



(续前)

末梢神经的磁刺激

言 1984~1985 年间,上野照刚 导 (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。





齐凤

春(大连理工大学物理系

辽 宁

大连

116023

图 16 神经轴系统在 10.3×10²T/S 强度的梯形磁场刺激下振幅 (μv)与 T₂(0~1)

又在刺激强度为 10.3×10²T/S、 10.7×10²T/S 和 11.0×10²T/S 时的 梯形磁场刺激下,得到了 EMG 曲线 ⁽⁸⁾。这是振幅 (µv) 与 T₂(0~100µs) 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 T₂(0~100µs)的关系 00µs)的关系曲线

由图可知, 在刺激强度为 11.0× 10²T/S下, T₂在 30 μ s 以下进行刺激 时,振幅只有 25 μ v 而已。但 T₂在 40 μ s 以上时,振幅却急剧地增大到 150 μ v 左右;在强度为 10.7×10²T/S下, T₂ = 60 μ s 时,振幅急剧地增大;在强度为 10.3×10²T/S下, T₂ = 70 μ 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。



生	,故下式成立:	
	$V_{n,n} - V_{n,n-1} = E_n L$	(5)

是由平行于神经纤维的感应电场所产

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

膜电流 In,是通过膜的负载电流 和离子电流的总和,从而有:

$$I_{n} = G_{m} \frac{dV_{n}}{dt} + I_{i, n}$$

$$\frac{dV_{n}}{dt} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} G_{n} (V_{n+1} - 2V_{n} +$$

$$dt = G_{m} + C_{n+1} + L_{m+1} = L_{m+1}$$

$$V_{n-1} + E_{n} - E_{n-1} L - I_{i,n} J$$
(8)

最终,由电磁感应产生的电场 E, 由下式给出:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},\mathbf{t}) = \left(\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}(\mathbf{t})}{\mathrm{d}\mathbf{t}}\right) \left(\frac{\mu \mathbf{N}}{4\pi} - \int \frac{\mathrm{d}\mathbf{L}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right) (9)$$

这里, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Vs/Am$, 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



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 T₂ 部分。以此研究了神经兴奋 值的变化关系。



大,神经兴奋的阈值在减小。当线圈中 的刺激电流为 640A 时,在 $T_2 \leq 30 \mu s$ 下,神经没有发生兴奋;但当 $T_2 \geq 40 \mu s$ 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 $30\mu s$ 和 $40\mu s$ 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。



^(计算机模拟) 如图 21 所示,在 T₂ = 30µs 时,由 于一个脉冲涡电流刺激,则神经出现了

活动电位;但在 30μs 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 T₂为 40μs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 = 18mm的位 置。在后续涡电流刺激的时候,其兴奋

BIOMAGNETISM 学术研究

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

论

讨

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 T₂的变 化规律进行说明。在图 20中,当刺激强 度为 640A 并且在 T₂ \leq 20 μ s 时,神经纤 维没有出现兴奋,即没有出现 EMG 曲 线峰。但是,在 T₂ \geq 40 μ 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× 10²T/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 T₂ 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 T₂ 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

- 4 S. Ueno, K. Harade, IEEE Trans. Magn. 1984, MAG – 20: 1660
- A. T. Barker, Lancet, 1985, 1106

S. Ueno, IEEE Trans. Magn. 1987, MAG - 23: 2437

- S. Ueno, J. Appl. Phys. 1988, 64: 5862
- 8 木通肋治等,日本应用磁气学会志,1992,16 (3) 570





