

文章编号:1671-1637(2016)02-0082-08

## 基于井群原理的起重船压载水系统仿真

董智惠<sup>1</sup>, 韩端锋<sup>1</sup>, 林晓杰<sup>2</sup>, 袁利毫<sup>1</sup>, 咎英飞<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 深圳海油工程水下技术有限公司, 广东 深圳 518067)

**摘要:**建立了起重船压载水系统的虚拟井群系统和管网结构模型,分析了节点水头和流量的计算方法,研究了管路压降损失的计算方程,考虑了阀门开度和泵节点等特殊节点。建立了管网系统的流量-水头矩阵方程,采用矩阵分割和迭代方法求解节点的水头。为了提高矩阵方程计算效率,得到了实际流电路径的预流通方案。以某起重船压载水系统为原型,建立了仿真系统,实现了人机交互操作控制管网,并实时监控系统工作状态。设置舱室阀门开度分别为1.0、0.5的工况,进行了压载泵输出流量为 $3\,500\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,输入到8P、8S、6P、6S、4P、4S六个压载水舱的仿真试验。仿真结果表明:阀门开度均为1.0时,各压载水舱流量分别为603.73、603.73、605.88、605.88、540.39、540.39  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,流量和管路长度成反比,将8P、8S舱室阀门开度调整为0.5,6个舱室流量分别为484.87、484.87、670.19、670.19、594.94、594.94  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,因此,流量对阀门开度较敏感,并且阀门开度对相邻节点的流量影响较大,这与实际压载水系统具有较高的吻合度;求解算法收敛速度快,经过5次循环后,流量计算值趋于稳定解。

**关键词:**船舶工程;起重船;压载水系统;井群原理;管道网络;动态输送;实时仿真

**中图分类号:**U664.8

**文献标志码:**A

## Simulation of crane ship's ballast system based on well cluster theory

DONG Zhi-hui<sup>1</sup>, HAN Duan-feng<sup>1</sup>, LIN Xiao-jie<sup>2</sup>, YUAN Li-hao<sup>1</sup>, ZAN Ying-fei<sup>1</sup>

(1. School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. COOEC Subsea Technology Co., Ltd., Shenzhen 518067, Guangdong, China)

**Abstract:** The virtual well cluster system and pipe network structure model of crane ship's ballast system were established, the calculation methods of node's water head and flow rate were analyzed, the calculation equation of pressure drop loss of pipe was researched, and the open degrees of valves and the special nodes such as pumps were considered. The flow rate-water head matrix equation of pipe network was built, and the water heads of nodes were calculated by using matrix partitioning and iteration methods. The pre-transferring routine of actual flow path was calculated in order to improve the calculation efficiency of matrix equation. The simulation system was built based on a crane ship's ballast system, and the man-computer interactive operation of pipe network was implemented, and the working status of system was monitored real-timely. In simulation experiment, the open degrees of valves were set as 1.0 or 0.5 in different cases respectively, the output flow rate of ballast pump was  $3\,500\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , and the flow was transferred into 6 ballast tanks including 8P, 8S, 6P, 6S, 4P, 4S. Simulation result indicates

收稿日期:2015-12-05

基金项目:国家科技重大专项课题(2011ZX05027)

作者简介:董智惠(1985-),女,黑龙江尚志人,哈尔滨工程大学工学博士研究生,从事海洋工程作业模拟器实时仿真研究。

导师简介:韩端锋(1966-),男,黑龙江双鸭山人,哈尔滨工程大学教授,工学博士。

that when the open degrees of all valves are set as 1.0, the flow rates of 6 ballast tanks are 603.73, 603.73, 605.88, 605.88, 540.39 and 540.39  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  respectively, and the flow rate is inversely proportional to the length of pipe network. When the open degrees of valves of 8P and 8S are both adjusted to 0.5, the flow rate of 6 ballast tanks are 484.87, 484.87, 670.19, 670.19, 594.94 and 594.94  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  respectively. Obviously, the flow rate is sensitive to the open degrees of valves, and the open degrees has more impact on the flow rates of adjacent nodes, which has a high agreement degree to the actual system. The convergence rate of algorithm is high, and the calculation values of flow rate closely approach steady solution after circulation of 5 times. 1 tab, 17 figs, 22 refs.

**Key words:** ship engineering; crane ship; ballast system; well cluster theory; pipe network; dynamic transferring; real-time simulation

**Author resumes:** DONG Zhi-hui(1985-), female, doctoral student, +86-451-82519910, dongzhihui@hrbeu.edu.cn; HAN Duan-feng(1966-), male, professor, PhD, +86-451-82519910, dfhan163@yahoo.com.

