

4-16-2020

Modeling and Propeller Location Optimization for Diving Propeller Vehicle

Jianjun Zhang

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Yang Bing

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Jinhui Wu

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Yan Qiang

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Propeller Location Optimization for Diving Propeller Vehicle

Abstract

Abstract: Focus on the rapid physical exertion and the poor flexibility of diving propeller vehicle, a *wearable diving propeller equipped with buoyancy control devices* is proposed, and the position of the propeller in the device is optimized. *The human body structure is regarded as a rigid body to establish a spatial 6-degree-of-freedom motion equation*, and its surrounding hydrodynamic performance is analyzed. The hydrodynamic parameters in the model are obtained based on the FLUENT. The propeller position optimization model based on *the minimum external force of rectilinear diving and slewing motions* is established. The optimization results demonstrate that the optimized propeller position can effectively reduce the vertical diving speed and maintain a steady diving state.

Keywords

diving propeller vehicle, hydrodynamic parameters, added mass, dynamic simulation, positional optimization

Recommended Citation

Zhang Jianjun, Yang Bing, Wu Jinhui, Yan Qiang. Modeling and Propeller Location Optimization for Diving Propeller Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 562-570.

蛙人推进装置建模及其推进器位置优化

张建军, 杨兵, 吴锦辉, 阎强

(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 针对蛙人体力消耗快、灵活性差等问题, 提出一种配备浮力调节装置的可穿戴式蛙人推进装置, 并对其推进器位置进行优化。以人体结构作为刚体建立六自由度运动方程, 进而对该装置的水动力性能进行分析; 通过 FLUENT 仿真得到方程中的水动力参数; 将推进器合理位置作为约束条件, 以直线潜行和回转运动所受的合外力最小为优化目标建立优化模型, 解得随速度变化的最优位置点集。优化结果表明: 优化后的推进器位置能够有效减小潜水的垂向速度并保持稳定的潜水状态。

关键词: 蛙人潜水推进器; 水动力参数; 附加质量; 运动仿真; 位置优化

中图分类号: U674.941 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 04-0562-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0409

Modeling and Propeller Location Optimization for Diving Propeller Vehicle

Zhang Jianjun, Yang Bing, Wu Jinhui, Yan Qiang

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Focus on the rapid physical exertion and the poor flexibility of diving propeller vehicle, a wearable diving propeller equipped with buoyancy control devices is proposed, and the position of the propeller in the device is optimized. The human body structure is regarded as a rigid body to establish a spatial 6-degree-of-freedom motion equation, and its surrounding hydrodynamic performance is analyzed. The hydrodynamic parameters in the model are obtained based on the FLUENT. The propeller position optimization model based on the minimum external force of rectilinear diving and slewing motions is established. The optimization results demonstrate that the optimized propeller position can effectively reduce the vertical diving speed and maintain a steady diving state.

Keywords: diving propeller vehicle; hydrodynamic parameters; added mass; dynamic simulation; positional optimization

引言

蛙人潜水推进装置(diver propeller vehicle, DPV)是一种辅助蛙人在水中潜行的装备, 因其能够提供一定的推力从而降低蛙人的体力消耗, 且在二次世界大战中发挥了重要的作用, 因此受到了各

国的广泛关注^[1-3]。如 H. Anam 等^[4]研制的 Ganendra RI-1 系列 DPV 能够达到 50 kg 的推力, 可在 3.5 kN 的最大速度下运行 3 h, 大大增加了潜水员在水下的潜水时间; 美国 Farallon 公司所生产的手握式 MK-8 系列 DPV^[5], 下潜深度能达到 40 m, 可以容纳多名潜水人员, 能够在极为严格的环境下使用, 具有较强的环境适应能力; 美国 STIDD 公司生产的骑行式 DPV^[6]是使用最广泛的军用级别蛙人潜水推进器, 性能可靠、耐用; 俄罗斯生产的 Protei-5 蛙人单人小型 DPV 可以搭载于潜艇外部, 实战性



收稿日期: 2018-06-27 修回日期: 2018-10-10;
基金项目: 国家自然科学基金(51175144), 天津市自然科学基金(17JCZDJC40200);
作者简介: 张建军(1971-), 男, 河北沧州, 博士, 教授, 博导, 研究方向为机器人机构学; 杨兵(1993-), 男, 山西临汾, 硕士, 研究方向为潜水推进装备与运动仿真。

