ROV水动力性能及推力控制分配研究与仿真

赵言锋^{1,2,3}, 林明星^{1,2,3*}, 代成刚^{1,2,3}, 吴筱坚^{1,2,3}, 张东⁴, 管志光⁵

1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

3. 机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061;

4. 山东省科学院自动化研究所, 济南 250014;

5. 山东交通学院工程机械学院, 济南 250023

* E-mail: mxlin@sdu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-21; 接受日期: 2019-11-18; 网络版发表日期: 2020-02-26

山东省重点研发计划(产业关键技术)(编号: 2016CYJS02A01)、山东省高等学校“青创科技计划”(编号: 2019KJB014)和山东省高等学校科技计划(编号: J18KA038)资助项目

摘要 良好的推力控制分配策略是缆控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)机动性和作业安全性的保障, 也是ROV运动控制技术得以实现的必要条件。但现有的推力控制分配策略存在推力输出饱和或计算时间过长等问题, 导致ROV机动性欠佳。针对现存问题, 提出了一种混合优化目标推力控制分配策略。首先, 建立ROV驱动系统数学模型, 设计了一种混合优化目标推力控制分配函数; 再使用Fluent软件分析不同工况下导管螺旋桨的水动力性能, 得到推进器的推力模型, 从而确定混合优化目标推力控制分配函数的约束条件; 最后采用光滑牛顿法求解混合优化目标推力控制分配函数, 并与传统伪逆推力分配策略进行仿真对比。仿真结果表明, 混合优化目标推力控制分配策略能满足各推进器对推力的约束要求, 并能有效地利用约束范围内的推力集合, 且通过光滑牛顿法求解的总体误差小于0.0007 N m, 单步迭代次数在10步以内, 单步计算时间小于2 ms, 其具有精度高、实时性好、无推力输出饱和等优点。

关键词 ROV, 推力控制分配, 光滑牛顿法, 导管螺旋桨水动力性能

1 引言

缆控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)是海洋资源勘探与开采、海洋环境监测和海洋科学研究等领域中不可或缺的重大海洋装备之一。驱动控制系统是ROV运动控制系统的重要组成部分, 其性能直接影响ROV的机动性、稳定性和作业效率。而驱动系

统的性能好坏受推力螺旋桨水动力性能和推力控制分配算法优劣影响较大。因此, 对推力螺旋桨水动力性能的精确分析和实现推力最优分配控制是关于ROV研究的热点和关键问题之一。

ROV的驱动系统通常设计为过驱系统, 针对过驱系统, 控制分配算法能够利用冗余的推进器, 从无数满足控制映射关系的指令中选取最优解, 提高ROV

引用格式: 赵言锋, 林明星, 代成刚, 等. ROV水动力性能及推力控制分配研究与仿真. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 287–298

Zhao Y F, Lin M X, Dai C G, et al. Research and simulation of ROV hydrodynamic performance and thrust control distribution (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 287–298, doi: 10.1360/SST-2019-0251

的作业能力。目前,应用于ROV的推力控制分配策略主要包括:伪逆法及其改进方法^[1]、原始对偶法^[2]及其改进算法、基于数学规划的优化方法^[3]和智能优化算法^[4,5]等。伪逆法优势在于设计过程简单,可以快速得到有效解,但是伪逆法无法解决推力输出过饱和问题;原始对偶法优势在于理论简单,计算量较少,可以解决推力输出过饱和问题,但其产生推力突变大,易降低推进器寿命;序列二次算法优势在于运算速度快,可以较好提高推进器控制效率,因而被广泛应用于船舶定位系统^[6],但该方法通过与线性搜索算法相结合,更适用于小规模的非线性约束最优问题求解;智能优化算法优势在于对推力控制分配的求解过程中可以降低对目标函数和约束函数的要求,但是对于计算能力一般、内存空间有限的水下机器人系统来说,在线计算耗时较长,不能满足实时性要求。

导管螺旋桨因其具有良好的推力特性和高效的姿态调整功能而广泛应用于ROV驱动系统。目前,获取导管螺旋桨水动力性能的方法主要包括敞水实验法、升力面、面元法及其耦合计算的方法和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法。随着计算机性能的提高,通过求解RANS方程的CFD方法来研究导管螺旋桨的水动力特性被广泛使用。陈原等人^[7]结合RANS方程和 $k-\omega$ 湍流模型研究了Ka4-70+JD7704, Ka4-70+JD75和Ka4-70+NO.19A三种不同类型导管螺旋桨多种运动模式下的敞水性能。Hayati等人^[8]利用CFD方法,对水下机器人螺旋桨在不同攻角条件下的推力、转矩和推进效率进行了研究。顾强强等人^[9]采用Standard $k-\omega$, SST $k-\omega$, Standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ 和Realizable $k-\varepsilon$ 五种湍流模型对导管螺旋桨的敞水性能进行了计算,所得推力和转矩系数与实验值相差不超过5%。吕江^[10]采用RANS方程和 $k-\omega$ 湍流模型对Ka4-70+D1430导管螺旋桨的敞水值进行了计算,计算结果与实验值相差不超过6%。但是,目前通过CFD方法对导管螺旋桨水动力性能的研究多集中在单个导管螺旋桨,这不能反映实际情况下ROV中导管螺旋桨的水动力特性,所以研究考虑ROV影响下的导管螺旋桨的水动力性能是十分重要的。

