

# 高灵敏度热释电摄像管红外电视系统\*

张建军 黄铁侠

(华中理工大学电子与信息系, 湖北, 武汉, 430074)

**摘要:** 针对热释电摄像管 (PEV) 在传统的对称斩波模式下存在的各种问题, 设计了一种新的非对称斩波模式 PEV 红外电视系统. 通过提高 PEV 摄像机的温度响应率  $R_i$  和采用高去噪声信号处理系统, 大大改善了 PEV 红外成像系统的性能.

**关键词:** 红外成像, 斩波模式, 信号处理.

## 1 PEV 红外电视非对称斩波模式理论

热释电摄像管 (PEV) 获取连续信号电流的工作方法有三种: 瞬变模式、平移模式、斩波模式, 而斩波模式根据亮场与暗场在单位时间内场数是否相等可进一步分为对称和非对称斩波两种.

以往的 PEV 红外电视系统均采用对称斩波模式, 即斩波时亮场与暗场相间, 这种 PEV 输出信号电流很低 (典型值: 温差为  $1^\circ\text{C}$  时, 信号电流为  $1\text{nA}$ ). 将非对称斩波模式<sup>[1]</sup>用于 PEV 红外成像系统中, PEV 输出电流可比对称模式大 3~4 倍 (典型值: 温差为  $1^\circ\text{C}$  时, 信号电流为  $3.4\text{nA}$ ). 这样, 由于工作于非对称斩波模式的热电换能器件输出信号电流的增加, 有利于提高整个热成像系统的性能.

图 1 和图 2 是 PEV 摄像机对称斩波和非对称斩波模式的装置及靶面照度波形图.

PEV 对称斩波调制, 目标 (冷—热条) 辐射在靶面上图形, 在  $y$  方向上照度是按正弦规律分布, 靶面照度  $H$  为

$$H(y; t) = H_0 + H_m \cdot \sin 2\pi n y \cdot \exp \left[ j \left( \omega_c t + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (1)$$

式中,  $n$  为空间频率,  $\omega_c = 2\pi f_c$  为斩波角频率,  $\exp \left[ j \left( \omega_c t + \frac{\pi}{2} \right) \right]$  为斩波函数,  $H_0$  为照度的恒定分量.

设 PEV 的滞后系数为  $L$ , 热扩散系数为  $K$ . 则 PEV 对称斩波模式信号输出电流  $I_s$  的表达式为

本文 1991 年 7 月 31 日收到.

\* 机械电子工业部技术发展基金资助项目.

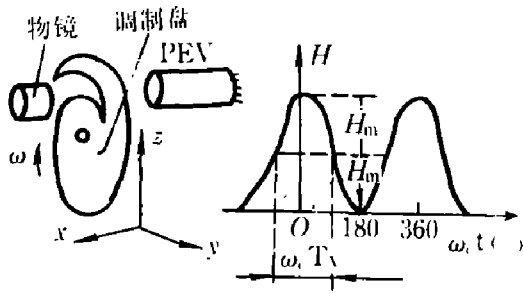


图1 PEV 对称斩波模式装置及辐照波形图  
Fig. 1 Schematic diagram for symmetrically chopped mode operation of a PEV and the irradiance waveform

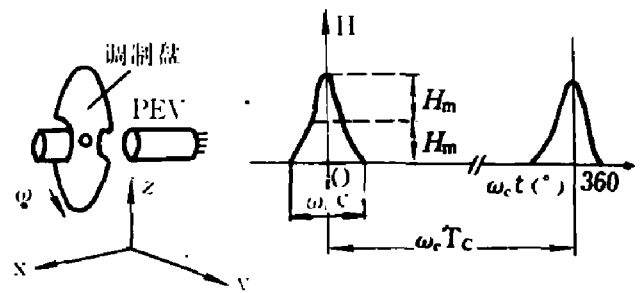


图2 PEV 非对称斩波模式装置及辐照波形图  
Fig. 2 Schematic diagram for asymmetrically chopped mode operation of a PEV and the irradiance waveform

$$I_s = I_{s0} \sin 2\pi n y \cdot (1 + \beta^2)^{-1/2} S_a \left( \frac{\omega_c T_v}{2} \right) (1 - L) (1 + L^2 - 2\cos \omega_c T_v)^{-1/2} \cdot \exp \left[ j \left( \omega_c t - \varphi - \theta - \frac{\omega_c T_v}{2} + \pi \right) \right], \quad (2)$$

