

一种提高数据采集系统精度的方法^①

赵文龙, 黄雅娜

(南昌航空大学 信息工程学院, 南昌 330063)

摘要: 数据采集系统对采集精度要求极高, 但采用 12 位的高精度模数转换器 AD774BKN, 直接利用标称值元器件设计的数据采集系统仍然存在系统误差. 尽管使用传统的线性参数标度变换可以消除系统误差, 但数据采集系统必须是线性系统. 如果存在饱和和非线性, 最好在多种输入情况下分段处理测量的若干数据, 饱和区采用传统的标度变换法, 非饱和区应用最小二乘法拟合的线性关系进行标度变换得到测量值. 实验结果证明该方法比传统的标度变换计算的测量值要明显准确, 达到提高系统精度的良好效果.

关键词: 数据采集系统; 精度; 标度变换; 最小二乘法; 信号调理

Method for Increasing Accuracy of Data Acquisition System

ZHAO Wen-Long, HUANG Ya-Na

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Data acquisition system requires high accuracy. When the data acquisition system designed with 12-byte high resolution AD774BKN and directly used the nominal value components, it still existed system error. The traditional linear parameters scale transform method can eliminate system error, but it happens when the data acquisition is linear system. If there is a saturation of nonlinearity, it is better to measure several data in a variety of input cases and make segment handling. Using the traditional scale transformation to deal with the saturation data and using the linear relationship by the least squares fitting scale transform with non-saturation can get the measured values. The experimental results show that calculation measurements using this method are much better accurate than the traditional scale transformation. It can get good effect to improve the system accuracy.

Key words: data acquisition system; accuracy; scale transformation method; least square method; signal conditioning

1 引言

数据采集系统能把物理参数模拟的真实世界与数字处理和数字控制的计算机连接起来, 实现模数转换与数字显示等功能, 数据采集系统是进行各种测量必不可少的装置^[1]. 数据采集系统一般由单片机和模数转换器^[2]等组成. 而数据采集系统追求的主要目标是精度^[3], 这势必会影响系统成本及复杂度.

普通元件精度不高, 有些还存在非线性, 基于标度变换原理, 采用线性参数标度变换法削弱元件精度不高及非线性因素导致的系统误差, 提高系统的精度.

2 数据采集系统的设计

典型的数据采集系统如图 1 所示, 包括信号调理

电路、A/D 转换电路、单片机、显示电路及通信接口电路. 输入的模拟信号经过信号调理, 以满足 A/D 转换器所能接受的电压范围, 再由 A/D 转换器转换为数字量, 采集的数据经单片机处理后, 结果可输出显示或经串行口发送到 PC 机等管理设备. 该系统采集到的数据可提取出研究对象的工作状态, 甚至用于计算机控制系统^[4,5]中进行调节控制. 选用 STC89C52RC 单片机以及逐次逼近型 12 位 A/D 转换器 AD774BKN.

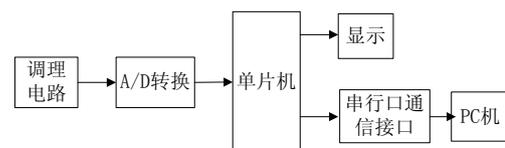


图 1 数据采集系统的结构框图

① 收稿时间:2014-05-08;收到修改稿时间:2014-05-26

3 信号调理电路设计

设输入 V_{in} (也称被测量)范围为-12V~+12V, 信号可能出现波动现象, 数据采集系统应留有余量, 12 位数字量 N 的范围设定为 $0x050 \sim 0xfb0$, 则系统期望的传输特性如图 2 所示, AD774BKN 的输入端连接方式为双极性输入, 可接收 $\pm 5V$ 范围的输入电压, 必须设计符合我们要求的信号调理电路^[6].

