脑机接口（英语：brain-computer interface，简称BCI；有时也称作direct neural interface或者brain-machine interface），是在人或动物脑（或者脑细胞的培养物）与外部设备间创建的直接连接通路。在单向脑机接口的情况下，计算机或者接受脑传来的命令，或者发送信号到脑（例如视频重建），但不能同时发送和接收信号[1]。而双向脑机接口允许脑和外部设备间的双向信息交换。

在该定义中，“脑”一词意指有机生命形式的脑或神经系统，而并非仅仅是抽象的“心智”（mind）。“机”意指任何处理或计算的设备，其形式可以从简单电路到硅芯片。

对脑机接口的研究已持续了超过30年了。20世纪90年代中期以来，从实验中获得的此类知识呈显著增长。在多年来动物实验的实践基础上，应用于人体的早期植入设备被设计及制造出来，用于恢复损伤的听觉、视觉和肢体运动能力。研究的主线是大脑不同寻常的皮层可塑性，它与脑机接口相适应，可以象自然肢体那样控制植入的假肢。在当前所获取的技术与知识的进展之下，脑机接口研究的先驱者们可令人信服地尝试制造出增强人体功能的脑机接口，而不仅仅止于恢复人体的功能。这种技术在以前还只存在于科幻小说之中。

动物脑机接口研究

一些实验室已实现从猴和大鼠的大脑皮层上记录信号以便操作脑机接口来实现运动控制。实验让猴只是通过回想给定的任务（而没有任何动作发生）来操纵屏幕上的计算机光标并且控制机械臂完成简单的任务。另外在猫上进行的研究对视觉信号进行了解码。

早期工作

面向运动功能的脑机接口

在面向运动功能的脑机接口方面，发展算法重建运动皮层神经元对运动的控制，该研究可以回溯到20世纪70年代。Schmidt, Fetz和Baker领导的小组在20世纪70年代证实了猴可以在闭环的操作性条件作用（closed-loop operant conditioning）后快速学会自由地控制初级运动皮层中单个神经元的放电频率[3]。20世纪80年代，约翰斯·霍普金斯大学的Apostolos Georgopoulos找到了猕猴的上肢运动的方向和运动皮层中单个神经元放电模式的关系。他同时也发现，一组分散的神经元也能够编码肢体运动[4]。

上世纪九十年代中期以来，面向运动的脑机接口经历了迅速的发展[5]。若干研究小组已经能够使用神经集群记录技术实时捕捉运动皮层中的复杂神经信号，并用来控制外部设备。其中主要包括了Richard Andersen、John Donoghue、Phillip Kennedy、Miguel Nicolelis和Andrew Schwartz等人的研究小组。

面向感觉功能的脑机接口

当前人类已经能够修复或者正在尝试修复的感觉功能包括听觉、视觉和前庭感觉。

人工耳蜗是迄今为止最成功、临床应用最普及的脑机接口。

视觉修复技术尚在研发之中。这方面的研究和应用落后于听觉同能的主要原因是视觉传递信息量的巨大和外周感觉器官（视网膜）和中枢视觉系统在功能上的相对复杂性。具体参见视觉假体。

美国约翰·霍普金斯大学的Della Santina及其同事最近开发出一种可以修复三维前庭感觉的前庭植入物。

[6]

研究进程大事记

Phillip Kennedy及其同事用锥形营养性（neurotrophic-cone）电极植入术在猴上建造了第一个皮层内脑机接口。

1999年，哈佛大学的Garrett Stanley试图解码猫的丘脑外侧膝状体内的神经元放电信息来重建视觉图像。他们记录了177个神经元的脉冲列，使用滤波的方法重建了向猫播放的八段视频，从重建的结果中可以看到可辨认的物体和场景。[7]

杜克大学的Miguel Nicolelis是支持用覆盖广大皮层区域的电极来提取神经信号、驱动脑机接口的代表。他认为，这种方法的优点是能够降低单个电极或少量电极采集到的神经信号的不稳定性和随机性。Nicolelis在1990年代完成在大鼠的初步研究后，在夜猴内实现了能够提取皮层运动神经元的信号来控制机器人手臂的实验。到2000年为止，Nicolelis的研究组成功实现了一个能够在夜猴操纵一个游戏杆来获取食物时重现其手臂运动的脑机接口。[8] 这个脑机接口可以实时工作。它也可以通过因特网远程操控机械手臂。不过由于猴子本身不接受来自机械手臂的感觉反馈，这类脑机接口是开环的。Nicolelis小组后来的工作使用了恒河猴。[9][10]

