

从大脑的生物结构与记忆行为探究其中蕴含的数学模型
——基于群节点的拓扑网络

目录

第一部分 感知信息相关数值的估算	1
一、 眼睛、视觉和感知信息	1
二、 大脑接收到的视觉感知信息总量	5
第二部分 大脑存储和处理信息的生物结构	7
三、 关于生物分子的内容	7
四、 关于神经系统的内容	8
五、 关于神经元、突触、突触囊泡和神经递质的内容	11
六、 各数值之间的对比	17
第三部分 信息以及与其相关的概念	20
七、 关于信息的一些定义或描述	20
八、 客观信息、感知信息和抽象信息	21
第四部分 记忆与回忆、魔方与群——基于群节点的拓扑网络	25
九、 静态的记忆和动态的回忆	25
十、 回忆、魔方与群	26
十一、 基于群节点的拓扑网络	28
第五部分 其他的问题	30
十二、 意识和脑中的样本	30
十三、 需要从生命进化角度看待的一些问题	34
第六部分 梳理和总结	36
附录	37
附录 1 关于生命的内容	37
附录 2 其他有关视觉感知信息的数值的估算	43
附录 3 关于核酸 (DNA 和 RNA) 的内容	45
附录 4 关于蛋白质的内容	46
附录 5 关于免疫系统的内容	51
附录 6 其他关于神经系统的内容	56
附录 7 其他关于突触和神经递质的内容	57
附录 8 当前计算机系统中信息的存储方式	60
附录 9 关于感觉和知觉的内容	61
参考书籍	65

本文依据眼睛和视觉的研究内容对视觉感知信息的相关数值进行了估算，并与神经科学和分子生物学的研究内容进行对比分析，提出大脑中存储和处理信息的基本单元是突触处的突触囊泡；然后，通过对记忆所指行为的重新理解，用“回忆”替代原有的“记忆”对该行为进行描述，将信息存储的描述从原本的静态记录调整为动态回溯过程，调整后的描述更契合大脑中突触处的突触囊泡处于动态变化这一客观事实；接着，通过对比回忆行为与魔方还原过程的相似性，提出可以借助数学中的群论，为突触处的突触囊泡的工作机制建立对应的数学模型；最后，基于大脑“神经元—突触—突触囊泡”这一生物学结构，本文提出了用于处理感知信息与抽象信息的生物神经网络（Biological Neural Network, BNN）的数学模型——基于群节点的拓扑网络。

第一部分至第五部分结合多领域的研究内容展开分析讨论，第六部分是对全文主要思路的梳理和总结，附录是受本文主题和篇幅所限，不便于放置在正文中的内容。本文引用的内容涵盖专业与科普类书籍、大语言模型、网络百科等多种来源，引用时为了尽可能地将原有的内容表述完整，也会对引用中含有的与本文观点不一致的内容进行保留，供读者阅读参考。需要说明的是，笔者并没有将所列的参考书籍都阅读完毕，而是因为这些不同的书籍对同样的知识点有不同的叙述方式、描述角度和详略程度，为了尽快了解相关的知识点，于是通过较频繁地变换不同的书籍阅读，确保尽快推进理解的进度。如果读者对有关的引用内容比较熟悉，则可以跳过这些引用内容。

第一部分 感知信息相关数值的估算

一、眼睛、视觉和感知信息

以下有关眼睛的内容来自《40 亿年地球生命简史》（[英] 尼克·莱恩 著 梅菱芒 译 文汇出版社）：

“

……根据化石记录，第一只真正的眼睛突然莫名其妙地出现在 5.4 亿年前，差不多就是进化“大爆发”要开始的时候，也就是寒武纪大爆发开始的时候。那时候动物突然留下大量化石，记录之多样，令人叹为观止。在这些现在已经寂静了不知多久的岩石中可以看到，几乎所有现存的动物门都毫无征兆地出现了。

化石记录中动物生命大爆发与眼睛的发明，这两者发生的时间是如此接近，几乎可以确定不是单纯的巧合，毕竟空间视觉必定会改变猎食者与猎物之间的相对关系。而这种关系的改变很可能是（或许根本就是）寒武纪的动物都是身披厚重铠甲的原因，而这也解释了为何寒武纪动物可以留下大量化石记录。……

——第 226 页

”

以下有关眼睛的内容来自《生命的起源》（刘大可 著 中信出版集团）：

“

同样的事情也发生在人类的身上：视网膜上满满当地覆盖着感光细胞，感光细胞顶端有像烙饼一样层层叠叠撑起来的内质网膜，内质网膜上密密麻麻地嵌满了视蛋白，这些视蛋白都含有被称为“视黄醛”的色素，这种色素实际上就是维生素 A^[1]的变体，它一旦接受了恰当波长的光子就会扭曲性状，从而触发各种蛋白质的一系列变化，最终形成神经冲动，传入大脑，让我们感知到光（参见图序-5）。

[1] 和许多维生素一样，维生素 A 并不专指某种单一的物质，而是几种关系密切，可以相互转化，发挥一样的生理功能的物质。具体来说，它包括了视黄醛、视黄醇、视黄酸，以及β-胡萝卜素等类胡萝卜素，在深色植物和脊椎动物的肝脏里含量丰富。

（图略）图序-5 脊椎动物的感光原理。在最上方的反应式里，视黄醛吸收了恰当波长的光子后会发生显著的扭曲，并且能借助 ATP（腺苷三磷酸）的能量恢复原状。在中间，是细胞膜结构上的镶嵌的视蛋白的局部结构，它由 7 根棍状物^[1]攒成，视黄醛就被架在其中，显然，当视黄醛吸收了光子改变了形态，就会促使这些蛋白质发生某种形态变化。具体来说，像最下面展示的那样，不同的视蛋白用不同的“棍子”连接视黄醛，这让不同的视蛋白对不同波长的光有了不同的吸收率^[2]。对人类来说，我们有红绿蓝三原色的视蛋白，以及另外一种负责感受明暗的视紫红质。（作者绘）

[1] 这些“棍状物”更正式的名称是“α螺旋”，你会在第六章的“延伸阅读”里看到更加详细的解释。

[2] 如果你仔细观察，你会发现红色视蛋白吸收率最大的波长对应某种绿色，而蓝色视蛋白吸收率最大的波长对应发红的紫色——对于前者，我们这个物种的确不能很好地分辨红色和绿色，看到红色在很大程度要归功于大脑的处理，但我们在红色和绿色之间看到的黄色和橙色仍然很不丰富；出现后一种情况是因为红色视蛋白在那一带也有挺高的吸收率，所以两种色觉混合了起来。

——第 010, 011 页

至于为什么人们能看到不同颜色的光，那是因为不同的视蛋白能够让视黄醛吸收不同颜色的光，而每一个感光细胞都只集中镶嵌一种视蛋白，所以每个感光细胞都能像显示器的像素一样，给大脑传达一个点的颜色信息。而人眼的视网膜上大概有 1.2 亿个感光细胞，这么多的颜色信息点汇聚起来，自然就形成丰富多彩的视觉影像。（参见图序-6）

（图略）图序-6 包括人类在内，脊椎动物的感光细胞主要分为视杆细胞和视锥细胞两类，相比普通细胞，它们最显著的特征就是有厚厚的一摞膜结构，叫作“膜盘”。膜盘上嵌满了视蛋白，图序-5 的中间部分其实就是图右的一个小“颗粒”。另外，视杆细胞的视蛋白是视紫红质，负责感受明暗，而视锥细胞区分色彩，所以一种脊椎动物有几种视锥细胞，就有几种原色的色觉，比如人类有红绿蓝三种视锥细胞，所以就有红绿蓝三原色的色觉。（作者绘）

——第 011, 012 页

”

以下关于眼睛的内容来自《脑研究的新大陆——一位德国工程师与一位中国科学家之间的对话》(顾凡及、[德]卡尔·施拉根霍夫(Karl Schlagenhauf)著 顾凡及译 上海教育出版社):

“

人视网膜分成好多层,如果从信息的流向来看,首先是光感受器层,紧接着的是双极细胞层,再后是神经节细胞层,神经节细胞的轴突构成视神经传向脑。从工程师的观点来看,显然光感受器层“应该”在视网膜最接近光线进入的地方,而神经节细胞层则“应该”紧贴后壁。然而实际情况正好相反,光感受器层最贴近后壁,光线要穿过神节细胞层和双极细胞层之后才能到达光感受器。另外因为神经节细胞层在最“前方”,因此当视神经要离开视网膜进入脑时不得不再折返穿过双极细胞层和光感受器层之后才得以离开眼睛。这样就不得不在视网膜表面会聚成束折返处留下一小块没有光感受器的区域——盲点。只是靠了脑后期对盲点的“补插”作用才使得我们的视野中不留下一个洞。另外,因为光感受器紧贴视网膜壁,所以血管也挡住了进光的通路,只是靠了眼睛的不断颤动和光感受器的适应作用,才使得我们看到的图像不受到血管的干扰。有人以此说明“造物主”的存在,因为只有智慧如造物主才能想出这种补插,并用眼动和感受器的适应性去除血管的干扰。不过他没有想一想,真有大智慧如造物主,为什么会作出这样“颠倒”的“设计”,造成这许多麻烦!当然视网膜的这种“设计”自有其生物学上的好处,不过没有一位图像接收器的工程师会采用这样的设计。

——译注

——第 35 页

”

以下关于视觉的内容来自《认知、大脑和意识》([美]伯纳德·J.巴斯 尼科尔·M.盖奇 主编王兆新 库逸轩 李春霞 等译 上海人民出版社):

“

3.0 视觉意识的理论: 视知觉在哪里发生?

伴随着一系列的神经活动,我们是不是有可能确定正在发生的意识的所在位置?是不是有可能指出一个特定集合的神经元或者一个特定的脑区然后说:我的大脑中有着……有着这么一个地方,我正是在这个地方体验着在我脑海中出现的视觉世界?

其实答案并不是那么简单的,但是科学家们正在搜集重要的线索。即便一个人的眼睛是闭着的,或者一个人因为眼睛或 LGN 损伤而失明,但如果在他们的初级视觉皮层中施加电刺激,那么这个人仍然有可能“体验视觉”。换句话说,不通过刺激视网膜和 LGN,而通过直接刺激 V1 区来产生视觉体验是有可能的。

有没有可能不通过初级视觉皮层而产生清晰的视觉体验呢?我们还不知道确切的答案。但是迄今为止,答案似乎是否定的。初级视觉皮层似乎对我们能有意识地感知任意的视觉特征起着重要的作用,然而高级视觉区域可能更加专门地

负责感知特定的视觉特征或事物（Tong, 2003）。……

——第 190, 191 页

”

根据以上关于眼睛和视觉的内容，很明显在眼睛和大脑之间不存在一根光纤直接将光传到大脑，而是人眼在接收到光线（可见波段的电磁波）的刺激后，会产生一系列的化学信号或电信号，这些信号传到大脑的某个区域后，这个区域根据传来的信号触发了“视觉”，即你的大脑根据传来化学信号和电信号生成了相关的景象，而这才是你“看到”的景象。

那么我们看到的景象还客观真实吗？当然是客观真实的！在你面前的客观世界，如果你看到的景象是这样的，那么其他的人如果当时在现场，看到的景象也应该是这样的。所有的人——包括过去所有的人、现在所有的人和未来所有的人，如果当时在现场，看到的景象都应该是这样的。每个人的大脑都具有重现其他人所看到景象的能力。大脑凝聚了人类共同的对客观世界的感知能力。客观世界生产主观意识，主观意识证明客观世界是客观的。这真是一件有意思的事情！

当然，如果你闭上眼睛，却因为某些原因仍有一系列化学信号或电信号传递到大脑的特定区域，你依旧可能“看见”一些景象——比如做梦或者产生幻觉时就是如此，则这些景象就不能算是客观的了。

以下关于生命感知信息的内容来自《生命是什么》（王立铭 著 人民邮电出版社）：

“

我们还可以进行更大胆的猜测，那些人脑无法获取和利用的信息，也许能够被其他生物体所利用，产生人类完全无法想象的美妙感知。

这样的例子即便在地球生物圈也并不罕见。

很多动物可以接收到人类感知能力之外的信号。例如，人耳能够采集到振动频率在二十赫兹到两万赫兹的声音，而蝙蝠可以听到频率达到十几万赫兹的超声波。蝙蝠的听觉世界一定比我们嘈杂热闹得多，如果蝙蝠也有音乐家，那它们的交响乐将有着人类无法比拟的丰富音色。再比如，依靠三种稍微不同的视紫红质蛋白，人的眼睛能够识别三种基本颜色（黄、绿、紫），三种色彩的组合让人的眼睛能区分多达一千万种色彩，这构成了我们能看到的五彩斑斓的视觉世界。而蝴蝶能够感知五种不同的基本颜色，简单计算可知，蝴蝶应该有能力区分一百亿种颜色！如果蝴蝶能做画家，那它们画笔下的世界一定有着人类不可言说的美妙色彩。

有些地球生物还发展出了人类根本无法想象和理解的感觉。例如，蜜蜂、蚂蚁和鸽子能够检测到极其微弱的地球磁场方向，利用地磁场来引导行动；有些鱼类能够感受到周围电场的微弱变化，利用这些信号来搜索、捕食和迁徙；许多鸟类能够利用星光或地磁场导航，飞行在没有任何地面标志物的茫茫大海上，进行数千千米乃至上万千米的迁徙。

但是我们可以大胆地估计，不管这些感知外在世界的方式在人类看来是多么不可思议，地球生命收集感觉信号、处理感觉信息的基本原则，仍然是可以被我们理解的。

”

在这里，我们需要插入一些关于“信息”这个概念的简要讨论，第三部分还会专门展开详细阐述，因为“信息”这个术语使用得过于宽泛，若不对各类信息加以细致区分，将不利于我们清晰地理解与信息有关的各个概念。

我们身处客观世界之中，客观世界本身具有的信息不妨称之为客观信息，而生命体通过自身具有的感知能力感知到的客观信息就是感知信息，即感知信息是生命体通过感知器官和神经系统共同作用，对客观世界具有的客观信息在某个方面和某种程度上的反映。

显然，不同的生命体拥有不同的感知能力，比如：人类以视觉为主感知客观世界，蝙蝠以听觉为主感知客观世界。因此，不同的生命体感知客观世界获得的感知信息不一定是相同的，基于各自感知信息构建出的客观世界的景象也不一定是相同的。在本文中相对人类的感知信息一般就直接简称为感知信息，获取和处理各种感知信息的生物基础则是各种感知器官和神经系统。

不过，上述关于感知信息的表述仍不够严谨。特别是当我们进一步追问“生命是什么”“神经系统是什么”“感知是什么”“意识是什么”等问题的时候，就会牵扯出更多关于事物的本质与起源的问题。总的来讲，如果我们希望对感知、意识等问题形成更深入的认知，或许需要从更本质的角度、更宽广的范围来探究这些概念。

受本文主题和篇幅所限，关于生命的一些相关内容可参见附录 1。

二、大脑接收到的视觉感知信息总量

视觉感知信息是人类获得的最主要的感知信息，视觉感知信息量占据了总的感知信息量的绝大部分。以下关于人眼传送到大脑的视觉感知信息量的内容来自《遗忘的机器：记忆、感知与“詹妮弗·安妮斯顿神经元”》（[阿根廷] 罗德里戈·奎安·基罗加 著 曹立宏 邓雅菱 译）：

“

……最后，考虑到人眼的神经节视网膜神经元数量是豚鼠的 10 倍，研究者估计人眼以每秒 1000 万比特（10Mbps）的速度向大脑传输信息。这个数字听起来可能很熟悉，因为它是标准以太网连接的传输速度。

让我们再仔细考虑一下这个结果。视觉信息以每秒 1 兆字节的速度传输到大脑。如果假设我们平均每天清醒 16 小时，这意味着大脑每天接收的信息总量为 57.6GB（3600 秒×16 小时×1MB）。

”

以下关于人眼与其他感觉器官信息接收量对比的内容来自大语言模型豆包：

“

视觉（眼睛）：83%

听觉（耳朵）：11%

触觉（皮肤）：1.5%

嗅觉（鼻子）：1%

味觉（舌头）：0.5%

合计：100%

简单记：眼睛占绝大部分，耳朵次之，触、嗅、味加起来不到 5%。

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 22 日查询）

”

根据上述引用内容中的数据，大脑接收到的视觉感知信息总量可以按如下估算（以比特为单位）：

$120 \text{ 年} \times 365 \text{ 天} \times 16 \text{ 小时} \times 3600 \text{ 秒} \times 1000 \text{ 万比特} = 2,522,880,000,000 \text{ 万比特} \approx 2.5 \text{ 亿亿比特}$

即假设一个人生存 120 年，每天 16 小时不休息，则其接收到的视觉感知信息量约为 2.5 亿亿比特。

又由于其他感知信息接收量与视觉感知信息接收量相比差距巨大，因此，我们可以用此数值代替各感知信息量的总和。

其他有关视觉感知信息的数值的估算可参见附录 2。

第二部分 大脑存储和处理信息的生物结构

在第一部分中给出了感知信息的概念，显然不是所有的信息都能够被生命体感知的。在对大脑存储和处理信息的生物结构展开讨论前，需要指出其中提及的“信息”是指人类神经系统可感知的信息以及基于感知信息形成的抽象信息。从生物学的通路来看，大脑存储和处理信息的生物结构各层级是：脑区——神经网络——神经元——突触——突触囊泡——生物分子。

三、关于生物分子的内容

以下关于生物分子的内容来自大语言模型豆包：

“

生物分子是生物体中天然存在、以碳为核心的有机分子，是生命结构与功能的物质基础，通常分为生物大分子和生物小分子两大类。

一、四大核心生物大分子

类别	基本构件	核心元素	主要功能	典型代表
核酸	核苷酸（戊糖 + 磷酸 + 含氮碱基）	C、H、O、N、P	储存 / 传递遗传信息，指导蛋白质合成	DNA（双螺旋）、RNA（单链）
蛋白质	氨基酸（20 种标准）	C、H、O、N、S	催化（酶）、结构支撑、运输、免疫、信号传导	酶、血红蛋白、抗体、胶原蛋白
碳水化合物	单糖（如葡萄糖）	C、H、O	能量供给 / 储存，细胞结构组成	葡萄糖、蔗糖、淀粉、纤维素
脂质	脂肪酸、甘油等	C、H、O（部分含 P、N）	膜结构骨架，长期储能，信号分子	磷脂、甘油三酯、胆固醇、激素

二、生物小分子

分子量多在 500 以下，是代谢与调控的关键，包括：单糖、脂肪酸、氨基酸、核苷酸、维生素、激素、神经递质及代谢中间产物（如乙酰辅酶 A）。

三、核心规律

结构决定功能：构件的种类、数量、排列顺序及空间折叠，决定生物分子的特异性与功能。

相互协作：核酸编码蛋白质，蛋白质催化合成糖与脂质，脂质与蛋白 / 糖形成膜结构，共同维持生命活动。

——来自大语言模型豆包（2026 年 2 月 25 日查询）

”

生命系统本身及其各个子系统在信息的存储与传递方面与各种生物分子有着极其密切的关系，如生命系统本身与核酸（DNA 和 RNA）分子，神经系统与神经递质分子，免疫系统与蛋白质分子，等等。

有关核酸的一些内容可以参见附录 3；有关蛋白质的一些内容可以参见附录 4；有关免疫系统的一些内

容可以参见附录 5。

另外，在附录 5 的讨论中提出了如下观点：“在人体内已知的生物系统里，免疫系统是复杂度仅次于神经系统的生物系统，而免疫系统的功能主要依靠不同蛋白质分子之间的相互结合实现。既然复杂度仅次于神经系统的免疫系统，其功能是在生物分子层面实现的，而比神经系统更基础、更复杂的，代表生命本身的蛋白质分子的“复制”，也是在生物分子层面完成的，那么我们有充分理由推测，神经系统的功能实现也应当发生在生物分子层面，即神经系统对感知信息的存储和处理是在生物分子这个层面完成的。”

四、关于神经系统的内容

以下关于神经系统的内容来自《脑与认知科学概论（第 2 版）》（主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社）：

“

2.1.1 大脑的组成

认识脑，首先要从脑的基本知识出发。脑和脊髓一样，是中枢神经系统的一部分，而脑又由端脑（大脑和基底神经节）、间脑、中脑、脑桥、延髓和小脑构成，如图 2-3 所示。脑干包括中脑、脑桥和延髓三部分。延髓连着脊髓，像是脊髓的延长，故称延髓。

