

另一效应是,由于随着 cAMP 对细胞膜钙离子导体的作用,使从细胞外进入的 Ca^{2+} 增多。并由于肌质网的磷酸化受磷酸蛋白使钙泵汲取 Ca^{2+} 增快,肌质网的 Ca^{2+} 储存量增多,导致心肌收缩力的增强。

在血管及支气管壁的平滑肌及骨骼肌红肌,它们的肌质网上都有受磷酸蛋白,当这些肌

细胞的 cAMP 增多时,肌细胞只出现松弛效应或收缩时间缩短的效应,而不出现收缩力增强的效应。这可能是由于 cAMP 只通过激活蛋白激酶,影响肌质网的受磷酸蛋白,使肌质网钙泵汲取 Ca^{2+} 增快,而并不影响或很少影响细胞膜 Ca^{2+} 的进入。

(待续)

侧抑制网络的瞬态模型和理论研究

顾 凡 及

(中国科技大学生物系)

侧抑制是神经系统信息处理的基本原则之一。现在已经知道从蜚这样原始的节肢动物直到人,从外周直到中枢的各级水平,从触觉到视觉的各种感官中都存在着侧抑制作用。这一作用的基本原则经过 Hartline 及其同事们近四十年对蜚的电生理实验,已经基本上弄清楚了。Hartline 本人也由于引入了侧抑制和感受野这两个重要概念而获得了 1967 年度的诺贝尔医学与生理学奖金^[1]。

汪云九同志^[2]在本刊 1975 年第 4 期上已经就侧抑制神经网络的研究作了全面的综述,本文试图对蜚复眼侧抑制网络的瞬态模型和理论研究作某些补充。

一、蜚复眼侧抑制网络的瞬态模型

对于蜚复眼侧抑制网络的解剖学基础及其稳态模型——H. K. Hartline-Ratliff 方程组和它的参数分布,汪云九同志已经作了详细的介绍,他还介绍了 Hartline 和 Ratliff 所建立的蜚复眼侧抑制网络的瞬态方程:

$$r_p(t) = e_p(t) - \sum_{j=1}^n K_{p,j} \left\{ \frac{1}{\tau} \int_0^t \exp[(t' - t)/\tau] r_j(t') dt' - r_{p,j}^0 \right\}$$
$$p = 1, 2, \dots, pn$$

但是由于这个方程组的解析解很难求,因此为了便于和实验事实比较起见,就必须把它化为较易处理的形式。同时在实验技术上不采用光刺激邻近小眼的办法来产生侧抑制,而是用 Tomita^[3] 所发展起来的利用电脉冲逆行刺激邻近小眼的视神经纤维的办法来得到侧抑制作用,以利于精确控制实验条件。下面我们来介绍 H. K. Hartline 实验室所建立的两类模型:

1. 程序模型

(1) 脉冲发生 根据蜚眼偏心细胞中脉冲发生的生理事实,在模型中令受试单元在受到某刺激之后所产生的发生器电位 g 为兴奋项 e 和所有的抑制项之差。在程序的每一循环中,把该发生器电位加到一个总和 S 上去。当这个和数达到某一临界值,就可以从受试单元上记录到一个脉冲,而求和过程再重新开始。

(2) 自抑制 程序开始时置自抑制为零,而当受试单元每产生一个脉冲时,就把一个自抑制量子 A_s 加到自抑制储集场中去。在程序的每一次循环中,都要从中减去一个与自抑制储集场中的即时值以及和自抑制时间常数 τ_s 的倒数成比例的部分。亦即在每一次循环中,自抑制量 I_s 都要按指数衰减。

(3) 侧抑制 同理,每当有一个逆行电脉冲刺激时,就要向侧抑制储集场加上一个侧抑

制量子 A_L ，而在每一次循环中，侧抑制储集场中的量值 I_L 都要按指数衰减(时间常数为 τ_L)。

(4) 线性模型 由此，假定不考虑侧抑制作用的阈值效应的话，整个模型就可归结为：

$$g = e - I_s - I_L$$

这个模型虽然也能解释一些实验事实，但是和实验不符之处也不少。主要是没有潜伏期，而且它的给刺激相和撤刺激相是对称的。

(5) 非线性模型 对上述模型的一个改进是在侧抑制储集场中引入一个阈值 C 。这样模型就变成：

$$g = e - I_s - I_r$$

其中

$$I_r = \begin{cases} I_L - C & \text{若 } I_L > C \\ 0 & \text{若 } I_L \leq C \end{cases}$$