其它设计脑机接口算法和系统来解码神经元信号的实验室包括布朗大学的John Donoghue、匹兹堡大学的Andrew Schwartz、加州理工的Richard Anderson。这些研究者的脑机接在某一时刻使用的神经元数为15-30，比Nicolelis的50-200个显著要少。Donoghue小组的主要工作是实现恒河猴对计算机屏幕上的光标的运动控制来追踪视觉目标。其中猴子不需要运动肢体。[11] Schwartz小组的主要工作是虚拟现实的三维空间中的视觉目标追踪，以及脑际接口对机械臂的控制。[12]. 这个小组宣称，他们的猴子可以通过脑机接口控制的机械臂来喂自己吃西葫芦。[13] Anderson的小组正在研究从后顶叶的神经元提取前运动信号的脑机接口。此类信号包括实验动物在期待奖励时所产生信号。[14]

除了以上所提及的这些用于计算肢体的运动参数的脑机接口以外，还有用于计算肌肉的电信号（肌电图）的脑机接口。[15] 此类脑机接口的一个应用前景是通过刺激瘫痪病人的肌肉来重建其自主运动的功能。

人类脑机接口研究

侵入式脑机接口

侵入式脑机接口主要用于重建特殊感觉（例如视觉）以及瘫痪病人的运动功能。此类脑机接口通常直接植入到大脑的灰质，因而所获取的神经信号的质量比较高。但其缺点是容易引发免疫反应和愈伤组织（疤），进而导致信号质量的衰退甚至消失。

视觉脑机接口方面的一位先驱是William Dobelle。他的皮层视觉脑机接口主要用于后天失明的病人。1978年，Dobelle在一位男性盲人Jerry的视觉皮层植入了68个电极的阵列，并成功制造了光幻视（Phosphene）。该脑机接口系统包括一个采集视频的摄像机，信号处理设备和受驱动的皮层刺激电极。植入后，病人可以在有限的视野内看到灰度调制的低分辨率、低刷新率点阵图像。该视觉假体系统是便携式的，且病人可以在不受医师和技师帮助的条件下独立使用。[16]

2002年，Jens Naumann成为了接受Dobelle的第二代皮层视觉假体植入的16位病人中的第一位。第二代皮层视觉假体的特点是能将光幻视更好地映射到视野，创建更稳定均一的视觉。其光幻视点阵覆盖的视野更大。接受植入后不久，Jens就可以自己在研究中心附近慢速驾车漫游。

针对“运动神经假体”的脑机接口方面，Emory大学的Philip Kennedy和Roy Bakay最先在人植入了可获取足够高质量的神经信号来模拟运动的侵入性脑机接口。他们的病人Johnny Ray患有脑干中风导致的锁闭综合征。Ray在1998年接受了植入，并且存活了足够长的时间来学会用该脑机接口来控制电脑光标。[17]

2005年，Cyberkinetics公司获得美国FDA批准，在九位病人进行了第一期的运动皮层脑机接口临床试验。四肢瘫痪的Matt Nagle成为了第一位用侵入式脑机接口来控制机械臂的病人，他能够通过运动意图来完成机械臂控制、电脑光标控制等任务。其植入物位于前中回的运动皮层对应手臂和手部的区域。该植入称为BrainGate，是包含96个电极的阵列。 [18]

部分侵入式脑机接口

部分侵入式脑机接口一般植入到颅腔内，但是位于灰质外。其空间分辨率不如侵入式脑机接口，但是优于非侵入式。其另一优点是引发免疫反应和愈伤组织的几率较小。

皮层脑电图（ECoG）的技术基础和脑电图的相似，但是其电极直接植入到大脑皮层上，硬脑膜下的区域。[19] 华盛顿大学（圣路易斯）的Eric Leuthardt和Daniel Moran是最早在人体试验皮层脑电图的研究者。根据一则报道，他们的基于皮层脑电图的脑机接口能够让一位少年男性病人玩电子游戏。[20] 同时该研究也发现，用基于皮层脑电图的脑机接口来实现多于一维的运动控制是比较困难的。

