

基于事件相关电位绝对时间标记法的 汽车造型语义评价方法

邵景峰^{1,2}, 杨志刚¹, 杨再峰², 郑恩泽²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海汽车集团股份有限公司技术中心 设计中心, 上海 201804)

摘要: 借助 Muse 脑电设备, 采用绝对时间标记法, 探索事件相关电位(ERP)实验的造型评价方法, 从而缩短造型设计评估周期, 提高企业内部造型设计决策效率。首先通过句尾歧义经典实验范式, 验证 Muse 脑电设备可用于 ERP 的 N400 经典实验范式研究, 其次进行多模态语义加工研究的复合刺激范式实验, 验证 Muse 脑电设备测试结果。结果表明, Muse 脑电设备在对汽车造型语义与文字语义进行测量时, 能够准确采集 N400 成分并进行比较。N400 成分可以在特定刺激下反映用户的真实想法, 提高汽车造型决策效率, 降低造型设计成本。

关键词: 汽车造型; 绝对时间标记法; 事件相关电位

中图分类号: TB472

文献标志码: A

Semantic Evaluation Method of Automobile Modeling Based on Event-Related Potential Experiment Absolute Time Marking Method

SHAO Jingfeng^{1,2}, YANG Zhigang¹, YANG Zaifeng², ZHENG Enze²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Motor Corporation Limited Technical Center, Shanghai Automotive Industry Corp., Shanghai 201804, China)

Abstract: With the help of the Muse EEG device, this paper explores the styling evaluation method of event-related potential experiment (ERP) by using the absolute time notation method to shorten the styling design evaluation cycle and improve the efficiency of internal styling design decision-making in the enterprise. First, through the classic experimental paradigm of sentence ending ambiguity, it is verified that the Muse EEG device can be used for the N400 component research

of ERP. Then, the compound stimulation paradigm experiment of multi-modal semantic processing research is performed to verify the test results of the 32-lead EEG device and the Muse EEG device. The results show that the Muse EEG device can effectively collect the N400 EEG data. The N400 amplitudes induced by 32-lead EEG and Muse EEG devices are consistent when measuring the semantics of car modeling and text semantics. It is concluded that N400 can reflect the user's real and objective thoughts under certain stimuli, which can improve the efficiency of automobile styling decision-making and reduce the cost of styling design.

Key words: car styling; absolute time notation method; event-related potential experiment

汽车造型设计是一个由创意驱动的、不确定的、复杂的设计求解过程^[1]。传统汽车主机厂通常在每一款车型设计最终锁定前, 为了更加准确地决策, 会进行大规模的实车主观问卷调研^[2]。实际操作过程中发现主观问卷调研形式容易出现“话题领导者”“意见领袖”“随大流”和“所说非所想”等主观想法扭曲客观事实的情况, 使最终调研数据正确率偏低, 不能提供客观准确的决策参考, 并且现行传统主观问卷调研方式成本较高, 参与人员众多, 给企业的发展带来负担。为此, 研究引入基于使用便携式脑电采集设备的事件相关电位技术进行汽车造型语义评价实验, 测量用户对汽车造型的感性意向^[3-4]。

在自然状态下大脑加工语义而发生的脑电被称为自发电位, 通过特定刺激诱发的脑电称为诱发电位, 即事件相关电位(event-related potential, ERP)。Neuroscan 32 导脑电采集设备采用 10-20 国际标准

收稿日期: 2021-09-16

第一作者: 邵景峰(1976—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要研究方向为汽车造型设计、设计决策。

E-mail: shaojingfeng@saicmotor.com

通信作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学。

E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

导联系统布置电极,在测量用户语义认知过程中,虽然能得到用户真实的想法,但存在成本高、操作复杂、实验时间长(50~60 min)等众多缺点^[5]。因此,本研究借助Muse便携式脑电设备采集和描述用户大脑的语义加工特征属性,改进ERP实验方法,提出绝对时间标记法,提高汽车造型决策的效率^[6]。

