

# PEV 热象测试仪的数据处理 方法及系统

王 筠                      王 凡

(华中工学院电子与信息工程系)

**摘要**——本文针对热释电摄像管(PEV)成象系统的特点,提出了数字式红外图象的数据处理的原理与方法。设计了红外图象数据处理系统及软件包,并给出了对红外图象的测试和处理实例。

## 一、引 言

PEV 热象测试仪是一种采用热释电摄像管的红外热成象测试设备。它广泛应用于显示热能动力设备、输配电电器设备以及电子设备部件等的热象,测定其温度场分布和各部位的表面温度值,从而对被测物体进行故障检测和节能技术指标的测试。

长期来 PEV 的热成象系统由于其本身(主要是 PEV 器件)存在着严重影响测试精度的因素,所以仅能作为对目标温度场的定性观测设备,无法实现定量测温,其主要原因是:

(1) 电子束上靶不均匀及 PEV 制造工艺不完善而导致本底电流出现黑斑和疵点信号;  
(2) 电子束聚焦状态随上靶的几何位置不同而不同,形成靶面温度响应率不均匀度达 30% 左右;  
(3) 系统的信噪比较低;  
(4) 环境温度对信号电平的影响;  
(5) 由于靶面的热扩散作用,影响空间分辨率的进一步提高;  
(6) 辐照度响应信号与被测物体表面温度之间存在着复杂的非线性关系。致使红外测温误差高达 30%,甚至可达 100% 以上<sup>[1]</sup>,严重影响 PEV 的成象测温系统在工程应用中的推广和发展。

针对热成象系统的上述问题,本文提出了一套数据处理方法,并研制了微型计算机图象处理系统及数据采集与处理软件包,从而使该系统温度响应率不均匀性降低到 1.5% 以下;测温误差(黑体定标误差)小于  $\pm 3\%$ ;热耗计算与理论值比较误差小于  $\pm 4\%$ 。这种测试精度完全满足工程测温 and 节能测试的实用要求。

## 二、数据处理方法

PEV 摄像机通常有平移、回旋跟踪和斩光调制三种工作制式。本文所讨论的数据处理方法仅限于斩光调制信号。

本文 1985 年 11 月 20 日收到。修改稿 1986 年 3 月 22 日收到。

## 1. 象差处理

象差处理的原理是基于信号的相关性。作为固定噪声的黑斑和疵点信号的场间相关系数为1,而被测目标信号其场间相关系数一般可认为趋近于1。因此,可以认为由摄象机输出(经模拟信号处理器预处理)的相邻的斩光亮场和斩光暗场的被测目标信号电压的幅度基本相等,而极性相反。

根据上述分析,PEV的斩光亮场和暗场的输出电压(暂不考虑随机噪声)可分别写为

$$V_{sb} = V_p + V_{sm} \cdot \text{MTF} + V_{FN}; \quad (1)$$

$$V_{sd} = V_p - V_{sm} \cdot \text{MTF} + V_{FN}; \quad (2)$$

式中  $V_{sb}$  为斩光亮场输出电压;  $V_{sd}$  为斩光暗场输出电压;  $V_p$  为 PEV 的本底电流在负载电阻上的电压; MTF 为摄象管调制传递函数;  $V_{sm}$  为 MTF=1 时的信号电压;  $V_{FN}$  为 PEV 的固定噪声电压。

如果把暗场的信号倒相与亮场信号分别采样量化后求均值,则象差处理后的图象信号为

$$V_s(x, y) = \{V_{sb}(x, y) + [-V_{sd}(x, y)]\} / 2 = V_{sm}(x, y) \cdot \text{MTF}。 \quad (3)$$