这个模型所算得的理论预期不仅在定性上而且在定量上也和实验结果符合得较好：它对阶跃刺激表现出明显的时滞，而且它的给刺激相与撤刺激相是不对称的，此外它也能解释容易化现象和抑制后回跃现象。但是这个模型在定量上也还有些尚待继续改进之处。例如，看来除了由阈值引起的时滞之外，还必须引入别的时滞，才能充分解释在实验中所观察到的时滞。

2. 线性系统模型^[4]

蜃眼虽然一般地说并不是一个线性系统，但是在一定的条件下——假定每个小眼的活动都远超过其阈值，而使其阈值作用可予忽略，并且外界光刺激模式的变化比较小（其变化幅度在平均水平的 10—20% 以下）时，那么就有理由期望可以把它当作线性系统来处理。实践证明这种设想是正确的。

蜃眼中的信号变换可以用一个框图图解如图 1 所示。B. W. Knight 等人^[5]用实验分别求出了单个小眼的光强——发生器电位、发生器电位-脉冲发放率以及光强-脉冲发放率的频率特性。由线性系统理论可知，后者的对数幅频特性与对数相频特性应该是前二者相应特性之和。实验事实和这一理论预期符合得很好。

B. W. Knight 等人所设计的另一个实验是用逆行电脉冲来产生侧抑制作用。他们用实

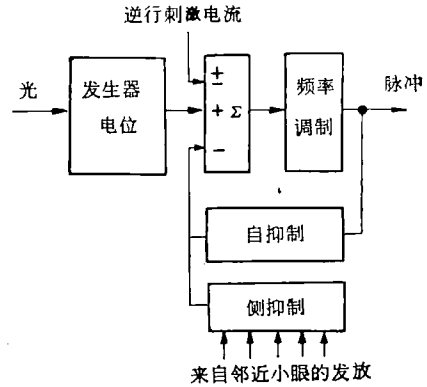


图 1

验分别测得侧抑制脉冲发放率——受试感受器单元的脉冲发放率与发生器电位——受试感受器的脉冲发放率的频率特性。如果蜃眼是一个线性系统的话，那么它们的商就将是侧抑制突触的频率特性。这一理论预期也和实验结果符合得很好。

在实验测定了上述这些频率特性之后，就不难求出自抑制作用的传递函数 $T_s(f)$ ，再加上我们测得的光电转换的传递函数 $G(f)$ 和侧抑制作用传递函数 $T_c(f)$ ，即可写出整个网络的动态方程：

$$r_p = G(f)I_p - KT_s(f)r_p - T_c(f) \sum_{i \neq p} K_{p,i} r_i$$

利用这个模型还可以解释其它的一些实验事实。F. Ratliff 并设计了一系列的实验，验证了对上述方程的线性假设，说明不同小眼之间 $T_c(f)$ 的形式是一样的，距离的影响只表现在侧抑制系数 $K_{p,i}$ 上，且 $T_c(f)$ 与刺激幅度无关。

二、侧抑制网络的理论研究

1. 感官侧抑制现象的各种数学模型

从马赫以来，许多作者对各种动物各种感官的侧抑制现象提出了各种数学模型。Ratliff 曾把它们总结成一表(见本刊 1975 年第 4 期汪云九同志文)。

Furman^[6] (1964) 根据对听觉的研究，也得出了类似的数学模型：

$$r_p = \frac{e_p}{1 + \sum_{j=1}^n K_{p,j} e_j} \quad p = 1, 2, \dots, n$$

$$r_p = \frac{e_p}{1 + \sum_{j=1}^n K_{p,j} r_j} \quad p = 1, 2, \dots, n$$

这些模型都能解释侧抑制网络突出边框的功能,但是它们在许多方面又是各不相同的。我们可以根据在这些模型中侧抑制的量值究竟是取决于其周围单元的输出生还是输入而把它们分成循环抑制模型和非循环抑制模型;也可以根据这些模型的数学表达式是线性的还是非线性的而分成线性模型和非线性模型;还可以根据抑制性影响是通过总和作用实现的还是通过分流现象实现的而分成减法性模型和分流性模型。例如 Hartline-Ratliff 模型就是一种非线性的减法性的循环抑制网络, Furman 模型则是一种非线性的分流模型。

