

喷水推进型无人水面艇的嵌入式运动控制系统研究^①

廖煜雷^② 万 磊 庄佳园

(哈尔滨工程大学水下智能机器人技术重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要 针对无人水面艇(USV)系统因其强非线性和不确定性且难以建立精确的数学模型而难以控制的问题,进行了嵌入式运动控制研究。为某单泵喷水推进型无人水面艇设计了嵌入式运动控制系统,分别从软件和硬件两个方面实现了该嵌入式控制系统的体系结构。为了满足嵌入式无人水面艇控制系统对数据处理实时性和可靠性的需求,在 S 面运动控制器的基础上引入了 α - β - γ 滤波器。海试和湖试试验结果表明所设计的控制器和滤波器具有良好的控制性能,试验验证了该控制系统的可行性和可靠性。

关键词 无人水面艇(USV), 运动控制, 嵌入式系统, S 面控制, α - β - γ 滤波器

0 引 言

无人水面艇(unmanned surface vehicle, USV),简称无人艇,是一种遥控或自主式的无人水面船舶,在海洋科研、海洋开发和军事领域具有极其广泛的应用。目前 USV 的典型代表有美国的“Spartan”号、以色列的“Protector”号,以及双体型 USV 如意大利的“Charlie”号^[1]、英国的“Springer”号^[2]、葡萄牙的“Delfim”号等。在 USV 的运动控制方面,国内外学者开展了一些研究^[3-8]。文献[3]中讨论了 USV 的艏向控制问题;Kumarawadu 等利用 Lyapunov 直接法设计了 USV 的速度控制器^[4];Bao 等针对 USV 的艏向和横向控制问题,基于滑模观测器和滑模控制器设计了艏向和横向联合控制器^[5];文献[6,7]中将模糊 PID 和神经网络等控制算法应用于 USV 的控制中,但只进行了仿真试验,在工程应用的性能有待验证。上述控制方法都需要 USV 的精确数学模型,事实上这是很难获得的,这阻碍了上述控制方法在实际中的应用。目前,在 USV 嵌入式控制系统方面的研究较少。文献[8]中讨论了一种嵌入式控制系统的设计方法,但其并不是自主式 USV。本研究讨论了 USV 嵌入式控制系统的体系结构,并针对 USV 难以建立精确数学模型和强非线性特点,引

入了 S 面控制算法,该算法将模糊控制思想与 PID 简单控制结构相结合,具有不依赖于精确数学模型、适合非线性控制、结构简单和便于参数调整等优点。S 面以及改进 S 面控制算法在水下机器人的控制中得到了广泛应用,并取得了良好效果^[9-11]。考虑到嵌入式系统的实时性和 USV 运动特点,本文采用 α - β - γ 滤波器进行传感器数据滤波。所提出方法的有效性和可靠性通过试验得到了验证。

1 控制系统的体系结构

本文研究对象是单体滑翔艇式无人艇,配备柴油发动机和单泵喷水推进装置。该 USV 系统是为了实现自主航行、智能规划、作业任务而研制的无人试验平台,它也可用于多种无人平台(即无人艇、水下机器人、无人机等)的编队航行和协同作业等多智能体联合控制研究。无人艇系统由无人艇载体、无人艇控制系统、岸基监控系统、无线数据通信系统等 4 部分构成,如图 1 所示。

为了实现自主式智能无人艇,在体系架构的设计上,已将控制系统完全布置到嵌入式控制系统中。无人艇控制系统是无人艇系统的核心部分,它是实现自主式无人艇的关键所在。下面分别从硬件和软件两方面来阐述无人艇控制系统。

① 863 计划(2008AA092301),国家自然科学基金(50909025/E091002)和水下智能机器人技术重点实验室研究基金(HEUFT08017)资助项目。

② 男,1985 年生,博士生,研究方向:无人水面艇的智能控制与运动仿真;联系人,E-mail: liaoyulei@hrbeu.edu.cn
(收稿日期:2010-11-16)

