

超低温精密智能铂电阻温度变换器设计

刘 辉, 张 恂, 董 帅
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 以 16 位 MSP430 CPU 为核心, 通过可编程增益模数转换器 AD7715 的应用, 实现涵盖超低温在内的全量程温度测量。利用 AD7715 自带的校准功能, 消除增益与零点的漂移和误差, 设计出免于调试、可完全互换的铂电阻测试数字化、智能化平台。通过不同温度段温度-电阻函数, 解决温度精确计算的难题。测试结果表明: 智能铂电阻温度变换器可以与各不同温度段的铂电阻温度传感器匹配, 通过简便的传感器校准特性输入设置, 消除通用传感器特性造成的误差, 获得更高的测试精度。

关键词: 超低温温度测量; 智能温度变换器; 增益与零点自校准; 非线性校准

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)01-0045-07

Design of precision smart platinum resistance transmitter for ultra-low temperature measurement

LIU Hui, ZHANG Yun, DONG Shuai

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: With the 16-bit MSP430 CPU as the core, full-scale measurements including ultra-low temperature are realized through the application of programmable gain analog-to-digital converter AD7715 connected to platinum resistance sensors. With the self-calibration capability of the AD7715, the drift and error of the device are removed. The problem of temperature accurate calculation is solved by the temperature-resistance function of different temperature segments. The experimental results show that the smart platinum resistance temperature transmitter can be directly matched with the platinum resistance sensors of different temperature segments. With the calibration parameter set of the sensor, the error caused by the universal sensor characteristics is eliminated and higher accuracy is obtained.

Key words: Ultra-low temperature measurement; Smart temperature transmitter; Gain and zero self-calibration; Non-linear calibration

引 言

目前常用的温度测量方式有: 热电偶、铂电阻、热敏电阻、红外传感器。1990 年国际温标 (ITS-90) 是目前国际通用的最新国际温标, 其中第三温区: 13.8033K~1234.93K 用铂电阻温度计定义。铂电阻被认为是当今高精度温度测量的主要敏感元件, 其具有性能稳定和可靠性高的特点, 常用于 -250℃~650℃ 区间温度测量。以液氢为燃料、液氧为添加剂的超低温介质在航天、工业等领域中已经获得广泛使用, 如何实现涵盖液氢、液氧超低温温度范围的精确测量是不可回避的问题, 因此迫切需要研制新型铂电阻温度变换器, 实现超低温、宽温度 (跨不同的温区) 的高精度测量。数字智能技术的发展, 为实现测量提供了途径, 特别是带模拟前端的模数转换器 ADC (Analog-to-digital Converter)、具有各种接口功能的 CPU 已经大量上市, 为传感器信号接入数字器件、直接完成采样与数据处理、实现数字量智能变换器提供了捷径。

1 现有铂电阻模拟温度变换器的不足

1.1 铂电阻敏感元件的温度特性

铂电阻测温敏感元件分为绕线型和薄膜型。铂的纯度与电阻的温度系数相关。日本和德国都建立

了代号不同、基本内容相同的铂电阻敏感元件工业标准, 即铂电阻阻值与温度的关系如下:

① 0℃~600℃时,

$$R_t = R_0(1 + 3.90802 \times 10^{-3}t - 0.5802 \times 10^{-6}t^2) \tag{1}$$

② -200℃~0℃时,

$$R_t = R_0(1 + 3.90802 \times 10^{-3}t - 0.5802 \times 10^{-6}t^2 - 4.2735 \times 10^{-12}(t-100)t^3) \tag{2}$$

其中, t 为温度值 (℃); R_0 为温度 0℃时的电阻; R_t 为温度 t 时的电阻;

③ -200℃以下时, 需要通过铂电阻标定获得阻值与温度的关系。

对不同交付批次薄膜铂电阻超低温传感器特性对比, 不同批次的温度传感器 20K~70K 温度范围分度表电阻值具有较大的分散性。

低温液氮沸点 (温度为 77K) 以上, 铂电阻敏感元件电阻-温度是多次项函数关系; 超低温液氢 (三相点的温度为 13.81K)、液氧 (三相点的温度为 54.361K) 情况下, 电阻-温度是更复杂的函数关系。中国科学院低温计量测试站标定的超低温铂电阻温度传感器 (编号 16B1322#) 分度表超低温特性示于图 1。

