

变结构控制理论在船舶动力定位系统中的应用

吴鹤雄, 李东明

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:介绍一种时间最优与变结构理论相结合的控制方法.其方法是,控制开始以后,系统状态轨迹按时间最优运动,当系统状态轨迹运动到最后一段换向线,同时也是过原点的最优轨迹时,让换向线与最优轨迹分开.即采用一条过原点且与最优轨迹相割的直线作为换向线.这时系统状态将沿换向线运动到原点.用该方法设计的船舶动力定位系统控制器,结构简单、动态性能好,且具有一定的鲁棒性.

关键词:时间最优控制;动力定位;变结构控制;滑动模式控制

中图分类号:U666 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7043(2002)02-0012-04

Application of Variable Structure Control Theory to Ship Dynamic Positioning

WU He-xiong, LI Dong-ming

(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The system status orbit moves in terms of time optimal after control is exerted, and when it moves to the last switching line, and it is the optimal orbit passing through the origin at the same time, the switching orbit moves away from the optimal orbit, the secant of optimal orbit passing through the origin is taken as the switching orbit. The system status then moves to the origin along the switching orbit. The controller of dynamic ship positioning designed by this method features simple structure, higher dynamic response and good robust performance.

Key words: time optimal control; dynamic positioning; variable structure control; sliding mode control

动力定位技术已被广泛地应用于各种军用与民用海上作业船的定位.船舶动力定位系统通常是用推力器来控制船舶的位置和首向的系统,它由位置检测器、控制器和推力器组成.船舶的位置和姿态可用纵荡、横荡和首摇来描述.船舶的运动由低频运动($0 \sim 0.25$ rad/s)和低频运动($0.3 \sim 1.6$ rad/s)迭加而成.低频运动是由风、流和二级浪引起的,高频运动由一级浪引起.由于推力器的功率有限,它不但可能抵消高频运动,相反地却会使推力器增加能量消耗和机件磨损.倘若在常规控制器的基础上,采用低通滤波器,可消除高频信号,但是却会使定位误差信号产生相位滞后,限制了控制器的允许带宽和定位的精度.新一代的动力定位系统采用卡尔曼滤波技术处理低频运动,用自校正滤波技术处理高频运动,并利用

LQG 最优反馈控制定律.由于采用了自校正滤波实时修正低频估计值,提高了控制的适应性和系统的调节精度.但在控制算法上仍多采用常规的PID控制方法,本文希望在控制方法上进一步提高系统的动态特性和实用性.这里采用时间最优和变结构理论结合的控制方法.它是一种本质上的非线性控制方法.它有利于充分发挥控制器的最大能力.其控制的作用过程是,当控制一开始,系统的状态轨迹就按时间最优运动(即 Bang-Bang 控制规律).当系统状态轨迹运动到最后一段换向线,同时也是最后一段过原点的状态最优轨迹时,让换向线与最优状态轨迹分开,即采用一条过原点且与最优状态轨迹相割的直线作为换向线,系统则可获得所谓的滑动模态.这时系统状态运动方式只取决于换向线的方程,而与

收稿日期:2001-03-20;修订日期:2002-02-28.

作者简介:吴鹤雄(1942-),男,副教授,主要研究方向为模型控制和变结构控制.

系统的参数无关,从而,系统对外界干扰有很强的鲁棒性.综上所述,本方法可以显著地改善系统的动态特性.

1 某型船舶的模型简介

由于船舶平面运动方程与风浪流和推力器有关,为方便起见,只考虑流的影响,这是因为风的影响可由风速计测量后用前馈的方法加以消除,而浪的影响类似于流的影响.为此,文献3首先通过对某型作业船实验测量后建立的复杂模型进行详尽的技术仿真,然后根据各个因素的影响程度加以适当的简化,并经过线性化处理,代入有关资料,最后得出了以下4种典型海况下的数学模型:

1) 无风静水时

$$\begin{aligned}\dot{u} &= 1.19 \times 10^{-6} TF[0], \\ \dot{v} &= 7.9472 \times 10^{-6} TF[1], \\ \dot{r} &= 9.1556 \times 10^{-10} TF[2];\end{aligned}\quad (1)$$

