

# ROV 型深海采矿车动力学建模及路径跟踪控制研究<sup>\*</sup>

陈昱衡<sup>1</sup> 张海成<sup>1,2,3†</sup> 邹伟生<sup>1</sup> 李煜<sup>1</sup> 徐道临<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙 410082)

(2. 湖南大学 粤港澳大湾区创新研究院, 广州 511300)

(3. 湖南大学 无锡智能控制研究院, 无锡 214082)

**摘要** 本文针对传统深海采矿系统中履带车操作稳定性差的瓶颈问题,研究了一种新型的遥控水下机器人(ROV)型深海采矿系统,其中 ROV 型深海采矿车取代了传统的履带式深海采矿车. ROV 型深海采矿车由一个 ROV 和一个采矿机器人(MRT)组成. 首先,假设 ROV 保持固定深度拖曳 MRT,通过类比自行车模型,以此建立了 ROV 型采矿车的动力学模型. 其次,提出了一种分层路径跟踪控制策略,基于 ROV 型采矿车的运动学模型,设计了线性模型预测控制器(LMPC)以计算收敛 MRT 路径跟踪偏差的虚拟控制律,下层 PID 控制器计算响应虚拟控制律的 ROV 控制输入. 最后,通过数值模拟初步验证了分层路径跟踪控制策略的可行性.

**关键词** 深海采矿, ROV 型深海采矿系统, 动力学建模, 路径跟踪控制

**中图分类号**:U664.82;TP273

**文献标志码**:A

## Dynamic Modeling and Path Tracking Control of a ROV-Based Deep-Sea Mining Vehicle<sup>\*</sup>

Chen Yuheng<sup>1</sup> Zhang Haicheng<sup>1,2,3†</sup> Zou Weisheng<sup>1</sup> Li Yu<sup>1</sup> Xu Daolin<sup>1</sup>

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

(2. Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou 511300, China)

(3. Wuxi Intelligent Control Research Institute, Hunan University, Wuxi 214082, China)

**Abstract** This study proposes a ROV-based deep-sea mining system to overcome the stability issues of tracked vehicles in the traditional deep-sea mining system. The ROV-based deep-sea mining vehicle replaces the traditional tracked deep-sea mining vehicle. The ROV-based deep-sea mining vehicle consists of a remote operated vehicle (ROV) and a mining robot (MRT). First, this paper investigates the dynamic model of the ROV-based mining vehicle, assuming that the ROV maintains a fixed depth while towing the MRT. By analogy with a bicycle model, the dynamic model of the ROV-based mining vehicle is established. Subsequently, a hierarchical path tracking control strategy is introduced. Based on the kinematic model of the ROV-type mining vehicle, a linear model predictive control (LMPC) controller is designed to calculate a virtual control law for converging MRT path tracking deviations. A lower-level PID controller computes the ROV control input in response to the virtual control law. Finally, the feasibility of the

2024-07-31 收到第 1 稿,2024-09-13 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(52071138,12272128),广东省基础与应用基础研究资助项目(2024A1515010683),江苏省基础研究计划重点项目(BK20243019), National Natural Science Foundation of China (52071138,12272128), Key Projects of the Jiangsu Province Basic Research Program (BK20243019), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2024A1515010683).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail:zhanghc@hnu.edu.cn

hierarchical path tracking control strategy is preliminarily validated through numerical simulations.

**Key words** deep-sea mining, ROV-based deep sea mining system, dynamic modeling, path tracking control

## 引言

深海蕴藏着丰富的矿产资源,如多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等,因此有效开发利用这些矿产资源可以缓解陆地矿产资源的短缺问题<sup>[1,2]</sup>.深海采矿系统是开发这些深海矿产资源的关键装备<sup>[2]</sup>.

目前,我国乃至世界的深海采矿仍处于研究和探索阶段,其中一个主要原因是深海采矿系统尚未达到商业化开发的水平.自从提出深海采矿的概念以来,已经提出了多种深海采矿系统的采集方式,从船拖式采矿车到阿基米德螺旋自行车式采矿车<sup>[3]</sup>等形式.目前,水力提升深海采矿系统被认为是商业上可行的选择.在该系统中,深海履带式采矿车需要跟踪采矿路径来收集矿产资源,矿石与水混合后由提升泵通过缓冲器和提升管提升至矿船.深海履带式采矿车是深海采矿系统中最核心的子系统之一,需要平稳地在海底矿区行驶,以此完成收集矿产资源的作业任务<sup>[4,5]</sup>.然而,传统的重型履带式采矿车在海底沉积物上行驶时存在抓地力大和车身沉陷大的矛盾,这给采矿车的操纵稳定性带来了巨大的挑战<sup>[6]</sup>.