现有研究表明,大脑通过整套认知神经机制控制人的感知和反应行为。当刺激发生后,在100~200 ms之间、200~600 ms之间和600 ms之后,分别是认知加工的早期、中期和晚期阶段^[7-8]。在脑认知领域,研究主要集中在大脑认知加工中期。Kutas和Hillyard在1980年发现语句最后一个单词按照25%概率随机出现不可预料的歧义词,将在250~600 ms之间产生一个潜伏期约400 ms的负波即N400。该范式被称为N400经典实验范式^[8]。此后实验发现不同词性、反义词、无关词能够明显诱发N400成分^[9-10]。语义脑认知实验范式以文字与文字匹配为起点,逐步发展为文字与图片、图片与图片匹配范式^[11],呈现形式也扩展到了听觉语言、手势语言等^[12]。为了更深入地研究与语义统一有关的脑过程,Zude等^[13]采用同步脑电-功能磁共振(EEG-fMRI)技术对与语义统一相关的N400变化进行时间锁定。Delogu等^[14]对语言研究中ERP的时空重叠问题进行了研究,发现N400反映了词汇检索过程。Meade等^[15]将N400效应解释为目标词和侧翼词共同语义特征(如动物、毛茸茸的)联合激活的便利加工效应,以及词汇决策的促进加工效应。综上所述,语义和语用不适合、语义类别错误以及与已有知识不一致等诸多情况都会诱发N400效应。可以肯定的是N400确与语义的期待有关,并且其波幅随语义背离程度的增大而增大^[8]。因此,可以通过它来检验与语义启动有关的理论和模型。

基于上述分析,本研究设计两个独立实验,探索Muse脑电设备在以绝对时间标记法代替事件标记信号法的情况下,在一台电脑上进行ERP N400成分研究的可行性,以简化实验操作,提高汽车造型决策效率^[16]。实验一采用诱发N400成分的句尾歧义经典实验范式^[17],验证Muse便携式脑电设备收集ERP数据的准确性。实验二采用复合刺激S1-S2实验范式,以N400指标检验4种不同造型设计方案的用户语义意向,从而为准确了解用户的汽车造型语义需求提供客观指标和参考。研究假设如下:

(1) Muse脑电采集设备,能够验证句尾歧义时诱发的N400波幅大于句尾通顺时诱发的N400

波幅。

(2) 使用Muse设备,以绝对时间标记法采集的N400成分能够准确测量出用户对汽车造型语义的创新性程度。

1 句尾歧义诱发N400成分实验

1.1 实验设计

1.1.1 句尾歧义经典实验范式

本实验采用诱发N400成分的句尾歧义经典实验范式^[8]。选取语法和语义正确,字母大小一致的4个句子为标准刺激组,分别编号为1、3、5和7号。选取语法正确,字母大小一致,但句尾的最后一个词错写为歧义词的4个句子为偏差刺激组,分别编号为2、4、6和8号,如图1所示。每个句子按照词组分成5部分,在屏幕上按照既有顺序每秒呈现一个词组,令被试者默读,采集脑电数据。每个句子随机出现一次,实验流程如图2所示。

- ① 馅饼----太烫了----根本----没法----吃
- ② 芥末----太辣了----我----不敢----飞
- ③ 他在----面包上----抹了----一些----黄油
- ④ 他在----薯条上----抹了----一些----大便
- ⑤ 桂花-----上-----有-----一只----蜜蜂
- ⑥ 茉莉花---上-----有-----一只----长颈鹿
- ⑦ 窗外---瓢泼大雨---根本----没法----回家
- ⑧ 下雨了----快-----打开----你的----台灯

图1 标准刺激语句与偏差刺激语句

Fig.1 Standard stimulus sentences and deviated stimulus sentences

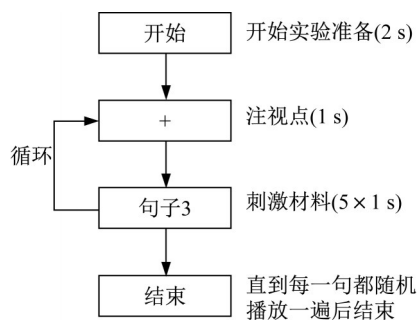


图2 实验流程

Fig.2 Experiment process

1.1.2 绝对时间标记法

绝对时间标记法是以成熟的ERP实验方法为基础,针对企业实际生产需求提出的更高效、更便捷的试验方法。

实验数据采集设备为美国 Interaxon Inc 公司开发的 Muse 便携式脑电设备。该设备的电极位置属于 10-20 国际标准导联系统,一共有 5 导:额叶 3 导电极 (Fpz、AF7 和 AF8)、颞叶 2 导电极 (TP9 和 TP10)。其中 Fpz 为参考电极,AF7、AF8、TP9 和 TP10 是有效采集电极,电极的放置如图 3 所示。Muse 设备可简便有效地获取用户额叶和颞叶的脑电信号,并被许多研究证明可用于 ERP 的测量^[18]。

