

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.001

基于视听交互刺激的认知机理与 脑机接口范式研究进展^{*}

安兴伟^{1,2} 曹 勇³ 焦学军³ 明 东^{1,2}(1. 天津大学生物医学工程系 天津 300072; 2. 天津大学医学工程与转化医学研究院 天津 300072;
3. 中国航天员科研训练中心 北京 100092)

摘要:与人类视听觉感知密切相关的图像、语音和文本(语言)信息在社会经济发展与国家安全保障等领域中扮演着重要角色,脑机接口(BCI)是无需外围神经肌肉便可操控外部设备、使“思想”直接变成“行动”的创新技术,基于视、听觉刺激的BCI系统具有极其广阔应用前景。目前认知心理学研究普遍认为视听交互刺激模式可产生比视或听单模态刺激更强的事件相关电位信号,因而可使识别大脑思维模式的正确率更高和响应速度更快,然而BCI研究至今尚难有充分验证其优势的成果。分别从认知心理机制和BCI实验范式两方面综述了视听交互刺激的信息整合机制、视听刺激之间的协同与竞争关系、匹配度对刺激效果的影响及相关BCI实验范式的研究现状;深入分析了视听交互刺激范式未在现有BCI系统中体现其优越性的原因;最后从BCI实验范式选择、系统硬件性能改进、脑电信号处理等方面提出了改进思路并展望了基于视听交互刺激BCI范式研究未来动向。

关键词:视听交互刺激;认知心理机制;脑机接口范式

中图分类号: R318 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 310.61

Research on cognitive mechanism and brain-computer interface application in visual-auditory crossmodal stimuli

An Xingwei^{1,2} Cao Yong³ Jiao Xuejun³ Ming Dong^{1,2}(1. Department of Biomedical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100092, China)

Abstract: The information of image, voice, and text (language), which is closely related to the human perception of visual and auditory, plays an important role in socioeconomic development and country security assurance. Brain-computer interface (BCI) is an innovative technology that directly controls peripheral equipment and makes ‘thought’ into ‘action’ with non-muscular methods. Visual and auditory stimuli based BCI system has extremely broad application prospects. It is commonly believed that brain has stronger event-related potential, higher reaction accuracy and faster reaction speed on visual-auditory crossmodal stimuli (VACS) than single modal stimuli (visual or auditory) in current cognitive psychology researches, while BCI researches have difficulty on the verification of the VACS superiority. In this paper, the VACS researches in cognitive psychology and BCI paradigms were reviewed respectively, which included the information integration mechanism of VACS, the facilitation and competition relationship between visual stimuli and auditory stimuli in VACS system, the influence of congruence and the research status of VACS based BCI paradigms. Also, the reasons for not showing the superiority of VACS in BCI system were discussed. Then, the countermeasure of defusing the difficulties were presented from aspects of the selection of BCI paradigms, the performance improvement of system hardware, the signal processing of electroencephalography (EEG) and so on. In the end, the future trends of VACS based BCI research were presented.

Keywords: visual-auditory crossmodal stimuli (VACS); cognitive psychology mechanism; brain-computer interface (BCI) paradigm

1 引言

伴随世界各科研强国纷纷吹响探索人类大脑奥秘号角,我国亦提出了以探索大脑思维机理、攻克中枢神经难症为主要科学目标和以发展新一代类脑人工智能机器为关键技术开发应用的“中国脑计划”。脑机接口(brain-computer interface, BCI)是其中重要内容之一。BCI是一种无需通过外围神经肌肉产生肢体动作便可操控电脑或开动机器、实现人与外部信息交互、使“思想”直接变成“行动”的新技术^[1-3]。在目前BCI研究和应用中,人们普遍认为基于事件相关电位(event related potential, ERP)的BCI系统(ERP-BCI)较为高效和稳定^[4]。借助ERP-BCI,用户可以通过对视觉、听觉等刺激的选择性注意来实现目标字符或工作任务的选择。而与人类视听感知密切相关的图像、语音和文本(语言)信息在社会经济发展和国家安全保障等领域中扮演着重要角色,故基于视、听觉刺激的BCI系统具有极其广阔的应用前景。但现有针对视、听觉信息的ERP-BCI多仅使用视觉或听觉单一模态信息^[5-6],少见视听觉交互刺激范式应用和视听觉认知心理机制与信息融合模式的研究^[7-9],使其脑机信息交互处理能力及效率远不能满足应用需求。国家自然科学基金委员会为此特设立“视听觉信息的认知计算”重大研究计划,指出要以多模态感知信息的认知机理、计算模型及与之相对应的脑机接口为重要研究内容,以解决视听觉信息计算和与视听觉认知相关的脑机接口等关键技术方面取得重大突破为主要科学目标。重大计划要求从人类的视听觉认知机理出发,研究与视听觉认知相关的脑信号提取、脑区定位与脑功能网络分析方法和技术,脑-机交互中的信号传输、处理与控制技术,与视听觉认知相关的脑机接口典型应用。

从视听相关认知心理学基本知识可了解到:在各种感官获取知识的比率中,视听觉所占份量最多(视觉占83%、听觉占11%);在信息传播方式与记忆持久性方面,视听觉性能最好(3 h后记忆保留比例:视觉70%、听觉60%、视听结合90%;3 d后比例:视觉15%、听觉40%、视听结合75%);由此可见视听觉是人类获得信息的主要感觉通道,且视听交互结合模式应优于单个感知模式。

目前认知心理学的研究通常着重于大脑对视觉与(或)听觉的响应过程与强度,其研究发现大脑对“视觉+听觉”交互刺激比单模态刺激(视觉或听觉)具有更强的响应特性^[10-11],且视觉刺激反应要大于听觉。

BCI通常着重于研究与应用大脑对特定刺激模式的思维意念反应。与视、听觉刺激相关的BCI研究大多基

于视听觉事件相关电位诱发模式构成ERP-BCI。与认知心理学的研究不同,基于ERP-BCI的研究迄今很少观察到视觉相关的双模态刺激与单独视觉刺激的反应有显著性差异^[12],其中所诱发产生的ERP模式差别也并不明显,相对于视、听单模态的刺激范式,视听双模态刺激的BCI系统并没有体现出显著优越性^[13]。上述研究现状进而说明,人的认知过程非常复杂,由人的感觉、知觉、记忆、思维和想象等认知要素组成;既含各感官对感觉信息的加工处理,又有人对客观事物的知觉心理活动,并伴随人的注意心理引发记忆、思维和想象等变化;故大脑对多模态交互刺激信息的感知与认知可能存在不同感官信息通道间的注意力竞争效应、交叉干扰作用和信息整合机制,最终形成主辅分工的协同补偿认知效果。为此,须针对多模态交互刺激的信息整合机制建立合理的假设模型,分析不同感官信息通道间的协同与竞争关系,考虑多模态联合刺激信息空间、时间匹配度对认知的影响;并依此设计优化脑机接口范式以达到最佳脑机信息交互处理效率。

