doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 01. 024

基于驾驶员脑电微状态分析的草原公路交叉口交通设施组合研究

屈冉,苏杭,李航天,戚春华
(内蒙古农业大学 能源与交通工程学院,呼和浩特 010018)

摘　要:为解决典型草原公路交叉口交通标志组合设置现存问题,针对性优化交叉口交通工程设施组合设置。通过模拟试验,采集 40 名驾驶员的脑电信号,聚类为 5 种(MS1—MS5)微状态地形图,并对驾驶员的反应时间和微状态的持续时间、覆盖率、出现频率、转换概率进行统计分析。试验结果表明,在草原公路交叉口交通设施组合的认知过程中,驾驶员脑电微状态中的默认网络和背侧注意网络发挥主要作用;MS4 的持续时间和 MS1—MS3 的转换概率随交通设施增多呈上升趋势,可以作为评估驾驶员认知负荷的直接指标;微状态指标和反应时趋势分析发现在信息量等级 C,即 4 种交通工程设施组合时驾驶员大脑状态具有最佳表现,认知能力最强,负荷较小且反应最快。

关键词:草原公路交叉口;交通工程设施;认知负荷;微状态;量化模型
中图分类号:U491. 5+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)01-0207-08

Research on the Combination of Grassland Highway Intersection Traffic Facilities Based on Driver´s EEG Microstate Analysis

QU Ran, SU Hang, LI Hangtian, QI Chunhua
(College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to solve the existing problem of the combination of traffic signs at typical grassland highway intersections, the combination setting of intersection traffic engineering facilities was optimized. Through simulation experiments, the electroencephalogram (EEG) signals of 40 drivers were collected, clustered into 5 (MS1—MS5) microstate topographic maps, and the reaction time and duration, coverage, frequency of occurrence and conversion probability of the drivers were statistically analyzed. The experimental results showed that the default network and the dorsal attention network in the driver´s EEG microstate played a major role in the cognitive process of the combination of traffic facilities at the grassland highway intersection. The duration of MS4 and the conversion probability of MS1—MS3 increased with the increase of transportation facilities, which can be used as direct indicators to evaluate driver´s cognitive load. Microstate indicators and reaction time trend analysis found that at the information level C, that was, the combination of four traffic engineering facilities, the driver's brain state had the best performance, the strongest cognitive ability, the smaller load and the fastest response.

Keywords: Grassland highway intersection; traffic engineering facilities; cognitive workload; microstate; quantify the model

0　引言

相关调查研究发现,草原地区约 50%的交通事故发生在道路交叉口附近[1]。交叉口作为交通流交汇点和道路关键控制节点,行车环境复杂、车辆行驶流线多变、冲突点多[2]。同时,草原公路线形单一、路侧景观单调、地形地貌变化小,驾驶员操作转换频率低,极易引发驾驶员精神疲劳,导致驾驶员注意力不集中,处理信息能力下降,致使交叉口成为草原公路交通安全重点风险区域。结合前期调查发现,草原公路小型平面交叉口数量多,间距密,交通设施设置不合理、连续性差[3-5]。因此,研究草原公路交叉口交通工程设施组合对驾驶员脑电信号的影响,对深入探究驾驶员认知机理和负荷能力,进而提高交通设施设置合理性和交叉口安全水平有重要意义。

脑电微状态是大脑全局功能状态的瞬时表征,

收稿日期:2023-03-01
基金项目:国家自然科学基金项目(51768057);内蒙古自治区自然科学基金项目(2020BS05036);内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划项目(NMGIRT2304)。

第一作者简介:屈冉,硕士,讲师。研究方向为公路交通系统工程。E-mail: 280381535@ qq. com

引文格式:屈冉,苏杭,李航天. 基于驾驶员脑电微状态分析的草原公路交叉口交通设施组合研究[J]. 森林工程, 2024, 40(1):207-214.

