

Brain-Computer Interfaces

Principles and Practice

脑-机接口

原理与实践

[美] Jonathan R. Wolpaw Elizabeth Winter Wolpaw 著

伏云发 杨秋红 徐保磊 李永程 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

脑-机接口

——原理与实践

Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice

[美] Jonathan R. Wolpaw Elizabeth Winter Wolpaw 著

伏云发 杨秋红 徐保磊 李永程 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2014-218 号

图书在版编目（CIP）数据

脑-机接口：原理与实践/（美）乔纳森·R·沃尔帕乌，（美）伊丽莎白·温特·沃尔帕乌著；伏云发等译. —北京：国防工业出版社，2017.5

书名原文：Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice

ISBN 978-7-118-10161-4

I. ①脑… II. ①乔… ②伊… ③伏… III. ①脑科学—人-机系统—研究 IV. ①R338.2②R318.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 105106 号

Copyright ©2012. by Oxford University Press, Inc.

Brain-Computing Interfaces: Principles and Practice. First Edition was originally published in English in 2012. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 插页 23 印张 33¼ 字数 900 千字

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 199.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

译者序

本书是根据 Brain - computer Interfaces: Principles and Practice (2012 版) 翻译的。原书编者是美国纽约州卫生署沃兹沃思中心神经损伤与修复实验室主任乔纳森·R. 沃尔帕乌教授和纽约劳登维尔锡耶纳大学教授伊丽莎白·温特·沃尔帕乌, 他们汇聚并编辑国际著名脑 - 计算机接口 (简称脑 - 机接口) 研究者的原始创新, 从而造就了一部力作。

这是一本关于脑 - 机接口原理、方法和实践的专著。本书全面、系统、深入、具体地介绍了脑 - 机接口的基础、原理、实现方法和应用。全书非常重视脑 - 机接口的基础、原理和方法, 着重指出了脑 - 机接口最重要的问题、信号采集问题、验证和宣传问题、可靠性问题; 提出了脑 - 机接口六个重要的主题; 详细论述了脑 - 机接口的设计、实施和操作, 包括从大脑内和从大脑外采集脑信号、脑 - 机接口信号处理、特征提取和转化、脑 - 机接口硬件和软件、脑 - 机接口操作协议及脑 - 机接口应用。此外, 本书特别注重原理与实际应用的紧密结合, 在上述共性原理和方法的基础上, 深入研究了现有的七种脑 - 机接口的具体原理和实现方法, 分别是基于 P300 事件相关电位、基于感觉运动节律、基于稳态视觉诱发电位/慢变皮层电位、基于皮层脑电活动、利用运动皮质记录的信号、利用在顶区或运动前期皮层记录的信号、基于大脑代谢信号的脑 - 机接口, 这些具体实例便于读者更加深刻地理解和运用原理及方法。因此, 本书非常适合高年级本科生和研究生学习脑 - 机接口的基础、原理、实现方法并熟悉各种应用。同样, 本书对于工程师、研究人员以及技术管理人员学习脑 - 机接口的基础、原理和实现方法也具有重要的参考价值。

脑 - 机接口是一种变革性的人机交互, 是国际重大前沿研究热点, 是交叉跨学科的研究, 需要多学科研究者的协作。译者在从事脑 - 机交互融合控制的研究中感到, 脑 - 机接口系统的研发涉及方方面面的问题, 本书不失为一部全面、系统并深入论述的专业性著作。希望本书的出版能够给予从事相关研究的人员以启迪。

本书的完成首先要感谢国家自然科学基金委员会批准的国家自然科学基金面上项目 (81470084)、国家自然科学基金地区科学基金项目 (61463024)、云南省自然科学基金面上项目 (2013FB026)、云南省教育厅重点项目 (2013Z130)、云南省级人培项目 (KKS Y201303048) 的资助, 如果没有这些项目的资助, 就无法开展翻译工作。在本书立项翻译时, 得到了清华大学医学院生物医学工程系高小榕教授、北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室李小平教授、中国人民解放军国防科学技术大学机电工程与自动化学院自动控制系胡德文教授、中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室李洪谊研究员、昆明理工大学信息工程与自动化学院自动化系余正涛教授的推荐和大力支持, 译者深表感谢。

