

米,组成平板型综合成象透镜。

经测试,该综合成象透镜的主要参数为:物距、象距相等,约为3毫米;分辨率达到25线/毫米视场角为40°(图6,见封二图8)。

## 六、讨 论

1. 综合成象的平板型复眼透镜具有以下特点:它的物距、象距短,体积小,因而在相同照明条件下,可以获得比普通透镜更高的象面照度;被观察图象的幅面大小不受视场限制,因为它可以通过增加柱状变折射率元件的数量、扩大列阵的大小来实现;综合成象透镜的中心区域与边缘区域的分辨率及亮度均匀。根据这些特点,它可望用于超小型复印机中,也可以用在与阴极射线管结合的光学印刷中,以及用于光学信息处理中。

2. 平板型综合成象透镜只是对萤火虫复眼综合成象原理的初步模拟,更进一步的模拟将考虑采用锥状变折射率元件,组成扇形球面综合成象透镜,以探索设计相对孔径大、超广角透镜系统的新途径。

3. 在柱状变折射率元件中,光线轨迹的周期 $L$ 可以表示为:

$$L = \sqrt{2} \pi R \sqrt{N_0 / \Delta N} \quad (12)$$

因而有:

$$\frac{dL}{L} = \frac{dR}{R} + \frac{1}{2} \frac{dN_0}{N_0} - \frac{1}{2} \frac{d\Delta N}{\Delta N} \quad (13)$$

要做到前面讲的“光学性能均匀”,每个变折射率元件的光线轨迹周期就必须一致;而要做到光线轨迹周期一致,从等式(13)可知,应从 $R$ 、 $N_0$ 、 $\Delta N$ 三方面着手解决,即应做到纤维直径变差小,玻璃材料均匀以及离子交换条件恒定。另外,为了减小柱状变折射率元件的色差,可以采用一种含有铯的玻璃材料。

## 参 考 文 献

- [1] Exner, S.: Die Physiologie der facettierten Augen von Krebsen und Insekten, 1891.
- [2] Exner, K.: *Ann. Phys. Chem.*, **29**, 484, 1886.
- [3] Klaus Hausen: *Nature*, **231**, 393, 1971.
- [4] Klaus Hausen: *J. Comp. Physiol.*, **82**, 365, 1973.
- [5] Horridge, G. A.: *Proc. Roy. Soc.*, B, **181**, 151, 1972.
- [6] Uchida, T. et al.: *J. Quantum. Electronics*, **5**(25), 1969.
- [7] Horridge, G. A.: *The Compound Eye and Vision of Insects*, 1975.
- [8] 中国科学院生物物理研究所昆虫复眼光学信息加工组:北京萤火虫复眼晶体柱的光学特性,见本刊本期。
- [9] Felix P. Kapron: *J. O. S. A.*, **60**, 1433, 1970.

[本文于1978年12月8日收到]

# 提高微光电视图像清晰度的鲎眼侧抑制电子模型

中国科学院生物物理研究所五室三组

鲎眼对图像的侧抑制加工原理,给微光图像的信息处理以有益的启示。根据简化的侧抑制方程设计的电子模型,突出了微光电视图像的主要信息,抑制了噪声干扰,提高了图像的清晰度。

## 一、鲎眼侧抑制原理和微光图像的信息处理

哈特兰(H. K. Hartline)及其助手,经过

多年的研究,揭示了鲎(Limulus)眼小眼间横向联系的侧抑制(Lateral inhibition)作用,并导出了反映其定量关系的侧抑制方程<sup>[1]</sup>。鲎活动于浅海底层,它通过小眼间的侧抑制神经网络,增强图像的轮廓、提高反差,从噪声中提取基本的视觉信息。众所周知,轮廓带有图像的基本信息,增强轮廓就能更可靠地从噪声中把图像信息的大部分分离出来<sup>[2]</sup>。特别对于微光图像,由于缺乏足够的信息提供细节,因此,轮廓就是

