

0~20 mA 电流输出回路设计及其误差校正

顾晓棠 陈 吉

(西门子电力自动化有限公司 南京 211100)

摘 要: 在工业现场,0~20 mA 模拟电流输出回路不受传输线路阻抗的影响、具有较强的抗干扰能力,因而得到广泛的应用。LM231 是一款具有频率电压转换功能的芯片,可以实现模拟电流 0~20 mA 输出,电路简单并且精度高。电路包括输出可变频率信号的单片机、光耦隔离电路、频率电压转换电路 LM231、放大电路和电压电流转换电路。由于温度、电子元器件误差等因素影响,实际输出往往与理想值存在一定偏差,这种偏差可以用最小二乘法来校正。即对电路采样一组数据、计算处理采样所得数据,取偏差的平方和为最小值,得到一个最佳的拟合曲线。经过这个校正过程后大多数误差基本消除,电路的输出精度得到了明显提高。

关键词: LM231;误差校正;频率/电压转换;最小二乘法

中图分类号: TN79+2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

0~20 mA current output circuit design and its error calibration

Gu Xiaotang Chen Ji

(Siemens Power Automation Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: In an industrial environment, the output of a 0~20 mA analog circuit is unaffected by transmission line impedance, and remains robust against electromagnetic interferences, which lead to its widespread use. LM231 is a Frequency-to-Voltage converter chip which realizes an analog output of 0~20 mA, the circuit achieves the characteristics of simple hardware and high precision. The circuit consists of a MCU which outputs a variable frequency signal, an opto-coupler, a frequency-to-voltage converter LM231, an amplifier and a voltage-to-current converter. Due to thermal effects and errors in the electronic parts, the actual output of LM231 suffers deviations from the theoretical value. Such deviations can be calibrated by the least square method. By sampling a set of data from the circuit, minimizing the sum of squared deviations of sampled data, a best fit curve is obtained. It is shown that accuracy of the output is remarkably improved after this calibration process.

Keywords: LM231; error calibration; frequency-to-voltage converter; least square method

0 引 言

电路由单片机控制输出一定范围内的频率信号,经频率电压转换(F/V)芯片 LM231 和电压电流转换(V/I)^[1]电路输出 0~20 mA 的标准信号。由 LM231 实现的 F/V 转换电路,与传统的数字模拟转换(digital to analog converter,DAC)芯片相比,具有电路简单、精度高、温度特性好,软件设计简单等优点。

电路的电流输出精度是一个关键的性能指标。但由于温度、元器件离散性等原因电路必然存在一些误差,有必要对这些误差进行校正。这里采用最小二乘法^[2],通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,找到最匹配的拟合曲线。最小二乘法相比于其他的拟合方法,如端点连

线法、平均选点法等,具有最大允许误差小、拟合精度高的优点。

1 硬件电路设计

1.1 系统简介

如图 1 所示, F_1 是由单片机输出的一定范围的频率信号,经光耦隔离后输出 F_{in} 信号,频率 F_{in} 和 F_1 数值相等, F_{in} 输出给 F/V 转换芯片 LM231,然后由电压跟随器、放大电路和 V/I 转换电路得到 0~20 mA 的电流输出。

1.2 单片机与隔离电路

单片机选用 Microchip 公司的 PIC 系列控制输出频率信号给后续电路。光耦选用 Vishay 公司的 TCLT1008,光耦器件具有输入输出间互相隔离的特点。由单片机产生的

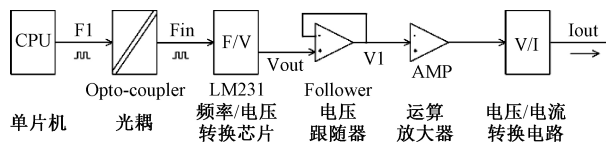


图 1 系统框图

频率信号通过光耦隔离,有效实现了单片机与频率电压转换电路的隔离,提高了系统的抗干扰能力^[3]。

1.3 频率电压(F/V)转换电路

用 LM231 芯片作为频率/电压转换电路,LM231/LM331 是德州仪器(TI)公司的高精度电压频率转换芯片,最大非线性失真小于 0.01%。它既可以实现电压/频率(V/F)的转换,也可以实现频率/电压(F/V)的转换。具备良好的温度特性,低功耗、宽频率范围,电路简单,只需外接几个电阻电容就可实现频率和电压的相互转换,适用于低成本、高精度的 V/F、F/V 转换电路^[4]。

