

坚持流域、区域及片区协同治理，系统提升雨水消纳与防洪能力，韧性应对日趋严峻的防洪排涝形势。

②重点突出，近远结合。坚持问题导向，结合区域建设发展，近期重点解决区域典型内涝点问题，加强治涝体系建设；远期结合城市建设，逐步构建高标准内涝防治体系，达到规划标准。

③建管并举，智慧管控。统筹工程建设和应急管理，坚持防灾、减灾、避灾相结合；构建监测预警、预测预报、调度决策、智慧控制于一体的全区多要素防洪排涝联调联控系统。

4.2 工程治理措施

以模型计算分析成果为基础，围绕治理目标和标准，针对前述提出的雨水管网设计标准偏低、雨水管网缺陷、调蓄空间不足、入城外洪水量大、河道过流能力不足及流域总

体排出能力受限等问题，提出系统解决方案如图4所示。

经分析，导致研究区积水原因较多，综合考虑萍乡市实际情况和建设能力，目前不具备大面积开展管网达标建设条件，宜围绕重点内涝点、近远结合，逐步实现区域内涝防治等级提升，管道系统改造应根据需要及资金情况开展。

①结合城市规划，改造管网系统，合理优化排水分区，尽可能实现高渗高排。

②结合城市规划，通过管网局部改造和湿地改造或建设，强化中上游规划水域的海绵功能，优化河湖塘库调度策略，增强水域的错峰调蓄功能，减小下游河道洪峰流量。

③必要时，进一步提升主要泄洪通道的排水能力和防洪能力。

④必要时，进一步提升流域出口的自排和强排能力，确保涝水限时排出能力。

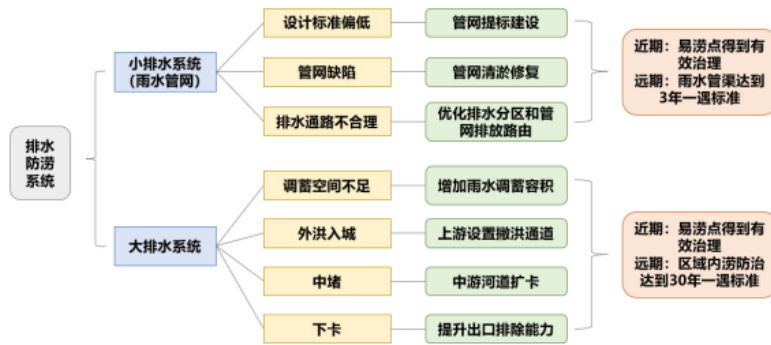


图4 系统治理方案

4.3 非工程管理措施

城市管道工程由于建设年代久远，加之为地下工程，现状排水系统不可避免地存在混接、老旧、破损、淤积、高水位运行等问题，严重制约着排水设施的有效运行，是城市内涝产生的重要原因之一。排水系统管理措施包括日常管养维护、汛前管理、汛期管理以及应急管理，是内涝防治的关键一环。

4.3.1 日常管养维护

日常管理中需有计划地对管网系统进行排查、清淤、检测和修复等措施，主要包括：①持续开展雨污分流改造，进一步严格区分并隔离合流制和分流制系统；②针对排水管网每年度进行计划性、周期性、规范化清淤和养护工作；③周期性开展管网检测与评估，原则上对管龄在20年以上的管道优先安排检测，对于检测合格或已修复完成的管道需安排定期复检，建议周期10年。

4.3.2 汛前管理措施

开展隐患排查、物资储备检查，针对当地易发生的各类险情、突发事件，有针对性地每年进行汛前应急演练；同时，应多渠道、多形式开展防涝避险知识宣传教育。

4.3.3 汛期管理措施

应根据监控情况对易积水路段进行交通组织和疏导，

在易积水路段设置警示标识，配置移动泵车专人值守，最大限度减少超标将带来的内涝风险。

4.3.4 应急管理措施

建立城市暴雨预报预警体系，健全城市防洪和排水防涝应急预案体系，加强应急管理组织机构、人员队伍、抢险能力等。

5 结语

论文利用InfoWorks ICM模型计算分析了典型丘陵城市内涝成因，基于内涝治理原则提出了系统治理工程措施及非工程管理措施，通过近远期措施相结合，近期能有效缓解片区内涝，远期逐步达到治涝标准，可为类似区域内涝防治提供参考。