针对某作业型ROV导管螺旋桨水动力性能和垂直面推力控制分配算法进行研究。首先,根据推进器安装特点建立垂直面驱动系统数学模型,设计适合ROV的混合优化目标推力控制分配函数;然后,分析了在

ROV影响下的导管螺旋桨的水动力性能,得到推进器的推力模型和推力约束条件;最后,使用光滑牛顿法进行求解,通过仿真验证了该推力控制算法的准确性、有效性。

2 ROV驱动系统建模及推力分配

为了进行ROV运动学分析,针对作业型ROV建立空间坐标系,如图1所示。依据国际拖拽水池会议(International Towing Tank Conference, ITTC)及造船和轮机工程学会(Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME)推荐的坐标系规范^[11]建立了两种右手坐标系:一种为固定坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ (简称“定系”),另一种为运动坐标系 $O-xyz$ (简称“动系”)。

2.1 驱动系统数学模型

ROV垂直面上配置了4台推进器,如图2所示,它实现了ROV的垂荡、横摇和纵摇三个自由度的运动,由于垂直面上推进器个数大于运动自由度,所以存在一个冗余的推进器,因此需要对其推力控制分配进行优化设计,实现在满足推进器约束条件下的推力输出最优控制。根据ROV驱动系统垂直推进器分布图,整理得4台推进器产生的推力、推力矩为

$$\begin{aligned} Z &= T_1^{\text{TH}} + T_2^{\text{TH}} + T_3^{\text{TH}} + T_4^{\text{TH}}, \\ K &= \frac{d_3}{2} T_1^{\text{TH}} - \frac{d_3}{2} T_2^{\text{TH}} + \frac{d_3}{2} T_3^{\text{TH}} - \frac{d_3}{2} T_4^{\text{TH}}, \\ M &= -d_1 T_1^{\text{TH}} - d_1 T_2^{\text{TH}} + d_2 T_3^{\text{TH}} + d_2 T_4^{\text{TH}}, \end{aligned} \quad (1)$$

图1 ROV运动空间坐标系定义示意图

Figure 1 The diagram of ROV motion space coordinate system.

图 2 垂直推进器分布图
Figure 2 Vertical propeller diagram.

式中, T_i^{TH} ($i=1, 2, 3, 4$) 为第 i 个推进器产生的推力.

整理为矩阵向量形式为

$$\begin{bmatrix} Z \\ K \\ M \end{bmatrix} = \mathbf{B} \times \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{d_3}{2} & -\frac{d_3}{2} & \frac{d_3}{2} & -\frac{d_3}{2} \\ -d_1 & -d_1 & d_2 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{TH} \\ T_2^{TH} \\ T_3^{TH} \\ T_4^{TH} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 伪逆法推力控制分配

此ROV垂直面推力系统中的推进器是固定不变的, 不存在推进器方位角优化的问题, 针对这种情况, 伪逆法可以简单快速地求解目标函数.

对于式(1)而言, 在满足式(3)的条件下要求最小, 可以看成优化问题进行处理, 优化目标函数为式(4), 边界条件为式(3).

$$\boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} = 0, \quad (3)$$

$$\min J = \boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau}, \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\tau} = [T_1^{TH} \ T_2^{TH} \ T_3^{TH} \ T_4^{TH}]^T$, 为推进器的目标输出

出力向量, $\boldsymbol{\tau}_d = [Z_d \ K_d \ M_d]^T$ 为运动控制器输出的期望力向量.

定义拉格朗日函数为

$$L(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}) = \boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\lambda}^T (\boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{B}\boldsymbol{\tau}). \quad (5)$$

依据局部最优定理理论及优化问题的边界条件, 求解可得

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1} \boldsymbol{\tau}_d, \quad (6)$$

式中, $\mathbf{B}^T (\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1}$ 称为伪逆, 简称MP伪逆.

但是伪逆法没有考虑复杂的约束问题, 不能有效利用约束条件内的推力和推力矩.

2.3 混合优化推力控制分配

伪逆法求解的前提是满足 $\boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} = 0$ 的条件, 但在一些特殊情况下, $\boldsymbol{\tau}$ 不存在可行解, 此时将期望 $\boldsymbol{\tau}_d$ 的误差作为优化目标之一, 由此得到混合优化目标推力控制分配函数, 如式(7)所示.

$$\min J = (1 - \theta) \|\mathbf{B}\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_d\|_2^2 + \theta \|\boldsymbol{\tau}\|_2^2, \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max},$$

式中, $\tau_{\min}$ 和 $\tau_{\max}$ 分别为推进器输出力的最小和最大约束; $0 < \theta < 1$ 为权值调节系数, θ 的取值必须足够大, 以保证求解的收敛速度, 同时足够小保证误差最小目标作为首要的优化目标^[12].

