

理论神经信息学初探

生物声呐及其他感觉系统信息处理机理研究

童勤业 张 宏 丁 炯◎著

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = f(\omega_e)$$

$$\sum_{r=0}^{\infty} f_r(x_i)$$

$$\varphi(\omega t + \gamma)$$

$$\alpha \in \gamma$$



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

理论神经信息学初探

生物声呐及其他感觉系统信息处理机理研究

童勤业 张 宏 丁 炯◎著

$$b\dot{y} + cy = f(\omega_e)$$

$$\sum_{r=0}^{\infty} f_r(x_i)$$

$$\varphi(\omega t + \gamma)$$

$$\alpha \in \gamma$$



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

理论神经信息学初探:生物声呐及其他感觉系统
信息处理机理研究 / 童勤业,张宏,丁炯著. — 杭州:浙
江大学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-308-17752-8

I. ①理… II. ①童… ②张… ③丁… III. ①神
经科学—信息学—研究 IV. ①Q189

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第000899号

理论神经信息学初探 ——生物声呐及其他感觉系统信息处理机理研究 童勤业 张 宏 丁 炯 著

策 划 许佳颖
责任编辑 金佩雯 候鉴峰
责任校对 陈静毅 刘 郡
封面设计 周 灵
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州兴邦电子印务有限公司
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 24
字 数 369千
版 次 2018年2月第1版 2018年2月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-17752-8
定 价 88.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部电话 (0571) 88925591; <http://zjdxbs.tmall.com>

前 言

有关神经科学的研究已经有一百多年历史,在脑研究方面已经积累了大量实验数据,并且数据还在不断增加之中。这些数据已经大大超过人类基因库的数据。但是很多实验所得的结论往往相互矛盾。由于脑的复杂性,人们很难搞清真正的现象,越来越多的人认为要对这些数据进行整理。看来,现在已经到了从整体上对此进行理论综合的时候了。

按杰夫瑞·霍金斯(Jeffrey Hawkins)的意见,要对大脑深入理解,不能采用自下而上的研究方法,我们需要的是一个自上而下的理论框架……可以说,这就是理论神经信息学的研究思想。

本书书名是《理论神经信息学初探——生物声呐及其他感觉系统信息处理机理研究》,为什么取这一名?理由主要有如下三点。

(1) 研究脑首先要从理论开始,要强调建立理论框架的重要性。对于复杂的脑,如果没有脑本身的理论框架指导(尽管这些理论存在问题,有不正确的地方),便很难统一现有实验中存在的矛盾结果。只有具备正确的理论框架,才能更好地分析生物现象。

(2) 目前,要建立系统理论,首先要在规定时间内脱离实验,或者说要“理论脱离实际”。我们并不反对所有理论最后都必须经过实验来证明其正确性的观点,但是,要知道理论的发展与实验的发展规律不同,发展速度也不同。理论与实验同步进行是有困难的,实验会拖累理论发展的速度。

(3) 目前神经生物学家对于没有实验证明的东西一概不信,这会严重影响神经信息学的发展。我们反对哲学上无休止的争论,但也不要以为没有实验证明的“理论”或文章都是空谈,不要以为只有实验才是踏踏实实的工作,要知道,从实验中得到的假象更是对研究的极大干扰。争论是必要的,但是我们更需要静下心来踏踏实实地做些理论工作。理论神经信息学在理论上每前进一步,都要考虑生物的实际状态,考虑现有的生物实验,但

常常只对现有的实验采取“各取所需”的态度。我们对本书中符合不稳定性 and 不确定性的实验给予重视,暂且搁置与此观点相反的实验,因为我们不可能去分析所有实验正确与否。

本书提出的观点有:①承认神经系统的不稳定性和不确定性;②承认神经信息中存在高分辨率的定量关系;③神经信息是神经回路的属性,神经脉冲序列就是神经信息传输的形式。这三个观点与现有理论不同,有的甚至与现有理论矛盾。这里的第一点和第二点看上去是矛盾的。不稳定系统能测量小信号吗?这是不可想象的事,但是在脑中却实际存在。类似的涉及根本观念的问题,要求我们离开原有的强调稳定性和确定性的线性观,以不稳定和不确定的非线性观为基础来观察和分析一切。紧紧抓住这一矛盾,走出新的路子。

