

④ 22-28

## 动力定位船舶的机动定位技术

李家炜 徐玉如<sup>✓</sup> 庞永杰

(哈尔滨工程大学船舶与海洋工程系, 哈尔滨 150001)

U664.82  
U661.338

**摘要** 为提高动力定位船舶在高海情下的定位能力,研究了机动定位的控制方式,并设计了一种机动定位模糊控制系统。其特点是模仿人类的航海技巧,通过充分利用环境力,实现船舶的定位与机动。仿真结果表明,在高海情下,机动定位方式可以实现较高精度的定位,并且其辅推功率消耗较小。<sup>①</sup>

**关键词** 机动定位; 动力定位; 模糊控制

**分类号** U661.338

船舶

Position Control by Manoeuvring Technique for  
Dynamic Positioning Vessels

Li Jiawei Xu Yuru Pang Yongjie

(Dept. of Naval Arch. and Ocean Eng., Harbin Engineering University, Harbin 150001)

**Abstract** In order to improve the positioning ability of dynamic positioning (DP) vessels, the control method of position control by manoeuvring (PCM) is studied, and a PCM fuzzy control system is proposed. The control system simulates the natural seamanship skill of manoeuvring and uses the forces exerted by the environment on the vessel to maintain position or assist manoeuvre. Simulation results show that the vessel can keep position precisely in PCM mode, and consumes fewer energy in severe weather conditions.

**Key words** position control by manoeuvring; dynamic positioning; fuzzy control

## 0 引言

水面船舶所处的海洋环境是很复杂的,风、波浪、海流等各种环境干扰力经常导致船舶的平移和旋转。对于某些具有特殊任务的船舶来说,相对指定位置与艏向的过大偏移是不允许的,因此就产生了船舶定位控制系统。由船上的推进器或舵等机械动力产生平衡力,抵消环境力的干扰,使船舶保持一定的位置与姿态。具有不同任务的船舶对于动力定位的要求也不一样,从广义上说,以往的定位控制系统大致包括下列几方面的内容:

(1)悬停(也就是定位于地球表面的某一点上);

① 收稿日期:1997-09-23  
责任编辑:刘玉明

- (2) 机动(从某位置向目标位置机动的过程);
- (3) 航迹保持(由一系列航迹点规定的某一机动形状);
- (4) 自动驾驶(保持某一预定航向作航行);
- (5) 能够用操纵杆进行手动控制。

其中悬停和机动能力是动力定位系统的基本要求,动力定位系统主要关心船舶在水平面三个自由度的运动:纵荡、横荡和摇艏,因此通常需要三只(组)推力器,提供三个方向的平衡力与力矩。较常用的辅推布置方案是在艏、艉布置一只侧向推力器,加上艉部的纵向推力器。侧向推力器布置在船艏、艉两端,是为了提供较大的转艏力矩。如果采用全方位推力器,只用两只推力器就可以提供三个自由度的力与力矩,但是船艏的推力器是不可缺少的(严格地说,在船艏布置两只全方位推力器是可以产生三个自由度的力与力矩的,但为了保持力的平衡,仅能提供很小的横向力与力矩)。船艏推力器的性能受环境的影响很大,在较高的海情下,由于波浪和船舶纵摇的影响,艏侧推的水流有效冲击速度降低,其推力能力大幅度下降,甚至可能低到完全丧失的程度。因此,通常的动力定位系统在高海情下,其定位能力显著降低。

随着对于动力定位技术研究的深入,以及某些特殊类型船舶对定位控制精度的更高要求,又提出了一种机动定位的概念。这一概念来自于关于英国海军新型猎雷舰的文献<sup>[1,2]</sup>,其涵义是不用艏侧推,通过仿效人类早已掌握的航海技巧,充分利用海洋环境作用在船上的力来促使船舶机动或保持位置。

