

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311736

可重构磁耦合水下推进器的磁场分析及性能评估*

李亚鑫, 张冀, 王宇, 任诚

(西南石油大学电气信息学院 成都 610500)

摘要:在保证微小型水下机器人运动灵活的同时,降低矢量推进器机械复杂性,改善其防水密封问题,设计了一款可重构磁耦合的水下矢量推进器。基于磁耦合非接触式动力传输,解决了驱动电机与螺旋桨之间的防水问题;与此同时,采用重构机构在两自由度内改变螺旋桨位姿,实现了可重构矢量推进水下机器人的目的。在建立磁耦合磁场模型的基础上,通过 ANSYS Maxwell 磁场仿真与搭建的磁转矩测量装置,验证了磁场建模的正确性并分析了重构机构对磁耦合动力传输磁转矩的影响。在此基础上,进一步搭建了螺旋桨水下测力装置,评估了转速与推力以及不同重构角下最大矢量推力的变化情况。结果表明,推进器能够在 $[-15^\circ, 15^\circ]$ 两自由度可重构角范围内稳定地输出矢量推力。

关键词:水下机器人;矢量推进器;可重构磁耦合;磁感应强度

中图分类号: TH-39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 580.50

Magnetic analysis and performance evaluation of a reconfigurable magnetic coupling underwater thruster

Li Yaxin, Zhang Ji, Wang Yu, Ren Cheng

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: A reconfigurable magnetic coupling underwater vectored thruster was designed to reduce the mechanical complexity, improve the waterproof sealing performance of micro underwater robot and ensure the flexibility of movement. Based on the non-contact magnetic coupled power transmission, the problem of waterproof between the motor and propeller was solved. Meanwhile, the reconfigurable mechanism was used to change the propeller position within two degrees of freedom, which realizes the reconfigurable vector propulsion of underwater vehicle. After establishing the magnetic field model of magnetic coupling, the correctness of magnetic field modeling was verified and the influence of reconfigurable mechanism on the magnetic torque of the magnetic coupling power transmission was analyzed by both ANSYS Maxwell magnetic field simulation and built magnetic torque measuring device. On this basis, the propeller thrust measurement device was fabricated, and the changes of rotational speed, thrust and correspondingly maximum vector thrust under different reconstruction angles were evaluated. The results show that the thruster can output the vectored force stably for the two degrees of freedom reconfigurable angles ranged between -15° and 15° .

Keywords: underwater robot; vectored thruster; reconfigurable magnetic coupling; magnetic flux density

0 引言

随着人类对海洋认识、探索、开发研究的不断深入,无人水下潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)逐步在恶劣的海洋环境以及潜水员难以胜任的水下任务中受到广泛关注^[1-2]。为了高效地开展水下作业,UUV不

仅需要结合任务属性、行为决策、环境感知等相关技术提升智能化水平,还需要具备灵活的操控能力自主调节运动控制,以适应复杂多变的海洋环境。其中,水下推进方式是潜航器实现运动机动性的重要动力保障。

针对水下定点观测任务,潜航器为了实时调整位姿,可通过在机身不同方位配置多个固定螺旋桨构成过驱动方式,保证其运动的全向可控特性^[3-4]。而在长航程、大

收稿日期:2023-07-30 Received Date: 2023-07-30

* 基金项目:国家自然科学基金(51905457)、成都市科技局科普创作项目(2022-HM07-00046-SN)、成都市科普基地建设项目(2022-HM03-00044-SN)资助

深度的海洋环境监测或海底资源探索等应用领域,通常桨-舵驱动方式可使流线外形的潜航器在推进效率方面更占据优势^[5]。但倘若航行速度过小,作用于舵面的水流压力将不足以产生充足舵力,进而 UUV 难以稳定、精确地控制其航向和深度。面对低航速下桨-舵推进效率较低的问题,目前基于仿生类的水下推进器^[6]和多自由度矢量推进器^[7-8]也逐步成为了研究热点。鱼类经过漫长的自然选择,进化出了高推进效率和高机动性的运动模式。例如,中科院自动化研究所提出的 RobCutt^[9]、希腊克里特学院提出的 SQUIDBOT^[10]均采用波动长鳍驱动方式研发了仿鳃科鱼类的水下机器人。仿生水下推进方式众多(包括体摆式、鳍摆动、长鳍波动等),但受限于结构设计复杂度、制造材料和工艺等因素,其实际推进效果和期望性能还存在一定差距。与此同时,矢量推进器借助转向机构可依据控制量为水下机器人提供多维度推力,并且其操纵机器人转向的运动能力不完全依赖于航速。Li 等^[11]基于康达效应为微小型水下机器人设计了一款喷水式矢量推进器,该推进器在最少个数执行器作用下,利用产生的偏转高速射流可驱动机器人实现包括直行、旋转、上浮、下潜在内的多自由度运动。但该喷水式矢量推进器由于存在固有的矢量推力耦合特征,所以增大了水下机器人运动控制的难度。相较之下,山东大学徐瀚等^[12]设计的三自由度球面并联矢量推进机构能够灵活实现空间多维转动,且推力可达工作空间范围较大。尽管矢量推进器推力性能在不断提升,但其多采用机械密封形式,从而间接影响到水下机器人运行的可靠性。基于以上考量,一种非接触式的磁力耦合传动技术逐步应用于水下推进器中。Chocron 等^[13]设计的球形磁耦合推进器可实现推力单自由度的矢量偏转,并且文献[14]基于此原型,提出了一种球形径向磁耦合矢量推进器。以上各种磁耦合推进器不仅可解决机械密封的防水问题,还可实现过载保护,避免螺旋桨因水生植物缠绕发生的电机堵转问题。但 Chocron 团队提出的磁耦合推进器只能在一个方向改变矢量推力,且关于磁场理论的研究相对较少。