发现式(7)可以整理成标准二次规划形式, 如式(8)所示.

$$\min f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau}, \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{h}_E + \mathbf{A}_E \boldsymbol{\tau} = 0,$$

$$\mathbf{g}_I + \mathbf{A}_I \boldsymbol{\tau} \geq 0.$$

实际上, 矩阵 $\mathbf{W}$ 是对称正定矩阵, 所以上述混合优化目标推力控制分配问题是严格凸二次规划问题.

2.4 光滑牛顿法

光滑牛顿法是解决严格凸二次规划问题的有效方法, 可以在有限迭代次数内快速获得全局最优解, 满足ROV控制系统的要求. 本小节主要给出光滑牛顿法求解推力分配二次规划问题的步骤及求解中的重要计算公式, 具体理论推导过程参考相应文献^[13].

利用Kuhn-Tucker条件, 问题式(8)等价于:

$$\mathbf{H}_1(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} - (\mathbf{A}_E)^T \boldsymbol{\mu} - (\mathbf{A}_I)^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c} = 0, \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_2(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{h}_E + (\mathbf{A}_E)^T \boldsymbol{\tau} = 0, \quad (10)$$

$$\lambda \geq 0, \mathbf{g}_1 + \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\tau} \geq 0, \lambda^T [\mathbf{g}_1 + \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\tau}] = 0, \quad (11)$$

式中, $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 为拉格朗日乘子向量。

可以发现式(11)是一个8维的线性互补问题, 定义光滑FB函数:

$$\varphi(\varepsilon, a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2 + 2\varepsilon^2}, \quad (12)$$

其中, $\varepsilon > 0$ 是光滑参数。令

$$\boldsymbol{\Phi}(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}) = (\varphi_1(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}), \dots, \varphi_m(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}))^T, \quad (13)$$

其中,

$$\varphi_i(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}) = \lambda_i + \left[(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau} \right] - \sqrt{\lambda_i^2 + \left[(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau} \right]^2 + 2\varepsilon^2}, \quad (14)$$

式中, $(\mathbf{g}_1)_i$ 和 $(\mathbf{A}_1)_i$ 分别表示矩阵 $\mathbf{g}_1$ 和 $\mathbf{A}_1$ 的第*i*行。

记 $\mathbf{z} = (\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda})$, 则方程(9)和(10)等价于矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{z})$:

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}) = \mathbf{H}(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \mathbf{H}_1(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) \\ \mathbf{H}_2(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) \\ \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) \end{bmatrix} = 0. \quad (15)$$

计算整理得到 $\mathbf{H}(\mathbf{z})$ 的雅克比矩阵为

$$\mathbf{H}'(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{W} & -(\mathbf{A}_E)^T & -(\mathbf{A}_D)^T \\ 0 & \mathbf{A}_E & 0 & 0 \\ \mathbf{v} & \mathbf{D}_2(\mathbf{z})\mathbf{A}_1 & 0 & \mathbf{D}_1(\mathbf{z}) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中,

$$\mathbf{v} = \nabla_{\varepsilon} \boldsymbol{\Phi}(\varepsilon, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = (v_1, \dots, v_m)^T,$$

$$\mathbf{D}_1(\mathbf{z}) = \text{diag}(a_1(\mathbf{z}), \dots, a_m(\mathbf{z})),$$

$$\mathbf{D}_2(\mathbf{z}) = \text{diag}(b_1(\mathbf{z}), \dots, b_m(\mathbf{z})).$$

v_i , $a_i(\mathbf{z})$ 和 $b_i(\mathbf{z})$ 的定义如下:

$$v_i = -\frac{2\varepsilon}{\sqrt{\lambda_i^2 + \left[(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau} \right]^2 + 2\varepsilon^2}}, \quad (17)$$

$$a_i(\mathbf{z}) = 1 - \frac{\lambda_i}{\sqrt{\lambda_i^2 + \left[(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau} \right]^2 + 2\varepsilon^2}}, \quad (18)$$

$$b_i(\mathbf{z}) = 1 - \frac{(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau}}{\sqrt{\lambda_i^2 + \left[(\mathbf{g}_1)_i + (\mathbf{A}_1)_i \boldsymbol{\tau} \right]^2 + 2\varepsilon^2}}. \quad (19)$$

定义非负函数为

$$\beta(\mathbf{z}) = \gamma \|\mathbf{H}(\mathbf{z})\| \min\{1, \|\mathbf{H}(\mathbf{z})\|\}, \quad (20)$$

