

文章编号: 1672-8785(2018)10-0001-11

杜瓦及热电致冷封装中的温度传感器

张忆南 朱宪亮 洪斯敏 李 雪

(中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 在对红外光电探测器及焦平面封装结构中常用的三大类若干种温度传感器的特点及关键参数等进行整理的基础上, 分析了不同种类传感器的测控精度及误差特点, 并对不同温区封装结构中选用温度传感器需要考虑的因素以及使用时需要注意的问题进行了详细讨论。

关键词: 电阻温度探测器; 半导体温度传感器; 热电偶; 杜瓦封装; 热电致冷封装

中图分类号: TB942 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.10.001

Temperature Sensors in Dewar and TE Cooling Packages

ZHANG Yi-nan, ZHU Xian-liang, HONG Si-min, LI Xue

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The characteristics and key parameters of various temperature sensors in three categories commonly used in the packaging structures of infrared photodetectors and focal plane arrays are summarized. On this basis, the measurement and control accuracy and error of different types of sensors are analyzed. Finally, the factors which need to be considered in the selection of temperature sensors for the packages in different temperature zones and the matters which need attention in practical application are discussed in detail.

Key words: resistance temperature detector; semiconductor temperature sensor; thermal couple; dewar package; thermal-electrical cooling package

0 引言

半导体光电探测器及其焦平面是温度敏感器件, 其性能直接受其工作温度的影响。对于红外波段的器件, 由于其在室温下的性能不能满足应用要求甚至无法工作, 因此常需对其进行致冷并保持工作温度稳定, 即使可在室温工作的器件也常需稳定其工作温度, 因此必须采

用合适的封装结构并对器件的工作温度进行精密测量和控制。红外光电探测器最常采用的是杜瓦(Dewar)封装, 也有其他形式的封装如气密的热电(Thermal Electrical, TE)致冷封装等。根据其工作温度范围、温度测量和控制精度要求以及可靠性和成本等各方面的考虑, 可以选择不同类型的温度测量元件(或称温度传感

收稿日期: 2018-08-23

作者简介: 张忆南(1987-), 女, 上海市人, 工程师, 主要从事红外探测器组件的封装工作。

E-mail: 666shelley@sina.com

器)。温度传感器的种类繁多,它们的工作原理不同,参数也较复杂,性能指标各不同。本文在对红外光电探测器封装结构中常用的若干种温度传感器的特点及关键参数等进行整理的基础上,分析了不同种类传感器的测控精度及误差特点,并对不同封装结构中选用温度传感器需要考虑的因素以及使用时需要注意的问题进行了讨论。

1 光电探测器封装中常用测温元件的种类、特点及关键参数

杜瓦和热电致冷封装中使用的测温元件根据其工作原理不同可大致分为电阻温度探测器、半导体温度传感器和热电偶等三大类。

1.1 电阻温度探测器

电阻器的阻值(包括导线的电阻等)一般都会随温度变化,因此广义地说电阻元件都可作为温度传感器,但用作测温元件的电阻的阻值随温度变化不仅要灵敏,有固定规律,还要有合适的阻值并具有很高的稳定性、重复性、可靠性及精度。用来测温的电阻被称为电阻温度探测器(Resistance Temperature Detector, RTD),主要包括具有正温度系数的铂电阻等和具有负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)的热敏电阻(Thermistor)两大类。测温元件、温度探测器、温度传感器(Temperature sensor, Temperature transducer)及热敏电阻等多种名称逻辑上都可用于此类器件,但热敏电阻常指采用半导体材料制成的具有较大负温度系数的测温电阻,而直接称铂电阻为 RTD。

1.1.1 铂电阻

铂电阻的感温部件是采用贵金属铂(Platinum, Pt)即白金制作的,用得最多的标称阻值在 0 °C 下为 100 Ω ,因此常称其为 Pt100。铂电阻具有正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC),随温度升高,其阻值相应增加,因此可称其为 PTC-RTD,常直接简称为 RTD。此类测温电阻还包括在 0 °C 下标称

阻值为 1000 Ω 的 Pt1000 以及采用较廉价的金属铜或镍制作的 Cu100 或 Ni1000 等。根据具体结构, Pt100 有线绕式和薄膜式等种类。线绕式 Pt100 的结构为将纯金属铂细丝绕制固定在绝缘材料如陶瓷管上,加上铠装保护和引线接头等,构成完整的温度探头。因其体积和热容量均较大,并不适合在探测器封装中采用,但可用于测量标定。薄膜式 Pt100 的结构是对淀积于绝缘材料如陶瓷片上的金属铂薄膜采用微细加工工艺,在刻蚀出的电阻图形中引出电极,可加工成有引脚或表面贴装电子元件的形式。其体积和热容量均很小,适合与探测器芯片或组件封装在一起,因此常被选为探测器杜瓦封装中的测温元件,图 1(b)显示出了一种适用于探测器组件中微型陶瓷封装 Pt100 RTD 的照片。基于贵金属铂的高理化稳定性,铂丝或铂薄膜本身是相当稳定的,由其制成的测温元件耐热循环冲击,具有很高的重复性和可靠性,有很宽的工作温度范围,一般可在 -200 °C ~ +850 °C 的温度范围内工作。但根据其采用的绝缘材料和填充材料以及封装形式的不同,分为适合低温或高温段工作的不同种类。

金属材料(除少数合金外)一般都具有正温度系数,且其温度系数在较宽的温度区间可近似为一常数,即阻值随温度线性变化。作为一级近似,其阻值可表示为

$$R_T = R_0(1 + AT) \quad (1)$$

式中, A 即为温度系数,为一正值。对于标准 Pt100, R_0 为在 0 °C 下的标称阻值 100 Ω ,温度系数 $A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。 R_T 为其在温度 T (°C) 下的阻值,即温度每升高 1 °C,阻值增加 0.39083 Ω ,即其电阻值有约每度 0.4% 的正温度系数,可以用于日常估算。当温度趋于 0 K (-273.15 °C) 时电阻也趋于零。在实际应用时,式(1)需做相应的高次修正,具体可表示为