微光图像最基本最重要的信息<sup>[3]</sup>。利用鲨鱼对模糊图像的侧抑制加工原理,可以提高低信噪比、低反差的微光图像的清晰度。

## 二、简化的侧抑制方程及其物理意义

电生理实验表明,鲨鱼复眼的某个小眼受光照射,它的输出是本身的兴奋与所有周围小眼抑制作用的总和。而且抑制作用取决于输出量。因此,哈特兰方程是一个复杂的循环方程。只有对它进行必要而合理的简化,才有可能设计实用的鲨鱼眼电子模型。

我们根据哈特兰方程中,“抑制系数”随小眼之间的距离增加而减小,而“抑制阈”随小眼之间的距离增加而增加,即抑制作用随小眼之间的距离增加而减弱的特点,提出了简化的侧抑制方程。下面就对简化方程的一维形式及其物理意义进行一些讨论。

设侧抑制网络具有几个输入端和几个输出端。输入和输出端之间存在单向联系。如果第  $j$  个输入端到第  $p$  个输出端之间的传递系数为  $k_{pj}$ ,那么当第  $j$  个输入端的图像信号为  $e_j$  时,第  $p$  个输出端的图像信号为

$$r_p = \sum_{j=1}^n k_{pj} e_j \quad (1)$$

$j = 1, 2, \dots, n$

这里,侧抑制作用表现在

$$k_{pp} > 0, \text{ 而 } k_{pj} < 0 \quad p \neq j$$

如果把输入信号  $e$  和输出信号  $r$  用相应的列向量  $E$  和  $R$  表示,那么方程可写成如下矩阵形式:

$$R = KE \quad (2)$$

其中,  $K$  为由传递系数  $k_{pj}$  组成的方阵:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$$

令:  $k_{pp} = k_0 + 1, k_{pp \pm 1} = -\frac{1}{2} k_0$

这里,  $p = 1, 2, \dots, n$

$$k_0 > 0$$

$$k_{pj} = 0$$

这里,  $j \neq p$  同时  $j \neq p \pm 1$

这样,方阵就变成一种较简单的形式:

$$K = \begin{bmatrix} k_0 + 1 & -\frac{k_0}{2} & 0 & \dots & 0 \\ -\frac{k_0}{2} & k_0 + 1 & -\frac{k_0}{2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_0 + 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

这就是一维形式的侧抑制方程系数方阵的表达式。方阵说明,抑制作用仅限于最邻近的输入和输出端之间,而且抑制系数为常数。

根据上述简化方程设计的侧抑制电子模型,便于调节抑制系数和有效地抑制噪声,并可以提高加工后图像的保真度。

下面就对方程的物理意义,进行简单讨论。

设输入图像为  $e_j, j = 1, 2, \dots, n$

(1) 当  $e_j = e_{j \pm 1}$  时,根据方阵  $K$  (3)

$$r_j = k_{j1} e_1 + k_{j2} e_2 + \dots + k_{jj-1} e_{j-1} + k_{jj} e_j + k_{jj+1} e_{j+1} + \dots + k_{jn} e_n = e_j$$

(2) 当  $e_j \neq e_{j \pm 1}$

或  $e_j \neq e_{j-1}$  时

设  $e_j = e_{j+1}, e_j > e_{j+1}, e_{j-1} = e_{j-2}$

那么,经侧抑制网络加工后

$$r_j = \left(1 + \frac{1}{2} k_0\right) e_j - \frac{1}{2} k_0 e_{j-1}$$

$$r_{j-1} = \left(1 + \frac{1}{2} k_0\right) e_{j-1} - \frac{1}{2} k_0 e_j$$

如果定义  $j$  和  $j-1$  两点输入图像的反差为

$$c_{in}(j, j-1) = \frac{e_j - e_{j-1}}{e_j + e_{j-1}} \quad (4)$$

那么输出图像的反差

$$c_{out}(j, j-1) = \frac{r_j - r_{j-1}}{r_j + r_{j-1}} = (k_0 + 1) c_{in}(j, j-1) \quad (5)$$