式中, 系数 $0 < \gamma < 1$ 。

采用光滑牛顿法求解混合优化目标推力控制分配问题的流程如图3所示。

具体步骤如下。

步骤0 初始化: 选取参数 $\rho, \sigma \in (0, 1)$, 光滑参数 $\varepsilon_0 > 0$, 容许误差 $0 \leq \varepsilon_s \ll 1$, 设置 $\mathbf{z}_0 = (\varepsilon_0, \boldsymbol{\tau}_0, \boldsymbol{\mu}_0, \boldsymbol{\lambda}_0)$, $\bar{\mathbf{z}} = (\varepsilon_0, 0, 0, 0)$, 并选取满足 $\gamma\mu_0 < 1$ 和 $\gamma\|\mathbf{H}(\mathbf{z}_0)\| < 1$ 两个条件的 $\gamma \in (0, 1)$ 。令 $j=0$ 。

步骤1 判断算法终止条件: 计算 $\|\mathbf{H}(\mathbf{z}_j)\|$ 值, 若 $\|\mathbf{H}(\mathbf{z}_j)\| \leq \varepsilon_s$, 程序终止, 否则由式(20)计算 $\beta_j = \beta(\mathbf{z}_j)$ 。

步骤2 根据式(21)求解得

$$\Delta \mathbf{z}_j = (\Delta \varepsilon_j, \Delta \boldsymbol{\tau}_j, \Delta \boldsymbol{\mu}_j, \Delta \boldsymbol{\lambda}_j), \quad (21)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}_j) + \mathbf{H}'(\mathbf{z}_j) \Delta \mathbf{z}_j = \beta_j \bar{\mathbf{z}}.$$

需要注意的是, 如果 $\mathbf{H}'(\mathbf{z}_j)$ 为奇异矩阵, 那么 $\mathbf{H}'(\mathbf{z}_j)$

图3 (网络版彩图)光滑牛顿法求解混合优化目标推力控制分配问题的流程图

Figure 3 (Color online) The flowchart of solving smooth optimization target thrust control assignment problem by smooth Newton method.

的逆矩阵不存在, 所以为保证 Δz_j 有解, 本文使用 $\mathbf{H}'(z_j)$ 的伪逆矩阵代替其逆矩阵.

步骤3 根据式(22)求解得到最小非负整数 m_j , 并令 $a_j = \rho^{m_j}$, 由式(23)更新迭代点.

$$\|\mathbf{H}(z_j + \rho^{m_j})\| \leq [1 - \sigma(1 - \gamma\mu_0)\rho^{m_j}]\|\mathbf{H}(z_j)\|, \quad (22)$$

$$z_{j+1} = z_j + a_j \Delta z_j. \quad (23)$$

步骤4 令 $j=j+1$, 转步骤1.

3 导管螺旋桨水动力性能数值分析

3.1 导管螺旋桨的模型

ROV所配置的导管螺旋桨为简易导管螺旋桨JD7704+Ka4-70, 其主要几何参数如表1所示.

建立精确的三维模型是通过CFD方法进行导管螺旋桨水动力性能分析的关键, 然而Ka螺旋桨桨叶是十分复杂的曲面, 其三维模型很难直接绘制. 因此采用文献[14]中一种螺旋桨实体参数化设计方法进行绘制, 其三维图如图4所示.

3.2 CFD仿真模型建立

目前通过CFD方法对导管螺旋桨的水动力性能研究多集中在单个导管螺旋桨, 这不能反映ROV中导管螺旋桨的水动力特性. 因此本文对导管螺旋桨的水动力性能分析主要考虑ROV影响下的导管螺旋桨水动力特性.

按照导管螺旋桨的布置位置, ROV中的6个导管螺旋桨可以分为三大类: 水平面尾部的两个导管螺旋桨(尾桨)、垂直面前部的两个导管螺旋桨(前桨)及后部的两个导管螺旋桨(后桨). 本文重点研究前桨和后

表1 导管螺旋桨主要几何参数

Table 1 Main geometric parameters of ducted propeller

几何参数	数值
螺旋桨直径(D_p)	60 mm
桨叶数(Z)	4
盘面比(A_e/A_o)	0.7
螺距比(P/D_p)	1.2
毂径比(D_o/D_p)	0.2
标称叶梢间隙(D_c)	1 mm

图4 (网络版彩图)Ka4-70实体模型

Figure 4 (Color online) Ka4-70 solid model.

桨的水动力性能, 为垂直面驱动系统的推力控制分配研究奠定基础. 因此, 在不影响导管螺旋桨水动力性能的情况下, 为降低网格数量, 提高数值计算效率, 选取包含前桨和后桨的ROV局部几何体作为数值计算模型, 如图5(a)和(b)所示. 此外, 在后桨水动力性能计算过程中, 暂不考虑尾桨对流场的影响, 因此使用简易导管螺旋桨代替尾桨.

在后桨水动力性能计算过程中, 计算域采用圆柱体结构, 并将计算域的直径、上游和下游分别设置为局部ROV模型长度($DR=240$ mm)的5倍、2.5倍和5倍, 如图6(a)和(b)所示.