2. 侧抑制网络在信息预处理中的作用

关于侧抑制网络在信息预处理中的作用问题,目前国际上流行着下列三种看法:

(1) 侧抑制网络能突出边框、增强反差

如上所述,一般认为突出边框和增强反差是侧抑制网络最主要的功能之一。特别是 Hartline 和 Ratliff 对蜚侧眼的电生理实验更支持了这一看法。许多作者企图从理论上对这个问题进行分析。

Gawronski 证明,对称的减法性线性非循环网络可以检测亮度的非均匀变化,亦即可以检测图象的边框。

Iwao Morishita 和 Akio Yajima 对于减法性线性循环网络

$$r_p = e_p - \sum_{j=1, j \neq p}^n K_{p,j} r_j$$

当 $K_{p,j} = K < 1$ 对所有的 $p, j (p \neq j)$ 成立时,证明了这个网络能提高反差。

Furman 对于循环和非循

环的线性减法性网络以及循环和非循环的分流性网络,用计算机对由 101 个单元构成的一维网络的中心区域进行了数学实验,在侧抑制系数只有一层相互作用,与距离成反比和与距离的三次方成反比的三种情况下,当输入模式取阶跃形式,三角形形式和钟形形式时分别研究了它们提高反差,突出边框的作用。他的研究表明,除了分流性网络对钟形输入这一例外以外,所有的各种情况均以各种不同的形式提高了反差。

(2) 侧抑制网络作为空间频率的高通滤波器

Ratliff^[7] 根据实验测定的侧抑制系数分布曲线(不论是按 Barlow 直接测定的双峰分布,还是按 Kirshfeld 间接测定的单峰分布)通过计算求得了线性减法性侧抑制网络的空间频率响应曲线(图 2)。由图可见,空间低频成分为侧抑制网络所压抑,而高频部分则渐接近于没有抑制的情况。如果不考虑侧抑制网络之前的屈光系统的传递特性所引起的高频截止的话,那么侧抑制网络本身实际上是一种衰减低频响应的高通滤波器。而相对地衰减低频响应正是“突出边框”、“加强反差”的实质所在。

N. Moray 强调指出,侧抑制网络的功能作用除了增强边框这一点意义之外,还在于它能很大的均匀输入变化范围压缩到这个网络本

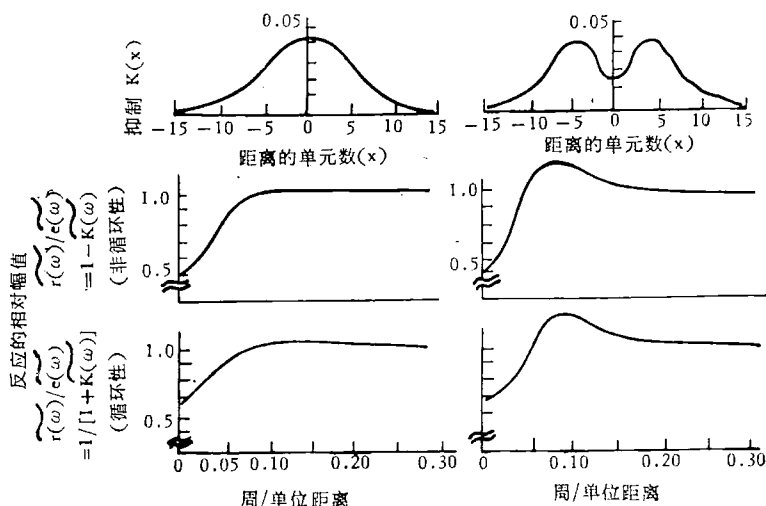


图 2

身的动态范围之内。因此,对于均匀光照来说,侧抑制网络起到了亮度水平适应的作用。这样,侧抑制网络一方面由于其空间高频效应而增强了局部区域之间的差异——细节;而另一方面则由于其空间低频效应而使其输出就整体而言趋向于衰减和压缩。也就是说侧抑制网络把亮度适应机制和边框突出机制结合了起来,在实质上也就是一种空间频率的高通滤波器。