QU R, SU H, LI H T. Research on the combination of grassland highway intersection traffic facilities based on driver´s EEG microstate analysis[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):207-214.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可以反映脑网络的整体变化,已经成为近年来国际上常用的认知和心理评估手段。传统的脑电分析方法中,研究者通常通过对 α、β 波等特定脑电波的时域、频域进行研究,探讨驾驶员的脑力负荷[6];或针对 N200、P300 等认知电位成分研究驾驶员的认知能力[7]。其虽然具有时间分辨率高、便携性好等优点,但包含的空间信息较少,易受到环境干扰。微状态分析则能在一定程度上弥补脑电微状态(electroencephalogram,EEG)在识别空间分辨率和分析大规模脑网络变化方面的不足。Muthukrishnan 等[8]和 Kim 等[9]通过视觉空间工作记忆任务和心算任务比较了脑电微状态在不同任务负荷下的区别,探究了大脑工作记忆的机理;D´Croz-Baron 等[10]设计了听觉和视觉任务进行感官刺激,以研究大脑不同状态下微状态的改变;Krylova 等[11]使用脑电微状态区分了不同负荷任务下被试的警戒水平。随着脑科学与交通系统的交叉融合,脑电微状态逐渐开始在交通领域应用。李文斌等[12]和周凌霄等[13]通过模拟试验得到驾驶员脑电微状态指标,进而评估了驾驶员脑力负荷。

综上所述,国内外学者针对交叉口交通工程设施已进行了大量研究,在运用脑电微状态研究脑认知与脑负荷等领域也取得了一定的进展,但基于脑电微状态进行的草原公路交叉口交通设施组合设置研究尚处于起步阶段。鉴于此,通过开展模拟试验,搭建典型草原公路交叉口场景,设置不同组合的交通工程设施,分析不同组合对驾驶员脑电微状态指标的影响规律,结合反应时间,探究适宜的交通工程设施组合,为草原公路交叉口交通工程设施设置和道路交通系统安全提供理论依据和实践建议。

1 模拟试验设计

驾驶人在实际道路驾驶过程中,容易受到环境中各种干扰因素的影响,而产生其他脑电伪迹。驾驶模拟器不仅可以很好控制外部因素的影响,同时能够保证试验安全、适合大样本量试验。课题组前期相关研究也验证了模拟驾驶试验研究的有效性[4,14],满足本研究的需要,因而采用虚拟驾驶模拟平台开展试验。

1.1 试验人员

调查发现,18~25 岁为事故高发年龄区间[15],且长途驾驶员多为男性。数理统计简单随机抽样中样本量的计算公式如下。

$$n \geqslant \frac{Z^2 S_D^2}{d^2}。\tag{1}$$

式中:n 为试验所需样本量;Z 为某一置信水平的 Z 统计量,在 95%置信水平下,$Z=1.960$;S_D 为驾驶员各指标的总体标准差,$S_D=0.629$;d 为驾驶员各指标的允许误差,$d=0.040$。

根据式(1)计算,至少需要 38 名被试人员。结合试验需要,最终选取 40 名青年驾驶员作为试验人员,其中男性 25 名,女性 15 名。要求被试人员试验前身心状态良好,视力或矫正视力正常且持有驾驶证,具有法定驾驶资质。

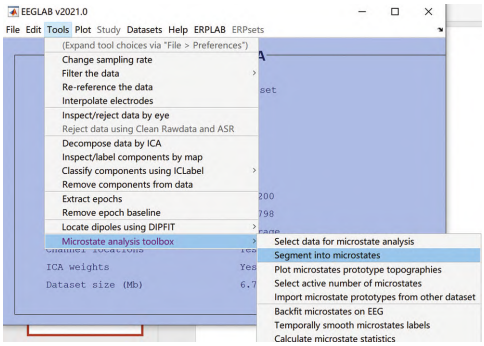
1.2 试验设备

模拟驾驶系统结合 E-Prime 软件提供尽可能真实的道路环境,呈现交通标志组合作为刺激材料。脑电采集设备为 32 导联 BrainAmp 型设备,如图 1(a)所示。对采集到的脑电数据使用开源工具箱 EEGLAB 进行分析处理,操作界面如图 1(b)所示。



(a) 脑电采集设备

(a)EEG acquisition equipment



(b) EEGLAB 操作页面

(b)EEGLAB operation page

图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3　交通设施组合选择

经过对内蒙古地区典型一、二级草原公路的调查发现,小型平面交叉口占绝大多数,其前置的交通工程设施主要包括指路标志、交叉口警告标志、禁令标志、地面诱导线以及红白警示桩等。结合课题组前期对草原公路交通工程设施的研究[3-5],将交叉口常见的交通工程设施组合按照交通工程设施种类数量[4]划分成 4 个信息量等级,见表 1。

