

脑机交互系统技术

刘亚东 周宗潭 胡德文 著



 科学出版社

脑机交互系统技术

刘亚东 周宗潭 胡德文 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者及其团队在脑机交互范式和原型系统研究上十余年的成果总结。书中提出 P300 超立方体编码、序列运动想象范式、触觉通道范式、移动目标选择范式等创新性脑机交互方式方法。这些方法用于解决诸如运动想象模式拓展、视觉通道刺激优化、复杂系统脑机操纵等领域内存在的难点问题,进而推动脑机接口技术的实用化进程。基于这些方法,成功实现机械臂操作控制、智能地面移动平台控制、一级倒立摆控制等原型系统。这些系统多属于国内首创,系统为脑机交互技术在各领域的应用提供整体方案,对相关系统研究具有借鉴意义。这些原型设计思想经过适当改造,可移植于实际系统的脑机控制中。

本书主要面向脑机接口、人机交互、康复助残等领域的科研人员和研究生,对人工智能领域的科技工作者也具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

脑机交互系统技术 / 刘亚东,周宗潭,胡德文著. —北京:科学出版社,2019.6

ISBN 978-7-03-057695-8

I. ①脑… II. ①刘… ②周… ③胡… III. ①电子计算机-接口-交互技术
IV. ①TP334.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122807 号

责任编辑:张艳芬 王 苏 / 责任校对:王 瑞

责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张:20 插页:10

字数:383 000

定价:136.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

脑机接口技术的目标在于绕开四肢,将大脑的思维意图直接交给外部设备去完成。对人类个体而言,脑机接口技术无疑可以提升他们的行为能力,完成一些人类在速度、力量、精确性、复杂度等方面无法胜任的任务。这一应用前景使每个人都具有成为“超人”的可能。科幻作品进一步激发了大众实现这一想法的兴趣,使目前依然处于实验室阶段的脑机接口技术在行业内已经有了相当的热度。对专业研究者来说,打造“超人”依然在视野之外,目前应该做的是,时刻关注现阶段的理论与技术瓶颈,不断努力取得突破,不断提升脑机接口技术的现实能力。

经过近 20 年的迅猛发展,脑机接口已经展现了令人不可小觑的实力。它可以帮助瘫痪患者控制机械臂完成食物抓取、喂送等简单动作,还可以帮助他们进行网络浏览;可以帮助渐冻人表达自己的真实意愿,在诸如是否接受相关治疗等重大事件上发表自己的意见;可以控制汽车、无人机等地面和空中机器人的移动,扩展个体的操控途径和能力空间等。欧洲和美国已经制订科技计划,将脑机接口作为重要研究方向。近年来,国内脑机接口研究队伍不断壮大,取得了和国际水平并行的研究成果。值得关注的是,脑机接口技术和人工智能技术相结合,形成了混合智能这一具体智能形态。在这一研究背景下,研究者努力将人脑智能和机器智能相融合,实现人在回路的智能架构,这一架构具有单纯人工智能无法取代的独特优势。可以预见,未来脑机接口技术将会实现质的飞跃,一系列关键技术将被突破,脑机接口将从实验室走进大众视野,改变人们的日常生活方式。

脑机接口的核心技术包括个体意图的激发与获取、脑信号的观测与模式分析、数据模式与控制命令的映射、外部设备计算能力与人脑智能的融合等。这些方面在本书都有所涉及。本书内容分为两部分:一部分是作者及其团队在脑机接口范式方面的研究成果;另一部分是作者及其团队将新型范式应用于实际系统控制的研究成果。在内容的编排上,并没有将两者截然分开,为了阅读方便,把范式研究和相关的实际系统控制内容放在一起。本书涉及的范式有视觉 P300、稳态视觉诱发电位、运动想象、触觉 P300 等。这些范式都是目前脑机接口通行的技术方案。作者及其团队针对他们的性能短板或者在实际应用中存在的问题,提出了诸如视觉 P300 立方体编码、序列运动想象等新型范式,改善传统范式的性能,扩宽它们的应用范围。作者及其团队利用本书提出的技术方案,先后完成两足步行机器人行走控制、助残轮椅移动控制、机械臂操作控制、移动目标选择、倒立摆控制、汽车行驶等实际系统控制。本书给出的技术具有很强的可移植性,稍加修改便可应用于