式中,  $I_{s0}$  为理论上信号电流能达到的最大值,  $\beta = \frac{k(2\pi n)^2}{\omega_0}$ ,  $\varphi = \arctg \frac{1}{\beta}$ ,

$$\theta = \arcsin \frac{[L \sin(\omega_c T_v)]}{(1 + L^2 - 2L \cos \omega_c T_v)^{1/2}}.$$

对于 PEV 非对称斩波模式, 利用傅里叶级数, 其靶面照度  $H$  在  $y$  方向的分布规律为:

$$H(y, t) = H_0 + \sin 2\pi n y \cdot \sum_{N=1}^{T_c/\tau} H_N \cdot \exp \left[ j \left( \omega_c N t + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (3)$$

靶面照度中第  $N$  次谐波分量产生的输出电流为

$$I_{SN} = I_{sa} \frac{2 \sin N \pi \frac{2T_v}{T_c}}{N \pi \left[ 1 - \left( \frac{2T_v}{T_c} \right)^2 N^2 \right]} \left[ 1 + \left( \frac{K \cdot 2\pi n^2}{N \frac{1}{T_c}} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \frac{\sin \pi N \frac{T_v}{T_c}}{\pi N \frac{T_v}{T_c}} (1 - L) \left( 1 + L^2 - 2L \cos 2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right)^{-1/2} \cdot \exp \left\{ j N \frac{2\pi}{T_c} t - \arctg \frac{N \frac{1}{T_c}}{K \cdot 2\pi n^2} - \arcsin \left[ L \sin \left( 2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right) \left( 1 + L^2 - 2L \cos 2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right)^{-1/2} \right] - \frac{\pi N T_v}{T_c} + \pi \right\}. \quad (4)$$

因此, PEV 非对称斩波输出总电流为

$$I_s(n) = \sum_{N=1}^{T_c/\tau} I_{SN}(n), \quad (5)$$

式中,  $n$  为空间频率.

当空间频率  $n$  取不同的值时, 读出相角  $\omega_c t$  与信号电流  $I_s$  的关系曲线如图 3 所示.

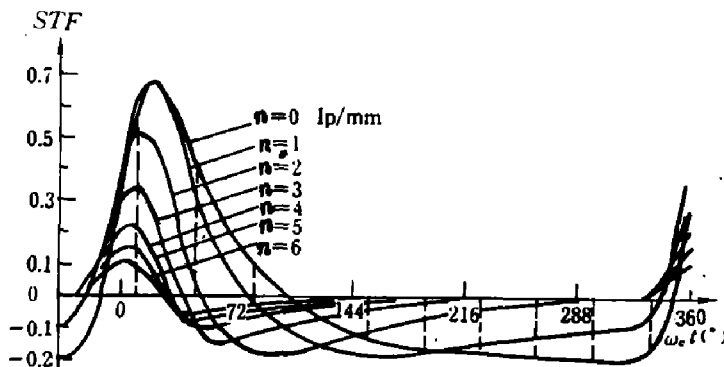


图 3 不同空间频率时, 非对称斩波模式信号传递函数与读出相角的关系

Fig. 3 Signal transfer function in the asymmetrically chopped mode vs reading phase angle for various spatial frequency

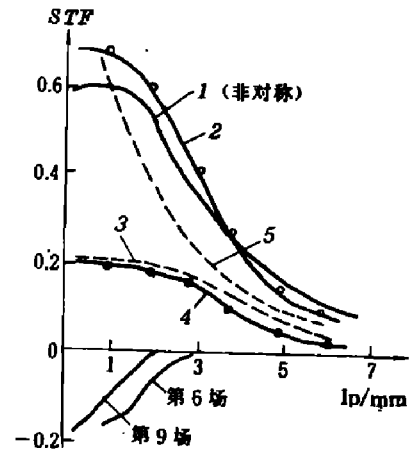


图 4 非对称斩波模式信号传递函数与空间频率的关系

Fig. 4 Signal transfer function in the asymmetrically chopped mode vs spatial frequency

