

# 基于 cRIO 的快速伺服控制原型系统设计

王 卿<sup>1,2</sup>, 王 汀<sup>2</sup>, 胡 贞<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

**摘要:** 针对传统惯导设备伺服回路控制系统人机交互能力差, 调试验证手段不够灵活的问题, 提出一种基于 cRIO 的快速伺服回路控制原型半实物仿真系统; 在分析了惯导设备位置伺服回路原理及对比了几种仿真平台特点的基础上, 完成了系统总体架构、cRIO 快速控制原型软硬件系统搭建、外围驱动电路设计及 Labview 软件程序编写, 最终进行了实物在环仿真实验; 结果表明其功能实现正常, 与理论控制系统模型契合度较高, 是一种高效实时验证模型及控制性能的手段。该系统设计对今后各领域伺服回路控制系统设计尤其是高精度机电伺服系统研制效率进一步提高提供了一定指导作用。

**关键词:** 快速控制原型; Labview; 伺服控制; cRIO

## Design of Rapid Position Servo Control Prototype System Based on cRIO

Wang Qing<sup>1,2</sup>, Wang Ting<sup>2</sup>, Hu Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The traditional servo loop control system of the navigation system lacks the ability of human-computer interaction and flexible verification methods. To solve the problem, a rapid position servo control prototype simulation system based on cRIO is presented. Based on the analysis of the principle of the position servo circuit of the inertial navigation equipment and the comparison of the characteristics of several simulation platforms, the overall architecture of the system, the building of the software and hardware system of the rapid control prototype of cRIO and the design of peripheral drive circuit and Labview software program are completed, and finally the semi physical simulation experiment is carried out. The results show that the system functions well, and the model fit well with the theoretical control system, which is proved to be an efficient and real-time mean for the verification of model and control performance. The design plays a guiding role in the design of the servo loop control system on the future and especially offers guidance for improving the efficiency of the development of high precision servo system.

**Keywords:** rapid control prototype; Labview; servo control; cRIO

## 0 引言

在精密仪表设备领域伺服回路的应用场合颇多, 随着仪表设备集成度越来越高及产品批量化进度日益加快, 对伺服控制系统可靠性要求也随之提高, 需要对其进行多次测试验证。因此若在研制前期阶段运用快速控制原型系统进行算法模型的实时验证, 就能有效避免研制周期延长、费用增加等问题。快速控制原型就是在系统硬件未完善时将控制算法下载到实时仿真设备并连接实物对象进行调试验证<sup>[1-2]</sup>。这项技术近年来在国内自动控制领域广泛应用, 如王建锋等人建立了航空发动机快速控制原型系统<sup>[3]</sup>, 王偃薪等实现了内燃机喷油器快速控制原型<sup>[4]</sup>, 吕强等基于快速控制原型设计了倒立机器人<sup>[5]</sup>, 这些研究工作对快速控制原型技术进一步发展起到推动作用。在伺服控制领域, 白金泽等人利用 MATLAB 中的 RTW 模块和 xPC 模块实现了液压伺服快速控制原型技术<sup>[6-7]</sup>, 王晓琳等也开发了基于 MATLAB/RTW 的控制器快速原型而实现了冲床伺服

驱动<sup>[8]</sup>, 上述研究均以 MATLAB 中的实时模块作为实时环境并结合代码自动生成工具构建快速控制原型实现了预期研究目标。

本文基于 NI 实时测控验证平台 cRIO 设计了惯导设备快速伺服回路控制原型系统, 经过配置后在 Labview 环境下编程即可通过底层 FPGA 实现实时控制, 设计流程简单且获得较好的控制效果。

## 1 快速位置伺服回路组成及原理

精密惯导设备快速位置伺服回路的原理如图 1 所示, 该快速位置伺服回路由框架轴、陀螺仪、调理放大电路、位置校正网络、功率放大器及力矩电机组成。在框架轴端的干扰力矩作用下, 框架轴位置发生改变, 此时陀螺仪敏感轴感受到此位置变化并由于陀螺效应在其输出轴产生转角, 经过角度传感器变成电压信号进而通过调理电路对信号放大, 后由校正网络控制输出驱动力矩电机, 最终使框架轴保持稳定。

