网络首发地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20200411.2101.003.html **期刊网址:** www.ship-research.com

引用格式: 尚留宾, 王威, 刘志华. 动力定位船舶全回转推进器工作区优化 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 104–110.
SHANG L B, WANG W, LIU Z H. Workspace optimization of azimuth thrusters applied by dynamic positioning [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2): 104–110.

动力定位船舶全回转推进器工作区优化

扫码阅读全文

尚留宾*, 王威, 刘志华
海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

摘　要: [**目的**] 为使动力定位全回转推进器及时响应外界环境力, 避免推进器产生大范围旋转, 实现动力定位控制的高精度, 开展全回转推进器最佳工作区间研究。[**方法**] 以安装有两个全回转推进器和一个侧向推进器的动力定位自航模型为研究对象, 首先, 分析当前推力分配奇异性优化指标存在的问题, 在此基础上考虑推进器的推力限制, 并采用遍历推进器推力及方位角的方法, 建立轴向最大能力矩阵; 然后, 根据外界环境力大小及变化, 计算得到各轴向的最低性能要求, 结合禁止角, 确定推进器在不同外界环境下的最佳工作区间, 获得新的推力分配逻辑框架; 最后, 基于传统奇异性指标与最佳工作区间的动力定位船模, 分别开展定点定位试验。[**结果**] 结果表明, 所提方法能够克服奇异性指标存在的不足, 实现推进器方位角在 50°范围内变化, 定点定位达到 0.1 m 半径位置和 0.5°艏向的控制精度。[**结论**] 所述方法可替代奇异性指标, 满足船模动力定位试验要求, 具备一定的工程实用价值。

关键词: 动力定位; 全回转推进器; 推力分配; 最佳工作区间; 奇异性
中图分类号: U664.82　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01819

Workspace optimization of azimuth thrusters applied by dynamic positioning

*SHANG Liubin**, *WANG Wei*, *LIU Zhihua*
College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: [**Objectives**] In order to make the dynamic positioning of azimuth thrusters respond to external environmental forces in time, avoid the large-scale rotation of the thrusters and achieve high precision dynamic fixed-point positioning control, research on the optimal workspace of azimuth thrusters is carried out. [**Methods**] Taking the dynamic positioning self-driven model with two azimuth thrusters and a lateral thruster as the research object, the problem of the current thrust allocation singularity optimization index is analyzed, and the thrust limits of the thrusters are further considered. The method of traversing the thrust and azimuth of the thruster to establish the axial maximum capability matrix is applied. According to the external environmental force mean and variance, the minimum axial capability requirements are calculated, the optimal workspaces of the thrusters in different external environments are determined by combining the prohibition angle, and a new thrust allocation logic framework is proposed. The fixed-point positioning experiment of a dynamic positioning ship model based on the traditional singularity index and optimal workspace is carried out. [**Results**] The experimental results show that the proposed method can overcome the shortcomings of the previous singularity index and achieve control accuracy of 0.1 m radius position and 0.5 degree direction control accuracy under the propeller azimuth within the range of fifty degrees. [**Conclusions**] This method can replace the singularity index; it also satisfies the requirements of the ship model dynamic positioning experiment and has certain practical engineering value.

Key words: dynamic positioning; azimuth thruster; thrust distribution; optimal workspace; singularity

收稿日期: 2019–11–06　　**修回日期:** 2019–12–23　　**网络首发时间:** 2020–04–13 14:23

作者简介: 尚留宾, 男, 1992 年生, 博士生。研究方向: 船舶动力定位系统。E-mail: shangliubin@126.com
王威, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 复杂系统。E-mail: wv600@126.com
刘志华, 男, 1981 年生, 博士, 副教授。研究方向: 舰船水动力性能。E-mail: liuzhihua99111@aliyun.com
***通信作者:** 尚留宾

0　引　言

动力定位船舶推进器是过驱动控制系统，其控制自由度大于运动自由度，故需针对目标力和力矩分配推力。在动力定位控制流程中，推力分配模块主要以上层控制器发出的横向力、纵向力和转艏力矩为目标，在考虑推进器推力限制、方位禁止角等约束的条件下，优化推进器的总功率、方位角磨损、奇异性等目标，最终得到各个推进器应执行的推力和方位角。本质上，推力分配是有约束的多目标优化问题，而奇异性指标和禁止角约束条件则共同决定推进器系统方位角的工作区间。区间不同，其克服和响应外界环境力的能力也不尽相同，从而会进一步影响动力定位控制精度。禁止角约束属固定方位角约束，处理较为简单直接，但推力分配奇异性问题则较为复杂，故得到了众多学者的关注。