## 0 引言

压载水系统是船舶作业运营的重要辅助系统,通过调节压载舱室水量使船舶姿态角发生变化,以适应各种工况的作业需要。目前,国内外很多学者进行了压载水系统的研究:Yun 等用 SimulationX 软件分析模拟了深海半潜平台不同作业情况的调载水量策略<sup>[1]</sup>;Xiao 等研究了船舶海上吸排水调载作业不同工序的效果<sup>[2]</sup>;Wilson 等采用计算流体力学方法建立压载水系统模型,研究不同策略下的排放效率<sup>[3]</sup>;Armstrong 系统研究了杂货船和集装箱船的压载水系统<sup>[4]</sup>;Qiu 研究了深海载人潜水器压载水系统的总体设计问题<sup>[5]</sup>;Gomes 研究了压载水系统调载方案的评估方法<sup>[6]</sup>;张显库等实现了半潜船航海模拟器的压载水系统仿真<sup>[7]</sup>;肖民等利用有限元方法,基于流体力学的基本原理研究了船舶压载水系统调节过程<sup>[8]</sup>;吕治慧研究了 LNG 船舶液货装卸模拟器在装卸货过程中的稳性计算与压载水仿真系统<sup>[9]</sup>;白青壮等研究了半潜船压载水系统的实时调节问题,以满足滚装重大件作业时的装载要求<sup>[10]</sup>;周根明等研究了维修母船浮态实时调节的配载方案和配载方法<sup>[11]</sup>。上述研究都是针对一般运输型船舶的压载水系统,对于起重船等海上施工作业型船舶,由于作业工况和海洋环境的时变性,要求有较高的调载精度<sup>[12-14]</sup>,并且由于实船管路网络复杂,增加了压载方案计算和人员操作的难度,因此,开发一套基于实船的压载水仿真模拟系统,不仅能够有效地帮助操作人员熟悉工作流程和技能,还具有分析、预演压载方案的价值<sup>[15-16]</sup>。

本文基于流体力学原理,借鉴地下水源工程中的井群供水管网思想,建立了输配管网模型,引入调节阀开度等参数,建立了压载水系统仿真数学模型,实时计算压载水系统水力数值,监控压载水流通路径;结合“海洋石油 201”压载水系统管路网络特征,建立其压载水系统仿真数学模型,开发压载水控制仿真软件,实现压载水系统操作控制和监控的实时模拟仿真。

## 1 井群供水管网原理

在地下水源工程中,通常多口水井同时工作,通过井水泵和输水管等相应配件与集水池相连接,组成井群供水管网系统。图 1 为简单的井群供水管网,节点 1~8 为 8 个工作水井,向供水管网输入井水,节点 0 为集水池,是供水管网的集中输出点。考虑水井围壁向水井的渗流运动遵守恒定流动(即稳定流理论),即假定水井的出水量处于稳定平衡状态<sup>[17]</sup>。

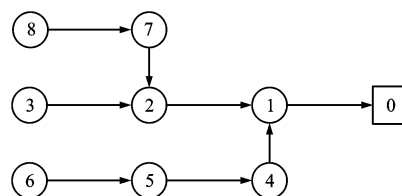


图 1 井群供水管网

Fig. 1 Water supply pipe network of well cluster

井群供水管网系统有管段流量  $q_{ij}$ 、管段压降  $h_{ij}$ 、节点出水量  $Q_i$  和节点水头  $H_i$  四种水力要素<sup>[18]</sup>,  $i, j$  为节点编号。根据水力学原理与输配管网特点,随着管径和阻力变化重新分配管段流量  $q_{ij}$  和管段压降  $h_{ij}$ ,根据工作水井出水量确定节点出水

量  $Q_i$ , 根据整个管网的阻力特性曲线和井水泵的性能特征曲线共同决定节点水头  $H_i$ 。

设定 8 个工作水井的出水量保持恒定, 即节点出水量  $Q_i$  保持恒定。在稳定状态下, 管段流量  $q_{ij}$ 、管段压降  $h_{ij}$  与节点水头  $H_i$  也都保持恒定<sup>[18]</sup>。根据图 1 中供水管网的布置方式及井水的流通方向, 集水池节点流量为负值, 连续方程组为

$$\begin{cases} |Q_0| = q_{10} \\ Q_1 = q_{10} - q_{21} - q_{41} \\ Q_2 = q_{21} - q_{32} - q_{72} \\ Q_3 = q_{32} \\ Q_4 = q_{41} - q_{54} \\ Q_5 = q_{54} - q_{65} \\ Q_6 = q_{65} \\ Q_7 = q_{72} - q_{87} \\ Q_8 = q_{87} \end{cases} \quad (1)$$

节点  $i$  的出水量  $Q_i$  可以进一步表示为

$$Q_i = \sum_{j=0}^N q_{ij} - \sum_{r=0}^N q_{ri} \quad (2)$$

式中:  $N$  为工作水井总数。

式(2)中若节点  $j$ 、 $r$  与节点  $i$  之间无直接管段连接, 则  $q_{ij}$ 、 $q_{ri}$  为 0。节点  $i$ 、 $j$  之间的管段压降  $h_{ij}$  和水头  $H_i$ 、 $H_j$  间的关系为

