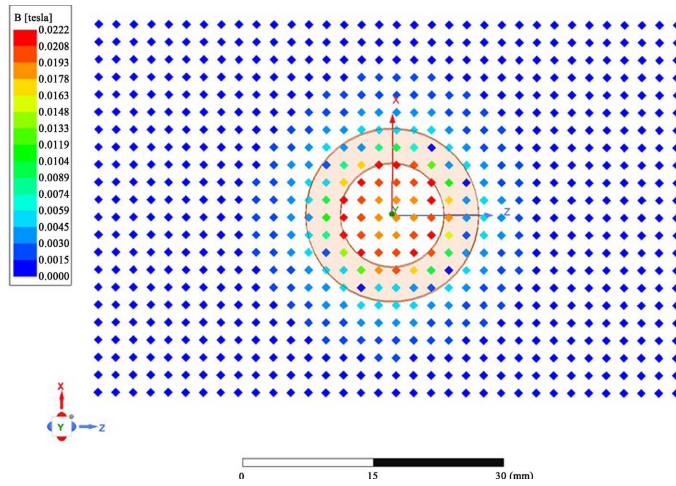


Figure 3. XZ plane magnetic flux diagram
图 3. XZ 平面磁通向量图

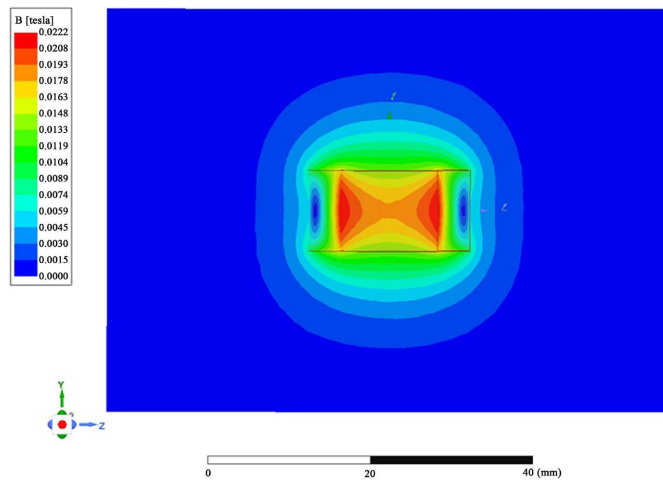


Figure 4. YZ plane magnetic field intensity diagram
图 4. YZ 平面磁场强度图

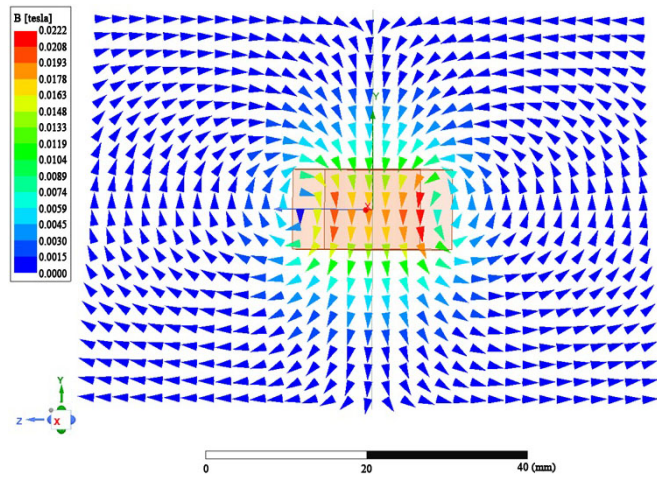


Figure 5. YZ plane magnetic flux diagram
图 5. YZ 平面磁通向量图

4. 瞬态磁场分析

4.1. 三维瞬态磁场模型

与静磁场分析不同[11], 由于动磁铁的存在, 需要对 Bond 域进行建模来规定动磁铁的运动范围。Band 域直径为 9 mm, 高度为 7 mm, 圆柱磁铁绕 X 轴运动, 运动范围从 -360° 至 360° , 速度为 360 度每秒, 分析步收敛项设为 1, 并利用虚功力的方式计算磁铁在磁场中受到的扭矩大小。瞬态磁场分析模型如图 6 所示。同时, 还分析了不同激励下的磁铁受到的磁力矩。

