

# 人机结合的研究现状与进展<sup>①</sup>

高 楠<sup>②</sup> 傅俊英<sup>③</sup> 赵蕴华

(中国科学技术信息研究所 北京 100038)

**摘要** 阐述了脑科学的形成及其多学科融合特点和研究重要性。从人机交互(HCI)和脑机接口(BCI)两个方面,综述了脑科学领域中的以开发仿脑计算机为目的的人机结合技术研究的进展和现状,并介绍了人机结合领域中的重要研究成果。分析了人机结合的研究趋势,指出开发基于脑机接口的人机交互将是下一代人机结合技术的发展方向。

**关键词** 脑科学, 人机结合, 人机交互(HCI), 脑机接口(BCI), 仿脑计算机

## 0 引言

19世纪末科学家采取实证的方法观察和研究了人的大脑及其产物,到20世纪60年代,对脑的研究进入快速发展时期,形成了脑科学(又称神经科学)这门边缘科学。它融合了神经生理学、生物化学、神经解剖学、组织胚胎学、药理学、精神病学,以及信息科学和计算机科学等学科,主要研究人和动物神经系统的结构和功能,目的是揭示人脑的奥秘,防治神经和精神疾患,发展模拟人脑部分功能的神经计算机<sup>[1]</sup>。脑科学的研究有重大科学价值,因而得到了各科学强国的高度重视。1989年,美国率先把20世纪的最后十年命名为“脑的十年(The Decade of the Brain)”,1995年,国际脑研究组织(IBRO)把21世纪称为“脑的世纪”,随即欧共体成立了“欧洲脑的十年”委员会及脑研究联盟<sup>[2]</sup>。1996年,日本制定了“脑科学时代”计划,拟在20年内以每年1000亿日元的支持力度推进脑研究<sup>[3]</sup>,2003年正式启动了庞大的“脑科学与教育”研究规划项目,仅2004年的投入达30亿日元<sup>[4]</sup>。2005年,瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)神经科学家马克拉姆在EPFL和IBM的共同支持下启动了“蓝脑计划(Blue Brain Project)”<sup>[5]</sup>。2007—2012年第七个欧盟科研框架

计划在脑科学领域共投入19.2亿欧元,设立了1268个研发项目,参研人员达4312人。2013年,欧盟委员会宣布“人脑工程(HBP)”入选“欧盟未来新兴旗舰技术项目”,计划在未来10年内投入10亿欧元经费<sup>[6]</sup>,并将脑科学列为实施的“地平线2020”科研规划的重中之重<sup>[7]</sup>。2013年,奥巴马提出了“脑活动图谱计划”,并正式启动了“尖端创新神经技术脑研究计划”,以探索人类大脑工作机制、绘制脑活动全图,提供治疗目前无法治愈的大脑疾病的新治疗方法。2014年初,奥巴马再次呼吁全国采取行动推进脑科学创新研究的进程<sup>[8]</sup>。此外,德国、英国和中国等国家也纷纷推出本国的神经科学研究计划。

脑科学的研究可分为三个方向<sup>[2]</sup>:认识脑——揭示脑的奥秘,阐明脑的功能;保护脑——征服脑疾病,包括控制脑的发育和衰老,治疗和预防神经性和精神性疾病,探索神经性和精神性疾病的预防方法等;创造脑——开发仿脑计算机,包括开发脑型器件和结构,开发仿脑的信息产生和处理系统。在脑科学的研究中,Lenat等<sup>[9]</sup>提出了“人机合作(human-computer collaboration)”的概念,我国钱学森等<sup>[10,11]</sup>则提出了“人机结合(human-computer cooperation)”学说,本文将二者统一,称为人机结合。人机结合是人工智能中新兴的一个涉及内容广泛的重要研究方

<sup>①</sup> 国家社会科学基金(13CGL007)资助项目。

<sup>②</sup> 女,1992年生,硕士生;研究方向:情报学分析

<sup>③</sup> 通讯作者,E-mail:fujunying@istic.ac.cn

(收稿日期:2014-10-13)

向和分支,其核心就是将人的心智(形象思维、灵感)与计算机智能(计算和逻辑推理)统一在一个相互作用、相互影响的环境中,通过人机协作实现智能互补,以充分发挥系统的整体优势和综合优势<sup>[12]</sup>。人机结合主要分为人机交互(human-computer interaction, HCI)和脑机接口(brain-computer interface, BCI)两大技术分支。本文主要关注国内外在“创造脑”方面的研究进展,重点综述在开发仿脑计算机的人机结合技术上的创新研究。

## 1 人机交互(HCI)

人机结合的第一个研究方向为人机仿真研究(human emulation approach),即赋予计算机类似人类的能力,通过仿真人-人协作的模型,尤其是语言协作模型,来实现计算机的拟人化和智能化。该研究方向以人机交互(HCI)为典型代表。

### 1.1 HCI 的提出与发展

随着计算机使用的普及,研究人员开始聚焦于人类和机器间的交互,并试图从生理、心理和理论等方面进行分析,促使了 HCI 领域的出现<sup>[13]</sup>,其目的就是为了理解和改善人与计算机之间的交流。Dix 等人<sup>[14]</sup>指出,“人机交互可以定义为服务于人类的交互计算机系统的设计、评估和实施,及对交互现象的研究。”Sharp 等<sup>[15]</sup>认为,HCI 的重点在于交互设计(interaction design, ID)。2006 年,Hinze-Hoare 提出<sup>[16]</sup>,HCI 包含三个子领域:计算机支持的协同工作(computer supported collaborative working, CSCW)、计算机支持的协作学习(computer supported collaborative learning, CSCL)和计算机支持的协同研究(computer supported collaborative research, CSCR),而且后者是前者的子集,如图 1 所示。

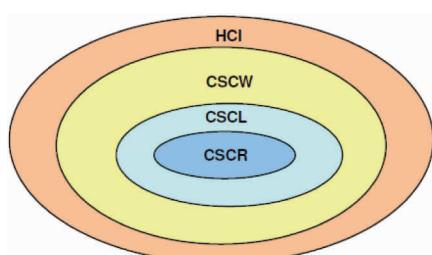


图 1 HCI 的子领域

据 Diaper<sup>[17]</sup>考证,HCI 的研究最早始于 1959 年 Shakesel 发表的论文 *The ergonomics of a computer*,文中首次对 HCI 的问题进行讨论。1960 年,Licklider 发表了具有开创性意义的论文 *Man-Computer Symbiosis*,首次提出人机紧密共栖(human-computer close symbiosis)的概念,预见了未来人类与机器人一起生活的场景,被视为人机界面学的启蒙之作。1969 年,第一次人机系统国际大会在英国剑桥大学召开,同时第一本专业期刊 *The International Journal of Man-Machine Studies (IJMMS)* 创刊,而使 1969 年成为人机界面学发展史的里程碑。1970 年两个 HCI 研究中心——英国 Loughborough 大学的 HUSAT 研究中心和美国 Xerox 公司的 Palo Alto 研究中心成立。