表 1　交通标志组合信息量等级划分

Tab. 1 Division of traffic sign combination information level

信息量等级 Level of information	标志种类数/种 Number of sign types	试验场景 Experimental scenario
A	2	
B	3	
C	4	
D	5	

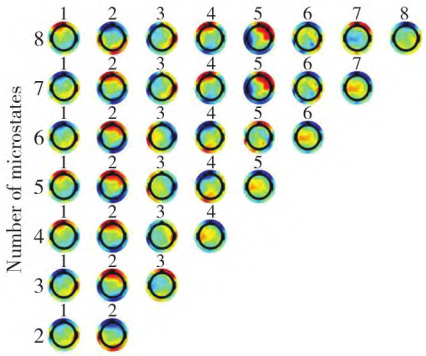
1.4　试验流程

模拟试验分 2 个阶段, 1)练习试验,连接脑电设备后告知试验人员试验目的与任务,进行约 5 min 的练习,了解操作内容和程序; 2)正式试验,练习完成后保持一段静息状态,关闭手机、车内空调等电子设备,避免干扰。运行 E-Prime 软件,屏幕中间呈现注视点 1 000 ms,后以 7 500 ms 为时间窗[16-17]随机播放不同信息量的交通标志组合方案,被试认读信息完成后做出按键反应,全程记录脑电数据和被试按键时间。

2　结果与分析

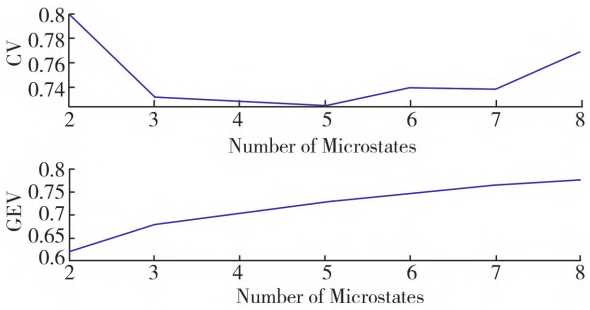
2.1　微状态聚类

脑电微状态分析方法是基于脑电地形图分类进行的。为提高分析的精度,设置了多种脑电微状态分类模式,进行对比选择,如图 2(a)所示。由图 2(b)可知,经过聚类指标的分析,微状态全局解释方差(Global Explained Variance, GEV)和交叉验证标准(Cross-Validation Criterion, CV)在脑电地形图聚为 5 类时具有最佳表现,既能代表大多数脑电信号,残余噪声又最少。最终将驾驶员脑电信号分为 5 种微状态地形图(MS1—MS5)。脑源分析[18]研究表明脑电微状态与功能系统存在对照关系,微状态 MS1 与听觉网络和语音处理有关;MS2 在前额叶和后枕叶电势较高,是默认模式网络的一部分,默认模式网络是一个任务负性网络,随着认知任务难度的增加而减少活动,而在注意力降低时变得活跃;微状态 MS3 与视觉网络有关,反映了视觉意象型活动;MS4 与背侧注意网络相关,可以反映注意力增加、认知控制能力、焦点转换和重新定位的反射性;MS5 则常在任务微状态研究中出现[19-20]。



(a) 脑电地形图

(a) EEG topographic map



(b) 聚类指标

(b) Clustering index

图 2　微状态聚类结果

Fig. 2 Microstate clustering results

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 指标分析

微状态时间序列映射着丰富的神经信息和生理学意义,其中平均持续时间、覆盖率、发生频率和转换概率常被用于描述大脑认知过程、反应任务完成情况和评估脑力负荷[6]。采用 EEGLAB 软件提取上述 5 个微状态在不同信息量等级组合下的平均持续时间、覆盖率、发生频率和转换概率,进行对比分析,探究不同交通工程设施的组合对驾驶员脑电微状态指标的影响差异。

