

doi: 10.7690/bgzdh.2016.04.002

某火炮伺服系统数字电流环研究

曹晶晶, 曲俊海, 庞继文, 徐艳, 桑海
(北方自动控制技术研究所火控部, 太原 030006)

摘要: 针对火炮伺服系统模拟电流环存在控制参数不易调整、抗噪声干扰能力不足等缺点, 基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 设计了数字电流环的硬件电路和软件代码, 并对电流环进行 dSPACE 扫频测试、仿真分析和性能测试。结果表明: 基于 FPGA 的数字电流环性能优越, 可满足火炮伺服系统的要求。

关键词: 数字电流环; FPGA; 火炮伺服系统
中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Research on Digital Current Loop of Certain Type Artillery Servo System

Cao Jingjing, Qu Junhai, Pang Jiwen, Xu Yan, Sang Hai
(Department of Fire Control, North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Because it's not easy to adjust the control parameters in the analog current loop of artillery servo system and the capability of noise immunity is insufficient. Based on field-programmable gate array (FPGA), in this paper the hardware circuit and software codes of digital current loop are designed, and then dSPACE sweep testing, simulation analysis and performance testing have been carried out for the current loop. The results show that the digital current loop based on FPGA possesses superior performance and can meet the requirement of the artillery servo system.

Keywords: digital current loop; FPGA; artillery servo system

0 引言

某火炮伺服系统采用电流环、速度环和位置环三环控制结构, 其中位置环和速度环已运用 DSP 控制器 (TMS320F28335) 实现了数字化, 而电流环仍采用传统的模拟电路^[1]。

相较于模拟电流环, 数字电流环主要有以下优点: 1) 可采用更加灵活的数字校正策略, 且更易实现控制器参数的在线调整; 2) 由于数字电流环误差信号是数字量, 当系统出现意外时能更及时地对电机及功放进行保护; 3) 电流环实现数字化后, 脉宽调制 (pulse-width modulating, PWM) 信号可由处理器直接产生, 避免了模拟线路固有的零位漂移不对称等问题; 4) 对于采集的电流反馈信号, 可进行数字滤波等处理, 提高电流信号的信噪比^[2]。

为了进一步提高火炮伺服系统的性能和可靠性水平, 笔者建立了数字电流环的数学模型, 设计了基于 FPGA 的数字电流环硬件电路和软件代码, 并进行了 dSPACE 扫频测试、仿真分析和性能测试。

1 数字电流环的组成

数字电流环的难点在于对电流信号高频率的采

样以及数据处理问题。笔者采用 Maxim 公司的 MAX11168 串口 A/D 转换芯片对电机电枢电流信号进行高频率 A/D 变换, 然后用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 EP2C8Q208I8 型号的 FPGA 芯片进行数据采样、误差计算和电流环闭环控制, 同时产生 PWM 信号送给功放单元实现电机驱动控制。

电流环输入为速度环输出的控制信号, 经过 DSP (TMS320F28335) 数据线输入到 FPGA 中; 电流环反馈为电流传感器采集的电机电枢电流信号, 通过与 max11168 串口通信将电流反馈数字信号输入到 FPGA 中, 在 FPGA 中进行做差、校正控制后, 输出 PWM 信号到功放单元驱动电机, 实现数字电流环控制。数字电流环原理框图如图 1 所示, 电流传感器选用霍尔传感器。

2 电流环数学模型

图 2 为数字电流环的数学模型。其中, U_i^* 、 U_i 、 e 分别表示电流环参考输入信号、反馈信号、误差信号的数字量。 $D(s)$ 为电流环控制器的传递函数 (电流环通常采用控制器设计为 I 型系统); $G_1(s)$ 为 PWM 功放的传递函数; K_s 为 PWM 增益, $T_s=1/f$, f 为功率管开关频率; $G_2(s)$ 为电机的传递函数; R 、 L