机动定位与传统的动力定位控制方式下船舶运动的比较见图1,图2。

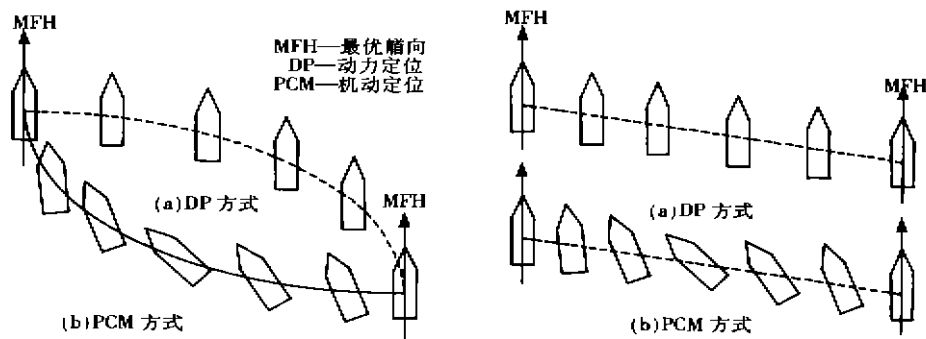


图1 设定点变化时动力定位与机动定位控制方式下船舶的运动情况比较

图2 航迹保持时动力定位与机动定位运动方式的比较

船舶在海上进行动力定位作业时,可能遇到各种恶劣的天气情况,在这样的环境中保持最优艏向是至关重要的。在最优艏向上推力器只需发出较小的推力就可以保持船位,而在其它方向上则需要较大的推力或根本无法定位<sup>[4]</sup>。一般动力定位的控制方式是使船舶艏向尽量保持在最优艏向上,横向移动则完全依靠侧向推力器产生的横向推力,因此,不仅消耗大量辅推功率,而且运动速度慢。机动定位的控制方式中横向移动是通过调整艏向,由外界环境提供横向力来实现的,避免了很大的横向推力需求,使辅推系统可以更有效地控制纵向和转艏运动。从这个意义上说,机动定位要比传统的动力定位优越。图1显示的是船舶从

一点到另一点的机动过程,对于定点定位也是同样道理,当船舶受到扰动偏离定位点时,它回到定位点的过程与图 1 类似.需要指出的是,机动定位适用于船舶在较高的海情下定点定位,在低海情下,由于可利用的环境作用力很小,用机动定位技术实现定位是非常困难的

## 1 机动定位的数学模型

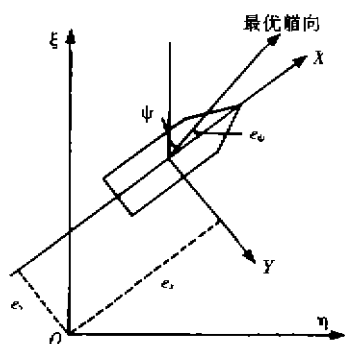


图 3 坐标系

坐标系如图 3 所示,船舶的运动方程可以写作

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr - x_g r^2) = X_S + X_T + X_E \\ m(\dot{v} + ur + x_g r) = Y_S + Y_T + Y_E \\ I_x \dot{r} + m x_g (\dot{v} + ur) = N_S + N_T + N_E \end{cases} \quad (1)$$

式中方程右端( $X, Y, N$ )所表示的作用力依次为:由于船舶运动引起的水动力;推力器的推力;环境干扰力(风、浪、流).为了使船舶实现预期的运动,需要不断调整推力器的推力值,以维持方程组(1)的平衡.如果船舶在某一点上实现定位,则速度与加速度都成为小量,方程(1)简化为

$$\begin{cases} X_T + X_E = 0 \\ Y_T + Y_E = 0 \\ N_T + N_E = 0 \end{cases} \quad (2)$$

机动定位由于不用艏侧推,其横向推力与转艏力矩之间有如下关系

$$N_T = -Y_T \cdot l_{\text{aft}} \quad (3)$$

式中, $l_{\text{aft}}$ 为艏推力器距船重心的纵向距离.