2) 纵向顶向三节流时

$$\dot{u} = -4.024 \times 10^{-1} u + 1.19 \times 10^{-6} TF[0];\quad (2)$$

3) 横向顶 0.7 m/s 流时

$$\dot{v} = -2.075 \times 10^{-2} v + 7.3472 \times 10^{-7} TF[1];\quad (3)$$

4) 与流成 30° 夹角而顶流时

$$\begin{aligned}\dot{u} &= -1.1 \times 10^{-1} u + 1.19 \times 10^{-7} TF[0], \\ \dot{v} &= -4.9 \times 10^{-2} v + 7.3472 \times 10^{-10} TF[1], \\ \dot{r} &= -7.0 \times 10^{-2} r - 2.769 \times 10^{-4} v + \\ &\quad 9.1556 \times 10^{-10} TF[2].\end{aligned}\quad (4)$$

以上运动方程均为二阶模型,因此以纵向顶三节流的情况为例,介绍我们的控制系统设计方法.

2 控制算法的设计原理

假设控制器的输入是经过卡尔曼自适应滤波后的低频信号,控制器采用时间最优和变结构理论相结合的设计方法.

2.1 时间最优原理

设系统状态方程

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (5)$$

$$A: n \times n, B: n \times m.$$

系统的端点条件为

$$x(0) = x_0, x(T) = 0. \quad (6)$$

控制变量 u_j 满足约束条件为

$$|u_j| \leq 1; j = 1, 2, \dots, m.$$

问题是寻找最优控制 u^* , 将系统状态由 X_0 转移到坐标原点, 并且使调节时间为最小.

由极大值原理知, 时间最优控制为一继电式控制. 对时不变系统, 时间最优控制为正常情况的充要条件是, m 个矩阵 G_j 都是非奇异的, 即

$$\text{rank} G_j = n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

式中: $G_j = [b_j : Ab_j : \dots : A^{n-1}b_j]$, $j = 1, 2, \dots, m$; $B = [b_1 : b_2 : \dots : b_m]$.

2.2 滑动模态控制

变结构控制的特点之一是在换向面上存在的滑动模态. 假设系统状态轨迹的换向面方程为

$$s[kx] = 0. \quad (8)$$

式中: k 是与系统的参数无关的 n 维常向量. 它是根据需要的, 若系统的状态轨迹达到换向面 $s=0$ 后, 沿着它运动到原点, 被称为滑动模态运动. 由于运动只跟方程(8)有关, 跟系统参数无关, 故具有很强的鲁棒性. 系统状态能够达到换向面 $s=0$ 的条件是系统特征方程中没有正实根. 系统存在滑动模态的充分条件是

$$\dot{s} s < 0. \quad (9)$$

目前一般都使用该条件来确定滑动模态存在的区域.

2.3 时间最优—滑动模态控制

采用时间最优控制方案, 状态轨迹运动到最后一段换向线时由于同一符号的控制作用下, 通过原点的只有一条最优轨迹, 同时也必须是最后一段换向线. 如果将最后一段换向线与最优轨迹分开, 即采用方程(8)作为换向线, 这时方程(8)通过原点且与过原点的最优轨迹相割:

$$s(kx) = x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n = 0. \quad (10)$$

那么系统在初始条件激励下, 在换向线上一定能得到滑动模态运动, 而滑动模态运动的存在区域和常向量 k 以及初始条件的太小有关, 下面以二阶系统为例, 说明基本原理.

若系统进入原点的最优轨迹如图1中 r_{-} 直

线 AB 过原点 r 相割的换向线, 且与 r 相交于 c 点.

若系统初始状态为 $x_{10} = x_{11}, x_{20} = 0$ 时, 位于 R_+ 区, 在控制量 $u = u_+ > 0$ 的作用下, 相轨迹沿 $x_{11}c$ 运动, 到达 c 后系统换向, 控制量变成 $u = u_- < 0$, 于是相轨迹沿 r 到达原点. 此时系统运动与时间最优轨迹完全一致.