为了比较 PEV 摄像管各种工作方式下输出电流的大小, 将平移方式、非对称、对称斩波方式下信号传递函数 (STF) 列在同一坐标图中 (见图 4). STF 定义为

$$STF = \text{Re}(I_s / I_{sa}).$$

由图 4 可知, PEV 工作于非对称斩波模式, 在低空间频率  $n < 1$  时, 输出电流接近平移模式, 优于对称斩波模式约 3 倍. 在高空间频率  $n > 1$  时, 非对称模式稍高于平移模式. 另外, 由于非对称斩波模式靶面照度  $H(y, t)$  的平均分量  $H_0$  比对称斩波模式要小得多, 故使得快速运动目标出现时, 负向残象影响小得多. 非对称斩波模式与对称斩波模式相比, 另一个优点是它的信号电流幅度可以比管子本底电流大 4 倍, 这对提高系统的信噪比很有利.

总之, 采用非对称斩波模式的 PEV 摄像管与通常斩波模式的摄像管相比较, 具有电流响应率高, 负向残象小及动态范围宽等优点, 为改善 PEV 红外成像系统的性能奠定了基础.

## 2 PEV 非对称斩波红外电视系统的研究

### 2.1 设计考虑

利用 PEV 成像的红外电视系统可分为两大部份, 即 PEV 摄像管和信号处理器. 为了改善 PEV 红外热成像系统的灵敏度和温度定标精度, 除了 PEV 摄像管采用非对称斩波调制外, 还得设计与之相匹配的信号处理电路, 以便较好地解决 PEV 靶面本底电流不均匀和提高系统的信噪比等问题.

由于非对称斩波模式的工作特点, 其信号处理电路与对称斩波不同, 这主要表现在如下两个方面: (1) 由于它的斩波频率很低 (例如: 斩波频率为 5Hz, 或 10Hz), 要直接将

这样低的 PEV 输出送至显示器将会产生闪烁. 因此, 为了获得连续而不闪烁的热象, 在信号处理器部分必须使用帧存贮体, 并且帧存贮体的读出速率应高于人眼的临界闪烁频率. (2) PEV 非对称斩波模式暗场信号传递函数性能低劣 (见图 3), 故对称斩波方式为消除 PEV 本底电流不均匀性所采用的象差处理技术不适合于非对称斩波方式<sup>[2]</sup>.

### 2.2 系统框图及工作原理

图 5 为 PEV 非对称斩波红外电视系统的简化框图, 该系统各部分工作原理简述如下:

#### (1) 非对称斩波模式的摄像机

它由热释电摄像管、预放大器、扫描电路、高低压电路、电机伺服电路、非对称斩波调制盘等部分组成. 当电子束按电视扫描速率扫描 PEV 电靶时, 目标的辐照信号即转换为红外图象电信号. 非对称斩波盘的形状如图 6 所示, 斩波频率  $f_c$  可取 5 Hz 或 10 Hz.

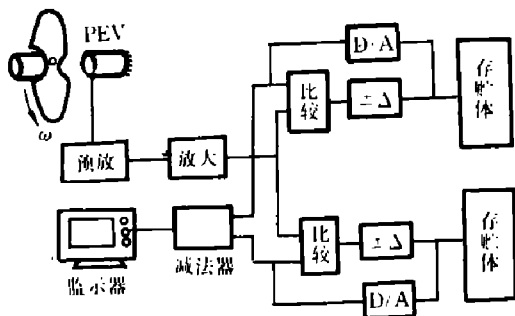


图 5 PEV 非对称斩波模式红外电视系统简化方框图  
Fig. 5 Block diagram of the simplified PEV infrared TV system in the asymmetrically chopped mode



图 6 非对称斩波盘形状  
Fig. 6 The shape of the chopper used in the asymmetrical mode

#### (2) 图象信号处理器

它由两个参数完全相同的时间滤波器 (数字式相关滤波器), 本底补偿减法器及时序信号发生器三部分组成.

