

基于心率变异性的船员心理负荷特征研究

刘 清^{a,b}, 陈俊华^a, 杨 柳^a, 何 萌^a, 杨 钺^a, 万志远^a

(武汉理工大学 a. 交通与物流工程学院; b. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘 要:为预防船员主观方面失误引起的水上交通事故发生,需探究在岗船员的心理负荷变化特性,作为了解船员驾驶行为能力的基础性研究,也是智能航行人机共融的关键一步。开展基于船舶操纵模拟器的驾驶模拟试验,提取在不同航行场景下船员的心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)指标数据,构建基于因数分析的船员心理负荷模型,分析并验证在岗船员的心理负荷变化特征,结果表明:在计算船员心理负荷时,HRV 指标比心率指标具有更高的效度和信度;在航行初期,船员的心理负荷处于较高水平或呈现升高的趋势,随后船员逐渐适应常规航行场景且此时心理负荷水平较低;在航行末期,船员的心理负荷处于较低水平且变化趋势比较平滑;突发事件对船员的心理负荷有显著的影响,船员心理负荷因突发事件的发生而显著增加。

关键词:船员;航行安全;心理负荷;心率变异性;因数模型

中图分类号:X951;U676.1

文献标志码:A

Research on Characteristics of Navigator's Psychological Load Based on Heart Rate Variability

LIU Qing^{a,b}, CHEN Junhua^a, YANG Liu^a, HE Meng^a, YANG Xian^a, WAN Zhiyuan^a

(a. School of Transportation and Logistics Engineering; b. National Water Transportation Safety Engineering Technical Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The HRV (Heart Rate Variability) data of ship navigators in different navigation situations are collected through simulation experiments on a marine simulator. The model of Navigator's psychological load based on factor analysis is built and the psychological load characteristics of navigators on duty are analyzed. The research shows that, for calculating navigator's psychological load, heart rate variability is more efficient and more reliable than heart rate. The calculation shows that for a voyage, the psychological load goes up at the beginning, then, gradually goes down and keeps lower level as the voyage proceeds and the navigator gets used to his duty. During last stage of a voyage, the psychological load keeps low and changes smoothly. Unexpected Incidents will cause obvious increase of psychological load.

Key words: navigator; navigational safety; psychological load; HRV; factor model

据统计,约有 75%~96% 的海上事故是由人为失误引起的。^[1]一项针对 1993—2006 年希腊籍船舶事故中人为因素的研究发现:所有事故中有 57.1% 归因于人为因素,其中 75.8% 是在船上被发现的,而船上人为造成的事故有 80.4% 与船长的错误指令有关。^[2]工作应激与工作绩效呈“倒 U 形”的关系表明,合适的工作负荷状态对安全驾驶具有重要作用。^[3]负荷过高会使驾驶员出现决策失误的概率升高,增大发生事故的风险。^[4]因此,研究在不同场景下船员的心理负荷变化特性,探索其心理负荷变化

的差异性,对提高航行安全具有重要意义。

国内外学者围绕船员行为和心理负荷开展了一系列相关研究。例如:FAN 等^[5]采集脑电指标,利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)识别情感,分析情绪对行为决策的影响;MURAI 等^[6]使用 RR 心率间距来评估船员精神负荷,并利用船舶操纵模拟器来确认指标的有效性;OKAZAKI 等^[7]研究通过使用热像仪摄像机测量的导航员鼻温数据来推测船舶操纵模拟器中船员的精神工作量,并通过实际仿真检验该技术的有效性;SUGIMOTO 等^[8]使

收稿日期:2021-04-07

基金项目:国家自然科学基金(51979214);绿色智能内河船舶创新专项(2019(358));国家自然科学基金青年科学基金(72001163)

作者简介:刘 清(1966—),女,湖北武汉人,教授,博士,博士生导师,研究方向为交通运输安全。E-mail:673633005@qq.com

用 RR 间隔数据和低频/高频 (Low Frequency/High Frequency, LF/HF) 值, 评估操作员的精神工作量, 将其与船长和舵工的精神工作量进行比较, 并验证模拟器及其训练场景的有效性; 一些学者使用心理负荷主观评定技术以评估船员心理负荷, 如美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 任务负荷指数和 Cooper-Harper 量表等。^[9] 这些技术虽然实施需求较低、可接受性较高, 但其敏感性和诊断力存在不足, 研究者难以消除其主观性的缺陷。^[10-11]

