

文章编号: 1007-7294(2024)11-1687-13

一种ROV型深海矿物采集装置的路径跟踪控制方法

陈昱衡¹, 张海成¹, 邹伟生¹, 李秋华², 徐道临¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410082)

摘要: 本文针对一种新型遥控无人潜水器(Remote Operated Vehicle, ROV)拖曳采集装置(Mining Robot, MRT)的路径跟踪问题, 提出一种路径跟踪控制方法。首先建立简化的ROV型深海采集装置的运动模型, 随后提出一种基于线性模型预测控制算法(Linear Model Predictive Control, LMPC)和非线性模型预测控制器(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)的路径跟踪算法。与传统的模型预测控制器(Model Predictive Control, MPC)不同, 本文提出的双层模型预测控制算法(Double Model Predictive Control, DMPC)由两部分组成: (1) 由MRT的LMPC控制器计算得到MRT的速度控制律, 用于快速收敛MRT的跟踪误差; (2) 由ROV的NMPC控制器计算得到ROV的控制输入, 用于响应MRT的速度控制律。在DMPC的设计中, 有效考虑状态量和控制量约束, 其中为了保证ROV控制输入的平顺性, 引入ROV的控制量增量约束。最后, 设计仿真实验用于验证MRT的路径跟踪效果, 数值仿真结果证明了该算法的有效性。

关键词: 深海采矿装备; 无人遥控潜水器; 移动机器人; 模型预测控制

中图分类号: O232 U66 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.11.006

Path tracking method for ROV deep-sea mining equipment

CHEN Yu-heng¹, ZHANG Hai-cheng¹, ZOU Wei-sheng¹, LI Qiu-hua², XU Dao-lin¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410082, China)

Abstract: To solve the path tracking problem of ROV deep-sea mining equipment, where a Mining Robot (MRT) is towed by a Remote Operated Vehicle (ROV), the motion model of a simplified ROV deep-sea mining equipment was established first. Then, a path tracking algorithm based on Linear Model Predictive Control (LMPC) and Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) was proposed. Different from the traditional Model Predictive Control (MPC), the proposed Double Model Predictive Control (DMPC) algorithm consists of two parts: (1) the LMPC controller of MRT for calculation of the speed control law of MRT, which is used to quickly converge the tracking error of MRT; (2) the NMPC controller of the ROV for calculation of the control input of the ROV, which is used to follow the speed control law of the MRT. In the design of DMPC, constraints of state quantity and control quantity were considered effectively. In order to ensure the smoothness of ROV control input, the incremental control quantity constraint of ROV was introduced. Finally, simulation experiments were designed to verify the path tracking performance of MRT. Numerical simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: deep sea mining equipment; ROV; mobile robot, model predictive control

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071138; 12302028)

作者简介: 陈昱衡(1996-), 男, 博士研究生; 张海成(1987-), 男, 博士, 副教授;

邹伟生(1965-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: zouweisheng@sina.com。

0 引 言

随着人类社会的不断发展,陆地的矿产资源正在逐渐枯竭,而海底富集可开采的矿物资源,如多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物。海底矿物资源多含铜、镍、钴等多种金属元素,极具商业开采价值^[1]。这些矿物资源的开采利用,需要通过可商业化的深海采矿系统来实现。从 20 世纪 70 年代开始,世界各国就开始了深海采矿系统的探索,目前由水面支持系统、动力输送系统、水下输送系统、水下中继站和海底集矿与导航定位系统组成的深海采矿系统(如图 1 所示)被认为最具商业化开采潜质。在海底集矿与导航定位系统中,通常采用自行式履带采矿车作为采集装置^[1-3],但传统的自行式履带采矿车在稀软海底沉积物上行走时常会发生打滑、沉陷,行走困难等问题^[4]严重影响深海采矿效率。为此,邹伟生等^[5]提出了一种新型的 ROV 型深海采矿系统,如图 2 所示,其中 ROV 型深海采集装置由潜游 ROV 和 MRT 组成,故将 ROV 型深海采集装置简称为 ROV-MRT。潜游 ROV 与 MRT 通过钢架铰接,拖曳采集装置在海底表面滑行,控制采集装置的接地比压,使其小于海底沉积物的承载能力,从而保持采矿机构的离地高度恒定,提高采集机构的采矿效率^[5]。采矿机器人可以不再受海底复杂地形和坡度的限制,避免了海底采矿车底盘在沉积层上的打滑、沉陷的问题。ROV 是一种具有完整约束的水下机器人,ROV 的动力学模型具有强非线性耦合的特点,同时其水动力参数较难精准测算,因此其运动控制是一大难题^[6-10]。控制 ROV 拖曳 MRT 精准跟踪预设路径更是一大挑战。

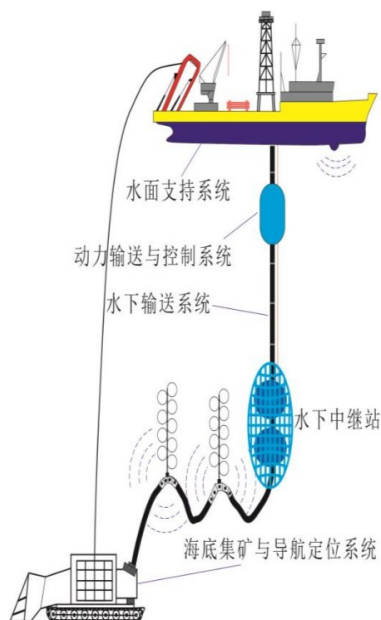


图 1 传统深海采矿系统

Fig.1 Traditional deep sea mining system

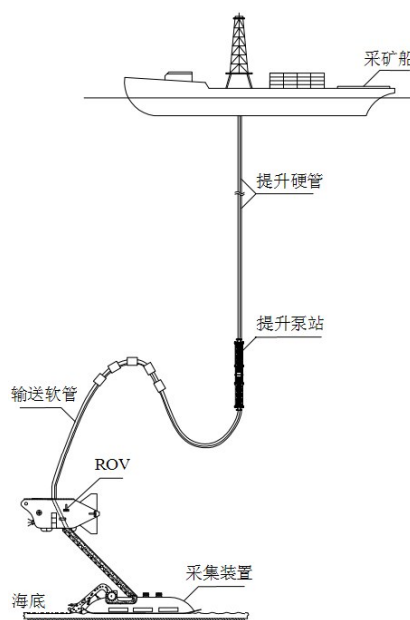


图 2 ROV 型深海采矿系统

Fig.2 ROV deep sea mining system

在传统海底采矿车的路径跟踪控制中,滑模控制(Slip Mode Control, SMC)、PID算法和模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)等可作为上层的控制算法得到期望的速度控制律,随后结合运动学模型,将其转变为期望的驱动轮转速来完成响应^[11-14]。戴瑜等^[12]提出了一种模糊 PID 的路径跟踪控制方法,具有较好的鲁棒性,但是路径跟踪精度较低。MPC 根据依赖的模型是否线性可分为(Linear Model Predictive Control, LMPC)和非线性模型预测控制(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)。MPC 根据是否对模型进行线性化处理,可分为 LMPC 和 NMPC^[15]。LMPC 适用于弱非线性模型和线性模型,可将带约束的 MPC 优化问题转变成标准的 QP 问题,QP 问题求解快速,其实时性较好。NMPC 可用于强非线性模型,求解带约束的一般非线性规划问题,当系统维度较高或预测步长较长时, NMPC 的实时性较差。文献[16-17]采用 LMPC 设计 ROV 的速度控制律,文献[16]在响应速度控制律的时候基

