

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 25 日 (25.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/124838 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 3/01 (2006.01) **G06F 17/14** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/079096
- (22) 国际申请日: 2019 年 3 月 21 日 (21.03.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811553136.X 2018 年 12 月 19 日 (19.12.2018) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。
- (72) 发明人: 宋爱国 (SONG, Aiguo); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。
张文彬 (ZHANG, Wenbin); 中国江苏省南京市

江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。
曾洪 (ZENG, Hong); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。 徐宝国 (XU, Baoguo); 中国江苏省南京市江宁区东南大学路 2 号, Jiangsu 211189 (CN)。

(74) 代理人: 南京瑞弘专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING RUIHONG PATENT & TRADEMARK AGENCY (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市玄武区龙蟠路 155 号 3 幢 411 室, Jiangsu 210000 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: BRAIN-COMPUTER INTERFACE METHOD AND SYSTEM BASED ON REAL-TIME CLOSED-LOOP VIBRATION STIMULATION ENHANCEMENT

(54) 发明名称: 一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法及系统

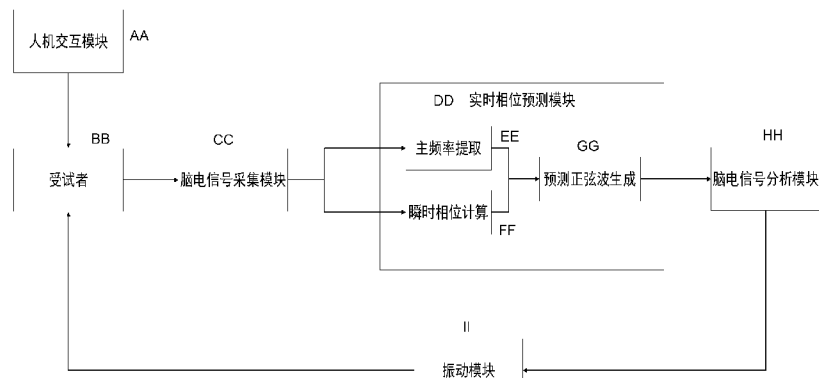


图 1

AA Human-computer interaction module
BB Subject
CC Electroencephalogram signal collection module
DD Real-time phase prediction module
EE Extract a main frequency
FF Calculate an instantaneous phase
GG Generate a predicted sine wave
HH Electroencephalogram signal analysis module
II Vibration module

(57) Abstract: Disclosed are a brain-computer interface method and system based on real-time closed-loop vibration stimulation enhancement. The method comprises: displaying and providing a motor imagery task for a subject, and collecting a generated digital electroencephalogram signal; reading the digital electroencephalogram signal and determining whether a pre-set time period is exceeded, and if so, performing capturing, otherwise continuing to perform reading; performing band-pass filtering, using the fast Fourier transform to calculate and obtain a time-frequency feature of the digital electroencephalogram signal, and extracting a frequency value with the highest frequency energy to serve as a main frequency; using the Hilbert transform to calculate and obtain an instantaneous phase of the digital electroencephalogram signal; respectively taking the main frequency and the instantaneous phase as the frequency and initial phase of a sine wave, generating a predicted sine wave, and predicting and acquiring real-time phase information; and determining whether the phase is located in a phase interval where vibration stimulation is applied, generating and outputting a control

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格 (细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

instruction, and controlling, according to the control instruction, a vibration motor to vibrate to stimulate a sensory channel of the subject. The present invention improves the signal-to-noise ratio of a brain-computer interface system, and increases the recognition rate of a motor imagery signal.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法及系统, 包括: 将运动想象任务显示提供于受试者, 并采集产生的数字脑电信号; 读取数字脑电信号并判断是否超过预设时段, 是则截取, 否则继续读取; 进行带通滤波, 采用快速傅里叶变换计算得到数字脑电信号的时频特征并提取频率能量最高的频率值作为主频率; 并采用希尔伯特变换计算得到数字脑电信号的瞬时相位; 以主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相, 生成预测正弦波且预测获取实时相位信息; 判断是否在施加振动刺激的相位区间, 并生成和输出控制指令, 根据控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。本发明提高了脑机接口系统的信噪比, 增强了运动想象信号的识别率。