（图略）图 2-3 大脑的组成示意图

大脑各部分功能参见表 2-1。

表 2-1 大脑中枢神经系统各部分的主要功能

部位	功能
脊髓	中枢神经系统的最尾侧部。控制四肢和躯干运动，接受由四肢和躯干皮肤、关节及肌肉传入的感觉信息并进行加工
延髓	位于脊髓上方，内有许多与生命相关的自主性中枢，包括消化、呼吸及心率控制
脑桥	位于延髓上方，把有关运动的信息传向小脑
小脑	位于脑桥后方，有 3 对小脑脚与脑干相连，控制运动的力量与范围，并与运动技巧的学习有关
中脑	位于脑桥的嘴侧，控制许多感觉及运动功能，包括眼球运动及视、听反射的协调
间脑	位于中脑的嘴侧，包括丘脑及下丘脑两部分。丘脑加工从脑的其他部分进入大脑皮层的信息；下丘脑调节自主性、内分泌及内脏功能
大脑	包括大脑皮层及三个深位置的结构：基底神经节参与运动调节；海马参与记忆存储的某些方面；杏仁核群协

调与情绪有关的各种自主性及内分泌反应，它也是恐惧性条件反射的中枢之一

其中，大脑由左右大脑半球组成，两半球占人脑重量的 60%，其体积为整个中枢神经系统的 1/3，它覆盖在间脑、中脑和小脑的上面。大脑皮层指大脑半球表面，它由灰质所覆盖，人类的大脑皮层是人类意识活动的物质基础。大脑皮层的神经细胞约有 140 亿个，面积约为 2200cm²，大脑皮层凹凸不平，布满深浅不同的沟，沟与沟之间的隆起称为大脑回。每个半球以几条主要沟为界，分为不同的脑叶。而在各脑叶区域内，有许多小的脑沟，其中蕴藏着各种神经中枢，分担不同的任务，形成了大脑皮质的分区专司功能。大脑的结构示意如图 2-4 所示。

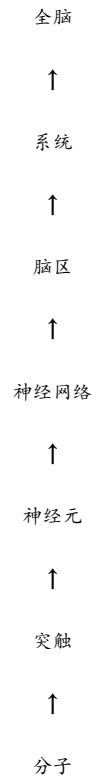


图 2-4 大脑的结构示意图

2.1.2 人脑的三位一体学说

地球生命已有 30 多亿年的历史，在这个历史长河中，生物的大脑缓慢地进化，形成了今天的样子。图 2-5 为地球进化图。人类的大脑里面也有着这种进化的痕迹。图 2-6 为人类进化图。

(图略) 图 2-5 地球进化图

(图略) 图 2-6 人类进化图

根据脑结构、皮质的类型和作用的不同，科学家提出了人脑的三位一体学说，即大脑有三个部分：古脑，也叫作爬行脑；旧脑，也叫作哺乳脑；最后一个是新脑，也就是大脑的新皮层，如图 2-7 所示。这三个大脑部分一个覆盖着一个，在进化的阶梯上逐步形成，并且后形成的部分掌管之前形成的部分。

(图略) 图 2-7 人类大脑的三大组成部分

爬行脑位于最底部，是一个状似爬行动物的脑的结构，爬行动物就已具备了这种脑结构，已有 2 亿年的历史。爬行

脑的主要部分就是脑干，主要负责人类的非随意性行为，即那些不受思想制约的无意识的生理性活动，如调节心跳和呼吸等维持生命活动的基本功能等。此外，爬行脑在人类本能的身体反应中也起着重要的作用。

哺乳脑在爬行脑的上面，没有爬行脑那么古老，但也有 6000 万年之久。它的结构类似于老鼠的大脑结构，是哺乳动物共有的。哺乳脑的功能比较复杂，它掌管着繁殖、吃喝的节律，还是情绪的发起中心和操纵平台，控制着人类复杂的情绪和情感活动。与爬行脑一样，它所掌管的那些功能也不受思想控制。人遇到危急情况时的紧张、受惊吓时的恐惧以及各种微妙的情感波动都是哺乳脑的功能活动。

新皮层是人类独有的。从进化上看，人类的大脑皮层包含了几种不同的成分。在种系演化上，最早出现的皮质是嗅觉性的，主要的功能是调节内脏的活动，这种皮质在鱼类就已经出现，叫作古皮质。从爬行类开始，非嗅觉的新皮质出来了，在以后的进化过程中，新皮质的面积不断增加，发展迅速。到了哺乳类，特别是高等哺乳类，新皮质已占据了主导地位。在人类的大脑中，新皮质占了全部皮质的 96%，而古皮质则剩下很小的部分。新皮层是人类进行思维的部分，它负责人类的各种高级认知机能，如言语、记忆、判断、推理、计划、组织以及各种有意识的行为。由于新皮层是在爬行脑和哺乳脑的基础上发展起来的，所以它对于它的前身具有调控作用。

——第 33, 34, 35, 36 页

神经系统由中枢神经系统和周围神经系统两部分组成（如图 2-13 所示）。脑和脊髓构成中枢神经系统，脑神经、脊神经和内脏神经系统（自主神经系统）组成周围神经系统。周围神经一端与脑或脊髓相连，另一端通过各种末梢与身体各器官、系统相联系。

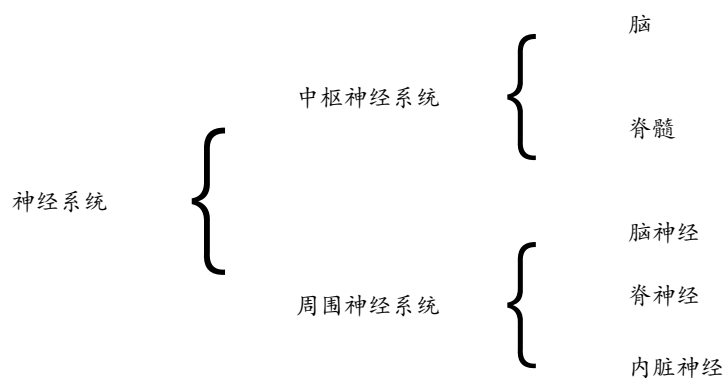


图 2-13 神经系统的结构（按位置和功能）

——第 47 页

”

从宏观的生物学通路来看，不同脑区连接着不同的感觉器官，而后汇总到更深层的脑区。还有一些关于神经系统的内容可以参见附录 6。

五、关于神经元、突触、突触囊泡和神经递质的内容

以下关于神经元和突触的内容来自《脑与认知科学概论（第2版）》（主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社）：

“

人类智能的产生得益于人脑高度发达的神经网络，人类大脑有约860亿个神经元和约1000万亿个突触（神经连接）。

——第5页

”

以下关于神经元、突触的内容来自《神经科学——探索脑（第4版）》（[美] Mark F. Bear Barry W. Connors Michael A. Paradiso 著 朱景宁 王建军 主译 电子工业出版社）：

“

本章着重介绍神经系统中两类不同细胞——神经元和神经胶质细胞的结构。这是两个大的类别，其中包含许多类型的细胞，而这些细胞在结构、化学特性和功能上都不同。尽管如此，神经元与神经胶质细胞之间的区分还是重要的。虽然成年人脑中神经元和神经胶质细胞的数量大致相等（大约各850亿个），但神经元负责脑的大部分独特功能。正是神经元（neuron）感知环境的变化，再将这些变化传递给其他神经元，并控制机体对这些感觉做出反应。神经胶质细胞（glia或glial cell）主要通过隔离、支持和滋养邻近的神经元来促进脑功能。如果将脑看成一块巧克力曲奇饼而神经元是巧克力块，那么神经胶质细胞就是曲奇面团，它填充了其余所有的空间，并使巧克力块悬浮于适当的位置。……

——第24页

正如我们所见，神经元（也称为神经细胞，nerve cell）由胞体、树突和轴突组成。

——第29页

到目前为止，我们已经探讨了胞体、细胞器、细胞膜和细胞骨架。但是，这些结构都不是神经元特有的，因为它们也存在于我们身体的其他每个细胞中。现在来看看轴突，这是一个仅存在于神经元中的结构，并且专门负责神经系统内信息远距离传递。

……

轴突的长度从不足1mm到1m不等。……

轴突的直径也大小不一，人的轴突从不足 $1\mu\text{m}$ 到约 $25\mu\text{m}$ ，而枪乌贼的可达1mm。轴突粗细的这种可变性非常重要。正如第4章所述，掠过轴突的电信号，即神经冲动（nerve impulse）的速度取决于轴突的直径。轴突越粗，冲动传导越快。

轴突终末。所有轴突都有始段（轴丘）、中段（轴突主干）和末梢。这个末梢称为轴突终末（axon terminal）或终末扣（terminal bouton; bouton 为法语单词，意为“纽扣”），从字面上可知它就像一个膨胀的圆盘（图 2.16）。终末是轴突和其他神经元（或其他细胞）接触并向其传递信息的部位。这个接触点称为突触（synapse），synapse 一词源于希腊语，意为“连接在一起”。有时轴突末梢有许多短分支，每一个分支都能与同一区域的树突或胞体形成突触。这些分支统称为终末树（terminal arbor）。有时轴突在其膨胀区沿长轴形成突触，然后继续延伸并终止于别处（图 2.17）。这种膨胀称为顺路扣（bouton en passant; 即 buttons in passing, 路过的纽扣）。不论是上述两种情况中的哪一种，当一个神经元和另一个细胞建立突触联系时，我们就说该神经元支配了那个细胞，或者说它向这个细胞提供了神经支配（innervation）。

（图略）图 2.16 轴突终末和突触。轴突终末与其他神经元的树突或胞体形成突触。当神经冲动到达突触前轴突终末时，神经递质分子就从突触囊泡释放到突触间隙中。然后，神经递质与特定的受体蛋白结合，使突触后细胞产生电信号或化学信号

（图略）图 2.17 顺路扣。一根轴突（黄色）与一根树突（蓝色）在相交时形成突触。该突触是用电子显微镜拍摄的一系列图像重构的（蒙普林斯顿大学的 Sebastian Seung 博士和 Pop 科技的 Kris Krug 惠允使用）

轴突终末的细胞质和轴突的细胞质有以下几点不同：

1. 微管不延伸入终末。
2. 终末包含为数众多的膜质小泡，称为突触囊泡（synaptic vesicle），直径约 50nm。
3. 面向突触的膜的内表面附着有特别密集的蛋白质。
4. 轴突终末的细胞质含有大量线粒体，说明其能量需求很高。

突触。虽然整个第 5 章和第 6 章将专门讨论信息是如何经突触从一个神经元传递到另一个神经元的，但我们先在这里预览一下这个过程。突触有突触前（presynaptic）和突触后（postsynaptic）两个部分（图 2.16）。这两个名称指明信息流的通常方向是从“前”到“后”。突触前通常由轴突终末组成，而突触后可以是另一个神经元的树突或胞体。突触前膜和突触后膜之间的间隙称为突触间隙（synaptic cleft）。在突触上，信息从一个神经元向另一个神经元的传递过程称为突触传递（synaptic transmission）。

在大多数突触中，以电脉冲方式沿轴突传导的信息会在终末被转换为可跨突触间隙的化学信号。在突触后膜上，该化学信号又被转换成电信号。这个化学信号被称为神经递质（neurotransmitter），其由终末中的突触囊泡存储并释放。我们将会了解到，不同类型的神经元使用不同的神经递质。

这种电—化学—电形式的信号转换使脑的许多计算能力成为可能。这一过程的改变涉及记忆和学习，而突触传递功能异常将导致某些精神疾患。突触同时也是许多毒素和大多数精神药物的作用位点。

——第 39, 42, 43 页

”

以下关于突触、突触囊泡和神经递质内容来自《神经科学（第4版）》（主编 韩济生 北京大学医学出版社）：

“

（一）化学性突触的结构

化学性突触结构复杂，包括突触前结构、突触间隙和突触后结构（图 2-5-3）。突触前结构为膨大的轴突终末，也称突触终末，由线粒体、小突触囊泡、致密核心大囊泡、内涵体等细胞器和细胞膜组成。细胞中主要有两类囊泡：一类是直径约 50nm 的清亮小囊泡（clear vesicle），主要分泌谷氨酸、 γ -氨基丁酸（ γ -aminobutyric acid, GABA）等神经递质；另一类是直径在 100nm 以上的致密核心大囊泡（large dense core vesicle, LDCV），主要在神经及内分泌细胞中分泌儿茶酚胺等激素和神经肽。虽然两者的囊泡内含物不一致，但其分泌的基本过程基本相似，相关蛋白具有保守性。每个突触终末含 100~200 个突触囊泡，每个囊泡含有数千至上万个递质分子。与突触后细胞相对的细胞膜为突触前膜，在突触前膜囊泡聚集和膜融合的特化区域为活性区（active zone），此处存在大量与囊泡胞吐相关的蛋白质，在电子显微图像中呈现电子致密性。突触囊泡聚集于活性区并在此处与突触前膜融合。化学突触的突触间隙为 20~40nm，其中存在细胞基质和酶。突触后结构为突触后细胞特化区域，包括突触后膜和突触后致密体，突触后膜存在大量密集排列的递质受体。

（图略）图 2-5-3 突触终末的显微结构 电镜图像显示海马神经元的化学突触的结构。大细胞器为线粒体，大量小的圆形结构为储存神经递质的突触囊泡。突触前膜活性区在电镜图像中呈细绒毛状增厚，为囊泡锚定和膜融合之所。突触间隙为分隔突触前膜与突触后膜的空间，存在有细胞基质

——第 249, 250 页

突触囊泡内包含的递质分子达数千到上万个，囊泡内含物的理论浓度可达 1000mM 以上。如电鳗电器官单个囊泡包含 200 000 个 ACh 分子，ACh 浓度为 0.9M、ATP 为 0.17M；在肾上腺嗜铬细胞致密核心囊泡中，肾上腺素浓度为 0.5~1M、ATP 为 120~300mM、 Ca^{2+} 为 40mM。如此高浓度内含物的理论计算渗透压可高达 1500 毫渗透摩尔（mOsm），而实际的胞浆渗透压仅为~320 mOsm。因此，必然存在一种机制将囊泡内含物固定成浓缩基质才能降低囊泡内渗透压，以避免囊泡被渗透裂解。……

——第 252 页

”

以下关于突触囊泡和神经递质内容来自《从光子到神经元——光、成像和视觉》（[美] 菲利普·纳尔逊（Philip Nelson）著 舒咬根 黎明 译 科学出版社）：

“

每个神经元不断合成新的神经递质，并且还可以清除上一个动作电位遗留下来的突触中使用过的分子。神经元将递

质分子包装进膜泡（囊泡），然后将其导入轴突末端内侧，时刻准备释放（图 2.7 顶部）

（图略）图 2.7 [基于结构数据的手绘图。]神经突触的横截面图。轴突末端（突触前末端）显示在顶部，其中几个突触囊泡内部充满了神经递质分子（黄点）。其中一个囊泡正在与轴突的外膜融合，并将其内含物递送到突触间隙。接收方（突触后）树突显示在底部。穿过突触间隙的递质分子与树突膜上的受体蛋白（r）结合。这些受体通常是配体门控离子通道。图中显示为蓝色、绿色和紫色的其他蛋白共同维持了这个空间结构，使得信号传输高效、可重复。[由 David S Goodsell 绘制。]

当动作电位到达轴突末端时，其去极化会打开那里存在的另一类电压门控离子通道，它们能特异性地允许钙离子通过。胞内钙离子通常由离子泵维持在低浓度，因此这个去极化会导致胞内钙离子暴增。这反过来又触发了神经递质囊泡膜与细胞外膜的融合（图 2.7 中心）。在融合之前，神经递质位于细胞内的囊泡内；膜融合之后，神经递质就直接释放到细胞外，进而继续扩散，最终到达突触另一侧，结合到对应的配体门控通道上。

简而言之，神经元通过离散事件（动作电位）进行长距离通信，反过来又触发其他离散事件（神经递质成团释放）。

囊泡释放的离散性

神经递质释放的离散特征可以直接测量。虽然单个递质分子与目标离子通道的结合对接收端树突的膜电位影响极小，但是整个囊泡释放的数千个神经递质分子确实具有可观的效果。图 2.8 显示这些事件确实大致为某个基本强度的整数倍（“量子化释放”），符合 2.4.6 节描述的图像。该基本值对应单个囊泡释放的效应。

（图略）图 2.8 [实验数据。]突触处囊泡释放离散性的证据。该实验测量了当肌肉细胞接收来自运动神经元的单个动作电位（神经冲动）时其膜电位的响应变化。横轴表示膜电位的变化幅度，纵轴表示基于 198 次相同条件实验而估算的概率密度函数。为了更清晰地展示响应的离散特征，实验者提高了细胞周围溶液中镁离子的浓度，使得递质囊泡释放（响应动作电位的结果）的平均数量减小了。肌肉细胞本身被禁止产生动作电位，因此它的响应完全反映了轴突神经递质的释放量。图示分布中的隆起峰值出现在某个基本值的整数倍处（箭头），说明了释放离散特征。每处隆起都存在一定的宽度，部分原因是包裹在每个囊泡中的递质分子数量存在一个分布。0 mV 处的峰值表示偶尔会出现响应失败。另见习题 2.1。[数据来自 Boyd & Martin, 1956, 可参见 Dataset 4。]

——第 73, 74 页

”

以下关于突触囊泡释放神经递质内容来自大语言模型豆包：

“

突触囊泡释放神经递质遵循量子化原则：单个囊泡（1 个量子）释放的分子数通常在数千到数万之间；一次动作电位触发的总释放量，是多个囊泡同时释放的总和。

一、单个囊泡（1 个量子）的释放量

不同递质、不同囊泡类型差异较大，核心数据如下：

表格

神经递质 / 囊泡类型	单个囊泡分子数	典型场景
乙酰胆碱 (ACh)	1,000 - 50,000	神经 - 肌肉接头、中枢胆碱能突触
多巴胺 (DA)	~3,000 - 14,000	中脑多巴胺神经元
去甲肾上腺素 (NA)	~37,000	蓝斑核去甲肾上腺素能突触
5-羟色胺 (5-HT)	~4,700 (小囊泡); ~80,000 (大囊泡)	中枢 5 - 羟色胺能突触
谷氨酸 / GABA	~1,000 - 10,000	中枢兴奋性 / 抑制性突触

二、一次动作电位触发的总释放量

一次动作电位触发的是多个囊泡同步释放，数量因突触类型、钙离子浓度、释放概率而异：

神经 - 肌肉接头（经典）：一次动作电位触发 200 - 300 个 ACh 囊泡释放，总分子数约 10^7 。

中枢单突触（如海马）：一次刺激通常释放 1 - 5 个囊泡（单囊泡 / 多囊泡释放），总分子数数千到数万。

释放概率：中枢突触释放概率通常 0.1 - 0.5，即 10 次动作电位中仅 1 - 5 次成功释放囊泡。

三、关键概念

量子化释放：递质以单个囊泡为最小单位释放，决定突触后电位的离散幅度。

量子大小 (Quantal size)：单个囊泡的递质分子数，决定单个量子的信号强度 National Center for Biotechnology Information。

量子含量 (Quantal content)：一次动作电位释放的囊泡总数，决定总信号强度。

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 23 日查询）

”

以下关于突触囊泡的“种类”的内容来自大语言模型豆包：

“

一、先明确：突触囊泡的“种类”怎么分

1. 按形态与递质（最常用）

小清亮囊泡 (SSV, 40 - 60 nm)：含乙酰胆碱、谷氨酸、GABA 等小分子递质，负责快速突触传递。

小致密核心囊泡 (SDCV, 40 - 60 nm)：含儿茶酚胺（多巴胺、去甲肾上腺素）。

大致密核心囊泡 (LDCV, 90 - 250 nm)：含神经肽（如 P 物质、脑啡肽），释放慢、作用持久。

2. 按功能池（动态分类）

即刻释放池 (RRP)：docked 在活化区，毫秒级可释放 PMC。

循环池 (Recycling)：靠近膜，中度刺激下循环使用。

储备池 (Reserve)：远离膜，强刺激才动员。

二、每个突触里，不同囊泡大概有多少？（典型数据）

1. 中枢小突触（如海马 CA1 兴奋性突触）

总囊泡数：100 - 300 个 / 突触（电镜计数）。

小清亮囊泡（谷氨酸）：占绝大多数 (90%+)。

大致密核心囊泡（神经肽）：0 - 数个 / 突触（通常 < 5）。

即刻释放池 (RRP)：1 - 10 个 / 突触（仅 docked 于活化区）。

2. 神经肌肉接头 (NMJ)

总囊泡数：数千个 / 突触终末。

小清亮囊泡（乙酰胆碱）：几乎全部。

大致密核心囊泡：极少或无。

3. 单胺能突触（如多巴胺、5-羟色胺）

小致密核心囊泡：数十 - 数百个 / 突触。

大致密核心囊泡：数个 - 数十个 / 突触。

——来自大语言模型豆包（2026年3月23日查询）

”

