

基于 PXI 总线的 24 通道高精度铂热电阻模拟板设计

林 旭, 韩小兵

(北京康拓科技有限公司, 北京 100190)

摘要: 针对市场上现有模拟铂热电阻的不足, 使用数字电位器和精密电阻设计了一款基于 PXI 总线的 24 通道高精度铂热电阻模拟板——PXI5440; 依据误差传递原理对设计进行了误差分析, 结果表明: 更换精密电阻可调整铂热电阻输出范围, 但不影响其输出精度; 输出电阻越大, 数字电位器步长对输出电阻精度的影响将减小, 输出电阻的绝对误差将减小; 同时, 给出了软件驱动函数算法, 实际测量结果, 证明了设计思路的正确性, 理论的正确性; 本产品同市场上现有产品相比, 其具有价格低、通道个数多及精度高等优点。

关键词: PXI 总线; 铂热电阻; 高精度

Design of 24 Channel High Precision Platinum Resistance Breadboard Based on PXI-bus

Lin Xu, Han Xiaobing

(Beijing Control Technology Co. Ltd, Beijing 100190, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of simulation platinum thermal resistance in current market, we design a 24 channel high precision platinum resistance breadboard—PXI5440 using digital potentiometer and precision resistance. We analyse the error on the basis of error propagation, and the results confirmed that: The replacement of precision resistance can adjust the output range of the platinum resistance, and it will not affect the output precision of the resistance; The greater the output resistance, the lesser it will affect on the precision of output resistance, and the absolute error of the output resistance will decrease. We give the driving function algorithm and the actual measurement results, which prove the correctness of the design ideas and theory. Compared with the existing products on the market, the breadboard of platinum thermal resistance in this paper, has the characteristics of low price, multi-channel and high precision.

Key words: PXI-bus; platinum resistance; high precision

0 引言

随着 PXI 总线技术在测试、测量领域的广泛应用, 许多 PXI 模块和系统被开发出来以满足不同用户的需求。目前市场上有多家公司提供了基于 PXI 总线技术的铂热电阻模拟板, 如 Picking 的 40-262 等, 但是其存在结构复杂、价格昂贵及通道个数偏少等缺点。

本文设计了一款基于 PXI 总线技术的铂热电阻模拟板——PXI5440, 其具有结构简单、精度高、单通道体积小及通道个数易于扩展等优点, 是传感器仿真, 实验室及工业自动化领域应用的理想选择。

1 总体方案

PXI5440 是一款符合 PXI 标准规范^[1]的 6U PXI 总线板卡, 提供多达 24 通道铂热电阻输出, 其原理如图 1 所示。从图 1 可以看出, 板上采用高速数字隔离器件对数字、模拟电路进行隔离以保护上位机免受现场异常信号的干扰; 支持板上温度测试; 支持对模拟铂热电阻的校准。

PXI5440 作为一款标准 PXI 模块可以直接应用于所有的 PXI 机箱。用户通过 PXI5440 驱动程序, 可以快速建立自己的应用程序。

2 电路结构及误差分析

2.1 模拟铂热电阻的电路结构

PXI5440 单通道模拟铂热电阻的电路结构如图 2 所示。PXI5440 为了实现高精度低温漂的模拟铂热电阻输出, 选用了 10 位的数字电位器 AD5270。其电路结构采用两个 AD5270 和一个 124 Ω 0.1% 精度, 10 ppm 温漂的高精密电阻进行并联的方式, 从而实现高精度低温漂的模拟铂热电阻输出。数字电位器 AD5270 最大输出阻值为 20 K Ω , 具有 1% 电阻误差, 温度系数 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ^[2]。由于数字电位器价格低、体积小、温漂小, 因此输出电阻也具有价格低、体积小、温漂小等优点。

AD5270 是一款 10 位的数字电位器, 采用一个数字电位器和高精密电阻并联即可实现较高精度。本文为了减小数字电位器步长 (19.531 25 Ω) 对输出电阻精度的影响, 采用了两个数字电位器并联结构。