为了克服传统深海采矿系统的固有缺点,本文研究了一种遥控水下机器人(remote operated vehicle, ROV)型的深海采矿系统,其示意图如图1所示.在矿物采集方法中,以ROV和采矿机器人(mining robot, MRT)组成的ROV型深海采矿车取代了传统的履带式采矿车.ROV保持一定深度,在海底滑动牵引MRT,ROV与MRT通过钢架进行铰接.与传统履带式采矿车相比,ROV型的深海采矿车与海底沉积物的接触面积较大,能保证较小的接地比压,因此可以从根本上有效解决履带式采矿车履带打滑和车身沉陷的问题.与传统履带式采矿车的路径跟踪控制技术不同<sup>[7-9]</sup>,设计这种由ROV和MRT组成的ROV型采矿车的控制策略时,需要同时考虑ROV和MRT的动力学特性,目前尚未有相关研究.为此ROV型采矿车路径跟踪

控制策略的研究是必要的,也是充满挑战的.

为此,本文初步探索了ROV型采矿车的动力学模型及其路径跟踪控制技术.动力学建模过程中,充分考虑了ROV的水动力、MRT与海底底质的相互作用力,以及ROV和MRT的连接方式.将建立的ROV型采矿车的动力学模型作为数值仿真实验中的被控模型,用于分析ROV型采矿车的路径跟踪控制策略.在其路径跟踪技术上,提出了一个分层的路径跟踪控制器,上层线性模型预测控制(linear model predictive control, LMPC)控制器计算出收敛MRT的路径跟踪偏差的虚拟控制律,下层PID控制器用于计算响应虚拟控制律的ROV控制输入.

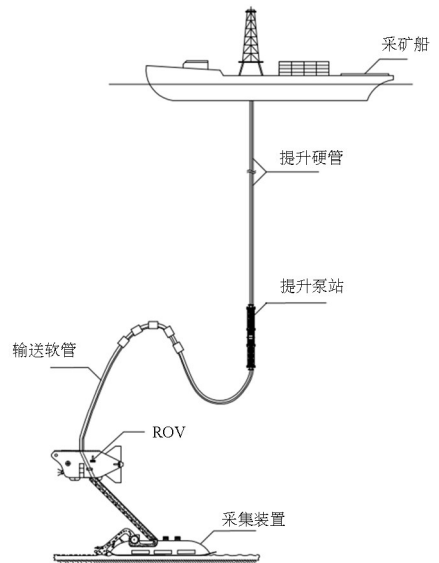


图1 ROV型深海采矿系统  
Fig. 1 ROV-based deep-sea mining system

## 1 ROV型采矿车动力学建模

考虑到ROV上方的管道对ROV动力学特性的影响较小,同时与潜游ROV和MRT相比,钢框架的质量较小.故在ROV型采矿车的动力学建模中,做了如下的假设:钢架一端铰接在ROV上,钢架一端固定在MRT上.忽略了管道的作用和钢框架的质量.假设ROV以一定深度拖曳MRT,

MRT 在海底表面滑动. 因此, 在水平面上建立 ROV 型采矿车的动力学模型.

### 1.1 ROV 型采矿车运动学模型

在 ROV 型采矿车运动学建模时, 考虑到钢框架与 ROV 和 MRT 的铰接方式, 并借鉴乘用车的自行车模型, 可将 ROV 类比为前轮, MRT 类比为后轮<sup>[10,11]</sup>. 因此, ROV 和 MRT 的横荡和纵荡速度可以假设是一致的:

$$u_{\text{MRT}} = u_{\text{ROV}}, \quad v_{\text{MRT}} = v_{\text{ROV}} \quad (1)$$

与乘用车的运动学关系相似, 忽略攻角的影响, ROV 的偏航角速度  $\omega_{\text{MRT}}$  与 MRT 的纵荡速度  $u_{\text{MRT}}$  和 ROV 绕钢架的转角  $\delta_{\text{ROV}}$  有关:

$$\dot{\psi}_{\text{MRT}} = \omega_{\text{MRT}} = \frac{u_{\text{MRT}} \delta_{\text{ROV}}}{L} \quad (2)$$

其中  $\dot{\psi}_{\text{MRT}}$  是 MRT 的偏航角,  $L$  是钢架的水平面投影长度.

ROV 型采矿车的坐标系如图 2 所示.  $O-x_y$  为全局坐标系,  $O_1-X_1Y_1$  为 MRT 的局部坐标系,  $O_2-X_2Y_2$  为 ROV 的局部坐标系. 从图上可知, ROV 和 MRT 都有 3 个自由度, 因此 ROV 型采矿车的运动学模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = u_{\text{MRT}} \cos \psi_{\text{MRT}} - v_{\text{MRT}} \sin \psi_{\text{MRT}} \\ \dot{y} = u_{\text{MRT}} \sin \psi_{\text{MRT}} + v_{\text{MRT}} \cos \psi_{\text{MRT}} \\ \dot{\psi}_{\text{MRT}} = \omega_{\text{MRT}} = \frac{u_{\text{MRT}} \delta_{\text{ROV}}}{L} \\ u_{\text{ROV}} = u_{\text{MRT}} \\ v_{\text{ROV}} = v_{\text{MRT}} \\ \dot{\delta}_{\text{ROV}} = \omega_{\text{ROV}} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $x$  和  $y$  是 MRT 的全局坐标,  $\omega_{\text{ROV}}$  是 ROV 的偏航角速度.

