



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116654232 A

(43) 申请公布日 2023. 08. 29

(21) 申请号 202310963372.3

(22) 申请日 2023.08.02

(71) 申请人 西南石油大学

地址 610000 四川省成都市新都区新都大道8号

(72) 发明人 李亚鑫 刘里宵 王宇 任诚  
陈金令

(74) 专利代理机构 成都慕川专利代理事务所  
(普通合伙) 51278

专利代理师 屈敏

(51) Int.Cl.

B63H 11/04 (2006.01)

B63C 11/52 (2006.01)

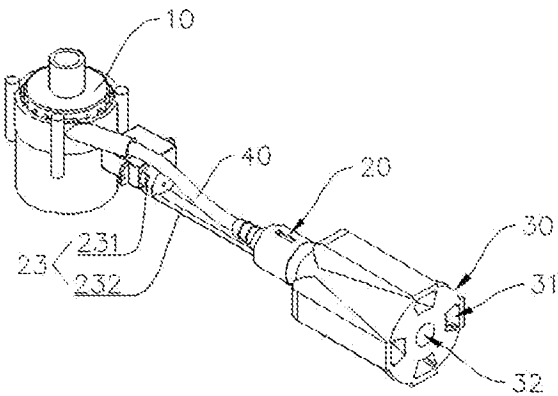
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

可控矢量射流推进器及水下机器人

(57) 摘要

本发明公开了一种可控矢量射流推进器及水下机器人,可控矢量射流推进器包括水泵、控制组件及特斯拉阀器件,水泵用于形成具有压力的射流,当需要使可控矢量射流推进器的推力朝向上、下、左、右的其中一个方向时,则控制外筒将位于该方向的第一开口打开,射流在第一开口的对侧形成附壁射流,并随之导入至对应的特斯拉阀通道,以单向的形式向前传输;当需要使推力朝向正前方时,则控制外筒关闭所有第一开口,射流从主通道直接导入至直通道,形成向前推动的动力;基于康达效应及特斯拉阀设计的可控矢量射流推进器具有结构简单、控制方便、射流稳定以及能量效率高的优点,安装方便的同时没有外部复杂的辅助机械结构,便于机电设计。



1. 一种可控矢量射流推进器,其特征在于,包括:

水泵,适于形成具有压力的射流;

控制组件,包括内筒、外筒及转动驱动机构,所述内筒的中部设置有主通道,所述主通道的出口端向外发散,所述内筒沿其周向均匀设置有四个第一开口,所述四个第一开口两两相对设置且与所述主通道均通过直管路连通,所述直管路的中轴线位于所述主通道的径向上,所述内筒包括第一端及第二端,所述第一端与所述水泵的输出端连通;所述外筒套设于所述内筒的外壁,并适于控制打开其中一个所述第一开口或关闭所有所述第一开口,所述转动驱动机构适于驱动所述外筒绕所述内筒同轴转动;及特斯拉阀器件,所述特斯拉阀器件的内部对应所述内筒的四个第一开口开设有相应的特斯拉阀通道,所述特斯拉阀器件的中部开设有直通道,所述直通道与所述特斯拉阀通道在所述特斯拉阀器件的入口端收拢且与所述主通道平滑连接。

2. 根据权利要求1所述的可控矢量射流推进器,其特征在于,所述外筒的外周设置有四个第二开口,所述第二开口与所述第一开口的大小相同。

3. 根据权利要求2所述的可控矢量射流推进器,其特征在于,相邻的所述第二开口在所述主通道间上的夹角为50-70度、100-110度、50-70度及140-150度,该四个夹角总和为360度。

4. 根据权利要求1所述的可控矢量射流推进器,其特征在于,所述主通道的出口端呈圆台状。

5. 一种水下机器人,其特征在于,采用权利要求1-4任一项所述的可控矢量射流推进器作为动力源。

6. 根据权利要求5所述的水下机器人,其特征在于,所述水下机器人采用以下布局优化方法得到,包括以下步骤:

根据自身推力以及矢量角度建立可控矢量射流推进器的数学模型,并以此建立衡量多个可控矢量射流推进器组成的推进系统性能的评价指标,以探究多个可控矢量射流推进器的最优组合,可控矢量射流推进器约束下的推力输出范围可以表示为

$$\Omega = \left\{ \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3 \mid \|\mathbf{u}_i\|_2 \leq u_{\max}, \sqrt{\frac{u_{iy}^2 + u_{iz}^2}{u_{ix}^2}} \leq \tan \theta_{\max}, u_{ix} > 0 \right\};$$

其中,  $\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T$ ,  $u$  为推进器推力,是可控矢量射流推进器的推力在推力坐标系T中的表示;  $\Omega$  表示推力可达集;  $\theta_{\max}$  为矢量射流最大偏转角度;  $\mathbb{R}$  为实数集;  $i$  为第  $i$  个推进器,  $i=1, 2, 3$ ;

以各个方向都能产生最大的推力为目标,体现在广义力可达集中就是最大化其内切超球的半径,因此整个推力布局就可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{P, N} \quad & \arg \max_r \left\{ r : \left\{ \mathbf{r} \in \mathbb{R}^6 \mid \|\mathbf{r}\|_2 \leq r \right\} \subseteq \Phi \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{n}_i\|_2 = 1, \forall i \in 1, \dots, n, \\ & P \in P \end{aligned};$$

其中,  $n_i \in \mathbb{R}^3$ , 表示第  $i$  个可控矢量射流推进器的方向矢量,  $\mathbb{P}$  为可控矢量射流推进器位置的可行集;  $\tau$  代指推力,  $r$  为广义力可达集内切超球的半径;  $P$  为安装位置集合,  $N$  为安装方向集合;