<http://www.china-simulation.com>

能较好,以军用为主。但由于蛙人在潜行过程中双手被限制,且其推进装置体积庞大、灵活性差,从而严重影响蛙人的活动能力及活动范围。

针对该问题,学者们进行了大量研究:Fenu, Alessandro 等设计了一种双推进手拉式 DPV^[7],该 DPV 采用模块化设计,可根据实际需要调整推进器,使其灵活性和驱动能力有较大的提高;Melendez M、Valente O、Mazin B A 等^[8-10]分别提出了可将推进器安装在蛙人的手臂、腰部以及腿部,而将电池、控制等模块独立安装于背部的背包中的穿戴式 DPV。该类新型 DPV 与文献[4-6]中提到的 DPV 相比能够进行快速回转和滚转等操作,具有极好的灵活性,同时还能空出双手进行其他作业。但由于上述装置中背部的背包与水肺(Buoyancy Control Devices, BCD)不兼容,不能同时配备推进器、BCD 和氧气瓶,导致潜水时间和潜水范围大大缩减,只适用于一些浅水领域的休闲活动,应用范围较小。

本文提出一种穿戴式潜水推进器,该装置将电池与控制部分安装于氧气瓶下方,将推进器安置于蛙人的手臂或氧气瓶上。这种设计将穿戴式 DPV 与 BCD 相结合,既保持了文献[8-10]中的穿戴式 DPV 和常规潜水装备共同的优点,同时又具有活动范围广、灵活性强,体积小等优点。但由于推进器的安装位置对潜水影响很大,而且不同的潜水速度会导致不同的潜水状态,除此之外,目前对 DPV 推进器优化问题缺乏相关的研究,因此通过优化推进器位置进而保证潜水运动稳定性的研究迫切需要展开。

潜水过程是一个非常复杂的动态过程,由于本文主要考虑推进器对人体的影响作用而不考虑人体自身运动对潜水效果的影响,因此将人体结构作为刚体来分析潜水过程,将人和穿戴式潜水推进装备为研究对象,建立相应的运动和动力学方程并对其水动力性能进行分析;在此基础上,通过仿真模拟水下拖拽实验得到数学模型中的水动力参数,为推进器位置优化提供计算数据;最后分析了推进器

空间位置对潜水状态的影响,得出了推进器合适的空间位置,通过选择合适的推进器安装位置来保证潜水运动的稳定性。

1 潜水推进装置运动建模

1.1 坐标系建立

为了便于描述潜水推进装置的一般运动规律,本文采用国际标准水池会议(ITTC)推荐的坐标系体系,分别建立固定坐标系和运动坐标系,各坐标轴均按右手系确定,如图 1 所示。其中,运动坐标系 $B-xyz$ 固定于人体,且规定动坐标系原点和浮心重合, $B-x$ 轴指向蛙人头部, $B-y$ 轴垂直于 $B-x$ 轴并且指向人体右侧, $B-z$ 轴按右手定则确定,并认为各坐标轴为系统的惯性主轴;固定坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ 固定于地球,其坐标原点及各坐标轴与初始时刻的人体运动坐标系重合。

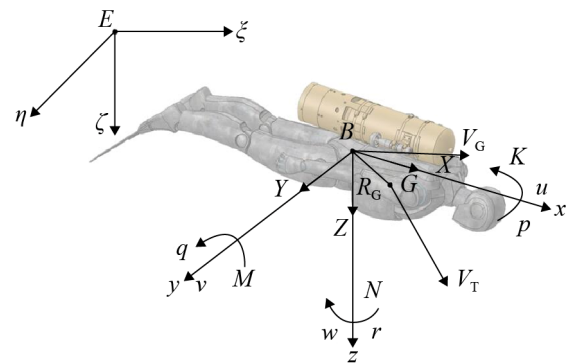


图 1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate system

图 1 中, u, v, w, p, q, r 分别为系统在 3 个动坐标方向的速度和角速度; X, Y, Z, K, M, N 分别为系统在 3 个动坐标方向上所受的合外力和合外力矩。

系统在固定坐标系中的潜水姿态用 zyx 欧拉角来表示,其变换过程为:首先将固定坐标系统 $E-\zeta$ 轴转动 φ 角得到坐标系 $E-\zeta'\eta'\zeta$,再将其绕 $E-\eta'$ 轴旋转 θ 角得到坐标系 $E-x\eta'\zeta$,最后将其绕 $E-x$ 轴旋转 ϕ 角与动坐标系重合,整理得到从运动坐标系到固定坐标系转换矩阵 T_E^B ,如公式(1)所示;将姿

态角坐标轴 $E-x, E-\eta', E-\zeta$ 变换到运动坐标轴 $E-x, E-y, E-z$ 中即可得到姿态角角速度 $\dot{\omega} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi})$ 与运动坐标系中角速度 $\Omega = (p, q, r)$ 之间的关系矩阵, 如公式(2)所示。

$$T_E^B = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & c\varphi s\theta - c\phi s\varphi & c\varphi c\phi s\theta + s\varphi s\phi \\ s\varphi c\theta & c\varphi c\phi + s\varphi s\phi s\theta & c\phi s\varphi s\theta - c\varphi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_\omega = \begin{bmatrix} 1 & t\theta s\phi & t\theta c\phi \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi / c\theta & c\phi / c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: c, s, t 分别为三角函数 \cos, \sin, \tan 的缩写; ϕ, θ, φ 分别称为横滚角、俯仰角和偏航角。