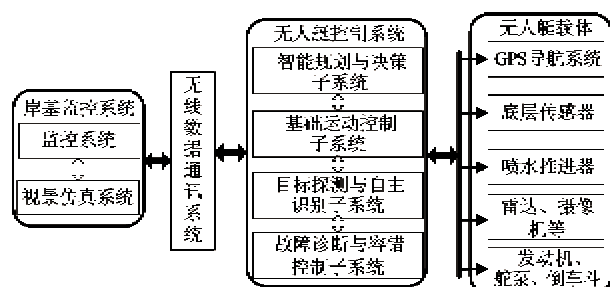


图1 USV 系统的系统构成图

1.1 硬件体系结构

无人艇控制系统为嵌入式计算机系统(从硬件角度)和嵌入式控制系统(从软件角度,在只讨论无人艇(USV)的运动控制问题时,可称为运动控制系统)组成(图2)。其中嵌入式计算机系统的核心是基于PC/104总线多板嵌入式系统,包括基于Intel Pentium M处理器的PC模块,基于PC/104总线的8通道串口板模块、A/D卡模块、D/A卡模块、I/O板模块以及一个提供5伏电压的电源模块。

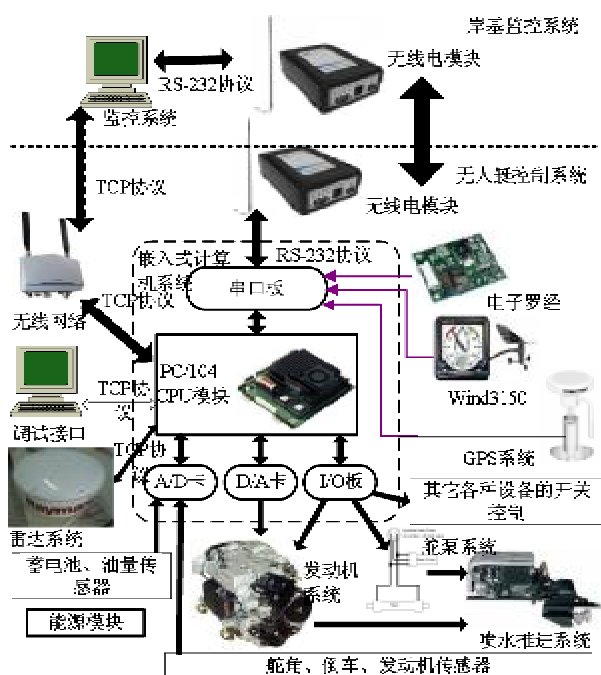


图2 USV 基础运动控制系统硬件体系结构图

嵌入式PC/104模块采用Wind River公司的实时多任务操作系统VxWorks。它以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛应用在通信、军事、航空、航天等对实时性要求极高的领域。岸基监控机采用Windows下的VC++建立监控系统。通过无线数据通信系统,岸基监控机与USV系统之间实现了远距离无线实时监控,同时预留了网络调试接口。