将所述推力布局简化, 以便在使用优化算法中求解全局最优解, 基于凸包的形式可将推力可达集线性化地表示为

$$\begin{aligned}\Omega'_i &= \left\{ u_i \in \mathbb{R}^3 \mid u_i = \sum_{j=1}^6 k_{ij} \zeta_j, \sum_{j=1}^6 k_{ij} \leq 1 \right\}; \\ &= \text{Conv}(\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6\}) \subset \mathbb{R}^3\end{aligned}$$

其中,  $\Omega'_i$  表示单个可控射流推进器简化后的推力可达集;  $\text{Conv}()$  表示顶点的凸包;  $k_{ij}$  表示系数;  $\zeta_j$  表示单个可控矢量射流推进器的推力可达顶点;  $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ , 表示自由度;

则整个推进系统的简化推力可达集表示为

$$\begin{aligned}\Omega' &= \left\{ u \in \mathbb{R}^9 \mid u_1 \in \Omega'_1, u_2 \in \Omega'_2, u_3 \in \Omega'_3 \right\} \\ &= \text{Conv} \left\{ s_j \mid s_j = \begin{bmatrix} \zeta_{\lceil \frac{j}{36} \rceil} \\ \zeta_{\lceil \frac{j}{6} \rceil} \\ \zeta_{1/6} \end{bmatrix}, j=1, \dots, 216 \right\} \subset \mathbb{R}^9;\end{aligned}$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  代表向右取整,  $/$  代表取余, 整个推进系统的简化推力可达集为  $6^3 = 216$  个点组成的凸包, 保凸运算可知凸集的交仍为凸集, 所以凸包  $\Omega'$  内的所有点都是可达的, 其顶点为各个推进器简化推力可达集  $\Omega'_i$  的顶点;

9维的整推进系统的简化推力可达集通过矩阵投影到6维广义力空间中得到简化广义力可达集, 记为  $\Phi'$ , 由投影不改变凸集的凸性可得  $\Phi'$  同样可以用凸包来表示

$$\Phi' = \text{Conv} \left\{ s_j \mid s_j = B \begin{bmatrix} \zeta_{\lceil \frac{j}{36} \rceil} \\ \zeta_{\lceil \frac{j}{6} \rceil} \\ \zeta_{1/6} \end{bmatrix}, j=1, \dots, 216 \right\} \subset \mathbb{R}^6;$$

简化广义力可达集为凸包的形式, 通过超正多面体来近似超球, 分别以推力可达集在个三维子空间的投影的最大内接正方体的边长最为优化目标, 即目标函数简化为

$$\begin{aligned}& \arg \max_r \left\{ r : \{ r \in \mathbb{R}^6 \mid \| r \|_\infty \leq r \} \subseteq \Phi' \right\} \\ & \arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \{ r_f \in \mathbb{R}^3 \mid \| r_f \|_\infty \leq r_f \} \subseteq \Phi'_f \right\} + \arg \max_{r_r} \left\{ r_r : \{ r_r \in \mathbb{R}^3 \mid \| r_r \|_\infty \leq r_r \} \subseteq \Phi'_r \right\};\end{aligned}$$

其中,  $\tau_f$  为三自由度推力;  $\Phi_f'$  为简化三自由度推力可达集;  $\tau_r$  为三自由度转矩;  $\Phi_r'$  为简三自由度转矩可达集;

考虑到参数的简化和单个可控矢量射流推进器的各方向推力分布在  $xOy$  平面的对称性, 选择将可控矢量射流推进器的位置和方向矢量都放在机体坐标系的  $xOy$  平面内, 从而将优化问题的参数减少到6个角度表示, 则目标函数简化为:

$$\theta = [\theta_{p1} \quad \theta_{p2} \quad \theta_{p3} \quad \theta_{n1} \quad \theta_{n2} \quad \theta_{n3}];$$

其中,  $\theta_{pi}$  代指当前射流与中心射流的水平面夹角,  $\theta_{ni}$  代指当前射流与中心射流的竖直面夹角, 三个可控矢量射流推进器产生当前射流时, 分别与自身的中心射流形成6个夹角;

进一步将推力布局分配问题可以简化为一个无约束优化问题:

$$\max_{\theta} \arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \left\{ \tau_f \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_f\|_{\infty} \leq r_f \right\} \subseteq \Phi_f' \right\} + \arg \max_{r_r} \left\{ r_r : \left\{ \tau_r \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_r\|_{\infty} \leq r_r \right\} \subseteq \Phi_r' \right\};$$

采用DF0无导数优化, 将目标函数的6个角度参数采用整数表示, 编码采用格雷码, 种群数量为40, 父母数量为20, 变异率10%, 适应度函数设计上增加惩罚项, 以限制  $p_i$  和  $n_i$  之间的夹角必须  $\leq 135$  度; 惩罚项表示为

$$-k \sum_{i=1}^3 \max(|\theta_{pi} - \theta_{ni}| - 135, 0);$$

其中,  $k$  为给定惩罚系数;

推力布局优化: 初始种群中个体由推力布局的6个简化参数组成范围为1-360之间的整数, 并且为随机选择; 推力布局的性能分析包含广义力可达集的计算、最大内接正方体的边长计算及惩罚项的计算, 用于优化算法的适应度函数评价; 如果达到适应度准则, 则保存推力布局优化的参数, 否则生成一组新的种群进行同样的操作; 其中, 广义力可达集的最大内接正方体采用二分法和convhull函数, 给定初始8个正方顶点与广义力可达集的顶点组合形成新的凸包再判断新的凸包和广义力可达集的凸包是否相同, 以得该正方体是否在广义力可达集中, 使用二分法重复这一过程直到找到一个满足精度的最大内接正方体; 解算优化问题, 得到最少推进器数量及布局。