由图 2 计算直线的斜率 a_1 和截距 b_1 为

$$a_1 = \frac{0xf70 - 0x050}{12 - (-12)} = 164V^{-1} \quad (1)$$

$$b_1 = 164 \times (0 + 12) + 0x050 = 0x800 = 2048 \quad (2)$$

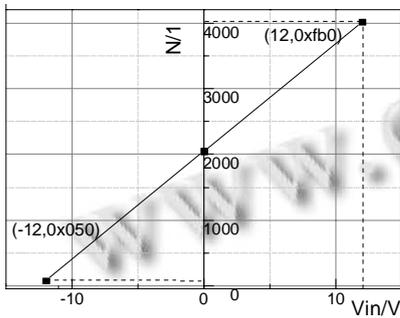


图 2 期望的数据采集系统传输特性

忽略 A/D 转换的量化误差, 则数字量 N 与被测量 V_{in} 的关系近似为

$$N = a_1 \times V_{in} + b_1 = 164 \times V_{in} + 2048 \quad (3)$$

其中, N 取 12 位二进制整数. 反之, 如果已知 A/D 转换结果为 N , 则对应被测量为

$$V_{in} = 6.098 \times 10^{-3} \times N - 12.488 \quad (4)$$

由式(4)可得, 数据采集系统期望的分辨率为 6.098mV. 假设 AD774BKN 的输入电压为 V_o , 忽略量化误差, 双极性输入 $\pm 5V$ 电压, 则 V_o 与转换后的数字量 N 之间的关系为

$$N \approx \frac{4096}{10} \times V_o + 2048 \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可得期望调理电路输出 V_o 与被测量 V_{in} 的关系:

$$V_o = 0.4004 \times V_{in} \quad (6)$$

由式(6)可知, 需对被测量信号进行衰减(0.4004 倍), 考虑到标称电阻的规定, 则信号调理电路原理图如图 3 所示, 需要一个衰减电路和一个同相放大电路才能实现所需要的衰减倍数. 由图 3 可得

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_5} \cdot V_{in} \quad (7)$$

为使设计的调理电路能满足式(6), 考虑到标称电阻的

规定, 选用 R_1 为 20K Ω , R_2 为 10K Ω , R_4 为 10K Ω , R_5 为 47K Ω . 由式(7)和式(5)可得

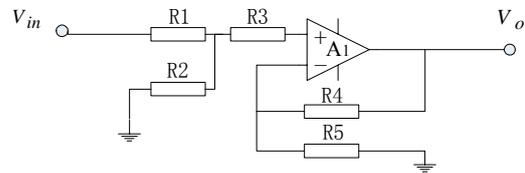


图 3 A/D 信号调理电路原理图

$$V_o = 0.4043 \times V_{in} \quad (8)$$

$$N \approx 165.6 \times V_{in} + 2048 \quad (9)$$

$$V_{in} \approx 6.039 \times 10^{-3} \times N - 12.367 \quad (10)$$

忽略 A/D 量化误差, 由式(10)可知, 实际设计的系统分辨率 6.039mV, 略低于预期的分辨率 6.098mV.

4 系统的误差分析

选用三组普通标称值电阻进行阻值测量, 用 UT61E 数字万用表电阻挡测得数据如表 1 所示, 可以看出三组电阻的实际阻值与标称阻值之间均存在一定的误差, 且最大可达 3.82%.

表 1 实测值与标称值的误差情况

	R_1	R_2	R_4	R_5
标称值/K Ω	20	10	10	47
第一组/K Ω	20.347	9.618	9.961	48.480
相对误差(%)	1.74	3.82	0.39	3.15
第二组/K Ω	20.090	9.995	10.071	47.000
相对误差(%)	0.45	0.05	0.71	0
第三组/K Ω	19.680	10.032	10.134	46.850
相对误差	1.6	0.32	1.34	0.32

分别将三组标称电阻应用于数据采集系统进行实验, 实验结果如表 2 所示. 其中 N 是 A/D 结果, V_{in} 是实际信号调理电路的输入, N_t 是式(9)计算的结果, ΔN 是 $N - N_t$. 将表 2 中的 V_{in} 和 N 绘成如图 4 所示传输特性, 同时也将式(9)对应的理论特性绘于图 4 中.