1.2 软件体系结构

无人艇(USV)的嵌入式控制系统主要由环境与运动感知模块、控制模块、无线数据通信模块、执行模块等几大部分组成,如图3所示。

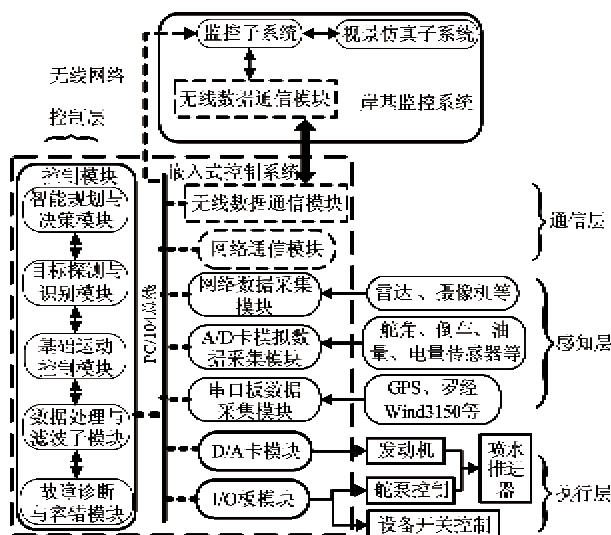


图3 基础运动控制系统的软件体系结构图

基于时空分解体系结构和行为响应体系结构相结合的思想,本文将嵌入式控制系统分为控制层、通信层、感知层和执行层等4部分构成的分层控制系统。控制层可分为基础控制层和智能决策层两个子层,其中基础控制子层负责处理位姿信息并根据目标指令生成所需的控制指令,它包含了基础运动控制、数据处理与滤波、故障诊断与容错控制等子模块,它是嵌入式控制系统的核心;智能决策子层是USV的“大脑”,处理任务的空间、时间分解和决策规划问题,综合考虑USV的状态生成目标指令。考虑到未来扩展需要,可将目标探测与识别、特殊任务等子模块嵌入到控制层中,由智能决策层来协调控制。通信层主要负责整个系统的通信,包含了串口的无线通信接口、TCP/IP协议的网络通信接口和PC/104总线的通信接口。感知层即环境与运动感知模块,它由A/D卡、串口板和网络等采集模块组成,负责USV所处环境、位置和姿态等传感器数据的采集。执行层即执行模块,负责控制指令的理解和下达,以完成执行机构和各类设备控制,主要由D/A卡和I/O板模块组成。

2 控制器和滤波器的设计

本文中的基础运动控制系统包括基础运动控

制、故障诊断与容错以及数据处理与滤波等子模块。限于篇幅,只介绍控制器(基础运动控制)、滤波器(数据处理与滤波)等内容。

2.1 S 面控制器

USV 运动控制系统有三个突出特点:

(1)高度非线性:USV 是一个强非线性系统,各自由度的运动相互耦合,且难于获得精确的水动力系数;控制对象工作于不同工作点(速度)时模型会产生变化;工作环境高度非线性,即风、浪、流等环境扰动力具有非线性。

(2)不确定性:水动力系数的不能精确获知导致运动模型的不确定,运动模型中至少参数是不确定的;外部干扰不确定,工作海区内风、浪、流等的特性无法精确得到。

(3)欠驱动性:在水平面内 USV 的运动具有 3 个自由度,但仅有 2 个独立驱动力(纵向推进力和转艏力矩)。因此,USV 在水平面内的运动具有欠驱动性。

由于 USV 系统具有上述特点,建立精确的 USV 运动模型是不可能的。所以设计的控制器必须能够容忍这些不确定性和非线性,并且要具备对应建模误差及诸多参数变化的鲁棒性。

经典控制和现代控制在 USV 的实际应用中存在着很多难以解决的问题。而智能控制将控制理论的方法和人工智能技术灵活地结合起来,其控制方法适应对象的复杂性和不确定性。可选用的智能控制方法主要有神经网络、模糊逻辑控制、专家控制等。本文采用简单实用的 S 面控制算法^[9],其算法描述如下。

取常规模糊控制器的控制规则(见表 1)主对角线数值连成折线,对于这样的折线,可以用一条光滑曲线来拟合(例如,Sigmoid 函数、tanh 函数等),事实上,光滑曲线可以看作无数条长度趋向于零的折线相连。同理,整个模糊控制规则库对应的折线面,也就可以用光滑的曲线面代替。

Sigmoid 曲线函数可表示为

$$u = 2.0 / (1.0 + \exp(-kx)) - 1.0 \quad (1)$$

那么,Sigmoid 曲面函数为

$$z = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_1x - k_2y)) - 1.0 \quad (2)$$

因此本文中用到的 S 面控制器的控制模型为

$$u = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_1e - k_2\dot{e})) - 1.0 \quad (3)$$

其中, e 和 $\dot{e}$ 为控制的输入(分别为偏差和偏差变化率,并通过归一化处理), u 为归一化的控制力输出, k_1 、 k_2 分别为对应偏差和偏差变化率的控制参数,可

以改变其对应控制输入的变化速度。图 4 的三维光滑曲面表达了偏差、偏差变化率与控制力之间的关系。对比 PID 控制器可知,S 面控制器在模型结构形式上和 PD 控制器很相似,只不过后者是线性的,前者是非线性的。显然采用非线性函数来拟合非线性系统比采用线性函数更好一些。