于高维耦合的非线性动力学模型设计了NMPC控制器,相比于文献[17]中由动力学关系直接计算ROV控制量的方法,不仅提高了速度响应的鲁棒性,同时获得了平顺的ROV控制量,但在耦合的非线性模型约束和控制量约束下,该NMPC控制器的实时性较差。

白国星等^[14]基于MPC设计了移动机器人的速度控制律,与文献[14]所提出的LMPC控制算法相比,显著提高了移动机器人的路径跟踪精度,但是降低了算法的实时性。陈昱衡等^[13]针对传统海底采矿车的路径跟踪问题提出了一种快速收敛跟踪误差的滑模控制律,随后采用LMPC优化该控制律,不仅提高了路径跟踪精度,也抑制了单一滑模控制带来的抖振。当速度控制律转变为直接的控制输入时,若基于不精准的运动学模型,会导致控制效果的退化。海底采矿车在沉积层上发生打滑和沉陷时,该现象对采矿车的影响具有较高的不确定性,故难以在运动学建模时考虑进去,因此传统的海底采矿车运动学模型就失真了^[18-19]。秦兆博等^[20]提出了基于双层无迹卡尔曼滤波估计履带车辆瞬时转向中心的方法,用瞬时转向中心的变化来体现打滑和沉陷的影响,以此改善模型失真的问题。陈昱衡等^[21]基于履带车动力学模型,采用自适应无迹卡尔曼滤波估计履带打滑率,将打滑和沉陷的影响体现在履带的打滑率上,以此改善模型失真的问题。传统海底采矿车和MRT均可以由上层控制算法得到其速度控制律。传统海底采矿车的速度控制律由履带两侧的驱动轮响应,最大难点在于如何在打滑和沉陷的影响下精准响应上层控制律。MRT的速度控制律通过柔性钢架铰接的ROV响应,速度控制律的响应更为复杂。

对于新型ROV型深海采矿系统,ROV是一种多自由度具有完整约束的机器人,其动力学模型具有强非线性耦合的特点^[22-23],由于水动力学系数较难精准获取,故难以建立精准的动力学模型,但能建立不失真的动力学模型。为此在单体ROV的运动控制中,可基于具有较好鲁棒性的MPC算法,由ROV的动力学模型响应期望速度^[16-17]。在ROV型深海采矿系统中,与MRT铰接的钢架会产生一个较难辨识的载荷,且对ROV的动力学特性的影响较大。故在考虑钢架载荷的情况下,难以建立不失真的单体ROV动力学模型。为此,采用欧拉法建立ROV-MRT的整体动力学模型,不仅考虑了铰接钢架的载荷,同时还能得到不失真的动力学模型用于响应MRT的速度控制律。

为此本文采用LMPC设计MRT的速度控制律,通过运动学关系得到ROV期望的速度和偏航角速度,该控制律可以快速收敛MRT路径跟踪偏差且不影响实时性。MRT控制律可以根据ROV-MRT的运动学关系转变成ROV期望的航速和偏航角速度,为了获得平顺ROV控制量和保证算法的实时性,通过解耦ROV-MRT动力学模型来降低非线性规划求解的系统维度,并设计了带约束的ROV航速NMPC控制器和ROV航向NMPC控制器。本文的第一章为ROV型深海采集装置的运动建模,介绍MRT-ROV的速度传递关系和ROV-MRT动力学模型;第二章介绍ROV型深海采集装置的路径跟踪算法;第三章为仿真分析,通过两种采集路径验证所提出的路径跟踪算法的可行性。

1 ROV型深海采集装置运动建模

本文主要研究ROV型深海采集装置的动力学特性及其路径跟踪算法,ROV上部的输送软管搭载浮力块起到运动补偿作用,故输送软管所产生的载荷对ROV的动力学特性的影响较小,在建模时忽略输送软管的作用。ROV偏航方向的水阻力系数较大,实际的偏航速度都比较小,可忽略不计;且在做弧线航行时,转向主要通过偏航角速度来实现。故在运动学建模时假设其航行方向等于偏航角。本文主要研究ROV拖曳MRT的路径跟踪算法,假设ROV在定深处拖曳MRT,MRT贴着海底表面滑行,因此在水平面内进行运动建模,为此仅考虑动能,不考虑势能的变化。同时为了简化模型,将MRT视为质点模型。铰接钢架相比于ROV和MRT的质量,质量较小,其动能可忽略不计,故未考虑铰链钢架的影响。此时MRT有2个自由度,ROV有3个自由度。

1.1 ROV-MRT 运动学模型

简化后的 ROV-MRT 运动模型如图 3 所示,其中 xoy 为大地坐标系, XOY 为 ROV-MRT 载体坐标系, v_0 为 ROV 偏航速度, u_0 为 ROV 航速, ω 为 ROV 的偏航角速度, θ 为 ROV 的偏航角, v_1 为 MRT 沿 Y 轴方向的速度, u_1 为 MRT 沿 X 轴方向的速度, L 为钢架长度。ROV-MRT 的运动学关系如下式所示:

$$\begin{cases} u_1 = u_0 \\ v_1 = v_0 + L\omega \\ \dot{\theta} = \omega \\ \dot{x}_{MRT} = u_1 \cos \theta - v_1 \sin \theta \\ \dot{y}_{MRT} = u_1 \sin \theta + v_1 \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中满足 $\dot{X} = u_0, \dot{Y} = v_0$