7. 根据权利要求6所述的水下机器人, 其特征在于, 包括三个呈星形布局的可控矢量射流推进器, 相邻的所述可控矢量射流推进器的夹角为120度。

8. 根据权利要求7所述的水下机器人, 其特征在于, 还包括设置于三个所述可控矢量射流推进器的中央的中间仓。

9. 根据权利要求8所述的水下机器人, 其特征在于, 所述水下机器人的外部壳体采用卡门曲线型设计; 所述中间仓的顶部开设有连通水泵的吸入口; 所述中间仓对应所述可控矢量射流推进器分别设置有独立供电的电源, 三个所述电源呈对称分布。

## 可控矢量射流推进器及水下机器人

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水下机器人技术领域,具体涉及一种可控矢量射流推进器及水下机器人。

### 背景技术

[0002] 水下机器人在海洋工程中早有应用,但水下机器人的能源供应及其相应技术在近几年才取得突破性进展,这才使得自主式水下机器人(AUV)步入快速发展的轨道,水下机器人需要借助推进系统提供的动力来克服水的阻力行进,随着水下机器人技术的不断革新,其在严苛环境中的应用也越来越多,对于便携式水下航行器或微小型水下机器人而言,其应用场景的作业范围以及机动性、隐蔽性在很大程度上都取决于推进方式及控制算法。尤其是复杂水域环境的高压、低温及强干扰等极限条件,对水下潜航器及水下机器人的有效应用提出了较高要求,低功耗、长续航、高机动性、高稳定性以及抗干扰能力等都是设计时需要考虑的因素。但由于技术发展时间较短,新兴的推进方式随有其独特的优点,依然存在许多不足,例如仿生推进具有极高的效率以及较好地机动性,但实际应用难度较大,控制设计较为复杂;磁流体推进具有出色的静音效果,但技术尚不够成熟,且航速慢、成本高。因此目前常用的推进方式依然以螺旋桨和射流推进为主。传统的螺旋桨推进方式因其强大的实用性、可靠性以及简便性依然是水下推进方式的主流,但螺旋桨旋转过程中产生的噪音和尾迹容易被侦测到,增大了目标暴露的风险,同时螺旋桨产生的空泡效应不仅会降低推进效率,也会对螺旋桨本身造成损伤,相较之下,虽然射流推进有制造难度较大、成本高、倒车和结构优化难等缺点,但其最大的优点就是抗空泡能力强,基本不会出现被空泡腐蚀严重的情况,而且保护性能好、运行噪声低、吃水浅、利于环保。

[0003] 随着矢量技术的引入,依靠单一的推进器结合变向装置就可以改变推力大小和方向,产生矢量力矩,提高船舶和潜水器的操作性以及机动性,因此成为了近年来的推进技术研究热点。

[0004] 目前,常见的水下机器人的矢量推进装置主要分为机械结构类以及物理效应类。基于机械类的矢量输出较为稳定,但结构相对较为复杂,如华中国防科技大学采用射流作为主推进器,使用三自由度并联动力换向机构(3-RPS)产生矢量力矩;国防科技大学采用螺旋桨与万向节组合成矢量推进器;西工大采用可变涵道形成矢量射流。基于物理效应类的结构相对较为简单,但矢量可控性以及稳定性不足,如中科院提出了二次射流水下矢量推进器,但需要额外引入射流来控制主射流的偏转,变相增加了复杂度;同样中科院提出了基于充气曲面的康达附壁射流推进器,通过充气来调节曲面曲率,进一步控制射流的方向,实现了射流的多方向以及多角度控制,同时充气曲面的不易控性及射流对于充气膜的磨损使得该技术目前仍然处于理论层面。

### 发明内容

[0005] 本发明提供了一种可控矢量射流推进器及水下机器人,基于康达效应产生射流偏

转的原理,同时基于特斯拉阀的单向流通性以及加速效应,本发明的可控矢量射流推进器具有低功耗、结构简单且稳定的特点。

[0006] 本发明通过下述技术方案实现:

第一方面,本发明提供了一种可控矢量射流推进器,包括:

水泵,适于形成具有压力的射流;

控制组件,包括内筒、外筒及转动驱动机构,所述内筒的中部设置有主通道,所述主通道的出口端向外发散,所述内筒沿其周向均匀设置有四个第一开口,所述四个第一开口两两相对设置且与所述主通道均通过直管路连通,所述直管路的中轴线位于所述主通道的径向上,所述内筒包括第一端及第二端,所述第一端与所述水泵的输出端连通;所述外套套设于所述内筒的外壁,并适于控制打开其中一个所述第一开口或关闭所有所述第一开口,所述转动驱动机构适于驱动所述外筒绕所述内筒同轴转动;及

特斯拉阀器件,所述特斯拉阀器件的内部对应所述内筒的四个第一开口开设有相应的特斯拉阀通道,所述特斯拉阀器件的中部开设有直通道,所述直通道与所述特斯拉阀通道在所述特斯拉阀器件的入口端收拢且与所述主通道平滑连接。

[0007] 进一步地,所述外筒的外周设置有四个第二开口,所述第二开口与所述第一开口的大小相同。

[0008] 进一步地,相邻的所述第二开口在所述主通道间上的夹角为50-70度、100-110度、50-70度及140-150度,该四个夹角总和为360度。

[0009] 进一步地,所述主通道的出口端呈圆台状。

[0010] 第二方面,本发明提供了一种水下机器人,采用如上所述的可控矢量射流推进器作为动力源。

[0011] 进一步地,所述水下机器人采用以下布局优化方法得到,包括以下步骤:

根据自身推力以及矢量角度建立可控矢量射流推进器的数学模型,并以此建立衡量多个可控矢量射流推进器组成的推进系统性能的评价指标,以探究多个可控矢量射流推进器的最优组合,可控矢量射流推进器约束下的推力输出范围可以表示为

$$\Omega = \left\{ \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3 \mid \|\mathbf{u}_i\|_2 \leq u_{\max}, \sqrt{\frac{u_{iy}^2 + u_{iz}^2}{u_{ix}^2}} \leq \tan \theta_{\max}, u_{ix} > 0 \right\};$$

