

信息学院人工智能专业方向

# 《脑与认知科学》

脑科学基础：人脑的基本结构和功能

- 注：本课程部分内容整理自课程教材、参考书籍或公共资源，特此致谢！

# 人脑和电脑的异同

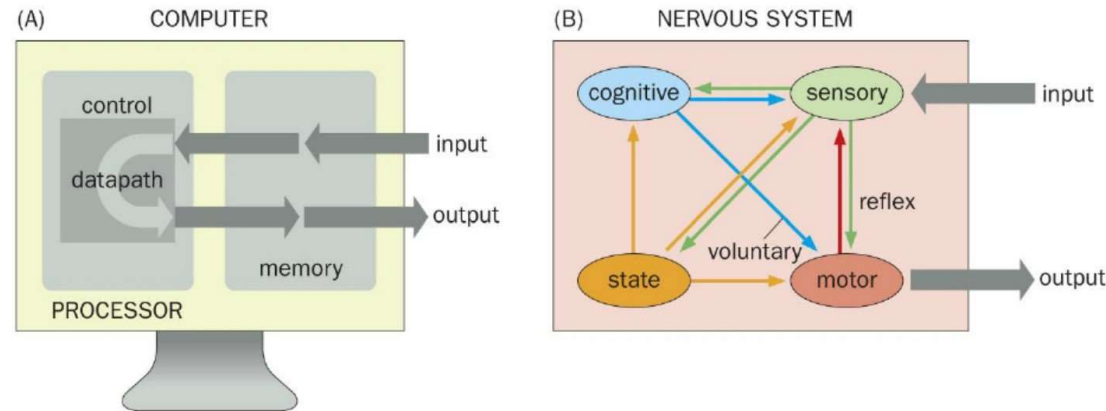


Figure 1-26 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)



不适定问题

Table 1-1: Comparing the computer and the brain

Properties	Computer <sup>1</sup>	Human brain
Number of basic units	up to $10^9$ transistors <sup>2</sup>	$\sim 10^{11}$ neurons; $\sim 10^{14}$ synapses
Speed of basic operation	$10^{10}$ /s	$< 10^3$ /s
Precision	1 in $4 \times 10^9$ for a 32-bit number	$\sim 1$ in $10^2$
Power consumption	$10^2$ watts	$\sim 10$ watts
Processing method	mostly serial	serial and massively parallel
Input/output for each unit	1–3	$\sim 10^3$
Signaling mode	digital	digital and analog

<sup>1</sup> Based on personal computers in 2008.

<sup>2</sup> The number of transistors per integrative circuit has doubled every 18–24 months in the past few decades; in recent years the performance gains from this transistor growth has slowed, limited by energy consumption and heat dissipation.

(Data from von Neumann [1958] The Computer and the Brain 1st ed. Yale University Press; Patterson & Hennessy [2012] Computer Organization and Design, 4th ed. Elsevier).

Table 1-1 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

# 爱因斯坦大脑的故事

## KEY CLUE SOUGHT IN EINSTEIN BRAIN

Study of Blood Vessels in Its  
Covering May Shed Light  
on Secret of Genius

By WILLIAM L. LAURENCE

The brain of Dr. Albert Einstein, to be studied with the most up-to-date methods, may shed light on one of nature's greatest mysteries—the secret of genius.

The brain that, in a living body, vastly extended the horizons of man's understanding of his universe, may, as a result of the studies, open new vistas of knowledge after its death.

Studies aimed at locating the "seat of intelligence" in the human brain have been carried out for nearly a century by comparing the anatomy of the brains of men of genius with

those of ordinary mortals. The studies were described by Dr. Edward Podolsky, New York psychiatrist, in his book, "The Thinking Machine" (Beechhurst Press, Inc., 1947).

The first such study was undertaken in 1860 by Dr. Rudolph Wagner, to whom were bequeathed the brains of three men of genius, including Karl Friedrich Gauss, one of the greatest mathematicians of all time (1777-1855).

Dr. Wagner undertook a careful study, comparing the brain of Gauss with that of an ordinary day laborer. He compared the depth of the fissures, the weights, and the number and pattern of the convolutions of the two brains. It turned out that the brain of one of the intellectual giants of all time and the brain of the common laborer were "practically identical in all respects."

**On Weight and Convolutions**

In other studies it was found that the brain of an idiot might weigh more than that of a man of superior talent. The brains of

been rather light in weight. The depth and number of convolutions in the brains of men of talent were found to be no more complicated than those in the brain of a moron. In fact, it was found impossible to distinguish between the brain of a genius and that of an illiterate laborer.

Attention was then focused on the frontal lobe of the brain as the possible "seat of intelligence." However, a careful study of the frontal lobes of the brain of G. Stanley Hall, eminent psychologist and university president, and of Sir William Osler, world-famous physician, revealed no essential differences from the frontal lobes of ordinary individuals.

Attention was then focused on studies of the arterial systems supplying to the brain the fuel it burns for its proper functioning. It was realized that two engines, equal in every respect, might nevertheless function very differently if one were supplied with better grade gasoline and lubrication, as well as a better supply system.

Since the fuel of the brain—

mostly sugar—is carried by the blood stream, which is carried by the blood vessels, the studies were concentrated on the brain's blood supply and the number and quality of its blood vessels.

**Brain Coverings Important**

The "most serious mistake the early brain anatomists made when studying the brain," Dr. Podolsky said, "was to remove and discard the brain coverings," whereas "it was not the brain itself but the membranes which covered the brain that had the most interesting story to tell."

"The brain coverings," he continued, "contain the arteries and veins that nourish the brain, hence a study of the size and complexity of these arteries may tell us more about brain power than the size, weight and complexity of the brain structure itself."

The first studies of brain coverings of individuals of superior mental power, as compared with those of ordinary mental ability, were made in 1926. These re-

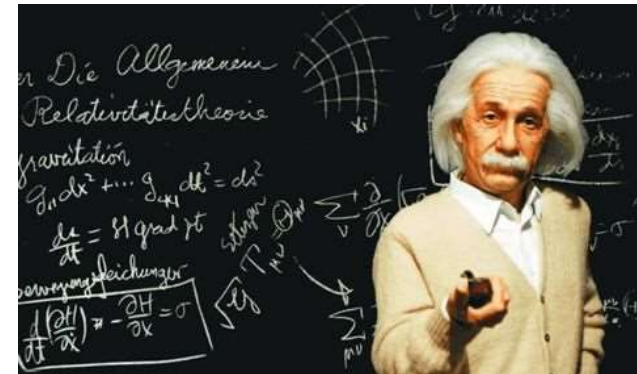
vealed, Dr. Podolsky asserts, real differences between the two types of brains.

It was found that the blood supply systems of the brain coverings of those with superior mental endowment were richer and more complex. It was further found that the brain coverings (meninges) of men of genius had blood vessels of "magnificent caliber" and were rich in the number of these "pipelines." The half-wit, on the other hand, was found to have a brain covering poor in the number of these blood vessels, which were of restricted caliber.

Dr. Thomas F. Harvey, pathologist at the Princeton Hospital, where the studies on the Einstein brain will be carried out by a team of experts, was asked yesterday whether, in removing the brain for study, the brain coverings had also been saved. He replied in the affirmative.

Asked whether the brain could be reassembled after its dissection in small segments for minute studies, Dr. Harvey replied in the negative.

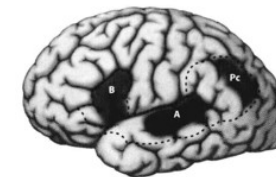
The New York Times  
Published: April 20, 1955  
Copyright © The New York Times



<https://www.guokr.com/article/442489/>

## 爱因斯坦大脑的故事

- 1985年,《实验神经学》刊登了戴蒙和哈维的论文《一个科学家的大脑:艾伯特·爱因斯坦》。论文里比较了爱因斯坦的大脑和另外11颗男性大脑的四个区域,发现在左脑39区角回处,爱因斯坦的“神经胶质细胞与神经元之比”特别高,平均多出73%的神经胶质细胞。那里是与语言相关的韦尼克区(Wernicke's area)的一部分
- 研究者认为,这可能提示,爱因斯坦那个脑区的神经元有着更多的神经胶质细胞支持,消耗了更多氧气和营养



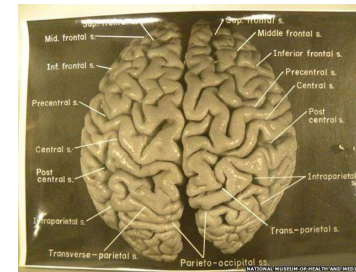
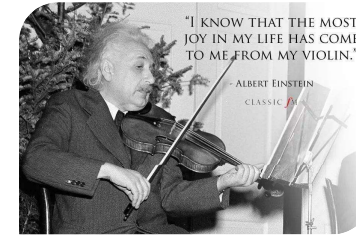
A=Wernicke 感觉语言中枢;  
B=Broca语言区; Pc=与语言  
理解和意义相关的Wernicke区

