

The Output Circuit Design Method for Remote Transmission of Multi-Channel 4 - 20 mA Signal*

He Zhou¹, Yafu Zhou², Xinwei Zhou³

¹Department of Automation Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an

²School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian

³Department of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang University, Hangzhou
Email: cloverskywalker@yahoo.com.cn, dlzyf62@126.com, zhouxinwei0302@hotmail.com

Received: Jul. 1st, 2012; revised: Jul. 24th, 2012; accepted: Aug. 6th, 2012

Abstract: This paper introduces a novel design of 4 - 20 mA output circuit about remote transmission of multiple signals, it is a different circuit with the widely used at present, the circuit can realize the multi-channel 4 - 20 mA signal common ground in the distal. This new method not only can solve the problem of sampling of distal of the same computer, but also can save a large amount of wiring. Analyzed by computer simulation and circuit experiment, we prove that the proposed circuit hardware design method has the advantages of high precision and simple wiring, and it is able to meet the application in multi-channel 4 - 20 mA signal remote transmission.

Keywords: 4 - 20 mA Signal Output; Signal Remote Transmission; Computer Sampling

面向多路 4~20 mA 信号远程传输的输出电路设计方法*

周 鹤¹, 周雅夫², 周心炜³

¹西安交通大学自动化科学与技术系, 西安

²大连理工大学汽车工程学院, 大连

³浙江大学机械工程自动化系, 杭州

Email: cloverskywalker@yahoo.com.cn, dlzyf62@126.com, zhouxinwei0302@hotmail.com

收稿日期: 2012 年 7 月 1 日; 修回日期: 2012 年 7 月 24 日; 录用日期: 2012 年 8 月 6 日

摘 要: 本文提出了一种面向多路信号远程传输的 4~20 mA 输出电路设计方法, 该电路与目前广泛应用的同功能电路不同, 可实现多路 4~20 mA 信号在远端共地, 不仅解决了远端计算机共地采样问题, 而且节省了大量布线。通过仿真分析和电路实验测试, 证明所提出的电路硬件设计方法具有布线简单、精度高等优点, 能够满足多路 4~20 mA 信号的远程传输需求。

关键词: 4~20 mA 信号输出; 远程信号传输; 计算机采样

1. 引言

混合动力电动汽车动力总成台架实验时要进行多种信号的实时监控, 由于动力总成中既有驱动电机的大电流, 又有发动机的高压点火, 信号长距离传输极易受到干扰, 传输线的分布电阻还会产生压降, 故通常采用 4~20 mA 电流进行信号传输^[1-3]。目前, 监

*基金项目: 国家“十二五”节能与新能源汽车“863”重大专项(2010AA1123091001)。

控计算机中的多路 A/D 信号采样电路有两种, 一种是多路共地的采样板^[4], 另一种是通道相互隔离的采样板^[5], 前者不适合对目前流行的多路 4~20 mA 电流信号进行采样, 而后者虽然可以对目前流行的多路 4~20 mA 电流信号进行采样, 但价格是前者的数倍, 且布线量大。

针对以上问题, 本文提出一种新的 4~20 mA 电流输出电路。该电路与目前广泛采用的 4~20 mA 电流输

出电路不同，不仅对输出布线和元器件要求不高，而且能够实现远程共地，减少大量布线，很适合应用于多路 4~20 mA 电流信号的远程共地传输。

2. 电路原理及仿真分析

2.1. 电路原理

图 1 是本文提出的 4~20 mA 输出电路与目前广泛采用的 4~20 mA 输出电路外部接线的比较，其中图 1(a)为本文提出的 4~20 mA 输出电路外部接线框图，图 1(b)是目前广泛采用的 4~20 mA 输出电路外部接线框图^[6]。从图中可以看出 2 者的区别有两点，对于图 1(a)来说，若有 n 路信号，需要 n + 1 根信号线，远端信号采样共地；对于图 1(b)来说，若同样有 n 路信号，需要 2n 根信号线，远端信号采样隔离。

图 2 为两种输出电路内部电路的对比，其中图 2(a)是本文提出的 4~20 mA 输出电路内部框图，图 2(b)是目前广泛采用的 4~20 mA 输出电路内部框图。图 2(a)和图 2(b)的主要差别在于二者的电流取样点不同，图 2(a)的电流取样点在电流的输出线上，图 2(b)的