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad (2)$$

此公式也称 Callendar-Van Dusen 方程。式中,温度 T 均以 °C 计。根据 0 °C、100 °C 和 260 °C

这 3 个温度点得到的修正系数为 $B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$, 修正后可在 $-200 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 660 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内保证较高精度。如只保留二次项, 忽略高次项, 则只能在 $0 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 660 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内保证一定精度。根据式(2), 在 $\pm 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下, 相对于式(1)的修正量, 如只考虑二次项, Pt100 约为 $-2.3 \text{ } \Omega$ ($-5.9 \text{ } ^\circ\text{C}$), 还是较可观的。因此在偏离 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 较多时必须修正。但忽略三、四次项引起的误差相对较小, 在 $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下约为 $-1 \text{ } \Omega$ ($-2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$), 在 $+200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下约为 $-0.3 \text{ } \Omega$ ($-0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$)。图 1(a)给出了由式(2)计算的在 $\pm 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内标准 Pt100 的电阻温度特性以及忽略高次项引起的误差情况。实际应用中如探测器组件只工作在某固定工作温度附近, 则二次项近似可很好地满足要求。

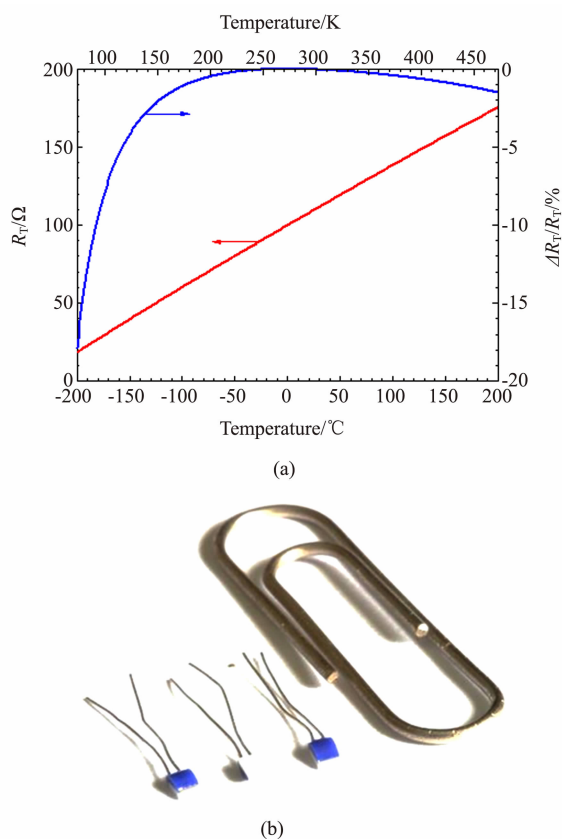


图 1 标准 Pt100 RTD 的电阻温度特性及忽略高次项的误差;(b)带引线的微型陶瓷封装 Pt100 测温电阻的照片

应指出的是, 式(2)及其校正参数是用于

计算 RTD 元件的标准公式, 用于各种 Pt100 元件都可保证一定精度。但它也只是一个经验公式, 受加工精度以及材料本身形变和纯度等各方面的影响, 实际 Pt100 元件的阻值与标准值相比仍会有一定误差。因此商品 Pt100 元件还会根据其精度进行分档, 需要较高精度时还要实测标定。例如, 商品 Pt100 的 A 级品在 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的误差限制在 $\pm 0.15 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.06 \text{ } \Omega$), $\pm 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的误差限制在 $\pm 0.55 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.2 \text{ } \Omega$); B 级品在 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的误差限制在 $\pm 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.12 \text{ } \Omega$), $\pm 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的误差限制在 $\pm 1.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5 \text{ } \Omega$)。应注意的是, 虽然杜瓦或 TEC 封装的探测器组件的工作温度固定, 但在对其制冷的过程中会受到大温差(如杜瓦可能大于 200 K)的重复温度冲击, 因此用于探测器组件封装中的测温元件会对其在稳定性、重复性和可靠性方面有很高要求, 而测温元件本身的精度与其稳定性和重复性等逻辑上并无直接关联。组件封装中, 测温元件的误差可以通过测量标定来校正, 因此选用精度较低的元件仍可达到较高的相对控温精度, 但进行绝对温度测量时显然应选用高精度元件。Pt100 属于低阻测温元件, 其在 $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下的阻值约为 $18.5 \text{ } \Omega$, $+200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下的阻值约为 $176 \text{ } \Omega$, 相对于其他类型的测温元件, 它需要较大的偏置电流, 常规为 1 mA ; 且分布电阻等的影响也相对较大。对 Pt100, 在 1 mA 的偏置电流下 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温差对应的电压变化仅为 0.39 mV , 在控温精度要求较高时对相关控制电路的要求也相应提高, 如采用阻值高 10 倍的 Pt1000 则要求可相应放宽。Pt1000 与 Pt100 相比只是阻值增大 10 倍, 其温度变化规律完全相同, 可以类推。由于 Pt100 元件是采用纯金属材料制作的, 只要能够保证材料的纯度, 其温度特性就是确定的。因此对不同种类及批次的 Pt100 元件, 可以采用相同的拟合参数, 其阻值偏差只需进行简单的比例校正。

1.1.2 负温度系数热敏电阻

阻值随温度变化的电阻均可称为热敏电

阻,但热敏电阻常特指对温度特别敏感的电
阻,有较大的负或正温度系数。此类热敏电阻
常采用掺杂的半导体或陶瓷类材料制成,具有
负温度系数的电阻测温元件更常见,被称为
NTC-RTD 或 NTC-Thermistor,也常简称为
NTC,或直接称为热敏电阻。实际中也有具有
较大 PTC 的 PTC-RTD 或 PTC-Thermistor,但
使用不如 NTC 普遍,以下侧重介绍 NTC。由于
不使用贵金属材料,因此 NTC 较铂电阻廉价,
但其稳定性和可靠性会略差些,工作温度范围
也较窄。最常用的 NTC 是 25 °C 下标称阻值为
10 kΩ 的热敏电阻,常称为 NTC10;还有 25 °C
下标称阻值为 20 kΩ 的 NTC20 等类型。