2.2.1 持续时间分析

将微状态在相对稳定状态下维持的平均时间称为持续时间,反映了微状态对应是功能网络及该网络底层神经组件的稳定性。由图 3 可知,无论何种等级的组合认知任务下,微状态 MS2 与 MS4(即默认模式网络和背侧注意网络)的持续时间跟其他 3 种相比较处于较高水平,说明在认知任务中默认模式网络和背侧注意网络在大脑动态中发挥主导作用,活动较为稳定,这与以往的认知任务研究相符合。在交叉口工程设施组合信息量水平达到 C、D 等级时,MS4 显著上升,驾驶员的注意力更加集中,MS2 持续时间则缩短,在 D 等级时甚至低于 MS5,这是任务难度增加、默认网络不稳定的表现。MS4 的平均持续时间超过 MS2,即在此信息量水平下,注意网络相较于默认网络达到了更为稳定的状态,驾驶员注意力较为集中,认知能力较强。

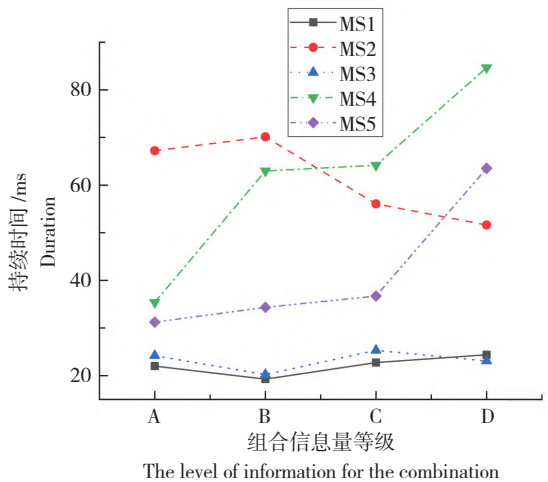


图 3 微状态持续时间

Fig. 3 Microstate duration

对 5 种微状态的持续时间进行单因素方差分析,其中 MS4 和 MS5 方差不齐,需要进行韦尔奇检验。结果表明,微状态 MS4 在不同交通设施组合信息量等级下持续时间具有显著性差异($P<0.05$),其余 4 种微状态在组间和事后多重检验中均没有显著性表现。

微观状态 MS4 脑全局瞬时高电势位于顶叶和枕叶,与背侧注意网络相关,其持续时间的延长说明在负荷增大状态下,更多的注意力资源被调动,从而导致微状态 MS4 的时间参数增加,这与心算任务[21]、推理任务[22]等任务态研究对微状态变化的探索分析一致。可以推定 MS4 的持续时间与认知负荷呈正相关关系,能够表征驾驶员认知负荷的增加。而在信息量等级为 A、B 水平时,MS4 微状态持续时间较短,注意功能网络相对不太稳定,可能将导致对交通设施组合认知判断处理过程较早结束,这种情况在整个任务完成过程中重复性、间歇性地进行,微状态的总体平均时间就会出现显著差异,导致背侧注意网络在认知过程中维持时间较短,从而难以迅速、准确地对交叉口交通设施组合完成认知和判断,影响行车安全。