以下关于突触囊泡的囊泡循环机制的内容来自大语言模型豆包：

“

突触囊泡释放神经递质后，会通过囊泡循环机制被回收、重新填充递质并再次投入使用，以维持持续的神经信号传递。

一、核心过程：释放 → 回收 → 再填充 → 再释放

释放 (Exocytosis) 动作电位到达突触前末梢 → 钙通道开放、 Ca^{2+} 内流 → 囊泡与前膜融合 → 神经递质释放到突触间隙。

回收 (Endocytosis) 囊泡膜不会被丢弃，而是通过内吞从细胞膜上回收，形成新的囊泡结构。

经典途径：网格蛋白 (Clathrin) 介导的内吞，较慢但稳定。

快速途径：非网格蛋白介导、超快速内吞 (毫秒级)，适应高频放电。

再填充 (Refilling) 回收的空囊泡通过囊泡膜上的转运蛋白（如 VGLUT、VGAT、VMAT 等），从胞质中摄取神经递质，重新装满。

动员与再释放填充好的囊泡被运输到活性区，等待下一次 Ca^{2+} 信号触发释放。

二、为什么必须补充？

维持持续传递：单个突触每秒可释放数百次递质，若不循环补充，囊泡与递质会迅速耗尽 PMC。

效率与经济性：局部循环比在胞体合成新囊泡并长距离运输快得多，是神经元的“节能循环” PMC。

递质再利用：释放到间隙的递质大部分被前膜再摄取，回收到胞质后可再次装入囊泡。

三、时间尺度（关键参考）

释放：毫秒级。

回收：几十毫秒到几秒。

再填充：几十毫秒到数秒（依递质与突触类型而异）。

易释放池（RRP）补充：约 10 - 100 ms 即可完成快速再 dock，支持高频发放。

简单说：囊泡是“可重复使用的容器”，释放后被回收、重新装满递质，循环使用。

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 23 日查询）

”

根据以上关于神经元、突触、突触囊泡和神经递质的内容，可以看到大脑在微观的结构上是比较均匀和一致的，都遵守神经元——突触——突触囊泡——神经递质这个基本的结构。突触囊泡释放神经递质时会出现离散性的特征，且有循环回收的机制，突触囊泡可以被回收、重新填充递质并再次投入使用，以维持持续的神经信号传递。

当然，大脑中还有神经胶质细胞和其他非神经元细胞，以下内容来自《神经科学——探索脑（第 4 版）》（[美] Mark F. Bear Barry W. Connors Michael A. Paradiso 著 朱景宁 王建军 主译 电子工业出版社）：

“

一些神经科学家认为神经胶质细胞是神经科学中“沉睡的巨人”（sleeping giant）。的确，我们不断意识到，神经胶质细胞对脑信息处理的贡献要远比我们过去认识到的重要得多。然而，资料持续表明，神经胶质细胞主要通过支持神经元的功能来促进脑功能。尽管它们的作用是次要的，但没有神经胶质细胞，脑也不能正常运作。

——第 49 页

”

其他关于突触和神经递质的一些内容可以参见附录 7。

六、各数值之间的对比

根据以上关于神经元、突触、突触囊泡和神经递质的内容，可假设大脑中神经元的数量约为 860 亿个，突触的数量约为 1000 万亿个，每个突触平均含有约 150 个突触囊泡，每个突触囊泡平均含有约

10000 个神经递质分子，则

突触囊泡的总量大约为： $1000 \text{ 万亿} \times 150 = 15 \text{ 亿亿}$ ；

神经递质分子的总量大约为： $1000 \text{ 万亿} \times 150 \times 10000 = 15 \text{ 万亿亿}$ 。

这里需要指出的是，虽然没有直接的研究表明所有的感知信息都会被存储，但从我们对曾经感知过的信息都会有一种熟悉的感觉这个事实来说，感知信息的相当一部分大概率是被存储下来了。因此，本文中假设所有的感知信息都会被存储在大脑中。不过显然，我们的大脑很难主动地读取和还原感知信息，只能在被动地感知到之后进行比对。

下面看看各数值之间简单对比：

神经元	860 亿	个	
突触	1000 万亿	个	
感知信息的总量	2.5 亿亿	比特	
突触囊泡	15 亿亿	个	（按每个突触平均含 150 个算）
神经递质	15 万亿亿	个	（按每个突触囊泡平均含 10000 个算）

根据引用的内容可知，神经元与突触的状态是相对稳定的，突触处的突触囊泡的状态则处于动态变化中；神经递质分子同样处于动态变化的状态，但由于分子体积极小、本身存在热运动，几乎无法单独对其进行统计，并且同种类的神经递质分子还应当是全同的粒子，彼此之间无法区分，因此不适合作为信息存储的基本单元。

相比之下，突触囊泡的动态变化具备三个关键特征：第一，突触囊泡遵循量子化原则释放神经递质，具备了可计数的特性，满足信息存储的基础要求；第二，突触囊泡存在囊泡循环机制，支持信息的重复写入；第三，从之前的数值对比可以看出，突触囊泡的总数量足以满足感知信息的存储需求。除此之外，还可以根据神经递质分子的种类区分不同的突触囊泡。因此，我们将大脑存储和处理信息的基本单元确定为突触处的突触囊泡。

需要指出的是，这一结论与前文提出的“神经系统对感知信息的存储和处理是在生物分子层面完成的”观点并不冲突，因为生物分子（此处为神经递质分子）依托突触囊泡，遵循量子化释放原则，间接实现了感知信息的存储与处理。更确切地说，此处存储的并非原始的感知信息，而是经过转化的间接信息，也就是原始感知信息的记录或表示。

当然，仅凭突触囊泡以上三个特征，还无法推测其具体的工作机制。我们不妨将其与计算机系统中信息的存储机制做个对比，在计算机系统的信息是以一维线性地址空间的方式进行存储（可以参见附录 8），且其存储信息的单元的状态是不会随意变化的，除非有新的数据写入。我们的大脑与计算机系

统在信息存储机制方面显然是不同的，否则如果大脑是像计算机那样存储信息的话，则由于突触处的突触囊泡的状态一直是以一种动态变化的状态存在，那么大脑中的信息就会不断地被修改。这显然与事实不符，以感知信息来说，虽然我们不能主动地还原各种感知信息，但我们能够被动地将当前感知到的信息与曾经感知过的信息进行对比，这说明突触囊泡的动态变化并没有将曾经感知过的信息抹除。

因此，我们可以推测大脑是以一种动态的机制存储信息，这样才能符合大脑的生物结构。在进一步讨论大脑的信息存储机制之前，有必要对信息以及与其相关的概念做个讨论。

第三部分 信息以及与其相关的概念

“信息”其实应当是一个需要结合具体使用场景加以区分的概念。它或许因为使用便捷，被应用得过于宽泛，因此对信息及与其相关的概念作进一步讨论是十分必要的。

七、关于信息的一些定义或描述

以下有关信息的内容来自百度百科：

“

信息，指音讯、消息、通讯系统传输和处理的对象，泛指人类社会传播的一切内容。人通过获得、识别自然界和社会的不同信息来区别不同事物，得以认识和改造世界。在一切通讯和控制系统中，信息是一种普遍联系的形式。1948年，数学家香农在题为“通讯的数学理论”的论文中指出：“信息是用来消除随机不定性的东西”。创建一切宇宙万物的最基本单位是信息。

“信息”一词在英文、法文、德文、西班牙文中均是“information”，日文中为“情报”，我国台湾称之为“资讯”，我国古代用的是“消息”。作为科学术语最早出现在哈特莱（R. V. Hartley）于1928年撰写的《信息传输》一文中。20世纪40年代，信息的奠基人香农（C. E. Shannon）给出了信息的明确定义，此后许多研究者从各自的研究领域出发，给出了不同的定义。具有代表意义的表述如下：

信息奠基人香农（Shannon）认为“信息是用来消除随机不确定性的东西”，这一定义被人们看作是经典性定义并加以引用。

控制论创始人维纳（Norbert Wiener）认为“信息是人们在适应外部世界，并使这种适应反作用于外部世界的过程中，同外部世界进行互相交换的内容和名称”，它也被作为经典性定义加以引用。

经济管理学家认为“信息是提供决策的有效数据”。

美国著名物理化学家吉布斯（Josiah Willard Gibbs）创立了向量分析并将其引入数学物理中，使事件的不确定性和偶然性研究找到了一个全新的角度，从而使人类在科学把握信息的意义上迈出了第一步。他认为“熵”是一个关于物理系统信息不足的量度。

电子学家、计算机科学家认为“信息是电子线路中传输的以信号作为载体的内容”。

我国著名的信息学专家钟义信教授认为“信息是事物存在方式或运动状态，以这种方式或状态直接或间接的表述”。

美国信息管理专家霍顿（F. W. Horton）给信息下的定义是：“信息是为了满足用户决策的需要而经过加工处理的数据。”简单地说，信息是经过加工的数据，或者说，信息是数据处理的结果。

根据对信息的研究成果。科学的信息概念可以概括如下：

信息是对客观世界中各种事物的运动状态和变化的反映，是客观事物之间相互联系和相互作用的表征，表现的是客

观事物运动状态和变化的实质内容。

从物理学上来讲，信息与物质是两个不同的概念，信息不是物质，虽然信息的传递需要能量，但是信息本身并不具有能量。信息最显著的特点是不能独立存在，信息的存在必须依托载体。

——百度百科 (<https://baike.baidu.com/item/信息/111163>) 2026年2月9日查询

”

从上文引用内容不难看出，由于看待问题的角度和出发点不同，学界对“信息”这一概念存在诸多不同的解释与理解。

八、客观信息、感知信息和抽象信息

前面我们谈到了感知信息，并在客观信息的基础上定义了感知信息。回顾一下前面的内容：

“

我们身处在客观的世界里，客观世界具有的信息不妨称之为客观信息，生命体通过其具有的感知能力感知到的客观信息就是感知信息，即感知信息是生命体通过感知器官和神经系统的共同作用，对客观世界具有的客观信息在某个方面和某种程度上的反映。

”

那么什么是客观信息？我们暂且将它描述为物体或物质之间的相互作用。这里我们可以把相互作用视作一种持续的状态，因此，将客观信息理解为客观信息流也许更为合适。而生命体凭借自身感知能力捕捉到的客观信息，就是相对于该生命体的感知信息，而相对于人类的感知信息在本文中一般简称为感知信息。

我们需要明确一点，人类的感觉并非凭空产生，更不会天然就是我们当下体验到的状态。打个比方，婴儿每天的饮食种类、进食时间，从来都不是理所当然固定不变的，而是由父母逐一安排的。同理，我们的视觉只能在可见光波段感知景象，听觉也只能在特定频率范围接收声音，其他所有感知都存在类似的范围限制。因此，我们所见、所闻的信息，也并非必然就是我们现在所感知到的样子。客观世界里的蓝色物体，不会只反射可见光波段中蓝色波段的电磁波，也会反射不可见波段的电磁波；蓝色的发光体同理，不会只辐射可见光波段中蓝色波段的电磁波，也会辐射不可见波段的电磁波——只是人类无法感知这些波段的电磁波罢了。显然，人类感知不到的电磁波，不表示它们不存在，否则我们就无法用手机打电话、发信息和视频聊天了。当然，实际情况可能还要更复杂，比如有些颜色的光本身就不是由单一波段的电磁波形成，而是多个波段混合而成的结果。

另一个重要的信息概念是抽象信息，它是感知信息在某个方面和某种程度上的反映。

三者之间简单的关系如下：

信息类别	描述	存在位置	维度
客观信息	客观世界具有的信息	客观世界	多维
感知信息	客观信息在某个方面和某种程度上的反映	感知器官与神经系统	一维、二维和三维(?)
抽象信息	感知信息在某个方面和某种程度上的反映	神经系统	一维

客观信息显然是多维的；感知信息应当是有三维的，不过视觉感知信息一般被认为是两眼分别生成的两个二维信息的合成；抽象信息是一维的，是感知信息的某个方面和某个程度在一维线性空间中的表示。

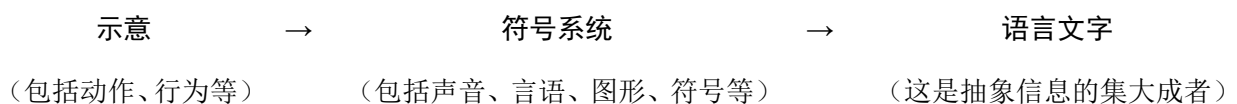
想象一下，当我们闭上眼睛，是无法清晰地重现刚刚看到的完整景象的，即使你用尽全力地去回想，可能在脑中重现的信息也不足原信息的百万分之一，但是如果只是回想刚才景象中部分物品的名称或是它们的位置，则我们基本能够回想起来。这说明我们的大脑不具备主动构建完整感知信息的能力，但拥有在感知信息的基础上，主动构建抽象信息的能力。

而当我们再次睁开眼睛，如果眼前的景象发生了变化，有时候只是细微的变化，我们大部分的情况下都是可以察觉到的。也就是说，我们可以对比当前感知信息和曾经感知信息的异同，这足以证明，大脑的确存储了刚才接收到的感知信息，而且存储的内容应当覆盖了大部分感知信息。

客观信息、感知信息和抽象信息是三种基本的信息分类。对于人类的神经系统来说，感知信息与抽象信息是最重要的两种信息分类，因为这两类信息凝聚了人类共同的感知和认知。还有其他与信息有关的概念，如信息记录与信息表示、直接信息与间接信息、已知信息与未知信息、相对信息与绝对信息，等等。

例如，书上写了一个“火”字，如果你能够理解这个字，那么它就是承载着抽象信息的一条信息记录，属于间接信息；如果你不认识“火”字，那它对你来说就只是一个图形符号，仅属于关于图形符号的感知信息，是直接信息。如果你在你面前点燃一根火柴，你看到了舞动发光的火焰，这是感知信息，也是直接信息；发光的火焰是你可以直接感知的，它的表象是已知信息，但你可能并不清楚火焰其中蕴含的具体的化学反应，这个化学反应就是未知信息。

人类大脑的强大之处在于能够不断深化和推进对抽象信息的理解，下面是抽象信息发展的一个简单过程：



本部分我们对与信息有关的概念进行了讨论，提出了关于信息的三个基本分类，即客观信息、感知信息和抽象信息，并提到了一些其他有关信息的概念，如信息记录与信息表示、直接信息与间接信息、已知信息与未知信息，等等。考虑到实际的情况，我们一般不会在后面的讨论中严格区分各个有关信息的概念，但如果有需要的话，则以本部分讨论的内容为参考基准。

本部分讨论信息的目的在于为进一步讨论大脑存储和处理信息的机制做准备。从刚才讨论的情况来看，抽象信息相对感知信息在信息量和维度上都更少一些，因此我们将从抽象信息的角度来讨论大脑存储和处理信息的机制。这样做的理由是，根据第二部分中有关大脑的生物结构的内容，我们知道大脑在微观的结构上是比较均匀和一致的，都遵守神经元——突触——突触囊泡——神经递质这个结构，因此我们有理由相信大脑处理感知信息和抽象信息的基本机制应当是一样的。

需要指出的是，我们将大脑存储和处理信息的基本单元定位在突触处的突触囊泡，而突触囊泡释放神经递质遵循量子化原则，那么由量子化显示出的运行机制可行吗？当然是可行的，因为突触囊泡不仅遵循量子化机制，而且数量巨大，而我们所熟悉的物理定律其实也是建立在类似的统计基础之上。

以下内容来自《生命是什么》（[奥] 埃尔温·薛定谔 著 邹路遥 译 江苏凤凰科学技术出版社）：

“

物理定律建立在原子统计之上，因而只是近似

如果一个有机体仅由少量原子组成，并且敏锐到能够感受到一两个原子的碰撞，那为什么它就注定无法实现上述目标呢？

因为我们知道，原子无时无刻不在进行毫无秩序的热运动。这么说吧，这种热运动会破坏体系的有序行为。因此，少数原子的行为，不会表现出任何明确的规律。只有针对海量原子的运动，统计规律才能开始起效，并准确预测这些“集合体”（assemblies）的行为。涉及的原子数量越多，规律的准确度也就越高。通过这种方式，系统的行为才真正变得有序。在生物的生命活动中，所有已知能起重要作用的物理和化学规律，都具有这种统计属性。人们能想到的其他规律和秩序，永远会被永不停歇的原子热运动干扰，无法起作用。

大量原子参与产生精确规律的第一个例子（顺磁性）

.....

第二个例子（布朗运动，扩散）

.....

第三个例子（测量精度的极限）

.....

\sqrt{n} 法则

.....

——第 15-24 页

”

第四部分 记忆与回忆、魔方与群——基于群节点的拓扑网络

我们在第三部分讨论了信息的分类问题，并从信息量与维度数量的角度出发，提出从抽象信息切入研究大脑存储与处理信息的机制，而语言文字是抽象信息最终的集大成者，因此，接下来我们将从抽象信息的存储，也就是关于语言文字的记忆展开讨论。

九、静态的记忆和动态的回忆

以下有关记忆的内容来自《脑与认知科学概论（第2版）》（主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社）：

“

记忆这个词包含的内容十分广泛，它涵盖了一个人所拥有的众多技能与能力。首先要了解它的基本含义：学习过后，信息保持一段时间，在一些特定的情境中提取出它们并加以运用。

认知心理学认为，记忆是对输入信息的编码、存储，并在一定条件下进行检索和提取的过程。从这个角度出发可以看出，记忆的整个过程包括三个阶段，它们分别是编码、存储和提取。所有的信息都经过这些过程的加工处理，然后进入长时记忆系统转换为个体的知识与经验，个体随即可以利用它们来解决实际问题。

在认识心理学上，人类的记忆被划分为三个连续的阶段：信息编码、信息存储和信息提取。

信息编码的过程是人的记忆在对刺激信息进行某种方式的转换与编码，在这个过程中，人利用各种方法加工处理自己所要记忆的刺激信息。需要说明的是，在记忆系统结构当中，信息编码不尽相同，它们有着不同的层次或水平，并以不同的形式存在。信息编码同时也是个包含对刺激信息的反复感知、思考、体验和操作的展开过程。新输入的刺激信息需要有知识结构与经验体系形成某种联系，并成为后者的一部分，才能被个体获得，成为知识与经验。当然，例外普遍存在，当某个事物与个体的需要、兴趣、情绪等紧密联系时，一次经历也能够让个体牢固地存储这种信息。

信息存储则是把上一阶段加工处理后的信息，以一定的形式保存在记忆系统中的过程。认知心理学称信息存储的状况为知识的表征，该表征可以是图像，也可以是概念或命题。信息存储作为记忆的中间环节，发挥着非常重要的作用，没有信息存储，记忆根本不可能存在。

信息提取便是指个体在一定情境下，从记忆系统中查找出已存储的信息，重现并运用的过程。一个人记忆力的强弱，其实就表现在这个人对于已存储信息的提取顺利与否。

一个人在记忆过程中获得了成功，即表明以上三个过程都是完整的。倘若失败，则说明以上三个过程并不完整。但就目前的情况来说，若要确切地知道哪个过程出了问题，是较为困难的事情。

认知心理学认为记忆结构是由三个不同的子系统构成的，它们分别是瞬时记忆、短时记忆和长时记忆，如图 5-5 所示。

——第 164, 165 页

”

在上述引用内容中，对抽象信息的存储或者说语言文字的记忆仍然是以一种静态的观点描述，而在第二部分的内容中，我们根据大脑的生物结构，提出大脑是以一种动态的机制存储信息的观点。

那么，我们该如何理解和讨论记忆行为呢？在这里我们引入一个常用的、语义与记忆相近的概念——回忆。记忆是静态的行为，而回忆则是动态的行为。

这里聊一点题外话，语言文字的发展史，既是人类抽象思维的发展史，更是人类认识客观世界的发展史。人类通过语言文字表达思维活动，传递对客观世界的理解，借此凝聚人们对客观世界的共同感知和认知。但如果语言文字在描述客观现象时不够准确，就可能对我们准确理解客观世界产生阻碍。因此，用语言文字表达名称或概念时，明确其确切含义以支撑后续的讨论研究是一项很重要的工作，或者说用于描述客观内容和逻辑思维活动的语言文字应该与科技的发展水平相适应。这样的例子并不少见，比如前面提到的对生命、信息等概念的描述。另外，虽然语言文字是抽象思维的集大成者，但两者在客观上也并不是完全一致的，比如人们常常会感到，说出口的语言无法完全准确传达自己心中所想。因此，就像生产关系需要适应生产力的发展一样，语言文字也需要不断发展，才能适应抽象思维的发展，适应人类对客观世界不断深化的认知。

现在继续回到刚才的讨论，我们通过对记忆所指行为的重新理解，改用“回忆”替代原有的“记忆”来描述相关过程，这样就将信息存储的描述逻辑从原本的静态记录模式，转变为动态回溯模式。新的描述更加符合大脑中突触处的突触囊泡的状态处于动态变化的客观事实。下面，我们进一步讨论这里的动态机制是如何存储信息，或者说回溯信息的。

