

基于 FPGA 的工业机器人运动控制器设计

刘宏乐¹, 李 兵²

(1. 华北理工大学, 河北 唐山 063210; 2. 唐山学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 为了提高工业机器人的位置控制精度, 解决传统运动控制器实时性、可重构性较差的问题, 针对一款具有六自由度的工业机器人, 设计了基于 FPGA 的模糊 PID 运动控制器。控制器的运行效果达到了预期要求, 在实时性、准确性以及可重构性等方面均取得了较好的效果。

关键词: 六自由度工业机器人; 运动控制器; 模糊控制系统

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2018)06-0049-06

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2018.06.011

Motion Controller Design for Industrial Robot Based on FPGA

LIU Hong-le¹, LI Bing²

(1. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: In order to improve the precision for the position control of industrial robots and solve the problem of low real time and poor reconfigurability of the traditional motion controllers, a fuzzy PID motion controller based on FPGA is designed for an industrial robot with six degrees of freedom. With this design, the operation effect of the controller has met the expected requirements and achieved good results in terms of real time, accuracy and reconfigurability.

Key Words: industrial robot with six degrees of freedom; motion controller; fuzzy control system

0 引言

随着电子技术与信息技术的不断发展, 机器人正在逐渐地进入到工业领域中, 尤其是在高端制造业和工业自动化生产中发挥着重要作用。运动控制系统是工业机器人的核心, 它向驱动装置发出任务信号, 控制末端的执行装置实现对被控对象的位置、速度等参数的精准控制。为此, 就需要设计一个行之有效的运动控制器对给定轨迹进行实施跟踪。

根据控制器控制核心的不同, 运动控制器主要有三大类型: PC 型、嵌入式型、全软件型, 并向多轴化、网络化、开放式、智能化、可重构性

等方向发展^[1]。

依据运动控制器的上述类型及特点, 为了达到良好的控制效果, 专家们已经进行了很多的尝试, 在运动定位策略方面, 根据不同的工况环境, 有针对性地提出了决策树、模糊逻辑、遗传算法、人工神经网络等智能算法与传统 PID 相结合的方法^[2]。传统的 PID 控制因为结构简单易懂, 在大部分的工业自动化系统中都有它的存在, 但是在碰到复杂的系统时, 由于无法获得准确的数学模型, 难以整定 PID 的参数, 因而无法获得预期的效果。本文的研究对象为六自由度工业机器人, 目前还无法建立准确的

作者简介: 刘宏乐(1993—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事运动控制研究。

模型。考虑运算的实时性、控制的准确性、硬件设计的复杂性及可重构性,本设计选择模糊 PID 作为运动控制器的核心算法。在运算的实时性方面,模糊算法实际上是一种离散的算法,无论选择软件执行还是硬件执行,在执行速度方面优于其他算法。因为模糊算法是一种经验性算法,一般情况下决策树、遗传算法、人工神经网络算法在运动控制的准确性方面要优于模糊算法,但如果模糊控制规则选择得当,该算法也能够满足控制需求。在硬件设计的法则性方面,无论是采用 PLC、单片机、DSP、嵌入式还是可编程逻辑芯片,模糊算法的实现都是最为容易的。在可重构性方面,如果采用的是纯软件设计方法(PC 机)、PLC、单片机、DSP 或嵌入式等方法,要根据重构需求重新修改软件程序,同时还要更换相应的数据采集或通信接口等设备,成本比较高,周期也比较长^[3]。如果采用的是 FPGA,根据重构需求,通过修改程序即可设计出相应的电路系统,数据采集、通信接口电路的更改也可以通过修改程序来实现,可大大降低重构成本和周期。因此依托于 FPGA 设计模糊 PID 运动控制器更为简单、易懂,开发周期更短,设计成本也更低。

1 伺服系统的传递函数

本设计中选择的六自由度工业机器人为 ABB 的 IRB-2600ID,在伺服电机的驱动下,相邻的关节之间的动态性能可由下面的方程表示^[4]:

$$J_i \ddot{\theta}_i(t) + B_i \dot{\theta}_i(t) + u_{id}(\theta, \omega, \dot{\omega}, t) = u_i. \quad (1)$$

