

文章编号:1671-1637(2016)02-0027-10

水流作用下的沉管平移控制模型与优化方法

李军军, 杨小军, 李 芸, 肖英杰

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘 要:针对水流作用下的沉管平移控制问题,在数学描述的基础上对拖轮合力、合力矩进行了分析,统一了四象限拖轮力矩的计算公式,构建了考虑作业拖轮数量、拖力裕量、浮运速度的沉管平移控制优化模型,提出了基于加权对数理想点法的粒子群优化方法,运用克拉默法则进行拖力大小和角度的约束处理,通过港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节浮运控制算例进行仿真。仿真结果表明:拖轮总数量为6艘时,涨潮流情况下所得浮运速度为4.770 kn,适应度为0.720,作业拖轮数量为3艘,拖力裕量乘积为 2.693×10^{20} kN⁶;落潮流情况下所得浮运速度为1.750 kn,适应度为3.042,作业拖轮数量为5艘,拖力裕量乘积为 3.352×10^{19} kN⁶。可见,本文提出的模型和方法具有较强的适用性,适应度较优,作业拖轮数量较小,拖力裕量与浮运速度较大。

关键词:沉管平移控制;拖轮合力;合力矩;粒子群优化;加权对数理想点法

中图分类号:U455.46

文献标志码:A

Translation control model and optimization method of immersed tube under action of water flow

LI Jun-jun, YANG Xiao-jun, LI Yun, XIAO Ying-jie

(School of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the translation control of immersed tube under the action of water flow, the resultant force and resultant moment of tugboats were analyzed based on the mathematical description, the calculation equations of tug moment in four quadrants were unified, the translation control model of immersed tube was built, and the number of working tugboats, the surplus capacity of towing force and the floating speed were considered. A weighted logarithmic ideal point particle swarm optimization (WLIPPSO) method was designed. Cramer's rule was utilized to handle constraints for towing forces and angles of towing forces. The simulation was carried out through tube floating control example of immersed tube tunnel in island tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. Simulation result shows that when the total number of tugboats is six, in rising tide the floating speed is 4.770 kn, the fitness is 0.720, the number of working tugboats is three, and the surplus capacity product of towing force is 2.693×10^{20} kN⁶. In falling tide the floating speed is 1.750 kn, the fitness is 3.042, the number of working tugboats is five, and the surplus capacity product of towing force is 3.352×10^{19} kN⁶. So the model and method proposed have strong applicability, the fitness is better, the number of working tugboats is smaller, surplus capacity of towing force and floating speed are higher. 8 tabs, 5 figs, 24 refs.

收稿日期:2015-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51509151);上海市自然科学基金项目(15ZR1420200);教育部人文社会科学研究项目(15YJC630145, 15YJC630059)

作者简介:李军军(1981-),男,江苏如东人,上海海事大学讲师,工学博士,从事沉管浮运研究。

Key words: translation control of immersed tube; resultant force of tugboats; resultant moment; particle swarm optimization; weighted logarithmic ideal point method

Author resume: LI Jun-jun(1981-), male, lecturer, PhD, +86-21-38282966, jsliljj@163.com.

0 引 言

沉管法由于隧道延长短、地质条件制约小、现场施工期短等优点而逐渐成为水下大型隧道工程的首选施工方法^[1-2],而沉管浮运是沉管隧道施工过程中较为复杂、极具挑战性的一道关键工序^[3-4],一般情况下,沉管自身没有航行的动力,需要一定数量的拖船协助才能航行。直航(包括前进、后退)、横移(包括左横移、右横移)是沉管浮运的典型工况,本文将它们统称为平移。在水流作用下,受沉管自身的尺度、受力特性与拖航动力等因素的影响,沉管平移运动中的浮运控制具有一定的复杂性,而沉管法往往应用于航运密度较大、航运要求较高的水域,浮运工作有航道宽度、时间窗口等限制,因此,需要对水流作用下的沉管平移控制进行研究。

目前,国内外已有不少学者在拖轮拖带、沉管浮运这两个方面开展研究。在拖轮拖带方面,一些学者对拖轮顶推拖曳作业方法、拖带阻力、拖带中的动态性与稳定性等开展了研究^[5-7]。鲍文明对不同顶推位置对船舶运动与操纵的不同影响作了详细阐述^[8];Nam 等利用多项式插值法对船舶拖带阻力计算方法与拖绳张力进行了研究^[9],运用基于 LQR 算法的姿态控制对船舶拖带线性动力学系统中的拖力大小、拖力作用点进行了分析^[10];Nam 等通过测量驳船轨迹与拖绳张力对驳船的拖带特性进行了试验和数值模拟研究^[11];詹海东等从拖航任务特点、拖航阻力计算、拖轮和拖缆的合理配置与拖航航速计算等方面,总结了狭窄水道与弯道拖航操纵作业的技术要领和相关的注意事项^[12];熊振南等运用大型船舶操纵模拟器对超大型船舶靠离泊操纵作业中拖轮的配备数量和功率进行了分析^[13];Couce 等开发了自动拖带系统,描述了一种能协助拖带的拖绳控制系统^[14];Nam 等对平静海面上的拖带稳定性进行了详细的数值模拟研究^[15];Sinibaldi 等将拖轮看作一个点,通过一种 4-DOF 非线性动力学模型对拖带动力学进行了研究^[16]。

在沉管浮运方面,特殊的结构使得沉管拖航方法与一般船舶有所不同,一些研究者对沉管浮运过程中的水动力、管节受力、拖航操纵进行了研究。朱升等对不同施工参数条件下的管段周围的流场进行

了数值模拟^[17],分析了管段所受水动力作用的特性;吕卫清等基于相似理论和相对运动概念,在拖曳水池完成沉管管节系列水动力学试验,得到沉管管节在不同风浪流载荷组合作用下的管节受力^[18];胡晓明以顶推方式组成沉管浮运运动系统,由自由自航模试验确定其完整操纵性,分析了管节长度及航速变化对操纵性的影响^[19]。

