

基于 FPGA 的海底泥浆举升泵控制系统设计与实现

何新霞, 徐伟敏

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 目前, 采用先进控制理论和先进控制器控制海底泥浆举升泵作为深水双梯度钻井的关键技术之一, 是成功进行井控的关键; 提出了针对双梯度钻井系统中海底泥浆举升泵的控制方案, 选择 FPGA 作为系统控制器, 给出了控制系统硬件构成, 基于 VHDL 语言编制程序, 分别实现对 A/D、D/A 的时序控制; 根据海底泥浆举升泵控制系统特点, 基于 FPGA 设计完成模糊 PI 控制算法, 并将基于 FPGA 的模糊 PI 算法应用于对举升泵的控制, 试验结果表明, 设计的控制系统实现了海底泥浆举升泵入口压力为恒定值的控制要求; 模糊 PI 控制器对系统具有较好的控制性能, 为双梯度钻井作业提供了指导。

关键词: 海底泥浆举升泵; FPGA; 模糊 PI 算法

FPGA-based Control System for Subsea Mudlift Pump in Deepwater Drilling

He Xinxia, Xu Weimin

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: At present, it is the key to success for well control that advanced control algorithm and advanced controller are used to control the mud lifting pump of the dual-gradient drilling as one of the key technology in deepwater drilling. This paper proposes a control program for subsea mud lift pump of the dual gradient drilling system, in which FPGA is choose as the controller system and control system hardware structure is given. The A/D、D/A Timing Control are realized respectively based on VHDL language. According to characteristics of control system for subsea mud lift pump, the fuzzy PI control algorithm based on FPGA is developed, and is used to control lift pump. The experimental results show that inlet pressure of pump may be nearly maintained at a constant value by means of control system. The fuzzy PI controller based on FPGA system has good control performance. This provides a guide for the dual-gradient drilling.

Keywords: subsea mudlift pump; FPGA; fuzzy PI algorithm

0 引言

深水钻井是深海石油钻采的首要环节, 决定着深海石油开发的成败。通常, 在深海钻井中地层压力和破裂压力间的压力区间很小, 为了解决常规深海钻井压力梯度区间较窄的问题, 双梯度钻井技术(DGD)应运而生^[1]。

在海底双梯度钻井系统中, 通过小直径回流管线旁路和海底泥浆举升泵回输钻井液, 使得海底泥浆举升泵的入口压力维持在一固定值(约为钻杆外部的静水压力), 此方法有效地控制海底泥线以下井眼的井底压力和环空压力, 实现安全、经济地钻井^[2]。对海底泥浆举升泵的控制是实现海底泥浆举升双梯度钻井的关键技术之一。本文根据双梯度钻井系统中海底泥浆举升泵的控制要求及控制特点, 选择 FPGA 作为系统控制器, 基于适当的控制算法, 实现对双梯度钻井系统中海底泥浆举升泵的控制。

1 海底泥浆举升泵控制系统构成

在海底泥浆举升双梯度钻井系统中, 要求海底泥浆举升泵的入口压力维持约为外部的静水压力^[3-4]。基于 FPGA 的海底泥浆举升泵控制系统构成如图 1 所示, 海底泥浆举升泵采用圆盘泵^[5], 压力变送器检测海底泥浆举升泵的入口压力, 经信号调理后, 通过 A/D 模块送入 FPGA。与给定值比较形成偏差信号, 经系统控制器调节后, 通过 D/A 模块输出模拟量控制信号, 借助于变频器控制电机转速, 实现对海底泥浆举升泵流量的控制, 以达到对海底泥浆举升泵入口压力的控制。控制系统中, FPGA 控制单元主要完成模糊 PI 控制算法、A/D 时序控制、D/A 时序控制及与 Matlab 的通讯等功能。PC 机作为上位机完成监控和数据管理功能, 并可根据需要将对下位机设定和更改控制参数。

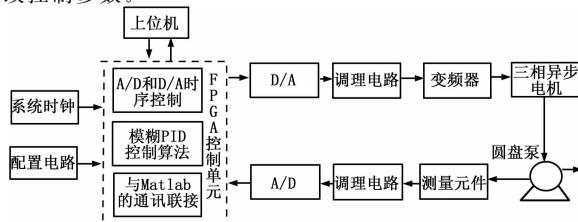


图 1 控制系统构成框图

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-03-24。

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05026-001-12)。

作者简介: 何新霞(1966-), 女, 河南滑县人, 副教授, 硕士生导师,

主要从事油气测控技术、电力传动及控制系统的研究工作。

2 A/D、D/A 转换控制模块的实现

系统选用 TLC549 模块实现 A/D 转换,借助于 VHDL 语言编写 TLC549 控制时序,控制时序由时钟分频计数、状态机间的转换和数据输入、输出三部分组成。其仿真时序如图 2 所示。