本文将从视听交互刺激的认知心理机制与脑机接口实验范式两个方面评述其研究进展,以期查找现有视听双模态BCI系统未能发挥视听交互刺激优势的原因,最后归纳相关研究难点、提出改进思路并预测未来发展方向。

2 视听交互刺激的认知心理机制研究

视觉和听觉所诱发的大脑思维活动属于人类高级认知功能,大脑通过整合调控来自视听觉的信息对意识和行为进行判断。目前,视、听单一感觉通道的大脑认知研究已经取得大量有价值的成果。然而,对于视听跨感觉通道大脑认知机理及信息处理方法的研究仍存在一些关键问题有待解决。

视听交互刺激是对大脑同一或不同感觉通道同时或依次施加视觉刺激与听觉刺激,实验通常采用Oddball模式(也是认知心理学研究和脑机接口系统常用的实验范式)。Oddball实验中对被试者同一感觉通道施加两种(或多种)刺激,其中一种刺激出现概率较低(10%~30%),另一种(或其余)刺激出现概率较大(70%~90%);要求被试关注小概率刺激(即靶刺激)并作出认知反应,其余刺激为非靶刺激^[1,14]。

认知心理学研究中视听交互刺激常用的视觉刺激为视觉发音图片(唇读图片)、视觉光照射刺激、不同颜色图形或图片等。而听觉刺激则通常利用不同频率、不同方位的语音信号等。视听交互刺激将视觉刺激与听觉刺激相结合,形成视听靶刺激组和非靶刺激组。例如采用4种图形(视觉)与语音(听觉)的组合方式可以是1)图形

“圆”和语音“圆”;2)图形“圆”和语音“线”;3)图形“线”和语音“圆”;4)图形“线”和语音“线”。图形与语音一致刺激为靶刺激组,出现概率占20%;图形与语音不一致刺激为非靶刺激组,出现概率占80%^[15-16]。

2.1 视听交互刺激的信息整合机制研究

近年来,认知心理学主要通过对视觉图片(唇读图片等)与听觉语音的联合刺激来研究大脑对语言感知过程中视听交互刺激的信息整合机制^[17-21]。所用技术主要包括功能磁共振成像技术(functional magnetic resonance imaging,fMRI)、脑磁图(magnetoencephalogram,MEG)、ERP等。

研究发现同时实施视听交互刺激较单一通道刺激对特定感觉皮层具有更高的激活强度^[18-20],表明大脑皮层存在各种跨通道、多感觉集中的感知功能区,这些脑区内的神经细胞可以接收来自多个感觉通道的信息,并且按照一定原则进行信息整合。目前有多种关于视听交互

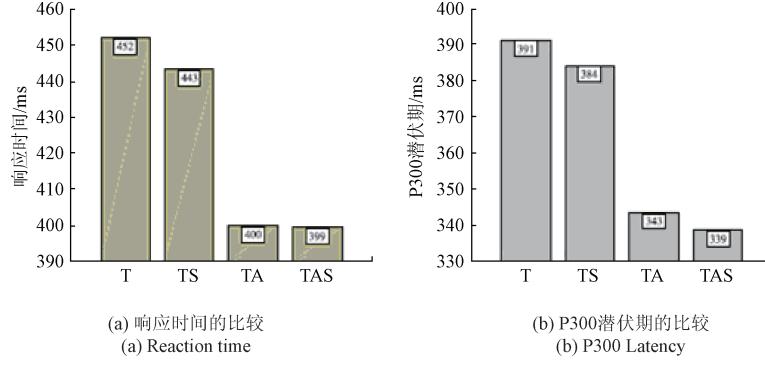


图1 神经认知心理研究中多模态ERP与单模态ERP的比较

Fig. 1 Comparison between multimodal ERP and single modal ERP in cognitive neuropsychology field

同样,Chen等人^[25]和Van der Burg等人^[26]的研究也分别报告相关甚至无关的听觉刺激加入均可以增加大脑对视觉目标刺激的感知。另外,Odgaard等^[27]研究则发现视觉刺激的加入也有助于大脑对听觉白噪音的感知。

值得注意的是上述研究中视觉刺激与听觉刺激通常不存在预定的相关性,皆在一种刺激(通常是视觉刺激)为主任务的情况下加入另一种辅助刺激(听觉刺激)所观察到视听交互刺激对视觉目标选择的影响,均证实视听觉双模态之间存在着互相促进的协同机制并取得主辅分工的协同补偿认知效果。

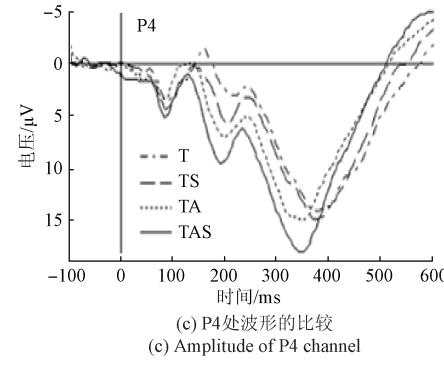
2.2 视听交互刺激间的协同关系研究

当视听觉信息编码不同,且需要同时注意双模态的不同刺激时,两个模态信息将存在明显的竞争关系。1976年McGurk等人^[28]研究发现,当被试看到视觉刺激所给出发音嘴型和听觉刺激配音不匹配时,被试会受视觉刺激影响而对声音刺激产生错误感知。他们的研究结

果发表于《Nature》,提出了McGurk效应。后续进一步研究表明,当分别以不同编码信息的视觉或者听觉刺激作为目标刺激,同时加入不一致的听觉或视觉干扰刺激,则会在一定程度上影响被试的大脑响应^[29]。

2.3 视听交互刺激间的竞争关系研究

2005年Stefanics等人^[10]研究了在视觉目标选择任务中分别加入听觉、体感和听-体多模态刺激时的感知效果,发现视听交互刺激比单独视觉刺激和视-体觉双模态刺激具有更好的诱发效果(图1),不仅响应时间快(图1(a))、靶刺激感知ERP信号潜伏期短(图1(b))且ERP特征波形幅值差异大(图1(c)),即视听交互刺激具有更快的反应速度和更高的反应精度^[22-24]。分析其原因在于视听交互刺激间存在某种协同合作机制。



果发表于《Nature》,提出了McGurk效应。后续进一步研究表明,当分别以不同编码信息的视觉或者听觉刺激作为目标刺激,同时加入不一致的听觉或视觉干扰刺激,则会在一定程度上影响被试的大脑响应^[29]。