通过式 (1) 计算可以知道如果仅用线性变换器、采用线性方程替代会带来不同程度的温度测量误差, 如表 1 所示。

1.2 铂电阻敏感元件互换性误差

铂电阻敏感元件精度分为 A、B 两个等级。直接采用式 (1)、式 (2) 本身就存在测温误差。

其中 A 级精度的敏感元件误差为

$$\Delta t = \pm(0.15 + 0.002|t|) \tag{3}$$

B 级精度的敏感元件误差为

$$\Delta t = \pm(0.3 + 0.005|t|) \tag{4}$$

铂电阻敏感元件测温误差见表 2。

1.3 模拟铂电阻温度变换器使用范围

通过式 (1)、式 (2) 可以知道, 铂电阻温度传感器只有在正温及 -100℃ 以上 (忽略式 (2) 高次方项, 最大误差 0.21℃) 时, 电阻与温度的关系近似为二次方的关系, 近似用式 (1) 代替。将敏感元件接入正反馈电路后, 可以实现铂电阻温度传感器电阻-温度非线性校正, 电压输出与温度成线性关系, 实现温度的准确测量, 非线性误差校正精度可以达到 0.1%。

因此模拟铂电阻温度变换器存在如下两个缺陷:

① 不能消除敏感元件互换性所带来的误差, 要提升测温精度, 必须采用传感器分度值与变换器配对调试, 给使用带来极大不便。

② 温区应用范围只有在正温及 -100℃ 以上才能到达很好的精度, 温区应用范围受到限制, 简单模拟电路无法线性化铂电阻温度传感器复杂的温度特性函数, 无法准确测量超低温度。

因此铂电阻温度变换器在超低温测量时需要对信号进行复杂的非线性变换, 才能准确测温。

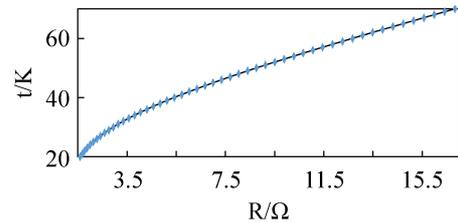


图 1 铂电阻超低温特性

Fig. 1 Platinum resistance ultra-low temperature characteristics

表 1 铂电阻非线性误差

Table 1 Nonlinear error of platinum resistance

温度范围	非线性误差	非线性误差值
0℃~100℃	0.4%	0.4℃
0℃~200℃	0.7%	1.4℃
0℃~500℃	2.0%	10℃

表 2 铂电阻敏感元件测温误差

Table 2 Platinum resistance sensitive element temperature error

测量温度 (℃)	A 级元件 测温误差 (℃)	B 级元件 测温误差 (℃)
-200	±0.55	±1.3
-100	±0.35	±0.8
0	±0.15	±0.3
100	±0.35	±0.8
200	±0.55	±1.3
300	±0.75	±1.8
400	±0.95	±2.3

2 智能铂电阻温度变换器方案设计

设计超低温精密测量智能铂电阻温度变换器要达到的目的就是：解决铂电阻对液氢、液氧类超低温介质的高精度测量问题；提供通用或专用分度表用于不同应用场合，通过简便的传感器特性设置就可以实现温度精确测量，并且能与不同量程的铂电阻传感器匹配，实现全温区的准确测量，以及满足对智能变换器价格低、可靠性高、制造便捷的要求。

智能铂电阻温度变换器具有的功能：传感器特性参数可输入；现场温度显示；模数转换器 DAC (digital-to-analog converter) 输出可选择 4mA~20mA 电流或 0.1V~4.9V 电压输出。

超低温精密测量智能温度变换器的设计充分考虑工业现场使用, 为确保 CPU 系统长时间工作的可靠性, 采用电源地线隔离设计, 防止接地干扰造成的温度测量不准、系统死机等现象。智能铂电阻温度变换器系统如图 2 所示。