众多外部设备的移动控制和操作控制中。

本书撰写分工如下:第1章由刘亚东执笔,第2章~第5章由刘杨、周宗潭、胡德文执笔,第6章由孟宪鹏、胡德文、周宗潭、刘亚东执笔,第7章由刘亚茹、刘亚东执笔,第8章和第9章由岳敬伟、唐景昇、胡德文、周宗潭、刘亚东执笔,第10章由唐景昇、周宗潭、刘亚东执笔,第11章由岳敬伟、姜俊、周宗潭、刘亚东执笔,第12章~第14章由姜俊、周宗潭、刘亚东执笔,第15章由王惊君、刘亚东执笔。

刘湲、曹博研、钟赛赛对全书图片进行了编辑处理,刘坤佳对全书文献进行了校正。赵准参与了全书的排版和文字整理工作。没有他们细致耐心的工作,就没有本书的按时付梓,在此对他们表示衷心感谢!

本书是在国家重点基础研究计划(973)课题“高级脑机交互验证平台、评估体系与示范应用”(2015CB351706)、国家自然科学基金项目(61473305、91320202、61375117)等研究成果的基础上撰写完成的。本书总结了作者多年来在脑机接口领域的研究成果,希望对国内脑机接口相关领域的研究起到促进作用,并对相关研究人员有所帮助。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 脑机接口技术概述 | 1 |
| 1.1 脑机接口的概念 | 1 |
| 1.1.1 基本概念 | 1 |
| 1.1.2 BCI 的分类 | 3 |
| 1.2 有损 BCI | 7 |
| 1.2.1 有损 BCI 概述 | 7 |
| 1.2.2 有损 BCI 发展中的一些重要研究 | 9 |
| 1.2.3 有损 BCI 的发展趋势 | 18 |
| 1.3 无损 BCI | 20 |
| 1.3.1 基于 EEG 的 BCI | 20 |
| 1.3.2 基于 fNIRS 的 BCI | 26 |
| 1.3.3 其他无损 BCI | 27 |
| 1.4 本书的内容安排 | 29 |
| 参考文献 | 29 |
| 第 2 章 事件相关电位脑机接口 | 33 |
| 2.1 引言 | 33 |
| 2.2 P300 speller 及其衍生范式 | 34 |
| 2.2.1 P300 speller 的设计 | 34 |
| 2.2.2 oddball 刺激范式与 P300 波 | 35 |
| 2.2.3 P300 speller 的改进和衍生范式 | 35 |
| 2.3 P300-BCI 与 ERP-BCI | 35 |
| 2.3.1 ERP 的 P300 成分 | 35 |
| 2.3.2 瞬态视觉诱发电位 BCI | 36 |
| 2.4 ERP-BCI 的设计 | 37 |
| 2.4.1 需求分析和选项确定 | 37 |
| 2.4.2 设计要素 I: 视觉设计 | 38 |
| 2.4.3 设计要素 II: 刺激编码设计 | 39 |
| 2.4.4 设计要素 III: 刺激序列时间控制 | 40 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 2.4.5 设计要素Ⅳ:信号处理与目标识别算法 | 41 |
| 2.5 相关的分析方法 | 43 |
| 2.5.1 ERP 特征计算 | 43 |
| 2.5.2 ERP 特征时空模式分析 | 43 |
| 2.6 系统性能评价 | 44 |
| 2.6.1 目标识别正确率 | 44 |
| 2.6.2 信息传输率 | 44 |
| 2.6.3 字符率 | 45 |
| 2.6.4 写入字符率 | 46 |
| 2.6.5 实际信息传输率 | 46 |
| 2.7 本章小结 | 47 |
| 参考文献 | 48 |
| 第3章 视觉脑机接口范式中的刺激类型 | 52 |
| 3.1 引言 | 52 |
| 3.2 视觉刺激类型的设计 | 53 |
| 3.2.1 刺激类型的定义 | 53 |
| 3.2.2 刺激类型的分类 | 53 |
| 3.3 实验设计和过程 | 54 |
| 3.3.1 实验范式设计 | 54 |
| 3.3.2 实验过程和数据采集 | 55 |
| 3.4 不同刺激类型的比较 | 56 |
| 3.4.1 字符识别方法 | 56 |
| 3.4.2 拼写性能 | 56 |
| 3.4.3 分类器及特征的时空模式 | 59 |
| 3.5 本章小结 | 61 |
| 参考文献 | 62 |
| 第4章 事件相关电位脑机接口的超立方体编码方案 | 63 |
| 4.1 引言 | 63 |
| 4.2 cube 刺激编码的设计 | 64 |
| 4.2.1 cube 编码的生成 | 64 |
| 4.2.2 目标预测方法 | 65 |
| 4.2.3 性能指标及优化 | 66 |
| 4.3 嵌入 cube 编码设计 | 66 |
| 4.3.1 嵌入 cube 编码 | 66 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|-----------|
| 4.3.2 | PITR 计算和优化 | 67 |
| 4.3.3 | 最优性能和配置的函数特性 | 67 |
| 4.4 | 跨 cube 性能预测和优化方法 | 68 |
| 4.4.1 | score- P 模型 | 69 |
| 4.4.2 | 跨 cube 特征分布预测 | 69 |
| 4.4.3 | cube 编码的优化 | 70 |
| 4.5 | 实验设计 | 70 |
| 4.5.1 | 刺激设计 | 70 |
| 4.5.2 | 被试和数据采集 | 72 |
| 4.5.3 | 实验过程 | 72 |
| 4.5.4 | 数据处理过程 | 73 |
| 4.6 | 最优嵌入 cube 编码及分析 | 73 |
| 4.6.1 | 模型的检验 | 73 |
| 4.6.2 | 最优嵌入 cube 编码 | 76 |
| 4.6.3 | ERP 时空特征随目标刺激概率的变化 | 81 |
| 4.7 | cube 编码优化的进一步讨论 | 83 |
| 4.7.1 | 关于码长和正确率因素的进一步讨论 | 83 |
| 4.7.2 | 子菜单设计的优化策略 | 84 |
| 4.7.3 | 刺激序列数的确定 | 85 |
| 4.8 | 本章小结 | 86 |
| | 参考文献 | 87 |
| 第 5 章 | 基于视觉搜索任务和视线独立的脑机接口范式 | 88 |
| 5.1 | 引言 | 88 |
| 5.2 | 基于 oddball 视觉搜索任务的拼写范式 | 90 |
| 5.2.1 | 刺激序列设计 | 90 |
| 5.2.2 | 两种刺激呈现模式 | 91 |
| 5.3 | 字符拼写实验 | 93 |
| 5.3.1 | 拼写实验 | 93 |
| 5.3.2 | 被试和数据采集 | 94 |
| 5.3.3 | 系统校准 | 95 |
