

(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 7 月 23 日 (23.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/147235 A1

(51) 国际专利分类号:
A61B 5/18 (2006.01) *A61B 5/0478* (2006.01)
A61B 5/0476 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/088445

(22) 国际申请日: 2019 年 5 月 25 日 (25.05.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910035315.2 2019 年 1 月 15 日 (15.01.2019) CN

(71) 申请人: 五邑大学(WUYI UNIVERSITY) [CN/CN];
中国广东省江门市东城村 22 号王洪涛,
Guangdong 529000 (CN)。

(72) 发明人: 王洪涛(WANG, Hongtao); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 刘旭程(LIU, Xucheng); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 吴聪(WU, Cong); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 唐聪(TANG, Cong); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 裴子安(PEI,

Zian); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 岳洪伟(YUE, Hongwei); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。 陈鹏(CHEN, Peng); 中国广东省江门市东城村 22 号, Guangdong 529000 (CN)。

(74) 代理人: 北京盛凡智荣知识产权代理有限公司(BEIJING SHENGFANZHIRONG INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO.LTD); 中国北京市海淀区苏州街 1 号 9 层 057A 梁永昌, Beijing 100080 (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, 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。

(54) **Title:** METHOD OF DETECTING DRIVING FATIGUE ON BASIS OF BRAIN FUNCTION NETWORK CONSTRUCTED USING PHASE LOCKING VALUE

(54) 发明名称: 一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法

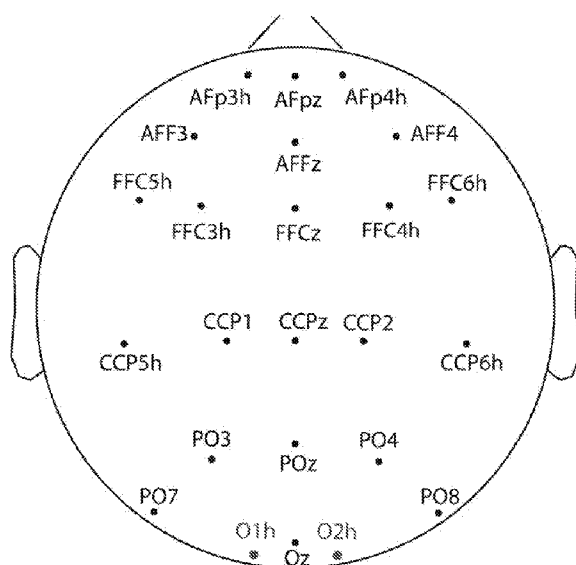


图 1

(57) **Abstract:** Provided is a method of detecting driving fatigue on the basis of a brain function network constructed using a phase locking value, belonging to the field of driving fatigue detection; electroencephalogram signals are collected during driving in an awake time and a test time, and said signals are de-noised, decomposed, and reconstructed; then the phase locking value (PLV) within the awake time and the test time series for every two channels is calculated, and, according to the PLV, the functional connection matrix of the channels in the awake time and test time series is formed; a connection strength threshold is set and compared with each element value in the functional connection matrix so as to obtain a connection relationship between the channels in the awake time and the test time series and form a brain function network of the test subject during the awake time and the test time series; the differences between brain function network topology in three sub-bands between the awake time and the test time series are compared and analyzed to determine whether the test subject is in a state of driving fatigue during the test time series; the reliability and accuracy of detection are relatively high.

(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)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法, 属于驾驶疲劳检测领域, 通过分别采集在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号, 并对其进行去噪处理、分解和重构, 然后分别对每两个通道计算在清醒时间内和测试时间序列内的相位锁定值PLV, 并根据PLV形成通道在清醒时间内和测试时间序列内的功能连接矩阵, 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较, 以分别获取清醒时间内和测试时间序列内通道间连接关系并形成受试者清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络, 对比分析清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异, 以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态, 检测的可靠性和准确性较高。

一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及驾驶疲劳检测领域，更具体地，涉及一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法。

背景技术

[0002] 许多国家都重视驾驶疲劳相关的检测方法研究，最初的研究主要从医学方面入手，利用医疗设备研究人的精神状态。十九世纪初美国最早开展了机动车驾驶员服务时间管理条例的合理性的调查。之后关于驾驶疲劳的研究相继展开。经过多年的发展，驾驶疲劳检测方法的研究大致可分为三类：基于面部特征的检测方法、基于驾驶行为的检测方法、基于生理特征的检测方法。

[0003] 基于面部特征的检测方法，通过检测驾驶员眨眼幅度、频率以及平均闭合时间等眼部活动、频繁点头、头部长期不动等头部特征以及其它的面部特征，判断驾驶员是否处于疲劳状态。这些检测方法大多基于机器视觉，有检测设备易于放置、检测时效性好等优点，是驾驶疲劳检测最常用的方法。

[0004] 基于驾驶行为的检测方法，通过监控驾驶员操作方向盘转动角度、加速踏板、制动器等车辆控制特征，以及车辆行驶过程中的速度、加速度、控制稳定性、是否偏移驾驶路线等车辆行驶特征，间接判断驾驶员是否进入疲劳状态。优点在于无需接触人体以及使用方便，设备在车辆内部占用空间小。

[0005] 基于生理特征的驾驶疲劳检测方法中，脑电信号可以直接反映人的身体及精神活动，被誉为检测驾驶疲劳的“金标准”。在针对脑电信号的方法中，大多使用功率谱或熵的方法。