奇异性指标是推力分配的重要优化目标之一。该指标的主要作用是优化推进器方位角，避免推进器系统在某些方位角组合区间内无法产生特定方向的力，导致船舶在某个控制维度内丧失控制能力，从而严重影响动力定位控制的精度。虽然全回转推进器可 360°旋转，但其方位角回转速度较慢，一旦推进器系统进入奇异状态，船舶就需要较长的时间才能恢复控制能力，从而造成控制精度急剧下降。因此，如何解决推力分配奇异性问题，确定推进器最佳工作区间，对于提高动力定位控制精度有着重要影响。

奇异性作为控制能力指标，最早来自机器人机械臂的应用研究。Yoshikawa[1] 首先提出了以“可操作度椭球”的体积作为机械臂的可操作度指标；Klein 等[2] 随后列举了最小奇异值、条件数等多个指标，用来衡量和优化机械臂的灵活性；姚建初等[3-4] 提出基于任务的方向可操作度，进一步拓展了灵活性指标。奇异性在机器人控制领域的研究应用可以作为动力定位推进器奇异性研究的参考。在假设全回转推进器能够反转的前提下，Sørdalen[5] 利用奇异值分解详细分析了奇异性产生的机理，结果表明，奇异值本质上是推力向量到广义力向量（横向力、纵向力、转艏力矩）的增益；Johansen 等[6] 利用序列二次规划算法，提出将推进器配置矩阵的行列式值作为奇异性指标，引导全回转推进器在最佳工作区间运行。此后，有许多学者均采用上述方法来避免奇异性[7-9]。但此算法较复杂，难以保证实时性。Xu 等[10] 针对半潜平台，采用更简单的全回转推进器方位角方差作为奇异性指标，并通过时域仿真，取得了与文献 [6] 相同的效果；朱梦飞和徐海祥[11] 针对动力定位船舶所处海况环境载荷较小的情况，设置了推进器的固定角度工作模式，利用增广拉格朗日乘子法求解了推力分配问题，仿真结果表明，该方法可进一步降低磨损及功耗；陈亚豪等[12] 采用组合偏置思路，设计了一种能量最优组合的偏置推力分配算法，但并未考虑固定禁止角约束。虽然固定角度工作模式和组合偏置推力分配算法可部分解决外界环境下推进器方位角的设置问题，但在实际动力定位中，通常需要面对多样的外界环境，若不同方位角区间受到推力的限制时，系统各方向的性能也不尽相同。可见，这都是确定推进器最佳工作区间需要解决的实际问题。

为克服传统动力定位推力分配中奇异性研究难以考虑推进器推力限制、外界不同环境力等不足，本文将以动力定位船舶自航模型为研究对象，采用遍历推进器推力、方位角的方法，考虑推力限制和禁止角约束，建立轴向最大能力数据库。然后根据外界环境确定全回转推进器的最佳工作区间，使推进器系统既能保证一定的控制能力且保持定位精度，又能进一步减小推进器磨损。最后，通过模型试验检验所提方法的有效性。

1　传统奇异性指标分析

图 1 所示为某动力定位船舶的推进器布置。该船配备有 2 个全回转推进器 (1#和 2#) 和 1 个侧向推进器（3#），1#, 2#, 3#推进器的坐标分别为 $(-l_x,-l_y)$, $(-l_x,l_y)$, $(l_s,0)$。图中，l_x, l_y, l_s均为正值，α_1 和 α_2 分别为 1#, 2#全回转推进器的方位角。假设上层控制器要求推进器系统产生目标广义力为 $\boldsymbol{\tau}_{\text{control}}$，则有

$$\boldsymbol{B} * \boldsymbol{F} = \boldsymbol{\tau}_{\text{control}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{B}$为推进器配置矩阵；$\boldsymbol{F}$为推进器推力向量。

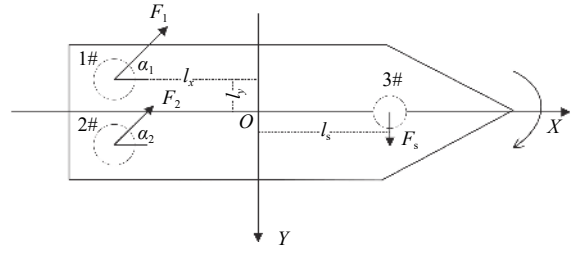


图 1　随船运动坐标系

Fig. 1　Ship motion coordinate system

对推进器配置矩阵进行奇异值分解，则有

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{USV}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{U}$和$\boldsymbol{V}$为单位正交矩阵；$\boldsymbol{S}$为奇异值矩阵。

进一步变换式 (2)，则有

$$\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}=\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{control}} \tag{3}$$