2.2.2 发生频率分析

发生频率指某一微状态出现并保持稳定期间平均每秒的出现次数,反映了其底层神经发生器被激活的趋势,如图 4 所示。

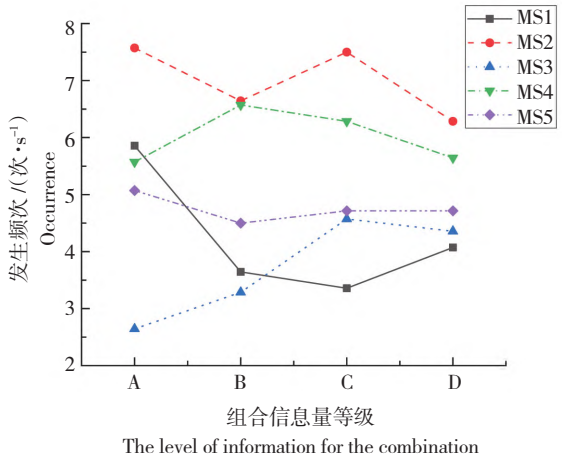


图 4 微状态发生频率

Fig. 4 Frequency of Microstate Occurrence

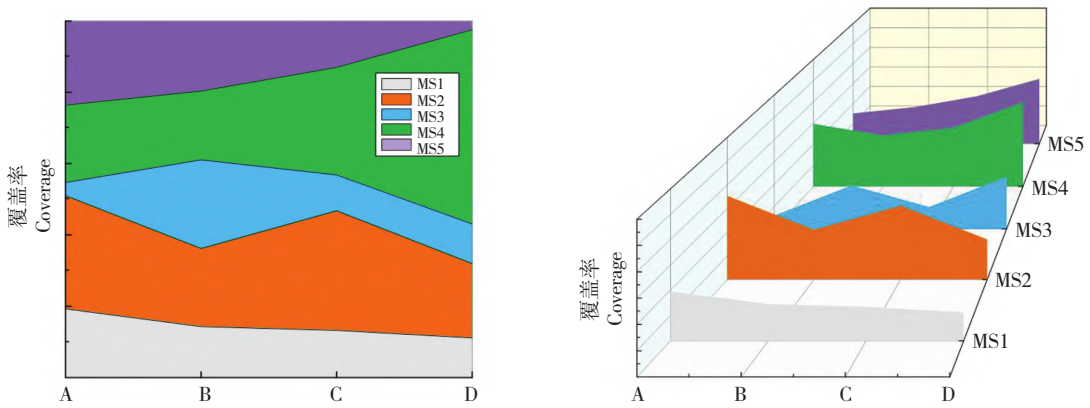
由图 4 可知,微状态 MS2 和 MS4 的发生频率相较于其他 3 种微状态来说较高,说明交通设施组合的认知任务当中,背侧注意网络和默认模式网络不

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

断被激活。MS2 作为任务负性网络，其发生频率整体随交通工程设施组合信息量等级增高而出现下降趋势，但在 C 等级信息量出现波动，说明 C 等级的交通工程设施组合信息量较为符合人体工程学，驾驶员感到轻松时出现了认知负荷的下降。而对于微状态 MS4 而言，在信息量等级 B 的出现频次高于等级 A，但随后在等级 C、D 出现下降趋势，这与 Kim 等[10]的研究：表现良好的受试者在任务期间微状态 MS3 的平均持续时间和频率减少，微状态 MS4 的平均持续时间和频率增高，表明微状态特征可以反映任务完成情况这个结果相悖。但也有研究认为[16]，微状态 MS4 作为背侧注意网络，其发生频率反映着工作记忆功能被激活的趋势，发生频率呈现上升趋势说明完成相应认知加工过程需要重复更多次，也就是说任务完成更为困难。结合本研究实际情况考量，认为信息量等级 B—D 微状态 MS4 的出现频次呈现下降趋势有 2 个主要原因。首先是在交通工程设施种类增多的情况下，驾驶员分配了更多的脑力给视觉系统，而交通标志之间的配合和关联性使驾驶员能够更轻松地理解其指引含义从而做出处理、判断和操作，不必对大脑的额叶与顶叶的认知记忆功能反复激活；其次，由上节可知 MS4 的持续时间较其他微状态来说更长、更具稳定性，这可能导致了每秒内其出现次数的下降。

2.2.3　覆盖率分析

计算整个试验分析期间每个微状态覆盖的总时间占比，即覆盖率，能够更为直观地看出认知任务中不同功能网络的变化，对驾驶员的脑网络状态进行监测和评估。结合微状态持续时间和出现频次的研究，可以总结出驾驶员的脑电微状态覆盖趋势，其示意图如图 5 所示。



（a）覆盖率 2D 趋势图
（a）Coverage 2D trend chart

（b）覆盖率 3D 趋势图
（b）Coverage 3D trend chart

图 5　不同信息量等级下各微状态覆盖趋势示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the coverage trend of each microstate under different level of information

由图 5 中可知，随着交叉口交通工程设施组合信息量等级的增加，驾驶人认知网络 MS4 所占用的资源也有所增加，而听觉微状态 MS1 所占用的资源却在减少。默认网络映射的微状态 MS2 从信息量等级 B 到信息量等级 C 的变化显示出轻微的上升趋势，其余阶段一直处于下降状态。微状态 MS3 和 MS5 则是在信息量等级 B 到信息量等级 C 出现小幅下降，在其余阶段呈现上升趋势。

通过分析可以看出，随着认知负荷任务的加强，驾驶人的大脑注意能力将持续增强，积极参与操纵和保持注意力，以控制其行为进而实现安全驾驶，这与国内外学者的以往研究一致[18]。然而由于认知任务的进展，随着信息量增大，认知负荷程度的加深，听觉网络资源的减少意味着对外部声音环境的关注呈下降趋势，但是视觉微状态占用了更多的资源，并且需要更多的精力用于视认任务的处理。默认网络微状态 MS2 和 MS5 覆盖率的波动说明了驾驶员脑力分配的复杂性，其认知能力并不与