由式(3)可见,由于固定噪声电压被消除,所以图象质量提高了。

## 2. 多场累积

由于随机噪声的存在(其中主要是系统的电子束噪声和第一级预放器的热噪声),故 PEV 热成象系统灵敏度较低,加之使用斩光调制方式,特别是当目标与背景的温差  $\Delta T$  较小时,信噪比更是大大降低。例如,当  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  时,对于大目标,斩光调制频率为 25 Hz; 其信噪比仅有 4 dB<sup>[2]</sup>。而红外图象的最小可分辨温度 (MRT) 与信噪比密切相关,为了降低 MRT,也必须提高信噪比。

由于图象信号的随机噪声为加性噪声,且场间相关系数为零,而被测目标信号场间相关系数趋近于1。利用相关原理,对图象信号进行多场累积平均技术,是提高信噪比的有效方法。

设原图象为  $f(x, y)$ , 加性噪声为  $n(x, y)$ , 则有噪声的图象  $g(x, y)$  可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) + n(x, y)。 \quad (4)$$

图象的信噪功率比为

$$P(x, y) = f^2(x, y) / E[n^2(x, y)]。 \quad (5)$$

取  $M$  场累积平均后图象的信号功率比为

$$\bar{P}(x, y) = f^2(x, y) / E\left\{\left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i(x, y)\right]^2\right\} = MP(x, y)。 \quad (6)$$

可见,图象多场累积平均后,可使信噪功率比增加  $M$  倍,或信噪电压比增加  $\sqrt{M}$  倍。

根据上述结论,并考虑到人眼的生理特性,可以证明<sup>[2]</sup>,在象差处理的基础上进行  $M$  场累积,净得的信噪比增量为  $20 \lg \sqrt{M} - 10$ , 故有

$$MRT_M = MRT_0 \times 10^{-(10 \lg \sqrt{M} - 0.5)}; \quad (7)$$

式中,  $MRT_0$  为斩光调制时的 MRT;  $MRT_M$  为  $M$  场累积后的 MRT。

由式(6)和式(7)可见,当累积的场数增加时,信噪比将明显提高,最小可分辨温差随之降低。

### 3. 消除信号静态工作点的温度漂移

由于调制盘叶片的影响,象差处理后本底电流并未完全消除。该信号十分灵敏地受环境温度 and 信号处理器中电路温度漂移的影响,它将对温度定标引入不可忽视的误差。在此利用图象相减原理,即在采集目标图象信号之前先建立一幅剩余本底图象,将此图象信号与目标图象信号相减,即可得到不受环境温度影响的“纯净”的被测目标信号,即

$$V_{g(x,y) \in s} = V_{s(x,y) \in s} - V_{p(x,y) \in s} \quad (8)$$

### 4. 温度响应率不均匀性修正

在 PEV 成像过程中存在着电子束的聚焦状况与所扫的靶面位置不同而各异的现象。通常靶面中心聚焦情况最好,愈接近靶面边缘沿聚焦情况愈差,这一现象不仅降低分辨率,而且使靶面的热响应率不均匀。

通过硬件实现粗补偿,可以使靶环在 1/2 直径内不均匀度降低到小于 5%。为实现精确定标,尚需通过软件进行逐点补偿,其步骤是:

#### (1) 求取逐点的修正因子

在一幅经过象差处理、多场累积等一系列处理的等温场数字图象上,用下列关系式可求出诸象元的修正因子。

$$k(x,y) = \bar{g}(i,j) / C(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in P} g(i,j) / C(x,y) \quad (9)$$

式中  $\bar{g}(i,j)$  是用局部平均法处理后的中心象元的量化值;  $P$  是点  $(i,j)$  邻域内的点集;  $M$  是点集  $P$  中的象元数,在此取  $M=9$ ;  $C(x,y)$  是等温场原图象的数字矩阵;  $k(x,y)$  是作为修正因子的数字矩阵。

#### (2) 温度响应率不均匀度修正

设原图象为  $V_g(x,y)$ ,修正因子的数字矩阵为  $k(x,y)$ ,则逐点修正后的图象为

$$V_{pk(x,y) \in s} = V_g(x,y) \times k(x,y) \quad (10)$$

### 5. 辐照度信号与温度值的换算

一般自然表面都可看成为朗伯面,对朗伯面其辐亮度可表示为

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_\lambda(T_g) + (1 - \varepsilon_\lambda) L_\lambda(T_b) \quad (11)$$