LM231 内部包含比较器、RS 触发器、输出驱动三极管、输出保护器件、精密电流源电路、电流开关和能隙基准电路等^[5]。

LM231 低频输入范围内误差比较小,10~2 000 Hz 内工作更稳定。所以为了获得最好的精度,设计输入的频率范围可以控制在 200~600 Hz 范围内^[6]。

如图 2 所示,根据 LM231 的数据手册,LM231 的输出电压和输入频率关系为:

$$V_{out} = (1.9F_{in}) \left(\frac{R_L}{R_S} \right) (1.1R_i C_i) = (2.09F_{in}) \left(\frac{R_L}{R_S} \right) (R_i C_i) \quad (1)$$

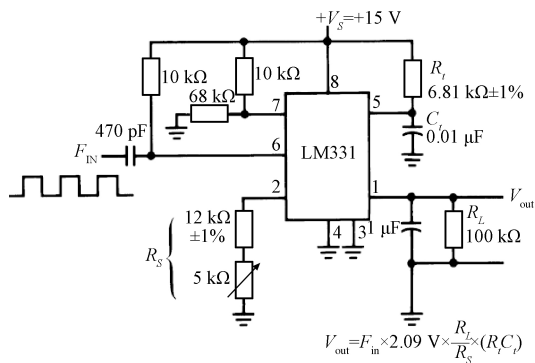


图 2 LM231 组成的 F/V 转换电路

1.4 电压放大和电压电流(V/I)转换电路

由于 LM231 的输出驱动能力有限,需要对 LM231 的输出信号作进一步处理,提高驱动能力。

如图 3 所示,N12(LT1013DI)为电压跟随器,起到缓冲和隔离的作用^[7],根据电压跟随器的特性,输出 V_1 和输入 V_{out} 相等。

N13(LT1013DI)为电压放大器,Q11 将电压信号转为电流信号输出,Q11 可以选用三极管或 MOS 管,起到增强

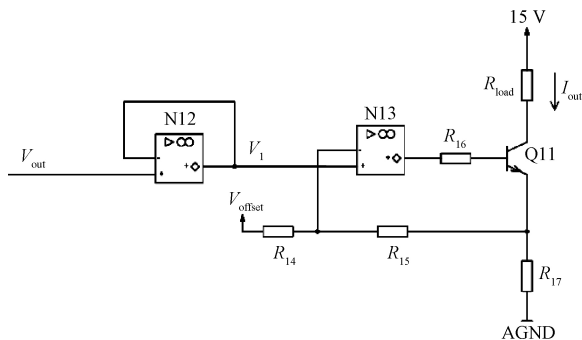


图 3 电压放大电路和 V/I 转换电路

电流输出能力的作用^[8],这里选用 MOS 管 BSS138。 V_{offset} 是对起始频率为 200 Hz 而做的电压补偿,补偿后使输入频率 F_{in} 为 200 Hz 时对应的电流输出为 0 mA。 R_{load} 为外接负载,要求不大于 300Ω。

根据运放的虚短虚地原理^[9],可以推导出 I_{out} 和 V_{out} 之间的关系式:

$$I_{out} = V_{out} \left(\frac{R_{14} + R_{15} + R_{17}}{R_{17} R_{14}} \right) - V_{offset} \left(\frac{R_{15} + R_{17}}{R_{17} R_{14}} \right) \quad (2)$$

把式(1)代入式(2)得到输入频率 F_{in} 和输出电流 I_{out} 的关系为:

$$I_{out} = (2.09F_{in}) \left(\frac{R_L}{R_S} \right) (R_i C_i) \left(\frac{R_{14} + R_{15} + R_{17}}{R_{17} R_{14}} \right) - V_{offset} \left(\frac{R_{15} + R_{17}}{R_{17} R_{14}} \right) = aF_{in} + b \quad (3)$$