使用推力向量$\boldsymbol{F}'=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}$代替$\boldsymbol{F}$，向量$\boldsymbol{\tau}'_{\mathrm{control}}=\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{control}}$代替$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{control}}$，则式 (3) 可写为

$$\boldsymbol{S}\boldsymbol{F}'=\boldsymbol{\tau}'_{\mathrm{control}} \tag{4}$$

因$\boldsymbol{U}$，$\boldsymbol{V}$均为单位正交矩阵，仅起到旋转的作用，故可将$\boldsymbol{S}$视为由推力向量$\boldsymbol{F}'$到$\boldsymbol{\tau}'_{\mathrm{control}}$的“增益”。若奇异值趋近于 0，且对应维度上存在控制力或力矩，则需要近乎无限大的推力才能满足$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{control}}$。换言之，当全回转推进器方位角处于奇异位置时，推进器系统不能产生任意方向上的力。

有鉴于此，学者们大多将$1/((\varepsilon+\det(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}))$作为奇异性指标，其中$\varepsilon$为大于 0 的固定值，其作用是避免分母直接为 0，亦即$\det(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}})$越小时，奇异性指标值越大，推进器系统也就越接近奇异位置。推力分配算法的目标是尽量增大$\det(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}})$，以确保动力定位船舶在各方向上的控制能力。但是，该指标仅考虑了推进器角度对船舶控制能力的影响，未考虑推进器推力限制及外界环境力。具体分析如下：

1）推力限制对奇异性的影响。以图 1 所示船舶推进器配置为例：若$(\alpha_1,\alpha_2)=(0,\pi/2)$，此位形下的奇异性指标表明，该方位角位置的船舶在各运动维度上的控制能力均较好。但因全回转推进器一般不能反转，此时不能产生负向推进力，而若全回转推进器旋转速度较慢时，此位形下的推进器系统并不能产生任意方向的力。

2）外界环境力对奇异性的影响。奇异性指标表达式为$\det(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}})=\sigma_1^2\sigma_2^2\cdots\sigma_m^2$，其中$\sigma$为奇异值，该指标实质上追求的是各运动维度上的优化特性，因该奇异性指标是对各方向提出的优化要求，即不必要地对非任务运动方向提出了与运动方向相同的要求，从而浪费了部分优化能力。例如，它导致外界环境力存在较大的正向纵向力，而此时并不需要船舶产生纵轴负向力，仅需降低正向纵向力，船舶就可朝着纵轴的负向运动。此时，两个全回转桨均可朝向纵轴正向，从而也就减少了不必要的功率损耗。

2 最佳工作区间确定方法

2.1 轴向最大能力计算方法

针对全回转推进器推力限制的情况，本文提出了一种通过离线方式计算动力定位船舶轴向最大能力的方法，即计算在不同推进器方位角组合下，推力在推进器推力限制内变化时，推进器系统在不同轴向上能够产生的最大推力或力矩。

所谓离线方式，是指一旦确定了任何动力定位船舶推进器的配置方式及能力，即可确定其轴向的最大能力，且可提前在动力定位船舶中装定轴向最大能力，并可不随外界环境的变化而改变。而轴向最大能力则是指，正纵向、负纵向、正横向、负横向、正转艏、负转艏这 6 个方向的最大运动能力。具体算法描述如下：

1）根据动力定位船舶确定推进器角度向量$\boldsymbol{\alpha}$、角度分辨率$\Delta\boldsymbol{\alpha}$、推力向量$\boldsymbol{F}$、推力分辨率$\Delta\boldsymbol{F}$、推力限制向量$\boldsymbol{F}_{\min}$和$\boldsymbol{F}_{\max}$。

2）根据$\Delta\boldsymbol{\alpha}$计算得到不同推进器角度组合，针对任意角度组合，分别执行以下循环操作：

(1) 根据推力分辨率$\Delta\boldsymbol{F}$，从$\boldsymbol{F}_{\min}$到$\boldsymbol{F}_{\max}$遍历推力向量；

(2) 根据式 (1) 计算得出横向力矩阵$\boldsymbol{M}_x$、纵向力矩阵$\boldsymbol{M}_y$和转艏力矩矩阵$\boldsymbol{M}_z$；

(3) 分别计算：正纵向最大能力$\max(\boldsymbol{M}_x)$，负纵向最大能力$\min(\boldsymbol{M}_x)$，正横向最大能力$\max(\boldsymbol{M}_y)$，负横向最大能力$\min(\boldsymbol{M}_y)$，正转艏最大能力$\max(\boldsymbol{M}_z)$，负转艏最大能力$\min(\boldsymbol{M}_z)$。

3）得到关于推进器角度组合的轴向最大能力矩阵$\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{P}}$，$\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{N}}$，$\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{P}}$，$\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{N}}$，$\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{P}}$和$\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{N}}$，其中上标P，N 分别表示正向和负向。