式中第一项是发射部分的辐亮度;第二项是反射部分的辐亮度;  $L_\lambda$  为自然表面光谱辐亮度;  $L_\lambda(T_g)$  为自身发射的光谱辐亮度;  $L_\lambda(T_b)$  为环境光谱辐亮度。

根据辐射度学基本原理,利用温差测量法可以实现对温度的定标与测量。所谓温差测

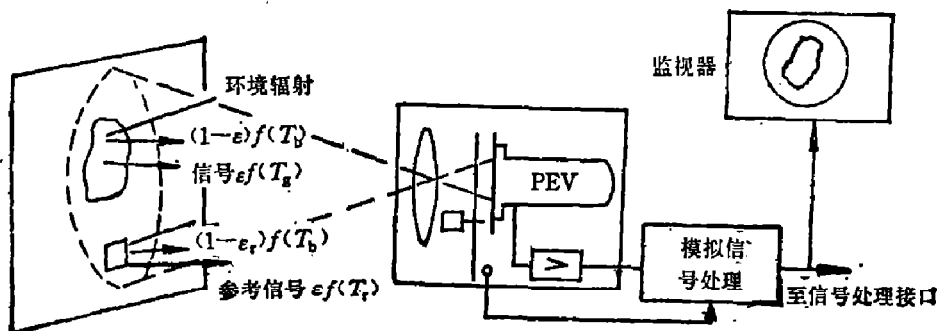


图1 温差测量法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature difference

量法,就是在某一频段内,热象仪的摄像机同时测出两个真实表面的总辐射率,其原理如图1所示。随扫描进程而输出的电压信号,代表被测目标总辐射率与参考目标总辐射率之差,可表示为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta V = [\varepsilon f(T_o) + (1 - \varepsilon)f(T_b)] - [\varepsilon_r f(T_r) + (1 + \varepsilon_r)f(T_b)], \quad (12)$$

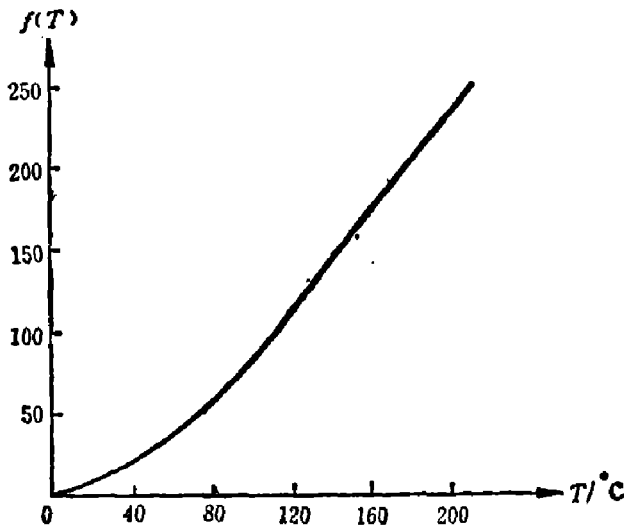


图2 0~200°C 温度实测定标曲线  
Fig. 2 0~200°C temperature calibration curve

式中  $\varepsilon$  和  $\varepsilon_r$  分别为被测目标表面和参考表面的发射率;  $T_o$ 、 $T_r$  和  $T_b$  分别为被测目标的表面温度、参考面温度和环境温度值;  $f(T_o)$ 、 $f(T_r)$  和  $f(T_b)$  分别为被测目标的自身、参考面和环境的温度响应信号。

