

# 红外测温中检测强噪声下微弱信号的新途径

刘建科 张海宁 马毅

(西北轻工业学院自动控制工程系, 咸阳 712081)  
(1999 年 2 月 6 日收到, 1999 年 5 月 13 日收到修改稿)

就“BHJ-400”型便携式电脑红外测温仪的研制从理论和实践角度介绍了以下内容: ①提高红外光学系统信噪比的方法和途径; ②提高红外探测器输出信号的方法和途径; ③在探测器输出信号处理电路中滤除广白噪声、有效提取并放大深埋在强噪声中微弱目标信号的方法和途径. 从而使该红外测温仪性能得到了最大限度地提高, 实验结果和理论分析值相符, 达到了设计要求.

PACC: 6271

## 1 引 言

“BHJ-400”型红外测温仪是以前我们研制的“YBJ-Z-5”型红外测温仪(该仪器 1983 年已投入生产, 各项性能指标均优于当时进口产品, 为国家节省了大量外汇, 并获省、部级奖励多项)的换代产品, 可广泛用于非接触测温的所有领域. 与“YBJ-Z-5”型红外测温仪相比, 主要从以下几方面作了改进.

## 2 提高红外光学系统信噪比的途径

由红外系统理论<sup>[1]</sup>知, 对于扩展源目标, 红外系统信噪比方程为

$$S_{NR} = \frac{\pi D_0 N_A \tau_0 \tau_a D^* \sqrt{\Omega L}}{2 \sqrt{\Delta f_R}} \quad (1)$$

式中  $N_A$  和  $D_0$  是红外光学系统的数值孔径和有效孔径;  $\Omega$  是透镜的瞬时视场, 由透镜的焦距  $f$ 、探测器的接收面积及测试距离决定;  $\tau_0$  和  $\tau_a$  分别为光学系统及传输路径上大气的光谱透射比;  $\Delta f_R$  及  $L$  分别是噪声等效宽度和目标的辐射亮度;  $D^*$  是探测器的比探测率( $D^*$  是探测器视场的函数, 是一个不依赖于探测器面积和测量带宽的参数, 即描述探测器在给定功率下输出信号的一个参量). (1) 式中, 在决定目标辐射强度的测试距离和大气透射比一定的条件下, 提高红外系统信噪比  $S_{NR}$  的主要措施在于比探测率  $D^*$  和辐射窗口即光学透镜的选材上. 为此在“BHJ-400”型红外测温仪中选用比探测率  $D^*$  较高的薄膜热电堆探测器和菲涅耳透镜作为其光学系统, 这是基于:

(1) 薄膜热电堆探测器是一种由热电系数较高的材料经多结集成化而构成, 为绝大多数国内外非接触测温仪所采用, 是非接触测温仪的理想接收元件. 因该器件正向响应快(弛豫时间可达十几 ms), 集成度高, 工作稳定可靠; 又因温度辐射是一种直流或低频信号, 而热电堆的典型特征是能对这一信号直接响应而无需使用调制系统. 该仪器中采用热电堆作为接收元件, 探测器的视场由菲涅耳透镜像光学系统决定. 探测器的输出信号是目标辐射及探测器工作温度的函数, 当探测器的工作温度确定时, 信号仅与目标辐射有关, 而工作温度变化所引起的偏离可通过放大器电路给予补偿. 所以热电堆属于受辐射而直接产生电压的器件, 无需偏压, 从而避免了因电源所引起的干扰, 并可在常温下稳定工作而无需制冷, 最终达到仪器小型化、大大降低成本的目.

(2) 一般情况下, 红外光学系统中的棱镜、透镜、窗口、滤光片等重要元件都是由一系列光学材料构成. 本仪器的红外光学系统在选材时考虑了以下几个方面的特点: ①当辐射源的温度在常温下变化时光谱透射比要求大于 50%; ②仪器的测温目标温度范围为  $-20^\circ\text{C}$ — $400^\circ\text{C}$ , 测温仪工作环境温度为  $8^\circ\text{C}$ — $40^\circ\text{C}$ . 所以红外光学系统的透镜(即菲涅耳透镜)选用塑料制成, 因为它的振转吸收带和晶格振动吸收带正好在中红外波段, 而对远红外( $0$ — $30\ \mu\text{m}$ )光有较高的透射比, 透过率即透射比大于 60%, 且具有易成型、价格低、耐腐蚀的优点.