基于“光反应成像”的脑机接口尚处在理论阶段。其概念是在颅腔内植入可测量单神经元兴奋状态的微型传感器，以及受其驱动的微型激光源。可用该激光源的波长或时间模式的变化来编码神经元的状态，并将信号发送到颅腔外。该概念的优点是可在感染、免疫反应和愈伤反应的几率较小的条件下长时间监视单个神经元的兴奋状态。

非侵入式脑机接口

和侵入式脑机接口一样，研究者也使用非侵入式的神经成像术作为脑机之间的接口在人身上进行了实验。用这种方法记录到的信号被用来加强肌肉植入物的功能并使参加实验的志愿者恢复部分运动能力。虽然这种非侵入式的设备方便佩戴于人体，但是由于颅骨对信号的衰减作用和对神经元发出的电磁波的分散和模糊效应，记录到信号的分辨率并不高。这种信号波仍可被检测到，但很难确定发出信号的脑区或者相关的单个神经元的放电。

脑电图机所记录到的多导脑电图信号

脑电图（EEG）作为有潜力的非侵入式脑机接口已得到深入研究，这主要是因为该技术良好的时间分辨率、易用性、便携性和相对低廉的价格。但该技术的一个问题是它对噪声的敏感，另一个使用EEG作为脑机接口的现实障碍是用户在工作之前要进行大量的训练。这方面研究的一个典型例子是德国图宾根大学的Niels Birbaurmer于1990年代进行的项目。该项目利用瘫痪病人的脑电图信号使其能够控制电脑光标。 [21] 经过训练，十位瘫痪病人能够成功地用脑电图控制光标。但是光标控制的效率较低，在屏幕上写100个字符需要1个小时，且训练过程常耗时几个月。在Birbaumer的后续研究中，多个脑电图成分可被同时测量，包括μ波和β波。病人可以自主选择对其最易用的成分进行对外部的控制。

与上述这种需要训练的EEG脑机接口不同，一种基于脑电P300信号的脑机接口不需要训练，因为P300信号是人看到熟识的物体时非自主地产生的。美国罗切斯特大学的Jessica Bayliss的2000年的一项研究显示，受试者可以通过P300信号来控制虚拟现实场景中的一些物体，例如开关灯或者操纵虚拟轿车等。 [22]

1999年，美国凯斯西留地大学由Hunter Peckham领导的研究组用64导脑电图恢复了四肢瘫痪病人Jim Jatich的一定的手部运动功能。该技术分析脑电信号中的β波，来分类病人所想的向上和向下两个概念，进而控制一个外部开关。除此以外，该技术还可以使病人控制电脑光标以及驱动其手部的神经控制器，来一定程度上回复运动功能。 [23]

应用人工神经网络，计算机可以分担病人的学习负担。Fraunhofer学会2004年用这一技术显著降低了脑机接口训练学习所需的时间。 [24]

Eduardo Miranda的一系列试验旨在提取和音乐相关的脑电信号，使得残疾病人可以通过思考音乐来和外部交流，这种概念称为“脑声机”（encephalophone）. [25]

脑磁图（MEG）以及功能核磁共振成像（fMRI）都已成功实现非侵入式脑机接口。例如在一项研究中，病人利用生物反馈技术可以用改变fMRI所检测到的脑部血流信号来控制乒乓球运动。 [26] 也有人用fMIR信号来准确实时地控制机械臂，这一控制的延迟大约7秒左右。 [27]

成果商品化及公司介绍

John Donoghue及其同事创立了Cybernetics公司，宗旨是推动实用的人类脑机接口技术的发展。该公司当前以Cybernetics神经技术公司为名在美国股市上市。BrainGate是该公司生产的电极阵列，该产品基于美国犹他大学的Richard Normann研发的“犹他”电极阵列。

Philip Kennedy创立了Neural Signals公司。该公司生产的脑际接口设备使用玻璃锥内含的蛋白质包裹的微电极阵列，旨在促进电极和神经元之间的耦合。该公司除了生产侵入式脑际接口产品，还销售一种可回复言语功能的植入设备。