<https://www.guokr.com/article/442489/>



## 爱因斯坦大脑的故事

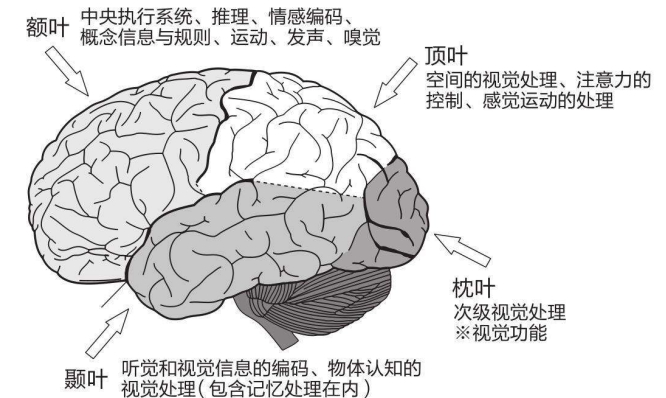
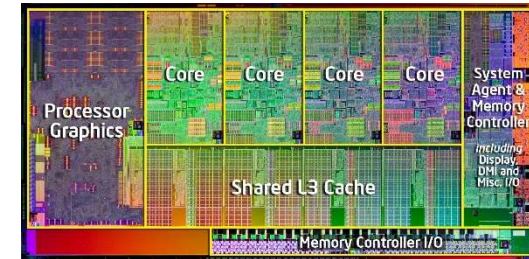
- 1996年,《神经科学快报》上发了一篇论文《爱因斯坦的额叶皮质厚度和神经元密度改变》,认为爱因斯坦的右侧前额叶皮质比其他大脑更薄,神经元密度更大。这可能让信息交换速度更快
- 1999年,《柳叶刀》上发了一篇论文《爱因斯坦的杰出大脑》,认为和另外35颗男性大脑相比,爱因斯坦的大脑负责数学能力和空间推理的顶叶大出差不多15%



<https://www.guokr.com/article/442489/>

# 大脑的基本结构与功能

- 对神经系统结构进行研究，探究神经系统各部分的结构与功能，描述这些结构之间的关联
- 对大脑神经结构的研究主要在两个层面上进行
  - 微观层面：被称为精细解剖学，神经元甚至亚细胞结构之间的组织关联
  - 宏观层面：被称为大体解剖学，可以用肉眼进行区分的整体结构及其关联

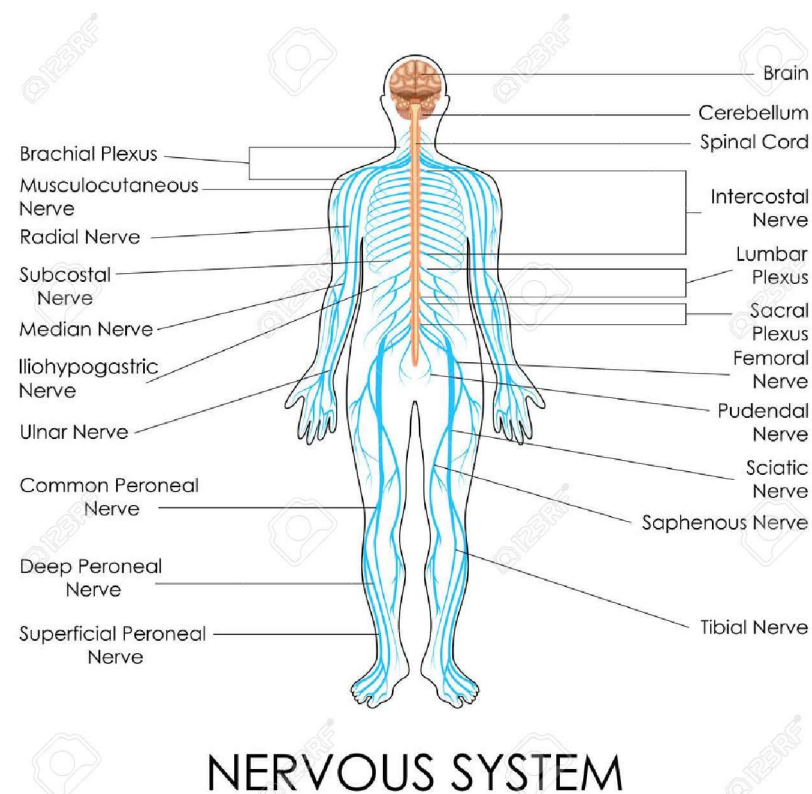


大脑3D可视化网站

<https://www.brainfacts.org/>

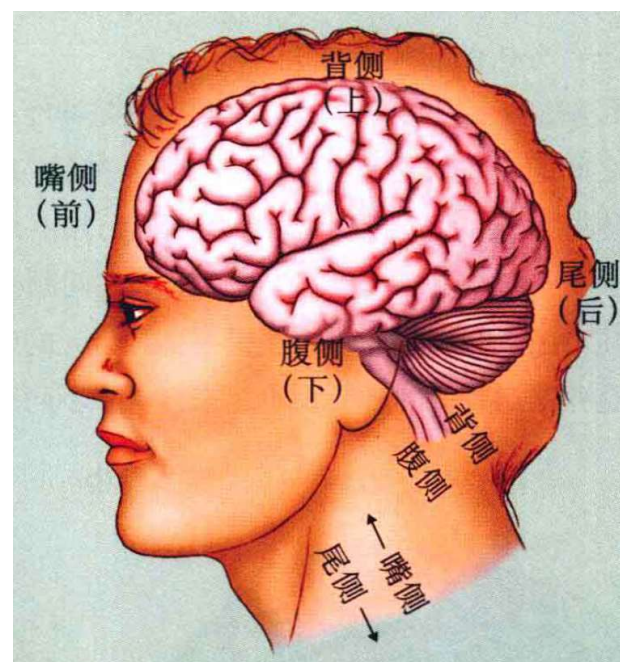
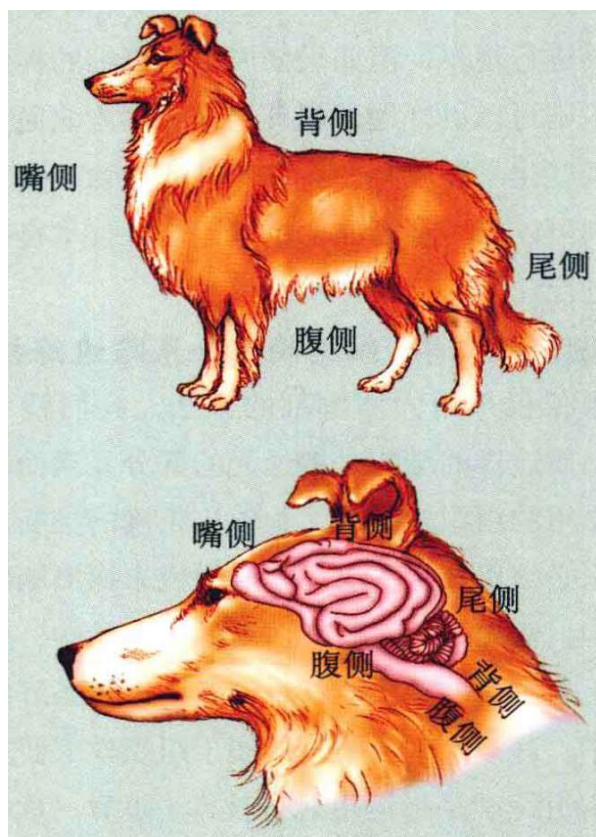
## 神经系统构成

- 中枢神经系统：包括脑和脊髓，是神经系统中进行命令和控制的部分
- 周围神经系统：神经系统中其他组分，负责传递信息



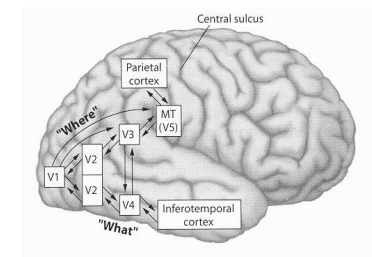
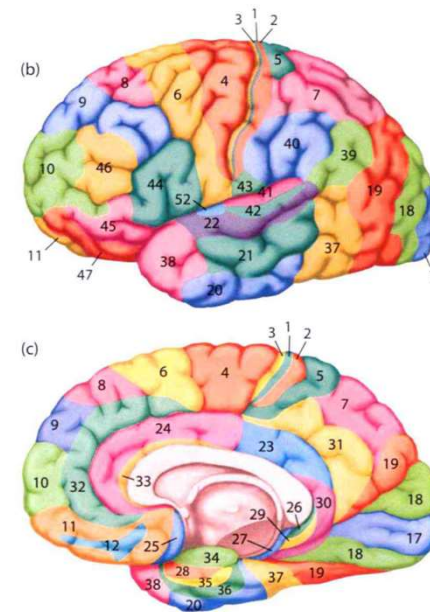
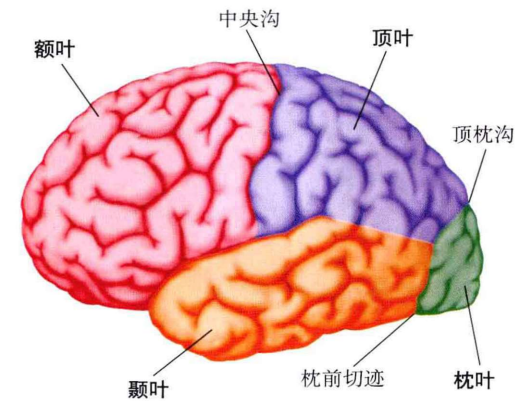