可见,近年来国内外对沉管浮运及拖带控制相关研究较多,但关于沉管浮运过程中的多拖轮拖带控制与优化的研究还很少见。基于此,本文速度、阻力、拖轮合力与合力矩对水流作用下的沉管平移问题进行了数学描述,提出沉管平移控制与优化的思路,通过拖轮合力、合力矩的分析建立了沉管平移控制模型,针对该模型的多目标特点,提出一种基于加权对数理想点法的粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)方法,以港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节浮运控制为例,进行了仿真计算。

1 沉管平移控制问题

将沉管及其安装船近似看作一个具有长方体结构的整体,设长、宽分别为 l 、 b ,拖航时沉管吃水为 e ,协同作业的拖轮数为 N 。

沉管平移有一定的速度,有速度则有阻力,有阻力即需要拖力,且对拖轮合力及合力矩有一定的要求。本文从速度、阻力、拖力、拖轮合力与合力矩 4 个方面逐步展开,提出沉管平移控制优化的思路。

1.1 平移速度

为便于分析,设沉管中心为坐标原点 O ,沉管轴线为 x 轴,垂直于沉管轴线为 y 轴。令水流速度为 V_0 ,沉管相对于岸的平移速度为 V_1 ,沉管相对于水的平移速度为 V_2 , V_0 、 V_1 、 V_2 与 x 轴正方向的夹角分别为 θ_0 、 θ_1 、 θ_2 。沉管浮运需要克服水的阻力,通过几何分析可知, V_0 、 V_1 、 V_2 的关系见图 1。 V_2 在 x 、 y 轴的分量 V_x 、 V_y 分别为

$$V_x = V_1 \cos(\theta_1) - V_0 \cos(\theta_0) \quad (1)$$

$$V_y = V_1 \sin(\theta_1) - V_0 \sin(\theta_0) \quad (2)$$

1.2 沉管平移时的阻力

根据《海上拖航指南》(2011),沉管的海上拖航总阻力 R_2 为

$$R_2 = 1.15(R_0 + R_1) \quad (3)$$

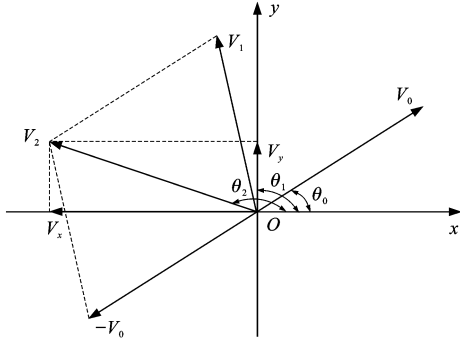


图1 沉管速度

Fig. 1 Immersed tube velocities

$$R_0 = 1.67 \times 10^{-3} a_1 |V_2|^{1.83} \quad (4)$$

$$R_1 = 0.62 \delta a_2 V_2^2 \quad (5)$$

若对水直航,有

$$a_1 = l(b + 2e)$$

$$a_2 = be$$

若对水横移,有

$$a_1 = b(l + 2e)$$

$$a_2 = le$$

式中: R_0 、 R_1 分别为沉管的摩擦阻力、剩余阻力,考虑到沉管是非流线型变化的,参照剩余阻力估算方法^[20]计算 R_1 ; a_1 为沉管的水下湿表面积; δ 为方形系数; a_2 为浸水部分的沉管横剖面积。

式(3)~(5)为针对沉管对水直航或横移运动状态($\theta_2 = k\pi/2$, k 为整数)的计算公式,实际情形下 V_2 往往与 x 、 y 轴有一定角度,本文在计算阻力时,根据 V_x 、 V_y 分别计算出 x 、 y 轴的阻力 R_x 、 R_y 。 R_x 、 R_y 都是非负实数,没有考虑方向性。

1.3 拖轮拖力

令第 i 艘拖轮与沉管的系固点为 A_i ,坐标为 (x_i, y_i) ,拖力为 F_i ,拖力力矩为 T_i , x 轴正方向逆时针到 F_i 的夹角为 α_i ,各拖力的大小、角度都有一定的范围,即

$$F_i \in [0, F_i^{\max}] \quad (6)$$

$$\alpha_i \in [\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}] \quad (7)$$

式中: F_i^{\max} 为 F_i 的最大值; α_i^{\min} 、 α_i^{\max} 分别为 α_i 的最小值、最大值。

1.4 拖轮合力与合力矩

在浮运作业中,沉管的运动是较为缓慢的。本文假设沉管的平移是匀速的,则阻力 f 与拖轮合力 F 大小相同,方向相反,即

$$F = -f \quad (8)$$

令拖轮合力 F 在 x 、 y 轴的分力分别为 F_x 、 F_y ,则有

$$F_x = -f_x \quad (9)$$

$$F_y = -f_y \quad (10)$$

式中: f_x 、 f_y 分别为阻力 f 在 x 轴、 y 轴方向的分力。

为避免沉管旋转,拖轮合力矩 T 应满足

$$T = 0 \quad (11)$$

1.5 沉管平移控制优化的思路

本文沉管浮运控制优化的具体思路为:首先根据水流速度、沉管速度,获得 V_x 、 V_y ,进而计算出 f_x 、 f_y ,可得 F_x 、 F_y ;然后以各拖力的大小及角度为决策变量,建立浮运控制模型,基于PSO设计控制优化方法来判断哪些拖轮出力,计算各拖力大小及角度。

2 沉管平移控制模型

沉管平移主要是对拖轮合力 F 与拖轮合力矩 T 具有要求,本文对这两个力进行分析,进而建立沉管浮运控制模型。

2.1 拖轮合力

考虑到 F_x 、 F_y 分别与 V_x 、 V_y 方向一致,结合式(9)、(10),有

$$F_x = R_x \operatorname{sgn}(V_x) \quad (12)$$

$$F_y = R_y \operatorname{sgn}(V_y) \quad (13)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