2004年为止，William Dobelle创建的公司已经在16位失明病人内植入了初级视皮层视觉假体。该公司当前仍在继续研发视觉植入物，但这类产品至今没有获得FDA的批准，因而不能在美国境内使用于人类。 [28]

Macrotellect宏智力科技[1]公司。该公司生产了一个消费级别的脑机接口可穿戴式设备BrainLink，定位于娱乐（Neuro-Gaming），教育（儿童的大脑训练）以及健康（大脑健康数据管理）。其价格较为亲民，使得非侵入式脑机接口技术得以推广至大众消费领域。

细胞培养物的脑机接口

细胞培养物的脑机接口是动物（或人）体外的培养皿中的神经组织和人造设备之间的通讯机制。 这方面研究的焦点是建造具有问题解决能力的神经元网络，进而促成生物式计算机。 研究者有时在半导体芯片上培养神经组织，并且从这些神经细胞记录信号或对其进行刺激。这类研究常称为“神经电子学”（Neuroelectronics）或“神经芯片”（Neurochips）。1997年，加州理工Jerome Pine和Michael Maher的团队最先宣称研制成功神经芯片。 [29]该芯片集成了16个神经元。

2003年，美国南加州大学的Theodore Berger小组开始研制能够模拟海马体功能的神经芯片。该小组的目标是将这种神经芯片植入大鼠脑内，使其称为第一种高级脑功能假体。他们之所以选择海马体作为研究对象，是因为其高度有序的组织以及丰富的研究文献。海马体的功能与记忆生成和长期记忆有关。

佛罗里达大学的Thomas DeMarse用提取自大鼠脑的包含25000个神经元的培养物来操控一个F-22战斗机模拟程序。 [30] 这些神经元提起自大脑皮层，离体以后，它们在培养皿上迅速集结成活的神经元网络，并且与60个电极通讯，来控制战斗机的上下和左右摇摆运动。该项目的主要目的是研究人类的脑在细胞层面上如何学习特定的计算任务。

　摘 　要 : 　脑2机接口是在人脑与计算机或其它电子设备之间建立的直接的交流和控制通道 ,通过这种通道 ,人就可 以直接通过脑来表达想法或操纵设备 ,而不需要语言或动作 ,这可以有效增强身体严重残疾的患者与外界交流或控 制外部环境的能力 ,以提高患者的生活质量.脑2机接口技术是一种涉及神经科学、 信号检测、 信号处理、 模式识别等多 学科的交叉技术.本文对脑2机接口技术的发展、 研究现状、 工作原理以及涉及的关键技术进行了较为详细地综述 ,在 总结脑2机接口技术存在问题的基础上 ,探讨了该领域进一步研究的方向.

关键词 : 　脑2机接口 ; 脑电图 ; 事件相关电位 ; 特征提取 ; 通信

　引言 　　脑2机接口(Brain2Computer Interface ,BCI)技术形成于 20 世 纪 70 年代 (1973 年 ,Vidal) [1] ,是一种涉及神经科学、 信号检 测、 信号处理、 模式识别等多学科的交叉技术. 20 多年来 ,随 着人们对神经系统功能认识的提高和计算机技术的发展 ,BCI 技术的研究呈明显的上升趋势 ,特别是1999 年和2002 年两次 BCI国际会议的召开为BCI技术的发展指明了方向.目前 ,BCI 技术已引起国际上众多学科科技工作者的普遍关注 ,成为生 物医学工程、 计算机技术、 通信等领域一个新的研究热点. BCI是一种连接大脑和外部设备的实时通信系统. BCI系 统可以把大脑发出的信息直接转换成能够驱动外部设备的命 令 ,并代替人的肢体或语言器官实现人与外界的交流以及对 外部环境的控制.换言之 ,BCI系统可以代替正常外围神经和 肌肉组织 ,实现人与计算机之间或人与外部环境之间的通 信[2～8] .