式(12)所描述的是复杂的非线性函数关系,它既与系统特性有关,又与谱响应有关。这种函数关系通常用系统的定标曲线来表达(见图2)。

不难看出,适当选定工作条件和参数值,如将背景选作参考面,即  $T_r = T_b$ , 并令  $\varepsilon_r = 1$ , 则式(12)可简化为

$$\Delta V = \varepsilon [f(T_o) - f(T_b)],$$

或

$$f(T_o) = \frac{\Delta V}{\varepsilon} + f(T_b); \quad (13)$$

式中,  $\Delta V$  为热象测试仪的温差实测值。当已知被测物体发射率  $\varepsilon$  及环境温度  $T_b$  时,利用定标曲线,便可将采集到内存的象元值  $\Delta V(x, y)$  换算成相应的温度值,从而实现温度的定量测试。

## 6. 热损耗计算

PEV 热象测试仪将热象数据按上述步骤处理后,可得到较精确地反映物体表面温度的数字图象。它是用表面温度法进行热耗计算的基础。下面依次介绍热损耗计算步骤。

### (1) 目标分离

需要计算热耗的目标往往是处在背景之中,采用图象分割、光标取样或门限化处理技术,即可获得具有而且仅有热损耗贡献的全部信息。

### (2) 求等温区的面积百分比 $S_n(\%)$ 和平均温度 $T_{av}(\text{°C})$ ,

### (3) 计算表面热流的数学模型。

由工程传热学理论推知,发热体表面热流量损失主要是由对流和热辐射作用所引起。因此被测物体单位面积上的总热流损失可写为

$$Q = Q_{os} + Q_{rs} = \sum_{j=1}^N h_j (T_{oj} - T_b) + \sigma \varepsilon \sum_{j=1}^N (T_{oj}^4 - T_b^4); \quad (14)$$

式中,  $N$  为具有热耗贡献的象元总数;  $T_{oj}$  为物体表面元温度 (K);  $T_b$  为环境温度 (K);  $\varepsilon$  为物体表面发射率;  $\sigma$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数,  $h_j$  为表面元对流换热系数, 单位是  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 。

为便于计算机处理,式(14)可改写为

$$Q_L = \sum_{j=1}^N Q_j \Delta S = \frac{S}{N} \sum_{j=1}^N Q_j \quad (15)$$

式中,  $Q_j$  为第  $j$  个单位面元的热流损失量;  $\Delta S$  为每个象元的面积,  $\Delta S = S/N$ ;  $S$  为被测物体总面积( $m^2$ )。

为减少计算量, 现以等温区的平均温度求出该等温区的平均热损耗  $\bar{Q}_k$ ,

$$\bar{Q}_k = h_{avk}(T_{avk} - T_b) + \sigma \epsilon (T_{avk}^4 - T_b^4) \quad (16)$$

被测目标单位面积的平均热损耗为

$$\bar{Q} = \sum_{k=1}^{16} \bar{Q}_k S_k \quad (17)$$

总热损耗量为

$$Q_L = \bar{Q} S \quad (18)$$

用上述模型和计算方法, 在环境温度为  $15^\circ C$ , 风速趋近于零时, 对表面涂白漆、水平放置的金属圆筒(内装电发热体), 在热平衡状态下进行热损耗测量, 其结果与理论值的相对误差为  $-2.5\%$ 。

### 三、红外图象的处理

#### 1. 微机红外图象处理系统

实现红外数字图象处理的首要条件是把模拟信号转换成数字图象信号, 并输入到内存贮器或外存贮体。为了解决信号传输速率与微机采样速率的矛盾, 在此采用的是按列(纵向)采集技术<sup>[1]</sup>。经处理后的图象, 可用  $2 \sim 16$  级的灰级图符打印, 也可以返回视频存贮器经  $D/A$  变换后以黑白或伪彩色在屏幕上显示。该系统不仅能将图象分解成  $i \times j$  象元的数字化图象, 还设有窗口形成电路, 以便有选择地采集局部感兴趣的部分。当进行多场累积处理时, 能在每一列的位置上重复采  $M$  次。图 3 为 PEV 热象测试仪图象处理系统的框图。该系统可配置 TRS-80, Apple II 和 IBM-PC 等多种微机工作。