因此,为进一步提升水下机器人运动的灵活性,本文设计了一款可重构磁耦合的三自由度水下推进器。在为磁耦合动力传输结构建立磁场模型的基础上,本文借由 ANSYS Maxwell 磁场仿真和实物测试两种方式,验证了理论分析的正确性以及结构设计的合理性;最后,通过搭建螺旋桨推力测试装置评估了推进器实际推力性能,为设计机动性更强的水下机器人提供了有效动力保障。

1 磁耦合矢量推进器设计

螺旋桨矢量推进器的运动自由度可分解为桨叶自身旋转及其空间位姿的调整。本文提出的可重构磁耦合矢

量推进器具有三自由度,整体结构如图 1 所示。该推进器借助磁力耦合动力传输技术,不仅实现了电机输出力矩到螺旋桨的无接触式推力传递;通过重构机构还可以在两自由度球面调整推力矢量输出的方向。作为水下机器人动力核心装置,本节将分别介绍推力传输的磁耦合结构、矢量推力重构机构以及控制电路 3 部分内容。

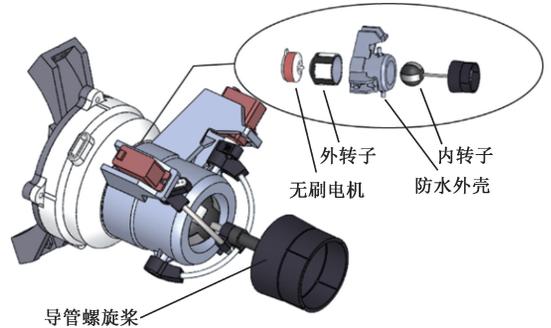


图 1 可重构磁耦合水下推进器

Fig. 1 Reconfigurable magnetic coupling underwater thruster

1.1 磁耦合动力传输结构

用于无接触式动力传输的磁耦合结构主要由内外转子组成,如图 2(a)所示。外转子呈圆筒形内嵌 4 片瓦形磁铁,由无刷电机直接驱动。内转子呈球形,中心圆孔固定连接螺旋桨轴,径向对称分布 4 片瓦形磁铁。如图 2(b)所示,内外转子的 4 对磁体径向充磁,并且相邻磁体充磁方向相反。当外转子在电机驱动下转动时,由于其密封于防水外壳内部,内转子通过磁耦合气隙传递力矩,进而联动螺旋桨同步旋转,在保障推力无接触式传输的同时,较好地实现密封效果。

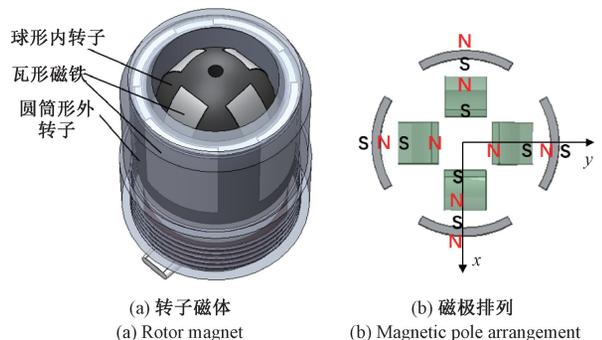


图 2 磁耦合转子

Fig. 2 Magnetic coupling rotors

1.2 矢量推力重构机构

考虑到水下机器人机动性要求推进器产生多维矢量推力,因此重构角度的范围以及矢量偏转的精度是推进器重构机构设计的关键。从加工工艺、难度以及成本综合考虑,本文设计了具有两自由度的并联重构机构,如

图3所示。舵机分别单独驱动两个十字交叠的弧形轨,轨道截面为圆形,在偏转过程中稳定性更强。与此同时,内嵌轴承的滑块能以较小的摩擦系数在每条弧形轨上自由滑动,并且通过滑块内的轴承约束螺旋桨轴位置。借由两个弧形轨和滑块组成的并联偏转机构,螺旋桨输出推力可在半球面实现两自由度的矢量输出,重构角范围最大可达 45° 。

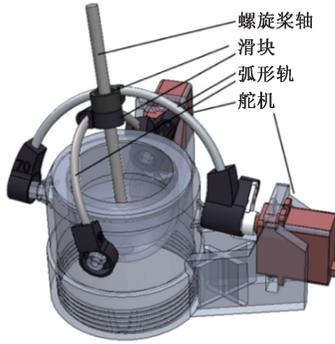


图3 矢量推力重构机构

Fig. 3 Reconfiguration mechanism of vectored thrust

1.3 控制电路

推进器以FOC(field oriented control)电子调速器和CAN总线通信为核心,构建了模块化、可扩展的控制电路,如图4所示。

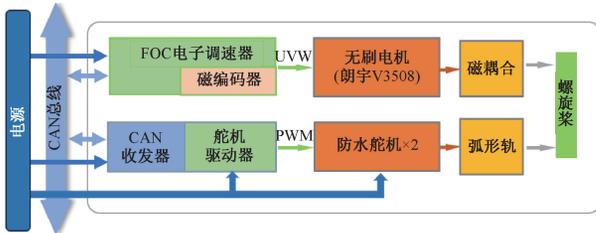


图4 控制电路示意图

Fig. 4 Control circuit diagram

磁耦合动力传输部分选取直径35 mm的直驱式无刷直流电机(V3508380KV 朗宇),以实现小型化、轻质化的推进器设计。结合FOC与集成编码器的DGMv2.0电子调速器(支持CAN总线通信),可使驱动螺旋桨的磁耦合转子实现闭环调速控制。在控制矢量推力的重构角时,驱动弧形轨的舵机由于需要具备较好的水密性,所以选取防水性较好的GW DS096舵机。为进一步增强电路的扩展性,本文采用驱动器(GD32F303CCT6)将接收的CAN总线信号转换为PWM信号控制舵机。至此,磁耦合矢量推进器在综合平衡性能、制造难度、可靠性等前提下,保证了控制电路具备体积紧凑、模块化和可扩展的特征。