BCI技术的核心是把用户输入的脑电信号转换成输出控 制信号或命令的转换算法. BCI 研究工作中相当重要的部分 就是调整人脑和 BCI 系统之间的相互适应关系 ,也就是寻找 合适的信号处理与转换算法 ,使得神经电信号能够实时、 快 速、 准确地通过 BCI系统转换成可以被计算机识别的命令或 操作信号. 由于应用的场合以及需要的信号特征不同 ,相应的信号 处理方法和转换算法也有很大的差异 ,甚至每种 BCI 系统都 有自己的算法 ,这就使得对 BCI性能的评价比较困难. 建立一 种统一的并能被大多数人接受的评价标准 ,也是 BCI 技术发 展不可缺少的重要环节. BCI技术是目前国际上一个十分活跃的研究领域. 作为 一种综合多种学科的交叉技术 ,BCI 技术的发展目前还存在 着很多问题 ,有待于更多的科技工作者致力于深入的研究. 为 促进 BCI技术的发展 ,本文在查阅有关资料的基础上 ,对 BCI 的原理、 概念、 关键技术及其发展做了较为详细的综述 ,并对该领域存在的问题以及可能的发展方向进行了探讨。

2 　BCI系统及其工作原理 211 　BCI的原理及概念 神经科学的研究表明 ,在大脑产生动作意识之后和动作 执行之前 ,或者受试主体受到外界刺激之后 ,其神经系统的电 活动会发生相应的改变. 神经电活动的这种变化可以通过一 定的手段检测出来 ,并作为动作即将发生的特征信号.通过对 这些特征信号进行分类识别 ,分辨出引发脑电变化的动作意 图 ,再用计算机语言进行编程 ,把人的思维活动转变成命令信 号驱动外部设备 ,实现在没有肌肉和外围神经直接参与的情 况下 ,人脑对外部环境的控制.这就是 BCI的基本工作原理. 第一次 BCI 国际会议给出的 BCI 的定义是[9] :“脑2计算机 接口(Brain Computer Interface) 是一种不依赖于正常的由外 围神经和肌肉组成的输出通路的通讯系统” . BCI 完全不依赖 肌肉和外围神经的参与 ,直接实现脑和计算机的通信.这对完 全没有活动能力的患者(如脑中风 ,肌萎缩性 (脊髓) 侧索硬 化 ,脑瘫等)的辅助治疗和语言功能、 行为能力的恢复 ,对特殊 环境中外部设备的控制 ,甚至对娱乐方式的改进都具有非常 重要的意义. 212 　BCI系统的基本结构 基于各种不同的需求 ,人们已经设计出多种可以在实验 室中进行演示的基于脑电的 BCI原型系统[10 ,11] . 原理上 ,BCI系统一般由输入、 输出和信号处理及转换等 功能环节组成.输入环节的功能是产生、 检测包含有某种特性 的脑电活动特征信号 ,以及对这种特征用参数加以描述. 信号处理的作用是对源信号进行处理分析 ,把连续的模 拟信号转换成用某些特征参数 (如幅值、 自回归模型的系数 等) 表示的数字信号 ,以便于计算机的读取和处理 ,并对这些 特征信号进行识别分类 ,确定其对应的意念活动. 信号转换是根据信号分析、 分类之后得到的特征信号产 生驱动或操作命令 ,对输出装置进行操作 ,或直接输出表示患 者意图的字母或单词 ,达到与外界交流的目的.作为连接输入 和输出的中间环节 ,信号分析与转换是 BCI 系统的重要组成 部分.在训练强度不变的情况下 ,改进信号分析与转换的算 法 ,可以提高分类的准确性 ,以优化 BCI系统的控制性能. BCI系统的输出装置包括指针运动、 字符选择、 神经假体 的运动以及对其他设备的控制等. BCI 系统的 基本构成如图 1 所示. 作为一种实 时通信系统 ,BCI 系统的设计还应 考虑其它相关问题 ,如开/ 关控制、 反应时间、 速度和精度以及 与之相关的信息传输率、 训练方式、 训练人数、 应用场合等. 213 　BCI的分类 第一次 BCI国际会议根据输入信号的性质把 BCI系统分 成两大类 ,即 :使用自发脑电信号的 BCI系统和使用诱发脑电

信号的 BCI系统.

