

文章编号: 1001-2486(2008)01-0110-05

# 基于 DSP 的主动式波浪补偿起重机控制系统设计\*

徐小军, 何平, 陈循, 尚建忠

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 设计了一种基于 DSP(Digital Signal Processing) 的主动式波浪补偿起重机的控制系统, 分析了系统的工作原理与功能要求, 研究了 DSP 控制核心及其外围接口, 完成了前向通道设计 ZRS-422 串行通信人机接口设计、后向通道设计以及整个 DSP 控制系统软件设计, 并采用 Matlab 进行了系统仿真。将该控制系统成功应用于主动式波浪补偿系统缩比样机, 实验表明样机的主动补偿性能良好, 工作稳定可靠。

**关键词:** DSP; 波浪补偿起重机; 微机控制

**中图分类号:** TH132.41 **文献标识码:** A

## Design of Control System for an Active Heave Compensation Crane With DSP

XU Xiaojun, HE Ping, CHEN Xun, SHANG Jianzhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on TMS320L F2407, a micro-computer control system used for an active heave compensation crane is designed. The working principle and function request of the control system is analyzed. The designing of the kernel of the DSP control system and the peripheral circuit were described in detail. The foreword channel, RS-224 serial man-machine interface, backward channel and the whole DSP control system software were designed, and the simulations were done with the MATLAB. The control system was implemented in a reduce-scaled prototype of the active heave compensation crane, and the test results show that the prototype works with a stable state of the active compensation character.

**Key words:** DSP; heave compensation crane; microcomputer control

当两船在海上进行货物横向靠帮补给时, 由于波浪作用, 两船的横摇、纵摇以及升沉引起的相对运动, 造成下放中的货物与上升的船体发生碰撞, 或已放落到甲板上的货物由于船体的下沉出现再次悬空的现象, 同时还将引起起吊绳索的拉力发生很大变化。为了确保吊装的安全, 需要使原起重机增加波浪补偿功能。波浪补偿起重机工作条件多变, 影响因素多, 而且对快速响应性、适应性都有较高的要求。波浪补偿起重机的控制系统是整个系统的核心。良好的控制性能和可操作性是起重机安全作业的前提。

### 1 波浪补偿起重机工作原理及控制系统功能要求

起重机在海上作业时, 波浪使补给舰和被补给舰呈现复杂的波动状态, 本文仅考虑对升沉运动的补偿。如图 1 所示, 波浪补偿系统结构由检测系统、控制系统、电液伺服系统和机械执行系统组成, 系统利用内嵌于卷扬机的差动行星齿轮传动机构的调速特性来实现补偿, 工作原理的详细描述见文献[1]。根据波浪补偿要求和实际指标, 控制系统必须具备以下功能: (1) 自动检测舰船各方向的受迫运动, 包括横摇、纵摇和垂直波动; (2) 实时控制液压马达转速, 包括大小和方向; (3) 实时控制钢绳的张力; (4) 故障自诊断和报告, 记录系统的状态; (5) 与整个波浪补偿系统有连接的硬件接口。