[0006] 功率谱密度方法是将脑电信号从时域转化为频域进行分析，针对每个频带可以分析其清醒到疲劳时的能量变化。当人的大脑进入疲劳状态时，脑电信号的 δ 、 θ 频带的能量会升高，而 α 、 β 频带的能量会降低，通过对相应频带能量的比，可以放大这种趋势从而

判断驾驶员的精神状态。

[0007] 熵可以用来测量系统的混乱程度。基于熵的方法，包括近似熵、样本熵、小波熵等。其中，小波变换具有时频局部化特性，小波熵是从小波分解后的信号序列计算的一种熵值，它可准确反映脑电波的复杂程度。用小波熵值分析驾驶员疲劳状态脑电波的复杂度，并对模拟驾驶前、模拟驾驶疲劳后和休息后的脑电信号进行分析，可以判断驾驶疲劳。

[0008] 但是，上述驾驶疲劳检测方法存在如下不足：基于面部特征的疲劳检测方法易受环境影响，亮度、角度以及其他的一些不可控因素仍然在一定程度上限制着算法的性能，基于计算机视觉的面部特征提取方法非常容易接受人为的伪造信号，并且被其所欺骗；驾驶行为方法则对非标准型道路无能为力，准确率不够，易产生误报；在基于生理信息的检测方法中，脑电能够直接反映人的身体活动、精神状态等信息，大脑通过不同区域的相互连接和集群工作来实现信息交互，人的意识、行为等状态也并非由某个区域单独决定，而往往是由全脑的多个区域共同协作完成的，但基于功率谱、熵的驾驶疲劳检测方法没有涉及大脑区域性的信息，无法全面、系统研究驾驶疲劳产生的机理。

发明内容

[0009] 本发明旨在克服上述现有技术的缺陷，提供一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，检测的可靠性和准确性较高。

[0010] 为达到上述目的，本发明采取的技术方案是：提供一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1.使用脑电信号采集设备采集受试者分别在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号；其中脑电信号采集设备中每个电极的位置作为一个脑功能网络节点，电极个数为节点个数 N ；

S2.对脑电信号进行去噪处理，以提高脑电信号的信噪比；

S3.对去噪处理后的脑电信号进行分解和重构，按频率范围重构三个子频带波形，其中 θ 波频率为 4-8Hz， α 波频率为 8-13Hz， β 波频率为 13-30Hz；

S4.重构后的信号中每个脑功能网络节点作为一个通道；对每两个通道计算在清醒时间内的相位锁定值 PLV ，以获取清醒时间内每两个通道的耦合关系；将测试时间划分为多个测试时间序列，对每两个通道计算在测试时间序列内的相位锁定值 PLV ，以获取测试时间序列内每两个通道的耦合关系；相位锁定值 PLV 表示两个通道间的连接强度，分别利用清醒时

间内和测试时间序列内相位锁定值 PLV 形成通道在清醒时间序列内和测试时间序列内的功能连接矩阵； PLV 的计算使用公式 (1)：

$$PLV = \left| \left\langle e^{i\varphi(t)} \right\rangle \right| \quad (1)$$

其中， $\varphi(t)$ 是两个通道在清醒时间序列内和测试时间序列内的相位差，每个通道在清醒时间序列内和测试时间序列内的相位使用希尔伯特变换获取， $i \in N$ 为脑功能网络节点， PLV 值在 $[0, 1]$ 之间，0 为通道间无连接，1 为通道间完全连接；

S5. 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较，以分别获取清醒时间序列内和测试时间序列内通道间连接关系；元素值大于或等于连接强度阈值的为两个通道间连接，否则为两个通道间无连接；

S6. 根据通道间连接关系，形成受试者清醒时间序列内和测试时间序列内的脑功能网络；对比分析清醒时间序列内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异，以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态。

[0011] 上述方案中，通过分别采集在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号，并对其进行处理去噪、分解和重构，然后分别对每两个通道计算在清醒时间序列内和测试时间序列内的相位锁定值 PLV ，并根据 PLV 形成通道在清醒时间序列内和测试时间序列内的功能连接矩阵，设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较，以分别获取清醒时间序列内和测试时间序列内通道间连接关系并形成受试者清醒时间序列内和测试时间序列内的脑功能网络，对比分析清醒时间序列内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异，以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态，检测的可靠性和准确性较高。

[0012] 优选地，步骤 s1 中脑电采集设备为无线干电极脑电采集设备，包括 24 个电极，采集信号的频率为 250Hz；功能连接矩阵为 24×24 ；测试时间为 90 分钟。采用改进的国际 10-20 放置标准放置电极，电极名称为：AFp3h, AFpz, AFp4h, AFF3, AFFz, AFF4, FFC5h, FFC3h, FFCz, FFC4h, FFC6h, CCP5h, CCP1, CCPz, CCP2, CCP6h, PO3, POz, PO4, PO7, O1h, Oz, O2h, PO8，该无线干电极脑电采集设备被公布在文献 (Klem G H, Lüders H O, Jasper H H, et al. The ten-twenty electrode system of the International Federation[J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1999, 52(3): 3-6.) 中；每次驾驶疲劳检测实验测试时间为 90 分钟，以确保获取受试者从清醒状态进入疲劳状态整个过程的脑电信号。