其中,  $\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T$ ,  $\mathbf{u}$  为推进器推力,是可控矢量射流推进器的推力在推力坐标系T中的表示;  $\Omega$  表示推力可达集;  $\theta_{\max}$  为矢量射流最大偏转角度;  $\mathbb{R}$  为实数集;  $i$  为第  $i$  个推进器,  $i=1, 2, 3$ ;

以各个方向都能产生最大的推力为目标,体现在广义力可达集中就是最大化其内切超球的半径,因此整个推力布局就可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{P,N} \arg \max_r \left\{ r : \left\{ \tau \in \mathbb{R}^6 \mid \|\tau\|_2 \leq r \right\} \subseteq \Phi \right\} \\ & \text{s.t.} \quad \|\mathbf{n}_i\|_2 = 1, \forall i \in 1, \dots, n, \\ & \quad \quad P \in \mathcal{P} \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{n}_i \in \mathbb{R}^3$ , 表示第  $i$  个可控矢量射流推进器的方向矢量,  $\mathcal{P}$  为可控矢量射流推进器位置的可行集;  $\tau$  代指推力,  $r$  为广义力可达集内切超球的半径;  $P$  为安装位置集合,  $N$  为安装方向集合;

将所述推力布局简化, 以便在使用优化算法中求解全局最优解, 基于凸包的形式可将推力可达集线性化地表示为

$$\begin{aligned} \Omega'_i &= \left\{ \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3 \mid \mathbf{u}_i = \sum_{j=1}^6 k_{ij} \zeta_j, \sum_{j=1}^6 k_{ij} \leq 1 \right\}; \\ &= \text{Conv}(\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6\}) \subset \mathbb{R}^3 \end{aligned}$$

其中,  $\Omega'_i$  表示单个可控射流推进器简化后的推力可达集;  $\text{Conv}()$  表示顶点的凸包;  $k_{ij}$  表示系数;  $\zeta_j$  表示单个可控矢量射流推进器的推力可达顶点;  $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ , 表示自由度;

则整个推进系统的简化推力可达集表示为

$$\begin{aligned} \Omega' &= \left\{ \mathbf{u} \in \mathbb{R}^9 \mid \mathbf{u}_1 \in \Omega'_1, \mathbf{u}_2 \in \Omega'_2, \mathbf{u}_3 \in \Omega'_3 \right\} \\ &= \text{Conv} \left( \left\{ \mathbf{s}_l \mid \mathbf{s}_l = \begin{bmatrix} \zeta_{\lceil \frac{l}{36} \rceil} \\ \zeta_{\lceil \frac{l}{6} \rceil} \\ \zeta_{l/6} \end{bmatrix}, l=1, \dots, 216 \right\} \right) \subset \mathbb{R}^9; \end{aligned}$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  代表向右取整,  $/$  代表取余, 整个推进系统的简化推力可达集为  $6^3 \times 216$  个点组成的凸包, 保凸运算可知凸集的交仍为凸集, 所以凸包  $\Omega'$  内的所有点都是可达的, 其顶点为各个推进器简化推力可达集  $\Omega'_i$  的顶点;

9维的整推进系统的简化推力可达集  $\Omega'$  通过  $B$  矩阵投影到6维广义力空间中得到简化广义力可达集, 记为  $\Phi'$ , 由投影不改变凸集的凸性可得  $\Phi'$  同样可以用凸包来表示

$$\Phi' = \text{Conv} \left( \left\{ \mathbf{s}_l \mid \mathbf{s}_l = B \begin{bmatrix} \zeta_{\lceil \frac{l}{36} \rceil} \\ \zeta_{\lceil \frac{l}{6} \rceil} \\ \zeta_{l/6} \end{bmatrix}, l=1, \dots, 216 \right\} \right) \subset \mathbb{R}^6;$$

简化广义力可达集为凸包的形式, 通过超正多面体来近似超球, 分别以推力可达

集在个三维子空间的投影的最大内接正方体的边长最为优化目标,即目标函数简化为

$$\arg \max_r \left\{ r : \left\{ \tau \in \mathbf{R}^6 \mid \|\tau\|_{\infty} \leq r \right\} \subseteq \Phi' \right\} \\ \arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \left\{ \tau_f \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_f\|_{\infty} \leq r_f \right\} \subseteq \Phi_{f'} \right\} + \arg \max_{r_{\tau}} \left\{ r_{\tau} : \left\{ \tau_{\tau} \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_{\tau}\|_{\infty} \leq r_{\tau} \right\} \subseteq \Phi_{\tau'} \right\};$$

其中,  $\tau_f$  为三自由度推力;  $\Phi_{f'}$  为简化三自由度推力可达集;  $\tau_{\tau}$  为三自由度转矩;  $\Phi_{\tau'}$  为简三自由度扭矩可达集;

考虑到参数的简化和单个可控矢量射流推进器的各方向推力分布在  $xOy$  平面的对称性,选择将可控矢量射流推进器的位置和方向矢量都放在机体坐标系的  $xOy$  平面内,从而将优化问题的参数减少到6个角度表示,则目标函数简化为:

$$\theta = [\theta_{p1} \quad \theta_{p2} \quad \theta_{p3} \quad \theta_{n1} \quad \theta_{n2} \quad \theta_{n3}];$$

其中,  $\theta_{pi}$  代指当前射流与中心射流的水平面夹角,  $\theta_{ni}$  代指当前射流与中心射流的竖直面夹角,三个可控矢量射流推进器产生当前射流时,分别与自身的中心射流形成6个夹角;