根据上述算法，可计算得到任意推进器角度下推进器系统能够产生的各轴向最大能力。计算时间虽然受推力、角度分辨率、计算机性能等因素的影响，但因无需实时计算最大能力，故无需担心实时性的问题。

2.2 融合外界环境力及变化程度

在某段时间内，外界环境力通常在一定范围内不断变化，其平均值分别由$\bar{F}_x$，$\bar{F}_y$，$\bar{F}_z$表示。此外，在船舶纵向运动方向上，正纵向运动阻力一般小于负纵向运动阻力，即相同推力在前进方向上可产生更大的加速度。鉴于以上两点，即可设置振荡值参数如下：$\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}$，$\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}$，$\Delta\bar{F}_y$，$\Delta\bar{F}_z$。其中，$\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}$表示正纵向力变化的最大值；$\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}$表示负纵向力变化的最大值；$\Delta\bar{F}_y$表示正负横向力变化的最大值；$\Delta\bar{F}_z$表示正负转艏力矩变化的最大值。

上述 4 个振荡值是根据外界环境力变化的情况而设定，结合平均值$\bar{F}_x$，$\bar{F}_y$和$\bar{F}_z$，可计算出当前海洋环境下动力定位船舶需要的各轴向最低能力要求，并分别由F_x^{P}，F_x^{N}，F_y^{P}，F_y^{N}，F_z^{P}和F_z^{N}参数表示。以纵向为例，描述具体计算过程如下：初始化F_x^{P}和F_x^{N}为 0，这表示此时对纵向运动能力无要求；若$\bar{F}_x+\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}\geqslant 0$，则$F_x^{\mathrm{P}}=\bar{F}_x+\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}$；若$\bar{F}_x-\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}\leqslant 0$，则$F_x^{\mathrm{N}}=\bar{F}_x-\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}$。

2.3 确定最佳工作区间

根据 2.1 和 2.2 节的算法描述，首先，可以得

到推进器在不同工作区间内各轴向的最大能力矩阵和最低能力值 $\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{P}}$, $\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{N}}$, $\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{P}}$, $\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{N}}$, $\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{P}}$, $\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{N}}$, 以及各轴向最低能力 F_x^{P}, F_x^{N} 和 F_y^{P}, F_y^{N}, F_z^{P}, F_z^{N}。然后, 通过计算各轴向满足最低能力要求的角度区间, 并取交集, 得到如下角度区间子集。

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{p}} \geqslant F_x^{\mathrm{P}}) \cap \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_x^{\mathrm{N}} \leqslant F_x^{\mathrm{N}}) \cap \\ &\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{p}} \geqslant F_y^{\mathrm{P}}) \cap \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_y^{\mathrm{N}} \leqslant F_y^{\mathrm{N}}) \cap \\ &\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{p}} \geqslant F_z^{\mathrm{P}}) \cap \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{M}_z^{\mathrm{N}} \leqslant F_z^{\mathrm{N}})\end{aligned} \tag{5}$$

将满足上述条件的角度区间子集与固定的禁止角区间取交集, 得到当前外界环境下的最佳工作区间。上述算法完整描述了确定全回转推进器最佳工作区间的计算过程。与传统的利用奇异性指标引导推进器方位角的方法相比, 本文方法考虑了推力限制和外界环境, 可首先确定推进器的最佳工作区间, 然后再进行推力分配优化算法。图 2 给出了新的推力分配框架。