$$h_{ij} = H_j - H_i \quad (3)$$

对于供水管网中的管段, 节点水头的损失和管段阻力相关, 根据阻力性能, 有如下关系<sup>[18]</sup>

$$h_{ij} = s_{ij} q_{ij} \quad (4)$$

式中:  $s_{ij}$  为管段压降损失系数。

## 2 压载水系统虚拟井群数学模型

压载水系统通常由压载舱、压载泵、输配管路和阀门等配件组成, 本文分别建立输配管路、阀门和压载泵等数学模型。

### 2.1 虚拟井节点数学模型

根据井群供水管网原理, 假定管段连接点为节点, 压载舱入口为集水池节点。对于单个管段, 综合管路流动的阻力情况, 管网的水力性能用压降表示

$$\begin{aligned} h_{ij} &= \lambda \frac{l}{d} + \xi \frac{v_{ij}^2}{2g} \\ \lambda &= 0.021d^{-0.3} \\ \xi_1 &= \frac{\xi_2}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为管段沿程水头损失系数, 按舍维列夫公式估算<sup>[19]</sup>;  $l$  为管段长度;  $d$  为管段直径;  $\xi_1$  为管段局

部水头损失系数, 主要考虑阀门的阻力系数后, 进行简化估算<sup>[20]</sup>;  $\xi_2$  为阀门全开时的水头损失系数, 只和阀门的形状有关;  $n$  为阀门的开度,  $n \in [0, 1]$ , 其中  $n$  为 0 表示阀门关闭,  $n$  为 1 表示全开;  $g$  为重力加速度;  $v_{ij}$  为管段流速。

将式(5)整理为管段压降与流量的关系式

$$h_{ij} = q_{ij} \left[ \frac{8}{g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \frac{\xi_2}{n} \right) |h_{ij}| \right]^{\frac{1}{2}} / \pi d^2 \quad (6)$$

根据式(4), 可知

$$s_{ij} = \left[ \frac{8}{g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \frac{\xi_2}{n} \right) |h_{ij}| \right]^{\frac{1}{2}} / \pi d^2 \quad (7)$$

为计算方便, 引入管段阻抗系数  $k_{ij}$ , 令

$$q_{ij} = k_{ij} h_{ij} \quad (8)$$

其中  $k_{ij}$  和  $s_{ij}$  成反比, 表示为

$$k_{ij} = \left[ \frac{g}{8} \left( \frac{d}{l\lambda} + \frac{n}{\xi_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} |h_{ij}|^{-\frac{1}{2}} \pi d^2 \quad (9)$$

并且当  $n=0$  时, 有  $k_{ij}=0$ 。将式(3)、(9)代入式(2)可知, 对任意节点  $i$ , 其流量关系为

$$Q_i = H_i \sum_{j=0}^N k_{ij} - \sum_{j=0}^N k_{ji} H_j \quad (10)$$

联立整个管路网络中的所有节点, 根据其管段连接形式, 可以建立起矩阵方程, 为了书写方便, 将

矩阵中的  $\sum_{j=0}^N k_{ij}$  简写为  $\sum k_{0i}$ , 表示为

$$\begin{bmatrix} \sum k_{0i} & \cdots & -k_{0N} \\ \vdots & & \vdots \\ -k_{N0} & \cdots & \sum k_{Ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_0 \\ \vdots \\ H_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 & \cdots & Q_N \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

可以简化为

$$\mathbf{KH} = \mathbf{Q} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为管网系数矩阵;  $\mathbf{H}$  为节点的水头矩阵;  $\mathbf{Q}$  为节点的出水量矩阵。

### 2.2 预流通计算

通过式(11), 建立起压载水系统仿真数学模型, 可对其管路网络进行水力计算, 进而求出管网中的流量分配。在复杂的压载管路网络中, 实际工作的管路组成形式具有多样性, 为简化模型可先确定压载水的实时流通过程, 而确定压载水的流通过程, 需要确定各个管段中压载水的流通状态。根据上文所述, 可以用阻抗系数  $k$  表示管段中压载水的流通状态,  $k$  为 0 时, 表示管段中无压载水处于流通状态, 当  $k$  非 0 时, 则表示有压载水流通。对于带阀门管段,  $k$  由其阀门的开度  $n$  决定, 而无阀门管段则需要进一步确定。为确定这些无阀门管段的  $k$  是否非

0,进而确定压载水的流通过程,可在进行水力计算前进行一次压载水预流通计算。

预流通计算时,先假设所有无阀门管段中均有压载水流通,即设其  $k$  为正数。如图2管网局部所示,其中有4个阀门,0~7为节点。根据式(11),对于节点1~4有

$$\begin{cases} (k_{15}+k_{12})H_1-k_{15}H_5-k_{12}H_2=0 \\ (k_{12}+k_{20}+k_{23})H_2-k_{12}H_1-k_{20}H_0-k_{23}H_3=0 \\ (k_{23}+k_{36}+k_{34})H_3-k_{23}H_2-k_{36}H_6-k_{34}H_4=0 \\ (k_{34}+k_{47})H_4-k_{34}H_3-k_{47}H_7=0 \end{cases} \quad (13)$$