1.2 建立运动方程

根据坐标变换矩阵, 得到推进系统在运动坐标系中的速度 $V = [u, v, w]^T$ 向固定坐标系中的速度 $V' = [u', v', w']^T$ 的转换方程和人体角速度 Ω 与姿态角角速度 $\dot{\omega}$ 之间的关系方程, 即运动关系式:

$$V' = T_E^B V \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = T_\omega \Omega \quad (4)$$

将变换矩阵式(1)~(2)代入式(3)和式(4)中即可得到运动关系式的具体表达式, 这里省略书写。

1.3 建立动力学方程

将推进系统作为刚体考虑, 当其重心和动坐标原点(浮心)不重合时, 相对速度和绝对速度之间的关系为:

$$V_G = V_T + V_R = V_T + \Omega \times R_G \quad (5)$$

式中: V_G, V_T, V_R 分别为重心的绝对速度、牵连速度和相对速度; $R_G = [x_g, y_g, z_g]^T$ 为系统重心与动坐标系原点之间的距离。

根据动量、动量矩定理得到:

$$\begin{cases} \frac{dB_G}{dt} = F \\ \frac{dK_G}{dt} = M \end{cases} \quad (6)$$

式中: $B_G = mV_G, K_G = I\Omega_G = IT_\omega\Omega$ 分别为系统相对于固定坐标系的动量和动量矩, 将其对时间求得:

$$\frac{dB_G}{dt} = m\left(\frac{\partial V_T}{\partial t} + \Omega \times V_T + \frac{\partial \Omega}{\partial t} \times R_G + \Omega \times (\Omega \times R_G)\right) \quad (7)$$

$$\frac{dK_G}{dt} = \frac{dK_T}{dt} + \Omega \times I_G \Omega + mV_T \times \frac{dV_G}{dt} \quad (8)$$

式中: $I = [I_x, I_y, I_z]^T$ 为系统对动坐标系 3 个坐标轴的转动惯量。将式(7)~(8)代入公式(6)中整理即可得到推进系统的动力学方程展开式, 如公式(9)所示:

$$\begin{bmatrix} m\dot{u} \\ m\dot{v} \\ m\dot{w} \\ I_x \dot{p} \\ I_y \dot{q} \\ I_z \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m(wq - vr) \\ m(ur - wp) \\ m(vp - uq) \\ (I_z - I_y)qr \\ (I_x - I_z)rp \\ (I_y - I_x)pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ma_u \\ ma_v \\ ma_w \\ ma_p \\ ma_q \\ ma_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:

$$a_u = -x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})$$

$$a_v = -y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})$$

$$a_w = -z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})$$

$$a_p = y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)$$

$$a_q = z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)$$

$$a_r = x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)$$

公式(9)中, 等号左边第 1 个矩阵表示当系统重心与动坐标系重合且动坐标系平动时产生的惯性力项; 第 2 个矩阵表示由动坐标系的旋转运动引起的系统的向心力和回转效应力; 第 3 个矩阵表示由于系统质心和动坐标系原点不重合导致的惯性力项。等式右边表示系统所受到的合外力。

1.4 受力分析

在进行受力分析时, 一般假定人体处于静止的水域中, 不考虑风、浪、流等因素的影响, 将系统在水下所受的力分成 4 种, 即重力、浮力、推力和水动力, 如公式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} G \\ B \\ \tau_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_T \\ M_T \end{bmatrix} + [F_{ine} + F_{vis}] \quad (10)$$

式中: 等式右边 4 项分别为重力(矩)、浮力(矩)、推力(矩)、水动力(矩)的矩阵表示形式, 其中水动力又分为惯性水动力 F_{ine} 和粘性水动力 F_{vis} 两部分。

1.4.1 重力和重力矩

将重力及力矩由固定坐标系转换到随体坐标系中, 可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \boldsymbol{\tau}_G \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi \\ \cos\theta\cos\phi \\ -z_g\cos\theta\sin\phi + y_g\cos\theta\cos\phi \\ -x_g\cos\theta\cos\phi - z_g\sin\theta \\ y_g\sin\theta + x_g\cos\theta\sin\phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

1.4.2 浮力和浮力矩

由于规定浮心与运动坐标系的原点重合, 因此人体在运动坐标系中受到的浮力矩为零, 其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \boldsymbol{\tau}_B \end{bmatrix} = -B[-\sin\theta, \cos\theta\sin\phi, \cos\theta\cos\phi, 0, 0, 0]^T \quad (12)$$