2 磁耦合的磁场模型

2.1 磁场建模

为理论分析磁耦合转子的磁力,本文基于等效磁荷法对瓦形磁铁的空间磁场进行建模^[15]。磁体径向均匀充磁后,对外表现的面磁荷密度 ρ_{ms} :

$$\rho_{ms} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{n} 为永磁体表面外法线单位矢量, \mathbf{B}_0 为剩磁强度。

磁位和面磁荷密度关系:

$$\varphi_m = \oint_S \frac{\rho_{ms}}{4\pi\mu_0 r} dS + c \quad (2)$$

式中: r 表示为源点与场点之间的距离, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb/Am, S 为永磁体边界面, c 为常数取决于选择的磁位参考点。由于空间不存在自由电流,磁场强度和标量磁位存在如下关系:

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi_m = -\nabla \oint_S \frac{\rho_{ms}}{4\pi\mu_0 r} dS = -\oint_S \frac{\rho_{ms}}{4\pi\mu_0} \nabla \frac{1}{r} dS \quad (3)$$

在图5所示的圆柱坐标系下,将式(1)代入式(3)并结合 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$,可得外转子磁体在空间任一点磁感应强度:

$$\mathbf{B}(r, \theta, z) = \frac{B_0}{4\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} \int_{z_3}^{z_4} \frac{\mathbf{e}_r [r - r_i \cos(\theta - \theta_i)] + \mathbf{e}_\theta [r_i \sin(\theta - \theta_i)] + \mathbf{e}_z (z - z_i)}{[r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos(\theta - \theta_i) + (z - z_i)^2]^{3/2}} r_i d\theta_i dz_i \quad (4)$$

其中, B_0 为剩磁强度幅值, \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_θ 及 \mathbf{e}_z 分别为圆柱坐标系下单位方向矢量, r_i 为磁体距 Z 轴水平距离, z_3 、 z_4 为磁体底和顶面的 Z 轴坐标值, θ_3 、 θ_4 为磁体两侧角坐标。

考虑到外转子通过磁力带动内转子旋转,即依赖外转子磁体投影在内转子磁体表面的切向磁场,所以本文主要考虑外转子磁感应强度的切向分量^[16],即:

$$\mathbf{B}_\theta(r, \theta, z) = \frac{B_0 r_i^2}{4\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} \int_{z_3}^{z_4} \sin(\theta - \theta_i) G^3 d\theta_i dz_i \quad (5)$$

其中,

$$G = \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos(\theta - \theta_i) + (z - z_i)^2}} \quad (6)$$

计算 θ_i 的积分采用辛普森数值积分方法:

$$\mathbf{B}_\theta(r, \theta, z) = \frac{B_0 r_i^2 (\theta_4 - \theta_3)}{4\pi N_\theta} \sum_{n=0}^{N_\theta} S_\theta(n) \times \sin(\theta - \theta_i(n)) \int_{z_3}^{z_4} G^3 dz_i \quad (7)$$

其中, N_θ 为积分区间等分个数。

$$\theta_i(n) = \frac{n}{N_\theta}(\theta_4 - \theta_3) \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N_\theta) \quad (8)$$

$$S_\theta(n) = \begin{cases} 1/3, & n = 0 \\ 4/3, & n = 1, 3, 5, \dots \\ 2/3, & n = 2, 4, 6, \dots \\ 1/3, & n = N_\theta \end{cases} \quad (9)$$

等式右边关于 G 的定积分由积分表可写成:

$$\mathbf{B}_\theta(r, \theta, z) = \frac{B_0 r_i^2 \cdot (\theta_4 - \theta_3)}{4\pi N_\theta} \sum_{n=0}^{N_\theta} \sum_{k=3}^4 (-1)^{k+1} \times S_\theta(n) \sin(\theta - \theta_i(n)) I \quad (10)$$

其中,

$$I = \begin{cases} \frac{(z - z_k) G}{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos(\theta - \theta_i)}, & r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos(\theta - \theta_i) \neq 0 \\ -1, & \theta = \theta_i, r = r_i, z \neq z_k \\ \frac{-1}{2(z - z_k)^2}, & \theta = \theta_i, r = r_i, z = z_k \end{cases} \quad (11)$$