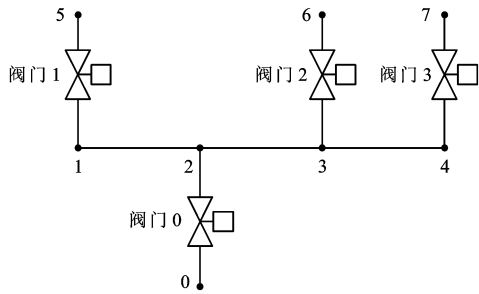


图2 局部管网

Fig. 2 Partial pipe network

若阀门0、1均处于打开状态,阀门2、3均处于关闭状态,则可以从方程组(3)得到  $H_1 \neq H_2$ ,  $H_2 = H_3 = H_4$ 。可以看出节点2、3之间管段与节点3、4之间管段没有产生压降,即压载水处于非流通状态,即可令  $k_{23} = k_{34} = 0$ 。

利用式(12),可以求出整个管路网络中各个管段的压降,确定其  $k$  是否非0,进而可以确定在不同阀门开启策略下压载水在管路网络中的实际流通过程。后续计算可只针对在此阀门开启策略下的实际流通过程的管路网络进行计算,从而提高了计算效率。在不同阀门开启策略下发生的压载水流通过程符合实际逻辑与仿真要求。

### 2.3 特殊节点处理

“海洋石油201”压载水系统采用集成遥控监测控制系统,具有遥控和手动控制模式,在压载控制室有集中控制台,可用于控制阀门,显示起停泵和压载舱水位、吃水、纵横倾指示与数据。压载水泵采用  $3\,500\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的立式离心电驱动泵,每台泵配有自吸真空泵,并在出口安装电液控制的流量调节阀,泵的实际排量与压载水的流速通常和系统的操纵有关,为简化计算,假设泵流量不变。压载水系统与井群供水系统存在最大的差异是压载水泵安置在管段中间(图3),因而带泵管段不能简单按照其他管段的方式处理。对于这类管段,本文的处理方式是:当泵工作时,切断泵所在的管段,以此作为断点,将管

网分割为两部分,见图3,0~7为节点,并且直接令该管段的阻抗系数  $k_{10}$  为0,并令节点0的出水量为泵流量,而节点1的出水量则为泵流量的负值。

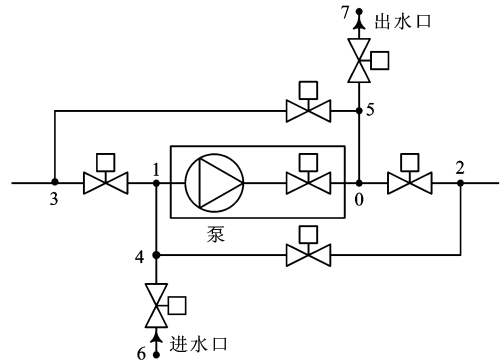


图3 包含泵的管路

Fig. 3 Pipe network with pump

当压载水系统向船舶外排水或者从船舶外注水时,一般与出水口或进水口相连接的泵都处于工作状态,因此,当向船舶外排水时,可令出水口处节点(图3中的节点7)的出水量为泵流量的负值,当从船舶外注水时,可令进水口处节点(图3中的节点6)的出水量为泵流量。

“海洋石油201”主要功能阀门采用电液一体控制的蝶阀,在压载泵出口与压载舱进出口处的蝶阀选用开度型,可以在机舱集控台、压载室控制台通过人机界面遥控操作至任意开度<sup>[21]</sup>。本文采用  $\xi_1 = \xi_2/n$  进行拟合简化计算局部水头损失系数。

### 2.4 模型求解

输配管网水力计算的重点是确定流量和压降分配,而对于压载水系统更关心的是流量的分配。为确定管网流量的分配,井群供水管网计算模型主要考虑的是各个井泵与管网的水头压力匹配以及各个水井的出水量,因而本文压载水系统模型的求解须先确定各个节点在管网中的水头压力匹配和节点的出水量。模型的求解流程见图4,其中  $\epsilon_1$  为阻抗系数  $k_{ij}$  两次循环计算的差值,  $\epsilon_0$  为误差允许值。

在压载水系统中,节点上的水井装置实际上并不存在,因而除了上文提及的特殊节点外,其余节点的出水量均为0。各个节点在管网中的水头压力匹配,主要是确定管网中各管段的阻抗系数以及集水池节点(即压载舱的接入口节点)的水头  $H_0$ ,需要进行迭代。

另外,因为式(11)为集水池节点和节点联立而成,矩阵  $Q$  中节点部分已知,而集水池节点部分待求,因此,为计算集水池节点的流量  $Q_0$  和水头  $H_0$ ,需要分割矩阵方程(11)。