| 5.4 | 数据处理与分析方法 | 95 |
| 5.4.1 | 分类器训练和在线字符识别 | 95 |
| 5.4.2 | ERP 计算与分析 | 95 |
| 5.4.3 | 离线性能分析 | 95 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|------------|
| 5.4.4 | EOG 校准与分析 | 96 |
| 5.5 | 结果与分析 | 97 |
| 5.5.1 | 系统校准的结果 | 97 |
| 5.5.2 | 在线拼写正确率 | 97 |
| 5.5.3 | 刺激诱发的特征电位 | 97 |
| 5.5.4 | 离线性能分析 | 100 |
| 5.5.5 | 眼动显著度分析 | 101 |
| 5.6 | oddball 视觉搜索 BCI 范式的特点 | 103 |
| 5.6.1 | 自纠错拼写系统的正确率要求 | 103 |
| 5.6.2 | 中心视觉和外围视觉比较 | 103 |
| 5.6.3 | 任务复杂度和 P300 潜伏期的关系 | 104 |
| 5.6.4 | P300 潜伏期的任务间差异 | 105 |
| 5.6.5 | 练习效应 | 106 |
| 5.7 | 进一步的改进 | 107 |
| 5.7.1 | 最优目标集大小 | 107 |
| 5.7.2 | 视觉设计的改进 | 107 |
| 5.8 | 本章小结 | 108 |
| | 参考文献 | 108 |
| 第 6 章 | 视觉 P300 诱发电位控制多关节机械臂范式 | 111 |
| 6.1 | 引言 | 111 |
| 6.2 | RM-501 机械臂及其控制系统 | 112 |
| 6.3 | 机械臂控制 P300 范式设计与实现 | 114 |
| 6.3.1 | 机械臂控制转换方式设计 | 115 |
| 6.3.2 | BCI 控制指令集设计 | 117 |
| 6.4 | 信号处理算法及参数选择 | 119 |
| 6.4.1 | 被试与信号采集 | 119 |
| 6.4.2 | P300 信号特征提取与分类算法 | 120 |
| 6.4.3 | 特征分类算法 | 121 |
| 6.5 | 实验结果分析与讨论 | 121 |
| 6.5.1 | P300 刺激呈现参数优化 | 121 |
| 6.5.2 | P300 刺激重复次数优化 | 123 |
| 6.6 | 本章小结 | 125 |
| | 参考文献 | 125 |
| 第 7 章 | 基于视觉通道脑机接口的多移动目标选择 | 126 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 7.1 引言 | 126 |
| 7.2 BCI 类型选择 | 127 |
| 7.3 基于 SSVEP 的移动目标选择范式 | 128 |
| 7.3.1 SSVEP 实验范式设计 | 128 |
| 7.3.2 实验设计 | 131 |
| 7.3.3 信号处理 | 132 |
| 7.3.4 实验结果分析与讨论 | 135 |
| 7.4 基于 P300 的移动目标选择范式 | 138 |
| 7.4.1 P300 动态范式设计 | 138 |
| 7.4.2 实验设计 | 139 |
| 7.4.3 信号处理 | 141 |
| 7.4.4 实验结果分析与讨论 | 143 |
| 7.5 本章小结 | 146 |
| 参考文献 | 147 |
| 第 8 章 机械臂控制的运动想象脑机接口范式 | 148 |
| 8.1 引言 | 148 |
| 8.2 范式设计、实现及控制策略 | 149 |
| 8.3 数据处理 | 152 |
| 8.3.1 信号预处理与特征提取 | 152 |
| 8.3.2 最小距离分析方法 | 153 |
| 8.4 实验结果分析与讨论 | 154 |
| 8.5 本章小结 | 157 |
| 参考文献 | 157 |
| 第 9 章 基于运动想象脑机接口的虚拟倒立摆控制 | 158 |
| 9.1 引言 | 158 |
| 9.2 IPC 系统模型 | 159 |
| 9.3 基于 MI-BCI 的 IPC 控制范式设计与实现 | 160 |
| 9.3.1 EEG 特征选择 | 160 |
| 9.3.2 实验准备 | 161 |
| 9.3.3 离线训练设计 | 162 |
| 9.3.4 在线控制实验设计 | 165 |
| 9.4 信号处理算法及改进 | 166 |
| 9.4.1 EEG 信号的非平稳性 | 166 |
| 9.4.2 空域滤波算法及其适应性优化 | 167 |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 9.4.3 分类算法及其适应性优化 | 169 |
| 9.5 实验结果分析与讨论 | 172 |
| 9.5.1 实验结果分析 | 172 |
| 9.5.2 几点讨论 | 174 |
| 9.6 本章小结 | 176 |
| 参考文献 | 176 |
| 第 10 章 真实倒立摆脑机协同控制系统 | 177 |
| 10.1 引言 | 177 |
| 10.1.1 BCI 系统控制回路的非对称性 | 177 |
| 10.1.2 提升 BCI 系统通信效率的基本方法 | 178 |
| 10.1.3 增加被控对象的信息输入源 | 178 |
| 10.2 脑机共享自主性与脑机协同 | 179 |
| 10.2.1 脑机协同 BCI 控制系统的基本原理 | 179 |
| 10.2.2 人类原子运动理论 | 180 |
| 10.3 基于脑机协同控制的 IPC 控制策略 | 181 |
| 10.3.1 控制方案确定 | 181 |
| 10.3.2 IPC 平衡的协同控制实验 | 184 |
| 10.3.3 信号处理算法 | 188 |
| 10.3.4 实验结果分析 | 188 |
| 10.3.5 关于控制效果的讨论 | 191 |
| 10.4 本章小结 | 192 |
| 参考文献 | 193 |
| 第 11 章 多分类运动想象脑机接口范式设计 | 194 |
| 11.1 引言 | 194 |
| 11.2 六自由度 MI-BCI 的设计与实现 | 195 |
| 11.2.1 实验设计与数据采集 | 195 |
| 11.2.2 数据处理方法及改进 | 197 |
| 11.2.3 实验结果分析 | 200 |
| 11.3 序列 MI-BCI 范式 | 203 |
| 11.3.1 实验设计、数据采集与处理 | 204 |
| 11.3.2 实验结果 | 209 |
| 11.3.3 分析与讨论 | 216 |
| 11.4 本章小结 | 220 |
| 参考文献 | 220 |