本仪器中依照透射比和接收角的要求设计的菲涅耳透镜, 为厚 2 mm, 半径 13 mm 的球壳(其外形如图 1 所示), 对 4—14  $\mu\text{m}$  红外线透射比达 65%, 使用焦距  $f=12\ \text{mm}$ , 并经过优选装配, 就可使  $\tau_0$ ,  $D_0$ ,  $N_A$ ,  $\sqrt{\Omega}$  增大,  $\Delta f_R$  减小, 使红外系统的信噪比

得以极大提高. 由测量结果知  $S_{NR}$  比改进前提高了 25% 左右. 应该说明的是  $S_{NR}$  的提高主要是由于采用了球壳形菲涅耳透镜, 这一改进取消了原旧系统中对外界进入探测器前的红外辐射的反射系统, 且探测器前移, 从而有效地增大了视场, 增加了外界红外辐射进入探测器的光通量, 同时也可使各种噪声与外界红外辐射信号的相对值降低很多. 与改进前相比  $\tau_0$ ,  $D_0$ ,  $N_A$ ,  $\sqrt{\Omega}$  分别增大约 25%, 70%, 55%,  $\Delta f_R$  减小约 30%.

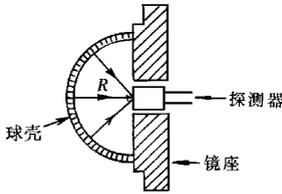


图 1 红外光学系统菲涅耳透镜示意图

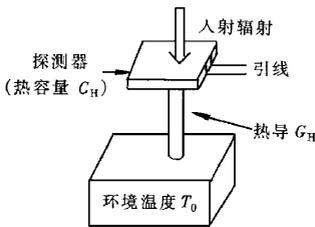


图 2 探测器的热回路

### 3 提高热探测器吸收红外辐射时温度改变量 $\Delta T$ 的途径

一般红外探测器最简单的热回路如图 2 所示. 探测器通过热导  $G_H$  与周围环境发生热交换. 设周围环境热容量为无限大, 且整个环境温度是一致的. 若探测器测量端比环境温度高  $\Delta T$ , 则探测器在单位时间内通过热导流向环境的热量流  $\Delta P = G_H \Delta T$ , 探测器接收红外辐射时其温升公式为

$$\eta P = C_H \frac{d(\Delta T)}{dt} + G_H \Delta T, \quad (2)$$

通常投射到探测器的辐射是经过调制的, 投射到探测器上的辐射功率  $P = P_0 + P_{\omega_0} e^{i\omega_0 t}$ ,  $P_0$  为直流分量,  $P_{\omega_0} e^{i\omega_0 t}$  为交流分量, 所以温升为  $\Delta T_0$  (与时间无关的平均温升) 和  $\Delta T_{\omega_0}$  (与时间有关的温度变化) 两部分之和, 设  $\eta$  为热探测器的吸收比,

$$\Delta T_{\omega_0} = \frac{\eta P_{\omega_0} e^{i(\omega_0 t + \phi)}}{G_H \sqrt{1 + \omega_0^2 \tau_H^2}}, \quad (3)$$

式中  $\phi = \arctan \frac{\omega_0 C_H}{G_H}$  为温升与辐射功率之间的相位差, 而  $\tau_H = \frac{C_H}{G_H} = C_H R_H$  为探测器的热时间常数.

从(2)(3)式知, 在目标源辐射功率一定的前提下, 要使探测器有尽可能大的温度变化, 就应提高投射到探测器上的辐射功率  $P$ , 并使  $G_H$  尽可能小,  $\omega_0$  尽可能的低, 使  $\omega_0 \tau_H \ll 1$ . 在本文所述光学系统及探测器系统中  $G_H$  及  $\tau_H$  不变的条件下, 我们在“BHJ-400”型红外测温仪中取消了原探头中的机械调制, 经计算使  $P$  提高了约 20%; 同时  $\omega_0 \rightarrow 0$  增大了目标在探测器上的辐射时间, 即增加了投射到接收窗口的辐射能量, 同时满足了  $\omega_0 \tau_H \ll 1$  的条件, 使探测器的温度变化量得到了最大限度的提高.

### 4 提高探测器输出信号电流的途径

测辐射热电偶是利用热能与电能相互转化的温差电现象的原理制成的. 即当两种不同金属组成的电路通电流时, 接点会发热或冷却, 这种现象称为珀尔帖效应. 其原因是两种材料接触时有接触电势, 热电流  $I$  流过接点总是在测量端吸收热量, 使测量端温度降低, 从而降低了温差电势和回路中的测量电流. 珀尔帖效应等效于一个阻抗  $Z_d$ , 若参考端保持在某一温度  $T_0$ , 则温度为  $T$  的测量端以  $\alpha_{AB} TI$  的速率吸收热量, 其中  $\alpha_{AB}$  是描述该回路中同时具有的温差电效应的温差电势率. 假设测量端热阻为  $R_H$ , 则测量端的温度变化量是  $\Delta T$ ,  $R_1$  是热电偶丝的电阻, 可以证明<sup>[1]</sup>, 回路中电源的电动势为