##### (a) 数字式时间滤波器

它是整个系统利用数字处理技术和统计信号理论来提高信噪比的关键. 采用时间滤波器作为图象信号处理的系统, 其特点之一是: 对于静止或慢速运动的热图象, 可大大改善预放输出的热图象信号的信噪比. 这在理论上和实验上都得到了证明. 按文献[3]的结论有:

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = 4\sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{V_{in}}{\Delta_{min}}}$$

式中,  $V_{in}$  为时间滤波器输入端的噪声,  $V_{out}$  为时间滤波器输出噪声,  $\Delta_{min}$  为时间滤波器的最小增量. 该时间滤波器实测的信噪比曲线如图 7 所示. 当时间滤波器输入端信噪比  $S_i/N_i$  较低时, 输出端可获得很好的去噪声效果. 随着输入端  $S_i/N_i$  的提高, 时间滤波器的去噪声效果受到 D/A 转换精度以及滤波器电路自身固有噪声的限制, 而趋向一个定值.

特点之二是在进行数字图象处理的过程中, 信号处理系统不必使用高速 A/D 转换器, 便可获得对图象的数字化. 这样就大大降低了电路的成本.

##### (b) 本底电流补偿减法器

采用 PEV 作为热成象摄像管的红外电视系统, 虽然具有室温工作、电子扫描等优点, 但不足的是本底信号电流大小随靶面位置不同而起伏. 这种电流的起伏约占平顶部分的 25%, 称为本底信号电流的不均匀性. 它既影响成象的质量又影响温度定标的精度. 为此本系统采用了不同于对称斩波方式的补偿方法. 它利用二个时间滤波器, 分别存放斩波周期中第二个暗场 (调制盘对靶面遮光) 所得的信号和斩波周期中的亮场 (调制盘窗口打开) 所得的信号. 然后对上述两个信号进行相减, 便可对 PEV 非对称斩波方式下本底电流不均匀性进行补偿. 经实验证明: 这样的补偿方法不仅较好地解决 PEV 的本底电流不均匀问题, 而且靶面的疵点对图象质量的影响也得到改善.

(c) 时序信号发生器

用它产生图象处理系统工作时所需的各种时序控制信号及存贮体寻址所需的地址码.

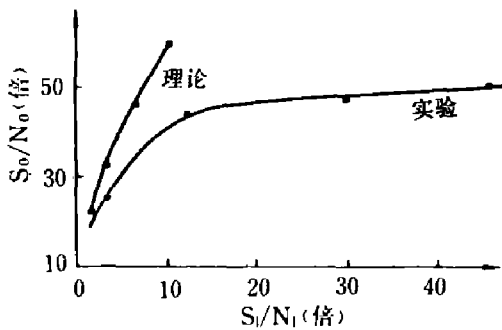


图 7 时间滤波器  $S_i/N_i$  与  $S_o/N_o$  的关系  
Fig. 7 Relationship between the input and output signal-to-noise ratios of the temporal filter

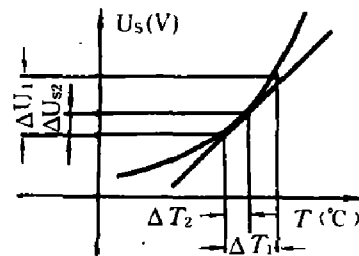


图 8 定标曲线及线性化  
Fig. 8 Curve of the calibration of a PEV infrared TV system and its linearization

### 3 系统性能测试

系统测试装置由红外热辐射源 (面源黑体), 冷热条测试卡、标准温度计及红外电视系统等组成. 测试结果如下:

#### 3.1 最小可分辨温差(MRTD)

设冷热条温度差为  $\Delta T$ , 摄像机光圈数为  $F$ , 减少冷热条之间的温度差  $\Delta T$  直至监视器上冷热条热象刚好为人眼所识别为止. 此时有:  $MRTD = \Delta T/F^2$ ; 当室温为  $28^\circ\text{C}$ 、光圈数  $F=4$ , 平均温差约  $1.5^\circ\text{C}$  时, 监视器上的冷热条热象刚好可分辨. 故有  $MRTD = 0.1^\circ\text{C}$ .

