

Dynamics Modeling and Simulation of Deep-sea Mining Trucks

Zhi Yang Xiaoyan Lv

Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan, Hunan, 411101, China

Abstract

The deep-sea terrain is complex and affected by hydrodynamics, so the motion control of mining trucks is currently a difficult problem encountered in deep-sea mining. To solve its precise motion control, its dynamic model is the key technology. At present, the modeling of deep-sea mechanical equipment based on hydrodynamic modeling mainly focuses on underwater robots or robotic arms, and there is little research on the dynamics of underwater vehicles. This paper analyzes the hydrodynamic forces acting on the mining truck, establishes a 7-degree-of-freedom 4-wheel vehicle dynamics model based on hydrodynamics, and conducts simulation research on it using MATLAB. By comparing the analysis of vehicle motion trajectory, vehicle speed, vehicle angular velocity, vehicle acceleration, and angular acceleration after adding hydrodynamic force, the influence of hydrodynamic force on vehicle motion performance is studied.

Keywords

hydrodynamics; vehicle dynamics; matlab simulation

深海集矿车动力学建模及仿真

杨智 吕小艳

湖南电气职业技术学院, 中国·湖南湘潭 411101

摘要

深海地形复杂且受到水动力学影响, 所以集矿车的运动控制是目前深海采矿遇到的难题, 要解决其精确的运动的控制, 其动力学模型是其关键技术。目前基于水动力建模的深海机械设备建模, 主要集中在水下机器人或者机器手, 而对于水下车辆动力学研究的甚少。论文通过对集矿车所受水动力进行分析, 建立基于水动力学的7自由度4轮车辆动力学模型, 并通过MATLAB对其仿真研究。通过对比其添加水动力后, 对车辆运动轨迹、车辆速度、车辆角速度、车辆加速度、角加速度的分析, 从而研究水动力对车辆运动性能的影响。

关键词

水动力学; 车辆动力学; matlab仿真

1 引言

为了适应复杂的深海地形环境, 防止集矿车翻倒, 掉入海沟, 灵活避开障碍物, 需要对其运动进行精确的控制。在对物体运动进行精确控制, 其前提需要建立足够准确的动力学模型, 而深海环境下其动力学模型必须考虑水动力, 这就增加了模型建模难度。目前考虑水动力学建立动力学模型的设备主要有深海小型潜艇、深海机器人、深海机械手, 但是对于深海车辆考虑水动力学的动力学模型研究的甚少, 论

文建立基于水动力学模型的车辆动力学模型对深海集矿车的开发具有非常现实的意义。

2 集矿车所受水动力分析

刚性结构体在水中运动将受到2个作用力, 其一为水的阻力, 另一个为流体的等效惯性力, 为此莫尔森建立了其经验公式如下。

$$F = \int \frac{1}{2} C_d \rho v S dl + \int C_M \rho V v dl$$

其中, C_d 为水阻力系数; C_M 为等效惯性力系数; ρ 为流体密度; v 为流体速度; S 为水阻力单位等效面积; l 为刚体的长度; V 为刚体的单位体积。

车辆所受水动力与车辆速度, 及其车辆外形相关, 所以可以建立的车辆水动力学方程为:

$$F_i = \int \frac{1}{2} C_d \rho v S di + \int C_M \rho V v di \quad i = x, y$$

【基金项目】湖南省教育厅科学研究优秀青年基金项目《深海钻结壳多轮独驱电传动采矿车差速转向研究》(项目编号: 21B0860)。

【作者简介】杨智(1984-), 男, 中国湖南常宁人, 硕士, 工程师, 从事深海采矿装备研究。

3 基于水动力学的集矿车动力学建模

目前所研究的 7 自由度车辆动力学模型, 车辆所受力及其与结构的几何关系如图 1 所示。基于水动力学的 7 自由度车辆所受力于前者^[1-6], 只是在增加了水动力项。