在实际情况下,企业的汽车造型设计工作强度大,需要更加简单高效的 ERP 实验范式。在 Muse 采集脑电信号的过程中,传统的事件标记信号法操作复杂,故而改用绝对时间标记法进行实验,如图 4 所示。实验开始,刺激发生系统呈现视觉刺激的同时,开始收集绝对时间数据,在实验过程中,每一步时间都精准固定,直到所有刺激呈现完成,停止收集绝对时间并保存脑电数据和绝对时间数据,全部被试者完成实验后,进行数据预处理。实验一的采集流程为:实验开始,刺激发生系统启动,界面出现“开始”字样,与此同时电脑收集绝对时间数据起点。2s 后出现注视集中界面,此画面持续 1 s,随后随机呈

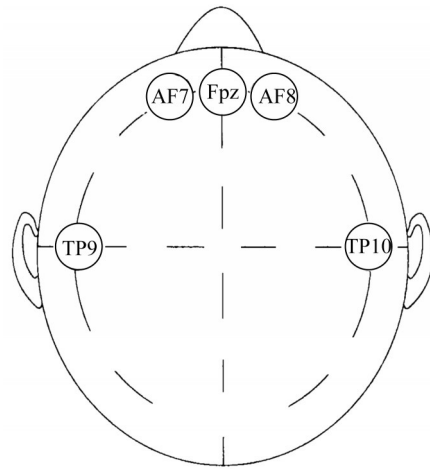


图3 Muse 脑电采集设备导电位示意图
Fig.3 Electrode position

现 8 个语句中的一个,并按顺序每秒呈现这个语句中的一个词组。每句话最后一个词组呈现结束后,返回注视集中界面,保持 1 s 后,随机呈现下一个语句,所有语句都随机呈现一次后,实验结束,保存脑电数据和绝对时间数据。全程被试者不需要进行任何操作,只需注意力集中,默读理解语句语义即可。

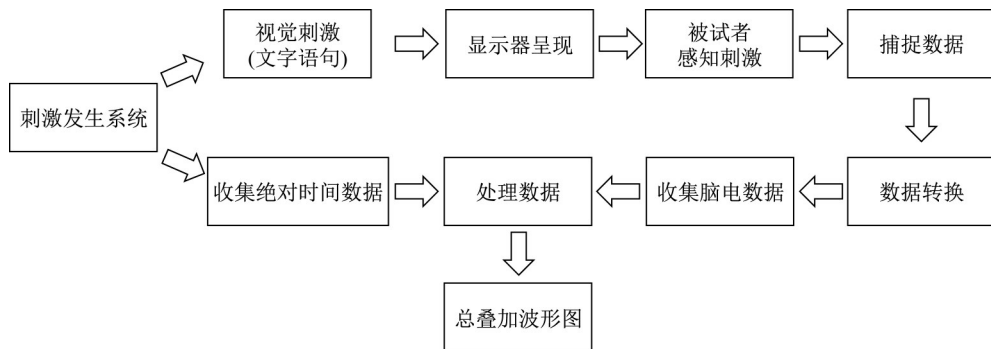


图4 刺激呈现系统流程图
Fig.4 Flowchart of stimulation system

在实验准备过程中,由于多个设备之间通过蓝牙连接传输数据,存在延迟抖动。为了解决这个问题,自主设计了基于 Python 平台的代码程序,用于测量延迟抖动数据。多次同一环境下实验,发现设备系统固定且一直存在 10~25 ms 的延迟抖动。即通过蓝牙传输到电脑上的数据较被试者脑电波真实诱发时间全部延迟 10~25 ms。为了规避误差,在分段分割阶段适度增大比较脑电波幅的时间窗,本实验环境下延迟抖动问题不影响实验结果。

1.2 数据预处理

使用 Python 工具软件自主开发了脑电数据分析系统。其中主要使用 Pygame 模块构建整个实验程

序,使用 PyLSL (python lab stream layer) 模块和 Pythontime 模块分别接收 Muse 采集的脑电数据和视觉刺激发生的绝对时间信号。经过数据预处理,共有 59 个有效数据产生,额叶三导电极 (Fpz、AF7 和 AF8)、颞叶两导电极 (TP9 和 TP10) 阻抗保持在 10 kΩ 以下,采样频率 256 Hz。当载入电极后,以 Fpz 导电位作为参考电极,以 0.1~15.0 Hz 区间为基准进行二阶带通滤波,之后以刺激发生前 200 ms 为起始点,刺激发生后 600 ms 为结束点,细化分段和分割实验数据,去除眼电、眼动、肌电等伪迹信号,针对不同刺激分别作叠加平均,绘制总叠加波形图。具体数据分析流程如图 5 所示。