此位置伺服回路作用过程实为框架轴与陀螺仪输出轴各自达到力矩平衡状态的过程, 对于陀螺仪输出轴, 其平衡方程为:

$$\bar{I}\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + K\beta = Mr + H\dot{\alpha} \quad (1)$$

式中,  $I$ 、 $D$ 、 $K$ 、 $H$  分别表示陀螺仪输出轴的转动惯量、阻尼系数、弹性系数及陀螺仪角动量,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示轴端干扰力矩下框架转角及陀螺仪输出轴转角,  $Mr$  表示陀螺仪输出轴

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-01-28。

基金项目: 国家电网公司科技项目(JLBI7201700041)。

作者简介: 王 卿(1990-), 女, 山西忻州人, 在读硕士, 主要从事惯导系统伺服回路控制方向的研究。

王 汀(1972-), 男, 研究员, 博导, 主要从事导航制导与控制方向的研究。

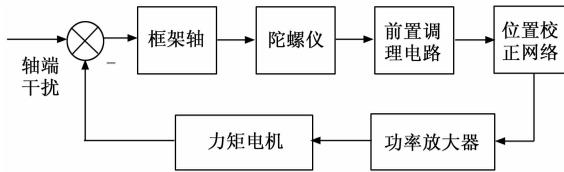


图 1 惯导设备快速位置伺服回路组成及原理

上的干扰力矩。

其中陀螺仪输出轴上的弹性系数很小, 因此弹性力矩  $K\beta$  可以忽略。

对于框架轴, 其平衡方程为:

$$J\ddot{\alpha} + C\dot{\alpha} = M_D - M_C - H\dot{\beta} \quad (2)$$

式中,  $J$ 、 $C$  分别表示框架轴的转动惯量和阻尼系数,  $M_D$ 、 $M_C$  分别表示框架轴上的干扰力矩和控制力矩。

由于空气的阻尼系数很小, 阻尼力矩  $C\dot{\alpha}$  可以忽略。此外, 框架轴没有弹性, 故不存在弹性力矩。

在满足稳定的条件下, 快速位置伺服回路控制系统要保证调节时间在 100 ms 以内, 相位裕度  $\gamma$  大于  $25^\circ$ , 幅值裕度  $h$  大于 8 dB。

## 2 快速位置伺服回路控制原型系统设计

### 2.1 快速位置伺服控制原型系统总体架构

快速控制原型系统的总体架构如图 2 所示。其中惯导平台部分包括力矩电机、陀螺仪及对应框架轴, 均视作被控对象。信号转接盒作为快速控制原型与实物被控对象的连接枢纽。cRIO 仿真平台用来完成信号采集计算输出功能, 即实现控制原型。驱动电路完成功率放大驱动电机的功能。校正网络经过上位机 Labview 编程实现, 伺服回路原型中将位置伺服回路的控制对象惯导平台的输出作为 cRIO 机箱信号采集模块的输入, 经过校正网络控制输出脉冲调宽波, 然后由功率级电路进行放大后作用到力矩电机完成位置伺服回路控制功能。