波浪补偿控制系统涉及速度和张力两方面的补偿控制, 控制原理如图 2 所示。它根据两船相对速

\* 收稿日期: 2007-08-30

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: (1972-), 男, 副教授, 博士生。

度、绳索张力以及液压执行机构输出速度的大小,进行实时运算,给出控制信号,对液压执行机构的速度进行调整,直至达到要求。

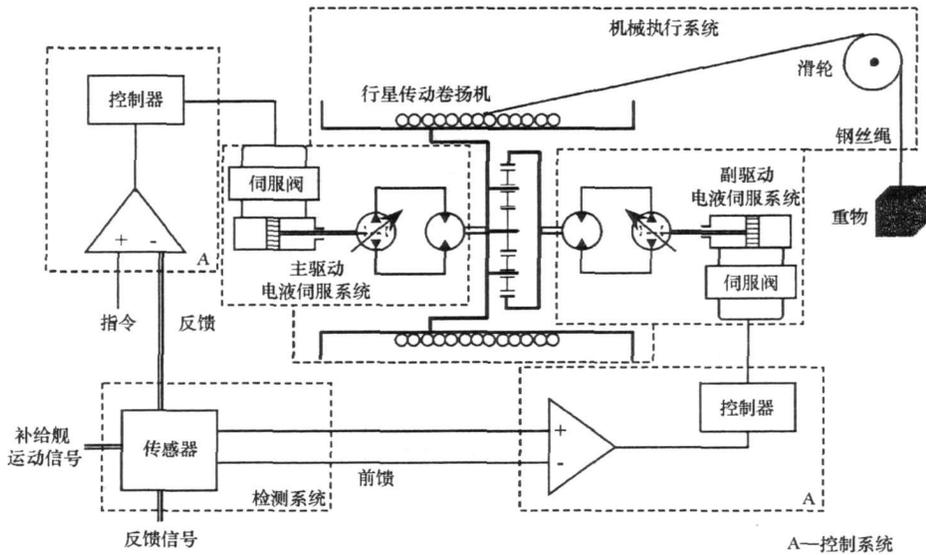


图1 波浪补偿系统结构图

Fig. 1 Structure of the heave compensation system



图2 波浪补偿控制系统原理图

Fig. 2 Principle of control system of the heave compensation system

## 2 波浪补偿控制系统设计

### 2.1 控制系统组成

主动式波浪补偿控制系统主要由以TMS320LF2407A为核心的控制器、传感器及其输出信号处理电路、控制信号输出接口电路、通信接口电路和监控软件等组成。如图3所示。

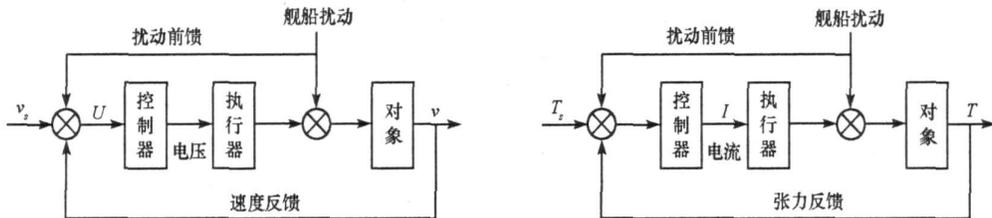


图3 控制系统电路结构图

Fig. 3 Circuit structure of the control system

在进行海上补给的过程中,海况时刻在发生变化,引起补给舰的升沉、横摇、纵摇运动,波浪补偿起重机控制系统存在参数时变,负载扰动以及被控对象的严重非线性、强耦合等不确定因素。因此,系统不仅要求满足补偿系统的快速跟踪、准确定位等动态特性,还应具有抑制各种非线性因素对系统的不良影响,具有良好的鲁棒性等要求。为了减小甚至消除海况对补给舰进行并靠补给作业的影响,提高补

给舰并靠补给的安全性和高效性, 控制系统不仅要能够实时检测补给舰运动状态、补给物资运动状态、补给装置状态和海况, 并对补给舰运动状态进行预测, 还要能够实现控制器参数的自动调整和补给装置的实时控制。本系统采用具有高运算速率和高控制能力的 DSP 作为控制器处理核心, 充分利用 DSP 的高性能和丰富的硬件资源, 提高波浪补偿系统的控制精度、实时性和抗干扰能力<sup>[2,4]</sup>。

### 2.2 前向通道设计

DSP 控制系统的前向通道由加速度传感器、速度传感器、张力传感器、位移传感器和前向调理电路构成, 如图 4 所示。前向信号调理电路的作用是对传感器输出的电压电流信号进行放大、滤波和运算, 得到满足 A/D 采集芯片要求的信号。前向通道主要完成两方面的信号检测。