对于上述矛盾,光是停留在哲学意义上或文字模型上讨论是毫无意义的,应该在数学模型上或在电路仿真中进行讨论。我们努力把一切新概念都落实在回路中,完全抛开回路的讨论会显得是空话。

本书从不稳定性和不确定性观点出发,提出一系列新的看法和概念,可用下面的公式来简单地说明新框架:S 空间理论+简并性原理+同一性原理+Pr 效应+L 效应+M 效应。这些大都是现有理论所没有的。这些假设构成了脑的信息处理理论新框架。尽管这些理论还不完善,但都是从神经元模型的圆映射规律和符号动力学的规律中产生的,而圆映射和符号动力学理论是成熟的理论。

这一新框架使我们看到,系统的不稳定性和不确定性还有更多好处。有了不稳定性,才有初值敏感性,脑才有可能利用它来高灵敏地检测小信号;只有存在不稳定性和不确定性,脑中才会有“自由意志”(free will)的出现。

由于基本观点不同,本书在很多地方与现有理论产生了强烈的反差。可以说,新框架在很多地方很武断,会引来很多人反对,但这至少是一个全新的思路。我们就是从全新的角度去分析现有理论的。

人类对健康的强烈需求以及现代科技水平的高度发展,预示着神经信息学在之后的十年或二十年内将会迎来一个高速发展的阶段。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 脑研究的核心问题	1
1.2 神经信号与神经信息	2
1.3 研究神经信息学的重要性	3
1.4 研究神经信息学必须考虑的几个基本问题	7
1.5 研究神经信息回路的困难	14
1.6 衡量理论研究方向的准确性的几个原则	20
1.7 小 结	21
参考文献	23
第 2 章 非线性动力学基础知识	26
2.1 相平面的基本概念	26
2.2 分岔现象	31
2.3 极限环与神经脉冲	41
2.4 振 荡	43
2.5 同 步	52
2.6 混 沌	56
2.7 圆映射	80
2.8 符号动力学	81
2.9 混沌控制	85
2.10 可激发介质动力系统	87
2.11 小 结	89
参考文献	90

第3章 神经系统的基本生理特征	92
3.1 脑的结构	92
3.2 神经细胞的形态和生理特性	93
3.3 突触的形成和突触的重排	102
3.4 郎飞结	103
3.5 神经系统的电信号	104
3.6 神经系统携带信号的方式和特点	108
3.7 神经元的可塑性	111
3.8 脑内神经回路和电子回路的比较	111
3.9 胶质细胞	112
3.10 小结	115
参考文献	115
第4章 S空间理论	117
4.1 S空间的性质	119
4.2 S空间的运算	122
4.3 序的重要性	126
4.4 符号动力学与S空间	127
4.5 S空间与不确定性	127
参考文献	129
第5章 神经系统的数学模型基础	130
5.1 理论神经信息科学的基本出发点	130
5.2 神经回路中信息流通的抽象化	131
5.3 数学模型研究中需解决的几个关键问题	133
5.4 神经元的数学模型	135
5.5 集中参数与分布参数模型	140
5.6 H-H模型是一种累积—释放模型	140
5.7 H-H方程的圆映射分析	141
5.8 神经元输出脉冲序列按参数排序的规律	146
5.9 广义圆映射	153

5.10	神经元输入和输出之间的另一个关系	155
5.11	神经元之间的信号连接	156
5.12	延迟特性	160
5.13	抑制性神经信号	161
5.14	耦合映像格子模型	161
5.15	神经回路的基本模型	163
	参考文献	164
第 6 章	S 空间神经信息编码	167
6.1	神经信息与编码	167
6.2	衡量神经信息编码的几个准则	170
6.3	神经信息过程的基本描述	172
6.4	神经信息回路的三个基本环节	174
6.5	神经脉冲的分类	175
6.6	S 空间神经信息编码	176
6.7	神经编码的两大支柱	185
6.8	神经系统的逻辑回路	185
6.9	S 空间神经信息编码与现有神经编码理论的关系	187
6.10	神经编码的优越性分析	188
6.11	神经系统与 S 空间	190
	参考文献	191
第 7 章	嗅觉神经信息编码分析——无时空结构的信息分析	193
7.1	研究神经信息要从感觉器官开始	193
7.2	嗅觉神经系统	194
7.3	僧帽细胞的输入输出规律	201
7.4	嗅觉对气味的识别	201
7.5	PG 细胞和 Gr 细胞	204
7.6	小 结	204
	参考文献	205