基于自发脑电的 BCI系统是应用自发脑电作为系统的输 入特征信号.其特点是 ,受试者经过训练之后能够自主地控制 脑电变化 ,从而直接控制外部环境 ,但通常需要对受试者进 行大量的训练 ,容易受其身体状况、 情绪、 病情等各种因素的 影响.诱发脑电信号的 BCI 系统使用外在刺激诱发大脑皮层 相应部位的电活动产生变化 ,并以其作为特征信号.外部诱发 BCI系统不需要对受试者进行过多的训练 ,但需要特定的环 境(如排成矩阵的闪烁视觉刺激输入) ,这不利于系统的推广 和应用.在系统输出模式上 ,前者能使操作者把指针移到任意 的二维或者多维位置 ,而后者只能使操作者在所列出的选项 中进行选择. 根据信号检测的方式不同 ,也可以把 BCI 分为电极内置 式和电极外置式两种基本形式[12] .电极内置式信号检测方法 使电极直接和大脑皮层接触或进入大脑皮层 ,测量的信号噪 声小、 损失低 ,但由于涉及外科手术 ,操作复杂 ,需要具有专业 技术的操作人员 ,而且容易感染. 电极外置式信号检测方法 , 操作简单 ,安全 ,有利于 BCI 系统的推广 ,但由于电极距离信 号源较远 ,噪声较大. 在 BCI系统设计中 ,使用何种方案应根据信号的特征、 测 量技术的水平以及实际要求的精度等因素综合考虑.

5 　BCI的应用

　　作为一种多学科交叉的新兴通信技术 ,目前 ,BCI 的研究 大多处于理论和实验室阶段 ,离实际应用还有一定的差距. 但 从其性能来看 ,BCI 系统及其技术将在涉及人脑的各个领域 发挥重要的作用 ,尤其是对于活动能力严重缺失患者的能力 恢复和功能训练具有重要意义.目前 ,对 BCI应用的研究主要 集中在以下几个方面 : (1)交流功能 　这类研究的目的是提高语言功能丧失患 者与外界的交流能力.一个典型的例子是 Niels Birbaumer[52]等 人研究的思想转换装置 (TTD) . 该装置由训练和拼写两部分 组成 ,在训练阶段 ,通过视听反馈和慢波脑电位(SCP) 的正向 增强完成 SCP的自动调整 ;在拼写阶段 ,训练者用 SCP对字母 或单词进行选择 ,对不能进行字母或单次选择的患者 ,可以让 他们进行“是” 或“否” 的选择 ,以实现其与外部环境的交流. (2)环境控制[25] 　目前 ,对 BCI 环境控制的研究主要是 基于虚拟现实技术.虚拟现实具有相对安全和目标可移动的 特点 ,它能为训练和调整神经系统活动提供一个安全可靠的 环境.受试者大脑发出操作命令 ,这种命令不是由肌肉和外围 神经传出并执行 ,而是由 BCI系统经过检测、 分析和识别相应 的脑电信号 ,确定要进行的操作 ,然后由输出装备对目标进行 控制. (3)运动功能恢复 　由 BCI 系统完成脑电信号的检测和 分类识别过程 ,然后把命令输出给神经假体 ,完成已经失去功 能的外围神经应有的功能 ,或者把命令信号输出给轮椅上的 命令接受系统 ,完成运动、 行走等功能 ,使四肢完全丧失功能 的患者能够在无人照看的情况下自己进行一些简单的活动 , 或进行功能性的辅助训练[53～55] . (4)在其他领域的应用 　从理论上讲 ,只要有神经电参与 的通信系统 ,都可以应用 BCI技术 ,如适用于残疾人的无人驾 驶汽车 ,就是把操作过程中脑电信号的一系列变化 ,由 BCI系 统实时的转换成操作命令 ,实现无人直接驾驶的目的. R C Wu 和 S F Liang等人[56]描述了一种基于事件相关电位(ERP) 的BCI技术在智能交通中的应用 ,该系统可以模拟驾驶员对 不同交通信号或标志的反应程度 ,从而为交通信号与交通标 志的设置提供更加科学的依据. BCI的初步应用表明 ,一方面 ,BCI 可以作为辅助治疗方 案用于残疾人 ,特别是运动功能或语言功能丧失但大脑功能

保持完好的患者的运动或语言功能的恢复治疗 ,以提高患者 的生活质量 ;另一方面 ,在危险环境中或对人有害的环境中 (如粉尘污染严重的车间内) ,可以用这种系统代替人的肢体 完成某些操作.当然 ,要实现这种应用还需要进行大量的研究 工作.