NTC 的阻值是随温度升高而减小的,基本
是按指数规律非线性变化。为描述其阻值随温
度变化的规律,可根据不同的精度要求采用简
单或复杂的方式,具体可采用 1 个、2 个或 3
个拟合参数。只采用一个参数时常称其为 β 参
数(或 B 参数),在较窄温度范围内也可较好描
述其阻值变化,具体表达式为

$$R_T = R_0 \exp\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (3)$$

式中, R_T 为其在温度 T 下的阻值, R_0 为其在
温度 T_0 下的标称阻值,温度以绝对温度 K
计, β 或 B 参数具有温度的量纲,也以 K 计。
根据式(3)可以给出 β 或 B 参数的计算方法,
即

$$\beta = \ln \left[\frac{\frac{R_T}{R_0}}{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \right] \quad (4)$$

根据两个已知温度下的阻值即可得出 β 或
 B 参数。对于常用的 NTC 热敏电阻材料, β 或
 B 参数约在 3800~4000 K 范围内。例如,图 2
(a)给出了某一 NTC10 测温元件的实际阻值与
温度的关系,测试温度区间为 0~50 °C,步长
为 0.5 °C。其在温度为 0 °C、25 °C 和 50 °C 时
实际阻值分别为 33394.59 Ω、10196.92 Ω 和
3616.15 Ω。根据 0 °C 和 50 °C 两个温度点的阻
值,由式(4)计算出的 β 参数值为 3924.39 K。

图 2(a) 显示出了当 β 参数值为 3800 K、
3900 K 和 4000 K 时实际阻值与计算阻值的相
对误差 $\Delta R_T/R_T$,以 % 计。由图可见,当 $\beta=$
3900 K 时,在此温区两端的阻值最大相对误
差约为 1%。图 2(b)为两种 NTC10 测温元件
的实物照片,其中表面贴装型也称裸芯片,正
面可由金丝键合引出,背面可用银浆粘贴,常
用于探测器组件结构中,引线型可用于测试系
统。根据这些数据也可得出由单参数拟合的阻
值偏差可能导致的测温误差。由于 NTC 的较
大非线性,估计测温误差时需考虑在各温度点
上的阻值随温度变化的斜率即 dR_T/dT ,即测
温误差可表示为

$$\Delta T = \frac{\frac{\Delta R_T}{R_T} * R_T}{\frac{dR_T}{dT}} \quad (5)$$

当 β 参数值为 3800 K、3900 K 和 4000 K
时,根据式(5)及相关数据得出的各阻值下的
测温误差示于图 3(a)中。由图可见,当取 $\beta=$
3900 K 时,在此温度区间其最大误差约为 0.2
K,但当 β 参数选取不合适时误差将会显著
增加。

当要求温度测控精度较高且范围较大时,
对 NTC 可进一步采用更多拟合参数。采用 3
个参数的表达式为 Steinhart-Hart 方程,具体
表达式为

$$\frac{1}{T} = C_1 + C_2 * \ln(R_T) + C_3 * [\ln(R_T)]^3 \quad (6)$$

即同时采用 C_1 、 C_2 和 C_3 这 3 个参数来描述其
变化规律。根据式(6),最少知道 3 个温度下
的实际阻值即可求出参数 C_1 、 C_2 和 C_3 ,即根
据式(6)列出 3 个线性方程组,联立求出 C_1 、
 C_2 和 C_3 的具体数值。实际中如已知更多温度
下的阻值,也可采用最小二乘法拟合,得出更
精确、适应范围更宽的 C_1 、 C_2 和 C_3 数值。由
于 C_1 、 C_2 和 C_3 在数值上较小且本身数量级差
别较大,不便记录及应用,实际中会对其作约
化处理,引入同一数量级、方便记录的参数
 $C1$ 、 $C2$ 及 $C3$,即

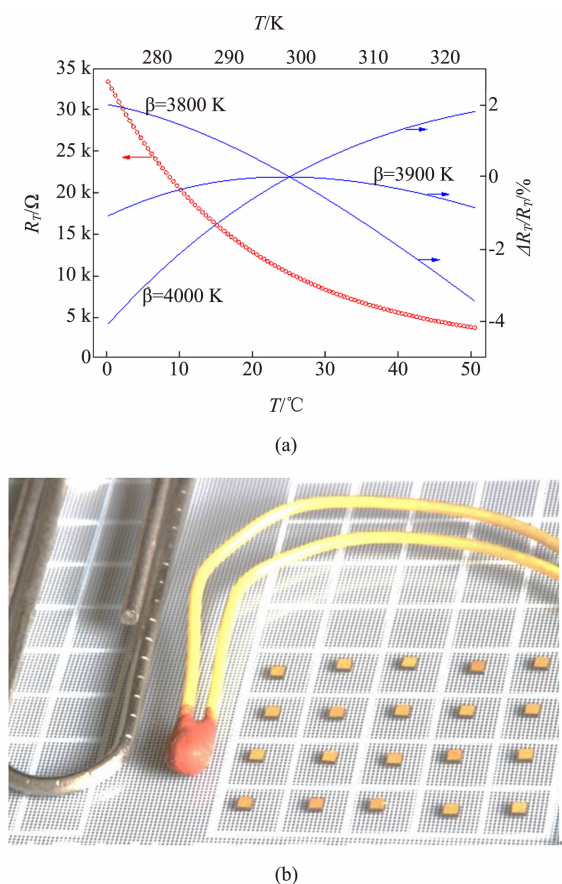


图 2 (a) NTC10 RTD 的电阻温度特性及其单参数拟合的电阻相对误差; (b) 引线封装及表面贴片(裸芯片)型 NTC10 RTD 照片

$$C1 = C_1 \times 10^3, C2 = C_2 \times 10^4, C3 = C_3 \times 10^7 \quad (7)$$

根据图 3 中对 NTC10 测温元件的阻值与温度关系的实测结果, 用最小二乘法拟合得出其参数的数值, $C1 = 1.1018$ 、 $C2 = 2.3788$ 、 $C3 = 0.7206$ 。实际中此类 NTC10 元件的拟合参数值均与此接近。图 3(b) 中示出了根据式(6)及 3 个拟合参数得到的计算温度与实际温度的差别。由图可见, 在此温区其最大误差不超过约 0.004 K, 仅约为图 3(a)中单参数拟合的 2%, 这也表明采用 Steinhart-Hart 方程得到的三参数拟合结果与单一 β 参数相比精度有显著提高。