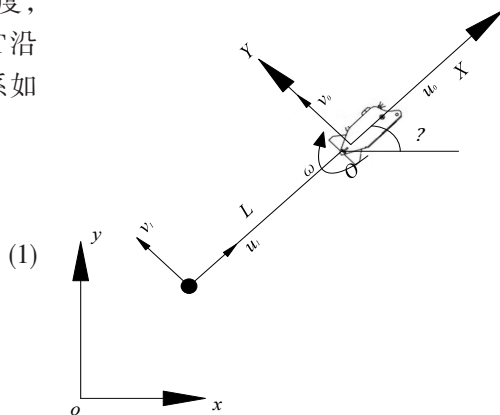


图 3 ROV-MRT 运动模型
Fig.3 ROV-MRT motion model

1.2 ROV-MRT 动力学模型

采用拉格朗日法建立 ROV-MRT 动力学模型。假设 ROV 质量为 m_0 , 转动惯量为 I_z , MRT 质量为 m_1 , 则 ROV 动能 K_0 、MRT 动能 K_1 和 ROV-MRT 的动能 K 可由下式所示:

$$\begin{cases} K_0 = \frac{1}{2} m_0 (u_0^2 + v_0^2) + \frac{1}{2} I_z \omega^2 = \frac{1}{2} m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}^2 \\ K_1 = \frac{1}{2} m_1 (v_1^2 + u_1^2) = \frac{1}{2} m_1 (\dot{X}^2 + (\dot{Y} + L\dot{\theta})^2) \\ K = K_0 + K_1 = \frac{1}{2} m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{X}^2 + (\dot{Y} + L\dot{\theta})^2) \end{cases} \quad (2)$$

由于本文假设 ROV 在定深处拖曳 MRT, MRT 贴着水平的海底滑行, 故 ROV-MRT 的势能 E 为常数 C :

$$E = C \quad (3)$$

已知 ROV-MRT 的动能 K 和势能 E 后可得其拉格朗日函数 $L(\dot{\Theta}, \Theta)$:

$$L(\dot{\Theta}, \Theta) = K - E = \frac{1}{2} m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{X}^2 + (\dot{Y} + L\dot{\theta})^2) - C \quad (4)$$

式中, $\Theta = (X, Y, \theta), \dot{\Theta} = (\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\theta})$ 。

假设 ROV-MRT 所受到的力和力矩矢量为

$$\bar{\tau} = (\bar{F}_X, \bar{F}_Y, \bar{T}_N)^T \quad (5)$$

式中, \bar{F}_X 为 ROV 载体坐标系 X 轴方向的合力, \bar{F}_Y 为 ROV 载体坐标系 Y 轴方向的合力, \bar{T}_N 为驱动 ROV 转动的合力矩。

根据拉格朗日方程, 可建立的 ROV-MRT 的动力学方程为

$$\bar{\tau} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L(\dot{\Theta}, \Theta)}{\partial \dot{\Theta}} - \frac{\partial L(\dot{\Theta}, \Theta)}{\partial \Theta} = \begin{bmatrix} (m_1 + m_0)u_0 \\ m_0 \dot{v}_0 + m_1 (\dot{v}_0 + L\dot{\omega}) \\ I_z \dot{\omega} + m_1 L (\dot{v}_0 + L\dot{\omega}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ROV 在定深处拖曳 MRT 贴着海底行走, 工作状态时 MRT 建议始终处于较小的接地比压力, 假设 MRT 不受底质的影响, 则 MRT 仅受到 X 轴方向的水阻力 f_X 和 Y 轴方向的水阻力 f_Y :

$$\begin{cases} f_X = X_{u1} |u_1| u_1 = X_{u0} |u_0| u_0 \\ f_Y = Y_{v1} |v_1| v_1 = Y_{v0} |v_0 + L\omega| (v_0 + L\omega) \end{cases} \quad (7)$$

式中, X_{u1} 和 Y_{v1} 为 MRT 的水阻力系数。

ROV 主要受到理想流体力、粘性流体阻尼力和升力、恢复力、外部扰动力和控制力的影响, 当 ROV 在定深处时, 可忽略恢复力。此时忽略外部扰动力, 结合式(7), 推导出 $\overline{F_x}$ 、 $\overline{F_y}$ 和 $\overline{T_N}$:

$$\begin{cases} \overline{F_x} = |u_0|u_0X_{uu} + |\omega|\omega X_{rr} + (m_0 + X_{ur})v\omega + X_{ii}\dot{u}_0 + F_x + f_x \\ \overline{F_y} = |v_0|v_0Y_{vv} + |\omega|\omega Y_{rr} + (Y_{ur} - m_0)u_0\omega + Y_{uv}u_0v_0 + Y_i\dot{v}_0 + Y_i\dot{\omega} + F_y + f_y \\ \overline{T_N} = |v_0|v_0N_{vv} + |\omega|\omega N_{rr} + (N_{ur} - m_0)u_0\omega + N_{uv}u_0v_0 + N_i\dot{v}_0 + N_i\dot{\omega} + T_N + f_yL \end{cases} \quad (8)$$

式中, X_{ii} 、 Y_{ii} 和 N_{ii} 为附加质量, X_{ur} 、 Y_{ur} 、 N_{ur} 、 Y_i 和 N_i 为交叉项附加质量, X_{uu} 、 X_{rr} 、 Y_{vv} 、 Y_{rr} 、 N_{rr} 和 N_{vv} 为横流阻力系数, N_{uv} 为载体升力矩系数, Y_{uv} 为载体升力系数, F_x 、 F_y 和 T_N 为 ROV 的控制力和控制力矩。

整合式(6)、式(7)和式(8), 可得到 ROV-MRT 动力学模型为

$$M\dot{\xi} = (C + D)\xi + F + \tau \quad (9)$$

式中, M 为等效质量矩阵, C 为 ROV 附加哥氏力和向心力矩阵, D 为 ROV 水动力阻尼矩阵, $\tau = [F_x, F_y, T_N]^T$ 为 ROV 控制输入, $\xi = (u_0, v_0, \omega)^T$ 为 ROV 速度矢量, F_w 反映了 MRT 的水阻力。

M 由下式表示:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 + m_0 - X_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_0 - Y_{ii} & m_1L - Y_i \\ 0 & m_1L - N_i & I_z + m_1L^2 - N_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

C 由下式表示:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (m_0 + X_{ur})v \\ 0 & Y_{uv}u_0 & (Y_{ur} - m_0)u_0 \\ 0 & N_{uv}u_0 & (N_{ur} - m_0)u_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

D 由下式表示:

$$D = \begin{bmatrix} X_{uu}|u_0| & 0 & X_{rr}|\omega| \\ 0 & Y_{vv}|v_0| & Y_{rr}|\omega| \\ 0 & N_{vv}|v_0| & N_{rr}|\omega| \end{bmatrix} \quad (12)$$

F_w 由下式表示:

$$F_w = \begin{bmatrix} X_{u1}|u_0|u_0 \\ Y_{v1}|v_0 + L\omega|(v_0 + L\omega) \\ Y_{v1}|v_0L + L^2\omega|(v_0 + L\omega) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 ROV 型深海采集装置路径跟踪控制器