20 世纪 80 年代,又有三种 HCI 期刊陆续推出,而举办的 HCI 相关会议的上座率高达平均 500 人/每场次<sup>[17]</sup>。学术界则相继出版了六本专著,对最新的 HCI 研究成果进行了总结。HCI 学科逐渐形成了自己的理论体系和实践范畴的架构。在理论体系方面,HCI 学科从人机工程学独立出来,更加强调认知心理学以及行为学和社会学的某些人文科学的理论指导;在实践范畴方面,则从人机界面(人机接口)拓展开来,强调计算机对于人的反馈交互作用。20 世纪 90 年代,HCI 中的“I”含义由原来的“interface(界面)”改变为“interaction(交互)”,反映了数字技术发展规模的不断壮大。同时,“usability(可用性)”几乎成为了 HCI 的代名词,并提出了 HCI 的五大发展目标<sup>[18]</sup>:安全性(safety)、实用性/utility)、有效力(effectiveness)、有效率(efficiency)和可用性(usability)。

20 世纪 90 年代后期以来,随着高速处理芯片、多媒体技术和 Internet Web 技术的迅速发展和普及,HCI 的研究重点放在了智能化交互、多模态(多通道)-多媒体交互、虚拟交互以及人机协同交互等方面,也就是放在以人为中心的 HCI 技术方面。

### 1.2 HCI 系统分类

HCI 按交互模式可分为单通道交互系统(unimodal interaction system)和多通道交互系统(multimodal interaction system)两种<sup>[19]</sup>。其中,单通道交

互系统又分为基于视觉的 HCI( Visual-Based HCI )、基于音频的 HCI( Audio-Based HCI )和基于传感器人机交互的( Sensor-Based HCI )三个子类。基于视觉人机交互又包括<sup>[20]</sup>面部识别( face recognition )、手势识别( gesture recognition )、躯体运动追踪( body movement tracking )和视线追踪( eye movement tracking );基于音频的人机交互包括音频识别( speech recognition )、语音情感识别( audio emotion analysis )和噪声探测( noise detection )<sup>[20]</sup>。语音识别指计算机识别语音内容,并将音频资料转化为相应的机器

语言的能力。音频情感分析和噪声探测则多基于人类的情绪化声音(如笑声、哭声和叹息声等)进行甄别分析。

多通道交互系统是近年来迅速发展的一种 HCI 技术,输入通道更是涵盖了用户表达意图、执行动作或感知反馈信息的各种通信方法,如言语、眼神、脸部表情、唇动、手动、手势、头动、肢体姿势、触觉、嗅觉或味觉等,其基本结构如图 2 所示,图中详细展示了不同的交互模式是如何独立分析以及综合输出的<sup>[19]</sup>。

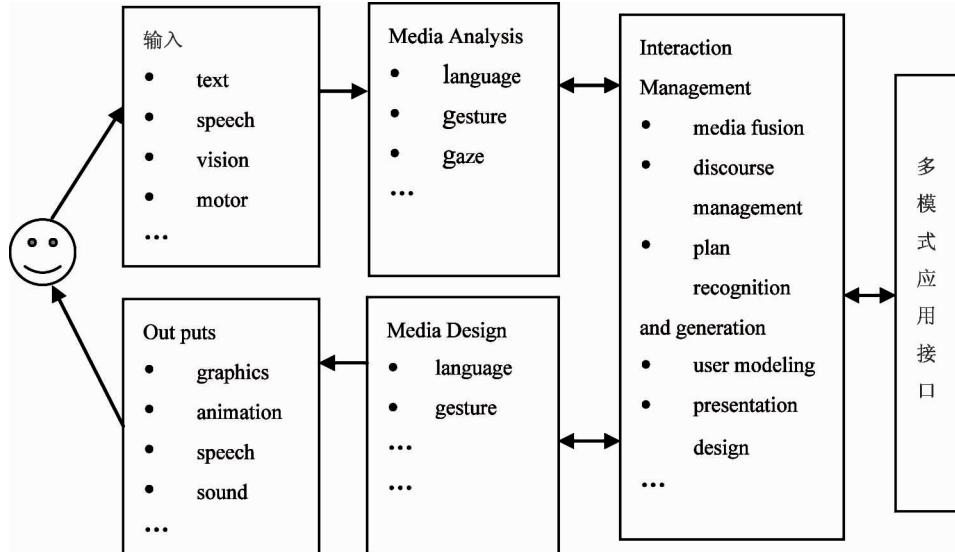


图 2 多通道交互系统的基本结构

近年来,对多通道系统的避错率和纠错率要求提高,除了使用性能的要求,为了满足多样化受众和对各种环境的适应性,对多通道系统的个性化设置和与环境融合的能力也都提出了新的挑战。目前多通道系统设计面临的问题包括:缺少通用接口的设

计、输出结果的清晰化解释、自然用户界面的设计和不断增加的硬件成本。

尽管多通道系统的发展有诸多困难,但还是得到了市场的认可,成功应用到多个领域,尤其是艺术和科学等领域。图 3 中,头戴式音乐播放器和镜头捕捉到的图像



图 3 头戴式音乐播放器和镜头捕捉到的图像

安装有一个摄像头,直接对准人嘴巴部分的区域,可以通过设置镜头距离和焦距来调整输入视频帧仅包括嘴,去除无关部位如鼻孔等。可穿戴音乐播放器的镜头在捕捉到人做出口型动作或面部动作时,就能控制音乐声音的播放。

在智能环境中,通过多通道输入模式(如视频、音频、压力传感器等)来产生不同的情绪状态回应用户,进行交流。图 4 是名为 Ada 的智能环境感知系统<sup>[22]</sup>由近 400 个六边形的压力敏感地砖组成,还

