

6-25-2020

## Multi-tank Adaptive Scheduling Algorithm and Simulation for Ship Stability Realization

Xiong Yong

*Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;*

Xuanzhuo Liang

*Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;*

Zhang Jia

*Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Multi-tank Adaptive Scheduling Algorithm and Simulation for Ship Stability Realization

### Abstract

**Abstract:** Aiming at the influence of the oil tank on the floating state and stability of the ship, the multi-tank adaptive dispatching control algorithm to maintain the stability of the ship is studied. The automatic floating state adjustment simulation system of the ship is realized by the WinCC (Windows Control Center) configuration software. For the system architecture, the Boolean logic table is used to construct the connection relationships of the oil tanks, pumps and pipelines, and the amount of oil exchange between the cabins is calculated according to the floating equation, and the balance of the floating state in the oiling process of the tanker is achieved according to the adaptive optimal scheduling algorithm of the multivariate and multi-constraint. The simulation results show that the scheduling algorithm can effectively adjust the floating state of the ship and maintain the stability of the ship, and can avoid the adverse effects caused by the uneven distribution of oil volume in the oil tank to ensure the navigation safety.

### Keywords

ship stability, adaptive optimization, WinCC (Windows Control Center), tank scheduling

### Recommended Citation

Xiong Yong, Liang Xuanzhuo, Zhang Jia. Multi-tank Adaptive Scheduling Algorithm and Simulation for Ship Stability Realization[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(6): 1060-1070.

## 实现船舶稳性的多油舱自适应调度算法及仿真

熊勇, 梁萱卓, 张加

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 针对油舱对船舶浮态与稳性的影响, 研究了保持船舶稳性的多油舱自适应调度控制算法, 并用 WinCC (Windows Control Center) 组态软件编写了船舶自动浮态调整仿真系统。在系统架构上, 采用布尔逻辑表构建了油舱、泵、管路之间的连通关系, 并根据浮态方程计算出舱群之间的调驳油量, 再根据多变量多约束的自适应优化调度算法实现了油舱驳油过程中浮态的平衡。仿真结果表明调度算法可以对船舶的浮态进行有效调整, 并保持船舶稳性, 避免了由油舱油量分布不均给船舶带来的不利影响, 保障了航行安全。

**关键词:** 船舶稳性; 自适应优化; WinCC (Windows Control Center); 油舱调度

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 06-1060-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0552

## Multi-tank Adaptive Scheduling Algorithm and Simulation for Ship Stability Realization

Xiong Yong, Liang Xuanzhuo, Zhang Jia

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of the oil tank on the floating state and stability of the ship, the multi-tank adaptive dispatching control algorithm to maintain the stability of the ship is studied. The automatic floating state adjustment simulation system of the ship is realized by the WinCC (Windows Control Center) configuration software. For the system architecture, the Boolean logic table is used to construct the connection relationships of the oil tanks, pumps and pipelines, and the amount of oil exchange between the cabins is calculated according to the floating equation, and the balance of the floating state in the oiling process of the tanker is achieved according to the adaptive optimal scheduling algorithm of the multivariate and multi-constraint. The simulation results show that the scheduling algorithm can effectively adjust the floating state of the ship and maintain the stability of the ship, and can avoid the adverse effects caused by the uneven distribution of oil volume in the oil tank to ensure the navigation safety.

**Keywords:** ship stability; adaptive optimization; WinCC (Windows Control Center); tank scheduling

## 引言

伴随着船舶的吨位和尺度不断向大型化方向

发展, 其运输安全问题越来越受到航运界人们的重视<sup>[1]</sup>。为了达到安全航行的目的, 就必须对油船进行精确的配载计算, 以保证油船具有适当的浮态、稳性, 避免过大的总纵弯曲<sup>[2]</sup>。其中, 在船舶驳油过程中, 船身的稳性和浮态会相应产生变化, 这时候所采用的调驳方案就显得尤为重要。同时, 随着船舶智能化的发展需要, 靠人工手动驳油这种风险



收稿日期: 2019-10-14 修回日期: 2019-12-03;  
基金项目: 国家自然科学基金(51979216);  
作者简介: 熊勇(1976-), 男, 湖北黄冈, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制; 梁萱卓(1996-), 男, 北京, 硕士, 研究方向为交通信息装备及控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1060 •

大、效率低的方法已经无法满足人们的需求。

因此, 船舶分布式油舱调度算法的研究可为有分布式油舱的大型船舶航行安全提供有力的技术保障, 也为航海人员提供辅助技术支持和安全操作指导<sup>[3]</sup>; 也可以应用到无人商船的自动航行中, 解决无人商船安全航行的技术难题<sup>[4]</sup>, 从而极大地减少由船舶事故带来的海上环境污染等生态灾难, 保证海上交通运输安全。

本文以船舶智能化的发展需要为背景, 研究了实现船舶稳性的多油舱自适应调度控制算法, 并设计了基于 WinCC (Windows Control Center) 的船舶自动浮态调整仿真系统。在算法的研究上, 采用了多变量多约束的动态规划算法。在系统架构上, 采用了分层控制逻辑, 并把调度控制算法与自动浮态调整系统相结合, 通过给定的输入值, 计算船舶目前浮态, 并通过油舱调驳控制算法来进行船舶稳性调整和保持船舶稳定。