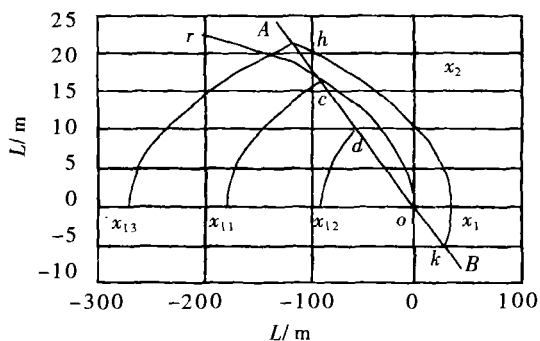


图 1 初始偏差为 x_{11}, x_{12}, x_{13} 时的相轨迹图

Fig. 1 Phase locus with initial bias of x_{11}, x_{12}, x_{13}

若 $|x_{10}| = |x_{11}| < |x_{12}|$, $x_{20} = 0$, 见图 1 中的 $x_{12}do$ 段, 系统在 $u = u_+ > 0$ 的作用下, 沿相轨迹 $x_{12}d$ 运动到换向线 AB , 然后系统状态换向, 在控制 $u = u_- < 0$ 的作用下, 向下运动, 又交于 AB , 接着在 $u = u_+ > 0$ 的作用下又换向, 于是状态轨迹出现了模态运动. 滑动模态段为 do 段.

若 $|x_{10}| = |x_{12}| > |x_{11}|$, $x_{20} = 0$ 时, 相轨迹见图 1 中曲线 $x_{13}hko$ 段, 其滑动模态段为 ko 段.

上述 3 种情况, 第 1 种情况系统处于时间最优控制, 调节时间最短, 鲁棒性较差. 第 3 种情况, 系统相轨迹首先沿曲线 $x_{13}h$ 运动到 h 点, 然后沿曲线 hk 运动到 k 点, 最后以滑模状态进入原点. 在这种情况下, 系统有超调现象, 调节时间增加, 滑动模态区很小 (Bo 段), 超调的大小和时间的长短跟 h 与 c 的距离有关. 第 2 种情况, 系统相轨迹与直线 AB 第一次相交后, 即进入滑动模态运动, 系统的调节时间略大于最优时间, 滑动模态区大, 系统鲁棒性好, 这便是时间最优为基础选择滑动模态区的依据.

3 船舶动力定位系统的控制器设计

3.1 对象模型和要求

本文以纵向顶三节流的纵向信道为例说明设计方法.

其模型方块图见图 2.

设计的要求是, 动力定位系统在距定位中心 50 m 内开始工作, 调节时间为 $t_s \leq 200$ s, 不希望有超调量.

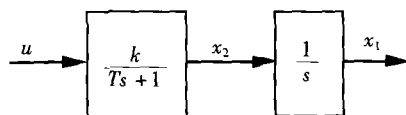


图 2 船舶模型纵向通道结构图

Fig. 2 Frame of ship model's longitudinal channel

3.2 系统设计

系统的状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -x_2/T + ku/T. \end{aligned} \quad (11)$$

初始条件为

$$\begin{aligned} x_{1(0)} &= x_{10}, \\ x_{2(0)} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

其解为

$$\begin{aligned} x_1 &= kut + kuTe^{-t/T} + x_{10} - kuT, \\ x_2 &= ku(1 - e^{-t/T}). \end{aligned} \quad (13)$$

从上面两式中消去 t , 可得

$$\begin{aligned} x_1 &= -kuT \ln[1 - x_2/(ku)] + T(ku - x_2) + \\ &\quad x_{10} - kuT. \end{aligned}$$

代入 $k = 6.151$, $T = 248.5$, 可得

$$x_1 = -1529u \ln[1 - x_2/(6.151u)] + x_{10} - 248.5x_2.$$

为满足系统的设计要求, 设系统状态为 $(x_{10}, 0)$, 在 u_+ 的作用下运动到换向线, 其相轨迹为图 3 中的 AC 段, 再在 u_- 的作用下运动到原点. 其相轨迹为 r 上的 CO 段.