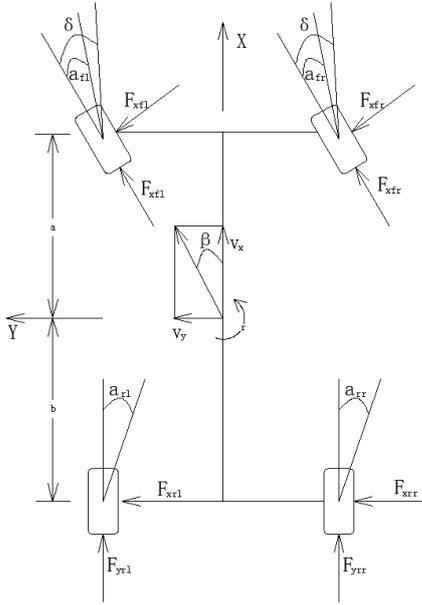


图 1 七自由度车辆动力学模型

3.1 整车动力学方程

车辆纵向与侧向动力学方程, 是根据车辆四轮所受力, 及车辆车速及旋转角速度, 车辆 4 轮所受力, 车辆方向角所建立的, 其公式如下:

$$m(\dot{V}_x - r \cdot V_y) = (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr} + \frac{1}{2} C_d \rho V_x^2 A + C_M \rho V_x V$$

$$m(\dot{V}_y + r \cdot V_x) = (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + (F_{yrl} + F_{yrr}) \cos \delta + F_{yrl} + F_{yrr} + \frac{1}{2} C_d \rho V_y^2 A + C_M \rho V_y V$$

其中, m 为车辆的质量, V_x 、 V_y 分别为车辆 X、Y 方向的速度, r 为车辆的横摆角速度, F_{yfl} 、 F_{yfr} 、 F_{yrl} 、 F_{yrr} 分别为左前轮 X 方向所示力, 右前轮 X 方向所受力, 左前轮 Y 方向所示力, 右前轮 Y 方向所受力, F_{xrl} 、 F_{xrr} 、 F_{yfl} 、 F_{yrr} 分别为左后轮 X 方向所示力, 右后轮 X 方向所受力, 左后轮 Y 方向所示力, 右后轮 Y 方向所受力, δ 为车辆方向角。

车辆横摆方向动力学平衡方程为:

$$I_z \cdot \dot{r} = [(F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + (F_{yrl} + F_{yrr}) \cos \delta] a + [(F_{xfr} - F_{xfl}) \cos \delta + (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta] \frac{l_{w1}}{2} + (F_{xrr} - F_{xrl}) \frac{l_{w2}}{2} - (F_{yrl} + F_{yrr}) b$$

其中 I_z 为车辆的转动惯量, a 、 b 尺寸如图 1 所示, l_{w1} 、 l_{w2} 分别为前轮轮距, 后轮轮距。

3.2 轮胎动力学

整车动力学所提到的车轮所受力 F_{xfl} 、 F_{xfr} 、 F_{yfl} 、 F_{yfr} 、

F_{xrl} 、 F_{xrr} 、 F_{yfl} 、 F_{yrr} , 必须根据轮胎动力学所求解, 轮胎动力学还存在整车动力学运动参数, 所以在求解过程必须跟整车动力学耦合求解^[7]。

轮胎转动动力学方程:

$$I_{tw} \cdot \dot{\omega}_i = -R_w \cdot F_{xi} - T_{bi} + T_{di} \quad i=1,2,3,4$$

其中, I_{tw} 为轮胎转动惯量, R_w 为轮胎半径。

地面对轮胎的作用力为:

$$F_{z-fl} = mg \frac{b}{2l} - m \dot{V}_x \frac{h_g}{2l} - m \dot{V}_y \frac{h_g}{t_{w1}} \cdot \frac{b}{l}$$

$$F_{z-fr} = mg \frac{b}{2l} - m \dot{V}_x \frac{h_g}{2l} + m \dot{V}_y \frac{h_g}{t_{w1}} \cdot \frac{b}{l}$$

$$F_{z-rl} = mg \frac{a}{2l} + m \dot{V}_x \frac{h_g}{2l} - m \dot{V}_y \frac{h_g}{t_{w1}} \cdot \frac{a}{l}$$

$$F_{z-rr} = mg \frac{a}{2l} + m \dot{V}_x \frac{h_g}{2l} + m \dot{V}_y \frac{h_g}{t_{w1}} \cdot \frac{a}{l}$$

