

电磁驱动器鱼类的驱动器研究

朱红秀, 杜 闯, 孟庆博, 褚彦斌, 宋高明, 徐 亮

(中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要:根据电磁驱动器工作原理,建立动力学方程,在 Maxwell 软件二维环境下建立电磁驱动器简化模型。根据电磁驱动器电路方程在 Simplorer 模块中建立电磁驱动器驱动电路模型。二者联合使用正交试验方法对电磁驱动器通电线圈瞬态运动电磁仿真,得到电磁驱动器通电线圈运动过程中的位移曲线,分析正交试验结果得到相关参数对电磁驱动器工作时输出力的影响情况和使电磁驱动器力输出最大时的各参数值,通过仿真验证分析结果。

关键词:电磁驱动器;简化模型;驱动电路;通电线圈;瞬态运动;电磁仿真;正交试验

本文引用格式:朱红秀,杜闯,孟庆博,等.电磁驱动器鱼类的驱动器研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(S2):29-32,61.

Citation format:ZHU Hongxiu, DU Chuang, MENG Qingbo, et al. Actuator Research on Actuating Fish by Electromagnetic Force[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S2): 29-32, 61.

中图分类号:TM155

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)S2-0029-04

Actuator Research on Actuating Fish by Electromagnetic Force

ZHU Hongxiu, DU Chuang, MENG Qingbo, CHU Yanbin, SONG Gaoming, XU Liang

(China University of Mining & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the working principle of electromagnetic drive, the dynamic equation is established, and the simplified model of electromagnetic drive is established in Maxwell software two-dimensional environment. The electromagnetic drive drive circuit model is built in the Simplorer module according to the electromagnetic drive circuit equation. The two orthogonal experiments are used to simulate the transient motion of the electromagnetic actuator energized coil, and the displacement value curve of the electromagnetic actuator energizing coil is obtained. The orthogonal test results are analyzed to obtain the influence of relevant parameters on the output force of the electromagnetic actuator. According to the simulation results, the values of each parameter when the electromagnetic actuator output is maximized are analyzed. Finally, the analysis results are verified by simulation.

Key words: electromagnetic drive; simplified model; drive circuit; energized coil; transient motion; electromagnetic simulation; orthogonal test

随着科技发展水下机器人引起了越来越广泛的关注^[1-4]。水下机器人的驱动方式也是多种多样的,作为典型水下机器人的机器鱼驱动方式可以分为两大类:

1) 利用材料特性作为驱动,如形状记忆合金驱动^[5]、压电陶瓷^[6]和人工肌肉^[7]驱动。但这几种材料特殊,不易制备,且难以实现精准控制。

收稿日期:2019-05-29;修回日期:2019-06-25

作者简介:朱红秀(1970—),女,副教授,主要从事测试测量技术与仪器研究;孟庆博(1997—),男,主要从事电磁驱动仿生机器鱼研究;褚彦斌(1995—),男,硕士研究生,主要从事电磁驱动仿生机器鱼研究;宋高明(1993—),男,硕士研究生,主要从事电磁驱动仿生机器鱼研究;徐亮(1999—),男,硕士研究生,主要从事电磁驱动仿生机器鱼研究。

通讯作者:杜闯(1993—),男,硕士研究生,主要从事电磁驱动仿生机器鱼研究。

2) 加入驱动器驱动,主要包括液压^[8]、气压^[9]、电机^[10]和电磁^[11-12]等几种不同类型的驱动方式。但液压和气压驱动器及其配套设备的大体积问题、电机的耗能和噪音问题导致液压、气压、电机都不是仿生机器鱼理想的驱动装置。

电磁驱动器与电机及特种材料相比,具有结构设计简单,空间占有率较低,能量转换效率高的特点^[12]。故将其作为动力元件应用在仿生机器鱼领域,将为该领域引入新鲜血液。

1 电磁驱动原理

本文研究的机器鱼总体装配如图 1 所示,动力源为电磁驱动器,其结构如图 2 所示,电磁驱动器正常工作时始终处于通电状态,通过输入交流电压信号,使线圈从一侧极限位置摆动到另一侧极限位置来带动鱼尾页摆动。在进行瞬态仿真时,所加激励源为正弦电压,初始状态如图 2 左侧位置所示。