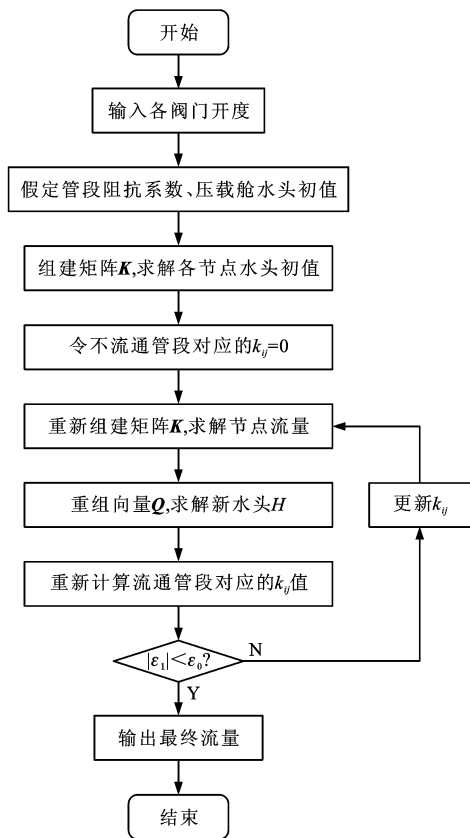


图4 模型求解流程

Fig. 4 Calculation flow of model

### 3 “海洋石油 201”压载水仿真系统

为了验证建立的数学模型,以“海洋石油 201”深水铺管起重船为对象,建立压载水系统的仿真数学模型。“海洋石油 201”深水铺管起重船压载水系统仿真模型包含 30 个压载水舱,108 个节点,4 个压载泵和 98 段管段。压载水系统控制仿真软件的前端界面与 AFT 界面分别见图 5、6,采用 C#.NET 语言开发压载水系统控制仿真软件,能够仿真实船压载水系统各个元件的操作控制,监控压载水舱实时液位信息和船舶实时浮态等参数,并且实时监控显示压载水流通路径,从而模拟并实现实船不同工况下压载水系统作业的操作控制和监控功能。不同阀门开启策略相应发生不同的压载水流通路径,并在界面上显示。

“海洋石油 201”压载水舱舱容为  $300 \sim 2\,500 \text{ m}^3$  [22],选取最大压载水舱进行晃荡载荷计算,考虑 20%~90%压载深度,按照《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南(2014)》(GD20—2013)计算得到的压载舱液体运动周期远小于船舶运动固有周期下限,不考虑由船舶运动引起的液舱晃荡现象。利用实船静水力曲

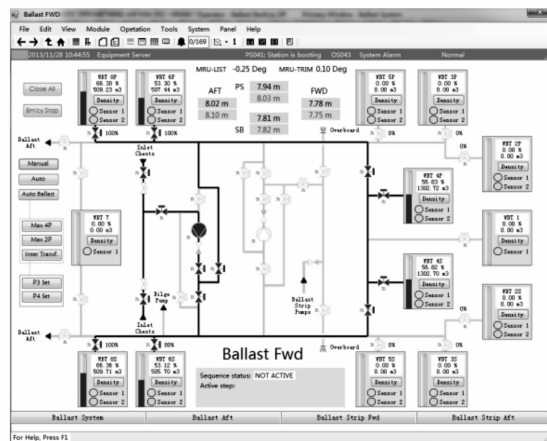


图5 FWD界面

Fig. 5 FWD interface

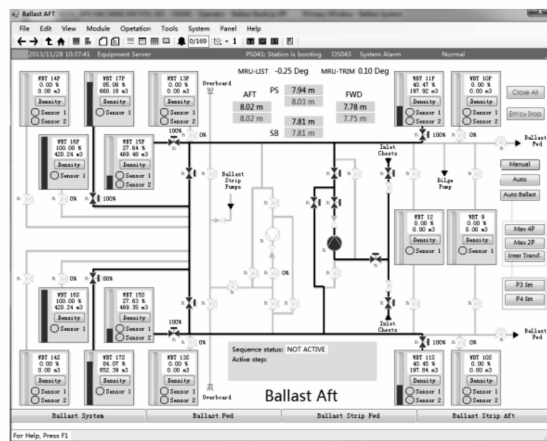


图6 AFT界面

Fig. 6 AFT interface

线插值计算船舶浮态,采用时间步长内初始时刻的压载舱内压载水,得到其对船舶作用的力和力矩产生的相应浮态。

#### 3.1 流量分配仿真分析

压载水仿真系统的仿真重点为流量分配,以图 5 的压载水通路为例,假定调载泵输出流量为  $3\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,输入到 8P、8S、6P、6S、4P、4S 六个压载水舱,考察不同仿真工况的流量分配情况,5 个工况中阀门的开度策略见表 1。

表 1 仿真工况

Tab. 1 Simulation cases

工况	不同压载水舱的阀门开度					
	8P	8S	6P	6S	4P	4S
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
3	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0
4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

计算得到工况1~5中的6个舱室流量分别见图7~11,可以看出:阀门开度均为1.0时,各压载水舱流量分别为603.73、603.73、605.88、605.88、540.39、540.39  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;同样阀门开度时,影响流量的主要因素为管路长度,距离压载泵越远,流量越小;阀门开度的变化对流量的影响较为显著,将8P、8S舱室阀门开度调整为0.5,六个舱室流量分别为48.87、484.87、670.19、670.19、594.94、594.94  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,改变舱室8P、8S的阀门开度,对与其相邻的舱室6P、6S流量的影响比对相隔较远的舱室4P、4S流量的影响大,与实际逻辑情况相符;各个阀门开度减小后流量分配更加均匀,因阀门阻力越大而致使管段中沿程阻力影响越小,与实际情况相符。