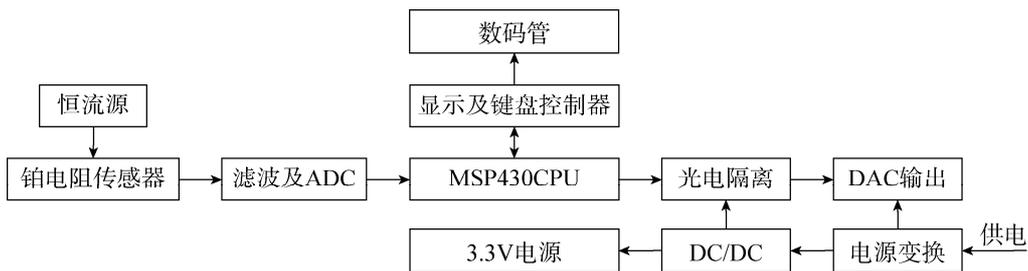


图 2 智能铂电阻温度变换器系统

Fig. 2 Intelligent platinum resistance temperature converter system

传感器信号敏感方式采用恒流源激励, 地线隔离的 CPU 系统采用 3.3V 供电, 考虑到液氢、液氧类低温介质应用环境, 电路采用了本安防爆设计。

3 硬件设计

3.1 温度敏感方式

四线制铂电阻温度传感器是精度最高的测量方式, 温度测量采用四线制温度传感器, 消除了传感器引线电阻带来的测温误差。

四线制测温方法如图 3 所示, 通过恒流方式, 可以直接获取铂电阻敏感元件的电压 V_s , 测试出铂电阻值 R_t , 消除了传感器引线电阻 (r_1 、 r_2 、 r_3 及 r_4) 带来的测量误差情况。

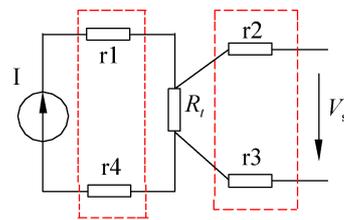


图 3 四线制测温方法

Fig. 3 Four-line temperature measurement method

3.2 电路设计

考虑到温度为缓变量、低频信号, 采用 Σ - Δ 型无失码 16 位 AD 转换器 AD7715, 传感器差分信号分别经无源 RC 滤波后进入 AD7715 输入端。AD7715 含有带差分输入的完整模拟前端, 具有可编程增益功能, 可以直接接收传感器输出的低幅值信号。器件内部直接带数字滤波, 可以有效消除转换过程带来的噪声。可编程设置滤波器的陷波点, 有效抑制工频干扰。可编程增益功能简化了电路, 节省了放大器设计, 保证了电路的一致性, 免除模拟前向通道的电路调试。基准电压采用与恒流源同源电压, 消除基准漂移、噪声带来的转换误差。

CPU 选择 Ti 公司的 MSP430 系列 16 位超低功耗单片机 MSP430F2132, 其具有如下特点: 16 位 CPU 通过总线连接到存储器和外围模块; 资源透明、调试便捷的 JTAG 接口仿真功能; 多时钟能够降低功耗; 8KB+256B Flash 存储器, 512B RAM, 其中 256B 信息存储器提供了更灵活的编程与擦除方

式,可在线存储、记录传感器的特性及温度输出特性系数,无需再扩展可编程器件;两个 16 位定时器,具有灵活的捕获/比较寄存器;各类通用串口 (UART/SPI 接口);降电压监视;看门狗功能。这是一款价格低、适宜于相对简单算法与数据处理场合的控制器。

DA 转换设计采用 16 位 AD420。通过引脚设置,可以提供电流或电压输出方式。数据输入通过光耦,采用 SPI 接口与 CPU 相连。简化了 DA 转换后电压/电流的转换,提高了可靠性和输出精度。

显示及键盘控制器采用 ZLG7289BS,连接 4 位数码管和 4 个数据设置键盘。具有多种显示控制功能,大大减轻了显示的编程负担。采用 SPI 接口与 CPU 相连。4 位数码管显示单位为 K,小数点后保留 1 位小数;4 个键盘用于输入传感器特性参数。虽然采用扫描显示,但该器件表现出良好的电磁兼容特性。

隔离 DC/DC 采用 Ti 公司的 DCP010505BP,具有良好的转换效率,提供数码管显示所需电流。

4 软件设计

4.1 软件流程

系统加电后,进入时钟、看门狗、显示器、ADC、DAC 的初始化设置,随后进入测试程序。软件流程示于图 4。

测试时每隔 10 秒,对 AD7715 进行自校准,消除温度、时间引起的漂移。采样传感器电压,计算铂电阻阻值,完成温度的计算。将计算出的温度送显示控制器,根据软件中设定的初始和满量程值计算出相应的数字量,送 DAC 输出。

