

# 辐射温度的检测原理及应用<sup>1)</sup>

宋雪君

(上海工程技术大学, 上海 200335)

杨颜峰

(中国科学院中国大恒公司, 北京 100080)

**摘要** 辐射测温是科学研究和工业生产中一种广泛采用的非接触测温方法。随着新型探测器件的出现, 测温的精度不断提高, 测温的范围不断扩大。但中低温特别是低温的测量却比高温要困难些。本文从黑体辐射理论出发, 着重讨论了用热电型探测器测量辐射温度的方法, 其中包括原理计算公式、探测光学系统、处理线路、计算机数据采集和处理、温度闭环控制方法等。在介绍实验系统的同时, 对辐射温度测量系统的设计特点也进行了讨论。

**关键词** 红外测温, 辐射测量, 光电测量

**Abstract** Radiation temperature measurement is a kind of noncontact measuring method which is widely used in research and industry. With the help of new detectors, the measurement becomes more and more precise and the temperature range can be very low. On the basis of the theory of black-body radiation, this paper focuses mainly on the method with pyroelectric detector. It describes the theoretical calculation formula, optical detecting system, electrical processing circuits, data acquisition, close-circuit temperature control, etc. Besides the experimental setup, we also discuss the particular considerations in designing radiation temperature measuring systems.

**Key words** infrared temperature measurement, radiation measurement, opto-electric measurement

## 1 概述

温度检测是科学研究、工业生产及日常生活中经常遇到的一种物理量测量。就测量方法来分, 可分为接触式和非接触式两种。非接触式测量, 一般使用热电型探测器或光电探测器等作为检测元件。本文着重讨论用热电型探测器来检测辐射温度。

辐射测温属于非接触测量, 因此被广泛地运用在危险场所、移动的物体、一些无法进入的地方以及要求短时间测量的场合。

与普通的接触式温度计比较, 非接触式温度计要复杂得多。为了精确测量一定距离外的物体温度, 首先要有一个专用的光学系统。热

电型探测器是微分型元件, 因此还需要一个斩波器和一个基准温度检测器。这样, 由检测器、光学系统、斩波装置、基准温度检测器以及采样处理系统等构成了一个基本的辐射温度计。

除此以外, 还有一些与检测结果直接相关的问题。例如物体的辐射率、斩波器的斩波频率、温度、波长和辐射能的关系等。本文对上述问题进行探讨并简单介绍闭环控制的方法。

## 2 辐射温度的检测原理

众所周知, 自然界中所有的物体, 即使是低

1) 1994年2月26日收到初稿, 1994年11月23日收到修改稿。

温物体,只要其温度高于绝对零度,都辐射能量(热量)。辐射温度计就是利用了这个特点来检测温度的。

根据斯忒藩-玻耳兹曼公式,温度为  $T$  (绝对温度)的物体,单位面积所辐射的能量  $M(T)$  为

$$M(T) = \varepsilon\sigma T^4 (\text{W/m}^2), \quad (1)$$

其中  $\varepsilon$  为物体表面的辐射率,  $1 < \varepsilon < 1.0$ , 因材料、表面形状而异;  $\sigma = 5.671 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$ , 称为斯忒藩-玻耳兹曼常数。(1)式说明,同一材料的物体由同一表面所辐射的能量与它的绝对温度的四次方成正比。

热电阻探测器只能接收到上述辐射能的一

小部分。又如前所述,由于它是微分型的,只能检测变化的温度,换句话说,如果没有变化,即使物体的温度再高,也无法检测出来。在检测器窗口前面使用了斩波装置以后,随着斩波器的开与闭的变化,热电阻探测器就测量到了物体和斩波器的辐射能之差,即