## 人脑的解剖学定位术语



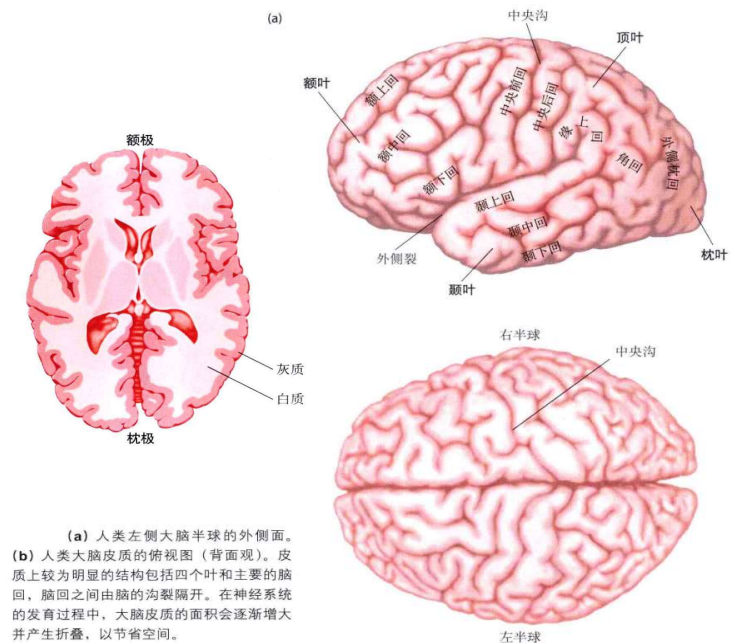
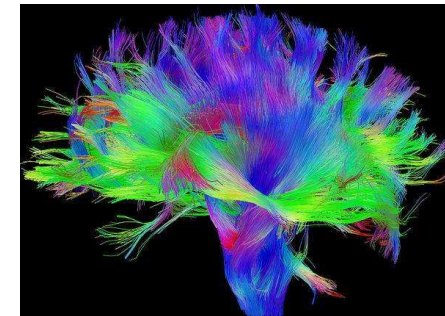
## 大脑解剖学分区

- 脑叶分为：
  - 额叶(frontal lobe)
  - 顶叶(parietal lobe)
  - 颞叶(temporal lobe)
  - 枕叶(occipital lobe)
- 胼胝体(corpus callosum)
  - 由发源于皮质神经元的轴突构成，连接左右大脑半球的神经束
- Brodmann分区：按细胞形态和组织结构划分
  - 与脑功能分区不完全重合
  - 如第17区与初级视皮层(V1区)重合，但第18区与视皮质V2区不重合



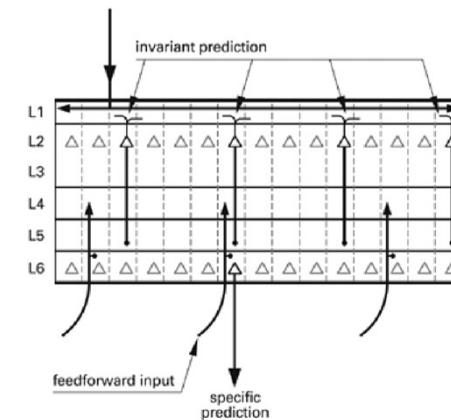
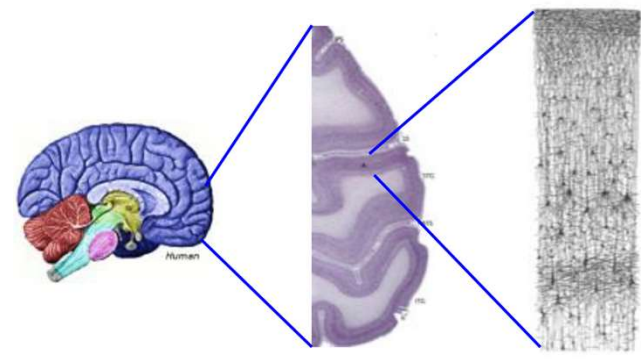
## 大脑皮质

- 大脑皮质(cerebral cortex)上存在大量沟回，增加了皮质的总面积，同时便于神经元之间形成紧密的三维联系
- 皮质：多层细胞构成，但平均厚度仅为3mm，包含神经元的细胞体、树突和部分轴突，因含细胞体导致颜色较深，也被称为“灰质”
- 皮质下是神经元轴突构成的神经束，因颜色较白被称为“白质”



## 大脑皮质

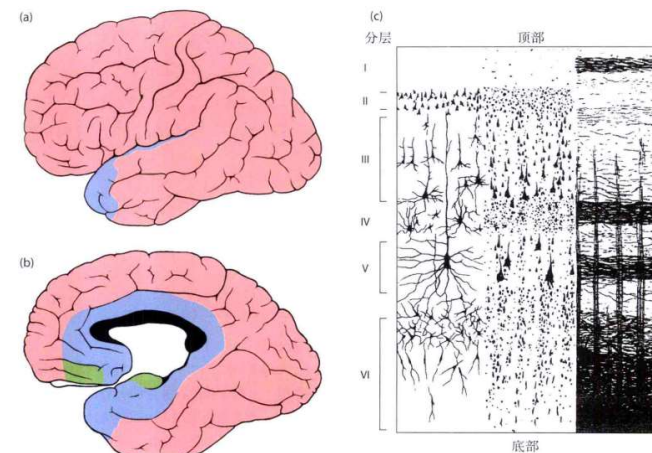
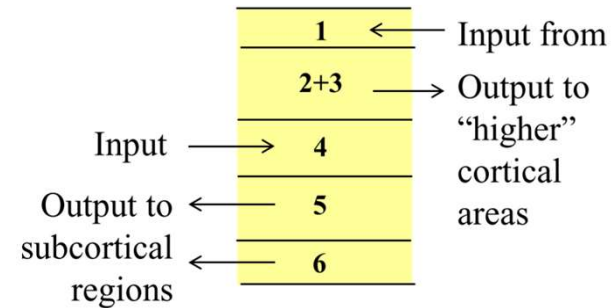
- 大脑皮质是人类思想、意识和智能的物质基础
  - 大脑皮质中包含300亿个神经元，每个神经元可以产生约1万个突触，总连接数可达到 $3 \times 10^{14}$ 个！
  - 大脑皮质的微观结构模式相对统一，由多层神经元构成，因此大脑皮层可能采用某种通用的计算模式进行信息处理





## 大脑皮质的分层模式

- 新皮质 (neocortex):
  - 占大脑皮质的90%，由6层细胞组成的新皮质构成，其神经元组织方式具有高度特异性
  - 包括感觉皮质、运动皮质和联合皮质
- 中间皮质:
  - 也由6层神经元构成
  - 主要包括扣带回、海马旁回等边缘系统中的皮质
- 异质皮质:
  - 仅含有1-4层神经元
  - 包括海马、初级嗅皮质等

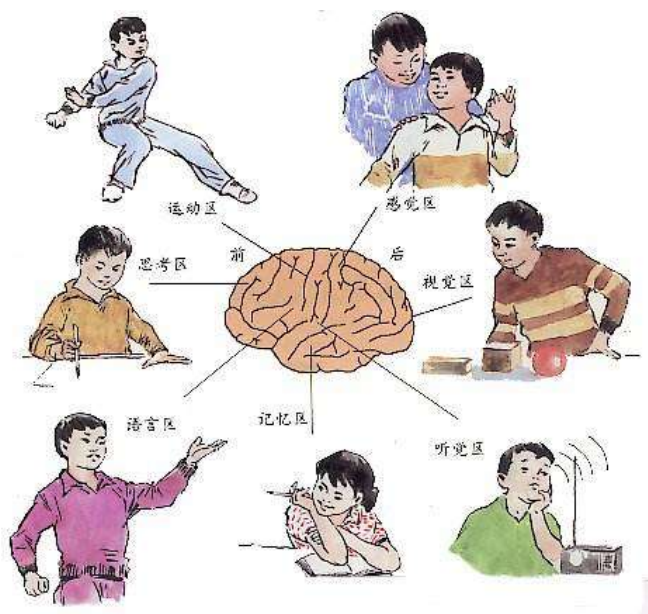


不同颜色表示皮质之间神经元的分层存在差异。(a) 左半球的外侧面。(b) 右半球的内侧面。(c) 新皮质神经元的分层示意图，用三种染色方法可以看到多种不同的细胞结构。左侧是用 Golgi 染色法染色后的示意图，仅有很少的神经元被染色，但是每个神经元都可以看得很清楚；中间的图是 Nissl 染色法染色后的示意图，可以看到神经元的细胞体；右侧为 Weigert 染色法染色后的结果，由于 Weigert 染色法会选择性地对髓鞘进行染色，因此能够很清晰地看到神经元的纤维。