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

信息量负荷绝对线性相关。

2.2.4 转换概率分析

从一个微状态转换到其他任何微状态的概率都不是随机的,因此微状态之间的转换序列具有重要的神经生理学意义[6]。对在不同信息量等级下的微状态转换概率进行方差分析,其中 MS1 与 MS3 之间的相互转换率和 MS2 至 MS1、MS5 至 MS4 的转换概率方差不齐,采用非参数检验进行分析。组间比较发现,信息量等级 A—D 的 MS1—MS3 的转换率存在显著性差异($P<0.05$),可用作交通工程设施组合信息量差异的评价指标。

进一步对其具体含义进行分析,MS1 代表听觉网络,MS3 代表视觉网络,MS1—MS3 的单侧转换概率表示脑力分配由听觉系统转换至视觉系统。由图 6 可知,MS1—MS3 的转换概率随交叉口交通工程设施组合信息量等级的升高而升高,但在等级 C—D 幅度较大,说明交通设施组合的信息量在这 2 个等级之间变化时,驾驶员视认负荷受到较大影响。另外,组内分析表明,在交通工程设施组合认知任务下,MS2 和 MS4 之间的转换概率与其他微状态相比较为频繁,两者转换概率数值之和在信息量等级 C 时达到峰值,在信息量等级 D 时出现轻微下降。有研究发现[15],二者相互转换率与任务完成程度正相关, 也就是说,在 C 等级时,驾驶员对交通设施组合的认知任务具有最高的完成度,而达到 D 等级时,交通设施个数增多,信息量增大,驾驶员的认知完成比例有所下降。

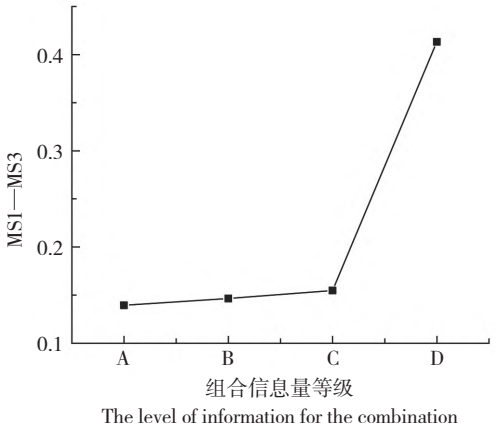


图 6 MS1—MS3 转换概率

Fig. 6 MS1 to MS3 conversion probability

2.2.5 讨论

对上述指标总结分析,脑电微状态 MS2(默认网络)与 MS4(背侧注意网络)的相关指标均处于较高水平,默认网络和背侧注意网络在交叉口交通设施组合的认知任务中始终发挥主导作用。持续时间和覆盖率的研究结果表明,A、B 等级下的交通设施组合信息量过少,对驾驶员脑状态刺激较小,认知功能网络持续时间较短,覆盖率较低,使驾驶员不能及时地、完整地理解交叉口交通设施组合所传达的含义。在 C、D 等级的组合刺激下,驾驶员背侧注意网络的持续时间和覆盖率超过默认网络,认知功能网络相对活跃,信息处理能力上升。发生频率和转换概率的相关结果则表明,在处理 C 等级的交通设施组合时,驾驶员任务负性网络发生频率较高,即认知难度相对较小,MS2 与 MS4 相互转换概率达到峰值,信息处理能力和任务完成度最高。相较于 C 等级而言,D 等级时驾驶员的默认网络发生频率和转换概率出现下降趋势,即信息量较大导致驾驶员大脑负荷水平高,认知能力降低。综合分析表明,在 C 等级交通设施组合时,驾驶员脑电微状态指标表现最佳,为草原公路交叉口交通设施最佳的设置组合。