第 8 章 听觉神经信息编码分析——生物声呐信号处理机理分析	206
8.1 听觉系统及其信号处理过程	206
8.2 海豚、蝙蝠等生物的生物声呐信号——多普勒效应测量	211
8.3 双耳多普勒效应	215
8.4 变频多普勒效应计算	221
8.5 生物声呐系统——双耳定方向机理分析	223
8.6 两串脉冲序列的相位差测量	226
8.7 听觉系统侧抑制原理	232
8.8 语音辨识	233
8.9 小 结	234
参考文献	234
第 9 章 神经信息系统的结构特性	237
9.1 神经信息系统的基本框架	237
9.2 神经信息系统的简并性	239
9.3 同一性	253
9.4 用同一性原理分析神经信息处理机理	258
9.5 根据位置确定信号性质	259
9.6 分析神经信息系统框架必不可少的两个原理	260
参考文献	260
第 10 章 视觉信息处理——有时空结构的信息处理	262
10.1 视觉系统	262
10.2 视觉信号的强弱测量	267
10.3 视觉信号在通路中的波形变化	268
10.4 视觉的侧抑制	269
10.5 图像识别机理	272

10.6 小 结	275
参考文献	276
 第 11 章 噪声在神经系统中的作用.....	277
11.1 对噪声的看法	277
11.2 编码理论与噪声	277
11.3 神经系统中的噪声及其分类	278
11.4 神经系统中影响最大的噪声——噪声脉冲	279
11.5 L 效应	281
11.6 海量神经树突信号处理	284
11.7 神经元如何识别噪声脉冲	290
11.8 神经系统抗干扰能力分析	291
11.9 小 结	292
参考文献	293
 第 12 章 神经系统与统计方法.....	295
12.1 统计的不变性与 S 空间的不变性	296
12.2 统计方法的适用性	298
12.3 对随机现象的看法进展	303
12.4 统计方法与现有处理方法	303
12.5 统计观点在脑整体系统分析中的作用	306
12.6 小 结	307
参考文献	308
 第 13 章 高层次信息处理与记忆.....	310
13.1 高层次信息研究现状及存在的问题	312
13.2 高层次信息研究与新概念介入	317
13.3 高层次信息与低层次信息之间的差异和关系	319
13.4 高层次信息处理研究与神经回路	322

13.5	信息通路	324
13.6	微观与宏观的关系——M 效应	330
13.7	M 效应、自组织现象与突现	334
13.8	对 M 效应的进一步思考	337
13.9	高层次信息研究的切入点和研究方法	338
13.10	绑定、联想和条件反射	339
13.11	决策与神经回路	342
13.12	记 忆	344
13.13	对人工智能学习机制的质疑	351
13.14	形成性格的神经回路	353
13.15	关于“非器质性疾病”的看法	354
13.16	小 结	356
	参考文献	357
第 14 章	向脑学习,研制模拟机	361
14.1	数字机的计算精度及局限性	362
14.2	数字机和模拟机的区别	363
14.3	脑作为模拟机与现有模拟机的差别	366
14.4	新的模拟机方向——数模混合机	369
	参考文献	370
致 谢		371
索 引		373

第1章 绪 论

我们坚信,我们已经处于科学史上一个重要转折点,我们在伽利略和牛顿所开创的道路上走到了尽头。他们给我们描述了一个时间可逆的确定性宇宙的图景。我们现在却看到确定性的腐朽和物理新定理的诞生。

——伊利亚·普里戈金(Ilya Prigogine)

真正认识人类大脑是开发智能机器的必由之路。

——霍金斯

天空中星体的排列和明显可见的运动的的确奇妙美丽。但仅有对运动的观察和解释远称不上真正的天文学,在接触这门真正的科学之前,我们必须抛开“天体”,因为真正的天文学探求的是数学化宇宙中的星体运动定律。而可见的天体只是其不完美的表现形式。

——柏拉图(Plato)

