

# 通用智能型舰炮载荷仿真系统设计

李刚, 闫伟杰

(中国人民解放军92941部队4分队, 辽宁葫芦岛 125001)

**摘要:**针对舰炮武器系统仿真试验需求,设计了以DSP为核心控制器,高性能正弦波变频调速系统为驱动对象的舰炮载荷仿真系统;采用将数字载荷波形直接转换成模拟量进行力矩驱动的控制策略,结合软硬件设计,实现了在Windows环境下高频率复杂力矩波形的实时控制和显示;测试结果表明:该系统易于操作使用,具有通用化、智能化特点。

**关键词:**舰炮载荷仿真;力矩驱动;DSP控制

中图分类号:TJ306

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)10-0076-04

## The Emulate System Design of General-duty and Intelligent Naval Gun Load

LI Gang, YAN Wei-jie

(94 Element of 92941 Unit, PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** Aimed at the emulator trial demand of naval gun weapon system, taking the DSP as vital controller and the sine-wave variable-frequency speed regulating system with high-performance as drive object, an emulate system of naval gun load is designed. By converting digital load wave into analogue which is used to torque driving directly, combining with software and hardware design, the real-time control and display of high-frequency and complex torque waveform in windows environment are realized. The test results show that the system is easy to operate and use and has the characters of generalization and intelligence.

**Key words:** naval gun emulate system; torque driving; DSP control

仿真试验在各种武器的研制过程中广泛地应用。舰炮武器系统半实物仿真试验作为一种新的试验手段,是仿真技术在舰炮武器系统试验领域中的应用,是对舰炮武器单一外场试验模式的必要补充和完善,其目的在于更多地获取舰炮武器全寿命管理进程中的信息,为最终科学评定舰炮武器系统提供辅助依据<sup>[1]</sup>。通用智能型舰炮负载仿真系统是舰炮武器系统仿真试验设备的重要组成部分,为舰炮随动系统实体或随动系统仿真器提供了负载驱动平台,通过人机交互,能够实现较高逼真度的多种型号舰炮静、动态负载特性的仿真效果,具有通用性和智能化的特点。

### 1 关键技术及系统总体设计

舰炮载荷仿真系统按实际工况条件模拟舰炮随动系统摩擦力矩、正弦负载力矩、舰艇摇摆力矩、俯仰运动不平衡力矩、转管炮陀螺力矩和射击冲击力矩等,采用何种加载方式实现高重复频率的舰炮负载力矩,是能否逼真地模拟舰炮射击动态的关键。以往的负载模拟系统所选用的加载方式大致是:直流发电机加载、磁粉离合器加载、电液伺服装置加载等<sup>[2-6]</sup>。本系统采用交流伺服驱动装置与被试舰炮数字交流随动系统构成伺服驱动器—电动机互馈对拖的测试平台<sup>[7]</sup>,模拟舰炮随动系统的负载变化,可以实现高频速度和

转矩的灵活调节,克服了直流发电机加载系统结构复杂、磁粉离合器磁滞效应和电液伺服回馈多余力矩的缺点。

舰炮载荷仿真系统由加载控制计算机(方向系统、高低系统共用)、加载控制器、加载驱动器、加载电动机、负载惯量盘和刚性试验台架组成,如图1所示。基本工作流程:加载控制计算机通过网络接收来自于模拟火控设备的射控指令(击发指令、射弹数指令或射击时间等),加载控制器根据加载控制计算机发送来的设置指令,产生加载控制指令,转换为模拟控制量输出到加载驱动器,实现对加载电机的可编程控制。同时,加载控制计算机将每一个载荷波形周期作为射弹计数信息发送给火控系统,并实时接收被试舰炮随动系统(或随动系统仿真器)架位回馈,根据架位回馈来实时调整冲击力矩的大小,在指定架位处施加力矩,显示所施加力矩载荷曲线,分析显示时间点处的力矩值。