十、回忆、魔方与群

现实生活中恰好存在一种常见事物，其运行逻辑与回忆的机制高度相似，那就是魔方还原。魔方作为经典的智力玩具，核心玩法就是将打乱的色块恢复到初始状态，而回忆本质上也可以理解为一种状态还原过程。因此可以推测，突触处的突触囊泡的运行逻辑遵循与魔方类似的机制，魔方经过特定步骤可以回到初始状态，突触处的突触囊泡也可通过一系列生理过程恢复到某一特定状态，这个过程为回忆行为的实现提供了生物学基础，也可以说为实现信息的存储提供了生物学基础。

以下有关魔方的内容来自百度百科（<https://baike.baidu.com/item/魔方/5275>）：

“

三阶魔方变化数

通常所说的魔方，即指三阶魔方，为 $3 \times 3 \times 3$ 的立方体结构，由 26 个色块组成。三阶魔方，通过旋转，总共有 43, 252, 003, 274, 489, 856, 000 $\approx 4.3 \times 10^{19}$ 种变化。

三阶魔方的变化数原理如下：

8 个角块：可以互换位置 (8!)，也可以翻转方向 (3⁸)，但无法单独翻转一个角块 (1/3)，所以有 8! \times 3⁷ 种变化。

12 个棱块：可以互换位置 (12!)，也可以翻转方向 (2¹²)，但无法单独交换一对棱块 (1/2)，亦无法单独翻转一个棱块 (1/2)，所以有 12! \times 2¹¹ / (2 \times 2) 种变化。

6 个中心块：固定不可移动。综上，三阶魔方共有 $\frac{8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{11}}{2 \times 2} \approx 4.33 \times 10^{19}$ 种变化。

正 n 阶魔方变化数

二阶至十五阶正立方体魔方的变化总数如下：

阶数	变化数 (约数)
二阶魔方	3.67×10^6
三阶魔方	4.33×10^{19}
四阶魔方	7.40×10^{45}
五阶魔方	2.83×10^{74}
六阶魔方	1.57×10^{116}
七阶魔方	1.95×10^{100}
八阶魔方	3.5×10^{217}
九阶魔方	1.4×10^{277}
十阶魔方	8.298×10^{349}
十一阶魔方	1.085×10^{425}
十二阶魔方	2.06×10^{513}
十三阶魔方	8.76×10^{603}
十四阶魔方	5.4×10^{707}
十五阶魔方	7.458×10^{813}

正 $n(n \geq 2)$ 阶魔方变化数公式：

奇数阶：

$$N = \frac{8! \times 3^7 \times 12! \times 2^{10} \times (24!)^{\frac{(n-3)(n+1)}{4}}}{24^{\frac{3[(n-2)^2-1]}{2}}}, n = 2k + 1, k \geq 1, k \in Z$$

偶数阶：

$$N = \frac{7! \times 3^6 \times (24!)^{\frac{n(n-2)}{4}}}{24^{\frac{3(n-2)^2}{2}}}, n = 2k, k \geq 1, k \in Z$$

”

以三阶魔方为例，即使只有 6 种颜色，26 个色块，其呈现的状态也可以高达约 4.3×10^{19} 种。根据第二部分中的估算，每个突触约有 100~200 个突触囊泡，突触囊泡含有不同的神经递质以区分其种类，因此，如果将突触看成一个节点，则每个节点都是一个含有状态数量极其巨大的群，并且这样的节点在不计算组合的情况下有大约 1000 万亿个（突触的数量约为 1000 万亿个）。

至此，我们得到了一个关于生物神经网络（Biological Neural Network, BNN）的数学模型——基于群节点的拓扑网络。

十一、基于群节点的拓扑网络

基于群节点的拓扑网络是由万亿数量级的节点相互连接构成，其中每个节点都可以看作是一个类似高阶魔方的群，节点或节点组合的一系列状态的变化，会被其他的节点或节点组合的状态变化记录和反馈，而大脑的神经元——突触——突触囊泡——神经递质的结构为该模型结构提供了强有力的生物学支撑。

除此之外，我们从最重要的抽象信息——语言文字的分析中，也可以得到类似的印证。以下内容来自《语言文字、思维活动和大脑的功能逻辑——基于逻辑存储结构的推理模型》：

“

摘要三：语言文字是高维空间的思维活动在低维空间上最重要的投影。其中，语言是高维空间的思维活动在一维空间上最重要的投影；文字是高维空间的思维活动在二维空间上最重要的投影。

摘要十一：思维活动借助语言文字呈现出了一个关于概念的集合，显然这是一个集合的集合，其进一步展现出群论中的么半群和拓扑学中的拓扑空间的特征。

摘要十二：大脑中信息的存储应符合世界的规律，即在生理层面，信息的存储需遵循生物或物理规律，而在逻辑层面，信息的存储则应遵循数学规律，即应当有相应的数学工具可以进行描述或解释，若现有数学工具无法胜任，则创造新的数学工具进行描述或解释。

摘要十三：推测大脑中信息的逻辑存储结构是一种三维空间点阵形式。这是一种既极其简单又可理解，还可以高效

地存储和操作超大规模各类信息的存储结构。

”

不过，在写这篇文章的时候，笔者还没有了解有关神经科学、分子生物学等方面的知识，且对初步学习的相关数学知识理解不足，于是认为语言文字展现出的群的特征需要对应着大脑的三维生物学结构，因此当时提出了一个三维空间点阵形式的存储结构，实际上不管是从群的定义来看，还是从一些具体的群来看，三维的结构都不是必须的。

当然，仅仅有这个基础模型结构还远远不够，我们还需要进一步探究大脑在各阶段处理信息时的具体结构与参数。

第五部分 其他的问题

结合当前神经科学的研究内容以及对回忆过程的重新理解,本文提出大脑中信息的存储与处理是基于群节点的拓扑网络结构。需要说明的是,目前仍有诸多问题不清楚是否可以被纳入这个模型框架,原因在于:第一,在神经元——突触——突触囊泡——神经递质这个结构中,不知道是否还存在其他适用的数学模型;第二,大脑的组成显然不止这一结构,至少还包含神经胶质细胞与其他非神经元细胞。

十二、意识和脑中的样本

以下关于意识和脑中的样本的内容来自《脑与认知科学概论(第2版)》(主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社):

“

意识既是哲学、心理学、人类文化学等人文社会科学研究的重要范畴,又是物理学、生物学、生命科学、人体科学、脑科学等自然科学关注的焦点。意识是脑的机能,这是生物学、心理学的观点。从一定意义上说,生物学、化学、生命科学、脑科学等都是物理学的延伸,现在物理学又回过头来,研究人类千百年来一直思考的问题——意识。本节将从心理学、神经科学等不同角度,探讨脑与意识的奥秘。

1. 意识的基本概念

意识(Consciousness)是人们对自身以及周围世界“感知”的心理现象。人的意识总是处于不同的状态,这与注意程度有关。……

在哲学中,意识是指人所特有的精神活动,包括感性认识活动、理性认识活动以及感情、意志等一系列复杂的心理活动。意识是自然界长期发展的产物和社会的产物,它的本质是人脑的机能对存在的反映。人脑是意识的物质承担者。意识是对存在的反映,人脑并不能自动产生出意识来,只有当客观事物在人的实践过程中作用于人的感觉器官,反映到人脑并经人脑加工之后,才形成意识。人脑是个“加工厂”,它通过对来自外部世界的“原材料”即各种信息,进行加工、改造、制作,才产生意识。所以,没有被反映者,就不可能有反映。意识的本质表明,它对物质有依赖性,是第二性的东西。无论意识的具体形式如何复杂多样,归根到底,是高度发达的物质——人脑对物质世界的某种反映。

2. 意识的产生

(1) 样本与样脑

样本是事物在脑中的代表符号。人们看到、听到、触摸到的事物都是通过感觉神经以信号的形式传递到脑中的。信号是杂乱的,其中包含多个事物,脑通过交换获得所需的事物。这个事物在脑中是用一系列的符号集合表示的,这就是样本。事物分为形象事物和抽象事物,样本也分为形象样本和抽象样本,形象样本是表示具体事物的样本,如物体的形状、结构、色泽等,抽象样本是思考问题、认识事物需要借助的样本,如语言、概念等。

丘脑 (Thalamus)、脑干之外的脑都是样脑, 包括大脑皮质、下丘脑、杏仁核、基底核、小脑等。样脑是由功能区、核团构成的, 功能区、核团能够独立完成样本的交换产出功能, 不同的功能区或核团完成不同的样本交换产出功能。

样脑的神经元中有遗传信息, 样本是数个神经元的遗传信息的集合。少数样本是先天遗传的, 大多数样本是后天通过学习建立的, 是数个样脑神经元遗传信息的连接, 是客观事物在脑中的代表符号。这些样本存储在功能区、核团中, 是样脑交换传入样本、产出对应样本的参照依据。

(2) 丘觉的显现

丘觉, 简单地说, 就是丘脑神经元的觉醒。当数个丘脑神经元觉醒后, 会显示一个意思, 也就在脑中产生了意识。丘脑由神经元构成, 每个丘脑神经元都通过遗传路上特定的遗传信息, 不同的神经元遗传信息不同, 数个神经元合成能够表示一个意思, 这个意思即为丘觉。神经元是构成丘脑的物质, 遗传信息通过遗传而固定在丘脑神经元中。

当人们观看事物时, 眼睛就如同摄像头, 可以将图像转变为信号传到大脑枕叶视区, 大脑皮质交换产出事物的样本, 样本点亮丘觉, 丘脑就显现了这个事物, “看”到了这个事物。

(3) 丘觉的发放与意识的产生

丘脑相当于一个意思显现器, 当丘觉显现后, 会立即发放出来, 通过大脑联络区向外扩散, 从而左右整个神经系统的活动, 于是意识就产生了。大脑皮质的联络区是丘觉活动的场所, 主要是大脑前额叶、大脑后部的联络区。大脑前额叶是丘觉汇集的场所, 丘脑各个核团合成发放的丘觉在这里汇集、留存、斗争。当丘觉发放到大脑皮质联络区后, 就能在这里获得暂时留存, 并向外 (其他脑、核团) 扩散, 等于告诉其他脑现在有一个这样的意思, 其他脑会根据这个意思展开活动。

.....

(4) 样本点丘觉的神经基础

.....

人们不能凭空产生对事物的意识, 外界事物并没有跑到我们的脑子里, 对事物的意识是事物在脑子里的映像。这个意识包含两个内容, 一个是脑中代表事物的符号, 即样本; 另一个是指示这个事物是什么意思, 即丘觉。样本是意识的外壳, 是大脑、基底核、下丘脑、杏仁核、小脑等交换产出的; 丘觉是意识的内核, 是丘脑合成发放出来的。样本只是事物在脑中代表符号, 在脑中表示出这个事物的长、宽等形状外观, 没有意义指示功能。事物的意义是丘觉发放、指示出来的, 丘觉发放一个意思也就产生了对事物的感知, 产生了对事物的意识。

.....

丘觉是支撑意识的核心结构, 是丘脑发放的。.....如果没有遗传与这个事物对应的丘觉, 也就不能意识到这个事物, 客观世界的许多事物是意识不到的, 如人们不能看到紫外线、听到超声波。这是因为没有遗传这样的丘觉, 因此不能通过学习看到紫外线、听到超声波。

.....

(5) 丘觉是根据样本即时合成的

丘觉是根据样本即时合成的，合成的丘觉是临时存在的，并不会固定下来，当丘觉熄灭后，在丘脑中只有神经元遗传信息。丘觉的合成发放是根据样本动态变化的，因此意识也是不断转换的。丘觉的合成非常类似于物理学中的矢量合成，丘觉遗传信息相当于各个矢量，合成的丘觉是一个独立的矢量。矢量的合成是没有限制的，丘觉的合成理论上也是没有止境的，但丘觉的宽度、广度不能超越极限，否则只能产生混乱意识。……

(6) 样脑的交换产出

当样本传入某个样脑的功能区或核团时，这个功能区或核团的功能被激活，将这个传入样本与自有样本进行对照，找出两者的异同后产生一个相应的样本，点亮丘觉或发送到另一个功能区、核团，这就是样脑的交换产出功能。由于大脑皮质等样脑具有极其强悍的交换产出功能，一般这个过程在极短的一瞬间完成，不会造成意识的停顿。

——第 72、73、74、75 页

4.2.3 感知模型

20 世纪 50 年代末，Rosenblatt 提出著名的视知觉模型——感知机 (Perceptron)。它具有与脑结构部分相似的结构。简单的感知机的基本结构如图 4-7 所示。该模型共分为三层，信息由感知层输入（相当于视皮层原感区），经过联合层最后到决策层，由决策层输出，每一层都是由一组神经元所组成的。感知层与联合层的连接是随机的，联合层与输出层之间的联系是可塑的，即可通过学习而改变。……

(图略) 图 4-7 感知机示意图

——第 107 页

”

在以上的引用内容中提出了“脑中的样本”这样一个概念，就目前来看，“脑中的样本”既不能确认，也不能否认，但是很有必要讨论。大脑凝聚了人类对客观世界共同的感知能力，不以个体的意志为转移。这个感知能力从进化论的角度来说，可以延伸至相当一部分种类的生命体。以视觉感知能力为例，因为我们具有共同的对客观世界的感知能力，客观性的世界就意味着不能是你看到的乒乓球是白色的，而当我看到的时候乒乓球就变成了黑色的了，更不能是你能看到乒乓球的存在，而我却看不到乒乓球的存在。这就表示我不一定到过你当时所到过的客观环境，但是如果我到了当时的那个客观环境，则我会与你得到同样的感知景象。

假设一：脑中的样本存在

基于刚才的分析，人们的大脑中会存在其还未曾到过的客观环境的样本，这意味着每个人的大脑中存在的样本是这样的——所有的人类所能感知的所有信息的样本，包括所有过去的人，所有现在的人和所有未来的人，从进化论的角度来看，还可以延伸至相当一部分种类的其他生命体。也就是说你所能够

感知到的一切感知信息都已经“存储”在你的大脑中了，无论是曾经感知的，现在感知的，甚至是未来感知的各种信息，没有存在于你的大脑中的那些样本，你根本不会感知到客观世界所对应的信息！

显然，这是一个超级巨大的样本空间。不过，考虑到基于群节点的拓扑网络是由万亿数量级的节点相互连接构成，且每个节点都可以看作是一个类似高阶魔方的群，并拥有远超万亿数量级的更加超级巨大的状态数量，因此这样的样本空间也不是不可能存在。从生命进化的角度来看，你所能够感知到的信息与你大脑中的样本又是一个先有鸡还是先有蛋的问题。这真是一件令人难以置信的事情！

假设二：脑中的样本不存在

这样的话则意味着我们的大脑在进化的过程中，对所能感知到的客观世界的信息所遵守的物理规律已经完成了“学习”。如何学习呢？以下内容来自《语言文字、思维活动和大脑的功能逻辑——基于逻辑存储结构的推理模型》：

“

综合上述讨论和推测，大脑处理信息的推理模型可作如下描述：根据场景信息在三维空间点阵中存储结构的相似性，构建事物的概念；根据场景信息生成的先后顺序，建立事件的因果关系。这就是基于逻辑存储结构的推理模型的两点基本内容。

根据上面这两点基本内容，可以再回到前面关于语言文字的单位与思维活动的单位的对应关系的讨论中，其中第一组对应关系，即语言文字中的词语、词组分别与思维活动中概念、简单的概念组合的对应关系，主要体现了推理模型基本内容中的第一点。场景信息在三维空间点阵中存储会呈现出整体结构和各种各样的局部结构，单独的结构可以抽象为一个概念，并可以投影出相应的词语，多个局部的结构可以抽象组成为简单的概念组合，并投影出相应的词组。

第二组对应关系，语言文字中的句子与思维活动中的判断的对应关系，则根据句子的复杂程度，简单句子归入上面第一组对应关系，复杂结构的单句（其本质是由若干有因果关系的简单句子组成）归入下面第三组对应关系。

第三组对应关系，即语言文字中的一组句子与思维活动中推理的对应关系，或者说语言文字中的具有复杂结构的单句与思维活动中的推理的对应关系，则主要体现了推理模型基本内容中的第二点。各种复杂的逻辑推理活动在本质上就是因果关系，即基于场景信息生成的先后顺序而建立的各种各样的因果关系，包括直接的因果关系、间接的因果关系、充分的因果关系、必要的因果关系、充要的因果关系、并行的无因果关系，等等，再加上从场景信息中抽象得到的各种概念，由此形成复杂的逻辑推理活动，并相应地投影出语言文字中的一组组的句子，或具有复杂结构的单句。同时，由于在交际的过程中，思维活动通过语言文字表达的信息为唤醒大脑中相关场景信息的信息，那么根据交际双方的理解水平，表达复杂思维活动的语言文字也可以无需都要全部投影出来，只要投影出的语言文字可以唤醒相应的场景信息即可。典型的成语和俗语，通常只寥寥数字，但表达出丰富的信息，如“南辕北辙”“叶公好龙”“厚积薄发”“为了一口醋包了一盘饺子”，等等。

或许正是凭借以上两点简单的内容，地球的生命工程在几十亿年的反复学习、纠错和迭代的过程中，尝试了几乎所

有的不可能，无数的物种在残酷的竞争中被淘汰，最终进化出具有极其复杂的逻辑推理能力的人类大脑。同时，部分思维能力在生命的进化过程中被固化成为生命的本能。

”

上面这段内容从语言文字的角度进行分析和讨论，并提出如下观点：“各种复杂的逻辑推理活动在本质上就是因果关系，即基于场景信息生成的先后顺序而建立的各种各样的因果关系，包括直接的因果关系、间接的因果关系、充分的因果关系、必要的因果关系、充要的因果关系、并行的无因果关系，等等，再加上从场景信息中抽象得到的各种概念，由此形成复杂的逻辑推理活动，并相应地投影出语言文字中的一组组的句子，或具有复杂结构的单句。”

这一观点其实也指出了生命体的神经系统是怎么认识客观世界的规律的，即神经系统根据感知到的客观世界的信息流，按照信息流的先后顺序或者说因果关系，建立起对客观世界运行规律的认识，其中生命体对部分规律的认识可能在进化的过程中已经被固化为其本身的一部分了。

小结：这里的两个假设性的讨论是想提出这样的一个观点，基于群节点的拓扑网络是用于存储和处理感知信息和抽象信息的，但还有很多问题的解决是不一定被包括在这个网络结构中。比如，根据当前的生物学研究进展来看，我们既无法解释基于群节点的拓扑网络的生物结构为何呈现出当前形态，以及是如何进化成当前形态的，也无法确定基于群节点的拓扑网络能否覆盖意识产生、感知形成等其他问题的解答。此外，“群”本身是一个很大的概念，每个节点具体属于哪一类群、对应的具体参数是什么、节点之间存在怎样的组合关系、不同节点组合彼此间呈现何种拓扑关系，这些问题都有待进一步的研究与讨论。

十三、需要从生命进化角度看待的一些问题

有关神经系统的一些问题，从其本身来找答案也许方向不一定对，如果从生命进化的角度来看可能好一些，比如：

1、广义上的意识很可能产生于有机分子到病毒分子这个进化阶段，这也可能是广义上生命产生的阶段。

2、广义上的神经系统可能产生于病毒分子到单细胞生命这个进化阶段。不过，生命之树是从单细胞生命开始，病毒并没有被包括在生命之树中，但是显然科学家们对此也是有争论的，因为单细胞生命不仅是相对于生物分子来说太复杂了，而且即使是相对病毒分子来说也是太复杂了，总之进化的过程实在是太跳跃了！

3、如何从感知信息中提取特征值以形成抽象信息？从生命进化的角度来看，理应是先有简单的感知信息，而后在此基础上形成丰富的感知信息，也即理应先有了能够表示特征值的简单的感知信息，而

后才有了在简单的感知信息的基础之上形成的丰富的感知信息。

4、感觉是如何产生的？从生命进化的角度来看，从视觉感知信息去研究不是一个适合的方向，虽然视觉感知信息在信息量的获取比例上占据绝对的主导位置，但它显然并不是生物第一个出现的感觉，因此从视觉上去追溯研究感觉并不是一个适合的方向。

5、抽象思维是谁点亮的？视觉也大概率不是那个点亮抽象思维的感觉，在研究抽象思维的时候，似乎更应该从听觉入手，因为语言的诞生是抽象思维形成的标志。

6、当然不是说视觉不重要，显然作为大部分生命体感知客观世界的最主要方式，它将外部的客观世界搬进了大脑之中，在它出现的那一刻起，不管是比它出现更早的感觉，还是在它之后才出现的感觉，都将以它为中心，让生命体构建起对客观世界的景象。