显然,  $c_{out}(j, j-1) > c_{in}(j, j-1)$

可见经侧抑制网络加工后,图像轮廓增强,反差提高;轮廓外的区域,保持不变。既突出了

图像的主要信息，又保证了图像失真较小。此外，改变  $K_0$  可以方便地调节图像轮廓反差，以适应不同性质的图像和不同的要求。

简化的侧抑制方程的一维形式所描述的侧抑制网络及其功能，可用示意图 1 表示。

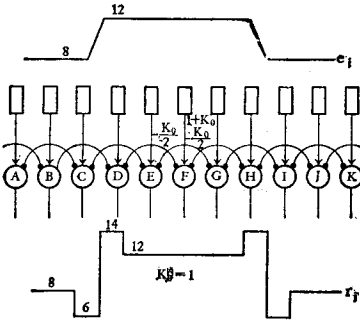


图 1 侧抑制网络结构功能示意图

图中，箭头表示兴奋性联系(正值)，圆点表示抑制性联系(负值)。

简化的侧抑制网络由感受器、抑制性侧向神经交叉和神经节细胞组成。

输入图像为圆形光斑(扫描波形为方波)  $e_{i0}$ 。每个神经节细胞除了接收本身感受器的兴奋信号外，由于存在侧向抑制联系，还受到两侧感受器的抑制性信号作用。在光斑的中心区和周围区，由于光照均匀，相应的神经节细胞受到恒定的兴奋和抑制作用，因此输出平坦。然而光斑的边缘区，情况就不同了：靠近亮区(中心)一侧的神经节细胞  $D, H$ ，由于受到较弱的抑制，输出最大；靠近暗区一侧的神经节细胞  $c$  和  $I$ ，受到较强的抑制，输出最小。结果，光

斑边缘处亮的一侧更亮，暗的一侧更暗。整个输出光斑  $r_{ij}$ ，变得轮廓鲜明，反差提高。

### 三、苍蝇侧抑制电子模型

根据侧抑制数学模型<sup>[1]</sup>，简化的侧抑制网络具有类似于复眼的六角形结构(图 2)。被抑制点  $e_{pi}$  位于最邻近的六个抑制点的中心。六点成六角形对称排列。

在微光电视侧抑制电子模型中， $e_{pi}$  的下角码  $p$  相当于电视扫描行的行序号， $i$  为像素序号。因此，如果以  $e_{pi}$  点为电子模型的时间参考点 ( $t = 0$ )，则电子模型如图 3 所示。

电子模型中， $\Delta T$  表示两个连续电视扫描行的时间差， $\Delta t$  为同行两相邻像素间的时间差。 $\Delta T$  和  $\Delta t$  前边的“+”(正)“-”(负)号，表示以  $e_{pi}$  为时间参考点时，各像素间的时间相互关系。箭头表示兴奋性联系(正)，圆点表示抑制性联系(负)。

电子模型包括由超声延迟线组成的  $\Delta T$  延迟(行延迟)单元(由调制、解调、视频放大等电路组成)，由视频延迟线组成的  $\Delta t$  像素时间延迟电路和七点组合电路等。此外，为了降低图像的附加高频噪声，电子模型中还特别设计了压缩行间四个抑制信号带宽的低通滤波器和“噪声抑制电路”。

### 四、关于经苍蝇侧抑制电子模型加工后图像的信噪比问题

经侧抑制电子模型加工后，图像的信噪比问题，是一个有待进一步研究的理论和实际问题。

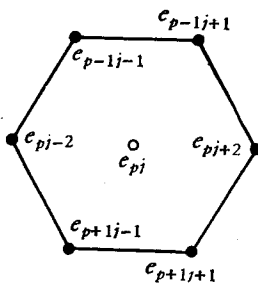


图 2 七点网络的六角形结构

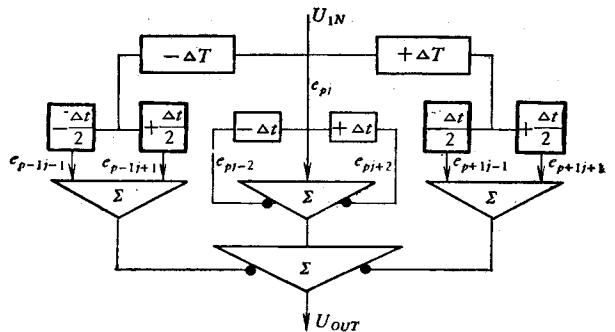


图 3 苍蝇侧抑制电子模型

题。

微光电视图像的显著特点是信噪比低、反差小,图像模糊。在使用 SEC 低照度摄像管的微光电视中,图像中的噪声主要来自视频前置放大器,主要是高频噪声。微光下景物引起的光子统计涨落和夜天光漫反射引起的对比度效应,都影响了图像的反差和清晰度。