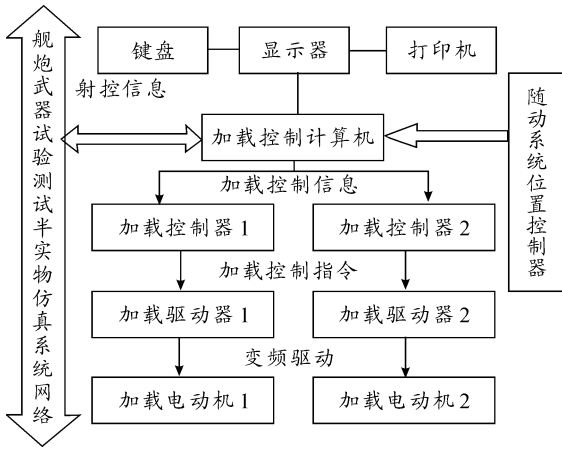


图1 载仿系统整体结构及信息流程

## 2 系统硬件设计

### 2.1 惯性负载

系统用惯量系来等效舰炮负载在随动系统执行电机轴上的折算值。惯量系总转动惯量  $J_i$  为固定部分转动惯量  $J_s$  (联接轴、联轴节、固定盘、加载电机转子) 和活动惯量盘转动惯量  $J_R$  之和(图2),活动惯量盘用于调节惯量系转动惯量,以等效不同型号舰炮负载的折算值,其厚度尺寸(试验台架中心距为定值,固定盘和活动盘外径尺寸即为定值)计算为:

若惯量系以角速度  $\Omega_d$  旋转所贮藏的动能等于随动系统执行电机以角速度  $\Omega_d$  拖动舰炮处于正传动工作状态时整个系统贮藏的总能量,则惯量系总转动惯量  $J_i$  即为舰炮系统向执行电机轴上折算的总折合转动惯量,有

$$J_i = J_d + J_r + J_c/\eta^2 \quad (1)$$

活动惯量盘的转动惯量为

$$J_R = J_r + J_c/\eta^2 - J_s - J_r' \quad (2)$$

活动惯量盘的厚度尺寸为

$$L = \frac{2(J_r + J_c/\eta \cdot i^2 - J_s)}{\pi\rho(R^4 - r^4)} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $J_d$  为被试随动系统执行电机转动惯量; $J_r$  为

舰炮减速器正传动时折算到执行电机轴上的折合转动惯量(在实际系统中,通常减速器齿轮系统速度比较大,只需考虑第一级齿轮的转动惯量); $i$ 、 $\eta$  为舰炮减速器的传速比和传动效率; $J_r'$  为被试舰炮随动系统执行电机安装试验台架的减速器正传动时的转动惯量(通常为小模数齿轮,在计算活动盘转动惯量时可以忽略不计); $J_c$  为舰炮负载转动惯量; $R$ 、 $r$  为活动盘外、内半径; $\rho$  为活动盘质量密度。

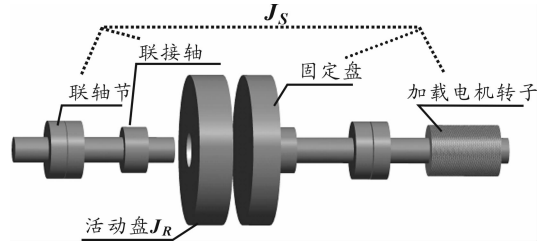


图2 惯性负载结构示意图

### 2.2 加载电机和加载驱动器选择

加载电机选用科尔摩根(KOLLMORGEN)金线(Gold-Line)系列中等惯量的M607B(11.2 kW、3 050转、额定转矩为44.6 N·m)永磁同步电动机,电机按IP65电动机防护等级生产,使电动机具有卓越的连续和峰值力矩特性,且能在严酷的工业环境中可靠地运行。加载驱动器(包括电源模块)选用与加载电动机相适应的BDS5全数字交流调速驱动器。BDS5系列为全功能、高性能的无刷位置控制伺服驱动器,它集成度高、体积小,是同类产品同等功率中体积较小的一种,且功能全,把位置控制器、伺服放大器、输入/输出接口、串行通信等集成在一个系统中,代表了当代永磁交流伺服系统驱动器的最新水平。