F_i 在 x 、 y 轴的分量分别为 $F_i \cos(\alpha_i)$ 、 $F_i \sin(\alpha_i)$,因此,有

$$\sum_{i=1}^N F_i \cos(\alpha_i) = F_x = R_x \operatorname{sgn}(V_x) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N F_i \sin(\alpha_i) = F_y = R_y \operatorname{sgn}(V_y) \quad (15)$$

2.2 拖轮合力矩

计算拖轮合力矩,需要对每个拖力的力臂、力矩进行计算。在图1中,各拖力位于不同的象限,各象限拖力力矩的计算方法并不相同,首先针对第1象限进行计算,然后拓展到其他象限。

第1象限, $x_i > 0$, $y_i > 0$,令 $\beta_i = \arctan(x_i/y_i) \in (0, \pi/2)$,而 $\alpha_i \in [0, 2\pi)$,因此, $\alpha_i + \beta_i \in (0, 5\pi/2)$ 。当 $\alpha_i + \beta_i$ 处于不同范围时,力臂与力矩的计算有所不同。按照 $\alpha_i + \beta_i$ 的不同范围分为五种情况,并分别画出拖力力臂示意(图2), L_i 为 OA_i 在垂直于 F_i 方向上的投影长度。

(1) $\alpha_i + \beta_i \in (0, \pi/2)$,如图2(a)所示,通过几何分析,有

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i - \beta_i\right) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (16)$$

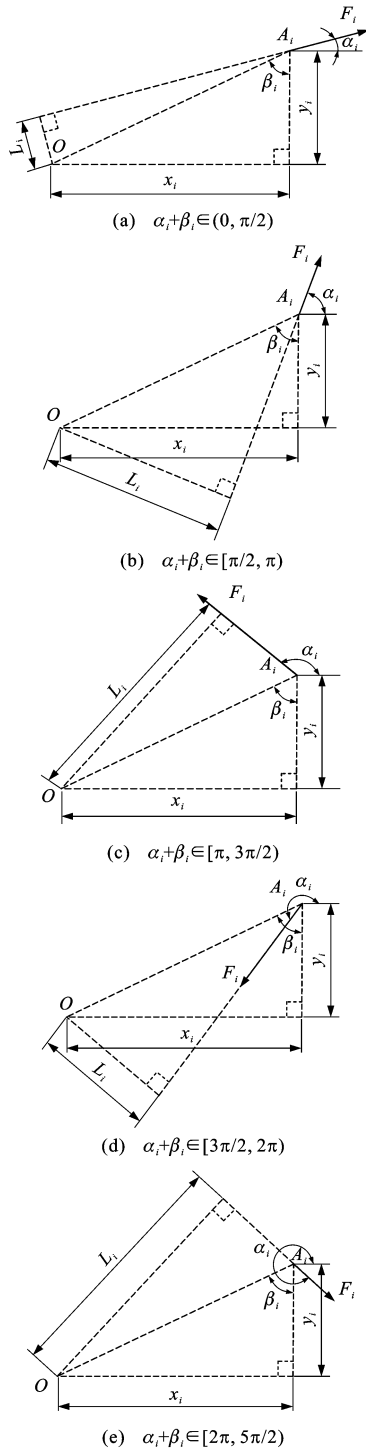


图 2 拖力力臂

Fig. 2 Drag arms

以顺时针方向为参考方向,可知此时的拖力力矩为正,为

$$T_i = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (17)$$

(2) $\alpha_i + \beta_i \in [\pi/2, \pi)$, 如图 2(b) 所示, 有

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\alpha_i + \beta_i - \frac{\pi}{2}\right) = -\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (18)$$

考虑方向性, 此时的拖力力矩为负, 为

$$T_i = -F_i [-\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)] = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (19)$$

(3) $\alpha_i + \beta_i \in [\pi, 3\pi/2)$, 如图 2(c) 所示, 有

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \alpha_i - \beta_i\right) = -\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (20)$$

考虑方向性, 此时的拖力力矩为负, 为

$$T_i = -F_i [-\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)] = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

(4) $\alpha_i + \beta_i \in [3\pi/2, 2\pi)$, 如图 2(d) 所示, 有

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\alpha_i + \beta_i - \frac{3\pi}{2}\right) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (21)$$

考虑方向性, 此时的拖力力矩为正, 为

$$T_i = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

(5) $\alpha_i + \beta_i \in [2\pi, 5\pi/2)$, 如图 2(e) 所示, 有

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\frac{5\pi}{2} - \alpha_i + \beta_i\right) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (22)$$

考虑方向性, 此时的拖力力矩为正, 为

$$T_i = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

由此可知, 以顺时针方向为参考方向时, 5 种情况下都有

$$T_i = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

在第 2 象限, $x_i < 0, y_i > 0$, 则点 $(-x_i, y_i)$ 位于第一象限, 与点 (x_i, y_i) 关于 y 轴对称。令 $F_{2,i}$ 为拖力 F_i 关于 y 轴对称的力, 则 $F_{2,i}$ 的力矩 $T_{2,i}$ 与 T_i 关于 y 轴对称。根据式(17), 并考虑方向性, 有

$$T_i = -T_{2,i} = -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_{2,i} + \beta_{2,i}) = -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\pi - \alpha_i - \beta_i) = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (23)$$

$$\alpha_{2,i} = \pi - \alpha_i$$

$$\beta_{2,i} = \arctan[x_i / (-y_i)] = -\beta_i$$

在第 3 象限, $x_i < 0, y_i < 0$, 则点 $(-x_i, -y_i)$ 位于第 1 象限, 与点 (x_i, y_i) 关于原点对称。令 $F_{3,i}$ 为拖力 F_i 关于原点对称的力, 则 $F_{3,i}$ 的力矩 $T_{3,i}$ 与 T_i 关于原点对称。根据式(17), 并考虑方向性, 有

$$T_i = T_{3,i} = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_{3,i} + \beta_{3,i}) = F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i - \pi + \beta_i) = -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (24)$$

$$\alpha_{3,i} = \alpha_i - \pi, \beta_{3,i} = \arctan[(-x_i)/(-y_i)] = \beta_i$$