## 1 目标函数及约束条件

### 1.1 目标函数

船舶浮态方程组是非线性和隐性的<sup>[5]</sup>, 一般可表示为:

$$\begin{cases} f_1(T_m, tg\theta, tg\psi) = 0 \\ f_2(T_m, tg\theta, tg\psi) = 0 \\ f_3(T_m, tg\theta, tg\psi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_1$  为重力与浮力的平衡方程式;  $f_2, f_3$  为力矩平衡方程式;  $T_m$  (平均吃水),  $tg\theta$  (横倾角正切),  $tg\psi$  (纵倾角正切) 为浮态参数<sup>[6]</sup>。这里设浮力为  $\gamma V$ , 其中  $\gamma = \rho g$ , 重力为  $P$ , 船舶重心  $G$  的坐标记为  $X_g, Y_g$ , 和  $Z_g$ , 船舶浮心  $C$  的坐标记为  $X_c, Y_c, Z_c$ , 分别计算重力  $P$  对  $x, y, z$  坐标轴的力矩  $M_{xp}, M_{yp}, M_{zp}$  和浮力  $\gamma V$  对  $x, y, z$  坐标轴的力矩  $M_{xc}, M_{yc}, M_{zc}$ ,  $P_x, P_y, P_z$  分别表示重力在随船坐标系的  $x, y, z$  三个坐标轴上的分量<sup>[7-8]</sup>, 可以表示为:

$$\begin{cases} P_x = \frac{P \tan \psi}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ P_y = \frac{P \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ P_z = \frac{-P}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{xp} = P_z Y_g - P_y Z_g \\ M_{yp} = P_x Z_g - P_z X_g \\ M_{zp} = P_y X_g - P_x Y_g \end{cases} \quad (3)$$

式(2)代入式(3)后, 得到:

$$\begin{cases} M_{xp} = -\frac{P(Y_g + Z_g \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_{yp} = \frac{P(X_g + Z_g \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_{zp} = \frac{P(X_g \tan \theta - Y_g \tan \psi)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (4)$$

类推可得浮力  $\gamma V$  对  $x, y, z$  坐标轴的力矩为:

$$\begin{cases} M_{xc} = -\frac{\gamma V(Y_c + Z_c \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_{yc} = \frac{\gamma V(X_c + Z_c \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_{zc} = \frac{\gamma V(X_c \tan \theta - Y_c \tan \psi)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (5)$$

为利于推导, 定义公式(6)为:

$$\begin{cases} M_{xz} = V Y_c - \frac{P}{\gamma} Y_g \\ M_{yz} = V X_c - \frac{P}{\gamma} X_g \\ M_{xy} = V Z_c - \frac{P}{\gamma} Z_g \end{cases} \quad (6)$$

可以得到总力矩为:

$$\begin{cases} M_x = \frac{\gamma(M_{xz} + M_{xy} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_y = \frac{\gamma(M_{yz} + M_{xy} \tan \psi)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_z = \frac{\gamma(M_{xz} \tan^2 \psi - M_{yz} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (7)$$

首先定义油舱对于坐标轴的力矩, 其中,  $g_{ij}(t)$  代表第  $i$  类第  $j$  号油舱的重量, 是一个关于时间变化的函数。

$$g_{ij}(t) = m_{ij}(t) * g \quad (8)$$

同时，这里的油舱重量  $g_{ij}(t)$  的改变受到多个状态量和开关量的约束，具体包括液位值、压力值、流量值等状态量以及油舱惰化、油舱清洁、油舱维修、油舱压载和泵组启停、阀门开关等开关量信息。用  $T_{ij}(t)$  表示油舱的状态量，用  $J_{ij}(t)$  表示油舱的开关量，即：

$$\begin{cases} T_{\min} \leq T_{ij} \leq T_{\max} \text{ (状态量)} \\ J_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ (开关量)} \end{cases} \quad (9)$$

根据油舱状态参数是否满足这些约束条件，即状态量是否小于指定的最小值或大于指定的最大值并且开关量满足驳油条件，可将油舱标记为可用（可调驳）与不可用（不可调驳）状态。然后采用多变量多约束的动态规划算法，确定阀门开关顺序、油舱进出顺序和油舱驳油量。

这里不妨将每个油舱每时刻的重量记为  $g_{ij}(t)$ ，则每个油舱对船舶 3 个方向的力矩可分别表示为  $x_{ij} \cdot g_{ij}(t)$ ， $y_{ij} \cdot g_{ij}(t)$ ， $z_{ij} \cdot g_{ij}(t)$  将其带入式(7)，可得到式(10)：

$$\begin{cases} M_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{xz} + M_{xy} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{yz} + M_{xy} \tan \psi)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{xz} \tan \psi - M_{yz} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (10)$$

则新的船舶浮态方程组可写为：

$$\begin{cases} f_1(T_m, \text{tg } \theta, \text{tg } \psi) = V - P/\gamma = 0 \\ f_2(T_m, \text{tg } \theta) = M_{xz} + M_{xy} \text{tg } \theta = 0 \\ f_3(T_m, \text{tg } \psi) = M_{yz} + M_{xy} \text{tg } \psi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

针对上述问题，本文研究目的是采用自适应控制算法，根据环境的改变调整参变量，使得其满足船舶运动方程，并且使得船舶在调整后的纵倾、横倾以及油舱重量差值的和达到最小，因此针对上述问题建立目标函数如式(12)所示：

$$\min \rho_s = \lambda_1 (\psi - \psi_s)^2 + \lambda_2 (\theta - \theta_s)^2 + \lambda_3 (|g_L - g_r| - g_s)^2 \quad (12)$$

其中， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为各部分所占比重。在本问题中，不妨令：

$$\gamma = \rho g = 800 \text{ kg/m}^3, P = mg = p/0.3 = 32 \times 10^6 \text{ kg}, \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1, s = 2 \text{ 208 m}^2, \text{ 船舶全长 } 150 \text{ m}, \text{ 宽 } 20 \text{ m}, \text{ 型深 } 8 \text{ m}. \text{ 指标 } \psi_s = 5, \theta_s = 5, g_s = 40, \rho_s \leq 600, \text{ 调驳时间 } t \leq 60 \text{ s}.$$