收稿日期: 2016-02-18; 修回日期: 2016-03-23

作者简介: 曹晶晶 (1988—), 男, 湖北人, 在读硕士, 从事系统工程研究。

分别表示电机电枢电阻、电枢电感； $H(s)$ 为霍尔传感器的传递函数。

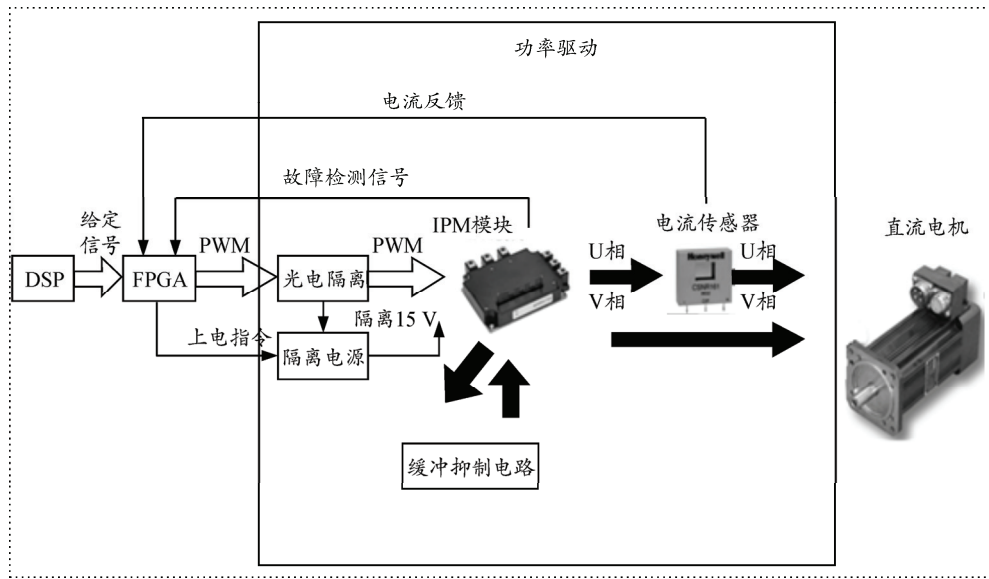


图 1 数字电流环原理框图

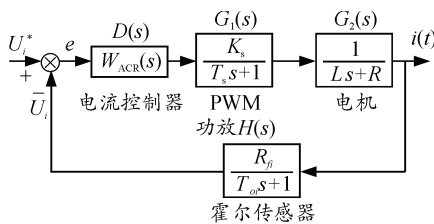


图 2 数字电流环数学模型

电机驱动功率器件的等效传递函数为 $\frac{K_s}{T_s s + 1}$ ，

$W_{ACR}(s)$ 的输出电压范围为 $\pm 10\text{ V}$ ，电机额定电压为 22 V ，PWM 增益 $K_s=2.2$ ；开关频率为 20 kHz ，故 $T_s=0.000\ 05\text{ s}$ 。

已知：电机电枢电阻 $R=0.03\ \Omega$ ；电机电枢电感 $L=0.042\text{ mH}$ ；电机转动惯量为 0.014 Nms^2 ；电机力矩系数 $K_F=0.04\text{ N/A}$ ；负载惯量最大值 $J_F=900\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；最大负载力矩 $T_F=325\text{ N}\cdot\text{m}$ ；减速比 $i=400$ 。

下面给出具体的计算：

1) 电气时间常数：

$$\tau_F=L/R=0.042\times 10^{-3}/0.03=0.001\ 4\text{ s}；$$

2) 折算到电机轴的转动惯量：

$$J_F=0.005\ 625\text{ kg}\cdot\text{m}^2；$$

3) 折算到电机轴上的最大负载力矩：

$$T_F=0.812\ 5\text{ N}\cdot\text{m}；$$

4) 系统加速度：

$$a=80\ (^{\circ})/\text{s}^2=1.396\text{ rad}/\text{s}^2；$$

5) 从以上的电机参数和计算可以计算出电流指令为：

$$I_F=250.5\text{ A}；$$

6) 计算电流反馈系数： $k_{fi}=0.039\ 92\text{ V/A}$ 。

电流反馈系数选电流滤波时间常数

$$T_{oi}=0.000\ 05\text{ s}，T_{\Sigma i}=T_s+T_{oi}=1\times 10^{-4}\text{ s}。$$

电流环设计为典型 I 型系统，电流调节器采用 PI 调节器，其传递函数形式为：

$$W_{ACR}(s)=\frac{K_i(\tau_i s+1)}{\tau_i s}。$$

式中 τ_i 为电气时间常数。

取 $K_i T_{\Sigma i}=0.5$ ， $K_i=\frac{0.5}{T_{\Sigma i}}=5\ 000\text{ s}^{-1}$ ，则有

$$K_{fi}=\frac{K_i \tau_i R}{K_s R_{fi}}=\frac{5\ 000\times 0.001\ 4\times 0.03}{2.2\times 0.039\ 92}=2.39。$$

