

# Dynamics Simulation of Deep-sea Rigid Structure Based on Hydrodynamics

Zhi Yang

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

## Abstract

Since the Industrial Revolution in 1860, there has been an increasing demand for mineral resources, which are non renewable and there is a crisis of depletion of mineral resources on land. Therefore, since the 1970s, major developed countries in the world have focused on the wider ocean than land and demanded the development of underwater mineral resources. China also began to pay attention to deep-sea mining in the 1990s. However, there is currently no mature deep-sea mining equipment that can be practical and commercialized. The main difficulty lies in the complex deep-sea environment and the complex dynamics of mechanical structures, making it difficult to predict and control. Deep sea mechanical structures are inevitably subjected to hydrodynamic effects due to the impact of ocean currents and their own motion, which makes their dynamic modeling complex. For multi rigid body structures, modeling based on deep sea dynamics is still a difficult point in their motion control. Currently, the main approach is to analyze them based on hydrodynamic theory and then solve them numerically using MATLAB. In order to quickly and conveniently solve the deep-sea rigid body dynamics based on hydrodynamics, this paper uses MATLAB numerical solution to solve the rigid body hydrodynamics, and then imports ADMAS dynamic simulation software to solve it, which greatly simplifies the difficulty of its dynamic modeling and solution.

## Keywords

deep-sea mining; hydrodynamics; dynamics simulation

## 基于水动力学的深海刚体结构动力学仿真

杨智

湖南电气职业技术学院, 中国·湖南湘潭 411101

## 摘要

自从人类1860年工业革命以来,对矿产资源需求越来越多,而矿产资源又是不可再生的,陆地上的矿产资源终有枯竭的危机,所以20世纪70年代开始世界主要发达国家把目光聚焦到了比陆地更宽广的海洋,需求对海底矿产资源的开发,中国20世纪90年代也开始关注深海采矿。但是目前都还没有比较成熟的,能实用与商业化的深海采矿设备。其主要难点有深海环境复杂,机械结构所受动力学复杂,很难预测及对其控制。深海机械结构由于受到洋流的冲击以及自身运动,其不可避免地受到水动力作用,这就会使其动力学建模变得复杂,对于多刚体结构,其基于深海动力学建模目前还是其运动控制的难点,目前主要是通过基于水动力学理论分析,然后通过matlab数值求解。为了快捷方便求解基于水动力学的深海刚体动力学,论文采用matlab数值求解刚体水动力,然后导入ADMAS动力学仿真软件求解,这大大简化了其动力学建模及求解的难度。

## 关键词

深海采矿;水动力学;动力学仿真

## 1 刚体水动力学理论模型

20世纪的50年代, Morison<sup>[1]</sup>提出刚体所受的水动力可以等效为2部分,其中一部分为水的阻力其大小与速度线性相关,另一部分为等效惯性力其大小与加速度线性相关,

【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。

其水动力矢量表达为:

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_d D \|V\| V dl + \rho C_m A \dot{V} dl$$

其中,  $C_d$  为阻力系数;  $C_m$  为惯性力系数;  $\rho$  为流体的密度;  $A$  为物体面积投影;  $D$  为物体的等效直径;  $V$  为速度矢量。

## 2 多刚体采矿转臂受到的水动力计算

在图1所展示的多刚体采矿转臂系统中,利用基础的数学矢量分析方法<sup>[2]</sup>,我们可以便捷地推导出各切片位置上的速度矢量。

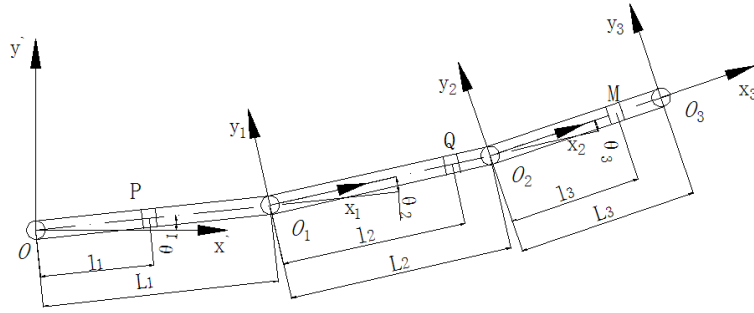


图1 多刚体采矿转臂图

$$V_P = l_1 \frac{di_1}{dt} = l_1 \dot{\theta}_1 j_1$$

$$V_{P\perp} = V_P \cdot j_1 = l_1 \dot{\theta}_1$$

$$V_Q = L_1 \frac{di_1}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt} = L_1 \dot{\theta}_1 j_1 + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) j_2$$

$$V_{Q\perp} = V_Q \cdot j_2 = L_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2) + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$V_M = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + l_3 \frac{di_3}{dt} = L_1 \dot{\theta}_1 j_1 + L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) j_2 + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) j_3$$

$$V_{M\perp} = V_M \cdot j_3 = L_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_3) + l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)$$