4.2 铂电阻值的测试

4.2.1 AD7715 的设置

在 AD7715 进入测试及增益切换时采取 AD 自校准。AD7715 的自动增益校准、调零有效消除了增益、零点漂移产生的误差,保证了前向通道的精度和稳定性,确保超低温度的测量精度。

AD7715 采用数字滤波,Z 域滤波器传递函数为

$$H(Z) = \left(\frac{1}{N} \times \frac{1-Z^{-N}}{1-Z^{-1}} \right)^3 \quad (5)$$

频率域特性

$$|H(f)| = \left[\frac{1}{N} \times \frac{\sin\left(N \times \pi \times \frac{f}{f_s}\right)}{\sin\left(\pi \times \frac{f}{f_s}\right)} \right]^3 \quad (6)$$

其中, f_s 为采样频率。

在 AD7715 软件设置中,第一陷波点设置为 50Hz,有效抑制耦合进来的工频干扰,衰减优于 100dB。-3dB 滤波截止频率设置在 13.1Hz。从 AD7715 滤波器的频率响应特性可以知道,低通滤波器具有极好的衰减特性。

4.2.2 铂电阻值的计算

除了 AD7715 自身携带的滤波器外,在软件中增加滤波环节,消除 AD7715 转换输出噪声,有效提升滤波器在高增益时的采样位数。滤波方法采用算术平均值法及程序判断滤波法相结合,既充分考虑温度值作为缓变量,也防止应用环境的变化所带来的温度突变,提升智能温度变换器的响应速度。通过算术平均值法有效获得 16 位 AD 采样值,抑制数据波动。电阻计算采用下式:

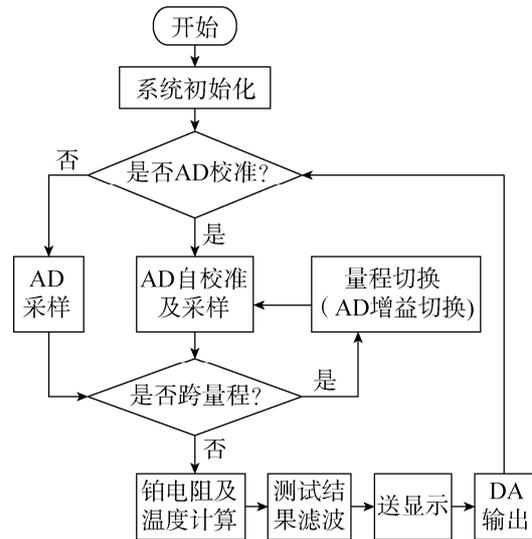


图 4 软件流程

Fig. 4 Software processes

$$R(n) = \frac{1}{16} \sum_{i=0}^{15} R'(n-i) \quad (7)$$

其中, $R(n)$ 为测试结果, $R'(n)$ 为当前获取值, $R'(n-1)$ 为前次采用的计算值。

当 $|R'(n) - R'(n-1)| \geq 0.5 \Omega$ 时, 电阻计算采用

$$R(n) = R'(n) \quad (8)$$

$R'(n-i)(i=0 \sim 15)$ 设置为 $R'(n)$ 。

初始化时, $R'(n-i)(i=0 \sim 15)$ 设置为 0, 第一次测试后, 全部设置第一次采样值, 便于加电后快速跟踪测试状态。

通过软件后置低通滤波, 有效提升 AD7715 在高增益时的分辨率, 确保了高增益情况下的采样精度, 消除了噪声带来的误差。

4.3 温度计算

完成敏感元件电阻测试后有两种算法可以得到测量温度, 即: 方法一, 将传感器分度表存入存储器, 再采取搜索、插值算法计算出温度; 方法二, 根据分度表拟合出特性方程, 通过特性方程计算出温度。前者要占用大量的存储空间, 在后续智能变换器与传感器更换配对使用时需要输入分度表数据; 后者只需拟合校准数据方程, 便于后续智能变换器与传感器配对使用。

本超低温精密智能温度变换器采取拟合分度表特性方程的算法。

根据《1990年国际温标》(ITS-90)标准, 温度值 T_{90} (单位为开尔文) 是由该温度时的电阻 $R(T_{90})$ 与水三相点时的电阻 $R(273.16)$ 之比来求得的。比值 $W(T_{90})$ 为