包括 10 个动态摄影机和 4 个静态摄影机、麦克风和压力传感器等。Ada 的智能感应输出包括地砖的 20 种动态灯光显示,12 个放映机和 360 度巨型屏幕组成的实时计算机图形预测,以及实时的音乐创作和演奏。六边形地砖具有压力敏感和多色彩模式,通过与游客的互动来进行不同的显示。墙壁是半透明的镜子,方便顾客透过墙壁看到 Ada 的内部是如何运作的。墙壁之上是环形的投影屏幕,播放实时的动态图形和音乐。



图 4 智能环境感知系统 Ada

机器人是多通道系统的又一蓬勃应用<sup>[23]</sup>,机器人的学习和模仿能力、使用自然语言交流能力、情绪感知与表达能力、交互模式选择等都是对多通道系统提出的挑战。图 5 和图 6 分别是 Sony SDR-4X



图 5 Sony SDR-4X



图 6 Honda P3

机器人和 Honda P3 机器人。未来,机器人将在人们的生活中发挥越来越大的作用,可广泛应用于医疗、

农业、工业、家政服务、旅游业等等各个领域,极大地便捷人们的生活。

多通道系统还应用于智能轮椅的开发(见图 7、图 8)<sup>[24]</sup>,图中的智能轮椅可以通过周围环境和用户行为来感知用户意图,比如通过手势变化来判断用户是否要离开轮椅,根据视线的方向判断轮椅将移动的方向,还可以通过记录用户嘴部、眼部或者其他身体可动的部分的运动来判断用户意图。由于周围环境通常都比较嘈杂,结合环境和用户行为的智能感知系统能更有效地识别用户意图。智能轮椅将为残疾人或年老行动不便的人带来福音。



图 7 智能轮椅



图 8 受试者体验智能轮椅

1989 年美国人 Jaron Lanier 提出了虚拟现实(Virtual Reality)技术,这是一种可提供沉浸感觉的人机交互三维技术,是多通道交互技术的一种,它涉及视觉感知、听觉感知、触觉感知、嗅觉感知、味觉感知、力觉感知和运动感知等。目前该技术主要应用于虚拟装配、模拟与仿真成本高代价大(如故障、碰撞等)的实验、教学培训、操作训练、建筑及工业设计、故障诊断与虚拟维修、游戏开发等。图 9 显示实验者正在进行虚拟训练,头部的装置里有车辆模拟器,受试者可以使用加速器、刹车以及触觉方向盘来实现虚拟环境中的车辆控制。图 10 所示是实验者视野中的画面<sup>[25]</sup>。

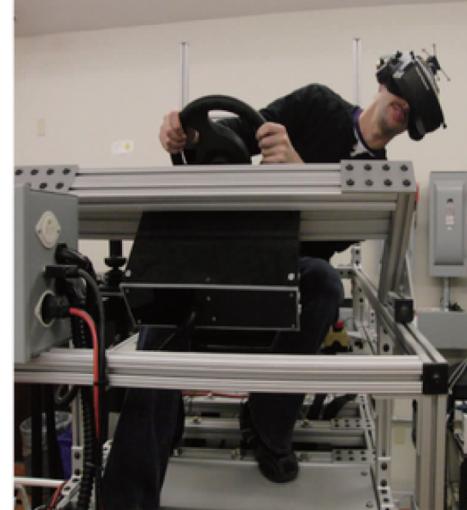


图 9 受试者进行虚拟训练



图 10 受试者视野中的画面

### 1.3 HCI 研究进展

Gupta 等<sup>[19]</sup>总结了 20 世纪 HCI 的主要进展,包括普适计算(ubiquitous computing)以及 HCI 的智能化与自适应化。普适计算又称环境智能(ambient intelligence)感知或者普及计算(pervasive computing),这一概念强调和环境融为一体计算,而计算机本身则从人们的视线里消失。普适计算的促进者希望嵌入到环境或日常工具中去的计算能够使人更自然地和计算机交互,其显著目标之一是使得计

算机设备可以感知周围的环境变化,从而根据环境的变化做出自动的基于用户需要或者设定的行为。HCI 的智能化和自适应化是为了让 HCI 能更好地处理用户任务,比如导航和自主操作等。智能 HCI 就是一种基于某种智能感知系统来协助用户的创新界面模式。比如,通过视觉追踪用户行为,结合语音识别技术来动态地与用户交流等。表 1 列出了 20 世纪以来 HCI 发展过程中有代表性的研究成果。

表 1 HCI 发展进程中典型的研究成果

研究人员	年份	典型研究成果
Bush	1945	发表著名论文 <i>As we may think</i> ,提出了采用新设备新技术来检索、记录、分析和传输各种信息以及名为“Memex”的工作站构想
麻省理工学院 Sutherland	1963 1968	开创计算机图形学 开发了头盔式立体显示器,奠定了现代虚拟现实技术的基础
斯坦福研究所 Engelbart	1963	发明了鼠标
Xerox 研究中心 Alan Kay	20 世纪 70 年代	发明了重叠式多窗口系统,奠定了目前的图形用户界面的基础
Tim Berners Lee	1989	用 HTML 和 HTTP 开发了 WWW 网,奠定了开发日后各类浏览器的基础
美国麻省理工 Negroponte	20 世纪 90 年代	提出了“交谈式计算机”概念,在多通道用户界面做了许多研究
Xerox 研究中心 Mark Weiser	20 世纪 90 年代	提出了“普适计算”的思想

HCI 的研究已经涵盖了多个学科,包括教育学、心理学以及协作、效率和工效学等。研究人员追求让计算机拥有尽可能多的人类感官通道,并试图对计算机进行隐形输入,即输入意味不明的指令来让计算机自行判断如何行动和执行命令<sup>[23]</sup>,以提高人机交互的自然性和高效性。

目前,以虚拟现实为代表的计算机系统的拟人化和以智能电子产品为代表的微型化计算机系统是计算机发展的两大主要趋势,而人机交互技术则在其中起着关键作用,限制着计算机领域发展的速度。随着互联网技术的不断发展,传统的人机交互已经发展到基于网络的智能交互<sup>[26]</sup>,即智能接口技术。该技术的目标是使人与计算机之间的信息交互能像人与人之间的交流一样自然且方便。基于网络的智

能交互目前主要的研究内容有:文字识别技术(包括印刷体和手写体文字识别)、语音处理技术(包括语音识别与语音合成)、计算机视觉与图像处理技术、生物特征信息处理技术(包括指纹识别、虹膜识别、脸像识别、笔迹鉴别和声纹识别)、多媒体技术、虚拟现实技术和自然语言处理技术(包括机器翻译和自动文摘)等。HCI 未来的发展除了更贴合人们的需求外,还要注重使用的便捷性和舒适性等问题。