以上几个简单举例旨在说明，对于生物神经网络（**Biological Neural Network, BNN**）的数学模型——基于群节点的拓扑网络来说，其基础初始参数或许需要跳出模型本身才能确定。当然也可以借助目前的人工神经网络（**Artificial Neural Network, ANN**）去模拟这个生物神经网络（**Biological Neural Network, BNN**）的模型，以加速获取初始的参数。

第六部分 梳理和总结

这里对本文的主要内容进行梳理和总结。首先，我们对有关感知信息的几个数值进行了估算，并结合神经科学和分子生物学的研究内容展开对比分析。因为在神经元——突触——突触囊泡——神经递质这个结构中，除了该结构的各层级单元与感知信息量之间绝对数值的对比之外，相对于大脑接收到的视觉感知信息的帧数来说，神经元和突触处于一个相对稳定的状态，或者说它们的状态变化是跟不上视觉感知信息的变化频率，而神经递质分子由于分子热运动等原因，不可能对其单独统计和区分，所以综合而言，我们将信息存储和处理的基本单元定位在突触处的突触囊泡，即神经递质分子依托突触囊泡释放神经递质分子遵循量子化原则等几个特征，间接实现信息的存储和处理，并且从数量上看，突触囊泡约 15 亿亿个的数量也应当能够满足信息量的要求。

不过，到了这一步还无法推测突触处的突触囊泡的运行机制。在进一步讨论其运行机制之前，我们对有关信息的内容进行了讨论，提出了信息的三个基本分类，即客观信息、感知信息和抽象信息，同时指出了有关信息的其他概念，如信息记录与信息表示、直接信息与间接信息、已知信息与未知信息、相对信息与绝对信息，等等。

接着，本文提出这样一个观点，考虑到大脑在微观的结构上是比较均匀和一致的，都遵守神经元——突触——突触囊泡——神经递质这个基本的结构，因此有理由相信大脑处理感知信息和抽象信息的基本机制应当是一样的。因为感知信息在维度和数量上都远超抽象信息，且曾经感知过的感知信息无法主动重新生成，只能被动地与当前感知的信息进行比对，而抽象信息则相对简单，且作为抽象信息最终的集大成者——语言文字，是大脑进行思维活动的主要手段，所以本文从抽象信息的存储，或者说语言文字的记忆入手去讨论突触处的突触囊泡的工作机制。

因为“记忆”这个词语在描述信息存储时，使得存储像是一种静态的行为，这与突触处的突触囊泡处于动态变化的生物特征不相符合，本文用“回忆”代替“记忆”，这样就将静态的信息存储变为动态的信息回溯，就符合了突触处的突触囊泡处于动态变化的生物特征。又由于回忆行为与魔方的还原操作具有相似性，而魔方在数学上可以用群来描述，因此提出神经元——突触——突触囊泡这个结构的数学模型是一个基于群节点的拓扑网络，每个节点都是一个类似于高阶魔方的群节点，而在这个基于群节点的拓扑网络中这样的节点有约 1000 万亿个。

需要指出的是，这是一个处理感知信息和抽象信息的生物神经网络(Biological Neural Network, BNN)的数学模型，还有很多问题的解决不一定包括在这个网络中，如意识产生、感知形成等其他问题。这些问题的解决很可能需要从生命进化的角度去追溯。同时，群是一个很大的概念，每个节点具体来说究竟是什么样的群，更具体的参数是什么，依赖于进一步的研究内容。

附录

附录 1 关于生命的内容

以下关于生命的内容来自《复杂生命的起源》（[英]尼克·莱恩 著 严曦 译 贵州大学出版社）：

“

……然而，大多数生物学家甚至都不把它算作活物。病毒自己根本不在乎。

为什么病毒不算活物？因为它自身没有任何新陈代谢能力，完全依赖宿主的能量生产机制。那么问题来了：新陈代谢是否是生命的必要特征？不假思索的回答是“当然是”。但根据是什么？病毒利用自身的周围环境复制。但人类也是如此：我们以植物或动物为食，我们呼吸氧气。如果把我们与周围环境隔离，比如头上套个塑料袋，几分钟内就会窒息而亡。可以说，我们寄生于我们所处的环境，就像病毒。植物也是如此。植物需要我们，正如我们需要植物。……所以植物和我们一样，也是寄生于它们所处的环境。

从这个视角来看，植物、动物和病毒之间的区别，只不过在于环境的慷慨程度。病毒进入我们的细胞，就像进了天堂，一个应有尽有的安乐窝。彼得·梅达沃曾把病毒形容为“一条外表包裹着蛋白质的坏消息”；它们能以如此简单的形式存在，正是因为周围的环境资源丰富。植物处于另一个极端，它们对环境的需求非常低，只要有光、空气和水，植物几乎能在任何地方生长。……

所以，万物都离不开环境的支持，唯一的问题是，具体需要多少支持？与转座子（即跳跃基因）这样的 DNA 寄生物相比，病毒可谓极其复杂。转座子从不离开自己的安乐窝，只在整个基因组中到处复制自己。质粒（通常是微小的独立环状 DNA，包括几个基因）可以通过纤细的连接管，从一个细菌直接传递到另一个细菌，无须武装自己来面对外部世界的风险。那么，转座子、质粒和病毒算是活物吗？它们都有某种微妙的“目的性”，都有利用生物环境复制自身的能力。很明显，从非生命到生命是一个渐变的连续体，非要在某个地方划清界限，没有什么意义。学术界对生命的定义大都集中在生物本身，而忽略了生命寄生于环境的本质。……环境一词从本身的词义来看，仿佛与生命界限分明；我们会看到事实并非如此。二者从来都密不可分。

如果生命与自己适应的环境互相隔离，会发生什么？当然是死亡，非生即死嘛。但这个二分法并不总是成立。当病毒在宿主细胞外与生存资源隔离时，它们并不会马上腐坏和“死去”；它们面对外部世界的侵蚀时表现得十分坚韧。……病毒抵抗侵蚀的能力类似于细菌孢子。细菌孢子能够进入一种暂停生息的休眠状态，并保持很多年。……

……严格地说孢子不算活着，尽管大多数生物学家都会把它们算作生命，因为它们保持着复活的潜力。能够回到生命状态，当然不能算死了。我找不到任何理由对病毒另眼看待：一旦出现合适的环境，它们也会“醒过来”，开始复制自己。水熊虫，真正的动物，不也就是如此吗？生命的实质在于结构（部分由基因和演化决定），但是生存（生长与繁殖）的实质在于环境，在于结构和环境如何相互关联。……

——第 52, 53, 54, 55 页

”

以下关于生命的内容来自《进化》（[英] N·H·巴顿 [美] D·E·G·布里格斯 J·A·艾森 D·B·戈尔茨坦 N·H·帕特尔 著 宿兵等 译 科学出版社）：

“

要研究生命的起源需要知道生命体区别于非生命体的特征。根据我们的目的，我们使用以下定义：生命是由有组织的物质构成的，它能够生殖并被自然选择。这个定义使我们能够区分生命系统和非生命系统，并且能够鉴别出一些所有生命系统都应该存在的功能。为了生殖，一个生命系统必须能够积累生物物质并使其结构化为一体的、可遗传的生物结构。这些过程需要能量，一个化学反应的网络（如代谢）以及一些特征的记忆。更进一步，为了使自然选择能够发生作用，这个系统必须能够产生可遗传的多样性。

——第 89 页

”

以下关于生命的摘要内容来自《生命的逻辑：整合子生命观概论》（白书农 著 北京大学出版社）：

“

无论早期的先贤用什么指标，他们显然已经注意到在自己生存的空间中，存在有生命的和无生命的两大类实体。而在所谓的“有生命”的实体存在中，又有不同的类群。于是，在人类的认知空间中，就出现了“生物”和“生命”两个用于描述这些存在的概念。和之前的基于常识的“活物”或“死物”的区分不同，在这里，生物与非生物，已经有了丰富的特征描述作为基础。于是出现了基于举例和归类的对“生物”或者“生命”的定义。可是，虽然“生物”和“生命”这两个概念已经成为现代语言体系中几乎所有受过基础教育的人都耳熟能详的概念，可是从上一章我们对当下生物学体系中有关“生物”或者“生命”的概念的一些初步分析可以看出，对这两个概念的定义基本上停留在基于举例和归类的层面上，对于所描述对象的本质仍然语焉不详。我们还是回到词典这种在反映当下认知方面具有权威性的信息来源来评估一下这两个概念的定义方式。

对于“生物 (organism)”一词，《辞海》的注释是这样的：自然界具有生命的物体。包括动物、植物、微生物三大类。牛津词典的注释是这样的：an individual animal, plant, or single-celled life form。中国最容易检索的百度词条的注释是这样的：具有动能的生命体，也是一个物体的集合，而个体生物指的是生物体，与非生物相对。从这些注释可见，人们目前是以“生命”来定义“生物”的。那么“生命 (life)”又是怎么被定义的呢？

对于“生命 (life)”一词，《辞海》的注释是：由高分子的核酸蛋白质和其他物质组成的生物体所具有的特有现象。牛津词典的注释是这样的：the condition that distinguishes animals and plants from inorganic matter, including the capacity for growth, reproduction, functional activity and continual change preceding death。百度词条的注释则是：在宇宙发展变化过程中自然出现的存在一定的自我生长、繁衍、感觉、意识、意志、进化、互动等丰富可能的一类现象，也可以包括生化反应产生的能够自我复制的氨基酸结构，以及真菌、细菌、植物、动物(人类)，就未

来的发展可能而言，人工制造或者促成的机器复杂到一定程度，具备了某种符合生命内涵的基本属性的现象也将可能纳入生命的范畴，包括人机混合体，纯自由意志人工智能机器人等。和前面不同词典有关“生物(organism)”的定义相对一致不同，不同词典对于“生命(life)”一词的定义，就出现了侧重点的分歧。在《辞海》的定义中，把侧重点放在了由特定化学组分组成的生物体所表现出来的现象上；在牛津词典的定义中，则进一步细化了目前已知的生物体所具备而非生物体所不具备的属性；百度词条给出了更多的现象，可是给出的信息量越大，越无法说清什么叫“生命”。

词典上“生物”和“生命”词条注释中包含信息的语焉不详，激发了很多学者的好奇心来揭示生命的本质。在和钱纭、葛颖一起撰写 Structure for Energy Cycle: A unique status of Second Law of Thermodynamics for living systems 一文、完成钱纭布置的“家庭作业”时，我发现从 20 世纪初苏联学者 Oparin 就生命起源提出“原始汤”假说以来，在正式的学术性科学杂志上发表的(科幻或者哲学的说法不包括在内)、由不同专业背景学者提出的有关生命本质的猜想或者假说不下二三十种。后来发现有人专门对“生命”一词的定义做过研究，说有两百多个不同的定义。表 3-1 列举了部分作者的观点。在这些猜想或者假说中，最广为人知的莫过于因量子力学研究而得到诺贝尔物理学奖的薛定谔在 1944 年演说中提出的生命是一种“负熵”系统。此外，还有大名鼎鼎的计算机之父 J. von Neumann 在 1951 年提出的生命的本质属性是自我复制；和 J. Watson 一起提出 DNA 双螺旋模型，并提出遗传信息传递的“中心法则”的诺贝尔奖得主 F. Crick 在 1981 年提出的生命系统是一个可以发生突变和修复的编码系统；因超快反应研究而得到诺贝尔化学奖的 M. Eigen 提出的生命系统是一个超环反应系统；以研究非平衡态不可逆过程的热力学而获得诺贝尔化学奖的 I. Prigogine 提出的生命过程是一个耗散结构等等。在 1944 年有人以“*What Is Life*”为标题出版了薛定谔的演讲之后，目前可以在 Amazon 上查到另外 6 本同样标题的书(图 3-1)。作者们各自从不同的角度讨论生命的本质问题。那么，面对各路大家的众说纷纭，对于初学者而言，有没有一个比较全面反映当今科学界对生命本质认知的简明扼要的表述，为大家了解生命提供一个起点呢？

表 3-1 不同学者对“生命(Life)”一词内涵的不同解读

英文原文	中文翻译
Noireaux et al, 2011 一文中引用的说法	
von Neumann, 1951: Self-reproduction	自我复制
F. Crick, 1981: A coded system with mutation and error correction	具有突变和纠错能力的编码系统
S. Kauffman, 1995: An emerging phenomenon and a dynamical system where signal to noise is just marginal	信噪比适度的衍生现象和动力学系统
S. Gould, 2002: A historical phenomenon	历史现象
N. Lane, 2005: Metabolism with a permanent absorption and transformation of nutrients from the environment, a constant flux of energy is needed to sustain the operation of this living dynamical system	持续从环境中吸收和转化营养的新陈代谢，这个活的动力学系统依赖于稳定的能量流来维持运行
Bai et al, 2018 一文中引用的说法	
S. Rose: Distinguishing of life with non-life: infused with the breath of life	生命与非生命的区别在于是否充满生命气息
理论 Aristotle's teleology	目的论
推理 Vitalism by Glisson, Malpigi, and Wolff	活力论

Oparin' s theory and its elaboration by Dyson	奥巴林的“原始汤”理论。该理论被 Dyson 进一步发挥
Schrödinger' s neg-entropy	负熵
Blum's organic evolution in a perspective of the 2 nd of thermodynamics	在热力学第二定律下的有机演化
Eigen & Schuster' s hyper-cycles	超环理论
Smith & Morowitz' s metabolism first	代谢优先
Miller-Urey' s synthesis of amino acid	人工条件下氨基酸合成
Orgel' s study on RNA world	实验室条件下 RNA 合成
Wächtershäuser's amino acid integration with surface catalysis	在有表面催化条件下氨基酸合成多肽
Copley's protein moonlighting	蛋白质的衍生功能
其他说法	
Gerald Joyce, 1994 (A NASA definition): Life is a self-sustained chemical system capable of undergoing Darwinian evolution	生命是可以发生达尔文演化的自我维持的化学系统
Robert Shapiro, 2007: A Simpler Origin of Life——alternative version of the metabolism first	有关生命起源的随机碰撞理论, “代谢优先”观点的另一种版本
Freeman Dyson, 2007: A Garbage-bag Model	垃圾袋模型
Doron Lancet, 2000: The GARD model (The graded autocatalysis replication domain)	复制模块的分级自催化模型
Seth Lloyd, 2007: A Complexors proposal	复杂子
Noireaux V, Maeda Y T, Libchaber A. (2011). Development of an artificial cell, from self-organization to computation and self-reproduction. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 108 (9): 3473-3480.	
Bai S N, Ge H, Qian H. (2018). Structure for energy cycle: A unique status of second law of thermodynamics for living systems. Sci. China Life Sci., 61 (10): 1266-1273.	
Machery E. (2012). Why I stopped worrying about the definition of life... and why you should as well. Synthesis, 185: 145-164.	
——第 31, 32, 33 页	

什么是生命现象的物质性呢? 我认为, 首先是作为生命现象基础的生命分子的物质属性; 其次是生命分子相互作用的化学属性; 最后影响生命分子相互作用的能量关系。

生命分子的物质属性——碳骨架分子

……毕竟, 目前所知道的地球上生物体的化学组成中的所谓“生命分子”, 即蛋白质、核酸、多糖和脂类, 其基本结构都是由碳原子经共价键关联起来作为骨架加上各种修饰所形成的链式分子(图 3-2)。然而, 目前地球上已知的化学元素有 118 种, 为什么生物体的化学组成是碳骨架(carbon-based)?

碳是化学元素周期表中第 6 号元素(图 3-3)。按照目前的化学知识, 碳的原子核外有两层电子, 外层是 4 个电子, 可以形成 4 个共价键。这可能是碳成为生物体化学组成骨架的必要条件。

——第 37 页

生命分子互作的化学属性——独特的分子间力

……

目前文献中能看到的有关生命起源的研究中，最为人关注的，是作为多肽构成单元的氨基酸如何形成多肽，或者核酸构成单元的核苷酸如何形成核酸。根据现有的生命科学知识，这类问题好像是有现成的标准答案的：中心法则——DNA记录多肽的信息，通过 mRNA 这个中间载体，指导核糖体合成多肽。可是再向前追问一步，地球上最初的 DNA 是哪里来的？最初的核糖体是哪里来的？由于这些生命分子（如 DNA）或者生命分子的复合体（如核糖体）都太复杂了，似乎很难想象它们生来如此！尽管有人后来提出了 RNA world (RNA 世界) 的说法来调和多肽合成需要信息载体和催化活性双重同时存在的困境，同时具有信息载体和催化活性双重功能的 RNA 的最初来源仍然是一个无法回避的问题。

.....

可是，在生命分子的互作中，除了共价键之外，还有至少另外两种相互作用：离子键和包括氢键、范德华力的分子间力 (inter-molecular-forces, IMF)。在对生命活动的研究中，无论是信号转导还是酶反应机理，离子键和分子间力都受到人们的关注。但是，在目前有关生命分子起源的探讨中，却很少见到人们涉及离子键和分子间力。这个现象让我感到好奇：在生物体中，生命分子互作最重要的究竟应该是共价键，离子键，还是分子间力？

在前面分析“生命是什么”问题时提到，一瓶 DNA 放在实验台上恐怕将一直就是 DNA。现代生物学对化石中古 DNA 进行的分析可以有效地重现化石所属古生物的遗传信息，可是没有人会认为成为化石的古生物属于活的生物体。在这些古 DNA 分子中，连接不同核苷酸的共价键与取自活体生物的 DNA 没有实质性的差别，否则无法用类似的方法去分析其序列。放到更大的尺度上，我们知道作为有机化学研究对象的分子无论大小、形状和来源，都由共价键关联而成。从这个意义上，也说明共价键的有无无法作为判断相关分子是否具有生命活性的指标。

离子键更是一种不仅在有机分子，还在无机分子中普遍存在的分子间相互作用，同样无法作为判断相关分子是否具有生命活性的指标。

那么，分子间力呢？

基于目前人们对生命活动特点的了解，大概有三个现象是非生命世界中所没有的：第一，在常温常压下作为蛋白质中一种的酶所具有的催化活性；第二，DNA 作为遗传信息的载体；第三，细胞作为各种生命活动的基本单位。这三种现象的化学基础是什么？从酶催化活性的基础来看，目前已经有很多证据表明，活性中心是酶催化功能的关键。那么，活性中心是怎么构成的呢？特定蛋白结构上特定区间内特定氨基酸之间的分子间力所形成的特定空间。就我的知识范围，没有分子间力，就不可能产生活性中心，也就无法形成酶的催化活性。从 DNA 作为遗传信息载体的功能来看，这种功能的化学基础，是两条 DNA 链上的碱基配对。而碱基配对的基础是氢键。换句话说，如果没有分子间力，就不会有 DNA 作为遗传信息载体的功能。从细胞的构成来看，在细胞构成的各种组分中，最重要的结构是细胞膜。可以说，没有细胞膜就没有细胞。那么，细胞膜是怎么构成的呢？基本结构是磷脂双层膜。磷脂是一种一头亲水、一头疏水的极性/两性 (amphiphilic) 分子。在水中会因为分子间力与水分子相互作用而自发地形成双层膜。如果我们认同酶的催化活性、DNA 作为遗传信息载体和细胞作为生物体的基本结构是生命系统的三个独特属性的话，那么分子间力是这三个属性形成所不可或缺的一种分子间相互作用。从这个意义上，分子间力才是在理解生命系统独特性是最应该予以关注的！

——第 40, 41 页

”

下面是 DNA 与蛋白质之间关于“鸡生蛋和蛋生鸡”的内容，供参考阅读。以下内容来自《40 亿年地球生命简史》（[英] 尼克·莱恩 著 梅菱芒 译 文汇出版社）：

“

关于这点目前还没有肯定的答案，同时也还有许多难题尚未解决。最先遇到的难题就是蛋白质与 DNA 两者谁先谁后，这种类似于鸡生蛋蛋生鸡的问题。因为 DNA 分子活性比较低，它需要特定蛋白质的帮助才能完成自我复制。但反过来讲，特定的蛋白质不是无缘无故产生的，它们需要经过自然的筛选，而要通过自然选择，它们就必须能被遗传且能产生变异。然而蛋白质本身不是遗传的模板，它要由 DNA 编码。所以问题就是，蛋白质没有 DNA 就无法进化，而 DNA 没有蛋白质也无法进化。如果两者缺一不可，那进化就永远无法发生。

在 20 世纪 80 年代中期，科学家有一项超凡的发现，那就是 RNA 可以当作催化剂。RNA 分子很少形成双螺旋，它们常卷成小而复杂的形状，同时具有催化作用。这样一来 RNA 分子就可以打破前面的困境。在这个假设的“RNA 世界”里，RNA 既可以扮演 DNA 的角色也可扮演蛋白质的角色，它可以催化自我复制以及很多其他反应。现在密码不再是 DNA 的专属，它也可以通过 RNA 和蛋白质的直接作用来产生。

