脑力负荷对前注意加工的影响与分析

完颜笑如 庄达民 刘 伟

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 为研究与飞行任务相关的脑力负荷对听觉前注意加工的影响,采用 14 名被试者在不同脑力负荷下开展飞行模拟实验,并记录失匹配负波(MMN, Mismatch Negativity)作为听觉前注意加工的评价指标. 被试者需要在飞行模拟器上完成包括起飞、巡航、降落在内的完整飞行过程,同时对平视显示器所呈现的目标信息状态进行监视,并对异常信息进行响应. 实验通过设定目标信息的数量及刷新频率来控制被试者的脑力负荷水平. 实验结果表明:脑力负荷对额中央区 MMN 影响显著,可为复杂飞行任务的脑力负荷评价提供一定的电生理依据.

关 键 词: 脑力负荷; 前注意加工; 失匹配负波; 飞行模拟; 人机工效

中图分类号: R 857.1; B 842.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0497-05

Analysis on effect of mental workload on preattentive processing

Wanyan Xiaoru Zhuang Damin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Liu Wei

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To investigate the effects of mental workload related to flight task on the preattentive processing, 14 subjects performed a flight simulation task under different mental workloads, and the mismatch negativity (MMN) was recorded as evaluation index. The subjects were asked to perform the whole process of flight simulation in a flight simulator, including take-off, cruise and landing. During the flight, subjects were instructed to keep monitoring the information targets presented on the head-up display and respond to any abnormal information. The mental workloads were manipulated by setting the quantities and refresh frequencies of the information targets. The experiment results reveale that the frontal-central MMN is affected by mental workload significantly. The present study can offer electrophysiological reference for flight mental workload assessment in complex tasks.

Key words: mental workload; preattentive processing; mismatch negativity; flight simulation; ergonomics

在飞机驾驶的过程中,飞行员经常需要兼顾舱外以及舱内多个显示器并获取飞行信息,这就要求飞行员必须合理地分配自身的注意力并根据信息的优先级别对多个信息进行选择性的注意以保证信息收集的全面性、准确性和及时性[1-2]. 在监视任务中,作业人员的注意力水平与其脑力负荷状态密切相关,对脑力资源的超低唤起或负荷超载都可能导致作业人员难以保持适宜的注意力水平,从而出现对信息的漏读、误读或误判等人为失误,进而威胁到作业安全. 有研究认为脑力负荷可被定义为作业人员为达到业绩标准而付出的注意力的大小[3]. 因此,通过研究不同脑力负荷下

收稿日期: 2010-12-21; **网络出版时间**: 2012-03-09 10:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120309.1037.019.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB734104)

作者简介: 完颜笑如(1981-),女,北京人,博士生,wwwchuan2003@yahoo.com.cn.

作业人员对信息注意能力的差异,可为选择性注意机制的深入研究提供实验依据,并可能用于飞行员的情境意识分析、警觉度评估及脑力负荷的综合评价.

到目前为止,针对飞行员注意活动所开展的研究大多集中于注意行为本身及其后的行为决策阶段[4-6],而对前注意加工阶段的关注较少. 在选择某个目标作为注意对象之前,大脑皮质首先需要对不同事物进行识别,以区分该事物是否应当被注意. 这种在注意之前对事物进行该不该注意分析的心理过程称为前注意[7]. 前注意发生在知觉之前,反映了大脑皮质对外界信息的自动加工能力,是选择性注意的开始或准备阶段. 因此,前注意阶段对信息的自动加工水平会对后期选择性注意行为的发生及信息的认知加工过程产生重要影响.

大量研究表明,失匹配负波(MMN, Mismatch Negativity)是前注意加工的主要电生理指标,可以有效反映出大脑皮质对信息变化的自动探测能力[8]. 目前所开展的相似研究主要为在单一作业任务或双作业任务下,探讨任务难度变化对被试者听觉 MMN 的影响[9-11]. 这些研究所取得的研究结论并不一致,且多基于抽象的心理学实验展开,与飞行员从信息显示界面获取信息并做出反应判断的作业过程还有较大差异,同时缺乏对脑力负荷与前注意加工之间关系的探讨. 考虑到飞行任务的复杂性,评价这类研究的结论能否直接应用于飞行任务的评价有待进一步的验证.