本书的翻译也得到了昆明理工大学的支持, 在翻译过程中, 昆明理工大学脑信息处理与脑 - 机交互融合控制学科方向团队研究生孙会文、刘传伟、张簪、张夏冰、郭衍龙、李松参与了本书的翻译和校正工作, 也得到了该团队施霖博士、苏磊博士、熊馨博士、杨俊博士生

的支持。同时，该书的翻译和出版也得到了云南省高校模式识别与智能计算重点实验室、昆明理工大学智能信息处理省创新团队老师的支持。

译者对原著印刷方面的错误，一经发现便予以纠正而不加说明。译文不妥之处在所难免，恳请读者指正。

译 者

2016 年 12 月

前 言

在过去的几十年里，从大脑记录的信号可以用来通信和控制，这种可能性已经流行并引起了科学兴趣。然而，只是在过去的 25 年开始了持续的研究，只是在过去的 15 年出现了一个可辨认的领域：脑-机接口（BCI）的研究和开发。目前，在这一新的领域全世界已有数百个研究组，并且新的研究组在不断出现。该领域的发展突飞猛进，其显而易见的事实是，所有以往出版的 BCI 研究论文中，大部分出现在过去的 5 年内。

对 BCI 领域科学兴趣和活动的这种激增源于三个因素的结合：

第一个也是最明显的因素是，最近出现的功能强大、廉价的计算机硬件和软件，它们能够支持对大脑活动复杂高速的分析，这是实时 BCI 操作必不可少的条件。直到最近，大部分用于当前和预期的 BCI 的快速在线信号处理，要么不可能，要么非常昂贵。现在，硬件和软件不再是限制因素：给定适当的专业知识，可以快速和廉价地实现几乎任何有前景的 BCI 设计。

第二个因素是，在过去的 50 年，从动物和人类的研究中，人类对中枢神经系统（CNS）有了更多的理解，特别是关于大脑信号的本质与功能性相关的大量新信息，例如，脑电活动和神经元动作电位。随着这种新的理解，记录这些信号的方法在短期和长期内得到改进。基本知识与技术进步的持续增加促进和稳步地指导更富有经验及富有成效的 BCI 研究。特别重要的是，在理解大脑无论是对正常生活或对创伤或疾病的反应方面具有非凡的适应能力，出现了名副其实的变革。与只在 20 年或 30 年前盛行的硬连接的 CNS 的概念相比，这个新的理解是一个惊人的变化。利用这些自适应能力，可能创建大脑与基于计算机的设备之间新颖的交互，这种可能性令人十分兴奋，交互作用可以替代、恢复、增强、补充或改善大脑与它的内部和外部环境的自然交互。

第三个因素是，对残障患者的需要和能力有了新的认识，他们因疾病而残疾，如脑瘫、脊髓损伤、脑中风、肌萎缩性脊髓侧索硬化症（ALS）、多发性硬化症、肌肉营养不良症。家用呼吸机和其他维持生命的技术，现在能够使最严重的残疾患者活很多年。此外，如果能够给有很少自愿肌肉控制的人即便最基本的通信和控制方式，他们也能够享受令人愉快的和富有成效的生活。脑-机接口在目前有限的发展状态下，可以服务这一需要。

BCI 研究和开发的独特性，超出其近年来非凡的发展，是它内在和必然的多学科性（跨学科性）。从用户大脑到 BCI 动作的操作顺序清晰地表明这个特点。脑-机接口所用大脑信号的适当选择，取决于人们对神经科学的理解，无论是基础和应用神经科学。正确记录这些信号取决于物理科学以及电气和材料工程，也取决于神经外科和组织生物学。记录信号的适当、有效、及时的处理需要计算机科学和应用数学。算法将信号特征翻译为实现用户意图的设备命令，该算法的设计和操作取决于系统工程以及对大脑功能自发（无意识/自然）和自适应变化的理解。适当用户群的选择与适当应用的实现需要临床神经病学和康复工程，并依靠辅助技术的专业知识。最后，用户与应用设备之间复杂持续的交互管理需要理解行为心理学和人类工程学。如果 BCI 研究和开发要实现它们的首要目标，即为严重残疾患者提供重要