1.4.3 推力和推力矩

由螺旋桨理论可知, 推进器自身产生的推力及推力矩可表示为:

$$F_T = \rho n^2 D^4 K_T (1-t) \quad (13)$$

$$Q_T = \rho n^2 D^5 K_Q \quad (14)$$

式中: ρ , n , D , K , t , K_Q 分别为水的密度、电机的转速、螺旋桨叶的直径、电机推力系数、推力减额系数和转矩系数。

根据图 2 所示的推进器的位置与动坐标原点之间的关系即得到人体受推进器推力及力矩的矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_T \\ \mathbf{M}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{T1} + F_{T2} \\ 0 \\ 0 \\ Q_{T1} - Q_{T2} \\ -(F_{T1} + F_{T2})|z_T| \\ (F_{T1} - F_{T2})|y_T| \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: F_{T1} , Q_{T1} 为人体右侧推进器所提供的推力和推力矩; F_{T2} , Q_{T2} 为人体左侧的推进器所提供的推力和推力矩; $[x_T, y_T, z_T]^T$ 表示推进器重心在动坐标系中的坐标。

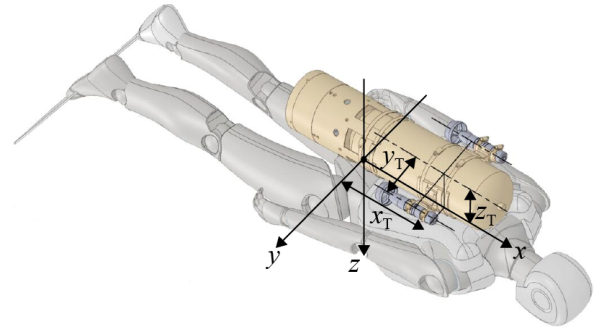


图 2 推进器布局示意图
Fig. 2 Layout diagram of propeller

1.4.4 水动力和水动力矩

作用于人体上的水动力和水动力矩除了与潜水设备的几何参数有关外, 还与其运动参数和水的性质有关。可以将其分为 2 类: 惯性水动力和粘性水动力。前者是由于人体在水中加速运动时推动人体附近的水也跟着做加速运动所产生的水的反作用力, 因其与物体运动的加速度和角加速度有关, 所以称这部分力为惯性水动力, 将其系数称为惯性水动力系数, 其相反数称之为“附加质量”^[11]; 后者表示运动速度和角速度对水动力产生的影响, 将这部分力称为粘性水动力, 将其系数称为粘性水动力系数。由于 Gertler 等^[12]提出的六自由度空间运动方程中对水动力考虑的影响因素太多、计算公式复杂及水动力系数获取困难等原因, 下面对潜水推进装置所受水动力进行了符合实际的简化处理。

(1) 惯性水动力

根据“势流理论”忽略加速度和角加速度之间的耦合因素的影响, 得到简化后的惯性水动力表达式如公式(16)所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{ine}} = & \text{diag}(M_{11}, M_{22}, M_{33}, M_{44}, M_{55}, M_{66}) \\ & [\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}]^T \end{aligned} \quad (16)$$

式中： $M_{11}, M_{22}, \dots, M_{66}$ 为对应加速度下的附加质量(惯性水动力系数)。

(2) 粘性水动力

由于粘性水动力与物体的运动速度 $\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}$ 之间存在非常复杂的非线性关系, 因此, 为保证该推进器在具有较大的攻角时同样适用, 将其简化为粘性水动力平方项模型, 如公式(17)所示:

$$\mathbf{F}_{\text{vis}} = \begin{bmatrix} X_{uu}u|u| + X_{qq}q|q| + X_{rr}r|r| \\ Y_{pp}p|p| + Y_{vv}v|v| \\ Z_{uu}u|u| + Z_{vv}v|v| + Z_{rr}r|r| + \\ Z_{pp}p|p| + Z_{ww}w|w| + Z_{qq}q|q| \\ K_{pp}p|p| + K_{vv}v|v| \\ M_{uu}u|u| + M_{qq}q|q| \\ N_{vv}v|v| + N_{rr}r|r| \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $X_{uu}, X_{qq}, \dots, X_{rr}$ 为粘性水动力系数。

2 水动力系数仿真计算

为了获得相应的水动力系数^[13], 首先以椭球体代替人体进行 fluent 仿真计算, 设定相应的边界条件和时间参数, 得到椭球体的水动力系数仿真值; 然后对椭球进行相应的理论计算, 得到椭球体的水动力系数理论值, 并将其与仿真结果对比, 进而验证了仿真结果及其相关参数设置的正确性; 最后, 在上述边界条件和时间参数等设定正确的情况下对人体模型进行仿真, 最终得到人体模型的水动力系数。

2.1 椭球附加质量

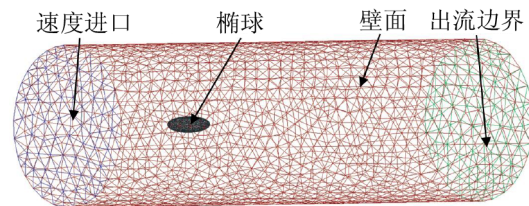
2.1.1 椭球附加质量的理论解

将该系统简化为一个长轴为 $2a=1.7\text{ m}$, 短轴为 $2b=2c=0.5\text{ m}$ 的椭球, 根据兰伯(lamb)用“势流理论”计算得到的附加质量曲线即可得到椭球附加质量的理论值, 因椭球关于 x 轴轴对称, 因此附加质量 M_{44} 为 0。