进一步将推力布局分配问题可以简化为一个无约束优化问题:

$$\max_{\theta} \arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \left\{ \tau_f \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_f\|_{\infty} \leq r_f \right\} \subseteq \Phi_{f'} \right\} + \arg \max_{r_{\tau}} \left\{ r_{\tau} : \left\{ \tau_{\tau} \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_{\tau}\|_{\infty} \leq r_{\tau} \right\} \subseteq \Phi_{\tau'} \right\};$$

采用DF0无导数优化,将目标函数的6个角度参数采用整数表示,编码采用格雷码,种群数量为40,父母数量为20,变异率10%,适应度函数设计上增加惩罚项,以限制  $\theta_{pi}$  和  $\theta_{ni}$  之间的夹角必须  $\leq 135$  度;惩罚项表示为

$$-k \sum_{i=1}^3 \max(|\theta_{pi} - \theta_{ni}| - 135, 0);$$

其中,  $k$  为给定惩罚系数;

推力布局优化:初始种群中个体由推力布局的6个简化参数组成范围为1-360之间的整数,并且为随机选择;推力布局的性能分析包含广义力可达集的计算、最大内接正方体的边长计算及惩罚项的计算,用于优化算法的适应度函数评价;如果达到适应度准则,则保存推力布局优化的参数,否则生成一组新的种群进行同样的操作;其中,广义力可达集的最大内接正方体采用二分法和convhull函数,给定初始8个正方顶点与广义力可达集的顶点组合形成新的凸包再判断新的凸包和广义力可达集的凸包是否相同,以得该正方体是否在广义力可达集中,使用二分法重复这一过程直到找到一个满足精度的最大内接正方体;解算优化问题,得到最少推进器数量及布局。

[0012] 进一步地,包括三个呈星形布局的可控矢量射流推进器,相邻的所述可控矢量射流推进器的夹角为120度。

[0013] 进一步地,还包括设置于三个所述可控矢量射流推进器的中央的中间仓。

[0014] 进一步地,所述水下机器人的外部壳体采用卡门曲线型设计;所述中间仓的顶部开设有连通水泵的吸入口;所述中间仓对应所述可控矢量射流推进器分别设置有独立供电的电源,三个所述电源呈对称分布。

[0015] 本发明与现有技术相比,具有如下的优点和有益效果:

本发明的可控矢量射流推进器包括水泵、控制组件及特斯拉阀器件,水泵用于形成具有压力的射流并进入控制组件的内筒中,当需要使可控矢量射流推进器的推力朝向上、下、左、右的其中一个方向时,则通过转动驱动机构控制外筒将位于该方向的第一开口打开,在流体的康达效应下,射流将在第一开口的对侧形成附壁射流,使其从主通道的远离第一开口的壁面向前,并随之导入至特斯拉阀器件的入口端,之后便顺着特斯拉阀的避免向前,进入对应的特斯拉阀通道,以单向的形式向前传输,得到射流驱动力;当需要使可控矢量射流推进器的推力朝向正前方时,则可控制外筒关闭所有第一开口,射流从主通道直接导入至特斯拉阀器件的直通道,形成向前推动的动力;基于康达效应及特斯拉阀设计的可控矢量射流推进器具有结构简单、控制方便、射流稳定以及能量效率高的优点,安装方便的同时没有外部复杂的辅助机械结构,便于机电设计。

### 附图说明

[0016] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解,构成本申请的一部分,并不构成对本发明实施例的限定。在附图中:

图1为本发明实施例可控矢量射流推进器的结构示意图;

图2为本发明实施例的附壁射流示意图;

图3为本发明实施例内筒及外筒的横截面示意图;

图4为本发明实施例的遗传算法解推力布局流程框图;

图5为本发明实施例的水下机器人结构示意图。

[0017] 附图中标记及对应的零部件名称:

100-可控矢量射流推进器;10-水泵;20-控制组件;21-内筒;211-主通道;212-第一开口;213-直管路;22-外筒;221-第二开口;23-转动驱动机构;231-舵机;232-连接杆;30-特斯拉阀器件;31-特斯拉阀通道;32-直通道;

200-中间仓;210-吸入口;220-电源。

### 具体实施方式

[0018] 正如背景技术所述,目前常见的水下机器人的矢量推进装置主要分为机械结构类以及物理效应类。基于机械类的矢量输出较为稳定,但结构相对较为复杂,如华中国防科技大学采用射流作为主推进器,使用三自由度并联动力换向机构(3-RPS)产生矢量力矩;国防科技大学采用螺旋桨与万向节组合成矢量推进器;西工大采用可变涵道形成矢量射流。基于物理效应类的结构相对较为简单,但矢量可控性以及稳定性不足,如中科院提出了二次射流水下矢量推进器,但需要额外引入射流来控制主射流的偏转,变相增加了复杂度;同样中科院提出了基于充气曲面的康达附壁射流推进器,通过充气来调节曲面曲率,进一步控制射流的方向,实现了射流的多方向以及多角度控制,同时充气曲面的不易控性及射流对于充气膜的磨损使得该技术目前仍然处于理论层面。

[0019] 基于此,发明人创造出了本申请的一种可控矢量射流推进器及水下机器人,以解决上述技术问题。

[0020] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下面结合实施例和附图,对本发明作进一步的详细说明,本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明,并不作

为对本发明的限定。

## 实施例

[0021] 第一方面,请参阅图1至图3,本发明提供了一种可控矢量射流推进器100,包括水泵10、控制组件20及特斯拉阀器件30。水泵10,适于形成具有压力的射流