$$P = K\sigma(\varepsilon T^4 - \varepsilon_0 T_0^4) (\text{W/m}^2), \quad (2)$$

其中  $\varepsilon_0$  为斩波器表面的辐射率,  $T_0$  为斩波器表面的绝对温度,  $K$  为与测温仪有关的常数。

如果我们知道了上述两个辐射率并且测量出了辐射能之差  $P$ , 就可以得到物体的表面温度。

红外测温仪主要测量物体辐射的红外光。

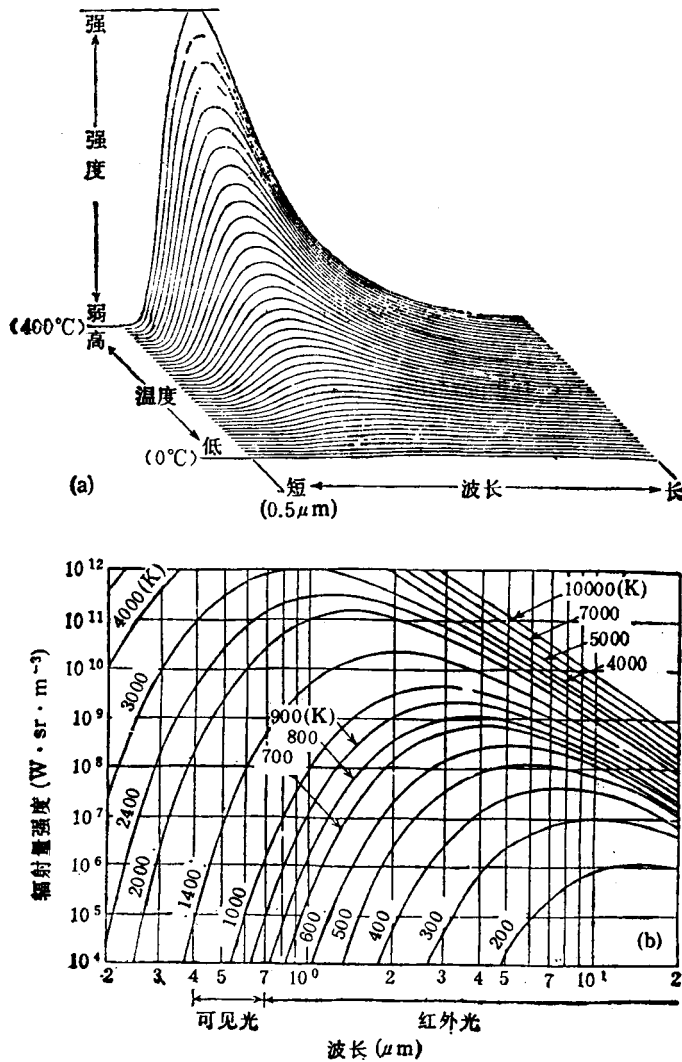


图 1

红外光的波长是介于可见光与微波之间的一种波。图 1 显示了辐射能、温度和波长的关系。

由图 1 (a) 可知,相同的波长,温度越低,辐射能越小,而在同样的温度下,波长越长,辐射能越小。

图 1(b) 是温度、波长和辐射能关系的另一种表示法。从该图可以看到,波长大于  $2.5\mu\text{m}$  的波,若温度低于  $300\text{K}$ ,其辐射能几乎为零。这就是中低温红外辐射温度仪的光学系统不用透镜的原因。因为普通光学玻璃的截止波长不大于  $2.5\mu\text{m}$ ,低温无法通过。但是玻璃的反射却没有截止频率的限制,所以一般的测温光学系统都采用反射系统。当  $300\text{K}$  以下的温度辐射时,由于其辐射是全波长范围的,小于  $2.5\mu\text{m}$  的波可以被检测到,就解决了中低温的检测问题。

### 3 辐射温度仪的构成

辐射温度仪由检测器、光学系统、斩波装

置、基准温度检测器以及采样系统等构成,如图 2 所示。

#### 3.1 热电型检测器

热电型检测器是将辐射能转换为电能的器件。可以用钽酸锂、陶瓷等材料作为感应元件,再通过场效应管进行电压放大而获得信号。当陶瓷等强介质经高电压 ( $3-5\text{kV}$ ) 进行分极处理后,它的表面电荷被极化,并吸引了空气中相反极性的电荷,达到静电平衡。受到热辐射后,上述分极的大小发生了变化,使原来的平衡遭到破坏,又由于介质表面电荷与空气中电荷恢复时间的不同,就产生了电的不平衡而生成电荷。电荷被送到场效应管进行电压放大变成相应的采样信号。