的新的通信和控制选择，那么这些不同的学科之间的有效合作是至关重要的。

BCI 研究的多学科性质是本书的一个主要的动力，也是本书结构和内容的主要原则。本书提供 BCI 研究与开发基本上是所有主要方面的介绍和总结，并且旨在全面、均衡、协调地介绍该领域的关键原理、现行的方法（实践）和未来的前景。其读者对象是科学家、工程师和各级临床医师，本书设计可使在生物学、物理学和数学方面具有基本的本科水平背景的人容易接受。响应该领域固有的多学科性质，力图向来自许多不同相关学科的人介绍 BCI 研究的所有方面，从而使他们进行最有效的交互。现在已注意到要确保章节融合为一个合理的协调和逻辑的整体，而同时保留作者个人有时候不同的观点。

每一章尝试以说教的方式介绍它的主题，以便读者能够获得基本的知识，这是来自广泛学科并从事 BCI 研究的研究者和临床医生有效地开展工作所需要的基本知识。例如，信号处理章节（第 7 章和第 8 章）不仅评论已用于 BCI 的各种信号分析方法，也试图对应用于 BCI 的广泛的信号分析方法提供一个易理解的介绍，并概述了这些方法对于特定的 BCI 它们相对的优点和缺点。目的是使读者积极参与并从可替代的方法中进行选择。

这本书共有六篇。第 1 篇引言部分定义的 BCI 表明了本书的领域（范围），并确认了贯穿于本书的 6 个重要的主题。第 2 篇介绍了 BCI 使用的不同类型的电的和代谢的大脑信号；这些章节介绍了构成所有后续章节主题的许多基本原理。第 3 篇从信号采集到输出命令，依次介绍了构成 BCI 系统的每个组件（部分），并讨论了这些命令控制的应用。第 4 篇回顾了迄今为止开发的主要 BCI 类型，并介绍了目前的最新技术（现状）。第 5 篇解决对严重残疾患者有益的 BCI 系统所涉及的实现、验证和宣传问题（分发/正面宣传），这些困难任务的成功解决对 BCI 技术的未来是至关重要的。同时，也考虑了 BCI 应用的可能性超出到目前为止受到最多关注的辅助通信和控制应用，包括能够（可以）服务有或没有残疾的人的 BCI 应用。此外，讨论与 BCI 研究和开发相关的伦理问题。第 6 篇结论部分，如果 BCI 要实现许多人对它的高期望，介绍了必须解决的关键问题。

本书的每一章都是一个独特的章节和必不可少的部分，我们希望这些章节一起讲述一个连贯和令人兴奋的故事，因此整本书的作用甚至大于各个部分之和。

Jonathan R. Wolpaw
Elizabeth Winter Wolpaw
Albany, New York
September 2011

致 谢

脑-机接口的研究与开发是一项团队协作活动，正如本书的完成也是团队协作的结果。该书不是出自单独的一位作者。对于我们的目标：呈现一本对脑-机接口这一复杂的新领域有一个全面的思考或看法，各章节作者中每一个研究者的贡献都是必不可少的。这些作者来自各种各样的学术领域，他们以自己在BCI研究和开发若干重要领域的知识和对研究的责任汇集在这里。在本书中，他们与世界各地其他的研究人员及临床医生分享各自的专业知识和工作成果。一些作者自脑-机接口开始就一直从事这一研究，最近其他人也加入了这一行列，还有一部分人从事相关领域的工作。他们都慷慨地贡献，使本书成书成为可能。感谢所有这些人的这种慷慨奉献，也感谢他们在成书过程的许多步骤中体现的耐心。

感谢担任审阅的许多专家，他们代表着许多不同的学科和来自不同地方。他们卓见的评论和建议使本书各章内容变得更加完善。我们也感谢在沃兹沃思中心的同事给予的许多有益的意见和建议；特别感谢Chadwick Boulay、Peter Brunner、Natalie Dowell-Mesfin、Markus Neuper、Jeremy Hill和Stuart Lehrman的优良的技术咨询和援助。

神经肌肉疾病导致的残疾患者一直是BCI研发的主要动力。他们面对生活中困难挑战的勇气激励了我们所有的人。感谢他们给予的激励，尤其要感谢参加了这里报道的许多研究的人。他们是本书真正的合作伙伴。