[0013] 优选地，步骤 s1 中受试者利用模拟驾驶系统进行驾驶，且模拟驾驶系统随机发出刹车命令，记录受试者在看到刹车命令和做出反应的时间间隔；设置时间间隔阈值，若反应的时间间隔大于或等于时间间隔阈值，则将从这个时间间隔往前的测试时间内的脑电信号作为清醒时间内的脑电信号，将从这个时间间隔往后的测试时间内的脑电信号作为待检测是否疲劳的信号。时间间隔阈值来源于训练实验，由于受试者的个体差异，时间间隔阈值也不统一，因此在测试实验前即步骤 S1 之前需要通过训练实验获得面向个体受试者的时间间隔阈值，其计算方法是训练实验过程中，受试者外在表现为疲劳状态（如打呵欠）或汽车行车路径偏离正常运行轨迹的时间段内反应的时间间隔的平均值；驾驶疲劳时，受试者在看到刹车命令和做出反应的时间间隔会变长，将测试时间利用时间间隔阈值区分开来，可以只对这个时间间隔往后的测试时间内的脑电信号作为待检测是否疲劳的信号进行处理，减少处理的数据。受试者利用模拟驾驶系统进行驾驶，也被称为汽车驾驶仿真，或虚拟驾驶，是指利用现代高科技手段如：三维图像即时生成技术、汽车动力学仿真物理系统、大视场显示技术（如多通道立体投影系统）、六自由度运动平台（或三自由度运动平台）、用户输入硬件系统、立体声音响、中控系统等，让体验者在一个虚拟的驾驶环境中，感受到接近真实效果的视觉、听觉和体感的汽车驾驶体验，适用于研究机构进行汽车工程、交通工程、人因工程研究的需要以及作为汽车研究领域的模拟实验平台。

[0014] 优选地，步骤 s2 中，使用独立成分分析方法对脑电信号进行去噪处理，以去除眼电信号的干扰，提高脑电信号的信噪比。

[0015] 优选地，步骤 s3 中利用小波包变换对脑电信号进行分解，然后重构为三个子频带的信号。

[0016] 优选地，步骤 s5 中连接强度阈值为 0.2。

[0017] 优选地，步骤 s6 中利用复杂网络分析方法从功能整合与功能分化两方面分别对三个子频带在清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构的差异进行定量分析；功能整合方面包括特征路径长度和全局效率，功能分化包括局部效率和聚类系数；

聚类系数表示脑功能网络节点的聚集程度，使用公式（2）计算：

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

其中， C_i 表示脑功能网络的平均聚类数， k_i 表示节点 i 的相邻节点数，相邻节点为与节点

i 连接的节点, E_i 为对于节点 i 相邻节点中存在的闭环三角形数; 与节点 i 相连接的另外两个节点, 若三个节点间都存在边则为闭环三角形;

特征路径长度反应脑功能网络内部的信息传递能力, 使用公式 (3) 计算:

$$L = \frac{\sum_{i \geq j} L_{ij}}{\frac{1}{2} N(N+1)} \quad (3)$$

其中, L 为特征路径长度; L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度, 即从节点 i 到节点 j 所用最短的边的数量; N 为节点的个数;

全局效率为最短路径长度 L_{ij} 的倒数的平均值, 用来衡量脑功能网络传递和处理信息的能力, 使用公式 (4) 计算:

$$E_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{L_{ij}} \quad (4)$$

其中, N 为节点的个数, L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度;

局部效率用来衡量局部信息传递和处理能力, 使用公式 (5) 计算:

$$E_{local} = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} E_{global}(G_i) \quad (5)$$

其中, $E_{global}(G_i)$ 为节点 i 的全局效率即 E_g 。

[0018] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为: 通过分别采集在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号, 并对其进行去噪处理、分解和重构, 然后分别对每两个通道计算在清醒时间内和测试时间序列内的相位锁定值 PLV , 并根据 PLV 形成通道在清醒时间内和测试时间序列内的功能连接矩阵, 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较, 以分别获取清醒时间内和测试时间序列内通道间连接关系并形成受试者清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络, 对比分析清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异, 以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态, 检测的可靠性和准确性较高。

附图说明

[0019] 图1为本实施例一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法中使用的改进国际10-20系统的电极位置图。

[0020] 图2a为清醒时间内的功能连接矩阵示意图，图2b为测试时间内的功能连接矩阵示意图；其中行列线为通道，格网右边的渐变条框为相位锁定值 PLV 。

[0021] 图3a为清醒时间内的脑功能网络图，图3b为测试时间内的脑功能网络图，图3c为图3a和图3b的差异对比图。

[0022] 图4为本实施例中清醒时间内的和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的聚类系数的示意图。

[0023] 图5为本实施例中清醒时间内的和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的全局效率的示意图。

具体实施方式

[0024] 本发明附图仅用于示例性说明，不能理解为对本发明的限制。为了更好说明以下实施例，附图某些部件会有省略、放大或缩小，并不代表实际产品的尺寸；对于本领域技术人员来说，附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。

实施例

[0025] 本实施例提供一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1.使用脑电信号采集设备采集受试者分别在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号；其中脑电信号采集设备中每个电极的位置作为一个脑功能网络节点，电极个数为节点个数 N ；

S2.对脑电信号进行去噪处理，以提高脑电信号的信噪比；

S3.对去噪处理后的脑电信号进行分解和重构，按频率范围重构三个子频带波形，其中 θ 波频率为4-8Hz， α 波频率为8-13Hz， β 波频率为13-30Hz；