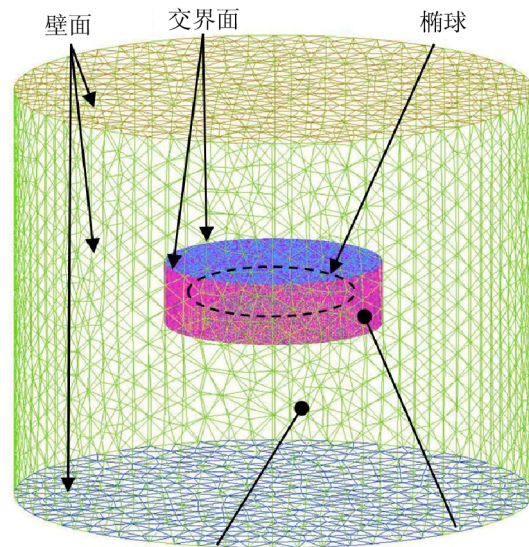
2.1.2 椭球附加质量的仿真值

经过多次的仿真实验后, 最终得到符合实际的仿真结果, 仿真过程中具体参数设置如下:

计算域划分: 为得到全部的粘性水动力系数, 需要建立 2 种不同的计算域, 分别模拟椭球在水中的匀加速直线运动和旋转运动。前者设置流体域总长为 17 m, 直径为 5 m, 密度区长 4 m, 宽、高为 1 m, 用 ICEM CFD 划分四面体非结构网格, 网格数约 56 万, 改变椭球放置位置可得到附加质量 M_{11}, M_{22} 和 M_{33} 的仿真值, 如图 3(a)所示; 后者所对应的流体域总长为 5 m, 直径为 6 m, 网格数约 23 万, 采用滑移网格模拟椭球旋转运动, 同样改变椭球放置位置可得到附加质量 M_{55} 和 M_{66} 的仿真值, 如图 3(b)所示。



(a) 直线运动网格划分



(b) 滑移网格划分

图3 流体域网格划分
Fig. 3 Meshes of flow field

边界条件: 入口速度和旋转角速度都采用 UDF(User Define Function)函数进行控制(分别设置进口来流加速度为 $a=0.1 \text{ m/s}^2$ 和旋转角加速度 $\alpha=0.1 \text{ rad/s}^2$); 出口为自由出流(outflow); 选用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 其中湍动能按公式估算为 0.004 J , 耗散率估算为 0.043% ; 系统表面采用标准壁面函数法且设定为无滑移边界, 侧面边界为自由滑移面; 设置时间步长为 0.001 s , 总运行时间为 0.02 s ; 时间离散采用二阶向后欧拉差分格式。图 4 为后处理软件(CFD—Post)得出的受力随时间的变化曲线。

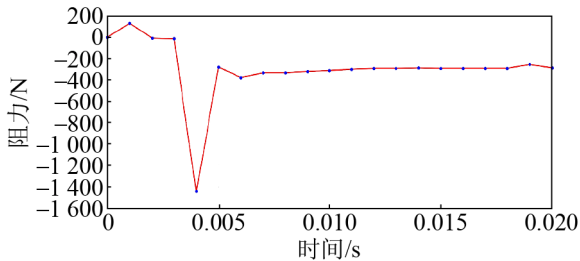


图 4 椭球沿 x 轴以 0.1 m/s^2 加速时所受阻力

Fig. 4 Drag force of ellipsoid when it is accelerated along the x -axis at 0.1 m/s^2

从图 4 可以看到, 在 0.005 s 以后受力趋于平稳, 因此将稳定后的值作为椭球定加速度和定角加速度仿真中某时刻的阻力 F_{total} 和阻力矩 M_{total} ; 然后在对应瞬时速度下进行匀速运动的仿真, 从中得出定常阻力 F_{stab} 和定常力矩 M_{stab} , 最后通过计算得到相应椭球的附加质量^[14-17], 计算公式如下:

$$M_{ii} = \frac{|F_{\text{total}} - F_{\text{stab}}|}{a} - m_F \quad (18)$$

$$M_{jj} = \frac{|M_{\text{total}} - M_{\text{stab}}|}{\alpha} - m_M \quad (19)$$

式中: $i=1, 2, 3; j=5, 6; m_F=4\pi abc/3$ 表示椭球体完全浸没在水中时所排开的水的质量, $m_M = 4\pi abc(a^2 + c^2/b^2)/15$ 为对应体积所排开水的转动惯量。