全世界许多国家有很多机构，包括公共的和私人的，都支持脑-机接口的研究，该研究是一些章节的内容。没有他们的慷慨和热情支持，完成本书的编写几乎是不可能的。

最后，感谢牛津大学出版社负责本书的编辑。我们非常荣幸地认识并与神经科学、神经病学和精神病学的副主编Craig Allen Panner一起工作，他首先鼓励我们开展这个项目。衷心地感谢给了我们这个机会，也感谢他在整个过程中的明智指导和坚定耐心。感谢助理编辑Kathryn Winder，在完成这个项目时的热情和对细节的无过失关注。也感谢编辑制作Karen Kwak、Viswanath Prasanna、Elissa Schiff和牛津出版社制作团队将本书手稿打造成精美的作品。

BCI有特权与很多科研人员一起工作，感谢能有这样一个机会。希望本书可以为从事或以其他任何方式涉及BCI研究和开发的人提供宝贵的基础、框架和资源。

目 录

第 1 篇 绪论

第 1 章 脑-机接口：阳光下的新事物	2
1.1 脑-机接口简介	3
1.2 脑-机接口术语	4
1.2.1 脑-机接口术语的起源和目前的定义	4
1.2.2 与脑-机接口同义或附属的术语	5
1.2.3 与脑-机接口相关的神经技术	6
1.3 脑-机接口 6 个重要的主题	6
1.3.1 脑-机接口创建了本质上不同于自然输出的新的中枢神经系统输出	6
1.3.2 脑-机接口操作取决于两个自适应控制器的交互	8
1.3.3 选择信号类型和大脑区域	8
1.3.4 识别并避免伪迹	9
1.3.5 脑-机接口输出命令：目标选择或过程控制	10
1.3.6 有效性验证和宣传：有效的脑-机接口应用	11
1.4 小结	12
参考文献	12

第 2 篇 用于脑-机接口的脑信号

第 2 章 在运动皮层和相关脑区的神经元活动	16
2.1 引言	16
2.2 大脑解剖综述	17
2.2.1 中枢神经系统方向的术语	19
2.2.2 大脑皮层结构	19
2.2.3 大脑新皮质的 6 层结构	21
2.2.4 皮层下区域	22
2.2.5 皮层传出神经投射	22
2.3 大脑皮层的运动和感觉区域	23
2.4 大脑皮层区域和运动控制	27
2.4.1 时间维度：规划与控制	28
2.4.2 编码维度：抽象与具体的编码	30
2.4.3 复杂性维度：复杂与简单的运动	34
2.4.4 源维度：外部与内部运动引发	35
2.4.5 有视觉引导的抵达-抓握行为	36
2.4.6 运动控制的躯体感觉反馈	37

2.5	皮质下脑区	39
2.5.1	丘脑	39
2.5.2	脑干	39
2.5.3	基底神经节	40
2.6	小脑	40
2.6.1	位置、组织和连接	40
2.6.2	小脑功能	41
2.7	动作电位(尖峰脉冲峰值)中的信息	42
2.7.1	放电率-编码假设	42
2.7.2	时间-编码假说	43
2.8	尖峰脉冲峰值记录和处理	43
2.8.1	微电极	43
2.8.2	降噪和电极信号调理	45
2.8.3	动作/峰值电位分类	46
2.9	小结	46
	参考文献	47
第3章	脑产生的电磁场	57
3.1	引言	57
3.2	电路中的电流和电位	59
3.2.1	电路中的欧姆定理	59
3.2.2	电流源与电压源之间的等效	59
3.2.3	电路中的阻抗	61
3.2.4	电路中的线性叠加	61
3.3	组织容积导电的电流和电位	62
3.3.1	容积导电的欧姆定理	62
3.3.2	头部电流分布	63
3.3.3	容积导电的头模型	64
3.4	颅骨内电位记录	65
3.4.1	不同尺度下的电位	65
3.4.2	单极电流源	66
3.4.3	偶极电流源	67
3.4.4	动作电位源	68
3.4.5	局部场电势	68
3.4.6	皮层脑电位	68
3.4.7	颅骨内记录	69
3.4.8	空间分辨率比较	69
3.5	多尺度下的脑源	69
3.5.1	在大脑皮层脑回产生脑电	69
3.5.2	皮质源的多尺度	70
3.5.3	细观源强度为单位容积偶极矩	71