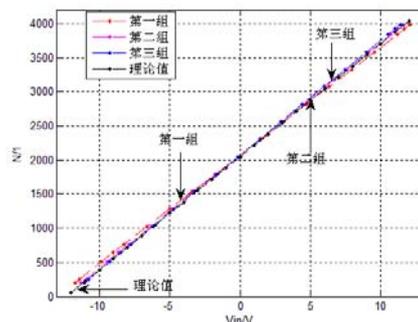


图 4 传输特性

将表 2 中的 V_{in} 和 ΔN 绘成如图 5 所示误差特性。

由图 4 可知, 基于标称值设计的信号调理电路由于元件参数误差导致数据采集系统传输特性不一致。根据表 1 测量的数据值进行计算, 第一组斜率为 0.3869, 第二组斜率为 0.4034, 第三组斜率为 0.4107。与式(8)的斜率 0.4043 相比, 第一组斜率偏小; 第三组斜率偏大; 第二组比较接近理论特性。由图 5 可知, 误

差 ΔN 与 V_{in} 近似是线性关系, 但在 V_{in} 的高端存在非线性, 原因是图 3 中使用了运算放大器, 它存在饱和和非线性。又由图 5 可知, 线性段的“最大”误差值分别为 104LSB、33LSB、52LSB, 如果数据采集系统直接用式(10)计算被测量 V_{in} , 最大绝对误差分别为 0.628V、0.199V、0.314V, 严重影响测量的准确度。

表 2 三组标称电阻对应输入和转换结果数据

序号	N	第一组			第二组			第三组		
		$V_{in}(V)$	N_i	ΔN	$V_{in}(V)$	N_i	ΔN	$V_{in}(V)$	N_i	ΔN
1	0D0H	-11.739	068H	104	-11.307	0AFH	33	-11.068	0D7H	-7
2	100H	-11.394	0A1H	95	-10.943	0EBH	21	-10.735	10EH	-14
3	200H	-9.828	1A4H	92	-9.436	1E5H	27	-9.256	203H	-3
4	280H	-9.026	229H	87	-8.664	265H	27	-8.492	281H	-1
5	300H	-8.221	2AEH	82	-7.892	2E5H	27	-7.733	2FFH	1
6	400H	-6.609	3B9H	71	-6.345	3E5H	27	-6.213	3FBH	5
7	500H	-4.991	4C5H	59	-4.798	4E5H	27	-4.691	4F7H	9
8	600H	-3.379	5D0H	48	-3.245	5E6H	26	-3.177	5F1H	15
9	700H	-1.7668	6DBH	37	-1.6964	6E7H	25	-1.6537	6EEH	18
10	800H	-0.1467	7E7H	25	-0.1418	7E8H	24	-0.132	7EAH	22
11	900H	1.4823	8F5H	11	1.4015	8E8H	24	1.3876	8E5H	27
12	A00H	3.097	A00H	0	2.95	9E8H	24	2.907	9E1H	31
13	B00H	4.708	B0BH	-11	4.494	AE8H	24	4.425	ADCH	36
14	C00H	6.324	C17H	-23	6.043	BE8H	24	5.945	BD8H	40
15	D00H	7.936	D22H	-34	7.587	CE8H	24	7.464	CD2H	46
16	E00H	9.555	E2EH	-46	9.136	DE8H	24	8.984	DCFH	49
17	F00H	11.156	F37H	-55	10.69	EEAH	22	10.511	ECCH	52
18	F50H	11.669	F8CH	-60	11.183	F3BH	21	11	FIDH	51
19	F92H	12.099	FD3H	-65	11.604	F81H	17	11.398	F5FH	51