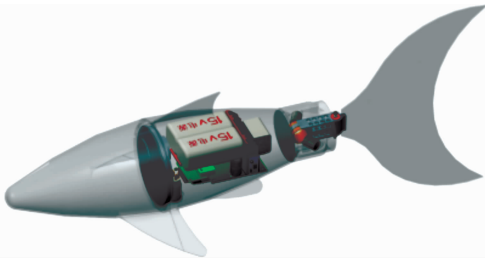


图 1 机器鱼总体装配示意图

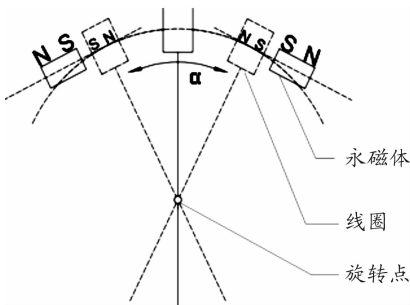
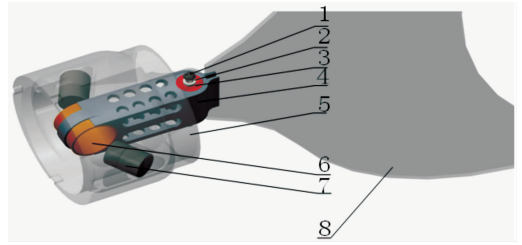


图 2 电磁驱动器结构示意图

当所通入正弦交流电处于正半周期时,线圈处于左侧极限位置,通入正方向的电流,左端磁化为 S 极右端磁化为 N 极,使该线圈与右侧永磁体相互吸引,而与左侧永磁体相互排斥,在二者合力作用下使永磁体推动线圈绕旋转轴顺时针摆动,摆动到右侧极限位置后,正弦交流电变换为负半周期,线圈通入反方向的电流,左端磁化为 N 极右端磁化为 S 极,使该线圈与左侧永磁体相互吸引,而与右侧永磁体相互排斥,在二者合力作用下使永磁体推动线圈绕旋转轴逆时针摆动。永磁体和线圈间气隙是电磁驱动器主要的工作气隙,该处磁场主要由永磁体和线圈磁场共同组成,在气隙磁场力作

用下线圈带动鱼尾绕旋转轴摆动,线圈装配如图 3 所示,从而控制鱼尾页实现往复摆动。



1. 中心轴;2. 尼龙垫片;3. 法兰轴承;4. 电磁驱动器动力输出臂;
5. 支撑外壳;6. 线圈;7. 永磁体;8. 鱼尾页

图 3 尾部装配示意图

2 建模仿真与实验

2.1 理论基础

2.1.1 电磁驱动器瞬态模型的建立

将线圈理想化为一个电感线圈,由电磁感应定律知电磁驱动器的电路方程为式(1)所示。

$$\mu = Ri + \frac{d\lambda}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

其中: μ 为线圈的输入电压; r 为线圈电阻; i 为线圈电流; λ 为磁链,包括永磁体磁通和线圈磁通; L 为电感。根据该电路方程,在瞬态仿真中可以对线圈绕组的输入电压和初始电流进行合理设置,在 Maxwell 电路模块 Simplorer 中建立电路模型如图 4 所示。

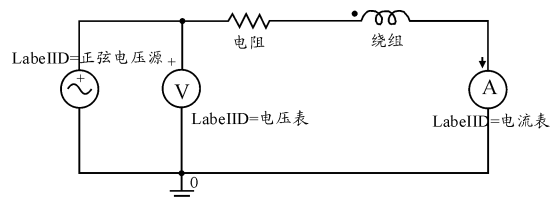


图 4 电磁驱动器电路

2.1.2 磁场理论基础

瞬态磁场中可以求解激励源为时变电压源或者电流源,且求解模型中存在具有一定规律运动的部件^[13]。瞬态磁场求解器中矢量磁位 A 满足的场方程为式(2):

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v - \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times A \quad (2)$$

式中, H_c 为永磁体矫顽力; v 为运动物体的速度; A 为矢量磁位; J_s 为源电流密度; σ 为电导率。

Ansoft Maxwell 2D 瞬态分析时使用一个参考框架,固定在模型某一部分使速度为零。运动物体固定在自身的坐标系,偏时间导数变成时间导数,因为运动方程为式(3):

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v - \nabla \times H_c \quad (3)$$

因此,矢量磁位在每一时间段有限元模型中每一点都可获得。

本文忽略位移电流和磁滞效应对模型的作用根据麦克斯韦基本方程得出磁场矢量位函数方程为式(4):

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v \quad (4)$$

式中: μ 为磁导率; A 为磁位矢量; J_s 为源电流密度; σ 为电导率, v 为线圈运动速度。

整体仿真时,认为磁场为开域,无限远处磁场为零,故选择气球边界条件。

2.1.3 动力学方程

永磁体的运动形式为摆动运动,线圈运动方程为式(5):

$$M - Mr = J\alpha \quad (5)$$

其中: M 为线圈的转动力矩; Mr 为鱼尾页在水中摆动产生的阻力; J 为线圈的转动惯量, α 为线圈的角加速度。该运动方程为瞬态仿真中负载力矩的设置提供了理论基础。