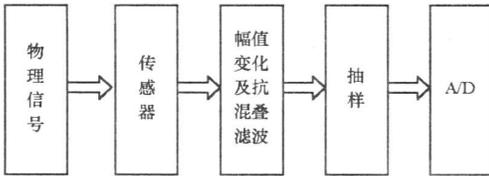


图 4 DSP 控制系统前向通道  
Fig. 4 DSP control system forward channel

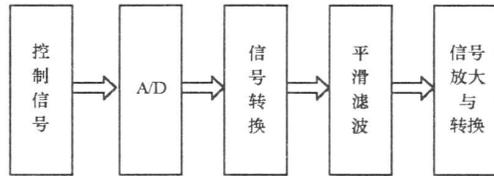


图 5 DSP 控制系统后向通道  
Fig. 5 DSP control system backward channel

#### (1) 舰船运动干扰信号检测

采用船舶加速度传感器。补给舰和被补给舰分别安装加速度传感器, 检测各自的升沉、横摇和纵摇运动状态。船舶加速度信号是补偿信号的来源, 因此提高舰船加速度检测精度和检测系统实时性是波浪补偿控制的关键。通常可采用传感器阵列的方式提高检测精度。

#### (2) 补给装置反馈信号检测

反馈信号包括补给物资相对于被补给舰的速度和距离信号、钢丝绳张力信号。采用速度和位移传感器检测补给物资的相对速度和位移。补给装置中物资位置变化范围很大, 要求选用的位移传感器具有大量程、非接触式的特点。张力传感器用于检测起重钢丝绳的张力。由于在进行补给作业的过程中钢丝绳张力在一定的范围内波动, 这就要求张力传感器不仅有大量程, 还要有宽频带。

传感器高精度实时检测各状态是波浪补偿控制的重要基础。

### 2.3 后向通道设计

DSP 控制系统的后向通道设计的目的是实现波浪补偿原理和对液压伺服驱动系统的控制, 后向通道由串行外设接口 SPI (Serial Peripheral Interface) 模块、两路 D/A 转换芯片和后向信号处理电路构成。后向处理电路的作用主要是对 D/A 输出的控制信号进行平滑滤波、转换放大, 得到符合液压伺服驱动系统输入标准的控制信号, 如图 5 所示。

两路 D/A 转换信号分别控制液压伺服驱动系统的主驱动和副驱动, 主、副驱动信号经差动式行星卷扬机进行补偿运算, 实现波浪补偿。

### 2.4 RS-422 串行通信人机接口设计

为实时监视波浪补偿系统运行状态、系统状态变量与参数和设置系统参数, 采用 MAX232 接口芯片设计了基于 RS-232 的 DSP-PC 机串行通信接口电路, 实现了 DSP 的 TTL 电平与 RS-232 传输电平之间的转换, 其结构如图 6 所示。人机接口配置相应的监控软件, 完成对波浪补偿系统的实时监控<sup>[5]</sup>。

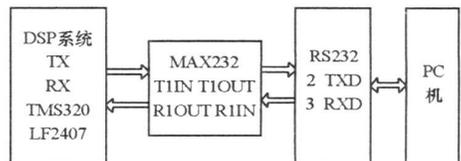


图 6 DSP 与 PC 的硬件连接电路框图  
Fig. 6 DSP-PC connection framework

### 3 波浪补偿控制系统软件设计

DSP 芯片是波浪补偿控制系统的运算核心, 它完成了控制系统输入信号的 A/D 采集与预处理, 数字 PID 控制算法实现、控制决策以及串行通信。整个系统的控制流程如图 7 所示。

#### 3.1 信号采集与预处理

前向通道信号是传感器检测信号, DSP 通过 5 个 A/D 转换通道对各路信号按一定的时序进行采样。采样间隔可通过系统最高工作频率  $f_{\max}$  确定<sup>[3]</sup>:

$$\Delta t = \frac{1}{(3 \sim 4)f_{\max}} \quad (1)$$

采样后需要对数据进行降噪滤波处理, 包括: 去直流分量, 消除高频分量和低频分量, 消除趋势项和剔出野点等。

#### 3.2 数字 PID 控制算法

把典型的 PID 控制与智能的神经网络控制有机地结合起来, 构成单神经元 PID 控制器。单神经元 PID 控制器是最简单的神经网络 PID 控制器, 兼备 PID 控制和神经网络控制的优点, 不但结构简单, 而且具有一定的自适应性和较强的鲁棒性。