一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法及系统

技术领域

本发明涉及一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法及系统，属于脑机接口技术领域。

背景技术

1999 年召开的第一次脑机接口国际会议给出了脑机接口的定义，即脑-机接口是一种不依赖于正常的由外周神经和肌肉组成的输出通路的通讯系统。脑机接口的生物学原理是大脑在进行思维活动、产生动作意识或受外界刺激时。神经细胞将产生几十毫伏的微电活动，大量神经细胞的电活动传到头皮表层形成脑电波。脑-机接口（BCI）是以脑电信号或其他相关技术为基础，将大脑活动特征转化为预定义的命令，从而实现与外界交流或者控制其他外部设备的先进技术。

由头皮上放置电极方法提取的脑电信号称为头皮脑电信号（EEG），由于从大脑到头皮之间存在脑膜、颅骨和多层组织的阻隔，所以 EEG 信号的信噪比很低，难以提取到稳定可靠的信号，这在对外部设备的控制中是一个较严重的问题，严重影响了脑机接口的应用范围。同时不同个体间的脑电信号也存在差异，研究表明大约有 30% 的人使用脑机接口时解码率较低，以至于难以实现大脑与外界环境的交流和控制，我们把这一类人称为“BCI 盲”。所以如何提高 BCI 的解码率等实际表现是脑机接口的一个关键问题。

BCI 用户可以通过简单地执行想象左手或右手运动来启动大脑控制。手部运动的动觉想象在受试者的感觉运动皮层中产生事件相关同步（ERD / ERS）。事件相关同步定义为特定频带（例如 α 波段 8-13Hz）的功率减少或增加。通常，运动想象诱导的 ERD 活动侧向对侧半球，即运动想象诱导对侧感觉运动皮层中的 ERD，这些侧向皮质活动构成了基于运动想象的脑机接口的神经生理学基础。

解决 BCI 发展所面临问题的潜在方法是采用触觉。与视觉刺激相比，触觉感觉产生较少的视觉疲劳，让使用者不会过度疲劳。人的触觉感受器主要是分布于表层皮肤中的麦斯纳小体，感受皮肤的轻压刺激；梅氏小体主要负责感受触觉；较为深层的巴西尼环层小体，主要感受压觉；还有品库斯小体及许多神经末梢、触盘等。其中，梅氏小体位于与主脊相邻并且最靠近皮肤表面的尖端。这些在低频振动（1-40 Hz）信号传导中特别有效，因此在检测感觉振动中起着重要作用。

越来越多的研究表明，非侵入性的电刺激可以在锁定潜在的大脑节律时更有效地调节

神经活动。振动刺激有可能潜在的与自然震荡同相位，但由于 EEG 信号的复杂性与时变性，匹配人体自发的震荡是一项具有挑战性的问题。

发明内容

本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术的不足，针对脑电信号本身的非线性、非平稳、非高斯过程等特征的问题，提供一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法及系统，提高了脑机接口系统的信噪比，增强脑源信号。

本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题：

一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，包括以下步骤：

将运动想象任务显示提供于受试者，并采集受试者运动想象时产生的数字脑电信号；

读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，是则截取预设时段内的数字脑电信号，否则继续读取所采集的数字脑电信号；

对所截取预设时段内的数字脑电信号进行带通滤波后，采用快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高的频率值作为其主频率；并对带通滤波后的数字脑电信号采用希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位；以该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相，生成预测正弦波，且根据预测正弦波预测获取当前时刻下的实时相位信息；

根据预测获取的当前时刻下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间，并根据判断结果生成和输出控制指令，根据控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述方法中运动想象任务包括左手或右手运动想象动作。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述方法中对所截取预设时段内数字脑电信号进行 α 波段的带通滤波。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述方法中采用希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位，采用公式：

$$y(t) = p \cdot \frac{1}{\pi} \cdot v \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