## 2 脑机接口(BCI)

人机结合的第二个研究方向为人机互补研究,即利用计算机独特的能力,通过人机协作的途径来弥补人类某些能力的不足或缺憾。考虑到计算机和

人类的能力具有不对称性,研究的重点是如何合理分配每个智能体(人、计算机)的任务,使不同任务既具区别性又能巧妙利用各个智能体的长处,然后通过人机协作的途径促进人与计算机间的有效交流。该研究方向以脑机接口(brain-computer interface, BCI)为典型代表。

## 2.1 BCI 的提出

BCI 技术开辟了一种全新的模式,给人类提供了一种可根据不同情境的脑电活动来操控电脑或者通信设备进行活动的可能<sup>[27]</sup>,为用意念或思维控制外部设备提供了可行手段<sup>[28]</sup>。

该技术使人在无外周神经系统和肌肉组织参与的条件下,通过计算机等电子设备输出控制信号,进而与外界环境进行交流。脑成像技术如脑电图(electroencephalograph, EEG)、功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑磁图描记术(magnetoencephalography, MEG)和功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)等则为观察神经生理活动提供了可能途径。

脑机接口(BCI)技术是涉及神经生理学、信号处理、模式识别、控制理论、计算机科学和康复医学等多个领域的交叉技术<sup>[29]</sup>,相关研究最早可追溯至20世纪70年代初加州大学洛杉矶分校的Vidal和他的军事研究组的研究。他们首先成功地应用了BCI系统<sup>[30]</sup>,并于1973年首次使用脑机接口一词来描述计算机反应大脑信息的系统<sup>[31]</sup>,而这个系统就是现代BCI系统的雏形。1990年代中期,随着信号处理和机器学习等技术的发展,BCI的研究逐渐成为热点。1999年在美国奥尔巴尼郡举行了第一

次BCI国际研讨会,22个研究团体与会,会议将BCI定义为“一种不依赖于外周神经和肌肉的脑电信号正常输出通路的通信系统”<sup>[32]</sup>。

研究BCI的组织不断增多。1995年世界上只有6个专门从事BCI研究的组织,2002年扩大到38个<sup>[33]</sup>,2005年发展至53个<sup>[34]</sup>,而目前全世界范围内研究BCI的小组有100多个。来自美国、德国、奥地利和意大利的研究小组在BCI的基础研究及应用研究上取得了丰硕成果。而国内研究机构包括清华大学、天津大学、上海交通大学、重庆大学、浙江大学和东南大学等都有相关的成果报导。在今后一段时间内,BCI的研究热度将进一步提升。

## 2.2 BCI 分类

依据采集脑电信号的位置可将BCI分为植入式和非植入式。非植入式BCI因其无创性和便于记录,因而成为当前研究的重点。按照采集的脑电信号的类型可分为基于诱发EEG的BCI和基于自发EEG的BCI两种。诱发EEG指人接受外界刺激时所产生的特定电活动,目前以P300和稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)的研究为主。自发EEG则是在人体自然状态下就可以记录到的脑细胞的自发性电活动,目前研究的重点包括皮层慢电位法(slow cortical potential, SCP)、眼动产生的α波、基于运动想像的μ节律和β节律等。

## 2.3 BCI 系统组成

BCI系统的组成如图11所示,一般包括信号采集、信号处理和控制器三个功能模块<sup>[35]</sup>。

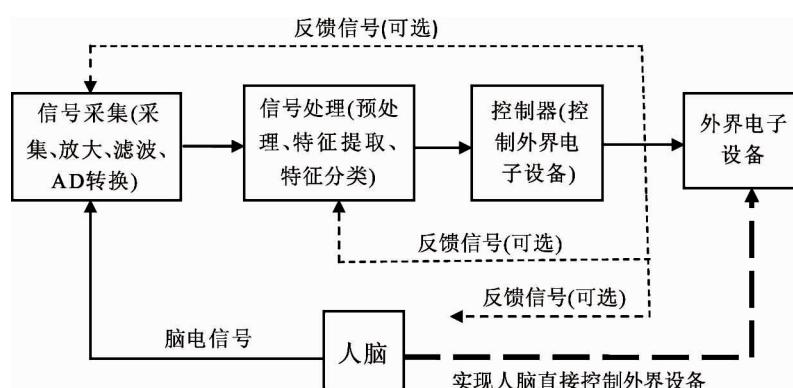


图11 脑机接口系统结构框图

(1) 信号采集:采用盘装或者支架型电极,获取脑电信号,通过导联线传送给前置放大器,经过预处理(去除部分极化电压)、多级放大(10000 倍左右)、高低通滤波、隔离后送入 AD 转换成数字信号,存储于计算机中(见图 12、图 13<sup>[36]</sup>)。

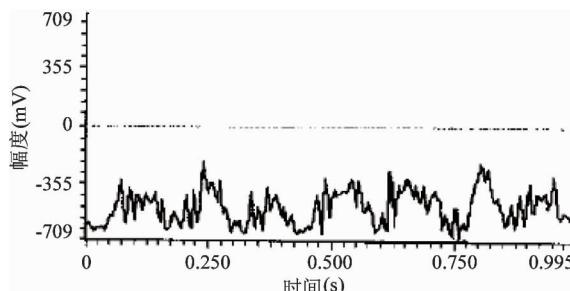


图 12 输入的脑电信号

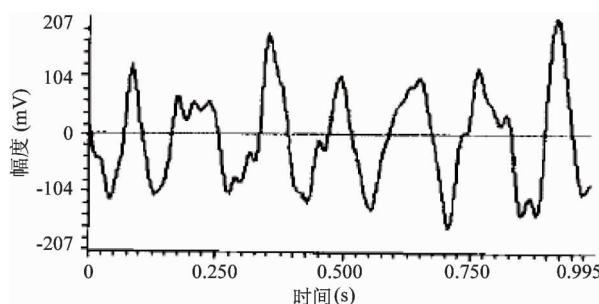


图 13 经过带通滤波和陷波后的信号

(2) 信号处理:包括特征提取和信号分类两部分,是脑机接口系统的核心。利用独立向量分析、傅立叶变换、小波分析和遗传算法等方法,从经过预处理的脑电信号中提取与受试者意图相关的特定特征量(如频率变化和幅度变化等)。以快速傅里叶变换(FFT)为例,对经过预处理的脑电信号进行谱分析,便于进行特征提取,图 14<sup>[36]</sup>为脑电信号 FFT 结