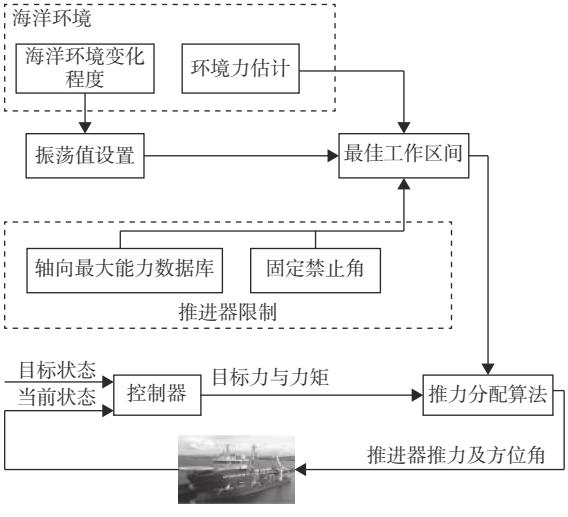


图 2　本文提出的推力分配框架

Fig. 2　Thrust allocation framework proposed by this paper

3　计算最佳工作区间算例

本节以图 2 所示某型动力定位自航模型为例, 描述了计算最佳工作区间的过程。该船艉部全回转推进器的推力限制为 0 ~ 90 N, 艏部侧向推进器的推力限制为−120 ~ 120 N, 角度分辨率 $\Delta\boldsymbol{\alpha} = (1°, 1°)$, 推力分辨率 $\Delta\boldsymbol{F} = (1\ \mathrm{N}, 1\ \mathrm{N}, 1\ \mathrm{N})$。根据 2.1 节, 可计算出关于 α_1, α_2 的轴向最大能力。图 3 给出了计算得到的各轴向最大能力的变化结果。图中, 颜色深度代表轴向最大能力, 深度条表示不同深度对应的轴向能力具体数值。由结果可见, 全回转角度区域不同, 各轴向的最大能力也有较大的不同。

假设此时外界环境处于缓慢变化状态, 船舶顶浪进行定位作业, 环境力 $\bar{F}_x$, $\bar{F}_y$, $\bar{F}_z$ 估计平均值分别为 20, 0 N 和 0 N·m; 振荡值 $\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}$, $\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}$, $\Delta\bar{F}_y$, $\Delta\bar{F}_z$ 分别设定为 10, 15, 20 N 和 30 N·m, 则各轴向的能力最低要求如下:

1) 正纵向最低能力要求为 30 N, 即满足能够产生 30 N 正纵向推力的角度区间;

2) 负纵向最低能力要求为 0 N, 对负向运动能力无要求;

3) 正横向最低能力要求为 20 N, 即满足能够产生 20 N 的正横向推力的角度扇区;

4) 负横向最低能力要求为−20 N, 即满足能够产生−20 N 的负横向推力的角度扇区;

5) 正转艏最低能力要求为 30 N·m, 即满足能够产生 30 N·m 的正转艏力矩的角度扇区;

6) 负转艏最低能力要求为−30 N·m, 即满足能够产生−30 N·m 的负转艏力矩的角度扇区;

7) 禁止角区域设定为 $60° \leqslant \alpha_1 \leqslant 180°$, $-180° \leqslant \alpha_2 \leqslant 60°$。

将满足以上 7 个条件的方位角区间取交集, 可得到最佳推进器工作区间。图 4 给出了满足该条件的一个工作区间示意图, 其中黑色代表禁止角区域, 绿色扇区代表确定的最佳工作区间。图 5(a) 描述了满足该条件的另一个工作区间, 在实际使用中选择其中一种即可。图 4 所示工作区间表示: 在此工作环境下, 一个全回转推进器 2#可以在除禁止角外区间活动, 另一个 1#全回转推进器必须朝向纵轴正向。无论推力分配算法如何优化功率和磨损等条件, 只要推进器角度不在该工作空间内, 就一定不能满足目标力与力矩。此时, 即使按照功率最优, 两个全回转推进器最终均朝向纵轴正向, 动力定位船舶仍具备 3 轴不同方向运动的能力。

若振荡值不变, 只改变 $\bar{F}_x$ 的值(20 N, 5 N, −20 N), 得到的最佳工作区间如图 5(a) 所示。针对不同的外界环境力, 全回转推进器的最佳工作区间并不相同, 避免了推进器在某些角度组合下出现不能产生任务方向力的情况, 随时保持动力定位船舶的控制能力。

4　模型试验

为进一步验证和说明本文提出的全回转推进器最佳工作区间确定方法的有效性和工程实用价值, 分别基于传统奇异性指标和本文方法进行了动力定位自航模定点定位试验。

该船模长约 8 m, 位置参考系统采用 DGPS 定位, 精度可达厘米级。试验外界环境力在零均值附近振荡, 振荡值 $\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{P}}$, $\Delta\bar{F}_x^{\mathrm{N}}$, $\Delta\bar{F}_y$, $\Delta\bar{F}_z$ 分别为 10,