本研究在前期实验[12]基础上,以 MMN 为评价指标,并增加了记录电极的数量,通过对不同脑力负荷下被试者的听觉前注意加工特征进行比较,探讨与飞行任务相关的脑力负荷对前注意加工机制的影响,以期提出一种基于前注意加工能力的脑力负荷评价方法.

1 方 法

1.1 被试者

因采用 10 ~ 15 名被试者可获得较为稳定的脑电数据[13],本研究中的被试者共 14 名,他们均为北京航空航天大学在飞行模拟器上受过培训的男性模拟飞行员(22 ~ 28 岁,平均年龄 25.6 岁),右利手,视力或矫正视力正常,听力正常.

1.2 实验任务

被试者在飞行模拟器上完成包括起飞、巡航、降落在内的完整的动态飞行过程(约 13 min). 同时,被试者需要对平视显示器中的目标信息状态进行监视,发现状态异常时,按指定键消除异常. 平视显示器可显示空速、气压高度、雷达高度、航向角、俯仰角、滚转角等多项目标信息,不同的目标信息对应不同的按键. 实验通过设定目标信息的数量及刷新频率来控制被试者的脑力负荷水平[14]. 在高、低脑力负荷下,需要被试者保持监视的目标信息数量分别为 9 个和 3 个,信息异常状态的平均与间隔时间分别为 0.5 s 和 2 s. 信息异常状态的平均呈现时间分别为 1 s 与 0.5 s.

被试者在飞行模拟过程中佩戴电极帽及耳机,由耳机双侧呈现新异刺激模式(oddball paradigm)下的听觉刺激. 一个完整的听觉刺激序列包含 1 200 个标准刺激(1 000 Hz,65 dB SPL,出现概率:80%)以及 300 个偏差刺激(1 100 Hz,65 dB SPL,出现概率:20%),刺激呈现时间为 50 ms,刺激间隔(SOA, Stimulus Onset Asynchrony)为 500 ms. 实验采用非注意条件下的 MMN 诱发实验方法,要求被试者关注飞行模拟任务,忽略听觉刺激,由大脑完成对声音刺激的自动加工.

1.3 实验设计

14 名被试者均参与高、低两种脑力负荷下的两次飞行模拟任务,每个被试者的两次飞行模拟任务之间间隔 3 天,同一被试者的两次实验均在上午或下午进行. 高、低脑力负荷的实验顺序在被试者中交叉平衡.

因额中央区 MMN 和颞区 MMN 的极性翻转,反映了不同的机制,因此,实验针对两个部位的 MMN 分别进行重复测量设计. 针对额中央区(F3,FC3,C3,FZ,FCZ,CZ,F4,FC4,C4),采用 2 ×3 ×3 完全被试内设计:脑力负荷(高、低) × 脑区(左侧、中线、右侧) × 电极位置(额区、额中央区、中央区);针对颞区(M1、M2),采用 2 ×2 完全被试内设计:脑力负荷(高、低) × 电极位置(M1、M2).

1.4 数据记录及离线分析

采用 Neuroscan Neuamps 系统记录 30 导脑电信号(F7,FT7,T3,TP7,T5;FP1,F3,FC3,C3,P3,O1;FZ,FCZ,CZ,CPZ,PZ,OZ;FP2,F4,FC4,C4,P4,O2;F8,FT8,T4,TP8,T6;M1,M2). 以鼻尖作参考,同时记录水平和垂直眼电. 电极与皮肤接触阻抗小于 5 kΩ,记录带宽为 0.1 ~ 100 Hz,采样率为 500 Hz/导. 利用眼电图(EOG, Electro-Oculogram)信号相关法去除眼电伪迹,排除有明显伪迹的数据. 分析时程为 450 ms,含刺激前 50 ms 为基线矫正,波幅大于 ±70 μV 视为伪迹剔除. 用偏差刺激诱发的事件相关电位成分(ERPs, Event-

Related Potentials)减去标准刺激诱发的 ERPs,得到声音频率变化引发的 MMN.