所以根据切片效应的 Morison 公式得到静水中施加在节杆 1、2、3 质心的等效水作用力为<sup>[3]</sup>:

$$F_1 = \int_0^{l_1} (0.5 \rho C_D D_1 (V_{P\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{P\perp}) dl$$

$$F_2 = \int_0^{l_2} (0.5 \rho C_D D_2 (V_{Q\perp})^2 + \rho C_M A_2 \dot{V}_{Q\perp}) dl$$

$$F_3 = \int_0^{l_3} (0.5 \rho C_D D_3 (V_{M\perp})^2 + \rho C_M A_3 \dot{V}_{M\perp}) dl$$

$$T_1 = \int_0^{l_1} ((l_1 - S_1)(0.5 \rho C_D D_1 (V_{P\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{P\perp}) dl_1$$

$$T_2 = \int_0^{l_2} ((l_3 - S_2)(0.5 \rho C_D D_1 (V_{Q\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{Q\perp}) dl_3$$

$$T_3 = \int_0^{l_3} ((l_3 - S_3)(0.5 \rho C_D D_3 (V_{M\perp})^2 + \rho C_M A_3 \dot{V}_{M\perp}) dl_3$$

### 3 基于 ADMAS 的采矿转臂刚性模型仿真

#### 3.1 模型参数

在 ADAMS 动力学仿真软件中<sup>[4]</sup>, 需要根据文献添加 3 个转臂的参数, 其转臂长度都是 5m, 质量分别为 1310kg、931kg、620kg, 转动惯量分别为 2966kg·m<sup>2</sup>, 2013kg·m<sup>2</sup>, 1310kg·m<sup>2</sup>. 添加的约束为转动约束如图 2 所示, 转动速度相同为如公式:

$$\theta_1(t) = \begin{cases} \frac{t^2}{15} & t \in [0, 0.5] \\ \frac{1}{60} + \frac{1}{15}(t-0.5) & t \in (0.5, 1.5) \\ \frac{1}{12} + (\frac{1}{15} - \frac{1}{15}(t-1.5))(t-1.5) & t \in [1.5, 2] \end{cases}$$

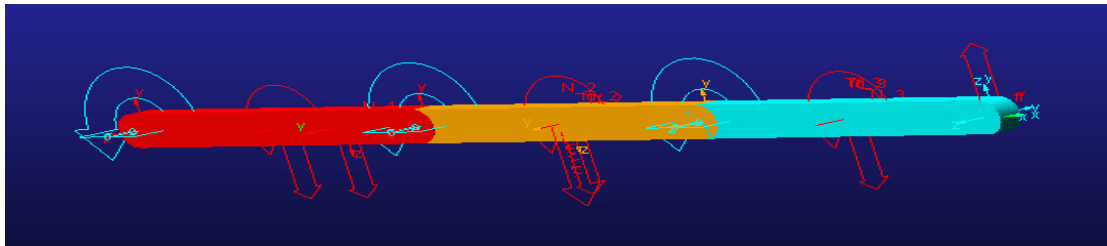


图2 深海采矿臂 ADMAS 模型

#### 3.2 添加作用力

重力及采矿平台对转臂的直接影响力可以直接纳入计算。而对于转臂所遭受的水动力, 我们采取等效转换策略, 将其视为作用于转臂质心的特定力及力矩。这些力和力矩的特性在于, 它们均随时间展现出复杂的非线性变化规律, 因此不适宜直接应用固定公式添加<sup>[5]</sup>。为了精确模拟这种动态效应, 我们首先借助 MATLAB 平台进行数值求解, 通过高级数值分析方法捕捉水动力随时间变化的细节。随后, 利用 spline 函数对这些离散的数据点进行平滑拟合, 从而构建出随时间连续变化的作用力模型。这一过程的核心在于, 通过

数学方法间接引入并精确模拟了难以直接量化的水动力影响。其主要操作步骤如下:

①利用转臂所受水动力学的精确公式, 我们在 MATLAB 环境中执行数值计算, 以求解对应的水动力值, 并将这些计算结果以 txt 文件格式保存, 便于后续处理。图 3 直观展示了这一处理结果, 其中左侧纵列对应时间数据, 右侧纵列则对应了随时间变化的水动力大小。