PEV 热象测试仪用人机对话方式进行图象采集窗口参数的设定、象元采集、图象存

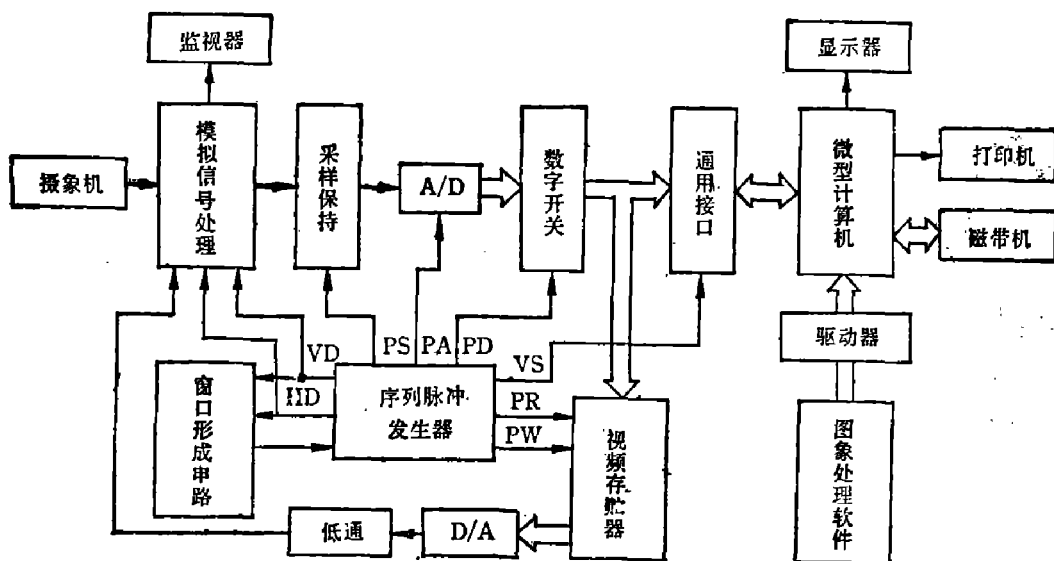


图 3 PEV 热象测试仪数据处理系统框图

Fig. 3 Block diagram of data processing system in PEV thermovision

不均勻度修正、溫度換算、圖象切割、灰級變換、熱耗計算以及圖象顯示和打印等一系列操作。

## 2. 軟件包的功能

包括：(1) 可將熱圖象轉換成 256 級灰度的  $i \times j$  數字矩陣，其中  $i, j$  均可從 0~128 之間任意設定；(2) 在採集象元的同時，進行多場累積、象差處理、背景清除等多項處理；(3) 求取補償因子，並逐點進行不均勻度補償；(4) 對象元進行溫度變換；(5) 可用 2~16 種圖符打印輸出溫度場分布圖，並標定出最大值、最小值及其溫度範圍；(6) 設置溫度窗口，把目標上感興趣的溫度範圍選出，而後進行細分，從而實現溫級擴展；(7) 圖象存貯、調入和顯示；(8) 圖幅的切割；(9) 計算並打印溫度直方圖；(10) 計算目標因輻射和對流產生的熱耗；(11) 以黑白或 12 級偽彩色在顯示器上顯示圖象。

除上述功能外，軟件包還配有一組輔助功能的處理軟件，如中值濾波、等溫區邊緣增強，直方圖均衡等。

## 四、熱損耗計算的應用實例

圖 4 為天津某拔絲廠加熱爐爐壁取樣區的溫度圖象。爐壁表面為塗有灰色油漆的鐵板，壁內敷設有珍珠岩等保溫材料。取樣面積為  $520 \times 580 \text{ mm}^2$ ，環境溫度為  $T_0 = 26^\circ\text{C}$ ，風速接近於零。該圖真實地反應了物體表面的溫度分布。可由圖直接讀出被测目標最高溫度為  $67^\circ\text{C}$ ，最低溫度是  $34^\circ\text{C}$ ，根據圖符和溫級門限值可直接由圖讀出其各象元處的溫度值。