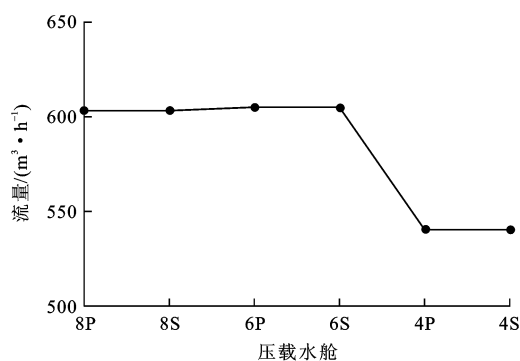


图7 工况1的流量曲线

Fig. 7 Flow curve in case 1

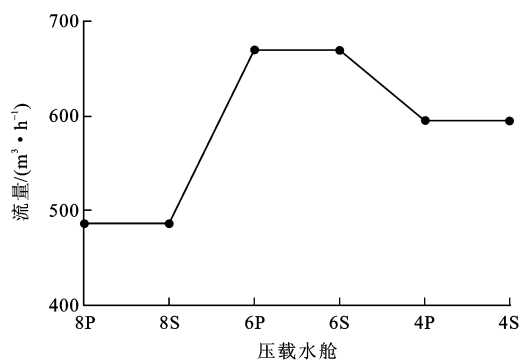


图8 工况2的流量曲线

Fig. 8 Flow curve in case 2

### 3.2 稳定性分析

以工况1为例,验证流量计算值的稳定性。设定误差允许值为极小值,截取流量的前20次计算值,见图12~17,可以看出:舱室的流量计算值收敛迅速,经过5次循环后,即趋于稳定值,计算速度与计算稳定性均可以满足仿真需求。