2　实验结果

2.1　作业绩效结果

表 1 为被试者在高、低脑力负荷下对异常信息的正确探测率及反应时间. 单因素重复测量的方差分析表明,在高脑力负荷下,被试者对目标信息异常状态的正确探测率降低($p<0.001$),且反应时间延长($p=0.05$).

表 1　高、低脑力负荷下的正确探测率及反应时间

测试状态	正确探测率/%	反应时间/ms
高脑力负荷	65.38 ± 14.63	736.62 ± 65.27
低脑力负荷	96.11 ± 3.07	696.84 ± 84.47

2.2　ERP 结果

由于 MMN 的波峰不清楚,一般采用平均波幅作为评价指标[15]. 图 1 为额中央区及颞区的 MMN 总平均图,图 2 为 150 ~ 300 ms 的脑电压地形图. 根据图 1、图 2,对 200 ~ 250 ms 时间窗内的 MMN 平均波幅进行统计分析.

表 2 为额中央区 MMN 的平均波幅. 三因素重复测量的方差分析表明,脑力负荷主效应显著($p=0.025$),表现为高脑力负荷下的 MMN 平均波幅(−0.89 μV)显著高于低脑力负荷下的(−0.43 μV). 脑区主效应也是显著的($p=0.028$),并如图 2 所示,呈现出右侧脑区电压优势效应,具体表现为中线(−0.68 μV)及右侧脑区(−0.71 μV)的 MMN 平均波幅显著高于左侧脑区(−0.59 μV). 电极位置主效应也是显著的($p<0.001$),并如图 2 所示,呈现出额区电压优势效应,具体表现为额区电极位置的 MMN 平均波幅(−0.84 μV)显著高于额中央区电极位置(−0.68 μV),额中央区电极位置的 MMN 平均波幅显著高于中央区电极位置(−0.46 μV). 统计结果显示没有交互效应达到显著性水平($p>0.05$).

对于颞区,在高脑力负荷下,M1 和 M2 的平均波幅分别为 0.33 μV 和 0.45 μV;在低脑力负荷下,M1 和 M2 的平均波幅分别为 0.77 μV 和 0.67 μV. 两因素重复测量的方差分析表明没有主效应及交互效应达到显著性水平($p>0.05$).