| | |
|--|-----|
| 第 12 章 序列运动想象脑机接口范式在机器人控制中的应用 | 223 |
| 12.1 引言 | 223 |
| 12.2 基于序列 MI 的机器人行走控制 | 223 |
| 12.2.1 被试 MI 任务选择 | 224 |
| 12.2.2 机器人行走控制系统设计 | 225 |
| 12.2.3 对比实验设计 | 228 |
| 12.2.4 实验结果 | 229 |
| 12.3 多关节机械臂 BCI 控制 | 231 |
| 12.3.1 机械臂控制实验平台 | 232 |
| 12.3.2 六分类序列 MI 范式 | 233 |
| 12.3.3 机械臂控制策略 | 233 |
| 12.3.4 实验流程和性能指标 | 234 |
| 12.3.5 实验结果 | 235 |
| 12.4 实验结果分析与讨论 | 236 |
| 12.4.1 序列 MI 范式的控制性能 | 237 |
| 12.4.2 序列 MI-BCI 存在的不足及其对控制性能的影响 | 238 |
| 12.4.3 序列 MI 范式设计中的关键因素 | 240 |
| 12.5 本章小结 | 240 |
| 参考文献 | 241 |
| 第 13 章 基于异步序列运动想象脑机接口的助残轮椅控制 | 242 |
| 13.1 异步序列 MI 范式 | 242 |
| 13.1.1 异步序列 MI 任务设计 | 243 |
| 13.1.2 异步序列 MI 任务检测算法 | 244 |
| 13.2 助残轮椅 BCI 控制系统设计 | 247 |
| 13.2.1 助残轮椅实验平台 | 248 |
| 13.2.2 轮椅控制策略设计 | 248 |
| 13.2.3 助残轮椅控制任务设计 | 250 |
| 13.3 实验流程与结果 | 250 |
| 13.3.1 实验流程 | 250 |
| 13.3.2 助残轮椅控制结果 | 252 |
| 13.3.3 异步序列 MI 任务在线检测结果 | 252 |
| 13.3.4 离线数据分析结果 | 255 |
| 13.4 分析与讨论 | 258 |
| 13.4.1 助残轮椅控制结果分析 | 258 |

