

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.03.010

## 基于 FPGA 与 AD7985 的脉冲电源数据采集设计

沈杰, 张林\*, 刘广民, 戴越, 张勇斌, 荆奇

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 为了满足精密电镀的控制需求, 设计了一种基于 FPGA 和 AD7985 的高速高精度的数据采集系统, 该数据采集系统可应用于高精度的脉冲电镀电源中, 用于采集输出脉冲的电流和电压参数并用于电流调控。首先设计分析了采集系统的主要硬件电路, 包括隔离放大电路、电压跟随电路和 AD 转换电路; 然后对 AD7985 的控制时序进行了研究, 给出了控制流程图, 并通过 Quartus II 进行仿真, 得到了预期的仿真波形图。最后, 将该数据采集系统应用于高精度脉冲电镀电源中, 在单独正向脉冲和周期换向脉冲两种模式下均可实现对电流、电压的实时、高速数据采集, 采集得到的电流误差均在 10 mA 以内, 能够有效满足高精度电镀电源的电流控制需求。

**关键词:** FPGA; AD7985; 数据采集系统; 脉冲电镀电源

**中图分类号:** TP274+.2

**文献标识码:** A

## Design of Pulse Power Data Acquisition Based on FPGA and AD7985

SHEN Jie, ZHANG Lin\*, LIU Guangmin, DAI Yue, ZHANG Yongbin, JING Qi

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** In order to meet the control requirements of precision electroplating, a high-speed and high-precision data acquisition system based on FPGA and AD7985 is designed. The data acquisition system can be applied to the high-precision pulse electroplating power supply, which is used to collect the output pulse current and voltage parameters and to regulate the current. Firstly, the main hardware circuit of the acquisition system is designed and analyzed, including isolation amplifier circuit, voltage following circuit and AD conversion circuit. Then the control time sequence of AD7985 is studied, the control flow chart is given, and the expected simulation waveform is obtained through Quartus II simulation. Finally, the data acquisition system used in high precision pulse electroplating power supply, in two separate positive pulse and cycle reversing pulse mode can realize the real-time current, voltage, high speed data acquisition, the acquisition of current errors are within 10 mA, can effectively meet the demand of high precision plating power source current control.

**Keywords:** FPGA; AD7985; data acquisition system; pulse electroplating power supply

通过表面镀金工艺制备的镀金层由于具有良好的耐腐蚀性, 其已经在微电子工程、表面工程、微细

精密电镀和国防工业等领域具有了广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前, 脉冲电镀, 包括单向脉冲电镀和周期换向电

收稿日期: 2021-05-11

修回日期: 2021-08-09

作者简介: 沈杰(1997—), 男, 硕士研究生, E-mail: shenjie19@gscaep.ac.cn

\*通信作者: 张林, E-mail: linzhang0832@163.com

基金项目: 国防科工局项目(JCKY2018212C015); 四川省科技计划资助(2021YFG0374)

镀,是在零件表面获得镀金层的常用方法。研究发现除电镀液外,脉冲电源的脉冲参数也是影响镀金层的晶粒尺寸、镀层致密性、厚度均匀性、孔隙率等的关键因素<sup>[2-4]</sup>。为了获得更高质量的镀层,需要高速、准确地采集脉冲输出的电流值和电压值,根据采集得到的数据进行准确、高效地调控,稳定输出脉冲的峰值电流等参数。尤其是精密物理实验的电镀件更是对镀金层的致密性有极高需求,要求脉冲电流的精度要足够高,其误差要能达到10 mA以内。但是,现有脉冲电镀电源系统多是面向大功率、大电流的镀金工艺,其输出的脉冲电流精度较低,制备的镀金层致密性难以满足精密零件的镀金需求。现有脉冲电镀电源输出的脉冲电流精度不高的原因一般是其采用的电流传感器和AD转换芯片的精度不够高,或是参数的采集速度较慢,导致控制相对滞后。为得到足够高精度的脉冲电流,需要在高速高精度的电流传感器和AD转换芯片的基础上,设计一种高速、准确、实时性好、稳定性好的电流、电压数据采集系统。