系统设计中,将加载系统驱动器的工作模式设置为力矩工作状态,即使驱动器的内部参数  $TQ = 1$ 。这时电机电枢的电流大小仅与给定的转数指令成正比,其电流方向取决于转速指令的正负符号,电机则输出一个大小与方向均确定的力矩,工作原理如图3所示。 $P_{cmd}$  表示从用户的轨迹图中得到的位置指令; $V_{cmd}$  表示从  $P_{cmd}$  中得到的速度指令; $I_{cmd}$  表示从速度指令  $V_{cmd}$  得到的电流大小指令。由图3虚线框中可知, $I_{cmd}$  是速度指令  $V_{cmd}$  和比例因子  $K_{prop}$  的乘积,当然在计算过程中要经过驱动器内部程序对各单位进行一系列转换。例如,当  $V_{cmd} = 100$  rpm,  $K_{prop} = 528$  时,  $I_{cmd} = 3\%$  额定值,则可得到输出转矩  $T = 0.141$  N·m(作用在电机轴上的力矩)。

### 2.3 加载控制器

标准的BDS5驱动器配置为外部数字量输入,但在本系统中,若要以数字方式实现力矩控制,需在DOS平台BDSS MotionLink环境下运行驱动器提供的类似BASIC语言的转速指令编程,人机交互性差,不易操作使用。作为一个选择,BDS5提供了外部模拟输入模式(图3),因而系统设计了以DSP芯片为控制核心的加载控制器,接收加载控制计算机发送来的载荷波形指令信号,采样电机状态,根据指令实现相应的力矩控制模式,利用D/A芯片产生模拟控制信号,使用

模拟量输入口控制驱动器与加载电机,提供各种形式力矩。对应的关系为当外部模拟电压为 10 V 时,电机的转速为最大值。加载控制器主要由核心控制单元和检测信号输入、控制信号输出、数据通信等单元组成。

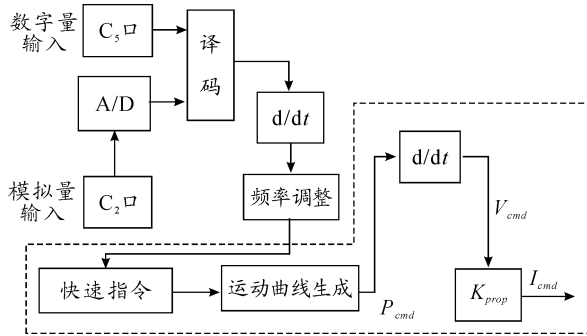


图3 驱动器力矩模式工作原理框图

核心控制芯片采用 TI 公司的 TMS320F2812 数字信号处理器<sup>[8-9]</sup>,32 位的 F2812 整合了 DSP 和微控制器的最佳特性,提高了数字信号处理器运算的精度(32 位)和系统的处理能力(时钟周期 6.67 ns,最高 150 MIPS),能够在 1 个周期内完成  $32 \times 32$  位的乘法累加运算或 2 个  $16 \times 16$  位乘法累加运算。由于器件集成了快速的中断管理单元,使得中断延迟时间大幅减少,满足了实时控制的需要。本系统使用的 I/O 较多,主要用于与数字式随动系统位置控制器交互数字信息。由于 F2812 的外围电路采用 3.3 V 供电,因此采用双列贴片 48 管脚封装的 74ALV164245 作为电平变换芯片,完成 F2812 芯片与 5 V 供电的外围器件的数据交互任务。

加载控制信号输出采用 12 位高精度的 AD767 作为数模转换芯片,将加载计算机传来的仿真载荷波形数据转换成加载驱动器可接收的  $\pm 10$  V 电压信号。

系统采用 DIO-48 型 ISA 数字量输入/输出卡,完成加载计算机向加载控制器发送的仿真载荷数据和加载控制器向加载计算机传递的被试随动系统(或仿真器)速度信号,这是 2 种不同数据格式的数据传输。