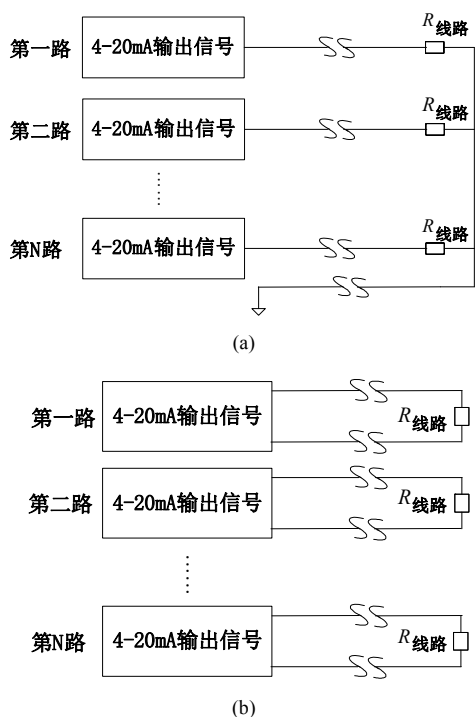


Figure 1. The contrast between external connection of two kinds of output circuits: (a) The 4 - 20 mA output circuit proposed by this paper; (b) The 4 - 20 mA output circuit widely used at present
图 1. 两种输出电路外部接线对比: (a) 本文提出的 4~20 mA 输出电路; (b) 目前广泛采用的 4~20 mA 输出电路

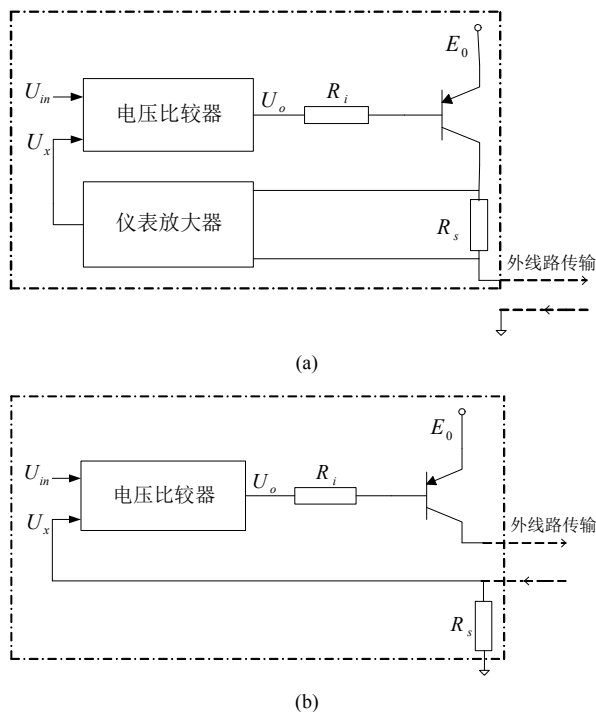


Figure 2. Contrast between internal circuit of two output circuits
图 2. 两种输出电路内部电路对比

电流取样点在电流的返回线上。对以远程共地的信号传输，图 2(a)采样到的电流输出线上的电流仅代表一路信号的电流，其它共地的信号对取样信号没有影响，图 2(b)采样到的电流返回线上的电流包含多路电流信息，各共地信号相互影响采样信息。图 2(b)的工作原理为大家熟知，这里不再赘述，下面仅就图 2(a)的工作原理作简要介绍。

图 2(a)中 R_S 为电流取样电阻， R_L 为负载电阻， R_L 在不同应用场合为不同值； I_L 为输出电流，实际标准为 4~20 mA，即 4 mA 为被测物理量的零点，20 mA 为被测物理量的满度值； U_S 为取样电阻两端的电压， U_X 为仪表放大器的输出电压。框图中仪表放大器的放大倍数为 A ，仪表放大器的输出电压为：

$$U_X = I_L R_S A \quad (1)$$

电压比较器的特性如图 3 所示，其中 U_+ 为正向饱和电压， U_- 为负向饱和电压， ΔU 为正向饱和电压到负向饱和电压变化时对应的输入端电压变化，即比较器暂态区的宽度。根据图 3 可知，比较器有三个工作区，利用“+”输入端电压 U_X 与“-”输入端电压 U_{in} 进行比较说明，当 $U_{out} - U_{in} > \Delta U/2$ 时，工作在正向饱和区，其输出电压接近正供电电源电压；反之，