检测器的内部构造如图 3 所示。实验中,采用了日本产 SDA02-1 型热电型检测器,其性能如下:窗口尺寸为  $2.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ ,视角为  $2.0\text{mm}$  侧:  $48^\circ$ ;  $1.0\text{mm}$  侧:  $54^\circ$ ,窗口材料为硅滤色片,波段为  $6-14\mu\text{m}$ ,NEP 标准值为  $2.2 \times 10^{-9}\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。  $D^*$  标准值为  $0.7 \times 10^8$

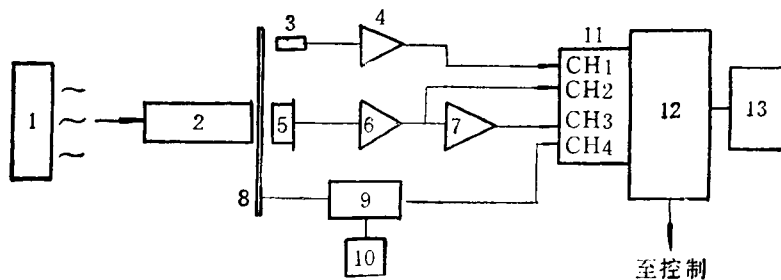


图 2 辐射温度仪的构成

1. 被测物; 2. 光学系统; 3. 室温检测器; 4. 放大器; 5. 红外检测器; 6. 放大器; 7. 放大器;  
8. 斩波器; 9. 斩波器回路; 10. 斩波信号发生器; 11. A/D 转换器; 12. 计算机; 13. 显示器

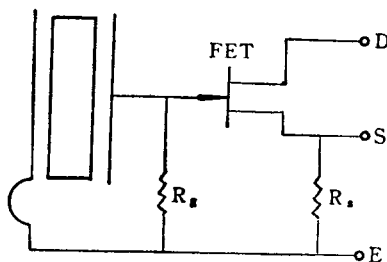


图 3 热电型检测器的内部构造

$\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , 工作电压为  $2.2-15\text{V}$ 。

使用了波段为  $6-14\mu\text{m}$  的硅滤色片后,不

但可以保护检测器,而且正好避开了波长为  $1-6\mu\text{m}$  的大气(主要是水蒸气和二氧化碳)的吸收区域,消除了大气的干扰,而辐射能量(主要是远红外)却能通过。

当然,检测器的输出仅为  $\text{mV}$  级,还需要进行放大并滤去噪音信号,才能采样处理。

#### 3.2 光学系统

辐射温度仪的光学系统主要由探测系统和瞄准系统组成。瞄准系统可以是目视瞄准和激光对准两种形式。本文介绍的是目视瞄准系统。

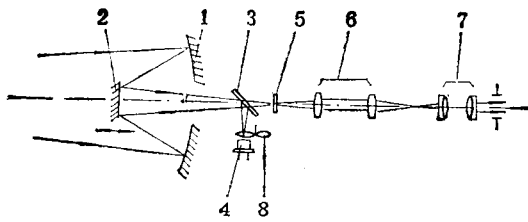


图 4 光学系统示意图

- 1.主反射镜; 2.次反射镜; 3.分光镜; 4.热探测器;  
5.分划板; 6.倒像系统; 7.目镜; 8.斩波器

光学系统总图如图 4 所示。

探测物镜是一个折反系统,由主反射镜 1 和次反射镜 2 组成。被测物体的像经该物镜会聚到热电检测器 4 的检测面上,分光镜 3 将  $6-14\mu\text{m}$  的红外波反射而使可见波段透过。为了保证不同物距上的像均成像在检测面上,我们将次反射镜 2 设计成可调节的,前后移动次镜 2 就可保证对不同距离上的物体的测量。序号 5 为一个分划板,上面有瞄准标志,它与检测器的检测面关于分光镜 3 共轭,这就保证当在目视系统观察到清晰的图像时,检测器检测到的信号为最大。