目前研究多发现受试者对视觉刺激的反应要强于对听觉刺激的反应,从而凸显了视听觉竞争机制中视觉的优势作用^[30-31]。当然亦有研究指出在特定的实验范式设计下听觉也会占主导地位,从而大大影响被试对于视觉信息的获取和分辨^[32-33]。2011年,葛小立等人介绍了部分视觉和听觉分别占主导地位的研究^[34]。

对于这种单一模态刺激主导机制的解释有不同的假说。Welch等人^[35]认为主导地位的确立主要与感觉通道的敏感度相关,敏感度较强的感觉通道容易在双模态刺激竞争的过程中占据主导地位。而从大脑资源分配的角度来看,Kahneman等人^[36]认为视觉注意在本质上是一种资源分配机制,是一个在多种因素制约下产生的资源分配方案,对人类有限的信息处理能力进行分配。因此,

当第二种模态的刺激加入时,大脑资源将会再分配,若两个模态之间的刺激不一致且容易造成干扰时,将会导致双模态信息之间的竞争。

2.4 匹配度对视听交互刺激的影响

在语言认知过程中视听交互刺激的空间匹配度、语义匹配度及时间匹配度均会对大脑的信息处理响应产生一定的影响^[37]。

Gondan 等人^[38]在 2005 年利用 ERP 技术研究发现不同空间匹配度的视听交互刺激所诱发 ERP 信号在刺激产生后 150 ~ 180 ms 会出现显著性差异。Teder-sälejärvil 等人^[39]利用左右放置的发光二极管与相同位置的声音刺激作为视听交互刺激,研究了视、听觉呈现的刺激空间位置匹配度不同时的大脑反应。结果发现,大脑在处理视听觉信息时部分脑区对视听觉信息的整合与其空间的匹配度相关。

近年来,国内外研究发现视觉与听觉刺激的语义匹配与否对 ERP 各成分的幅值、潜伏期及头皮分布会产生影响^[40-41]。2010 年 Andres 等人^[22]研究了听觉发音和视觉字母的一致性对大脑语言处理过程中所产生的 ERP 信号的影响,发现匹配的视听觉刺激会产生较大幅值的失匹配负波 (mismatch negative wave, MMN)。2014 年 Guo 等人^[40]利用两种视觉刺激与两种听觉刺激研究了视听刺激匹配与失配对听觉认知的影响,发

现大脑在早期注意过程中就已经产生了视听觉信息的整合过程,并延续到后期的注意认知过程当中;匹配的视听刺激对听觉认知有促进作用,而失配的视听刺激则抑制听觉的认知。

对于视、听呈现时间匹配度,Conrey 的研究认为只要视觉刺激和听觉刺激的视听呈现时间匹配度在一定范围内,被试会认为视听觉刺激是同时呈现,从而产生视听整合效应。而大部分研究则认为在大脑处理言语加工的过程中视听交互刺激之间的整合过程受时间匹配度的影响较大,部分脑区(颞上沟和颞平面等)只有在视听交互刺激同步呈现时才会响应^[19,41]。

归纳上述视听交互刺激的认知心理机制研究进展可得以下要点:大脑对视听交互刺激信息的感知与认知确实存在视听感官信息通道间的注意力竞争效应、交叉干扰作用和信息整合机制,从而产生不同的主辅分工与协同补偿认知效果。建立符合视听交互刺激信息整合机制模型,分析不同视听信息通道间的协同与竞争关系,调整好视听交互刺激信息的空间、时间匹配度对改善视听交互刺激的感知效果、提高受试者对视听交互刺激的认知准确度和脑机信息交流效率均有重要作用,也是相应的脑机接口实验范式设计主要依据和获得实际应用的基本前提。表 1 所示列出了视听交互刺激认知心理机制研究分析结果。

表 1 视听交互刺激认知心理机制研究分析

Table 1 Research on cognitive psychology mechanism of visual-auditory crossmodal stimuli

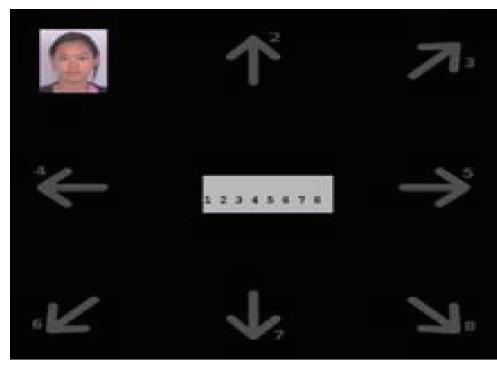
实验范式与检测技术	认知心理机制	机制要点			小结
		1)	2)	3)	
实验范式: 视听觉刺激相结合,形成 视听靶刺激组和非靶刺 激组 视觉刺激:视觉发音图片 (唇读图片)、视觉光 照刺激、不同颜色图形或图 片等 听觉刺激:不同频率、空 间方位语音信号等; 采用视觉图形与听觉语 音组合方式 视觉与听觉刺激通常无 预定相关性,皆在一种刺 激(通常是视觉)为主 务下加入另一辅助刺激 (听觉),观察视听刺激 对视觉目标选择影响 检测技术:ERP、MEG、 fMRI 等	视听交互整合 视听交互协同 视听交互竞争	脑区活动受专 属作用功能区 域支配,不同脑 区之间有相互 整合作用联系 视听协同刺激 比视觉刺激诱 发效果更好,响 应时间快、靶刺 激 ERP 信号潜 伏期短且特征 波幅高 视听觉信息编 码不同,需同时 注意双模态不 同刺激,两模态 信息存在明显 的竞争关系	视听单模态刺 激对应脑区附 近存在视听交 互整合作用关 联区域 因视听刺激间 存在协同合作 机制,视听协同 刺激有更快反 应速度和更高 反应精度 视觉注意本质 是资源分配机 制,视觉反应要 强于听觉,凸显 视觉优势作用	存在整合作用 关联区与视听 单通道作用区 构成反馈回路。 视听觉之间存 在互相促进的 协同机制并取 得视主听辅分 工的协同补偿 认知效果。 主导地位确立 与感觉通道敏 感度相关,敏感 度较强通道容 易在双模竞争 中占主导地位。	1) 视听交互刺 激的空间、语义 和时间匹配度 均会影响大脑 信息处理响应 2) 匹配的视听 觉刺激会产生 较大幅值特征 波信号 3) 匹配视听刺 激对听觉认知 有促进作用,而 失配视听刺激 则抑制听觉认 知。 1) 大脑对视听 交互刺激信息感 知与认知确实存 在视听感官信息 通道间的注意竞 争效应、交叉干 扰作用和信息整 合机制,并产生 不同的主辅分工 与协同补偿认 知效果 2) 建立视听交 互整合机制模 型,分析协同与 竞争关系,调整 好视听刺激的空 间、时间匹 配度对改善感 知效果、提高认 知准确度和信 息交流效率均 有重要作用,也 是脑机接口 实验范式设计 主要依据