$$V = I(R_1 + R_L + \alpha_{AB}^2 R_H T). \quad (4)$$

上式表明在直流情况下珀尔帖效应等效于一个电阻  $R_d = \alpha_{AB}^2 R_H T$ , 称为热电偶的动态电阻. 设想有外电源  $V e^{i\omega t}$  通过负载电阻  $R_L$  与热电偶相连, 由测量端的能量守恒条件, 同时在考虑珀尔帖效应的情况下可得

$$C_H \frac{d(\Delta T)}{dt} + \frac{\Delta T}{R_H} = -\alpha_{AB} IT,$$

回路中的电流是

$$I = \frac{V e^{i\omega t}}{R_1 + R_L + Z_d}, \quad (5)$$

式中  $\tau_H = R_H C_H$  是探测器的热时间常数,  $Z_d = \frac{R_d}{1 + i\omega \tau_H}$ , 这个阻抗相当于由等效电阻  $R_d$  与等效电容  $C_d$  并联而成(如图 3 所示), 即

$$Z_d = \frac{R_d}{1 + i\omega \tau_H} = \frac{R_d}{1 + i\omega R_d C_d}.$$

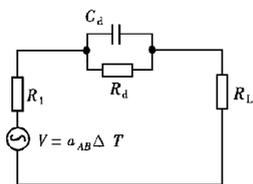


图3 测辐射热电偶电路的等效电路



由(5)式可知,珀尔帖效应在直流电路中的等效阻抗  $R_d = \alpha_{AB}^2 R_H T$  大于交流电路中的等效阻抗  $Z_d$ ,为减小珀尔帖效应对温度测量的影响,提高测温回路中的电流,我们对原探测器及其前置电路作了改进,即将原前置地+2.5 V 直流供电改为直流方波 2.5 V 对探测器  $G$  供电,与前置放大器+5 V 方波供电同步(其电路如图4所示),同时考虑到测辐射热电偶对响应时间的较高要求,选其调制频率  $\omega = 236\pi$  之所以选这一调制频率是因为:防止测温仪周围环境中的 50 Hz 市电的干扰;从 CPU 即图4中的 80C552 中取出的+5 V 方波比较信号频率为  $\omega = 236\pi$  时实际使用效果最好),从而达到了降低  $Z_d$  增大测量电流的目的.测量证明,经改进后测量电流  $I_s$  比原直流供电实际提高约 2.3 倍,与理论计算符合.

### 5 红外测温中提取深埋在强噪声中的微弱信号的途径

“BHJ-400”型红外测温仪测量范围为中低温区段,目标信号十分微弱,大多掩埋在强噪声之中.如探测器与周围环境热交换的起伏引起的温度噪声、红外探测器的热噪声、电子器件的复合噪声及其他广白噪声等.噪声虽然很强,甚至大过信号许多倍,但噪声多具随机性,而弱信号却有其独特的规律性.根据相关接收理论,发挥 CPU(即图4中的 80C552)器件的优势,在信号处理电路中设置了信号通道和参考信号通道,几乎滤除了所有的随机噪声信号,从

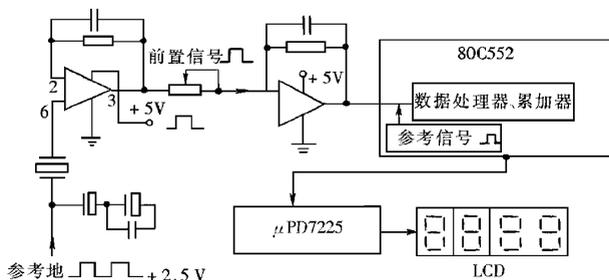


图4 红外探测器前置电路及红外测温仪部分电路原理图

而可将微弱的目标信号有效的提取并放大.其理论依据是当

$$\begin{aligned} f_1(t) &= S_1(t) + n_1(t), \\ f_2(t) &= S_2(t) + n_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

为两个同时包含噪声与信号且有相互联系的函数,即相关函数,其中  $S_1(t), S_2(t)$  为二信号函数,  $n_1(t), n_2(t)$  为与信号混在一齐的噪声函数时,在相关接收技术<sup>[2,3]</sup>中,可以把  $f_1(t)$  和  $f_2(t)$  两相关函数表示为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t - \tau) dt, \quad (7)$$

式中  $\tau$  为两相关函数在电路中的延迟时间.将(6)式代入(7)式得

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left\{ \int_{-T}^T S_1(t) S_2(t - \tau) dt \right. \\ &\quad + \int_{-T}^T S_1(t) n_2(t - \tau) dt + \int_{-T}^T S_2(t - \tau) \\ &\quad \left. \cdot n_1(t) dt + \int_{-T}^T n_1(t) n_2(t - \tau) dt \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