由于存在式(3)的关系,方程组(2)的后两个方程不能同时得到满足,这意味着无法使船进行定位.怎样解决这个问题呢?我们知道船舶运动方程(1)中的艏向角是任意取值的,而方程右端的环境干扰力项与艏向角有关,通过改变艏向角可以改变环境对船舶作用的力与力矩.这样,在某个艏向角 $\psi_c$ 处有可能满足方程组(2)的条件.假设这个 $\psi_c$ 是存在的,将式(3)代入式(2)得到

$$N_E(\psi_c) + Y_E(\psi_c) \cdot l_{\text{aft}} = 0 \quad (4)$$

显然上式是很难成立的,除非 $N_E(\psi_c) = Y_E(\psi_c) = 0$ ,也就是 $\psi = \psi_c$ 时外界环境作用在船上的横向力与力矩都为零.由于船舶前后形状不对称,横向力为零时,力矩通常不会为零,所以式(4)一般是不成立的,也就是说艏向角 $\psi_c$ 未必存在.其实,即使 $\psi_c$ 定位,它的意义也不大,这说明船舶只能在艏向 $\psi_c$ 上定位,而海洋环境非常复杂且不断变化,即使船舶在某一瞬时能够定位在艏向 $\psi_c$ 上,由于扰动船舶将很快偏离这个艏向,并且 $\psi_c$ 也是不断变化的,其结果就是船舶始终处于运动中.

经过以上分析我们知道,机动定位的控制方式无法使船舶静止地定位在一点上.实际上,在高海情的海洋环境中,任何控制方式也无法使船舶静止不动.定位的要求是使船舶的运动限制在定位点周围的一定范围内,规定范围内的运动是允许的,因此机动定位的目标是使船舶在定位点附近保持缓慢运动.

将式(4)修改为

$$N_E(\psi_C) + Y_E(\psi_C) \cdot l_{\text{aft}} \rightarrow 0 \quad (5)$$

当  $\psi_C$  接近于最优艏向时,横向力与转舵力矩都很小,上式是可以成立的,这样,可以得到机动定位在定位点附近的平衡状态方程

$$\begin{cases} X_T + X_E = 0 \\ Y_T + Y_E \rightarrow 0 \\ N_T + N_E \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6)$$

与动力定位的平衡状态方程(2)对应,方程(6)表示机动定位可能达到的稳定状态,但这种稳定不是静止而是动态的稳定,船舶的纵向位置可能保持不变,而横向位置和艏向角是缓慢变化的。

动力定位低频运动的数学模型有多种形式,较典型的有 Balchen 模型和 Norrbinn 模型等。下面是一种较实用的形式<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} = X_{uu} |u - U_{cx}| (u - U_{cx}) + m_x (u - U_{cx}) r + X_{uv} (v - U_{cy})^2 + \\ \quad T_x + F_{\text{wind}x} + F_{\text{wave}x} \\ (m + m_y) \dot{v} = Y_{vv} |v - U_{cy}| (v - U_{cy}) + Y_v |u - U_{cx}| (v - U_{cy}) + \\ \quad T_y + F_{\text{wind}y} + F_{\text{wave}y} \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} = N_{rr} |r| r + N_r |u - U_{cx}| r + N_{rv} |v - U_{cy}| (v - U_{cy}) + \\ \quad N_v |u - U_{cx}| (v - U_{cy}) + T_n + F_{\text{wind}n} + F_{\text{wave}n} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $U_{cx}$ ,  $U_{cy}$  分别为流在  $x$ ,  $y$  方向的速度;  $m$ ,  $I_{zz}$  分别为船的质量和绕  $z$  轴的转动惯量;  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $J_{zz}$  分别是船在  $x$ ,  $y$  方向上的附加质量和绕  $z$  轴的附加转动惯量;  $X_{uu}$ ,  $X_{uv}$ ,  $Y_{vv}$ ,  $Y_v$ ,  $N_{rr}$ ,  $N_r$ ,  $N_{rv}$  和  $N_v$  均为水动力导数;  $F_{\text{wind}x}$ ,  $F_{\text{wind}y}$  和  $F_{\text{wind}n}$  分别为作用在船上的风力和风力矩;  $F_{\text{wave}x}$ ,  $F_{\text{wave}y}$  和  $F_{\text{wave}n}$  分别为波浪作用在船上的力和力矩;  $T_x$ ,  $T_y$  和  $T_n$  为螺旋桨产生的推力和推力矩。