第 4 象限, $x_i > 0, y_i < 0$, 则点 $(x_i, -y_i)$ 位于第 1 象限, 与点 (x_i, y_i) 关于 x 轴对称。令 $F_{4,i}$ 为拖力 F_i 关于 x 轴对称的力, 则 $F_{4,i}$ 的力矩 $T_{4,i}$ 与 T_i 关于 x 轴对称。根据式(17), 并考虑方向性, 有

$$\begin{aligned} T_i &= -T_{4,i} = -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_{4,i} + \beta_{4,i}) = \\ &= -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(2\pi - \alpha_i - \beta_i) = \\ &= -F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\alpha_{4,i} = 2\pi - \alpha_i$$

$$\beta_{4,i} = \arctan[x_i/(-y_i)] = -\beta_i$$

由此可知, 4 个象限所得结果的符号有正有负, 其正负与 y_i 的正负是一致的, 因此, 可以将各拖轮力矩统一表示为

$$T_i = \text{sgn}(y_i) F_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (26)$$

一般情况下, 拖力、力臂都是非负实数, 而式(26)中的力矩具有正负号。为方便分析, 取

$$M_i = \text{sgn}(y_i) \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \cos(\alpha_i + \beta_i) \quad (27)$$

则带正负号的拖力力矩为

$$T_i = F_i M_i \quad (28)$$

结合式(11), 有如下关系式存在

$$T = \sum_{i=1}^N F_i M_i = 0 \quad (29)$$

式中: M_i 为第 i 艘拖轮具有正负号的拖力力臂。

2.3 目标函数

在实际浮运过程中, 为降低协同作业复杂度, 希望同时进行顶推或拖曳作业的拖轮数量尽量少; 为增强对不确定情况的处理能力, 要求各拖轮拖力裕量值尽量大; 另外, 希望浮运的时间尽量短, 即沉管相对于岸的平移速度尽量快, 因此, 沉管浮运控制的目标函数为

$$\min g_1 = \sum_{i=1}^N C_i \quad (30)$$

$$\max g_2 = \prod_{i=1}^N (F_i^{\max} - F_i) \quad (31)$$

$$\max g_3 = V_1 \quad (32)$$

$$C_i = \begin{cases} 0 & F_i = 0 \\ 1 & F_i > 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中: g_1 为同时进行顶推或拖曳作业的拖轮数量; g_2 为各拖轮拖力裕量值的乘积; g_3 为沉管相对于岸的平移速度; C_i 为 0-1 变量。

2.4 约束

为保证对不确定情况的处理能力, 增加拖力裕量约束, 保证拖轮有一定的拖力裕量

$$F_i^{\max} - F_i \geq G_i \quad (34)$$

式中: G_i 为拖轮 i 的最小拖力裕量, $G_i > 0$ 。

式(34)可以与式(6)合并为

$$F_i \in [0, F_i^{\max} - G_i] \quad (35)$$

各拖力大小、角度范围约束式(35)、(7), 拖力和约束式(14)、(15), 拖轮合力矩约束式(29), 都作为沉管浮运控制的约束。

本文设计的沉管平移控制优化模型, 能同时适用于各种水流速度、沉管速度下的直航或横移工况, 具有适用性强的优点。

3 基于 PSO 的沉管浮运控制优化

沉管浮运控制优化较为复杂, 考虑到 PSO 算法^[21-22]在非线性复杂优化问题的求解上具有较强的能力, 且简单实用^[23], 本文基于 PSO 算法提出一种沉管平移控制优化方法。

3.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法首先初始化一群随机粒子, 通过迭代找到最优解, 迭代式^[24]为

$$W_{jd,t+1} = \omega W_{jd,t} + c_1 r(X_{jd} - X_{jd,t}) + c_2 r(Y_d - X_{jd,t}) \quad (36)$$

$$X_{jd,t+1} = X_{jd,t} + W_{jd,t+1} \quad (37)$$

式中: $W_{jd,t}$ 为第 j 个粒子第 d 维第 t 次迭代的速度, 该速度被一个最大速度所限制; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为认知和社会参数; r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; X_{jd} 为第 j 个粒子第 d 维在其搜索过程中到达过的最优位置; Y_d 为整个粒子群第 d 维目前找到的最优位置; $X_{jd,t}$ 为第 j 个粒子第 d 维第 t 次迭代的位置。

3.2 基于加权对数理想点法的适应度函数

由式(30)~(32)可知, 沉管浮运控制模型 3 个子目标的范围具有明显差异, 为了对 3 个子目标同等对待, 首先进行归一化处理, 取

$$h_1 = \frac{g_1^{\max} - g_1}{g_1^{\max} - g_1^{\min}} \quad (38)$$

$$h_2 = \frac{g_2 - g_2^{\min}}{g_2^{\max} - g_2^{\min}} \quad (39)$$

$$h_3 = \frac{g_3 - g_3^{\min}}{g_3^{\max} - g_3^{\min}} \quad (40)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 分别为 g_1 、 g_2 、 g_3 的归一化值; g_1^{\max} 、 g_2^{\max} 、 g_3^{\max} 分别为 g_1 、 g_2 、 g_3 的最大值; g_1^{\min} 、 g_2^{\min} 、 g_3^{\min} 分别为 g_1 、 g_2 、 g_3 的最小值。

h_1 、 h_2 、 h_3 都在 $[0, 1]$ 内, 且都是求最大值。为兼顾各子目标, 可采用理想点法将 h_1 、 h_2 、 h_3 整合在一起

$$B = \min \left[\sum_{m=1}^3 (1 - h_m)^p \right]^{1/p} \quad (41)$$

式中: B 为整体函数; p 为整合参数。

为了便于调节对各子目标 h_1, h_2, h_3 的重视程度, 分别增加加权系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0, \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 3$ 。同时, 为避免优化结果中的个别子目标过弱, 用 $1/h_m$ 的自然对数取代 $1/h_m$, 将 PSO 的适应度函数取为