3 基于视听交互刺激的 BCI 范式研究进展

早期 BCI 实验范式通常仅采用单一感觉刺激模态,如基于视觉的矩阵拼写范式^[42]和中心拼写范式^[43]、基于听觉的矩阵拼写范式^[44]和空间拼写范式^[45]及基于听觉的伪空间拼写范式^[46]等。后期才逐步发展有基于视听觉交互刺激协同关系、竞争关系等视听交互联合刺激 BCI 范式的研究。

3.1 基于视听交互刺激协同关系的 BCI 范式

目前国内外已开展了多项视听交互联合刺激范式的研究^[11,47-49]。图 2 所示为常见的几种视听交互刺激 BCI 范式。



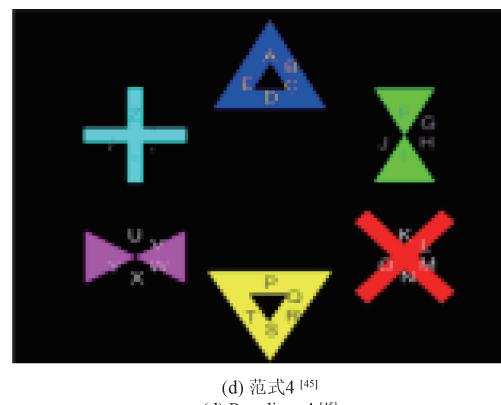
(a) 范式 1^[43]
(a) Paradigm 1^[43]



(b) 范式 2^[44]
(b) Paradigm 2^[44]



(c) 范式 3^[11]
(c) Paradigm 3^[11]



(d) 范式 4^[45]
(d) Paradigm 4^[45]

图 2 常见的视听交互刺激脑机接口范式

Fig. 2 Common BCI paradigms based on visual-auditory crossmodal stimuli

2014 年,Cui 等人^[47]将相同人脸图片在 8 个不同方位分布作为视觉刺激,8 个不同单音节语音刺激作为听觉刺激(图 2(a)),构建了视听交互刺激范式,并与单独的视觉刺激相比较,研究视听交互刺激范式的大脑响应特性。该实验范式只对 3 名被试的数据进行了分析,其视听交互刺激范式的分类正确率可达 94% 以上。

2016 年 Barbosa 等人^[48]将视觉单词图片与对应的语音发声刺激相结合(图 2(b)),比较研究了大脑对视听交互刺激与单模态刺激的反应以及不同范式间系统分类效率的异同,统计了实验中 10 名被试分类正确率,结果显示平均分类正确率达 85.3%。

视听交互刺激 BCI 的主要应用是字符拼写,需要针对大字符集进行输入。Belitski 等人^[11]在研究中采用改进的矩阵拼写范式(6×6 的字符分布)进行视觉刺激,而听觉刺激则是利用 6 个不同空间分布的数字(1~6)的语音信号(图 2(c))。在设计视听交互刺激范式时,将 36 个字符分布在 6×6 的视觉矩阵中并将行列分别编排序号 1~6,与空间分布的听觉 1~6 声音信号相联合。在视觉闪烁某一行(或列)时,对应的听觉声音同时刺激,从而构成视听交互刺激范式。

2014 年,An 等人^[49]利用隐性注意的视觉图形与左右耳不同的单音节发音相结合(图 2(d)),研究了 15 名被试对视听交互刺激与单模态视觉刺激及听觉刺激反应的异同以及不同范式脑机接口效率的异同。该实验范式中 6 个不同形状、颜色的刺激以伪随机序列方式呈现在显示屏中心。视觉图片刺激的持续时间为 130 ms,两个相邻刺激之间的刺激间隔为 200 ms。*‘ti’*(左耳男高音、右耳女高音)、*‘to’*(左耳男低音、右耳女低音)、*‘it’*(双通道男高音)、*‘ot’*(双通道男低音)等 6 个不同声音刺激均是短音节的自然发音并具有通道、音域、音调和音节等 4 个属性。在视听交互刺激范式中,每一个

视觉图片对应一个声音刺激并同时呈现。对目标视听刺激的选择可实现其所代表字符的脑电输入。实验中将至少 30 个字符分 6 组, 每组 5~6 个字符, 从而经过两步选择(组选择与组内字符选择)即能完成对目标字符的输入。

上述研究均是通过对不同刺激范式 ERP 成分分析、目标刺激与非目标刺激的可分性分析以及系统分类正确率和分类效率等进行比较, 试图发现视听交互刺激的协同优势。虽然其中有部分研究确实观察到视听觉联合刺激的 BCI 系统效率显著高于单独的视觉刺激和听觉刺激^[47-48], 但亦有部分研究显示视听联合刺激的 BCI 系统与单独的视觉刺激 BCI 系统在 ERP 特征和系统效率上并没有显著性差异, 仅与单独的听觉刺激 BCI 系统存在显著性差异^[11, 49]。

3.2 基于视听交互刺激竞争关系的 BCI 范式

通常基于视听交互刺激的 BCI 范式都要尽量避免视听觉间的竞争关系, 然而亦有研究利用这两种模态之间的有益竞争来构造 BCI 范式。An 等人^[49-50]尝试设计了一种并行视听双模态刺激范式, 即视听并行刺激范式(visual-auditory parallel stimuli, V × A), 并行完成了视觉刺激与听觉刺激对目标任务的选择。在大脑对视、听觉模态信息存在竞争和互扰的情况下, 分别提取视觉目标刺激与听觉目标刺激, 实现了目标任务的并行选择, 也证实了利用视听双模态竞争机制的可行性。并且, 该脑机接口范式可以将 36 个字符所在组和组内字符的选择并行完成, 大大缩短了字符选择所需要的时间。表 2 所示列出了视听交互刺激脑机接口范式研究分析结果。