本文设计的脉冲电镀电源数据采集系统采用了内部延时小、运算速度快的FPGA为核心处理器。为了满足脉冲电镀电源的控制需求,设计了电流、电压采集电路的硬件电路,其中采用高精度的霍尔电流传感器和16位AD转换芯片,能够实现高速信号采集,且实时性好,精度高<sup>[5-6]</sup>。根据AD转换芯片的信号时序设计了控制流程并编写了控制程序,通过Quartus II软件进行仿真,验证了程序的正确性。将数据采集系统应用于脉冲电镀电源,可以得到输出峰值稳定的脉冲电流,平均电流精度可达10 mA,并且可以同时正反向采集处理,实现周期换向脉冲的稳定输出。

## 1 系统总体设计

电镀电源的总体方案如图1所示,其工作原理为:用户通过触摸屏设定脉冲模式和脉冲参数,确认后参数自动下发至单片机,单片机接收和解析这些参数后通过自定义总线传递给FPGA,随后FPGA根据这些参数通过脉冲产生单元实现正反向脉冲的输出和电流、电压的控制,并由脉冲产生电路来产生相应的脉冲电流。其中,整个电镀电源的核心是FPGA通过电压电流双闭环反馈的方式实现对脉冲电流的恒定控制,其具体原理为:先由FPGA调控输出

电压,并控制多路模拟开关进行脉冲输出,同时采集电路将采集输出脉冲的电流值与电压值并反馈至FPGA,FPGA通过反馈得到的脉冲参数对输出电压进行调整,实现电镀过程中脉冲峰值电流的稳定输出。根据一段时间内采集的电流、电压值分别计算出实际的平均电流、电压值,接着利用该平均电压、电流值计算出当前回路中的实际电阻值,然后利用该电阻值和设定的电流值计算电压值,并将该电压作为下一阶段的目标电压进行电压调控,从而实现恒流控制。

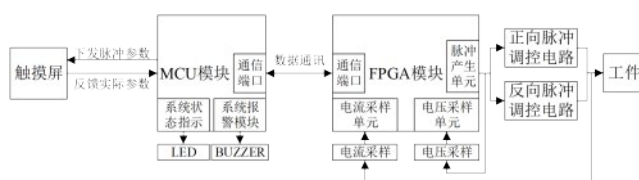


图1 电镀电源结构图

Fig.1 Electroplating power supply structure diagram

数据采集系统设计方案如图2所示,为了实现脉冲电流稳定输出,本脉冲电源采用了电流、电压双闭环反馈控制,即该电源系统能够实时检测回路中的实际电流和电压,用于电流和电压调控。具体的,在调压电路和脉冲产生电路中分别设计有电压检测接口和电流检测接口,用于检测输出脉冲的电流参数和电压参数。其中,电压采集电路的原理为:电流在调压电路调压后,经过分压进入隔离放大电路中消除共模电压并进行隔离,再通过电压跟随电路滤波后,进行AD模数转换输入FPGA。电流采集电路的原理为:当脉冲产生电路产生的脉冲电流流过霍尔传感器,感应电流转化为电压信号,然后经过电压跟随电路进入AD转换电路,再利用FPGA产生时序来控制AD7985将模拟信号进行模数转换为数字信号后串行发送输入FPGA<sup>[7]</sup>。

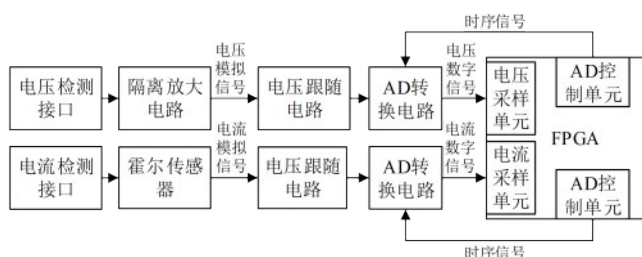


图2 单向脉冲数据采集系统结构图

Fig.2 Structure diagram of unidirectional pulse data acquisition system

## 2 硬件电路设计

### 2.1 隔离电路

由于系统检测的电压较大,为了检测实际输出脉冲的电压,防止数据采集元件受到潜在的破坏性电压的影响,防止高低压之间信号相互影响,必须对采样的电压电气隔离输给采样电路<sup>[8]</sup>,在电压采集电路前端设计了隔离电路。电路连接图如图 3 所示。