从现代细胞工作的角度来看，该假设是有意义的。今天的细胞里，氨基酸并不会和 DNA 直接接触，当细胞需要合成蛋白质时，许多基础反应都是由核酶（一种具有催化功能的 RNA）催化完成的。“RNA 世界”这个词，出自沃森的哈佛同事沃尔特·吉尔伯特（Walter Gilbert）发表在《自然》上的一篇文章。该论文可能是迄今为止《自然》上阅读量最多的文章之一。该假设让整个学界为之着迷，它让生命密码的研究方向，从“DNA 密码如何编码蛋白质”转向“RNA 和氨基酸之间到底发生了什么”，然而至今我们仍没有明确的答案。

——第 59, 60 页

”

以下内容来自《进化》（[英] N·H·巴顿 [美] D·E·G·布里格斯 J·A·艾森 D·B·戈尔茨坦 N·H·帕特尔 著 宿兵等 译 科学出版社）：

“

先有鸡和先有蛋问题的解决：RNA 可以同时作为信息的载体和催化剂

今天，所有细胞生物都用 DNA 作为遗传物质而蛋白质（和 RNA）来实现其功能。当我们从现在的细胞生物向前回溯思考生命起源的时候，我们遇到了一个先有鸡和先有蛋的问题。DNA 编码所要合成的蛋白质的信息，而蛋白质是不能自身复制的。但是 DNA 的复制又需要蛋白质的催化。这样的完整系统是不可能最早期同时进化来。那蛋白质是否曾经能够自我复制呢？这也不太可能。而 DNA，一种相对惰性的分子，曾经有催化活性也不太可能。

在 20 世纪 60 年代，Francis Crick 提出这个谜题的一种可能的解决方法——当生命起源的时候，RNA 可能同时作

为信息的载体和催化剂。他的学说主要是理论上的，但是当实验揭示即使现在的 RNA 都还可以作为催化剂时，RNA 可以同时是“基因型和表型”的观点得到了巨大的推进。这里我们列出支持“RNA 世界”在过去曾经存在可能性的理论和实验上的证据。

——第 103 页

先有鸡和先有蛋问题的第二部分：RNA 复制系统是怎么进化出来的？

RNA 复制系统是怎么起源的呢？可能活化的 RNA 单体只是用来形成链。这已经可以足够形成多样的 RNA 链。如果这些 RNA 链中的一个有 RNA 连接酶的活性，就可以产生很多的长链。这种连接酶的形成被体外的进化实验所支持，其中 RNA 连接酶由随机的序列通过几次突变和选择产生。体外进化实验在后面描述。

——第 105 页

”

从以上引用的内容可以看到，“生命”这个词语在不同的情况下指代的对象并不一致，其有时候指生命个体，有时候指生命个体具有的生命属性，有时候指某种物质具有的生命现象。生命的范围也没有共识，一般来说生命之树的根，或者说最近共同祖先（last universal common ancestor, LUCA）是从单细胞生命开始，而这个生命之树是不包括病毒的，更不用说更基本的生命物质蛋白质分子或者氨基酸分子。从氨基酸分子、蛋白质分子到病毒分子（或者说病毒体？如噬菌体），再到单细胞生命体、多细胞生命体，从低级简单的生命体到高级复杂的生命体，它们在尺寸上的对比，可说相邻的两两之间都存在巨大的差距，更不用说复杂程度上的对比了。生命的进化是如此的跳跃！

这里讨论不了最初的生命是如何出现的，但现有的组成生命的基本物质蛋白质分子是在 DNA（少数情况下是 RNA）的指导下复制合成的，进而我们可以理解代表生命本身的复制功能的实现是在蛋白质分子或者氨基酸分子，或者说生物分子这个层级完成的，因此如果要追溯基于生命的意识和感知的本质的话，生物分子这个层级应当是一个研究的出发点。

附录 2 其他有关视觉感知信息的数值的估算

我们再估算两个有关视觉感知信息的数值，每帧的视觉感知信息的信息量和视觉感知信息总帧数。以下关于人眼的帧数的内容来自大语言模型豆包：

“

人眼没有固定的“帧数”，它是连续感知光线的生物系统，而非像相机 / 显示器那样按固定帧率采样。我们对“流畅度”和“极限帧率”的感知，是视觉暂留、神经处理速度、运动分辨能力共同作用的结果。

一、核心感知阈值（最实用的数字）

流畅临界（视觉暂留）：10 - 12 fps 以上，离散画面开始被感知为连续运动。

电影标准（流畅可接受）：24 fps（利用动态模糊 + 视觉暂留，形成流畅观影体验）。

日常清晰流畅：30 - 60 fps，多数场景下足够顺滑，无明显卡顿。

高动态 / 游戏感知上限：100 - 144 fps，人眼能明显区分 60 vs 144 fps 的顺滑度（尤其快速运动、转动视角）。

极限分辨（极短闪光）：实验显示人眼可捕捉 1/220 秒（≈220 fps）的单帧图像；大脑识别简单图像可快至 13 ms（≈75 fps）。

二、关键原理：为什么没有“固定帧数”

视觉暂留（Persistence of Vision）视网膜感光细胞的信号不会立即消失，会残留 100 - 400 ms，让离散帧“连”起来。

神经处理是并行、非固定帧率大脑视觉系统是连续、异步处理，不是按固定“帧”读取，而是对运动、边缘、亮度变化实时响应。

不同任务，极限不同

看静态 / 低动态：60 - 85 fps 以上，人眼难分辨差异。

看快速运动 / 游戏：144 - 240 fps 仍能感知更顺滑、更低延迟。

捕捉极短闪光：可达 200+ fps 的分辨能力。

三、常见误区澄清

✗ “人眼最多 60 fps”：错。60 fps 是日常流畅线，但高动态场景 144+ fps 可感知。

✗ “超过 X 帧就一样”：错。感知是非线性、分场景的，高刷在快速运动中优势明显。

✓ 正确理解：人眼是连续光感受器，“帧率”是对显示器 / 相机的描述；我们的感知极限是动态范围极宽的连续能力。

四、不同场景的实用帧率参考

场景	推荐 / 标准帧率	人眼感知特点
传统电影	24 fps	流畅，有电影感
电视 / 流媒体	30/60 fps	日常清晰流畅
竞技游戏	144+ fps	低延迟、更顺滑、易捕捉细节
VR / 高沉浸	90 - 120+ fps	减少眩晕、提升真实感

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 4 日查询）

”

根据以上内容，按照人眼平均每秒 100 帧计算，则每帧的视觉感知信息量约是：

$1000 \text{ 万比特} \div 100 = 10 \text{ 万比特}$

一个人一生中接收到的视觉感知信息的总帧数是：

$120 \text{ 年} \times 365 \text{ 天} \times 16 \text{ 小时} \times 3600 \text{ 秒} \times 100 \text{ 帧} = 252,288,000,000 \text{ 帧} \approx 2500 \text{ 亿帧}$

同样的，我们也用这两个数值代替每帧的感知信息量和接收到的感知信息的总帧数。

附录 3 关于核酸（DNA 和 RNA）的内容

以下有关核酸的内容来自《核酸生物化学》（李冠一 林栖凤 朱锦天 黄惜 编著 科学出版社）：

“

核酸研究已有一百多年历史。早在 1868 年，瑞士的一位年轻科学家 Miescher（1844~1895）从外科绷带上脓细胞的细胞核中分离出了一种有机物质，它的含磷量之高超过任何当时已经发现的有机化合物，并且有很强的酸性。由于这种物质是从细胞核分离出来的，当时就称它为核素（nuclein）。Miescher 所分离到的核素就是我们今天所指的脱氧核糖核蛋白。直到 1889 年，才有人成功地分离得到不含蛋白质的这种新物质，因为是从细胞核中分离出来的酸性物质，所以叫核酸（nucleic acid）。后来的研究发现细胞质、线粒体、叶绿体、无核结构的细菌和没有细胞结构的病毒都含有核酸，从此“核酸”这一名称被保留并一直沿用至今。

——第 1 页

”

以下有关核酸的内容来自《结构生物学：从原子到生命（原书第二版）》（A.利亚斯 L.利亚斯 M.-R.阿什 G.林德布卢姆 P.尼森 M.谢尔德高 苏晓东 等 译 科学出版社）：

“

核酸，也称为多聚核苷酸，是由众多核苷酸单体组合而成的线性聚合物。多聚核苷酸骨架由磷酸基团连接的五碳糖单元组成。每个核糖单体上连接一个嘌呤或嘧啶分子。它们被称为碱基，该术语源于这些分子的酸碱性质。有两类主要的多聚核苷酸对于所有生命形式都是必需的，即脱氧核糖核酸（DNA）和核糖核酸（RNA）。

DNA 将细胞的遗传信息存储在由腺嘌呤（A）、胸腺嘧啶（T）、鸟嘌呤（G）和胞嘧啶（C）四种碱基组成的不同序列中。在翻译过程中（第 11 章），通过使用 RNA 分子作为 DNA 特定区域的临时拷贝，该序列被转化为功能性蛋白质分子。这些基因或基因组的拷贝被称为信使 RNA（mRNA），因为它们不仅在 DNA 分子和翻译机器之间作为信息传递者，而且还可以作为细胞代谢状态的信使（第 10 章）。

RNA 分子也可以存储遗传信息（如在一些病毒中），同时，RNA 还在其他过程中扮演重要角色。与核酸相关的最核心的代谢过程是复制、转录和调控，它们都依赖于蛋白质对核酸序列信息的识别。因此，为了能够看到核酸和蛋白质生物学相关的多种可能的相互作用，首先理解 DNA 和 RNA 的结构特征是非常重要的。

——第 72 页

DNA 双螺旋的发现比任何事情都更加重要，这标志着分子生物学领域的诞生。在此之前，细胞的许多生命过程是已知的，但很难理解。大多数生命科学研究都是针对细菌和噬菌体进行的，并且这些观察结果与纯生物化学有何关系尚不清楚。今天的观点认为，细胞的生命过程是由大量的大分子（其本质是纳米机器）相互作用或与较小的分子作用实现的，这些作用都遵循严格的化学原理，但这些都 1953 年来看是很遥远的。DNA 双螺旋模型是对未来的第一次瞥见。

——第 74 页

”

关于 DNA 和 RNA 的内容非常多且复杂，有兴趣的读者可以进一步阅读有关核酸、基因、染色体等方面的书籍。

附录 4 关于蛋白质的内容

以下有关蛋白质的内容来自《蛋白质导论》（王克夷 编著 科学出版社）：

“

蛋白质是生物体最重要的组成成分之一。通常认为蛋白质是 α 氨基酸通过酰胺键连接而成的长链分子，这一分子的长链也被称为肽链。然而这样定义蛋白质还有若干不严密之处。第一，在自然界存在着许多种氨基酸，如 ω 氨基己酸，它可以作为单体，也可以通过形成分子间的酰胺键而成为长链分子，即我们日常生活中的尼龙 6。尼龙 6 可以制造成有弹性的织物，但是不可能具有蛋白质的空间结构，更没有蛋白质的生物活性。生物体内发现的氨基酸有几百种之多，但迄今在蛋白质中所鉴定到的 α 氨基酸却只有 22 种。除了常见的 20 种氨基酸外，还有硒代半胱氨酸和 2002 年才报道的吡咯赖氨酸，且这些氨基酸全是 L 型构型，由 DNA 编码的。第二，一些酸性或碱性的氨基酸，除了 α 氨基和 α 羧基可形成酰胺键外，氨基酸残基侧链上的基团也能形成酰胺键。应该认为，由 mRNA 转译而成的新生肽链还不能说是蛋白质。转译所得的新生肽链只有经过一系列转译后的事件才能成为具有特定空间结构、呈现明确生物功能的蛋白质。为此，蛋白质比较严格的定义应该是：一种由 DNA 编码的 L 型 α 氨基酸通过 α 碳原子上的氨基和羧基间形成酰胺键，连接而成肽链，经转译后加工形成的具有特定空间构象和生物功能的生物大分子。

——第 1 页

1.2 蛋白质的两个重要特性——结构层次和时空性

1.2.1 蛋白质的结构是多层次的

任何一个分子中的单键都有转动的可能性。如果分子中有多个可旋转的单键，则这些单键同时旋转的结果是使分子中诸多原子和功能团之间的相对距离处于不断变化中。只有在分子内存在着某些特定的相互作用时，分子中一些原子或

基团间的相对位置才能得以固定，呈现某种稳定的立体结构。长链分子更复杂些。一些合成高分子，如尼龙 6，是由一种单体 ω 氨基己酸缩聚形成的；而蛋白质的肽链是由 20 种氨基酸单体随机组成的，由此蛋白质肽链结构的复杂程度更是可想而知。从另一个角度看，任何一种伸展的长链分子基本上都是处于较高的能态，只有降低了分子的内能，分子才能处于更稳定的状态。故在一定的条件下，蛋白质的肽链有可能自发地通过许多和 α 碳原子与肽平面键间单键的旋转，并伴随着分子内大量原子和基团间的相互作用来降低内能，折叠成为一些较为稳定的立体结构。因此，蛋白质的立体结构并不是在描述蛋白质肽链中的氨基酸的排列次序时所表示的线状。

由于蛋白质的立体结构形成不是一蹴而就，而是分阶段的，且在已知立体结构的蛋白质中也“看到”了不同类型规则的有序结构，因而在此基础上提出了“蛋白质的结构是立体的多层次的”学说。

蛋白质的结构层次可分为一、二、三、四级结构。蛋白质的二、三、四级结构一般也统称为蛋白质的高级结构。

1. 蛋白质的一级结构

蛋白质的一级结构一般是指构成蛋白质肽链的氨基酸残基的排列次序，有时也称为氨基酸残基的序列。这一定义对不含氨基酸以外其他组分的简单蛋白质是适用的。但是在生物体内还有很多复合蛋白质，它们除了氨基酸外，还有其他的组分。……

2. 蛋白质的高级结构

蛋白质的高级结构也就是蛋白质的立体结构。早期发现蛋白质有旋光性，且旋光性和蛋白质的立体结构有关。因此，就将有机化学中描述具有光学活性的立体异构体的概念应用于蛋白质化学中，并将蛋白质的立体结构也称为构型 (configuration)。但有人认为蛋白质构型的概念不妥，应将蛋白质的立体结构和分子的构象 (conformation) 相联系。目前蛋白质的立体结构、三维结构、空间结构和蛋白质的构象是等同的概念。

——第 19, 20 页

3. 蛋白质的天然结构并不是分子的能量最低态

虽然蛋白质形成层次结构的过程是肽链内部和 / 或肽链间一些基团以不同方式相互作用、同时能量不断降低的过程，但是具有生物活性的蛋白质绝不是分子的能量最低态。因为处于能量最低的状态的构象如果行使功能，理论上要提供更大的活化能；如果是处于一系列能量非常接近的亚稳态中的一个能态，则只要给予较小的能量，就能使其结构改变，转变到另一种能量相近的亚稳态，同时行使其功能，然后在其他因素影响下，经过微小的扰动，恢复到蛋白质原始的亚稳态。酶催化作用是最佳的例子。

——第 28 页

1.2.2 蛋白质的时空特性

研究蛋白质的结构和功能，离不开蛋白质的结构层次。如果要进一步了解蛋白质在生物体内的作用，了解蛋白质在

整个生命现象中所处的地位，只将着眼点放在个别蛋白质的结构和功能上是不够的，观察蛋白质在一些体系中的作用依然不够，而是要了解蛋白质在何时、在何处、起何种作用，即研究蛋白质的时间和空间的特性。从某种意义上来说，对蛋白质时空性质的研究已经超出了蛋白质结构生物学的范畴，要从细胞生物学、发育生物学，乃至生理学的角度来研究蛋白质和（或）蛋白质体系的产生和定位。近年的生物学中很多领域的研究不断深入，对了解蛋白质的时间和空间特性有所裨益。

……

总之，对蛋白质时空性的研究，应该说是在最高层次上对蛋白质在生物体内生物功能的研究。这方面的研究，尤其是蛋白质时间特性的研究，不是单独着眼于蛋白质本身的结构和功能的研究所能解决的，还涉及到编码蛋白质的基因的调控、细胞间的通讯和细胞内的信息转导，是一个非常长远的研究目标。如果对蛋白质的时空性有了深刻的认识，也将使很多生物学的基本现象能从分子水平上加以阐明。

蛋白质的时间特性是分子发育生物学的重要内容，已经超出本书的范围，但是，严格的蛋白质生物合成过程中的时间顺序性，仍将在本书第 8 章中加以讨论。

——第 30, 31 页

”

以下关于蛋白质的内容来自《生命通史》（朱钦士 著 北京大学出版社），有助于进一步了解蛋白质分子在信息传递中起到的作用。

“

第一节 蛋白质分子的信息开关

细胞没有眼睛耳朵，没有电缆光纤，更没有大脑，有的只是蛋白质、DNA、各种糖类和脂类物质、无机盐、以及各种小分子如氨基酸和核苷酸。要细胞用这些分子组成信号传输和反应系统，好像有点强“人”所难。但是细胞又是生物接收信号和做出反应的基础，所以生物必须在使用细胞所拥有的材料来建造这样一个信号系统。在实际上，生物不仅用这些“材料”建造出了信息处理系统，而且这个系统的工作方式还出人意料地巧妙。

在细胞里的各种分子中，能够担当这个信息系统主角的，只能是蛋白质分子。蛋白质分子不仅能够催化化学反应以及参与细胞结构的建造，而且还能够在“有功能”和“无功能”、或者“开”和“关”两种状态之间来回转换，这就使它具有接收和传输信号的功能，类似于计算机用“0”和“1”代表电路“通”和“不通”两种不同的状态，并借此来传递信息。由于蛋白质也是细胞中各种生理活动的执行者（例如催化化学反应和调控基因表达），自身状态的改变也同时改变其功能状态，从不执行某种功能到开始执行某种功能，或者停止执行以前在使用的功能，这些改变就相当于细胞对信息的反应。在许多的情况下，蛋白质分子（一种或多种）就可以完成所有这些任务。在另外一些情况下，一些小分子如核苷酸，甚至一些无机离子如钙离子，也可以起信号传输者的作用，但是形成或者释放这些非蛋白分子的，以及接收这些分子所传递的信号的，仍然是蛋白质分子。

要了解为什么蛋白质分子具有这样的“本事”，需要先了解蛋白质分子是如何形成自己特有的功能状态的。蛋白质由许多氨基酸依次相连，再折叠成具有三维结构的分子。由于肽链中碳-碳之间的单键是可以旋转的，这些碳原子伸出的化学键又不是一条直线上，从理论上说同一种蛋白质可以折叠成无数种形状。这就像用牙签把小塑料球穿成串，插在每个塑料球上的两根牙签又不是一条直线上，而且牙签还可以旋转，这根塑料球链就可以被折叠成无数种形状。如果是这样，蛋白质就不可能有特定的功能了。幸运的是，细胞中肽链折叠的方式并不是任意的，而是受能量状态的控制。在水溶液中，由于蛋白质分子中各带电原子之间的相互作用可以形成氢键，蛋白质分子中亲脂部分又有聚团的倾向，不同的折叠方式就具有不同的能量状态。绝大多数的结构都具有比较高的能量状态，就像位于山顶或山坡上的石头，处于不稳定状态，随时可以滚下坡，而处于最低能量状态的结构就像位于沟底的石头，不会自发滚动，是最稳定的状态。一般来讲，处于最低能量状态的结构就是蛋白质分子在细胞中的结构，也是其执行生理功能时的结构。

但是这种能量最低状态的结构是可以改变的。如果蛋白质结合了另一个分子，蛋白质分子中原子之间原来的相互作用情形就会发生改变，原来的形状就不一定是处在能量最低的状态，而要改变为另一种形状才更稳定。这种现象叫做变构现象（allosteric effect）。蛋白质的功能是高度依赖于它的三维空间结构的，例如酶的反应中心常常是肽链的不同部分通过肽链折叠聚到一起形成的，蛋白质形状改变通常会形成或者破坏这种功能，即把原来没有功能的蛋白质分子变成有功能的分子，或者把原来有功能的蛋白质分子变成没有功能的分子。除去与之结合分子，蛋白质的形状又恢复原样，这样蛋白质分子就可以在功能“开”或者是“关”的状态之间来回转换。

细胞里面有几千种分子，如果它们都能够和某种蛋白质分子结合，改变它的形状和功能，那么每种蛋白质分子就不只是在两种形状之间来回变换，而是有数千种形状了，幸运的是，这种情形并不会发生。细胞中分子的种类虽多，但是这些分子基本上是互不结合，而是各行其是的。要能够与某种蛋白质分子结合，首先要有形状相匹配的结合面，这就像碎成两段的卵石，断面必须形状完全配合才能重新对在一起，两个不同卵石的断面是无法对在一起的。另一个要求是结合面上电荷的分布也必须匹配，一方带正电的地方，另一方就要带负电，至少不带电，以免出现电荷同性排斥的情形。有这两种限制，能够与一种蛋白特异结合分子就屈指可数了，在很多情况下只能是一一对一地结合，在这种情况下蛋白质分子就只能在两种形状之间来回转换。