表 2 视听交互刺激脑机接口范式研究分析

Table 2 Analysis on BCI paradigms using visual-auditory crossmodal stimuli

作者 (时间)	BCI 实验范式				刺激参数			认知心理 机制 (整合、 协同、 竞争)	小结 (问题、改进、动向)
	视觉 刺激	听觉 刺激	呈现时间 差/ms	刺激时 长/ms	刺激间 隔/ms	分类正确 率/s	视听刺激匹 配度(空 间、语义、 时间)		
	8 个不同 方位人脸 图片	8 个不同 单音节 语音	-	100	-	94~98	显性空间失配、 隐性语义匹配、 显性时间匹配		
Cui 等人 ^[47] (2014)	不同方位 单词图片	不同单词 发音	0	450	550	85.3	显性空间失配、 显性语义匹配、 隐性时间匹配	视听协同	1) 迄今 BCI 实验范 式尚未做到视听交 刺激在空间、语义与 时间均匹配, 仅部分 匹配, 故多为视听交 互竞争或协同共存, 难见视听全面整合
Barbosa 等人 ^[48] (2016)	Belitski 等人 ^[11] (2011)	6 × 6 行 列矩阵 字符	数字 1~ 6 发音	(V) 100 (A) 200 ~270	200	~82	显性空间匹配、 隐性语义匹配、 显性时间失配	视听协同	2) 精心设计 BCI 实 验范式, 力争做到视 听交互刺激在空间、 时间和语义多方匹 配, 利用视听交互整 合机制提高 BCI 性能
An 等人 ^[49] (2014)	不同颜色 形状图形	空间分布 单音节 发音	17	133	200	92	隐性空间失配、 显性语义失配、 显性时间失配	视听协同	是今后改 进发展 方向。

4 认知心理学与 BCI 研究的综合分析

认知心理学研究通常认为大脑对协同关系的视听交互刺激比单模态刺激具有更快的反应速度和更好的反应精度。其研究事件类型通常是两分类、刺激数较少(小于 3 个)、刺激时程(stimuli duration, SD)较长且刺激间的时间间隔(stimulus onset asynchrony, SOA)亦较长(一般在 1000 ms 以上)。然而 BCI 系统中视、听刺激实验范式大

多需要被试在较短时间内完成对目标刺激的选择, 从而有效地提高系统的效率。因此 BCI 的实验范式通常具有较短的刺激时间间隔和刺激时长以及较多的刺激种类等特性。这就限制了视、听觉所用的刺激类型。如要求视、听觉刺激尽量呈现时间短、易分辨、刺激种类多等特点。在这种快速多分类的刺激实验范式下, 基于视听交互刺激的 BCI 系统与单独的视觉刺激 BCI 系统在 ERP 特征和系统效率上无法体现出显著性差异, 仅与单独的听觉刺激 BCI 系统存在显著性差异, 即视听交互刺激在目前

的 BCI 实验范式中并没有很好地发挥认知心理学研究所体现的优越性。表 3 所示列出了视听交互认知心理学研

究与 BCI 实验范式综合分析结果。

表 3 视听交互认知心理学研究与 BCI 实验范式综合分析

Table 3 Analysis on VACS studies in cognitive psychology and BCI paradigms

视听交互 刺激	实验方法			研究或应用目标	研究结论或应用效果	启发与改进思路
	刺激 类型	刺激时程与 间隔	检测 技术			
认知心理 学研究	类型少(受 心理学实验 规 范 限 制)、刺 激 数少(≤ 3 , 通 常是两分 类)、格 式 严 密规范	较长(需产 生充分心理 变 化, 时 程 和 间 隔常 在 1 s 以 上)、 按 实验 规范 要 求	包 括 ERP、 MEG、fMRI 等 多种信 号 检 测与 建模 分 析技 术	研究 不 同视、听 单 模 刺 激 和 视 听 交 互 刺 激 模 式 下大 脑 对 相 应 视、听 觉 刺 激 信 息 认 知响 应 机 理 与 心 理反 应 机 理	大 脑 对 视 听 交 互 刺 激 具 有 整 合、 协 同 和 竞 争 等 多 种 认 知 心 理 机 制 在 整 合 认 知 心 理 机 制 下 的 视 听 交 互 刺 激 较 视、听 单 模 刺 激 对 特 定 感 觉 皮 层 有 更 高 激 活 强 度 视 听 交 互 刺 激 在 空 间、语 义 和 时 间 方 面 的匹 配 度 均 会 影 响 大 脑 认 知 心 理 机 制 模 式 (整 合、协 同 或 竞 争) 整 合 机 制 对 应 空 间、语 义 和 时 间 的全 面 高 匹 配 度, 协 同 机 制 对 应 部 分 较 高 匹 配 度, 竞 争 机 制 对 应 部 分 低 匹 配 度	1) 认 知 心 理 研 究 启 示: 分 析 视 听 交 互 刺 激 协 同 与 竞 争 关 系, 调 整 好 视 听 刺 激 的 空 间、时 间 和 语 义 匹 配 度, 建 立 视 听 交 互 整 合 机 制 模 型 是 优 化 设 计 最 佳 BCI 实 验 范 式、提 高 认 知 准 确 度 和 信 息 交 流 效 率 的 主 要 技 术 关 键 2) 已 有 BCI 实 验 范 式 的 视 听 交 互 刺 激 效 果 提 示: 尽 可 能 提 高 交 互 刺 激 的 空 间、时 间 匹 配 度 以 促 进 交 互 协 同、避 免 失 匹 配 竞 争, 力 争 视 听 交 互 全 面 整 合 以 获 得 更 高 激 活 强 度 的 ERP 信 号 是 今 后 改 进 BCI 实 验 范 式 设 计、提 高 BCI 性 能 的 首 要 发 展 方 向 3) BCI 系 统 设 计 应 综 合 选 择 实 验 范 式、系 统 硬 件 方 案 和 脑 电 信 号 处 理 及 实 时 在 线 用 户 需 求 等 利 弊 优 化 进 行
BCI 实 验 范 式	型 式 多 (可 在 不 同 空 间 方 位、时 间 顺 序 与 语 言 文 字 含 义各 方 面 编 码组 合)、刺 激 数 多、格 式 灵 活 多 样 (按 应用 需 求)	较 短 (追 求 实 时 在 线 性 方 位、时 间 顺 序 与 语 言 文 字 含 义各 方 面 编 码组 合)、刺 激 数 多、格 式 灵 活 多 样 (按 应用 需 求)	主 要 为 ERP 信 号 检 测 与 建 模 分 析	应 用 不 同 视 听 交 互 刺 激 范 式 提 取 大 脑 对 目 标 刺 激 响 应 的 ERP 信 号 进 行 建 模 分 析, 识 别 大 脑 对 外 信 息 交 流 或 外 部 设 备 操 作 思 维 意 图 并 将 其 转 化 为 对 相 应 工 作 指 令, 从 而 心 想 事 成	目 前 流 行 的 典 型 视 听 双 模 态 刺 激 的 BCI 实 验 范 式 相 对 于 视、听 单 模 态 的 刺 激 范 式, 尚 未 见 能 获 得 对 特 定 感 觉 皮 层 有 更 高 激 活 强 度 的 ERP 信 号 迄 今 BCI 实 验 范 式 仅 做 到 视 听 交 互 刺 激 在 空 间、语 义 与 时 间 部 分 匹 配, 故 多 为 视 听 交 互 竞 争 或 协 同 共 存, 难 有 深 层 次 整 合; 相 对 于 视、听 单 模 态 的 刺 激 范 式, 视 听 双 模 态 刺 激 的 BCI 系 统 并 没 有 体 现 出 显 著 优 越 性	