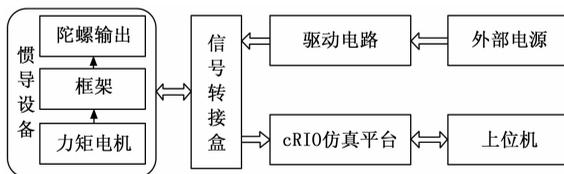


图 2 快速位置伺服控制原型系统框图

### 2.2 cRIO 仿真平台软硬件搭建

目前快速控制原型仿真平台有 xPCTarget、RT-lab、dSpace、NI cRIO 及 YH-AStar 等。xPCTarget、RT-lab 及 dSpace 快速控制原型平台均依赖于 MATLAB/Simulink 工具箱<sup>[9-10]</sup>, 基于模型运用代码生成工具及实时软件接口在实时操作系统如 VxWorks、QNX、Linux 等或实时硬件上建立实时控制系统。YH-AStar<sup>[11]</sup>以 YHSIM 专用仿真语言为基础, 配置专用 IO 设备完成一体化建模及软硬件仿真工作, 但其对用户专业仿真知识有较高要求, 操作难度大。NI cRIO 快速控制原型平台基于用户界面良好的 Labview 图形化编程环境, 其实时控制器与自定义 FPGA 结合可实现两种接口模式, 具备方便易用的可重配置工业级 IO<sup>[12]</sup>, 能提供较高的安全可靠性能, 快速控制原型上位机代码易于移植到目标控制器, 系统集成度高、轻小便携, 因此采用 cRIO 快速原型仿真平台实现快

速位置伺服回路控制原型。

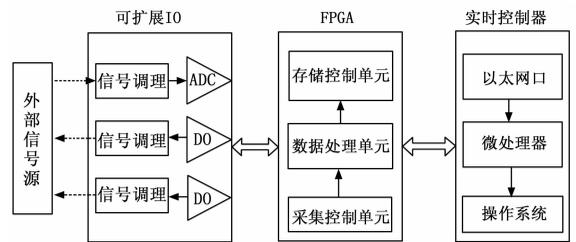


图 3 cRIO 仿真平台结构框图

cRIO 仿真平台的硬件组成如图 3 所示, 包括可扩展 IO 模块、FPGA 及实时控制器三部分。可扩展 I/O 模块实现陀螺仪输出信号采集, 控制信号 PWM 输出以及驱动电路开断的功能。陀螺仪输出是处于零附近的小偏信号, 所以对模拟量采集要求在零位附近有较高的转换精度, 经放大的电压信号变化在  $-10\text{ V}$  到  $+10\text{ V}$  范围内, 同时考虑快速率及减小死区, 选用 100 Ks/s 每通道采样率, 16 位分辨率的 NI 9215 数据采集模块。该模块具有 4 个  $-10\text{ V}$  到  $+10\text{ V}$  的同步模拟输入通道, 有两种接口类型可供选择, 一种是螺栓端子接口的, 另一种是 BNC 接口的, 前者较后者接线方式复杂且安全可靠性低, 所以本文采用 BNC 接口类型的 9215 采集模块。校正网络输出作用到直流力矩电机, 目前直流力矩电机的控制大多采用 PWM 控制, 考虑到本文位置伺服回路控制灵敏度要求较高, 因此选择 PWM 数字输出模块更新率也要高, 选取 5V/TTL 更新率高达 100 ns 的 NI 9401 数字 I/O 模块。Xilinx Kintex-7 系列 FPGA 用于实现对信号的采集控制、处理运算及存储, 该 FPGA 直接和每个 I/O 模块相连, 可高速访问 I/O 电路并灵活实现定时、触发和同步等功能。实时控制器通过以太网与上位机通信, 其 64 位微处理器与 Linux 操作系统完成与 FPGA 端数据交互。

快速位置伺服控制原型系统软件设计在上位机 Labview 编译环境中开发。开发环境的配置包括 IP 配置、cRIO 设备识别及访问 I/O 的接口模式选择。建立项目后存在三种 VI 程序编写方式, 即本机端 VI、RT 端 VI 及 FPGA 端 VI, 三者实时性依次增强, 对数据的处理运算速度也依次提高。根据设计要求, 需建立 RT 端 VI 下载至实时控制器与 FPGA 交互并实现数据监控, 建立 FPGA 端 VI 实现数据采集处理和输出功能。LabVIEW 环境下建立的 FPGA vi 需要编译才能运行, 被合成了到可编程逻辑门硬件上, 这些门电路通过可重构的内部连线连接。但其编译过程与传统 Windows 上的 LabVIEW 应用程序不同。当向 FPGA 写入代码时, 同时也将这些相同的 LabVIEW 代码写入到了其他目标上, 但运行后, LabVIEW 则通过不同的进程来运行这些代码。运行进程生成的 VHDL 代码经过 Xilinx 编译器编译, 生成硬件可执行的 bit 文件。上述过程通过逻辑映射, 时钟同步和启用链三个环节来实现, 由此保证了 FPGA 与 Labview 的数据流能严格一致, 最终与 Labview 程序中数据并行运行。