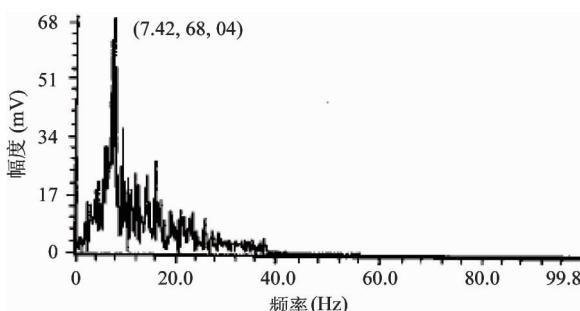


图 14 脑电信号 FFT 结果

果。特征量提取后交给分类器进行分类,分类器的输出即作为控制器的输入。

(3) 控制器:将已分类的信号转换为实际的动作以控制外部电子设备,如显示器上光标的移动、机械手的运动、轮椅的前进与后退和字母的输入等。

## 2.4 主要的 BCI 系统

### (1) 基于视觉诱发电位的 BCI 系统

目前的稳态视觉诱发电位(SSVEP)-BCI 系统种类繁多,可实现的功能包括飞行模拟器的控制、开关选择、电话号码输入系统、屏幕光标控制、自由度假肢的控制和康复机器人的控制,典型的研究成果包括美国 Wright-Patterson 空军基地利用 SSVEP 实现了对飞行模拟器的控制;Leonard 等人基于 SSVEP 实现了对屏幕光标的控制(图 15 和图 16);我国清华大学研发了“脑控电话拨号系统”,通过 SSVEP 控制电视、电灯、空调甚至可以启动语音播放功能(图 17)。

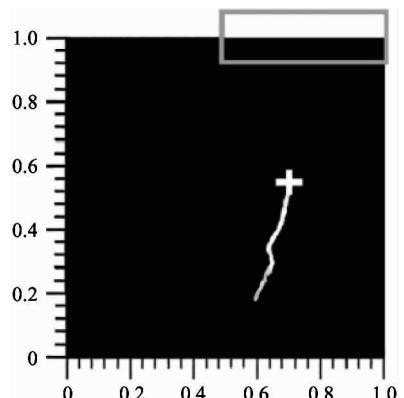


图 15 一维打靶训练

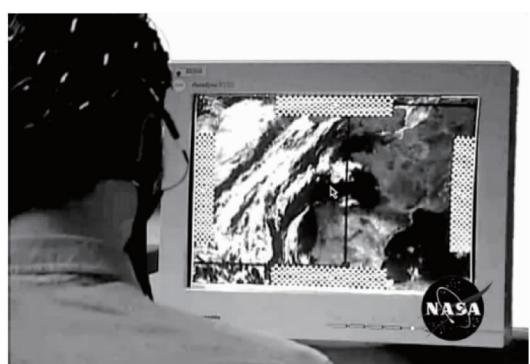


图 16 二维虚拟指针训练



图 17 清华大学的自动拨号系统

Leonard 等人研发的 SSVEP-BCI 系统采用基于核函数的偏最小二乘自适应算法,通过用户移动计算机显示器上的光标来记录关联模式的多通道脑电频谱图。首先在控制系统中进行一维打靶训练——左右移动显示屏上的光标,实验者通过屏幕上的反馈信息来学习自主控制脑电信号。通过训练后实验者移动光标的平均正确率从 58% 上升到 88%。第二个阶段进行虚拟指针训练,这属于二维光标控制。稳态视觉诱发电位(SSVEP)信号由 4 个位于显示器边缘的闪烁棋盘来诱发。用户通过逐步选择方位(上、下、左、右),来移动光标到地图上的目标位置。相比于打靶训练,虚拟指针训练还实现了基于小波变换的实时去除动眼干扰。经过训练,实验者控制光标的准确率可以达到 80% 到 100%。

### (2) 基于 P300 电位的 BCI 系统

P300 是事件相关电位(event related potential, ERP)的一种,出现在事件发生后的 300ms 左右,相关事件发生的概率越小,所引发的 P300 电位越显著,较典型的 P300-BCI 系统是 Farewell 和 Donchin

在 1988 年设计出的虚拟打字机<sup>[37]</sup>,如图 18 所示,在计算机屏幕上显示了一个 6 行 6 列的字符矩阵,该矩阵按行或列随机闪烁。首先,实验者集中注意力于某个字符上,当实验者心中所想的字符恰好加亮时,就会引发一次 P300 电位信号,计算出引起 P300 幅度最大的行和列,那么该行和列交叉处的字符就是受试者所想选择的字符。

A	B	C	D	E	F
G	H	I	J	K	L
M	N	O	P	Q	R
S	T	U	V	W	X
Y	Z	1	2	3	4
5	6	7	8	9	-

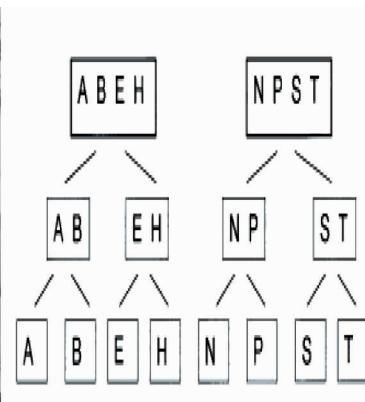
图 18 基于 P300 电位的 BCI 系统

### (3) 基于皮层慢电位的 BCI 系统

皮层慢电位(slow cortical potential, SCP)是指持续时间在几百毫秒到几十秒的 EEG 信号 1Hz 以下的部分,具有较大正负电位差异的低频脑电信号。SCP 可以反映神经元的兴奋性,当神经元处于兴奋状态时,SCP 电位为负,否则为正。研究人员证明了受试者通过自主训练,能够自我管理 SCP,并通过其幅值正负方向的变化来发出控制命令。2003 年,Birbaumer N 利用皮层慢电位设计了一种名为“思维翻译器”(thought translation device, TTD)的 BCI 系统<sup>[38]</sup>(见图 19),具体方法是,首先将电脑屏幕上所有的字符均分成两部分显示,用 SCP 偏移选择目标