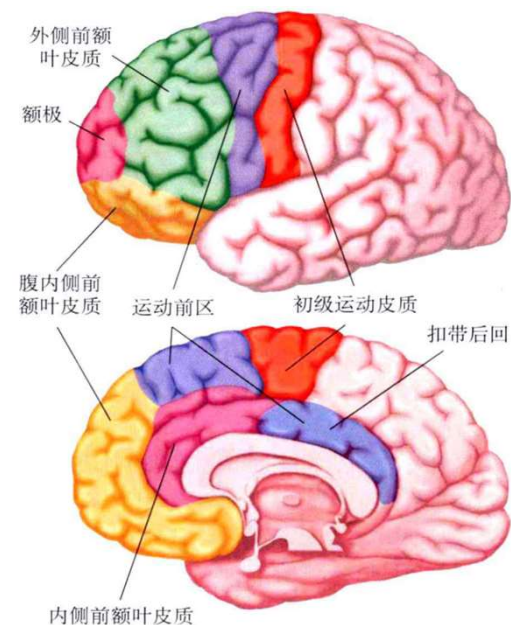
## 大脑皮质的功能分区

- 大脑皮质在信息处理过程中发挥多方面的作用，主要的功能系统一般都能够定位在某一个脑叶中



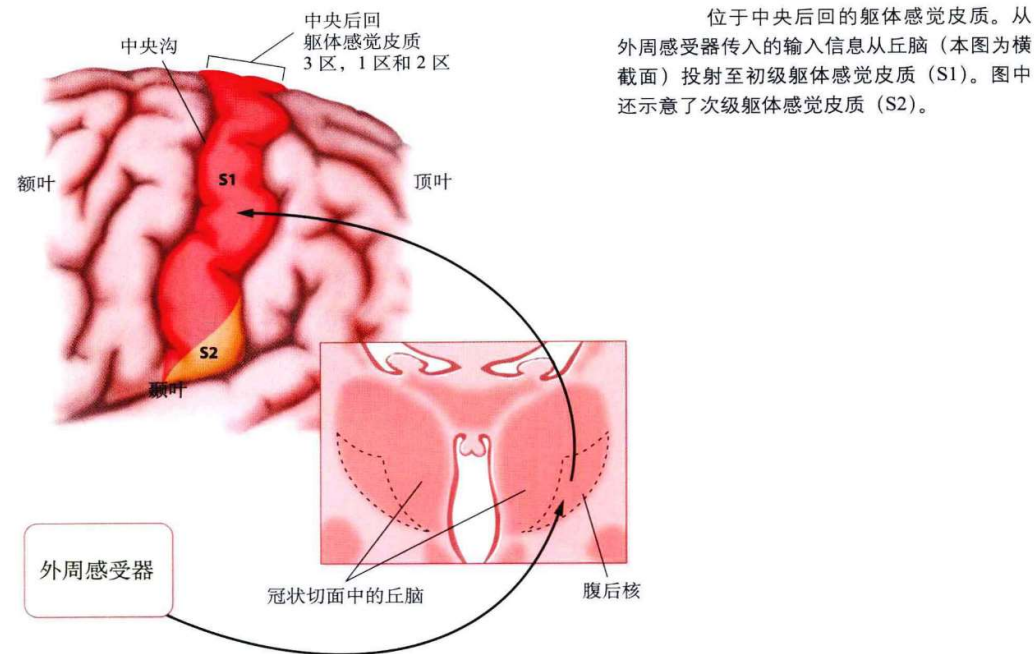
## 额叶中的运动区

- 额叶中的运动皮质 (premotor cortex) 在运动的执行方面起重要作用
- 初级运动皮质位于额叶后部，其前侧和腹侧是次级运动皮质，包含运动前区、辅助运动区、Broca区等



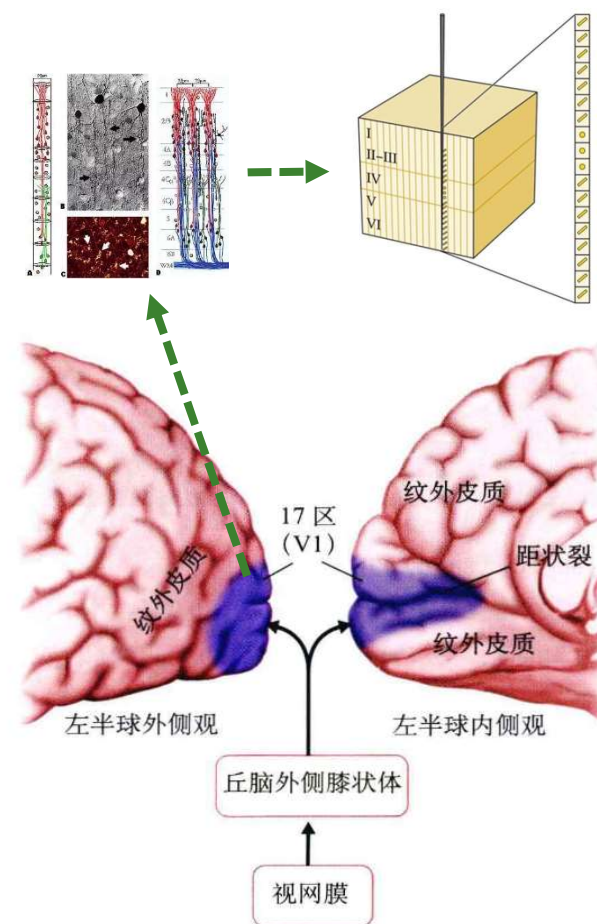
## 顶叶中的躯体感觉区

- 顶叶中的躯体感觉皮质(somatosensory cortex)，接受来自丘脑的躯体感觉输入，包括触觉、痛觉、温度和本体感觉（肌肉、关节等运动器官本身产生的感觉）等



## 枕叶中的视觉加工区

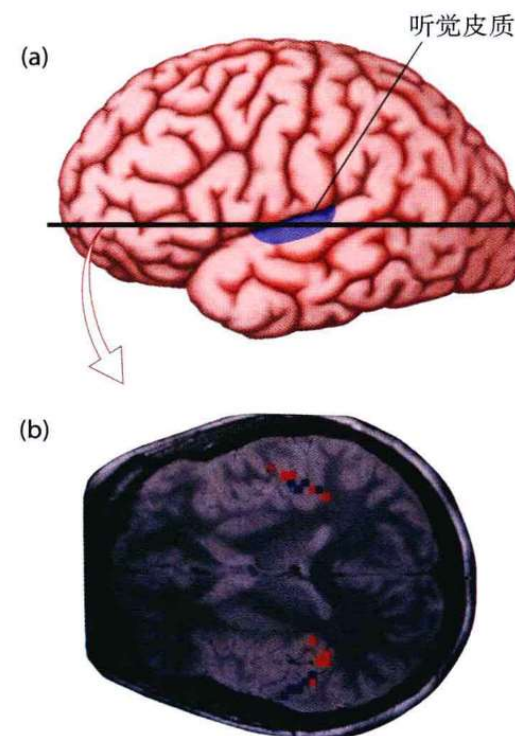
- 初级视觉皮质（primary visual cortex，也称纹状皮质、V1区）位于大脑半球的内侧，仅有少部分位于大脑表面
  - 接收丘脑外侧膝状体传来的视觉信息
  - 皮质内6层细胞负责对颜色、亮度、空间频率、朝向及运动等信息进行编码和加工
- 初级视觉皮质将视觉信息传递给枕叶中的高级视觉皮质（纹外皮质）进一步处理



位于枕叶的视皮质。BA17区，也称为初级视皮质（V1），位于枕极（occipital pole），并且一直延伸至半球的内侧面，大部分埋藏于距状裂中。

## 颞叶中的听觉加工区

- 来自耳蜗的听觉信号通过丘脑的内侧膝状体最终到达颞叶上部的听觉皮质，经信息加工后形成对声音的感觉

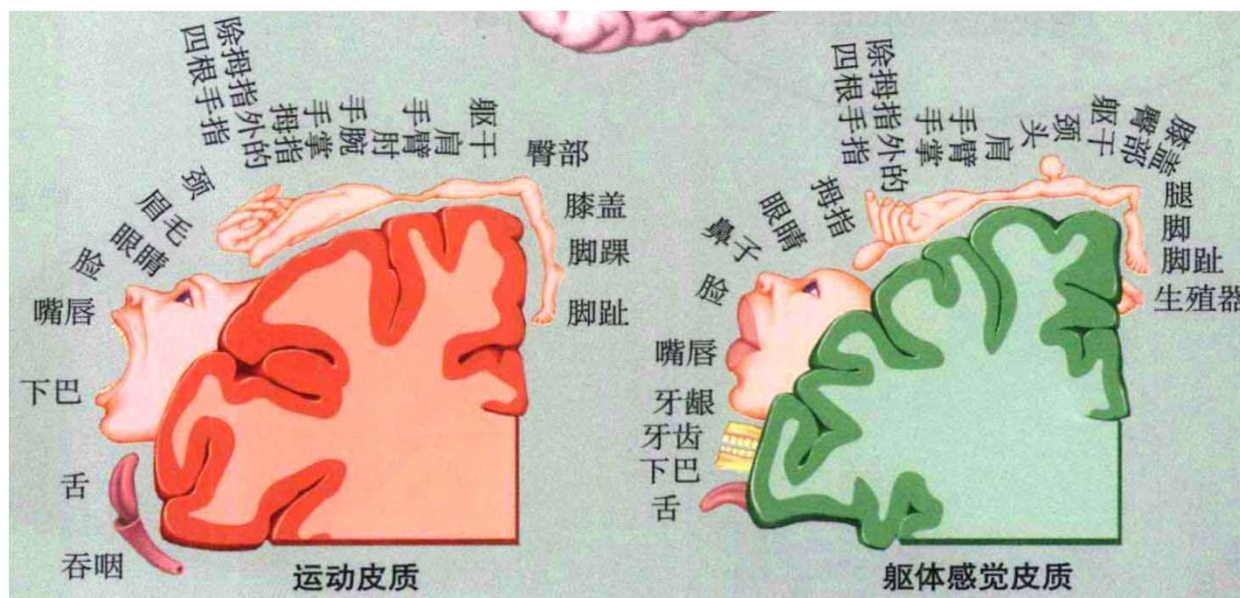


(a) 位于上颞叶的初级听觉皮质。初级听觉皮质以及周围的听觉联合区包含对听觉刺激的反应，呈现为音质定位。(b) 这张磁共振成像水平切面图所呈现的是接收到许多不同频率声音刺激的上颞叶区域，图中显示出神经激活的结果：血流量增加。