根据前述仿真及公式(18)~(19)即可得椭球体的附加质量仿真值, 而理论值则由势流理论中的附

加质量曲线得到。最后根据公式(理论值-仿真值)/理论值可得到仿真值相对于理论值的相对误差, 由此公式和仿真过程可知, 影响相对误差的主要因素有流体粘性的作用和网格划分的疏密程度。椭球体附加质量的理论值、仿真值及相对误差如表 1 所示。

表 1 附加质量理论值与仿真值对比

Tab. 1 Comparison of added mass between theoretical value and simulation value

附加质量	理论值	仿真值	相对误差/%
M_{11}/kg	22.2	21.3	4.05
M_{22}/kg	183.2	180.5	1.47
M_{33}/kg	183.2	180.5	1.47
$M_{44}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	-	-	-
$M_{55}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	40.16	39.81	0.87
$M_{66}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	40.16	39.81	0.87

从表 1 可看出, 通过仿真得到的附加质量与理论值最大误差为 4.05% , 因此该仿真方法可用于人体模型的仿真。

2.2 人体水动力参数仿真

惯性水动力的仿真方法和上述椭球的仿真过程一致, 首先从 Solidworks 中可以读出模型体积 $V=0.074 \text{ m}^3$ 和质量 $m=85.45 \text{ kg}$, 经计算得到其排水质量为 $m_F=74.33 \text{ kg}$, 按上述椭球的仿真步骤进行仿真即可得到该模型惯性力系数, 如表 2 所示。

表 2 人体模型附加质量

Tab. 2 Added mass of DPV / kg

M_{11}	M_{22}	M_{33}	M_{44}	M_{55}	M_{66}
15.7	85.7	93.7	63.2	13.4	12.8

对于粘性水动力系数而言, 为减小仿真次数, 将仿真分成 6 个组, 每组为对应速度分量下的粘性水动力系数, 再按不同的速度(速度从 $0.2\sim 2 \text{ m/s}$, 共 10 个速度点)分别进行匀速运动的仿真, 得到速度与受力的关系, 最后按待定系数法进行拟合即可得到对应的粘性水动力系数, 如表 3 所示。

表 3 粘性水动力系数仿真值
Tab. 3 Viscous hydrodynamic coefficient

分组	粘性力系数	仿真结果
第 1 组	$X_{uu}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	-72.53
	$M_{uu}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	1.71
	$Z_{uu}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	5.98
第 2 组	$Y_{vv}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	-207.42
	$Z_{vv}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	15.53
	$K_{vv}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	1.36
	$N_{vv}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	9.31
第 3 组	$Z_{wv}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$	-243.9
第 4 组	$Y_{pp}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-1.36
	$Z_{pp}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	0.09
	$K_{pp}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-0.23
第 5 组	$X_{qq}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	6.48
	$Z_{qq}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-17.61
	$M_{qq}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-24.43
第 6 组	$X_{rr}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-16.74
	$Z_{rr}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-5.16
	$N_{rr}/(\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2)$	-38.72

3 推进器位置优化

推进器安装位置的不同将会影响推进设备整体的重心位置以及推进器对人体的作用力矩,从而影响人体潜水时的平衡状态,因此应当合理设定推进器安装位置,调节整体的重心,保证人体潜水时姿态的稳定性和舒适性。根据重心坐标公式,系统重心与推进器位置之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} x_g = \frac{m_1}{m} x_T \\ y_g = 0 \\ z_g = \frac{m_1}{m} z_T \end{cases} \quad (20)$$

式中: (x_g, y_g, z_g) 为整体重心坐标; m 为考虑推进器时的总质量; m_1 为除推进器以外的质量; (x_T, y_T, z_T) 为人体右侧推进器重心位置坐标,两推进器位置关于 x - B - z 平面对称。

3.1 目标函数及约束条件

为了得到推进器的最优位置,建立了以平面直线潜行和平面回转运动中系统所受到的合力最小为优化目标,以推进器重心位置坐标 x_T, y_T, z_T

为优化变量的优化模型,如公式(21)所示:

$$\min f = \alpha_1 \|F_1\|_2 + \alpha_2 \|F_2\|_2 \quad (21)$$

式中: F_1 和 F_2 分别为系统在水平直线潜行和水平回转运动时所受的合外力,根据公式(9)得 F_1 和 F_2 的表达式为:

$$F_1 = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{uu}u^2 + F_{T1} + F_{T2} \\ Z_{uu}u^2 + Z_{wv}w^2 \\ M_{uu}u^2 + G(-x_g \cos \theta - z_g \sin \theta) + (F_{T1} + F_{T2})z_T \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} F_x \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{uu}u^2 + X_{rr}r^2 + F'_{T1} + F'_{T2} \\ N_{vv}v^2 + N_{rr}r^2 + (F'_{T2} - F'_{T1})y_T \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $\|F_1\|_2$ 和 $\|F_2\|_2$ 分别为向量 F_1 和 F_2 的二范数(即向量的模); α_1, α_2 为加权系数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; F_{T1}, F_{T2} 为直线运动时两推进器的推力、 F'_{T1}, F'_{T2} 为旋转运动时两推进器的推力。