ROV 型深海采矿装置的路径跟踪控制器如图 4 所示。ROV-MRT 载体坐标系方向的位置偏差 $(e_x(k), e_y(k))$ 由 MRT 位置 $(x_{MRT}(k), y_{MRT}(k))$ 、ROV 参考偏航角 $\theta_r(k)$ 和 MRT 参考位置 $(x_{MRT_r}(k), y_{MRT_r}(k))$ 生成。MRT 路径跟踪 LMPC 控制器计算得到 MRT 的控制律 $u_{MRT}(k)$, 并根据 ROV-MRT 运动学关系得到 ROV 的参考航速 $u_{or}(k)$ 、参考偏航角速度 $\omega_r(k)$ 和参考偏航速度 $v_{or} = 0$ 。最后由 ROV 航速 NMPC 控制器和 ROV 航向 NMPC 控制器输出 ROV 的控制输入 $\tau(k)$ 。

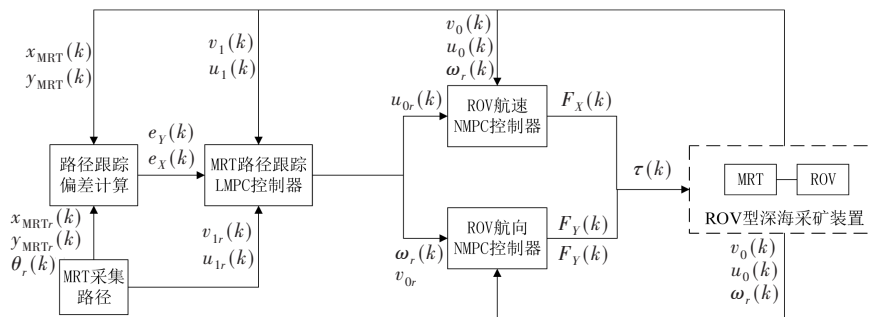


图4 ROV 型深海采矿装置路径跟踪控制器

Fig.4 Path tracking controller of ROV deep-sea mining system

2.1 基于LMPC的MRT路径跟踪控制器

MRT的运动学方程如下式所示：

$$\begin{bmatrix} X_{MRT} \\ Y_{MRT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

在参考点处采用欧拉法进行离散化处理：

$$\tilde{\eta}(k + 1) = \tilde{\eta}(k) + T\tilde{u}(k) \tag{15}$$

式中, T 为采样时间,控制量偏差 $\tilde{u}(k) = u(k) - u_r(k)$,真实控制量 $u(k) = [u_1(k); v_1(k)]$,参考控制量 $u_r(k) = [u_{1r}(k); v_{1r}(k)]$, $u_{1r}(k)$ 和 $v_{1r}(k)$ 为ROV-MRT载体坐标系方向的参考速度。状态量偏差 $\tilde{\eta}(k) = [e_x(k); e_y(k)]$,横向位置偏差 $e_x(k)$ 和纵向位置偏差 $e_y(k)$ 由下式计算：

$$\begin{cases} e_x(k) = \cos(\theta_r)(x_{MRT}(k) - x_{MRT_r}(k)) + \sin(\theta_r)(y_{MRT}(k) - y_{MRT_r}(k)) \\ e_y(k) = -\sin(\theta_r)(x_{MRT}(k) - x_{MRT_r}(k)) + \cos(\theta_r)(y_{MRT}(k) - y_{MRT_r}(k)) \end{cases} \tag{16}$$

以 $v_1(k)$ 和 $u_1(k)$ 的改变量 $\Delta v_1(k)$ 和 $\Delta u_1(k)$ 为控制量,得到新的状态空间模型：

$$\xi(k + 1) = A_{MRT}\xi(k) + B_{MRT}\Delta u(k) \tag{17}$$

其中状态量 $\xi(k) = [\tilde{\eta}(k); \tilde{u}(k)]$,控制量 $\Delta u(k) = (\Delta v_1(k), \Delta u_1(k))^T$,状态矩阵 A_{MRT} 如下式所示：

$$A_{MRT} = \begin{bmatrix} I_2 & TI_2 \\ 0_{2 \times 2} & I_2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

式中, I_2 为2阶单位矩阵, $0_{2 \times 2}$ 为2行2列各元素全为0的矩阵。

控制矩阵 B_{MRT} 如下式所示：

$$B_{MRT} = \begin{bmatrix} TI_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{19}$$

MRT需要跟踪预设采集路径进行作业,故MRT的路径跟踪控制器目标函数如下式所示：

$$J_{MRT}(k) = \sum_{i=1}^{N_{\rho 0}} \|\xi(k + i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_{c 0} - 1} (\|\Delta u(k + i|k)\|_R^2) \tag{20}$$

式中, $N_{\rho 0}$ 为预测步长, $N_{c 0}$ 为控制步长,满足 $N_{\rho 0} > N_{c 0}$ 。

将式(5)代入式(6),忽略常数项和状态量,代价函数可转变为

$$J_{MRT}(k) = 0.5 \cdot \Delta U(k)^T H(k) \Delta U(k) + f^T(k) \Delta U(k) \tag{21}$$

式中, $\Delta U(k) = (\Delta u(k|k), \Delta u(k + 1|k), \dots, \Delta u(k + N_c - 1|k))^T$, $H(k) = 2(\bar{B}^T(k)\bar{Q}\bar{B}(k) + \bar{R})$, $\bar{Q} = \text{diag}(Q_{MRT}, Q_{MRT}, \dots, Q_{MRT})$, $\bar{R} = \text{diag}(Q_{MRT}, Q_{MRT}, \dots, Q_{MRT})$, Q_{MRT} 为4阶正定对角矩阵, R_{MRT} 为2阶正定对角

矩阵, $f(k) = 2\bar{B}^T(k)\bar{Q}\tilde{\eta}(k)$, $\bar{B}(k)$ 如下式所示:

$$\bar{B}(k) = \begin{bmatrix} B_{MRT}(k) & 0 & \cdots & 0 \\ A_{MRT}(k)B_{MRT}(k) & B_{MRT}(k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{MRT}(k)^{N_p-1}B_{MRT}(k) & A_{MRT}(k)^{N_p-2}B_{MRT}(k) & \cdots & A_{MRT}(k)^{N_p-2}B_{MRT}(k) \end{bmatrix} \quad (22)$$

考虑控制量和控制增量约束, 通过求解如下的二次规划, 可得到优化控制序列 $\Delta U^*(k) = (\Delta u^*(k|k), \Delta u^*(k+1|k), \dots, \Delta u^*(k+1|k))$:

$$\begin{aligned} \Delta U^*(k) &= \arg \min_{\Delta U(k)} J_{MRT}(K) \\ \Delta U_{\min} &\leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max} \\ \text{s.t.} \\ U_{\min} &\leq A_u \Delta U(k) + U(k) \leq U_{\max} \end{aligned} \quad (23)$$