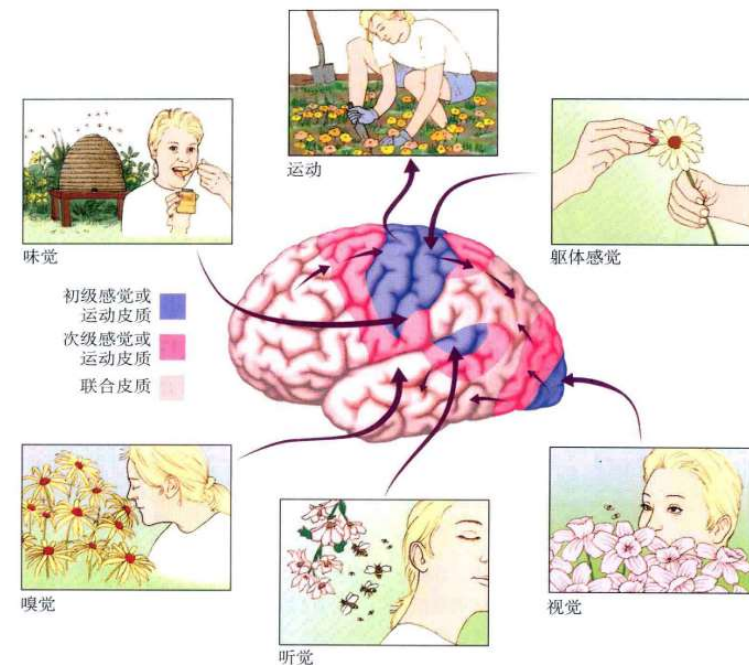
## 感觉和运动皮质的拓扑图

- 对于躯体感觉和运动的信息加工，身体和大脑皮质之间存在空间拓扑关系，被称为大脑皮质的功能拓扑图



## 联合皮质

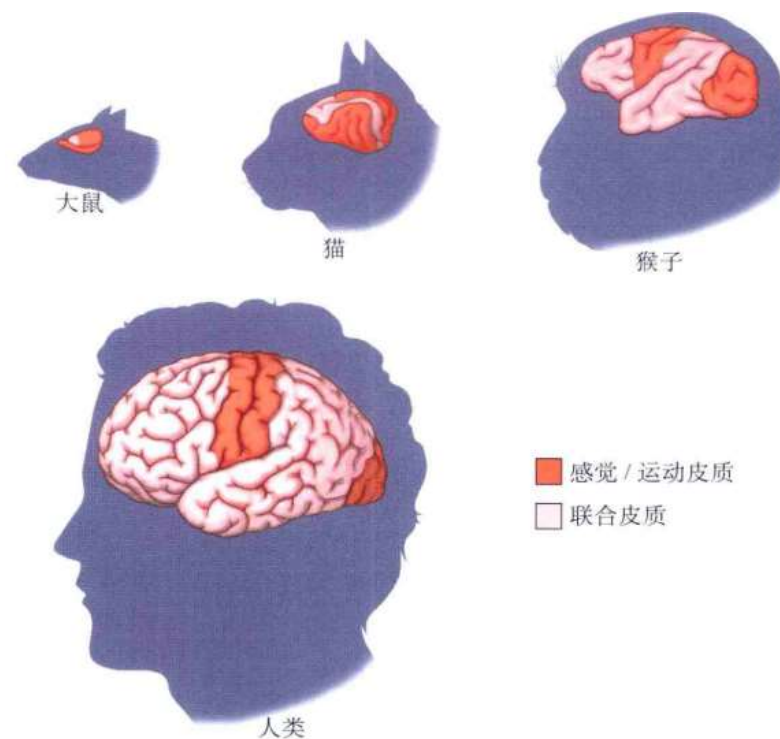
- 新皮质中不能单纯划分为感觉或运动的部分称为联合皮质
- 接收多个皮质区域的输入信息，其中的神经元被多种感觉信息所激活，其作用也很难被单纯划分为感觉或运动



初级感觉和运动皮质及周围的联合皮质。蓝色的区域所代表的是初级皮质，即负责接受来自上行感觉通路信息的区域，以及负责向脊髓传送信息的初级输出区域。红色的部分是次级感觉和运动区域，其余部分则是联合皮质。

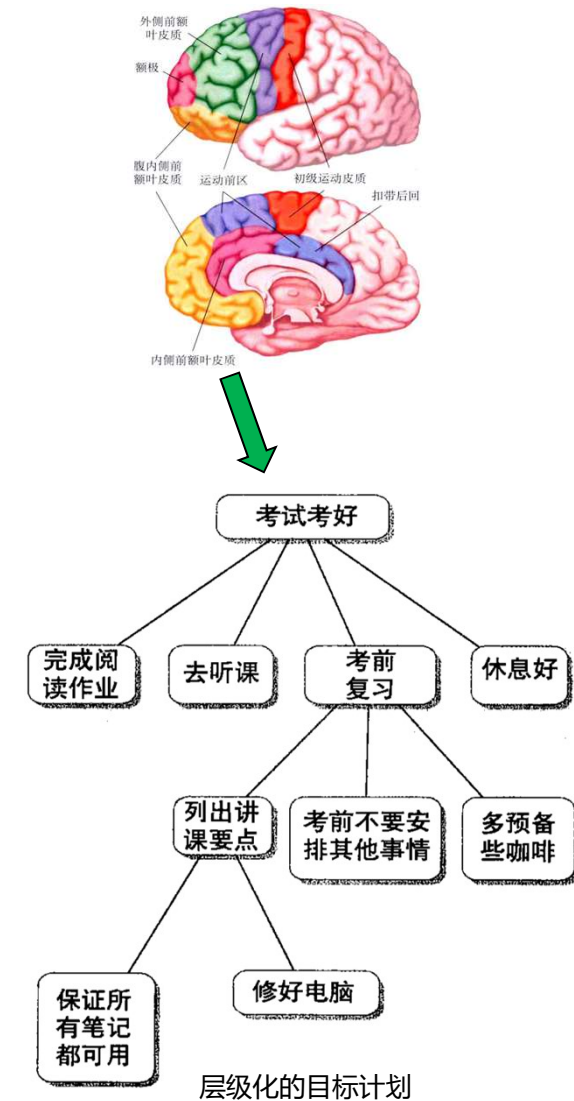
## 不同动物大脑中的联合皮质占比

哺乳动物从鼠到猫、猴和人的进化过程中，脑特别是新皮质的面积增加，其中联合皮质的占比在所有哺乳动物中最大



## 前额叶皮质

- 人类前额叶皮质 (pre-frontal cortex) 属于联合皮质，占额叶皮质的一半
- 前额叶皮质中包含大量的神经网络，与几乎所有的大脑皮质都存在直接或间接联结
- 前额叶皮质在人类对实现某种目标所采取行动的计划和执行、记忆等认知过程中发挥重要作用