为了适应螺旋桨的复杂曲面结构, 便于网格划分与近壁面网格加密处理, 故采用分区混合网格划分方案. 利用Gambit软件, 将计算域划分为5个子流域, 对各子流域、螺旋桨及导管壁面的网格划分如下: 首先对螺旋桨和导管壁面进行非结构化三角形网格划分, 网格尺寸设定为 0.6 mm($1\% D_p$); 然后对子流域I和II进行四面体网格划分, 网格尺寸分别设定为 1.2 mm($2\% D_p$)和 1.8 mm($3\% D_p$); 其次对子流域III采用以六面体为主的混合网格划分, 网格尺寸设定为 12 mm($5\% DR$); 最后对子流域IV和V进行结构化六面体网格划分, 网格尺寸设定为 24 mm($10\% DR$). 网格总体数目约为380万.

在前桨水动力性能计算过程中, 计算域的设计与网格的划分策略同后桨一致(图7).

3.3 边界条件设置与求解方法

(1) 边界条件设置

1) 旋转域转动: 采用MRF模型实现螺旋桨的旋转运动, 设置子流域I为内部旋转流域, 其余子流域为外部静态流域;

图 5 ROV局部几何模型. (a) 前桨; (b) 后桨
Figure 5 ROV local geometric model. (a) Front paddle; (b) rear paddle.

图 6 (网络版彩图)ROV中后桨计算域结构图. (a) 正车; (b) 倒车
Figure 6 (Color online) Structural diagram of calculation area of rear propeller in ROV. (a) Forward; (b) reverse.

图 7 (网络版彩图)网格划分结果示意图. (a) 局部计算域网格; (b) 旋转计算域网格
Figure 7 (Color online) Schematic diagram of meshing results. (a) Local computational domain grid; (b) rotating computational domain grid.

- 2) 入口条件: 速度入口, 速度大小恒定为0.6 m/s;
 - 3) 出口条件: 设置为压力出口, 表压为0;
 - 4) 子流域之间的交界面: 设定Interface类型;
 - 5) 壁面条件: ROV的壁面及剩余流域边界设定为无滑移壁面.
- (2) 求解方法
- 1) 控制方程和湍流模型: RANS方程和SST $k-\omega$ 湍流模型;
 - 2) 压力速度耦合方程的求解方法: SIMPLE;
 - 3) 压力离散格式: 二阶;
 - 4) 动量、湍流动能和特定耗散率的离散格式: 二阶迎风;
 - 5) 其他: 设置计算分析步为5000, 收敛判据为 10^{-4} .

3.4 ROV影响下导管螺旋桨水动力性能分析

导管螺旋桨的相关水动力性能采用式(24)所示的无因次系数进行表达.

$$\begin{cases} K_T = \frac{T}{\rho n^2 D p^4}, \\ K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D p^2}, \\ J = \frac{V_A}{n D p}, \end{cases} \quad (24)$$

式中, T 表示导管螺旋桨总推力, Q 表示导管螺旋桨扭矩, K_T 表示总推力系数, K_Q 代表扭矩系数, n 表示转速(单位r/s), J 为进速系数, V_A 表示导管螺旋桨的进速(单位m/s), ρ 表示水的密度.

为了验证计算方法的可行性, 本文采用JD7704+Ka4-70系列导管螺旋桨公开敞水实验结果对Fluent数值计算得到的敞水结果进行验证. 其实验结果见参考文献[15]. 该导管螺旋桨正车和倒车的敞水水动力性能数值计算结果与实验结果对比分别如图8(a)和(b)所示. 从中可以看出, 导管螺旋桨水动力性能系数 K_T 和 K_Q 的计算结果与实验数据吻合良好, 其正车敞水时 K_T 和 K_Q 最大相对误差分别为6.84%和5.71%, 倒车敞水时分别为9.14%和7.48%, 误差均在10%以内, 验证了使用该方法模拟导管螺旋桨敞水性能的有效性.

JD7704+Ka4-70导管螺旋桨的总推力系数 K_T 和螺旋桨转矩系数 K_Q 的计算结果, 如表2所示. 为了更直观地观察 K_T 和 K_Q 的变化规律, 绘制导管螺旋桨正车及倒车时的水动力性能曲线, 如图9(a)和(b)所示.

图 8 (网络版彩图)导管螺旋桨敞水特性计算结果与试验结果对比曲线. (a) 正车; (b) 倒车
Figure 8 (Color online) Comparison curve between calculation results and test results of open water characteristics of ducted propeller. (a) Forward; (b) reverse.