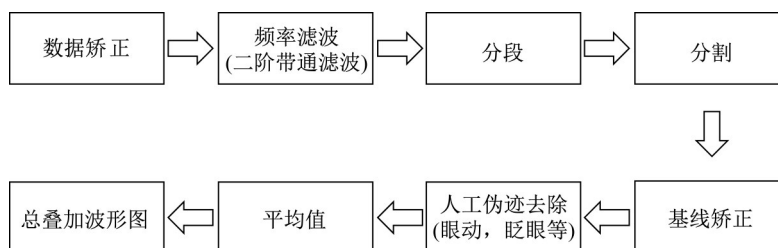


图5 数据分析流程图

Fig.5 Flowchart of data analysis

1.3 被试者招募

本次实验一共招募62名被试志愿者,年龄在23~45岁之间,平均年龄27.2岁,视力或矫正视力正常,身体健康。所有被试者在实验前被告知实验流程,并签署了实验知情同意书。

实验开始前10 min准备好并佩戴Muse设备。屏幕呈现和数据采集程序将由电脑自动进行,其间要求被试者距离显示器50 cm,平视显示器中央,保持身体不动,尽量减少眨眼和面部动作。每组实验时间大约100 s。

1.4 数据分析与结果

本实验诱发出多个脑电成分,研究将实验数据分为数值与图形两个部分,对其进行主效应分析。在句尾歧义与否两种条件下,分别对AF7、AF8、TP9和TP10这4种导电位的波幅求均值。由于波幅时刻波动,找到波形图的峰值时间点 t ,提取时间窗 $(t-10, t+10)$ ms。

1.4.1 图像分析

以4个句尾通顺语句叠加平均为标准刺激,4个句尾歧义语句为4个偏差刺激,分别将其与标准刺激对比,根据4个导电位分别生成脑电波叠加波形图,如图6所示。在TP9导电位上生成的叠加图有显著相似规律,其余导电位无显著相似规律。通过TP9导电位生成的波形图发现,潜伏期在190~210 ms范围内,标准刺激和偏差刺激均诱发出N200成分,且偏差刺激波幅更大。潜伏期在290~310 ms范围内,标准刺激和偏差刺激均诱发出P300成分。且第3组数据中,偏差刺激诱发出的P300波幅最显著。潜伏期在390~430 ms范围内,标准刺激和偏差刺激均诱发出了显著的N400成分,且全部4组偏差刺激诱发出的N400波幅更大。潜伏期在550~570 ms范围内,标准刺激和偏差刺激均诱发出N560成分。

把4个句尾歧义和4个句尾通顺语句分别总叠加为总偏差刺激和总标准刺激,基于4个导电位分别生成4张总叠加图,如图7所示。从图7中可以明

显发现TP9导电位生成的偏差刺激和标准刺激波形拟合度高,TP10波形拟合程度低,AF7和AF8波形没有拟合迹象。在TP9波形图上,偏差刺激在190~210 ms范围诱发出N200,在280~300 ms范围诱发出P300,在390~410 ms范围诱发出N400成分,其中N400成分非常显著,在550~570 ms范围内诱发出N560成分。

1.4.2 数值分析

提取AF7、AF8、TP9和TP10这4种脑电数据做统计学分析,比较在句尾歧义与否两种条件下的波幅差异。表1显示了这两种条件下各导电位波幅值的 t 检验结果

以句尾歧义与否作为自变量,各个导电位置的波幅作为因变量,进行配对样本 t 检验。结果表明:N400成分在TP9导电位($t=-3.36, p<0.001$)波幅差异显著,即句尾歧义与否在TP9导电位对N400成分有显著影响,该结论与图6和图7图像匹配。

由以上结果分析得出结论:

(1)TP9导电位收集的N400成分数据最显著,具有主效应,其他的成分不具有主效应。

(2)验证假设(1)正确,在使用便携式脑电采集设备Muse的实验中,句尾歧义时诱发出的N400波幅大于句尾通顺时诱发的N400波幅。

2 汽车造型创新性语义认知事件实验

2.1 实验设计

2.1.1 复合刺激S1-S2实验范式

本研究的实验材料中有图片和文字两种形式,所以采用适合于多模态语义加工研究的复合刺激范式S1-S2^[17]。该范式要求依次呈现两种刺激S1和S2,S1为图片刺激,S2文字刺激。当S1是4张目标刺激车辆图片中的任意一张时,其后出现的S2固定呈现“创新的”形容词文字,组成图片文字对。其他背景刺激图片与文字随机形成图片文字对。每组图