2.3 **反应时间分析**

反应时间是指从交通设施组合出现到驾驶员进行认读,完成按键行为所产生的时间间隔。反应时间是一个综合性指标,能够更加直观地表征驾驶员认知完成情况,反映驾驶员认知能力和负荷水平。反应时间在实际应用中起着重要作用,部分交通事故发生的原因就是驾驶人的反应时间不够,来不及判断、操作。反应时间与脑电信号的联合应用是一种被广泛应用的认知任务评价方法[23]。对驾驶员的反应时间以不同组合信息量等级为因子进行单因素方差分析,发现组间存在显著性差异($P<0.01$),说明反应时间可以作为表征信息量变化的指标。

由图 7 可知,驾驶员的反应时间随交通设施组合信息量等级的升高呈 U 形变化,从 A 到 C 等级逐渐降低,在 D 等级出现了上升趋势。交通设施组合提供的信息量过少或过多时,驾驶员都需要耗费更长时间来处理判断、做出反应。这也验证了驾驶员脑电微状态指标在 C 等级交通设施组合表现最好,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

认知功能网络发挥最佳效用,且负荷较小。即 C 等级为建议交通设施组合信息量。

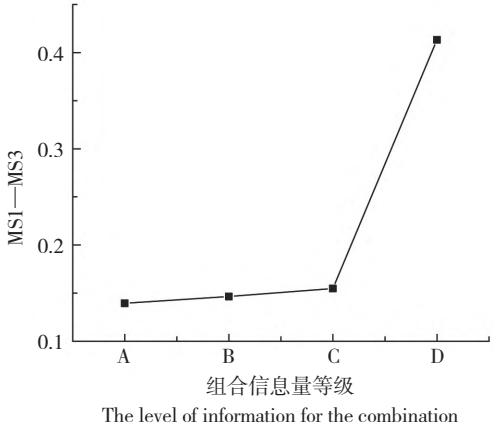


图 7　不同等级交通设施组合下的反应时间

Fig. 7 Reaction time for different levels of transportation facilities

3　结论

1)将交叉口交通工程设施组合作为一个整体进行研究,分析不同信息等级下驾驶员的脑电微状态指标,发现在组合认知任务中微状态 MS2 和 MS4 始终占据主导地位,默认网络和注意网络发挥主要作用。

2)对微状态指标持续时间、覆盖率、发生频次和转换概率进行统计分析,发现 MS4 的持续时间和 MS1—MS3 的转换概率随交通设施种类的增加而呈现上升趋势,可以作为驾驶员认知负荷评价的直接依据指标。

3)对微状态指标和反应时间进行趋势观察和对比分析。结果表明,在交叉口交通工程设施组合信息量等级为 C,即设施种类为 4 种时,驾驶员的脑电微状态指标具有最佳表现,为适宜信息量。为草原地区相关部门进一步优化交叉口交通工程设施组合设置提供了理论依据。

【参　考　文　献】

[1] 宫希良. 内蒙古一级公路交通安全分析与评价研究[D]. 西安:长安大学,2009.
GONG X L. Analysis and evaluation of first-class highway traffic safety in Inner Mongolia[D]. Xi´an: Chang´an University, 2009.

[2] 宗芳,石蕊,刘怿轩,等. 信号交叉口行车风险场建立及车辆通行行为优化[J]. 中国公路学报,2022,35(10):244-253.
ZONG F, SHI R, LIU Y X, et al. Construction of risk field and optimization of driving behaviors for signalized intersections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10):244-253.

[3] 李航天,杨锋,朱守林,等. 草原公路直线段交通工程设施信息量对驾驶员心率变异性的影响研究[J]. 森林工程,2022,38(6):172-178.
LI H T, YANG F, ZHU S L, et al. Study on influences of traffic engineering facilities information quantity on drivers HRV in straight section of grassland highway[J]. Forest Engineering, 2022, 38(6):172-178.

[4] 王笑男. 基于驾驶员脑认知特性的草原公路交叉口交通标志组合研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
WANG X N. Based on drivers´ brain cognitive features of prairie highway intersection traffic signs combination study [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[5] 韩磊,朱守林,高明星,等. 注视熵和马尔科夫链的弯道诱导设施信息量研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(8):122-128.
HAN L, ZHU S L, GAO M X, et al. Research on information volume of guidance facilities on bends based on gaze entropy and Markov chain[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8):122-128.

[6] 许子明,牛一帆,温旭云,等. 基于脑电信号的认知负荷评估综述[J]. 航天医学与医学工程,2021,34(4):339-348.
XU Z M, NIU Y F, WEN X Y, et al. A review of cognitive workload assessment based on EEG[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2021, 34(4):339-348.