表 1 控制规则表

4	3	2	1	0
3	2	1	0	-1
2	1	0	-2	-2
1	0	-1	-2	-3
0	-1	-2	-3	-4

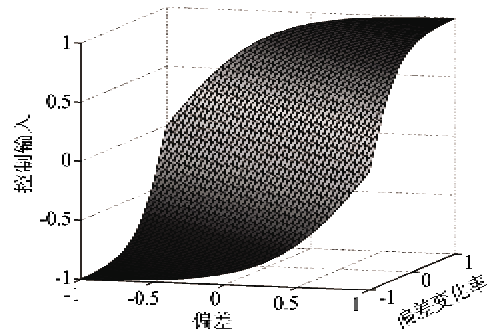


图 4 Sigmoid 曲面

在控制过程中,风、浪、流等环境力是时变的,但是对于在中低速运行的 USV 来说,可以认为是一段时间内的固定干扰力。另外,由于控制系统的执行机构会出现舵角零点偏移的问题,也考虑为固定干扰力。因此可通过调整 S 面的偏移,来达到消除固定误差的目的,即采用如下的控制器模型函数^[11]:

$$\begin{cases} u_i = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_{d1}e_i - k_{d2}\dot{e}_i)) - 1.0 + \Delta u_i \\ f_i = K_i u_i \end{cases} \quad (4)$$

式中, e_i 和 $\dot{e}_i$ 分别为第 i 自由度归一化的偏差和偏差变化率, u_i 为第 i 自由度归一化的控制输出; k_{d1} 、 k_{d2} 分别为对应第 i 自由度偏差和偏差变化率的控制参数,可以改变其对应自由度的变化速度; Δu_i 为第 i 自由度通过自适应方式得到的归一化的固定干扰力值; f_i 为第 i 自由度上所需力的大小; K_i 为第 i 自由度上所能提供的最大控制输出。需要指出的是:USV 系统是通过改变喷水推进器的喷嘴角和喷水量(由发动机转速控制)来控制艇的艏向和航速,因此这里的控制输出即指舵角(对应喷水推进器喷嘴的角度)或油门电压值(对应发动机转速)。

通过改变 k_{i1} 和 k_{i2} 的大小,可以调整偏差和偏差变化率在控制输出中所占的比重,即可以调整 k_{i1} 和 k_{i2} 来改变控制器的控制特性,从而调节超调量和收敛速度以满足控制要求。一般地,参数调整如果超调大了,可适当减小 k_{i1} 而增加 k_{i2} ,反之,如果收敛速度慢了,则可适当增加 k_{i1} 而减小 k_{i2} 。

2.2 α - β - γ 滤波器

传感器数据的准确性和有效性对控制系统的稳定性和控制性能有极其重要的影响。由于 USV 系统在海洋、湖泊等复杂的环境中运行,其运动受环境干扰很大,同时位置和姿态传感器又存在精度低、野值率高的特点。因此数据滤波前需要进行野值剔除,同样数据滤波对于 USV 控制系统尤为重要。

与导弹、战斗机、航天器等做大机动运动的对象相比,船舶机动比较缓慢,所以近似看作线性运动^[12]。目前广泛应用的线性滤波理论有维纳滤波、卡尔曼滤波、 α - β - γ 滤波等。卡尔曼滤波器是最常用滤波器之一,对于匀速直线运动对象,它也是最优滤波器。 α - β - γ 滤波器实质上是运动方程为匀加速的卡尔曼滤波器的稳态解形式,其增益就是 α 、 β 、 γ 这 3 个常数,且计算格式简单,不涉及矩阵运算,计算速度快,这克服了卡尔曼滤波器计算量大的缺点,因此在机动目标跟踪和雷达跟踪中获得了广泛应用^[12-14]。下面介绍 α - β - γ 滤波器的基本理论^[13]。

假设控制对象近似作匀加速直线运动,此时状态量 X 是三维向量,表达式为

$$X = (x, \dot{x}, \ddot{x})^T \quad (5)$$

式中, $(x, \dot{x}, \ddot{x})$ 分别表示对象的位置、速度和加速度分量。对象运动的状态方程为

$$X_{k+1} = \Phi X_k + \Gamma W_k \quad (6)$$

其中: $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\Gamma = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}$; 状态噪声

W_k 为零均值的高斯白噪声过程,其方差 $Q = E(W_k W_k^T)$; T 为采样时间间隔。该过程的测量方程为

$$y_k = H X_k + V_k \quad (7)$$

式中: $H = [1 \ 0 \ 0]$; 测量噪声 V_k 是均值为零,方差 $R = E(V_k V_k^T)$ 的高斯白噪声过程。运动方程(6)的卡尔曼滤波公式为

$$\begin{cases} \tilde{X}_{k+1/k} = \Phi \tilde{X}_{k/k} \\ P_{k+1/k} = \Phi P_{k/k} \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T \\ K_{k+1} = P_{k+1/k} H^T (H P_{k+1/k} H^T + R)^{-1} \\ \tilde{X}_{k+1/k+1} = \tilde{X}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - H \tilde{X}_{k+1/k}) \\ P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} H) P_{k+1/k} \end{cases} \quad (8)$$