综合分析视听交互刺激范式未体现其优越性的原因可归纳为以下几个方面。

1) 通常基于视觉刺激的 BCI 范式一般要比基于听觉刺激的 BCI 范式更高效, 大脑对于视觉刺激的反应较强, 而对于听觉刺激反应相对较弱, 在视听交互刺激协同范式下被试倾向于注意视觉刺激而忽略听觉刺激, 从而视听交互刺激范式的系统效率与视觉单模态刺激不存在显著性差异。

2) 当实验难度加大时, 大脑更易产生较高幅值的事件相关电位。在 BCI 中, 视听交互刺激被试更容易区别目标刺激与非目标刺激、投入的精力大大减少, 大脑对视听交互刺激诱发的 ERP 幅值较低, ERP 特征相对于视觉单模态刺激较不明显, 从而不利于系统的分类。

3) 认知心理学和 BCI 范式中所用到的实验参数设置不同导致了不同的实验结果。图 3 所示为常见视听交互刺激 BCI 范式所用的实验参数, 包括视听呈现时间差 (visual to auditory delay, VAD)、SOA 和 SD 等。有研究证

实在视觉单模态刺激范式中, 刺激时间间隔和刺激时间长度对系统的效率均会产生重要的影响^[51]。An 等人^[52-53]发现视听呈现时间差确实影响视听联合刺激的事件相关电位 (VA-ERP) 和系统效率。实验参数设置的不同有可能是视听双模态刺激相对于视觉单通道刺激未体现优越性的原因之一。

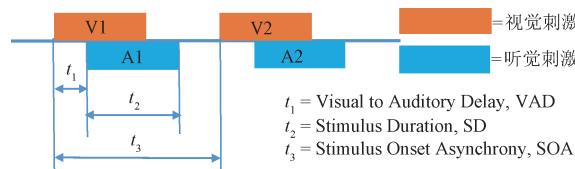


图 3 视听双模态刺激实验参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental parameters of visual-auditory bimodal stimuli

4) 认知心理学的研究发现视听刺激的匹配度对实验结果有重要的影响。脑机接口范式由于其可选项通常较

多,常用的视觉刺激与听觉刺激之间的匹配度(包括时间匹配度,空间匹配度,语义匹配度等)有待优化。提高视听觉刺激之间的匹配度有可能会有效得改善基于视听双模态刺激的脑机接口范式系统效率。

5)认知心理学与BCI研究所使用的研究方法不同。目前BCI研究所使用的特征提取与分类识别算法尚不能将视听觉双模态刺激所诱发脑电的优势体现出来。需要寻找或提出更适合于双模态刺激的特征提取与分类算法,如可以尝试深度学习算法^[54]。

5 视听交互刺激BCI的研究难点与未来动向

视听交互刺激需要被试同时(或依次)对视觉和听觉刺激做出反应。在视听交互刺激的研究中主要包含以下几个研究难点。

5.1 实验范式的选择

要实现视听交互联合刺激首先要选择合适的视听觉刺激方式。视觉刺激的匹配与否,视、听刺激的参数设置以及被试对视、听刺激的熟悉和接受程度都会对实验结果造成一定影响。

另外,视、听觉刺激呈现时间差(反映其时间匹配度)显然会对BCI系统的效率产生影响。该时间差是否影响视听交互刺激效果(即影响其与单模态刺激的比较结果)?其他实验参数(如视听刺激的空间或语义匹配度)会不会对系统的性能和与单模态刺激比较的结果产生影响呢?这些问题都有待通过BCI实验范式选择做进一步的研究。

5.2 硬件系统的改进

视听觉交互刺激需通过不同感觉通道实施,这就难免使视、听刺激之间呈现时间差(图3)^[47]。变化的视听呈现时间差(即时间失匹配)必定会对大脑的响应机制(可能引发视听竞争)和BCI系统工作效率产生影响。为得到确切且恒定的时间差(少量视听呈现时间差不致引发视听竞争),一方面要求BCI系统硬件自身性能精度高,另一方面要求硬件有很高稳定性(即相邻刺激时间间隔要精准)。如目前常用显示器呈现视觉刺激,则其呈现刺激时刻的精确性有赖于显示器的刷新频率,通常误差为±刷新周期。而听觉刺激主要由音频输出设备决定其刺激精确度。随着对视听交互刺激精准性与稳定性要求的提高,BCI系统硬件性能改进的技术难度也会随之加大。

5.3 视听交互刺激脑电信号的处理

如前述,基于视听交互刺激BCI系统的脑电信号处理工作主要包括视听觉认知相关信息提取、脑区定位与

脑功能网络分析和脑-机交互中的信号传输、处理与控制。而目前BCI的脑电信号处理还主要局限于对视觉或听觉信号的ERP特征及系统效率的分析,尚未针对视听交互刺激的脑电信号建立一套较完善的专门处理方法,还有待于在优化选择实验范式后进一步挖掘相关脑电信号特征才能掌握有效的信号处理方法。

5.4 视听交互刺激BCI的未来展望

随着人类对脑科学和类脑计算研究的深入开展,视听交互刺激BCI必将成为未来研究开发的重点。认知心理学研究已充分证实了视听交互刺激相对于单模态刺激的优势,然而目前相关研究的刺激选项仍较少,SOA和SD均较长,其研究结果恐难以指导快速呈现刺激的实时在线高效应用型BCI系统的设计;大脑对快速呈现的刺激序列有怎样的响应特性?如何充分地利用视听觉交互刺激相较于单模态刺激的优势,同时避免双模态刺激之间的干扰?对于这些问题的研究与解决均是视听交互刺激范式与BCI系统设计的未来发展动向,也是相关研究开发需做好的前期功课。另外如何借鉴人类认知机理和最新相关数学研究成果,建立新的脑电信号处理计算模型和方法,从而大幅度提高与视听觉认知相关的BCI系统软硬件性能技术水平,也是近期需踏实苦干的研究任务。如此才能在不久将来有望推动视听觉认知相关BCI系统在改善残疾人生活质量和功能康复等方面得到实际验证或应用,为延伸和提高人类行为控制能力提供可靠的新技术。

参考文献

- [1] WOLPAW J R, WOLPAW E W. Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice [M]. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [2] 孔丽文,薛召军,陈龙,等. 基于虚拟现实环境的脑机接口技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(3):317-327.
- [3] KONG L W, XUE ZH J , CHEN L, et al. Review of brain-computer interface technology based on virtual reality environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (3): 317-327.
- [4] DORNHEGE G. Toward Brain-Computer Interfacing [M]. Cambridge: MIT Press, 2007.
- [5] 李鹏海,许敏鹏,万柏坤,等. 视觉诱发电位脑-机接口实验范式研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10):2340-2351.
- [6] LI P H, XU M P, WAN B K, et al. Review of experimental paradigms in brain-computer interface based on visual evoked potential [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):2340-2351.

