

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201803162

一种 AUV 并联型矢量推进机构的姿态控制算法

王 瑞,吕建良,钟诗胜,屈华伟,王 君,陈 选

(哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋学院,山东 威海 264209)

摘 要: 为克服一些 AUV 矢量推进方式存在的作动器外置、自由度冗余等缺点,提出一种基于少自由度并联机构、作动器内部布置、满足两自由度矢量推进的结构方案. 方案采用 RS+2PRS 并联机构作为 AUV 推进系统的主体结构,并联机构的固定平台与 AUV 的尾部舱壁固联、机构的运动平台安装螺旋桨等推进器,将驱动部件和动力输入单元内置于 AUV 舱体内部,结构紧凑,刚度性能好,便于推进系统的密封与防护;通过推进机构的运动参数解耦分析可知,该推进机构的自由度为 2,独立运动参数为螺旋桨安装平台的进动角和章动角;可以采用两个移动副构件作为机构的驱动输入,建立推进机构欧拉姿态角与两路驱动参数之间的非线性映射模型;利用 MATLAB 和 ADAMS 的联合仿真分析,并搭建实物装置实现了螺旋桨姿态角的快速调整,从而实现 AUV 航向角和俯仰角的变化. 研究表明,该型两自由度推进机构结构可行,姿态控制算法正确有效,可以有效提升 AUV 的水下机动性和工作效能,为后续两自由度矢量推进机构的工程化应用奠定理论基础.

关键词: 矢量推进;少自由度并联机构;独立参数;结构设计;控制算法

中图分类号: U663.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)04-0001-05

Attitude control algorithm for a 2-DOF parallel vector propulsion mechanism on AUV

WANG Rui, LÜ Jianliang, ZHONG Shisheng, QU Huawei, WANG Jun, CHEN Xuan

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: To overcome the disadvantages of some vector propulsion methods, such as external actuators and redundant degrees of freedom, a 2 degree-of-freedom(2-DOF) vector propulsion mechanism scheme is introduced, which is based on limited-DOF parallel mechanism and the actuator can be arranged internally. The fixed platform of the RS+2PRS mechanism can be used as the rear bulkhead of AUV, and the movable platform of the mechanism as the mounting base for the propeller. The proposed mechanism has a compact structure, high stiffness, and is well sealed. The movement decoupling analysis shows that the two independent movable parameters of the mechanism are the precession angle and the nutation angle. The nonlinear mapping model can be built between the Euler attitude angles and the driving parameters of the mechanism. The joint simulation analysis was carried out using MATLAB and ADAMS, and the experiment equipment was built. By changing the relative positions of driving components in two prismatic pairs, the 2 DOF attitude adjustment of the AUV rear propeller can be achieved, and the AUV heading and pitch angles can be adjusted rapidly. Research shows that the physical design of the propulsion mechanism is reasonable, and the attitude control algorithm is correct. This propulsion mechanism can improve the maneuverability and capability of the AUV, and this research lays a theoretical foundation for the further 2 DOF vectored thrust engineering application.

Keywords: vector propulsion; limited-DOF parallel mechanism; independent parameter; structural design; control algorithm

随着陆地资源的减少,海洋资源的探测是 21 世纪的主要任务,水下航行器是探测海洋资源的主要工具,由于海底环境的复杂性,对航行器提出了高灵活性和可控性能好的要求^[1-4]. 目前国内外大多数

水下航行器采用以下几种方式:1)多推进器分布式布局.在航行器上的不同位置安装多个推进器来实现航行器的多自由度操纵运动,可以实现转向和俯仰的姿态调整,可操作性高,运动灵活,因而被广泛应用于机动性要求较高的水下航行器.例如瑞典萨伯公司推出的“双头鹰”水下排雷机器人,能够在零速度和后退运动时实现全向可控,但是有些螺旋桨推进器只有在航行器转向时才启用,平时大多闲置,造成了机构资源的浪费,而且破坏了航行器结构的

收稿日期:2018-03-30

基金项目:国家自然科学基金(51205088);山东省自然科学基金(ZR2017MEE062)

作者简介:王 瑞(1978—),男,博士,副教授;

钟诗胜(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者:钟诗胜,zhongss@hit.edu.cn