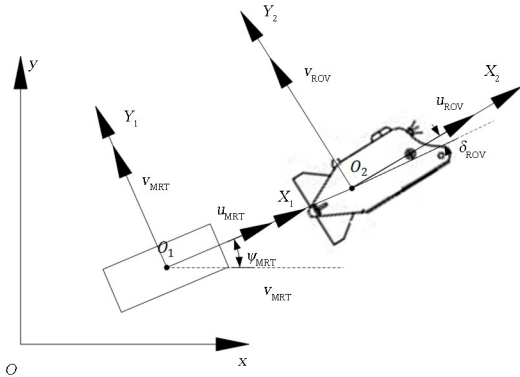


图 2 ROV 型采矿车坐标系示意图

Fig. 2 Diagram of the ROV-based mining vehicle's coordinate system

### 1.2 ROV 型采矿车动力学模型

根据 ROV 型采矿车的运动学方程(3), 如果 ROV 的运动状态是已知, 则 MRT 的运动状态也是已知的. 因此在建立 ROV 型采矿车的动力学模型时, 只需分析 ROV 对应的 3 个自由度的动力学特性, 其对应的动力学方程将由拉格朗日方法推导得到<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} K_0 = \frac{1}{2} m_0 (u_0^2 + v_0^2) + \frac{1}{2} I_{zz} \omega^2 \\ = \frac{1}{2} m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_{zz} \dot{\theta}^2 \\ K_1 = \frac{1}{2} m_1 (v_1^2 + u_1^2) \\ = \frac{1}{2} m_1 [\dot{X}^2 + (\dot{Y} + L\dot{\theta})^2] \\ K = K_0 + K_1 \\ = \frac{1}{2} m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_{zz} \dot{\theta}^2 + \\ \frac{1}{2} m_1 [\dot{X}^2 + (\dot{Y} + L\dot{\theta})^2] \end{cases} \quad (4)$$

ROV 和 MRT 的动能可以表示为:

$$\begin{cases} K_{\text{MRT}} = \frac{1}{2} [m_{\text{MRT}} (u_{\text{ROV}}^2 + v_{\text{ROV}}^2) + I_{\text{ROV}} \omega_{\text{ROV}}^2 + \\ m_{\text{MRT}} (u_{\text{ROV}}^2 + v_{\text{ROV}}^2) + I_{\text{MRT}} \left( \frac{u_{\text{MRT}} \delta_{\text{ROV}}}{L} \right)^2] \\ K_{\text{ROV}} = \frac{1}{2} [m_{\text{ROV}} (u_{\text{ROV}}^2 + v_{\text{ROV}}^2) + I_{\text{ROV}} \omega_{\text{ROV}}^2] \end{cases} \quad (5)$$

其中  $I_{\text{ROV}}$  和  $I_{\text{MRT}}$  为 ROV 和 MRT 的转动惯量,  $m_{\text{MRT}}$  和  $m_{\text{ROV}}$  为 ROV 和 MRT 的质量.

ROV 型采矿车的动力学模型是在水平面上建立的, 故它的势能可以认为是一个常数. 因此可以得到 ROV 型采矿车的拉格朗日函数  $L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ :

$$\begin{aligned} L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= K_{\text{MRT}} + K_{\text{ROV}} - E \\ &= \frac{1}{2} (m_{\text{MRT}} + m_{\text{ROV}}) (u_{\text{ROV}}^2 + v_{\text{ROV}}^2) + \\ &\quad \frac{1}{2} I_{\text{MRT}} \left( \frac{u_{\text{ROV}} \delta_{\text{ROV}}}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} I_{\text{ROV}} \omega_{\text{ROV}}^2 - E \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{q} = (x_{\text{ROV}}, y_{\text{ROV}}, \delta_{\text{ROV}})^T$  and  $\dot{\mathbf{q}} = (u_{\text{ROV}}, v_{\text{ROV}}, \omega_{\text{ROV}})^T$ .

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{F}_{\text{ROV}} + \mathbf{F}_{\text{MRT}} + \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{F}_{\text{ROV}}$  是表示在局部坐标系下  $O_2-X_2Y_2$  下 ROV 的广义水动力,  $\mathbf{F}_{\text{MRT}}$  是表示在局部坐标系下

MRT 和海底沉积物的广义相互作用力,  $\boldsymbol{\tau} = (F_x, F_y, T_N)^T$  是控制输入,  $F_x$  为纵向推力,  $F_y$  为横向推力,  $T_N$  为转向力矩。