控制组件20,包括内筒21、外筒22及转动驱动机构23。所述内筒21的中部设置有主通道211,所述主通道211的出口端向外发散,所述内筒21沿其周向均匀设置有四个第一开口212,所述四个第一开口212两两相对设置且与所述主通道211均通过直管路213连通,所述直管路213的中轴线位于所述主通道211的径向上,所述内筒21包括第一端及第二端,所述第一端与所述水泵10的输出端连通;所述外筒22套设于所述内筒21的外壁,并适于控制打开其中一个所述第一开口212或关闭所有所述第一开口212,所述转动驱动机构23适于驱动所述外筒22绕所述内筒21同轴转动。这里,控制组件20也可以称为康达效应阀,通过控制打开某一个第一开口212,使得射流在第一开口212的对侧形成附壁射流,从而调整推进器的射流朝向,从而调整推进方向,或者关闭所有的第一开口212,射流集束地从主通道211进入直通道32,形成向前的推力。这里,转动驱动机构23可以包括多种设备来驱动外筒22。例如,转动驱动机构23可以为舵机231,通过连接杆232与外筒22连接,来控制外筒22的转动。例如,进一步地,所述外筒22的外周设置有四个第二开口221,所述第二开口221与所述第一开口212的大小相同。例如,进一步地,相邻的所述第二开口221在所述主通道211间的夹角为50-70度、100-110度、50-70度及140-150度,该四个夹角总和为360度。例如,所述主通道211的出口端呈圆台状。

[0022] 特斯拉阀器件30,所述特斯拉阀器件30的内部对应所述内筒21的四个第一开口212开设有相应的特斯拉阀通道31,所述特斯拉阀器件30的中部开设有直通道32,所述直通道32与所述特斯拉阀通道31在所述特斯拉阀器件30的入口端收拢且与所述主通道211平滑连接。这里,需要说明的是,特斯拉阀通道31指的是具有特斯拉阀的功效,即具有单向流通的特点,有效避免射流造成的压差使外部流体流入导致的压力损失。这里,开设有相应的特斯拉阀通道31指的是,第一开口212的位置在圆周的哪一个方向,那么特斯拉阀就在相应的特斯拉器件的圆周的哪一个方向,使得内筒21内形成的附壁射流正好能够进入对应的特斯拉阀通道。

[0023] 本发明的可控矢量射流推进器100包括水泵10、控制组件20及特斯拉阀器件30,水泵10用于形成具有压力的射流并进入控制组件20的内筒21中,当需要使可控矢量射流推进器100的推力朝向上、下、左、右的其中一个方向时,则通过转动驱动机构23控制外筒22将位于该方向的第一开口212打开,在流体的康达效应下,射流将在第一开口212的对侧形成附壁射流,使其从主通道211的远离第一开口212的壁面向前,并随之导入至特斯拉阀器件30的入口端,之后便顺着特斯拉阀的避免向前,进入对应的特斯拉阀通道31,以单向的形式向前传输,得到射流驱动力;当需要使可控矢量射流推进器100的推力朝向正前方时,则控制外筒22关闭所有第一开口212,射流从主通道211直接导入至特斯拉阀器件30的直通道32,形成向前推动的动力,基于康达效应及特斯拉阀设计的可控矢量射流推进器100具有结构简单、控制方便、射流稳定以及能量效率高的优点,安装方便的同时没有外部复杂的辅助机械结构,便于机电设计。

[0024] 第二方面,本发明提供了一种水下机器人,采用如上所述的可控矢量射流推进器100作为动力源。

[0025] 在一些实施例中,所述水下机器人采用以下布局优化方法得到,包括以下步骤。通过优化不具方法,可以最大限度的发挥单一可控矢量射流推进器100的效能,减少推进器数量,从而实现以最简结构设计全驱动水下机器人这一目的。

[0026] S1、根据自身推力以及矢量角度建立可控矢量射流推进器100的数学模型,并以此建立衡量多个可控矢量射流推进器100组成的推进系统性能的评价指标,以探究多个可控矢量射流推进器100的最优组合,可控矢量射流推进器100约束下的推力输出范围可以表示为

$$\Omega' = \left\{ \mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3 \mid \|\mathbf{u}_i\|_2 \leq u_{\max}, \sqrt{\frac{u_{iy}^2 + u_{iz}^2}{u_{ix}^2}} \leq \tan \theta_{\max}, u_{ix} > 0 \right\};$$

其中,  $\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T$ ,  $u$  为推进器推力,是可控矢量射流推进器的推力在推力坐标系T中的表示;  $\Omega$  表示推力可达集;  $\theta_{\max}$  为矢量射流最大偏转角度;  $\mathbb{R}$  为实数集;  $i$  为第  $i$  个推进器,  $i=1,2,3$ ;

S2、以各个方向都能产生最大的推力为目标,体现在广义力可达集中就是最大化其内切超球的半径,因此整个推力布局就可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{P, N} \quad & \arg \max_r \left\{ r : \left\{ \boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6 \mid \|\boldsymbol{\tau}\|_2 \leq r \right\} \subseteq \Phi \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{n}_i\|_2 = 1, \forall i \in 1, \dots, n, \\ & P \in P \end{aligned};$$

其中,  $\mathbf{n}_i \in \mathbb{R}^3$ , 表示第  $i$  个可控矢量射流推进器的方向矢量,  $P$  为可控矢量射流推进器位置的可行集;  $\boldsymbol{\tau}$  代指推力,  $r$  为广义力可达集内切超球的半径;  $P$  为安装位置集合,  $N$  为安装方向集合;

S3、将所述推力布局简化,以便在使用优化算法中求解全局最优解,基于凸包的形式可将推力可达集线性化地表示为

$$\begin{aligned} \Omega'_j &= \left\{ \mathbf{u}_j \in \mathbb{R}^3 \mid \mathbf{u}_j = \sum_{j=1}^6 k_j \boldsymbol{\zeta}_j, \sum_{j=1}^6 k_j \leq 1 \right\}; \\ &= \text{Conv}(\{\boldsymbol{\zeta}_1, \boldsymbol{\zeta}_2, \boldsymbol{\zeta}_3, \boldsymbol{\zeta}_4, \boldsymbol{\zeta}_5, \boldsymbol{\zeta}_6\}) \subset \mathbb{R}^3 \end{aligned}$$