(3) 侧抑制网络对于屈光系统缺陷所引起的成象模糊的补偿作用

对于侧抑制网络的功能 Reichardt^[8]从另一个角度出发进行了研究。Reichardt 指出,蜚眼的屈光系统是不完善的,由之引起了各小眼的视野有很严重的交迭,因之使外界图象通过屈光系统之后落在感受器镶嵌体上的象的反差下降,图象变模糊。然而通过侧抑制网络的补偿作用,使模糊了的图象又重新变得清晰起来。Reichardt 并导出了使图象通过屈光系统-侧抑制网络之后能完全复原的条件。

我们曾经指出^[9],概括起来说,线性侧抑制网络实质上是一种衰减低频分量的空间数字滤波器,所以它的功能不可能超越上述范围以外。

3. 侧抑制网络的分类比较

由上述可知,如果把侧抑制网络从它周围的内外环境中孤立出来看,那么压低输入模式中空间频率的低频成分,从而实现突出边框,加强反差,这是它们的共性。但是不同类型的侧抑制网络在性质上又有所不同,现在我们就来介绍许多作者对不同类型的侧抑制网络的比较研究。

(1) 循环抑制网络与非循环抑制网络

F. Ratliff 和 Varjú^[10]在假设侧抑制网络是减法性而且是线性的前提下,讨论了循环抑制与非循环抑制的区别和联系。

他们指出了单级的循环抑制网络与非循环抑制网络在性质上的主要区别是: (i) 对于非循环抑制网络来说,各个单元对某一单元所产生的总的抑制性影响就等于它们分别单独作用时所产生的影响之和,而对于循环抑制网络则

否;反过来说,循环抑制网络存在除抑制现象,而非循环抑制网络则否。(ii) 对于非循环抑制网络来说,侧抑制的作用范围和直接耦合的连线范围是一致的;而对循环抑制网络来说,它们可以是不一致的。

Varjú 和 Ratliff 又指出,如果把一个非循环抑制网络的输出作为另一个非循环抑制网络的输入前后串接起来,那么对任一循环抑制网络都可以找到一个与之完全等价的无穷级非循环抑制网络。Ratliff 并指出,对于循环抑制网络来说,如果考虑到侧抑制作用有时间延迟的话,那么它在时间过程中实际上就相当于一个无穷级串联的非循环抑制网络,而对这种无穷级串联非循环抑制网络逐级求出其反应的过程,实际上就相当于对循环抑制网络方程的迭代法求解。

Ratliff 曾经指出,在侧抑制网络是线性而减法性的前提下,非循环网络和循环网络的传递函数 $\mathcal{K}_n(\omega)$ 和 $\mathcal{K}_r(\omega)$ 分别为:

$$\mathcal{K}_n(\omega) = 1 - K_n(\omega)$$

$$\mathcal{K}_r(\omega) = 1/(1 + K_r(\omega))$$

其中 $K_n(\omega)$ 与 $K_r(\omega)$ 分别为它们的侧抑制系数分布函数的富里埃变换。但他没有更进一步的就此论述这两者在功能上的联系与区别。

我们曾经指出,侧抑制网络本质上是一种空间频率的数字滤波器,对于循环和非循环这两种网络来说,若 $\mathcal{K}_n(\omega)$ 与 $\mathcal{K}_r(\omega)$ 均存在且相等的话,则它们在可能实现的功能方面并没有原则的区别。但是由于它们和相应的 $K(\omega)$ 之间关联形式上有很大的差别,因此在实现某些功能的程度上和实现特定功能的难易程度上有很大的区别。具体地说: (i) 非循环网络增强反差的能力理论上几乎是无限的,而循环网络增强反差的能力是相当有限的*。(ii) 如果

* 如果我们给网络以阶跃输入,而把输出中相邻单元之间的最大反差作为输出反差的整体度量的话,那么我们可以输出反差与输入反差之比 β 作为网络的反差放大倍数,通过在计算机上寻优,我们求得对减法性的循环网络来说,一维网络的最大反差放大倍数 $\beta_{\max} = 3.69$,二维正方形排列网络的 $\beta_{\max} = 1.872$,二维六角形排列网络的 $\beta_{\max} = 2.4581$ 。顺便指出,根据 Barlow 的电生理实验测得的黄复眼的 $\beta_{\max} = 2.109$ 。