方程(6)的左边满足:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \frac{L}{\partial u_{\text{ROV}}} - \frac{L}{\partial x_{\text{ROV}}} \\ &= (m_{\text{MRT}} + m_{\text{ROV}}) \dot{u}_{\text{ROV}} + \frac{I_{\text{MRT}} \delta_{\text{ROV}}^2}{L^2} \dot{u}_{\text{ROV}} \\ &= (m_{\text{MRT}} + m_{\text{ROV}} + m_{\delta}) \dot{u}_{\text{ROV}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{L}{\partial v_{\text{ROV}}} - \frac{L}{\partial y_{\text{ROV}}} = (m_{\text{MRT}} + m_{\text{ROV}}) \dot{v}_{\text{ROV}} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{L}{\partial \omega_{\text{ROV}}} - \frac{L}{\partial \delta_{\text{ROV}}} = I_{\text{ROV}} \dot{\omega}_{\text{ROV}} - \frac{I_{\text{MRT}} u_{\text{ROV}}^2}{L^2} \delta_{\text{ROV}} \quad (10)$$

其中  $m_{\delta} = I_{\text{MRT}} \delta_{\text{ROV}}^2 / L^2$  表示自由度  $\delta$  的附加质量。为了简化模型,  $m_{\delta}$  设置为一个常数。

ROV 的广义水动力由附加质量力, 科氏力和向心力和流体阻尼力组成<sup>[13]</sup>, 可表示为:

$$\mathbf{F}_{\text{ROV}} = \mathbf{M}_A \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C} + \mathbf{D}) \mathbf{q} \quad (11)$$

其中  $\mathbf{M}_A = \text{diag}(X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}})$  是附加质量力矩阵,  $\text{diag}(\cdot)$  表示矩阵对角运算,  $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}$  和  $N_{\dot{r}}$  是水动力系数,  $\mathbf{D} = \text{diag}(X_u + X_{uu} | u_{\text{ROV}} |, Y_v + Y_{vv} | v_{\text{ROV}} |, N_r + N_{rr} | \omega_{\text{ROV}} |)$  是流体阻尼矩阵,  $X_u, X_{uu}, Y_v, Y_{vv}, N_r$  和  $N_{rr}$  是流体阻尼系数, 科氏力和向心力矩阵满足:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (X_{uv} + m_{\text{ROV}}) v_{\text{ROV}} + X_{rr} \omega_{\text{ROV}} \\ 0 & Y_{uv} u_{\text{ROV}} & (Y_{ur} - m_{\text{ROV}}) u_{\text{ROV}} \\ 0 & N_{uv} u_{\text{ROV}} & N_{ur} u_{\text{ROV}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中  $X_{uv}, X_{rr}, Y_{uv}, Y_{ur}, N_{uv}$  和  $N_{ur}$  为流体阻尼系数。

下面给出 MRT 和海底沉积物的相互作用力  $F_{\text{MRT}}$  的推导, 海底沉积物是塑性土壤, 故在刚体 MRT 中的任意一点满足这样的规律<sup>[14]</sup>: 离其瞬时转向中心越远, 其转动阻力就越大。ROV 型深海采矿车的力学简图如图 3 所示, MRT 受到一个纵向阻力  $F_R$ , 刚体 MRT 转动时的横向阻力可等效成一个集中载荷  $f$ :

$$f = \mu_y \frac{W}{2} \quad (13)$$

其中  $W$  是 MRT 的水下重量,  $\mu_y$  是与转弯半径有关的横向阻力系数:

$$\mu_y = E_1 (1 - e^{-\frac{ClblE_2}{m_{\text{MRT}}}}) (1 - e^{-\frac{ClblE_3r}{m_{\text{MRT}}}}) \quad (14)$$

其中  $l$  和  $b$  是 MRT 的长和宽,  $CI$  是土壤圆锥指数,  $r$  是 MRT 的转弯半径,  $E_1, E_2$  和  $E_3$  是经验系数<sup>[15]</sup>。

纵向阻力  $f$  可以等效为作用在  $O_2$  上的阻力矩:

$$\begin{aligned} M_{o_2} &= \left( \frac{3}{4}l + L \right) f - \left( \frac{1}{4}l + L \right) f \\ &= \frac{1}{2}lf = \frac{\mu_y Wl}{4} \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 广义相互作用力  $\mathbf{F}_{\text{MRT}}$  可表示为:

$$\mathbf{F}_{\text{MRT}} = [-F_R \cos \delta_{\text{ROV}}, F_R \sin \delta_{\text{ROV}}, -\text{sg}(\omega_{\text{MRT}}) M_{o_2}] \quad (16)$$

其中  $\text{sg}(\cdot)$  是表示一种函数:  $\text{sg}(x) = 1, x > 0$ ;  $\text{sg}(x) = -1, x < 0$ ;  $\text{sg}(x) = 0, x = 0$ 。接着给出纵向阻力  $F_R$  的推导如下。在稀软的海底沉积物上, 纵向阻力  $F_R$  由压实阻力  $F_{Rc}$  和推土阻力  $F_{Rb}$  组成:

$$F_R = F_{Rc} + F_{Rb} \quad (17)$$

基于 Bekker 的压力和沉陷关系, 压实阻力  $F_{Rc}$  由下式计算<sup>[16]</sup>:

$$F_{Rc} = \frac{b}{2\tilde{f}} \Delta z^2 - \frac{be}{\tilde{f}} \Delta z \quad (18)$$

