

基于 ARM 的数字式自动舵设计*

封 浩¹, 熊远生^{2*}

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 嘉兴学院 机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 针对我国的自动操舵仪长期以来都是采用模拟技术设计的问题, 介绍了一种以 ARM 为核心的数字式自动舵的模块化设计方法及相应实验结果。首先介绍了船舶运动控制的野本模型, 分析了系统的控制原理, 然后根据系统结构框图设计了各功能模块和程序流程图。系统的软硬件均采用模块化设计, 自动航向控制策略采用 PID 控制。系统具有电子罗盘、电罗经、GPS 等多种导航信号接口, 具有手动、随动、自动等多种控制模式, 预留了多种通讯接口, 可方便地与其它设备连接。实验结果表明, 该设计方案可行。

关键词: ARM; 自动操舵仪; 野本模型; 模块化设计

中图分类号: TH134; U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)09-0065-04

Design of digital autopilot based on ARM

FENG Hao¹, XIONG Yuan-sheng²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;

2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Aiming at the problem of autopilot for a long time in our country using analog design technology, a modular design method for digital autopilot based on ARM was presented and the corresponding experimental results were given. Firstly, the nomoto model was introduced and the control principle of the system was analyzed. Then the main function modules were presented according to system diagram, as well as the software flow charts. Both hardware and software were realized in the design method of modularization structure. The PID control algorithm was used for the automatic heading control strategy. The system integrates a variety of navigation signal interfaces such as electronic compass, Gyro-compass and GPS. The system has a variety of control modes, including the manual control, servo control and automatic control. Additionally, various communication interfaces are reserved to provide convenience for connecting with other devices. The experiment results show that this design scheme is feasible.

Key words: ARM; autopilot; nomoto model; modular design

0 引 言

船舶的操纵性通常用航向稳定性与机动性来衡量。既希望船舶有良好的航向保持功能, 又有灵敏的机动性。可在船舶设计中, 这两者是矛盾的。船舶航向控制装置可以较好地解决这个矛盾^[1], 航向控制装置又称船舶自动操舵仪, 是最重要的船控设备之一。

随着航运交通密度不断加大, 以及船舶逐渐向大

型化和高速化发展, 对船舶控制系统的要求越来越高。而我国的自动舵产品长期以来都是基于模拟技术^[2], 技术水平较国外还有较大的差距, 市场上的自动操舵仪基本是以欧、美、日等发达国家的的产品为主, 如美国 Sperry 公司的 Navipilot-4000^[3]、日本 Tokimec 公司的 PR-6000^[4], 其技术特点主要表现为控制集成化、产品智能化。虽然国外产品技术先进、质量可靠, 但价格昂贵、维修困难。为促进我国造船业的均衡发展, 使我国

收稿日期: 2010-03-24

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2007C21002)

作者简介: 封 浩(1981-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统、船舶操纵方面的研究. E-mail: feng_hao2000@yahoo.com.cn

通信联系人: 熊远生, 男, 博士. E-mail: xiongyuansheng@163.com

早日实现从造船大国向造船强国转变,研制具有自主知识产权的、高技术水平的、高性价比的自动操舵仪刻不容缓。

GPS 的广泛应用,使低成本的自动导航成为了可能。电罗经作为传统的航向检测装置,因其优秀的自主特性,仍然是远洋航行的必配设备。数字式电子罗盘的出现,为自动导航提供了一种新的经济型解决方案。在本设计中,自动操舵仪不仅具有电罗经接口,还可同时接入 GPS 接收器与电子罗盘,各导航设备通过模式开关进行选择。

1 船舶运动模型

船舶的实际运动异常复杂,在一般情况下具有 6 个自由度,分别为进退、横漂、转艏、起伏、横摇、纵摇。对水面船舶的运动及其控制问题而言,可以忽略起伏运动、纵摇运动及横摇运动,这样就简化成一种只有 3 个自由度的平面运动问题^[5]。

考虑到船舶的对称性,船舶在平衡位置作小幅度运动,则船舶横漂和转艏的线性运动方程可以用下式表示:

$$\begin{cases} (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_v v + (m u_1 - Y_r)r - Y_r \dot{r} = Y_{\delta}\delta + Y_d \\ (I_z - N_r)\dot{r} - N_v v - N_{\dot{v}}\dot{v} - N_r r = N_{\delta}\delta + N_d \end{cases} \quad (1)$$