我们把鲨眼的侧抑制网络和它的内外环境联系起来加以考察,由于随机媒质的干扰所造成的图象模糊以及屈光系统的点扩布函数都是高斯型的,而侧抑制系数的分布也是高斯型的,所以它有可能是一种逆高斯滤波器,而且为了实现逆高斯滤波所必须的侧枝联结也比较短;而非循环网络为了实现逆高斯滤波,即便说不是不可能的话,也需要很长的侧枝联结才行。

(2) 减法性抑制网络与分流性抑制网络

G. G. Furman 详细地比较研究了减法性侧抑制网络和分流性侧抑制网络。所谓减法性侧抑制网络指的是网络单元的活动水平取决于其兴奋性输入与抑制性输入之差;所谓分流性网络指的是抑制作用是通过分流掉一部分由兴奋作用产生的去极化电流而实现的网络。他在阈值为零及其它的一些简化假设之下,对一维的稳态情况在数字计算机上通过数学实验比较了这两种网络。他的结论是减法性网络适用于要求: (1) 输入-输出关系为线性的。(2) 反差增强效应并不依赖于必须要有不连续性。(3) 反差增强的程度和输入幅度无关;而分流性网络则适用于要求: (1) 输入-输出关系为非线性。(2) 反差增强效应限于有不连续点的情况。(3) 反差增强程度和输入幅度有关。此外 Furman 还指出,在分流侧抑制的情况下,神经原的动态范围要比减法侧抑制或者没有侧抑制时的情况为大。

4. 减法性循环侧抑制网络方程的基本性质

(1) 稳态方程

1962 年 Melzak^[11] 研究了 Hartline-Ratliff 方程解的唯一性定理: 侧抑制网络方程

$$r_p = c_p - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^n K_{p,j} \max [O_j(r_j - r_{p,j})]$$

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

对于任意给定的 c_p 和 $r_{p,j}^0$ 仅当

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^n K_{p,j} K_{j,p} < 1 \quad p = 1, 2, \dots, n$$

时才有唯一解。

1974 年 Hadelar 证明了对于如下形式的侧

抑制网络

$$r_p = \max \left\{ \left(c_p - \sum_j K_{p,j} r_j \right); 0 \right\}$$

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

每给定一个输入 $\mathbf{e} = (e_p)$, 都至少存在一个解 $\mathbf{r} = (r_p)$ 。而若侧抑制系数矩阵 $\mathbf{K} = (K_{p,j})$ 的谱半径 $r(\mathbf{K}) < 1$, 则上述方程存在唯一解。

1962 年 W. Reichardt 对零阈值减法性循环抑制网络解的稳定性问题进行了研究, 得出了二条稳定判据。

(2) 瞬态方程

Hadelar 在 1974 年证明了瞬态方程

$$\dot{r}_p^{(v+1)} = \max \left\{ \left(c_p - \sum_j K_{p,j} r_j^{(v)} \right); 0 \right\}$$

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

存在平稳解, 且若侧抑制系数矩阵 $\mathbf{K}$ 的谱半径 $r(\mathbf{K}) < 1$, 则存在唯一的平稳点, 且此唯一的平稳解是渐近稳定的。

Hadelar 也证明了瞬态方程

$$\dot{y}_p(t) + y_p(t) = c_p(t) - \sum_j K_{p,j} y_j(t) \phi[y_j(t)]$$

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

(其中 $\phi[y] = \begin{cases} y & \text{若 } y > 0 \\ 0 & \text{若 } y \leq 0 \end{cases}$, 而 $r_i(t) = y_i(t)$)

$\phi[y_i(t)]$ 对所有的 $t \geq t_0$ 都有解且有界。

他也证明了若 $y = (y_p)$ 是上述方程的一个平稳解, 则

$$y_p = c_p - \sum_j K_{p,j} y_j \phi[y_j]$$

有解, 若 $r(\mathbf{K}) < 1$ 则有唯一解, 且此解是渐近稳定的。

我们在 1974 年也就鲨眼的瞬态线性积分方程模型

$$r_p(t) = c_p(t) - \sum_{j=1}^n K_{p,j} \left(\frac{1}{\tau} \int_0^t e^{\frac{t'-t}{\tau}} r_j(t') dt' \right)$$