其中  $\Delta z = e + \tilde{f}p$  是沉陷量,  $p = W/bl$  是 MRT 的接地比压, 参数  $e$  和  $\tilde{f}$  满足经验公式<sup>[17]</sup>:

$$\tilde{f} = 1.99 - 0.112\tau \quad (19)$$

$$\begin{cases} e = 6.725 - 2.568\tau + 0.245\tau^2, & \tau \geq 5 \\ e = 0, & \tau < 5 \end{cases} \quad (20)$$

其中  $\tau$  表示海底沉积物的剪切强度, 单位 kPa:

$$\tau = c + p \tan \phi \quad (21)$$

其中  $c$  是土壤的内聚力,  $\phi$  是土壤的内摩擦角。

同时, 推土阻力  $F_{Rb}$  可以表示为稀软的海底沉积物的力学特性和沉陷量之间的函数关系<sup>[18]</sup>:

$$F_{Rb} = \left( \frac{1}{2} r_s \Delta z^2 k_{pr} + c \Delta z k_{pc} \right) b \quad (22)$$

其中  $r_s$  是土壤比重,  $k_{pr}$  和  $k_{pc}$  为被动土压力系数<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned} k_{pr} &= \left( \frac{2N_r}{\tan \phi} + 1 \right) \cos^2 \phi, \\ k_{pc} &= (N_c - \tan \phi) \cos^2 \phi \end{aligned} \quad (23)$$

其中  $N_r$  和  $N_c$  为太沙基承载能力系数。

## 2 ROV 型采矿车的分层路径跟踪控制器设计

ROV 型采矿车的分层路径跟踪控制器框架如图 3 所示。上层的 LMPC 控制器基于 ROV 型采矿

车的运动学模型设计,输入为参考路径信息  $\boldsymbol{\eta}_r = (x_r, y_r, \psi_r)^T$ , MRT 参考纵荡  $u_r$ , 和 MRT 的状态量  $\boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}} = (\boldsymbol{\eta}; \boldsymbol{\xi})$ , 其中  $x_r$  和  $y_r$  为参考的大地坐标,  $\psi_r$  为参考的偏航角,  $u_r$  为参考的纵荡速度,  $\boldsymbol{\eta} = (x, y, \psi)^T$ ,  $\boldsymbol{\xi} = (u, v, \omega_{\text{MRT}})^T$ . LMPC 控制器通过构建收敛路径跟踪偏差的优化控制问题, 通过求解优化控制问题得到 ROV 的期望纵荡速度  $\bar{u}_{\text{ROV}}$ , 期望横荡速度  $\bar{v}_{\text{ROV}}$  和 ROV 绕钢架的期望转角  $\bar{\delta}_{\text{ROV}}$ . 下层控制器为基于 PID 的反馈控制器, 根据期望值与真实值的偏差计算 ROV 的控制输入。

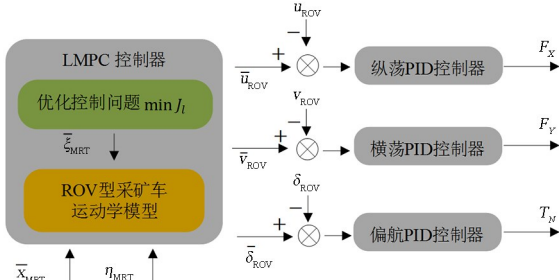


图3 分层 ROV 型采矿车路径跟踪控制器

Fig. 3 Layered path tracking controller for ROV-based mining vehicle

## 2.1 上层 LMPC 控制器

根据 ROV 型采矿车的运动学模型(3), 可以得到如下离散的状态空间模型:

$$\boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(k+1) = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}_{\text{MRT}}(k) \quad (24)$$

其中控制量  $\mathbf{U}_{\text{MRT}} = (\Delta u_{\text{MRT}}, \Delta v_{\text{MRT}}, \Delta \omega_{\text{MRT}})^T$  表示 MRT 的速度增量,  $\Delta u_{\text{MRT}}$  表示纵荡速度的改变量,  $\Delta v_{\text{MRT}}$  表示横荡速度的改变量,  $\Delta \omega_{\text{MRT}}$  为偏航角速度的改变量. 矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  表示状态转移关系:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & T\mathbf{J} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} T\mathbf{J} \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$$

其中  $\mathbf{I}_3$  表示 3 阶单位矩阵,  $\mathbf{0}_{3 \times 3}$  表示 3 行 3 列的零矩阵,  $T$  表示采样时间, 矩阵  $\mathbf{J}$  表示局部坐标系到全局坐标系的转移关系:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ROV 在拖曳 MRT 跟踪采集路径时, 其主要控制目标为最小化 MRT 的路径跟踪偏差, 同时 MRT 的速度改变量不应太大, 以满足 MRT 平稳作业的要求. 故将代价函数设计如下:

$$J = \sum_i^N \|\boldsymbol{\eta}(i|k) - \boldsymbol{\eta}_r\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{U}_{\text{MRT}}(i|k)\|_R^2 \quad (25)$$

其中  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  为权重矩阵,  $N$  为预测时域.