| | | |
|---------------|--------------------------------------|------------|
| 13.4.2 | 序列 MI 任务异步检测结果讨论 | 259 |
| 13.4.3 | 存在的问题及改进措施 | 260 |
| 13.5 | 本章小结 | 262 |
| | 参考文献 | 263 |
| 第 14 章 | 多时间尺度异步序列运动想象脑机接口范式分类算法 | 264 |
| 14.1 | 引言 | 264 |
| 14.2 | 时间窗口长度对序列 MI 任务检测性能的影响分析 | 265 |
| 14.2.1 | 时间窗口长度对分类正确率的影响 | 265 |
| 14.2.2 | 时间窗口长度对响应时间的影响 | 266 |
| 14.3 | 多尺度时间窗口分类算法设计 | 270 |
| 14.3.1 | 特征提取方法 | 270 |
| 14.3.2 | 分类器设计 | 270 |
| 14.4 | 实验结果 | 273 |
| 14.4.1 | 序列任务模板匹配结果 | 273 |
| 14.4.2 | 多尺度时间窗口与单一尺度时间窗口的结果对比 | 275 |
| 14.5 | 结果分析与讨论 | 277 |
| 14.6 | 本章小结 | 278 |
| | 参考文献 | 278 |
| 第 15 章 | 触觉脑机接口范式 | 279 |
| 15.1 | 引言 | 279 |
| 15.2 | 触觉诱发通道 | 280 |
| 15.3 | 触觉刺激软硬件设计 | 281 |
| 15.3.1 | 触觉刺激模块通信设计 | 281 |
| 15.3.2 | 触觉刺激模块控制设计 | 282 |
| 15.3.3 | 触觉 BCI 实验软硬件设计 | 283 |
| 15.3.4 | ERP 信号诱发测试 | 284 |
| 15.4 | 触觉 P300 范式设计 | 288 |
| 15.4.1 | 脑电信号采集 | 288 |
| 15.4.2 | 离线训练设计 | 289 |
| 15.4.3 | 在线测试设计 | 290 |
| 15.5 | 信号处理算法 | 291 |
| 15.5.1 | 信号预处理 | 291 |
| 15.5.2 | 特征提取算法 | 292 |
| 15.5.3 | 信号分类算法 | 292 |