上式中, J_i 代表第 i 个关节的等效转动惯量; B_i 表示的是第 i 个关节的粘性阻尼系数; $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ 分别表示的是第 i 个关节的角速度和角加速度; u_{id} 是第 i 个关节受到的误差扰动; u_i 是第 i 个关节的转矩; $\theta, \omega, \dot{\omega}$ 分别代表角度、角速度、角加速度的 6×1 维矢量。忽略粘性阻尼以及误差扰动,把方程进行简化,得到下列方程:

$$J_i \ddot{\theta}_i(t) = u_i, \quad (2)$$

该微分方程即为六自由度工业机器人的传递函数。

2 模糊 PID 算法

由于六自由度工业机器人的伺服控制系统

为非线性控制系统,传统的 PID 控制在位置控制效果方面不能满足要求,因此要将 PID 与模糊逻辑相结合对系统进行控制。模糊 PID 控制是根据 PID 控制器的 3 个参数与偏差 e 和偏差的变化 ec 之间的模糊关系,在运行时不断检测 e 及 ec ,通过事先确定的关系,利用模糊推理的方法,在线修改 PID 控制器的 3 个参数,让 PID 参数可自整定^[5]。在线实时调整控制器的 k_p, k_i, k_d 这 3 个参数,得到整理后的 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 作为输出。因为 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 这 3 个数一直是动态变化的,所以它们会根据系统的实时变化来整定自己的参数。PID 控制参数的计算用到下列公式:

$$k_p = k_{p0} + \Delta k_p$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i,$$

$$k_d = k_{d0} + \Delta k_d$$

其中 k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 为初始数据。

3 运动控制器的硬件实现

目前工业机器人的主流控制器有 DSP、嵌入式、工控机、PLC 等,这些控制器的结构与外设相对固定,使得控制缺乏灵活性,运算速率相对较低,实时性较差。虽然 FPGA 发展较晚,但它具有强大的计算能力及优异的可重构性,在控制器的开发设计以及升级改造等方面有着其他控制器无法匹及的优势^[6]。图 1 为基于 FPGA 的模糊 PID 控制器电路结构。

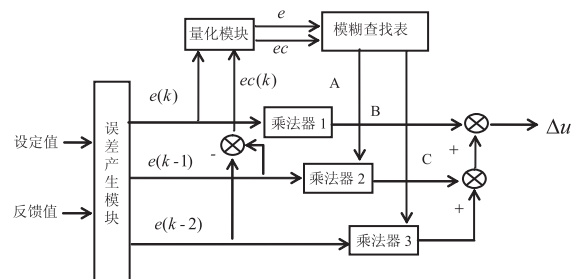


图 1 基于 FPGA 的模糊 PID 控制器电路结构

系统分为 4 个模块:误差产生模块、量化模块、模糊查找表模块以及运算模块。误差产生模块生成 e 和 ec 的精确值;量化模块就是把精确的 e, ec 变成模糊值;模糊值进一步经过模糊查找表,输出 PID 参数,最后通过一定运算,输出最终的 Δu 值。本设计采用的 FPGA 型号为

Altera 公司的 EP4CE40F29C8N。

3.1 误差及误差变化量模块设计

本模块的设计中输入是误差 e 以及误差变化率 ec , 利用连续的两个误差 e 得到误差变化率 ec 。整体设计采用的是原理图设计方法, 利用 FPGA 中固有的运算模块来进行浮点运算, 精确度更高, 与传统的编程语句实现方法相比较, 该方法在消耗的硬件资源方面不占有优势, 但是在运算精度上却要高出传统方法。由于所选择的 FPGA 具有丰富的逻辑单元, 在电路结构上的消耗可以忽略。在时钟 CLK 作用下同