其中, l 为车辆前后轮轴距, h_g 为车辆等效质心离地距离。

车辆轮胎的侧偏角为:

$$\alpha_{fl} = \delta - \arctan\left(\frac{V_y + ar}{V_x - \frac{t_{w1}}{2} r}\right)$$

$$\alpha_{fr} = \delta - \arctan\left(\frac{V_y + ar}{V_x + \frac{t_{w1}}{2} r}\right)$$

$$\alpha_{rl} = -\arctan\left(\frac{V_y - br}{V_x - \frac{t_{w2}}{2} r}\right)$$

$$\alpha_{rr} = -\arctan\left(\frac{V_y - br}{V_x + \frac{t_{w2}}{2} r}\right)$$

根据车辆几何关系可以求出车轮轮胎坐标系下的纵向速度为:

$$V_{t-fl} = (V_x - \frac{t_{w1}}{2} r) \cos \delta + (V_y + ar) \sin \delta$$

$$V_{t-fr} = (V_x + \frac{t_{w1}}{2} r) \cos \delta + (V_y + ar) \sin \delta$$

$$V_{t-rl} = V_x - \frac{t_{w2}}{2} r$$

$$V_{t-rr} = V_x + \frac{t_{w2}}{2} r$$

从而可以得到车轮的滑移率为:

$$\lambda_{fl} = \frac{w_{fl} R - V_{t-fl}}{V_{t-fl}}$$

$$\lambda_{fr} = \frac{w_{fr} R - V_{t-fr}}{V_{t-fr}}$$

$$\lambda_{rl} = \frac{w_{rl} R - V_{t-rl}}{V_{t-rl}}$$

$$\lambda_{rr} = \frac{w_{rr} R - V_{t-rr}}{V_{t-rr}}$$

在整车动力学模型中, 车辆纵向力, 侧向力, 横摆矩都需要轮胎的侧向力, 纵向力。论文参照相关文献, 可以建立以轮胎滑移率, 垂直载荷, 轮胎的侧偏角为输入, 输出

为车辆纵向力，侧向力的魔术公式函数，如下：

$$y(x) = D \sin\{C \arctan[Bx - E(Bx - \arctan Bx)]\}$$

$$Y(X) = y(x) + S_v$$

$$x = X + S_h$$

4 基于水动力学的集矿车动力学仿真

根据上节中水动力学集矿车的理论模型，通过 simlink 建立轮胎动力学模型与整车动力学模型，并对其耦合求解如图 2 所示。其中考虑水动力学的车辆纵向平衡方程建模如同 3 所示，侧向建模如同 4 所示。

其仿真参数为水动力学 $C_m=1.25$, $C_d=1.75$, 车辆质量 $m=2.5t$, 车辆转动惯量 $I_z=2400kg \cdot m^2$, 车辆外形尺寸 $a=1.3m$, $b=1.4m$, $L=2.7m$, $t_{w1}=1.7m$, $t_{w2}=1.7m$, $h=2m$ 。

轮胎参数为： $I_w=1.9kg \cdot m^2$, $h_g=0.6m$, $R=0.31m$, $m_u=0.3$, 车辆初始速度为 $5m/s$ 。

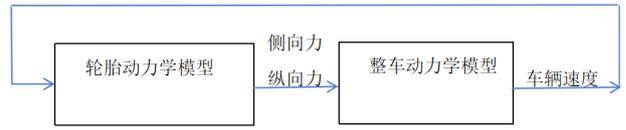


图 2 车辆动力学仿真总体布局

根据动力学仿真模型求解出考虑水动力与不考虑水动力学的车辆运动特性。图 5 为车辆运动轨迹，其中考虑水动力学时其纵向位移明显减少，但是其侧向位移明显增大，说明水动力对纵向阻碍作用明显增大，但是由于车辆受到水的冲击作用，其运用方法会发生变化，所以侧向位移会增大。图 6 为车辆纵向速度特性，图 7 为车辆侧向速度，当考虑水动力学时，其速度波动明显，当达到 15s 时就达到平衡状态。图 8 为车辆横摆速度，图 9 为车辆横摆角加速度，其特性是受到水动力学时其波动明显，且很快到达平衡状态。