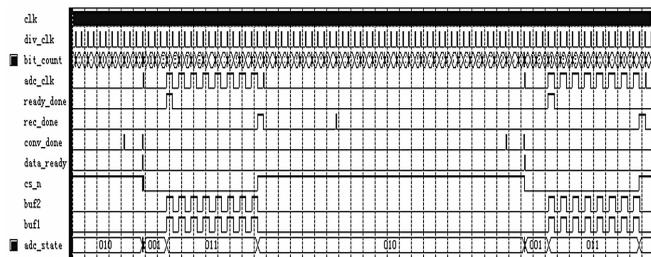


图 2 TLC549 仿真时序图

采用 5 种状态机的方式对 A/D 进行控制。000 为初始状态, A/D 芯片处于不使能状态; 001 为 A/D 数据准备阶段; 011 为 A/D 先前转换完数据接收状态; 010 为当前数据转换; 110 为数据输出状态。为了提高利用率, 采用任意两相邻状态只有一位数据变化的方法进行控制。

对系统 50 MHz 时钟进行 31 次分频, 计数器 bit_count 开始由 0~63 进行计数, 计到 4 时, 数据准备状态标志位 ready_done 输出高电平, A/D 输出前一次转换数据; bit_count 计到 19 时, 数据接收状态标志位 rec_done 输出高电平, A/D 接收数据完毕; bit_count 计到 63 时, 数据转换状态标志位 conv_done 输出高电平, A/D 转换数据完毕, bit_count 复位。至此完成一次 A/D 数据转换。

选用 TLC5620 实现 D/A 转换。用 VHDL 语言编写 TLC5620 的控制时序, 与 A/D 时序控制类似, D/A 控制时序也由状态转换、时钟分频和数据的输入、输出组成。对 D/A 控制采用 3 种状态机的方式进行。

3 控制系统算法设计及实现

3.1 控制系统算法设计

模糊 PID 控制器^[6]将 PID 控制与模糊控制相结合, 不需要建立被控对象精确的数学模型, 通常以二元函数的形式出现, 根据偏差 e 和偏差变化率 ec 的关系, 经过模糊推理规则, 调整系统中 K_p 、 K_i 和 K_d 的值, 其控制如图 3 所示。

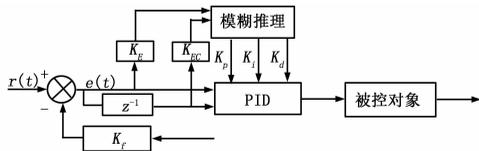


图 3 模糊 PID 控制框图

鉴于海底泥浆举升泵控制系统特点, 控制器选用模糊 PI 算法。误差 e 和误差变化率 ec 作为模糊 PI 控制器的输入, K_p 和 K_i 作为模糊 PI 控制器的输出。控制器根据 e 和 ec 的变化情况调节 K_p 和 K_i 的改变量 (即 ΔK_p 和 ΔK_i), 以达到对 K_p 和 K_i 的调节。 e 和 ec 的模糊变量值均取 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 7 个模糊值, ΔK_p 和 ΔK_i 的模糊变量值也取 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 7 个模糊值。 ΔK_p 和 ΔK_i 的模糊推理规则分别

如表 1 和表 2 所示。

表 1 ΔK_p 的模糊推理规则表

ΔK_p	EC	E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	PB	
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	PB	
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	PM	PM	
PS	PS	PS	ZO	NS	PM	PM	NM	
PB	PS	ZO	NS	NM	PM	NM	NB	
PB	ZO	ZO	NM	NM	PM	NB	NB	

表 2 ΔK_i 的模糊推理规则表

ΔK_i	EC	E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	NB	
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NB	
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	NM	NM	
PS	NM	NS	ZO	PS	NM	NM	PB	
NB	ZO	ZO	PS	PS	NM	PB	PB	
NB	ZO	ZO	PS	PM	NM	PB	PB	