$\theta_x(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)}$ 其中， $y(t)$ 是对 $x(t)$ 执行希尔伯特变换后的数字脑电信号； $x(t)$ 是带通

滤波后的这段数字脑电信号； p 和 v 是柯西主值意义上的积分； $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述方法中生成的预测正弦波 f_s 具体为：

$$f_s = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{main} \cdot t_f + \theta_x(t) + \frac{\pi}{2})$$

其中， f_{main} 为截取预设时段内数字脑电信号的主频率； t_f 是预测波形的长度； $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位。

本发明提出的一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口系统，包括：

人机交互模块，用于将运动想象任务显示提供于受试者；

脑电信号采集模块，用于采集受试者运动想象时产生的数字脑电信号；

实时相位预测模块，用于读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，是则截取预设时段内的数字脑电信号，否则继续读取所采集的数字脑电信号；及用于对所截取预设时段内的数字脑电信号进行带通滤波后，通过快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高的频率值作为其主频率，并通过希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位；以该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相，生成预测正弦波，且根据预测正弦波预测获取当前时刻下的实时相位信息；

脑电信号分析模块，用于根据预测获取的当前时刻下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间，根据判断结果生成和输出控制指令；

振动刺激反馈模块，用于根据脑电信号分析模块输出的控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案所述脑电信号采集模块包括依次连接的脑电帽、脑电信号放大器、低通和带阻滤波器、模数转换模块及通信模块。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述实时相位预测模块采用带通滤波器对预设时段内数字脑电信号进行带通滤波。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述带通滤波器采用十阶椭圆无限脉冲响应滤波器。

进一步地，作为本发明的一种优选技术方案，所述振动刺激反馈模块根据控制指令设置不同的振动频率作用于左手和右手。

本发明采用上述技术方案，能产生如下技术效果：

本发明方法及系统，通过显示指导受试者执行运动想象任务，同时利用采集的脑电信号数据段时频特征生成预测正弦波，再基于预测正弦波预测实时脑电信号相位信息，利用预测的瞬时相位信息来控制振动电机在人手指尖施加振动刺激，达到实时闭环的振动刺激效果以增强脑电信号的信噪比，提高运动想象任务解码率。本发明可以通过振动刺激反馈调控脑电

节律，提高了脑机接口系统的信噪比，为增强脑源信号提供了一种新方案。增强了运动想象信号的识别率，减少了“BCI 盲”现象，使使用者与外界沟通更加有效便捷。

因此，本发明可以提高振动刺激的实时性，通过将刺激集中在用于增强脑电信号的最佳相位上并且通过确保在多个循环中重复这一点以便利用累积效应来使刺激效果最大化，提高运动想象任务解码率，减少脑机接口在个体之间的差异。与传统的开环持续刺激方法相比，这样的系统可能以更低的功率需求和更高的特异性实现振动控制，并且可以降低耐受性和反弹的风险。

附图说明

图 1 为本发明基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口系统的结构示意图。

图 2 为本发明方法中实时相位预测流程图。

图 3 为本发明基于实时闭环刺激反馈的运动想象实验范式示意图。

具体实施方式

下面结合说明书附图对本发明的实施方式进行描述。

如图 1 所示，本发明设计了一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口系统，该系统主要包括：人机交互模块、脑电信号采集模块、实时相位预测模块、脑电信号分析模块、振动刺激反馈模块，其中脑电信号采集模块的输出端与实时相位预测模块的输入端相连，实时相位预测模块的输出端与脑电信号分析模块的输入端相连；所述脑电信号分析模块的输出端与振动刺激反馈模块相连，振动刺激反馈模块直接作用于受试者身体上，本实施例中作用于受试者左右手。