对上式进行拉氏变换得:

$$\begin{cases} [s(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_v]v(s) + [s(-Y_r) + (mu - Y_r)]r(s) = Y_{\delta}\delta(s) + Y_d(s) \\ [s(I_z - N_r)\dot{r} - N_r]r(s) + [s(-N_{\dot{v}}) - N_v]v(s) = N_{\delta}\delta(s) + N_d(s) \end{cases} \quad (2)$$

定义:

$$D_s = (mu - Y_r)N_v + N_r Y_v \quad (3)$$

从式(2)方程组的上等式解出 $v(s)$ 代入下等式后,两边同时除以 D_s ,再作拉氏反变换,并令:

$$\dot{\psi} = r \quad (4)$$

于是得二阶野本 (nomoto) 模型:

$$\tau_1 \tau_2 \ddot{\psi} + (\tau_1 + \tau_2)\dot{\psi} + \dot{\psi} = \quad (5)$$

$$K_{\delta}(\delta + \tau_3 \dot{\delta}) + K_{YD}(Y_d + \tau_4 \dot{Y}_d) + K_{ND}(N_d + \tau_5 \dot{N}_d) \quad (5)$$

野本认为,船舶在舵作用下的运动基本上是一个质量很大的物体的缓慢的转艏运动,于是用一个惯性环节来代表船舶的转艏运动方程,也就是著名的一阶野本模型,即:

$$I_z \ddot{\psi} + N \dot{\psi} = C\delta + N_d \quad (6)$$

式中 I_z, N 和 C —船舶的回转惯性力矩系数、回转中所受阻尼力矩系数和舵产生的回转力矩系数; N_d —一船

摇扰动力矩; δ —舵角。

上式可以改写为:

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta + \frac{N_d}{N} \quad (7)$$

其中, $T = \tau_1 + \tau_2 - \tau_3, K = C/N$ 。 K, T 可以通过海上实船试验获得。

用野本模型设计船舶运动控制器的优点是在低频范围内,其频谱与高阶模型的频谱非常相近,且设计出的控制器阶次低,易于实现。

2 系统控制原理

本系统的控制原理如图 1 所示。

系统控制结构由 3 个闭环组成,分别为舵角控制环、航向控制环和航迹控制环。最外为航迹控制环,系统通过 GPS 接收器获取船舶的当前位置信息,并与计划航线比较,获取航迹偏差,通过航迹计算得到指令航向。中间为航向控制环,当实际航向与计划航向发生偏差时,系统通过航向控制算法计算后发出转舵指令,当偏差为零(或可接受的范围内)时停止。最内为舵角控制环,当舵叶转动时,在水动力力矩的作用下,产生转船力矩,进而实现航向或航迹的控制。

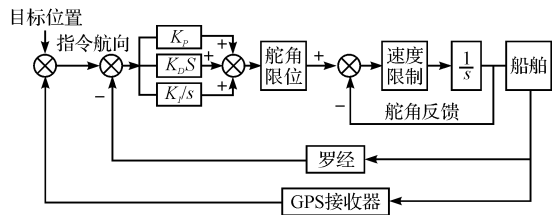


图 1 自动舵控制原理图

在对船舶航向进行控制时,通常采用 PID 控制^[6]策略。国内外众多学者对航向控制策略^[7-9]的研究表明,PID 控制结构简单,易于实现,控制效果好,具有一定的抗干扰能力,适合工程应用。PID 自动舵的控制律为:

$$\delta = K_p \psi + K_d \dot{\psi} + K_i \int \psi dt \quad (8)$$

式中 δ —舵角; K_p —比例系数; K_d —微分系数; K_i —积分系数; ψ —航向偏差信号; $\dot{\psi}$ —航向偏差信号的导数。

将式(8)代入式(6),可得:

$$T\delta^3 + (1 + KK_d)\delta^2 + KK_p + KK_i = 0 \quad (9)$$

取 K_p, K_i, K_d 必须使闭环控制系统特征方程(9)的根具有负实部。为了使闭环控制系统具有足够的稳定性, K_p, K_i, K_d 的参数可由下式的经验设计方法求出^[10-11]:

$$K_p = \frac{T\omega_n^2}{K}, K_d = \frac{2T\xi\omega_n - 1}{K}, K_i = \frac{\omega_n^3 T}{10K} \quad (10)$$

式中 K, T —野本模型参数; ξ —系统的相对衰减系

数,典型值可取为 $0.8 \leq \xi \leq 1.0$; ω_n —系统的自然频率 (rad/s),其选择受到舵机的特性频率 ω_s (rad/s) 和船舶的动态特性 $1/T$ (rad/s) 的限制,通常应该满足: $1/T \leq \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} + \sqrt{4\xi^4 - 4\xi^2 + 2} \leq \omega_s$ 。