完整性,增大了水下航行的阻力^[5-6]. 2) 矢量喷水推进系统. 这种方法通过改变喷水推进器的高速射流方向来改变推力方向,融合了喷水式推进器和推力矢量技术的双重优点,该方法虽有推力损失,但结构简单、易于实现. 如新西兰 Hamilton 公司和瑞典 Kamewa 公司的各型喷水推进装置^[7],其控制主要是通过倒车导向装置和操舵导管的控制,产生不同方向水流的推力,从而使舰艇实现转向、俯仰等运动和姿态^[8],但这种系统多用于低自由度的装置,对于高自由度的 AUV 具有一定技术上的难度,尚无法大量应用^[9]. 3) 矢量螺旋桨推进系统. 采用单个螺旋桨,通过改变推进器的方向来改变推力方向,从而实现矢量推进. 如 Cavallo 等^[10-11]提出的一种基于空间连杆—万向节的全偏转式矢量推进装置;国内中船重工 701 所也提出了一种类似的全偏转式单回转体矢量推进系统^[12-13],这种结构存在自由度冗余,控制相对复杂;山东大学利用 3-RRR 球面并联机构搭载螺旋桨实现水下机器人的矢量推进^[14-15],华中科技大学利用 3RPS 并联机构,通过液压驱动实现了推进器姿态的矢量调整^[16],天津大学在三杆球面机构的基础上进行改进,对一款两自由度并联矢量推进器的运动学、动力学进行了相关理论分析,验证了该型推进器的可行性^[17]. 这 3 款推进器均采用了作动器外置方式,对推进装置的密封性提出了较高的要求.

基于上述各类水下航行器结构的优缺点,本文提出了一种两自由度、刚度性能良好^[18]、作动器可内置、结构简单的矢量推进机构,降低了航行器对水下密封、耐压以及电气性能的要求. 通过改变 2 个移动驱动构件的位置,即可实现 AUV 尾部螺旋桨的两自由度姿态调整,从而改变推力的方向,实现 AUV 航向角和俯仰角的快速调整.

1 矢量推进机构的结构设计

为实现螺旋桨的两自由度姿态(俯仰角和航向角)调整,采用如图 1 所示的两自由度并联式机构. 机构由 AUV 舱壁通过 2 条驱动分支($P_2R_2S_2$ 和 $P_3R_3S_3$)、1 条从动分支(R_1S_1),连接螺旋桨的安装平台,其中 P 、 R 、 S 分别为移动副、转动副、球铰, R_1S_1 为定长杆,与转动副 R_1 的轴线垂直,杆长为 l_1 , R_2S_2 和 R_3S_3 为定长杆,分别与转动副 R_2 和 R_3 的轴线垂直,杆长相同,分别为 l_2 、 l_3 . 为方便运动学分

析,建立舱壁坐标系 $S\{O-XYZ\}$,下文简称 S 系,以舱壁几何中心为坐标系原点,转动副 R_1 (轴线平行于 Y 轴)、移动副 P_2 和 P_3 (移动方向平行于 Z 轴),分别以 O 点为圆心, 120° 均布,坐标依次为:

$$\mathbf{P}_{R1}^S = [R, 0, 0]^T,$$

$$\mathbf{P}_{P2}^S = [-R/2, \sqrt{3}R/2, 0]^T,$$

$$\mathbf{P}_{P3}^S = [-R/2, -\sqrt{3}R/2, 0]^T,$$

式中 R 为转动副和移动副的分布半径.

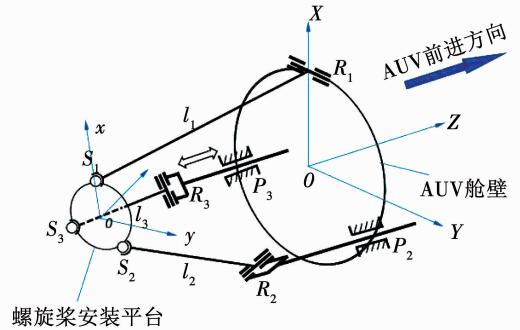


图 1 两自由度并联式矢量推进机构

Fig. 1 2-DOF parallel vector propulsion mechanism

建立螺旋桨安装平台坐标系 $M\{o-xyz\}$,下文简称 M 系,以安装平台中心为坐标系原点,球铰 S_1 、 S_2 和 S_3 分别以 o 点为圆心, 120° 均布,坐标依次为:

$$\mathbf{P}_{S1}^M = [r, 0, 0]^T,$$

$$\mathbf{P}_{S2}^M = [-r/2, \sqrt{3}r/2, 0]^T,$$

$$\mathbf{P}_{S3}^M = [-r/2, -\sqrt{3}r/2, 0]^T,$$

式中 r 为球铰分布半径.