图 19 受试者利用 TTD 进行单词拼写



字符所在方位,选定方位后再分为两部分,然后用 SCP 再次进行方位选择,直到选出所需字符为止。实验者经过长期的训练,可以利用 TTD 拼写单词和语句、控制开关,甚至上网。

#### (4) 基于 $\mu$ 节律和 $\beta$ 节律的 BCI 系统

清醒放松状态的受试者在进行运动想像时,相应的感觉运动皮层区域就能够检测到 8~12Hz 节律的脑电波,称之为  $\mu$  节律。 $\mu$  节律通常与 18~26Hz 的  $\beta$  节律相伴出现。美国 Wadsworth 研究中心的基于  $\mu$  节律和  $\beta$  节律的 BCI 系统是比较典型的 BCI 系统(见图 20),能够实现对光标的控制,包括一维和二维的移动;回答一些简单的 YES/NO 的问题;在屏幕选择栏中进行项目选择。实验者通过自主地调整  $\mu$  节律和  $\beta$  节律的幅值,来控制光标在屏幕上地移动。



图 20 Wadsworth 研究中心基于  $\mu$  节律和  $\beta$  节律的 BCI 系统

研究表明,在进行单侧肢体运动行为或想象时,大脑对侧区域的  $\mu$  节律和  $\beta$  节律出现幅度衰减,产生事件相关去同步电位(Event Related Desynchronization, ERD);大脑同侧区域两种节律出现了幅度增强,产生事件相关同步电位(Event Related synchronization, ERS)。基于 ERD/ERS 的 BCI 系统主要是辨别几种简单的,如左手、右手、脚、以及舌头的想象运动。奥地利 Graz 大学 Pfurtschellert 等人从 1991 年起就致力于 ERD/ERS BCI 系统的研究,并建立 Graz-BCI 系统,其中 Graz I 系统的脑电信号识别率达 85%,Graz II 系统的在线分类准确率达

77%,最新的 Graz-BCI 系统控制正确率可达 90%~100%。图 21 为一名受试者利用 Graz-BCI 系统进行二类想象运动。

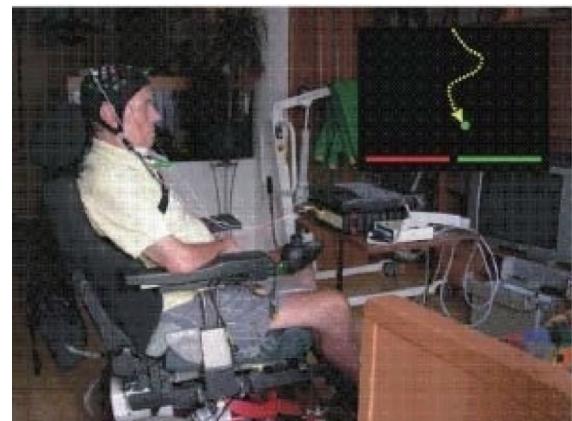


图 21 Graz-BCI 系统

以上几类 BCI 系统有各自的特点和局限性,P300-BCI 系统和 SSVEP-BCI 系统比较成熟,正确率较高,而且不需要实验者参加训练,但是需要外界提供特殊的视觉刺激,P300 的采集要限定在特定时间,SSVEP 则要限定于特定的频率。SCP-BCI 系统和基于  $\mu$  节律和  $\beta$  节律的 BCI 系统虽然采用自发 EEG,不需要外界刺激,但对实验者要求较高,需要接受长时间反复的训练以控制自身 EEG 信号的稳定性。

另外,除了上述主要 BCI 系统外,本文还详细汇总了 BCI 各个研究分支的典型研究成果(见表 2)。

#### 2.5 BCI 技术的应用前景

现阶段大部分 BCI 的研究都专注于让严重肢体障碍而丧失活动能力的患者(如脑中风、肌萎缩性侧索硬化、中枢神经系统受损)通过脑电图仪(EEG)的使用,恢复其语言功能和行为能力,实现外部设备的控制<sup>[39]</sup> 和对周围环境的交流<sup>[40,41]</sup>。

但 BCI 的应用不仅局限于此,可广泛应用于各个领域,如在康复医学和医疗检测领域,可通过观测脑电信息合理掌握用药剂量,减少药物对病人大脑的损伤;给癫痫、帕金森、老年痴呆、抑郁症等脑部疾病的治疗带来新的希望;给伤残人的生活提供便利,帮助他们实现生活自理。在军事及交通领域,则可

表 2 BCI 各研究分支的典型研究成果

BCI 研究方向	研究人员	年份	研究成果	准确率或传输速率
慢皮层电位 (SCP)	Kubler 等人	1999	通过 SCP 提取的控制信号,成功实现水平或垂直地移动电脑屏幕上的光标	75%
	Birbaumer N 等人	2003	通过 SCP 提取的控制信号,设计了思维翻译器 TTD,当自我调控 SCP 准确率大于 75% 时,即可进行拼写	
稳态视觉诱发电位 (SSVEP)	wright Patterson 空军基地	2000	通过 SSVEP 提取的控制信号,实现了对飞行器的控制	96%
	清华大学 高上凯等人	2002 - 2004	通过 SSVEP 提取的控制信号,可控制空调、电视、启动语音播放器和拨打电话等	87.5%
	清华大学 程明、任宇鹏等	2003	通过 SSVEP 提取的控制信号,实现了对假肢的控制,能完成握住水杯、倒水、将水杯放回原处和假肢复原四个动作	
	Leonard J 等	2006	通过 SSVEP 实现对屏幕光标的控制	80% 左右
	Dewan	1967	利用眼球运动产生的 $\alpha$ 波幅度的调节应用于 Morse 电报码发送,发送一个 Morse 码需要 35 ~ 50s	
自发 EEG 的 $\alpha$ 波	王黎等人	2005	利用自发 EEG 的 $\alpha$ 波对人疲劳状态进行评估	接近 100%
	赵丽、 刘自满等人	2008	利用自发 EEG 的 $\alpha$ 波实现了对服务机器人的控制	91.5%
P300 电位	Farwell 和 Donchin 等人	1988	基于 P300 电位的虚拟打字机	90% 2.3 字/min
	Hilit Serby 等人	2005	改进了 Farwell 和 Donchin 等人的 P300 虚拟打字机,引进独立成分分析去除噪音信息	92.1%
	Rebsamen 等人	2010	利用 P300 实现了智能轮椅在已知环境下的自主导航	
基于运动想象的 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波	Tanaka 等人	2005	利用 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波实现了智能轮椅左转和右转	
	沈继忠等	2010	利用 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波研究两类运动想象产生的脑电信号	86%
	Cano-Izquierdo 等	2012	利用 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波研究三类运动想象产生的脑电信号	80%
	Barachant 等 Christoph Guger 和 Werner Harkarn	2012 1999	利用 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波研究四类运动想象产生的脑电信号 利用 $\mu$ 节律和 $\beta$ 波控制假肢运动	70% 80% ~ 90%