通过联立式(1)~(5),可以建电磁驱动器的瞬态场仿真模型,利用二维有限元仿真的方法进行分析求解,从而获得其瞬态特性。

2.2 Ansoft 中几何建模

电磁驱动器正常工作时,通电线圈在两块永磁体作用下绕旋转轴摆动,尾页的力与通电线圈所受力成正比关系,而通电线圈是在永磁体的带动下运动的,因此模型中可通过直接分析通电线圈在永磁场中的运动特性来近似分析电磁驱动器运动情况。

由于电磁驱动器磁路的特殊性,线圈摆动过程中摆动弧度较小,为了简化分析过程,只对线圈和两块永磁体在 AnsoftMaxWell2D 环境下以 z 轴为圆柱坐标轴建模,将线圈绕轴旋转运动简化为在运动区域(band)往复直线运动,其他部分在仿真分析过程中进行了省略,其简化模型如图 5 所示。

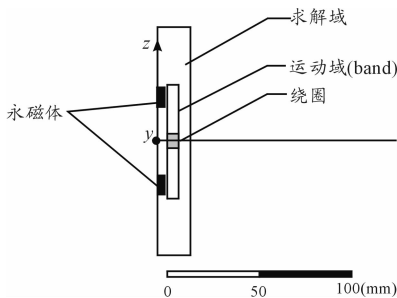


图5 电磁驱动器简化模型

线圈运动过程中的中间位置为原点 0 mm, z 轴正方向线圈运动方向为正,运动范围为 $-15 \sim 15$ mm。使用 if 函数表示鱼尾页在水中摆动产生的阻力,为了提高分析精度,对 band 区域以及线圈处进行网格加密,经多次实验对比,磁体材料选用 N35 型号烧结钕铁硼,线圈材料为铜。在软件中添

加对应材料后对永磁体产生的磁场进行仿真。

如图 6 为模型的磁场方向及磁场强度。可看出在永磁体内部磁场方向为 S 级指向 N 级且磁场强度最大;在永磁体外部磁场方向为 N 极指向 S 级,与现实情况相符,故模型建立正确。

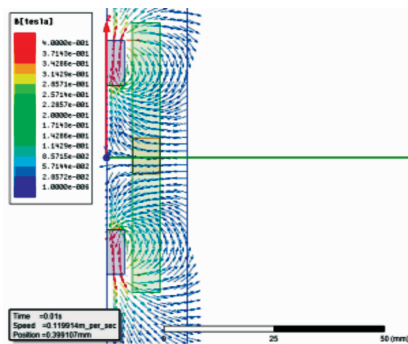


图6 电磁驱动器永磁场方向

2.3 运动仿真

在 AnsoftMaxwell 瞬态磁场中对电磁驱动器进行仿真分析,仿真电压、电流与位移曲线如图 7 所示。

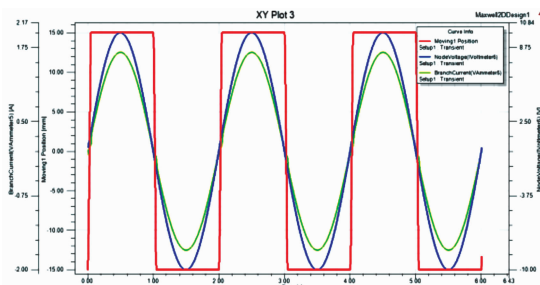


图7 10 V 电压下电压、电流与位移曲线

由图 7 可知,给线圈加载 10 V 交流驱动电压时,电流曲线同样呈现正弦状态,在 6s 的测试时间内保持稳定的变化过程,0.5 s 时电压、电流曲线上升至最高点且最高点的电压值为 10 V 电流值为 1.67 A,而后下降至最低点且最低点的电流值为 -1.67 A;位移曲线响应时间与电流曲线上升过程中最高点位置时间基本一致且在 $+15$ mm 与 -15 mm 之间周期性变化。在 Maxwell 软件中通电线圈在磁场中运动的仿真结果与实际运动情况相符,所以,电磁驱动器运动仿真模型建立正确。

3 电磁驱动器关键参数仿真分析

本文选择从气隙、线圈内径、线圈匝数、电压大小、电压频率五方面,由实际安装空间作为限制设置每个因素的五个水平并进行分析。各因素水平如表 1 所示。

为了使仿真次数减少,统计分析计算变得简单^[14],安排正交试验 $L_{25}(5^6)$,在仿真结果中将电磁力求平均值后得到 25 组仿真结果的各项参数极差值 R ,如表 2。