考虑 MRT 状态的状态转移约束和速度约束, 通过构建并求解如下的优化问题, 可以得到 MRT 的优化控制量序列  $\mathbf{u}(k) = [\mathbf{U}_{\text{MRT}}^*(0|k), \mathbf{U}_{\text{MRT}}^*(1|k), \dots, \mathbf{U}_{\text{MRT}}^*(N-1|k)]^T$ :

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{U}_{\text{MRT}}(i|k), i=0,1,2,\dots,N-1} J_l \\ & \boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(0|k) = \boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(k) \\ & \boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(i+1|k) = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi}_{\text{MRT}}(i|k) + \mathbf{B}\mathbf{U}_{\text{MRT}}(i|k) \\ \text{s. t. } & \boldsymbol{\xi}_{\min} \leq \boldsymbol{\xi}(i+1|k) \leq \boldsymbol{\xi}_{\max} \\ & \mathbf{U}_{\text{MRT}_{\min}} \leq \mathbf{U}_{\text{MRT}}(i|k) \leq \mathbf{U}_{\text{MRT}_{\max}} \end{aligned} \quad (26)$$

其中  $\boldsymbol{\xi}_{\min}$  和  $\boldsymbol{\xi}_{\max}$  为 MRT 速度的最小值和最大值,  $\mathbf{U}_{\text{MRT}_{\min}}$  和  $\mathbf{U}_{\text{MRT}_{\max}}$  表示 MRT 速度改变量的最小和最大值. 其中第一个优化控制量  $\mathbf{U}_{\text{MRT}}^*(0|k)$  作为输出, 以得到 MRT 的期望速度:

$$\bar{\boldsymbol{\xi}}(k) = \boldsymbol{\xi}(k) + \mathbf{U}_{\text{MRT}}^*(0|k) \quad (27)$$

根据 ROV 型采矿车的运动学模型, 可以得到 ROV 的期望纵荡速度  $\bar{u}_{\text{ROV}}$ , 期望横荡速度  $\bar{v}_{\text{ROV}}$  和 ROV 绕钢架的期望转角  $\bar{\delta}_{\text{ROV}}$ .

## 2.2 下层 PID 控制器

PID 控制算法由比例调节, 积分调节和微分调节组成<sup>[20]</sup>. 基于 ROV 的期望纵荡速度  $\bar{u}_{\text{ROV}}$  和纵荡速度  $u_{\text{ROV}}$ , 可以得到 ROV 纵向推力的 PID 控制律:

$$F_X = K_{P_u} e_u(k) + K_{I_u} \sum_{i=k-n}^k e_u(i) + K_{D_u} \frac{e_u(k) - e_u(k-1)}{T} \quad (28)$$

其中,  $K_{P_u}$ ,  $K_{I_u}$  和  $K_{D_u}$  分别为纵荡速度 PID 控制器对应的比例增益, 积分增益和微分增益.  $e_u(k) = \bar{u}_{\text{ROV}}(k) - u_{\text{ROV}}(k)$  表示 ROV 期望纵荡速度与 ROV 纵荡速度的偏差.

同样, 可以得到 ROV 横向推力的 PID 控制律:

$$F_Y = K_{P_v} e_v(k) + K_{I_v} \sum_{i=k-n}^k e_v(i) + K_{D_v} \frac{e_v(k) - e_v(k-1)}{T} \quad (29)$$

其中,  $K_{P_v}$ ,  $K_{I_v}$  和  $K_{D_v}$  分别为横荡速度 PID 控制器对应的比例增益, 积分增益和微分增益.  $e_v(k) = \bar{v}_{\text{ROV}}(k) - v_{\text{ROV}}(k)$  表示 ROV 期望横荡速度与 ROV 横荡速度的偏差.

对于 ROV 转向力矩的 PID 控制律, 微分项的物理意义为 ROV 的偏航角速度, 故 PID 控制律表

示为:

$$T_N = K_{P\delta}e_v(k) + K_{I\delta} \sum_{k=n}^k e_\delta(i) + K_{D\delta}(0 - \omega_{ROV})$$

其中,  $K_{P\delta}$ ,  $K_{I\delta}$  和  $K_{D\delta}$  分别为偏航 PID 控制器对应的比例增益, 积分增益和微分增益.  $e_\delta(k) = \bar{\delta}_{ROV}(k) - \delta_{ROV}(k)$  表示 ROV 绕钢架的期望转角与 ROV 绕钢架的转角的偏差.