当卡尔曼滤波递推充分多的步数后,增益矩阵 K_{k+1} 将趋于常数矩阵 K ,因此由式(6)和式(7)可得 α - β - γ 滤波器方程为

$$\begin{cases} \tilde{X}_{k+1/k} = \Phi \tilde{X}_{k/k} \\ \tilde{X}_{k+1/k+1} = \tilde{X}_{k+1/k} + K (y_{k+1} - H \tilde{X}_{k+1/k}) \end{cases} \quad (9)$$

其中:增益矩阵 $K = [\alpha \ \beta/T \ \gamma/(2T^2)]^T$; α, β, γ 为滤波增益参数。

α - β - γ 滤波器的精度和收敛速度与噪声方差矩阵 Q 和 R 有关,而 Q 和 R 的取值和增益参数 α, β, γ 直接相关。因此 α, β, γ 的选取必须合理考虑噪声特性与滤波器动态性能之间的平衡。一般情况下, α, β, γ 越大则滤波器收敛越快,但滤波精度较差。本文选 $\alpha = 0.6, \beta = 0.05, \gamma = 0.005$ 。

3 试验结果与分析

2010 年 5 月下旬至 7 月初,某型 USV 在山东省蓬莱海区进行了 USV 航行与操纵性能试验、遥控试验和运动控制试验。对 USV 系统改造升级后,2010 年 10 月上旬,该 USV 在黑龙江省的龙凤山湖进行了运动控制试验。USV 系统的运动控制主要包括艏向控制和航速控制两个方面。由于 USV 的速度控制比艏向控制相对简单,且受水域和时间限制,目前这两次试验均只做了低速状态下的艏向控制。因此下面只分析艏向控制和数据滤波试验结果。

3.1 数据滤波

两次试验中,都采用了 α - β - γ 滤波器。USV 实测艏向角和速度的滤波效果如图 5 和 6 所示。

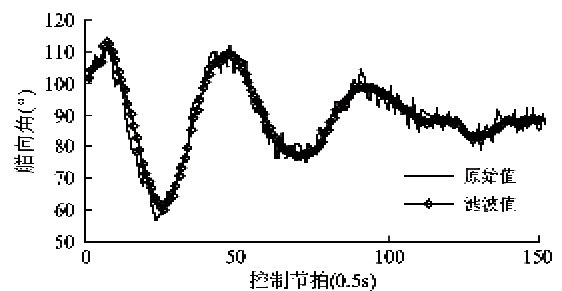


图 5 艏向角滤波比较

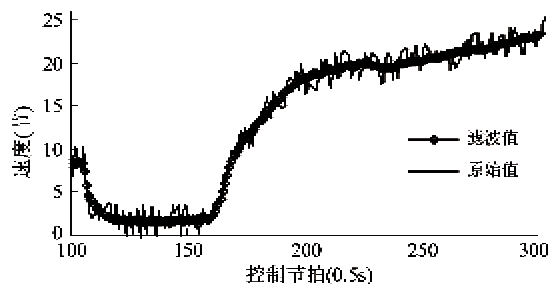


图 6 速度滤波比较

试验区域的风浪较大,从图 5 和 6 可以看出,滤波前姿态传感器数据和速度传感器有较大噪声。 α - β - γ 滤波器具有很好的跟踪性能,采用 α - β - γ 滤波器进行滤波处理,滤波后数据平滑,能够满足控制要求。 α - β - γ 滤波器结构简单,具有良好的收敛速度和滤波精度,因此十分适合 USV 这样的实时系统。

3.2 艏向控制

3.2.1 增量式 S 面控制器

直航试验中发现舵角的零点是在变化的,即操舵会产生“零点漂移”现象,对控制系统来说,该现象会带来时变的干扰。为减小零点漂移对艏向控制的影响,试验中初步采用增量式 S 面控制器进行艏向控制。