这里根据图 1 即假定的油舱分布图的数值，计算船舶在初始状态各个油舱对船舶各方向的力矩。

若把三维直角坐标系的原点定在船舶重心，则在  $x$  轴方向油舱的初始力矩可以表示为：

$$\begin{aligned} h_{11}(t) &= g_{11}(t) * (-33.93), h_{12}(t) = g_{12}(t) * (-32.43), \\ h_{13}(t) &= g_{13}(t) * (-30.93), h_{31}(t) = g_{31}(t) * (-30.09), \\ h_{32}(t) &= g_{32}(t) * (-28.59), h_{33}(t) = g_{33}(t) * (-30.09), \\ &\dots \\ h_{21}(t) &= g_{21}(t) * (-33.93), h_{22}(t) = g_{22}(t) * (-32.43), \\ h_{23}(t) &= g_{23}(t) * (-30.93), h_{41}(t) = g_{41}(t) * (-30.09), \\ h_{42}(t) &= g_{42}(t) * (-28.59), h_{43}(t) = g_{43}(t) * (-27.09), \\ &\dots \end{aligned}$$

在  $y$  轴方向油舱的初始力矩可以表示为：

$$\begin{aligned} h_{11}(t) &= g_{11}(t) * 13, h_{12}(t) = g_{12}(t) * 13, \\ h_{13}(t) &= g_{13}(t) * 13, h_{31}(t) = g_{31}(t) * 13, \\ h_{32}(t) &= g_{32}(t) * 13, h_{33}(t) = g_{33}(t) * 13, \\ &\dots \\ h_{21}(t) &= g_{21}(t) * (-13), h_{22}(t) = g_{22}(t) * (-13), \\ h_{23}(t) &= g_{23}(t) * (-13), h_{41}(t) = g_{41}(t) * (-13), \\ h_{42}(t) &= g_{42}(t) * (-13), h_{43}(t) = g_{43}(t) * (-13), \\ &\dots \end{aligned}$$

在  $z$  轴方向油舱的初始力矩可以表示为：

$$\begin{aligned} h_{11z}(t) &= g_{11z}(t) * 1.5, h_{12z}(t) = g_{12z}(t) * 1.5, \\ h_{13z}(t) &= g_{13z}(t) * 1.5, h_{31z}(t) = g_{31z}(t) * 1.5, \\ h_{32z}(t) &= g_{32z}(t) * 1.5, h_{33z}(t) = g_{33z}(t) * 1.5, \\ &\dots \\ h_{21z}(t) &= g_{21z}(t) * 1.5, h_{22z}(t) = g_{22z}(t) * 1.5, \\ h_{23z}(t) &= g_{23z}(t) * 1.5, h_{41z}(t) = g_{41z}(t) * 1.5, \\ h_{42z}(t) &= g_{42z}(t) * 1.5, h_{43z}(t) = g_{43z}(t) * 1.5, \\ &\dots \end{aligned}$$

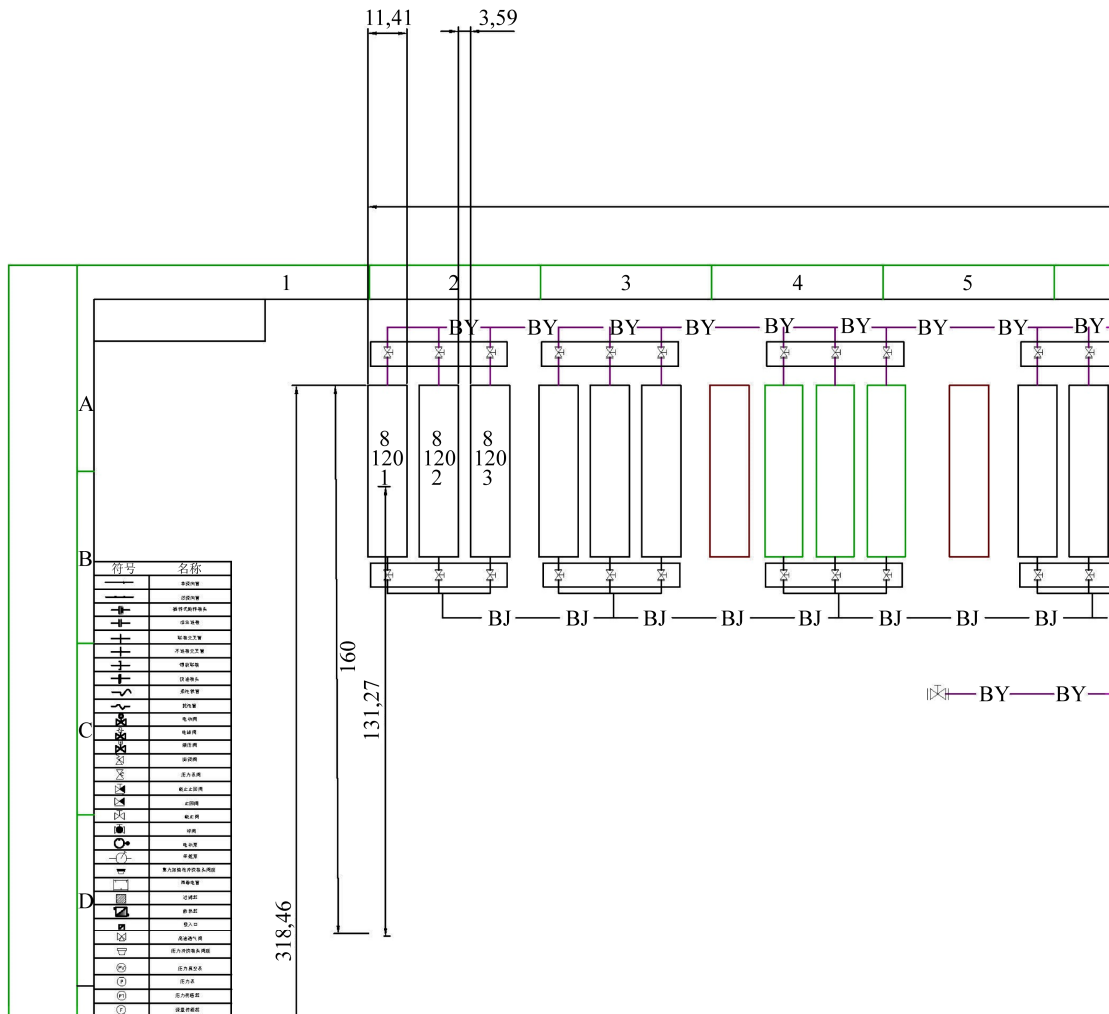


图 1 油舱位置图

Fig. 1 Tank position schematic diagram

## 1.2 约束条件

### (1) 输入量约束

油舱重量  $g_{ij}(t)$  的受到多个状态量和开关量的约束, 具体包括液位值、压力值、流量值等状态量以及油舱惰化、油舱清洁、油舱维修、油舱压载和泵组启停、阀门开关等开关量信息。用  $h_{ijn}$  表示油舱状态量和开关量, 即:

$$\begin{cases} h_{ijn} \leq h_{ij1} \leq h_{ijn} & (\text{状态量}) \\ h_{ij2} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} & (\text{开关量}) \end{cases}$$

### (2) 浮态调整工艺过程中的约束

① 优先调整力矩  $h_1(t) = g(t) \cdot x$  或

$h_2(t) = g(t) \cdot y$  较大的油舱。

② 调驳尽可能避免利用过渡舱。

③ 调驳过程中尽可能减少自由液面引起的稳性损失。

④ 尽量保持舷侧油舱储量稳定在 60%, 或者保持一致。这里根据油舱分布图, 即  $C_1, C_2, C_5 \sim C_{10}, C_{18} \sim C_{25}$  储量稳定在 60%, 或者保持一致, 即:

$$\sum_{i=1,2,5 \sim 10,18 \sim 25} \sum_{j=1,2,5 \sim 10,18 \sim 25} |g_i - g_j| \leq 1\%$$

⑤ 阀门打开顺序规定

驳油开始时: 先打开油舱入口处阀门, 再打开油舱出口处阀门, 再打开其他阀门, 再启动泵、离心机;

驳油结束时：先关闭油舱出口处阀门，再关闭泵、离心机，再关闭油舱入口处阀门，再关闭其他阀门。

### 1.3 输入参数

输入参数类型见表 1。输入参数主要包括油舱相关输入量以及泵组管道相关输入量，见表 2~3。

表 1 输入参数  
Tab. 1 Input parameters

对象	参数名称	数据类型	单位
船舶	船长	单精度浮点型	m
	船宽	单精度浮点型	m
	船纵深	单精度浮点型	m
	浮心坐标	单精度浮点型	m
	实时横倾角	单精度浮点型	度
	实时纵倾角	单精度浮点型	度
	左舷总油量	单精度浮点型	t
	右舷总油量	单精度浮点型	t
	纵倾角指标	单精度浮点型	度
	横倾角指标	单精度浮点型	度
油舱	液位值	单精度浮点型	t
	压力值	无符号 16 位	kPa
	清洁、维修	布尔型	无
	位置坐标	无符号 16 位	m
	容积	无符号 16 位	t
阀门	开关状态	布尔型	无
	使用状态	布尔型	无
泵组	开关状态	布尔型	无
	使用状态	布尔型	无
	泵组扬程	无符号 16 位	m
离心机	泵组轴功率	无符号 16 位	kW
	泵组效率	无符号 16 位	%
	开关状态	布尔型	无
离心机	使用状态	布尔型	无
	离心机效率	无符号 16 位	%
	离心机功率	无符号 16 位	kW

表 2 油舱输入量  
Tab. 2 Tank inputs

油舱编号	油舱类型	油舱液位	油舱维清洁	油舱容积	油舱口阀门	油舱位置坐标
C <sub>1</sub>	储油舱	C-Li1	C-PR1	C-CLE1	C-V1	C-VAL1 (12,60,0)
...	...	...	...	...	...	...
R <sub>1</sub>	储油舱	R-Li1	R-PR1	R-CLE1	R-V1	R-VAL1 (15,60,5)
...	...	...	...	...	...	...

表 3 泵组、管道输入  
Tab. 3 Pump, pipeline input

对象	可用性	状态(打开、关闭)
离心机 1	U-C1	C1
离心机 2	U-C2	C2
离心机 3	U-C3	C3
离心机 4	U-C4	C4
离心机 5	U-C5	C5
离心机 6	U-C6	C6
管道 n	U-LINEN	LINEN
离心泵 1	U-PUMP1	PUMP1
离心泵 2	U-PUMP2	PUMP2
离心泵 3	U-PUMP3	PUMP3
离心泵 4	U-PUMP4	PUMP4
离心泵 5	U-PUMP5	PUMP5
离心泵 6	U-PUMP6	PUMP6
离心泵 7	U-PUMP7	PUMP7
离心泵 8	U-PUMP8	PUMP8
离心泵 9	U-PUMP9	PUMP9

## 2 多油舱自适应优化调度算法

### 2.1 控制算法

针对上述优化问题，该优化问题属于有约束条件<sup>[9-10]</sup>的非线性动态规划 NDP (Nonlinear Dynamic Programming)问题<sup>[11-12]</sup>。采用一种自适应调度控制算法。对上述优化问题求解，总体流程见图 2。