由于主反射镜和次反射镜均为反射面,从而避免了光学材料对红外波的影响,提高了能量的利用率,可以测量低至室温甚至低于室温的物体。为了降低成本,主、次反射镜均设计成球反射面,这样不可避免地带来了像差。光学系统中序号 6 为一倒像系统,它不但能使像面的位置发生变化,还可以部分补偿会聚物镜的像差。

序号 8 为机械斩波器。这是热电型检测器必不可少的调制部件。

### 3.3 斩波装置

热电型检测器只能检测温度差,它可以直接用来作自动门的开关、防盗器等,却无法直接测量温度。将检测器对着物体,即使物体的温度再高,输出也是零。使用了斩波装置(斩波器)后,检测器接收到的是被测物体与斩波器表面的温度差,它就有了输出。当被测物体的温度高于斩波器的温度时,输出为正,反之则为负。只有两者温度相同时输出才为零。这时,被测

物体的温度就近似室温。

斩波器一般用机械方式实现。既可以用步进电机驱动也可以用继电器驱动。我们用继电器驱动,由黑色胶木(辐射率为 0.95)构成了斩波装置,获得了较满意的结果。斩波装置的工作频率与检测器的输出有极大的关系,这将在热电型检测器的响应时间一节中讨论。本实验装置使用的频率为 0.83Hz,并用 NE555 振荡器来产生脉冲信号(见图 5)。

为增加输出负荷能力,使用了驱动器 74 LS07,所以,斩波器的实际关闭时间  $t_1$  为

$$\begin{aligned} t_1 &= 0.693 \times (R_1 + R_2) \times C \\ &= 0.693 \times (1 \times 10^6 + 10 \times 10^6) \times 0.1 \times 10^{-6} \\ &= 0.76\text{s}. \end{aligned} \quad (3)$$

开启时间  $t_2$  为

$$\begin{aligned} t_2 &= 0.693 \times R_1 \times C \\ &= 0.693 \times 1 \times 10^6 \times 0.1 \times 10^{-6} \\ &= 0.07\text{s}. \end{aligned} \quad (4)$$

整个斩波周期是

$$\begin{aligned} T &= t_1 + t_2 \\ &= 0.83\text{s}. \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.4 基准温度

基准温度也就是斩波装置或者其附近的温度。这个温度可用接触式测温器例如热敏电阻等来获得。由于热敏电阻的输出特性曲线是非线性的,我们用了稳压电源输入和射极跟随器的线路(见图 5)。它的  $T-V$  特性曲线基本上是线性的,可用下式求出基准温度为

$$T_0 = -15.8e + 75.4(\text{°C}). \quad (6)$$

基准温度检测回路的输出信号是 0—5V 的电压信号,这个信号可以与辐射信号在回路中合并后输出,我们采用的方法是将它们分别输入到 A/D 转换器的不同端口,在软件中合成为对象的实际温度。

### 3.5 采样系统

本检测系统的总电路如图 5 所示。

在实验中,将经过放大的辐射信号通过 A/D 转换器送入计算机进行采样和数据处理。信号的采集和处理借助 PC 机强大的软件很方便地进行调试,并且可以采用多种测量方式,完