## 中国科大发现脑内负责压力应对行为的神经元

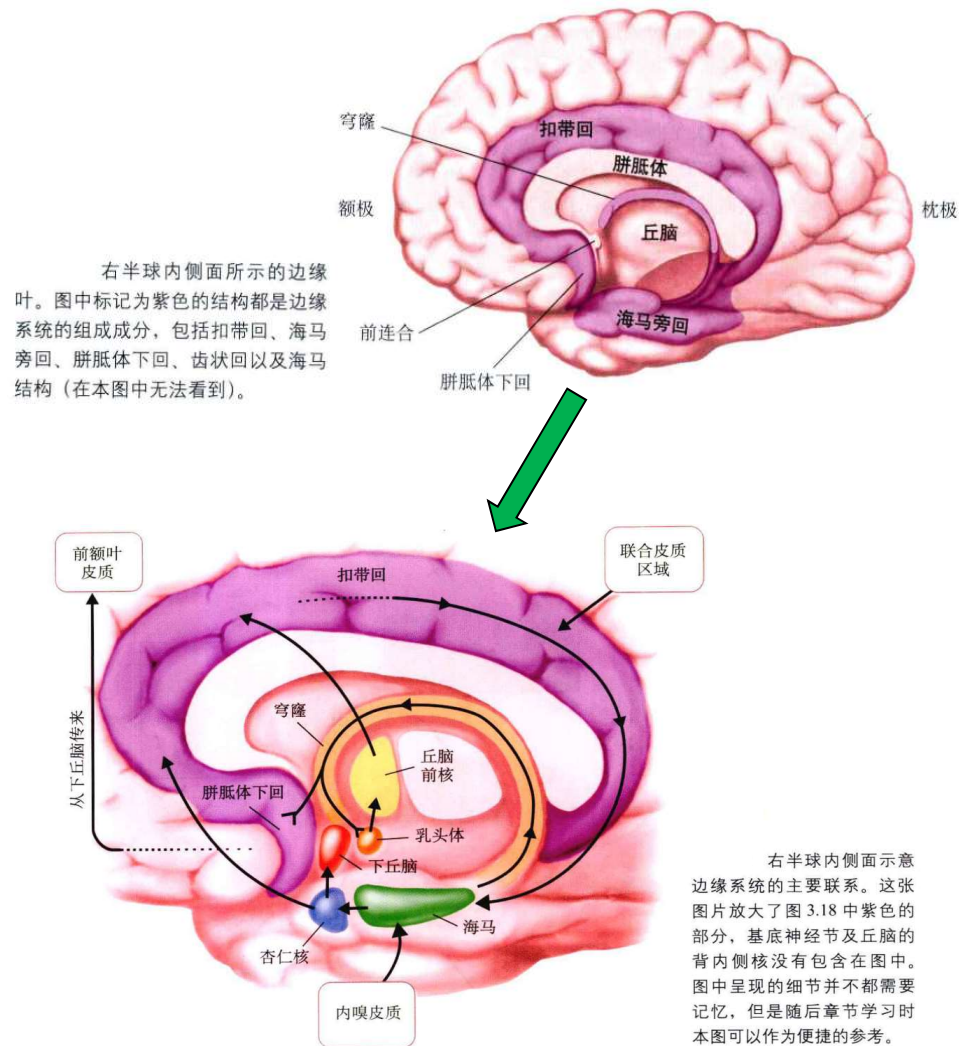
- 面对压力每一个个体都将做出选择：是主动应对还是被动回避，即“战斗或逃跑”的选择问题
- 内侧前额叶的促肾上腺皮质激素释放激素（CRF）神经元是决定选择“战斗或逃跑”的关键
  - CRF神经元为一种抑制性的中间神经元，并与椎体神经元构成神经回路
  - CRF神经元的激活则促进主动应对的“战斗”行为，个体抗压能力增强
  - CRF神经元的失活则促进被动应对的“逃跑”行为，个体抗压能力减弱





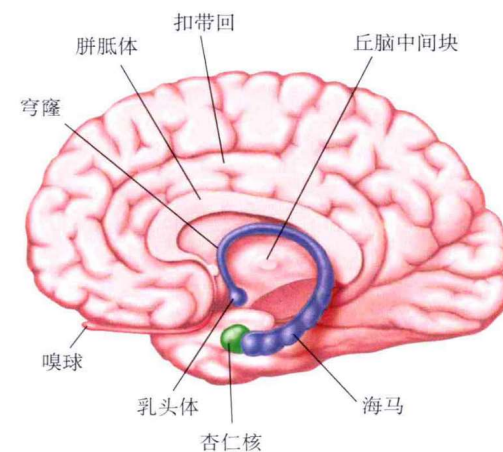
## 边缘系统

- 边缘系统(limbic system)也称边缘叶，包括以下区域：
  - 扣带回(cingulate gyrus)
  - 海马(hippocampus)
  - 海马旁回(parahippocampal gyrus)
  - 丘脑(thalamus)
  - 下丘脑(hypothalamus)
  - 杏仁核(amygdala)
- 参与情绪、学习和记忆的加工

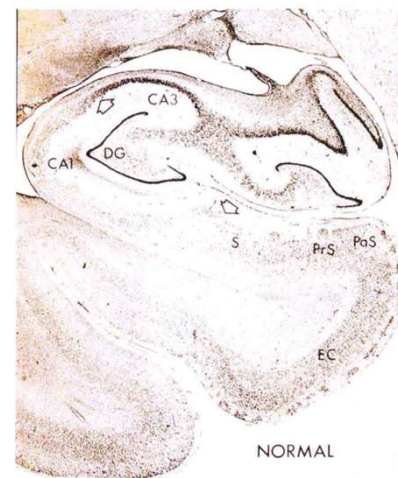


## 海马

- 海马 (hippocampus) 位于颞叶的腹内侧，属于异质皮质，仅由3-4层神经元构成
  - 可分为解剖结构不同的CA1-CA4区
  - 在记忆和学习方面有重要作用



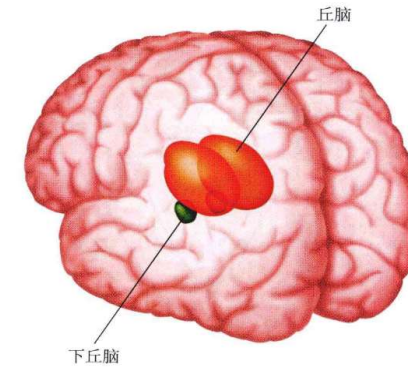
海马结构的解剖。海马位于颞叶内侧下部。



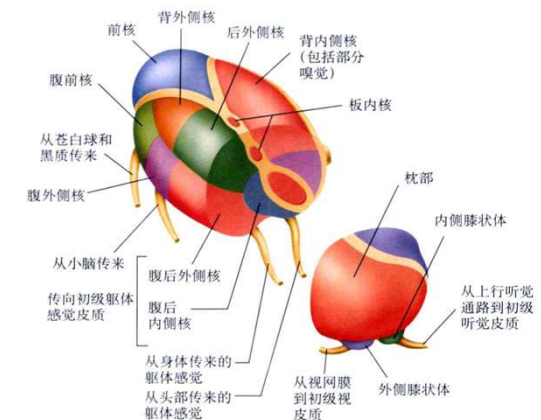
海马横切面的组织学切片。可以看到齿状回 (DG)、内嗅皮质 (EC)、下托 (S) 以及 CA 区的细胞。图中同样标出了前下托 (PrS) 和旁下托 (PaS)。

## 丘脑

- 丘脑(thalamus) 包括外侧膝状体、内侧膝状体、腹后侧核团等
- 丘脑被称为“皮质的关口”，除了嗅觉输入以外，其余感觉通道的信息都需要经过丘脑中的相应区域后到达初级感觉皮质
  - 视觉：视网膜神经元→外侧膝状体→初级视皮质
  - 听觉：内耳听觉神经元→内侧膝状体→初级听皮质
  - 躯体感觉：躯体感觉神经元→腹后侧核团→初级躯体感觉皮质
- 丘脑不仅是感觉信息输入大脑的中继站，还接收大量来自相同皮质区域的输入信息

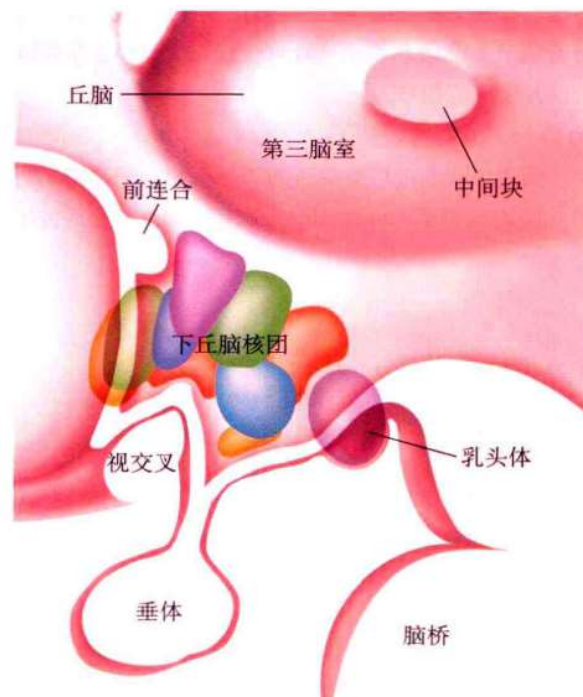


丘脑的大体解剖。这张图用一种透视的角度呈现了左、右两个半球中的丘脑。丘脑呈卵圆形状。它是感觉系统和皮质之间的门户，其不同部分与皮质中相应的区域之间存在双向环路。下丘脑同时也受到脑干投射系统的支配。



## 下丘脑

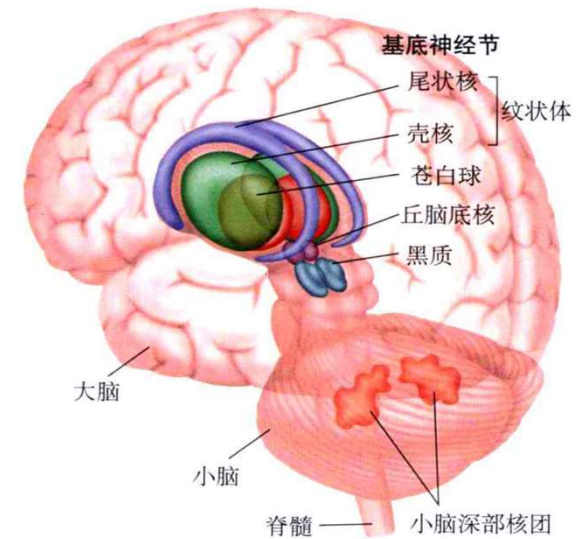
- 下丘脑 (hypothalamus) 对神经系统和内分泌系统非常重要，还参与情绪控制过程并控制与其底部相连的垂体
- 接收边缘系统等其他脑区的输入信息以调节生理周期的节律
- 输出信息到前额叶皮质、垂体等脑区，还可以通过向血液中释放激素进行远距离的神经调控