## 4 结 语

(1)针对海洋工程起重船等对调载要求较高的海

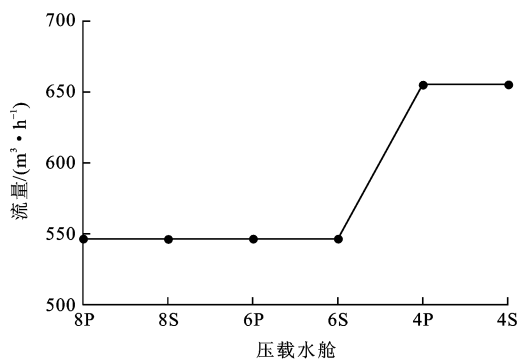


图9 工况3的流量曲线

Fig. 9 Flow curve in case 3

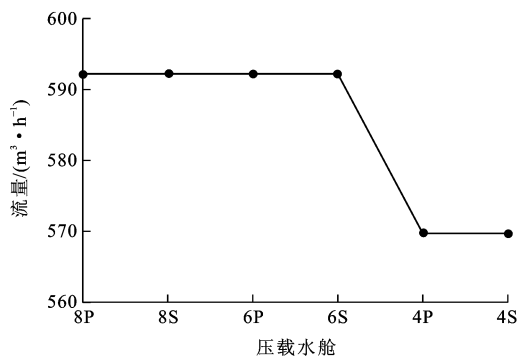


图10 工况4的流量曲线

Fig. 10 Flow curve in case 4

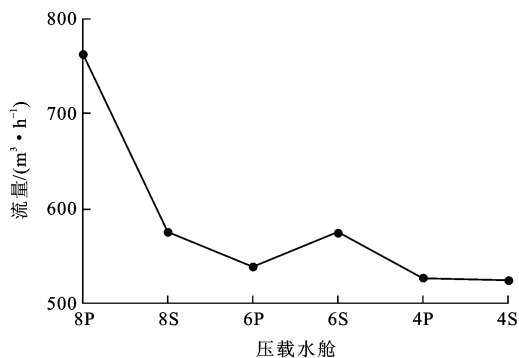


图11 工况5的流量曲线

Fig. 11 Flow curve in case 5

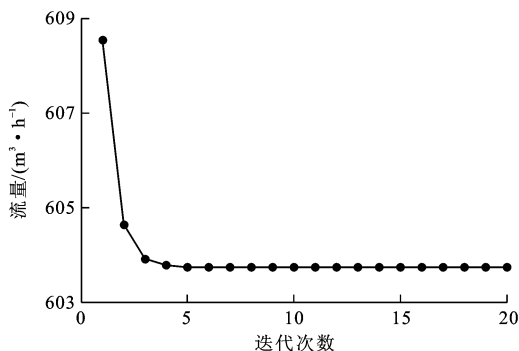


图12 压载水舱8P的流量曲线

Fig. 12 Flow curve of ballast tank 8P

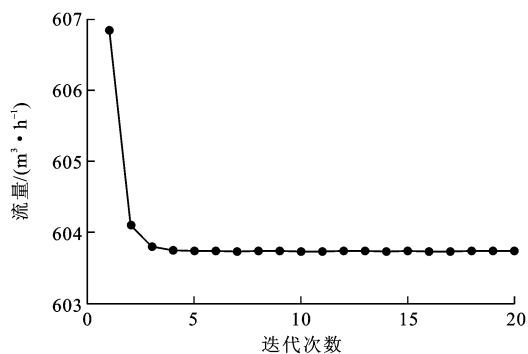


图 13 压载水舱 8S 的流量曲线

Fig. 13 Flow curve of ballast tank 8S

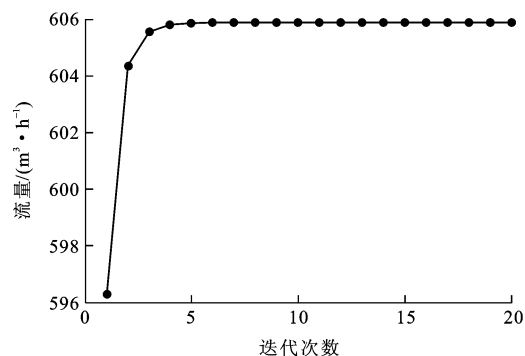


图 14 压载水舱 6P 的流量曲线

Fig. 14 Flow curve of ballast tank 6P

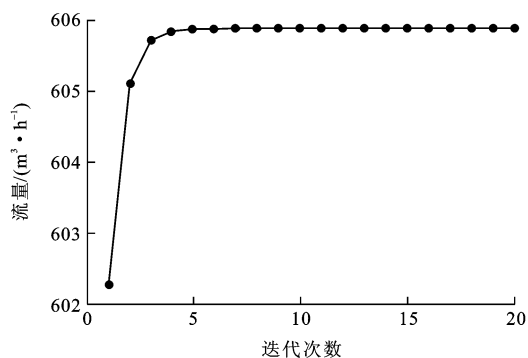


图 15 压载水舱 6S 的流量曲线

Fig. 15 Flow curve of ballast tank 6S

上作业船舶,在井群原理的基础上建立了压载水管路仿真系统,研究了管路的系统结构,建立了泵、阀等管路元件的计算模型,分析了管路压降损失的计算方法,完整模拟了压载水系统的管路动态工作状态,能够实现人机交互控制阀门、泵等开闭,实时反馈压载舱水量,为船舶浮态计算提供准确数据源。

(2)本系统已经应用在国家重大专项“海洋石油 201”深水铺管模拟器研究课题中,不仅能真实模拟实船压载水系统的操作控制,还能实时监控压载水系统运行,从仿真结果可知,阀门开度的变化对流量的影响显著,对相邻节点的影响较大,阀门开度相同

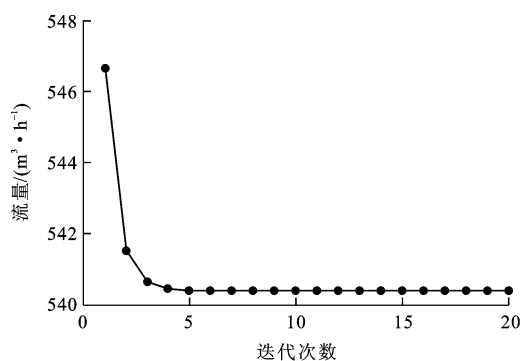


图 16 压载水舱 4P 的流量曲线

Fig. 16 Flow curve of ballast tank 4P

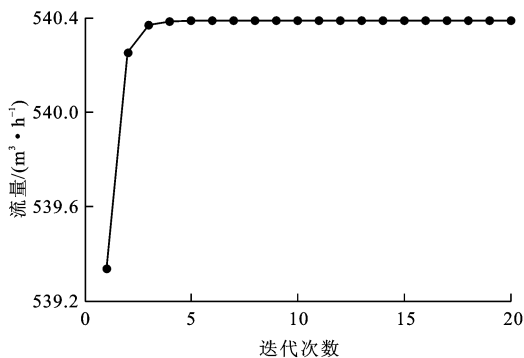


图 17 压载水舱 4S 的流量曲线

Fig. 17 Flow curve of ballast tank 4S

时,流量大小和管路长度成正比,与实际压载水系统具有较高的吻合度,流量计算值收敛速度快,有较好的稳定性。

(3)由于本文只考虑了手动调载工况,如何结合压载水自动配载计算和管路的自动调节,实现起重船调载仿真系统智能化的问题,是进一步研究的方向。

## 参考文献:

## References:

- [1] YUN S N, HAM Y B, TANAKA Y, et al. New circuit strategy of the variable ballast system for a deep sea submersible[C]// IEEE. 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics. New York: IEEE, 2015: 514-517.
- [2] XIAO Jian-wei, WANG Kai-po, WANG Ya-nan, et al. Studies on loading experiment scheme for heavy duty floating crane[J]. Ship Engineering, 2011, 33(5): 83-85.
- [3] WILSON W, CHANG P, VEROSTO S, et al. Computational and experimental analysis of ballast water exchange[J]. Naval Engineers Journal, 2006, 118(3): 25-36.
- [4] ARMSTRONG G. Ballast system design for flow-through exchange of ballast water[J]. International Maritime Technology, 1997, 109(3): 257-269.
- [5] QIU Zhong-liang. Design and research on a variable ballast system for deep-sea manned submersibles[J]. Journal of