参考文献

[1] 李霖,李磊,翟泽冰,等.平原丘陵地区城市内涝成因分析及应对措施[J].西北水电,2024(3):9-14.
 [2] 潘雪梅,郑勇,邓坤.萍乡市海绵城市建设的水利实践与探索[J].水利规划与设计,2024(2):25-30.
 [3] 李德师,徐连军,陶涛,等.山地丘陵城市汇水区划分方法及内涝模拟分析[J].中国给水排水,2021,37(1):109-113.
 [4] 王锡清,赵明.《室外排水设计标准》全面修订解读[J].净水技术,2021,40(7):1-4.

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^[1]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; ρ 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^[2],我们可以便捷地推导出各切片位置上的速度矢量。

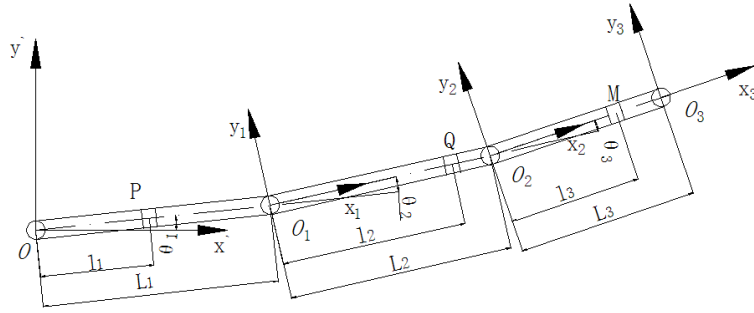


图1 多刚体采矿转臂图

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

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

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

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

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

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

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^[3]:

$$F_1 = \int_0^{L_1} (0.5 \rho C_D D_1 (V_{P\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{P\perp}) dl$$

$$F_2 = \int_0^{L_2} (0.5 \rho C_D D_2 (V_{Q\perp})^2 + \rho C_M A_2 \dot{V}_{Q\perp}) dl$$

$$F_3 = \int_0^{L_3} (0.5 \rho C_D D_3 (V_{M\perp})^2 + \rho C_M A_3 \dot{V}_{M\perp}) dl$$

$$T_1 = \int_0^{L_1} ((l_1 - S_1)(0.5 \rho C_D D_1 (V_{P\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{P\perp}) dl_1$$

$$T_2 = \int_0^{L_2} ((l_3 - S_2)(0.5 \rho C_D D_1 (V_{Q\perp})^2 + \rho C_M A_1 \dot{V}_{Q\perp}) dl_3$$

$$T_3 = \int_0^{L_3} ((l_3 - S_3)(0.5 \rho C_D D_3 (V_{M\perp})^2 + \rho C_M A_3 \dot{V}_{M\perp}) dl_3$$

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^[4], 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·m², 2013kg·m², 1310kg·m². 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:

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

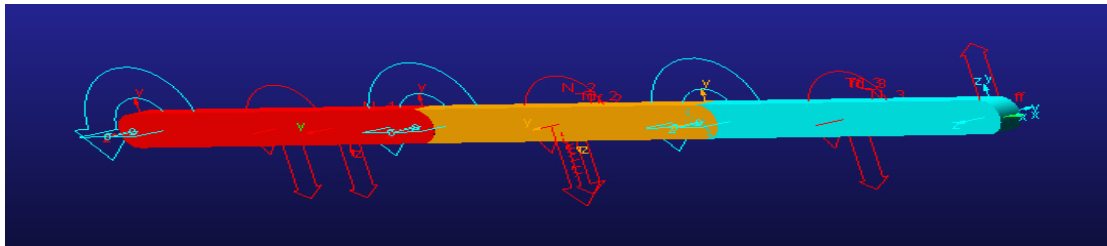


图2 深海采矿臂 ADMAS 模型

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^[5]。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。