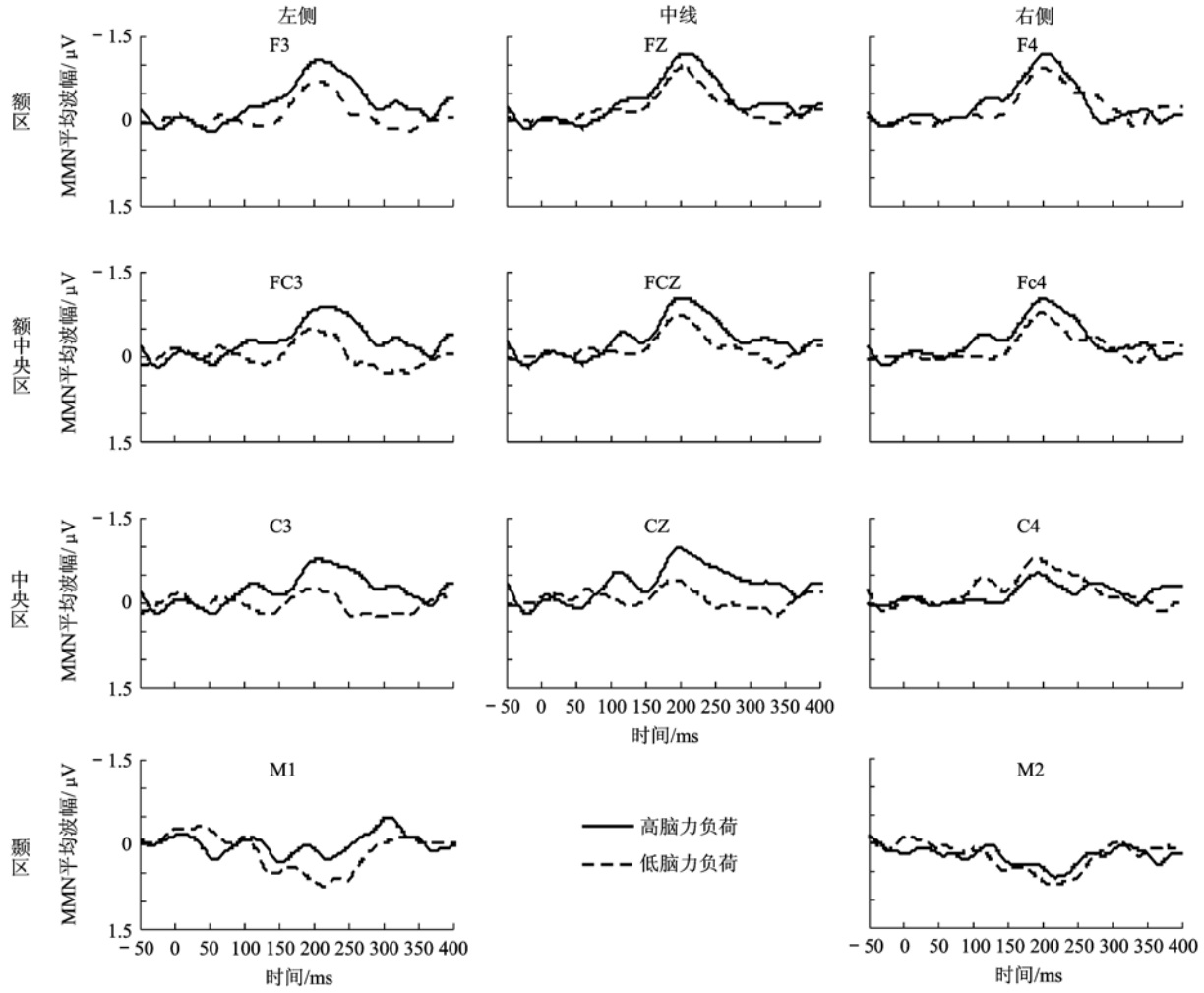

图 1　额中央区及颞区的 MMN 总平均图

表 2 额中央区 MMN 的平均波幅

测试状态	MMN 平均波幅/μV				
	F3	FC3	C3	FZ	FCZ
高脑力负荷	−0.97 ±0.55	−0.88 ±0.61	−0.75 ±0.61	−1.07 ±0.50	−0.93 ±0.55
低脑力负荷	−0.52 ±0.50	−0.32 ±0.52	−0.11 ±0.56	−0.68 ±0.45	−0.48 ±0.53

测试状态	MMN 平均波幅/μV			
	CZ	F4	FC4	C4
高脑力负荷	−0.80 ±0.72	−1.07 ±0.57	−0.94 ±0.60	−0.65 ±0.60
低脑力负荷	−0.14 ±0.60	−0.73 ±0.56	−0.54 ±0.59	−0.31 ±0.70

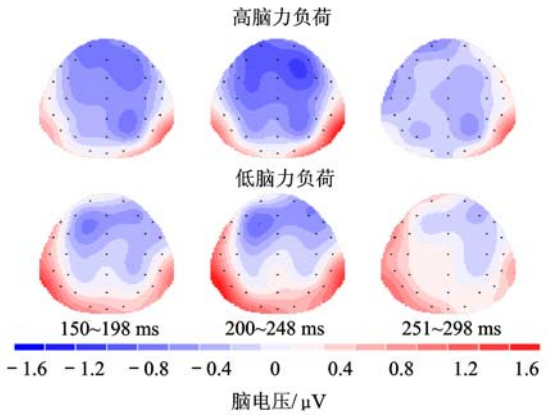

图 2 脑电压地形

2.3 相关性分析

为验证作业绩效与 MMN 成分之间的相关程度,选取 MMN 平均波幅最大的额区电极位置 FZ,对 MMN 平均波幅与正确探测率和反应时间的相关性进行检验. 相关检验结果表明,MMN 平均波幅与正确探测率在 200 ~ 250 ms 时间窗呈正相关($r = 0.39, p < 0.05$);MMN 平均波幅与反应时间的相关性不显著($r = -0.14$, $p > 0.05$). 因颞区的脑力负荷主效应不显著,故不进行颞区 MMN 平均波幅与作业绩效之间的相关性检验.