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

导出了它的稳定判据: 若上述方程的侧抑制系数矩阵为 $\mathbf{K} = (K_{p,j})$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\mathbf{K}' = \mathbf{K} + \mathbf{I}$, 则网络稳定的充要条件为 $\mathbf{K}'$ 的特征根均落

在复平面的右半平面。这个判据实质上 and Hadelar 的最后一个结论是一样的。

Iwao Morishita 等人利用电子计算机对侧抑制网络的微分方程模型进行了动态模拟,特别是研究了其平稳解,说明侧抑制网络根据其侧抑制系数分布和输入的情况,其解可以有三种情况:或者有一个唯一的平衡解,或者有多个平衡解,或者有一个周期解。他们认为,这三种情况正相当于侧抑制网络对信息处理的三种功能:提高输入反差,对信息的暂时贮存以及产生周期讯号。

5. 侧抑制原理在模式辨认中的作用

一般认为侧抑制在对外界信息的预处理和特征抽提中起着很大的作用。

首先,侧抑制网络突出了图象的边框,在很大程度上消除了原来图象中的冗长度。因此 Barlow 认为侧抑制原理的价值之一,就是只要用比较少的脉冲就可以传输几乎是同样多的信息量,这样它就是减少冗长度编码的一个例子。

其次,侧抑制网络还可以对图象边框作进一步的加工,抽提出对于图象模式来说最富于特征的所谓“信息点”来。

Gawróński^[12] 利用一个带阈值的侧抑制网络,证明了它可以抽提出诸如尖角、端点、曲率这样的一些特征点来;而一个带阈值的侧兴奋网络则能抽提交叉点、分枝点这样的一些特征点。

汪云九、郑竺英等^[13]也曾在计算机上通过数学实验讨论过利用侧抑制网络抽提阿拉伯数字特征点的可能性。

此外, W. Reichardt 曾利用模拟计算机构成一侧抑制网络,根据其最后对不同模式反应的大小来进行辨认。

6. 侧抑制理论研究的其它方面

Harth 等人^[14]根据在哺乳动物视觉通道中,从网膜到外侧膝体直至大脑皮层的各级水平上都存在着侧抑制这一事实,通过和多次重复干版印刷结果的类比,以及通过在计算机上对神经原链进行数学实验的结果,说明了虽然神经

原有自发活动,也就是说神经通道是一个噪声通道,但是由于侧抑制和适应的作用,它们起到了抑制噪声积累的作用,并保持神经讯号得以在噪声通道中相当可靠的传递。

Gawróński 等人认为,侧抑制网络是靠大量的元件之间的连线,而不是靠增加大量附加元件的办法提高了网络的可靠性。

N. Moray 利用电子计算机研究了侧抑制网络的图象后效应 (Figural After Effect)问题。所谓图象后效应是指在网膜某一区域中投射一光亮图象,在其撤去之后很快再在同一区域或稍差一点之处投射另一图象,则后一图象的边框将发生位移。Moray 用计算机模拟的结果说明,这个现象是由于前一图象在侧抑制网络瞬态过程中所引起的残留的侧抑制作用和后一图象相互作用的结果。

Furman, Beddoes 等人和福岛邦彦^[15]各自研究了侧抑制网络的边缘效应问题。前两人分别通过在计算机上进行数学实验估计了边缘效应的影响范围问题,福岛则提出用修改边缘单元的侧抑制系数的方法来避免这一效应。

此外,还有不少作者用运算放大器或神经原模型构造了侧抑制网络的电子模型。这是一种并行处理的方法。孙复川等同志则把图象变成时间函数的电信号后串行处理来实现“侧抑制”功能。他们所选取的数学模型为:

$$r_p = K e_p - \frac{K}{2} e_{p-1} - \frac{K}{2} e_{p+1}$$

经变换后得到传递函数为:

$$Y(\omega) = K e^{-i\omega\tau}(1 - \cos \omega\tau)$$

的梳状滤波器。他们的装置可以从强均匀背景中检测信号并抽提图象轮廓,取得了比较令人满意的结果。

综上所述,我们可以清楚地看到,侧抑制网络的研究是生物科学与工程技术科学相互渗透,相互促进的一个很好的例子。这种结合和渗透不仅有助于我们更深刻的理解侧抑制这一生物信息处理的基本原则,而且也为进一步研究更复杂的生物信息处理问题,例如感受野的研究提供了基础。同时也为工程技术开拓了思