由于噪声与噪声、噪声与信号都不相关,均是相互独立的,所以(8)式的第二、三、四项都等于零.(8)式简化为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T S_1(t) S_2(t - \tau) dt. \quad (9)$$

本仪器的线路设计中,被测目标信号为幅值  $A$  变化的 1:1 的方波,参考信号为幅值  $B$  恒定的 1:1 单位方波,分别取为  $S_1(t), S_2(t)$  这两个方波函数的傅里叶展开式为

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \frac{4A}{\pi} \left[ \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right], \\ S_2(t - \tau) &= \frac{4B}{\pi} \left[ \sin \omega'(t - \tau) + \frac{1}{3} \sin 3\omega'(t - \tau) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin 5\omega'(t - \tau) + \dots \right], \end{aligned}$$

且使  $\omega' = \omega$ , 代入(9)式则  $R(\tau)$  可得到简化.又由于在信号通道中插入了多个简单的低通滤波器及负反馈电路,广白噪声已经给予滤除,这里主要的是相关解调作用,高频成分的噪声减至不可测量的程度,只有频率为  $\omega$  的信号和噪声才能通过相关器,所以相关器的输出为

$$R(\theta) = \frac{8AB \cos \theta}{\pi^2}, \quad (10)$$

即相关器的最后输出值的大小正比于二信号的幅值乘积和二信号相位差的余弦值,式中  $\theta = \omega \tau$ , 为参考信号相对于目标信号的相位差,系一常量.将从 80C552 中直接取出的参考信号与进入 80C552 中的

目标方波信号取为同相位,即  $\theta = 0$ , 则(10)式变为  $R = 8AB/\pi^2$ , 这样最后进入 80C552 中数据处理器的信号是一个正比于被测信号幅值的输出电平  $R$ . 再经 80C552 中的同步累积程序,即第二次相关接收(其重复频率为  $\omega''$ ,且  $\omega'' \neq \omega$ ,这是因为从相关器中输出的只有频率为  $\omega$  的信号和噪声,第二次相关接收中的同步累积即积分电路对频率为  $\omega$  的信号和噪声同时进行多次累积并取其平均结果给予输出,由于噪声的随机性噪声的输出为零),则可将剩余噪声予以全部滤除,从而把深埋在强噪声中的微弱信号给以有效的提取并放大.在 80C552 中再与环境补偿信号、线性补偿数据进行运算处理,直接变为线性数据信号送入可编程液晶显示驱动器  $\mu\text{PD7225}^4$  推动 LCD 进行线性温度数字显示.其线路亦如图 4 所示.

## 6 结 论

在红外测量及其他很多领域都经常要求检测伴

随着强噪声的微弱信号,以便对其进行数字显示或作以记录.本文所介绍的方法,可以把深埋在强噪声中的微弱信号有效地提取出来并加以放大,使该型红外测温仪性能得到极大提高.即具有在强噪声下检测微弱信号不失真、恶劣环境下工作稳定性强、灵敏度高、抗干扰能力强的特点.当适当改变参量,还可实现对不同频率的锁定,同时该方法适用于其他仪表中不同性质的微弱信号的检测,是检测微弱信号的一种实用新方法.

- [1] 徐溢卿. 红外物理与技术(西安电子科技大学出版社,西安,1989)[Fu-qing Xu, Infrared Physics and Technology, Xi'an Electronic University Press, 1989 (in Chinese)].
- [2] P. W. Kruse *et al.*. Elements of Infrared Technology John Wiley and Sons Inc., 1962.
- [3] 马秉林. 西北轻工业学院学报 (2) (1983) [Bing-lin Ma, Northwest Institute of Light Industry, 1983 (2) (in Chinese)].
- [4] 刘建科等. 西北轻工业学院学报 (1) (1998) [Jian-ke Liu *et al.*, Northwest Institute of Light Industry, 1998 (1) (in Chinese)].

## RESEARCH ON THE DETECTION OF WEAK SIGNALS IN STRONG NOISE

LIU JIAN-KE ZHANG HAI-NING MA YI

(Northwest Institute of Light Industry, Xianyang 712081)

(Received 6 February 1999; revised manuscript received 13 May 1999)

### ABSTRACT

We present the introduction of the development of model BHJ-400 portable infrared fathometer. The following methods are introduced (1) improving the signal noise ratio of the infrared optic system (2) improving the output signal of the infrared detector (3) in output circuit of the detector, filtering flat noise and efficiently extracting and amplifying weak target signals buried in the strong noise. Consequently, the operating performance of the infrared fathometer is maximized and the experimental result agrees with the theory, thus the designing requirements have been achieved.

PACC: 6271