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^3 \lambda_m [\ln(1) - \ln(h_m)]^p \right\}^{1/p} = \left\{ \sum_{m=1}^3 \lambda_m [-\ln(h_m)]^p \right\}^{1/p} \quad (42)$$

这样, 若一个控制方案中第 m 个子目标 h_m 很小, 则 $-\ln(h_m)$ 是一个很大的正数, 该方案在 PSO 算法迭代过程中会较容易被淘汰。

在一些情况下, 可能要求 N 艘拖轮同时工作, 由式(30)、(38)可得, $h_1 = 0$, 而自然对数函数要求真数不能为 0, 为此, 用略大于 g_1^{\max} 的参数 g_0^{\max} 取代 g_1^{\max} 来避免这一问题, 可将式(38)调整为

$$h_0 = \frac{g_0^{\max} - g_1}{g_0^{\max} - g_1^{\min}} \quad (43)$$

式中: h_0 为 h_1 的转换参数。

本文将采用上述方法的粒子群优化算法称为基于加权对数理想点法的 PSO 算法。

3.3 决策变量设置与约束处理

沉管浮运控制问题的决策变量原本有 $2N$ 个: $F_1 \sim F_N, \alpha_1 \sim \alpha_N$, 该问题的特点为: 由速度、角速度求解阻力、阻力矩比较方便, 由阻力、阻力矩求解速度、角速度比较困难, 另外, 可以根据其他决策变量, 通过式(14)、(15)、(29)求出 F_{N-2}, F_{N-1}, F_N , 因此, 本文 PSO 算法中的决策变量取为 $V_1, F_1 \sim F_{N-3}, \alpha_1 \sim \alpha_N$, 然后求出 F_{N-2}, F_{N-1}, F_N 。具体求解方法如下。

由式(14)、(15)、(29), 有

$$F_{N-2} \sin(\alpha_{N-2}) + F_{N-1} \sin(\alpha_{N-1}) + F_N \sin(\alpha_N) = f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) \quad (44)$$

$$F_{N-2} \cos(\alpha_{N-2}) + F_{N-1} \cos(\alpha_{N-1}) + F_N \cos(\alpha_N) = f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) \quad (45)$$

$$F_{N-2} M_{N-2} + F_{N-1} M_{N-1} + F_N M_N = - \sum_{i=1}^{N-3} T_i \quad (46)$$

式(44)~(46)可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha_{N-2}) & \sin(\alpha_{N-1}) & \sin(\alpha_N) \\ \cos(\alpha_{N-2}) & \cos(\alpha_{N-1}) & \cos(\alpha_N) \\ M_{N-2} & M_{N-1} & M_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{N-2} \\ F_{N-1} \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) \\ f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) \\ - \sum_{i=1}^{N-3} T_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) \\ f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) \\ - \sum_{i=1}^{N-3} T_i \end{bmatrix} \quad (47)$$

根据克拉默法则, 有

$$(F_{N-2}, F_{N-1}, F_N) = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_0}, \frac{\Delta_2}{\Delta_0}, \frac{\Delta_3}{\Delta_0} \right) \quad (48)$$

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} \sin(\alpha_{N-2}) & \sin(\alpha_{N-1}) & \sin(\alpha_N) \\ \cos(\alpha_{N-2}) & \cos(\alpha_{N-1}) & \cos(\alpha_N) \\ M_{N-2} & M_{N-1} & M_N \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) & \sin(\alpha_{N-1}) & \sin(\alpha_N) \\ f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) & \cos(\alpha_{N-1}) & \cos(\alpha_N) \\ - \sum_{i=1}^{N-3} T_i & M_{N-1} & M_N \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \sin(\alpha_{N-2}) & f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) & \sin(\alpha_N) \\ \cos(\alpha_{N-2}) & f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) & \cos(\alpha_N) \\ M_{N-2} & - \sum_{i=1}^{N-3} T_i & M_N \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \sin(\alpha_{N-2}) & \sin(\alpha_{N-1}) & f_y - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \sin(\alpha_i) \\ \cos(\alpha_{N-2}) & \cos(\alpha_{N-1}) & f_x - \sum_{i=1}^{N-3} F_i \cos(\alpha_i) \\ M_{N-2} & M_{N-1} & - \sum_{i=1}^{N-3} T_i \end{vmatrix}$$

若 $\Delta_0 = 0$, 则将其取为一个很小的正实数, 以避免式(48)无解; 若 $F_1 \sim F_{N-3}, \alpha_1 \sim \alpha_N$ 超过式(6)、(7)的范围, 则将其限制在边界值以内, 以增加可行解; 若 F_{N-2}, F_{N-1}, F_N 超出式(6)的范围, 则采用惩罚函数法进行处理。

3.4 算法流程

由式(30)可知, 式(38)中的 $g_1^{\min} = 0, g_1^{\max} = 1$; 由式(31)可知, 式(39)中的 $g_2^{\min} = 0, g_2^{\max} = \prod_{i=1}^N F_i^{\max}$; 另外, 式(40)中的 $g_3^{\min} = 0$, 但 g_3^{\max} 无法直接获知。为此, 本文首先通过 PSO 算法求解 g_3^{\max} , 求解方法与求解式(42)基本相同, 只是适应度函数取为

式(32),同时不考虑约束式(34),然后以式(42)为适应度函数进行沉管浮运控制优化。求解步骤如下。

Step 1:设置模型与算法参数,在允许范围内初始化种群的初始位置和速度。

Step 2:计算 F_{N-2} 、 F_{N-1} 、 F_N 。

Step 3:计算每个粒子的适应度函数,适应度函数为式(32)、(42),通过惩罚函数法处理 F_{N-2} 、 F_{N-1} 、 F_N 超范围的问题。

Step 4:对每个粒子,取其历史最优解。

Step 5:在所有粒子的历史最优解中取最优值。

Step 6:检查终止条件,若满足,则结束寻优,输出结果;否则,转至 Step 7。

Step 7:根据式(36)、(37)调整粒子的位置和速度,产生新一代的种群,若 $F_1 \sim F_{N-3}$ 、 $\alpha_1 \sim \alpha_N$ 超过其范围,则将其限制在边界值,转至 Step 3。