根据表 1 和表 2 的模糊 PI 控制规则编写模糊化程序, 可以对 K_p 和 K_i 进行动态调节。设 K_{p0} 和 K_{i0} 分别为 K_p 和 K_i 的初始值, ΔK_p 和 ΔK_i 分别为 K_p 、 K_i 的改变量。则模糊 PI 控制器的控制参数为:

$$K_p = K_{p0} + \sigma_p \times \Delta K_p \quad (1)$$

$$K_i = K_{i0} + \sigma_i \times \Delta K_i \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中, σ_p 和 σ_i 均为系数。

3.2 基于 FPGA 的模糊 PI 控制算法实现

3.2.1 偏差和偏差变化率的实现

基于 VHDL 语言编写偏差和偏差变化率模块, 程序流程如图 4 所示。其中 k 表示采样时刻, T_s 为采样周期, $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 分别为第 k 次、 $k-1$ 次和第 $k-2$ 次采样时刻的偏差值, 当偏差数据为负数时, 其符号位为 1, 否则符号位为 0。首先生成带有符号位的 9 位 Integer 型的偏差数据, 然后根据数据的符号位将偏差信号转换成 8 位 bit_vector (位

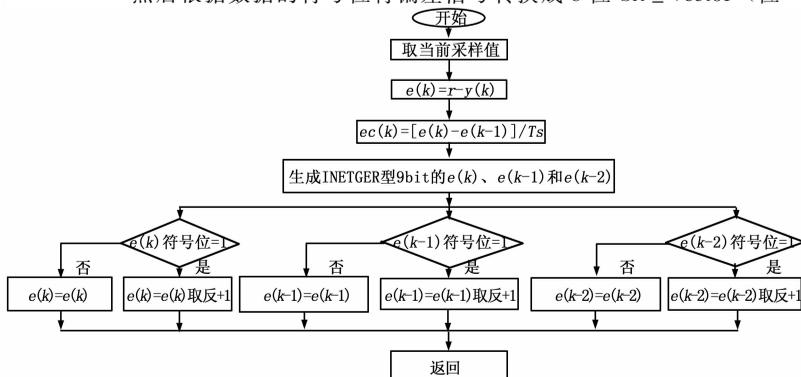


图 4 偏差及偏差变化率实现流程图

矢量) 型的偏差数据。

3.2.2 隶属函数及控制规则的实现

在模糊控制理论中, 隶属函数是指对一个数据概率的判断。误差 e 和误差变化率 ec 的隶属区间为:

- $E: (-\infty -150) \subset NB (-150 -100) \subset NM (-100 -50) \subset NS (-50 20) \subset Z0$
- $(20 50) \subset PS (50 100) \subset PM (100 +\infty) \subset PB$
- $EC: (-\infty -150) \subset NB (-150 -100) \subset NM (-100 -50) \subset NS (-50 20) \subset Z0$
- $(20 50) \subset PS (50 100) \subset PM (100 +\infty) \subset PB$

基于 VHDL 的 K_p 和 K_i 模糊控制规则表^[7] 储存在 ROM 模块中, 根据偏差 e 和偏差变化率 ec 的值得到 ROM 中 K_p 和 K_i 的值, 控制规则实现流程图如图 5 所示。