(1) 设控制舵角阈值为 $\pm 15^\circ$, 初始航速 3.08 节,控制参数 $k_1 = 2.4$, $k_2 = 5$ 。从初始艏向 192.6° ,定向到 120° ,其定向控制效果如图 7 所示。

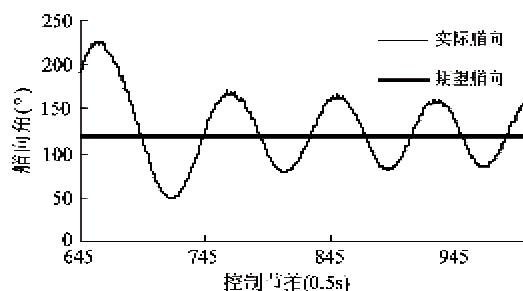


图 7 定向控制艏向变化曲线

从图 7 可看出,艏向角在期望艏向周围作大幅度的振荡(幅值高达 $\pm 40^\circ$),而不能收敛,显然不能满足控制要求。考虑到 USV 惯性大和执行机构大时滞的特点,结合手操 USV 的经验,即打小舵角以达到保持航向的目的。下面考虑减小控制舵角阈值,同时继续增大偏差微分项的作用。

(2) 设控制舵角阈值为 $\pm 10^\circ$, 初始航速 3.0 节,控制参数 $k_1 = 3$, $k_2 = 10$ 。从初始艏向 101° ,定向到 120° ,其定向控制效果如图 8 所示。

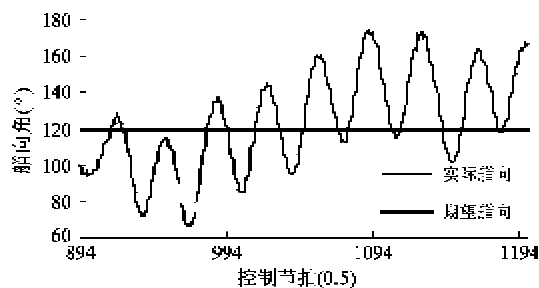


图 8 定向控制艏向变化曲线

从图 8 可看出,控制过程中艏向输出依然是振荡的。同控制舵角阈值为 $\pm 15^\circ$ 的控制效果相比没有明显的改善。因此,考虑继续减小控制舵角阈值。

(3) 设控制舵角阈值为 $\pm 5^\circ$, 初始航速 3.39 节,控制参数 $k_1 = 1.5$, $k_2 = 6$ 。从初始艏向 119° ,定向到 270° ,其定向控制效果如图 9 所示。

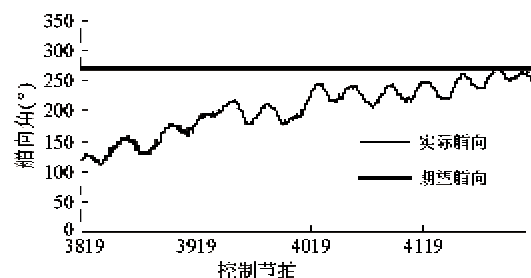


图 9 定向控制艏向变化曲线

从图 9 可看出,艏向响应依然是振荡的,但同控制舵角阈值为 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 时的控制效果相比有明显的改善。显然,控制舵角阈值较小时控制效果较好。

从图 9 - 图 11 可看出,增量式 S 面控制器的特征是系统振荡,这是由于增量控制方式对偏差的跟踪是以系统输出滞后为代价的,当系统对外界环境干扰较敏感时,很容易造成控制响应的振荡。因此,下面采用非增量式 S 面控制器进行艏向控制。

3.2.2 非增量式 S 面控制器

为使控制器能够对系统偏差做出较快响应,试验中可将控制舵角阈值放大一些。下面给出艏向控制中,控制器积分(引入自适应固定干扰力)和非积分(不引入自适应固定干扰力)两种状态下的试验结果。

(1) 设控制舵角阈值为 $\pm 7^\circ$, 初始航速 2.6 节,控制参数 $k_1 = 3$, $k_2 = 1.7$, 不引入积分。从初始艏向 256.8° ,定向到 320° ,其定向控制效果如图 10 所示。