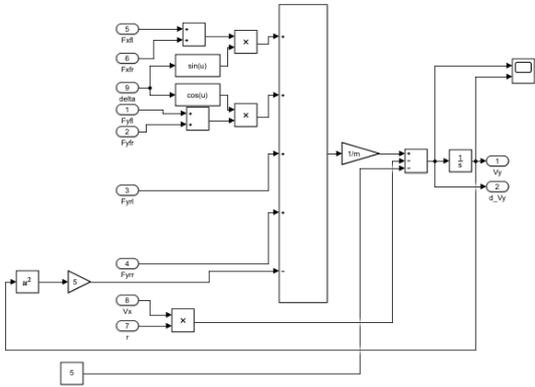


图 3 车辆纵向平衡方程建模

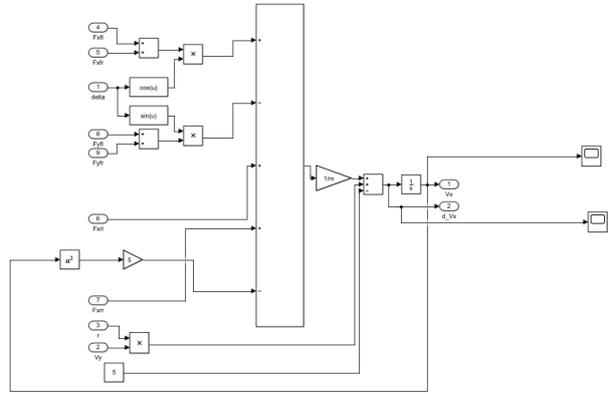
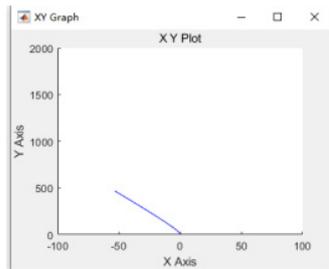
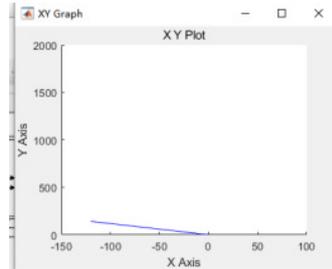