### 2.3 外围驱动电路设计

由 cRIO 数字模块输出的信号电流位于毫安级, 无法驱动力矩电机, 设计驱动电路如图 4 所示。GH281-4 光电耦合器使 cRIO 输出的 PWM 控制信号隔离传输至驱动芯片。

LMD18200 功率桥驱动芯片的输入端为方向控制信号 DIP 及 PWM 控制信号 PIP, DIP 与外部信号源提供的 3.3 V 比较控制光电耦合器 1 导通与关断, PIP 与外部信号源提供的 5 V 比较控制光电耦合器 2 导通与关断。为提高电压上升时间在驱动芯片输出端 VO1、VO2 分别接 10uF 的电容, 输出为幅值 28 V 的 PWM 信号。通过外接电源提供的 PWM+5 V、VCC\_PWM (28 V) 用作方向控制 (引脚 2) 及 PWM 控制 (引脚 4) 逻辑比较时的参考电压。芯片电源端 VS 由 28 V 电源提供。

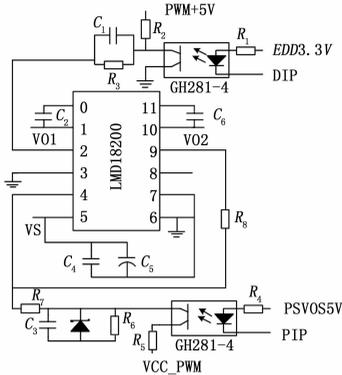


图 4 外围驱动电路

驱动功率桥芯片运行有双极性和单极性两种方式。若采用双极性驱动方式, 在每个 PWM 周期里电动机电枢电压极性呈正负变化。但若采用单极性驱动方式, 在每个 PWM 周期内, 电动机电枢电压表现为单极性。前者对应的电机系统可实现低速平稳运行的同时也存在一些缺陷, 比如电流波动大, 功率损耗较大等, 特别是必须增加死区来避免开关管直通的危险, 限制了开关频率的提高, 比较适用于中小功率直流电动机的控制。本文伺服回路采用的直流电动机功率相对较大, 因此采用单极性驱动方式。

### 3 系统功能实现

cRIO 控制原型系统功能实现主要依靠 FPGA 端 VI 程序实现, 如图 5 所示。

其中功能模块主要由以下 5 个子模块组成, 以此实现伺服控制功能:

1) 模拟量采集模块: 采集经陀螺仪前置放大后输出的电压信号。为保证位置伺服回路的控制速率, 将陀螺仪输出电压采集经过时钟频率为 40 MHz 的单周期定时循环完成求均值降噪。

2) 控制计算模块: 实现伺服回路校正网络。该位置伺服回路控制的校正网络采用经典超前滞后控制, 经过 Matlab 建模仿真后将控制器模型经双线性变换离散化进行数字控制。为了充分利用 FPGA 并行执行任务的能力, 运用双层流水线结构实现陀螺仪输出电压信号和校正网络控制输出的迭代运算。

3) 数字输出模块: 完成 PWM 控制信号输出。利用循环定时器改变数字输出的高低电平持续时间, 从而实现任意占空比的脉冲信号输出。由于受到驱动电路光耦隔离芯片传递速率的限制, PWM 信号的载波频率不宜过高。