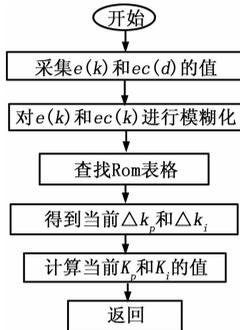


图 5 控制规则实现流程图

3.2.3 求和模块的实现

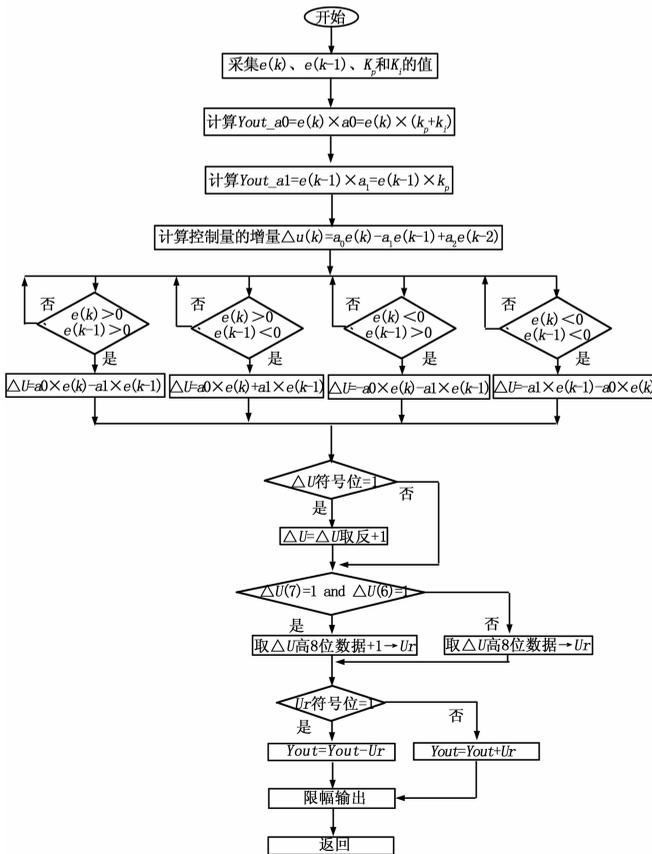


图 6 求和模块程序流程图

根据 PID 算法的增量表达式:

$$\Delta U(k) = \left(K_p + K_p \frac{T_s}{T_I} + K_p \frac{T_D}{T_s} \right) e(k) - \left(K_p + 2K_p \frac{T_D}{T_s} \right) e(k-1) + K_p \frac{T_D}{T_s} e(k-2) \quad (3)$$

$$\text{令: } a_0 = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \right), a_1 = K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T_s} \right), a_2 = K_p \frac{T_D}{T_s}.$$

且不考虑微分环节, 即: $T_D = 0$, 则有:

$$a_0 = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \right) = K_p + K_I, a_1 = K_p, a_2 = 0.$$

所以,

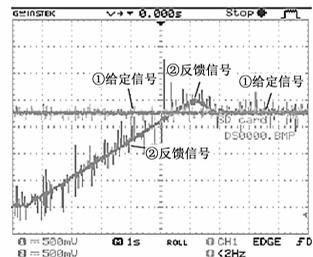
$$\Delta U(k) = a_0 e(k) - a_1 e(k-1) \quad (4)$$

求和模块主要用来计算 $\Delta U(k)$, 由式 (4) 可知, 求和模块实际上由乘法和求和两部分组成。求和模块的程序流程如图 6 所示。

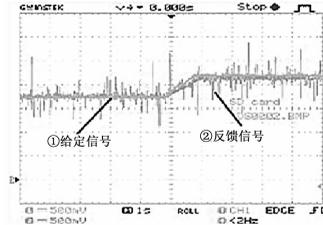
鉴于此款 FPGA 不能进行小数的运算, 在计算 $(K_p + K_i) \times e(k)$ 和 $K_p \times e(k-1)$ 时, 需先把数值放大 256 倍, 然后再将计算结果缩小 256 倍。

4 试验研究

将上述设计的基于 FPGA 的系统控制方案及控制算法, 应用于对举升泵的控制。利用示波器观察系统调试结果, 图 7 为实验波形图, 横坐标为 1 s/cm, 纵坐标为 0.5 V/cm。图 7 (a) 为系统启动时的波形图, 由图 7 (a) 可知, 系统经过 6.5 s 后达到稳定, 超调量控制在 8.5% 以内。图 7 (b) 为系统稳定运行过程中改变给定值时的波形图, 过程变量经过控制后能够很快跟踪给定值。



(a) 系统启动工作波形图



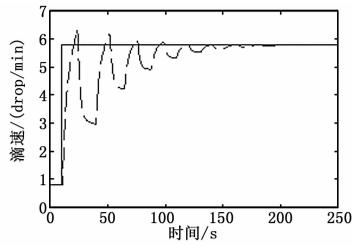
(b) 增加给定波形图

图 7 试验结果波形图

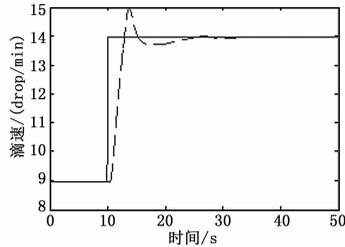
由上述试验结果可知, 基于 FPGA 的海底泥浆举升泵控制方案可行, 模糊 PI 控制器具有很好的控制效果。对实际工程应用具有一定的参考价值。

5 结论

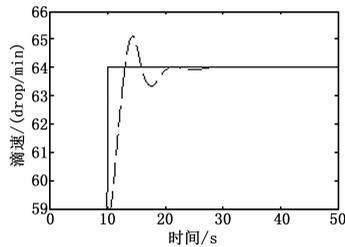
1) 结合海底泥浆举升钻井, 根据海底泥浆举升泵的工况和特点, 基于 FPGA 设计了海底泥浆举升泵控制系统方案, 开发了相应的硬件平台。