S4.重构后的信号中每个脑功能网络节点作为一个通道；对每两个通道计算在清醒时间内的相位锁定值 PLV ，以获取清醒时间内每两个通道的耦合关系；将测试时间划分为多个测试时间序列，对每两个通道计算在测试时间序列内的相位锁定值 PLV ，以获取测试时间序列内每两个通道的耦合关系；相位锁定值 PLV 表示两个通道间的连接强度，分别利用清醒时

间内和测试时间序列内相位锁定值 PLV 形成通道在清醒时间内和测试时间序列内的功能连接矩阵, 清醒时间内的功能连接矩阵示意图如图 2a 所示, 测试时间序列内的功能连接矩阵示意图如图 2b 所示; PLV 的计算使用公式 (1):

$$PLV = \left| \left\langle e^{i\varphi(t)} \right\rangle \right| \quad (1)$$

其中, $\varphi(t)$ 是两个通道在清醒时间内和测试时间序列内的相位差, 每个通道在清醒时间内和测试时间序列内的相位使用希尔伯特变换获取, $i \in N$ 为脑功能网络节点, PLV 值在 [0, 1] 之间, 0 为通道间无连接, 1 为通道间完全连接;

S5. 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较, 以分别获取清醒时间内和测试时间序列内通道间连接关系; 元素值大于或等于连接强度阈值的为两个通道间连接, 否则为两个通道间无连接;

S6. 根据通道间连接关系, 形成受试者清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络, 清醒时间内的脑功能网络如图 3a 所示, 测试时间序列内的脑功能网络如图 3b 所示, 图 3c 为图 3a 和图 3b 的差异对比图; 对比分析清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异, 以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态。

[0026] 通过分别采集在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号, 并对其进行去噪处理、分解和重构, 然后分别对每两个通道计算在清醒时间内和测试时间序列内的相位锁定值 PLV , 并根据 PLV 形成通道在清醒时间内和测试时间序列内的功能连接矩阵, 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较, 以分别获取清醒时间内和测试时间序列内通道间连接关系并形成受试者清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络, 对比分析清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异, 以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态, 检测的可靠性和准确性较高。

[0027] 其中, 如图 1 所示, 步骤 s1 中脑电采集设备为无线干电极脑电采集设备, 包括 24 个电极, 采集信号的频率为 250Hz; 功能连接矩阵为 24*24; 测试时间为 90 分钟。采用改进的国际 10-20 放置标准放置电极, 电极名称为: AFp3h, AFpz, AFp4h, AFF3, AFFz, AFF4, FFC5h, FFC3h, FFCz, FFC4h, FFC6h, CCP5h, CCP1, CCPz, CCP2, CCP6h, PO3, POz, PO4, PO7, O1h, Oz, O2h, PO8, 该无线干电极脑电采集设备被公布在文献 (Klem G H, Lüders H O, Jasper H H, et al. The ten-twenty electrode system of the International Federation[J].

Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1999, 52(3): 3-6.) 中；每次驾驶疲劳检测实验测试时间为 90 分钟的设置，以确保获取受试者从清醒状态进入疲劳状态整个过程的脑电信号。

[0028] 另外，步骤 s1 中受试者利用模拟驾驶系统进行驾驶，且模拟驾驶系统随机发出刹车命令，记录受试者在看到刹车命令和做出反应的时间间隔；设置时间间隔阈值，若反应的时间间隔大于或等于时间间隔阈值，则将从这个时间间隔往前的测试时间内的脑电信号作为清醒时间内的脑电信号，将从这个时间间隔往后的测试时间内的脑电信号作为待检测是否疲劳的信号。时间间隔阈值来源于训练实验，由于受试者的个体差异，时间间隔阈值也不统一，因此在测试实验前即步骤 S1 之前需要通过训练实验获得面向个体受试者的时间间隔阈值，其计算方法是训练实验过程中，受试者外在表现为疲劳状态（如打呵欠）或汽车行车路径偏离正常运行轨迹的时间段内反应的时间间隔的平均值；驾驶疲劳时，受试者在看到刹车命令和做出反应的时间间隔会变长，将测试时间利用时间间隔阈值区分开来，可以只对这个时间间隔往后的测试时间内的脑电信号作为待检测是否疲劳的信号进行处理，减少处理的数据。受试者利用模拟驾驶系统进行驾驶，也被称为汽车驾驶仿真，或虚拟驾驶，是指利用现代高科技手段如：三维图像即时生成技术、汽车动力学仿真物理系统、大视场显示技术（如多通道立体投影系统）、六自由度运动平台（或三自由度运动平台）、用户输入硬件系统、立体声音响、中控系统等，让体验者在一个虚拟的驾驶环境中，感受到接近真实效果的视觉、听觉和体感的汽车驾驶体验，适用于研究机构进行汽车工程、交通工程、人因工程研究的需要以及作为汽车研究领域的模拟实验平台。

[0029] 其中，使用独立成分分析方法对脑电信号进行去噪处理，以去除眼电信号的干扰，提高脑电信号的信噪比。

[0030] 另外，步骤 s3 中利用小波包变换对脑电信号进行分解，然后重构为三个子频带的信号。

[0031] 其中，步骤 s5 中连接强度阈值为 0.2。

[0032] 另外，步骤 s6 中利用复杂网络分析方法从功能整合与功能分化两方面分别对三个子频带在清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构的差异进行定量分析；功能整合方面包括特征路径长度和全局效率，功能分化包括局部效率和聚类系数；聚类系数表示脑功能网络节点的聚集程度，如图 4 所示，使用公式（2）计算：