下丘脑的正中矢状切面。图中呈现了许多核群。下丘脑位于第三脑室的底部，正如其名字暗示的一样，它位于丘脑的下侧。图片的左侧代表解剖结构中的前侧。

## 基底神经节

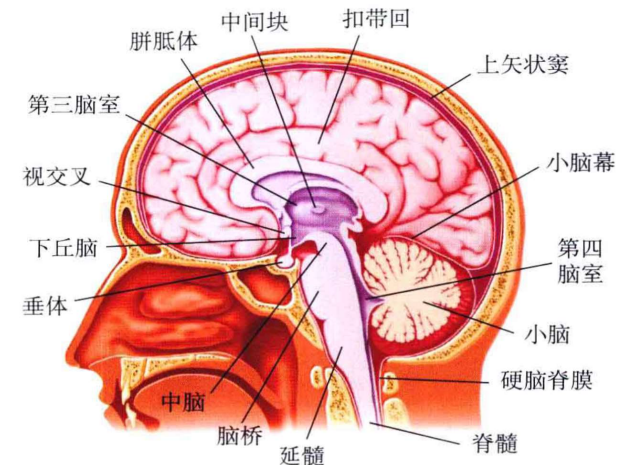
- 基底神经节 (basal ganglia) 是皮质下多个神经组织的集合，在运动控制中起重要作用
- 基底神经节并不参与对运动的直接控制，而是参与监控运动活动的进程





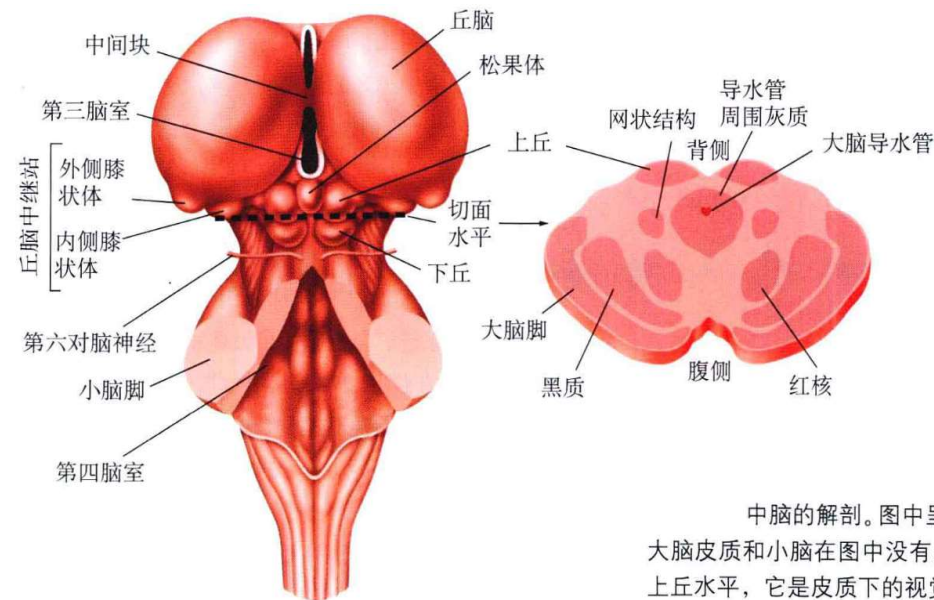
## 脑干

- 脑干(brainstem)介于脑和脊髓之间，包括中脑(midbrain)、脑桥(pons)和延髓(medulla)三个部分
- 脑干控制呼吸、睡眠和觉醒等意识，因此损伤大多致命，而皮质损伤相对影响较小



## 中脑(midbrain)

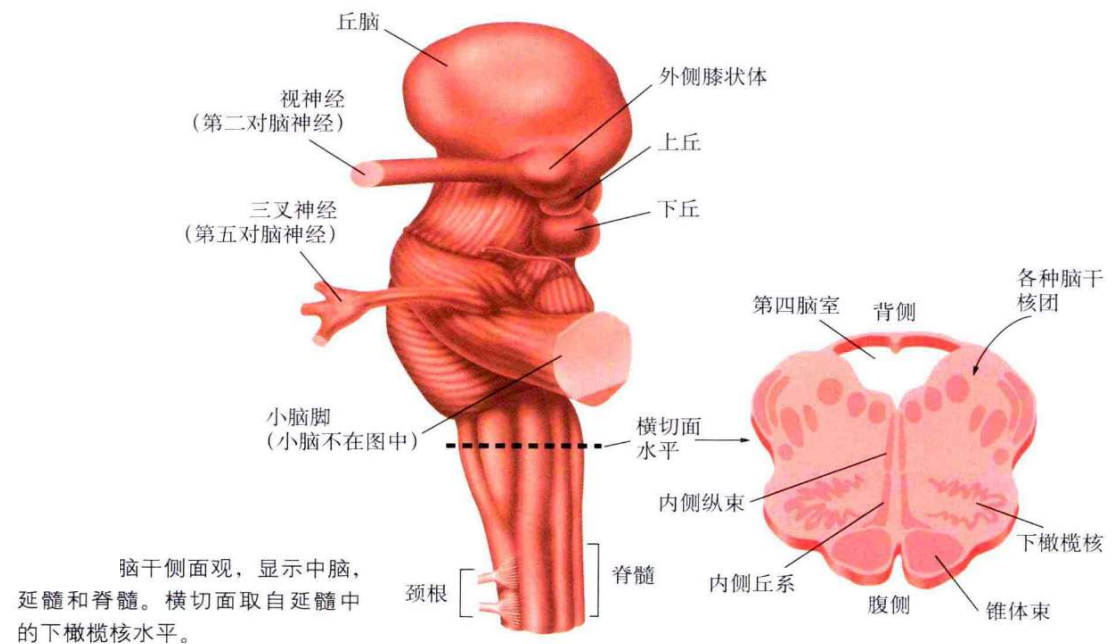
- 参与视觉运动（上丘、动眼神经核、滑车神经核等）、视觉反射（顶盖前区）、听觉中继（下丘）和运动调节（红核）等
- 脑中网状结构是一系列运动和感觉核团的集合，参与唤醒、呼吸、心血管调节、肌肉反射活动、疼痛的调节



中脑的解剖。图中呈现的是脑干的背侧面，大脑皮质和小脑在图中没有呈现。横切面取自中脑上丘水平，它是皮质下的视觉运动核团。

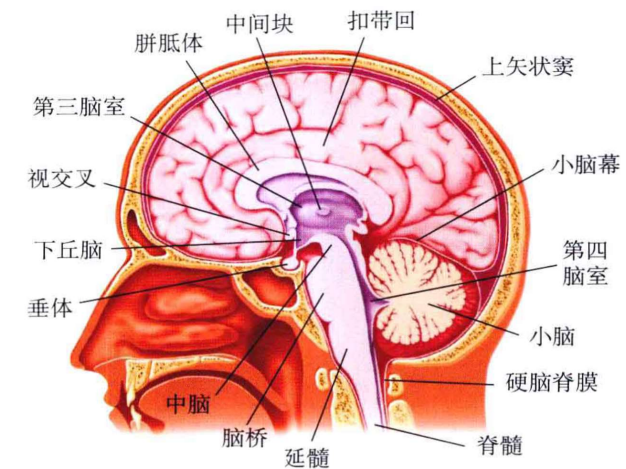
## 脑桥 (pons) 和延髓 (medulla)

- 脑桥主体由大量的神经束及其中散布的脑桥核团组成
- 脑桥核团功能包括：
  - 听觉和前庭觉（平衡）的功能
  - 面部、嘴部的感觉运动
  - 部分眼外肌肉的视觉运动
- 延髓位于脑部最末端，与脊髓相连，存在大量与躯体感觉、躯体运动、面/嘴/腹部感觉、心脏、颈/舌/咽等运动相关的核团



## 小脑

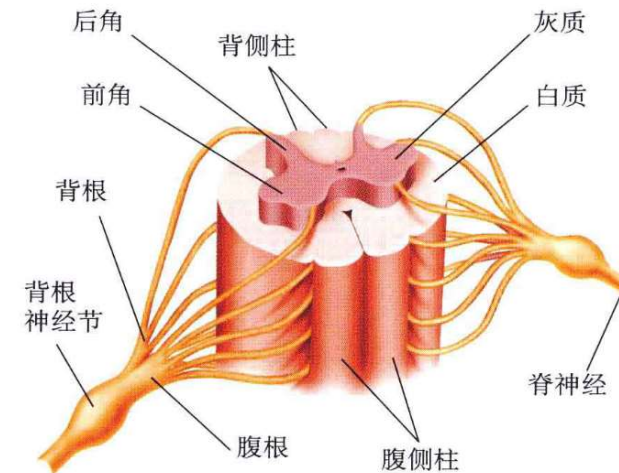
- 小脑(cerebellum)覆盖于脑干上部，处于脑桥水平位置
- 小脑有约110亿神经元，与中枢神经系统其余部分相当！
- 参与运动和感觉信息加工，但不直接控制运动，而是整合身体和运动信息并调整运动，从而维持姿态、行走以及协调运动，使其变得流畅而协调