作为矢量推进机构,该机构的驱动关节仅为移动副 P_2 和 P_3 ,可由位于 AUV 舱壁内侧的执行系统控制,提供螺旋桨两自由度姿态运动,同时避免了作动器外置于恶劣的海水环境中.

2 推进机构的运动参数分析

由于螺旋桨安装平台的运动参数较多且参数之间存在运动耦合,需先进行运动参数间的解耦.

为了方便描述推进机构螺旋桨安装平台 M 系的姿态,采用 Euler 姿态角表示,从舱壁坐标系 S 系重合的初始姿态出发,经过如下旋转次序:

- 1) 首先绕 M 系的 z 轴旋转角度 α ;
- 2) 然后绕 M 系的 y 轴旋转角度 β ;
- 3) 最后再次绕 M 系的 z 轴旋转角度 γ .

其旋转矩阵为

$$\mathbf{T}_{SM} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: α 为进动角, 为 M 系的 z 轴在 S 系的 XOY 平面内的投影与 x 轴的夹角, 表示螺旋桨安装平台相对于 S 系摆动的方位角; β 为章动角, 为 M 系 z 轴与 S 系 z 轴之间的夹角, 表示安装平台相对于 S 系, 在进动角 α 方向上的倾斜角度; γ 为自旋角, 为安装平台绕其 z 轴作自旋运动的角度, 由于前后两次分别绕 z 轴旋转了 α 和 γ , 故安装平台绕 z 轴的旋转角度为 $\varphi = \alpha + \gamma$.

设安装平台 M 系原点在舱壁 S 系中的坐标为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{S_2}^S &= \begin{bmatrix} -(r/2)(\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + (\sqrt{3}r/2)(-\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + x_o \\ -(r/2)(\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) + (\sqrt{3}r/2)(-\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) + y_o \\ (r/2) \sin \beta \cos \gamma + (\sqrt{3}r/2) \sin \beta \sin \gamma + z_o \end{bmatrix}, \\ \mathbf{P}_{S_3}^S &= \begin{bmatrix} -(r/2)(\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) - (\sqrt{3}r/2)(-\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + x_o \\ -(r/2)(\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) - (\sqrt{3}r/2)(-\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) + y_o \\ (r/2) \sin \beta \cos \gamma - (\sqrt{3}r/2) \sin \beta \sin \gamma + z_o \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

受转动副 R_1, R_2, R_3 的约束, 3 个球铰分别在 S 系的 $Y=0, Y=\pm\sqrt{3}X/3$ 个平面内运动, 则有:

$$\mathbf{P}_{S_1}^S(2) = 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{S_2}^S(2) = -\sqrt{3}\mathbf{P}_{S_2}^S(1), \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{S_3}^S(2) = \sqrt{3}\mathbf{P}_{S_3}^S(1), \quad (5)$$

式(4)、(5)相减, 可得

$$2x_o = r(c \alpha c \beta c \gamma - s \alpha s \gamma + s \alpha c \beta s \gamma - c \alpha c \gamma), \quad (6)$$

其中: $c = \cos, s = \sin$, 文中下同. 式(4)、(5)相加, 可得

$$2y_o = r(-2s \alpha c \beta c \gamma - 2c \alpha s \gamma). \quad (7)$$

将式(3)代入式(7), 得到:

$$c\beta(3c \alpha s \gamma + s \alpha c \gamma) + 3s \alpha c \gamma = c\beta(-2s \alpha c \gamma) - 3c \alpha s \gamma.$$

可以推导出对于任意一章动角 β , 需要满足:

$$\begin{cases} 3 \cos \alpha \sin \gamma = -3 \sin \alpha \cos \gamma, \\ 3 \sin \alpha \cos \gamma = -3 \cos \alpha \sin \gamma, \end{cases}$$