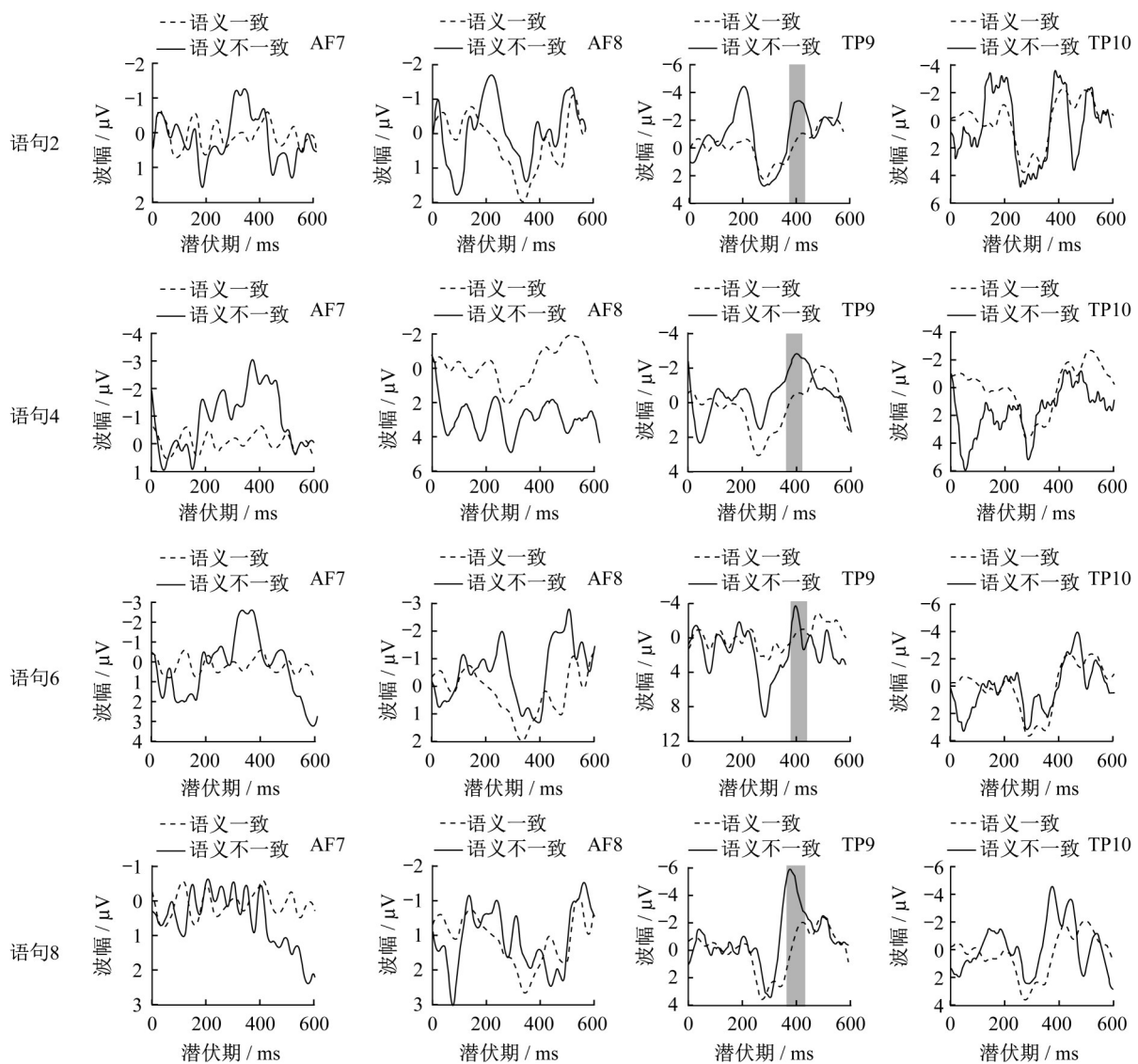


图 6 每个偏差刺激与 4 个标准刺激的脑电波叠加图

Fig.6 Brainwave superposition of each deviated stimulus and four standard stimuli