这种情形的一个直接后果就是蛋白质可以和信息分子特异结合，从而可以用一对一的方式接收所结合分子所携带的信息。特异结合是信号辨别的首要条件。如果蛋白质不加区别地结合许多类型的分子，例如一种蛋白质同时能够结合葡萄糖和二氧化碳，这两种信号也就无从分辨，蛋白质分子也不会只有“开”和“关”，或者说“0”和“1”两种状态了。所以每一种信息分子都需要能够与它特异结合的蛋白质分子来一对一地传递信息。我们把这些与各种信号分子特异结合，并且接受它们信息的蛋白质分子叫做受体（receptor）。与受体蛋白质结合，并且通过改变受体蛋白形状把信息传递给受体的分子就叫做配体（ligand）。每一种配体分子都需要与它匹配的受体分子结合。在信息链中，信息分子和配体分子是一个意思。

这种与配体分子的特异结合就相当于细胞“认字”。在人类的语言中，每个名词代表一个意思，识别这些意思可以

先用视觉器官看见这个词，或者用听觉器官听见这个词，这些信号被输入大脑后，还要经过大脑对信号的分析，才能知道某个词的意思。而在细胞水平，每种信号分子本身就是一个词。细胞虽然不能叫出葡萄糖和胰岛素的名字，但是通过受体与它们的特异结合，就相当于接收到这个词所携带的信息。

受体通过特异结合感知了某种信息分子的存在后，如何把信息传递下去呢？在这里细胞采取的是同样的策略，即把接收到信号，并且改变了形状的受体分子作为信号传递链中下一级蛋白分子的配体分子，以改变下一级蛋白分子的形状。改变了形状的下一级蛋白分子又可以作为配体，信号就这样传递下去了，直到最后的效应分子，通过它的形状改变使其活性被激活，或者使原来的活性消失，对信号的反应过程就完成了（见图 8-1 左上）。

（图略）图 8-1 细胞的信号传递链和信号传递的原理。左上：来自细胞外的配体分子与位于细胞膜上的受体分子结合，使受体分子形状改变，信息再通过信号传递链传到效应分子上，启动细胞对外界信号的反应。在信息传递链中，每一步都是上一级的蛋白与下一级的蛋白特异结合，改变下一级蛋白的形状和功能状态，像多米诺骨牌那样把信息传递下去。左下：配体分子与受体分子的结合使得受体分子从原来不能结合下一级分子到能够结合下一级分子，或者从原来能够结合下一级分子到不能结合，让下一级分子的功能改变。这两种方式都能够传递信息，同时也要求配体分子不离开受体分子，以维持受体分子形状改变的状态。右上：蛋白质分子可以在未磷酸化和被磷酸化两种状态中来回变换，这是通过蛋白激酶和磷酸酶的作用实现的。磷酸化可以使蛋白的功能从无到有，即从关的状态到开的状态，也可以是从开的状态变为关的状态。两种方式都可以传递信息。这种传递信息的方式不要求配体分子一直与受体分子结合，是磷酸化使蛋白质分子维持在功能变化的状态下

由于与其他分子的结合会改变蛋白质分子的形状，细胞中信息这样传递就有两种方式。一种是受体分子与配体分子的结合后，形状改变，使它和下一级蛋白分子的关系改变，从形状不匹配到形状匹配，从不能结合到能够结合，相当于从“关”到“开”。另一种是在没有配体分子结合时受体就与下一级的蛋白质分子结合，但是下一级蛋白分子处于无功能，即“关”的状态。在有配体分子时，受体分子形状改变，从原来能够结合下一级的蛋白质分子变为不再能够结合，下一级的蛋白分子因此从受体分子上游离出来。由于不再与受体分子结合，下一级蛋白分子的形状也要发生改变，功能状态也发生改变，从“关”变为“开”。这两种方式都可以把受体分子接收到的信息传递下去，但是要求配体分子一直与受体分子结合，以保持受体分子变化了的状态（图 8-1 左下）。

通过与配体分子结合改变形状来传递信息的方式虽然有效，但是也有局限性。蛋白质形状的改变需要配体分子一直与之结合，配体分子一离开，蛋白质又恢复到原来的形状。如果在配体分子离开前信息还没有传递下去，就相当于原来接收到的信息又丧失了。这对于有些信息传递步骤不是问题，例如配体分子和受体分子都不用移动位置，受体分子就可以把信息传递下去的情况。但是如果信息分子必须移动到新的位置才能传递信息，而配体分子又无法和受体分子一起移动时，问题就来了。解决这个困难的办法就是给受体分子打上“印记”，使受体分子在离开配体分子后还能够保持变化

了的形状。这个“印记”，就是对受体蛋白进行修改，例如在氨基酸侧链上加上带电的基团。这些基团引入的电荷会改变蛋白质分子中原子之间的相互作用，形状也就相应改变了，而且在配体分子离开后还能够保持这个状态。

——第 258, 259, 260 页

细胞的信息传递链也不一定完全由蛋白质组成，配体分子也不一定是蛋白质，例如后面要谈到的许多神经递质就不是蛋白质，性激素不是蛋白质，细胞内的信息分子如环腺苷酸（cAMP）也不是蛋白质，但是它们与受体蛋白的结合也能改变受体分子的形状和功能状态，起到信息传递的作用。信息传递链中的某些蛋白也可以利用它们被激活的酶活性生产一些非蛋白的信息分子。这些分子又作为配体分子，与下游的受体蛋白结合，改变其形状，把信息传递下去。但是产生这些非蛋白信息分子的，以及接收这些非蛋白分子信息的，仍然是蛋白质。

最后的受体蛋白分子一般是具有其他功能的蛋白，在与自己的配体分子（即上一级信号分子）结合或者同时被磷酸化后其功能被激活，就可以发挥效应分子的作用。无论是作为酶催化化学反应，还是通过结合于 DNA 调控基因表达，都可以实现细胞对信息的反应。

蛋白质分子和配体分子结合改变形状，或者同时被磷酸化，功能也随之改变，改变了功能的蛋白质又可以作为下一级信息分子的配体，使其改变形状或者磷酸化，最后到达效应分子，这就是细胞中信息系统工作的总机制。下面我们就来具体介绍细胞中的各种信息传递链。它们虽然各有特点，复杂程度不同，但是都不出这个总的机制。

——第 261 页

”

附录 5 关于免疫系统的内容

下面的关于免疫系统的内容来自《战斗细胞——人体的免疫系统奇妙之旅》（[德]菲利普·德特玛 著 李超群 译 海南出版社）：

“

在人类已知的生物系统中，除人脑外，就属免疫系统最复杂了。

——第 006 页

在最核心的意义上，免疫系统就是区分自身和异物的工具。

——第 014 页

把细胞比作人，细菌就相当于一只兔子大小。

——第 022 页

简而言之，细胞就像生物机器人，完全受更小的细胞构成部件所引导的生化反应驱动。

——第 024 页

不过蛋白质不仅仅是肌肉的必要部分，它更是所有地球生物最基本的有机构件和工具。它们种类丰富，用途广泛。从信号传递，到合成细胞壁及简单结构，再到形成复杂细胞器，细胞的所有活动都离不开它们。

蛋白质是由氨基酸链形成的。氨基酸这种微型有机构件有 20 种，把它们以无论什么顺序连成一串，就能得到蛋白质。这一原理能让生命构建出超级多不同种类的蛋白质。……

……典型的蛋白质通常包含 50 到 2000 个氨基酸（相当于有 50 到 2000 条图案框的老虎机），最长的有 3000 个氨基酸。也就是说理论上细胞可能合成的蛋白质种类会超过 10^{3900} 数量级。

当然，其中大部分组合都是无效的。据估计，合成有效蛋白质的概率只有百万分之一到十亿分之一。不过因为可能的组合太多，十亿分之一也很多了！那细胞是怎么知道要按怎样的顺序组装氨基酸，合成所需蛋白质的呢？

这离不开所谓的生命密码：脱氧核糖核酸（DNA），它含有对生命来说至关重要的长串信息序列。这是在说，DNA 中约有 1% 的序列会指导蛋白质的合成，这些序列就是“基因”。其余 DNA 调控合成蛋白质的时机、种类、方式和数量。也就是说，蛋白质对生物来说很重要，所谓的生命编码基本上就是构建蛋白质的指导手册。

——第 027 页

蛋白质的形状会决定它的功能。形状就是一切。某种意义上，你可以把蛋白质想象成特别复杂的三维立体拼图。基于形状的不同，有些蛋白质可以执行功能，有些则被用作建筑材料。细胞几乎可以用蛋白质合成出所需的一切。不过蛋白质的魔力远不止于此。它们还是传递信息的信使，可以收发信号，借此改变自身的形状，并触发极度复杂的连锁反应。蛋白质是细胞的一切。回想一下前面装着大米和水果的房的例子。蛋白质其实都不像球体，而更像由齿轮、开关、多米诺骨牌和轨道等构成的无敌复杂组合。

——第 028, 029 页

在微观世界里，分子的形状决定了它们是互相吸引还是互相排斥。因此细胞内蛋白质的形状也决定了蛋白质会互相吸引还是排斥，以及它们之间会发生怎样的相互作用（作用的频率则由不同种类蛋白质的数量决定）。地球上所有细胞的生化反应都是由这些相互作用组成的。它们对生物机制来说非常重要，叫“生物学通路”。“通路”是个形象的说法，用来描述细胞内各成分之间能引发变化的一系列相互作用，比如组装出新的特殊蛋白质或分子，这些新产物又可以开启或关闭基因的表达，进而改变细胞的功能；也可以是触发细胞的反应，使其产生某种“行为”，如面对危险时逃之夭夭。

——第 031 页

自然界中这种现象很常见，叫“涌现”（emergence），指的是实体拥有它的组成部分所没有的属性和能力。单只蚂蚁做不到的复杂事情，蚁群这个实体可以做到。

——第 032 页

……细胞本身就是复杂的生命机器；构成和填充细胞的，主要是一批拼图块，它们由大量不同的蛋白质形成，并完全受生化反应的支配；这一切凑在一起，不知怎么就创造出了生命，能感知环境，并与环境互动。

——第 033 页

……好，既然人类意义上的“视力”和“听力”在微观世界中不怎么值得选用，那细胞如何体验、感知它们的微观世界，又如何彼此交流的呢？

某种意义上，它们靠的是“闻”。对细胞来说，信息是实实在在的物理对象：“细胞因子”。简而言之，细胞因子是一类小分子蛋白质，用以传递信息。我们体内有几百种细胞因子，它们在几乎所有的生命活动中都发挥重要的作用——从胚胎在子宫中发育到人的衰老。

——第 074 页

细胞因子：小分子蛋白质，用以传递信息，在疾病的进展和人体细胞的应对过程中发挥重要作用，某种意义上是免疫细胞的语言。

——第 075 页

总结一下重点：细胞表面有几百万个名为“受体”的鼻子。细胞释放出携带着信息的蛋白质，即细胞因子，借此来彼此交流。细胞的受体（鼻子）闻到细胞因子后，会触发细胞内的通路，通路会改变细胞的基因表达，从而改变细胞的行为。因此，在生化反应的指引下，细胞尽管没有意识也无力思考，却也能对信息做出反应。所以细胞哪怕实际上很笨，却也能做到很智慧的事情。有些细胞因子还有导航作用——免疫细胞可以闻出细胞因子的来源，跟随气味抵达战场。

——第 078 页

地球上所有生命都是由同样几类基本分子以不同的方式排列而成的：碳水化合物、脂质、蛋白质和核酸。这些基本分子相互作用并组合起来，形成各种结构，这些结构就是地球上所有生命的基石。

——第 079 页

我们前面说过，蛋白质的形状决定了它的功能、和其他蛋白质相互作用的方式、能形成的结构以及可以传递的信息。

——第 079 页

对一些特定功能来说，使用的蛋白质不能换，否则功能就会丧失。……免疫系统就是利用这个原理来识别自身和异物的。

——第 080 页

凭借少数种类的受体，先天性免疫细胞可以识别相当多的蛋白质，和细胞因子一样，这些特殊受体有点像感官，像蛋白质识别装置。机理其实很简单：受体本身也是特殊的蛋白拼图块，可以结合其他的蛋白——这里就是指鞭毛蛋白。巨噬细胞一旦结合到鞭毛蛋白，就会进入杀敌模式。

先天性免疫细胞就是这样识别细菌的，哪怕它此前从没遇见过某种特殊的细菌。细菌都有某种不可或缺的蛋白。而先天性免疫细胞上都配备有一组特殊受体，能够识别细菌的所有常见蛋白。

——第 081 页

受体有点像细胞的感官，其工作原理基本类似锁孔和钥匙，可以跟特定的分子结合。

——第 082 页

细胞利用类似感官一般的受体来识别敌人的蛋白，这种原理叫“微生物模式识别”。

——第 083 页

本质上讲，补体系统是由 30 多种不同的蛋白质（不是细胞！）组成的军队，它们通力协作，巧妙配合，阻止入侵者在人体内悠哉游哉。

——第 085 页

适应性免疫系统为世上所有可能的敌人，包括过去曾经出现过的、现有存世的，甚至将来可能出现但目前还不存在的感染，都准备了专门的武器。总之，它拥有全宇宙最大的图书馆。

——第 108 页

答案既简单又复杂：免疫系统并不怎么能适应新入侵者，而是在人出生时就具备适应性。新生儿体内预装着几亿不同的免疫细胞——其中一些负责应对此生可能遇到的每种威胁。

——第 109 页

……地球上的所有生物都由同样一批基础部件组成，部件主体是蛋白质。蛋白质可能有无数种形状，你可以把它们想象成立体拼图块。免疫细胞要和细菌的蛋白质结合，才能识别并俘获细菌。

——第 110 页

用免疫学术语来说，能被免疫系统识别的蛋白块叫“抗原”。……抗原是免疫系统能够识别的异物结构。

世界上有几亿潜在的抗原，这就是几亿种不同的蛋白质。适应性免疫细胞想出了一个绝妙的办法来解决这个难题。此时此刻，你体内就至少有一个免疫细胞，有能识别这几亿抗原中某种特定抗原的受体。我再重复一遍：你体内当下就有识别全宇宙每种可能抗原的潜能。

——第 110 页

受体是由蛋白质构成的，而我们前面也说过，一个基因就是生成一种蛋白质的编码。

——第 111 页

简而言之，抗体就是 B 细胞的受体。

——第 132 页

某种意义上，抗体和补体有点像，都是游离的微小蛋白质；不过两者有一项巨大的区别：补体蛋白没有针对性，而抗体有。

——第 147 页

病毒是最简单的能自我复制的生物，不过关于病毒是不是生物还存在不同看法。前面我们讲过，细胞没有思想意识，只是生化过程的复杂集合，被遗传编码，以及细胞组间的化学反应所驱动。细菌也是如此，这种蛋白质机器人有各种神奇的行为，尽管某种意义上它们没有细胞那么复杂。

——第 169 页

”

在人体内已知的生物系统里，免疫系统是复杂度仅次于神经系统的生物系统，而免疫系统的功能主要依靠不同蛋白质分子之间的相互结合实现。既然复杂度仅次于神经系统的免疫系统，其功能是在生物分子层面实现的，而比神经系统更基础、更复杂的，代表生命本身的蛋白质分子的“复制”，也是在生

物分子层面完成的，那么我们有充分理由推测，神经系统的功能实现也应当发生在生物分子层面，即神经系统对感知信息的存储和处理是在生物分子这个层面完成的。

附录 6 其他关于神经系统的内容

以下关于神经系统的内容来自《语言、脑进化与认知》（江铭虎 主编 清华大学出版社）：

“

人类的神经系统分为中枢神经系统和周围神经系统，图 1.1 表明了大脑、脊髓和体内其他神经之间的关系。神经元细胞体微小，在神经系统中的分布密度不均，小脑中的神经元密度最大。小脑约有 700 亿个神经元，大脑皮层和联络脑区有 120 亿~150 亿个神经元，脊髓约有 10 亿个神经元。中枢神经系统包括大脑、小脑、脑干和脊髓。周围神经系统由大脑和脊髓外部的神经和神经节组成，是组成双边动物神经系统的两个组件之一。周围神经系统的主要功能是将中枢神经系统与四肢和器官相连，基本上充当大脑和脊髓以及身体其余部分之间的中继。与中枢神经系统不同，周围神经系统不受脊柱和头骨的保护。

在大多数情况下，神经元是在大脑发育和儿童时期由神经干细胞产生的。成年以后，大部分脑区的神经元再生基本停止。然而，强有力的证据表明新神经元可以在海马体和嗅球中大量产生。神经元是神经系统的主要成分，而神经胶质细胞则为它们提供结构和代谢支持。神经系统由包括大脑和脊髓在内的中枢神经系统和包括自主神经系统和躯体神经系统在内的周围神经系统组成。在脊椎动物中，大多数神经元位于中枢神经系统，但也有部分位于外周神经节，许多感觉神经元位于视网膜、耳蜗等感觉器官。轴突可能捆扎成束（就像成股的钢丝组成了钢索），构成周围神经系统的神经。中枢神经系统中的轴突束称为神经束。

（图略）图 1.1 人类的神经系统分布

中枢神经系统与周围神经系统的信息功能传递如图 1.2 所示。

（图略）图 1.2 中枢神经系统与周围神经系统的信息传递功能

脑位于颅腔内，主要由大脑、小脑、间脑和脑干组成，其中脑干又由中脑、脑桥和延髓组成，如图 1.3 所示。

.....

大脑是脑最发达的部分，主要包括左、右大脑半球。两半球之间由大脑纵裂分隔，如图 1.3 (b) 所示。大脑纵裂的底部有连接两半球的横行纤维构成的胼胝体，如图 1.3 (a) 所示。对人类来说，在脑皮层连接系统中被研究最多的是胼胝体。人类的胼胝体在母体怀孕期结束到出生后一两个月经历了横断面减少的时期。胼胝体总体形态的变化并不直接与轴突的数量变化相关，因为成人胼胝体由轴突的数量及其大小（包括髓鞘的厚度）二者决定。然而，胼胝体大小及形状的变化很可能是大脑两半球间连接性变化的指示。大脑半球和小脑之间有大脑横裂。半球表层的灰质称为大脑皮质，皮质深处的白质称为髓质。大脑底部的白质中包藏着基底神经核。大脑半球内部空腔为侧脑室。

（图略）(a) 大脑半球矢状切面（内侧切面）的结构面 （图略）(b) 顶视图

(图略) 图 1.3 人脑的解剖学构造

——第 3, 4, 5 页

”

以下摘要内容来自《神经科学——探索脑(第 4 版)》([美]Mark F. Bear Barry W. Connors Michael A. Paradiso 著 朱景宁 王建军 主译 电子工业出版社)：

“

本章着重介绍神经系统中两类不同细胞——神经元和神经胶质细胞的结构。这是两个大的类别，其中包含许多类型的细胞，而这些细胞在结构、化学特性和功能上都不同。尽管如此，神经元与神经胶质细胞之间的区分还是重要的。虽然成年人脑中神经元和神经胶质细胞的数量大致相等(大约各 850 亿个)，但神经元负责脑的大部分独特功能。正是神经元(neuron)感知环境的变化，再将这些变化传递给其他神经元，并控制机体对这些感觉做出反应。神经胶质细胞(glia 或 glial cell)主要通过隔离、支持和滋养邻近的神经元来促进脑功能。

——第 24 页

”

附录 7 其他关于突触和神经递质的内容

以下有关突触和神经递质的内容来自《神经元突触传递的细胞和分子生物学(神经生物学基本原理)》(盛祖杭 主编 上海科学技术出版社)：

“

突触是神经系统传递信息最基本的结构和功能单位，对突触传递机制的理解是认识神经系统功能的前提。本章主要从生理角度和分子层面对化学突触的传递机制做了概述。完整的突触传递过程可以概括如下：神经元在轴突或胞体接受信号，产生局部去极化或超极化膜电位，所有局部电位进行整合处理后，如果达到了轴丘部位产生动作电位的阈值，即产生动作电位，并沿轴突下传。下传的动作电位到达轴突终末，使聚集在突触前膜活性区的电压依赖性 Ca^{2+} 通道打开，大量内流的 Ca^{2+} 使活性区附近的 Ca^{2+} 浓度迅速升高，它们和突触囊泡上的 Ca^{2+} 感受器蛋白结合后，改变了处于准备状态的三个 SNARE 蛋白的疏松结合模式，在极短的时间内形成了紧密、稳定的 SNARE 核心复合体。囊泡膜和突触前膜进一步靠拢并形成融合孔，释放囊泡内的神经递质。递质分子和突触后膜离子型受体结合后，改变其受体蛋白构象，使特异的离子通过受体通道，产生局部膜电位。如果递质分子和代谢型受体结合，并不能在短时间内产生快速的电生理效应，但是可以通过激活 G 蛋白信号转导途径或蛋白酪氨酸激酶途径，缓慢地调节神经元的突触后膜受体分子或其他可溶性蛋白分子的表达和功能特性，从而较持久地调节突触传递的效能。然而上述的复杂过程还远不能覆盖突触传递机制的全部内容，各种离子通道的表达分布对神经元电生理特性的影响、神经信息的整合部位及模式、 Ca^{2+} 激发囊泡整合的详细过程、融合孔形成的具体机制、参与突触后受体功能调节的分子及其作用等，都是有待进一步研究和阐释的重要问题。