即

$$\gamma = -\alpha. \quad (8)$$

从式(8)可知, 螺旋桨安装平台绕 M 系的 z 轴的旋转角度为

$$\varphi = \alpha + \gamma = 0,$$

将式(8)代入式(6)、(7), 可得:

$$x_o = (r/2) \cos(2\alpha) (\cos \beta - 1), \quad (9)$$

$$y_o = (r/2) \sin(2\alpha) (1 - \cos \beta). \quad (10)$$

由于球铰 S_1 到舱壁坐标系中的转动副 R_1 为一定长度值 l_1 . 满足几何关系:

$$\|R_1 S_1\| = l_1. \quad (11)$$

设定:

$$A = r(\cos^2 \alpha \cos \beta + \sin^2 \alpha) + x_o - R,$$

$(x_o, y_o, z_o)^T$, 则螺旋桨安装平台的 3 个球铰在舱壁坐标系中的空间坐标依次为

$$\mathbf{P}_{S_i}^S = \mathbf{T}_{SM} \cdot \mathbf{P}_{S_i}^M + [x_o, y_o, z_o]^T, \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{S_i}^S = \begin{bmatrix} r(\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + x_o \\ r(\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) + y_o \\ -r \sin \beta \cos \gamma + z_o \end{bmatrix},$$

$$B = r \sin \alpha \cos \alpha (\cos \beta - 1) + y_o,$$

利用式(11), 以及 $\mathbf{P}_{S_i}^S$, 可得

$$z_o = r \cos \alpha \sin \beta - \sqrt{(l_1)^2 - A^2 - B^2}. \quad (12)$$

从式(8)~式(10)、式(12)可知, 螺旋桨安装平台的空间位姿参数 α 和 β 是独立变量, 其余的 γ 、 x_o 、 y_o 、 z_o 均是独立变量 α 和 β 的非线性函数关系.

3 推进机构姿态控制算法

为实现螺旋桨姿态的两自由度控制, 需要建立螺旋桨安装平台的姿态参数 α 和 β 与机构的 2 驱动关节 P_2 和 P_3 运动量 $P_2 R_2, P_3 R_3$ 之间的映射模型.

假定螺旋桨安装平台的当前姿态角度为 α 和 β , 利用式(9)、(10)、式(12)即可获取螺旋桨的位置参数 $(x_o, y_o, z_o)^T$.

利用式(8)、式(1)、(2)即可获取螺旋桨安装平台的 3 个球铰在舱壁坐标系中的空间坐标 $\mathbf{P}_{S_i}^S (i=1, 2, 3)$. 如图 2 所示, 以驱动支链 $P_2 R_2 S_2$ 为例.

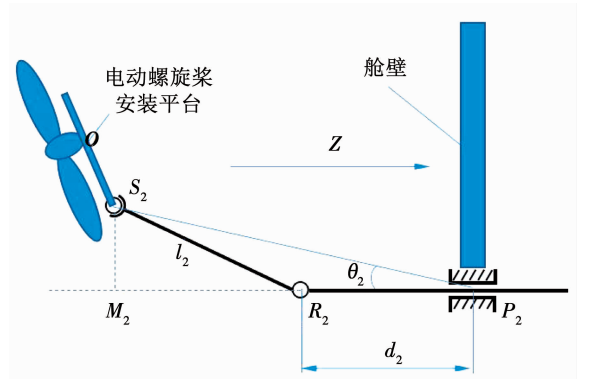


图2 驱动支链 $P_2 R_2 S_2$

Fig.2 Driving chain $P_2 R_2 S_2$

利用 $\boldsymbol{P}_{S_2}^S, \boldsymbol{P}_{P_2}^S = (-R/2, \sqrt{3}R/2, 0)^T$, 可得

$$\boldsymbol{S}_2 \boldsymbol{P}_2 = \boldsymbol{P}_{P_2}^S - \boldsymbol{P}_{S_2}^S.$$

$\boldsymbol{S}_2 \boldsymbol{P}_2$ 的投影量 $M_2 P_2, M_2 S_2$ 依次为:

$$M_2 P_2 = \boldsymbol{S}_2 \boldsymbol{P}_2 \cdot [0, 0, 1]^T = (\boldsymbol{P}_{P_2}^S - \boldsymbol{P}_{S_2}^S) \cdot [0, 0, 1]^T,$$
$$M_2 S_2 = \sqrt{(\boldsymbol{S}_2 \boldsymbol{P}_2)^2 - (M_2 P_2)^2}.$$