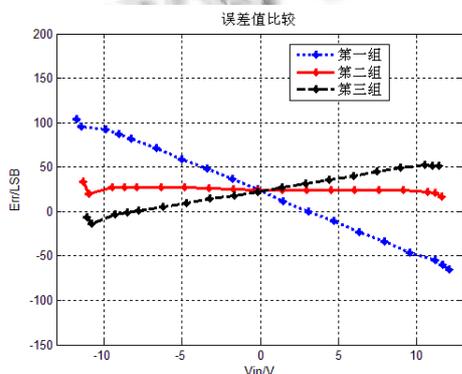


图 5 误差特性

5 线性参数标度变换法修正

5.1 线性标度变换

如果直接用式(10)计算被测量 V_{in} 会严重影响测量的精度, 但实际数据采集系统总是要在 A/D 结果基础上进一步进行被测量的显示、存储、打印、通信及报警等操作, 必须把数字量转换成输入物理量的单位, 以便操作人员对生产过程进行监视和管理, 这就是所谓的标度变换^[7]。线性参数标度变换法是最常用的标度变换方法, 其前提条件是被测参数值与 A/D 转换结果为线性关系。传统的线性标度变换的通用公式^[8]为

$$V_{in} = (V_{imm} - V_{in0}) \frac{N - N_0}{N_m - N_0} + V_{in0} \quad (11)$$

其中, V_{in0} 为一次测量仪表的下限; V_{imm} 为一次测量仪表的上限; V_{in} 为实际测量值; N_0 仪表下限对应的数字量; N_m 为仪表上限所对应的数字量; N 测量值所对应的数字量. 由表 2 可获得测量仪表的上下限数据为第 1 行和第 19 行, 求得三组数据的标度变换公式为:

$$\begin{cases} V_{in} = 6.3097 \times 10^{-3} N - 13.051415 \\ V_{in} = 6.0643 \times 10^{-3} N - 12.568379 \\ V_{in} = 5.9465 \times 10^{-3} N - 12.304879 \end{cases} \quad (12)$$

将表 2 中显示的 12 位 A/D 转换值代入式(12), 得到经传统的标度变换后的测量值如表 3 所示.

5.2 最小二乘法线性拟合

由图 5 可知, 数据采集系统的传输特性存在饱和和非线性, 因此不宜使用传统的线性标度变换法, 如果把饱和非线性部分数据去掉, 则可以多做一些中间数据, 利用最小二乘法线性拟合线性部分^[9]的传输特性就可以继续使用线性参数标度变换公式了.

由图 5 可知, 数据采集系统的传输特性存在饱和和非线性, 因此不宜使用传统的线性标度变换法, 如果

把饱和非线性部分数据去掉, 则可以多做一些中间数据, 利用最小二乘法线性拟合线性部分^[9]的传输特性就可以继续使用线性参数标度变换公式了.

用表 2 中 4~16 行实验数据($N_i, V_{in}i$), $i=4, \dots, 16$, 求关系式 $V_{in}=a_2 \times N+b_2$, 使总误差 Q 为最小.

$$Q = \sum_{i=4}^{16} [V_{in}i - (a_2 N_i + b_2)] \quad (13)$$

由求极值方法可知, 使 Q 达到极值的参数 a_2, b_2 应满足式(14)要求

$$\frac{\partial Q}{\partial a_2} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial b_2} = 0 \quad (14)$$

即有

$$\begin{cases} a_2 \sum N_i + b_2 \times 15 = \sum V_{in}i \\ a_2 \sum N_i^2 + b_2 \sum N_i = \sum N_i V_{in}i \end{cases} \quad (15)$$

其中 \sum 表示关于下标 i 从 4 到 16 求和, 结果求得三组实验数据的拟合函数如式(16)所示.

$$\begin{cases} V_{in} = 6.3134 \times 10^{-3} N - 13.07172 \\ V_{in} = 6.0473 \times 10^{-3} N - 12.53445 \\ V_{in} = 5.9364 \times 10^{-3} N - 12.29155 \end{cases} \quad (16)$$