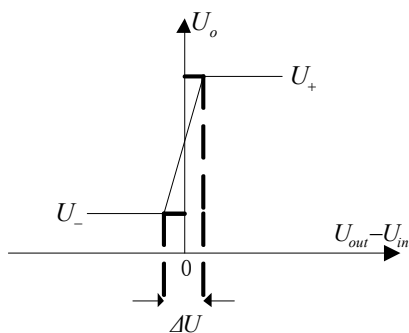


Figure 3. The characteristic curve of voltage comparator
图 3. 电压比较器的特性曲线图

当 $U_{in} - U_{out} > \Delta U/2$ 时, 比较器则工作在负向饱和区, 其输出电压接近负供电电源电压。以上二区均为稳态工作区。当 $|U_{out} - U_{in}| < \Delta U$ 时, 比较器则工作在暂态区。通常比较器的 ΔU 都很小, 尤其是精密比较器, ΔU 更小, 如比较器 LM339 的 $\Delta U \leq 10 \text{ mV}$ 。

正是利用电压比较器暂态区对输出电压的超高控制灵敏度这一特点, 找到比较器的动态平衡点。若 $U_{in} > U_{out}$, 则 $U_o \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow U_s \uparrow \rightarrow U_{out} \uparrow$ 直到 $U_{out} = U_{in}$; 若 $U_{in} < U_{out}$, 则 $U_o \uparrow \rightarrow I_L \downarrow \rightarrow U_s \downarrow \rightarrow U_{out} \downarrow$ 直到 $U_{out} = U_{in}$ 。故动态平衡点为:

$$U_{out} = U_{in} \quad (2)$$

利用公式(1)、(2)可得:

$$I_L = \frac{U_{in}}{R_S A} \quad (3)$$

由此可知, 该电路电流信号仅取决于比较器“-”输入端电压 U_{in} , 与负载无关, 比较器的比较精度取决于暂态区 ΔU 的宽度和 U_+ 、 U_- 的摆幅, 即 $(U_+ - U_-)/\Delta U$ 值越大精度越高。而 $R_S A = \text{常数}$, 故此设计电路又为一压控恒流源电路。

2.2. 仿真分析

为进一步分析所设计电路的有效性, 首先在 multisim 下设计两个分立电路如图 4 所示。

在图 4 中, A 电路输出电流值范围 3~17 mA, 频率为 10 Hz 的正弦电流, B 电路输出电流值范围 3~17 mA, 频率为 100 Hz 的正弦电流。在 multisim 仿真环境下, 分别测量两负载电阻 R_L , R'_L 上的电流, 得到如图 5(a)及(b)所示不存在相互干扰的两组正弦变化的电流波形。

采用本文所提出的方法建立图 6 所示的仿真电路。在图 6 中, 分别测量两负载电阻 R_L , R'_L 上的电流, 得到的电流波形如图 7(a)及(b)所示, 通过对比图 5 分立的电流波形, 可以看本文所提出的电路消除了干扰现象, 能够输出完好的正弦波形, 证明了所设计电路的有效性。