所述人机交互模块，是由屏幕上显示的运动想象任务内容的显示屏组成，用于将运动想象任务显示提供于受试者；通过视觉通道指导受试者完成左手或右手运动想象任务。

脑电信号采集模块，用于采集受试者运动想象时产生的数字脑电信号；其主要包括依次连接的脑电帽、脑电信号放大器、低通和带阻滤波器、模数转换模块及通信模块，脑电帽佩戴于受试者头部，并对受试者运动想象时产生的脑电信号采集，依次经脑电信号放大器进行放大、低通和带阻滤波器进行低通滤波、模数转换模块进行模数转换后得到数字脑电信号，并通过通信模块将数字脑电信号传输至实时相位预测模块。

实时相位预测模块，用于通过 USB 接口接收脑电信号采集模块传输的数字脑电信号，

读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，是则截取预设时段内的数字脑电信号，否则继续读取所采集的数字脑电信号；及用于对所截取预设时段内的数字脑电信号进行带通

滤波后,通过快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高的频率值作为其主频率,并通过希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位;以该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相,生成预测正弦波,且根据预测正弦波预测获取当前时刻下的实时相位信息,实现对实时脑电信号的瞬时相位的预测。

脑电信号分析模块,用于根据实时相位预测模块预测获取的当前时刻下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间,根据判断结果生成和输出控制指令;

振动刺激反馈模块,用于根据脑电信号分析模块输出的控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道,刺激受试者指尖进而影响受试者的感觉通道,调节脑电信号节律。

优选地,所述数字脑电信号包括想象手握拳运动信号等;本发明系统的实时相位预测模块,采用带通滤波器对预设时段内数字脑电信号进行带通滤波,所述带通滤波的频段为大脑活动的 α 频段,进一步地所述带通滤波器采用十阶椭圆无限脉冲响应滤波器,即以 500ms 为一个数据段进行实时分析,首先采用一个十阶椭圆无限脉冲响应滤波器对脑电信号数据段进行带通滤波,滤得所需要的 α 频段、范围在 8-12hz 的数字脑电信号;设置通带纹波为 0.5dB,阻带衰减设置为 40dB。因为所选取的数据段较短,所以若采用有限脉冲响应 FIR 滤波器会被限制阶数,选用无限脉冲响应 IIR 滤波器。

并且,本发明系统中振动刺激反馈模块,可根据控制指令设置不同的振动频率作用于左手和右手,如所述振动刺激模块中设置作用于左手的振动刺激信号是振动频率为 22hz 的正弦波,作用于右手的振动刺激信号是振动频率为 26hz 的正弦波。由于人体感觉系统对左右敏感程度不同,设置不同的振动频率可辅助产生最佳刺激效果。

本发明还提出一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法,该方法用于上述系统进行信号处理,具体包括以下步骤:

步骤 1、人机交互模块将运动想象任务显示提供于受试者,其中,运动想象任务可以包括左手或右手运动想象动作;所述人机交互模块中的显示器显示刺激包括三个模式,具体为:

- (1) 屏幕正中出现白色十字,受试者放松休息不进行想象;
- (2) 白色十字左端出现红色箭头,受试者执行左手运动想象任务;
- (3) 白色十字右端出现红色箭头,受试者执行右手运动想象任务;

在出现箭头的同时,实时振动刺激模块激活,所述振动刺激模块主要用于根据实时获取的脑电信号产生刺激反馈,实现增强脑电信号的作用。

然后，受试者按要求坐在舒服的座椅上，头部佩戴好 64 导联的脑电帽，双眼与显示器距离一米左右。根据显示器上显示的箭头指向想象左手或右手握拳动作，通过脑电信号采集模块中 64 导联的脑电采集帽获取使用者实时脑电信号数据，依次经各部件处理采集得到运动想象时产生的数字脑电信号数据。

步骤 2、实时相位预测模块在运动想象任务开始的同时执行实时脑电信号相位预测算法，如图所示，具体过程如下：

首先，实时相位预测模块读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，如是否超过 500ms，若超过 500ms 则截取预设时段 500ms 内的数字脑电信号进行分析预测，若没有超过则继续读取所采集的数字脑电信号。