3 讨 论

根据实验结果,被试者在高、低脑力负荷下的作业绩效差异显著,在高脑力负荷下,被试者对目标信息异常状态的正确探测率显著降低,且反应时间延长. 这是由于被试在高脑力负荷下需要同时监视的仪表个数增多,因此平均分配在每个仪表上的注意力减少.

ERP 结果则表明,与低脑力负荷相比,高脑力负荷下额中央区 MMN 平均波幅显著增强,且与模拟飞行期间被试者对异常信息的正确探测率正相关. 但是,脑力负荷对颞区 MMN 平均波幅的影响并不显著.

目前认为 MMN 的产生至少具有两个脑内发生源,分别为大脑颞上回皮质和前额叶皮层. 首先由双侧颞叶皮层对声音信息的变化进行自动加工,产生 MMN 的颞叶成分,进而引发额叶皮层对声音信息的变化进行自动处理,产生 MMN 的额叶成分以及其后引起注意偏向的 P3a[8]. 与知觉负载理论中基于被动资源竞争的信息选择机制不同,认知控制负载理论提出,大脑某些高级的认知控制功能能够有效筛选并主动抑制非任务相关信息,从而保持信息处理的优先级别,使任务相关的信息获得优先处理. 其中,前额叶的认知控制功能即被认为在这种主动的信息加工机制中发挥着重要作用[16]. 在本研究中,额中央区的 MMN 平均波幅在高脑力负荷下显著增高,表明非任务相关信息(即声音刺激)在高脑力负荷下获得了更多的加工,其可能的原因是被试者在高脑力负荷下面临更高的任务要求及时间压力,注意负荷增加,消耗了用于产生对非任务相关信息进行主动抑制作用的资源,从而导致被试者对任务无关信息的门控能力下降. 反应在本研究的实验结果上,即表现为高脑力负荷下的 MMN 诱发增强,这一实验结果有效支持了认知控制负载理论,并与文献[11]的研究结果一致.

在本实验中,颞区的 MMN 成分对脑力负荷的变化不敏感,其可能的原因在于颞区所体现的主要脑功能为区别和存储声音信息,并不具有对无关信息进行抑制的高级脑功能,因此,在高、低脑力负荷下,对声音信息变化的自动探测在颞区并没有出现明显差异.

本研究存在以下局限性:首先,本实验所采用的作业绩效仅是反映脑力负荷的一个主要方面,后期将结合脑力负荷综合评定量表以及同时对 N100、N200、P300 等主要成分进行综合分析,以增强实验分析结果的完备性. 其次,本实验属先行的基础研究,虽然基于飞行模拟器及动态的飞行模拟任务开展,但与真实的飞行环境及飞行任务仍有差异,因此所得到的研究结论有待在实际应用中做进一步的检验.

相关研究表明作业负荷将导致 P300 波幅出

现显著差异[10],而本研究结果则提示产生这种差异的起始点可能从注意前期,即大脑对信息变化的自动探测阶段就已开始. 通过本研究,表明 MMN 成分对与飞行任务相关的脑力负荷具有较好的敏感性和相关性,可为复杂飞行任务的脑力负荷评价提供一定的电生理依据,并可能用于飞行情境意识及警觉度的评估.

4　结　论

本研究可获得以下结论:

1) 额中央区 MMN 的平均波幅对脑力负荷的变化敏感,MMN 的平均波幅在高脑力负荷下显著增强,反映了被试者对非任务相关信息的自动加工能力提高.

2) 额中央区 MMN 的平均波幅与被试者的作业绩效正相关. 在本实验中,当被试者对异常信息的正确探测率下降约 30% 时,MMN 的平均波幅负向增高一倍左右.