4) 参数设置模块: 主要进行控制器参数等的配置。采用

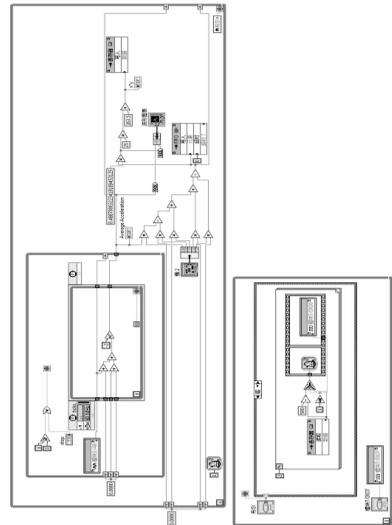


图 5 Labview FPGA VI 程序

簇结构实现各输入控件的集成一体化, 使界面整洁美观的同时降低了配置错误率。

5) 数据传递模块: 运用 DMA FIFO 在 FPGA 端与 RT 端传递数据, 运用寄存器在并行循环间传递数据。

系统运行过程如图 6 所示, 系统上电为驱动使能断开状态, 初始化将陀螺前放输出电压信号清零, 寄存器清零, 使能打开。进行参数设置后开始采集陀螺前放输出电压, 连续采集四帧在单周期定时循环内完成求均值降噪后, 输出到校正网络进行控制器解算, 计算后的控制输出进行占空比换算, 通过寄存器将值传递到 PWM 输出模块的输入端, 该模块输出 PWM 波完成对驱动电路的控制。

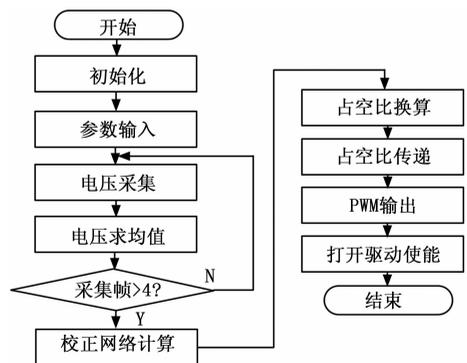


图 6 快速控制原型系统运行过程框图

### 4 实验验证

驱动电路能否按要求输出 PWM 占空比是系统能否实现闭环控制的前提, 在上位机设置 PWM 输出频率为 2 kHz, 分别进行断使能、45%、50%、55% 的占空比验证, 结果如图 7 所示, 其中 (A) 表示在上位机进行断使能操作后的驱动电路输出, 结果显示为 0, 表明操作有效; (B)、(C)、(D) 依次表示按上位机指令要求驱动电路应输出 PWM 占空分别为 45%、50%、55% 时对应的实测 PWM 波形, 可以看出三者的占空比存在 0.1% 的误差, 对于 2 kHz 的载波频率, 相当于 0.5 us 的延时, 输出结果符合较为理想, 表明 cRIO 程序设计及驱动电

路设计合理。

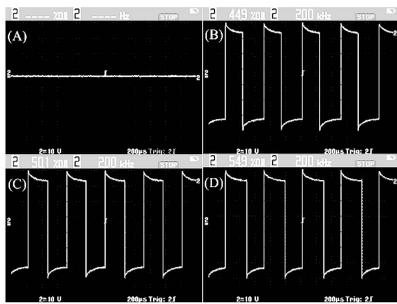


图7 占空比波形

完成占空比验证后, 将设计好的快速位置伺服回路控制原型设备与某型惯导系统连接, 验证快速控制原型设备软硬件功能。阶跃干扰响应可用回路闭合过程模拟, 此过程框架角波动反映了系统在干扰力矩作用下的动态响应情况, 在框架轴位置处于任意位置状态下闭合回路, 框架角波动曲线如图8所示, 可以看出伺服控制从响应到达稳定的时间约为88 ms, 满足系统指标要求。

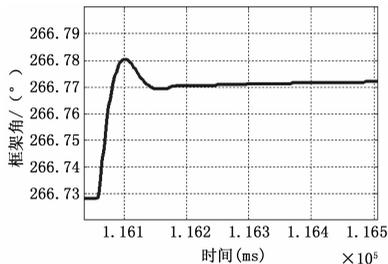


图8 闭合回路时框架角波动曲线

通过频率响应分析仪 TD1250 测量系统幅相频率曲线的方式对系统的频域特性进行分析。实验中设置分析仪激励信号为正弦信号, 分二次扫频测试, 每10倍频程40个点, 第一次输入信号为10V, 频率为5~10 Hz; 第二次输入信号为2V, 频率为10~200 Hz。读取上位机数据并进行处理。测试结果如图9所示。