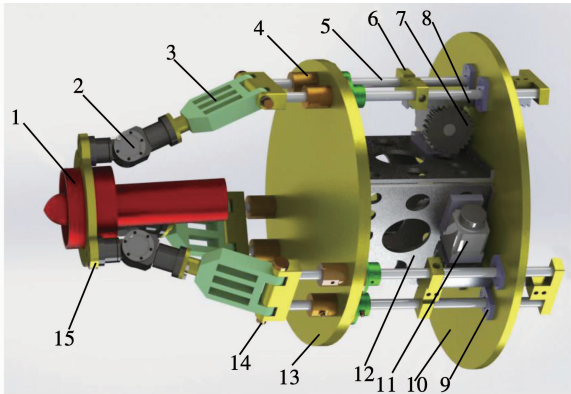
进而, 可以获取驱动支链 $P_2 R_2 S_2$ 的运动输入量为

$$d_2 = R_2 P_2 = M_2 P_2 - \sqrt{(l_2)^2 - (M_2 S_2)^2},$$

同理, 可以获取驱动支链 $P_3 R_3 S_3$ 运动输入量.

4 模拟仿真分析

为验证上述姿态控制算法的正确性, 建立两自由度矢量推进系统 3D 模型, 如图 3 所示.



1.螺旋桨; 2.球铰; 3.连杆; 4.密封装置; 5.光杆; 6.齿条安装座; 7.齿轮; 8.齿条; 9.带法兰的直线导轨; 10.前舱壁; 11.电机; 12.筋板; 13.后舱壁; 14.旋转副; 15.螺旋桨安装平台.

图 3 两自由度并联矢量式推进机构三维模型
Fig. 3 3D model for 2-DOF propulsion mechanism

把模型简化之后导入 ADAMS 运动仿真软件中并添加运动副约束, 如图 4 所示.

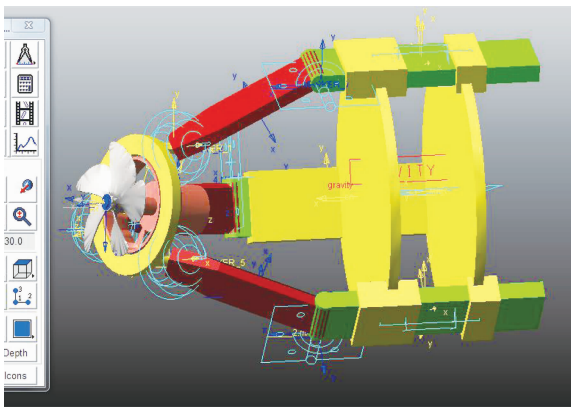


图 4 机构的仿真模型

Fig. 4 Simulation model for 2-DOF propulsion mechanism

进行算法的验证工作, 具体方法如下: 实现螺旋桨姿态角 $\beta = 30^\circ; \alpha = 0^\circ \sim 360^\circ$ 全向摆动, 步长 10° ; 结构参数 $l_1 = l_2 = l_3 = 140 \text{ mm}, r = 75 \text{ mm}, R = 150 \text{ mm}$. 利用上述算法借助 MATLAB 获取螺旋桨不同姿态角对应的驱动参数 $P_2 R_2, P_3 R_3$ 序列值见

表 1, 在 $\alpha = 0^\circ \sim 60^\circ$ 时, $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 以斜率为 $1/2$ 的趋势均匀增加; $\alpha = 60^\circ \sim 300^\circ$ 时, β 一直保持在 30° ; $\alpha = 300^\circ \sim 360^\circ$ 时, $\beta = 30^\circ \sim 0^\circ$ 以斜率为 $-1/2$ 的趋势均匀递减.

表 1 螺旋桨不同姿态角对应的驱动参数 $P_2 R_2, P_3 R_3$
Tab. 1 Driving parameters $P_2 R_2, P_3 R_3$ for different attitude angles