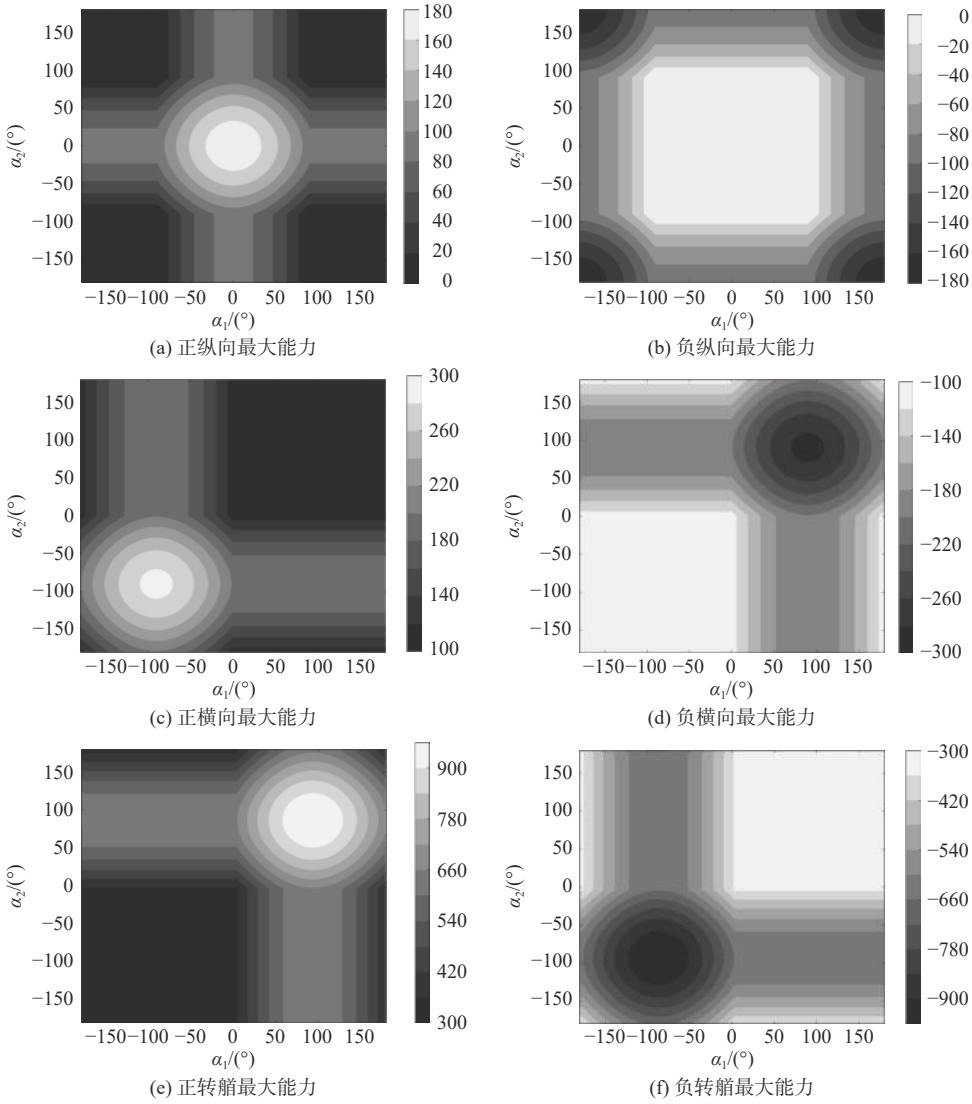


图 3 各轴的轴向最大能力

Fig. 3 Maximum axial capability

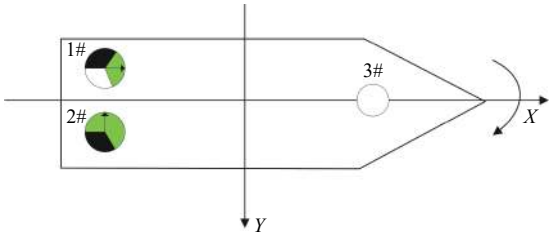


图 4 最佳工作区间示意图

Fig. 4 Optimal workspaces diagram

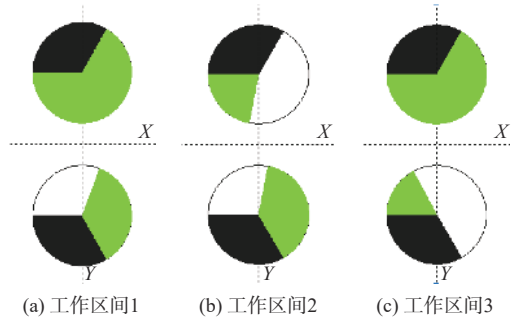


图 5 不同外界纵向力最佳工作区间

Fig. 5 Optimal workspaces of different external longitudinal forces

15, 20 N 和 30 N·m。半径的定点定位精度目标值为 0.1 m, 艏向角定位精度为 1°。这种控制精度和试验环境对船模在不同运动维度上的控制能力提出了极高的要求, 如何使推进器及时响应外界环境变化, 同时减少推进器方位角大幅度的改变以减少磨损是试验中的关键问题。

推力分配算法采用变异粒子群算法, 该算法根据当前时刻推进器状态及推进器性能参数确定推进器可行空间, 并在可行空间内寻优得到最佳推力分配解决方案, 最终通过推进器力到转速映射转换为推进器控制指令。