表 2 单独导管螺旋桨水动力性能计算结果

Table 2 Calculation results of hydrodynamic performance of single ducted propeller

转速 <i>n</i> (r/min)	进速系数 <i>J</i>	正车		倒车	
		<i>K_T</i>	10 <i>K_Q</i>	<i>K_T</i>	10 <i>K_Q</i>
6000	0.1	0.5614	0.6370	0.4152	0.5357
3000	0.2	0.4952	0.6220	0.3561	0.5211
2000	0.3	0.4327	0.6023	0.2907	0.4817
1500	0.4	0.3687	0.5636	0.2251	0.4298
1200	0.5	0.3081	0.5232	0.1566	0.3582
1000	0.6	0.2490	0.4763	0.0811	0.2713
857.1	0.7	0.1864	0.4176	−0.0002	0.1750
750.0	0.8	0.1146	0.3382	/	/
666.7	0.9	0.0343	0.2416	/	/

图9 (网络版彩图)单独导管螺旋桨水动力性能曲线. (a) 正车; (b) 倒车
Figure 9 (Color online) Hydrodynamic performance curve of single ducted propeller. (a) Forward; (b) reverse.

ROV影响下导管螺旋桨正车和倒车时的水动力性能计算结果分别如表3和4所示, ROV影响下导管螺旋桨正车和倒车的水动力性能曲线如图10(a)和(b)所示.

由图10(a)和(b)观察可知: (1) 正车时, 后桨的推力系数 K_T 和转矩系数 K_Q 与前桨的 K_T 和 K_Q 的变化趋势基本一致, 且在进速系数较低的情况下, 两者之间的 K_T 和 K_Q 的差值较小; 倒车时, 后桨与前桨的水动力性能基本相同, 因此, 可认为前桨与后桨具有相同的正倒车水动力性能; (2) 通过与图9的对比可以发现, 无论是正车还是倒车, 在相同进速系数下, 导管螺旋桨由于ROV的影响, 推力系数 K_T 和转矩系数 K_Q 要大于单独导管螺旋桨敞水中的 K_T 和 K_Q , 并且随着进速系数的增大两种工况下 K_T 和 K_Q 的差值也呈现增大趋势, 这说明进

速系数越大则ROV对导管螺旋桨的水动力性能影响越大; (3) 由于ROV的作用, 导管螺旋桨的推力系数变化比较平缓. 为进一步观察推力随转速的变化规律, 使用二次函数 $T=an^2$ 拟合推力与转速的关系, 结果如图11(a)和(b)所示. 从图11(a)和(b)可以看出, 导管螺旋桨的推力系数可视为定值, 并且前桨与后桨的推力特性可认为相同.

3.5 推进器推力约束条件

为便于对ROV推力的控制, 并基于上一小节对导管螺旋桨水动力性能的分析结论, 本节对导管螺旋桨式推进器提出如下合理假设:

- (1) 忽略外界环境水流对推进器干扰影响;
- (2) 将螺旋桨的正倒车推力系数视为定值;

表3 ROV影响下导管螺旋桨正车水动力性能计算结果

Table 3 Calculation results of hydrodynamic performance of ducted propellers under the influence of ROV

转速 n (r/min)	进速系数 J	前桨正车		后桨正车	
		K_T	$10K_Q$	K_T	$10K_Q$
6000	0.1	0.7301	0.6820	0.7230	0.6772
3000	0.2	0.6908	0.6839	0.6761	0.6786
2000	0.3	0.6765	0.6899	0.6613	0.6919
1500	0.4	0.6821	0.7070	0.6537	0.6943
1200	0.5	0.7424	0.7639	0.6710	0.7203
1000	0.6	0.7889	0.8192	0.7019	0.7598
857.1	0.7	0.7936	0.8253	0.7122	0.7733
750.0	0.8	0.8101	0.8397	0.7310	0.8006
666.7	0.9	0.8394	0.8717	0.7199	0.8038

表 4 ROV影响下导管螺旋桨倒车水动力性能计算结果

Table 4 Hydrodynamic performance calculation results of ducted propeller reversing under ROV

转速 <i>n</i> (r/min)	进速系数 <i>J</i>	前桨倒车		后桨倒车	
		<i>K_T</i>	10 <i>K_Q</i>	<i>K_T</i>	10 <i>K_Q</i>
6000	0.1	0.4608	0.7216	0.4604	0.7210
3000	0.2	0.4131	0.7168	0.4125	0.7150
2000	0.3	0.3662	0.7011	0.3653	0.7003
1500	0.4	0.3260	0.6851	0.3250	0.6820
1200	0.5	0.2863	0.6609	0.2828	0.6575
1000	0.6	0.2486	0.6295	0.2446	0.6250
857.1	0.7	0.2094	0.5867	0.2057	0.5826
750.0	0.8	0.1708	0.5393	0.1628	0.5346
666.7	0.9	0.1314	0.4846	0.1205	0.4789

图 10 (网络版彩图)ROV影响下导管螺旋桨水动力性能曲线. (a) 正车; (b) 倒车
Figure 10 (Color online) Hydrodynamic performance curve of ducted propeller under the influence of ROV. (a) Forward; (b) reverse.