时将给定值与输出反馈值送入两个 LPM_ADD_SUB 模块, 同时接入两个锁存器, 这样送入第二个 LPM_ADD_SUB 模块的值相对于第一个来说要差一个周期, 那么两个 LPM_ADD_SUB 模块分别产生第 k 次和 $k-1$ 次误差。最后将这两个误差送入第三个 LPM_ADD_SUB 模块中, 输出误差变化量。在离散化论域中, 误差变化率的值通常是用误差变化量的值来替代的。设计该模块主要实现的是一个减法功能, 于是调用了 Quartus II 模块库中的 LPM_ADD_SUB。图 2 为误差模块设计原理图。

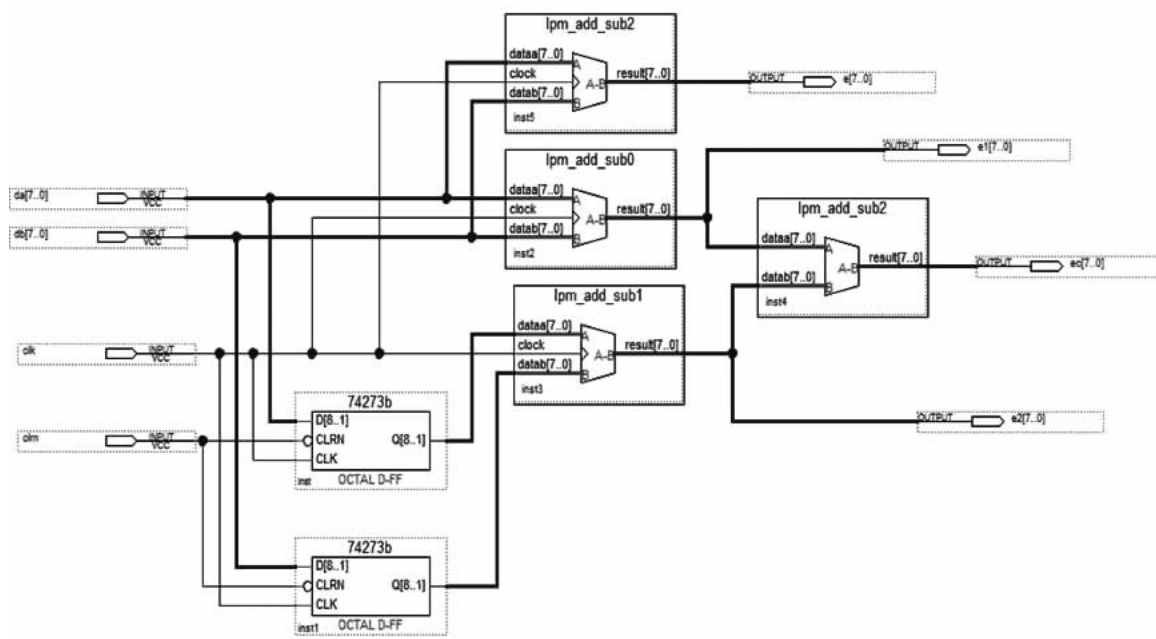


图2 误差模块设计原理图

3.2 模糊量化模块设计

上一个模块中输出的 e 与 ec 是精确的量, 但是模糊控制器的输入是模糊值。为了得到模糊值就需要将精确值经过量化。设计此模块, 首先是将 e 与 ec 的模糊论域与实际论域根据实际情况设定出来; 其次将模糊论域依据各个成分, 把实际论域分成几个段, 每一段对应于一个模糊论域中的一个成分。划分论域时, 如果划分过细, 会造成规则数目太多而使得电路结构过于复杂, 运算速度降低; 如果划分过粗的话, 则无法达到精确的控制。IRB-2600ID 型六自由度机械手臂的执行机构为伺服电机, 由于