#### 3.2 噪声等效温差(NETD)

热成象系统的  $NETD$  是指冷热条测试卡在某一个空间频率上, 系统的输出信噪比  $U_s/U_N = 1$  时, 冷热条之间的温差值. 考虑到温度计的测量精度等其它因素, 为了实现  $NETD$  进行较为准确的测量, 我们设计了以下测试步骤. 首先, 在较小的温差  $\Delta T$  内, 红外电视系统的定标曲线  $U_s(T)$  可视为线性的. 如图 8 所示, 在  $\Delta T_1$  范围内若  $\Delta T_1$  减少  $k$  倍, 则信号电压  $\Delta U_1$  也相应降低  $k$  倍. 即有:  $\Delta U_{s1}/\Delta U_{s2} = \Delta T_1/\Delta T_2$ . 因此, 测试装置测试步骤为:

- (1) 当物镜盖上后信号  $\Delta U_s = 0$  时, 用宽带示波器测出系统输出的噪声峰值  $U_{NPP} =$

60mV.

(2) 逐步加大冷热条之间的温差  $\Delta T_1$ , 使输出信号  $U_{S0} = 600 \text{ mV}$  为止. 并且  $\Delta T_1$  不宜大于  $5^\circ\text{C}$ , 以保证折线化的条件.

(3) 由于曲线  $U(T)$  满足线性条件, 可以认为若  $\Delta T_1$  减少 10 倍, 那么信号也下降 10 倍. 而系统噪声基本不随  $\Delta T_1$  变化. 此时刚好有  $U_{S0}/\Delta U_{NPP} = 1$ .

(4) 考虑噪声测量的峰值  $U_{NPP}$  与有效值  $U_N$  之间的关系:  $U_{NPP} = (4\sim 6)U_N$ , 便可换算出实际的  $NETD$ .

实测结果: 光圈数  $F = 2$ , 当平均温差约为  $4.5^\circ\text{C}$  时, 输出信号  $U_{S0} = 600 \text{ mV}$ . 故有  $NETD = 0.12^\circ\text{C}$ , 这里取  $U_{NPP} = 4U_N$ .

综上所述, 我们可以得出结论: 本文设计的 PEV 非对称斩波红外电视系统, 即摄像机采用非对称斩波模式, 图象信号处理器采用时间滤波器去噪声, 并对本底电流有较好的补偿能力的系统. 理论计算和实验结果都说明其性能较对称斩波红外电视系统有明显的改善. 例如: 最小可分辨率温差  $MRTD$  由原来的  $0.3^\circ\text{C}$  左右降低至  $0.094^\circ\text{C}$ . 同时, 非对称斩波摄像机输出信号较对称斩波增加约 3~4 倍<sup>[1]</sup>, 以及时间滤波器的去噪声处理, 这些对于提高系统的温度定标精度极为有利. 而且整个系统不使用价格昂贵的高速 A/D 就可将信号数字化. 从而降低了成本.

## 参考文献

- 1 黄铁侠. 红外研究, 1988, 7(2): 113-120
- 2 Helmick Jr. C N, Wood Worth W H. *Ferroelectrics*, 1976, 11(1): 309-313
- 3 Harro Bruggemann. *SMPTE*, 1981, 90(8): 686-694
- 4 Garn L E, Petito F C. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1977, 24(10): 1221

## A HIGH-SENSIBILITY PEV INFRARED TV SYSTEM\*

Zhang Jianjun, Huang Tiexia

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** A new type PEV infrared TV system in an asymmetrically chopped mode operation is designed in order to solve the problems in the standard chopped mode operation. By increasing the temperature responsivity  $R_i$  and adopting a high signal-to-noise ratio processor, the performances of the PEV infrared imaging system have been improved greatly.

**Key words:** infrared imaging, mode of chopping, signal processing.

\*The project supported by the Technical Development Fund of the Ministry of Machinery and Electronics Industry.