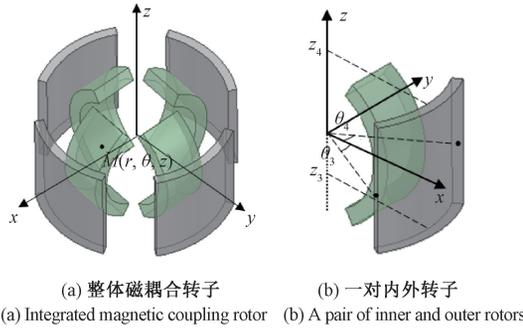


图 5 瓦形转子磁片
Fig. 5 Tile rotor magnet

2.2 磁耦合转矩求解

如图 6(a)、(b)所示,由于内转子磁铁内外表面不是圆柱面,所以内侧面磁荷任意 M 点投影到水平面 M' 点距 Z 轴距离 r 为变量,可用 r_{1f} 表示为:

$$r_{1f} = r' \sec(\theta') \quad (12)$$

其中,

$$r' = r_1 \cos\left(\arcsin\left(\frac{z}{r_1}\right)\right) \quad (13)$$

$$\theta' = \arctan\left(\frac{r_1 \tan(\theta_\rho)}{r'}\right) \quad (14)$$

式中: r' 、 θ' 为图 6(b) 所示内转子磁铁表面任意点到 YOZ 平面距离及水平面投影点角坐标。

同理内转子磁铁内侧面径向磁感应强度可写为:

$$\mathbf{B}_{1f} = \mathbf{B}_0 \cos\left(\arcsin\left(\frac{z}{r_1}\right)\right) \cos(\theta') \quad (15)$$

根据 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, 外转子内外两侧磁场强度叠加,可得

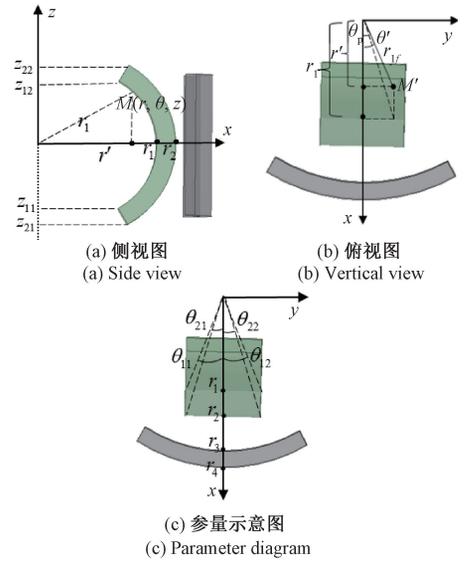


图 6 一对磁耦合转子
Fig. 6 A pair of magnetic coupling rotors

外转子磁铁磁场强度切向分量:

$$\mathbf{H}_\theta(r_{1f}, \theta, z) = \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \sum_{m=3}^4 (-1)^m \iint_{\theta_{3-3}^{\theta_{4-4}}} \frac{r_m^2 \sin(\theta - \theta_i) d\theta_i dz_i}{(r_{1f}^2 + r_m^2 - 2r_{1f}r_m \cos(\theta - \theta_i) + (z - z_i)^2)^{3/2}} \quad (16)$$

由转矩公式 $\mathbf{T} = \mathbf{R} \times \mathbf{F}$, 结合磁场定理, 可得磁力公式 $\mathbf{F} = \mathbf{H}_\theta q$, 其中 \mathbf{H}_θ 为外转子磁铁切向磁场强度分量, q 为内转子磁体表面磁荷。

因式(1)表明磁荷密度可用磁感应强度表示, 所以磁力公式可改为外转子磁铁切向磁场强度与内转子磁铁磁感应强度的乘积。

进一步可得一对内外转子磁铁磁耦合转矩^[17], 表示为:

$$\mathbf{T} = \int_{z_{11}^{\theta_{12}}} \int_{z_{11}^{\theta_{11}}} \mathbf{B}_{1f} r_{1f}^2 \mathbf{H}_\theta(r_{1f}, \theta, z) d\theta dz - \int_{z_{21}^{\theta_{22}}} \int_{z_{21}^{\theta_{21}}} \mathbf{B}_{2f} r_{2f}^2 \mathbf{H}_\theta(r_{2f}, \theta, z) d\theta dz \quad (17)$$

式中: z_{11} 、 z_{12} 、 θ_{11} 及 θ_{12} 如图 6(a)、(c)所示, \mathbf{B}_{2f} 、 r_{2f} 为内转子外侧面磁场分量及距 Z 轴距离, 可相应求解。

类似地, 两个舵机作用重构偏转时, 将上述公式进行变形, 利用重构后坐标进行转矩求解。

3 磁场仿真及实验验证

为分析推进器可重构磁耦合的性能, 本节不仅在 ANSYS Maxwell 软件中对磁场进行了瞬态仿真, 还搭建了推进器样机的磁转矩测试平台, 并分别对比了内外转子磁转矩的理论、仿真与实际测量结果, 在验证上文磁耦

合磁场建模正确性的同时,分析了不同矢量重构角对磁转矩的影响。

3.1 磁场分析

在矢量重构角为 0 的情况下,首先对磁耦合内外转子上的磁体进行瞬态磁场仿真。本文基于 Maxwell 2D 模块,依据如表 1 所示的内外转子磁体结构尺寸及参数,建立其二维模型。与此同时,在 Maxwell 软件中设置 1 个包围模型的求解域,令求解类型为静磁场,边界条件为二维状态下的 Vector Potential。在无需添加激励源的情况下,永磁体设置为径向充磁。网格划分采用 Length Based Refinement,求解精度为 0.01。

表 1 转子磁体参数

Table 1 Parameters of the rotor magnet

参数	内转子磁体	外转子磁体
内径/mm	26	41
外径/mm	32.5	45
磁体高度/mm	10	25
气隙/mm		4.25
剩磁强度/T		1.18
对数		4
永磁材料		NdFeB35

外转子在不受电机驱动时,图 7 和 8 分别展示了磁耦合动力传输结构的磁场强度及磁感应强度云图。由于磁体内部导磁率较高,磁感线泄露较少,因此磁体内磁场强度相对较高。但在磁体边缘与空气接触的界面,泄漏到空气中的磁感线也相应增强了内外转子气隙之间的磁感应强度。