然后，实时相位预测模块进行分析预测过程：

对所截取预设时段 500ms 内的数字脑电信号进行带通滤波，获得运动想象任务下 ERD 现象特定的发生频段，如 α 波段，范围为 8-12hz；

对带通滤波后的数字脑电信号数据，采用快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高频率值作为该段数字脑电信号的主频率；本实施例中，提取信号段中频率能量最高的频率值作为该段信号的主频率。

对带通滤波后的数字脑电信号数据，采用希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号 $x(t)$ 的瞬时相位；所述的瞬时相位提取通过希尔伯特变换计算，得到对 $x(t)$ 执行希尔伯特变换后的数字脑电信号 $y(t)$ ，采用如下公式：

$$y(t) = p \cdot \frac{1}{\pi} \cdot v \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

则 t 时刻的瞬时相位可以通过下式计算：

$$\theta_x(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)}$$

其中， $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位； $x(t)$ 是带通滤波后的这段数字脑电信号； p 和 v 是柯西主值意义上的积分。

最后，利用该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相，生成预测正弦波，且根据预测正弦波预测获取实时相位信息，实现对实时相位的预测；其中，所述正弦波函数公式如下：

$$f_s = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{main} \cdot t_f + \theta_x(t) + \frac{\pi}{2})$$

其中, f_s 是预测正弦波; f_{main} 为截取预设时段内数字脑电信号的主频率; t_f 是预测波形的长度, 这里设置为 50ms, 可根据所选取的当前时间点与获取脑电信号瞬时相位时间点的时间差确定; $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位。

上述中, 由希尔伯特变换求得 500ms 脑电信号数据中 480ms 处的瞬时相位, 即 $t=480ms$; 由快速傅里叶变换计算得到数据段的主要频率 f_{main} ; 由这些参数可列出正弦波函数式, 得到精确的预测正弦波, 预测波形的长度 t_f 设为参照信号长度的十分之一, 即 50ms, 其原理是由于脑电信号是非线性不稳定的信号, 所以在每 50ms 段内提取 500ms 的数据来进行预测, 以提高预测的准确率。

步骤 3、脑电信号分析模块根据实时相位预测模块预测获取的当前时刻 t 下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间, 判断结果是位于相位区间则生成和输出控制指令, 振动刺激反馈模块根据控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。否则判断结果为不位于相位区间时, 不输出控制指令, 则无需产生振动刺激。

本发明采用上述方法, 其试验结果如图 3 所示, 从脑电信号产生到被脑电帽记录, 再经过放大器、USB 传输进入实时相位预测模块大约需要 3ms, 电脑执行预测算法处理数据大约需要 5ms, 得到瞬时相位值并转化为指令控制振动电机振动大约需要 2ms, 所以预测正弦波的第 30ms 处可近似看作当前时间点的脑电信号, 取 30ms 处的瞬时相位作为振动电机控制触发信号从而实现基于实时相位刺激的目的。

综上, 本发明设计了一种可以基于脑电信号实时相位进行指尖振动刺激以增强运动想象任务的解码率的脑机接口方法及系统, 针对当前运动想象脑机接口的解码率不高、个体差异过大、“BCI 盲”现象等问题, 设计了一种增强脑电信号的方法。相比于过去的持续、闭环的振动刺激, 本发明通过将刺激集中在用于增强脑电信号的最佳相位上并且通过确保在多个循环中重复这一点以便利用累积效应来使刺激效果最大化, 这样可以更低的功率需求和更高的特异性实现振动控制, 并且可以降低耐受性和反弹的风险。本发明通过振动刺激反馈调控脑电节律, 提高了脑机接口系统的信噪比, 增强了运动想象信号的识别率。

上面结合附图对本发明的实施方式作了详细说明, 但是本发明并不限于上述实施方式, 在本领域普通技术人员所具备的知识范围内, 还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做出各种变化。