推进器相关性能参数设定为: 全局最小推力限制 $\boldsymbol{F}_{\min} = (0\ \mathrm{N}, 0\ \mathrm{N}, -120\ \mathrm{N})$, 全局最大推力限制 $\boldsymbol{F}_{\max} = (90\ \mathrm{N}, 90\ \mathrm{N}, 120\ \mathrm{N})$, 单个控制周期内最小推力变化限制 $\Delta\boldsymbol{F}_{\min} = (-15\ \mathrm{N}, -15\ \mathrm{N}, -15\ \mathrm{N})$, 单个控制周期内最大推力变化限制 $\Delta\boldsymbol{F}_{\max} = (15\ \mathrm{N}, 15\ \mathrm{N}, 15\ \mathrm{N})$, 全局最小舵角限制 $\boldsymbol{\alpha}_{\min} = (-180°, -60°)$, 全局最大舵角限制 $\boldsymbol{\alpha}_{\max} = (60°, 180°)$, 单个控制周期内最小

舵角变化限制$\Delta\boldsymbol{\alpha}_{\min}=(-7.5°,-7.5°)$, 单个控制周期内最大舵角变化限制$\Delta\boldsymbol{\alpha}_{\max}=(7.5°,7.5°)$。

1) 以$1/((\varepsilon+\det(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}))$为奇异性指标进行试验。

在该模式下, 推进器的默认工作区间为$\alpha_1\in[-180°,60°]$, $\alpha_2\in[-60°,180°]$, 推进器工作区间优化主要依靠奇异性指标。

在试验中发现, 由于全回转推进器限定了不能反转, 导致船模无法进行定点定位试验。其原因在于: 若目标定位点处于船模前方, 此时要产生正纵向推力。根据推进器系统功率最优和奇异性指标, 设置 2 个全回转推进器均处于纵向朝前状态, 推进器功率最小, 且奇异性指标值也能处于较低水平, 船舶向前运动; 到达目标点后, 推进器需产生纵轴负向推力, 此时推进器在下个时刻的可行区间内无法产生纵向负向力, 推力分配算法只能将全回转推进器转速置为 0 r/min, 无法完成定点定位试验。

2) 在确定的最佳工作区间下进行试验。

运用本文算法, 根据外界环境力及变化幅值估计值, 最终最佳工作区间设定为$\alpha_1\in[-180°,-111°]$, $\alpha_2\in[-60°,75°]$。

采用船模定点定位时长约 300 s 的试验数据进行说明。船模经、纬度转换后的平面坐标如图 6 所示, 位置定位精度和艏向定位精度如图 7 所示。位置精度在 0.05 m 半径范围内, 艏向精度为

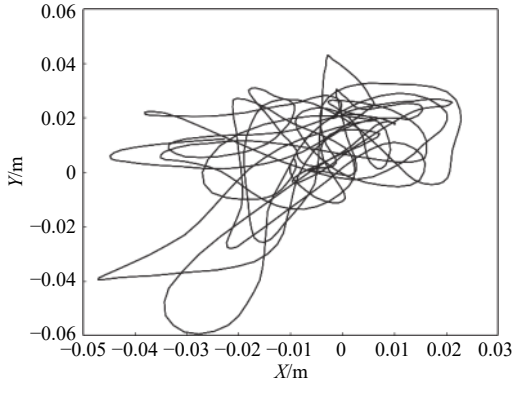
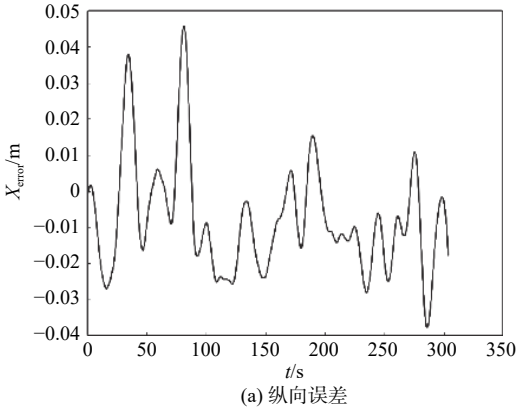
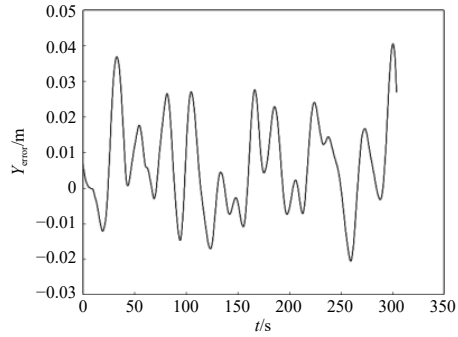