图 11 (网络版彩图)ROV影响下导管螺旋桨推力转速拟合结果. (a) 正车; (b) 倒车
Figure 11 (Color online) Fitting results of thrust speed of ducted propeller under the influence of ROV. (a) Forward; (b) reverse.

(3) 认为ROV的6台推进器具有相同的水动力性能.

基于以上假设条件, 从图11(a)和(b)整理得出推进器的推力模型为

$$\begin{cases} \text{正转: } T_{ff} = 2.5987 \times 10^{-6} n^2, \\ \text{反转: } T_{fb} = 1.6373 \times 10^{-6} n^2. \end{cases} \quad (25)$$

ROV选用的直流无刷电机的最大额定转速为3400 r/min, 所以由式(25)计算得到推进器输出推力的最大值和最小值(螺旋桨反转输出的最大推力), 从而确定推进器推力的范围为

$$\begin{cases} \tau_{\min} < \tau < \tau_{\max}, \\ \tau_{\min} = -19 \text{ N}, \\ \tau_{\max} = 30 \text{ N}. \end{cases} \quad (26)$$

4 仿真实验与结果分析

为验证光滑牛顿法求解混合优化目标推力控制分配函数的有效性和优越性, 使用Matlab软件对伪逆分配法和混合优化目标分配法进行仿真计算与分析。

由式(26)得到推进器的约束条件为 $T_{\min} = -19 \text{ N}$, $T_{\max} = 30 \text{ N}$ 。已知推进器布置参数为: $d_1 = 0.4 \text{ m}$, $d_2 = 0.26 \text{ m}$, $d_3 = 0.47 \text{ m}$, $d_4 = 0.36 \text{ m}$ 。综合考虑推力分配误差和求解收敛速度的要求, 设定混合目标推力分配函数中的权值调节系数为 $\theta = 0.00001$, 光滑牛顿法中的参数为 $\rho = 0.5$, $\sigma = 0.2$, $\varepsilon_0 = 0.05$, $\gamma = 0.05$, $\varepsilon_s = 0.000001$, $\tau_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, $\mu_0 = [0.05 \ 0.05]^T$, $\lambda_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

取样时间 h 为0.1 s, 仿真时间 t 为10 s, 选择输入指令为

$$\tau_d = \left[14 \sin\left(\frac{t}{50} \pi\right) \quad 9 \sin\left(\frac{t}{50} \pi\right) \quad 18 \sin\left(\frac{t}{50} \pi\right) \right]^T.$$

仿真得到了混合优化目标推力控制分配方法与伪逆分配算法的推力分配结果, 如图12所示, 从中可以看出, 混合优化目标推力控制分配方法能满足各推进器对推力的约束要求, 并有效地利用了约束范围内的推力集合。

此外, 整理得到光滑牛顿法求解混合优化目标推力控制分配问题时的误差变化曲线和单步迭代次数变化曲线以及单步计算时间变化曲线, 分别如图13~15所示。其中从图13可知, 求解误差随指令力(力矩)的增大而变大, 但总体误差小于0.0007 N·m, 具有较高的精度, 满足工程应用的要求。通过图14和15可以看出, 当所有推进器的推力(力矩)远离推力(力矩)约束边界时, 单步迭代次数稳定在3次, 单步计算时间在1 ms以内; 当存

图12 (网络版彩图)推力分配求解结果对比

Figure 12 (Color online) Comparison of thrust distribution results.

图13 (网络版彩图)光滑牛顿法求解误差变化曲线

Figure 13 (Color online) Smooth Newton method for solving error curve.

在推进器推力(力矩)接近或达到推力(力矩)约束边界条件时, 单步迭代次数会随推力(力矩)的变大而增多, 但单步迭代次数在10步以内, 单步计算时间小于2 ms, 满足ROV运动控制系统的要求。

5 结论

(1) 设计了一种混合优化目标推力控制分配函数, 采用光滑牛顿法进行求解, 其求解总体误差小于0.0007 N·m, 单步迭代次数最大在10步以内, 最大单步计算时间小于2 ms, 其精度和实时性均能满足ROV实

图 14 (网络版彩图)单步迭代次数变化曲线
Figure 14 (Color online) Single step iteration number curve.

图 15 (网络版彩图)单步计算时间变化曲线
Figure 15 (Color online) Single step calculation time curve.