| | |
|---------------------|-----|
| 15.6 离线实验 | 293 |
| 15.6.1 实验结果 | 293 |
| 15.6.2 离线结果分析 | 297 |
| 15.7 在线测试 | 298 |
| 15.7.1 实验结果 | 299 |
| 15.7.2 在线结果分析 | 300 |
| 15.8 本章小结 | 303 |
| 参考文献 | 303 |

彩图

第 1 章 脑机接口技术概述

1.1 脑机接口的概念

1.1.1 基本概念

脑机接口(brain computer interface,BCI)技术旨在建立一种脑与计算机(或其他机械电子设备)之间直接的信息交流和控制通道。这一通道不依赖由外周神经系统和肌肉组织构成的大脑常规输出通路,是一种新型的脑与机器信息交流的手段。在历史文献中,BCI 还有多个名称,如意识机器接口(mind machine interface,MMI)、直接神经接口(direct neural interface,DNI)和脑机器接口(brain machine interface,BMI)。

脑与计算机之间的信息传输是双向的:①脑向计算机传递信息,用于外部设备的控制,实现人体(也可以是其他动物)的功能补偿或者功能增强等;②计算机等向脑传递信息,其主要目的是调节大脑的认知或代谢状态以达到调节大脑认知水平的目的,如对注意力、情绪、警惕性水平等进行调节。因为目前脑向机器传递信息这一类研究在数量上占有绝对优势,所以 BCI 一般都指称这类研究。