圖 5 為溫度場的 12 級偽彩色圖象(黑白複印件)。

圖 6 為圖 4 所示的熱象溫度直方圖。圖中象元總數  $N$  為 6249 個，最高溫度為  $67^\circ\text{C}$ ，最低溫度為  $34^\circ\text{C}$ 。在此溫度範圍內共分 16 個等溫區，在熱耗計算中，以等溫區平均溫度作為其表面溫度。

表 1 是爐壁取樣區熱損耗計算的結果。表中  $L$  表示溫級序號； $S$  表示各溫級所含象元占總象元的百分比； $T$  表示各溫級的平均溫度； $Q$  表示各溫級每小時單位面積上的熱耗， $W$  為各溫級每小時的熱損耗。

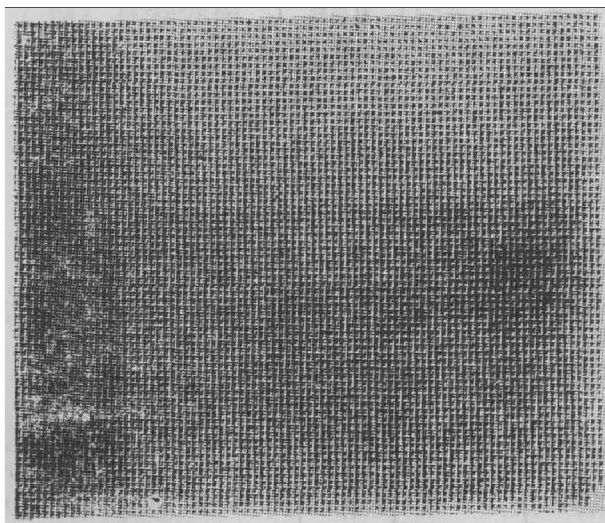


圖 4 爐壁取樣區溫度場

Fig. 4 The temperature profile in the furnace wall sampling area

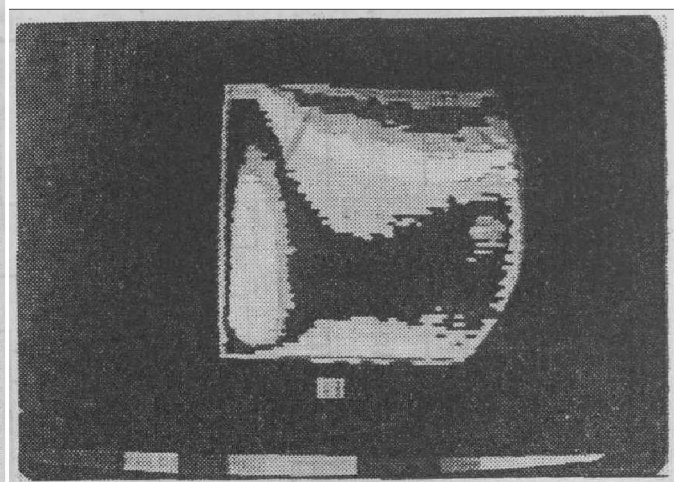


圖 5 偽彩色表示的爐壁溫度場

Fig. 5 Pseudo-color diagram of furnace wall temperature profile (in black and white)