### 3 系统软件设计

通过对舰炮载荷环境的分析,舰炮随动系统大多数情况下承受的是阻性载荷,阻性载荷主要包括干扰阻力矩和库仑摩擦力矩。本系统中对于摩擦力矩的仿真通过加载控制器的 A/D 部分采集电压信号,检测舰炮随动系统运行方向,然后通过 D/A 部分给处于力矩工作模式的加载驱动器加上一个代表力矩大小的电压。对于干扰力矩的仿真,是通过典型的负载曲线或加入事先编辑好的特定波形文件 data.txt 来实现的。

系统软件主要完成硬件初始化、工作模式(单机或网络)选择、典型载荷曲线参数设置、载荷实时显示与分析等功能。

利用 Visual C++ 作为软件开发工具,它提供了强大的图形界面功能,使得开发出来的应用程序具有友好的界面,具

有易操作性、易维护性和良好的人机交互功能。并采用数据采集卡提供的端口操作函数进行硬件 I/O 编程。

软件整体设计框图如图 4 所示,采用 MFC 提供的多线程技术,工作线程也就是子线程负责数据采集,将采集到的数据放到全局对象缓冲区。加载模拟信号通过主线程的显示模块显示给用户。D/A 模块通过全局数据缓冲区中的数据来判断被试舰炮随动系统(或仿真器)的运行方向,然后通过软件定时部分加载适当频率的典型载荷曲线。

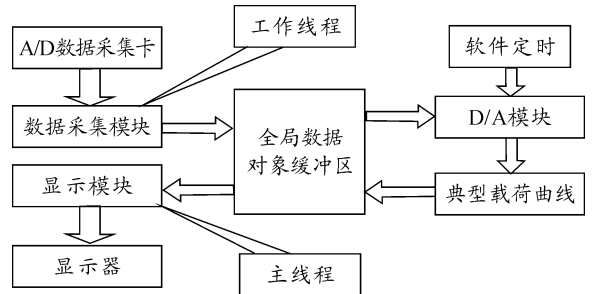


图4 软件设计整体框图

为得到连续数据和加载高频载荷,软件设计过程中,应用到数据采集的双缓冲技术和软件精确定时技术等。

### 4 系统调试与测试

加载计算机与加载驱动器通过 RS-232 串口建立通信,在 Windows 环境下运行驱动器运动链接软件(BDS5 MotionLink Plus),进行加载驱动器参数、变量配置和系统试运行,软件界面如图 5 所示。

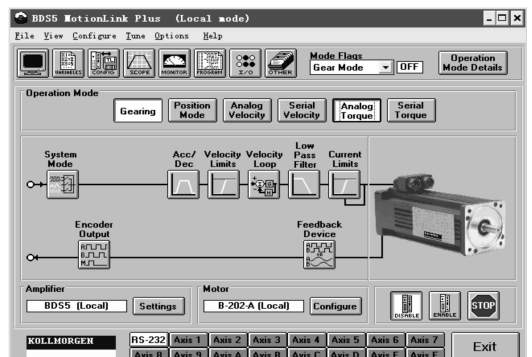


图5 BDS5 驱动器配置界面

位置环开关断开:  $PL = 0$ ; 电流环开关接通:  $TQ = 1$ ; 比例速度环/积分速度环选择开关接通(速度误差与比例常数  $K_{prop}$  相乘,产生电流命令  $I_{cmd}$ ):  $PROP = 1$ ; 电子齿轮 GEAR1/GEARO 设置为当输入电压为 10 V 时,电机的转速最大。

驱动器配置的最重要目的是实现恒定的滞后功率因数控制,以保证系统开环运行的稳定性。试运行结果表明,当功率因数控制在 0.85 滞后功率因数时,加载电动机在转矩 ( $0 \sim 28 \text{ N} \cdot \text{m}$ ) 和频率 ( $0 \sim 30 \text{ Hz}$ ) 的整个工作范围内能维持稳定运行,此外,当指令发生阶跃变化时,系统仍能维持稳定