BCI 技术发展的动力除了单纯的基础研究外,还在于建立新的脑意图执行通道、增强或者损伤脑认知能力、补偿残疾人士的认知和运动感觉功能等。作为一种独特的视角,BCI 也是研究人脑如何协调、表达肢体运动及新行为模式机制等问题的重要工具。通过 BCI 系统,特别是具有生物反馈机制的 BCI 系统,人类可以有意识地控制神经系统活动的时空模式。这样,相对于被动观测,研究者可以观察到更为丰富的脑活动与行为之间的各类关系及神经活动对不同行为的影响。

理论上,可以用于观测大脑活动的工具都可以作为 BCI 系统的一个环节使用,如功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图(electroencephalogram, EEG)、脑磁图(magnetoencephalography, MEG)、正电子发射断层显像(positron emission tomography, PET)、功能性光学近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)技术、微电极阵列(micro electrode array, MEA)、皮层贴片式电极(electrocorticogram, ECoG)等。其中, fMRI、MEG、PET 等因为价格昂贵、环境要求苛刻,目前只能在实验室中使用,主要用于基础研究;MEA、ECoG 等会对皮层造成不同程度的损伤,不能直接应用于正常人类对象,目前主要限制在动物和自愿参与研究的肢体功能损伤人士上;EEG、fNIRS 具有无损性和便携性,对环境要求不高,所以是目

前构建人体 BCI 系统时使用最多的手段,特别是 EEG,在目前占有绝对优势。

一个完整的 BCI 系统主要由两部分构成:①基于生物反馈的脑状态调制,即通过生物反馈,被试自主产生某种预期的脑神经代谢时空模式;②基于机器学习的脑神经代谢时空模式。分类完成后不同的模式将对应不同的控制命令。这两部分相互间会产生复杂的影响,如何综合设计,让整个系统性能达到高峰是系统设计面临的一个重要问题。BCI 系统若要有效提升性能,则需要针对每个被试优化系统参数。不过研究也发现,总有较低比例的个体无法通过训练达到 BCI 要求的最低正确率(随机正确率),这些被试无法使用 BCI 系统的原因,也是 BCI 研究者关注的问题。

真正意义上的 BCI 诞生于 20 世纪 70 年代。在美国国防部高级研究计划局的支持下,美国加利福尼亚大学洛杉矶分校的 Vidal 开展了相关研究^[1,2],并在学术论文中首次使用了“brain computer interface”一词。其研究发现,EEG 的绝大部分成分都在 30Hz 以下,并且进一步集中在 1Hz 以下,称为皮层慢信号(slow cortical potential, SCP)^[2];信号频谱的变化及不同电极信号的相关性和大脑的情感或者行为状态相关联。在 Vidal 开始研究 BCI 的时代,“事件相关电位”这一概念已经建立(于 20 世纪 60 年代提出),Vidal 已经将其作为信号加以考虑。但是,BCI 的研究者更多关注的是感觉刺激引起的皮层响应信号、皮层对不同刺激时空响应的差异性,以及刺激对皮层振荡信号的去同步化现象。当时的神经科学家已经积累了很多重要发现,例如,在静息情况下,大脑信号主要表现为自发的持续振荡,但当大脑受到外来感觉刺激时,脑信号时空特征会发生变化,如视网膜受到光照时,脑信号会出现 0.5~2s 的波形变化;又如,利用垂直/水平光栅刺激视网膜时,所激活的视觉皮层区域是不同的。因此,通过判别皮层激活空间模式的变化,可以推断视觉刺激的类型。显然,这些皮层响应信号是由外界刺激诱发的,属于诱发信号。这些诱发信号的幅值在毫伏级,埋藏在自发信号中,难以稳定提取。诱发信号的具体波形受注意力、刺激类型、刺激所附加的认知含义等因素的影响。通过实验积累,建立外界刺激和诱发信号时空模式的相关性,科学家就可以从脑信号模式出发反推脑皮层在处理何种外界刺激。可以说,Vidal 关于 BCI 的大部分研究是基于这些相关性的。直到今天,依然有研究者按照这一研究思路开展研究,人们称为反编码研究。视觉通道的反编码研究进展最为显著。研究者利用皮层响应对输入的视觉信号进行分类,对图片的分类能力有数十种,对视频的分类能力有十种左右。Vidal 还指出,在 BCI 中可以考虑引入眼动、肌电、心率等生物信号提升交互效率,这是混合 BCI 的最初设想。