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273.16K) \quad (9)$$

根据国际温标 (ITS-90) 标准, 采用高纯度、无应变的铂丝制成的铂电阻标准温度计 T_{90} 的参考函数可以用标准式 (10)、式 (12) 给出的 $W_r(T_{90})$ 值。但考虑到传感器敏感元件的不同, 精密温度测量计算 $W(T_{90})$ 需要使用偏差函数。 $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ 的偏差函数是个多项式, 多项式系数通过对固定点的测量计算获得, 可以获得特定铂电阻温度传感器比值 $W(T_{90})$ 。

① 对于 13.8033K~273.16K 的温区, 规定了下面的参考函数:

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}) / 273.16K + 1.5}{1.5} \right]^i \quad (10)$$

在 0.1mK 的误差内, 等效于式 (10) 的反函数是

$$T_{90} / 273.16 = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad (11)$$

② 对于 0°C 到 961.78°C 的温区, 规定了下面的参考函数:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90} / K - 754.15}{481} \right]^i \quad (12)$$

在 0.13mK 的误差内, 等效于式 (12) 的反函数是

$$T_{90} / K - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (13)$$

式 (10)~式 (13) 有关参数的常数见表 3。

偏差函数中, 系数是通过测量温区固定点测量值计算求解获得, 因此在拟合曲线时, 只需将固定点的分度值纳入拟合范围、选取适当多的点, 采用不同的温度区间、分段拟合的方法就可以精确拟合出 $W(T_{90})$ 与 T_{90} 特性方程, 从而解决温度的精确测量。

将拟合后的方程特性系数写入 CPU 进行存储, 就可以完成温度的计算。要实现温度的精准测量, 必须采用传感器与变换器配对的方式, 将传感器特性参数输入到对应的智能变换器中, 可以实现全部

温区温度的精准测量。

表 3 式 (10)~式 (13) 中的常数
Table 3 Constants in formula (10)~(13)

系数	数值	系数	数值	系数	数值	系数	数值
A ₀	-2.13534729	B ₀	0.183324722	C ₀	2.78157254	D ₀	439.932854
A ₁	3.18324720	B ₁	0.240975303	C ₁	1.64650916	D ₁	472.418020
A ₂	-1.80143597	B ₂	0.209108771	C ₂	-0.13714390	D ₂	37.684494
A ₃	0.71727204	B ₃	0.190439972	C ₃	-0.00649767	D ₃	7.472018
A ₄	0.50344027	B ₄	0.142648498	C ₄	-0.00234444	D ₄	2.920828
A ₅	-0.61899395	B ₅	0.077993465	C ₅	0.00511868	D ₅	0.005184
A ₆	-0.05332322	B ₆	0.012475611	C ₆	0.00187982	D ₆	-0.963864
A ₇	0.28021362	B ₇	-0.032267127	C ₇	-0.00204472	D ₇	-0.188732
A ₈	0.10715224	B ₈	-0.075291522	C ₈	-0.00046122	D ₈	0.191203
A ₉	0.29302865	B ₉	-0.056470670	C ₉	0.00045724	D ₉	0.049025
A ₁₀	0.04459872	B ₁₀	0.076201285				
A ₁₁	0.11868632	B ₁₁	0.123893204				
A ₁₂	-0.05248134	B ₁₂	-0.029201193				
		B ₁₃	-0.091173542				
		B ₁₄	0.001317696				
		B ₁₅	0.026025526				

如果不考虑 A 级、B 级敏感元件的差异, 可以将式 (1)、式 (2) 多项式系数直接输入, 获取 0℃~600℃、0℃~200℃温度计算值。

通过键盘显示控制器提供的 4 键键盘, 可以将传感器分段特性、输出零点、满量程特性数据写入 CPU 的信息存储器, 快速实现传感器特性、智能变换器特性的输入, 也可以通过 MSP430 仿真、编程接口 JTAG/BSL 写入。

5 产品测试结果

本智能铂电阻温度变换器最低、满量程测温范围在软件中可以任意定义。采用中国科学院低温计量测试站编号为 16B1322#的铂电阻温度传感器分度表来验证超低温精密智能铂电阻温度变换器的测量精度, 采用标准电阻箱替代传感器输出。将超低温精密测量智能铂电阻温度变换器最低量程设置为 15K (液氢温区, 对应 4mA)、满量程设置为 370K (对应 20mA), 测试结果示于表 4。