伺服电机本身的控制为闭环控制, 精度较高, 因此在模糊论域的划分上, 权衡了控制精度与系统的复杂程度后, 采用的是七级编码机制, 模糊语言变量划分为 7 个以下论域集合 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 即 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 因此本文中将误差大小量化为 7 个等级。当从现场采集到数值后, 将机器人关节的旋转角度误差 e 与误差变化率 ec 作为输入。根据 ABB IRB-2600ID 工业机器人产品手册可知, 轴 1 的工作范围是 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$, 因此将 e 与 ec 的实际论域范围定为 $[-180, 180]$, 量化因子为 60, 采取四舍五入的方式, 把实际论域分

成 7 段,分别是 $[-180, -150]$, $[-150, -90]$, $[-90, -30]$, $[-30, 30]$, $[30, 90]$, $[90, 150]$, $[150, 180]$,对应到模糊论域范围 $[-3, 3]$ 上,即 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。假设误差的精确值是 57,此精确值在 $[30, 90]$ 的论域段,误差经过量化后的值就是 1,量化地址为 100。 ec 和 e 的量化过程相同,表 1 为 e/ec 的量化地址。

表 1 模糊量化后的 e/ec 的量化地址

地址	000	001	010	011	100	101	110
e/ec	-3	-2	-1	0	1	2	3

这部分采用 VHDL 语言进行设计,其部分代码如下显示:

```

PROCESS(E,EC,CLK)
BEGIN
    IF CLKEVENT AND CLK='1' THEN
        IF E<=-180 THEN A<="111";
        ELSIF E>=-180 AND E<=-150
THEN A<="000";
        ELSIF E>=-150 AND E<=-90
THEN A<="001";
        ELSIF E>=-90 AND E<=-30
THEN A<="010";
        ELSIF E>=-30 AND E<=30
THEN A<="011";
        ELSIF E>=30 AND E<=90 THEN
A<="100";
        ELSIF E>=90 AND E<=150 THEN
A<="101";
        ELSIF E>=150 AND E<=180
THEN A<="110";
        ELSIF E>=180 THEN A<="111";

```

```

END IF;
...
END IF;
END IF;
END PROCESS;
C<=A&B;
Q<=C;
END ART;

```

该模块如图 3 所示。

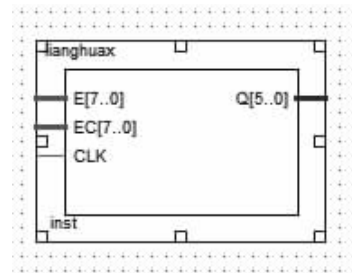


图 3 量化模块

3.3 模糊查找表模块设计

模糊控制器中,模糊查找表是至关重要的。由于在现实中模糊化运算、模糊推理和清晰化计算是非常繁复的,在线的演算量较少,故本文主要运用离线运算方式,这种方式不仅改善了 FPGA 的工作效率,而且编程的困难也有所消减。

为了得到 Δk_p , Δk_i , Δk_d 的值,主要通过 Matlab 建立模糊 PID 模型,在 Matlab 中得到相应的值。为了减少难度,可设 $A = \Delta k_p + \Delta k_i + \Delta k_d$, $B = -(\Delta k_p + 2\Delta k_d)$, $C = \Delta k_d$ 。

通过计算得到以 e 和 ec 为输入,以 A, B, C 为输出的表格。高 3 位是 e 的量化地址,低 3 位是 ec 的量化地址。表 2—表 4 即为 A, B, C 的模糊控制表。

表 2 A 模糊控制表

e	ec						
	-3(000)	-2(001)	-1(010)	0(011)	1(100)	2(101)	3(110)
-3(000)	4	5	3	3	3	5	4
-2(001)	5	4	3	2	3	4	5
-1(010)	6	6	4	4	4	6	6
0(011)	6	6	4	3	4	6	6
1(100)	6	6	4	4	4	6	6
2(101)	5	4	3	2	3	4	5
3(110)	4	5	3	3	3	5	4