时间/s	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	$P_2 R_2/\text{mm}$	$P_3 R_3/\text{mm}$
0	0	0	0	0
1	10	5	-8.982 9	-10.841 6
2	20	10	-15.743 7	-22.662 0
3	30	15	-19.272 5	-33.621 6
4	40	20	-18.423 5	-41.909 9
5	50	25	-12.185 3	-46.031 2
6	60	30	0	-45.211 6
7	70	30	15.078 4	-37.569 8
8	80	30	29.481 5	-29.594 3
9	90	30	42.527 2	-22.424 7
...	...	...	...	...
17	170	30	52.648 1	37.569 8
18	180	30	45.211 6	45.211 6
19	190	30	37.569 8	52.648 1
...	...	...	...	...
29	290	30	-37.569 8	15.078 4
30	300	30	-45.211 6	0
31	310	25	-46.013 2	-12.185 3
32	320	20	-41.909 9	-18.423 5
33	330	15	-33.621 6	-19.272 5
34	340	10	-22.652 0	-15.743 7
35	350	5	-10.841 6	-8.982 9
36	360	0	0	0

并将驱动长度序列值作为 ADAMS 运动模型 的参数输入, 观测螺旋桨的运动姿态, 由图 5 可知: 在 $\alpha = 0^\circ \sim 60^\circ$ 变化时, $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 以斜率为 $1/2$ 的趋势均匀增加; $\alpha = 60^\circ \sim 300^\circ$ 时, β 一直保持在 30° 左右; 在 $\alpha = 300^\circ \sim 360^\circ$ 变化时, $\beta = 30^\circ \sim 0^\circ$ 以斜率为 $-1/2$ 的趋势均匀递减. 由此, ADAMS 仿真出的图线形状与 MATLAB 中的实验图形吻合, 可以验证算法的正确性. 在 $\alpha = 60^\circ \sim 300^\circ$ 变化时, β 的值会在 30° 上、下做很小的浮动, 这是由于 MATLAB 在计算杆长时时保留精度与 ADAMS 进行曲线拟合时所带来的误差引起的.

利用上述结构参数加工并装配出整体的实验平台, 实物装置如图 6 所示. 利用搭建的实验平台可以实现螺旋桨的可控姿态运动, 进一步验证了方案的可行性和控制算法的正确性.

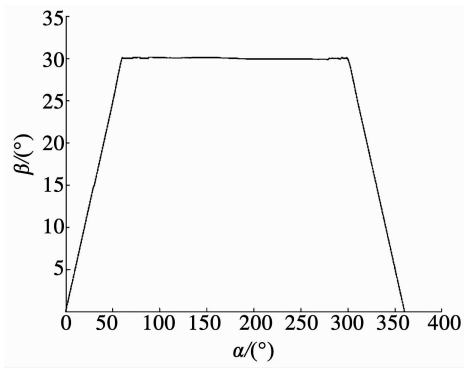


图5 所求得的 β 随 α 变化曲线

Fig.5 Variation of nutation angle with precession angle

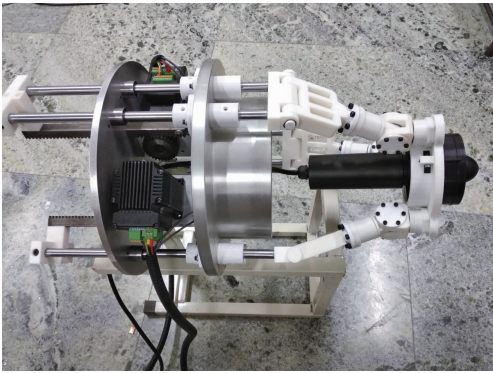


图6 搭建的实验平台

Fig.6 Experimental platform for 2-DOF propulsion mechanism

5 结 论

- 1) 针对现有矢量推进机构存在的不足,本文提出了一种作动器可以内置、结构简单的两自由度RS+2PRS 并联型矢量推进机构。
- 2) 结合推进机构自身结构特点,应用 ZYZ 型 Euler 角旋转矩阵,解决推进机构的运动参数耦合问题,并建立姿态控制算法,该方法与过程比较快捷。
- 3) 采用 MATLAB 和 ADAMS 联合仿真验证了机构设计与控制算法的正确性,搭建出实验平台,验证了整体方案的可行性。

参考文献

[1] 马伟峰, 胡震. AUV 的研究现状与发展趋势[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 10
MA Weifeng, HU Zhen. Current researches and development trend on AUV[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(6): 10. DOI:10.3969/j. issn. 1002-0640. 2008. 06. 003

[2] DUBROVIN F S, SCHERBATYUK A F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon; the results of simulation and sea trails[J]. Gyroscopy and Navigation, 2016, 7(2): 189. DOI:10.1134/s2075108716020024