图 4 车辆侧向平衡方程建模

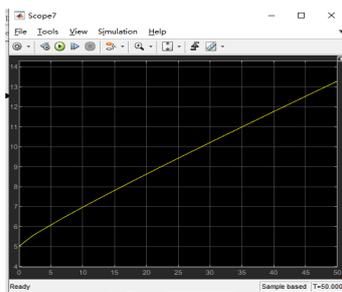


(a) 不考虑水动力学

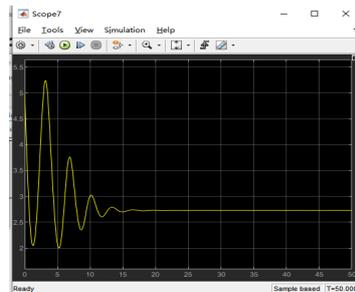


(b) 考虑水动力学

图 5 车辆运动轨迹



(a) 不考虑水动力学



(b) 考虑水动力学

图 6 车辆纵向速度特性

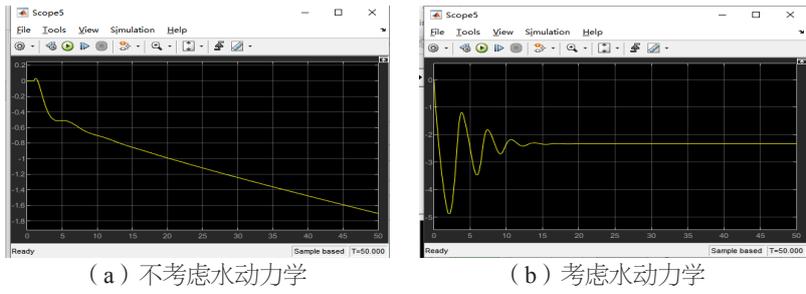


图7 车辆侧向速度特性

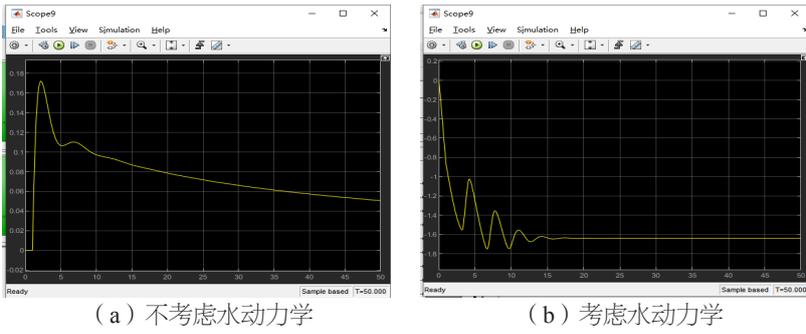


图8 车辆横摆角速度特性

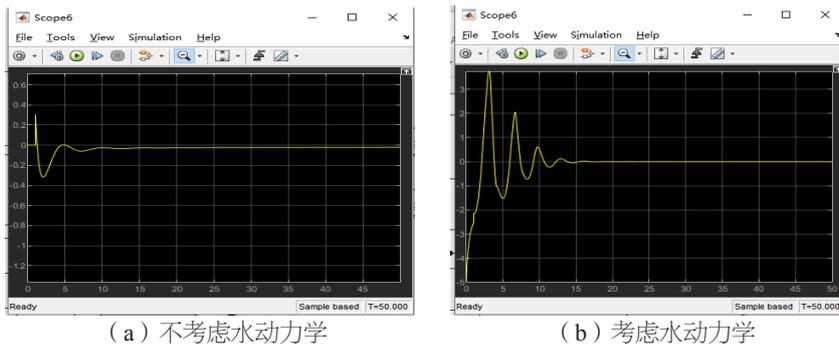


图9 车辆横摆角加速度特性

5 结语

论文通过分析车辆的水动力学特性建立了集矿车的整车7自由度动力学模型,轮胎动力学模型,并通过simulink搭建其仿真模型,并对仿真。通过对其仿真,验证了水动力学对车辆运动参数影响明显。

参考文献

[1] 李宁.四轮转向自动驾驶车辆紧急避障控制算法研究[D].吉林:吉林大学,2024.
 [2] 徐鸿,雷波,刘锦阳.月球车与月壤交互作用的离散元——多体动力学耦合建模[J].振动与冲击,2024,43(4):239-249.

[3] 万芳,张军伟,李辰,等.基于预瞄—优化驾驶员模型的多轴车辆操纵稳定性仿真研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2023(6):113-117.
 [4] 王笑,仪垂杰,王东.基于模型预测的车辆换道路径跟踪控制[J].汽车实用技术,2023,48(17):55-64.
 [5] 王子涵,张勇,霍政宇.无人驾驶方程式赛车系统动力学建模[J].汽车实用技术,2023,48(16):24-28.
 [6] 陈轶杰,张亚峰,徐龙,等.高机动履带车辆动力学建模与悬挂特性优化研究[J].中国科学:技术科学,2023,53(9):1545-1555.
 [7] 田顺,何海浪,赵建宁,等.车辆轮胎动力学仿真模型分析[J].汽车实用技术,2014(6):47-50.