由于存在式(3)的关系,在方程(7)中横向与转舵不可同时控制,所以机动定位必须将艏向  $\psi$  作为一个控制变量,通过转舵改变船舶受力,使船舶实现预期的机动或达到式(6)的平衡状态。式(7)中与艏向有关的项包括:  $U_{cx}$ ,  $U_{cy}$ ,  $F_{\text{wind}x}$ ,  $F_{\text{wind}y}$ ,  $F_{\text{wind}n}$ ,  $F_{\text{wave}x}$ ,  $F_{\text{wave}y}$ ,  $F_{\text{wave}n}$ , 要将后几项与艏向  $\psi$  的准确函数关系写出来是很困难的,尤其是波浪力(矩)部分,因此将式(7)中与艏向  $\psi$  有关的项合并在一起,并代入式(3),得到下面的方程

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} = X_{uu} |u| u + m_x u r + X_{uv} v^2 + T_x + F_x(\psi) \\ (m + m_y) \dot{v} = Y_{vv} |v| v + Y_v |u| v - T_n / l_{\text{aft}} + F_y(\psi) \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} = N_{rr} |r| r + N_r |u| r + N_{rv} |v| v + N_v |u| v + T_n + F_n(\psi) \end{cases} \quad (8)$$

这是一个包含未知因素的数学模型,其中  $F_y(\psi)$  提供船舶横向运动的推动力,是极为重要的一项。

## 2 控制系统

由于机动定位系统的复杂性,很难得到其精确的数学表达式,使常规控制器的设计遇到

很大困难,从机动定位的定义就可看出这是一种仿人的智能控制方式,它需要把人的航海技巧应用到控制器中,因此本文对机动定位控制系统采用模糊控制。

模糊控制可以方便地将人的经验转变成模糊控制规则,使控制器体现人控的特点,它不需要对象的精确数学模型,而只需要关于整个系统定性的描述<sup>[5,6]</sup>,下面对机动定位做定性分析。

机动定位对纵向的控制与传统的动力定位方式一样,由于环境力在纵向的分量不大,对纵向的控制没有困难,关键是对横向与转艏的控制。假设已经知道定位的最优艏向,如果艏向角与最优艏向的偏差为正,则船舶受到的横向力为正(参照图 3);反之,如果艏向角与最优艏向的偏差为负,横向力也为负。随着偏离最优艏向角度的增大,横向力也逐渐增大。当船舶相对于定位点有横向偏差时,需要依靠环境引起的横向力使船舶复位。具体地说:当横向偏差为正时,横向力应为负,艏向角与最优艏向的偏差应为负;当横向偏差为负时,横向力应为正,艏向角与最优艏向的偏差应为正。

通常的动力定位控制系统具有三个独立的控制回路,分别控制船舶的纵向、横向、艏向运动,而机动定位的控制系统只有两个控制回路,横向与转艏由一个控制回路控制。本文设计的机动定位控制系统如图 4。

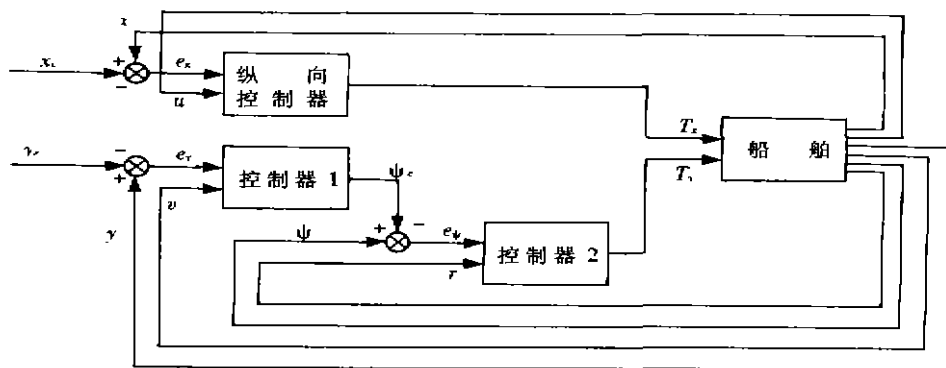


图 4 机动定位控制系统框图

横向与转艏由两个控制器构成串级控制,前一级控制器根据横向偏差与横向速度产生艏向指令,后一级控制器根据艏向偏差与转艏角速度产生力矩指令。三个控制器都是模糊控制器,纵向控制器与控制器 2 含有积分项以消除稳态误差。