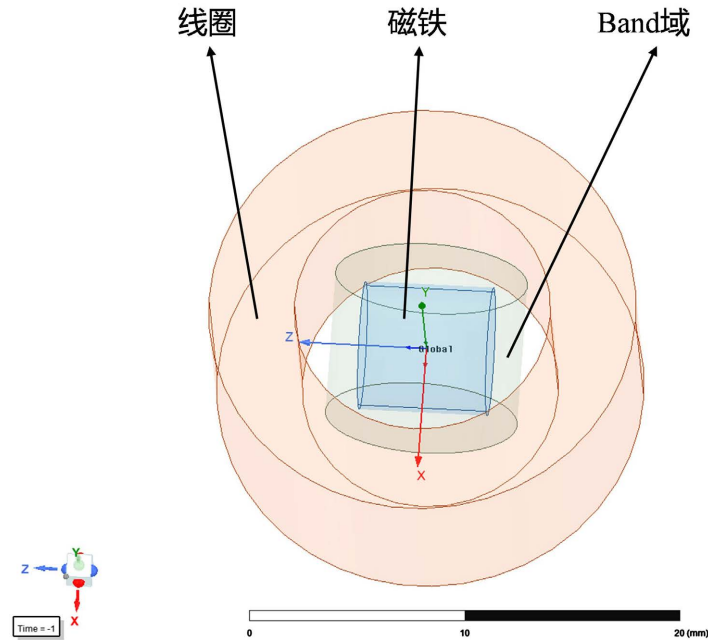


Figure 6. Electromagnetic drive model diagram
图 6. 电磁驱动器模型图

4.2. 瞬态磁场结果处理

通过对电磁驱动器的三维瞬态磁场分析, 可以得到驱动装置工作时磁场分布和大小, 以及线圈中动磁铁的磁力矩大小变化, 从而可以得出磁控鱼鳍的推动力大小。如图 7 所示动磁铁的磁力矩与转动角度呈现周期变化的趋势, 当动磁铁的圆截面与磁场平行时, 所受到的磁力矩最大, 当电流安匝数为 135 A 时, 磁力矩大小为 1.533 N·mm; 当电流安匝数为 270 A 时, 磁力矩大小为 3.015 N·mm; 当电流安匝数为 405 A, 磁力矩大小为 4.496 N·mm。当动磁铁的圆截面与磁场垂直时, 即转动为 90 度的整数倍时, 动磁铁受到的力矩大小为 0。从上述数据可以得出, 仿生电磁鱼鳍的运动角度应设置在 -90° 至 90° 之间, 并且可通过调节电流安匝数大小来获得相应数值的电磁力矩, 以应对驱动器在水下的不同工况。

同时, 由图 7 可以看出, 磁力矩与转角的图像表现出余弦函数特征, 而力矩大小又与线圈总安匝数表现出线性关系, 通过最小二乘法可以得到磁力矩与转角的数学模型:

$$T_M = K_M \cdot I_n \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

式(1)中 T_M 为磁铁受到的磁力矩, θ 为动磁铁的运动角度, I_n 表示线圈接入电流的总安匝数, K_M 为磁力矩弹性系数, 经拟合得到 $K_M = 11.1 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{A}$, 拟合优度 $R^2 = 0.99$, 表明该数学模型能够很好的描述动磁铁磁力矩与其空间转角的数值关系。