权 利 要 求 书

1. 一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于，包括以下步骤：

将运动想象任务显示提供于受试者，并采集受试者运动想象时产生的数字脑电信号；

读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，是则截取预设时段内的数字脑电信号，否则继续读取所采集的数字脑电信号；

对所截取预设时段内的数字脑电信号进行带通滤波后，采用快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高的频率值作为主频率；并对带通滤波后的数字脑电信号采用希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位；以该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相，生成预测正弦波，且根据预测正弦波预测获取当前时刻下的实时相位信息；

根据预测获取的当前时刻下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间，并根据判断结果生成和输出控制指令，根据控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。

2. 根据权利要求1所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述方法中运动想象任务包括左手或右手运动想象动作。

3. 根据权利要求1所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述方法中对所截取预设时段内数字脑电信号进行 α 波段的带通滤波。

4. 根据权利要求1所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述方法中采用希尔伯特变换计算得到数字脑电信号的瞬时相位，采用公式：

$$y(t) = p \cdot \frac{1}{\pi} \cdot v \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

$$\theta_x(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)}$$

其中， $y(t)$ 是对 $x(t)$ 执行希尔伯特变换后的数字脑电信号； $x(t)$ 是带通滤波后的数字脑电信号； p 和 v 是柯西主值意义上的积分； $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位。

5. 根据权利要求1所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述方法中生成的预测正弦波 f_s 具体为：

$$f_s = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{main} \cdot t_f + \theta_x(t) + \frac{\pi}{2})$$

其中， f_{main} 为截取预设时段内数字脑电信号的主频率； t_f 是预测波形的长度； $\theta_x(t)$ 是 t 时刻的瞬时相位。

6. 一种基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口系统，其特征在于，包括：

人机交互模块，用于将运动想象任务显示提供于受试者；

脑电信号采集模块，用于采集受试者运动想象时产生的数字脑电信号；

实时相位预测模块，用于读取所采集的数字脑电信号并判断是否超过预设时段，是则截取预设时段内的数字脑电信号，否则继续读取所采集的数字脑电信号；及用于对所截取预设时段内的数字脑电信号进行带通滤波后，通过快速傅里叶变换计算得到该段数字脑电信号的时频特征并提取其中频率能量最高的频率值作为其主频率，并通过希尔伯特变换计算得到该段数字脑电信号的瞬时相位；以该段数字脑电信号的主频率和瞬时相位分别作为正弦波的频率和初相，生成预测正弦波，且根据预测正弦波预测获取当前时刻下的实时相位信息；

脑电信号分析模块，用于根据预测获取的当前时刻下的实时相位信息判断是否在施加振动刺激的相位区间，根据判断结果生成和输出控制指令；

振动刺激反馈模块，用于根据脑电信号分析模块输出的控制指令控制振动电机振动刺激受试者的感觉通道。

7. 根据权利要求6所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述脑电信号采集模块包括依次连接的脑电帽、脑电信号放大器、低通和带阻滤波器、模数转换模块及通信模块。
8. 根据权利要求6所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述实时相位预测模块采用带通滤波器对预设时段内数字脑电信号进行带通滤波。
9. 根据权利要求8所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述带通滤波器采用十阶椭圆无限脉冲响应滤波器。
10. 根据权利要求6所述基于实时闭环振动刺激增强的脑机接口方法，其特征在于：所述振动刺激反馈模块根据控制指令设置不同的振动频率作用于左手和右手。