鉴于三参数 Steinhart-Hart 拟合在实际操作中稍显复杂, 实际中也有忽略式(6)中的高次项、采用简化的 Steinhart-Hart 二参数拟合

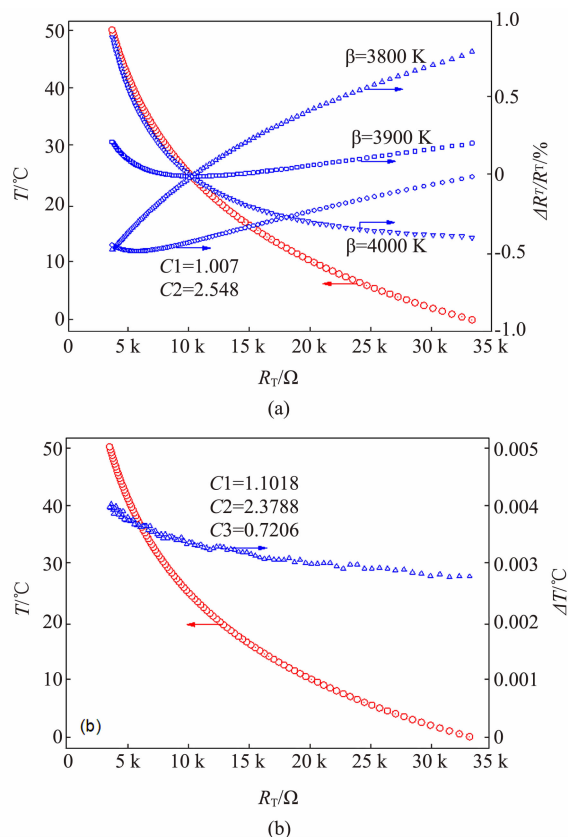


图 3 (a) NTC10 RTD 的电阻温度特性及单参数和两参数拟合的温度误差; (b) NTC10 RTD 的电阻温度特性及三参数拟合的温度误差

方式, 即

$$\frac{1}{T} = C_1' + C_2' \times \ln(R_T) \quad (8)$$

应指出的是, 这两个拟合公式虽然同源, 求得的拟合参数值也相近, 但并不可以互相取代。实际中为方便应用, 引入两个新参数 $C1'$ 和 $C2'$, 进行相同的约化处理, 即 $C1' = C_1' \times 10^3$, $C2' = C_2' \times 10^4$, $C_1' \neq C_1$, $C_2' \neq C_2$ (9)

采用二参数拟合只需知道两个温度点的数据, 对前述 NTC10 测温元件采用 0 °C 和 50 °C 时的实际阻值, 可以求得 $C1' = 1.007$, $C2' = 2.548$ 。用该拟合参数根据式(7)计算得到温度值, 其与实际温度的差别示于图 3(a)中。与三参数拟合相比, 二参数拟合的误差显著增加, 在此温度区间的最大误差约为 0.5 K, 与单一 β 参数拟合基本相当甚至更大。但由于其

与三参数拟合的处理方法相似,可作为同一测控系统在降低精度要求时的选项。NTC 测温元件由于其非线性特点及受制造方法的限制,其本身的离散性较大,特别是不同批次间的差别较大。因此对其进行校正和标定尤显重要,在要求较高时使用前需进行抽测乃至全部测量。一些厂家也会针对特定批次乃至单个元件提供对应的测量数据及拟合参数。在采用适当的方法对其进行标定后,NTC10 元件仍可达到很高的测控精度。

1.2 半导体温度传感器

另一大类常用于探测器封装中的温度测控元件是半导体温度传感器。其基本检测原理是基于半导体 pn 结的正向电压或反向击穿电压随温度有规律变化,利用 Si 集成电路中晶体管特性高度一致的特点工作,以下分别讨论。

1.2.1 二极管温度传感器

对一具有 pn 结的二极管,在不太小(远大于饱和电流)的正向电流作用下,其正向电压随温度的增加而减小,且在较宽的温度范围内其温度系数基本恒定,对 Si 二极管约为 -2.3 mV/K 。因此在恒定正向电流作用下,普通 Si 二极管可作为有效的测温元件。图 4(a)示出了用于测温的专用 Si 二极管在 $0\sim 500 \text{ K}$ 温度范围内的典型正向电压特性,其正向电流恒定为 $10 \mu\text{A}$ 。实际普通 Si 二极管也有类似的特性。由图 4 可见,在很大温度范围内其正向电压随温度降低近似线性增加,但到约 20 K 以下有突变。图 4(a)中也示出了其在各个温度下的测温灵敏度,即单位温度变化引起的正向电压变化或斜率的绝对值。得益于几十年来半导体工业的进步、Si 材料的高质量和 Si 半导体工艺的高稳定性,用于测温的专用 Si 二极管已具有极好的特性一致性,特别是同一公司同型号的产品,也就是说,针对某型号元件的标准特性标定后,系统更换测温二极管时无需再次标定。由图 4(a)可见,在以室温(300 K)为中心的很宽温度范围内,约 -2.3 mV/K 的电压温度系数已可以很好地表征其温度特性,在此范围