式中: a, b 均为常数,由电阻、电容值和 V_{offset} 值决定。由式(3)可知, I_{out} 和 F_{in} 为一次线性关系^[10]。

2 误差分析与校正

2.1 理想值

假定所有器件均为理想器件,误差为 0,输出电流 I_{out} 和输入频率 F_{in} 的关系式为线性函数:

$$I_{out} = a_0 F_{in} + b_0 \quad (4)$$

式中: a_0, b_0 为理想情况下的常数值。

选择适当的 $R_i C_i$ 值、运放的放大倍数以及 V_{offset} 值,可以计算得到 a_0 和 b_0 的数值。

假设实际电路中计算得到: $a_0 = 0.05, b_0 = -10$

那么 F/I 的理想线性关系式为:

$$I_{out} = 0.05F_{in} - 10 \quad (5)$$

其中 F_{in} 单位为 Hz; I_{out} 单位为 mA。

输入输出关系曲线如图 4 所示。

2.2 误差分析

由于电子元器件性能的离散性、温度系数、运放失调误差等参数的影响,造成了实际输出有一定误差^[11]。选择稳定的、低温度系数的元器件,可以降低误差。如选用金属膜电阻,1%或 0.1%精度。电容选用低介电吸收常数器件,如 NPO 陶瓷电容、聚苯乙烯、聚丙烯或聚四氟乙烯电容,

表 1 理想情况下 F_{in}/I_{out} 对应值

输入 F_{in}/Hz	理想输出 I_{out}/mA
250	2.5
300	5.0
350	7.5
400	10.0
450	12.5
500	15.0
550	17.5
600	20.0

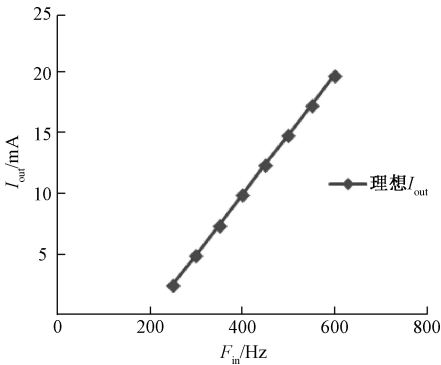


图 4 理想 F_{in}/I_{out} 曲线关系

精度为 5% 或更高。

不同的电流输出电路通道,输出电流 I_{out} 和输入频率 F_{in} 的关系式里的 a_n 和 b_n 都是不一样的。如:

通道 1:

$$I_{out} = a_1 F_{in} + b_1$$

(6)

通道 2:

$$I_{out} = a_2 F_{in} + b_2$$

(7)

...

以通道 1 电路的电容 C_i 误差为 +5% 为例(其他误差不考虑),F/I 的线性关系式为:

$$I_{out} = a_1 F_{in} + b_1 = 1.05a_0 F_{in} + b_0 = 0.052\ 5F_{in} - 10$$

(8)

如表 2 所示,输入频率为 600 Hz 时,引用误差为最大值 7.5%。

如图 5 所示,由于电容 C_i 的误差,造成了输出曲线与理想曲线产生了偏移。为了提高精度,这些误差必须通过软件方法进行校正。

2.3 误差校正方法

在实际电路中,所有误差累计在一起会导致 I_{out} 与 F_{in} 并非遵守严格的线性关系,而是散布在直线的两侧,如图 6 所示。通过拟合一条最接近的曲线可以尽可能减小误差。

图 6 中,散布的点为实测数据,直线为基于所测点的数值期望得到的拟合曲线。

表 2 通道 1(电容 C_i 误差为 +5%) 对应值

输入 F_{in}/Hz	实测 I_{out}/mA	理想输出 I_{out}/mA	绝对误差/ mA	相对误差/ %	引用误差 @20 mA/ %
250	3.125	2.500	0.625	25.00	3.13
300	5.750	5.000	0.750	15.00	3.75
350	8.375	7.500	0.875	11.67	4.38
400	11.000	10.000	1.000	10.00	5.00
450	13.625	12.500	1.125	9.00	5.63
500	16.250	15.000	1.250	8.33	6.25
550	18.875	17.500	1.375	7.86	6.88
600	21.500	20.000	1.500	7.50	7.50

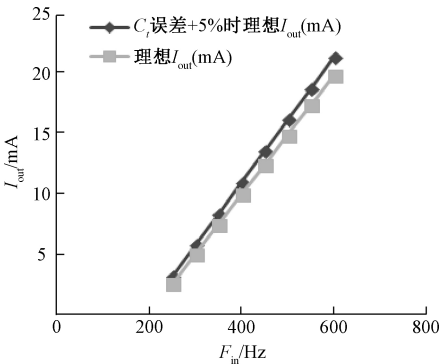


图 5 通道 1(电容 C_i 误差为 +5%) 的实际输出曲线与理想曲线

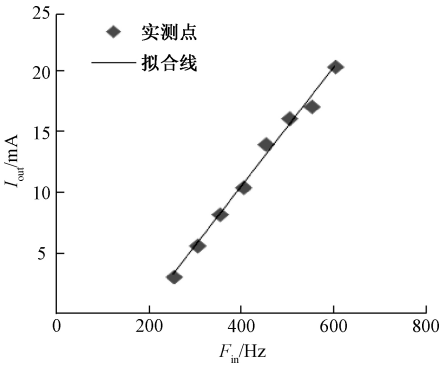


图 6 实测点分布与期望拟合曲线

对被测通道选取 n 个点进行测试,得到一组输入输出关系的数据,如输入频率为 250、300、350、400、450、500、550、600 Hz 时,这 8 个点对应的输出电流值,如表 3 所示。