3) 颞区 MMN 的平均波幅对脑力负荷的变化不敏感.

致谢　感谢视觉艺术与脑认知研究中心对本研究的技术支持及建议.

参考文献 (References)

[1] 郭小朝,刘宝善,马雪松,等. 歼击机座舱通用显示信息及其优先级的确定[J]. 中华航空航天医学杂志,2006,17(4):260 – 263
Guo Xiaochao, Liu Baoshan, Ma Xuesong, et al. General information of display and its priority for advanced fighter cockpit [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2006, 17(4): 260 – 263 (in Chinese)

[2] 柳忠起,袁修干,刘伟,等. 飞行员注意力分配的定量测量方法[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(5):518 – 520
Liu Zhongqi, Yuan Xiugan, Liu Wei, et al. Quantitative measurement method of attention allocation for pilots [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 518 – 520 (in Chinese)

[3] Young M S, Stanton N A. Mental workload: theory, measurement, and application [C]//Karwowski W. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors. London: Taylor & Francis, 2001: 507 – 509

[4] Miller S M, Kirlik A, Kosorukoff A, et al. Ecological validity as a mediator of visual attention allocation in human-machine systems [R]. AHFD-04-17/NASA-04-6, 2004

[5] Wickens C D, Goh J, Helleberg J, et al. Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology [J]. Human Factors, 2003, 45(3): 360 – 380

[6] 柳忠起,袁修干,刘伟,等. 在模拟飞机降落过程中的眼动分析[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(6):703 – 706
Liu Zhongqi, Yuan Xiugan, Liu Wei, et al. Eye-movementanalysis of simulating airplane landing course [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6): 703 – 706 (in Chinese)

[7] 魏景汉,阎克乐. 认知神经科学基础[M]. 北京:人民教育出版社,2008
Wei Jinghan, Yan Kele. Cognitive neuroscience foundation [M]. Beijing: People's Education Press, 2008 (in Chinese)

[8] Naatanen R, Paavilainen P, Rinne T, et al. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review [J]. Clinic Neurophysiology, 2007, 118(12): 2544 – 2590

[9] Yucel G, Petty C, McCarthy G, et al. Visual task complexity modulates the brain's response to unattended auditory novelty [J]. Neuroreport, 2005, 16(10): 1031 – 1036

[10] Kramer A F, Trejo L J, Humphrey D. Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes [J]. Biological Psychology, 1995, 40(1/2): 83 – 100

[11] Zhang P, Chen X, Yuan P, et al. The effect of visuospatial attentional load on the processing of irrelevant ascoustic distractors [J]. Neuroimage, 2006, 33(2): 715 – 724

[12] 完颜笑如,庄达民,刘伟. 基于非任务相关 ERP 技术的飞行员脑力负荷评价方法[J]. 中国生物医学工程学报,2011,30(4):528 – 532
Wanyan Xiaoru, Zhuang Damin, Liu Wei. Evaluation method of pilot mental workload based on task-irrelevant ERP technologhy [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2011, 30(4): 528 – 532 (in Chinese)

[13] Luck S J. An introduction to the event-related potential technique [M]. Cambridge: MIT Press, 2005

[14] 张磊,庄达民,完颜笑如. 基于不同脑力负荷和任务类型的信息颜色编码[J]. 兵工学报,2009,30(11):1522 – 1526
Zhang Lei, Zhuang Damin, Wanyan Xiaoru. The color coding of information based on different mental workload and task type [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11): 1522 – 1526 (in Chinese)

[15] 赵仑. ERP 实验教程[M]. 天津:天津社会科学院出版社,2004:110 – 113
Zhao Lun. ERP experiment course [M]. Tianjin: Tianjin Academy of Social Science Press, 2004: 110 – 113 (in Chinese)

[16] Lavie N, Hirst A, de Fockert J W, et al. Load theory of selective attention and cognitive control [J]. Journal of Experimental Psychology: General, 2004, 133(3): 339 – 354

(编　辑:李　晶)