3 系统的硬件设计

传统自动舵的中央控制单元通常采用工控机或者 PLC,成本较高。本研究设计的数字式自动舵,采用低成本、低功耗、高性能的 LPC2378 作为中央控制器。LPC2378^[12] 是一款基于 ARM7TDMI-S 核心的 ARM 处理器,包含了 1 个 10/100 M 自适应以太网接口、1 个 USB 2.0 全速接口、4 个 UART 通道、2 路 CAN 通道,内核采用 3.3 V 供电,I/O 口能够承受 5 V 电压。硬件系统框图如图 2 所示。系统主要有导航接口单元、人机界面单元、舵机驱动单元、舵角反馈单元、通讯扩展单元。

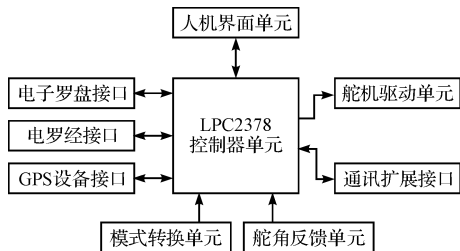


图 2 系统硬件框图

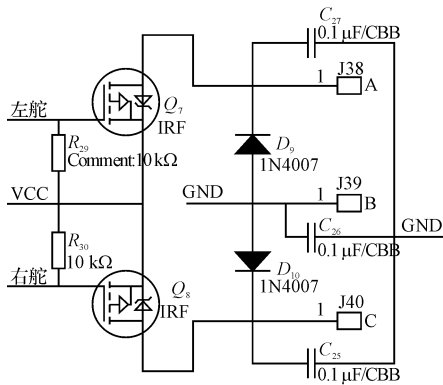


图 3 舵机驱动单元原理图

导航接口单元包括电子罗盘、电罗经、GPS 设备的接口,各导航信号依照 NMEA0183 协议通过串行接口与系统进行通讯。人机界面单元包括 LCD 显示电路、键盘输入电路、控制参数调节电路。舵角反馈单元用于测量实际舵角,为提高测量精度,采用外部 12 位 A/D 转换器 ADS7816 对舵机上高精度同轴电位器的信号进行模/数转换,ADS7816 通过 SPI 接口与 MCU 连接。驱动单元是系统的控制输出单元,根据 MCU 发出的控制指令,通过控制液压舵机上电磁阀的通断,从

而实现舵的左右转动,其原理图如图 3 所示。通讯扩展单元包括 1 个串行接口、1 个 CAN 总线接口和 1 个以太网接口,是为了以后系统升级而预留的通讯接口,如接入综合船桥系统 (IBS) 等。

4 系统的软件设计

在本研究中,软件设计采用自上而下的模块化设计方法。首先根据任务要求设计程序架构,划分各功能模块,定义各模块的接口,然后按模块进行设计。各功能模块主要有数据采集模块、人机界面模块、工作模式模块、报警信息模块、外部通讯模块等。各功能模块在主程序的合理调度下,实现系统的各项功能。其中工作模式模块包含对其它各模块的调用,是软件设计的核心。

简单工作模式直接控制舵机的转向,控制信号不经过 MCU 处理。

随动工作模式下需要实现的主要功能就是按照操作人员输入的舵角,控制舵机,使实际舵角快速精确地跟踪输入值。随动处理函数需要完成的工作包括采样输入值、实际舵角值,出错检测与处理,控制算法实现与计算结果输出,以及设定值、实际舵角值等参数的实时显示等。随动控制模式流程图如图 4 所示。

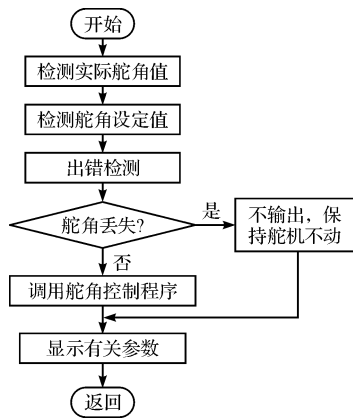


图 4 随动控制模式流程图

自动工作模式主要是船舶自动保持航向或航迹功能。本系统实现此模式功能在软件上所做的工作主要包括采集实际航向/航迹与设定航向/航迹、航向保持自动控制算法的调用、重要参数的实时显示、出错的检测与处理等。自动航向控制模式工作流程图如图 5 所示。