4 算 例

为验证本文提出的模型和算法,以港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节浮运控制为例,进行仿真试验。沉管长度、宽度、吃水见表 1。

表 1 沉管参数

Tab. 1 Parameters of immersed tube		m
长度		180.0
宽度		56.4
吃水		11.1

配备 4 艘主拖(拖轮 1~4)和 2 艘辅拖(拖轮 5、6),采用 4+2 倒拖和顶推的拖带方式。拖轮数量 $N=6$,拖轮最大拖力见表 2,各拖力及其作用点见图 3。对照图 2 的坐标轴,各拖轮拖力的作用点坐标见表 3。各拖力角度的范围见表 4。

表 2 拖轮最大拖力

Tab. 2 Maximum towing forces of tugboats		kN
拖轮编号		最大拖力
1		548.8
2		548.8
3		490.0
4		490.0
5		421.4
6		421.4

以榕树头航道为例, $V_0=2$ kn,沉管运动方向为 12° ,沉管运动方向与 x 轴正方向一致, $\theta_1=0^\circ$,涨潮流、落潮流的流向分别为 355° 、 175° 。本文分涨潮流、落潮流 2 种水流流向对沉管平移控制进行优化。

式(5)中的方形系数 $\delta=1$,式(34)中的拖力裕

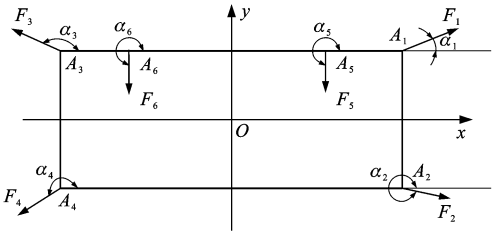


图 3 各拖轮拖力方向

Fig. 3 Towing force directions of tugboats

表 3 各拖力作用点的坐标

Tab. 3 Coordinates of towing force points

拖力作用点	坐标
A_1	$(l/2, b/2)$
A_2	$(l/2, -b/2)$
A_3	$(-l/2, -b/2)$
A_4	$(l/2, -b/2)$
A_5	$(l/4, b/2)$
A_6	$(-l/4, b/2)$

表 4 各拖力角度的范围

Tab. 4 Ranges of towing force angles

拖力角度	角度范围
α_1	$[-\pi/2, \pi]$
α_2	$[-\pi, \pi/2]$
α_3	$[0, 3\pi/2]$
α_4	$[\pi/2, 2\pi]$
α_5	$[0, 2\pi]$
α_6	$[0, 2\pi]$

量取为 98.0 kN。适应度函数式(42)中, $p=2$, $\lambda_1=0.20$, $\lambda_2=0.01$, $\lambda_3=2.79$ 。粒子数为 20,迭代次数为 500, $\omega=0.729$, $c_1=c_2=1.49445$ 。计算机配置为 Pentium Dual 2.00 GHz,2 G 内存,编程工具为 MATLAB 7.1。

为验证本文方法的有效性,同时采用直接加权遗传算法(Directly Weighting Genetic Algorithm, DWGA)、直接加权粒子群优化(Directly Weighting Particle Swarm Optimization, DWPSO)、基于加权对数理想点法的遗传算法(Weighted Logarithmic Ideal Point Genetic Algorithm, WLIPGA)、基于加权对数理想点法的粒子群优化(Weighted Logarithmic Ideal Point Particle Swarm Optimization, WLIPPSO) 4 种方法进行计算。

DWGA、DWPSO 的目标函数 s 取为

$$\max s = -\lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 + \lambda_3 g_3 \quad (49)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的取法与 WLIPPSO 一致。

DWGA、DWPSO 直接以式(49)作为适应度函

数,并不求取 g_3^{\max} 。DWPSO 其他参数设置同 WLIPPSO。DWGA、WLIPGA 采用均匀交叉算子与均匀变异算子,交叉率与变异率分别取为 0.7、0.01。

4.1 涨潮流情况

涨潮流流向为 355° ,此时 $\theta_0 = (12 + 360 - 355)^\circ = 17^\circ$ 。WLIPPSO 求得的拖轮拖力大小及角度、拖力裕量见表 5,水流速度 V_0 、沉管速度 V_1 、各拖力见图 4。

表 5 涨潮流时 WLIPPSO 的计算结果

Tab. 5 Calculation result of WLIPPSO in rising tide

拖轮	拖力/kN	拖力角度/ $^\circ$	拖力裕量/kN
1	0.00	180.00	548.80
2	404.15	-18.96	144.65
3	0.00	0.00	490.00
4	337.12	360.00	152.88
5	0.00	102.72	421.40
6	300.17	0.00	121.23

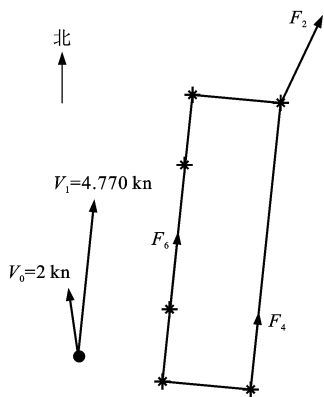


图 4 涨潮流时的速度与拖力

Fig. 4 Velocities and towing forces in rising tide

WLIPGA、WLIPPSO 求得的最快速度与 4 种方法获得的作业拖轮数量、拖力裕量、浮运速度、适应度见表 6。为了便于对比,表 6 中 DWGA、DWPSO 的适应度是按照式(42)计算的; g_3^{\max} 统一取为 6.675 kn, g_1^{\max} 统一取为 7 艘。

表 6 涨潮流时 4 种方法的结果对比

Tab. 6 Results comparison of four methods in rising tide

方法	最快速度/ kn	作业拖轮 数量	拖力裕量 乘积/ kN^6	浮运速度/ kn	适应 度
DWGA		3	2.104×10^{21}	3.741	1.013
DWPSO		4	1.850×10^{20}	4.681	0.815
WLIPGA	5.743	4	2.319×10^{20}	4.968	0.734
WLIPPSO	6.675	3	2.693×10^{20}	4.770	0.720