隔离放大器选用的是 Texas Instruments 公司的 ISO124 热电偶隔离放大器,采用了占空比调制-解调技术,具有良好的高频瞬态抗干扰性。电路采用  $-15\sim 15\text{ V}$  为输入端和输出端供电,输入端接调压电路的输出,输出端接放大电路,在输入输出端加入 RC 滤波电路,减小了信

号干扰,可以提高采集数据的可靠性。

### 2.2 电压跟随电路

由于噪声信号对模拟输入的干扰是影响采样精度的主要因素<sup>[9]</sup>,为了稳定感应电流,提高输出信号的精度,在 AD 转换电路前级设计了电压跟随电路,用来隔离输入端与输出端并滤除杂波,提高输出信号的精度<sup>[10]</sup>,电路连接图如图 4 所示。

本设计采用 Analog Devices 公司的一款高性能、高速电压反馈放大器 AD8021 构建电压跟随电路,电流采集电路的输入端接霍尔传感器,电压采集电路的输入端接隔离电路,输出端接 AD 转换电路。为了与 AD 转换电路的输入范围相匹配,选取  $5\text{ V}$  作为供电电压,即输出模拟量的范围为  $0\sim 5\text{ V}$ 。为了稳定电压,提高抗干扰能力,保证采集的准确度,在输入输出端加入了 RC 滤波。

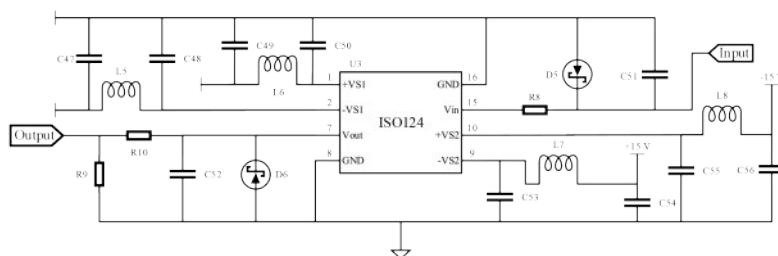


图 3 隔离电路电路图

Fig.3 Circuit diagram of isolation circuit

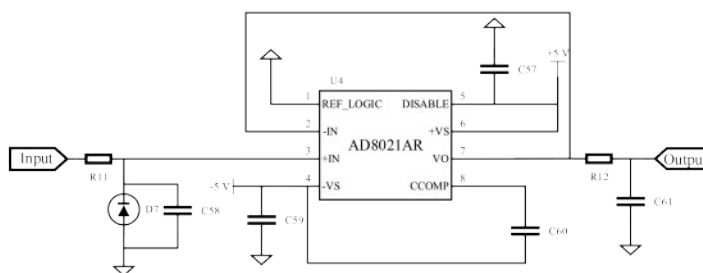


图 4 放大电路电路图

Fig.4 Circuit diagram of amplifier circuit

### 2.3 AD 转换电路

AD 转换电路是整个脉冲采集电路的核心,其影响着电流、电压的采样效率和采样精度。本系统采用的模数转换器为 Analog Devices 公司的一款快速、低功耗、单电源、精密 16 位、最大吞吐速率  $2.5\text{ MSPS}$  的逐次逼近型模数转换器 AD7985。电路连接图如图 5 所示。由于基准电压  $V_{REF}$  为  $5\text{ V}$ ,即可输入模拟电压为  $0\sim 5\text{ V}$ ,与模拟电压的范围相匹配。

数字量通过 SDO 端口以串行通信的方式输出至 FPGA 的 SOMI 端口, FPGA 通过 SDI、SCK 和 CNV 三个端口控制 AD7985,其连接图如图 6 所示。

AD7985 有多种工作模式,本文中采用的是  $\overline{\text{CS}}$  三线无忙指示模式,该模式可进行高速采样,最大吞吐速率能达到  $2.5\text{ MSPS}$ ,保证数据的实时性,此时 TURBO 端口接高电平,SDI 置 1。该电路能实现 16 位转换,极大提高了电流采集的精度,同时,其高速