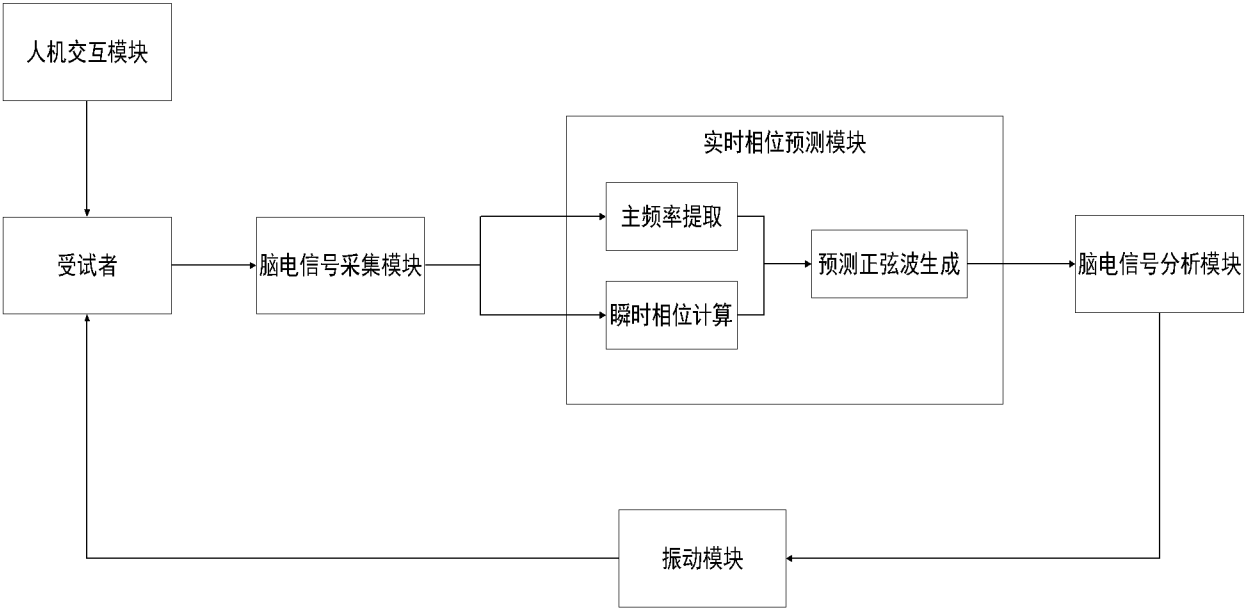


图 1

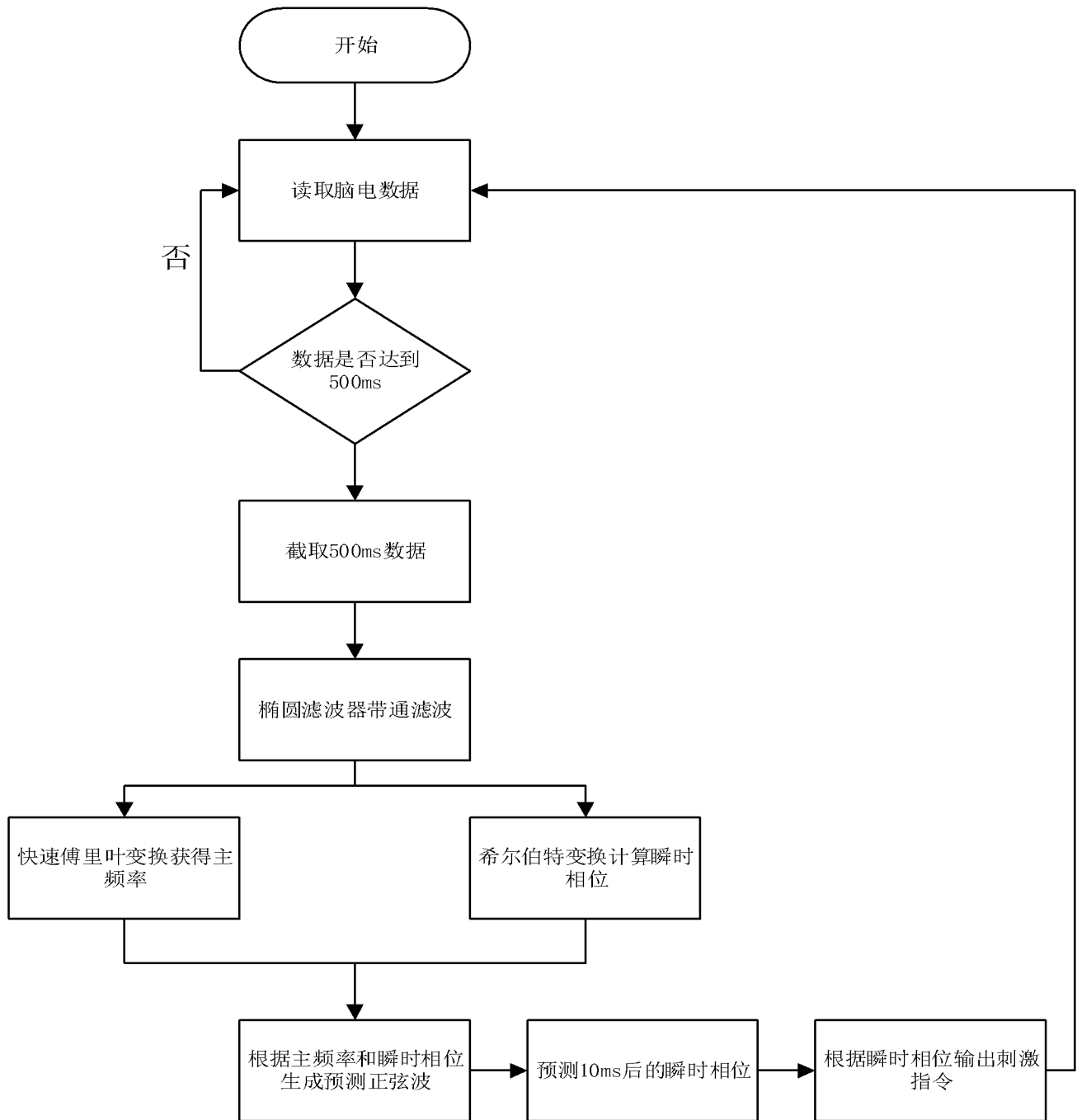


图 2



图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/079096

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 3/01(2006.01)i; G06F 17/14(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, SIPOABS, CNTXT, CNKI, DWPI: 实时, 闭环, 脑机接口, 振动, 刺激, 频率, 相位, 正弦波, real-time, closed-loop, brain-computer interface, vibration, stimulation, frequency, phase, sine wave

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 104951082 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 30 September 2015 (2015-09-30) entire document	1-10
A	CN 103268149 A (HANGZHOU DIANZI UNIVERSITY) 28 August 2013 (2013-08-28) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 September 2019

Date of mailing of the international search report

18 September 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088

China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/079096

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	104951082	A	30 September 2015	CN	104951082	B	12 January 2018
CN	103268149	A	28 August 2013	CN	103268149	B	15 June 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/079096

A. 主题的分类 G06F 3/01(2006.01)i; G06F 17/14(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类											
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNABS, SIPOABS, CNTXT, CNKI, DWPI: 实时, 闭环, 脑机接口, 振动, 刺激, 频率, 相位, 正弦波, real-time, closed-loop, brain-computer interface, vibration, stimulation, frequency, phase, sine wave											
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 104951082 A (浙江大学) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103268149 A (杭州电子科技大学) 2013年 8月 28日 (2013 - 08 - 28) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 104951082 A (浙江大学) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文	1-10	A	CN 103268149 A (杭州电子科技大学) 2013年 8月 28日 (2013 - 08 - 28) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求									
A	CN 104951082 A (浙江大学) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文	1-10									
A	CN 103268149 A (杭州电子科技大学) 2013年 8月 28日 (2013 - 08 - 28) 全文	1-10									
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。											
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件											
国际检索实际完成的日期 2019年 9月 10日		国际检索报告邮寄日期 2019年 9月 18日									
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 徐薇 电话号码 86-(010)-62411668									

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/079096

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	104951082	A	2015年 9月 30日	CN	104951082	B	2018年 1月 12日
CN	103268149	A	2013年 8月 28日	CN	103268149	B	2016年 6月 15日