利用鲨鱼侧抑制原理提高微光电视图像的清晰度,关键是要有效抑制图像处理后的噪声。我们研制的鲨鱼侧抑制电子模型,从电路结构到电路参数都有利于提高处理后图像的信噪比。

电视图像的近傍相关非常大。一般情况,相邻扫描行间的相关系数超过 80%,景物多的画面相关系数高达 90%;而混入图像中的高频噪声,在垂直方向是不相关的<sup>[4]</sup>。在同一行中,相邻像素之间的相关性,也比附加的高频噪声大得多。

为了提高鲨鱼侧抑制电子模型的高频噪声抑制能力,就要根据微光图像的特点,充分利用图像和高频噪声的相关性。前边已提到,微光图像高频细节较少,轮廓过渡时间较长,图像模糊。为了提高微光图像的清晰度,就必须加大鲨鱼电子模型中相邻像素的间距,对同行的相邻像素而言,就是要增加延迟时间  $\Delta t$ 。这样,就能使电子模型的幅频特性和微光图像的空间频谱特点相匹配。另一方面,加大  $\Delta t$  后,又可以大大降低同行两相邻噪声的相关性,有利于提高图像的信噪比。

在鲨鱼电子模型中,输出信号是由空间的七点信号组合而成的,其信噪比主要决定于同行的两个抑制信号所带来的噪声。其余四个抑制信号又经过频带压缩、带来的高频噪声可以忽略。

这样,图像经过鲨鱼侧抑制电子模型的加工,在信息集中的轮廓区域,信号多次相关叠加,信噪比提高、轮廓增强,图像清晰度提高。然而,在含图像信息较少,信号强度不变的“背景”区域,由于噪声的叠加,图像信噪比下降。因此,降低“背景”区域的高频噪声,对改善鲨鱼

侧抑制电子模型的加工效果,具有重要意义。为此,电路中设计了专门的“噪声抑制电路”(如图 4)。

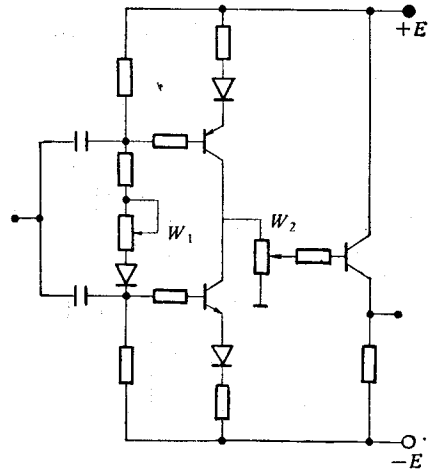


图 4 噪声抑制电路原理图

“噪声抑制电路”中,PNP 和 NPN 两个三极管,参数一致,对称偏置,处于乙类和丙类状态之间。发射极回路的两个二极管,可以实现电路的负反馈自动控制。电路的工作状态,可根据输入轮廓信号的幅度和信噪比,通过调节“噪声抑制”电位器  $W_1$  确定。调节电位器  $W_2$ ,可以改变图像的“轮廓反差”。“噪声抑制电路”通过对轮廓信号进行“挖心”和非线性变换,消除和抑制轮廓信号中的噪声,提高轮廓信号的幅度,改善图像的信噪比。然而,“噪声抑制电路”能否通过对轮廓信号“挖心”,有效地消