[3] 张铭钧. 水下机器人[M]. 北京: 海洋出版社, 2000
ZHANG Mingjun. Underwater robot [M]. Beijing: China Ocean Press, 2000

[4] 彭学伦. 水下机器人的研究现状与发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2004(4): 43
PENG Xuelun. Underwater robot research status and development trend[J]. Robot Technique and Application, 2004(4): 43

[5] 方世鹏. 水下矢量推进螺旋桨装置设计与研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008

FANG Shipeng. Research on submarine thrust-vectoring propulsion device[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2008

[6] 高富东, 潘存云, 杨政, 等. 多矢量推进水下航行器 6 自由度非线性建模与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 93
GAO Fudong, PAN Cunyun, Yang Zheng. Nonlinear mathematics modeling and analysis of the vectored thruster autonomous underwater vehicle in 6-DOF motions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 93. DOI:10.3901/JME. 2011. 05. 093

[7] 赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 1
ZHAO Tao, LIU Mingyong, ZHOU Liangrong. A survey of autonomous underwater vehicle recent advances and future challenges [J]. Fire Control and Command Control, 2010, 35(6): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0640. 2010. 06. 001

[8] 王立祥. 喷水推进及喷水推进泵[J]. 通用机械, 2007(10): 12
WANG Lixiang. Water jet propulsion and jet pump [J]. General Machinery, 2007(10): 12. DOI:10.3969/j. issn. 1671-7139. 2007. 10. 003

[9] 张明宇, 林瑞霖, 王永生, 等. 泵喷的三维反问题设计及其与螺旋桨的敞水特性对比[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 690
ZHANG Mingyu, LIN Ruilin, WANG Yongsheng, et al. 3-D inverse design of pumpjet and comparison with opening water performance of original propeller [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 690. DOI:10.11990/jheu. 201602030

[10] CAVALLO E, FILARETOV V F, MICHELINI R C, et al. Path guidance and attitude control of a vectored thruster AUV [C]// Proceedings of the 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Manchester, UK: IEEE, 2011: 325. DOI: 10.1115/esda2004-58196

[11] CAVALLO E, MICHELINI R C, FILARETOV V F. Conceptual design of an AUV equipped with a three degrees of freedom vectored thruster[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 39(4): 365. DOI:10.1023/b:jint. 0000026081. 75417. 50

[12] 龚浩, 吴先用, 黄宇, 等. 一种矢量推进方式下的 AUV 数学建模[J]. 中国仪器仪表, 2015(8): 41
GONG Hao, WU Xianyong, HUANG Yu, et al. Mathematical modeling of a kind of AUV with vector thruster [J]. China Instrumentation, 2015(8): 41. DOI:10.3969/j. issn. 1005-2852. 2015. 08. 008

[13] 陈路伟, 周朝晖. 矢量推进方式下的自主式水下航行器纵向运动操纵性分析[J]. 船海工程, 2011, 40(2): 119
CHEN Luwei, ZHOU Zhaohui. Maneuverability analysis of vertical movement of the vectored thruster autonomous underwater vehicle [J]. Ship & Ocean Engineering, 2011, 40(2): 119. DOI:10.3963/j. issn. 1671-7953. 2011. 02. 033

[14] 郭楠. 水下机器人 3-RRR 矢量推进球面并联机构的研究[D]. 威海: 山东大学(威海), 2016
GUO Nan. Research on 3-RRR sphere parallel manipulator with vectored thruster for underwater vehicle [D]. Weihai: Shandong University(Weihai), 2016

[15] ALICI G, SHIRINZADEH B. Topology optimization and singularity analysis of a 3-SPS parallel manipulator with a passive constraining spherical joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 32(2): 215. DOI:10.1016/s0094-114x(3)00116-2

[16] BA Xin, LUO Xiaohui, SHI Zhaocun, et al. A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2013, 74: 133. DOI:10.1016/j. oceaneng. 2013. 10. 003

[17] 郑炎. AUV 两自由度并联矢量推进器设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2015
ZHENG Yan. Design and research of the 2-DOF parallel vectored thruster for AUV[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015

[18] 曲海波, 梁艺瀚, 方跃法, 等. 4-RRS 冗余球面并联机构的静力学与刚度分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 8
QU Haibo, LIANG Yihan, FANG Yuefa, et al. Statics and stiffness analysis of 4-RRS redundant spherical parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 8. DOI:10.3901/JME. 2015. 11. 008