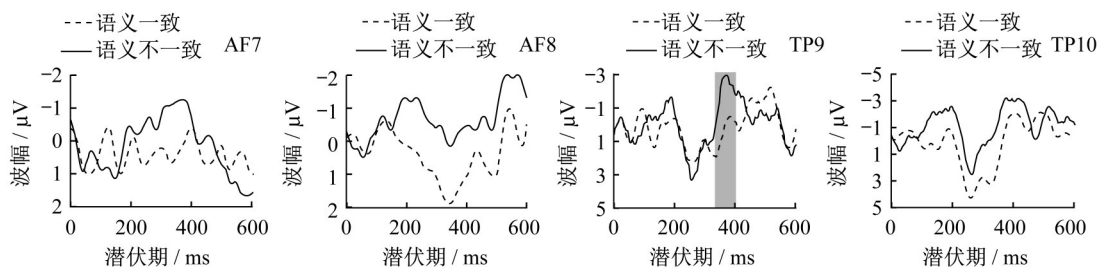


图 7 偏差刺激与 4 个标准刺激脑电波总叠加图

Fig.7 Total superposition of brainwave for deviation stimulus and four standard stimuli

片文字对随机呈现两次,任意两个连续图片文字对都不重复。

2.1.2 绝对时间标记法

实验二使用 Muse 便携式脑电设备和实验一中自主编写的程序对被试者的脑电数据进行采集和预处理。在实验范式上,采用绝对时间标记法进行实

验。实验开始,首先呈现 5 s 的讲解页面,随后进入正式实验。屏幕会先呈现 3 s “+”作为冷静期,其后随机呈现 S1 图片刺激 2s,被试者第一时间感知图片语义。随后呈现 S2 文字刺激 2 s 后无需任何操作自动跳转冷静期画面。直到每组刺激随机出现 2 次后结束实验。全程不需要被试者任何操作,记录时间

表1 句尾歧义与通顺两种条件下各导电位波幅值的t检验

Tab.1 Amplitude value t-test of different brain regions under two conditions

脑电成分时间窗	导电位置	句尾歧义条件下波幅/ μV		句尾通顺条件下波幅/ μV		t值	p值
		均值	标准差	均值	标准差		
N200(190~210 ms)	AF7	1.65	1.35	0.85	1.74	0.53	0.62
	AF8	1.97	2.13	1.35	0.98	0.57	0.60
	TP9	0.30	0.33	0.85	1.05	-1.09	0.34
	TP10	0.63	0.51	0.77	1.39	-0.25	0.81
P300(290~310 ms)	AF7	-3.82	1.51	-4.98	2.12	0.74	0.50
	AF8	-3.46	3.09	-4.40	1.48	0.45	0.68
	TP9	-1.89	0.81	-0.92	0.91	-1.81	0.14
	TP10	-1.79	1.35	-1.76	1.79	-0.02	0.99
N400(390~430 ms)	AF7	1.45	1.37	1.52	2.01	-0.05	0.96
	AF8	2.60	2.60	2.98	0.35	-0.27	0.80
	TP9	0.57	1.12	1.37	0.93	-3.36	<0.001
	TP10	0.50	1.00	1.00	1.43	-0.50	0.65
N560(550~570 ms)	AF7	3.84	1.87	2.79	2.28	0.59	0.59
	AF8	2.82	2.18	2.22	1.22	0.46	0.67
	TP9	1.16	1.14	1.51	0.53	-0.43	0.69
	TP10	1.21	1.61	1.25	1.12	-0.04	0.97

为起始时间点和绝对时间。具体流程如图8所示。

2.2 实验对象

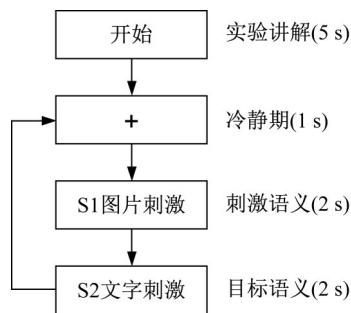


图8 实验设计过程

Fig.8 Experimental procedure

本次的实验对象为图片和文字形式。作为目标刺激的图片材料是4辆某品牌提出的下一代造型方

案A、B、C和D(截至本文刊发均处于保密状态)。其余作为背景刺激的10辆车通过网络收集获得,是刚刚上市或已发布未上市的运动型多功能车。采用传统造型评价标准处理图片。文字对象是1个创新性词汇和17个背景词汇,均是常用于描述汽车造型风格的形容词,统一格式与大小,如图9所示。