表 3 中,实测值与理想值的误差比较大,最大引用误差(即精度)为 7.33%。

根据表 3 中 8 个点的采样值,拟合出最接近采样值的曲线,求得被测通道的 a, b 系数值,也就得到了 I_{out} 和 F_{in} 的实际线性关系表达式。

表 3 F_{in}/I_{out} 测试数据与理想曲线误差分析

输入 $F_{in}/$ Hz	实测 $I_{out}/$ mA	理想输出 $I_{out}/$ mA	绝对 误差/ mA	相对 误差/ %	引用误差 @20 mA/ %
250	3.162	2.5	0.662	26.48	3.31
300	5.712	5	0.712	14.24	3.56
350	8.338	7.5	0.838	11.17	4.19
400	11.031	10	1.031	10.31	5.15
450	13.592	12.5	1.092	8.74	5.46
500	16.272	15	1.272	8.48	6.36
550	18.846	17.5	1.346	7.69	6.73
600	21.465	20	1.465	7.33	7.33

曲线拟合并不要求曲线通过所有的点,但要求画出的近似曲线能反应给定点的基本趋势。最小二乘法^[12]通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小,偏差的平方和最小可以保证每个点偏差都不会很大^[13]。

假设有如下一次函数:

$$Y = f(X) = a_0X + b_0 \tag{9}$$

$$R_i = a_0X_i + b_0 - Y_i (i = 1, 2, 3, \cdots, n) \tag{10}$$

式中: R_i 为 X_i 处的偏差^[14]。

最小二乘法是对于 n 对数据 (X_i, Y_i) 求系数 a_0, b_0 的值,使偏差 R_i 的平方和为最小。

即求 a_0, b_0 , 使:

$$\sum_{i=1}^n R_i^2 = \sum_{i=1}^n (a_0X_i + b_0 - Y_i)^2 \tag{11}$$

为最小,令:

$$\phi(a_0, b_0) = \sum_{i=1}^n R_i^2 = \sum_{i=1}^n (a_0X_i + b_0 - Y_i)^2 \tag{12}$$

根据求极小值的方法,要使 $\phi(a_0, b_0)$ 为极小,须令偏

导数 $\frac{\partial \phi}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial b_0} = 0$, 即:

$$\sum_{i=1}^n 2(a_0X_i + b_0 - Y_i)X_i = 0 \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^n 2(a_0X_i + b_0 - Y_i) = 0 \tag{14}$$

$$(\sum_{i=1}^n X_i^2)a_0 + (\sum_{i=1}^n X_i)b_0 = \sum_{i=1}^n X_iY_i \tag{15}$$

$$(\sum_{i=1}^n X_i)a_0 + nb_0 = \sum_{i=1}^n Y_i \tag{16}$$

由式(15)和(16)及表 3 中 F_{in}/I_{out} 的测试数据,推导出:

$$\begin{cases} 1\,550\,000a_0 + 3\,400b_0 = 47\,331.5 \\ 3\,400a_0 + 8b_0 = 98.418 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} a_0 = 0.052\,4 \\ b_0 = -9.975\,2 \end{cases}$$

故拟合方程为:

$$I_{out} = 0.052\,4F_{in} - 9.975\,2 \tag{17}$$

2.4 校正后精度

根据得到的拟合公式(17),对实测数据和采用拟合公式得到的值做进一步的误差分析,如表 4 所示。

表 4 F_{in}/I_{out} 测试数据与拟合曲线误差分析

输入 $F_{in}/$ Hz	实测 $I_{out}/$ mA	拟合后 $I_{out}/$ mA	绝对 误差/ mA	相对 误差/ %	引用误差 @20 mA/ %
250	3.162	3.129	0.033	1.05	0.16
300	5.712	5.750	-0.038	-0.66	-0.19
350	8.338	8.371	-0.033	-0.39	-0.16
400	11.031	10.992	0.039	0.36	0.20
450	13.592	13.613	-0.021	-0.15	-0.10
500	16.272	16.234	0.038	0.24	0.19
550	18.846	18.854	-0.008	-0.05	-0.04
600	21.465	21.475	-0.010	-0.05	-0.05