②随后, 我们执行文件格式转换操作, 将上述 txt 文件中的离散数据点转换为 ADAMS 软件能够识别的样条线离散数据格式。

③为了进一步调整水动力模型，我们根据转换后的样条线数据，对水动力的大小进行了重新设定，使其遵循样条线函数的变化规律。这一调整过程通过引入特定的样条线函数 CUBSPL (time,0,spline\_1,0) 实现，该函数为三次样条线类型，其中时间作为自变量，而 spline\_1 则包含了所有必要的离散数据点，确保了水动力模拟的精确性和连续性。

```

F1.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
0, 99.425
0.02, 99.569259259259259259259259259259
0.04, 100.00203703703703703703703703704
0.06, 100.723333333333333333333333333333
0.08, 101.73314814814814814814814814815
0.1, 103.03148148148148148148148148148
0.12, 104.618333333333333333333333333333
0.14, 106.4937037037037037037037037037
0.16, 108.65759259259259259259259259259
0.18, 111.11
0.2, 113.85092592592592592592592592593
0.22, 116.88037037037037037037037037037
0.24, 120.198333333333333333333333333333
0.26, 123.80481481481481481481481481481
0.28, 127.69981481481481481481481481481
0.3, 131.883333333333333333333333333333
0.32, 136.35537037037037037037037037037
0.34, 141.11592592592592592592592592593
0.36, 146.165
0.38, 151.50259259259259259259259259259
    
```

图 3 水动力数值

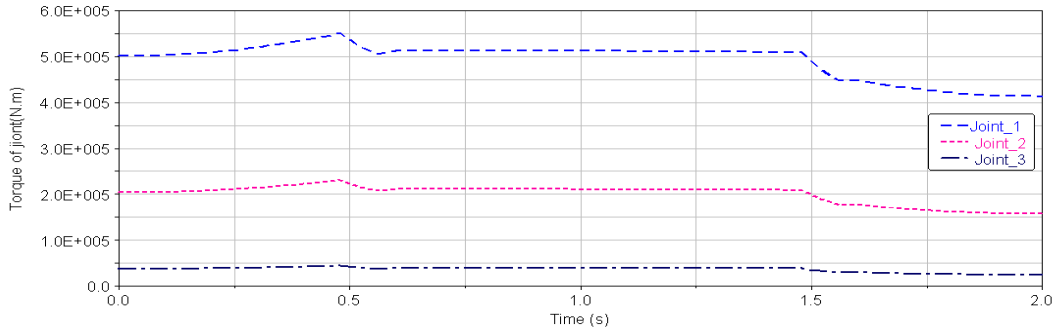


图 4 模型关节驱动力矩

### 3.3 仿真结果

仿真得出其关节驱动力矩如图 4 所示，其大小为关节 1 最大，关节 2 次之，关节 3 最小，而且其值与速度大小及速度波动相关，与文献 [6] 理论相复合。

### 4 结语

论文为了快捷方便求解基于水动力学的深海刚体动力学，论文采用 matlab 数值求解刚体水动力，然后导入 ADMAS 动力学仿真软件求解，这大大简化了其动力学建模及求解的难度。

#### 参考文献

[1] 党进,倪风雷,刘业超,等.基于新型补偿策略的柔性关节控制器设计[J].机器人,2011,33(1):150-155.

节臂之间的转角随时间变化的函数，可以通过 IF 函数加载其驱动转速，其表示式为：

$$IF(time - 0.5 : \frac{2}{15} * time, \frac{2}{15} * time, IF(time - 1.5 : \frac{1}{15}, \frac{1}{15}, IF(time - 2 : \frac{1}{15} - \frac{2}{15} * (time - 1.5), \frac{1}{15} - \frac{2}{15} * (time - 1.5), 0)))$$

[2] Hauschild J P, Heppler G R. Control of harmonic drive motor actuated flexible linkages[C]//IEEE International Conference Robotics And Automation. piscataway, NJ, USA:IEEE, 2007:3451-3456.

[3] (法)贝尔纳·莫兰.海洋工程水动力学[M].刘水庚,译.北京:国防工业出版社,2012.

[4] 徐世钰.Kane方程在机械臂动力学中的应用[J].西安电子科技大学学报,1988,15(2):100-108.

[5] 夏丹,陈维山,刘军考,等.基于Kane方法的仿鱼机器人波状游动的动力学建模[J].机械工程学报,2009,4(6):41-49.

[6] 周知进,杨智,刘爱军.深海采矿机构转臂动力学建模与力学分析[J].力学与实践,2018,40(4):409-414+421.