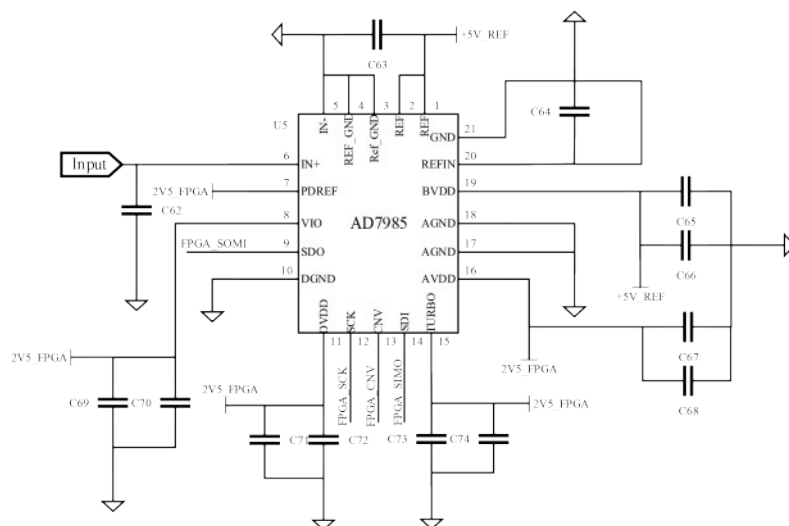


图5 AD转换电路电路图

Fig.5 Circuit diagram of analog-digital conversion circuit

采样模式可以保证采集的脉冲参数的实时性,提高了输出脉冲的精度。

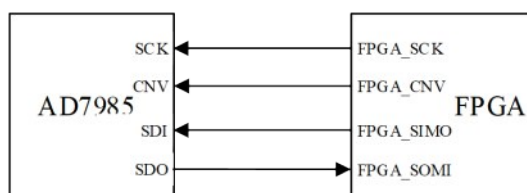


图6 AD转换电路与FPGA连接图

Fig.6 Connection diagram of analog-digital conversion circuit and FPGA

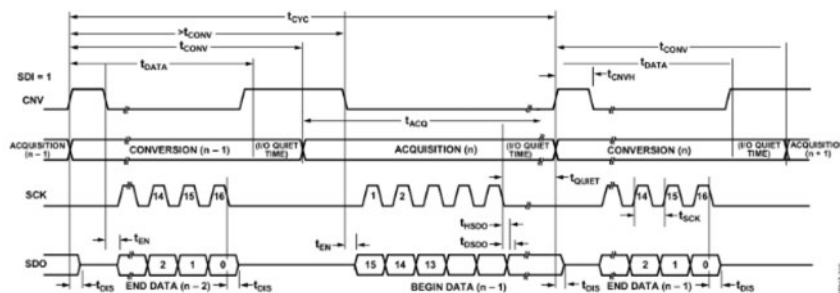
### 3 系统软件设计

#### 3.1 AD转换时序设计

FPGA通过转换输入信号CNV和串行数据时钟输入信号SCK对AD7985完成控制,将SDI端口置1使AD7985工作在 $\overline{CS}$ 三线无忙指示模式,信号

从SDO接口输入进FPGA。AD7985的 $\overline{CS}$ 三线无忙指示模式串行时序图如图7所示。

三线无忙指示模式下AD7985的运行状态分为转换阶段和采集阶段。转换阶段时进行AD模数转换,采集阶段时与FPGA进行通信,将转换得到的数据传送至FPGA。开始运行时,CNV的上升沿会启动转换阶段,选择 $\overline{CS}$ 模式,SDO强制进入高阻态。开始转换后,转换阶段会持续到完成为止,无论CNV为何状态。完成转换后,AD7985进入采集阶段并关闭输入。当CNV变为低电平时,转换得到的数据会从最高有效位开始,在SCK的下降沿依次输出。虽然数据在SCK的上升沿和下降沿均有效,但使用SCK下降沿能实现更快的采集速率。16个数据位采集完成或CNV变为高电平时,SDO返回高阻态,采集阶段结束,AD7985将在CNV的上升沿进入下一次的转换状态。

图7  $\overline{CS}$  三线无忙指示模式串行时序图Fig.7  $\overline{CS}$  mode, 3-Wire without busy indicator serial interface timing



### 3.2 总体逻辑设计

本文选用 Quartus II 软件,采用 Verilog 语言进行软件编程设计。Quartus II 是一款 Altera 公司开发的 EDA 工具,集成了逻辑综合、设计输入、时序分析、仿真验证和器件编程等开发 FPGA 所需要的软件工件<sup>[11]</sup>。