表 3 B 模糊控制表

e	ec						
	-3(000)	-2(001)	-1(010)	0(011)	1(100)	2(101)	3(110)
-3(000)	-5	-6	-1	-1	-1	-6	-5
-2(001)	-7	-6	-2	0	-2	-6	-7
-1(010)	-9	-9	-2	-2	-2	-9	-9
0(011)	-9	-9	-2	0	-2	-9	-9
1(100)	-9	-9	-2	-2	-2	-9	-9
2(101)	-7	-6	-2	0	-2	-6	-7
3(110)	-5	-6	-1	-1	-1	-6	-5

表 4 C 模糊控制表

e	ec						
	-3(000)	-2(001)	-1(010)	0(011)	1(100)	2(101)	3(110)
-3(000)	1	2	0	0	0	2	1
-2(001)	2	2	1	0	1	2	2
-1(010)	3	3	1	1	1	3	3
0(011)	3	3	1	0	1	3	3
1(100)	3	3	1	1	1	3	3
2(101)	2	2	1	0	1	2	2
3(110)	1	2	0	0	0	2	1

为了更好地运用 A,B,C 模糊控制表,需要将它们制作成 ROM 模块,而 ROM 模块的核心就是 MIF 文件。将这些设计完后,此时只需要计算:

$$\Delta u(k) = Ae(k) + Be(k-1) + Ce(k-2)。(3)$$

图 4 为 A 的 MIF 文件。

Addr	+000	+001	+010	+011	+100	+101	+110	+111	ASCII
0000000	4	5	3	3	3	5	4	0	
0001000	5	4	3	2	3	4	3	0	
0010000	6	6	4	4	4	6	6	0	
0011000	6	6	4	3	4	6	6	0	
0100000	6	6	4	4	4	6	6	0	
0101000	5	4	3	2	3	4	5	0	
0110000	4	5	3	3	3	5	4	0	
0111000	0	0	0	0	0	0	0	0	

图 4 A 的 MIF 文件

3.4 运算模块设计

乘法运算模块调用了函数库里的 LPM_MUITA。让 $e(k)$, B 与 $e(k-1)$, C 与 $e(k-2)$ 相乘,进一步使用 parallel_add,使这 3 个参数通过加法功能获得最后的结果 Δu 。图 5 为运算模块原理图。

3.5 顶层模块设计

图 6 就是模糊 PID 算法的顶层模块。首

先输入通过误差模块获得的精确值,量化模块把 e 和 ec 进行量化,得到模糊值;其次将量化后的值送入到下一个单元以查表的方式进行离线查询,得出控制参数的增量;最后将计算得到的 3 个参数 A, B, C 输入到下一个模块,通过计算得到输出。

取一组数据,如 $da=11, db=9$,则可以得到 $e=2, e_1=2, e_2=5, ec=-3$, e 精确值是 2,属于 $[-180, 180]$ 这个论域,其量化值是 0,量化编码是 011。同理可得 ec 的量化编码是 011。把 e 的量化编码设为高 3 位, ec 的量化编码设为低 3 位,查表可知 $A=3, B=0, C=0$,通过公式(3)计算得到 $\Delta u=6$ 。电路仿真结果如图 7 所示。

4 结语

由电路仿真结果可以看出,电路运算结果与理论计算得出的结果是一致的,说明设计中所采用的方法能够满足控制需求。电路运行的延迟时间为 11 ns,确保了执行的实时性。控制器整体占用 FPGA 资源的 58.5%,确保了后续升级重构需求。