### 3 仿 真

本文研究的控制对象是一种新型的动力定位船舶,主尺度见附表,动力定位技术指标要求在五级海情下,定位均方差  $\leq 20\text{m}$ 。本文设计的机动定位控制系统在不用艏侧推,且不增加艏推功率的基础上,实现了上述技术指标,并且可以在更高的海情下定位。下面给出几组仿真结果曲线。图 5 中外界环境设定为 3 节流,浪高 2m 的不规则波,5 级阵风,船的初始位置与艏向如(a)所示。因为初始艏向不在最优艏向上,船舶有一个调整艏向的过程(b),在此过程中船位偏差较大。(c)为定位过程中船舶重心的轨迹,(d),(e)分别是纵向偏差、横向偏差随时间的变化。

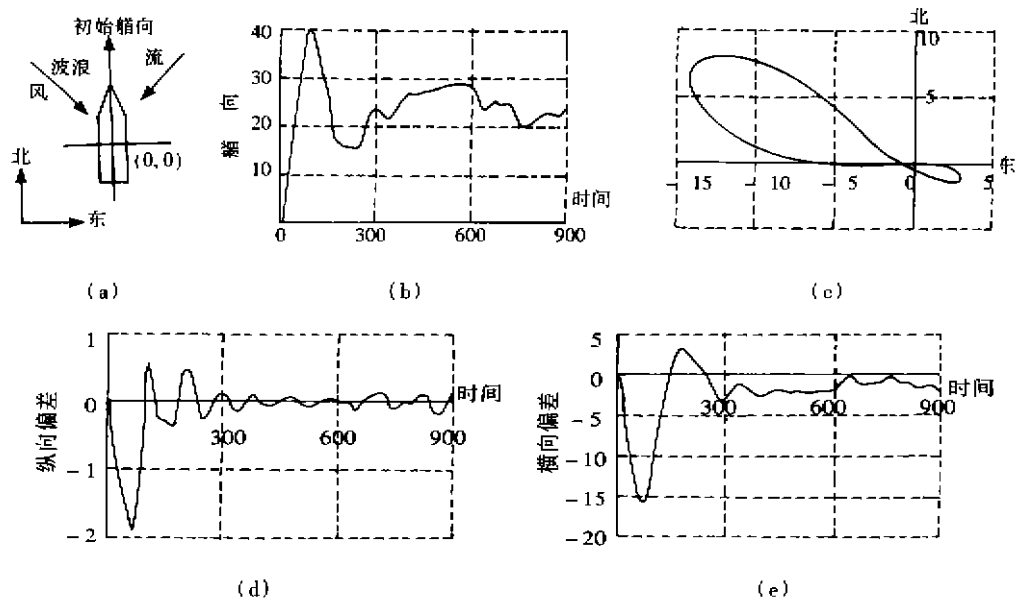


图5 机动定位控制器在定点定位时的性能曲线

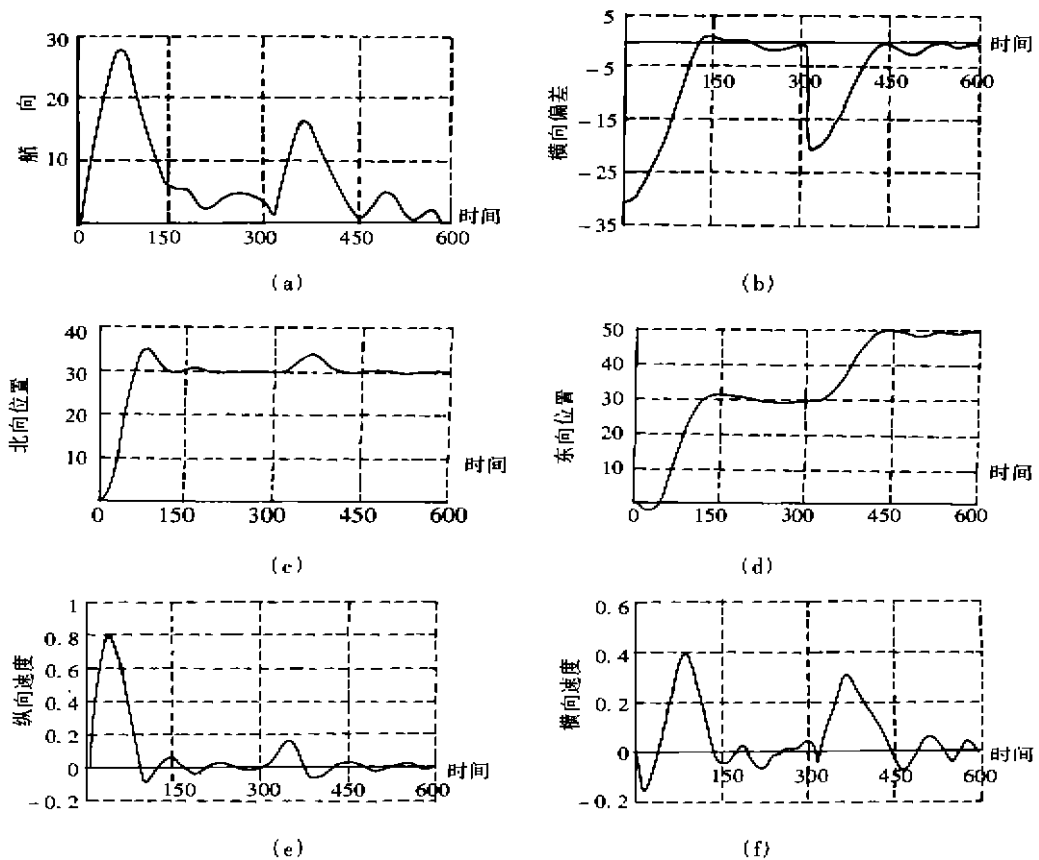


图6 机动定位对设定点变化的响应曲线

在同样的环境条件下,图6显示了本文机动定位控制系统对设定点变化的响应、船舶的初始艏向接近最优艏向,设定点从(0,0)变为(30,30)再变为(30,50)。因为船舶的最优艏向接近于指向正北,所以设定点的第二次变化接近于纯横移。(a)为艏向角随时间的变化,(b)为横向偏差的变化曲线,(c),(d)为船舶在大地坐标系下的位置变化,(e),(f)分别是船舶纵向、横向的运动速度曲线。从图中可以看出本文的机动定位控制器性能稳定,超调小,响应速度较快,船舶在定位点附近保持缓慢运动。