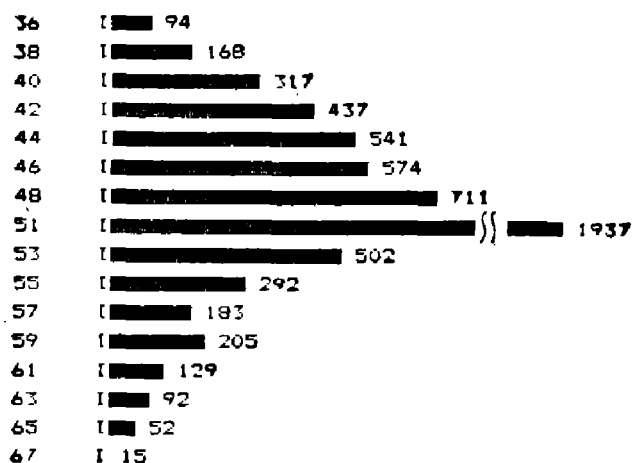


图 6 温度直方图

Fig. 6 Temperature histogram

表 1 炉壁取样区热损耗计算的结果

Table 1 The thermal loss computation of the sampling area of furnace well

| $L$ | $S(\%)$ | $T(^{\circ}C)$ | $Q(\text{kcal/h}\cdot\text{m}^2)$ | $W(\text{kcal/h})$ |
|-----|---------|----------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1   | 1.5     | 35.0           | 79.13                             | 1.190              |
| 2   | 2.7     | 37.0           | 99.00                             | 2.662              |
| 3   | 5.1     | 39.0           | 119.47                            | 6.060              |
| 4   | 7.0     | 41.0           | 140.48                            | 9.824              |
| 5   | 8.7     | 43.0           | 162.02                            | 14.027             |
| 6   | 9.2     | 45.0           | 184.07                            | 16.907             |
| 7   | 11.4    | 47.0           | 206.60                            | 23.506             |
| 8   | 31.0    | 50.0           | 241.27                            | 74.787             |
| 9   | 8.0     | 52.0           | 264.96                            | 21.285             |
| 10  | 4.7     | 54.0           | 289.10                            | 13.509             |
| 11  | 2.9     | 56.0           | 313.68                            | 9.186              |
| 12  | 3.3     | 58.0           | 338.70                            | 11.111             |
| 13  | 2.1     | 60.0           | 364.15                            | 7.517              |
| 14  | 1.5     | 62.0           | 390.03                            | 5.742              |
| 15  | 0.8     | 64.0           | 416.34                            | 3.465              |
| 16  | 0.2     | 66.0           | 443.07                            | 1.064              |

$T_0=299\text{ K}; E=0.93; H=0.52\text{ m}; S=0.3\text{ m}^2; V_0=0\text{ m/s}$

## 五、结 束 语

本文所提出的 PEV 热象测试仪的数据处理方法、红外图象处理系统及软件包，成功地解决了 PEV 热成象系统的定量测温及热损耗计算问题。经现场多次实验和试用，证明本系统完全适合工程应用的技术要求。

## 参 考 文 献

- [1] 王筠、王凡, 华中工学院学报, (1985), 4:111.
- [2] 黄铁侠, 红外研究, 2(1983), 2:103.
- [3] Burrel Don., *Electronique Industrielle*, (1983), No. 46.

- [4] Kar lekar B. V. and Demond R. M. , *Engineering Heat Transfer, st. Paul, west*, (1977)
- [5] Gonzalez R. C. and Wintz P., *Digital Image Processing, Addison-Wesley Reading, Massachusetts*, (1977).
- [6] Josph D. Greenfield, *Practical Digital Design using IC's*, John wiley & sons, 1977.
- [7] Data-Acquisition Databook 1982, Volume I: *Integrated Circuits. Analog Devices Inc.*, 1982.
- [8] K. 斯达尔、G. 缪斯卡, 红外技术, 石定河等译, 华中工学院出版社, 1982 年.
- [9] 郁启华、王鸿禧等, 管道保温技术文集, 中国科学院燕山石化总公司、热网管道保温技术改造攻关协作组编, 能源出版社, 1984, 147~152.

## THE METHOD AND SYSTEM OF DATA PROCESSING IN PEV THERMOVISION

WANG JUN, WANG FAN

*(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology)*

### ABSTRACT

The principles and methods of data processing for the digitized infrared image are presented with respect to the pyroelectric vidicon (PEV) imaging systems. The infrared image data processing system and the software parcel are designed. An example of measuring and processing of infrared image is given.