3.6	头皮记录的电位	72
3.6.1	所有头皮记录是双极性	72
3.6.2	参考电极	73
3.7	脑电的正向和逆向问题	73
3.7.1	正向问题	73
3.7.2	逆向问题	75
3.8	定量和高分辨率的脑电	75
3.8.1	脑电的数学变换	75
3.8.2	傅里叶变换	76
3.8.3	脑电相位同步和相干	76
3.8.4	瞬态和稳态诱发电位	77
3.8.5	高分辨率脑电	77
3.9	大脑磁场	78
3.10	容积传导和源动力学	79
3.11	小结	80
	参考文献	81
第4章	反映脑代谢活动的信号	83
4.1	引言	83
4.2	功能神经成像学概述	83
4.2.1	分辨率	83
4.2.2	血流成像技术	84
4.2.3	大脑活动的血流响应	85
4.3	四种主要的代谢神经成像方法	86
4.3.1	功能经颅多普勒	86
4.3.2	正电子发射断层扫描	87
4.3.3	功能近红外光谱技术	88
4.3.4	功能磁共振成像	91
4.4	代谢神经成像的任务设计	95
4.5	功能近红外光谱和功能磁共振成像应用于脑-机接口	96
4.5.1	基于功能近红外光谱的脑-机接口	96
4.5.2	基于功能磁共振成像的脑-机接口	97
4.6	未来发展前景	97
4.7	小结	98
	参考文献	98

第3篇 脑-机接口的设计、实施和操作

第5章	从大脑内采集脑信号	102
5.1	引言	102
5.2	用于脑-机接口的植入微电极概述	103
5.2.1	微电极阵列的一般特性	103

5.2.2	微丝阵列	105
5.2.3	亲神经（锥形）电极	105
5.2.4	基于 MEMS 的微电极	106
5.3	长期植入微电极神经记录的基本概念	108
5.3.1	微电极如何记录信号	108
5.3.2	长期神经记录中神经信号保真度的影响因素	110
5.3.3	在长期记录中引入噪声的因素	111
5.4	皮层内微电极阵列长期记录的性能	112
5.4.1	信号质量	112
5.4.2	阵列增益	113
5.4.3	信号稳定性	113
5.4.4	记录寿命	113
5.4.5	整体性能	114
5.5	脑组织对皮质内微电极阵列的响应	114
5.5.1	植入式微电极阵列周围的微观环境	114
5.5.2	与微电极植入相关的局部组织损伤	115
5.5.3	慢性脑组织反应	116
5.5.4	组织响应随时间变化的评估	118
5.5.5	组织反应对微电极性能的评估	119
5.5.6	其他重要问题	119
5.5.7	解决因组织反应而引起信号质量退化的方法	120
5.6	开发下一代皮层内脑-机接口的策略	121
5.7	未来展望	123
5.8	小结	124
	参考文献	124
第6章	从大脑外采集脑信号	133
6.1	引言	133
6.2	脑电记录	133
6.2.1	脑电电极	133
6.2.2	脑电记录的双极性	135
6.2.3	脑电电极布局	135
6.2.4	采样频率	137
6.2.5	避免、识别和消除非脑信号（伪迹）	137
6.3	脑磁记录	138
6.4	脑电与脑磁在灵敏度和空间分辨率方面的比较	139
6.5	脑电参考电极选择	141
6.5.1	参考电极位置选择	141
6.5.2	参考电极测试	143
6.5.3	间隔紧密的电极	143
6.5.4	耳垂相连参考和乳突相连参考	145

6.5.5	共同平均参考	145
6.5.6	基于模型的参考	147
6.5.7	平均参考和参考电极标准化技术比较	148
6.5.8	参考电极策略小结	148
6.6	脑电的空间采样	148
6.7	高分辨率脑电方法——表面拉普拉斯法	151
6.8	小结	152
	参考文献	152
第7章	脑-机接口信号处理：特征提取	155
7.1	引言	155
7.2	信号处理原理	157
7.2.1	模/数转换	157
7.2.2	傅里叶分析	159
7.2.3	数字滤波	160
7.3	特征提取的三个步骤	162
7.3.1	信号调理	163
7.3.2	提取特征	168
7.3.3	特征调理	174
7.4	从尖峰序列提取特征	175
7.4.1	尖峰序列的结构	176
7.4.2	从尖峰时间提取特征	177
7.5	小结	182
	参考文献	183
第8章	脑-机接口信号处理：特征转换	185
8.1	引言	185
8.2	选择模型	186
8.2.1	一般原则	187
8.2.2	常用模型	190
8.3	为模型选择特征	195
8.4	参数化模型	196
8.5	评估转换算法	198
8.5.1	测量性能	198
8.5.2	黄金标准：在线评估	201
8.5.3	脑-机接口研究的重要部分：离线评估	202
8.5.4	评估转换算法的特定方面	203
8.5.5	数据竞赛	205
8.6	小结	205
	参考文献	206
第9章	脑-机接口的硬件和软件	209
9.1	引言	209