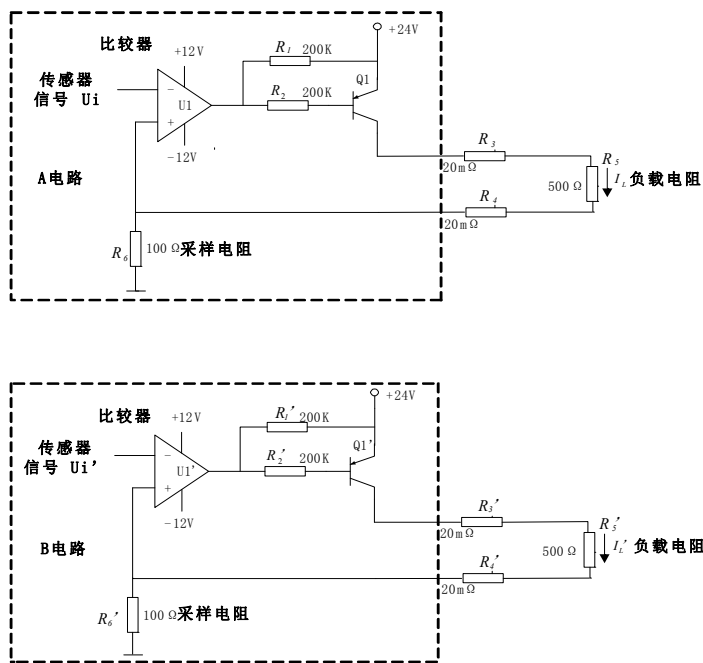


Figure 4. The diagram of discrete circuit
图 4. 分立电路图

面向多路 4-20 mA 信号远程传输的输出电路设计方法

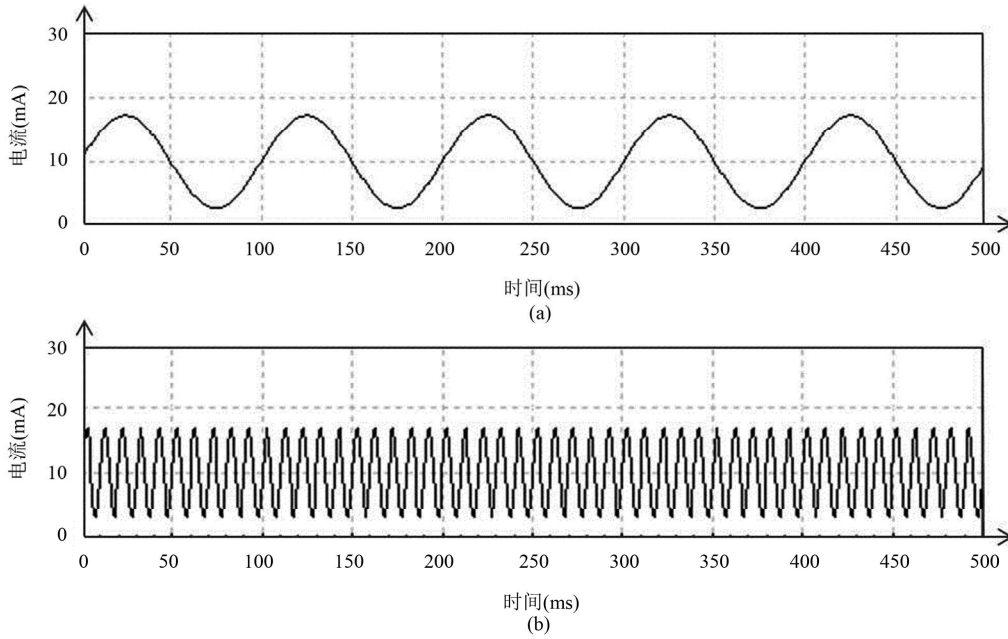


Figure 5. The waveform of load resistance in discrete circuit
图 5. 分立电路负载电阻上的波形

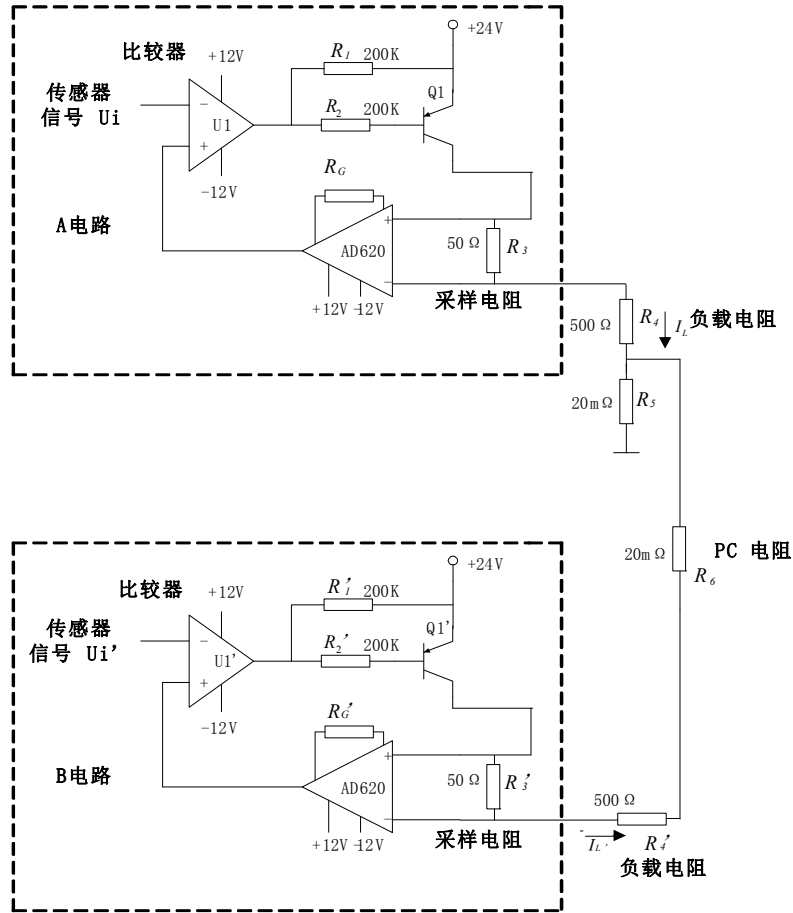


Figure 6. The schematic of output circuit proposed in this paper
图 6. 本文所提出输出电路的电路图

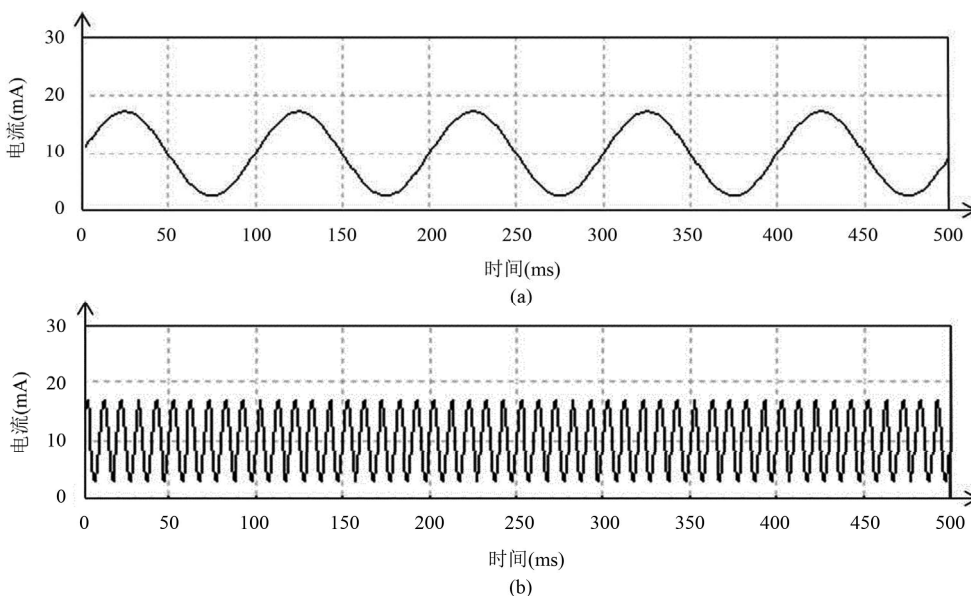


Figure 7. The waveform of load resistance in this paper
图 7. 本文电路负载电阻上的波形

3. 实验电路与测试结果

3.1. 硬件实验电路设计

硬件设计实验电路如图 8 所示。其中微处理器采用 Microchip 公司的 dsPIC33F 系列作为主控芯片，该处理器是一种性价比较高的芯片，系统可靠性强，处理器速度最快可达 40MIPS，能够很好地适应现场调试要求。D/A 转换芯片采用 TLC5615 芯片^[7,8]，该芯片为串行半参放 10 位 D/A。电压比较器采用 LM339 芯片。仪表放大器采用 AD620 高精度仪表放大器，其增益范围为 1 至 10,000。

在进行 D/A 转换时，TLC5615 的参考电压 $V_R = 1.25\text{ V}$ ，则其参放电压为 $2V_R = 2.5\text{ V}$ ，对应的数字量相应为 0~1023。此外，参考电压的稳定性可提高转换精度。