5 实验研究

由于自动模式的控制效果实验需在实船上进行,目前还只能进行随动性能的实验。随动实验效果如图

6 所示。将系统与液压舵机连接,设定值通过电位器模拟给定,舵的初始位置为 0° ,从图上可以看出,舵的动作时间滞后转舵指令 0.7 s ,向左打舵(从 $-30^\circ \sim 30^\circ$)时,运转平稳,基本无超调;当向右打舵(从 $30^\circ \sim -30^\circ$)时,运转平稳,但受舵机液压阀影响,有一次震荡过程,能较好地实现随动控制。从右舵 30° 到左舵 30° 的时间为 14 s ,满足通用技术条件要求。

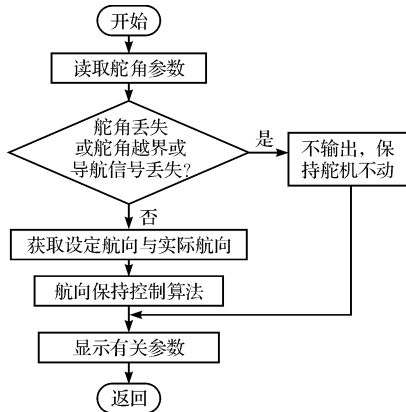


图 5 自动航向控制流程图

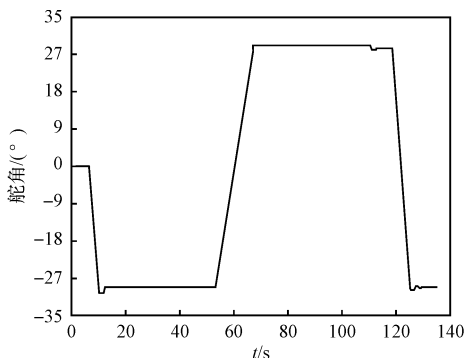


图 6 随动控制实际效果图

6 结束语

本研究设计的数字式自动操舵仪,软、硬件均采用模块化设计,具有电子罗盘、电罗经、GPS 等多种导航设备接口,具有简单、随动、自动等多种工作模式,既可实现低成本的自动航向控制,也能通过修改控制算法升级为组合导航,从而实现高精度的自动航向控制;既可作为独立的船控设备进行船舶操纵,也可通过预留的以太网接口或 CAN 总线接口接入综合船桥系统(IBS),

对船舶进行集成控制。试验结果表明此方案可行。本研究设计的自动舵,对我国在该领域技术水平的提升具有重要的意义,且结构简单、成本低、可靠性高,具有良好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 王科俊. 海洋运动体控制原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [2] 熊远生, 俞立, 徐建明. 数字式航向航迹自动操舵仪的设计与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 175 - 178.
- [3] TOKIMEC Inc. . PR-6000 Steering Stand Operator's Manual [EB/OL]. [2001 - 07 - 01]. <http://www.tokyokeiki-usa.com/uploads/files/200907201044127c7eee.pdf>.
- [4] SPERRY MARINE. Navipilot-4000 Product Brochure [EB/OL]. [2005 - 06 - 20]. <http://www.sperrymarine.northropgrumman.com/CustomPages/BrochureDownloads/Downloads/323/Product%20Brochure.PDF>.
- [5] 张显库, 贾欣乐. 船舶运动控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [6] 杨盐生, 于晓利, 贾欣乐. 船舶航向鲁棒 PID 自动舵设计[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(4): 11 - 15.
- [7] SAMANTA B, NATARAJ C. Design of intelligent ship autopilots using particle swarm optimization [C]//IEEE Swarm Intelligence Symposium. St. Louis MO USA: IEEE, 2008: 1 - 7.
- [8] LEE G, SURENDRAR S, KIM S. Algorithms to control the moving ship during harbour entry[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2009, 33(5): 2474 - 2490.
- [9] 杨盐生. 不确定系统的鲁棒控制及其在船舶运动控制系统中的应用[D]. 大连: 大连海事大学航海学院, 1999: 177 - 178.
- [10] 汤建斌, 蒋庆, 蔡晋辉, 等. 基于 ARM 微处理的自动称重选别系统[J]. 轻工机械, 2009(1): 58 - 60.
- [11] 谢 楫, 沈 希, 徐春伟. 基于 ARM 平台的制冷系统远程监测技术[J]. 轻工机械, 2008(6): 84 - 86.
- [12] NXP Semiconductors. LPC23XX User Manual [EB/OL]. [2008 - 03 - 11]. http://www.zlgmcu.com/philips/NXP_ARM_2300.asp/LPC23xx_us_en.pdf.

[编辑: 柴福莉]