图 7 和 8 展示的内外转子磁体之间的磁场云图不仅是内外转子同步运动的前提,也间接表明了磁耦合动力传输结构设计的合理性。具体而言,图 9 是磁耦合内外转子间气隙一周内($r = 19 \text{ mm}$)的磁场强度幅值,其值随着角度呈周期性变化,最大为 191.4 kA/m 。

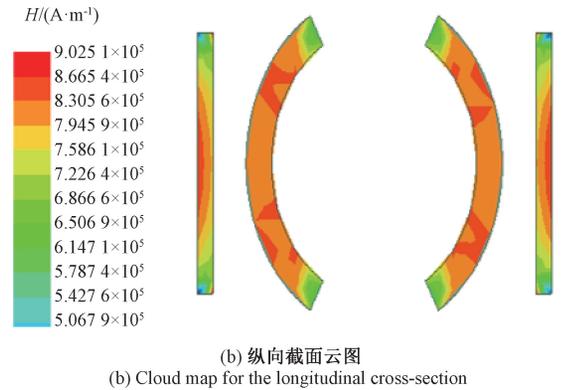
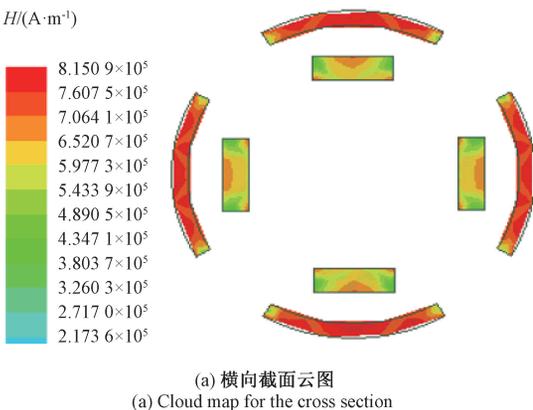


图 7 磁场强度云图

Fig. 7 Magnetic field intensity nephogram

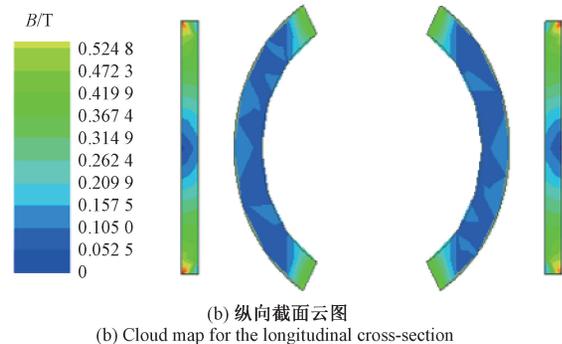
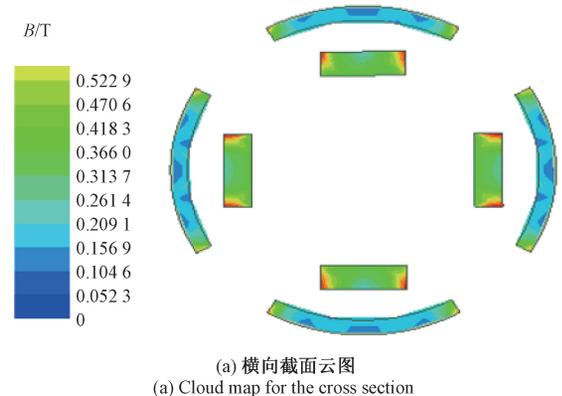


图 8 磁感应强度云图

Fig. 8 Cloud map for the magnetic flux density

3.2 磁耦合转矩分析

考虑到重构机构可能会影响磁耦合动力传输的推力矢量,本节将重点评估可重构磁耦合结构的内转子所受磁转矩的情况。通过为推进器样机搭建转矩测量装置并采集实际结果,分别与磁场建模计算的理论值以及 ANSYS Maxwell 3D 模块求取的仿真值进行对比。

图 10 展示了可重构磁耦合的内转子磁转矩测试装置。静态扭矩传感器底座固定于铝合金支架并始终保持水平位置不变,另一端与螺旋桨轴相连便于测量内转

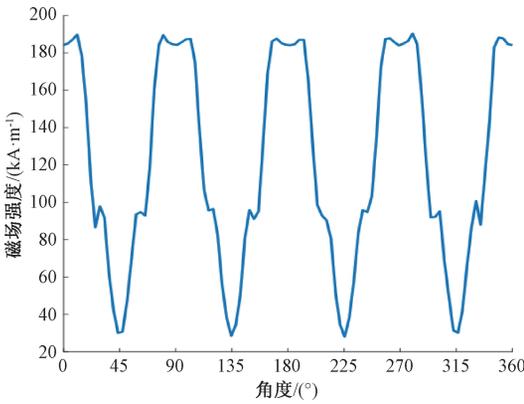


图 9 内外转子气隙处磁场强度

Fig. 9 Magnetic field intensity between rotors

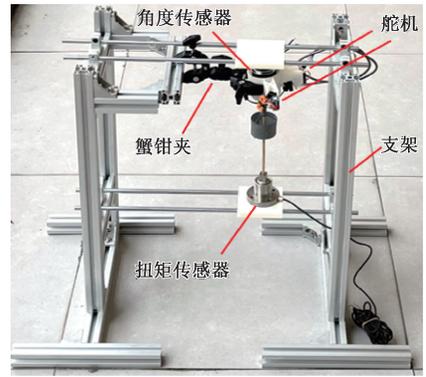


图 10 磁耦合转矩测试装置

Fig. 10 Magnetic coupling torque testing device

子所受转矩。多个蟹钳夹依次夹持,在固定推进器的同时,可跟随舵机产生的重构角调整推进器姿态,以保持螺旋桨轴与扭矩传感器的相对位置不变。此外,磁耦合的外转子与角度传感器直连,可手动适当旋转外转子,使其与内转子发生相对转动,进而内转子在磁耦合作用下产生转矩。实际测量过程中,矢量重构机构的两个舵机将使重构角在 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 范围内以 5° 为步长连续变化,并在不同推力矢量重构角下测量内转子所受转矩。该过程重复 5 遍,并对所测量结果取平均值作为磁耦合转矩。