内测温可以此作为基准。与其他测温元件相比,测温 Si 二极管具有很宽的测温区间,甚至可拓展至极低温端。在极低温端的测温灵敏度更高,是少数几种可用于液氮温区的测温元件之一。红外光电探测器的封装以及测试系统常会涉及液氮乃至液氦温区,因此可选用二极管作为测温元件。由图 4(a)可注意到,在很宽的温区特别是涉及低温端时,测温二极管的特性难以象 Pt100 或 NTC10 元件那样用拟合公式来描述,只能根据其特性曲线采用查表方法。

常用 Si 测温二极管的型号有 670 系列等,如常用的 DT670、CY670 等,标称测温范围是 $1.4\sim 500 \text{ K}$ 。其常用的微型陶瓷封装结构(如图 4(b)中照片右侧所示)可保证其在此宽温度范围内的可靠性。其热容量很小,反应速度较快。由图 4(a)可看出,在大温度范围内, Si 测温二极管的灵敏度变化很大,特别在低温端。因此使用时,测控系统必须根据厂家提供的标准数据进行分段逐点标定。标定后,其在 300 K 、 77 K 及 10 K 下的测温精度分别优于 $\pm 32 \text{ mK}$ 、 $\pm 22 \text{ mK}$ 和 $\pm 12 \text{ mK}$ 。除 Si 二极管外,也有用其他材料如 GaAs 制成的测温二极管,其特性与 Si 二极管相似,不再赘述。

1.2.2 电压型半导体温度传感器

随着半导体和集成电路技术的发展,人们希望获得这样一种温度传感器:线性器件(温度系数为常数),具有正温度系数及合适的温度灵敏度以利于测控,其输出值最好与温度值(如绝对温度 K)直接关联。电压型半导体温度传感器就是这样一种器件。与前述测温二极管不同,这种器件的基本原理是基于二极管的反向击穿电压随温度的变化。二极管的反向击穿具有雪崩和齐纳(Zener)击穿两种机制。常规二极管会在雪崩机制作用下在较高击穿电压下击穿。其击穿电压具有负温度系数,即击穿电压随温度升高而减小。材料高掺杂的二极管由齐纳击穿机制主导,常会在较低的电压下击穿。这时的击穿电压具有正温度系数,即击穿电压随温度升高而增加,常称为齐纳二极管。

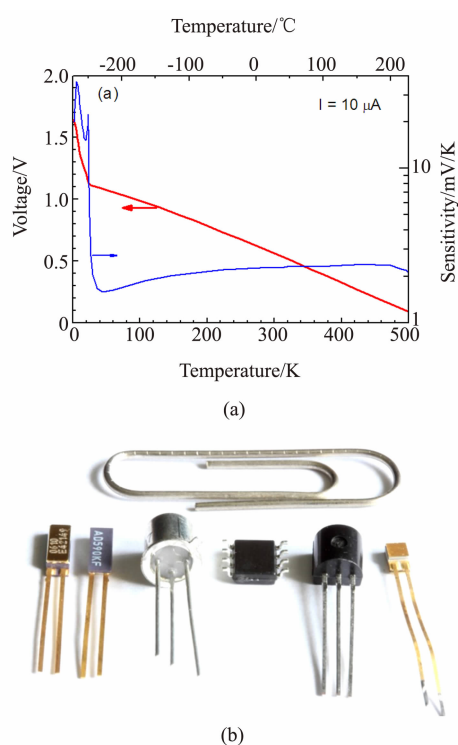


图 4 (a)二极管温度传感器的正向电压及测温灵敏度与温度关系;(b)半导体温度传感器的几种封装照片,从右至左依次为 AD590 微型陶瓷封装(正、反面)、TO46 金属封装、SO8 表面贴装塑封、TO92 塑封和测温 Si 二极管微型陶瓷封装

很多电压较低的稳压二极管为此类型,达到击穿电压后其反向电压值基本不随反向电流变化。齐纳二极管的击穿电压及其温度系数可以通过调整其掺杂及结构等参数在很大范围内调节。300 K 下击穿电压调整到恰为 3 V、温度系数恰为 10 mV/K 的齐纳二极管就是一个很好的温度传感器。其测得的电压数值(mV/10)直接对应绝对温度值(K)。为改善其负载、驱动以及调校等特性,使之更方便应用,这种齐纳二极管已被集成到专用集成电路中,构成电压型温度传感器。此种温度传感器主要有 LMx35(含 LM135、LM235、LM335)系列^[1],具有扁平表面贴装 SO8、TO92 塑封及 TO46 金属封装等形式(如图 4(b)照片所示)。此种温度传感器为三端器件(SO8 封装中多余脚为空脚),其中两端等效一个稳压二极管。对于电压固定的电源,可通过对限流电阻 R_1 加上

一固定电流(一般取 1 mA,可在 $450\ \mu\text{A} \sim 5\ \text{mA}$ 之间),其输出电压在室温下约为 3 V,随温度按 10 mV/K 变化,如图 5(a)中(I)所示。此器件的另一端为调校端,在要求较高时,可通过接入一电位器对器件的输出电压误差进行单点调校,如图 5(a)中(II)所示。例如,在 25 °C 下调节电位器,使其输出为 2.9815 V,这样在其他温度点上其输出值就可与绝对温度很好地对应。为适应电源电压的大范围变化,也可经由简单的三端恒流器件(如 LMx34 系列的 LM134、LM234 和 LM334)对其施加恒定电流,如图 5(a)中(III)所示,电流值 $I=68\ \text{mV}/R_2$,68 Ω 电阻对应 1 mA 电流。LM135、LM235 和 LM335 这几个型号器件的特性几乎完全相同,只是在未校正的温度误差、动态电阻以及推荐测温范围方面略有差别,其中 LM135 较佳。这种温度传感器的动态电阻均小于 1 Ω (实际约在 0.5 Ω)。当驱动电流在 0.4 ~ 5 mA 间变化时,其电压变化仅约 2.5 mV,对应 0.25 K 的温度误差。因此使用条件是宽松的,对驱动电源并无苛刻的要求。目前此种器件已属廉价器件,使用上也很方便,但其封装形式对光电探测器封装内部的测温并不合适,也不适用于很低的温度,因此更多地是应用于系统的环境温度测量和监控,以及热电偶的“冷端”补偿等场合。