考虑到控制过程中, 液压伺服系统的启动、停止和大幅度增减设定, 短时间内系统输出有很大的偏差, 会造成 PID 运算的积分积累, 致使控制量超过执行机构可能允许的最大动作范围对应的极限控制量, 引起系统较大的超调, 甚至引起系统较大的震荡。因此可以采用积分分离的思路, 当被控量与设定值偏差较大时, 取消积分作用, 以免由于积分作用使系统稳定性降低, 超调量增大; 当被控量接近给定值时, 引入积分控制, 以便消除静差, 提高控制精度。

#### 3.3 控制决策

在波浪补偿系统对补给装置进行补偿控制的过程中, 针对当前补偿系统的运行状态或异常状况需要快速地作出正确的控制决策。

当传感器检测到补给物资相对被补给舰的距离为 0, 而且钢丝绳张力也变为 0 时, 这表明补给物资安全吊装成功, 补给任务完成。这时控制系统应当作出补给完成的决策, 并准备新的补给任务。当张力传感器检测到钢丝绳承受的拉力超过钢丝绳的最大承载能力时, 控制系统应当立即发出报警信号, 并根据警告类型做出判断, 执行相应的动作, 以保护波浪补偿起重机。

#### 3.4 SCI 模块串行通信

在波浪补偿控制系统中, 串行通信的目的是实现实时监视系统的运行状态、系统状态变量与参数和系统参数的设置。因此在软件设计中考虑减少对 DSP 时钟的占用, 以提高控制器运算速度, 提高控制系统的实时性。一方面, 不专门设计通信函数, 只需在控制器运算结束后给串行通信寄存器写入相关的数据; 另一方面, 降低数据通信的频率, 即在控制系统完成  $k$  次信号采集、数据处理和控制器运算后, 进行一次数据通信。

### 4 动态仿真

采用 MATLAB/Simulink 仿真, 补给速度设为  $0.3\text{m/s}$ , 舰船扰动信号为  $\sin(\frac{\pi}{5}t + \varphi)$ , 补给舰和被补给舰扰动信号相位差为  $\frac{3}{5}\pi$ , 补给物资重量为  $1000\text{kg}$ 。仿真结果图 8(a) 表明, 吊装物体相对被补给舰的速

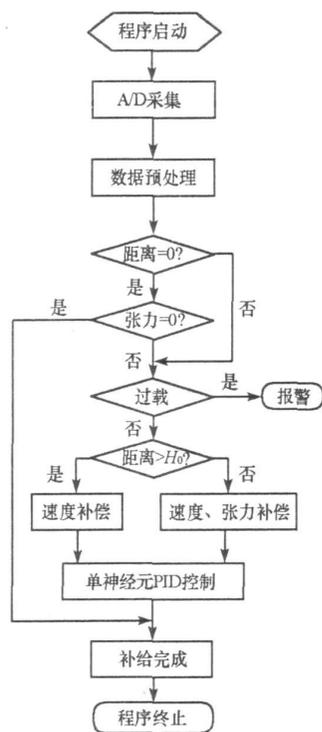


图 7 控制系统流程图  
Fig. 7 Flow chart of the heavy component control system

度始终保持在  $0.3 \pm 0.01 \text{ m/s}$ , 与图 8(b) 相对应的是物体相对被补给舰的距离与时间呈线性关系, 即物体在控制系统的作用下能相对于被补给舰匀速下降。图 8(c) 给出了钢丝绳张力随时间变化的曲线, 从该图可以看出钢丝绳的张力变化幅度不超过 6%。