- Marine Science and Application, 2008, 7(4): 255-260.
- [6] GOMES C F S. Using MCDA methods THOR in an application for outranking the ballast water management options[J]. Pesquisa Operacional, 2005, 25(1): 11-28.
- [7] 张显库,金一丞,尹 勇.半潜船航海模拟器的压载水系统仿真[J].中国航海,2008,31(3):230-235.  
ZHANG Xian-ku, JIN Yi-cheng, YIN Yong. Simulation of ballast water system in the navigation simulator for semi-submersible heavy lift vessels[J]. Navigation of China, 2008, 31(3): 230-235. (in Chinese)
- [8] 肖 民,乔红宇,姚寿广.船舶压载水系统的有限元仿真与监控界面设计[J].哈尔滨工程大学学报,2008,29(8):862-866.  
XIAO Min, QIAO Hong-yu, YAO Shou-guang. FEM simulation of ballast water system in ships and a design of monitoring and control interface[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(8): 862-866. (in Chinese)
- [9] 吕治慧.LNG 船液货装卸模拟器中稳性计算及仿真[D].大连:大连海事大学,2015.  
LU Zhi-hui. Stability calculation and simulation for liquid cargo handling simulator of LNG carrier[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [10] 白青壮,杨国豪,徐铁群.半潜船滚装重大件压载水调节可视化研究[J].集美大学学报:自然科学版,2013,18(2):119-123.  
BAI Qing-zhuang, YANG Guo-hao, XU Yi-qun. Research on the visual simulation of ballast water adjustment for a semi-submerged heavy lift vessel in rolling based on vega prime[J]. Journal of Jimei University: Natural Science, 2013, 18(2): 119-123. (in Chinese)
- [11] 周根明,吴如坤.维修母船最稳要求下的配载方法分析[J].河南科技,2015,5:40-41.  
ZHOU Gen-ming, WU Ru-kun. Research on the loading method about mother ship maintenance with stability[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015, 5: 40-41. (in Chinese)
- [12] ARVIND K. Impact of passive heave compensator on offshore lifting[J]. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 2015, 5(4): 166-180.
- [13] NAM B W, HONG S Y, KIM Y S, et al. Effects of passive and active heave compensators on deepwater lifting operation[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(1): 33-37.
- [14] TANIDA K, SUZUKI T, YASUDA T, et al. Active heave compensator for heavy hanging body suspended from offshore floating unit[J]. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 1994, 1994(176): 145-152.
- [15] 乔红宇,杨泽宇.船舶压载水监控系统设计[J].中国航海,2010,33(2):23-26.
- QIAO Hong-yu, YANG Ze-yu. Design of marine ballast monitor and control system[J]. Navigation of China, 2010, 33(2): 23-26. (in Chinese)
- [16] 吴杰长,庞之洋,梁述海.基于仿真支撑系统和组态软件平台的舰船轮机仿真训练模拟器研究[J].系统仿真学报,2004,16(3):605-607.  
WU Jie-chang, PANG Zhi-yang, LIANG Shu-hai. Research on the development of ship's propulsion plant simulator based on simulation support software and configuration software[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3): 605-607. (in Chinese)
- [17] 刘志春,朱永全.任意排列的承压-潜水完整型干扰井群计算理论及应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3359-3364.  
LIU Zhi-chun, ZHU Yong-quan. Calculation theory of integrated and arbitrarily arranged interferential wells bearing pressure under water and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3359-3364. (in Chinese)
- [18] 刘建续,王俊锋,王 旭.井群树状管网输水水力调节方式研究[J].地下水,2012,34(2):100-102.  
LIU Jian-xu, WANG Jun-feng, WANG Xu. Well field research of tree pipe network hydraulic regulation of water[J]. Ground Water, 2012, 34(2): 100-102. (in Chinese)
- [19] 王 中,陈 卓.输水管道水力损失的计算及其影响因素分析[J].土木建筑工程信息技术,2012,4(3):19-25.  
WANG Zhong, CHEN Zhuo. The aqueduct hydraulic loss calculation and its influencing factor analysis[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2012, 4(3): 19-25. (in Chinese)
- [20] 刘平昌.船闸阀门后廊道突扩体型阻力系数研究[J].重庆交通学院学报,1998,17(3):25-30.  
LIU Ping-chang. Study on resistance coefficient of the culvert sudden enlargement type behind the valve in ship lock[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1998, 17(3): 25-30. (in Chinese)
- [21] 刘炜慧,贾惠春,凌 静.“海洋石油 201”压载系统分析[J].船海工程,2013,42(2):29-31.  
LIU Wei-hui, JIA Hui-chun, LING Jing. Analysis of ballast system for “HAI YANG SHI YOU 201”[J]. Ship and Ocean Engineering, 2013, 42(2): 29-31. (in Chinese)
- [22] 许文兵.深水铺管起重船“海洋石油 201”研制[J].中国造船,2014,55(1):208-215.  
XU Wen-bing. Development of deepwater pipelay crane vessel “HAI YANG SHI YOU 201”[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(1): 208-215. (in Chinese)