1.2.3 电流型半导体温度传感器

电流型半导体温度传感器也是基于半导体和集成电路技术发展起来的,是一种二端线性器件,具有正温度系数,且其电流值与绝对温度值直接关联,因此使用上与电压型半导体温度传感器一样方便甚至更好。与前述电压型半导体温度传感器不同的是,这种器件的前提是用现代集成电路技术可以制作出全同的晶体管。当这些晶体管处于同一芯片上特别是在相邻或邻近区域时,其设计、材料和工艺等造成的差别可以忽略,温度差别也可以忽略,此时全同性会更佳。对于两个全同的双极型晶体管,当其集电极电流相差 r 倍时,两个晶体管

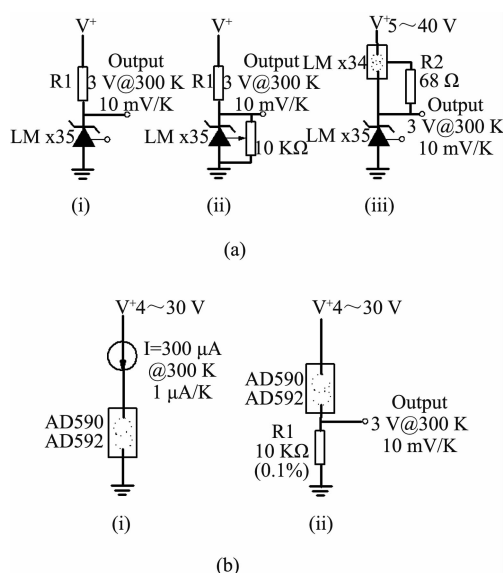


图 5 (a)电压型半导体温度传感器的应用示意图;
(b)电流型半导体温度传感器的应用示意图

的 EB 结电压差别 V_T 为

$$V_T = V_{EB2} - V_{EB1} = \frac{kT}{q} \ln(r) \quad (10)$$

式中, k 为波尔兹曼常数, q 为电子电荷。也就是说, 基于全同性, 这两个晶体管的其他参数造成的影响都可以互相抵消, 这样 EB 结的电压差只取决于绝对温度, 此特性也称为绝对温度正比特性 (Proportional to Absolute Temperature, PTAT)^[2]。在此电流型温度传感器集成电路的实际制作中, 器件芯片上集成了 $r+1$ 个全同的晶体管单元。各单元都通以相同电流, 其中 r 个单元并联, 构成晶体管 2, 另 1 单独单元作为晶体管 1, 效果与电流相差 r 倍是等效的, 且 r 恰为一整数, 无须特别控制。实际器件常取 $r=8$, 这样在 300 K 下其压差 $V_T=53.76$ mV, 此电压就可经由一个电阻转换成正比于绝对温度的电流了。实际传感器电路中, 在制作时采用一个可通过激光烧蚀修正的精密电阻把 3 路这样的电流值调节到 300 K 下为 300 μ A, 其电流的温度系数恰为 1 μ A/K。此温度传感器集成电路中也包含了其他一些辅助元器件, 使其工作更稳定可靠。

此种电流型温度传感器的常见型号为 AD590 和 AD592 等^[3-4], 根据其不同的封装和

精度分为多种细分型号。其封装形式包括二引线的微型陶瓷扁平封装、TO52 金属封装、SO8 塑封表面贴装及 TO92 塑料封装等(如图 4(b)照片所示), 以及无引线的 MO-229 倒扣封装形式。测温精度也有多种, 在 $\pm 0.5 \sim \pm 5$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内。AD592 为 TO92 塑料封装, 价格较低, 推荐的测温范围也稍窄, 但其精度不受影响甚至更高, 其他性能与 AD590 相似, 可根据不同要求选用。AD590/AD592 电流型温度传感器的使用很方便, 可直接用电流表读取电流值, 进行温度测量(如图(5b)中(I)所示); 也可以经精密取样电阻转换成电压值, 用于测控(如图(5b)中(II)所示)。在此取样电阻上串联一可调小电阻, 还可以进行单点温度调校标定, 以减小器件本身的误差。当取样电阻值为 10 K Ω 时, 其输出电压恰与 LMx35 电压型传感器相同, 灵敏度也是 10 mV/K, 两者甚至可以直接替换。AD590/AD592 使用时相当于一个恒流源, 其输出阻抗很高, 在 10 M Ω 量级, 外接引线电阻等的影响可以忽略。外电压在 5~30 V 范围内波动 1 V 时, 引起的电流变化仅 0.1~0.2 μ A, 相当于 0.1~0.2 K 的温度误差。因此可在很宽的电压下工作, 最低电压大于 4 V 即可, 因此使用条件是很宽松的, 对驱动电源并无苛刻要求。此种器件的价格要高于电压型器件, 图 4(b)左侧的微型陶瓷封装形式可用于光电探测器封装内部的测温, 测温范围在 $-55 \sim 150$ $^{\circ}\text{C}$, 不适用于更低的温度。

1.3 热电偶

两种不同种类的金属或合金导线顶端烧结在一起即可构成一个热电偶, 由赛贝克(Seebeck)效应产生的温差电压可用于温度测量, 这是传统的温度传感器原理。根据金属或合金材料的不同, 不同组合产生的温差电压差别很大。以贵金属铂为基础的材料组合本身稳定性很好, 在高温场合中应用较多, 贵金属本身价格也高。由于其温差电压低, 仅在 10 μ V/K 量级, 不适用于探测器封装内部测温。相对而言, 以金属镍 Ni 为基础的热电偶组合温差电压

