

脉冲磁场对神经系统的影 响(上)

(续前)

末梢神经的磁刺激

导言 1984~1985 年间,上野照刚(S. Uene)等^[4,5],采用磁刺激法使神经出现兴奋,即用电磁感应磁场和脉冲磁场进行磁刺激的。传统上用电容器充放电法产生的脉冲磁场的波形,是一种衰减波,尚不能形成矩形波和正弦波。这样就无法对神经的磁刺激过程进行详细地研讨。为此上野等在 1987~1988 年间,发表了采用任意波形发生器所提供的矩形波磁场所开展的磁刺激研究^[6,7]。上野等又对任意波形发生器所产生的梯形波进行放大,所用的 8 字形线圈,其匝数为 10,外径为 100mm,内径为 60mm。实验时 8 字形线圈置放在右肩的锁骨部位。从上肱二头肌处测量电压。实验系统和电流波形见图 14~15。



图 14 实验系统示意图

齐凤春(大连理工大学物理系 辽宁大连 116023)

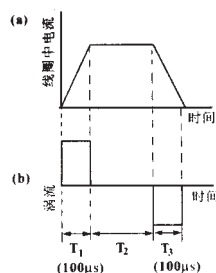


图 15 刺激电流的波形
实验结果 在刺激强度为 $10.3 \times 10^2 \text{T/S}$ 下,对图 15 中的 T_2 部分($0 \sim \mu\text{s}$)所做的磁刺激实验结果,示于图 16。

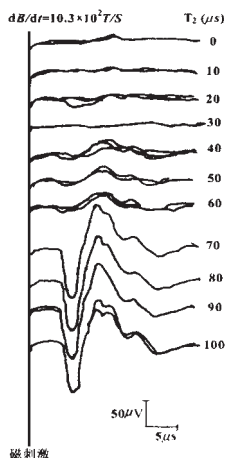


图 16 神经轴系统在 $10.3 \times 10^2 \text{T/S}$ 强度的梯形磁场刺激下振幅(μV)与 $T_2(0 \sim 100 \mu\text{s})$ 的关系曲线

又在刺激强度为 $10.3 \times 10^2 \text{T/S}$ 、 $10.7 \times 10^2 \text{T/S}$ 和 $11.0 \times 10^2 \text{T/S}$ 时的梯形磁场刺激下,得到了 EMG 曲线^[8]。这是振幅(μV)与 $T_2(0 \sim 100 \mu\text{s})$ 的关系曲线,结果见图 17。

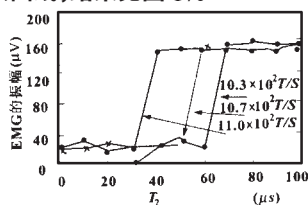


图 17 在三种梯形磁场强度刺激下所得到的 EMG 振幅与 $T_2(0 \sim 100 \mu\text{s})$ 的关系曲线

由图可知,在刺激强度为 $11.0 \times 10^2 \text{T/S}$ 下, T_2 在 $30 \mu\text{s}$ 以下进行刺激时,振幅只有 $25 \mu\text{V}$ 而已。但 T_2 在 $40 \mu\text{s}$ 以上时,振幅却急剧地增大到 $150 \mu\text{V}$ 左右。在强度为 $10.7 \times 10^2 \text{T/S}$ 下, $T_2 = 60 \mu\text{s}$ 时,振幅急剧地增大;在强度为 $10.3 \times 10^2 \text{T/S}$ 下, $T_2 = 70 \mu\text{s}$ 时,振幅急

剧变大。

磁刺激神经兴奋的理论模型^[8]

有髓神经系统的磁刺激下的兴奋模型,可以按图 18 所示的电路,进行模拟性计算。

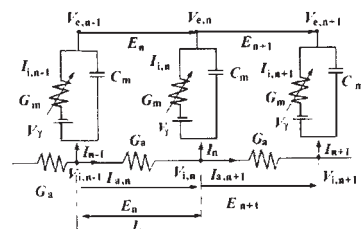


图 18 有髓神经纤维兴奋模型的模拟电路^[8]
此处:

- V_n : 节点 n 的膜电位;
- I_n : 节点 n 的膜电流;
- $V_{e,n}$: 节点 n 的外电位;
- $V_{i,n}$: 节点 n 的内电位;
- V_r : 静止电位;
- G_a : 轴向内电导;
- G_m : 节点的膜电导;
- C_m : 节点的电容;
- $I_{i,n}$: 节点 n 的总离子电流;
- $I_{a,n}$: 节点 n 与节点 $n-1$ 间的轴向内电流;
- L : 轴部的长度;
- E_n : 节点 $n-1$ 和 n 间的感应电场。

节点内的电导 G_n ,用下式表示:

$$G_n = \pi d^2 / 4 \rho L \quad (1)$$

电容 C_m 和电导 G_m ,以下式表示:

$$C_m = C_m \pi d L \quad (2)$$

$$G_m = q_m \pi d L \quad (3)$$

为计算方便,设神经纤维以外的介质为无限均匀的。节点 $n-1$ 和 n 间神经纤维轴向电流 $I_{a,n}$,是由平行于神经纤维的感应电场形成的电位差所产生的计算。

$$I_n = G_a [(V_{n+1} - 2V_n + V_{n-1}) + (V_{e,n+1} - 2V_{e,n} + V_{e,n-1}) + (E_{n+1} - E_n)L] \quad (4)$$

由于神经纤维自身的活动而产生的细胞外电位,在 1mV 以下,很小,所以细胞外的各个节点间的电位差,只是由平行于神经纤维的感应电场所产生,故下式成立:

$$V_{e,n} - V_{e,n-1} = E_n L \quad (5)$$

$$V_{e,n+1} - V_{e,n} = E_{n+1} L \quad (6)$$

膜电流 I_n , 是通过膜的负载电流和离子电流的总和, 从而有:

$$I_n = G_m \frac{dV_n}{dt} + I_{i,n} \quad (7)$$

$$\frac{dV_n}{dt} = \frac{1}{G_m} [G_n(V_{n+1} - 2V_n + V_{n-1}) + E_n - E_{n-1}]L - I_{i,n} \quad (8)$$

最终, 由电磁感应产生的电场 E , 由下式给出:

$$E(r, t) = \left(\frac{dI(t)}{dt} \right) \left(-\frac{\mu_0 N}{4\pi} - \int \frac{dL'}{|r-r'|} \right) \quad (9)$$

这里, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am}$, N 为线圈匝数, $I(t)$ 为线圈内电流, r 为计算电场的位置, r' 为线圈微分 dL' 的位置。

从 8 字形线圈中心下边的节点向两边各取 100 个点, 合起来为 200 个节点。感应电场就是对这 200 个节点进行计算的。神经纤维上膜电位的变化是通过式(8)和式(9)计算出来的。

磁刺激的神经兴奋的 计算机模拟实验

实验时, 直径为 50mm、匝数为 30 的 8 字形线圈与神经纤维的位置关系示于图 19。

如图 19 所示, 把平行于神经纤维

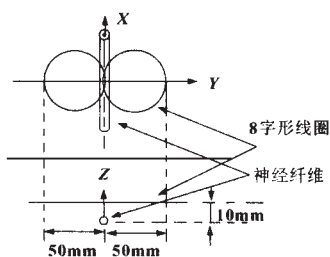


图 19 8 字形线圈与神经纤维的位置关系 (计算机模拟实验)

的轴作为 x 轴, 把垂直于神经纤维的轴定为 y 轴和 z 轴。采用如图 15 中梯形波形的 T_2 部分。以此研究了神经兴奋值的变化关系。

实验结果示于图 20。随着 T_2 的增

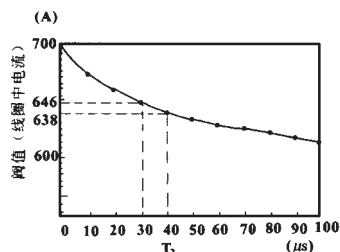
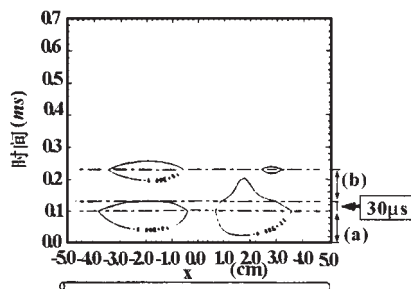