表 4 智能温度变换器测试结果

Table 4 Test data of smart temperature transmitter								
理论温度 (K)	20	22	77	120	180	260	300	370
理论输出电流 (mA)	4.225	4.315	6.794	8.732	11.437	15.042	16.845	20.000
输入电阻 (Ω)	1.583	1.772	19.829	38.156	62.863	94.834	110.433	137.228
显示温度 (K)	20.0	22.1	77.0	120.0	180.0	260.0	300.0	370.0
输出电流 (mA)	4.227	4.318	6.793	8.734	11.436	15.044	16.845	20.001
温度测量误差 (℃)	0	0.1	0	0	0	0	0	0

从表 4 可以看到, 智能温度变换器测温精度优于 0.2℃。

6 结束语

以 16 位 MSP430 CPU 为核心的超低温智能铂电阻温度变换器可以直接与各温度段的铂电阻温度传感器匹配, 实现了涵盖超低温在内的全量程温度测量。通过简便的传感器校准特性输入设置, 消除了通用传感器特性造成的误差, 获得了更高的测试精度。解决了传统模拟变换器无法准确测量液氢、液氧类超低温介质的温度测量问题, 克服了模拟变换器品种多、量程固定、调试复杂的缺点, 也解决了航天飞行器超低温介质温度测量需要地面解算、效率差的缺点, 实现了飞行器超低温高精度实时测量。

参考文献

- [1] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [2] 沈建华, 杨艳琴, 王慈. MSP430 超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [3] 国家技术监督局计量司. 1990 年国际温标宣贯手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [4] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [5] 程建华, 齐兵, 屈传波. 一种高精度低自热多通道测温系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(1): 56-59, 63. CHENG Jianhua, QI Bing, QU Chuanbo. Design and realization of a multichannel temperature measurement system of high-precision and low self-heating[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(1): 56-59, 63.
- [6] 汪定国, 王怡苹. 一种高精度铂电阻温度测量方法[J]. 电子测量技术, 2012(11): 104-107. WANG Dingguo, WANG Yiping. Method of high precision temperature measure based on platinum resistance[J]. Electronic Measurement Technology, 2012(11): 104-107.
- [7] 金海龙, 赵军卯. 基于恒流源的多路高精度测温仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 242-244. JING Hailong, ZHAO Junmao. Research on high precision multichannel thermoscope based on constant current source[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S1): 242-244.
- [8] 黄曠, 崔文德, 赵化业. 测量引线热电势对热电阻测温系统测温结果的影响分析[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(2): 22-26. HUANG Ze, CUI Wende, ZHAO Huaye. Analysis of effect by thermoelectric potential in RTD temperature measurement system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(2): 22-26.

[作者简介]

- 刘 辉 1973 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为传感器与变换器。
- 张 恽 1966 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为传感器与变换器。
- 董 帅 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为传感器与变换器。

(上接第 44 页)

参考文献

- [1] 周骏, 窦文斌, 沈亚, 等. 应用 SIP 技术的宽带板间垂直互连结构[J]. 固体电子学研究进展, 2012, 32(1): 36-39. ZHOU Jun, DOU Wenbin, SHEN Ya, et al. Broadband and vertical transition between substrates in application of SIP technology[J]. Research & Progress of SEE, 2012, 32(1): 36-39.
- [2] Yongwon Choi, Jiwon Shin, Kyung-Lim Suk, et al. Analysis of 3D TSV vertical interconnection using pre-applied nonconductive films[J]. Electronic Materials, 2014(43): 4214-4223.
- [3] 方南军, 陈文兰. 基于毛纽扣的 X 波段功分网络设计[J]. 中国科技信息, 2017(20): 79-82. FANG Nanjun, CHEN Wenlan. Design of X-band power divider network based on fuzz-button[J]. China science and technology information, 2017(20): 79-82.
- [4] Fuliang Le, Shi-Wei Ricky Lee, Qiming Zhang, et al. 3D chip stacking with through siliconvias (TSVs) for vertical interconnect and underfill dispensing[J]. Micromechanics and Microengineering, 2017, 27: 045012.
- [5] LI Zheng, YUE Zhang. Novel electrical and fluidic microbumps for silicon interposer and 3-D ICs[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2014, 4(5): 777-785.

[作者简介]

- 付 浩 1995 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。
- 刘德喜 1973 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。
- 祝大龙 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。
- 齐伟伟 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。