其中,  $\Omega'_j$  表示单个可控射流推进器简化后的推力可达集;  $\text{Conv}()$  表示顶点的凸包;  $k_j$  表示系数;  $\boldsymbol{\zeta}_j$  表示单个可控矢量射流推进器的推力可达顶点;  $j=1,2,3,4,5,6$ , 表示自由度;

S4、则整个推进系统的简化推力可达集表示为

$$\Omega' = \left\{ u \in \mathbb{R}^9 \mid u_1 \in \Omega'_1, u_2 \in \Omega'_2, u_3 \in \Omega'_3 \right\}$$

$$= \text{Conv} \left\{ s_l \mid s_l = \begin{bmatrix} \zeta \left\lceil \frac{l}{36} \right\rceil \\ \zeta \left\lceil \frac{l}{6} \right\rceil \\ \zeta_{1/6} \end{bmatrix}, l = 1, \dots, 216 \right\} \subset \mathbb{R}^9;$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 代表向右取整, $/$ 代表取余,整个推进系统的简化推力可达集为 $6^3=216$ 个点组成的凸包,保凸运算可知凸集的交仍为凸集,所以凸包 $\Omega'$ 内的所有点都是可达的,其顶点为各个推进器简化推力可达集 $\Omega'_i$ 的顶点。

[0027] S5、9维的整推进系统的简化推力可达集 $\Omega'$ 通过 $B$ 矩阵投影到6维广义力空间中得到简化广义力可达集,记为 $\Phi'$ ,由投影不改变凸集的凸性可得 $\Phi'$ 同样可以用凸包来表示

$$\Phi' = \text{Conv} \left\{ s_l \mid s_l = B \begin{bmatrix} \zeta \left\lceil \frac{l}{36} \right\rceil \\ \zeta \left\lceil \frac{l}{6} \right\rceil \\ \zeta_{1/6} \end{bmatrix}, l = 1, \dots, 216 \right\} \subset \mathbb{R}^6;$$

简化广义力可达集为凸包的形式,通过超正多面体来近似超球,分别以推力可达集在个三维子空间的投影的最大内接正方体的边长最为优化目标,即目标函数简化为

$$\arg \max_r \left\{ r : \left\{ \tau \in \mathbb{R}^6 \mid \|\tau\|_{\infty} \leq r \right\} \subseteq \Phi' \right\}$$

$$\arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \left\{ \tau_f \in \mathbb{R}^3 \mid \|\tau_f\|_{\infty} \leq r_f \right\} \subseteq \Phi'_f \right\} + \arg \max_{r_\tau} \left\{ r_\tau : \left\{ \tau_\tau \in \mathbb{R}^3 \mid \|\tau_\tau\|_{\infty} \leq r_\tau \right\} \subseteq \Phi'_\tau \right\};$$

其中, $r_f$ 为三自由度推力; $\Phi'_f$ 为简化三自由度推力可达集; $r_\tau$ 为三自由度转矩; $\Phi'_\tau$ 为简三自由度转矩可达集;

S6、考虑到参数的简化和单个可控矢量射流推进器100的各方向推力分布在 $xOy$ 平面的对称性,选择将可控矢量射流推进器100的位置和方向矢量都放在机体坐标系的 $xOy$ 平面内,从而将优化问题的参数减少到6个角度表示,则目标函数简化为:

$$\theta = [\theta_{p1} \quad \theta_{p2} \quad \theta_{p3} \quad \theta_{n1} \quad \theta_{n2} \quad \theta_{n3}];$$

其中, $\theta_{pi}$ 代指当前射流与中心射流的水平面夹角, $\theta_{ni}$ 代指当前射流与中心射流的竖直面夹角,三个可控矢量射流推进器产生当前射流时,分别与自身的中心射流形成6个夹角;

S7、进一步将推力布局分配问题可以简化为一个无约束优化问题:

$$\max_{\theta} \arg \max_{r_f} \left\{ r_f : \left\{ \tau_f \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_f\|_{\infty} \leq r_f \right\} \subseteq \Phi_{f'} \right\} + \arg \max_{r_t} \left\{ r_t : \left\{ \tau_t \in \mathbf{R}^3 \mid \|\tau_t\|_{\infty} \leq r_t \right\} \subseteq \Phi_{t'} \right\};$$

S8、采用DF0无导数优化，将目标函数的6个角度参数采用整数表示（为了交叉、变异的便利），编码采用格雷码，种群数量为40，父母数量为20，变异率10%，适应度函数设计上增加惩罚项，以限制 $\theta_{pi}$ 和 $\theta_{mi}$ 之间的夹角必须 $\leq 135$ 度。这里，优化目标函数的离散性无法得到其解析梯度，所以即使推力可达集是凸的，也难以采用常规的基于梯度的数值优化方法求解，即不需要目标函数和约束的梯度信息的优化求解算法，此处采用遗传算法。这里，DF0为Derivative-Free Optimization的简称，即无梯度优化算法。惩罚项表示为

$$-k \sum_{i=1}^3 \max(|\theta_{pi} - \theta_{mi}| - 135, 0);$$

其中， $k$ 为给定惩罚系数。

[0028] S9、推力布局优化：请参阅图4，初始种群中个体由推力布局的6个简化参数组成范围为1-360之间的整数，并且为随机选择；推力布局的性能分析包含广义力可达集的计算、最大内接正方体的边长计算及惩罚项的计算，用于优化算法的适应度函数评价；如果达到适应度准则，则保存推力布局优化的参数，否则生成一组新的种群进行同样的操作；其中，广义力可达集的最大内接正方体采用二分法和convhull函数，给定初始8个正方顶点与广义力可达集的顶点组合形成新的凸包再判断新的凸包和广义力可达集的凸包是否相同，以得该正方体是否在广义力可达集中，使用二分法重复这一过程直到找到一个满足精度的最大内接正方体；解算优化问题，得到最少推进器数量及布局。