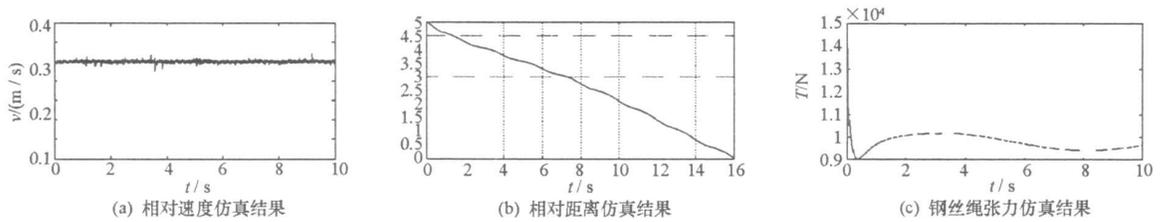


图 8 波浪补偿系统控制仿真

Fig. 8 Heave component control system simulation

## 5 控制实验与分析

### 5.1 实验设计

波浪补偿控制系统性能指标如表 1 所示。根据性能指标完成了波浪补偿缩比样机的设计(如图 9 所示), 两船的上下波动采用机械装置实现正弦波上下运动。

表 1 波浪补偿控制系统性能指标

Tab. 1 Performance of heave component control system

项目	工程机指标	缩比样机指标(1:5)
额定载荷(t)	2.5	0.02
变幅范围(m)	4.5~14	0.2~2.1
垂直补偿范围(m)	$\pm 6$	$\pm 1.2$
相应时间(s)	$\leq 0.5$	$\leq 0.224$
稳态误差	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
最大补偿速度(m/s)	1.2	0.537
最大补偿加速度( $\text{m/s}^2$ )	1	1

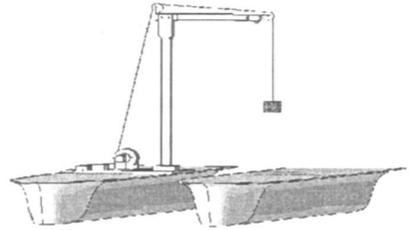


图 9 波浪补偿系统缩比模型

Fig. 9 Heave component system reduced-scale prototype

### 5.2 实验结果与分析

缩比模型实验结果表明: 吊装物资相对被补给舰的速度始终保持在  $0.5 \text{ m/s}$  范围内, 距离与时间基本呈线性关系; 钢丝绳张力变化幅度最大为 7.6%; 一般理想的被动波浪补偿系统, 钢丝绳张力变化幅度为  $8\% \sim 12\%$ <sup>[6]</sup>, 因此, 系统主动补偿效果较好。理想的主动式波浪补偿要求保持吊装物资与被补给船的相对速度为 0, 钢丝绳张力变化幅度最大为 2%。因此需要在机械装置的传动精度、控制的响应速度、检测系统的检测精度上对整个系统进行深入研究。

## 6 结论

设计的基于 DSP 的主动式波浪补偿控制系统效果良好, 在实验室里完成了缩比样机初步的试验, 取得了预期的结果, 得到了若干重要的经验, 为进一步开展波浪补偿起重机工程样机的研制工作打下了坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] 徐小军. 一种新型主动式波浪补偿系统的原理及数学建模[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3).
- [2] Bleuler H, Gahi E Y C, Herzog R, et al. Application of Digital Signal Processors for Industrial Magnetic Bearings[J]. IEEE Trans. Control Systems Technology, 1994, 2(4).
- [3] 温熙森, 陈循, 徐永成, 等. 机械系统建模与动态分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 曹建树. 基于 DSP 的焊缝自动跟踪控制系统设计[J]. 机械工程学报, 2005(9).
- [5] 刘淑琴, 刘庆亮, 陈大融, 等. 基于 DSP 的快速最优 PID 控制在磁悬浮轴承中的应用[J]. 机械设计与研究, 2003(10).
- [6] Love L J. Compensation of Wave-induced Motion and Force Phenomena for Ship-based High Performance Robotic and Human Amplifying Systems [EB]. <http://www.osti.gov/bridge>, 2003, 10.