(a) 静态工作点1时的控制系统的阶跃响应



(b) 静态工作点3时的控制系统的阶跃响应



(c) 静态工作点3时的控制系统的阶跃响应

图 5 不同静态工作点时的控制系统的阶跃响应

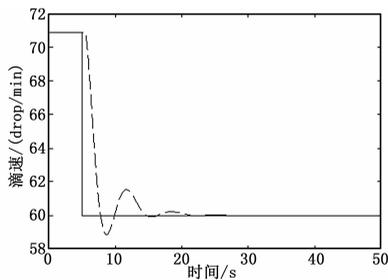


图 6 由开环转入闭环后的控制系统的输出曲线

范围变化和大范围的情况分别设计了相应的控制策略。仿真结果表明, 当系统在滴速较低的工作点附近工作, 由于滴速测量值的更新周期长, 故动态调节时间明显比在滴速较高的工作点长。后续工作之一是在这种情况下缩短该动态调节时间。可考虑参考静态模型, 在每个控制周期, 若滴速测量值未更新, 用静态模型计算值予以代替。更进一步, 可考虑自学习的方法, 实时对过程静态模型进行更新, 以克服静态模型参数易受外界干扰的缺点。

参考文献:

[1] 任 齐. 基于 PLC 的输液流量自动监控装置 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004, (10): 78-79.

[2] 果 莉. 点滴监控系统的研究 [J]. 中国科技信息, 2005, (17): 23-23.

[3] 白凤娥, 常晓明, 张新日. 基于 SOC 的输液滴速监视器设计 [J]. 计算机工程, 2005, 31 (14): 202-204.

[4] 贾少青, 李爱华, 陈 平. 智能输液监控系统设计与实现 [J]. 2007, 21 (4): 66-68.

[5] Andrea C, Giuseppe C, Nicola G, et al. Microwave TDR for real-time control of intravenous drip infusions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61 (7): 1866-1873.

[6] Barros E, dos Santos M V D. A safe, accurate intravenous infusion control system [J]. Micro, IEEE, 1998, 18 (5): 12-21.

[7] Zhang Y, Zhang S F, Ji Y, et al. Intravenous infusion monitoring system based on WSN [A]. IET International Conference on Wireless Sensor Network (IET - WSN) 2010 [C]. IET Conference Publications, 2010, (575): 38-42.

[8] 邵裕森, 戴先中. 过程控制工程 (第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[9] Chen C T. Linear system theory and design (3rd Edition) [M]. New York: Oxford University Press, 1999.

[10] 段英宏, 杨 硕. 步进电动机的模糊 PID 控制 [J]. 计算机仿真, 2006, 2 (2): 290-293.

[11] 傅俊楠, 秦传波, 杜启亮, 等. 基于 LM3S8962 的静脉输液滴速控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2693-2696.

(上接第 2477 页)

2) 针对海底泥浆举升泵控制系统特点, 选择模糊 PI 控制作为系统控制器算法。借助于 VHDL 语言编写 A/D、D/A 的控制时序和模糊 PI 控制算法程序。

3) 试验结果表明, 基于 FPGA 的模糊 PI 控制器对海底泥浆举升泵的控制具有较好的动态特性和鲁棒性。达到了模拟海底泥浆举升泵入口压力为恒定值的目的, 为双梯度钻井作业提供了指导。

参考文献:

[1] 许亮斌, 蒋世全, 殷志明, 等. 双梯度钻井技术原理研究 [J]. 中国海上油气, 2005, 17 (4): 260-264.

[2] 殷志明. 新型深水双梯度钻井系统原理、方法及应用研究 [D]. 东

营: 中国石油大学 (华东), 2007.

[3] 殷志明, 陈国明, 王卓显, 等. 深水海底泥浆举升钻井技术及其应用前景 [J]. 钻采工艺, 2006, 29 (5): 1-3.

[4] Jonggeun Choe. Analysis of riserless drilling system and well control [A]. SPE 55056 [C]. 1999.

[5] 高本金. 海底泥浆举升钻井系统及举升圆盘泵研究 [D]. 山东东营: 中国石油大学 (华东), 2009.

[6] 蔡绍伟, 吴千秋, 赵 丰, 等. 基于 FPGA 和 ARM 的弹上相位自动微调控制器设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3268-3270.

[7] 王水鱼, 安 鸽. 基于 FPGA 汽车电控单元模糊控制器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 2073-2075.