1.1 脑研究的核心问题

近年来,“脑科学研究”热潮被形容为在世界范围内“风起云涌,如火如荼”,国内也是这样。为什么国内外对“脑科学研究”的呼声如此之高,远高于肝科学或肾科学等研究?应该说研究脑的重要性远远大于研究肝脏和肾脏。人们在研究人体内的各脏器时,一般离不开研究生化过程,其目的主要是了解该器官是否工作正常。例如从生化角度去分析研究肝脏工作是否正常,如何使肝脏由不正常病态转变为正常工作状态等。这种研究主要为医学服务。神经信息研究恰恰相反,主要是研究脑在正常工作状态下信息处理过程的机理,而不是研究脑在不正常时的生化过程。它与生化并不直接相关,主要不是为医学服务,而是为信息科学服务。研究脑并不仅仅出于医学上的需要,更重要的是为了研究脑内信息处理过程。脑是信息加工的器官,它的信息加工能力远优于计算机。研究脑的意识和认知实际上是研究

脑的信息处理机理,搞清脑的信息加工机理。脑科学中信息研究的任何新成果必然会给信息科学带来突破,为信息科学提供新的方法和理论,这才是研究脑的更深层次的意义。

神经系统疾病可分为两类:一类是器质性疾病,属现代医学讨论范围,如阿尔茨海默病、帕金森病;另一类是非器质性病,如抑郁症、厌食症、强迫症和精神病等。为什么目前非器质性精神疾病治疗研究进展很慢?关键是这类病人在器质上没有病变,或者说这类病人的脑与正常人的脑在生理功能上无多大区别,用生化方法检查这类病人,各种指标都是正常的。他们的病属于信息上的问题或是“心理学”上的疾病,即在信息处理过程上出现故障。不懂得脑内信息过程,很难对这类疾病有深入认识,因此很难治疗这类疾病。到目前为止,还有很多医生根本不认为存在非器质性疾病。

总之,脑内信息过程的研究将大大促进信息科学的发展,也将进一步促进对某些脑内疾病治疗的更深入的分析。离开信息过程去研究脑和脑的疾病,那就和研究肝脏、肾脏没有多大区别,这仅仅是医院神经内科和神经外科的工作范畴。

1.2 神经信号与神经信息

从目前许多文献来看,凡是与神经信息有关的种种信号检测和处理都称为神经信息,与这些信号有关的处理方法和理论都属于神经信息学。这种说法实在会混淆研究的主要目的。为便于讨论问题,有必要将神经信息和神经信号区别开来。

有较多人认为,凡是从神经系统测得的信号都是神经信息。其实这是错的。有些信号可能是无用噪声,有的即使从中提炼出一些信息,其实这些信息也不是真正的神经信息。神经信息是神经内部传递的信息,或者说是神经编码方式能读懂的信号,否则只能称为神经信号。像脑电图(electroencephalogram, EEG)信号、脑成像等等,从严格意义上说,不能称为神经信息,称为神经信号更恰当。现有的脑机接口研究中所用的神经系统信号也不能说是神经信息。既然能用脑的 EEG 信号去开动机器,这是否就是意识通过 EEG 去控制机器呢?进一步地,就有人想,如果能把这一信息传给其他人,不就能把一个人的意识传给别人了吗?现在确实有人在动物身上做这类实

验^[1]。实验能否成功的关键在于 EEG 是神经信息还是神经信号,如果不是神经信息,则这些实验是徒劳的。可见,若不区分神经信息和神经信号,就会进入研究误区。

研究神经信号是研究神经信息的基础,神经信息是从神经信号中提炼出来的。没有神经信号研究,就没有神经信息学的产生。但若只研究神经信号而不研究神经信息,就像研究 EEG 一样,只能知道脑的一些状态而永远不能知道脑的工作原理。不用神经编码原理去解读神经信号,不可能读懂真正的神经信息。这好比用一台示波器接收计算机通信口输出的信号,若不懂计算原理,便不知道计算机输出的信息编码;若只根据示波器中的波形,用统计方法也许能看出一些规律,但是不可能真正了解计算机的信息过程。

神经信息学就是研究脑和神经系统中信息的接收、传输、变换、存储等过程的科学。神经信息学的研究离不开神经编码。

1.3 研究神经信息学的重要性

诺贝尔奖获得者弗朗西斯·克里克(Francis Crick)曾指出,没有哪一种研究对于人类的重要性超过了对人脑的研究,因为人类对于宇宙的全部认识都有赖于这种研究。更具体地可从以下几方面看出。