其中 $U(k) = \underbrace{[u(k); u(k); \dots; u(k)]}_{N_p}$, A_u 由下式所示:

$$A_u = \begin{bmatrix} I_2 & 0_{2 \times 2} & \cdots & 0_{2 \times 2} \\ I_2 & I_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0_{2 \times 2} \\ I_2 & I_2 & \cdots & I_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

通过求解式(23)的优化问题, 根据下式计算 MRT 的速度控制律 $u_{MRT}(k)$:

$$u_{MRT}(k) = \begin{bmatrix} u_{1mpc}(k) \\ v_{1mpc}(k) \end{bmatrix} = u_r(k) + \Delta u^*(k|k) \quad (25)$$

式中, $u_{1mpc}(k)$ 和 $v_{1mpc}(k)$ 对应当前 ROV-MRT 载体坐标轴方向的期望速度。

由于 $v_{0r} = 0$, 根据式(1)所示的运动学关系, 计算 ROV 的参考航速 $u_{0r}(k)$, 参考偏航角速度 $\omega_r(k)$:

$$\begin{cases} u_{0r}(k) = u_{1mpc}(k) \\ \omega_r(k) = v_{1mpc}(k)/L \end{cases} \quad (26)$$

2.2 基于 NMPC 的 ROV 航速控制器

根据式(9)描述的 ROV-MRT 动力学模型, 在 ROV 的航速控制时, 假设 ROV 偏航速度 v_0 和偏航角速度 ω 不变, 可以解耦得到 ROV 航速控制的非线性模型 $\dot{u}_0 = f_1(u_0, F_x)$:

$$\dot{u}_0 = f_1(u_0, F_x) = \left((X_{u1} + X_{uu})|u_0|u_0 + |\omega|\omega X_{rr} + (m_0 + X_{vr})v_0\omega + F_x \right) / (m_1 + m_0 - X_{ii}) \quad (27)$$

考虑状态量 u_0 的约束和控制量 F_x 的约束, 设计如下的非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^{N_{p1}} \|u_0(k+i|k) - u_{0r}(k)\|_{Q_{u0}}^2 + \sum_{i=1}^{N_{c1}-2} \|FX(k+i+1|k) - F_x(k+i|k)\|_{R_{Fx}}^2 \\ u_0(k+i+1|k) &= u_0(k+i|k) + Tf_1(u_0(k+i|k), F_x(k+i|k)), i = 0, 1, \dots, N_{c1} - 1 \\ u_0(k+i+1|k) &= u_0(k+i|k) + Tf_1(u_0(k+j|k), 0), j = N_{c1}, N_{c1} + 1, \dots, N_{p1} - 1 \\ \text{s.t. } u_{0\min} &\leq u_0(k+i|k) \leq u_{0\max}, i = 0, 1, \dots, N_{p1} \\ F_{x\min} &\leq F_x(k+i|k) \leq F_{x\max}, i = 0, 1, \dots, N_{c1} - 1 \\ \Delta F_{x\min} &\leq F_x(k+i+1|k) - F_x(k+i|k) \leq \Delta F_{x\max}, i = 0, 1, \dots, N_{c1} - 2 \end{aligned} \quad (28)$$

式中, Q_{u0} 和 R_{Fx} 为权重系数, N_{p1} 为预测时域, N_{c1} 为控制时域, 满足 $N_{p1} > N_{c1}$ 。

通过求解式(28)的优化问题, 可得到航速控制力 F_x 对应的最优控制序列:

$$\left(F_x^*(k|k), F_x^*(k+1|k), \dots, F_x^*(k+N_{c1}-1|k) \right) \tag{29}$$

其中选取第一个元素作为当前时刻的航速控制力:

$$F_x(k) = F_x^*(k|k) \tag{30}$$

2.3 基于 NMPC 的 ROV 航向控制器

根据式(9)描述的 ROV-MRT 动力学模型,在 ROV 的航向控制时,假设 ROV 航速 u_0 不变,可以解耦得到 ROV 航向控制的非线性模型 $\dot{X}_v = f_2(X_v, \tau_v)$:

$$\dot{X}_v = M_v^{-1} \left((C_v + D_v(X_v)) X_v + F_v(X_v) + \tau_v \right) \tag{31}$$

式中, $C_v = \begin{bmatrix} Y_{ur}u_0 & (Y_{ur} - m_0)u_0 \\ N_{ur}u_0 & (N_{ur} - m_0)u_0 \end{bmatrix}$, $\tau_v = \begin{bmatrix} F_Y \\ T_N \end{bmatrix}$, $X_v = \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega \end{bmatrix}$, $M_v = \begin{bmatrix} m_1 + m_0 - Y_i & m_1 L - Y_r \\ m_1 L - N_i & I_{zz} + m_1 L^2 - N_i \end{bmatrix}$,

$$D_v(X_v) = \text{diag} \left(Y_{vv} |v_0| + Y_{rr} |\omega|, N_{vv} |v_0| + N_{rr} |\omega| \right), F_v(X_v) = \begin{bmatrix} Y_{v1} |v_0 + L\omega| (v_0 + L\omega) \\ Y_{v1} |v_0 L + L^2 \omega| (v_0 + L\omega) \end{bmatrix}^{\circ}$$

考虑状态量 u_0 的约束和控制量 τ_v 的约束,设计如下的非线性规划问题:

$$\min \sum_{i=1}^{N_{p2}} \|X_v(k+i|k) - X_{vr}(k)\|_{Q_v}^2 + \sum_{i=1}^{N_{c2}-2} \|\tau_v(k+i+1|k) - \tau_v(k+i|k)\|_{R_v}^2 \tag{32}$$

$$X_v(k+i+1|k) = X_v(k+i|k) + Tf_2(X_v(k+i|k), \tau_v(k+i|k)), i = 0, 1, \dots, N_{c2} - 1$$

$$X_v(k+j+1|k) = X_v(k+i|k) + Tf_2(X_v(k+j|k), 0_{2 \times 1}), j = N_{c2}, N_{c2} + 1, \dots, N_{p2} - 1$$

$$s.t. X_{vmin} \leq X_v(k+i|k) \leq X_{vmax}, i = 0, 1, \dots, N_{p2}$$

$$\tau_{vmin} \leq \tau_v(k+i|k) \leq \tau_{vmax}, i = 0, 1, \dots, N_{c2} - 1$$

$$\Delta \tau_{vmin} \leq \tau_v(k+i+1|k) - \tau_v(k+i|k) \leq \Delta \tau_{vmax}, i = 0, 1, \dots, N_{c2} - 2$$