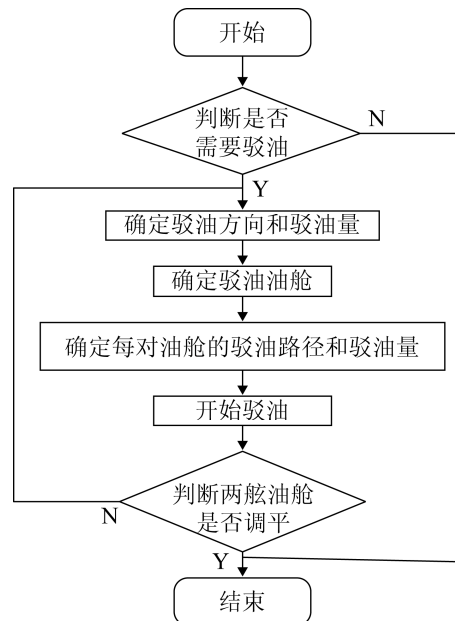


图 2 总体流程图

Fig. 2 Overall flow chart

## 1) 初始化判断

若当前浮态值超过标准值, 则开始驳油过程, 流程如图 3 所示。

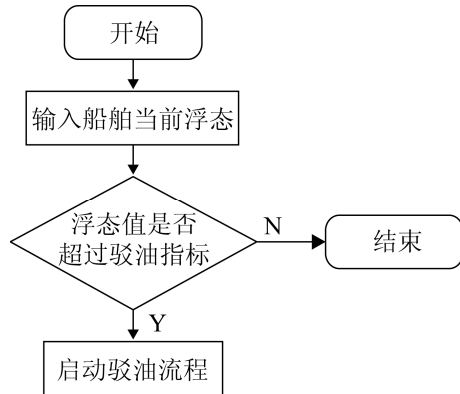


图 3 初始化判断

Fig. 3 Initialization judgment

## 2) 实时浮态计算

此过程主要对浮态进行计算, 如式(13)~(14)所示。

$$\begin{cases} M_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{xz} + M_{xy} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{yz} + M_{xy} \tan \psi)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \\ M_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot g_{ij}(t) = \frac{\gamma(M_{xz} \tan \psi - M_{yz} \tan \theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \psi}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} f_1(T_m, \text{tg } \theta, \text{tg } \psi) = V - P/\gamma = 0 \\ f_2(T_m, \text{tg } \theta) = M_{xz} + M_{xy} \text{tg } \theta = 0 \\ f_3(T_m, \text{tg } \psi) = M_{yz} + M_{xy} \text{tg } \psi = 0 \end{cases} \quad (14)$$

输入: 每个油舱的油量  $h(t) = g(t) / \rho g$ 、位置信息  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 、船的浮心坐标  $X_g, Y_g, Z_g$  船舶体积  $V$  (长、宽、纵深);

输出: 船舶实时的横倾角  $\psi$ 、纵倾角  $\theta$ 。

## 3) 确定驳油方向和驳油量

## ①驳油方向

输入: 当前横倾角、纵倾角;

输出: 如表 4 所示。

表 4 驳油方向

Tab. 4 Barge direction

横倾角 $\psi$ 、纵倾角 $\theta$	驳入区域	驳出区域
$\psi < -15 \cdot 0.8, -5 \cdot 0.8 < \theta < 5 \cdot 0.8$	右舷	左舷
$\psi < -15 \cdot 0.8, \theta < -5 \cdot 0.8$	右后	左前
$\psi < -15 \cdot 0.8, \theta > 5 \cdot 0.8$	右前	左后
$\psi > 15 \cdot 0.8, -5 \cdot 0.8 < \theta < 5 \cdot 0.8$	左舷	右舷
$\psi > 15 \cdot 0.8, \theta < -5 \cdot 0.8$	左后	右前
$\psi > 15 \cdot 0.8, \theta > 5 \cdot 0.8$	左前	右后
$-15 \cdot 0.8 < \psi < 15 \cdot 0.8, \theta < 5 \cdot 0.8$	后部	前部
$-15 \cdot 0.8 < \psi < 15 \cdot 0.8, \theta > 5 \cdot 0.8$	前部	后部

## ②总驳油量

将原浮态函数变为反函数

输入: 驳入、驳出油舱的实时油量  $h_i(t), h_j(t), i \neq j$ , 所有油舱油量、油舱个数  $n$ ;

过程: 式(13)中,  $g_{ij}(t) = \rho \cdot h_{ij}(t) \cdot g$ ,  $\rho$  为油品密度, 将需驳入区域油舱油量逐次增加, 需驳出区域油舱油量逐次减少, 计算每次的浮态值, 直至浮态值满足标准平衡指标的浮态值范围时, 停止循环;

输出: 满足浮态平衡时

$$H(t_2) = \sum h_i(t_1) - \sum h_i(t_2) = \sum h_j(t_2) - \sum h_j(t_1)$$

## 4) 确定驳油油舱

输入: 需调驳区域所有油舱的液位、压力、情节维修状态值, 需接收区域所有油舱的液位、压力、情节维修状态值;

约束: 油舱集合按权重由小到大排列, 见表 5。

表 5 油舱权重表

Tab. 5 Tank weight table

油舱区域	权重 $M$
中部底层	$M=0$
中部舷侧	$M=1$
艏部底层	$M=2$
艏部舷侧	$M=3$
艉部底层	$M=4$
艉部舷侧	$M=5$

过程:

在驳入区域从  $m=0$  开始搜索满足液位  $h(t) < 95\%$  的普通油舱和  $h'(t) < 80\%$  的舷侧油舱, 依次放入接收油舱集合;



在驳出区域从  $m=0$  开始搜索  $h(t)>5\%$  的普通油舱和  $h(t)>80\%$  的舷侧油舱, 依次放入调驳油舱集合;

输出: 调驳油舱约束顺序排列集合, 接收油舱约束顺序排列集合。

#### 5) 确定驳油路径:

输入: 全部阀门、泵组等状态信息如表 3 所示, 离心机状态, 管道状态(可用, 不可用);

约束: 阀门、泵组是否可用(布尔值为 1);

过程:

①  $h_i, h_j$  之间阀门管道泵组循环, 判断状态是否可用;

当每个阀门、泵组可用性值  $U-CN$ 、 $U-PUMP$ 、 $U-LINEN=1$  时, 确定为可用路径; 否则跳出, 将此路径排除;

② 在可用路径内选取最短路径(假定);

③ 将选取路径放入集合  $L$ ;