推力矢量在不同重构角下,图 11 对比了内转子所受磁转矩的理论计算值、仿真值以及实际测量值,3 者变化趋势一致且基本重合,这证明了上文磁场建模的正确性。分析数据不难发现,重构角在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 范围内,转矩相对恒定保持在 $0.04 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右。但重构角在两自由度均趋向于极限位置时,内转子所受转矩将急剧下降,导致螺旋桨发生失步的概率增大。因此,为避免内转子失步,以上转矩特性说明,可重构磁耦合推进器应尽量避免在其两自由度重构角同时最大及其附近处输出矢量推力。

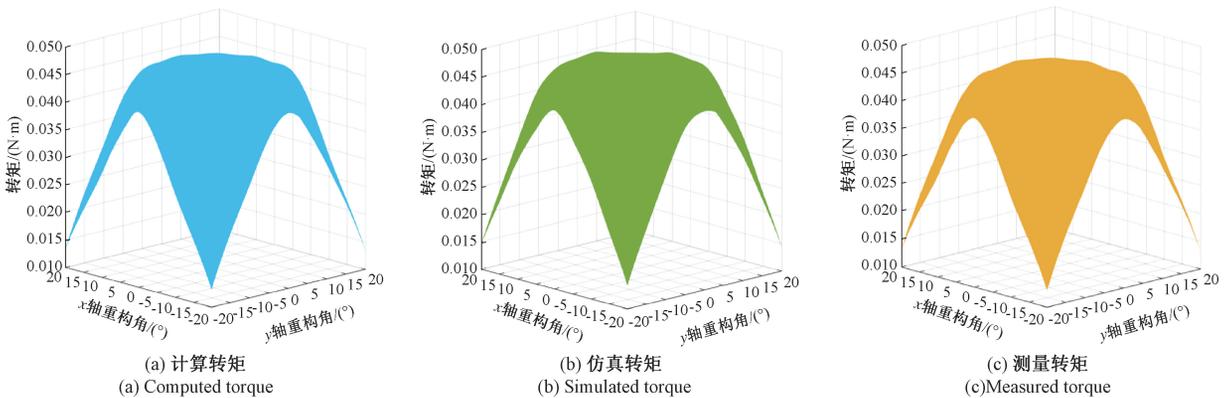


图 11 可重构磁耦合的转矩

Fig. 11 Reconfigurable magnetic coupling torque

4 推力性能测试

为进一步评估可重构磁耦合推进器的推力性能,本文通过 ANSYS 流体仿真和实物测试两种方式,对比了无矢量推力重构下不同转速的螺旋桨推力,以及有矢量重构下推进器的最大推力。

4.1 实验环境介绍

针对推进器的流体仿真实验,本文采用 ANSYS Workbench 平台对磁耦合推进器的两叶螺旋桨进行 CFD 仿真。将由 Solidworks 绘制的螺旋桨及导管模型导入 ANSYS FLUENT 模块中,并为其创建半径为 100 mm 的流体域,其中外部静流域设置为入口距导管 400 mm,出口距导管 700 mm。在划分网格时,螺旋桨表面设置网格尺度为 1 mm,螺旋桨导管网格尺度为 5 mm,外围流体域的

网格尺度为 15 mm。经过网格质量检查,其平均质量值为 0.833,总个数为 1 315 467。推进器在无推力矢量重构的情况下,为求取不同转速下螺旋桨产生的推力,仿真实验为螺旋桨设置了转速不同的旋转域,并基于 k-epsilon 湍流模型在瞬态压力求解器下获取推力数据。

实际测量螺旋桨推力的实验装置如图 12 所示。使用铝合金支架固定推进器并置于室内水池中。防水压力传感器固定于垂直光滑轨道上,并与推进器中心轴保持同一水平面。蟹钳夹一端固定推进器,另一端安装在铝方管上。铝方管左右两边各固定 1 个可在水平光滑轨道上滑动的滑块。当螺旋桨高速旋转产生推力使推进器挤压压力传感器时,滑块可最大限度减小水平光滑轨道上的静摩擦。