其中, Q_v 和 R_v 为 2 阶正定对角矩阵, $0_{2 \times 1}$ 为 2 行 1 列的 0 矩阵, N_{p2} 为预测时域, N_{c2} 为控制时域, 满足 $N_{p2} > N_{c2}$ 。

通过求解式(32)的优化问题,可得到航向控制量 τ_v 对应的最优控制序列:

$$\left(\tau_v^*(k|k), \tau_v^*(k+1|k), \dots, \tau_v^*(k+N_{c2}-1|k) \right) \tag{33}$$

其中, $\tau_v^*(k+i|k) = [F_Y(k+i|k); T_N(k+i|k)]$, $i = 0, 1, \dots, N_{c2} - 1$, 选取最优控制序列的第一个元素作为当前时刻的航向控制量:

$$\begin{cases} F_Y(k) = F_Y^*(k|k) \\ T_N(k) = T_N^*(k|k) \end{cases} \tag{34}$$

3 仿真分析

根据式(1)和式(9)所描述的深海采矿装置动力学模型和运动模型,采用 Simulink 的 S-function 建立仿真被控模型,并在 Simulink 环境验证本文提出的算法。其中仿真被控模型参数参照等比例的样机模型,ROV-MRT 模型参数记录在表 1,仿真采样周期为 0.1 s。

表 1 ROV-MRT 模型参数
Tab.1 Parameters of the ROV-MRT model

符号	单位	数值	符号	单位	数值	符号	单位	数值
m_0	kg	49.81	I_{zz}	kg·m ²	11.61	m_1	kg	30.5
X_u	kg	-3.93	X_{u1}	kg/m	-25.21	Y_{v1}	kg/m	-23.4
Y_r	kg·m/rad	13.18	X_{rr}	kg/rad	-149.9	X_{rr}	kg/m	-13.18
N_r	kg·m ² /rad	-53.87	Y_v	kg	-149.9	Y_{ur}	kg/rad	22.05
N_{rr}	kg·m ² /rad ²	-1037	N_{vv}	kg	-21.71	N_{uv}	kg	-163.9
X_{uu}	kg/m	-8.21	Y_{rr}	kg/m	-553.4	N_{ur}	kg/rad	-13.66
L	m	2.5	N_v	kg/m	13.18	Y_{rr}	kg·m/rad ²	4.316

本文以直线圆弧拼接路径和正弦路径为例进行仿真分析,以验证本文提出的 ROV 型深海采集装置路径跟踪控制算法的控制性能。

3.1 直线圆弧路径

ROV 和 MRT 的直线圆弧运动路径如图 5 所示,由图 3 可知,ROV 有效拖曳了 MRT 跟踪预设路径。

MRT 的位置偏差和 ROV 的航向角偏差如图 6 所示,ROV 的速度响应效果如图 7 所示。由图 6 可知,MRT 的纵向偏差不超过 0.05 m,最大横向偏差约为 0.1 m,此时 MRT 的参考路径正在直线和圆弧间切换,MRT 与 ROV 通过杆长 2.5 m 的钢架连接,ROV 拖曳 MRT 进行转向或停止转向时,需要一定的响应时间。尽管如此,ROV 仍可拖曳 MRT 精准跟踪预设路径。如图 7 所示,ROV 可以精准响应期望的速度。

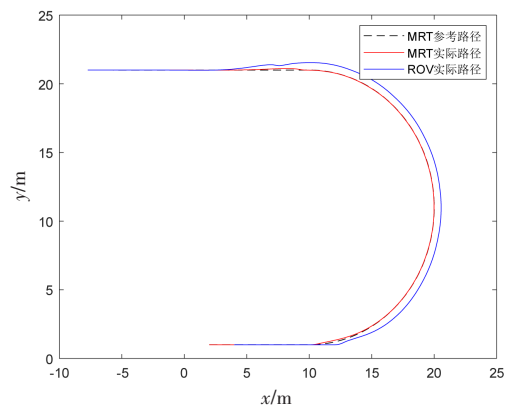


图 5 MRT 和 ROV 直线圆弧运动路径
Fig.5 Straight arc path of ROV and MRT

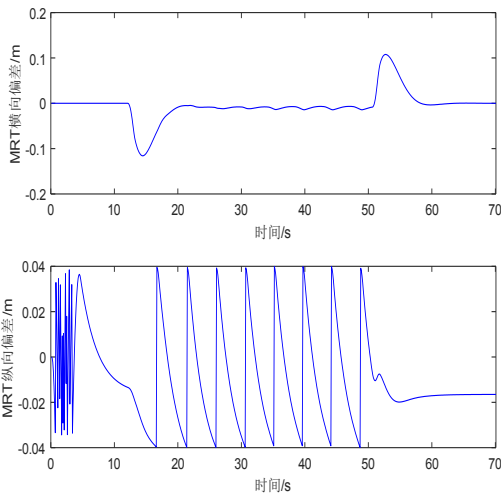


图 6 MRT 直线圆弧路径跟踪偏差

Fig.6 Straight arc path tracking deviation of MRT

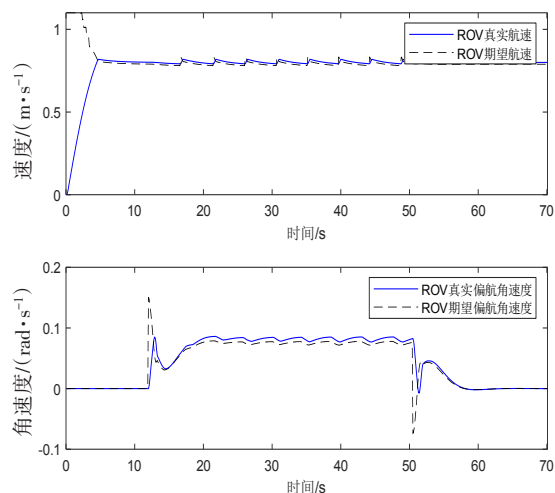


图 7 ROV 直线圆弧工况速度响应效果

Fig.7 Speed tracking result of ROV in straight arc path

ROV 的控制输入如图 8 所示,ROV 的动力输入变化较为平稳,可知 ROV 平稳地拖曳 MRT 跟踪了预设轨迹。

基于 LMPC 的 MRT 路径跟踪控制器,基于 NMPC 的 ROV 航速控制器和基于 NMPC 的 ROV 航向控制器的在线计算时间如表 2 所示,由表可知,三种控制器的计算耗时较低,可以满足算法的实时性要求。