4.2 落潮流情况

落潮流流向为 175° ,此时 $\theta_0 = (12 + 360 - 175)^\circ = 197^\circ$ 。WLIPPSO 求得的拖轮拖力大小及角度、拖

力裕量见表 7,水流速度 V_0 、沉管速度 V_1 、各拖力见图 5。

表 7 落潮流时 WLIPPSO 的计算结果

Tab. 7 Calculation result of WLIPPSO in falling tide

拖轮	拖力/kN	拖力角度/ $^\circ$	拖力裕量/kN
1	399.35	4.91	149.45
2	396.51	5.01	152.29
3	0.00	270.00	490.00
4	337.12	360.00	152.88
5	272.15	5.74	149.25
6	272.64	7.43	148.76

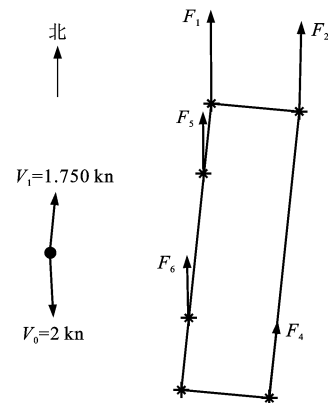


图 5 落潮流时的速度与拖力

Fig. 5 Velocities and towing forces in falling tide

WLIPGA、WLIPPSO 求得的最快速度与 4 种方法获得的作业拖轮数量、拖力裕量、浮运速度、适应度见表 8。为了便于对比,表 8 中 DWGA、DWPSO 的适应度是按照式(42)计算的; g_3^{\max} 统一取为 2.816 kn, g_1^{\max} 统一取为 7 艘。

表 8 落潮流时 4 种方法的结果对比

Tab. 8 Results comparison of four methods in falling tide

方法	最快速度/ kn	作业拖轮 数量	拖力裕量 乘积/ kN^6	浮运速度/ kn	适应 度
DWGA		5	2.595×10^{19}	1.386	3.583
DWPSO		6	2.776×10^{19}	1.934	3.354
WLIPGA	2.434	5	2.683×10^{19}	1.707	3.138
WLIPPSO	2.816	5	3.352×10^{19}	1.750	3.042

4.3 仿真结果分析

表 5、7 中的拖力大小及角度分别与图 4、5 一致,符合式(7)、(35)的约束。

在图 4 中,作业拖轮只有拖轮 2、4、6,图 5 中作业拖轮有拖轮 1、2、4、5、6。由表 6、8 可知:涨潮流时 WLIPPSO 获得的拖力裕量比落潮流时高,这是由于涨潮流时近似顺流,作业拖轮数量和拖轮出力可以少些,落潮流时近似逆流,对作业拖轮数量和拖

轮出力的需求大些;涨潮流、落潮流时 WLIPPSO 获得的沉管浮运速度分别为 4.770、1.750 kn,可见顺流时的速度比逆流时的速度要快很多。

在图 4 中, F_4 、 F_6 的方向与 V_1 一致, F_2 的方向偏东一些,以克服水流向西的分力。在图 5 中, F_4 的方向与 V_1 一致, F_1 、 F_2 、 F_5 、 F_6 的方向相对于 V_1 都略偏西一些,以克服水流向东的分力。

在表 6 中,WLIPPSO 结果的适应度较其他 3 种方法更优;WLIPGA 结果的浮运速度虽然略优于 WLIPPSO,但作业拖轮数量较多,拖力裕量较少;DWPSO 的浮运速度与 WLIPPSO 相当,但作业拖轮数量、拖力裕量较小;DWGA 作业拖轮数量与 WLIPPSO 同样是 3 艘,虽然拖力裕量较高,但浮运速度明显较低。在表 8 中,从适应度看,WLIPPSO 最优;WLIPGA 的作业拖轮数量与 WLIPPSO 相同,但拖力裕量较少,浮运速度较低;DWPSO 的浮运速度虽然比 WLIPPSO 快,但作业拖轮数量较多,拖力裕量较低;DWGA 的作业拖轮数量与 WLIPPSO 相同,但拖力裕量、浮运速度明显较低。

综上所述,本文构建的模型是可行的,本文提出的 WLIPPSO 算法优于其他几种方法。

5 结 语

本文建立了水流作用下适用于沉管平移的拖轮拖带控制优化模型,设计了一种基于加权对数理想点法的粒子群优化算法,港珠澳大桥岛隧工程榕树头航道沉管浮运案例仿真结果表明,该方法的适应度较好,作业拖轮数量较少,拖力裕量较高,浮运速度较高。本文提出的模型和方法具有较强的适用性,无论是直航或横移、顺流或逆流,均可直接采用。本文的研究对各类沉管、沉井、无动力船舶的拖带或浮运,均有一定的参考价值。

参考文献:

References:

- [1] 傅琼阁. 沉管隧道的发展与展望[J]. 中国港湾建设, 2004(5): 53-58.
FU Qiong-ge. Development and prospect of immersed tunnels[J]. China Harbour Engineering, 2004(5): 53-58. (in Chinese)
- [2] LI Wei, FANG Ying-guang, MO Hai-hong, et al. Model test of immersed tube tunnel foundation treated by sand-flow method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 102-108.
- [3] XIAO Long-fei, YANG Jian-min, LI Run-pei. Experimental study on mooring, towing and installing of immersed tunnel caissons[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science,

2010, 15(1): 103-107.

