

突触可塑性的数学公式

唐孝威

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039; 浙江大学物理系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出突触可塑性的一个可能的数学公式, 尝试用这个公式统一地描述突触长时程增强效应和突触长时程抑制效应。

关键词: 突触可塑性; 突触的连接强度; 长时程增强效应; 长时程抑制效应

中图分类号: Q421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6737(2001)02-0407-03

突触可塑性是神经元的基本特性之一,对脑的功能具有很重要的意义。最早 Cajal 提出突触变化是学习和记忆的神经基础的设想。在半个世纪之后,Hebb 提出神经细胞的重复而持久的活动会导致突触效能长时程变化的假说^[1]。以后关于突触长时程增强效应(LTP)的大量实验证实了这个假说^[2,3]。目前在生物化学方面对 LTP 已经有了大量的研究^[4],但是神经细胞的重复活动导致突触特性变化的定量规律是怎样的? 至今对此还很少研究。我们认为,Hebb 提出的线性变化规律只是一种特殊的情况。本文讨论普遍情况下的定量关系,提出突触可塑性的一个可能的数学公式。

单个神经元的许多功能,包括记忆、兴奋、学习等,在行为水平上也有类似现象。因此 Barlow 很早就根据实验事实指出,单个神经元的特性与行为的特性之间存在联系^[5]。其后,Newsome 等人^[6]和 Britten 等人^[7]在实验上都观察到并且强调单个神经元的兴奋阈限与行为阈限相接近的事实。此外,Posner 和 Raichle 还根据实验事实指出,在行为水平上练习导致加工自动化的原理可以应用于神经系统^[8]。

行为水平和神经元水平的活动具有不同的机制。行为水平上的功能表现是神经系统整体的表现,因而不能简单地还原为单个神经元层次。特别是突触可塑性具有复杂的分子机制,不能将描述行为水平的特性推广到神经元水平。但是考虑到行为水平和神经元水平的可塑性都是由多次刺激积累的过程所引起的,虽然它们的机制不相同,或许它们具有类似的数学形式。

过去在行为水平上对技能学习进行过许多研究,已经积累了大量的实验数据。经验表明,长期练习会使技能熟练,这表现为同一个人完成一项作业所需要的时间会随练习次数增多而缩短。由实验数据总结出的技能学习的经验公式具有幂定律的形式。而且事实证明,这种规律是许多不同种类的学习所共有的^[9,10]。

我们从唯象的角度提出,在神经元水平上的突触可塑性可能也具有幂定律的形式。用 S 表示突触的连接强度,用 n 表示神经细胞重复活动的次数。如果在神经元水平上的突触可塑性也具有幂定律的形式,突触的连接强度随神经细胞重复活动次数变化的可能的形式是:

收稿日期: 2000-08-14

作者简介: 唐孝威,1931年生,研究员,大学,电话:(010)68236097(O)。

$$S = an^{\gamma} \quad (1)$$

式中 $1 > \gamma > 0$ 。系数 a 和幂指数 γ 随不同的突触种类和不同的神经活动性质而具有不同的数值, 需要由实验来确定。在 $\gamma = 1$ 的特殊情况下就得到突触特性线性变化的规律。并且 n 也在一定的范围内, 该公式才有效。

这个公式表示, 突触的连接强度随着神经细胞重复活动次数的积累而增加。设 Δn 是重复活动次数的增量, ΔS 是突触的连接强度的相应增量, 根据式(1)得到:

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma \frac{\Delta n}{n} \quad (2)$$

这就是说, 突触的连接强度的相对变化 $\frac{\Delta S}{S}$ 在可塑性的早期即起始阶段远大于后期即熟练阶段。

已知突触可塑性具有复杂的机制, 其中包括突触前活动与突触后活动的相互关系。目前对突触前和突触后影响还在研究之中。我们考虑突触前活动和突触后活动是综合起作用的, 因此上面公式应当反映突触前和突触后活动的综合效应。

除突触长时程增强效应外, 实验上还发现有突触长时程抑制效应(LTD)^[11]。对某些神经元, 在一些刺激条件下重复刺激导致突触增强, 而在另一些刺激条件下重复刺激导致突触抑制。或许可以用同一个公式统一地描述这两种效应, 对这两种不同的效应, 公式中的系数 a 和幂指数 γ 的数值不同。对于 LTP, a 为正值($a > 0$), 而对于 LTD, a 为负值($a < 0$)。 a 的具体数值随不同的突触种类而不同。对 LTP 和 LTD, 重复刺激次数 n 的频率可以是不同的。

这些关系式只是对简单情况的讨论。但是在上述初步的描述中, 式(1)和式(2)都可以用实验来精密检验, 希望上面的讨论能够引起神经科学家的兴趣, 并对它们进行定量的实验检验。

参考文献:

- [1] Hebb D O. *The organization of behavior*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1949.
- [2] Bliss T, Lomo T. *Long lasting potentiation of synaptic transmission in the anesthetized rabbit following stimulation of the performant path*[[J]]. *J Physiol*, 1973, 232:331-356.
- [3] Bliss T, Collingridge G. *A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus*[[J]]. *Nature*, 1993, 361:31-39.
- [4] Brown T, Kairiss E, Keeman C. *Hebbian synapses: biophysical mechanisms and algorithms*[[J]]. *Ann Rev Neurosci*, 1990, 13:475.
- [5] Barlow H. *Single units and sensation. a neuron doctrine for perceptual psychology?*[[J]]. *Perception*, 1972, 1:371-394.
- [6] Newsome W, Britten K, Morshon J. *Neuronal correlates of a perceptual decision*[[J]]. *Nature*, 1989, 341:52-54.
- [7] Britten K, Shadler M, Newsome W, et al. *The analysis of visual motion. A comparison of neuronal and psychophysical performance*[[J]]. *J. Neurosci*, 1992, 12:4745-4765.
- [8] Posner M, Raichle M. *Images of Mind*[M]. New York: Scientific American Library, 1997.244.
- [9] Crossman E. *A theory of the acquisition of speed-skill*[[J]]. *Ergonomics*, 1959, 2:153-166.
- [10] Newell A, Rosenbloom P. *Mechanisms of skill acquisition and the law of practice*[A]. In: Anderson J. *Cognitive skills and their application*[C]. New Jersey: Hillsdale, 1981.1-55.
- [11] Fitzsimonds R, Song H, Poo M. *Propagation of activity-dependent synaptic depression in simple neural networks*[[J]]. *Nature*, 1997, 388:439-448.

A MATHEMATICAL FORMULA OF SYNAPTIC PLASTICITY

TANG Xiao-wei

(*Institute of High Energy Physics, Beijing 100039; Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: A possible mathematical formula of synaptic plasticity is proposed which may be used to describe both the long-term potentiation and the long-term depression.

Key Words: Synaptic plasticity; The synaptic strength; Long-term potentiation; Long-term depression