已知电流环截止频率： $\omega_{ci}=K_i=5\ 000\text{ s}^{-1}$ ，检验近似条件：

1) 校验整流装置传递函数近似条件：

$$\frac{1}{3T_s}=6\ 666.7\text{ s}^{-1}>\omega_{ci}，\text{ 满足近似条件。}$$

2) 校验忽略反电动势变化对电流环动态影响的条件：

$$T_{jm}=\frac{GD^2 R}{375 C_e K_m}=\frac{4gJR}{375 C_e K_m}=\frac{4\times 9.8\times 0.019\ 625\times 0.03}{375\times 0.047\times 0.047}=0.027\ 86\text{ s}，$$

满足近似条件。

3) 校验电流环小时间常数近似处理条件：

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}} = 20\,000 \text{ s}^{-1} > \omega_{ci}, \text{ 满足近似条件。}$$

电流给定量限幅 $-10 \text{ V} \leq U_i^* \leq 10 \text{ V}$ 。给定 $U_i = U_i^* = 10 \text{ V}$ ，电流环的阶跃响应曲线如图 3 所示。

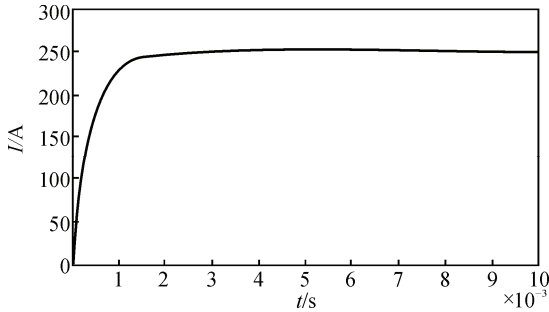


图 3 电流环的阶跃响应曲线

由图 3 可以看出：在电流阶跃响应过程中，电流动态响应较快，电流从零上升到额定电流 250.5 A 仅需要 2.5 ms，而且系统动态过程和稳态过程运行均非常平稳，无静差、无超调，满足要求。