图 20 梯形磁场的平稳部分(T_2)与神经兴奋阈值的关系 (计算机模拟)

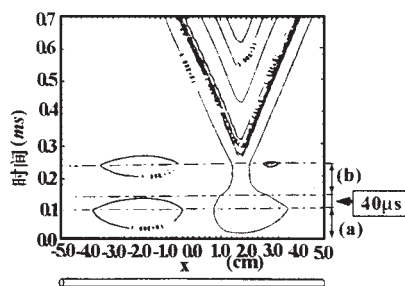
大, 神经兴奋的阈值在减小。当线圈中的刺激电流为 640A 时, 在 $T_2 \leq 30\mu\text{s}$ 下, 神经没有发生兴奋; 但当 $T_2 \geq 40\mu\text{s}$ 时, 则神经出现了兴奋 (即产生活动电位)。

在线圈电流为 640A 以及 T_2 为 $30\mu\text{s}$ 和 $40\mu\text{s}$ 的时候, 神经的膜电位与时间之间的变化关系示于图 21 和图 22。两图中: (A) 神经轴系的膜电位与时间的三维空间变化关系, (B) 神经轴系的电位与时间变化关系的等高线图。



神经纤维
(a) 感应电场
(b) 感应电场

图 21 在线圈电流为 640A 和 T_2 为 $30\mu\text{s}$ 时神经纤维膜的电位与磁刺激的关系^⑥ (计算机模拟)



神经纤维
(a) 感应电场
(b) 感应电场

图 22 在线圈电流为 640A 和 T_2 为 $40\mu\text{s}$ 时神经纤维膜的电位与磁刺激的关系^⑥ (计算机模拟)

如图 21 所示, 在 $T_2 = 30\mu\text{s}$ 时, 由于一个脉冲涡电流刺激, 则神经出现了活动电位; 但在 $30\mu\text{s}$ 后施加 2 个脉冲涡电流刺激时, 则活动电位的发生过程受到了抑制。

由图可知, 当 T_2 为 $40\mu\text{s}$ 时, 在离心方向的涡电流的刺激下, 神经的活动电位的发生过程, 处于 $x = 18\text{mm}$ 的位置。在后续涡电流刺激的时候, 其兴奋

的引发点, 比 $T_2 = 30\mu\text{s}$ 的情况 (如图 21) 要容易一些, 在刺激后 $260\mu\text{s}$ 后, 活动电位就发生了。并向神经纤维的二个方向传导。

讨 论

本理论模型的要点是: 在磁刺激下, 神经纤维内部和外部所感生的膜电位都发生了变化。根据该模型所作的模拟实验结果, 可以很好地解释实验事实。

腕神经丛在梯形磁场刺激下所得到的实验结果, 可以用图 20 (计算机模拟结果) 所示的神经兴奋阈值 T_2 的变化规律进行说明。在图 20 中, 当刺激强度为 640A 并且在 $T_2 \leq 20\mu\text{s}$ 时, 神经纤维没有出现兴奋, 即没有出现 EMG 曲线峰。但是, 在 $T_2 \geq 40\mu\text{s}$ 时, 则神经纤维出现了兴奋, 从而也就看到了 EMG 曲线峰。这个现象, 同图 17 在 $11.0 \times 10^2 \text{T/S}$ 强度的磁刺激下所得的结果是一致的。

在图 17 中的随着刺激强度的减小引发 EMG 曲线的 T_2 值变长了这个事实, 也可用图 20 加以解释, 即图 20 所示: 若刺激强度下降, 则使神经兴奋的 T_2 值就变长了, 这同图 17 的实验结果是一致的。

我们也可以看到, 日本学者的方案设计和研究方法是很精细的, 从而才获得了可喜的研究结果。

参考文献

1. S. Ueno, K. Harade, IEEE Trans. Magn. 1984, MAG - 20: 1660
2. A. T. Barker, Lancet, 1985, 1106
3. S. Ueno, IEEE Trans. Magn. 1987, MAG - 23: 2437
4. S. Ueno, J. Appl. Phys. 1988, 64: 5862
5. 木通肋治等, 日本应用磁气学会志, 1992, 16 (3) 570

(收稿 2000-08-31)