- [4] CHEN Ke-qiang, PENG Sheng, WU Wei-guo, et al. Model test of immersed tunnel element in towing tank in winds, waves and currents[C]//ISOPE. Proceedings of the Twenty-Second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Mountain View: ISOPE, 2012: 831-836.
- [5] CHERNEVA Z, SOARES C G. Evolution of wave properties during propagation in a ship towing tank and an offshore basin[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17/18): 2254-2261.
- [6] FITRIADHY A, YASUKAWA H, KOH K K. Course stability of a ship towing system in wind[J]. Ocean Engineering, 2013, 64: 135-145.
- [7] FITRIADHY A, YASUKAWA H, MAIMUN A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning[J]. Ocean Engineering, 2015, 99: 95-106.
- [8] 鲍文明. 港作拖轮在大型船舶港内操纵中的使用[J]. 中国航海, 2006(3): 23-26.
BAO Wen-ming. Application of harbor operational tugs in maneuvering large vessels in port[J]. Navigation of China, 2006(3): 23-26. (in Chinese)
- [9] NAM T K, JUNG C H, JEONG J S. A study on the calculation of resistance of the ship to be towed and towline tension[J]. Journal of Navigation and Port Research, 2012, 36(8): 607-612.
- [10] NAM T K. A study on the relation between towing force of tow vessel and towing point and behavior of towed ship[J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2013, 19(6): 637-642.
- [11] NAM B W, HONG S Y, KIM J H, et al. Experimental and numerical study on towing stability of transportation barge[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2014, 28(2): 102-110.
- [12] 詹海东, 陆 珏, 刘荣康, 等. 超大型无动力船舶黄浦江内拖航的论证及实操[J]. 中国航海, 2008, 31(4): 424-427, 438.
ZHAN Hai-dong, LU Ping, LIU Rong-kang, et al. Assessment and actual operation of towing dead ultra large LNG carrier in Huangpu River[J]. Navigation of China, 2008, 31(4): 424-427, 438. (in Chinese)
- [13] 熊振南, 翁跃宗, 张寿桂. 超大型船舶靠泊操纵中拖轮助操的应用[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2009, 14(3): 260-264.
XIONG Zhen-nan, WENG Yue-zong, ZHANG Shou-gui. Application of tug-assisting in super-sized ship's berthing and unberthing[J]. Journal of Jimei University: Natural Science, 2009, 14(3): 260-264. (in Chinese)
- [14] COUCE L C, COUCE J C C, FORMOSO J Á F. Operation and handling in escort tugboat manoeuvres with the aid of automatic towing winch systems[J]. The Journal of Navigation, 2015, 68(1): 71-88.
- [15] NAM B W, PARK J Y, HONG S Y, et al. Numerical simulation of towing stability of barges in calm water[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2013, 27(1):

- 67-73.
- [16] SINIBALDI M, BULIAN G. Towing simulation in wind through a nonlinear 4-DOF model: bifurcation analysis and occurrence of fishtailing[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 366-392.
- [17] 朱 升, 毛 军, 郗艳红, 等. 沉管隧道浮运水动力学性能的数值分析[J]. *北京交通大学学报*, 2010, 34(1): 25-29, 34. ZHU Sheng, MAO Jun, XI Yan-hong, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of the immersed tube tunnel in tugging[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(1): 25-29, 34. (in Chinese)
- [18] 吕卫清, 吴卫国, 苏林王, 等. 港珠澳大桥沉管隧道长大管节水动力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(3): 138-144. LU Wei-qing, WU Wei-guo, SU Lin-wang, et al. Hydrodynamic experimental study on immersed tube tunnel element of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(3): 138-144. (in Chinese)
- [19] 胡晓明. 南京长江沉管隧道管节顶推浮运系统操纵性模型试验研究[J]. *武汉交通科技大学学报*, 2000, 24(4): 397-401. HU Xiao-ming. An experimental study of the maneuverability of a segment of submerged tunnel pushed by supernatant means[J]. *Journal of Wuhan Transportation University*, 2000, 24(4): 397-401. (in Chinese)
- [20] 沈浦根. 谈拖航阻力的估算[J]. *航海技术*, 2011(5): 9-12. SHEN Pu-gen. Discussion on the estimation of towing resistance[J]. *Marine Technology*, 2011(5): 9-12. (in Chinese)
- [21] KENNEDY J, EBERHART R. Particles swarm optimization[C]//IEEE. *IEEE International Conference on Neural Network*. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [22] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particles swarm theory[C]//IEEE. *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. New York: IEEE, 1995: 39-43.
- [23] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 129-134. XIE Xiao-feng, ZHANG Wen-jun, YANG Zhi-lian. Overview of particle swarm optimization[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 129-134. (in Chinese)
- [24] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]//IEEE. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 1998: 69-73.

(上接第 26 页)

- [19] 季日臣, 夏修身, 陈尧隆. 承台大体积混凝土温度场计算与温控防裂措施[J]. *混凝土*, 2006(9): 92-94. JI Ri-chen, XIA Xiu-shen, CHEN Yao-long. Temperature field calculation and preventing crack measure in massive concrete about pillar abutment[J]. *Concrete*, 2006(9): 92-94. (in Chinese)
- [20] 袁广林, 黄方意, 沈 华, 等. 大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J]. *混凝土*, 2005(2): 86-88. YUAN Guang-lin, HUANG Fang-yi, SHEN Hua, et al. Research on temperature field and thermal stress of hydration heat in massive concrete of construction period[J]. *Concrete*, 2005(2): 86-88. (in Chinese)
- [21] 胡昌斌, 孙增华, 王丽娟. 水泥混凝土路面早龄期温度场性状与控制方法[J]. *交通运输工程学报*, 2013, 13(5): 1-9. HU Chang-bin, SUN Zeng-hua, WANG Li-juan. Characteristic and control method of early-age temperature field for cement concrete pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(5): 1-9. (in Chinese)
- [22] 闫海华, 李 东, 周红兵, 等. 大型基础承台水化热分析与裂缝控制[J]. *工业建筑*, 2005, 35(增): 862-866, 871. YAN Hai-hua, LI Dong, ZHOU Hong-bing, et al. Hydration heat analysis and crack control of large baseplate[J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(S): 862-866, 871. (in Chinese)
- [23] HONORIO T, BARY B, BENBOUDJEMA F. Evaluation of the contribution of boundary and initial conditions in the chemo-thermal analysis of a massive concrete structure[J]. *Engineering Structures*, 2014, 80: 173-188.