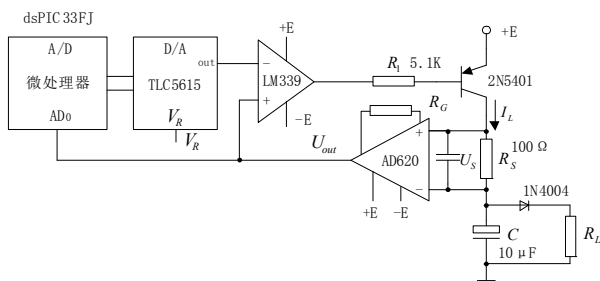


Figure 8. Experiment circuit diagram of hardware design
图 8. 硬件设计实验电路图

根据图 8 可知，实验电路的取样电阻 R_S 接在负载 R_L 的上方，即取样电压 U_S 是浮地结构，所以运算放大器采用差动输入。值得注意一点的是，运算放大器、电压比较器和三极管的供电电压需保持一致，否则浮动的共模电压会使运算放大器和电压比较器不能正常工作。

3.2. 测试结果与分析

根据所搭建硬件电路，分别对其进行线性度测试及恒流特性测试，其中线性度测试时取负载电阻 $R_L = 500\ \Omega$ ，恒流特性测试时取负载电流 $I_L = 20\text{ mA}$ 。实验测试结果如表 1 和表 2 所示。

经过上述实验测试结果分析可知，该测试电路的线性度较好，在负载一定时，小负荷电流较大负荷电流有更好的线性度。在负载电流不变时，该电路的恒流特性有着较高的精度，并且相对误差低于 0.5%，能够满足工业需求，是一种精度较高的压控恒流源电路。

4. 总结

本电路的设计能够为远距离过程控制系统传输信号提供可靠的理论依据。通过仿真分析和实验测试可知，该电路调试方便、性能稳定、精度高，同时该电路与数字信号处理器相结合可较好完成自校零、

Table 1. Linearity test ($R_L = 500 \Omega$)
表 1. 线性度测试($R_L = 500 \Omega$)

I_L (mA)	D_S (Bit)	D_X (Bit)	δ (%)
4	160	159	-0.125
5	200	199	-0.125
6	240	240	0.00
7	280	282	0.250
8	320	320	0.00
9	360	360	0.00
10	400	401	0.125
11	440	441	0.125
12	480	482	0.250
13	520	522	0.250
14	560	563	0.375
15	600	603	0.375
16	640	643	0.375
17	680	684	0.500
18	720	724	0.500
19	760	764	0.500
20	800	804	0.500

I_L ——负载电流, D_S ——理论值, D_X ——测量值, δ ——相对满度误差。

Table 2. Constant current characteristic test ($I_L = 20$ mA)
表 2. 恒流特性测试($I_L = 20$ mA)

R_L	125	250	500	750	1000	Ω
I_L	20.024	20.040	19.962	19.942	19.924	mA
δ	0.12	0.20	-0.19	-0.29	-0.38	%

R_L ——负载电阻, I_L ——实测负载电流, δ ——相对误差。

自校满功能, 对于精度要求极高的场合, 可进行线性化处理, 使其在工业应用领域、过程控制领域拥有较好的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 范传阳, 聂诗良. 基于单片机的转速测量及输出 4~20 mA 电流的系统设计[J]. 西南科技大学学报, 2012, 31(1): 74-76.
- [2] 孙刚, 郑文刚, 中长军等. 基于 MODBUS 协议的 4~20 mA 电流输出智能模块[J]. 仪表技术与传感器, 2010, 45(3): 78-79.
- [3] 鲍康贵, 秦会斌. 两线制 4~20 mA 液压变送器的设计[J]. 机电工程, 2011, 28(10): 1234-1236.
- [4] 王立华, 韩敬东, 邵玉芹等. 基于 DSP 的 4~20 mA 电流环的设计[J]. 工矿自动化, 2008, 2: 121-123.
- [5] 谢井华, 龚仁喜, 宁存岱. 基于虚拟仪器的谐波检测及远程传输实现[J]. 电测与仪表, 2010, 47(3): 47-51.
- [6] Y. Maret, S. U. Svensson and T. Merlin. Efficient harvesting from the 4.20 mA loop. ABB Review, 2011, 3: 64-70.
- [7] 宁海, 刘瀛. 用 TLC5620D/A 转换器实现 4 路 4~20 mA 信号发生器的设计方法[J]. 丹东纺专学报, 2003, 10(4): 4-5.
- [8] 朱更军, 彭永供, 项安等. 串行 10 位 D/A 转换器 TLC5615 原理及与 DSP 的接口[J]. 电子质量, 2003, 10: J012-J013.