路。

参 考 文 献

- [1] Hartline, H. K.: *Science*, **164**, 3877, 1969.
- [2] 汪云九:《生物化学与生物物理进展》, 1975年, 第4期, 第60页。
- [3] Tomita, T.: *J. Neurophysiol.*, **21**, 1958.
- [4] Ratliff, F. et al.: *Vision Res.*, **14**, p. 1155, 1974.
- [5] Knight, B. W. et al.: *J. Gen. Physiol.*, **56**, p. 421, 1970.
- [6] Furman, G. G. and Frishkopf, L. S.: *J. A. S. A.*, **36**, p. 2194, 1964.
- [7] Ratliff, F. et al.: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **62**, p. 733, 1969.
- [8] Reichardt, W.: *Kybernetik*, **1**, p. 57, 1961.
- [9] 陈森、顾凡及:《生物化学与生物物理学报》, 1978年, 第10卷, 第4期, 第321页。
- [10] Varjú, Von D.: *Kybernetik*, **1**, p. 200, 1962.
- [11] Melzak, Z. A.: *Information and Control*, **5**, p. 163, 1962.
- [12] Gawrónski: *Digest of the 7th International Conference on Medical and Biological Engineering*, Stockholm, p. 204, 1967.
- [13] 汪云九、郑竺英等:《科学通报》, 1965年, 3月号, 第262—263页。
- [14] Harth, E. et al.: *Kybernetik*, **10**, p. 32, 1972.
- [15] 福島邦彦: *システムと制御* **16**, 6, p. 441
- [16] 上海生理研究所成象信息处理组:《上海生理所科研论文汇编》(1966—1975年)p. 305—310。

[本文于1978年11月28日收到]

付立叶 (Fourier) 分析在视觉信息加工中的应用

赵 冠 美

(中国科学院生物物理研究所)

引 言

付立叶分析是一种谐波分析,是用于研究自然界中各种振动和波动现象的有效而通用的工具。它最初应用于热学、电学,后来又逐渐扩展到无线电、通讯理论等多种技术领域。相应地,它有一套完整的数学理论,即付立叶变换。近代、正交变换除付立叶变换外,其他如 Walsh 变换, Z 变换等对数字信号处理都是很有用的。

Abbe (1842—1905 年)和 Rayleigh(1842—1919 年)首先把付立叶分析的方法用于分析和综合光学系统,形成了显微镜衍射成象理论,奠定了付立叶光学的基础^[1]。由于技术上的限制和理论的艰难性,直到 70 年代这一概念才得到较为普遍的应用。例如在图象恢复、图象识别、侧视雷达和全息照像等方面都成功地使用了付氏分析。致使付立叶分析成为成象系统的理论基础,使古老的光学焕发出新的生命力。

人和动物的视觉系统可看作光学系统与神经系统的复杂组合。它们所处理的信息与光学

系统加工的信息基本上一样,主要是空间的亮度分布。早在 19 世纪后期 Helmholtz 就开始考虑把付立叶分析用来解释视觉现象。但是他没有获得成功,其失败的原因在于他把时间域中表示光的颜色的光波与空间域中表示光强在空间分布的光波混淆了。直到 60 年代,光学中定义了空间频率的概念后,生物学家才能把付立叶分析方法运用到视觉系统中来,从而解释了许多视觉现象并提出了各种视觉信息加工的模式。

空间频率与付立叶级数

我们已知,通讯系统加工的信息如电压,电流等是随时间而变的,是时间的函数,其频率是指单位时间内正弦波重复的次数,一般以周/秒即赫芝表示。听觉系统也是这样。而光学系统与视觉系统中所加工的则是空间信息。所谓空间信息,这里是指光的亮度在空间的分布状况、比如一张黑白照片是由许多不同灰度的亮度分布组成的。在光学信息加工中,最基本的亮度分布是正弦分布。如图 1(a)所示。在这种条