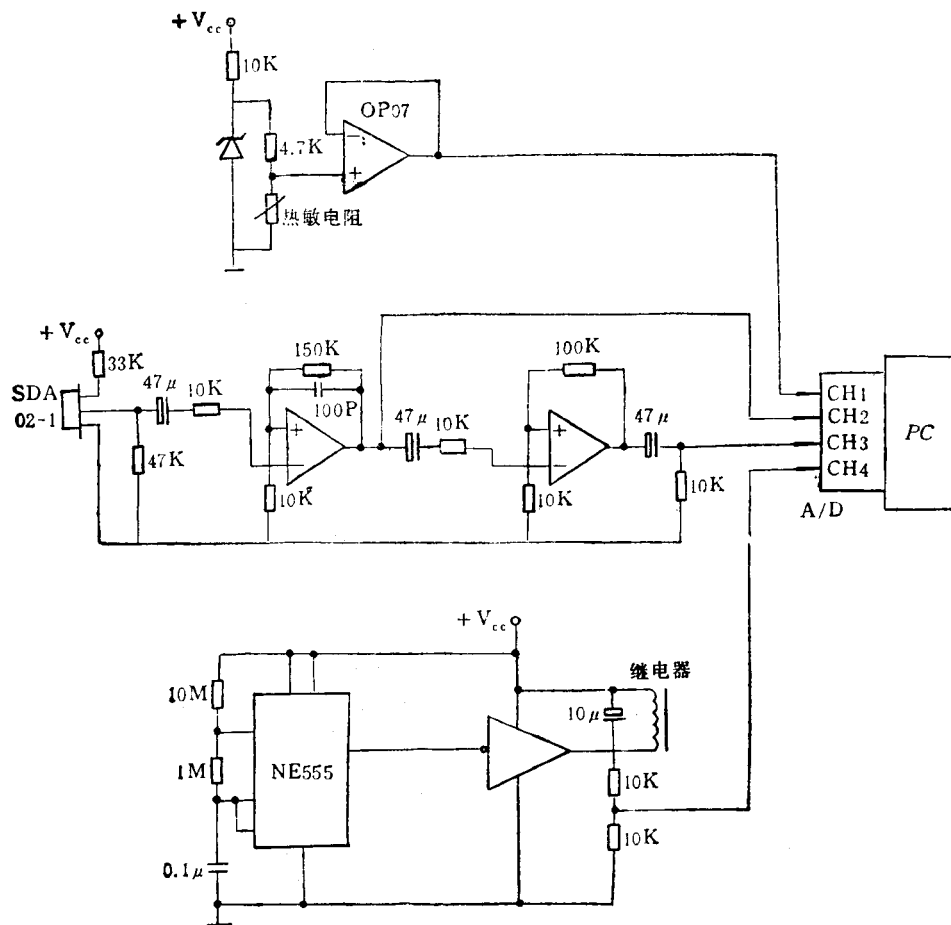


图5 系统总线图

成温度显示、图形表示、数据储存、打印以及闭环控制功能。

A/D 转换器采用 ADC0809 组成的模入模出接口板, 计算机可以用 286 以上的任何型号的计算机。A/D 转换器至少要用三个接口。一个是基准温度信号的输入口, 一个是辐射温度信号的输入口, 另一个是测量开始信号的输入口。这个信号由斩波器回路提供。计算机首先读取基准温度。当斩波器回路中产生低电平脉冲后, 斩波器由闭变为开, 辐射信号开始增大。上述低电平脉冲作为采样开始信号被输入计算机后, 启动 A/D 转换, 计算机读取上升后的一连串信号并取得最大值, 然后将这个值与基准温度的对应值一起代入转换公式求出温度值。图 6 为时序图。采样程序可用各种语言编制, 这里是用 C 语言制成 A/D 转换、采样以及后面

要提到的控制程序。

如果信号比较强, A/D 转换器的输出可能达到饱和值, 计算机就转读 A/D 转换器的另一个输出口, 即只经过一级放大, 放大倍数较小的信号。当然计算的公式是不同的。这样可以自动选择最合适的信号, 使测量的范围变大。