1. 信息科学需要突破

随着经济和科学技术的发展,信息科学和信息技术得到迅猛的发展,我们对信息科学的理论要求也越来越高。以人工智能为代表的信息处理理论取得了辉煌的成果,计算机在语音识别或手写字识别等方面也有了长足的进步。

信息技术高速发展到现在已有几十年了,但信息处理的方法还只有非常有限的几种,信息处理技术一直比不上人的神经系统,与人脑的能力相比还相差甚远。几个典型例子如下。

(1) 计算机下棋。IBM 的国际象棋机器人“深蓝”战胜了国际象棋世界冠军加里·卡斯帕罗夫(Gary Kasparov),曾经轰动一时。但是这种胜利对神经信息研究而言是无意义的。正像霍金斯所说,这种比赛根本不能说明任何问题。“深蓝”的取胜不是因为它比人聪明,而仅在于它的运算速度是人

脑的几百万倍^[2]。计算机在国际象棋上战胜了人,并没有引起很大反响,人们反而把 20 世纪 70 年代至 2005 年这段时间称为“人工智能冬天”——梦想幻灭的日子。2016 年 3 月,计算机又在围棋上战胜人类(其实也没有完全战胜,棋手至少是 1:4 输给计算机,还是赢一盘),后来又有人想挑战计算机,这些都是后话,暂不提它。有人提出了“深度学习”的口号,使人感到人工智能有了希望,人工智能由此再度崛起。我们不太了解什么是深度学习,但是从报道中看出,它无非是把学习分为很多层次,解决科学家认为神经网络最难的“局部最小点”难题。基本算法还是原来的“最优化”“演化选择”等理论,基本的网络还是原来的人工神经网络,只是多几层神经网络。加上“深度学习”确实可以改善一些算法,但是本质上还是没有变。后面我们会再讨论到,神经回路与现在的人工神经网络有着本质差异。也就是说,“深度学习”并没有跳出现有的理论框框,人们对“深度学习”期望过高了。

(2) 计算机美术和计算机音乐。美术和音乐都饱含情感,这是目前计算机完全无法做到的。按理说,音乐的乐谱(简谱)只有 1、2、3、4、5、6、7 这七个音符,再加音高以及节拍,总共的音符非常有限,所有的乐曲皆是如此。计算机处理这些符号的排列组合本是很容易的,但是没有哪台计算机能创作出好乐曲。

(3) 计算机证题。四色问题的计算机证明给人以很深的印象。这属于逻辑推理,是计算机最强的地方,但是在证题过程中还需要有人帮助。

(4) 机器翻译。乍看之下,机器翻译似乎是很容易的事,只要把大字典放在计算机数据库内即可。这正是计算机的强项,容量越大,越能发挥它的优越性。可惜多年来,流畅的机器翻译一直是人类的一个梦,年轻人要想出国,还必须老老实实地学外语。

信息学家都知道,现代信息技术水平远低于人和动物的神经系统。例如,蝙蝠和海豚的声呐系统远比现代声呐技术好,在人脸识别、语音识别、图像识别、文字识别等方面计算机远远比不上人。于是,有人怀疑计算机处理信息的能力究竟有多大,计算机究竟能走多远。可以说,现代信息处理理论发展已经进入了一个平台期,现代信息处理手段有限,如果没有新突破,很难有新发展。因此,很多信息学家把注意力集中到了神经系统。霍金斯明确指出,真正认识人类大脑是开发智能机器的必由之路^[2],只有从神经系统

得到启发才能促进信息科学的发展。

2. 脑的工作原理正好与现代信息科学技术原理相反

从现有的理论与技术观点看,用不稳定的仪器高灵敏地检测小信号,是 unimaginable 的。在狗的鼻子中,所有嗅感受细胞差不多 25~35 天要全部更换一次^[3],且其嗅觉神经系统还要受到新陈代谢的影响。这是一个极端不稳定系统,可是有的狗却能闻到几千米以外的气味。实验证明,猫头鹰能辨别出两耳间信号的 $5\mu\text{s}$ 时间差。一个神经脉冲的宽度约为 1ms , $5\mu\text{s}$ 相当于 $5/1000$ 的脉冲宽度。对如此微小的时间差猫头鹰的神经系统是如何区分的? Konishi 等人称之为“谜”^[3-4],这个谜至今尚未揭开。如果说狗的嗅觉是靠高灵敏度的嗅感受细胞,那么 $5\mu\text{s}$ 的分辨率已与感受细胞的灵敏度无关了,要提高时间的分辨率只能靠系统本身了。问题是,系统是如何提高灵敏度的呢?