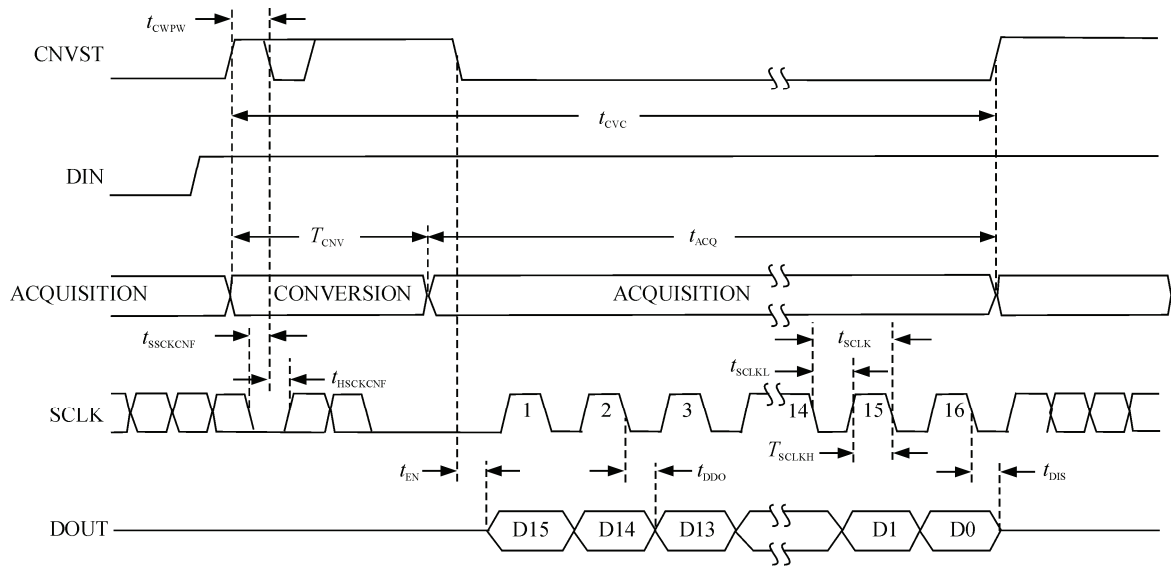


图 5 MAX11168 时序

反馈电流的采样时序控制根据 MAX11168 的时序图在 FPGA 中用 VHDL 代码完成，其实现流程示意图如图 6^[4]所示，然后用 Quartus II 自带的 SignalTap II 在线仿真工具观察信号波形如图 7。

3.2 PWM 波生成

在 FPGA 中，用 VHDL 代码产生 PWM 波，取代了原来模拟电流环中用三角波发生电路来产生 PWM 波^[5-6]。具体方法：先用代码生成三角波，然后用经过 PI 控制器校正后的电流环控制信号与三角波进行比较，生成 PWM 波，并采用受限单极型

3 数字电流环硬件电路及软件设计

根据上面介绍的数字电流环原理框图对各个部分的电路设计进行分解^[3]，具体分析如下。

3.1 反馈电流串口 A/D 转换电路

电流反馈经霍尔电流传感器转换，通过 MAX11168 串口 A/D 转换芯片转换成 16 位数字量。图 4 为 MAX11168 串口 A/D 转换电路。图 5 为 MAX11168 的采样时序图。