输出: 可用的驳油路线集合  $L$ 。

#### 6) 确定单次驳油量

输入: 油舱输入量如表 2 所示、泵组、管道输入如表 3 所示、可用驳油路径集合  $L$ 。

约束: 将非舷侧油舱驳至限定值 95% 或消耗到限定值 5%; 将舷侧油舱驳至 80% 或消耗至 80%, 打开顺序规定。

过程: 每条线路驳完后, 再次检查阀门、泵组状态, 打开阀门、泵组, 油舱口阀门标号与油舱号一致。假设阀门  $C_n, n=1, 2, \dots$ , 泵组  $P_m, m=1, 2, \dots$ 。

在每次驳油开始之前优先打开与接收油舱标号相同的阀门, 再打开与调驳油舱标号相同的阀门, 再打开其他阀门, 再启泵。

在每次结束驳油后优先关闭与驳油油舱标号相同的阀门, 再关泵, 再关闭与接收油舱标号相同的阀门, 再关闭其他阀门。

若  $C_1$  调驳至  $C_4$ , 则先令  $C-VAL4=1$ , 再令  $C-VAL1=1$ , 再令  $C_n=1$ , 最后令  $P_m=1$ ; 关闭时先令  $C-VAL1=0$ , 再令  $P_n=0$ , 再令  $C-VAL4=0$ , 最后令  $C_n=0$ 。

输出: 满足浮态平衡后的油舱油量  $C-LIQUIDELN, R-LIQUIDELN, XC-LIQUIDELN, N=1, 2, 3, \dots$ 。

## 2.2 分层控制逻辑

为了实现以上算法, 这里定义了双层逻辑矩阵, 并将逻辑矩阵写在 WINCC 全局脚本中。上层逻辑矩阵: 判断 2 个油舱之间是否连通, 若联通则元素值为 1, 不通则为 0。底层逻辑矩阵: 判断每 2 个油舱之间的阀门、泵组的状态, 若打开则对应元素值为 1, 关闭则为 0。这里还采用了舱群分类, 有些油舱所经阀门相同, 仅出入口处的油舱阀不同。

逻辑矩阵应用在驳油控制界面的开始按键。在判断完所选油舱及驳油量后, 在条件中调用上层逻辑矩阵元素, 若不满足为 1, 则无法驳油。若满足, 则使 2 个液位变量进行自加和自减, 每变化 1, 延时 2 s, 若满足结束条件, 则跳出循环。过程见图 4。

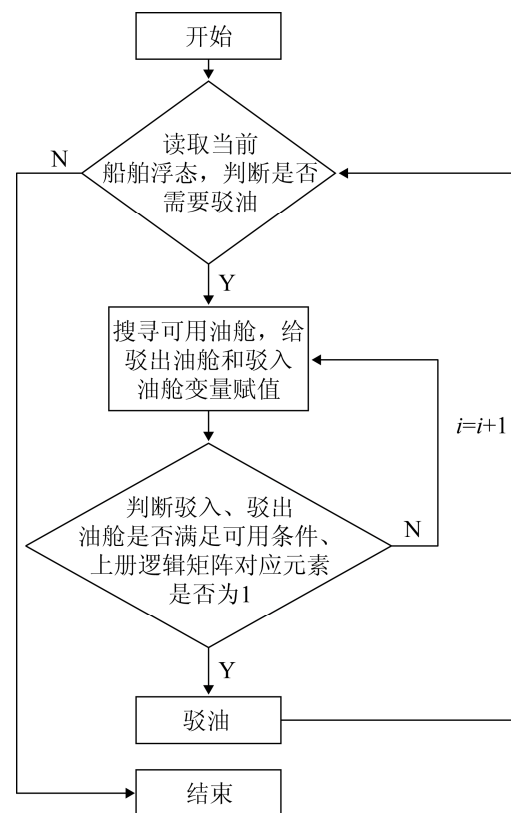


图 4 逻辑矩阵判断逻辑

Fig. 4 Logical matrix judgment logic

上层是舱与舱之间的逻辑关系这里油舱与油舱, 油舱与日用舱等之间的关系都可以用逻辑矩阵的方式表示, 若假设各舷共 40 个储油舱, 6 个日用舱, 这里列出了左舷油舱与右舷油舱见表 6。左舷油舱与右舷日用舱之间的关系见表 7。分别用  $m_j^i (i=0,1,\dots,40, j=0,1,\dots,6), n_k^i (i=0,1,\dots,40, k=0,1,\dots,6)$  来表示其对应关系。

表 6 储油舱-储油舱逻辑矩阵图

Tab. 6 Storage tank - storage tank logic matrix diagram

左	右				
	1	2	.....	39	40
1	$m_1^1$	$m_2^1$	.....	$m_{39}^1$	$m_{40}^1$
2	$m_1^2$	$m_2^2$	.....	$m_{39}^2$	$m_{40}^2$
.....			.....		
39	$m_1^{39}$	$m_2^{39}$	.....	$m_{39}^{39}$	$m_{40}^{39}$
40	$m_1^{40}$	$m_2^{40}$	.....	$m_{39}^{40}$	$m_{40}^{40}$

表 7 储油舱-日用舱逻辑矩阵图

Tab. 7 Storage tank-daily tank logic matrix diagram

左	右					
	1	2	3	4	5	6
1	$n_1^1$	$n_2^1$	$n_3^1$	$n_4^1$	$n_5^1$	$n_6^1$
2	$n_1^2$	$n_2^2$	$n_3^2$	$n_4^2$	$n_5^2$	$n_6^2$
.....			.....			
39	$n_1^{39}$	$n_2^{39}$	$n_3^{39}$	$n_4^{39}$	$n_5^{39}$	$n_6^{39}$
40	$n_1^{40}$	$n_2^{40}$	$n_3^{40}$	$n_4^{40}$	$n_5^{40}$	$n_6^{40}$

底层是每两舱之间阀门、泵的状态量的集合, 即每个元素都是舱与舱之间阀门、泵的状态值的集合, 如表 8 所示。

表 8 底层逻辑矩阵

Tab. 8 Underlying logical matrix

泵阀	$A_1$	$A_2$	...	$B_1$	$B_2$	...
状态	0	1	...	1	0	...