以利用 BCI 实现无人驾驶,这样不仅可以便捷人们的生活,更有望降低交通事故发生率;在深海、太空或其他危险领域,可以通过 BCI 实现人脑对机械的控制,既保障了人身安全也进行了危险作业的操作;在娱乐休闲领域,基于 BCI 开发的软件、游戏,将有可能带来全新的娱乐方式。

但是目前研究存在着一系列的挑战,以 BCI 最常用的基于 EEG 的 BCI(EEG-based BCI)为例,主要问题包括<sup>[42]</sup>:高昂的成本,噪声信号干扰,导电凝胶以及电极-皮肤阻抗的干扰,EEG 中电极数量过多,训练时间长和伦理道德问题等。BCI 目前最大

的信息转换速度仅达到 68bit/min(约 10 字/min),还远达不到正常沟通所需的速度。

未来的研究热点将集中于提高智能感知系统、智能驱动设备的长时间稳定性控制;提高脑电信号的转换和传输速率;减少诱发 BCI 系统实验者的训练时间,以及对个体差异性的平衡,设计 BCI 系统要注意个性化和多样化;降低 BCI 系统使用的复杂程度,提高系统兼容性;降低 BCI 系统对电脑的依赖性,如可采用 LED 灯刺激 SSVEP 电位产生,用数字信号处理器代替电脑进行脑电信号处理。

### 3 人机结合领域的研究成果

2011 年 IBM 研发人员研制出能模拟大脑认知活动的第一代神经突触计算机芯片,未来,IBM 将结合混合信号、类比数位和特制容错算法(如异步、平行、分布式和可重组等)来进一步开发神经突触芯片。Neuro Sky 研制出能检测脑电波和其他生物信号的生物传感芯片,该芯片还可将检测到的生物信号转化为电脑可识别的数字信号,实现人机交互。Emotiv Epoc 则研制出了可实时勘测和处理脑电信号变化的非侵入式脑机接口设备<sup>[43]</sup>。美国杜克大学与巴西的研究人员于 2013 年完成了对大鼠的“脑脑接口”(brain-to-brain interface)实验,该研究有望在未来实现脑电信号控制机械外骨骼<sup>[44]</sup>。2013 年 4 月,日本京都国际电气通信基础技术研究所借助核磁共振成像设备来解读梦境,该研究或在未来为窥测他人意图想法提供可能<sup>[45]</sup>。2013 年 6 月,美国明尼苏达州的科学家首次实现了通过意念远程遥控直升机的飞行<sup>[46]</sup>。2013 年 8 月,美国华盛顿大学科学家首次进行了人类之间非侵入式脑-脑接口试验,一个研究人员能通过互联网发送脑信号,成功控制远在校园另一侧的同伴的手部运动<sup>[47]</sup>,该研究计划在下一步进行两个大脑之间直接进行更加对等的双向交流。

随着脑科学的发展在人机交互、脑机接口、脑脑接口以及大脑思维读取与意念控制等领域研究的不断深入,相信在不久的将来读脑、控脑或成为现实。

### 4 结束语

Yang<sup>[42]</sup>等提出下一代人机结合的研发趋势是 HCI 与 BCI 的结合。HCI 的研发目标是不断提高计算机对人脑需求的理解,但 HCI 指令的接收依赖于传统的鼠标和键盘等输入渠道,这对于残疾人或不方便用手的健康人无疑都带来了不便。而 BCI 给我们展示了仅凭意念无需肌肉运动就控制计算机的可能,这或许能给 HCI 带来一次革命性的发展。因而,基于 BCI 的 HCI 将是下一代人机结合技术的研

发方向。

脑科学的发展能给人类社会带来多种惊人的变化。脑科学每前进一步,都将会为哲学、教育学、人工智能科学、语言学和仿生学提供科学依据,又为数学、物理学、化学以及技术科学提供重要的研究课题,也必然促进医学、心理学和思维认知科学的发展<sup>[48]</sup>。人机结合的出现就得益于脑科学的发展和计算机技术的不断进步,无论是 BCI 还是 HCI,均为人脑与计算机、人脑与环境的交流提供了全新的模式。相信随着研究工作的进一步开展,人机结合技术将日趋成熟,并最终造福人类。

### 参考文献

- [1] 胡玉华. 脑科学及其研究进展. 北京教育学院学报, 2000, 14(1):41-44
- [2] 龙程. 脑研究的进展、挑战与机遇. 华南师范大学学报(自然科学版), 2013, 45(6):161-164
- [3] 杜久林, 杨雄里. 日本“脑科学时代”计划纲要简介. 生命科学, 1997, 9(6):292-295
- [4] 那杰, 高飞. 日本脑科学与教育研究的进展. 比较教育研究, 2008, 30(5):16-19
- [5] 顾凡及. 从蓝脑计划到人脑计划:欧盟脑研究计划评价. 科学, 2013, 65(4):16-20
- [6] European Commission. Human Brain Project. <https://www.humanbrainproject.eu/project-objectives.html>, 2013 Human Brain Project, 2014
- [7] 姜岩. 脑科学或为人类带来一个新世界. 新华每日电讯, 2013-06-03008
- [8] Obama. A White House Call To Action to Advance the BRAIN Initiative. <http://www.whitehouse.gov/blog/2014/02/24/white-house-call-action-advance-brain-initiative.html>, Office of Science and Technology Policy, 2014
- [9] Douglas B, Lenat, Edward A. Feigenbaum, On the thresholds of knowledge. *Artificial Intelligence*, 1991, 47(1):185-250
- [10] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, 60(1):3-10
- [11] 戴汝为.“人机结合”的大成智慧. 模式识别与人工智能, 1994, 7(3):181-190
- [12] 滕弘飞, 王奕首, 史彦军等. 人机结合的关键支持技术. 机械工程学报, 2006, 42(11):1-9