图 6　定点定位试验轨迹

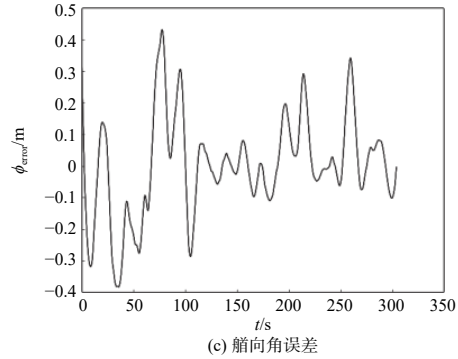
Fig. 6　Experimental track of fixed-point positioning



(a) 纵向误差



(b) 横向误差



(c) 艏向角误差

图 7　误差曲线

Fig. 7　Error curves

正负 0.5°, 完全达到目标要求, 定位控制过程中舵角的变化情况如图 8 所示。

从定点定位试验效果及舵角变化曲线可以看出, 在确定的最佳工作区间下, 推进器能够及时响应外界环境力; 同时, 方位角均处于设定的推进器最佳工作区间范围内, 变化范围约为 50°, 不存在大范围推进器转动, 满足了船模高精度定点定位控制试验要求。

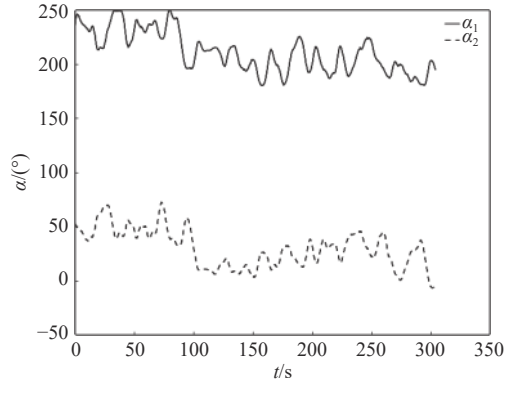


图 8　方位角变化曲线

Fig. 8　Variation of azimuth angles

5　结　语

鉴于动力定位推力分配奇异性的问题会导致船舶在某些维度上失去控制能力, 本文提出了一种基于外界环境力的动力定位推进器最佳工作区间的确定方法。该方法使推进器能够在响应外界环境力的同时, 保证推进器不发生大范围的旋

转。针对该方法，本文以动力定位船舶自航模型为研究对象，围绕最佳工作区间方法的确定，建立了轴向最大能力矩阵，给出了新的推力分配框架，并通过模型试验，实现了高精度的定点定位控制。定点定位的试验效果及方位角变化的结果表明，在最佳工作区间下，推进器系统可以及时响应外界环境力，解决了前述奇异性指标存在的问题，说明该方法具有一定的工程参考价值。

参考文献：

[1] YOSHIKAWA T. Analysis and control of robot manipulators with redundancy[C]//Robotics Research: The First International Symposium. Cambridge, MA: MIT press 1984: 735–747.

[2] KLEIN C A, BLAHO B E. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1987, 6(2): 72–83.

[3] 姚建初, 丁希仑. 冗余度机器人基于任务的方向可操作度研究 [J]. 机器人, 2000, 22(6): 501–505.
YAO J C, DING X L. Research on directional operability of redundant robot based on task[J]. Robotics, 2000, 22(6): 501–505 (in Chinese).

[4] XIE B. Directional manipulability constrained by the condition number[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 8.

[5] SØRDALEN O J. Optimal thrust allocation for marine vessels[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(9): 1223–1231.

[6] JOHANSEN T A, FOSSEN T I, BERGE S P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 211–216.

[7] WU D, LIU X, REN F, et al. An improved thrust allocation method for marine dynamic positioning system[J]. Naval Engineers Journal, 2017, 129(3): 89–98.

[8] VEKSLER A, JOHANSEN T A, BORRELLI F, et al. Dynamic positioning with model predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1340–1353.

[9] FU M, SUN J, WANG D. Research on Thrust allocation of dynamic positNioning ship with cycloidal propeller[C]// Proceedings of 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, China: [s.n], 2018: 620–624.

[10] XU S, WANG X, WANG L, et al. Using a simple method for singularity avoidance in thrust allocation for marine vessels[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(09): 1099–1113.

[11] 朱梦飞, 徐海祥. 基于固定角度模式的推力优化分配 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 45(3): 545–547.
ZHU M F, XU H X. Optimized distribution of thrust based on fixed angle mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 45(3): 545–547 (in Chinese).

[12] 陈亚豪, 徐海祥, 李文娟, 等. 能量最优组合偏置推力分配算法 [J]. 大连海事大学学报, 2019, 43(3): 26–32.
CHEN Y H, XU H X, LI W J, et al. Energy optimal combined bias thrust allocation algorithm[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 43(3): 26–32 (in Chinese).