表 3 传统的标度变换和最小二乘法拟合的标度变换后的测量值表

N	第一组			第二组			第三组		
	$V_{in}(V)$	传统(V)	最小二乘法(V)	$V_{in}(V)$	传统(V)	最小二乘法(V)	$V_{in}(V)$	传统(V)	最小二乘法(V)
0D0H	-11.739	-11.739	-11.7585	-11.307	-11.307	-11.2766	-11.068	-11.068	-11.0568
100H	-11.394	-11.4361	-11.4555	-10.943	-11.0159	-10.9863	-10.735	-10.7826	-10.7718
200H	-9.828	-9.8209	-9.8393	-9.436	-9.4635	-9.4382	-9.256	-9.2603	-9.2521
280H	-9.026	-9.0132	-9.0311	-8.664	-8.6872	-8.6642	-8.492	-8.4991	-8.4923
300H	-8.221	-8.2056	-8.223	-7.892	-7.911	-7.8901	-7.733	-7.738	-7.7324
400H	-6.609	-6.5903	-6.6068	-6.345	-6.3585	-6.342	-6.213	-6.2157	-6.2127
500H	-4.991	-4.975	-4.9906	-4.798	-4.8061	-4.7939	-4.691	-4.6934	-4.693
600H	-3.379	-3.3597	-3.3743	-3.245	-3.2536	-3.2458	-3.177	-3.1711	-3.1732
700H	-1.7668	-1.7444	-1.7581	-1.6964	-1.7012	-1.6977	-1.6537	-1.6488	-1.6535
800H	-0.1467	-0.1292	-0.1419	-0.1418	-0.1487	-0.1496	-0.132	-0.1264	-0.1338
900H	1.4823	1.4861	1.4744	1.4015	1.4038	1.3985	1.3876	1.3959	1.3859
A00H	3.097	3.1014	3.0906	2.95	2.9562	2.9466	2.907	2.9182	2.9056
B00H	4.708	4.7167	4.7068	4.494	4.5087	4.4947	4.425	4.4405	4.4254
C00H	6.324	6.332	6.323	6.043	6.0611	6.0429	5.945	5.9628	5.9451
D00H	7.936	7.9473	7.9393	7.587	7.6136	7.591	7.464	7.4851	7.4648
E00H	9.555	9.5625	9.5555	9.136	9.1661	9.1391	8.984	9.0074	8.9845
F00H	11.156	11.1778	11.1717	10.69	10.7185	10.6872	10.511	10.5297	10.5042
F50H	11.669	11.6826	11.6768	11.183	11.2037	11.171	11	11.0054	10.9791
F92H	12.099	12.099	12.0935	11.604	11.6039	11.5701	11.398	11.3979	11.3709

最小二乘法线性拟合不仅使离散的数据线性回归, 还实现了误差平方和最小. 将数字量代入式(16), 得最小二乘法拟合的标度变换后测量值如表 3 所示. 分别将表 3 中的三组数据进行绘图, 利用 V_{in} 做横坐标, V_{in} 减去传统的标度变换后的测量值作为传统法误差, V_{in} 减去最小二乘法拟合的传输特性进行标度变换后测量值作为最小二乘法误差, 用这两个误差作为纵坐标, 剔除表 3 中 4 行饱和数据, 得如图 6 所示的剔除饱和点后两种标度变换的误差特性图. 由图 6 可知, 第一组传统法最大误差达到 24.156mV, 而最小二乘法最大误差也有 ± 6.039 mV, 第二组传统法最大误差达到 30.195mV, 最小二乘法最大误差值为 ± 6.039 mV, 第三组传统法最大误差达到 24.156mV, 最小二乘法最大误差为 -6.0393mV. 由此可知, 最小二乘法最大误差明显低于传统法最大误差. 由式(8)可知系统设计的分辨率 6.039mV, 故 12 位 A/D 转换采用最小二乘法最大误差相当于 ± 1 LSB 误差.

解决该问题的方法是在不同范围内用不同的修正方法分段实现控制. 数据位于饱和区时, 采用传统的标度变换法利用其上下限获得饱和区域的线性关系进行修正; 数据位于非饱和区时, 可采用效果较好的最小二乘法拟合的线性关系进行修正, 效果如图 7 所示.