AD7985 与 FPGA 总体流程图如图 8 所示。在完成初始化后,AD7985 进入转换阶段。在转换阶段,SDO 为高阻态,没有输出。AD7985 设定的转换阶段需要持续 300 ns,如果持续时间少于 300 ns,转换阶段可能无法完成,需要重新转换。完成转换后,AD7985 进入采集阶段。在采集阶段,FPGA 从 AD7985 逐位采集 16 位数据。AD7985 所设定的采集阶段至少需要持续 640 ns,如果采集阶段的持续时间小于 640 ns,可能会导致数据采集异常,需要将寄存器清零后退出采集并反馈异常。为提高数据的可靠性,本设计取 30 次采样的平均值作为实际值。采集完一次数据后,FPGA 判断是否完成 30 次采样,若未完成,则累加寄存器并重新进入转换阶段继续采样;若已完成,则取平均值后清空寄存器。本逻辑设计适用于电流和电压的采集。

## 4 测试结果分析

### 4.1 仿真测试

在 Quartus II 中编写完程序后,进行波形仿真验证程序的逻辑正确性。数据采集程序在 Quartus II 环境下进行仿真所得的波形如图 9 所示。在接收到复位信号  $\text{rst\_n}$  的上升沿的下一个时钟信号的上升沿,CNV 信号会变为高电平,AD7985 进入转换阶段;转换完成后,CNV 信号变为低电平,则 AD7985 进入采集阶段,在 CNV 信号的下降沿,SCK 信号变为高电平,并在下一时钟信号的上升沿进入低电平,重复 16 次,在每一次 SCK 信号的下降沿采集一位数据,共 16 位。从图 9 可以看出,该仿真测试的结果与 AD7985 时序图一致,说明图 8 的 FPGA 控制 AD7985 数据转换程序流程图准确且 AD7985 转换得到的数据能够被 FPGA 正确收到。

### 4.2 实物测试

完成软件仿真后,将程序烧录到 FPGA 中进行

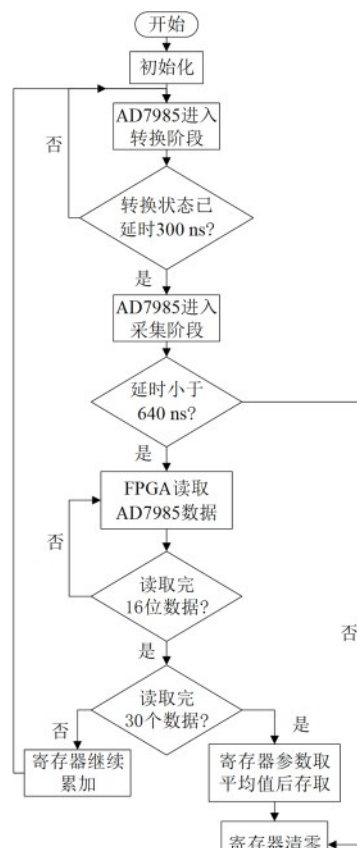


图 8 FPGA 控制 AD7985 数据转换程序流程图

Fig.8 Program flow chart of FPGA control AD7985 data conversion

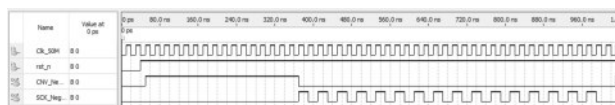


图 9 Quartus II 波形仿真图

Fig.9 Quartus II waveform simulation diagram

实物测试。实物测试的主要仪器为触摸屏、脉冲电源和示波器,脉冲电源拥有单独正向脉冲和周期换向脉冲两种输出模式。实验时通过触摸屏设置脉冲参数,采用 Quartus II 软件中的 Signaltap 实时监测 AD 采集的数值,并用装有电流探头的示波器测量负载处脉冲电源的输出波形。

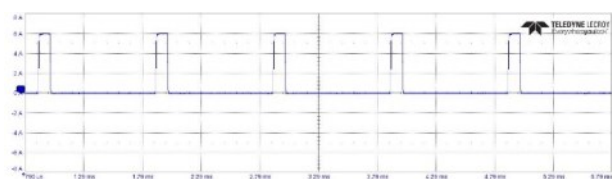
在单独正向脉冲输出模式下,设置脉冲参数为:平均电流 600 mA,脉宽 100  $\mu\text{s}$ ,占空比为 1:10,通过 Signaltap 监测数值可以看到实际采集得到的正向平均电流为 601 mA,与选取的电流值仅相差 1 mA,并且示波器显示负载处测量得到的实际脉冲电流峰值为 600 mA,即平均电流 600 mA,如图 10 所示。在周