运行。

加载驱动器配置完成并咨询参数正确后,断开串行通信连接。以某型小口径舰炮为对象,按国家军用标准舰炮随动系统“航行间”性能试验的要求<sup>[10]</sup>,进行舰艇横摇时方位随动系统摇摆转矩的仿真加载测试。运行系统应用软件,系统自动完成板卡自检和软件参数初始化。本例中选择“单机非限位”工作模式(单机非限位、单机限位、网络);选择“方位载荷信号”参数设置(方位信号、高低信号、方位和高低信号)。“信号参数”(即载荷)计算为:

舰艇横摇时,摇摆惯性力 $Q_j$ 与舰炮旋迴部分重力 $Q_F$ 在平行于舰炮座圈平面上的分力的最大值分别为

$$Q_{j\max} = Q_F \ddot{\theta}_{jm} R' \cos\theta_{jm} \quad (4)$$

$$Q_{Fy\max} = Q_F \sin\theta_{jm} \quad (5)$$

若舰艇横摇按正弦谱运动,则横摇时总摇摆转矩在方位随动系统执行电机轴上的折算为

$$M_S = (M_{jy} + M_{Fy}) i \eta = \frac{Q_F r' (\ddot{\theta}_{jm} R' \cos\theta_{jm} + \sin\theta_{jm})}{i \eta} \sin \frac{2\pi t}{\tau} \quad (6)$$

式(4)~(6)中: $R'$ 为舰炮旋迴部分重心到舰艇重心距离; $r'$ 为炮旋迴部分重心与迴转轴心的偏距; $\theta_{jm}$ 、 $\ddot{\theta}_{jm}$ 为舰艇某级海况下最大横摇角和最大横摇加速度; $\tau$ 为横摇周期。式(6)中, $Q_F$ 、 $R'$ 、 $r'$ 、 $\theta_{jm}$ 、 $\ddot{\theta}_{jm}$ 、 $\tau$ 均为常量,故“信号参数”选择“正弦波”,键入“幅值”为计算的最大总摇摆转矩折算值,“周期”为 $\tau$ 。

点击“开始”,系统运行,加载计算机显示所施加载荷的波形曲线。

## 5 结束语

大多数情况下,舰炮随动系统的负载环境可以用干扰摩擦力矩和惯性负载力矩2种组合来表示。舰炮载荷仿真系统设计中采用D/A转换芯片将计算机载荷曲线直接转换为加载驱动器所需模拟量,实现高频率复杂载荷波形的可靠输

出,并采用多线程、数据采集双缓冲、软件精确定时等软件技术,保证载荷控制和显示在Windows环境下的实时性。

系统通过ISA板完成被试随动系统架位和加载控制2种不同格式的数据交互,并通过网络适配器完成与“模拟火控设备”射控信息交互,实现按指定架位自动完成“射界内加载”和“模拟火控设备”直接操控功能。

测试与实际使用表明,舰炮载荷仿真系统人机界面友好,易于操控,具有通用化、智能化的特点。

## 参考文献:

- [1] 黄守训. 舰炮武器系统试验与鉴定[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 杨凯,石航飞,陈志锦,等. 一种伺服驱动系统检测平台[J]. 兵工自动化,2010,29(1):89-93.
- [3] 王跃武. 自适应控制在随动系统测试装置中的应用与研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- [4] 袁文,刘廷章,张国平,等. 力矩电机伺服系统性能测试技术[J]. 微电机,2010(12):87-89.
- [5] 张晨光,闫英敏,陈永利. 数字式直流伺服系统性能测试系统设计[J]. 电子测量技术,2010,33(8):46-49.
- [6] 周成胜,刘君,晏克俊,等. 某型伺服系统性能测试技术研究[J]. 计算机测量与控制,2008,16(1):33-35.
- [7] 张永鑫,杨喜军,姜建国. 永磁同步电动机互馈对拖测试平台的研究[J]. 电机与控制应用,2010,37(2):47-52.
- [8] 张雄伟,邹霞,贾冲. DSP芯片原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 王楠,曾连荪. 基于DSP的数据采集处理系统研究[J]. 信息技术,2010(10):143-145.
- [10] 韩友和,赫赤. 火炮随动系统定型试验规程[Z]. 北京:解放军总装备部,2008.

(责任编辑 杨继森)