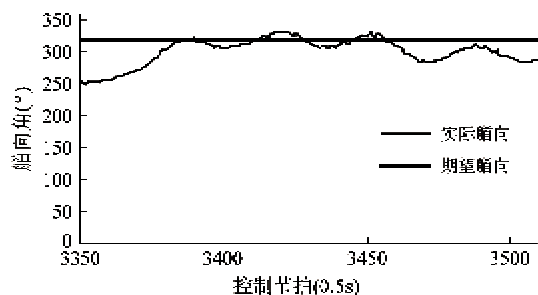


图 10 定向控制艏向变化曲线

从图 10 可看出,艏向响应曲线在上升阶段基本没有出现超调,但在趋于稳态时艏向出现小振荡,稳态误差在 18° 以内。显然,非增量式 S 面控制器的控制效果优于增量式 S 面控制器。

(2) 设最大控制舵角为 $\pm 7^\circ$, 初始航速 2.7 节, 控制参数 $k_1 = 3, k_2 = 2.2$, 不引入积分。从初始艏向 281° , 定向到 100° , 其定向控制效果如图 11 所示。

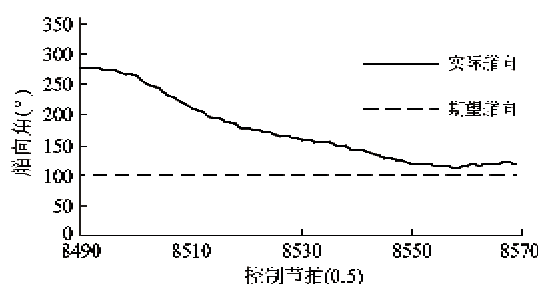


图 11 定向控制艏向变化曲线

从图 11 可看出,艏向响应快速、平滑,没有超调,艏向没有发生振荡,具有良好的动态性能。但是艏向角没有收敛到期望值,稳态误差 15° 左右。因此,考虑加入积分项来消除固定偏差。

(3) 设控制舵角阈值为 $\pm 7^\circ$, 初始航速 2.8 节, 控制参数 $k_1 = 3, k_2 = 2.1$, 引入积分。从初始艏向 89.6° , 定向到 200° , 其定向控制效果如图 12 所示。

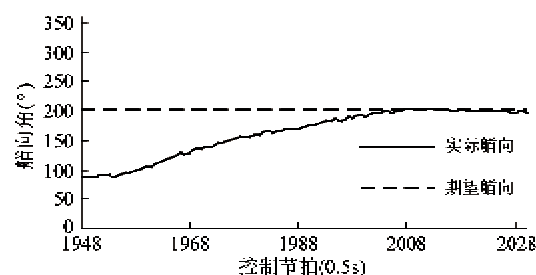


图 12 定向控制艏向变化曲线

从图 12 可看出,艏向收敛较快,超调很小,没有

稳态误差,定向控制的效果较好,定向精度为 $\pm 3^\circ$ 。

对比图 9 - 图 11 可知,在控制器中引入自适应固定干扰力后消除了稳态误差,艏向取得了较好的控制效果。

(4) 设控制舵角阈值为 $\pm 5^\circ$, 初始航速 6.8 节, 控制参数 $k_1 = 8, k_2 = 1.8$, 引入积分。从初始艏向 327.4° , 先定向到 280° , 再定向到 100° , 最后(接近 100 后)定向到 130° , 其定向控制效果如图 13 所示。

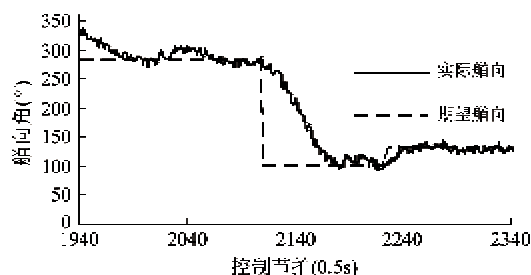


图 13 定向控制艏向变化曲线

USV 在提高航速后的航向控制结果,如图 13 所示。从图 13 中可看出,艏向角能够较好地跟踪上期望艏向,控制响应快,超调较小,定向精度为 $\pm 5^\circ$ 。对比不同速度时的控制参数可看出,随着航速的增加,喷水推进器的转舵能力明显增大,控制器的参数必须做相应的调整才能保持较好的控制效果。航速在低速段时,随着航速的增加,参数调整的规律是:增加比例项参数,减小微分项参数。另外,由于同一舵角下,转舵力矩随着航速提高而增大,因此应减小控制舵角阈值。