期换向脉冲输出模式下,每周输出一个正向群脉冲和一个反向群脉冲,选取参数:正向群脉冲的平均电流为 400 mA,脉宽 100  $\mu$ s,占空比 1:10,脉冲数 3 个;反向群脉冲的平均电流为 400 mA,脉宽 100  $\mu$ s,占空比 1:10,脉冲数 2 个。实际采集的正向平均电流为 399 mA,与设定电流值相差 1 mA,反向平均电流为 394 mA,与设定电流相差 6 mA,如图 11 所示。

以上两种脉冲模式下的脉冲输出电流精度都在 10 mA 以内,而且两种脉冲的波形平滑稳定,没有出现过冲、震荡现象,说明通过本论文提出的采集系统可以实现对电流和电压的实时、准确地采集,能够很好地满足精密电镀的需求。



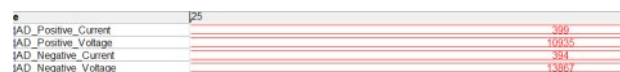
(a) AD实时监测采集数值



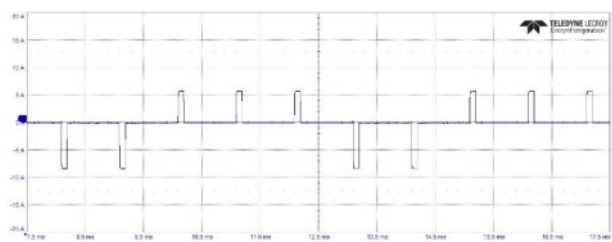
(b) 示波器测量负载处电流波形图

图 10 单独正向脉冲电流电压采集结果

Fig.10 Single forward pulse current and voltage acquisition results



(a) AD实时监测采集数值



(b) 示波器测量负载处电流波形图

图 11 双向组合脉冲电流电压采集结果

Fig.11 Bidirectional combined pulse current and voltage acquisition results

## 5 结论

本文以 FPGA 为控制核心,采用精度高、采集速率快的 AD7985 构建了脉冲电镀电源采集系统,实现了电流和电压实时、高速采集。在采集电路中引入放大电路对模拟信号进行调理,采集精度可达 16 位,在实际应用中能够有效提高脉冲电源的输出精度和可靠性,使脉冲电源输出的平均峰值电流误差能够控制在 10 mA 以内,且所得波形平滑稳定。本数据采集系统可应用于任意高速高精度的采样设计中。

## 参考文献

- [1] 王卿. 基于换向脉冲的精密镀金工艺研究[D]. 成都: 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 2019.
- [2] Lyubov S, Yevhen O, Ivan S, et al. Controlled gold deposition by pulse electrolysis[J]. Materials Letters, 2015, 139: 296-299.
- [3] 万小波, 周兰, 肖江. 无氰脉冲电镀金工艺及其在空腔靶中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2006, 2: 39-40+45.
- [4] Liu Z W, Zheng M, Robert D H, et al. West. The effect of pulse reversal on morphology of cobalt hard gold[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(5): 2546-2551.
- [5] 郭云飞, 赵冬娥, 张斌. 基于 FPGA 的高速 AD 采集设计[J]. 山西电子技术, 2013, 5: 37-39.
- [6] 王建中, 杨璐. 高速实时系统数据采集与传输[J]. 计算机科学, 2016, 43(S2): 604-606.
- [7] 贺秋实, 郝国法, 钱龙. 基于 FPGA 的高速 AD 转换[J]. 电子设计工程, 2012, 20(8): 122-124.
- [8] 吴文杰. 一种高压电源中高低压隔离电路设计[J]. 信息记录材料, 2018, 19(7): 247-248.
- [9] 齐红涛, 苏涛. 基于 FPGA 的高速 AD 采样设计[J]. 航空兵器, 2010, 1: 35-39.
- [10] 易志强, 韩宾, 江虹, 等. 基于 FPGA 的多通道同步实时高速数据采集系统设计[J]. 电子技术应用, 2019, 45(6): 70-74.
- [11] 罗杰. Verilog HDL 与 FPGA 数字系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.