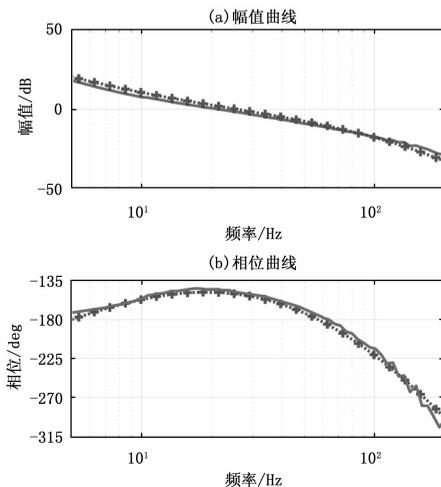


图9 仿真与实验幅相曲线

特性, 实线型曲线为 Matlab 建模仿真结果。对比两条曲线, 可以看出实验测试结果与仿真结果曲线一致性良好, 数学仿真分析得幅值裕度为12 dB, 相位裕度为 $33.9^\circ$ , 半实物仿真结果分析得幅值裕度为11.5 dB, 相位裕度约为 $35^\circ$ , 均满足设计指标要求。

通过上述对 cRIO 快速位置伺服回路控制原型系统的开环测试及实物在环测试验证了本文系统设计的正确性, 实验结果表明位置伺服回路工作正常, 性能满足设计需求。然而实际测量结果和理论设计还是存在差距, 图7中 PWM 波形在上升沿和下降沿均出现尖峰, 可能是受到功率芯片开关死区的影响, 也可能是因为驱动电路滤波电容的选择不合适。另外, 由于惯导设备中相关机械结构可能存在老化变形, 伺服回路仿真模型与实际会有不可避免的偏差, 这是导致稳定裕度与幅值裕度的测试结果与仿真存在微小差异的主要原因。图9中幅相频率曲线在中频段实际测试与仿真的吻合度要高于低频和高频段, 可能是由于激励信号的设置引起的。下一步将针对这些问题进一步进行系统调试优化。

## 5 结束语

本文在分析了惯导设备快速位置伺服回路原理的基础上, 搭建 cRIO 控制原型半实物仿真平台并编写 Labview 软件程序, 最后通过半实物仿真平台实验验证了该快速位置伺服回路控制原型系统功能实现正常, 满足控制回路调节时间在100 ms 以内, 幅值裕度大于8 dB, 相位裕度大于 $25^\circ$ , 符合预期的设计指标要求。表明该快速位置伺服控制原型系统兼具实时性、便捷性, 是一种高效测试验证模型及控制性能的手段。

## 参考文献:

- [1] Abel UDID, Bollig DIA. Rapid control prototyping [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] 杨向忠, 安锦文, 崔文革. 快速控制原型仿真技术应用 [J]. 航天控制, 2009, 27 (2): 72-75.
- [3] 王建锋. 航空发动机快速控制原型与实时仿真技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [4] 王假薪, 黄向华, 叶翔. 基于 CompactRIO 的内燃机喷油控制器快速原型设计与实现 [J]. 测控技术, 2011, 30 (2): 64-68.
- [5] 吕强, 张洋, 王国胜, 等. 基于快速控制原型的倒立机器人设计与实现 [J]. 科技导报, 2016 (18): 265-269.
- [6] 白金泽, 王占林, 裴丽华. 快速控制原型技术在液压伺服控制中的应用 [J]. 机床与液压, 2006 (1): 89-90.
- [7] 高亚东, 何刘宇, 崔浏, 等. 电液伺服系统快速原型设计研究 [J]. 液压气动与密封, 2015 (7): 11-14.
- [8] 王晓琳. 基于伺服冲床运动控制算法的 RCP 开发方法 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29 (1): 126-129.
- [9] 李向丽. 基于 dSPACE 快速控制原型的直流微电网协调控制研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [10] Faschang M, Kupzog F, Mosshammer R, et al. Rapid control prototyping platform for networked smart grid systems [J]. 2013, 20: 8172-8176.
- [11] 单勇. 实时半实物仿真平台关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [12] 郑文华, 刘渊, 余婷, 等. 基于 CompactRIO 的四旋翼飞控实时仿真平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 275-278.

图9中“+”标记曲线代表实验系统实际测量的幅相频率