突触 (synapse) 这一术语是 Charles Sherrington 于 1897 年提出的, 来源于希腊语, 是紧密结合的意思, 被用于描述那些神经元的轴突末梢与另一个神经元形成功能性联系的部位。突触是神经元与神经元之间, 或神经元与非神经细胞 (肌细胞、腺细胞等) 之间的一种特化的细胞联系, 它是神经元之间信息传递的关键性结构。突触可分两类, 即化学突触 (chemical synapse) 和电突触 (electrical synapse)。通常所说的突触指化学突触。

一、电突触的结构

电突触是神经元间传递信息的最简单形式。电突触的结构基础是细胞间的缝隙连接 (gap junction)。缝隙连接通道跨越突触前、后神经元的两层胞膜, 该通道由两个被称为连接小体 (connexon) 的半通道组成, 分布在突触前后的两个神经元上, 并跨越膜的全层。两个连接小体通过相互作用形成一个跨双层胞膜的密封细胞间通道, 该通道的直径大约在 1.5nm, 比普通的细胞膜孔大, 允许带电离子、小分子及代谢产物自由地在两个细胞间流动。如图 2-6 所示, 每个连接小体由 6 个被称为结合素 (connexin) 的蛋白亚单位形成。目前发现, 在哺乳动物的大脑皮质、丘脑、纹状体及小脑的抑制性中间神经元之间广泛存在电突触。

(图略) 图 2-6 电突触的结构 电突触是神经元间的缝隙连接结构。6 个结合素形成一个跨膜且中间有孔的连接小体, 突触前、后神经元上的两个连接小体通过相互作用形成一个跨双层胞膜密封的细胞间通道即缝隙连接通道。缝隙连接通道允许小分子及离子自由地在两个细胞间流动

在电突触中, 突触前、后神经元通过缝隙连接相连, 缝隙连接允许小分子及离子自由地在两个细胞间流动。所以当动作电位到达突触前神经元的电突触部位时, 因为正价离子通过缝隙连接流入突触后神经元, 去极化也会快速传递到突触后神经元。电突触两层的间隙仅有 2~3nm, 连接部位的神经细胞膜并不增厚, 两层膜之间有沟通两侧细胞质的水相通道蛋白, 而且膜两侧的胞质内存在突触小泡, 因此传导不需要神经递质, 是以电流传递信息的。动作电位在缝隙连接处的传递与在神经轴突上传播完全一样, 神经冲动可以由一个细胞直接传给下一个细胞, 并且是双向的, 其意义在于促使许多细胞产生同步化活动。电突触传递速度快, 且不易受外界因素的影响。

二、化学突触的结构

传统意义上的突触指化学突触。化学突触是神经元之间信息传递的关键结构。在光镜下, 多数突触的形态是一个神经元的轴突末梢呈球状或环状膨大, 附着在另一个神经元的胞体 (soma) 或树突 (dendrite) 表面, 从而形成轴-体突触、轴-树突触。虽然轴突也能接受突触前的支配, 但一般认为胞体和树突是神经元的突触后部位, 特别是树突表面的棘状突起——树突棘 (dendritic spine), 是形成突触的主要突触后部位。

电镜下, 突触是由参与突触形成的两个神经元相对应部位特化增厚的细胞质膜区及其之间的间隙组成的, 分别称为突触前结构、突触间隙和突触后结构 (图 2-7)。对于一个典型的突触, 突触前终末的活性区聚集了充满神经递质 (neurotransmitter) 的突触囊泡 (synaptic vesicle), 它们和突触前膜有着十分紧密的联系。正对突触前膜的突触

后膜，在电镜下呈一增厚的突触后致密带（postsynaptic density, PSD），这是由大量神经递质受体和骨架蛋白密集形成的特殊结构。

（图略）图 2-7 化学突触的结构模式图 化学突触是一种不对称的连接结构，分突触前、突触间隙和突触后三部分。突触前活性区聚集着大量突触囊泡。神经递质储存在囊泡中，通过囊泡与突触前膜的融合被释放到突触间隙。神经递质受体和相关分子聚集在突触后膜的特化结构——PSD。[改自 Cohen-Cory S. Science, 2002, 298 (5594):770~776.]

所有化学突触的关键特征是突触前终末存在突触囊泡，这些突触囊泡含有一种或多种神经递质。当一个动作电位作用于突触前神经元时，该动作电位引起膜电位的改变，从而打开突触前膜的电压门控 Ca^{2+} 通道，引起 Ca^{2+} 迅速内流到突触前末梢，继而引发 Ca^{2+} 依赖的突触囊泡和突触前膜的融合，囊泡内的神经递质被释放到突触间隙，与突触后神经元膜上的递质受体结合，从而改变突触后膜上离子通道的开闭状态，改变了离子的流入（或流出）。通过突触联系，信息从一个神经元传递到了另一个神经元。在化学突触中，没有直接的细胞间连接，电流并不能直接从突触前流向突触后神经元。只有在神经递质与突触后递质受体结合，使离子通道开放或关闭时，突触电流才能流过突触后膜。

根据突触后膜胞质面致密物质厚度的差异，可将突触分为不对称性突触（asymmetric synapse, Gray's I 型突触）和对称性突触（symmetric synapse, Gray's II 型突触）两种。不对称性突触的突触后膜胞质面有一层染色极深的致密物质，即 PSD，使后膜比前膜厚，结构上呈现出不对称性，突触小泡呈球形，突触间隙较宽（20~50nm）。一般认为兴奋性突触是不对称突触，主要分布在树突干上的轴-树突触。对称性突触的 PSD 较薄，前、后膜厚度相似，突触小泡呈扁平形，突触间隙也较窄（10~20nm）（图 2-8）。一般认为抑制性突触是对称性突触，主要位于树突的近侧及胞体，甚至在轴突的起始部位。在视觉皮质中，84%的突触是兴奋性的，16%是抑制性的。大部分兴奋性突触（79%）位于树突棘上，20%位于树突枝干，还有很少（0.1%）被发现位于胞体。抑制性突触显示不同的格局，大部分（62%）被发现位于树突枝干上，约 31%位于树突棘上，还有 7%位于胞体。通常一个神经元有许多突触，可接受多个神经元传过来的信息，如脊髓前角运动神经元有 2 000 个以上的突触，大脑皮质锥体细胞约有 30 000 个突触，小脑浦肯野细胞可有多达 200 000 个突触。

——第 19, 20 页

”

除了神经元，还有神经胶质细胞，它们也是含有神经递质的。以下内容来自《神经元突触传递的细胞和分子生物学（神经生物学基本原理）》（盛祖杭 主编 上海科学技术出版社）：

“

神经系统中存在大量的胶质细胞，其数量是神经元的 10~50 倍。在神经系统中，胶质细胞分为两大类：小胶质细胞（microglia）和大胶质细胞（macroglia）。大胶质细胞是神经系统中主要的胶质细胞，它又包括星形胶质细胞，以及分布在中枢神经系统的少突胶质细胞和分布在外周神经系统的 Schwann 细胞。少突胶质细胞和 Schwann 细胞都具有形成髓鞘的功能。胶质细胞不仅对神经元起支持、营养和保护作用，而且还参与了神经元间的信息传递。

”

附录 8 当前计算机系统中信息的存储方式

以下关于当前计算机系统中信息的存储方式的内容来自大语言模型豆包：

“

计算机物理存储是一维的，逻辑存储可以是任意多维。

拆开说：

硬件层面（真实存在）内存、硬盘、SSD 都是一维线性地址空间地址从 0、1、2、3…… 一直排下去，只有前后顺序，没有长宽高。→ 一维

软件层面（我们看到的）图片、表格、数组、3D 模型、文件结构……都是用规则和公式把一维地址“折”成二维、三维、多维。→ 可以是任意维度

不管多少维：

一维：直接编号

二维：按行折叠

三维：按平面折叠

N 维：按更高层块折叠

底层永远只有一维地址，多维全是数学公式算出来的。

一句话总结：物理存储：一维。逻辑存储：想几维就几维。

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 18 日查询）

”

还有另一部分的内容：

“

1. 一个内存地址 = 指向 1 字节 (Byte)

这是现代计算机铁律：

1 个地址 = 1 字节 = 8 比特 (bit)

也就是说：

地址 0 → 第 0 个字节 (8 bit)

地址 1 → 第 1 个字节 (8 bit)

地址 2 → 第 2 个字节 (8 bit) ……

每个地址，固定对应 8 比特。

2. 为什么不是 1 比特？

因为比特太小了：

只用 1 bit 只能存 0 或 1

根本存不了字母、数字、指令

所以计算机最小可寻址单元 = 1 字节 (8 bit)。

3. 容易搞混的两个概念

地址的宽度：32 位、64 位（指地址本身用多少 bit 表示）

地址指向的存储大小：永远是 8 bit = 1 字节

——来自大语言模型豆包（2026 年 3 月 18 日查询）

”

根据以上内容，在当前计算机系统中，不管存储器的物理形式如何，均统一在逻辑形式上把存储空间按照一维线性地址空间进行编号，即从 0、1、2、3……一直排下去，每个地址对应的信息量是若干比特。

附录 9 关于感觉和知觉的内容

以下关于感觉和知觉的内容来自《脑与认知科学概论（第 2 版）》（主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社）：

“

5.1.1 感觉

1. 感觉的定义

感觉就是人脑对客观事物的属性、特征的直接反映，是人察觉并获取信息的一个重要渠道，同时也是人们知识的源泉。它处在人类生理特点的制约下，同时受到客观事物本身的影响。

而感觉信息加工就是指感觉器官与刺激信息相互接触作用之后，感受器将刺激转化为生物电信号，同时通过动作电位把外部事件信息传递至大脑中枢特定区域的过程。具体的感受器、大脑中枢特定区域如表 5-1 所示。

感觉滞留现象是感觉信息加工部分一个重要的概念。认知心理学领域研究发现，感觉信息只有被个体“注意”时，才会被进一步加工处理。例如，一个人走在街上，在某一瞬间，他眼前所有事物都对他造成了感觉刺激，此时对于这个人来说感觉滞留信息量是很大的，但其中大部分信息还没有被加工处理就迅速消失了，只有被注意到的那一部分刺激信息被进一步加工与处理。

感觉器官对光、气、声等物理刺激都非常敏感，大脑无法直接接受并处理这些刺激，需要通过感受器进行加工处理，

产生感觉，这一过程被称为感觉信息的转录。

需要说明的是，每一种感觉都有着特定的感受器，并“配备”专门的转换机制，如视网膜上的锥细胞和杆细胞分别将明、暗光信号转换为不同的视觉信息。而且不同感觉通道在传递信息时都有自己特殊的神经通路，最终到达大脑中枢的不同区域，如视神经将光刺激传递到大脑的枕叶，而听神经则把声音刺激传递到颞叶。

表 5-1 感觉种类、感受器及皮层中枢分布情况

种类	感受器	皮层中枢	适宜刺激	
外部感觉	视觉	视锥细胞、视杆细胞	枕叶	380~780nm 的电磁波
	听觉	毛状细胞	颞叶	16~20 000Hz 的声波
	嗅觉	嗅细胞	边缘系统	挥发性物质
	味觉	味蕾	中央后回最下部	溶解于水、唾液和脂类的化学物质
	触觉	毛发的篮状末梢和游离神经末梢、迈斯纳氏小体、克劳斯氏球	中央后回	机械性和温度性刺激物
内部感觉	运动觉	肌梭、肌腱和关节小体	中央前回	骨骼肌运动、身体四肢位置状态
	平衡觉	内耳前庭器官中的纤毛	前外学氏回	头部运动的速率和方向
	机体觉	内脏器官及组织深处的神经末梢	下丘脑、第二感觉区和边缘系统	机体内部各器官的运动和变化

感觉系统把外部物理刺激转化为生物电能，然后再进一步编码为动作电位。神经系统在传递不同性质的刺激信息的时候，采用两种基本方式：其一是刺激各自的神经元，即激活特异性神经系统，如视觉和听觉；其二是被激活的神经元内部的动作电位本身也具有不同的活动模式，或者说不同的生物电性质。另外，外界物理刺激强度还在影响动作电位的频率，即频率编码。这种信息通过物理刺激激活神经元并使神经冲动经由特异性神经通路传递下去的过程，被称为总体编码。

2. 感觉的阈值

.....

表 5-2 人类重要感觉的绝对阈限

重要类别	绝对阈限
视觉	晴朗的夜空中可以看到 30 英里外的烛光
听觉	安静条件下可以听见 20 英尺外手表的滴答声
味觉	一茶匙糖溶于 2 加仑水中可以辨别出甜味

嗅觉

一滴香水扩散到三个房间的套房

触觉

一只蜜蜂的翅膀从1cm的高处落在你的面颊

温冷觉

皮肤表面温度有1℃之差即可察觉

5.1.2 知觉

1. 知觉的定义

知觉是人脑对客观事物的各种属性、各个部分及其相互关系的综合的、整体的反映，是通过感觉器官，把从环境中得到的各种信息，如光、声音、味道等转化为对物体、事件等的经验的过程。

知觉和感觉的主要区别在于，感觉是人脑对直接刺激的个别属性的反映，主要是感受器上滞留的未经整合的具体信息；而知觉则是整合组织后的信息。

2. 知觉恒常性

知觉恒常性指的是个体能够在一定范围内不随知觉条件改变而保持对客观事物相对稳定特性的组织加工的过程。知觉恒常性又细分为大小恒常性、形状恒常性、颜色恒常性、距离恒常性和明度恒常性。

……

3. 知觉信息加工过程

知觉过程包括以下三个方面：觉察、辨别和确认。觉察是指发现事物信息的存在，但并不知道是什么。辨别是指把某事物的属性与其他事物的属性区别开来。确认是指利用已有知识经验和当前信息进行比较，在人脑中确定知觉对象，为其命名，并将其纳入某个范畴的过程。

认知心理学中，知觉过程分为直接知觉和间接知觉。直接知觉指个体直接从客观事物中获得信息，并对它们进行整体属性的反映。间接知觉指个体利用已有知识经验来对客观事物进行整体属性的反映。两种知觉都包含了两种相关联的信息加工过程，即自下而上加工和自上而下加工。……

——第 157, 158, 159, 160 页

”

以下的内容来自《40 亿年地球生命简史》（ [英] 尼克·莱恩 著 梅苈苈 译 文汇出版社）：

“

不过你不需要深思很快就可以想到，大脑一定需要用某种方法，把所有感觉信息整合起来，我们才可能感觉到这样一部无缝衔接的电影。来自眼、耳、鼻、触觉、记忆或肠子的各种信息，会先进入大脑的不同区域，经过处理之后才被整合成为统一的颜色、触觉或饥饿感。所有的信息都不是“真实”的，它们都只是神经信号而已，但是我们几乎不会把“看”的感觉和香味或声音搞混。就算在视网膜上真的投射着外界的倒影，但这些影像也绝对不会在大脑里面像在电影

屏幕上一样播放，它们会被视神经转换成为一系列神经信号，像传真机一样。听觉和嗅觉也类似，外界的东西从来没有真正进入我们脑内，进来的只有神经信号。胃痛也是，除了神经信号以外什么也没有。

为了让我们每分每秒都能体验这一切如同在脑中不停播放的多媒体电影，大脑必须将外界传进来的密码般的长短信号，重新转换成一个“真实的世界”，包含一切外在的影像和气味。但是我们不会觉得重建的世界存在于大脑内，我们会把它们再次投射回它们原本存在的地方。世间万物都像我们透过一个装在头颅前面的单眼装置看到的一样，这些明显都是幻觉，都是神经安排的骗局，而这些神经纤维极为重要。如果切断视神经，人就会变成瞎子，如果把一个微电极阵列植入盲人大脑的视觉中心加以刺激，他们就会看见大脑直接产生的画面，不过到目前为止，能看到的只是非常原始粗糙的影像。这些就是人工视觉的基础原理，虽然技术尚未成熟，但是可行的。电影《黑客帝国》的剧情也是根据相同的原理，所有体验都可以通过刺激脑而产生。

——第 312, 313 页

这意味着意识也一样，它并非在大脑工作时，像某种“场域”般全面地浮现出来，而是大脑上某些区域的特质，许多特异区域彼此合作无间，像一个整体一样。不过关于这件事，我们可以说目前学界几乎没有什么共识，神经科学家们看法各不相同，然而我将试着在往后的章节里阐述我的观点。

——第 318 页

”

根据以上有关意识和感知的内容，与视觉感知信息一样，其他的感知器官获取到信息后，也是将信息转换为电信号或化学信号，然后传递至大脑中枢特定区域，而后依据这些信号触发了各种感知觉，包括听觉、嗅觉、味觉和触觉，等等。

参考书籍

1. 《40 亿年地球生命简史》（[英] 尼克·莱恩 著 梅菱苕 译 文汇出版社）
2. 《生命的起源》（刘大可 著 中信出版集团）
3. 《脑研究的新大陆——一位德国工程师与一位中国科学家之间的对话》（顾凡及、[德] 卡尔·施拉根霍夫（Karl Schlagenhauf）著 顾凡及 译 上海教育出版社）
4. 《认知、大脑和意识》（[美] 伯纳德·J.巴斯 尼科尔·M.盖奇 主编 王兆新 库逸轩 李春霞 等译 上海人民出版社）
5. 《生命是什么》（王立铭 著 人民邮电出版社）
6. 《遗忘的机器：记忆、感知与“詹妮弗·安妮斯顿神经元”》（[阿根廷] 罗德里戈·奎安·基罗加 著 曹立宏 邓雅菱 译）
7. 《脑与认知科学概论（第 2 版）》（主编 王志良 副主编 谷学静 王曦 许广利 北京邮电大学出版社）
8. 《神经科学——探索脑（第 4 版）》（[美] Mark F. Bear Barry W. Connors Michael A. Paradiso 著 朱景宁 王建军 主译 电子工业出版社）
9. 《神经科学（第 4 版）》（主编 韩济生 北京大学医学出版社）
10. 《从光子到神经元——光、成像和视觉》（[美] 菲利普·纳尔逊（Philip Nelson）著 舒咬根 黎明 译 科学出版社）
11. 《生命是什么》（[奥] 埃尔温·薛定谔 著 邹路遥 译 江苏凤凰科学技术出版社）
12. 《复杂生命的起源》（[英] 尼克·莱恩 著 严曦 译 贵州大学出版社）
13. 《进化》（[英] N.H.巴顿 [美] D.E.G.布里格斯 J.A.艾森 D.B.戈尔茨坦 N.H.帕特尔 著 宿兵 等 译 科学出版社）
14. 《生命的逻辑：整合子生命观概论》（白书农 著 北京大学出版社）
15. 《核酸生物化学》（李冠一 林栖凤 朱锦天 黄惜 编著 科学出版社）
16. 《结构生物学：从原子到生命（原书第二版）》（A.利亚斯 L.利亚斯 M.-R.阿什 G.林德布卢姆 P.尼森 M.谢尔德高 苏晓东 等 译 科学出版社）
17. 《蛋白质导论》（王克夷 编著 科学出版社）
18. 《生命通史》（朱钦士 著 北京大学出版社）
19. 《战斗细胞——人体免疫系统奇妙之旅》（[德] 菲利普·德特玛 著 李超群 译 海南出版社）
20. 《语言、脑进化与认知》（江铭虎 主编 清华大学出版社）

21. 《神经元突触传递的细胞和分子生物学（神经生物学基本原理）》（盛祖杭 主编 上海科学技术出版社）
22. 《王立铭进化论讲义》（王立铭 著 新星出版社）
23. 《生机勃勃的尘埃——地球生命的起源和进化》（[比] 克里斯蒂安·德迪夫 著 王玉山 等译 上海世纪出版集团）
24. 《群论彩图版》（[美] 内森·卡特（Nathan Carter）著 郭小强 罗翠玲 译 机械工业出版社）
25. 《人工智能算法（卷3）：深度学习和神经网络》（[美] 杰弗瑞·希顿（Jeffery Heaton）著 王海鹏 译 人民邮电出版社）
26. 《语言文字、思维活动和大脑的功能逻辑——基于逻辑存储结构的推理模型》