如前所述, 物体的辐射能量符合玻耳兹曼

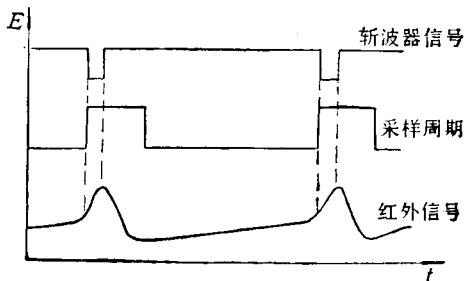


图6 采样时序图

公式:

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 (\text{W/m}^2).$$

若检测器检测到的能量为  $P$ , 又考虑到基准温度, 则

$$P = \sigma(\varepsilon T^4 - \varepsilon_0 T_0^4) \cdot A \cdot A_s / (\pi \cdot L^2), \quad (7)$$

其中  $A_s$  为检测器的受光面积,  $A$  为被测物体的被检测面积,  $L$  为检测器到被测物体表面的距离。

若被测物体的被检测面积的半径为  $r$ , 则

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot r^2, \\ A \cdot A_s / (\pi \cdot L^2) &= \pi \cdot r^2 \cdot A_s / (\pi \cdot L^2) \\ &= A_s \cdot \tan^2 \varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

由于  $\theta = 2 \cdot \varphi$  为检测器的视角, 可见只要确保被检测面积小于物体的面积且此面积中温度处处相同, 则检测器的输出与距离无关。

再进一步, 设测温仪的输出电压为  $E$ , 电压放大倍数为  $A_v$ , 检测器的输出电压为  $V$ , 灵敏度为  $R$ , 滤光材料的透过率为  $\eta$ , 则

$$\begin{aligned} E &= A_v \cdot V = A_v \cdot R \cdot \eta \cdot P \\ &= A_v \cdot R \cdot \eta \cdot \sigma(\varepsilon T^4 - \varepsilon_0 T_0^4) \\ &\quad \cdot A_s \cdot \tan^2 \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

又令  $1/K = A_v \cdot R \cdot \eta \cdot \sigma \cdot A_s \cdot \tan^2 \varphi$ , 则可得

$$E = 1/K \cdot (\varepsilon T^4 - \varepsilon_0 T_0^4),$$

或

$$T^4 = (K \cdot E + \varepsilon_0 T_0^4) / \varepsilon. \quad (10)$$

那么, 当  $\varepsilon$  和  $\varepsilon_0$  为已知, 并测出了  $E$  和  $T_0$ , 就可以求出  $T$ 。

当然,  $K$  只是近似常数, 实际上,  $R$ ,  $\eta$  等又是温度的函数, 上述公式在实际应用时, 还要进行校正处理。

## 4 辐射温度计的设计特点

### 4.1 辐射率的选取

辐射率是一个与物体材料、表面状况有关的量。如前所述,  $\varepsilon$  的取值范围是 0.01—1.0, 从(10)式来看,  $\varepsilon$  对检测结果影响很大。事实上, 任何物体, 在热辐射的同时, 还存在反射 ( $R$ ) 和透射 ( $T$ )。从理论上讲,  $\varepsilon + R +$

表 1 一些主要材料的辐射率

材料名	辐射率	温度(°C)
纸	0.92—0.94	0—100
塑料	0.95	0—200
陶器	0.90	20
水	0.95—0.963	0—100
冰	0.96—0.98	
雪	0.82	
土	0.80—0.95	
涂料	0.95	
皮肤	0.98	
无光泽油漆	0.95	
有光泽油漆	0.9	
有光泽铝板	0.095	100
铝的氧化物	0.26—0.42	500—830
有光泽的铜	0.052	100
有厚氧化膜的铜	0.78	25
有光泽的铸铁	0.21	200
氧化的铁	0.74	
有光泽的镍	0.045	
镍的氧化物	0.37—0.48	198—600
不锈钢(8-18)	0.16	25
不锈钢(304)	0.36—0.44	215—490
水泥	0.94	
橡胶	0.94	
石英玻璃	0.75	