6 　BCI的发展状况及存在的问题 611 　BCI的发展状况 BCI的研究只有大约 20 年的历史 ,对于这种新型通讯技 术的研究 ,目前仍处于理论和实验室研究阶段. 1999 年和 2002 年两次 BCI国际会议的召开 ,为 BCI 的发展带来了机遇 并引起了多学科科技工作者的研究兴趣. BCI 技术的最初研 究局限于给身体严重残疾的患者提供一种有效的与外界交流 的机制 ,随着技术的逐步成熟和应用需求的提高出现了应用 于拼写、 控制指针运动和控制神经假体的各种脑2机接口系统 ,各种信号处理技术也得到了迅速发展.下面是国际上较有 影响的一些研究工作 :

(1) Wadsworth中心的研究工作[57] 　Wadsworth 中心一直 研究如何用从运动感觉皮层测得的 EEG信号控制指针的一 维或二维运动.在如何提高运动的速度和精度上 ,提出了以下 三个方面的改进措施 :改进信号的特征选择和信号的转化方 法 ;结合其他信号特征 ;优化人和接口之间的调整配合.另外 , 为了便于比较和评估 ,他们研制了一种 BCI22000 通用 BCI 系 统.该中心与其他研究机构合作 ,开发了 BCI 的简单应用 ,并 对其应用性能进行了测试研究.

(2) NSF( Neil Squire Foundation) 的发展状况[58] 　NSF 是 加拿大的一个非赢利性组织 ,该组织从事 BCI研究的目的是 , 让由于身体残疾而无法与外界交流的患者重新获得与外界交 流的能力 ,其最终目标是设计一种先进的通讯设备 ,使患有严 重残疾的人获得一个有效的、 方便的控制计算机或神经假体 等外部设备的能力. NSF 的工作开始于十年前 ,主要研究了鲁棒统计信号处 理方法 ,从一维 EEG信号中估计自发 EEG,以单次检测的运 动相关电位作为检测信号和估计信号之间的差别. 近年来 , NSF的工作转到了低频异步开关的设计 ,以减少信号处理过 程中的延迟和提高分类精度 ,使用的驱动信号是具有自调整 功能的运动想象活动产生的神经电信号.

(3) GSU(乔治亚州大学) 脑实验室的研究[27] 　该实验室 致力于 BCI 在现实环境中的应用 ,探索把通过训练获取的 BCI技术转化为控制现实环境的方法. 目前研究的课题有 :用 户接口控制参数、 主体的训练和生物反馈、 创造性表达及应 用、 辅助交流和环境控制等. (4) Graz2BCI技术的发展状况 　G P furtscheller[59]等人进 行了一系列基于 ERD 的 BCI 系统的研究 ,并实现了 G raz Ⅰ和 G razⅡ两个有代表性的 BCI 系统. G raze2BCI 技术在 BCI 的发展 中具有非常重要的地位 ,其神经生理学基础是肢体的实际 运动和想象运动能够在大脑皮层的相同部位产生电位的变 化.他们早期的工作主要集中在参数估计方法和对各种分类 器的测试研究 ,目前研究的重点是时域内两种不同的想象运

8321 　　电 　　子 　　学 　　报 2005 年

动的分类问题.

(5)高上凯课题组的研究 　清华大学高上凯教授的项目 组在脑2机接口研究中深入分析了稳态视觉诱发电位的特征 和提取方法 ,设计了一种具有高传输速率的基于稳态视觉诱 发电位的脑2机接口系统[60] . 该系统在识别的正确率和信号 传输速度方面取得了重大突破 ,信号传输的速度达到了 68bits/ min ,平均准确率达到了 87. 5 %.

7 　结束语

　　BCI是一种多学科交叉的新兴技术 ,它涉及神经科学、 信 号检测、 信号处理、 模式识别等多种学科领域. BCI 技术的研 究具有重要的理论意义和广阔的应用前景. 由于 BCI 技术的 发展起步较晚 ,相应的理论和算法很不成熟 ,对其应用的研究 很不完善 ,有待于更多的科技工作者致力于这一领域的研究 工作.随着技术的不断完善和成熟 ,BCI将会逐步地应用于现 实 ,并为仿生学开辟新的应用领域.本文在查阅大量文献的基 础上 ,对 BCI技术的工作原理、 涉及的关键技术等问题进行了 较为详细的综述 ,指出了该领域存在的主要问题 展望了该 领域的发展方向.