设在偏离 50 m 处系统工作, 即当 u 初始状态为 $(-50, 0)$ 时, 最优轨迹为

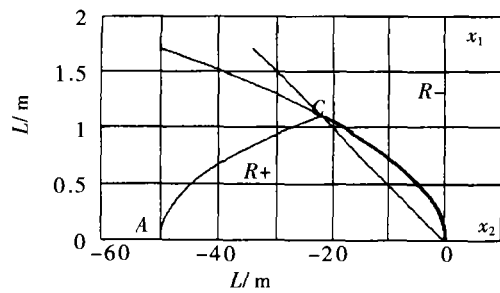


图3 系统偏差为50 m的系统相轨迹图

Fig.3 Phase locus with system bias of 50 m

$$x_1 = -1529 \ln(1 - x_2/6.151) - 50 - 248.5x_2; \quad (14)$$

而当 $u_- = 1$, 通过原点的最优轨迹为

$$x_1 = 1529 \ln(1 + x_2/6.151) - 248.5x_2. \quad (15)$$

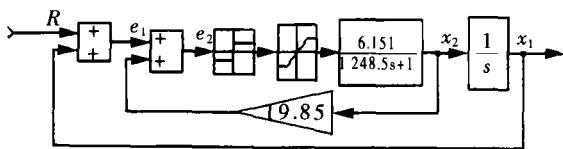


图4 船舶纵向通道控制系统结构图

Fig.4 Control system structure of ship's longitudinal channel

式(14)和(15)的交点可由下式确定:

$$-1529 \ln(1 - x_2/6.151) - 50 - 248.5x_2 = 1529 \ln(1 + x_2/6.151) - 248.5x_2.$$

解上面一元方程可得

$$x_2 = 1.103.$$

再由(14)式或(15)式解出:

$$x_1 = -21.90.$$

通过交点 $C(-21.90, 1.103)$ 和原点 $(0, 0)$ 作一直线作为换向线, 其斜率为

$$K_2 = -x_1/x_2 = 19.85.$$

其系统纵向通道的控制系统结构图见图4.

3.3 系统仿真

当初始偏差为 25, 50 和 75 m 时的系统仿真曲线见图 5. 其中曲线 1 为初始偏差为 25 m 时的仿真结果, 这时系统调节时间为 90 s, 无超调, 滑动模态存在. 曲线 2 为初始偏差为 50 m 时的仿真结果, 其调节时间为 76 s, 时间最优. 曲线 3 为初

始偏差为 75 m 时的仿真结果, 这时调节时间约为 160 s, 且有很大的超调.

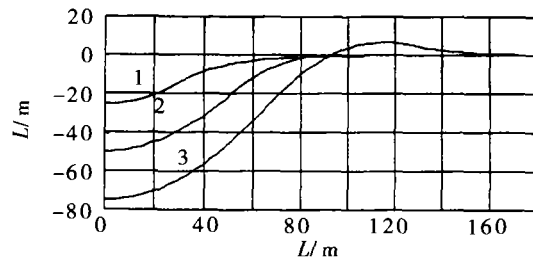


图5 初始偏差为 25, 50 和 75 m 时的系统动态响应曲线

Fig.5 System dynamic response curves with initial bias of 25, 50, 75 m

以上仿真结果表明, 当系统在 50 m 内启动时, 完全符合设计要求, 没有超调, 系统调节时间略大于时间最优, 由于滑动模态区比较大, 系统有较好的鲁棒性. 系统在 50 m 外启动时, 可以控制船舶运动到定位中心, 但会产生过调和增加太多的调节时间. 上述结果也完全符合前面的理论分析.

4 结束语

以时间最优和滑动模态为基本原理的设计方法, 对船舶动力定位系统的控制器设计来说非常简单, 所得动静态特性和鲁棒性都是很满意的. 本例中, 以时间最优轨迹为基础的滑动模态可达区比 $s \leq 0$ 式所确定的滑动模态区大.

参考文献:

- [1] 姚立强, 徐松源. 拦截器姿态控制的滑动模态设计法[J]. 宇航学报, 1995, 16(7): 18-24.
- [2] 摩根 M J. 近海船舶的动力定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [3] 张园. 动力定位系统的策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1996.
- [4] 高为炳. 变结构控制理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[责任编辑: 刘玉明]