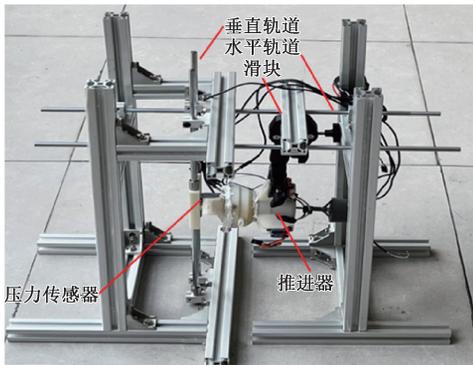


图 12 螺旋桨推力测试装置

Fig. 12 Propeller thrust measurement device

4.2 无矢量重构下推力测试

矢量推力重构角为 0 的情况下,根据外转子驱动电机的实际转速范围 0~2 400 r/min,每间隔 200 r/min 记录一次螺旋桨稳定输出的推力值,该过程重复 5 次。图 13 汇总了仿真与实际测量的平均推力与电机转速数据,根据螺旋桨推力公式 $T = C_T \rho n^2 D^4$,可关于转速对推力进行二次函数拟合。其中 C_T 为推力系数, ρ 为水的密度, n 为转速, D 为螺旋桨直径 ($D = 40$ mm)。拟合后仿真环境下螺旋桨的推力系数为 0.2,由实际测量数据所得的推力系数为 0.192。观察两组数据的误差发现,随着转速增加,仿真结果与实际测量结果之间的误差有逐渐增大的趋势,但不超过 4.4%。在最大转速 2 400 r/min 时,无矢量重构情况下的螺旋桨最大推力可达 0.774 N,相比之下仿真实验环境较理想,为 0.81 N,结果略大。但整体而言,以上数据验证了仿真与实际测量值的统一性。

4.3 矢量重构下最大推力测试

在实际最大推力测试过程中,采用舵机驱动板控制推进器上两个舵机重构螺旋桨的矢量输出,使其两自由

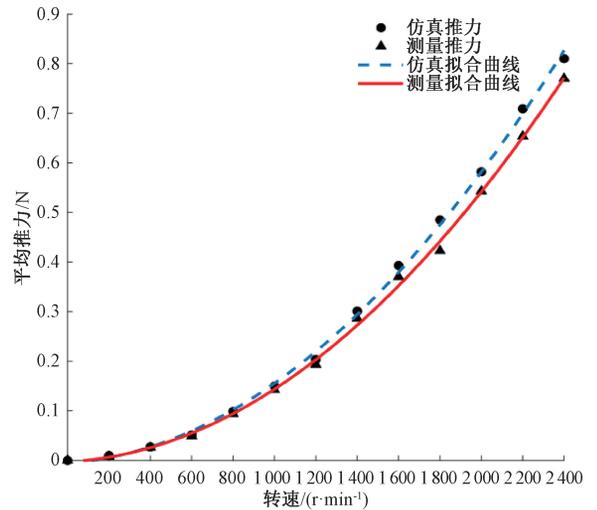


图 13 无矢量重构下的转速与推力关系

Fig. 13 The relation between speed and thrust without vector reconfiguration

度重构角分别在 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 范围内以 5° 为步长连续变化。图 14 展示了最大转速下推进器在不同重构角下的螺旋桨最大推力。考虑到图 12 所示的装置仅便于测量螺旋桨的水平推力分量,因此借助舵机具体旋转角度,可间接计算螺旋桨可重构矢量的推力大小。

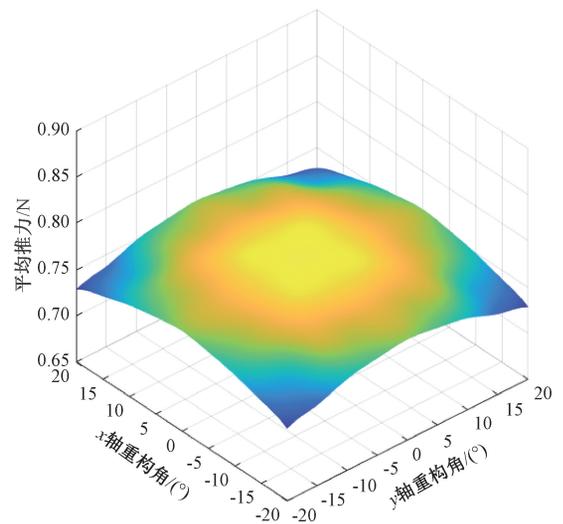


图 14 重构矢量推力

Fig. 14 Reconfigurable vectored thrust

由图 14 实验结果可得,最大推力在重构角为 $[-15^\circ, 15^\circ]$ 范围内近似维持在 0.75 N 以上,但随着两自由度重构角都趋于其极限位置,最大推力稍有衰减。进一步观察图 11 所得的磁耦合磁转矩,不难发现与图 14 所示数据有一定相关性。当螺旋桨输出矢量均处于重构角两自由度的极限位置附近,内转子由于所受磁耦合转矩急剧下降,螺旋桨在水阻力影响下与外转子会发生失

步现象,进而导致了输出矢量推力相对减小,针对此问题,后续研究将进一步考虑优化磁耦合结构。

5 结 论

本文设计的推进器借助磁耦合以及重构机构不仅可解决螺旋桨驱动电机的防水问题,还能使螺旋桨产生的推力在两自由度灵活调整矢量输出方向。为综合评估该推进器性能,本文基于等效磁荷法,不仅对磁耦合内外转子磁体产生的磁场及耦合转矩进行了理论建模,还利用 ANSYS Maxwell 仿真及实验装置对磁耦合建模的正确性进行了验证。针对螺旋桨在不同转速及可重构角下产生的推力,本文通过搭建螺旋桨测试装置获得了以下结论:矢量推力在 $[-15^\circ, 15^\circ]$ 可重构角度范围内推力性能良好,但当矢量重构机构两自由度均达到极限位置附近时,推力性能略有下降。因此,未来在关于水下机器人运动控制和推力分配相关研究中,需进一步考虑如何降低推进器矢量输出固有特性为机器人控制带来的负面影响。