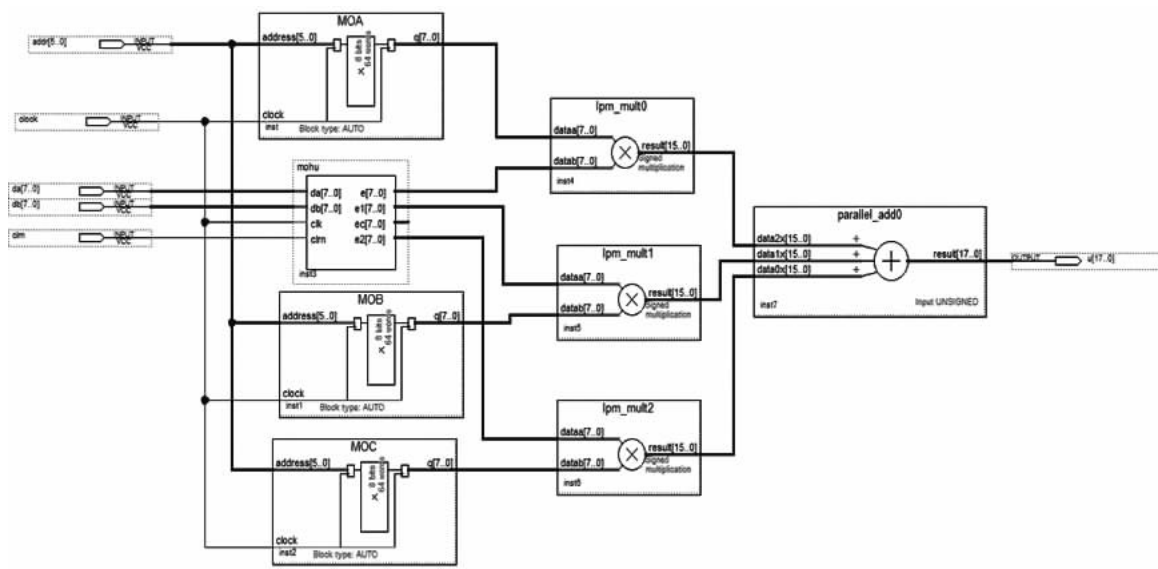


图 5 乘加运算模块原理图

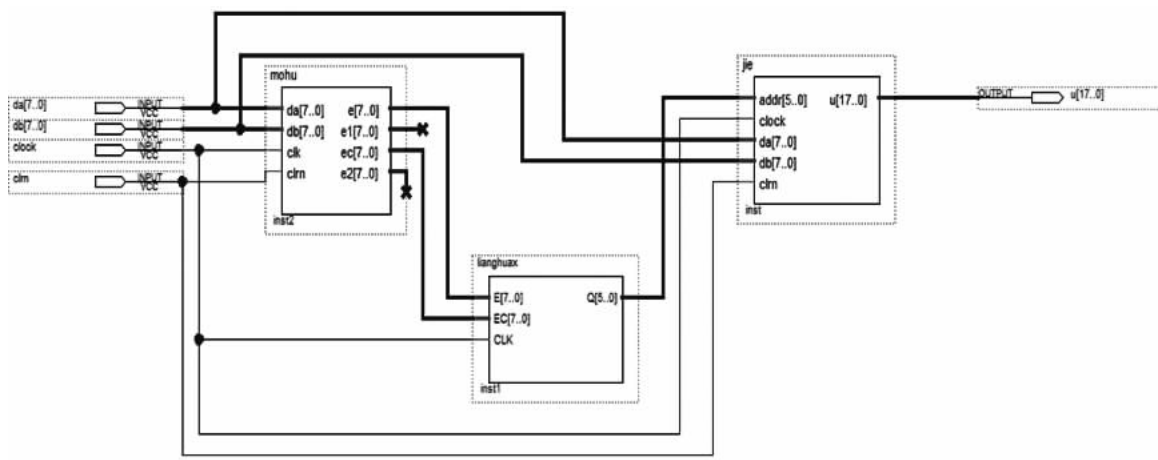


图 6 模糊 PID 算法顶层模块

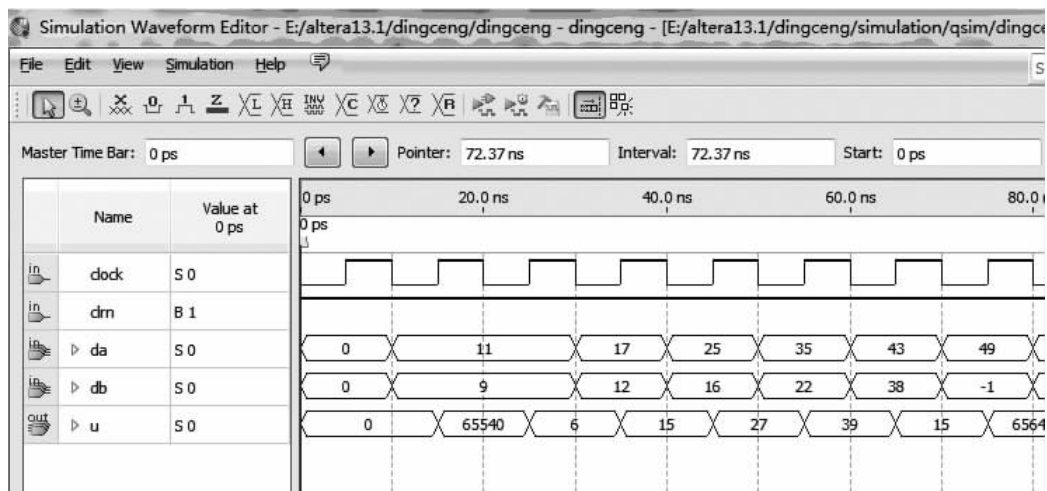


图 7 电路仿真结果

(下转第 75 页)

- [6] 江平宇,丁凯,冷杰武. 社群化制造:驱动力、研究现状与趋势[J]. 工业工程,2016,19(1):1-9.
- [7] A third industrial revolution[R/N]. The Economist,2012-04-21.
- [8] XIONG G, CHEN Y, SHANG X, et al. AHP fuzzy comprehensive method of supplier evaluation in social manufacturing mode[J]. Intelligent Control & Automation,2015,27(5):3594-3599.
- [9] 王飞跃. 从社会计算到社会制造:一场即将来临的产业革命[J]. 中国科学院院刊,2012,27(6):658-669.
- [10] 商秀芹,刘希未,程长健,等. 面向服装行业定制化需求的社会制造新模式[G]. 上海:第八届(2013)中国管理学年会论文集(选编),2013.
- [11] 胡泳,郝亚洲. 社群经济与组织社群化[J]. IT 经理世界,2014(15):86-87.
- [12] GLASER B G, HOLTON J. The discovery of grounded theory[J]. Strategies for Qualitative Research, 1967, 3(6): 377-380.
- [13] STRAUSS A, CORBIN J. Grounded theory methodology: an overview[M]. Thousand Oaks: Sage Publications, 2000:1-8.