### 3 仿真分析

在仿真分析中, ROV 型采矿车的动力学参数基于缩比模型获取, 其动力学模型的参数如表 1 所

示. 在仿真分析中, 第一节建立的 ROV 采矿车的动力学模型作为被控模型, 为第二节设计的 ROV 型采矿车的分层路径跟踪控制器提供实时的反馈信号. 分层控制器的参数设置如下  $K_{P_u} = 1200$ ,  $K_{I_u} = 1$ ,  $K_{D_u} = 20$ ,  $K_{P_v} = 5200$ ,  $K_{I_v} = 0$ ,  $K_{D_v} = 3$ ,  $K_{P_\delta} = 4100$ ,  $K_{I_\delta} = 0$ ,  $K_{D_\delta} = 2$ .

为了分析 ROV 型采矿车的分层路径跟踪控制器的性能, 以一条直线圆弧为参考采集路径进行仿真实验. MRT 的起始点设置在参考路径下方的 0.2m 处, 以验证所提出的路径跟踪控制器的纠偏性能.

表 1 ROV 型采矿车动力学参数

Table 1 Parameters of the dynamic model of the ROV-based mining vehicle

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$L$	0.5 m	$l$	2 m	$b$	1.4 m
$m_{MRT}$	40.5 kg	$m_{ROV}$	48.85 kg	$I_{ROV}$	11.6 kgm <sup>2</sup>
$I_{MRT}$	45.85 kg·m <sup>2</sup>	$m_\delta$	4.12 kg	$X_\delta$	-3.9 kg
$Y_\delta$	-149.9 kg	$N_\delta$	-53.87 kgm <sup>2</sup>	$X_u$	-4.1 kg/m
$N_r$	-547 kg·m <sup>2</sup> /s/rad	$Y_{vv}$	-553.4 kg/m	$X_{uu}$	-8.2 kg
$N_{rr}$	-1037 kg·m <sup>2</sup> /s/rad	$Y_v$	-285.7 kg/m	$X_{vr}$	-149.9 kg
$Y_{ur}$	-120.8 kg	$X_{rr}$	-13.18 kg·m/rad	$Y_{uv}$	-120.8 kg
$N_{ur}$	-13.6 kg	$N_{uv}$	-163.9 kg	$E_1$	0.95
$E_2$	-0.1	$E_3$	-0.1	$CI$	420
$W$	244.5 N	$\phi$	6.2 °	$N_r$	0.1
$N_c$	6.36	$r_s$	12.2 kN/m <sup>3</sup>	$c$	5.4 kPa

为了直观地展示路径跟踪性能, 给出了 MRT 的轨迹图 4, 其主要的控制轨迹如图 5 所示.

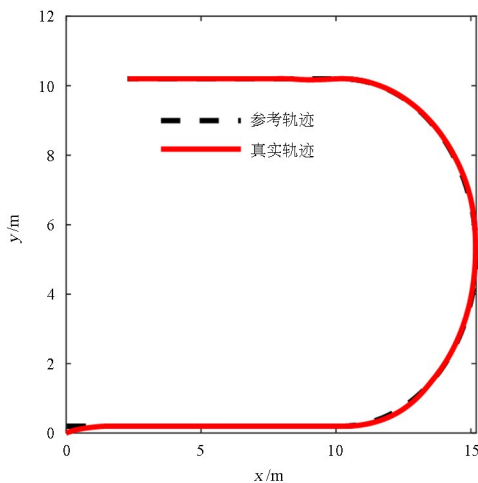


图 4 MRT 轨迹图  
Fig. 4 Trajectory of the MRT

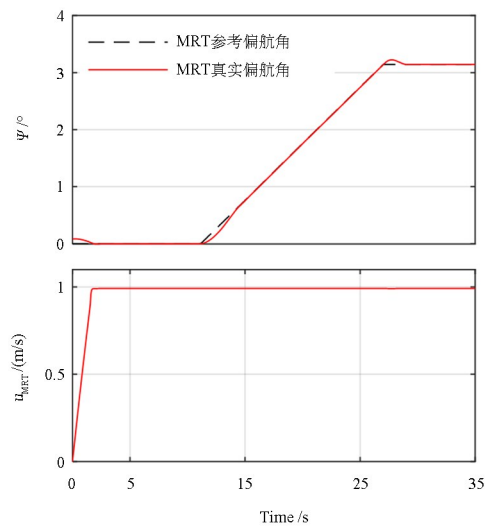


图 5 MRT 控制轨迹时序图  
Fig. 5 Control trajectory of the MRT

由图 4 和图 5 可知, ROV 可以拖曳 MRT 定速跟踪预设轨迹完成采集作业任务, 真实轨迹与参

考轨迹的重合度较高,但是在进入圆弧和驶出圆弧轨道处偏离相对较大.由图5可知,参考偏航角在进入圆弧和驶出圆弧轨道处的变化是不平顺的.这会产生ROV绕钢架的转角的阶跃期望值,而这样的阶跃信号是较难响应的,故这是MRT出圆弧轨迹和入圆弧轨迹偏离程度增大的原因.