参考文献

- [1] ZEREIK E, BIBULI M, MISKOVIC N, et al. Challenges and future trends in marine robotics[J]. *Annual Review in Control*, 2018, 46: 350-368.
- [2] 黄琰,李岩,俞建成,等. AUV 智能化现状与发展趋势[J]. *机器人*, 2020, 42(2):215-231.
HUANG Y, LI Y, YU J CH, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence [J]. *Robot*, 2020, 42(2):215-231.
- [3] THO D, LIONEL L, RENE Z, et al. Over-actuated underwater robots: Configuration matrix design and perspectives[J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7729.
- [4] VU M T, LE T H, THANH H L N N, et al. Robust position control of an over-actuated underwater vehicle under model uncertainties and ocean current effects using dynamic sliding mode surface and optimal allocation control[J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 747.
- [5] GALLIMORE E, TERRILL E, HESS R, et al. Integration and evaluation of a next-generation chirp-style sidescan sonar on the REMUS 100[C]. 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), IEEE, 2018: 1-6.
- [6] WANG R, WANG S, WANG Y, et al. Development and motion control of biomimetic underwater robots: A survey[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 52(2): 833-844.
- [7] 何彦霖,董明利,孙广开,等. 复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 219-226.
HE Y L, DONG M L, SUN G K, et al. Study on small-scaled amphibious robot with compound driving mechanism and its underwater motion control[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1):219-226.
- [8] 王宇,杜艾芸,李亚鑫. 两栖六足仿生机器人的水陆运动控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(11): 274-282.
WANG Y, DU AI Y, LI Y X. Study on the terrestrial and underwater motion control of the amphibious hexapod bionic robot [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(11):274-282.
- [9] WANG R, WANG S, WANG Y, et al. Vision-based autonomous hovering for the biomimetic underwater robot—RobCutt-II[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(11): 8578-8588.
- [10] SFAKIOTAKIS M, GLIVA R, MOUNTOUFARIS M. Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors [C]. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), IEEE, 2016: 496-503.
- [11] LI Y, LIU L, WANG Y, et al. Hydrodynamic analysis and motion control of the Coanda-effect jet thruster for underwater robots[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113096.
- [12] 徐瀚,李静,陈原,等. 基于螺旋理论的水下机器人矢量推进球面并联机构的运动学建模[J]. *机器人*, 2016, 38(6): 738-745.
XU H, LI J, CHEN Y, et al. Kinematic modeling of spherical parallel manipulator with vectored thrust function for underwater robot based on screw theory[J]. *Robot*, 2016, 38(6):738-745,753.
- [13] CHOCRON O, URBAIN P, LAURENT P. A validated feasibility prototype for AUV reconfigurable magnetic coupling thruster [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 642-650.
- [14] GASPAROTO H F, CHOCRON O, BENBOUZID M, et al. Magnetic design and analysis of a radial reconfigurable magnetic coupling thruster for vectorial AUV propulsion[C]. *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017:

2876-2881.

- [15] 张兴,方亮,李国丽,等. 无线内窥镜中圆柱永磁体建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2007(3):494-496,523.
ZHANG X, FANG L, LI G L, et al. Modeling and simulation of cylindrical permanent magnets in wireless endoscopes [J]. Journal of System Simulation, 2007(3):494-496,523.
- [16] 汤双清,沈洁,陈习坤,等. 基于磁荷模型的永磁体空间磁场的有限元分析与计算[J]. 三峡大学学报, 2003, 25(5): 452-455.
TANG SH Q, SHEN J, CHEN X K, et al. Finite element analysis and calculation of permanent magnet spatial magnetic field based on magnetic charge model[J]. Journal of Three Gorges University, 2003, 25(5):452-455.
- [17] RAVAUD R, LEMARQUAND V, LEMARQUAND G. Analytical design of permanent magnet radial couplings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(11):3860-3865.

作者简介



李亚鑫,2010年于重庆大学获得学士学位,2013年于电子科技大学获得硕士学位,2016年于日本国立香川大学获得博士学位,现为西南石油大学副教授,主要研究方向为仿生机器人,水下机器人等。

E-mail:liyaxin@swpu.edu.cn

Li Yaxin received his B. Sc. degree in 2010 from Chongqing University, received his M. Sc. degree in 2013 from University of Electronic Science and Technology of China, received his Ph. D. degree in 2016 from Kagawa University of Japan, now he is associate professor in Southwest Petroleum University. His main research interests include bionic robots, underwater robots, etc.



张冀,2017年于西南石油大学获得学士学位,现为西南石油大学电气信息学院硕士生,主要研究方向为磁耦合水下矢量推进技术。

E-mail:2916745611@qq.com

Zhang Ji received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2017 and is a master's student in the School of Electrical Engineering and Information of Southwest Petroleum University, with his main research interest is magnetic coupling underwater vector propulsion technology.



王宇(通信作者),2010年于重庆大学获得学士学位,2013年于西安交通大学获得硕士学位,2016年于日本国立香川大学获得博士学位,现为西南石油大学副教授,主要研究方向为水陆两栖仿生机器人。

E-mail:yuwang@swpu.edu.cn

Wang Yu (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2010 from Chongqing University, received her M. Sc. degree in 2013 from Xi'an Jiaotong University, received her Ph. D. degree in 2016 from Kagawa University of Japan, now she is associate professor in Southwest Petroleum University. Her main research interests include amphibious bionic robots.



任诚,分别于2003年、2006年和2018年获得电子科技大学学士学位、硕士学位和博士学位,现为西南石油大学副教授,主要研究方向为网络资源优化和计算机视觉。

E-mail:rencheng@swpu.edu.cn

Ren Cheng received her B. Sc. and M. Sc. degrees in electrical engineering and the Ph. D. degree in communication engineering from the University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), in 2003, 2006, and 2018, respectively. She is an associate professor in Southwest Petroleum University. Her research interests include network resource optimization, and computer vision.