2.2 电路误差分析

从图 2 可以看出, 两个数字电位器和固定电阻采用了并联结构, 因此可以得到输出阻值和数字电位器的数学关系:

$$Z = 1/(1/X + 1/Y + 1/R) \quad (1)$$

式中, Z 为某一通道的输出阻值, X 为电位器阻值, Y 为电位器阻值, R 为并联电阻阻值。

设 $Z = 1/P$, $P = 1/X + 1/Y + 1/R$, 则根据误差传递^[3]相关知识, 我们可以得到以下结果:

$$E_Z = -\frac{E_P}{Z^2} \quad (2)$$

收稿日期: 2013-09-29; 修回日期: 2013-12-20。

作者简介: 林旭 (1981-), 女, 工程师, 河南平顶山人, 主要从事工业控制、驱动方向的研究。

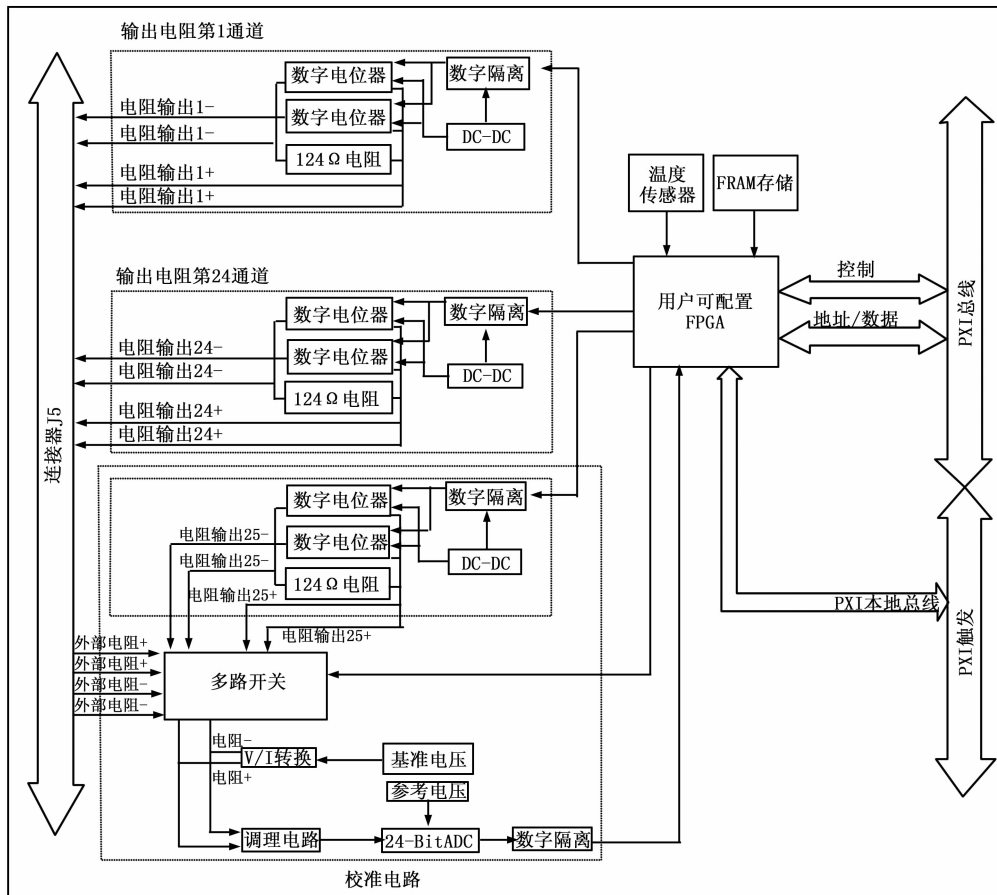


图 1 铂热电阻模拟板原理框图

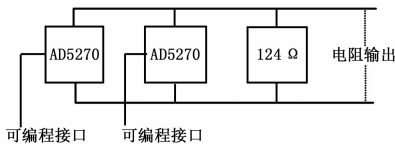


图 2 单通道模拟铂热电阻电路结构示意图

$$E_P = - \left(\frac{E_X}{X^2} + \frac{E_Y}{Y^2} + \frac{E_R}{R^2} \right) \quad (3)$$

式中， E_Z 、 E_P 、 E_X 、 E_Y 、 E_R 分别为 Z 、 P 、 X 、 Y 、 R 的绝对误差。

将公式 (2)、(3) 合并，可以得到输出电阻的绝对误差公式：

$$E_Z = \frac{1}{Z^2} * \left[\left(\frac{E_X}{X} \right) * \left(\frac{1}{X} \right) + \left(\frac{E_Y}{Y} \right) * \left(\frac{1}{Y} \right) + \left(\frac{E_R}{R} \right) * \left(\frac{1}{R} \right) \right] \quad (4)$$