## 4 小结

本文研究了一种新型的ROV型深海采矿系统,并对ROV型采矿车进行了水平面的简化建模.同时初步探索了ROV型采矿车路径跟踪控制策略,提出了一种基于LMPC和PID的双层控制策略.数值仿真实验表明,基于本文所提出的分层路径跟踪控制策略,ROV可以拖曳MRT精准跟踪直线圆弧采集的路径,其动力学响应合理.因此,通过数值仿真初步验证了所搭建动力学模型的合理性和该控制策略的可行性.

本文仅研究了水平面上的ROV型采矿车的动力学模型及其路径跟踪策略,尚未研究ROV在MRT的变化的沉陷量和ROV的垂向运动的复杂动力学关系.为此,下一步工作会进行三维ROV型采矿车的动力学建模,并研究对应的路径跟踪控制策略.

## 参考文献

- [1] SHA F, XI M S, CHEN X G, et al. A recent review on multi-physics coupling between deep-sea mining equipment and marine sediment [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 276: 114229.
- [2] 陈旭光, 寇海磊, 牛小东, 等. 深海水下技术装备发展研究[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(2): 1-14. CHEN X G, KOU H L, NIU X D, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(2): 1-14. (in Chinese)
- [3] 康娅娟, 刘少军. 深海采矿技术与装备研究进展及系统方案综述[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 325-337. KANG Y J, LIU S J. Review on the technology and equipment progress and the system scheme of deep-sea mining [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(20): 325-337. (in Chinese)
- [4] WU H Y, LIU W, JIANG M, et al. Numerical simulation investigation on parameter optimization of deep-sea mining vehicles [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 36(1): 54.
- [5] YAMADA M, YAMAUCHI G, HASHIMOTO T. Fundamental study on underwater trafficability for tracked vehicle [J]. *Journal of Terramechanics*, 2021, 98: 42-49.
- [6] 王国荣, 黄泽奇, 周守为, 等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 1-12. WANG G R, HUANG Z Q, ZHOU S W, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 1-12. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 陈昱衡, 边有钢, 崔庆佳, 等. 一种考虑ICR纵向偏差补偿的水下履带采矿车轨迹跟踪算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4): 1336-1343. CHEN Y H, BIAN Y G, CUI Q J, et al. A trajectory tracking algorithm for underwater tracked mining vehicles considering longitudinal deviation compensation [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(4): 1336-1343. (in Chinese)
- [9] CHEN Q H, YANG J M, MAO J H, et al. A path following controller for deep-sea mining vehicles considering slip control and random resistance based on improved deep deterministic policy gradient [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 278: 114069.
- [10] 白国星, 罗维东, 刘立, 等. 矿用铰接式车辆路径跟踪控制研究现状与进展[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(2): 193-204. BAI G X, LUO W D, LIU L, et al. Current status and progress of path tracking control of mining articulated vehicles [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(2): 193-204. (in Chinese)
- [11] 李韶华, 王伟达. 车辆动力学与控制研究进展[J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(3): 1-4. LI S H, WANG W D. Research advance in vehicle

- dynamics and control [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(3): 1–4. (in Chinese)
- [12] 孙秀婷, 陆泽琦. 仿生系统动力学与应用专刊序 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 1–3.
- SUN X T, LU Z Q. Preface to the special issue: bionic system dynamics and applications [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 1–3. (in Chinese)
- [13] LONG C Q, HU M J, QIN X H, et al. Hierarchical trajectory tracking control for ROVs subject to disturbances and parametric uncertainties [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112733.
- [14] CHEN Q H, YANG J M, WANG P, et al. Deep reinforcement learning-based controller for obstacle avoidance of deep sea mining vehicles [C]//The 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference. [S.l. : s. n.], 2022
- [15] AL-MILLI S, SENEVIRATNE L D, AL-THOEFER K. Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain [J]. *Journal of Terramechanics*, 2010, 47(3): 151–160.
- [16] 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: 109446.
- [17] 张滔, 戴瑜, 刘少军, 等. 深海履带式集矿机多体动力学建模与行走性能仿真分析 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(6): 173–180.
- ZHANG T, DAI Y, LIU S J, et al. Multi-body dynamic modeling and mobility simulation analysis of deep ocean tracked miner [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(6): 173–180. (in Chinese)
- [18] DAI Y, SU Q, ZHANG Y Y. A new dynamic model and trajectory tracking control strategy for deep ocean mining vehicle [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108162.
- [19] RUSLAN N A I, AMER N H, HUDHA K, et al. Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous tracked vehicles: a review of state of the art and challenges [J]. *Journal of Terramechanics*, 2023, 105: 67–79.
- [20] 李永歌, 张潇, 许勇. 航空发动机分数阶PID控制器的参数自整定方法 [J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(7): 77–88.
- LI Y G, ZHANG X, XU Y. Parameter self-tuning method of fractional order PID controller for the aero engine [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(7): 77–88.