在对 DPV 推进器位置选定时,除了要满足上述的关系式外,还应当满足如下约束条件:

- (1) 推进器位置不应超出整个人体和设备的最大尺寸范围;
- (2) 推进器不应干涉人手臂肘部的正常活动;
- (3) 在直线潜行和回转运动中,应使回转半径、垂向速度和横滚角尽量小,从而增加舒适性。

根据上述的约束条件得到 3 个优化变量之间的关系为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.173 \leq x_T \leq 0.397 \\ 0.130 \leq y_T \leq 0.1875 \\ -0.09 \leq x_T \leq 0 \\ x_g = \frac{m_1}{m} x_T \\ y_g = 0 \\ z_g = \frac{m_1}{m} z_T \end{cases} \quad (24)$$

3.2 结果分析

采用 MATLAB 中的 fmincon 函数求解^[18],当

$\alpha_1=\alpha_2=0.5$, 且速度 u 取值分别为 0.2, 0.4, ..., 2 m/s 时, 得到在不同潜水速度下推进器最优空间位置点, 如表 4 所示。

表 4 在不同速度下推进器最优位置
Tab. 4 Optimal position of the propeller at different speeds

速度 $v/(m/s)$	重心坐标/mm			目标函数 值/ f/N
	x	y	z	
0.2	173	159	0	2.4
0.4	173	132	0	1.8
0.6	173	132	0	1.0
0.8	173	132	0	0.2
1.0	173	132	0	0
1.2	196	132	-2.56	0
1.4	229	132	-5.98	0
1.6	255	132	-8.72	0
1.8	266	132	-9.99	0
2.0	279	132	-12.44	0

从表 4 可以看出, 当速度较小时, 推进器的位置基本不变, 始终在点(173, 132, 0)附近; 而当速度超过 1 m/s 时, 推进器距动坐标原点越来越远, 但在 y 和 z 方向上变化很小, 如图 5 所示。

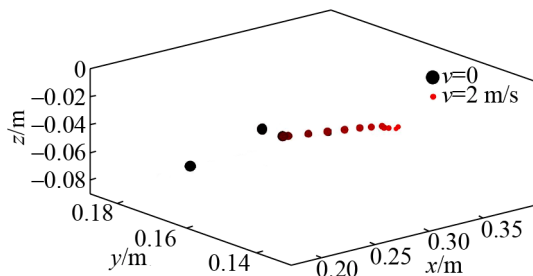


图 5 推进器重心空间位置
Fig. 5 Propeller spatial location

将优化之后的点 A(173, 132, -14)及优化之前的点 B(0, 120, 0)分别代入公式(9)中, 并设置推进器推力大小分别为 $F_{T1}=F_{T2}=160$ N 和 $F'_{T1}=160$ N, $F'_{T2}=80$ N, 当初速度为 0 时, 得到推进器安装于 A, B 两点时系统的横滚角 ϕ 随时间的变化规律和系统重心运动轨迹, 如图 6~7 所示。从图 6 可看出: 优化后的推进器位置使横滚角振幅减小约 43%, 增加了潜水的稳定性; 从图 7 可看出: 不管是直线潜行还是回转运动, 优化后的垂向运

动都很小, 都能够较好的保持潜水深度和稳定性, 最终减少人体体力消耗, 增加潜水舒适性。

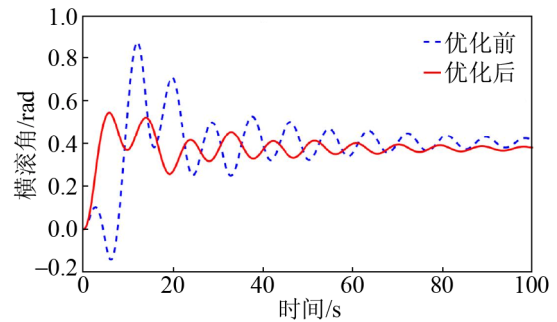
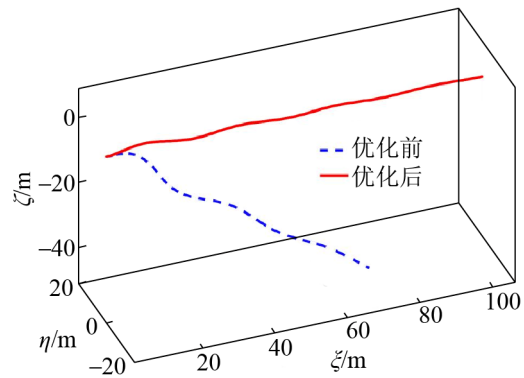
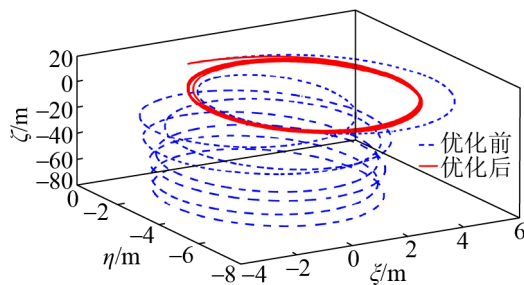