- [13] Adriana G W, Pascal B, Béat H. An Overview of Human-Computer Interaction Patterns in Pervasive Systems. *International Conference on User Science Engineering*, 2010;145-150
- [14] Dix A, Finlay J, Abowd G D, et al. Human Computer Interaction, Prentice Hall Publishers, 1992. 1327-1331
- [15] Sharp H, Rogers Y, Preece. Interaction Design: Beyond Human Computer Interaction. John Wiley & Sons Publishers, 2007
- [16] Hinze H V. CSCR: Computer Supported Collaborative Research: [ Ph. D dissertation ]. School of Electronics and Computer Science University of Southampton United Kingdom, 2006. 1-3
- [17] Diaper D , Sanger C. Tasks for and tasks in human - computer interaction. *Interacting with Computers*, 2006, 18:117-138
- [18] Hinze-Hoare, Review and Analysis of Human Computer Interaction ( HCI ) Principles. *Computer Science and Automation Engineering*, 2007, 19;27-42
- [19] Rachit G. Human Computer Interaction A Modern Overview. *Computer Technology & Applications*, 2012, 3(5) : 1736-1740
- [20] Mathew A R, Hajj, Abri. Human-Computer Interaction ( HCI ) : An Overview. *Computer Science and Automation Engineering*, 2011, 6;99-100
- [21] Lyons M J, Haehnel M, Tetsutani N. Designing, playing, and performing, with a vision-based mouth Interface, In: New Interfaces for Musical Expression, 2003. 245-252
- [22] Wassermann K C, Eng K, Manzolli J, et al. Live soundscape composition based on synthetic emotions. *IEEE Multimedia Magazine*, 2003, 10(4) :149-161
- [23] Fong T, Nourbakhsh I, Dautenhahn K. A survey of sociallyinteractive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 42(3-4) :143-166
- [24] Kuno Y, Shimada N, Shirai Y. Look where you're going: A robotic wheelchair based on the integration of human and environmental observations. *IEEE Robotics and Automation*, 2003, 10(1) :26-34
- [25] Dickey J P, Eger T R, Frayne R J, et al. Research Using Virtual Reality: Mobile Machinery Safety in the 21st Century, *Minerals*, 2013, 3(2) ;145-164
- [26] 傅鸥,钱跃良,黄铁军等. 智能接口技术的研究进展与发展趋势. 高技术通讯,2002,12(4) ;106-110
- [27] Boyu W C, Man W F, Wan. Comparison of Different Classication Methods for EEG-Based Brain Computer Interfaces: A Case Study. In: IEEE International Conference on Information and Automation, Macau, China, 2009. 22-24
- [28] 杨建,刘进,吴明曦等. 脑机技术发展及其对军事领域的影响. 国防科技,2013,34(6) :19-23
- [29] 尧德中,刘铁军,雷旭等. 基于脑电的脑-机接口:关键技术和应用前景. 电子科技大学学报,2009,38 (5) : 550-554
- [30] Vidal J J. Real-time detection of brain events in EEG. *Proceedings of the IEEE*, 1977 , 65(5) :633-641
- [31] Vidal J J. Toward direct brain-computer communication. *Annu Rev Biophys Bioeng*, 1973, 2;157-180
- [32] Wolpaw, J R. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. *Rehabilitation Engineering*, 2000, 8(2) :164-173
- [33] Vaughan T M, Heetderks W J, Trejo L J, et al. Brain-computer interface technology:a review of the Second International Meeting. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2003, 11(2) :94-109
- [34] Vaughan T M, Wolpaw J R. The Third International Meeting on Brain-Computer Interface Technology: making a difference. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2006, 14(2) :126-127
- [35] 高诺,鲁守银,张运楚等. 机器人发展新趋势——脑机接口机器人. 见:第四届全国先进制造装备与机器人技术高峰论坛论文集,2008. 153-157
- [36] 徐丁峰,程明,高小榕等. 数字信号处理器在脑-机接口系统中的应用. 北京生物医学工程,2002, 21 (4) :256-259
- [37] Farwell L, Donchin E. Talking off the top of your head: A mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroenceph Clin. Neurophysiol*, 1988 , 70 ( 6) : 510-523
- [38] Birbaumer N, Hinterberger T. The thought-translation device ( TTD ) : neuro behavioral mechanisms and clinical outcome. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2003, 11(2) : 120-123
- [39] 赵丽,刘自满,崔世钢等. 基于脑-机接口技术的智能服务机器人控制系统. 天津工程师范学院学报,2008, 18 (2) :1-4

- [40] Krepki R., Curio G, Blankertz B, et al. brain - computer interface—the HCI communication channel for discovery. *Human-Computer Studies*, 2007, 65 (5): 460-477
- [41] Wolpaw J R, Birbaumer N, Mcfarland D J, et al. Brain - computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 113(6) : 767-791
- [42] Yang Y, Wiart J. Towards Next Generation Human-Computer Interaction - Brain-computer interfaces: Applications and Challenges. In: Proceedings of the 1st International Symposium of Chinese CHI, Paris, France. 2013. 1-2
- [43] 陈騫. 人工大脑抢占脑科学制高点. 上海信息化, 2013, (12):82-84
- [44] Pais V M, Lebedev M, Kunicki C, et al. A brain-to-brain interface for real-time sharing of sensorimotor information. *SciRep*, 2013, 3:1319
- [45] Horikawa T, Tamaki M, Miyawaki Y, et al. Neural decoding of visual imagery during sleep. *Science*, 2013, 340 (6132) :639-642
- [46] 新浪科技. 美国科学家首次研制出意念控制直升机. 中国航空新闻网:中国航空报社, 2013
- [47] Cong L, Ran FA, Cox D, et al. Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas systems. *Science*, 2013, 339 (6221) :819-823
- [48] 安书成. 脑科学的研究现状与展望——脑科学的概念及其研究概述. 中学生物教学, 1997, 01:6-9

## A review of the development and status of the research on human-computer cooperation

Gao Nan, Fu Junying, Zhao Yunhua

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

### Abstract

The forming of brain science is stated, and its multi-discipline peculiarity and research importance are expounded. The development and current situation of the research on human-computer cooperation in the field of brain science with the purpose of creating brain-like computers are reviewed from the angles of human-computer interaction (HCI) and brain-computer interface (BCI), and some major research achievements in the field of human-computer cooperation are introduced. The trends of the research on human-computer cooperation are analyzed, and it is pointed that the BCI-based HCI is the developing direction of future human-computer cooperation techniques.

**Key words:** brain science, human-computer cooperation, human-computer interaction (HCI), brain-computer interface (BCI), brain-like computer