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

其中, C_i 表示脑功能网络的平均聚类数, k_i 表示节点 i 的相邻节点数, 相邻节点为与节点 i 连接的节点, E_i 为对于节点 i 相邻节点中存在的闭环三角形数; 与节点 i 相连接的另外两个节点, 若三个节点间都存在边则为闭环三角形;

特征路径长度反应脑功能网络内部的信息传递能力, 使用公式 (3) 计算:

$$L = \frac{\sum_{i \geq j} L_{ij}}{\frac{1}{2} N(N+1)} \quad (3)$$

其中, L 为特征路径长度; L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度, 即从节点 i 到节点 j 所用最短的边的数量; N 为节点的个数;

全局效率为最短路径长度 L_{ij} 的倒数的平均值, 用来衡量脑功能网络传递和处理信息的能力, 如图 5 所示, 使用公式 (4) 计算:

$$E_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{L_{ij}} \quad (4)$$

其中, N 为节点的个数, L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度;

局部效率用来衡量局部信息传递和处理能力, 使用公式 (5) 计算:

$$E_{local} = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} E_{global}(G_i) \quad (5)$$

其中, $E_{global}(G_i)$ 为节点 i 的全局效率即 E_g 。

[0033] 显然, 本发明的上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明技术方案所作的举例, 而并非是对本发明的具体实施方式的限定。凡在本发明权利要求书的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明权利要求书的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法, 其特征在于, 包括如下步骤:
 - S1. 使用脑电信号采集设备采集受试者分别在清醒时间和测试时间内驾驶时的脑电信号; 其中脑电信号采集设备中每个电极的位置作为一个脑功能网络节点, 电极个数为节点个数 N ;
 - S2. 对脑电信号进行去噪处理, 以提高脑电信号的信噪比;
 - S3. 对去噪处理后的脑电信号进行分解和重构, 按频率范围重构三个子频带波形, 其中 θ 波频率为 4-8Hz, α 波频率为 8-13Hz, β 波频率为 13-30Hz;
 - S4. 重构后的信号中每个脑功能网络节点作为一个通道; 对每两个通道计算在清醒时间内的相位锁定值 PLV , 以获取清醒时间内每两个通道的耦合关系; 将测试时间划分为多个测试时间序列, 对每两个通道计算在测试时间序列内的相位锁定值 PLV , 以获取测试时间序列内每两个通道的耦合关系; 相位锁定值 PLV 表示两个通道间的连接强度, 分别利用清醒时间内和测试时间序列内相位锁定值 PLV 形成通道在清醒时间内和测试时间序列内的功能连接矩阵; PLV 的计算使用公式 (1):

$$PLV = \left| \left\langle e^{i\varphi(t)} \right\rangle \right| \quad (1)$$

其中, $\varphi(t)$ 是两个通道在清醒时间内和测试时间序列内的相位差, 每个通道在清醒时间内和测试时间序列内的相位使用希尔伯特变换获取, $i \in N$ 为脑功能网络节点, PLV 值在 $[0, 1]$ 之间, 0 为通道间无连接, 1 为通道间完全连接;

- S5. 设置连接强度阈值并与功能连接矩阵中每个元素值进行比较, 以分别获取清醒时间内和测试时间序列内通道间连接关系; 元素值大于或等于连接强度阈值的为两个通道间连接, 否则为两个通道间无连接;
 - S6. 根据通道间连接关系, 形成受试者清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络; 对比分析清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构在三个子频带的差异, 以判断测试时间序列内是否处于驾驶疲劳状态。
2. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法, 其特征在于, 步骤 s1 中脑电采集设备为无线干电极脑电采集设备, 包括 24 个电极, 采集信号的频率为 250Hz; 功能连接矩阵为 24*24; 测试时间为 90 分钟。
3. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法, 其特

征在于，步骤 s1 中受试者利用模拟驾驶系统进行驾驶，且模拟驾驶系统随机发出刹车命令，记录受试者在看到刹车命令和做出反应的时间间隔；设置时间间隔阈值，若反应的时间间隔大于或等于时间间隔阈值，则将从这个时间间隔往前的测试时间内的脑电信号作为清醒时间内的脑电信号，将从这个时间间隔往后的测试时间内的脑电信号作为待检测是否疲劳的信号。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，步骤 s2 中，使用独立成分分析方法对脑电信号进行去噪处理，以去除眼电信号的干扰，提高脑电信号的信噪比。
5. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，步骤 s3 中利用小波包变换对脑电信号进行分解，然后重构为三个子频带的信号。
6. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，步骤 s5 中连接强度阈值为 0.2。
7. 根据权利要求 1 所述的一种基于相位锁定值构建脑功能网络的驾驶疲劳检测方法，其特征在于，步骤 s6 中利用复杂网络分析方法从功能整合与功能分化两方面分别对三个子频带在清醒时间内和测试时间序列内的脑功能网络拓扑结构的差异进行定量分析；功能整合方面包括特征路径长度和全局效率，功能分化包括局部效率和聚类系数；聚类系数表示脑功能网络节点的聚集程度，使用公式（2）计算；