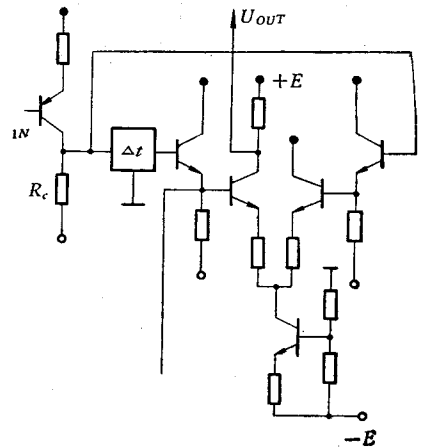


图 5 三点侧抑制电路

除和抑制附加噪声,这除了电路本身的设计外,还必须保证在轮廓信号中,相当于图像“背景”区的直流信号,完全处于同一电平。

为了保证这一点,我们在第 $p$ 行三像素的组合电路中,采用了延迟线初端匹配、终端开路的全反射延迟叠加技术和带恒流源的差分减法器,收到了良好的效果(图5)。图中, $R_c$ 为延迟线的特性阻抗, $\Delta t$ 为两相邻像素间的时间差,由视频延迟线完成时间延迟任务。通过分析不难看出,在图像的“背景”区域,差分电路两端的输入信号大小相等、相位相同,这就保证了轮廓信号的“背景”区处于同一电平。

其余两行( $p-1$ 和 $p+1$ )的四个抑制量的组合电路,也采用了延迟线初端匹配,终端开路的全反射延迟叠加技术,不但大大简化了组合电路,而且保证了同行两个抑制信号两两等隔叠加。

实践表明,鲨鱼侧抑制电子模型,采取了上述噪声抑制措施,对降低图像噪声、提高微光电视图像清晰度,具有明显的效果。

## 五、鲨鱼侧抑制电子模型的局限性

鲨鱼电子模型,模拟鲨鱼侧抑制网络的空

间结构和作用原理,根据微光图像及其噪声的空间频谱特点选取电路时间参数,确定行间抑制信号带宽,对抑制噪声干扰、突出图像主要信息,收到了满意的效果。

然而,鲨鱼侧抑制电子模型毕竟带来了一部分附加噪声,尽管有的文章分析了侧抑制加工提高信噪比的可能性<sup>[5]</sup>。因此我们认为“侧抑制原理”可以用于提高微光下“识别”图像的清晰度,而用于提高微光下“检测”图像的距离是困难的。

## 参 考 文 献

- [1] Ratliff F.: Mach Bands, p. 105—117.
- [2] Глезер В. Д.: Информация и зрение, с. 105—113.
- [3] Soule H. V.: Electro-optical Photography at Low Illumination levels.
- [4] 千葉茂樹、藤尾孝、安東平一郎: テレビ誌 20 (4)24, 1966.
- [5] Петров А. А.: Некоторые Методы Обработки. Рецепторных Сигналов в биологических Системах. В. сб. «Методы Сбора и Анализа Информации в Физиологии и Медицине».

[本文于1979年1月20日收到]

# 某些“视觉不变性”的计算机模拟

陆 惠 民

(中国科学院生物物理研究所五室)

## 一、引 言

“视觉不变性”是人类和某些动物识别图象的重要特点,所谓“视觉不变性”,是指当某一个物体或图形的位置、大小发生一定程度的变化以及其方位发生某些旋转以后,人与某些动物对该图形的识别不变,研究视觉系统“视觉不变性”的机理,模拟人与动物对图象的这种识别本领是十分重要的,因为用人造的“机器视觉”来代替人的视觉系统时,也要求机器的“眼睛”(如

摄象机)在被观察的物体相对于摄象机作一定程度的距离变化(即图象的大小发生变化)或者物体相对于摄象机光轴作一定的位移以及物体的方位相对于摄象机作了一定的旋转后,像人眼一样仍旧能够识别。此外,对“视觉不变性”的研究和模拟,可能会有助于搞清楚视觉系统信息加工的机制。

1966年, M. Kabrisky 对视觉不变性进行了初步的研究<sup>[1]</sup>。他总结了当时对人和动物的视觉系统取得的解剖学、组织学和生理学等的