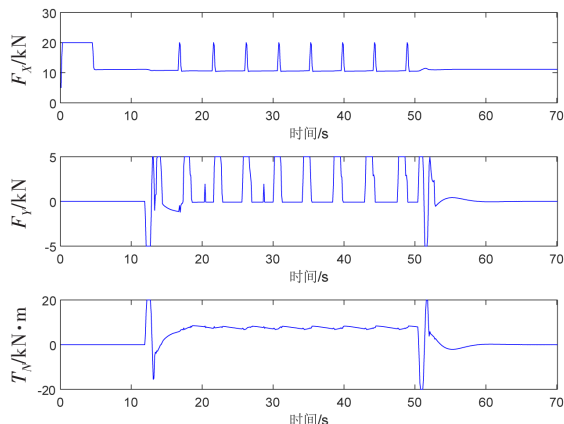


图8 ROV 直线圆弧工况控制输入

Fig.8 Control input of ROV in straight arc path

3.2 正弦路径

ROV 和MRT的正弦路径如图9所示,由图可知,ROV有效拖曳了MRT跟踪正弦路径。

MRT的位置偏差和ROV的航向角偏差如图10所示,ROV的速度响应效果如图11所示。由图10可知,MRT的横向偏差约为0.1 m,纵向偏差均小于0.06 m,MRT精准跟踪了预设轨迹。由图11所示,ROV同样较好地响应其期望线速度和偏航角速度。

表2 直线圆弧工况控制器计算耗时
Tab.2 Controllers' computing time in straight arc path

控制器类型	最大耗时/s	平均耗时/s
MRT路径跟踪控制器	0.0002	0.0001
ROV航速控制器	0.0041	0.0023
ROV航向控制器	0.0083	0.0042

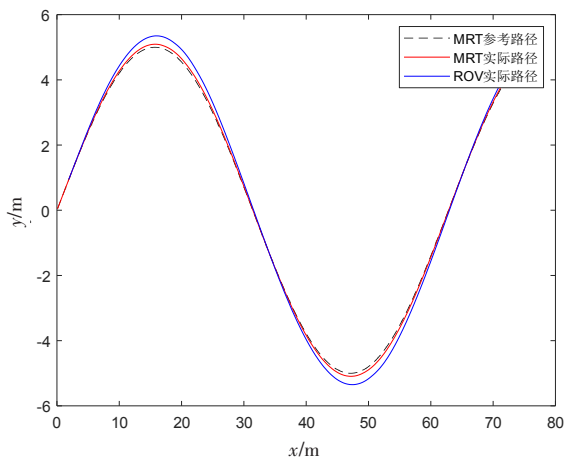


图9 MRT和ROV 正弦运动路径

Fig.9 Sine path of ROV and MRT

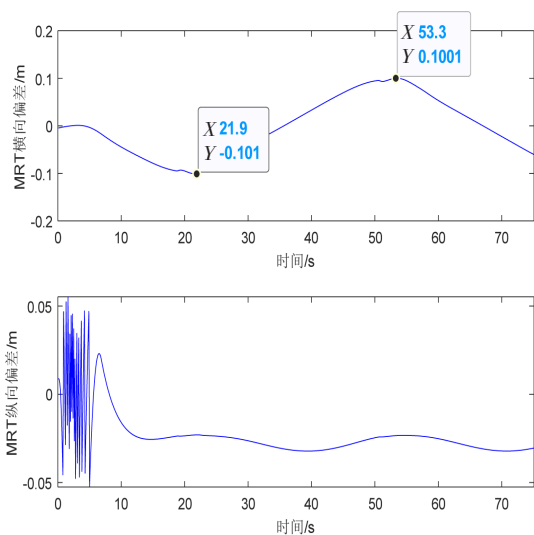


图10 MRT正弦路径跟踪偏差

Fig.10 Sine path tracking deviation of MRT

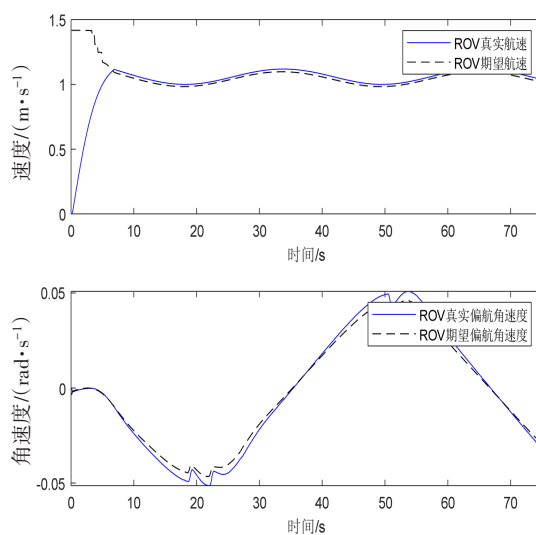


图11 ROV 正弦工况速度响应效果

Fig.11 Speed tracking results of ROV in sine path

ROV的控制输入如图12所示,在跟踪正弦路径时,ROV拖曳MRT时会产生一定的偏航速度,由于ROV期望的偏航速度始终是0,故此时 F_y 的作用是抵消ROV产生的偏航速度。最大的控制变化约为1 s变换5 kN,对应10个采样周期,此时的控制输入变化依旧是平顺的。故ROV同样平稳地拖曳MRT进行作业任务。

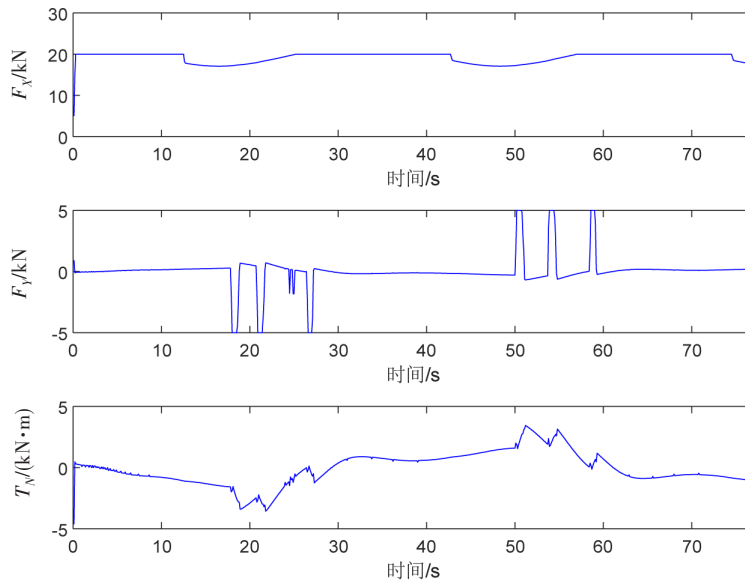


图 12 ROV 正弦工况控制输入

Fig.12 Control input of ROV in sine path

基于 LMPC 的 MRT 路径跟踪控制器, 基于 NMPC 的 ROV 航速控制器和基于 NMPC 的 ROV 航向控制器的在线计算时间如表 3 所示。由表可知, 三种控制器的计算耗时较低, 可以满足算法的实时性要求。