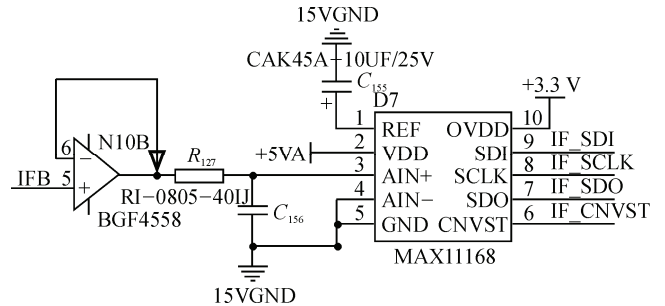


图 4 MAX11168 串口 A/D 电路

H 桥的方式来驱动直流电机。

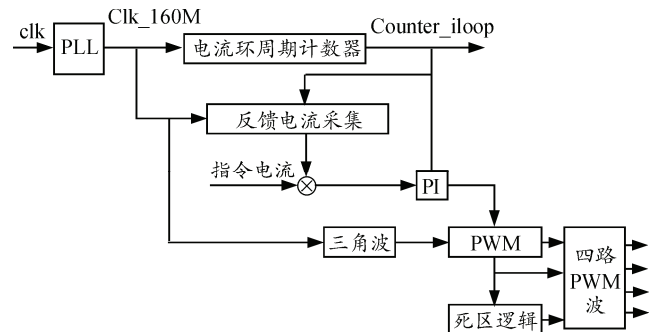


图 6 电流环流程

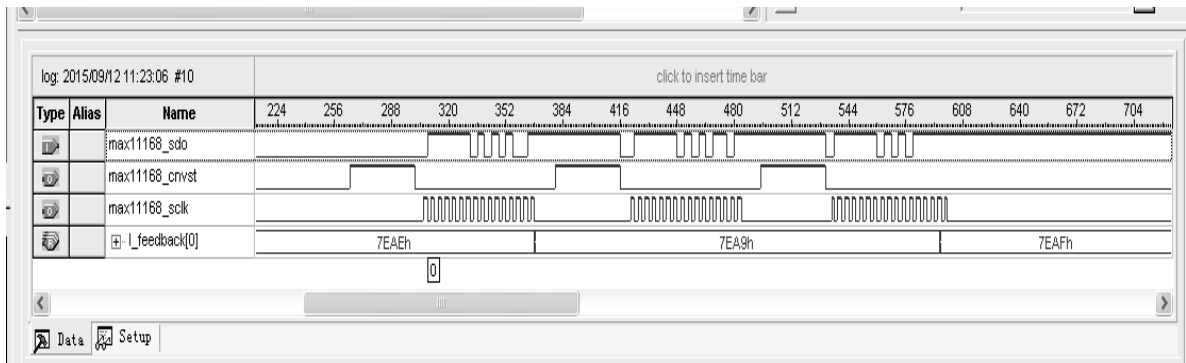


图 7 反馈电流采样信号波形

4 仿真及实验结果

4.1 dSPACE 半实物仿真

为验证上述设计方法的可行性，现基于搭建好的 Matlab/Simulink+dSPACE 半实物仿真平台，对数字电流环进行半实物仿真。图 8 为电流闭环测试扫频结果。测试条件是给定为幅值 6 V 的正弦波，采样频率 1~500 Hz，间隔为 20 Hz。从图中可以看出，此时带宽为 260 Hz。

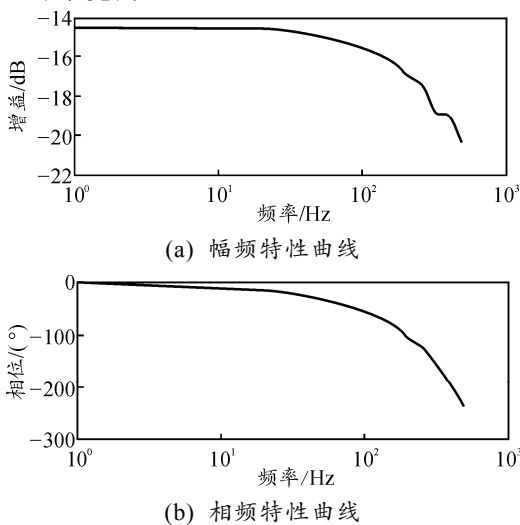


图 8 电流闭环扫频结果

4.2 实验及结果

通过半实物仿真后，将设计完成的数字电流环火炮伺服系统进行驱动电机实验，输入给定一个阶跃信号，用示波器观测输出电流，波形如图 9 所示。

从图 9 中可以看出：在实际系统中，电流从零上升到给定输入信号只需 10 ms 左右，而且无超调，满足火炮伺服系统的功能性能要求。

5 结论

笔者设计某火炮伺服系统基于 FPGA 的数字电

流环，建立了数学模型，通过电机实际参数进行数字电流环的参数设计，对各个部分进行硬件电路和代码设计，并对设计完成的数字电流环进行半实物仿真和实际系统实验。根据电流环的阶跃响应曲线和半实物仿真电流闭环扫频结果以及实际系统的实验结果可以看出，基于 FPGA 的数字电流环功能性能满足系统要求。

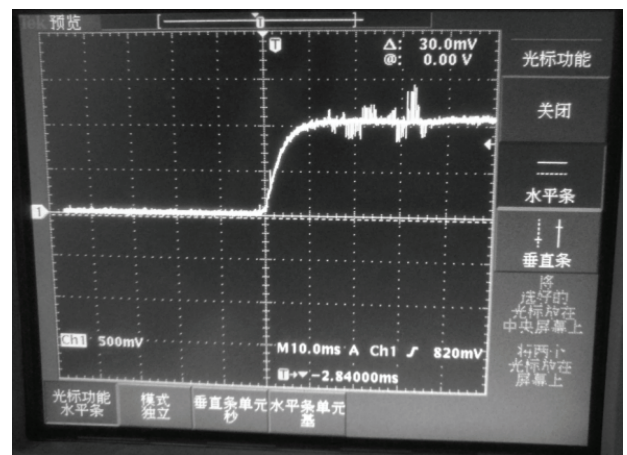


图 9 给定阶跃实际输出电流波形

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 104-122.
- [2] 段继岗. 伺服系统电流环数字化设计与实现[J]. 现代导航, 2013(3): 225-230.
- [3] 刘海涛, 高跃飞, 信义兵, 等. 一种车载火炮供输弹装置设计[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(7): 64.
- [4] 王诚. Altera FPGA/CPLD 设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 65-75.
- [5] Naouar M W, Monmasson E, Naassani A A, et al. FPGA-based current controllers for AC machine drives—a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1907-1925.
- [6] 吴征, 苏淑靖. 基于 FPGA + PWM 的多路信号发生器设计[J]. 电子技术应用, 2014(3): 38-40.