2.3 被试者招募

本实验共招募40名被试志愿者,招募条件与实验一一一致。

2.4 数据分析与结果

2.4.1 图像分析

图10是Muse脑电设备输出的数据图像,方案C激发出的N400波幅最高,方案B的N400波幅最低,4个方案关于创新性维度排序为B>D>A>C。



图9 S1-S2刺激材料

Fig.9 S1-S2 stimulator

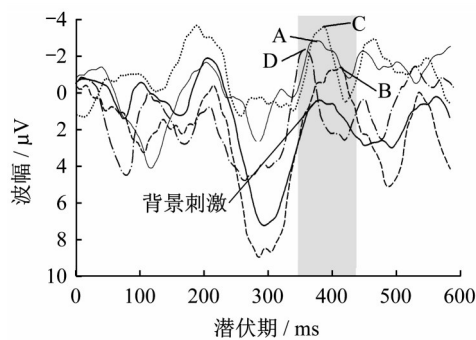


图10 数据图像
Fig.10 Data image

2.4.2 数值分析

实验数据按以下顺序操作处理:①移除无用通

道数据;②以Fpz为参考电极做重参考,并以0.5~30.0 Hz为基准进行二阶带通滤波,去除眼电、肌电等伪记;③进行分段,分割提取目标时间段数据,进行平均叠加等步骤^[19]。

实验结果表明,被试者在看到目标刺激时,诱发了显著的N200、P300和N400成分。基于实验一结果,收集N400成分数值,如表2所示,关于创新性维度的排序为B>D>A>C。

综上所述,比对图像与数据,作为目标刺激的4个造型方案关于创新性维度的排序为:B>D>A>C。

验证假设(2)正确:使用Muse设备,以绝对时间标记法采集的N400成分能够准确测量出用户对汽车造型语义的创新性程度。

表2 造型语义与目标语义各导电位波幅值的均值和标准差

Tab.2 Mean and standard deviation of conductive potential wave amplitude under two conditions

N400脑电成分 时间窗/ms	导电 位置	电位波幅/ μV									
		A方案		B方案		C方案		D方案		背景方案	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
390~430	TP9	-2.84	3.21	-1.72	3.04	-3.43	3.74	-2.36	4.17	0.21	3.16

3 结语

汽车造型设计的目标和评审本质是一个用关键词表达和描述汽车造型的过程。在实际工作流程中,该过程为设计诊断环节。由于汽车造型设计环节多、理解偏差大等因素,为得到准确的对应匹配语义,企业需要付出较高的时间成本和人力成本。本研究通过引入便携式脑电采集设备,运用绝对时间标记法,根据创新性造型的设计目标要求,探索用户创新性造型意向需求,即借助Muse TP9导电位采集到的N400指标实现了优化造型评估流程的目的。

研究基于Muse设备采集ERP中N400成分,运用绝对时间标记法简化ERP实验操作,进而优化企业造型设计评估流程。在ERP研究过程中,事件标记法是将时间标记物准确插入到连续的脑电数据中,以标记实验刺激的重要方法。而本研究以简化实验操作流程为准则,采用绝对时间标记法,即通过蓝牙传输一整段Muse收集的脑电波数据到实验电脑上,再按照特定的绝对实验时间节点进行分段处理。在以上实验准备过程中发现多设备蓝牙传输存在延迟抖动,通过自主设计的代码程序测量本实验使用的设备系统有固定且一直存在的延迟抖动,为10~25 ms,即通过蓝牙传输到电脑上的数据较被试者脑电波真实发生时间全部延迟10~25 ms。数据

分段分割阶段要进行规避。将原本50 ms左右的时间窗扩大为90 ms,所有被试刺激的N400成分波幅全都被时间窗包括,本实验环境下延迟抖动问题不影响实验结果。

在使用Muse便携式脑电采集设备的实验中发现,句尾歧义时诱发出的N400波幅大于句尾通顺时诱发的N400波幅。汽车造型语义与文字语义不一致时所诱发的N400波幅大于汽车造型语义与文字语义一致时的N400波幅。

设计用于多模态语义加工研究的复合刺激范式S1-S2,验证了Muse脑电装置可以在不进行事件标记的情况下,在一台电脑上进行事件相关电位N400成分的研究,判断汽车造型是否符合用户语义意向,进而对比在目标语义刺激下4个造型方案所诱发出的N400成分,进行创新性排序。

某乘用车公司将使用Muse采集脑电信号的绝对时间标记法与传统市场调研方法结合应用,大幅节省了成本,缩短了造型评估周期,提高了决策准确度,优化了汽车造型开发流程。

作者贡献声明:

邵景峰:指导设计评审分析,论文修改。

杨志刚:提出论文框架,论文修改。

杨再峰:完成实验设计,实验数据分析及论文撰写。

郑恩泽:完成数据分析系统搭建。

参考文献:

- [1] 段正洁, 谭浩, 赵丹华, 等. 基于风格语义的产品造型设计评价策略[J]. 包装工程, 2018, 39(12): 107.
DUAN Zhengjie, TAN Hao, ZHAO Danhua, *et al.* Evaluation strategy of product modeling design based on style semantics [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(12): 107.
- [2] 李彦龙, 蔡谦, 孙久康, 等. 基于BP神经网络的汽车外观设计评价方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 116.
LI Yanlong, CAI Qian, SUN Jiukang, *et al.* An evaluation method of vehicle exterior design based on BP neural network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 116.
- [3] 刘亚, 伍倚明, 李承炜, 等. 基于ADS1299的穿戴式脑电检测装置设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(11): 1317.
LIU Ya, WU Yiming, LI Chengwei, *et al.* Design of a wearable EEG detection device based on ADS1299 [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(11): 1317.
- [4] 王楼. 便携式可穿戴脑电采集系统研究与开发[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
WANG Lou. Research and development of portable wearable EEG acquisition system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.
- [5] 周晓霞, 遇涛, 张鑫, 等. 脑电图采集技术现状及临床采集基本技能[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(8): 153.
ZHOU Xiaoxia, YU Tao, ZHANG Xin, *et al.* Current situation of electroencephalogram technology and basic skills of clinical acquisition technique [J]. China Medical Devices, 2020, 35(8): 153.
- [6] KHUSHABA R N, CHELSEA W, SARATH K, *et al.* Consumer neuroscience: assessing the brain response to marketing stimuli using electroencephalogram (EEG) and eye tracking [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(9): 3803
- [7] 蔡林, 张亚旭. 句子理解过程中句法与语义加工的EEG时频分析[J]. 心理科学进展, 2014, 22(7): 1112.
CAI Lin, ZHANG Yaxu. EEG time-frequency analysis of syntactic and semantic processing in sentence comprehension [J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(7): 1112.
- [8] 魏景汉. 事件相关电位原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
WEI Jinghan. Principle and techniques of event-related brain potentials[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [9] BENTIN S, KUTAS M, HILLYARD S. Semantic processing and memory for attended and unattended words in dichotic listening: behavioral and electrophysiological evidence [J]. Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performan 1995, 21(1): 54.
- [10] GUERRA S, MARTIN M, BOBES M, *et al.* P17-6 N400 deficits from semantic matching of pictures in probands and first degree relatives from multiplex schizophrenia families [J]. Brain & Cognition, 2009, 121(2): 221.
- [11] 侯冠华, 卢国英. 标识设计中语义认知事件相关电位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 1582.
HOU Guanhua, LU Guoying. Event related potential of semantic cognition in sign design [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(11): 1582.
- [12] GUTIERREZ E, WILLIANMS D, GROSVOLD M, *et al.* Lexical access in American sign language: an ERP investigation of effects of semantics and phonology [J]. Brain Research, 2012, 1468(2): 63.
- [13] ZUDE Z, MARCEL B, JONATHAN G, *et al.* Semantic unification modulates N400 and bold signal change in the brain: a simultaneous EEG-fMRI study [J]. Journal of Neurolinguistics, 2019, 52: 100855.
- [14] DELOGU F, BROUWER H, CROCKER M. When components collide: spatiotemporal overlap of the N400 and P600 in language comprehension [J]. Brain Research, 2021, 1766: 147514.
- [15] MEADE G, DECLERCK M, HOLCOMB P, *et al.* Parallel semantic processing in the flankers task: evidence from the N400 [J]. Brain & Language, 2021, 219: 104965.
- [16] QING Guo, HU Linfeng, XIAO Can, *et al.* Neural correlates of multimodal metaphor comprehension: evidence from event-related potentials and time-frequency decompositions [J]. International Journal of Psychophysiology, 2016, 109: 81.
- [17] KRIGOLSON O, WILLIAMS C, NORTON A, *et al.* Choosing MUSE: validation of a low-cost, portable EEG system for ERP research [J]. Frontiers in Neuroscience, 2017, 11: 109.
- [18] 哈斯. 汉语隐喻认知脑机制的ERP研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
HA Si. Brain mechanisms of chinese metaphor processing by ERP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [19] FEDERMEIER K, MCLENNAN D, ESMERALDA O, *et al.* The impact of semantic memory organization and sentence context information on spoken language processing by younger and older adults: an ERP study [J]. Psychophysiology, 2002, 39(2): 133.