[7] CALCAGNO A, COELLI S, COUCEIRO R, et al. EEG monitoring during software development[C]//2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). Palermo, Italy: IEEE, 2020:325-329.

[8] MUTHUKRISHNAN S P, AHUJA N, MEHTA N, et al. Functional brain microstate predicts the outcome in a visuospatial working memory task [J]. Behavioural Brain Research, 2016, 314(1): 134-142.

[9] KIM K, DUC N T, CHOI M, et al. EEG microstate features according to performance on a mental arithmetic task [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 343.

[10] D´CROZ-BARON D F, BRECHET L, BAKER M, et al. Auditory and visual tasks influence the temporal dynamics of EEG microstates during post-encoding rest[J]. Brain Topography, 2021, 34(1): 19-28.

[11] KRYLOVA M, ALIZADEH S, IZYUROV I, et al. Evi-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

dence for modulation of EEG microstate sequence by vigilance level[J]. NeuroImage, 2021, 224(1):117393.

[12] 李文斌,康阳,谢小萍,等. 基于脑电微状态分析的模拟飞行多任务脑力负荷敏感性研究[J]. 载人航天,2022,28(1):55-62.
LI W B, KANG Y, XIE X P, et al. Study on mental workload sensitivity during multitasking in simulated flight based on EEG microstate analysis[J]. Manned Astronautics, 2022, 28(1): 55-62.

[13] 周凌霄,丁一琦,戴渊明,等. 基于脑电"微状态"的驾驶员脑负荷研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2014,34(4):23-26.
ZHOU L X, DING Y Q, DAI Y M, et al. Research on driver brain load based on EEG ˊmicrostate˙[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2014, 34(4):23-26.

[14] 戚春华,王笑男,朱守林,等. 基于驾驶员视觉兴趣区域的交通工程设施信息量阈值研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):53-60.
QI C H, WANG X N, ZHU S L, et al. Traffic engineering facility information threshold based on driverˊs visual area of interest [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(7):53-60.

[15] 徐鑫. 我国道路交通事故规律特点及预防对策分析[J]. 中国安全科学学报,2013,23(11):120.
XU X. Analysis of road traffic accidents in China and measures to prevent them[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(11):120.

[16] 马永杰. 基于驾驶员视认特性的匝道分流连接部平面线形指标及地点方向信息预告设置研究[D]. 西安:长安大学,2019.
MA Y J. Study on plane line and location direction advanced information setting of ramp junction based on analysis of driverˊs visual identity[D]. Xiˊan: Changˊan University, 2019.

[17] 程盛,毛阿立,李婷,等. 高速公路BIM正向设计技术体系研究及应用实例[J]. 公路工程,2023,48(4):91-97.
CHENG S, MAO A L, LI T, et al. Research and application example of expressway BIM forward design technology system[J]. Highway Engineering, 2023, 48(4): 91-97.

[18] BRITZ J, VAN DE VILLE D, Michel C M. BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics[J]. Neuroimage, 2010, 52(4): 1162-1170.

[19] 杨雄. EEG时序特征选取及其脑网络构建与分析[D]. 太原:太原理工大学,2019.
YANG X. EEG timing feature selection and its brain network construction and analysis[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[20] 张卫华,陶虎,陈乾. 城市快速路互通立交分流区交通冲突预测模型[J]. 公路工程,2022,47(1):149-155.
ZHANG W H, TAO H, CHEN Q. The predicting model of traffic conflicts in diverging segments of expressway interchange[J]. Highway Engineering, 2022, 47(1):149-155.

[21] POSKANZER C, DENIS D, HERRICK A, et al. Using EEG microstates to examine post-encoding quiet rest and subsequent word-pair memory [J]. Neurobiology of Learning and Memory, 2020, 181:107424.

[22] BRECHET L, BRUNET D, BIROT G, et al. Capturing the spatiotemporal dynamics of self-generated, task-initiated thoughts with EEG and fMRI [J]. Neuroimage, 2019, 194: 82-92.

[23] MAGNUSON J R, IAROCCI G, DOESBURG S M, et al. Increased intrasubject variability of reaction times and single-trial event-related potential components in children with autism spectrum disorder [J]. Autism Research, 2020, 13(2): 221-229.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net