时系统要求。

(2) 基于CFD方法, 结合RANS方程和SST $k-w$ 湍流模型, 利用Fluent软件对ROV影响下的导管螺旋桨进行水动力性能分析, 并建立推进器的推力模型, 确定了推进器的推力约束条件。

(3) 对传统伪逆法推力控制分配与混合优化目标推力控制分配法进行仿真对比, 仿真结果表明: 混合优化目标推力控制分配方法能够满足各推进器对推力的约束要求, 并且能够有效利用约束范围内的推力集合。

参考文献

- Johansen T A, Fossen T I. Control allocation—A survey. *Automatica*, 2013, 49: 1087–1103
- Fan S B. Hydrodynamics test and research on motion control for deep sea work-class remotely operated vehicle (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. 80–103 [范士波. 深海作业型ROV水动力实验及运动控制技术研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2013. 80–103]
- Garus J. Thrust allocation in propulsion system of underwater robotic vehicle via linear programming. *Solid State Phenomena*, 2013, 210: 326–332
- Ishii K, Ura T. An adaptive neural-net controller system for an underwater vehicle. *Control Eng Practice*, 2000, 8: 177–184
- Schurr S P, O’Leary D P, Tits A L. A polynomial-time interior-point method for conic optimization, with inexact barrier evaluations. *SIAM J Optim*, 2009, 20: 548–571
- Wei Y, Fu M, Ning J, et al. Quadratic programming thrust allocation and management for dynamic positioning ships. *Telkomnika Indonesian J Electrical Eng*, 2013, 11: 1632–1638
- Chen Y, Yu F, Li J. Numerical investigation of open water performances of ducted propellers in underwater vehicle under the condition of multiple motion modes (in Chinese). *J Ship Mech*, 2018, 22: 935–943 [陈原, 于飞, 李静. 多种运动模式下水下机器人导管螺旋桨的敞水性能研究. *船舶力学*, 2018, 22: 935–943]
- Hayati A N, Hashemi M S, Shams M. A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack. *Ocean Eng*, 2013, 59: 152–163
- Gu Q Q, Li T L, Hu J M, et al. Influence of blade tip spacing and blade tip corners upon the open water performance of ducted propeller (in Chinese). *Ship Ocean Eng*, 2018, 47: 11–15 [顾强强, 李铁骊, 胡俊明, 等. 叶梢间隙和尖角对导管螺旋桨敞水性能的影响. *船海工程*, 2018, 47: 11–15]
- Lü J. Optimization method research on duct profile of the ducted propeller (in Chinese). Dissertation for Master’s Degree. Wuhan: Huazhong

- University of Science and Technology, 2015. 64–74 [吕江. 导管螺旋桨导管剖面优化方法研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2015. 64–74]
- 11 Fossen T I. Marine Control Systems. 3rd ed. Trondheim: Marine Cybernetics, 2013. 194–195
- 12 Xu M X, Zhu X P, Zhou Z, et al. Exploring an effective method of thrust allocation for solar-powered UAV with multiple propellers (in Chinese). J Northwestern Polytech Univ, 2013, 31: 505–510 [徐明兴, 祝小平, 周洲, 等. 多螺旋桨太阳能无人机推力分配方法研究. 西北工业大学学报, 2013, 31: 505–510]
- 13 Xiao X, Li Y, Wen Z, et al. A regularized semi-smooth Newton method with projection steps for composite convex programs. J Sci Comput, 2018, 76: 364–389
- 14 Gao F D, Pan C Y. Numerical analysis and validation of propeller open-water performance based on CFD (in Chinese). J Mech Eng, 2011, 30: 1–5 [高富东, 潘存云. 复杂曲面螺旋桨实体模型参数化设计与分析. 机械科学与技术, 2011, 30: 1–5]
- 15 Sheng Z B, Yang J S, Cai Y Y. Atlas of Series Tests of Marine Propellers in China (in Chinese). Beijing: Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1983. 113–131 [盛振邦, 杨家盛, 柴杨业. 中国船用螺旋桨系列试验图谱集. 北京: 中国造船编辑部, 1983. 113–131]

Research and simulation of ROV hydrodynamic performance and thrust control distribution

ZHAO YanFeng^{1,2,3}, LIN MingXing^{1,2,3}, DAI ChengGang^{1,2,3}, WU XiaoJian^{1,2,3}, ZHANG Dong⁴ & GUAN ZhiGuang⁵

¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

² Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Jinan 250061, China;

³ National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Jinan 250061, China;

⁴ Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China;

⁵ School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China

A good thrust control distribution strategy is needed to guarantee ROV mobility and operational safety and implement ROV motion control technology. However, the existing thrust control distribution strategy has problems including saturation of thrust output and excessive calculation time, leading to poor ROV mobility. To address these problems, a hybrid optimization target thrust control allocation strategy is proposed. First, the ROV drive system is mathematically modelled and a hybrid optimization target thrust control distribution function is designed. ANSYS Fluent software is used to analyze the propeller's hydrodynamic performance under different working conditions and model its thrust to determine the constraints of the hybrid function. Finally, the smooth Newton method is used to solve the function, and compare it with the traditional pseudo-reverse thrust distribution strategy. Simulation results show that the new strategy is able to meet the thrust requirements of each thruster and effectively utilize the thrust set in the constraint range. The overall error solved by the smooth Newton method is less than 0.0007 N m, with less than 10 iteration steps, and a single-step calculation time of less than 2 ms. It has the advantages of high precision, good real-time performance, and no thrust output saturation.

ROV, thrust control distribution, smooth Newton method, ducted propeller hydrodynamic performance

doi: [10.1360/SST-2019-0251](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0251)