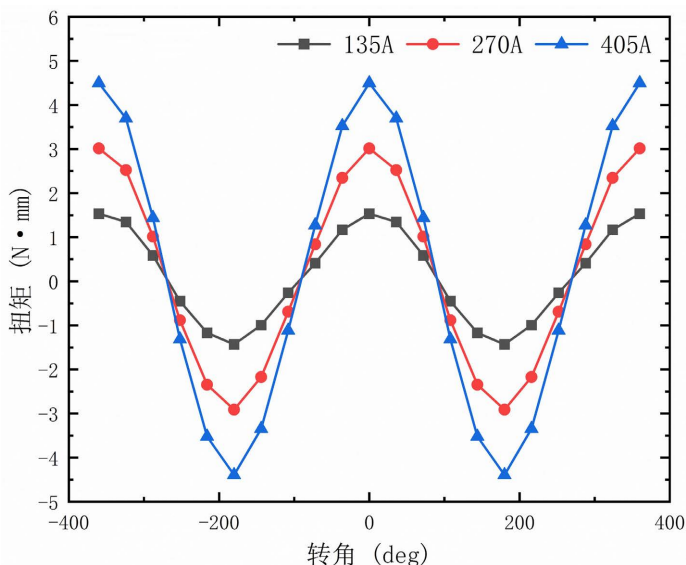


Figure 7. Magnetic torque at different ampere-turns diagram
图 7. 不同安匝数下的磁力扭矩图

5. 结论

通过 ANSYS Maxwell 软件对仿生磁控鱼鳍进行静磁场分析和瞬态磁场分析, 得到以下结果:

(1) 通过静磁场分析, 当仿生电磁鱼鳍的通电电流为 0.25 A 时, 线圈产生的电磁场呈现轴对称分布, 空心线圈内圈磁场比外圈磁场强度高, 最大磁感强度为 22.2 mTesla。因此, 该电磁驱动器的结构设计符合实际工作需求。

(2) 通过瞬态磁场分析获得了仿生电磁鱼鳍在不同激励大小下的驱动力矩。分析得出了电磁驱动力矩与动磁铁摆动角度之间的数学模型, 并用具体的磁动力数学模型来描述他们的关系, 为后续的研究提供了理论基础。

综上所述, 仿生电磁鱼鳍在静磁场和三维瞬态磁场分析都表明了其结构的可靠性。通过本次分析, 不仅验证了仿生电磁鱼鳍驱动器结构设计的合理性, 还为后续的优化和改进提供了重要依据, 在未来的工作中, 该仿生驱动装置将安装于水下机器人上并进行一系列的水下测试。

参考文献

- [1] 许裕良, 杜江辉, 雷泽宇, 等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述[J]. 机器人, 2023, 45(1): 110-128.
- [2] Renda, F., Giorgio-Serchi, F., Boyer, F., Laschi, C., Dias, J. and Seneviratne, L. (2018) A Unified Multi-Soft-Body Dynamic Model for Underwater Soft Robots. *The International Journal of Robotics Research*, **37**, 648-666. <https://doi.org/10.1177/0278364918769992>
- [3] Yoerger, D.R., Govindarajan, A.F., Howland, J.C., Llopiz, J.K., Wiebe, P.H., Curran, M., et al. (2021) A Hybrid Underwater Robot for Multidisciplinary Investigation of the Ocean Twilight Zone. *Science Robotics*, **6**, eabe1901. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abe1901>
- [4] Fish, F.E. (2013) Advantages of Natural Propulsive Systems. *Marine Technology Society Journal*, **47**, 37-44. <https://doi.org/10.4031/mts.j.47.5.2>
- [5] Sfakiotakis, M., Lane, D.M. and Davies, J.B.C. (1999) Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **24**, 237-252. <https://doi.org/10.1109/48.757275>
- [6] Li, G., Chen, X., Zhou, F., Liang, Y., Xiao, Y., Cao, X., et al. (2021) Self-Powered Soft Robot in the Mariana Trench. *Nature*, **591**, 66-71. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03153-z>
- [7] 崔磊, 黄兴保, 杨斌堂. 水下仿生贝壳电磁驱动器动力学分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(5): 13.

- [8] Aragaki, D., Nishimura, T., Sato, R. and Ming, A. (2023) Biomimetic Soft Underwater Robot Inspired by the Red Muscle and Tendon Structure of Fish. *Biomimetics*, **8**, Article No. 133. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020133>
- [9] Li, X., Rao, D., Zhang, M., *et al.* (2024) A Jelly-Like Artificial Muscle for Untethered Underwater Robot. *Cell Reports Physical Science*, **5**, Article ID: 101957.
- [10] 孟繁懿, 蒲祖萌, 马超. 基于 Ansoft Maxwell 的永磁直流空心杯电机有限元分析[J]. 微电机, 2023, 56(8): 8-11.
- [11] 张文迪, 王炆, 李涛, 等. 增强型电磁驱动装置瞬态磁场分析[J]. 科技导报, 2022, 40(9): 98-104.