## 脊髓

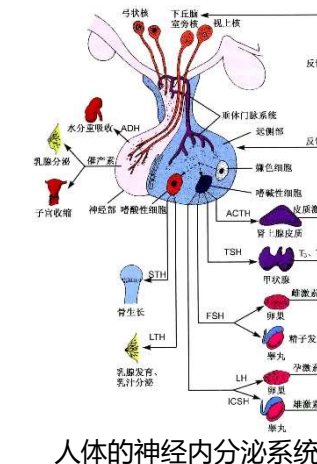
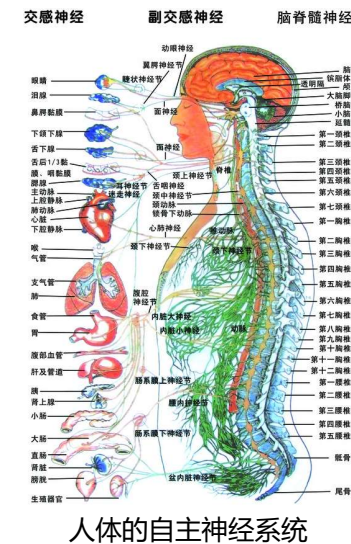
- 脊髓后角内的感觉神经元：从身体的外周感受器中接收感觉信息并传导到大脑皮质
- 脊髓前角内的运动神经元：将大脑产生的运动控制信息传递到相应的肌肉组织



脊髓的大体解剖。图中包括脊髓的横切面和三维图示，其中可以看到中央由神经元胞体组成的蝴蝶状灰质，以及周围的白质神经束。后者负责从脑部沿着脊髓向下传送信息到脊髓中的神经元，同时也负责从外周感受器向上传递信息至脑部。图中同样呈现了进出脊髓的前根和后根；它们融合在一起形成周围神经。外周感觉输入的胞体位于后根的神经节，并在后根中通过轴突将信息传递至中枢神经系统。运动神经元位于脊髓前角，它们在前根中通过轴突传递信息支配外周肌肉组织。

## 人的运动和调控系统

- 人类可以通过复杂的神经系统对外界环境的输入信息获得对所处环境的感受，并根据感觉信息来输出行动
- 与输出相关的神经系统主要包括三种类型，即运动系统、自主神经系统和神经内分泌系统
  - 运动系统：控制骨骼肌实现人体运动，如伸手抓握物体、行走、说话或保持身体姿态
  - 自主神经系统：控制平滑肌和心肌的收缩，调控内脏的功能
  - 神经内分泌系统：分泌激素调节人的生理和行为，如对食物及昼夜光线周期性变化的反应
  - 丘脑是自主和神经内分泌系统的共同调控中心



## 神经系统的运动控制

- 运动控制的神经系统具有非常复杂的分层组织
  - 脑：与运动相关的大脑皮质、小脑、基底核、脑干(运动相关神经元核团)
  - 脊髓：脊髓内部的神经回路(如膝跳反射回路)、感觉和运动神经元及在骨骼肌内的神经末梢
- 感觉神经元的运动反馈信息输出到神经系统中的多个不同层级
  - 脊髓：运动神经元、神经回路
  - 脑：脑干、小脑和运动皮质
- 运动神经元接收多种不同来源的信息
  - 感觉信息：本体感觉神经元输入
  - 控制信息：运动皮质、脑干和脊髓内的神经回路

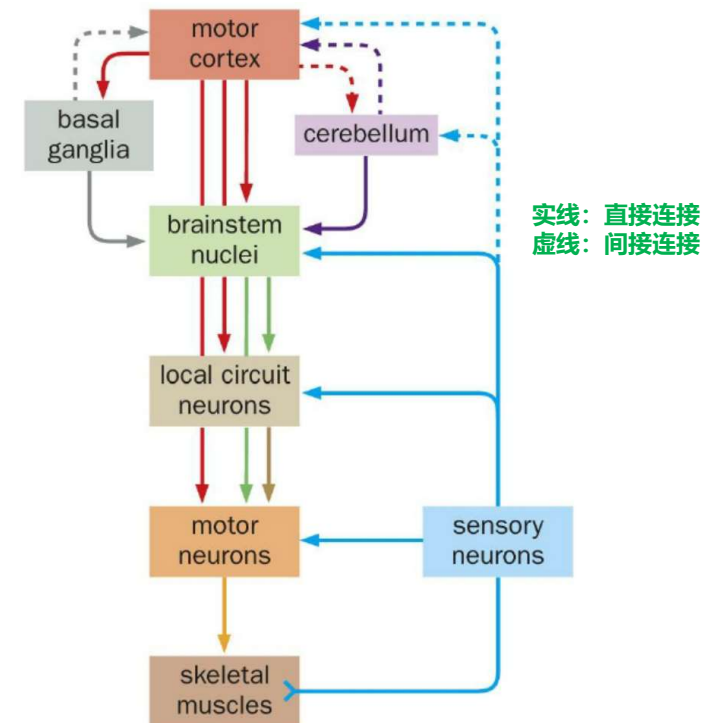


Figure 8-2 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

人体运动的神经控制系统

## 神经系统的运动控制特点

- 神经系统的运动控制方式具有分布式、跨跃不同层级的特点
  - 位于底层的脊髓不仅提供了神经系统和肌肉的连接，而且简单的反射运动也在这一水平进行控制
  - 位于最高层的是大脑皮质，主要负责对当前感觉输入信息的处理以及对运动目标的执行和计划（联合皮质），在小脑和基底神经节的辅助下，运动皮质和脑干将动作指令转化为运动
- 神经系统的层级化结构实现了分布式运动控制
  - 最高层的神经系统并不关心运动的细节，而是控制低层级的神经系统，后者将运动控制信息转变成具体动作
  - 例如皮质可以通过调节低层级神经系统，从而使得运动具有更大的灵活性，对于同样的感觉信息输入，可以输出多种不同的运动方式



## 作业

- 题目1：一个司机在驾驶过程中，突然发现有动物挡在行驶路线前方，随即做出了减速后安全变道的行动。请结合本章介绍的内容，分析在上述情况下神经系统的工作过程，并指明其中的信息流动顺序以及相关信息处理加工的神经系统组织结构（如初级视觉皮质等）。



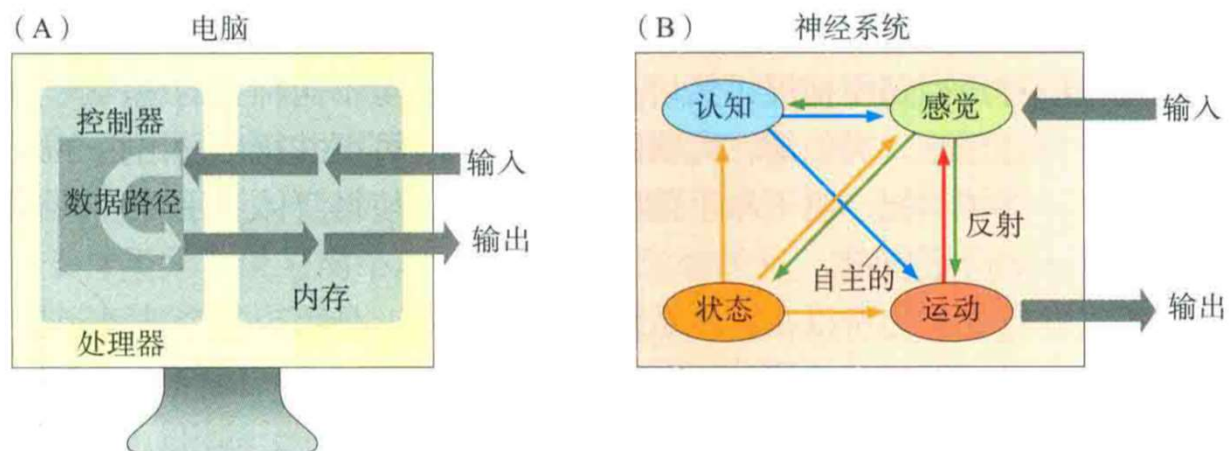
- 题目2：对于一个控制无人驾驶车辆的人工智能系统，至少需要包括哪些层级化的基本功能？

## 作业

请通过分析回答如下问题：

- 1) 大脑的结构和功能分区方式，对于实现具有复杂感知、运动等多种功能的智能机器人，是否具有借鉴意义？
- 2) 不同大脑皮质区域之间存在大量神经元连接，以及人脑中大量增加的联合皮质区域，说明了什么问题？

## 本章部分英文图表注释



性质	电脑 <sup>1</sup>	人脑
基本单元数目	最多 $10^9$ 个晶体管 <sup>2</sup>	约 $10^{11}$ 个神经元; 约 $10^{14}$ 个突触
基本运算速度	$10^{10}/s$	$< 10^3/s$
精准度	对于 32 位二进制数字, $1/(4 \times 10^9)$	约 $1/10^2$
能耗	$10^2$ W	约 10 W
处理方法	主要为串行处理	串行处理与并行处理
每个单元的输入 / 输出数目	1 ~ 3	约 $10^3$
信号模式	数字信号	数字信号和模拟信号

## 本章部分英文图表注释