根据非线性动力学分析,现有的工程技术观点属于线性观点,强调稳定、平衡、确定性和一致性。而生物神经系统却是很强的非线性系统,以不稳定、非平衡、不确定性和非一致性为特征。线性观点和非线性观点是截然相反的两种观点。对于持线性观点的人来说,很多非线性现象是不可理解的;而在持有非线性观点的人看来,非线性现象是常态。譬如,神经系统就是靠不稳定性来实现高灵敏度检测的。因此,要重新认识生物系统,应该向生物神经系统学习,必须放弃强调确定性的线性观点,学会在不确定的条件下来处理问题和思考问题。

3. 脑是利用混沌的最好专家

混沌理论自 20 世纪 60 年代开始高速发展以来,到现在已经半个多世纪了,可是混沌系统的应用,特别是混沌在信息科学中的应用却很少。20 世纪 90 年代初,混沌同步和混沌控制被发现后^[5-6],混沌用于通信的呼声很高,召开了多次国际专业会议,可是直到现在“混沌”仍未得到很好的应用。混沌电路中著名的蔡氏电路(Chua's circuit)发表之后,引起了人们极大的兴趣,各种研究文章层出不穷,十年后,发明者还为此写了专门的评论性文章^[7];可是又过去了二十多年,后续研究报道就不多了。文献[8]是 2005 年在这方面的研究文章,在其中也可看出一些动向,但这些研究与应用还相距甚远。原因何在?

混沌系统的特点集中表现在混沌轨道上,混沌系统要应用于信息科学,关键是混沌轨道能够表征信息。可是混沌轨道是不可预测的,而信息是确定的,这两者的矛盾如何解决?由于这一关键问题长期没有得到解决,所以混沌迟迟没有很好地用于信息科学。

我们从研究混沌电路测量技术^[9-11]转向神经回路研究,从两者的对比研究中可以得出,“脑是利用混沌的最好专家”。

混沌系统的最大特点是不稳定性,只有有了不稳定性,才具有初值敏感性和参数敏感性。系统越不稳定,敏感性就越强。脑就是依靠初值敏感性来测量小信号的。神经元是一个典型的累积—释放(生物研究者常把 integrate-and-fire 翻译为整合—发放)系统^[12],它存在初值敏感性^[13]。系统稳定性越差,初值敏感性就越强,对测量小信号也就越有利。可是,系统轨道的稳定性越差,其不确定性也越大。这就出现了矛盾。脑本身却能很好地解决这一矛盾。所以说,脑是利用混沌的最好专家。

4. 脑是目前理论研究最活跃的领域,是交叉学科最集中的地方

无论从杂志的数量、研究人员的人数、国际会议的次数还是参加人员的学科门类,都可看出科学家对脑的关注程度,特别是信息科学家。现代诺贝尔奖获得者对脑的关注也十分明显。有不少诺贝尔奖获得者转向脑的研究,如免疫系统专家杰拉尔德·埃德尔曼(Gerald Edelman)^[14]、DNA发现者克里克^[15]等都成为神经科学专家。

脑的研究需要多学科交叉,同样也能促进各学科的发展。脑的研究将集合从量子生物学到细胞科学,从生物组织学、系统学直到复杂系统科学的内容,其中包含流体动力学、传热传质、电子电磁学、光学、声学、生物化学、信息科学、数学等。除了相对论、天文学等之外,绝大部分现代科学理论都与脑研究存在关系。

信息技术的发展推动了整个科学和经济的发展,现代已被称为信息时代,几乎所有科学领域的发展都与信息科学有关。“信息化”这一口号已成为一切经济领域的行动方向,信息技术的发展水平也可以用来评价一个国家技术发展的水平。

5. 发达国家投入巨资于人脑研究领域

欧盟在2013年通过了“人类大脑计划”(Human Brain Project, HBP),预