9.2	硬件	210
9.2.1	传感器	210
9.2.2	放大器	215
9.2.3	模/数转换	217
9.2.4	伪迹	220
9.2.5	硬件接口	220
9.2.6	客户机硬件	222
9.2.7	未来方向	223
9.3	软件	223
9.3.1	脑-机接口实现的组件	223
9.3.2	研发脑-机接口软件的设计原则	224
9.3.3	通用脑-机接口研究软件概述	225
9.4	评估脑-机接口硬件和软件	227
9.4.1	典型脑-机接口系统的时序特性	227
9.4.2	代表性结果	230
9.5	小结	233
	参考文献	234
第10章	脑-机接口操作协议	239
10.1	引言	239
10.2	脑-机接口操作协议的关键要素	239
10.2.1	脑-机接口操作的启动	239
10.2.2	参数化的特征提取和转换过程	241
10.2.3	脑-机接口的应用协议	242
10.2.4	处理转换误差	243
10.3	用户训练和系统测试操作协议	244
10.4	小结	245
	参考文献	246
第11章	脑-机接口应用	248
11.1	引言	248
11.2	脑-机接口应用于辅助技术及其潜在的用户	248
11.2.1	脑-机接口用于辅助技术	248
11.2.2	脑-机接口操作辅助技术的潜在用户	250
11.2.3	面向用户方法的重要性	252
11.2.4	无意激活的代价	254
11.3	控制方案:脑-机接口与应用相匹配	255
11.3.1	脑-机接口的命令到应用:目标选择和过程控制	255
11.3.2	脑-机接口的指令转换为应用的动作:直接与间接	256
11.3.3	应用操作:离散/连续	257
11.4	脑-机接口在辅助技术中当前和潜在的应用	257
11.4.1	用户角度:脑-机接口应用能够提供的功能	258

11.4.2	技术开发者角度: 脑-机接口能够控制的辅助技术应用类型	259
11.5	为脑-机接口控制选择辅助技术应用	262
11.5.1	辅助技术专业人员的参与	262
11.5.2	目标用户的参与	262
11.6	脑-机接口+辅助技术系统与独立的脑-机接口/辅助技术系统	263
11.6.1	脑-机接口+辅助技术系统	263
11.6.2	独立的脑-机接口/辅助技术系统	264
11.7	最优化的脑-机接口控制的辅助技术性能	265
11.8	小结	265
	参考文献	266

第4篇 现有的脑-机接口

第12章	利用 P300 事件相关电位的脑-机接口	272
12.1	引言	272
12.2	P300 事件相关电位和基于 P300 的脑-机接口	272
12.3	新奇刺激范式	273
12.4	P300 的起源和功能	275
12.5	P300 的波幅和稳定性	275
12.6	基于 P300 的脑-机接口	276
12.6.1	最初基于 P300 脑-机接口的研究	276
12.6.2	随后基于 P300 脑-机接口研究的目标和局限性	278
12.6.3	可选的电极组合	278
12.6.4	可选的信号处理方法	279
12.6.5	可选的刺激和刺激呈现参数	280
12.6.6	基于 P300 的脑-机接口性能中注视方向的可能作用	281
12.6.7	基于 P300 的脑-机接口利用听觉刺激	282
12.6.8	基于 P300 的脑-机接口性能提高的前景	282
12.6.9	基于 P300 脑-机接口的独立家庭使用	283
12.7	小结	284
	参考文献	284
第13章	利用感觉运动节律的脑-机接口	291
13.1	引言	291
13.2	感觉运动节律	291
13.3	感觉运动行为期间的感觉运动节律	292
13.4	运动想象期间的感觉运动节律	294
13.5	分析感觉运动皮层活动	294
13.5.1	频率分析	294
13.5.2	空间分析	295
13.6	分析不同通道之间的关系	296
13.7	把感觉运动节律活动转化为设备控制	296