### 3 船舶自动浮态调整仿真系统

#### 3.1 态势显示界面

图 5 是用 WINCC 组态软件绘制的油舱态势显示图。共设有 60 个储油舱, 10 个日用舱。

#### 3.2 自动驳油功能界面

此界面可以实时计算船舶当前的横倾角、纵倾角以及两舷油料的质量差的绝对值。当点击开始后, 系统会遵循上文所述的自适应调度算法对船舶上的油料进行调驳, 从而调整船舶浮态, 实现船舶稳性, 如图 6 所示。

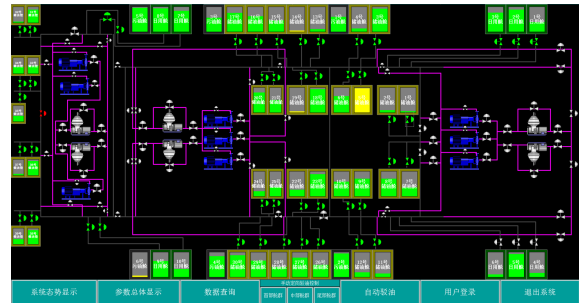


图 5 态势显示界面

Fig. 5 Self-adaptive scheduling algorithm flow chart



图 6 自动驳油控制

Fig. 6 Automatic oil control

### 4 仿真实例

#### 4.1 仿真设置

通过随机数给油舱、阀门、泵组、离心机变量赋值, 即给油舱液位  $C-LI$ 、 $R-LI$ , 油舱压力  $C-PR$ 、 $R-PR$  赋模拟值, 范围为  $(0, C-I)$ ; 给油舱清洁维修  $C-CLE$ 、 $R-CLE$ , 泵组开关  $PUMP$ , 阀门开关  $C-VAL$ 、 $R-VAL$ , 泵组可用性  $U-PUMP$ , 阀门可用性  $U-VAL$ , 管道可用性  $U-LINE$  等赋布尔值, 并通过后台浮态计算程序得到横倾角为  $15.0^\circ$ , 纵倾角为  $2.5^\circ$ , 两舷油料质量差为 200 t。

## 4.2 仿真结果分析

点击开始按键后,系统开始自动驳油,30 s 后,菜单中横倾角显示为 1.6°,纵倾角显示为 4.2°,两舷质量差为 16 t。

船舶油料经过自动调驳后,浮态发生改变,如式(15)所示:

$$\rho_s = (1.6 - 5)^2 + (4.2 - 5)^2 + (24 - 40)^2 = 268.2 < 600 \quad (15)$$

浮态变化曲线如图 7~8 所示,分别为理想变化曲线和仿真的实时浮态值离散点的连线。浮态数据如表 9 所示。

表 9 为仿真系统按照前文所述算法实时计算的每个时间点的浮态数据。

由于在自动调驳的过程中,  $g(t)$  即左右舷油舱质量变化是不均匀的,因此  $h(t)$  变化也是不均匀的,实际由各个时间点计算的浮态值连起来的曲线与  $h(t)$  随时间均匀变化产生的理想曲线有偏差;可以看到,纵倾角略微增加,这是由于油料整体往船舱艏部调送,但纵倾角并没有超出指标范围,所以仿真程序认为满足船舶浮态的标准值,并停止了驳油作业。

从横倾、纵倾角的变化对船舶实际的影响的角度来看,横倾从 15°减小至 1.6°,这对维持船舶的稳性起到了很大的作用;纵倾角从 2.5°增加至 4.2°,会使船体略微后倾,但仍处在所规定的纵倾标准值之内,并不会对船舶的稳性造成不利影响。

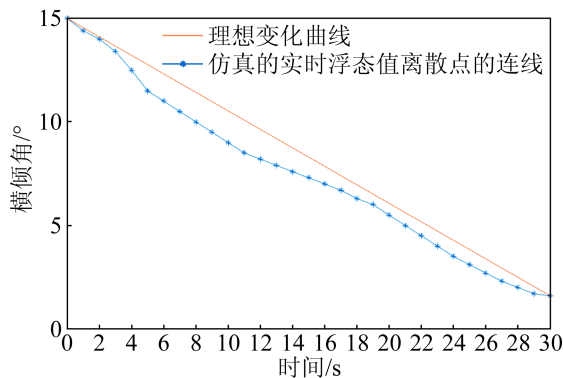


图 7 横倾角变化曲线  
Fig. 7 Heel angle curve

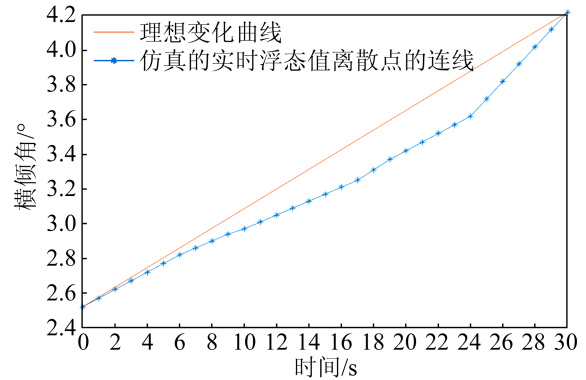


图 8 纵倾角变化曲线  
Fig. 8 Trim angle curve

表 9 浮态变化数据  
Tab. 9 Floating state data

时间点/s	横倾角/°	纵倾角/°
0	15.01	2.50
1	14.42	2.55
2	14.04	2.60
3	13.40	2.65
4	12.50	2.71
5	11.51	2.75
6	11.02	2.80
7	10.51	2.84
8	10.02	2.88
9	9.51	2.92
10	9.05	2.95
11	8.52	2.99
12	8.21	3.03
13	7.90	3.07
14	7.65	3.11
15	7.37	3.15
16	7.03	3.19
17	6.71	3.23
18	6.31	3.29
19	6.08	3.35
20	5.59	3.41
21	5.04	3.45
22	4.51	3.50
23	4.00	3.55
24	3.51	3.60
25	3.10	3.71
26	2.70	3.81
27	2.34	3.90
28	2.03	4.02
29	1.77	4.13
30	1.61	4.20