- [5] 刘晶,白艳茹,许敏鹏,等. 基于 Farwell 范式诱发 ERP 的身份识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(2):221-226.
LIU J, BAI Y R, XU M P, et al. Research of person identification using ERP based on Farwell paradigm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(2):221-226.
- [6] MAK J N, WOLPAW J R. Clinical applications of brain-computer interface: Current state and future prospects [J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2009, 2 (1): 187-99.
- [7] BIN G, GAO X, WANG Y, et al. A high-speed BCI based on code modulation VEP [J]. Journal of Neural Engineering, 2011, 8 (2): 025015.
- [8] HOEHNE J, TANGERMANN M. Towards user-friendly spelling with an auditory brain-computer interface: The CharStreamer paradigm [J]. PloS One, 2014, 9(6): e98322.
- [9] ACQUALAGNA L, BLANKERTZ B. Gaze-independent BCI-spelling using rapid serial visual presentation (RSVP) [J]. Journal of Clinical Neurophysiology, 2013, 124(5):901-908.
- [10] STEFANICS G, STAVRINOU M, SESTIERI C, et al. Cross-modal visual-auditory -somatosensory integration in a multimodal object recognition task in humans [J]. International Congress Series, 2005, 1278 (10): 163-166.
- [11] HESSLER D, JONKERS R, STOWE L, et al. The whole is more than the sum of its parts - Audiovisual processing of phonemes investigated with ERPs [J]. Brain and Language, 2013, 124(3), 213-24.
- [12] THURLING M E, BROUWER A M, VANERP J B F, et al. Does bimodal stimulus presentation increase ERP components usable in BCIs? [J]. Journal of Neural Engineering, 2012, 9 (4):045005.
- [13] BELITSKI A, FARQUHAR J, DESAIN, P. P300 audio-visual speller[J]. Journal of Neural Engineering, 2011, 8(2), 025022.
- [14] 安兴伟. 基于数字拼写的视-听联合刺激诱发 ERP 研究[D]. 天津:天津大学,2010.
AN X W, Research on event-related potentials (ERP) evoked by visual-auditory cross stimulation based on number speller[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [15] 明东. 用于脑机接口的感觉刺激事件相关电位研究进展[J]. 电子测量与仪器学报,2009, 23(6):1-6.
MING D. Progress on event related potential from sensory stimulation for brain computer interface [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2009,
- 23(6):1-6.
- [16] 李凌, 尧德中, 刘铁军, 等. 刺激前后脑电 α 波相位重排现象研究 [J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(1):118-121.
LI L, YAO D ZH, LIU T J, et al. A study of the phase resetting from ongoing EEG to single trial EPs of alpha wave [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(1):118-121.
- [17] DRIVER J, NOESSELT T. Multisensory interplay reveals crossmodal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments [J]. Neuron, 2008, 57(1): 11-23.
- [18] CALVERT G A, BULLMORE E T, BRAMMER M J, et al. Activation of auditory cortex during silent speechreading [J]. Science, 1997, 276 (5312), 593-596.
- [19] CALVERT G A, CAMPBELL R, BRAMMER M J. Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex [J]. Current Biology, 2000, 10(11): 649-657.
- [20] CALVERT G A. Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies [J]. Cerebral Cortex, 2001, 11 (12): 1110-1123.
- [21] SZYCIK G R, TAUSCHE P, MÜNTE TF. A novel approach to study audiovisual integration in speech perception: localizer fMRI and sparse sampling [J]. Brain Research, 2008, 1220: 142-149.
- [22] ANDRES A, CARDY J, JOANISSE F. Congruency of auditory sounds and visual letters modulates mismatch negativity and P300 event-related potentials [J]. International Journal of Psychophysiology, 2011 79(2): 137-146.
- [23] GANESH A C, BERTHOMMIER F, VILAIN C, et al. A possible neurophysiological correlate of audiovisual binding and unbinding in speech perception [J]. Frontiers in Psychology, 2014, 5(11): 1-13.
- [24] SENKOWSKI D, SAINT-AMOUR D, HOEFLE M, et al. Multisensory interactions in early evoked brain activity follow the principle of inverse effectiveness [J]. Neuro Image, 2011, 56(4): 2200-2208.
- [25] CHEN Y C, YEH S L. Catch the moment-multisensory enhancement of rapid visual events by sound [J]. Experimental Brain Research, 2009, 198 (2-3): 209-219.
- [26] VAN DER BURG E, OLIVERS C N, BRONKHORST A W, et al. Pip and pop: Nonspatial auditory signals improve spatial visual search [J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and