表 4 中,拟合后的绝对误差最大值为 0.039 mA,引用误差最大值为 0.2%。而在表 3 中,用理想公式得出的绝对误差最大值为 1.465 mA,引用误差最大值为 7.33%。可见校正后精度得到了显著的提高。

在产品出厂前的生产测试过程中,必须对每个模拟电流输出通道都进行单独校正。用上述最小二乘法可以得到最匹配的 a, b 常数,将得到的 a, b 常数值分别写入该通道单片机的存储器内,每个通道就都有了各自差异化的 F/I 线性函数关系式,单片机程序根据输出电流的需求,由本通道函数公式 $I_{out} = a_nF_{in} + b_n$ 计算单片机应该输出的对应频率 F_{in} 值,从而最大程度地减小误差,提高输出精度。

3 结 论

由 LM231 实现的频率/电流转换电路,成本低廉、应用灵活,并且在输入端对频率信号 F_1 进行光耦隔离,提高了整个系统的抗干扰能力。

电子元器件的离散性会使电路存在一定的线性和非线性误差,通过对每个通道分别加以误差校正,可以消除大部分误差,从而得到高精度的输出电流。

最小二乘法拟合数据具有能够覆盖到各个拟合点的特点,可以保证在测量范围内每个测量点上都能获得比较高的测量精度,而不是有的测量点精度很高,有的测量点精度又很低^[15]。

本方案已在继电保护装置中得到了应用,电路工作性能良好,相对于满量程 20 mA 的输出精度达到 0.2%。提出的 F/I 方案不仅适用于继电保护系统,也同样适用于其他工控产品的模拟电流输出电路。

参考文献

- [1] 余飞,冯宇刚,顾长恂.控制与保护开关电器用 420 mA 标准电流输出电路[J].电器与能效管理技术,2014(19):19-23.
- [2] 任殿慧,周巧娣,章雪挺,等.一种铂电阻测温电路的非线性校正方法[J].电子器件,2010,33(5):603-607.
- [3] 秦键,谭延良.基于 PWM 波的 4~20 mA 转换电路的设计与分析[J].信息技术,2014(5):64-66,70.
- [4] 黄伟,庄志红.一种基于频率/电流转换的 4~20 mA 电路设计[J].电子设计工程,2015,23(22):86-88.
- [5] 盛碧琦,应忠于,胡云琴.LM331 内部电路结构及实验验证[J].信息技术,2015(10):214-216.
- [6] 张维昭,马胜前,冉兴萍.基于 LM331 的宽频率/电压转换电路[J].电子技术应用,2013,39(10):46-48,52.
- [7] 丁林.基于热电制冷器的恒温电路设计[J].电子测试,2013(20):9-10.
- [8] 陈盼辉,郭立峰,陆古兵,等.一种基于数字 PID 控制精密电流源的设计与实现[J].海军工程大学学报,2016,28(3):108-111.
- [9] 史正凤.集成运算放大器的虚短虚断概念及在线性运算中的应用[J].电脑知识与技术(学术交流),2007(11):1293-1325.
- [10] 叶欣,李婷兰,徐晶晶,等.电潜泵测试仪的电流信号发生器设计[J].电子测试,2013(Z1):75-78.
- [11] 杨靖,李捍东.自校正频率输出模块的设计[J].自动化技术与应用,2009,28(6):63-64,67.
- [12] 冯英翹,万秋华.小型光电编码器细分误差校正方法[J].仪器仪表学报,2013,34(6):175-180.
- [13] 宋晓梅,纪亮,兰日鹏.多路隔离式 4~20 mA 通道系数校正方法[J].电子测量技术,2013,36(7):116-119.
- [14] 刘九卿.解析称重传感器误差计算用最佳拟合直线[J].衡器,2014,43(2):32-36.
- [15] 江海蛟,常明伟,刘志伟,等.最小二乘法在泵试验台数据测量曲线拟合中的作用[J].化工自动化及仪表,2017,44(10):953-958.

作者简介

顾晓棠,1970 年出生,本科、高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护硬件设计。

E-mail:xiaotang.gu@siemens.com

陈吉,1984 年出生,本科、工程师,主要研究方向为电力系统继电保护软件设计。

E-mail:chenji@siemens.com