图 6 系统横滚角优化对比(回转运动)
Fig. 6 Comparison of rolling angle under the condition of slewing motion



(a) 直线潜行时系统重心运动轨迹



(b) 回转运动时系统重心运动轨迹

图 7 系统重心运动轨迹

Fig. 7 Comparison of trajectories of DPV before and after optimization

4 结论

(1) 不同的潜水速度会改变推进器的最优位置, 当速度较小时, 推进器位置随速度变化较小, 因此有利于推进器位置的确定; 当速度较大(超过 1 m/s)时, 推进器与动坐标原点之间的距离随速度

的增大而增加,但在 y 和 z 方向上基本不变。

(2) 优化后的蛙人潜水推进装置可以有效减小潜水的横滚角震荡幅度和潜水的垂向速度,使潜水状态更加稳定,从而有利于降低潜水人员体力消耗,提高潜水舒适性。

参考文献:

- [1] 王帅, 刘涛. 蛙人运载装备体系发展现状及关键技术[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 198-210.
Wang Shuai, Liu Tao. Current Status of Swimmer Delivery Equipment System and Key Technologies[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 198-210.
- [2] 钟宏伟, 韩雪, 周辉. 一种用于蛙人或有效载荷的水下新型运载器[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(6): 47-51.
Zhong Hongwei, Han Xue, Zhou Hui. A New Underwater Operating Swimmer Delivery Vehicle (SDV) for Divers and Payload[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(6): 47-51.
- [3] 任奕. 国外海军用于运载特种部队的水下装备[J]. 水雷战与舰船防护, 2013, 21(4): 75-77.
Ren Yi. Underwater Equipments for Carrying Special Forces by Foreign Navies[J]. Mine Warfare and Ship Self-Defense, 2013, 21(4): 75-77.
- [4] Anam H, Haris L, Girindra W, et al. Recent Advances in Diver Propulsion Vehicle (DPV) Ganendra RI-1: Design, Analysis, Manufacture and Performance[J]. Journal of Unmanned System Technology (S2287-7320), 2016, 4(3): 69-74.
- [5] Withington T. Diver Propulsion Vehicles[J]. Naval Forces (S0722-8880), 2012, 33(3): 27-38.
- [6] Wyman D. Diver Propulsion Device[P]. EP 1272389 B1, 2011.
- [7] Fenu A, Segatto M, Sieber A. Support for Diver Propulsion Vehicles[P]. US: 9540090 B2, 2015.
- [8] Valente O. Propulsion System for Scuba Diver[P]. US: 7124701 B2, 2006.
- [9] Mazin B A. Diver Propulsion Assembly and Method[P]. US: 8567336 B1, 2013.
- [10] Melendez M. Propulsion System for Use by a Swimmer[P]. US: 9327165 B2, 2016.
- [11] 李天森. 鱼雷操纵性 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Li Tiansen, Torpedo Maneuverability [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [12] Gertler M, Hagen G R. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation[C]//Woolaver D, Pritchett C, Naval Ship Research and Development Center. Bethesda: MD, 1967, 32-47.
- [13] Sadeghizadeh M R S, Kamali B R. Optimization of a Diver Propulsion Vehicle Hydrodynamics Parameter and its' Shape Improvement by CFD Method for Improving Underwater Speed Record[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics (S1319-1328), 2017, 10(5): 1319-1328.
- [14] Chen Z, Yu J, Zhang A, et al. Design and Analysis of Folding Propulsion Mechanism for Hybrid-Driven Underwater Gliders[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2016, 119: 125-134.
- [15] 冯双双, 沙永祥, 魏晓娟, 等. 物体附加质量CFD计算方法[C]. 成都: 中国计算力学大会, 2014.
Feng Shuangshaung, Sha Yongxiang, Wei Xiaojuan, et al. Numerical Method of Added Mass Based on CFD Theory[C]. Chengdu: China Computational Mechanics Conference, 2014.
- [16] Raza N, Mehmood I, Rafiuddin H, et al. Numerical Simulation of Added Mass Determination of Standard Ellipsoids[C]. International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. Islamabad: IEEE, 2012: 270-273.
- [17] 杨磊, 曹军军, 姚宝恒, 等. 水下滑翔机附加质量数值计算[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(23): 116-120, 134.
Yang Lei, Cao Junjun, Yao Baoheng, et al. Numerical Method for Added Mass of an Underwater Glider[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(23): 116-120, 134.
- [18] Kim H, Ranmuthugala D, Zhi Q L, et al. Six-DOF Simulations of an Underwater Vehicle Undergoing Straight Line and Steady Turning Manoeuvres[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2018, 150: 102-112.