- Performance, 2008, 34 (5):1053-1065.
- [27] ODGAARD E C, ARIEH Y, MARKS L E. Brighter noise: Sensory enhancement of perceived loudness by concurrent visual stimulation [J]. Cognitive Affective and Behavioral Neuroscience, 2004, 4 (2): 127-132.
- [28] MCGURK H, MACDONALD J. Hearing lips and seeing voice [J]. Nature, 1976, 264(5588): 746-748.
- [29] EVANS K K, TREISMAN A. Natural cross-modal mappings between visual and auditory feature [J]. Journal of Vision, 2010, 10(1):6.1-612.
- [30] COLAVITA F B. Human sensory dominance [J]. Perception & Psychophysics, 1974, 16 (2): 409-412.
- [31] KOPPEN C, LEVITAN C A, SPENCE C. A signal detection study of the Colavita visual dominance effect [J]. Experimental Brain Research, 2009, 196(3): 353-360.
- [32] MEYLAN R V, MURRAY M M. Auditory-visual multisensory interactions attenuate subsequent visual responses in humans [J]. Neuroimage, 2007, 35 (1): 244-254.
- [33] MISHRA J, MARTINEZ A, HILLYARD S A. Cortical processes underlying sound-induced flash fusion [J]. Brain Research, 2008, 1242 (4): 102-115.
- [34] 闫蓓, 刘莎, 李建华, 等. 单通道视觉诱发脑电的单次提取方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33 (4): 905-910.
- YAN B, LIU SH, LI J H, et al. Study on single-trial feature extraction method of single-channel visual evoked potential [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4):905-910.
- [35] WELCH R B, DUTTONHURT L D, WARREN D H. Contributions of audition and vision to temporal rate perception [J]. Percept Psychophys, 1986, 39 (4): 294-300.
- [36] KAHNEMAN D, TVERSKY A. On the psychology of prediction [J]. Psychological Review, 1973, 80 (4): 237-251.
- [37] 文小辉, 李国强, 刘强. 视听整合加工及其神经机制 [J]. 心理科学进展, 2011, 19(7):976-982.
- WEN X H, LI G Q, LIU Q. Processing of audiovisual integration and its neural mechanism [J]. Advances in Psychological Science, 2011, 19(7):976-982.
- [38] GONDAN M, NIEDERHAUS B, R? DER B, et al. Multisensory processing in the redundant target effect: A behavioral and ERP study [J]. Perception & Psychophysics, 2005, 67 (4): 713-726.
- [39] TEDER-SÄLEJÄRVIL W A, DI RUSSO F, MCDONALD J J, et al. Effects of spatial congruity on audio-visual multimodal integration [J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2005, 17 (9): 1396-1409.
- [40] GUO X, LI X, GE X, et al. Audiovisual congruency and incongruency effects on auditory intensity discrimination [J]. Neuroscience Letters, 2015, 584: 1-6.
- [41] VAN ATTEVELDT N, FORMISANO E, BLOMERT L. The effect of temporal asynchrony on the multisensory integration of letters and speech sounds [J]. Cerebral Cortex, 2007, 17 (4): 962-974.
- [42] SELLERS E W, KRUSIENSKI D J, MCFARLAND D J, et al. A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance [J]. Biological Psychology, 2006, 73(3): 242-252.
- [43] TREDER M S, SCHMIDT N M, BLANKERTZ B. Gaze-independent brain-computer interfaces based on covert attention and feature attention [J]. Journal of Neural Engineering, 2011, 8(6), 066003.
- [44] KÜBLER A, FURDEA A, HALDER S, et al. A brain-computer interface controlled auditory event-related potential (p300) spelling system for locked-in patients [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2009, 1157 (1): 90-100.
- [45] SCHREUDER M, BLANKERTZ B, TANGERMAN M. A new auditory multi-class brain-computer interface paradigm: Spatial hearing as an informative cue [J]. PloS One, 2010, 5(4): e9813.
- [46] HÖHNE J, TANGERMAN M. Towards user-friendly spelling with an auditory brain-computer interface: the CharStreamer paradigm [J]. PloS One, 2014, 9(6), e98322.
- [47] CUI G, ZHAO Q, CAO J, et al. Hybrid-BCI: classification of auditory and visualrelated potentials [C]. 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), 2014:297-300.
- [48] BARBOSA S, PIRES G, NUNES U. Toward a reliable gaze-independent hybrid BCI combining visual and natural auditory stimuli [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2016, 261:47-61.
- [49] AN X W, HÖHNE J, MING D, et al. Exploring combinations of auditory and visual stimuli for gaze-independent brain-computer interfaces [J]. PLoS ONE, 2014, 9(10): e111070.
- [50] 安兴伟. 隐性注意下视听双通道脑控字符输入系统关键问题研究 [D]. 天津:天津大学, 2015.

- AN X W. Research on the key problem of audiovisual BCI speller with covert attention [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [51] MCFARLAND D J, SARNACKI W, TOWNSEND G, et al. The P300-based brain-computer interface (BCI): Effects of stimulus rate [J]. Clinical Neurophysiology, 2011, 122(4): 731-737.
- [52] AN X W, TANG J B, LIU S, et al. Effects of temporal congruity between auditory and visual stimuli using rapid audio-visual serial presentation [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2015, 63 (10): 2125-2132.
- [53] AN X W, MING D, STERLING D, et al. Optimizing visual-to-auditory delay for multimodal BCI speller[C]. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 36th Annual International Conference of the IEEE, 2014: 1226-1229.
- [54] 曲景影,孙显,高鑫. 基于 CNN 模型的高分辨率遥感图像目标识别[J]. 国外电子测量技术,2016,35(8): 45-50.
- QU J Y, SUN X, GAO X. Remote sensing image target recognition based on CNN [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016,35(8):45-50.

作者简介



安兴伟,2008 年于河北工业大学获得学士学位,2010 年和 2015 年分别于天津大学获得硕士学位和博士学位,并于 2011 年到 2013 年在德国柏林工业大学作为联合培养博士生学习两年,现为天津大学神经工程与康复实验室博士后,主要研究方向为视听觉相关的脑机接口研究。

E-mail:anxingwei@tju.edu.cn

An Xingwei received B. Sc. in biomedical engineering from Hebei University of Technology in 2008, M. Sc. and Ph. D. in biomedical engineering from Tianjin University in 2010 and 2015, respectively. From 2011 to 2013, she was a visiting student at the Neurotechnology Group in Berlin Institute of Technology, Berlin, Germany. She is currently a post-Ph. D. research fellow in Neural Engineering and Rehabilitation Laboratory of Tianjin University. Her main research interest includes visual and auditory stimuli based BCI.



曹勇,2015 年于上海交通大学获得学士学位,现在中国航天员科研训练中心攻读硕士研究生,主要研究方向为警觉度检测与调节、脑机接口、脑力负荷检测。
E-mail:caoyong_93@163.com

Cao Yong received B. Sc. from Shanghai Jiaotong University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Chinese Astronaut Research and Training Center. His main research interest includes visual and auditory stimuli based BCI, vigilance detection and mental workload detection.



焦学军,1992 年于天津大学精密仪器与光电子工程学院获学士学位,2000 年于北京航空航天大学电子与信息工程学院获得硕士学位,2012 年于清华大学生物化学系获得博士学位。目前为中国航天员科研训练中心副研究员,研究方向主要包括脑力负荷检测、脑机接口、自适应自动化系统等。

E-mail: jxjisme@sina.com

Jiao Xuejun received B. Sc. from Tianjin University in 1992, M. Sc. from Department of Electronical and Information Engineering, Beihang University, in 2000, and Ph. D. from Department of Biochemistry, Tsinghua University in 2012, respectively. Now he is an associate professor in China Astronaut Research and Training Center, Beijing, China. His main research interests are mental workload, brain signal processing, adaptive automation and BCI.



明东(通讯作者),1999 年于天津大学获得学士学位,2004 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学教授,医学工程与转化医学研究院院长,主要研究方向为神经工程、康复工程、运动科学、信号/图像处理,尤其专于神经调控、运动分析以及脑-机交互方向。

E-mail:richardming@tju.edu.cn

Ming Dong (Corresponding author) received B. Sc. from Tianjin University in 1999, and Ph. D. from Tianjin University in 2004, respectively. Now he is professor and the dean of Academy of Medical Engineering and Translational Medicine of Tianjin University. His major research interests include neural engineering, rehabilitation engineering, sports science, biomedical instrumentation and signal/image processing, especially in Neural regulation, kinematic analysis, and brain-computer interface.