13.8	在线和离线分析	296
13.9	伪迹	297
13.10	脑-机接口利用感觉运动节律	299
13.11	光标一维或多维运动	299
13.12	通信应用	301
13.13	控制应用	301
13.14	异步脑-机接口	302
13.15	基于感觉运动节律脑-机接口的潜在用户	303
13.16	未来方向	304
13.17	小结	304
	参考文献	305
第14章	利用稳态视觉诱发电位或慢变皮层电位的脑-机接口 (BCI)	312
14.1	引言	312
14.2	稳态视觉诱发电位和基于稳态视觉诱发电位的脑-机接口	312
14.2.1	稳态视觉诱发电位和相关范式	312
14.2.2	早期类似稳态视觉诱发的脑-机接口	314
14.2.3	最近基于稳态视觉诱发电位脑-机接口的设计	315
14.2.4	基于稳态视觉诱发电位脑-机接口的重要问题	316
14.2.5	基于稳态视觉诱发电位脑-机接口未来的研究方向	316
14.3	慢变皮层电位和基于慢变皮层电位的脑-机接口	317
14.3.1	慢变皮层电位	317
14.3.2	基于慢变皮层电位的脑-机接口	318
14.3.3	基于慢变皮层电位脑-机接口未来可能的用途	319
14.4	小结	320
	参考文献	320
第15章	利用皮层脑电 (ECoG) 活动的脑-机接口 (BCI)	325
15.1	引言	325
15.2	皮层脑电探测的电生理特征	328
15.3	目前基于皮层脑电的脑-机接口	331
15.3.1	皮层脑电信号的采集	332
15.3.2	基于皮层脑电的脑-机接口协议设计	332
15.3.3	基于皮层脑电的脑-机接口控制	333
15.4	局限性	335
15.5	有待进一步研究的重要问题和领域	336
15.6	小结	338
	参考文献	339
第16章	利用在运动皮层记录信号的脑-机接口 (BCI)	346
16.1	引言	346
16.2	皮层内脑-机接口系统 (iBCI) 的研发目标	347
16.3	从小规模神经元群获得复杂控制	347

16.4	对瘫痪患者功能恢复有用的动作	347
16.5	皮层内脑-机接口与皮层外脑-机接口相比的可能优势	348
16.5.1	安全性	348
16.5.2	可靠性	349
16.6	皮层内脑-机接口可利用的信号和记录它们的传感器	349
16.6.1	皮层内脑-机接口的关键特征	349
16.6.2	皮层内脑-机接口记录的信号	351
16.7	皮层内脑-机接口传感器的类型	355
16.7.1	多电极阵列(或平台阵列或犹他阵列)	356
16.7.2	多位点电极(又称柄电极或密歇根电极)	357
16.7.3	微丝(线)阵列	357
16.7.4	锥形电极(或神经营养电极)	357
16.8	皮层内脑-机接口研究	357
16.8.1	选择要植入的皮层区	357
16.8.2	迄今为止对非人类和人类灵长类动物的皮层内脑-机接口研究	358
16.8.3	对体格健全猴子的皮层内脑-机接口研究	358
16.8.4	对瘫痪猴子的皮层内脑-机接口研究	359
16.8.5	对瘫痪患者的皮层内脑-机接口研究	359
16.9	皮层内脑-机接口的长期性能	360
16.10	长期记录问题及影响记录稳定性的因素	363
16.10.1	长期记录问题	363
16.10.2	影响记录稳定性的因素	363
16.11	解码皮层内脑-机接口记录的神经元尖峰脉冲	365
16.11.1	开环和闭环解码	367
16.11.2	连续和离散解码	367
16.12	皮层内脑-机接口的通信和控制应用	368
16.13	皮层内脑-机接口的用户群	369
16.14	为实现皮层内脑-机接口实用于长期的人类使用所需要的进展	370
16.14.1	完全可植入的、安全和生物相容的系统	370
16.14.2	易用性(容易使用)	371
16.14.3	信号的稳定性和算法的自适应性	372
16.14.4	增强的感觉反馈	372
16.15	皮层内脑-机接口的其他潜在应用	372
16.16	小结	373
	参考文献	374
第17章	利用在顶区或运动前区皮层记录信号的脑-机接口(BCI)	380
17.1	引言	380
17.2	解剖学结构	380
17.3	动作规划	381
17.3.1	眼动和到达	381