[0029] 本发明的水下机器人的优化布局方法，推力布局基于遗传算法，通过优化三个矢量推进器的安装位置和角度，以达到最大的6自由度解耦广义推力，进而使得推进器能够更好地适配水下机器人，能够适应更为复杂的任务需求和水下环境。同时，基于最优推力布局模型的设计使得该水下机器人在保证其全驱动特性的属性下是最简洁的形态，减少了推进器冗余，使得整机更加轻量化，进而减少了推进器自身的消耗，提高了该型机器人的续航能力。再者，对称的布局结构设计提高了整机的稳定性，简化了动力学模型，便于高级运动控制器的设计以及实现。

[0030] 在一些实施例中，请参阅图5，水下机器人包括中间仓200及三个呈星形布局的可控矢量射流推进器100，相邻的可控矢量射流推进器100的夹角为120度。例如，进一步地，还包括设置于三个所述可控矢量射流推进器100的中央的中间仓200，中间仓200对应可控矢量射流推进器100设置有独立供电的电源220，起到了稳定重心的作用，同时分别驱动可控矢量射流推进器100，三个可控矢量射流推进器100呈120度布局分布，外形采用流线型对称设计，进一步能够使得重心、体心以及浮心三心合一，起到了简化其运动学和动力学模型的作用。

[0031] 例如，进一步地，请参阅图5，水下机器人的外部壳体采用卡门曲线型设计。这里，采用卡门曲线设计流体阻力系数小且耐压性能好。中间仓200的顶部开设有连通水泵10的吸入口210。例如，吸入口210保持一定的直接吸入距离，使其不会产生涡流力矩影响。所述中间仓200对应所述可控矢量射流推进器100分别设置有独立供电的电源220，三个所述电源220呈对称分布。例如，中间仓200的内部可用于放置控制电路板、能源装置以及检测装

置,保证密闭性的同时增强了该机器人的耐压性能以及安全性能,三块电源220呈对称分布,以便于保持整体重心处于中心略微偏下的位置,提高了整体的稳定性。例如,第二开口221可设置为鱼鳃式,鱼鳃式的开口设计在减小水流阻力的同时,确保内部可控矢量射流推进器100控制组件20外的水压与环境压强相同,从而保障康达效应及特斯拉阀器件30的正常工作。例如,在水泵10与控制组件20之间可通过导流管连接,该导流管可隔绝射流与中舱地相互影响,保障了中舱密闭性的同时使子机器人的重心趋近于中心,更有利于运动性能的调节。

[0032] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

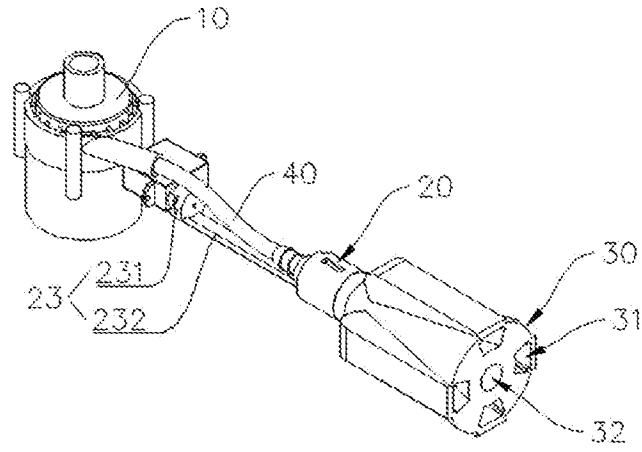


图 1

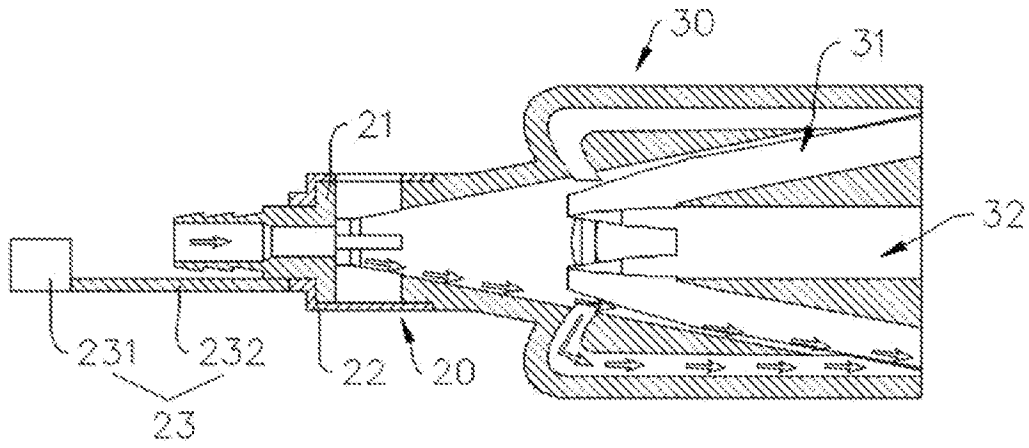


图 2

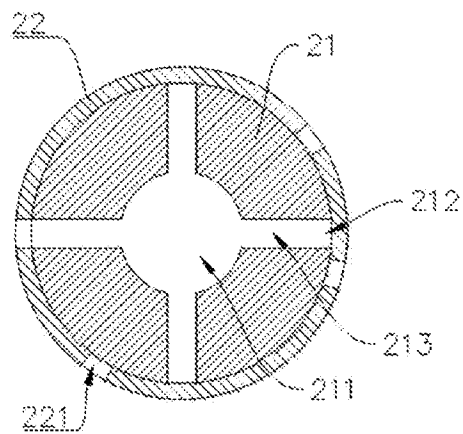


图 3