4 结 论

在海试和湖试过程中,所设计的 USV 系统能够可靠地运行,试验结果验证了 USV 控制系统在体系结构、控制算法、数据处理以及系统软件和硬件等方面的可靠性和合理性。USV 进行了低速时的定向控制试验,试验表明所设计的 S 面控制器能够满足运动控制的精度要求,具有良好的动态性能。从速度和艏向角等滤波数据可看出, α - β - γ 滤波器收敛快、滤波精度高,具有较好的滤波效果,满足 USV 系统运动控制的要求。

本文中所讨论的 USV 艇型为滑艇,相对中低航速而言,由于该 USV 在高速运动时航态和运动性能会发生显著变化,因此该艇高速时的运动控制问题需要深入研究,而且 USV 在复杂海洋状态下的运

动控制性能有待验证。此外,所设计的 α - β - γ 滤波器并不是最优滤波器,特别是在高速时的滤波性能仍需讨论。下一步将开展自适应性控制器的研究,以提高 USV 在复杂航态和海况下的运动控制性能。

参考文献

- [1] Caccia M, Bibuli M, Bono R, et al. Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle. *Autonomous Robots*, 2008, 25: 349-365
- [2] Xu T, Chudey J, Sutton R. Soft computing design of a multisensory data fusion system for unmanned surface vehicle navigation. In: *Proceedings of the 7th IFAC Conference Maneuvering Control Craft*, Bol, Croatia, 2006. 124-156
- [3] Yu Z, Bao X, Nonami K. Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors. *Journal of System Design and Dynamics*, 2008, 2(1): 389-400
- [4] Kumarawadu S, Kumara K J C. On the speed control for automated surface vehicle operation. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Automation for Sustainability*, Melbourne, Australia, 2007. 135-140
- [5] Bao X, Nonami K, Yu Z. Combined yaw and roll control of an autonomous boat. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009. 188-193
- [6] 高双,朱齐丹,李磊. 基于神经网络的高速 USV 模糊 PID 控制. *系统仿真学报*, 2007, 19(4): 776-777
- [7] 高双,朱齐丹,李磊. 滑行艇高速运动建模与姿态控制仿真. *系统仿真学报*, 2008, 20(16): 4461-4462
- [8] 廖煜雷,庞永杰,庄佳园. 无人水面艇嵌入式基础运动控制系统研究. *计算机科学*, 2010, 37(9): 214-217
- [9] 刘学敏,徐玉如. 水下机器人运动的 S 面控制方法. *海洋工程*, 2001, 19(3): 81-84
- [10] 刘建成,于华男,徐玉如. 水下机器人改进的 S 面控制方法. *哈尔滨工程大学学报*, 2002, 23(1): 33-36
- [11] 甘永,王丽荣,刘建成等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统. *机器人*, 2004, 26(3): 246-249
- [12] 罗威,姚放吾,张正宏. 基于 ARM 的船用导航雷达 α - β - γ 跟踪设计方法. *上海海事大学学报*, 2008, 29(1): 32-36
- [13] 郭军海,高耀文,沙定国. 多级组合 α - β - γ 跟踪滤波器. *弹道学报*, 2003, 15(2): 83-88
- [14] 荆晓鹏,侯明善,曲润峰. 模糊自适应 α - β - γ 滤波及其应用. *弹箭与制导学报*, 2004, 24(4): 504-506

An embedded motion control system for water-jet-propelled unmanned surface vehicles

Liao Yulei, Wan Lei, Zhuang Jiayuan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,
Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

A study of embedded motion control was conducted to solve the difficulties in design of a control system for an unmanned surface vehicle (USV) caused by the facts that an USV is a strongly nonlinear, uncertain system and its accurate mathematical model is difficult to establish. An embedded motion control system for a certain single water-jet-propelled USV was designed. The architecture of the embedded motion control system was constructed from the aspects of hardware and software. To satisfy the real-time and reliability of data processing of the embedded control system, a α - β - γ filter was incorporated into the S surface controller. The results of the sea trial and the lake trial showed that the proposed controller together with the filter can provide good control performance, and the feasibility and reliability of the embedded control system were also verified.

Key Words: unmanned surface vehicle (USV), motion control, embedded system, S surface control, α - β - γ filter