式中， $\frac{E_X}{X}$ 、 $\frac{E_Y}{Y}$ 、 $\frac{E_R}{R}$ 分别为数字电位器和并联固定电阻的相对误差，即元器件的固有参数。以本文的实际电路为例其数值分别为：1%，1%，0.1%。假设 E_{RX} 、 E_{RY} 、 E_{RR} 分别为 X 、 Y 、 R 的相对误差，则可以得到以下公式：

$$E_Z = \frac{1}{Z^2} * \left[E_{RX} * \left(\frac{1}{X} \right) + E_{RY} * \left(\frac{1}{Y} \right) + E_{RR} * \left(\frac{1}{R} \right) \right] \quad (5)$$

从公式 (5) 可以得到以下结论：

1) 输出电阻的绝对误差和输出电阻的阻值得平方成反比关系。

2) 输出电阻的绝对误差随着 X 、 Y 的变大逐渐变小。

3) 更换具有相同精度，不同阻值的并联电阻 R ，对输出电阻的误差影响很小。

因此，当 X 、 Y 的数值远大于 Z 时，输出电阻的绝对误差将非常小。以 $X=10\ 000\ \Omega$ 、 $Y=10\ 000\ \Omega$ 、 $R=124\ \Omega$ 为例，其绝对误差约为 7.5×10^{-5} 。在不改变数字电位器的情况下，通过更换电阻 R ，可以轻松调整输出电阻的输出范围，但不影响输出电阻的精度。

2.3 数字电位器步长对输出电阻精度影响分析

AD5270 是一款最大阻值 20 K Ω ，10 位的数字电位器，因此其电阻步长 S 为：20 K Ω /1024=19.531 25 Ω 。数字电位器的阻值是非连续的，其步长对输出电阻的精度存在一定的影响。公式 (1) 给出了电路结构的数学关系，本节将根据公式 (1) 计算出数字电位器步长对输出电阻精度的影响。

假设数字电位器 X 增加一个步长， Y 保持不变，根据公式 (1) 此时的输出电阻 Z_N 为：

$$Z_N = 1 / (1 / (X + S) + 1 / Y + 1 / R) \quad (6)$$

由公式 (1) 和 (6) 可以得到以下公式：

$$Z_S = Z_N - Z = \frac{SY^2R^2}{[(X+S)Y + (X+S)R + YS] * [XY + XR + YR]} \quad (7)$$

式中， Z_S 为输出电阻的差值。

将公式 (7) 进行化简后得到以下结果：

$$Z_S = \frac{S}{[(X+S)/R + (X+S)/Y + 1] * [X/R + X/Y + 1]} \quad (8)$$

由2.1节PXI5440板卡的电路结构可以知道:PXI5440的输出电阻为模拟铂热电阻输出,其输出电阻 $Z \geq 100 \Omega$,固定电阻 R 为 124Ω 。当输出电阻 $Z \geq 100 \Omega$ 时,根据3.1节驱动函数说明的算法可以得知:

1) X 和 Y 的输出差别很小(最大相差2个步长—— 39.0625Ω);

2) X 和 Y 的数值随着 Z 的变大而变大;

3) X 和 Y 的数值都将大于 976.5Ω ,都远大于固定电阻 R 和步长 S 。

因此可以认为 $X/Y=1$,因此公式(8)可以化简为以下公式

$$Z_s = \frac{S}{(X/R+2+S/R+S/Y) * (X/R+2)} \quad (9)$$

公式(9)中, S/R 为固定数值; S/Y 为小数,可以忽略不计; X/R 为大于1的正数。它们都和 Z_s 成反比例关系。因为随着 Z 的变大, X 和 Y 将快速增大, Z_s 将减小。因此数字电位器步长对输出电阻精度影响随着输出电阻的变大而减小。例如当 $Z=99.66366604 \Omega$, $X=Y=1015.625 \Omega$ 时,根据公式(9) Z_s 为 0.184871Ω 。当 $Z=101.4095177 \Omega$, $X=Y=1113.28125 \Omega$ 时,根据公式(9) Z_s 为 0.159517Ω 。因此,数字电位器步长对PXI5440的输出电阻——模拟铂热电阻的影响非常小——小于 0.184871Ω 。

综合2.2,2.3节的结论可以知道:随着 Z 的变大, X 和 Y 数值将变大(同时远大于 Z),数字电位器步长对输出电阻精度的影响将减小,输出电阻的绝对误差将减小。

3 驱动函数和实验验证

3.1 驱动函数说明

驱动程序采用WinDriver来开发,具有开发周期短、难度小等优点^[4]。用户调用驱动函数控制两个数字电位器阻值以实现用户期望的输出电阻阻值。驱动函数需要将输出电阻的期望值转换为两个数字电位器的码值,因此驱动函数算法精度对输出电阻的精度有巨大影响。