要高数倍, 可在 $50\ \mu\text{V/K}$ 左右, 并可用于较低温度下的测温。常用的镍基热电偶有 E、J、K 等类型, 分别为 NiCr-NiCu、Fe-NiCu 和 NiCr-NiAl 等合金组合, 镍铬合金也称 Chromel 合金, 是以镍为基础加入铬、铁、硅等。多种不同组份可用于热电偶, 其中 Ni(90%)Cr(10%) 的镍铬合金是常用的正极材料; Ni(45%)Cu(55%) 合金(称康铜合金 Constantan)是常用的负极材料。在这几种 Ni 基材料中, E 型热电偶的灵敏度最高, 可达约 $68\ \mu\text{V/K}$ 。涉及极低温测量时, 以上这些热电偶均不太适合。这时可以采用 AuFe 合金作为负极材料, 即纯 Au 中按原子数比 $0.03\sim 0.15\%$ 掺入微量 Fe, 正极仍为 Chromel 合金。根据不同的 Fe 掺杂量, 由其构成的热电偶的低温端最低可拓展至约 1.2 K, 并在室温附近仍保持相同的灵敏度。此种热电偶用到贵金属, 因此价格会较高。

常规热电偶热端与冷端之间的温度差与其输出的温差电压在其推荐的测温区间基本成正比, 线性度均较好, 但在涉及更低或更高温度时仍有一定非线性, 需要修正。热电偶的种类繁多, 其热电势与温差关系一般不用公式描述及拟合修正, 而常针对具体型号采用查表对应的方法。这主要是由于热电势受材料组分的影响很大, 而材料组分并不是一个容易精确控制的参数。即使同型号的热电偶, 不同厂家和批次间也会有一定差别, 只能将误差控制在一定范围。要求较高时必须根据每一根热电偶进行测量标定。影响热电偶测温精度的另一个重要问题是冷端补偿。当材料组合固定后热电势取决于两点间的温度差, 例如测试点温度与室温的差别。由于室温是会波动的, 不处理这个波动势必会影响测试精度。实际中常采用两种方法解决此问题。以图 6(a) 的示意图为例, (i) 图中, A 和 B 两种材料构成热电偶 AB。如果直接将 AB 经外部导线 C 及内部接线端口和引线 D 连接至电压表, 即使 CA 结和 BC 结处于同一温度, 但由其材料组合差别产生的热电势会引入误差; 这时引入反串的相同材料组合热

电偶 BA 就可消除此影响, 测得的热电势由 AB 结的温度 T_1 与 BA 结的温度 T_0 的差别决定; 其他对称结构如成对的 DC 和 CD 反串连接, 由于组合相同且处于同一温度, 并不会引入误差。热电偶传统上常用于高温测量, 用于测试的 AB 结常处于高温下, 因此称其为测试热电偶或热端。BA 结作为参考, 处于低温, 因此称其为参考热电偶或冷端。由此可见, 测试时冷端的温度需要固定, 或至少是已知的, 可进行扣除, 才能保证测量精度。实际中, 早期将冷端置于装入冰水混合物的保温瓶中, 使其稳定于 $0\ ^\circ\text{C}$ 即冰点, 但这样使用并不方便, 现已较少采用。另一方法是用其他方法对 BA 结进行恒温, 或测出其实际温度, 进行计算补偿, 但也不方便。随着前述电压型或电流型半导体温度传感器的出现, 用此温度传感器直接测得室温(或需要补偿的温度)的实际值, 产生一个与此相关的电压值; 再根据具体热电偶的类型将此电压进行约化, 输出一个热电偶补偿电压, 反馈到测试回路中, 以进行补偿, 是一种更直接方便的校正方法。

采用参考热电偶产生补偿电压等方法毕竟使用上不太方便。热电势信号常需传输至远端, 甚至数十米之外, 实际中更常用的是选用补偿导线进行连接。热电偶与导线的连接处由于距测试端较近, 可能处于某个不确定的中间温度, 可能高于室温。直接用与热电偶相同的 A、B 材料作为导线进行连接, 会有机械性能(强度、柔软度、耐久性、可加工性等)、电性能(电阻率等)以及成本方面的问题。人们根据不同型号的热电偶材料找到另一些材料, 使之与热电偶材料连接后在不太宽的温区中(如连接可能涉及的 $0\sim 100\ ^\circ\text{C}$ 温区)只产生较低的热电势, 且相应组合也可以互相抵消一部分, 以尽量减小连接产生的误差。这些材料可与热电偶本身材料相似、相同或不同, 但有合适的特性及较低成本, 可以加上绝缘层, 组合成方便连接的导线对。以图 6(a) 中(ii)为例, 对某种热电偶 A、B 材料, 采用 A_1 、 B_1 材料制成的补

偿导线, A_1A 结和 BB_1 结的热电势极低, 且还可互相抵消一部分, 这样可在 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连接温区将测温误差限制在 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内。显然, 要根据热电偶的具体型号来选择补偿导线, 不可混用, 且连接时正负极性会用不同颜色标示。热电偶输出的是一个电压信号, 相当于一个电压源, 阻抗较低, 为 mV 乃至 μV 量级的直流弱信号。因此, 测量热电偶输出需要使用电位差计或高精度数字电压表, 或使用专用的温度测控仪器。整个系统虽然简单, 但连接的种类、布局以及可靠性都会对测试结果产生影响, 需要细致考虑。

与其他温度传感器相比, 热电偶的灵敏度较低, 因此已针对不同型号的热电偶研制出了具有热偶信号放大功能的专用集成电路。例如, 针对 J 型和 K 型热电偶的 AD594 和 AD595 等, 能将 J 型和 K 型热电偶的输出都提高到 $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, 使之与电压型半导体温度传感器相同^[5]。此信号可直接用于驱动温度测控系统, 补偿导线仍可使用。AD594/595 电路为 14 脚双列直插封装, 如只测量 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度, 在 $+5\text{ V}$ 单电源下即可工作, 如图 6(a) 中 (iii) 所示, 给使用带来很大方便。若要同时测试 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下温度, 则需加负电源。此类专用集成电路的内部还集成了冰点补偿电路, 在电路板上连接参考热电偶, 使它的温度与此电路相同。此时内部会自动产生冰点补偿电压, 相当于功能上已使参考热电偶处于冰点, 这样输出电压即以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为参考点。例如, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的输出电压为 250 mV 。