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

其中， C_i 表示脑功能网络的平均聚类数， k_i 表示节点 i 的相邻节点数，相邻节点为与节点 i 连接的节点， E_i 为对于节点 i 相邻节点中存在的闭环三角形数；与节点 i 相连接的另外两个节点，若三个节点间都存在边则为闭环三角形；

特征路径长度反应脑功能网络内部的信息传递能力，使用公式（3）计算：

$$L = \frac{\sum_{i \geq j} L_{ij}}{\frac{1}{2}N(N+1)} \quad (3)$$

其中， L 为特征路径长度； L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度，即从节点 i 到节

点 j 所用最短的边的数量； N 为节点的个数；

全局效率为最短路径长度 L_{ij} 的倒数的平均值，用来衡量脑功能网络传递和处理信息的能力，使用公式（4）计算：

$$E_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{L_{ij}} \quad (4)$$

其中， N 为节点的个数， L_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度；

局部效率用来衡量局部信息传递和处理能力，使用公式（5）计算：

$$E_{local} = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} E_{global}(G_i) \quad (5)$$

其中， $E_{global}(G_i)$ 为节点 i 的全局效率即 E_g 。

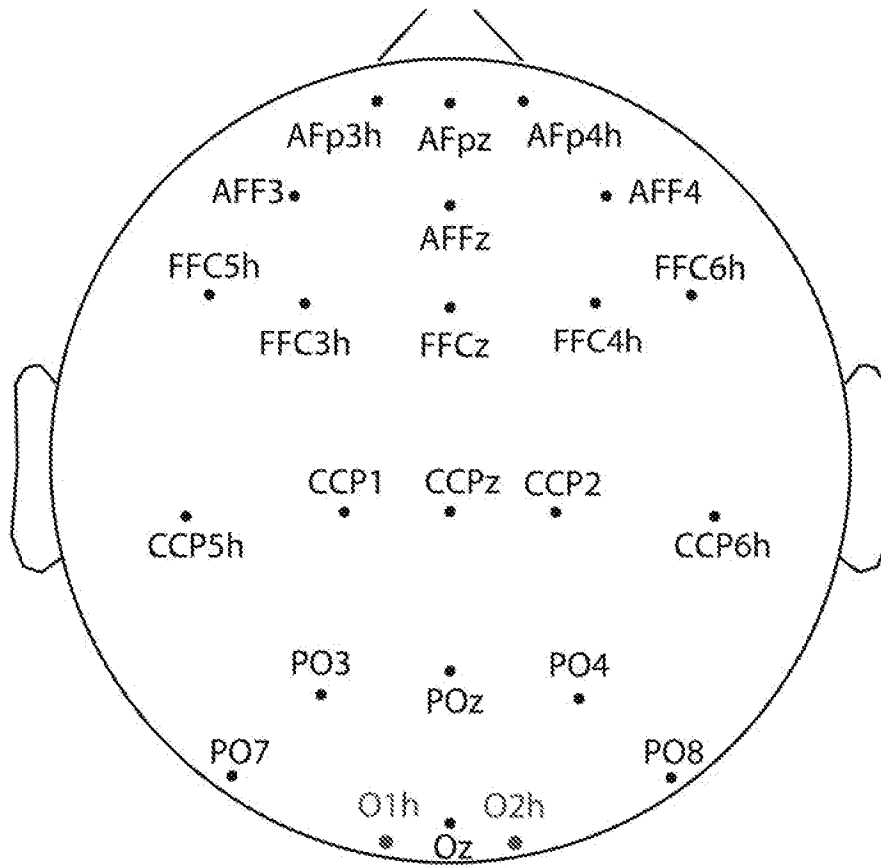


图 1

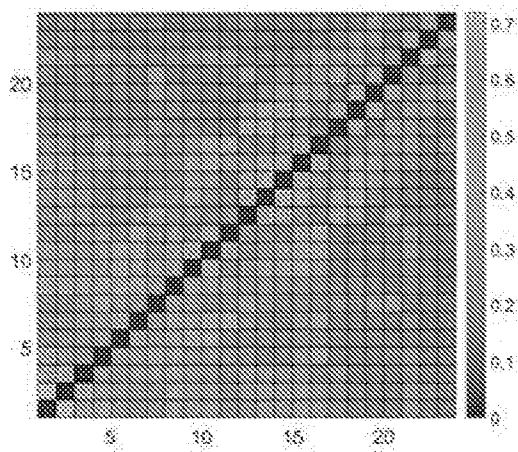


图 2a

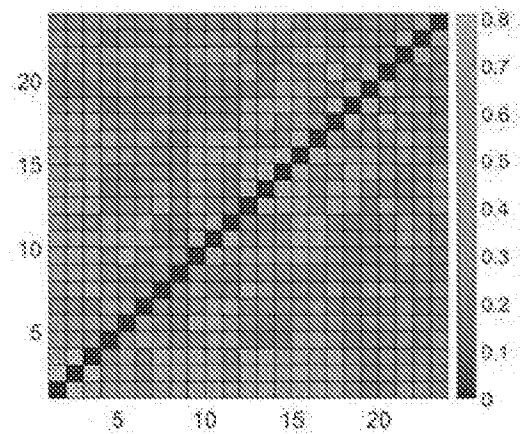


图 2b

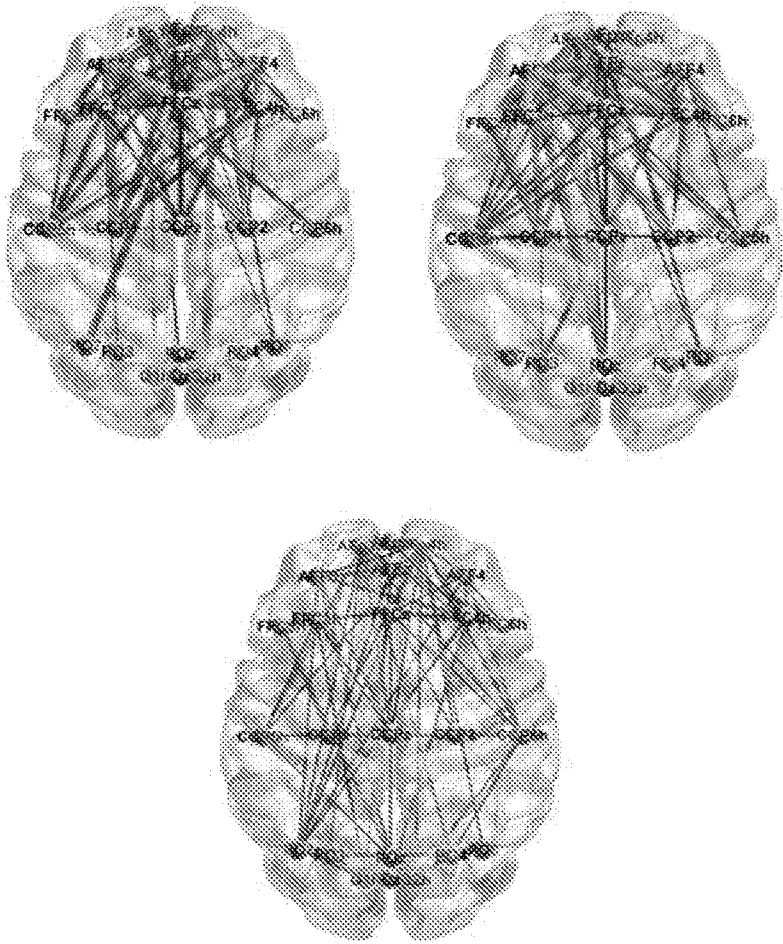


图 3a

图 3b.

图 3c

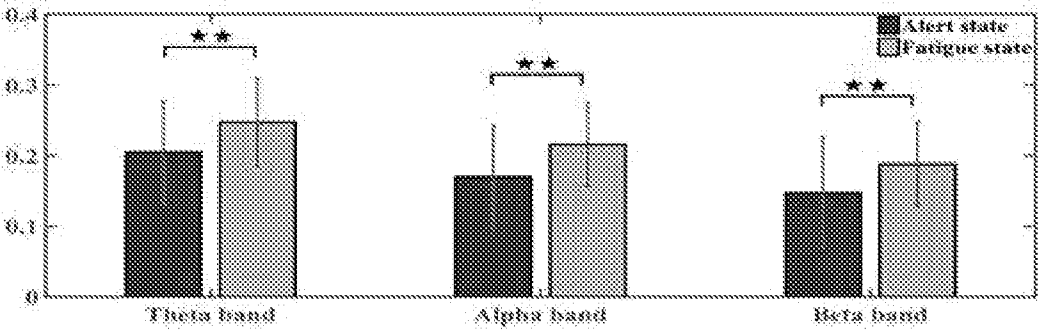


图 4

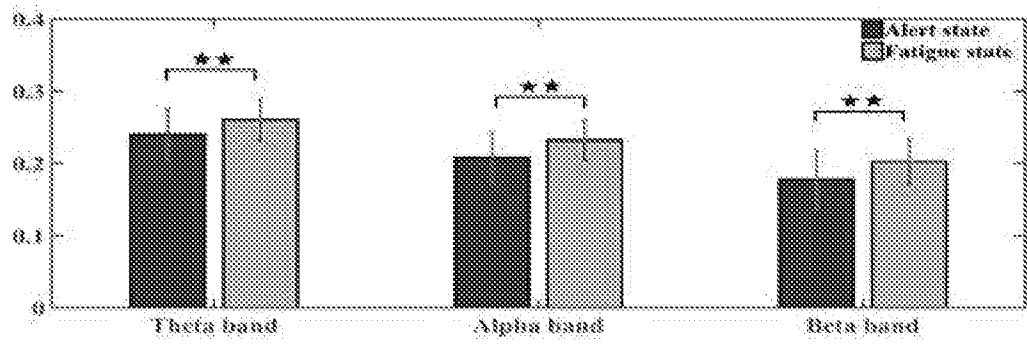


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/088445

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

A61B 5/18(2006.01)i; A61B 5/0476(2006.01)i; A61B 5/0478(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)