假设用户期望电阻数值为 Z ,数字电位器的码值分别为 X 和 Y ,则根据公式(1)可以得到以下关系:

$$Z = 1 / (1/X + 1/Y + C) \quad (10)$$

$C=1/R$ 为常数,等于通道并联电阻阻值。

3.1.1 转换算法说明

当上位机程序给出期望电阻数值 Z ,则 Z 为一个常量。驱动函数需要找到 $X1, Y1, Z1$ 的组合,以满足以下公式(11)~(14):

$$Z1 = 1 / (1/X1 + 1/Y1 + C) \quad (11)$$

$$-a < Z1 - Z < a \quad (12)$$

$$0 < X1 < 1024 \quad (13)$$

$$0 < Y1 < 1024 \quad (14)$$

$X1, Y1$ 分别为数字电位器的码值,且为整数;公式(12)中, a 为输出电阻的允许误差。

根据公式(10)可以知道 Z 和 X, Y 的关系为2维平面。虽然有很多种 X, Y 的组合可以满足公式(10),但 X, Y 为离散整数,要找到最优的 X, Y 组合需要大量的计算。为了兼顾计算数量和精度,驱动函数采用以下算法,其求解过程如下:

1) 当 Z 值给定以后,假设 X 和 Y 相等,则公式(10)可以变化为:

$$2/X = 1/Z - C \quad (15)$$

根据公式(15)求出 $X1_temp$;

2) 如果 $X1_temp$ 为一个非整数,对 $X1_temp$ 进行向上取整得到 $X1$,对 $X1_temp$ 向下取整得到 $Y1$;如果 $X1_temp$ 为一个整数, $X1$ 和 $Y1$ 均等于 $X1_temp$ 。

3) 如果 $X1, Y1$ 大于1023,强制将 $X1, Y1$ 置为1023;如果 $X1, Y1$ 小于1,强制将 $X1, Y1$ 置为1。将 $X1$ 和 $Y1$ 带入公式(11),求得 $Z1$ 。

4) 将 $Z1, Z$ 带入公式(12)看是否满足要求。

5) 如果满足公式(12)返回1,算法结束;否则返回0,算法结束。

以上算法首先通过暂时降低公式(10)维度的方法,得到一个中间变量 $X1_temp$ 。然后以 $X1_temp$ 为中心,展开双向搜索从而找到满足条件的 $X1, Y1, Z1$ 组合。为了减小计算量,驱动算法仅进行了一次搜索,造成驱动算法在个别点上的误差有点偏大,此处有待进一步改进。

3.2 实验验证

在前文设计的基础上,我们完成了PXI5440板卡的加工和调试。本文对PXI5440的输出电阻进行了多次测试以验证设计的有效性。测试结果如图3所示,图中输出电阻的期望值为 $100 \sim 122 \Omega$,测量间距为 0.2Ω 。

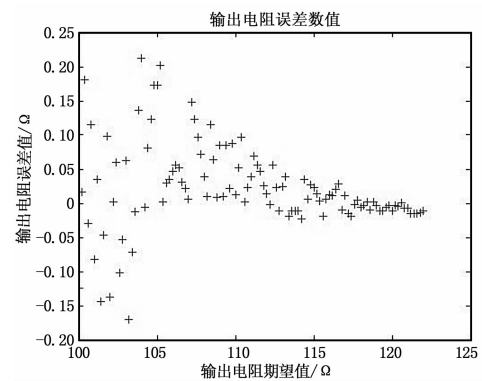


图3 输出电阻误差

从图3可以看出,随着输出电阻阻值变大,误差数值快速减小,实验结果和理论分析保持一致。虽然输出电阻阻值较小时输出电阻的误差较大,但其误差数值小于 0.25Ω ,依然具有很高的精度。图3的数据证明了本文的设计具有很高的精度,验证了设计的有效性。

4 总结

本文介绍了一款基于PXI总线的24通道高精度铂热电阻模拟板设计过程,给出了其设计思想。文章详细介绍了其总体设计方案、电路结构、误差函数及驱动算法,最后通过实验数据验证了设计思想的正确性。本文设计的PXI5440板卡具有精度高、通道多、价格低、稳定性好及操作简便等优点,是工业自动化等领域应用的理想选择,也为他人的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] PXI Express hardware Specification Revision 1.0 ECN 1 (Revision 2.0) [S]. 2008.
- [2] Analog Devices. AD5270 应用产品数据手册 [Z/OL]. 2010. 12.
- [3] 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 牛军浩, 代云启. 基于PXI总线的高速数字化仪研制 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (3): 859-861.