2 光电探测器及焦平面封装中温度传感器的选用及使用上的考虑

表 1 汇总了上述几种温度传感器的主要特性。对于探测器及焦平面封装结构中的温度测控, 一般不涉及很高的温度, 即使考虑到高温存贮实验等极限情况, 最高温度也都在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。所以表 1 中所列类型的温度传感器在高温端都是适用的。对于低温端, 光电

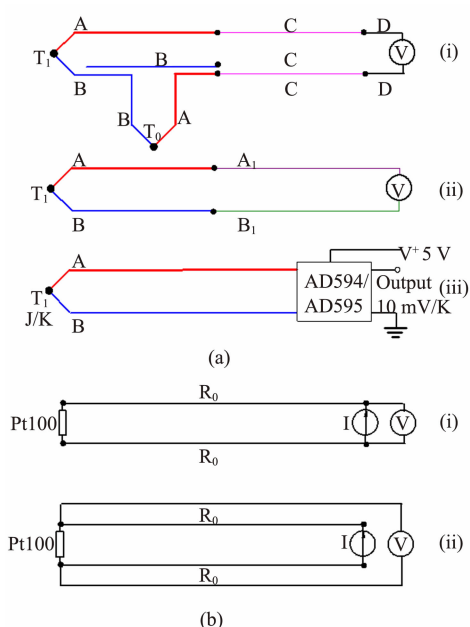


图 6 (a) 热电偶的不同连接方式示意图;
(b) Pt100 的两线和四线连接方式示意图

探测器及焦平面器件封装结构可能涉及的温度范围很宽, 大致会涉及 3 个温区, 即热电致冷温区、液氮制冷温区和液氦制冷温区。热电致冷温区可从高于室温至四级热电致冷所能达到的低温, 大致范围在 $320\sim 200\text{ K}$; 液氮制冷温区在 77 K 附近, 液氦制冷温区在 10 K 以下。封装结构中还可包括氮循环制冷机制冷, 其温度范围也较宽。

根据前述讨论及表 1 中的数据, 所列这些类型的温度传感器在热电致冷温区都是适用的。其中, NTC100 及电压型和电流型的半导体传感器应是此温区的优选, Pt100 也较常用。涉及液氮制冷温区后, 能选用的温度传感器有 Pt100、测温二极管、K 型和 AuFe 热电偶等。其中, Pt100 更常用, K 型热电偶配合专用集成电路也是可取的方案。在更低的温度直至液氦制冷温区, 能用的传感器就只有测温二极管和 AuFe 热电偶两种, 定制系统中测温二极管更常用。表 1 中所列的前 4 种传感器都采用恒流驱动方式, 这样连接时导线的串联电阻会对测量精度造成一定的影响, 连接点的长期可靠性也需要考虑, 特别对低阻器件。以 Pt100 为

表 1 常用温度传感器的种类及其主要参数和特性

类型		测温范围 (°C)	线性	温度系数	灵敏度@-0°C (mV/°C)	主要特点
电阻温度 探测器 RTD	Pt100	-200~850	√	+	0.39@1 mA	恒流驱动 (1 mA)
	NTC10	-55~170	×	-	16.6@10 A 166@100 A	恒流驱动 (10 或 100 A)
半导体 Semicon.	Diode 二极管	-272~227	×	-	2.3@10 A	恒流驱动 (10 μA)
	LMx35 电压型 IC	-55~150	√	+	10	恒流驱动 (0.5~5 mA)
	AD590	-55~150	√	+	1 μA/°C	电压驱动 (4~30 V)
	AD592	-25~105	√	+		
	电流型 IC					
热电偶 TC	Type-E (NiCr-NiCu)	-110~140	√	+	~0.068	直接电压输出 无需驱动 灵敏度较低 需“冷端”补偿 较易氧化
	Type-J (Fe-NiCu)	-40~750	√	+	~0.050	
	Type-K (NiCr-NiAl)	-200~1350	√	+	~0.041	
	AuFe (NiCr-AuFe)	-272~600	√	+	~0.015	

例, 其阻值通过通入恒定电流, 测量其两端电压获得。由于其在 0 °C 下的电阻仅为 100 Ω, 如图 6(b)中(i)所示, 采用两线连接时如引线及接点的电阻 $R_0=1\ \Omega$, 则在 0 °C 下测得电阻的相对误差 $2R_0/100$ 将达到 2%, 对应的温度误差约为 5 °C, 这是难以接受的。当采用如图 6(b)中(ii)所示的四线连接方式时, 由于电压表的阻抗很高, 可以忽略引线电阻的影响, 从而消除其误差。

3 结束语

以上对不同种类温度传感器特点的分析及讨论表明, 适用温区及合适的封装形式是红外光电探测器及焦平面封装结构中选用温度传感器时要考虑的首要因素。室温及热电致冷温区可选用的温度传感器的种类较多, 测温灵敏度的高低、线性与否、可靠性和成本等因素需要综合考虑。误差特点、测量标定和一致性筛选对实际应用有较大影响, 电流型半导体温度传感器今后可优先考虑。涉及液氮乃至液氦温区封装的传感器有铂电阻和 Si 二极管等。传感器

在低温区的特性较特殊, 测控上需特别注意。

参考文献

- [1] Texas Instruments. LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors [EB/OL]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm135.pdf>, 2018.
- [2] Michael P. T. A Two Terminal IC Temperature Transducer [J]. *IEEE J Solid-State Circuit*, 1976, **11**(6): 784-788.
- [3] Analog Devices. 2-Terminal IC Temperature Transducer [EB/OL]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD590.pdf>, 2018.
- [4] Analog Devices. Low Cost, Precision IC Temperature Transducer [EB/OL]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD592.pdf>, 2018.
- [5] Analog Devices. Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation [EB/OL]. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD594_595.pdf, 2018.