表1 电磁驱动器因素水平

水平	气隙/mm	内径/mm	匝/圈	电压/V	频率/Hz
1	10	6	200	2	0.5
2	12	7	400	4	1
3	14	8	600	6	1.5
4	16	9	800	8	2
5	18	10	1 000	10	2.5

表2 仿真结果极差值

极差值 R	气隙/ mm	内径/ mm	匝数/ 圈	电压/ V	频率/ Hz
力	3.325	3.012	3.243	2.400	1.326

由表2可以看出,气隙大小对磁场力影响最大,电源电压频率对电磁力大小影响最小,其他参数对通电线圈所受电磁力大小影响程度由大到小依次排列为:线圈匝数、线圈内径、电源电压。

由各参数对电磁力大小影响趋势图见图8可以看出,电磁驱动器在磁场中所受电磁力最优方案为:工作气隙18 mm,通电线圈内径6 mm,通电线圈匝数1 000匝,电源电压10 V,电源电压频率0.5 Hz。该组参数数值搭配未在正交试验设计的25种情况下,证明了试验设计具有正交性。在此搭配下仿真周期内,通电线圈受力数值曲线如图9中振幅最大者,最优值电磁力平均值为2.424 N。该数值大于所做的25组仿真中电磁力数值最大的组,该组仿真电磁力数值为1.907 N,该电磁力数值变化曲线如图9中振幅最小者。

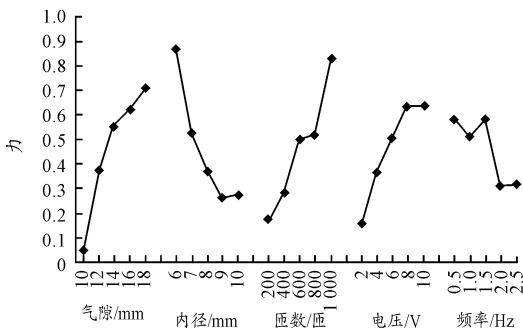


图8 各参数对电磁力大小影响趋势

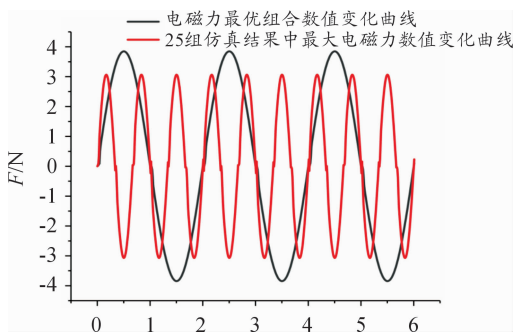


图9 电磁力变化曲线

4 结论

1) 在电磁驱动器工作过程中,工作气隙、线圈内径、线圈匝数、电源电压幅值、电源电压频率这五个参数分别对电磁驱动器通电线圈所受电磁力大小有不同程度的影响。

2) 工作气隙距离对电磁力的大小影响最大;电源电压频率高低对力的影响最小。

3) 根据力的趋势图可以得到:在仿真参数水平范围内,使电磁驱动器获得最大电磁力的参数搭配是:工作气隙18 mm,通电线圈内径6 mm,通电线圈匝数1 000匝,电源电压10 V,电源电压频率0.5 Hz。

参考文献:

- [1] LIU G, WANG A, WANG X, et al. A Review of Artificial Lateral Line in Sensor Fabrication and Bionic Applications for Robot Fish [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2016, 2016(5): 1-15.
- [2] WANG Y W, YAN Y C, LIU K, et al. Development and swimming experimental research on bionic stingray robot [J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(1): 106-112.
- [3] 邓鹏,李伟,王新华.水下无人平台“蜂群”作战体系研究[J].兵器装备工程学报,2018,39(8):8-10,47.
- [4] NGUYEN P L, LEE B R, AHN K K. Thrust and Swimming Speed Analysis of Fish Robot with Non-uniform Flexible Tail [J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(1): 73-83.
- [5] HUANG P H, WANG J. A New Design of Underwater Robot Fish System Using Shape Memory Alloy [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 187: 260-266.
- [6] NGUYEN Q S, PARK H C, BYUN D. Thrust Analysis of a Fish Robot Actuated by Piezoceramic Composite Actuators [J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8(2): 158-164.
- [7] ZHENG C. A review on robotic fish enabled by ionic polymer-metal composite artificial muscles: [J]. Robotics & Biomimetics, 2017, 4(1): 24.
- [8] ANDREW D M, CAGDAS D O, DANIELA R. Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators [J]. Soft Robotics, 2014(1): 75-87.
- [9] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists [J]. Angewandte Chemie, 2011, 123(8): 1930-1935.