$T = 1.0$ 。物体的表面越光滑, 例如铝、不锈钢等, 它的反射就越大, 相应辐射也就越小。表 1 列出了一些主要材料的辐射率。

在检测时, 若不知道物体的辐射率, 可在物体的表面贴上已知辐射率的胶布或喷涂黑油漆, 测量该点的辐射后, 就可以通过(10)式求出温度, 也可以对贴胶布前后的物体表面辐射输出进行比较, 由此就可求出该物体的辐射率。

### 4.2 热电型检测器的响应时间

如前所述, 斩波器的频率一般为 1Hz 左右。该值的选取, 既和检测器的响应时间有关, 也和放大器的频响有关。

检测器受光以后, 其输出上升到峰值至少需要 30ms, 若斩波器的开启时间过短, 当输出还在上升的时候, 由于斩波器的关闭使检测器产生了反向输出, 当然就达不到峰值了。从这一点来讲, 希望开启时间长一点。可是开启的时间过长又产生了新的问题, 在开启的时间内被测物体若有位移等变化的话, 也将被检测到,

产生误信号。同时,放大器的频响也有限制,如果对低于 1 Hz 的信号进行放大,对放大器将有很高的要求。而频率取 1 Hz 的话,由(4)式,开启时间约为 80ms,能符合上述要求。

一般产品中,使用步进电机的电路所采用的频率大多是 1 Hz,同时还可以在电路中增加一个滤波回路,将大约 7 Hz 的干扰波滤掉(图 7)。而使用音叉等振动子的回路则使用 10 Hz 左右的频率。这时,测量到的不是输出的峰值了,因此灵敏度比前者小得多。

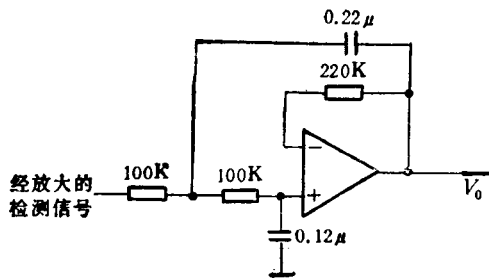


图 7 滤波回路

### 4.3 温度仪的标定

当辐射温度仪设计完成以后,还要进行标定。即以标准黑体为辐射源,在不同的温度下对仪器进行调校。

## 5 闭环控制

辐射温度仪的输出是电压信号,因此可以用来进行温度的闭环控制。

最简单的控制是开关控制。将输出的电压信号接到加热器的继电器开关上,由事先设定的温度值来控制开和关,就能达到控制的目的。

由于使用了计算机,因此还可以进行精度

更高的控制,例如 PID 控制等。一般是用加热器作为热源,计算机每次的输出值是前一次电源电压值的增量。控制硬件一般用可控硅控制回路,如果有其他热控制器件(如冷却装置),还可以有多个控制输出,以提高控制效果。

开启测温仪后,先向计算机输入一系列数据,包括被测物体的辐射率、目标温度、采样间隔时间等。如果要对控制系统进行调试,还可输入不同的控制常数,进行参数征定。计算机屏幕上显示出当前测量到的温度值,并且用图像表示温度向目标逼近的方式和趋势。所需的温度值和其他数据都可以存盘保存,各个不同的控制结果的图像也可打印出来,以便进行比较以取到最佳控制系数。

## 6 结束语

辐射温度仪是现代工业上较为广泛使用的一种测温仪器,热电型检测器是它的眼睛,计算机则是它的核心。简单的辐射温度仪用检测回路加上单片机就可以显示温度值,也能进行控制输出,体积也比较紧凑。若与微机配合使用,则具有更强的显示、控制及其他功能。例如,可用来观察、记录一些物体的温度变化特性,也可以对平面的温度分布进行扫描并可画出一幅“温度地形图”。总之,它的应用范围是十分广泛的。

### 参 考 文 献

- [1] 伊藤 聡, 温度湿度センサ活用ハンドブック, 日本 CQ 社, 102.
- [2] 杨宜禾、岳敏, 红外系统, 国防工业出版社, (1985).