表 3 正弦工况控制器计算耗时

Tab.3 Controllers' computing time in sine path

控制器类型	最大耗时/s	平均耗时/s
MRT 路径跟踪控制器	0.0002	0.0001
ROV 航速控制器	0.0054	0.0025
ROV 航向控制器	0.0091	0.0057

4 结 语

本文提出了一种 ROV 型深海采矿装置的路径跟踪控制方法, 推导了其运动模型, 设计了计算 MRT 路径跟踪控制律的 LMPC 控制器。在 MRT 路径跟踪控制律的响应上, 根据 ROV-MRT 的运动学关系将其转变为 ROV 期望航速和偏航角速度后, 分别设计了基于 NMPC 的 ROV 航速控制器和基于 NMPC 的 ROV 航向控制器。以直线圆弧拼接的路径和正弦路径为例进行仿真分析, 结果显示 ROV 均可以拖曳 MRT 精准跟踪预设轨迹。仿真结果验证了本文所提出的 ROV 型深海采矿装置路径跟踪控制方法的有效性。

参 考 文 献:

[1] 康娅娟, 刘少军. 深海多金属结核开采技术发展历程及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2848-2860.
Kang Y J, Liu S J. Development history and prospect of deep sea polymetallic nodules mining technology[J]. Chinese Journal of Non-Ferrous Metals, 2021, 31(10): 2848-2860. (in Chinese)

[2] 康娅娟, 王长伟, 刘少军. 深海多金属结核商业开采水下垂直提升方案[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2938-2952.
Kang Y J, Wang C W, Liu S J. Underwater vertical lifting scheme for commercial mining of deep-sea polymetallic nodules [J]. Chinese Journal of Non-Ferrous Metals, 2021, 31(10): 2938-2952. (in Chinese)

[3] Dai Y, Xue C, Su Q, et al. Numerical analysis on hydrodynamic characteristics of a deep-sea mining vehicle under three typical motions[J]. Ocean Engineering, 2021, 235(1): 109446.

[4] 饶秋华, 刘泽霖, 许 锋. 深海稀软底质特性及采矿车行走性能研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2795-

- 2816.
- Rao Q H, Xu Z L, Xu F. Research progress on characteristics of deep-sea soft sediment and walking performance of mining vehicle[J]. Chinese Journal of Non-Ferrous Metals, 2021, 31(10): 2795–2816. (in Chinese)
- [5] 邹伟生, 孙亚川, 董文杰. 一种海洋矿产资源开采装置及开采方法: 中国: CN103628881A [P/OL]. 2014-03-12.
Zou W S, Sun Y C, Dong W J. The utility model relates to equipment and method for mining marine mineral resources: CN103628881A [P/OL]. 2014-03-12. (in Chinese)
- [6] Makavita C D, Jayasinghe S G, Nguyen H D, et al. Experimental study of command governor adaptive control for unmanned underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(1): 332–345.
- [7] Yan J, Gao J, Yang X, et al. Position tracking control of remotely operated underwater vehicles with communication delay[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(6): 2506–2514.
- [8] Batmani Y, Najafi S. Event-triggered H_∞ depth control of remotely operated underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(2): 1224–1232.
- [9] Njaka T, Brizzolaro S, Ben-tzvi P. Design and experimental validation of a novel high-speed omnidirectional underwater propulsion mechanism[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(5): 2339–2349.
- [10] Walker K L, Gabl R, Aracri S, et al. Experimental validation of wave induced disturbances for predictive station keeping of a remotely operated vehicle[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 5421–5428.
- [11] 白国星, 刘 丽, 孟 宇. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 47–52+60.
Bai G X, Liu L, Meng Y. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 47–52+60. (in Chinese)
- [12] Dai Y, Su Q, Zhang Y. A new dynamic model and trajectory tracking control strategy for deep ocean mining vehicle[J]. Ocean Engineering, 2020, 216(1):108126.
- [13] 陈昱衡, 吴鸿云, 边有钢. 基于滑模预测控制的海底采矿车轨迹跟踪算法[J]. 信息与控制, 2022, 51(1): 119–128.
Chen Y H, Wu H Y, Bian Y G. A sliding mode predictive control-based trajectory tracking algorithm for a seabed mining vehicle[J]. Information and Control, 2022, 51(1): 119–128. (in Chinese)
- [14] 胡家铭, 胡宇辉, 陈慧岩. 基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(3): 456–463.
Hu J M, Hu Y H, Chen H Y. Research on trajectory tracking of unmanned tracked vehicles based on model predictive control[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3): 456–463. (in Chinese)
- [15] 白国星, 孟 宇, 刘 立. 无人驾驶车辆路径跟踪控制研究现状[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 475–485.
Bai G X, Meng Y, Liu L. Current status of path tracking control of unmanned driving vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 475–485. (in Chinese)
- [16] Yan Z, Gong P, Zhang W, et al. Model predictive control of autonomous underwater vehicles for trajectory tracking with external disturbances[J]. Ocean Engineering, 2020, 217(1):107884.
- [17] Zhang Y, Liu X, Luo M, et al. MPC-based 3-D trajectory tracking for an autonomous underwater vehicle with constraints in complex ocean environments[J]. Ocean Engineering, 2019, 189(1):106309.
- [18] 盖江涛, 刘春生, 马长军. 考虑履带滑转滑移的电驱动履带车辆转向控制 [J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2092–2101.
Gai J T, Liu C S, Ma C J. Steering control of electric drive tracked vehicle considering tracks' skid and slip[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2092–2101. (in Chinese)
- [19] 李睿, 李春明, 苏杰. 考虑轨迹预测补偿的履带车辆滑动参数估计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 133–140.
Li R, Li C M, Su J. Slid parameter estimates for tracked vehicles with trajectory prediction compensation[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2022, 62(1): 133–140. (in Chinese)
- [20] Qin Z, Chen L, Fan J, et al. An improved real-time slip model identification method for autonomous tracked vehicles using forward trajectory prediction compensation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(1): 1–12.
- [21] 陈昱衡, 吴鸿云, 边有钢. 基于AUPF算法的水下履带车动力学参数估计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(8): 29–35.

- Chen Y H, Wu H Y, Bian Y G. Estimation of motion parameters of a polymetallic nodule mining vehicle based on adaptive unscented particle filter[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2022, 49(8): 29–35. (in Chinese)
- [22] Long C Q, Qin X H, Bian Y G, et al. Trajectory tracking control of ROVs considering external disturbances and measurement noises using ESKF-based MPC[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 241(1): 109991.
- [23] Yang X, Yan J, Hua C C, et al. Trajectory tracking control of autonomous underwater vehicle with unknown parameters and external disturbances[J]. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics–Systems*, 2021, 51(2): 1054–1063.