在高海情下,采用机动定位技术可以实现船舶的定位,并且在定位能力、功率消耗等方面都要比传统的动力定位控制方式优越。机动定位的横向控制是通过转艏实现的,从而避免了很大的横向推力,相比之下,传统的动力定位方式在横向移动时推力器完全过载。与传统的动力定位方式相比,机动定位大大降低了功率消耗,这也就相当于增加了功率储备,从而可以抵抗更剧烈的环境变化。机动定位应与传统的动力定位方式结合使用,在低海情下采用一般的动力定位方式,在高海情下采用机动定位方式,这是提高船舶定位能力与精度的一种有效方法。

附表 某船主尺度

总 长	54.0m	设计水线长	48.0m
型 宽	48.0m	设计水线宽	9.0m
型 深	9.0m	方型系数	0.452
吃 水	2.45m	排水量	490t

## 参 考 文 献

- 1 Wiltshire D J. The SRMH platform control and monitoring system. Maritime Defence, 1988, 8: 398 ~ 303
- 2 Morley J F W. Automatic positioning control of MCMV. Maritime Defence, 1989, 4: 106 ~ 108
- 3 庞永杰, 王宗义, 朱德耀. 动力定位中的船舶运动方程. 第七届全国操纵性学术会议论文集. 湖南张家界, 1996: 64 ~ 71
- 4 摩根 M. J. 近海船舶的动力定位. 北京: 国防工业出版社, 1984
- 5 汪济民, 戴冠中. 隶属函数对模糊控制系统性能的影响. 第一届全球华人智能控制大会论文集. 上海, 1994
- 6 Parsons M G, Chubb A C, Cao Yusong. An assessment of fuzzy logic vessel path control. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20(4): 225 ~ 232