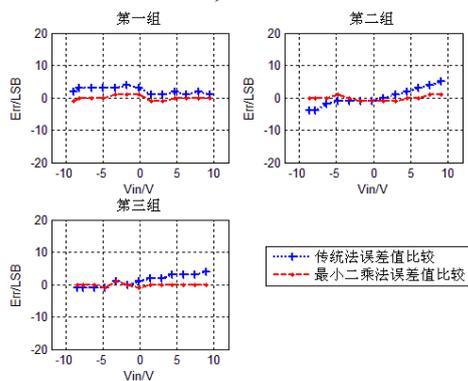


图 6 剔除饱和区两种标度变换的误差特性图

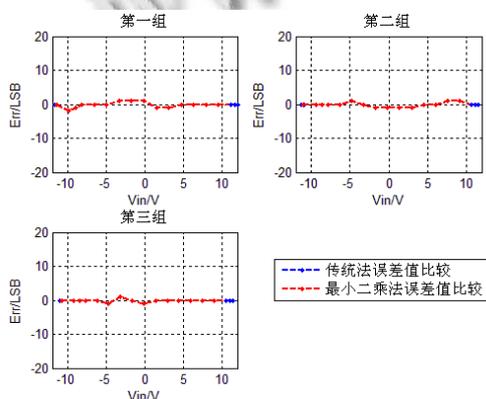


图 7 复合标度变换算法消除非线性误差

5.3 复合算法

由图 6 可知, 最小二乘拟合法处理非饱和区的离散数据较传统的标度变换效果更好. 为提高整个数据采集范围的精度, 故需针对饱和区另行处理. 由图 4 和图 5 的传输特性可知, 饱和区域的离散数据仍可修正为线性关系, 只是线性度与非饱和区线性度不一致.

6 结语

基于标称值设计的信号调理电路由于元件参数误差导致数据采集系统传输特性不一致, 影响数据采集系统精度, 从实验结果可知最大绝对误差达到 0.628V, 直接用标称值设计存在明显的系统误差, 需要改进.

信号调理电路中的运算放大器往往存在饱和和非线性, 不能简单地认为数据采集系统是线性系统. 某数据采集系统如图 8 所示, 基于标称值设计时不能直接使用采集的数据计算, 考虑到有些元件存在非线性, 在多种输入情况下测量若干数据后进行分段处理, 饱和区可采用传统的标度变换进行计算, 非饱和区剔除饱和数据后应用最小二乘法拟合的关系进行标度变换得到测量值, 比传统的标度变换的测量值要明显准确.



图 8 实验室数据采集系统校正测量

参考文献

- 1 王琳, 商周, 王学伟. 数据采集系统的发展与应用. 电测与仪表, 2004, 41(8): 4-8.
- 2 赵文艺. 基于 AT89S51 单片机的实验室数据采集系统的设计. 电子世界, 2012, (1): 60-61.
- 3 殷广冬, 王建立, 孟浩然, 万宏. 微弱信号的高精度数据采集系统. 计算机系统应用, 2014, 23(3): 199-202.
- 4 赵文龙, 刘洋, 黄雅娜, 等. 小功率随动系统中模拟校正装置的数字化设计与实现. 实验技术与管理, 2013, 30(9): 58-62.
- 5 黄凤良, 夏春梅, 刘亚俊, 陈敏. 某数据采集系统性能测试. 自动化仪表, 2008, 29(3): 54-56.
- 6 李常峰, 王洪君, 王效杰. 双极性信号采集处理系统设计与实现. 现代电子技术, 2010, 33(3): 93-95, 98.
- 7 蒋宗文, 樊鑫瑞, 徐恕宏. 自动显示仪表. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
- 8 潘新民, 王艳芳. 微型计算机控制技术(第 2 版). 北京: 电子工业出版社, 2011.
- 9 王伟斌, 邱长泉. 基于最小二乘曲线拟合的信号调理电路误差补偿方法. 计算机测量与控制, 2009, 17(11): 2286-2288, 2291.