A61B

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)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 驾驶, 疲劳, 疲惫, 瞌睡, 劳累, 疲倦, 脑电, 相位锁定值, 矩阵, 阈值, 脑功能网络, 脑网络, 复杂网络, 差异, EEG, driv+, fatigue, exhaust+, tire+, tiring, doz+, phase, lock+, value, PLV, matrix, threshold, set+, brain, network, complex, differ+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 105286890 A (JIANGXI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 03 February 2016 (2016-02-03) description, paragraphs [0023]-[0117], and figures 1, 4 and 6	1-7
Y	CN 108577835 A (TAIYUAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 28 September 2018 (2018-09-28) description, paragraphs [0060]-[0109], and figures 1-5	1-7
Y	曹锐 (CAO, Rui). "非线性与复杂网络理论在脑电数据分析中的应用研究 (Nonlinear and Complex Network Theory in the Application of EEG Data Analysis Research)" 中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑 (Chinese Doctoral Dissertations Full-text Database Information Science and Technology), No. 8, 15 August 2015 (2015-08-15), ISSN: 1674-022X, text, pages 52-55 and 62-71	7
PX	CN 109770923 A (WUYI UNIVERSITY) 21 May 2019 (2019-05-21) claims 1-7, description, paragraphs [0009]-[0032], and figures 1-5	1-7
A	CN 105956546 A (HANGZHOU DIANZI UNIVERSITY) 21 September 2016 (2016-09-21) entire document	1-7



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

18 September 2019

Date of mailing of the international search report

08 October 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

International application No.

PCT/CN2019/088445**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 101810479 A (TIANJIN UNIVERSITY) 25 August 2010 (2010-08-25) entire document	1-7
A	WO 2017152059 A1 (UNIVERSITY OF TENNESSEE RESEARCH FOUNDATION) 08 September 2017 (2017-09-08) entire document	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/088445

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	105286890	A	03 February 2016	None			
CN	108577835	A	28 September 2018	CN	108577835	B	19 July 2019
CN	109770923	A	21 May 2019	None			
CN	105956546	A	21 September 2016	None			
CN	101810479	A	25 August 2010	CN	101810479	B	14 September 2011
WO	2017152059	A1	08 September 2017	US	2019059803	A1	28 February 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/088445

A. 主题的分类 A61B 5/18(2006.01)i; A61B 5/0476(2006.01)i; A61B 5/0478(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) A61B 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)) CNPAT, CNKI, EPDOC, WPI: 驾驶, 疲劳, 疲惫, 瞌睡, 劳累, 疲倦, 脑电, 相位锁定值, 矩阵, 阈值, 脑功能网络, 脑网络, 复杂网络, 差异, EEG, driv+, fatigue, exhaust+, tire+, tiring, doz+, phase, lock+, value, PLV, matrix, threshold, set+, brain, network, complex, differ+																							
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>Y</td> <td>CN 105286890 A (江西科技学院) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 说明书第[0023]-[0117]段, 图1、4、6</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 108577835 A (太原理工大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 说明书第[0060]-[0109]段, 图1-5</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>曹锐. “非线性与复杂网络理论在脑电数据分析中的应用研究” 中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第8期, 2015年 8月 15日 (2015 - 08 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第52-55、62-71页</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109770923 A (五邑大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-7, 说明书第[0009]-[0032]段, 图1-5</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105956546 A (杭州电子科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101810479 A (天津大学) 2010年 8月 25日 (2010 - 08 - 25) 全文</td> <td>1-7</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	Y	CN 105286890 A (江西科技学院) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 说明书第[0023]-[0117]段, 图1、4、6	1-7	Y	CN 108577835 A (太原理工大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 说明书第[0060]-[0109]段, 图1-5	1-7	Y	曹锐. “非线性与复杂网络理论在脑电数据分析中的应用研究” 中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第8期, 2015年 8月 15日 (2015 - 08 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第52-55、62-71页	7	PX	CN 109770923 A (五邑大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-7, 说明书第[0009]-[0032]段, 图1-5	1-7	A	CN 105956546 A (杭州电子科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文	1-7	A	CN 101810479 A (天津大学) 2010年 8月 25日 (2010 - 08 - 25) 全文	1-7
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
Y	CN 105286890 A (江西科技学院) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 说明书第[0023]-[0117]段, 图1、4、6	1-7																					
Y	CN 108577835 A (太原理工大学) 2018年 9月 28日 (2018 - 09 - 28) 说明书第[0060]-[0109]段, 图1-5	1-7																					
Y	曹锐. “非线性与复杂网络理论在脑电数据分析中的应用研究” 中国博士学位论文全文数据库 信息科技辑, 第8期, 2015年 8月 15日 (2015 - 08 - 15), ISSN: 1674-022X, 正文第52-55、62-71页	7																					
PX	CN 109770923 A (五邑大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-7, 说明书第[0009]-[0032]段, 图1-5	1-7																					
A	CN 105956546 A (杭州电子科技大学) 2016年 9月 21日 (2016 - 09 - 21) 全文	1-7																					
A	CN 101810479 A (天津大学) 2010年 8月 25日 (2010 - 08 - 25) 全文	1-7																					
☒ 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		国际检索报告邮寄日期																					
2019年 9月 18日		2019年 10月 8日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																					
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		耿娜 电话号码 86-(10)-53962385																					

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	WO 2017152059 A1 (UNIVERSITY OF TENNESSEE RESEARCH FOUNDATION) 2017年 9月 8日 (2017 - 09 - 08) 全文	1-7

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/088445

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	105286890	A	2016年 2月 3日	无	
CN	108577835	A	2018年 9月 28日	CN 108577835	B 2019年 7月 19日
CN	109770923	A	2019年 5月 21日	无	
CN	105956546	A	2016年 9月 21日	无	
CN	101810479	A	2010年 8月 25日	CN 101810479	B 2011年 9月 14日
WO	2017152059	A1	2017年 9月 8日	US 2019059803	A1 2019年 2月 28日