- [14] 贾旭东,衡量. 基于“扎根精神”的中国本土管理理论构建范式初探[J]. 管理学报,2016,13(3):336-346.
- [15] 李志刚. 扎根理论方法在科学研究中的运用分析[J]. 青岛大学学报,2007(4):90-94.
- [16] 凯西·卡麦兹. 建构扎根理论:质性研究实践指南[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009:2.
- [17] PATTON M Q. Qualitative evaluation and research methods [M]. Thousand Oaks: Sage Publications,1990:1-10.
- [18] 李志刚,许晨鹤,乐国林. 基于扎根理论方法的孵化型裂变创业探索性研究——以海尔集团孵化雷神公司为例[J]. 管理学报,2016,13(7):972-979.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第54页)

参考文献:

- [1] 尹志生,崔洋,徐立松,等. 基于 OMAP 的可重构嵌入式运动控制系统设计[J]. 电子测量技术,2013,36(8):1-5.
- [2] 胡忠仲. 基于多轴运动控制卡的开放式工业机器人控制系统设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.
- [3] 黄文嘉. 工业机器人运动控制系统的研究与设计[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
- [4] 梅志千,刘德有. SCARA 机器人关节伺服系统中的干扰补偿控制[J]. 机床与液压,2007,35(7):149-150.
- [5] 刘洋. 基于 FPGA 的交流伺服电机位置环控制器研究与设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- [6] 沈峰. 基于 FPGA 的模糊 PID 控制器设计[D]. 武汉:武汉科技大学,2012.

(责任编辑:夏玉玲)