为了更直观的看到油料调驳的方向, 这里绘制了船舶重心的  $x$  轴和  $y$  轴坐标随时间变化的三维曲线, 如图 9 所示。

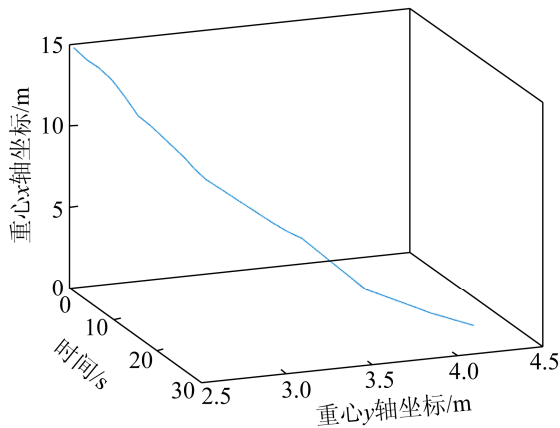


图 9 重心变化曲线

Fig. 9 Center of gravity curve

从重心的变化曲线可以看出, 油料总体从左舷调驳至右舷, 少部分油料调驳到了船舶的艏部, 因此油料总体是往船舶的右后方向调驳。

总体来讲, 仿真过程中, 浮态的各项数值随时间按一定趋势变化, 曲线变化趋势基本与理想曲线趋势保持一致。整个浮态调整过程历时 30 s, 使船舶的浮态由横倾  $15^\circ$  调整为横倾  $1.6^\circ$ , 重心  $x$  轴坐标由 14.9 调整到 2.2。虽然此算法还是存在缺陷, 只考虑了油料调驳对船舶浮态的影响, 并没有考虑其他因素。但是经检验, 调度算法在一定程度上实现了船舶稳性, 并满足了相关指标。

## 5 结论

船舶浮态及稳性的研究是一项复杂、重要的工作, 由于船舶在行驶过程中会受到各种各样的干扰, 船舶的安全行驶也会因此受到威胁。因此, 船舶分布式油舱调度算法的研究以及自动浮态调整仿真系统的实现可为有分布式油舱的大型船舶航行安全提供有力的技术保障。

在研究过程中, 仍有尚未解决的问题, 比如还未将仿真系统的变量通过某种协议与外部传感器连接以获得外部数据进行测试, 目前的仿真系

统主要成果还是验证了调度算法的可行性。同时, 与先前学者的研究工作相比, 将重心放在了油舱调度算法以及考虑到油舱分布的浮态计算上, 与传统的利用压载水舱进行浮态调整的方法对比, 其优点在于: 对于装载有大型分布式油舱的船舶或舰船, 通过油舱调驳调整浮态有效提高了调平效率, 大大缩短了调平时间。仿真系统的结果表明, 此算法在系统仿真的过程中达到预设指标, 在一定程度上实现了船舶稳性。

## 参考文献:

- [1] 程虹, 李炜, 杨屹. 船舶浮态调整系统研究[J]. 中国造船, 2001, 42(1): 75-79.  
Cheng Hong, Li Wei, Yang Yi. Research on ship floating state adjustment system[J]. Shipbuilding of China, 2001, 42(1): 75-79.
- [2] 李建军. 大型油船安全控制技术的研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2005.  
Li Jianjun. Research on Safety Control Technology of Large Oil Tankers[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2005.
- [3] 张建波, 强兆新, 郝金凤, 等. 超大型油船分舱方案优化设计研究[J]. 中国造船, 2017, 58(1): 125-134.  
Zhang Jianbo, Qiang Zhaoxin, Hao Jinfeng, et al. Research on Optimization Design of Submarine Plan of Super Large Oil Tanker[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(1): 125-134.
- [4] 谢田华. 船舶抗沉计算与决策模型研究[J]. 中国航海, 2005, 65(4): 11-14.  
Xie Tianhua. Research on ship anti-sink calculation and decision model[J]. Navigation of China, 2005, 65(4): 11-14.
- [5] 刘文艳. 综合试验舰浮态辅助决策系统研发[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.  
Liu Wenyan. Development of Integrated Test Ship Floating State Assistant Decision System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012.
- [6] 刘博. 基于三维模型的舰船浮态调整决策支持系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.  
Liu Bo. Research on Ship Floating State Adjustment Decision Support System Based on 3D Model[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [7] 王爱岭. 船舶破损进水浮态调整智能控制研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010.  
Wang Ailing. Research on Intelligent Control of Ship's

- Damaged Influent Floating State Adjustment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2010.
- [8] 马鑫延. 舰船浮态调整实时仿真计算技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.  
Ma Xinting. Research on Real-time Simulation and Calculation Technology of Ship Floating State Adjustment[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [9] Panda D, Ramteke M. Preventive crude oil scheduling under demand uncertainty using structure adapted genetic algorithm[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2019: 235.
- [10] Fernandez-Viagas V, Framinan J M. A best-of-breed iterated greedy for the permutation flowshop scheduling problem with makespan objective[J]. Computers and Operations Research (S0305-0548), 2019: 112.
- [11] Chiou J P, Chang C F, Jhang J S. Research for a New Novel Evolutionary Algorithm[C]. 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control. Taichung: Piscataway, NJ. 2014: 1115-1118.
- [12] Yusoh Z I M, Tang M. Composite SaaS scaling in Cloud computing using a hybrid genetic algorithm[C]. 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Beijing: Piscataway, NJ. 2014: 1609-1616.