20 世纪 70 年代,脑电采集频率在数百赫兹级别(典型的是 256Hz),对于识别 P300 等信号成分已经足够。Vidal 设计了一个类似星球大战的游戏,在其中将“爆炸”定义为期待事件,以此引发事件相关电位信号,实现了人脑对屏幕上不同目标的选择。目前,BCI 普遍采用的 P300-BCI 范式和 Vidal 设计的范式并没有显著的

差别,只是在一些方面有所改进而已。事件相关电位信号(特别是其中的 P300 信号成分)在 BCI 中的广泛使用,极大地推动了 BCI 的发展。

无论是皮层对刺激的慢响应信号还是事件相关电位,都是由外界感觉刺激诱发的,因此也称为诱发信号。当具有先验性的诱发信号出现时,就可以推断出人脑受到了何种外界刺激。Vidal 认为,这些诱发信号可以作为信息的载体,实现脑与计算机间的信息交流,如果实现了这一交流渠道,就可以利用这一信号实现对外部设备的控制。Vidal 还认为,BCI 的终极目标是将人类的归纳推理等智力活动和计算机的演绎、符号运算等能力结合起来,使计算机成为人脑的扩展和延伸。Vidal 并没有将 BCI 技术局限于残障人士的功能补偿,而是一开始就瞄准正常人认知能力的扩展和提升。

Vidal 认为,要实现 BCI 的最终发展目标,需要在三方面取得显著进展:①在神经生理学上,揭示认知决策和认知状态在信号层面上的相关性(这里的信号包括所有可采集的脑信号);②在信号处理技术上,实现从如 EEG 等多次污染/衰减的脑信号中提取脑认知状态相关信号(在今天看来这一条就显得局限了,由于 EEG 机理方面的限制,即使可以很好地净化 EEG 信号,EEG-BCI 也不可能有飞跃式的发展);③在计算机技术上,实现可以和脑进行信息交互的软件系统^[1]。

从 BCI 技术发展现状来看,计算机技术、信号处理都不是 BCI 真正的瓶颈,对脑结构功能的理解,特别是认知过程在神经电信号中的反映,以及全脑底层神经电活动的无损采集才是目前制约 BCI 发展的关键。

1.1.2 BCI 的分类

不同的 BCI 技术对脑皮层的损伤程度是不同的,根据损伤程度,可以将 BCI 分为有损 BCI(invasive BCI)和无损 BCI(noninvasive BCI)两大类。产生携带意图信息的大脑信号有两种基本方式:①由自发脑活动产生,如想象某种运动或者进行某种智力活动等;②由外部刺激产生,如通过视觉、听觉、触觉等形式的刺激,使大脑产生响应信号。据此可以把 BCI 分为自发型和诱发型两种类型。BCI 还可以从其他多个角度进行分类,例如,从通信协议上可以分为同步 BCI 和异步 BCI;根据是否含有反馈可以分为开环 BCI 和闭环 BCI;从大脑和 BCI 的互适应方式上可以分为模式识别方法和操作调节方法两种。另外,可以根据输出命令是离散信号还是连续信号,以及对训练量的需求大小进行分类等。下面重点从观测手段、使用的特征电位及独立性三方面进行较详细的讨论。

1. 有损 BCI 与无损 BCI

BCI 可以使用多种大脑信号观测手段:①植入电极的有损观测手段,例如,使用单根微电极(micro-electrode, ME)、MEA、ECoG 等,可以直接观测到神经元信