目前, 国内外针对船员心理负荷的量化研究较少, 国内研究大多偏重于定性研究, 国外则使用心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 频域指标直接表征船员心理负荷。因此, 为量化航行状态下的船员心理负荷值, 在结合汽车驾驶员心理负荷特性研究^[12]的基础上, 本文以心率和 HRV 指标为基础, 构建船员心理负荷因数模型, 探寻在航行状态下的船员心理负荷变化规律特征, 以更好地预防水上交通事故的发生和提高航行安全水平。

1 试验设计与实施

1.1 试验环境

试验在武汉理工大学航运学院全任务大型船舶操纵模拟器 Navi-Trainer Professional 5000 型内进行, 见图 1。该模拟器具有雷达、电子海图、助航仪器和通信系统等组成的驾驶台综合船桥系统, 能真实地模拟船舶在各种情况下的状态。通过后台操纵, 可实现场景变换, 包括能见度不良、碰撞、溢油和人员落水等。

1.2 试验设备

试验仪器选用芬兰 POLAR Electro 出售的 POLAR V800 腕表与带有数据发送器的 H10 胸带采集心电参数, 见图 2, 其佩戴方式见图 3。带有传感器的胸带测量 RR 心率间距, 发射器将 RR 心率间距数据发送到腕表, 该腕表会自动将 RR 心率间距数据更改为心跳, 试验期间可实时看到被试人员心率的起伏变化。



图 1 船舶操纵模拟器



图 2 心率监测器

1.3 被试人员

为确保数据的真实完整性, 选取 11 名试验时担



a) 心率设备佩戴步骤 1 b) 心率设备佩戴步骤 2

图 3 佩戴心率设备

任船长职位的船员, 被试船员最小年龄 32 岁, 最大年龄 46 岁, 船舶驾龄为 5 ~ 26 a。所有被试船员均有一定年限的航行经历, 有良好的驾驶习惯和心理健康状态, 精神状态良好且无生理缺陷, 均能完成船舶操纵下达的指令。被试船员基本信息见表 1。

表 1 被试船员基本信息

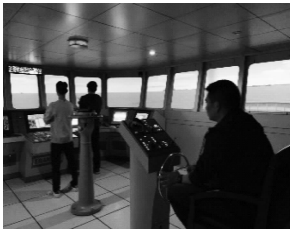
编号	年龄/ 岁	性别	船舶驾龄/ a	婚姻状况	教育程度
1	33	男	12	已婚	大专
2	33	男	9	已婚	大专
3	33	男	9	已婚	大专
4	38	男	10	已婚	大专
5	45	男	20	已婚	大专
6	46	男	26	已婚	本科及以上
7	43	男	16	已婚	大专
8	44	男	23	已婚	高中或中专
9	32	男	8	已婚	大专
10	34	男	5	未婚	大专
11	33	男	9	已婚	大专

1.4 试验过程

控制室工作人员预先告知被试船员的航行区域, 从资格考试数据库中 choice 并为其提供场景, 船舶操纵试验场景见图 4。在试验开始前, 将胸带上的电极区弄湿, 把胸带束紧在被试船员的胸部并调整至舒适区域, 连接传感器且被试船员均以放松的状态接受测试。每场试验持续时间约为 40 min, 每次使用后, 从胸带上解开传感器并用自来水冲洗胸带。



a) 操纵试验场景一



b) 操纵试验场景二

图 4 船舶操纵试验场景

1.5 评价指标

用 Kubios Oy 开发的 Kubios HRV 的 Standard (3.4 版) 软件进行数据处理,该软件具有预处理的功能,可进行基于阈值的心跳节拍校正,也可从 RR 数据中进行最佳趋势去除,以进行短期 HRV 分析,研究表明其输出参数对相关研究具有参考价值。^[13]

HRV 是指连续窦性心跳间期(瞬时心率)的微小涨落或逐拍 R 波间期的微小差异。^[14] 时域分析法、频域分析法和非线性分析法是 HRV 分析常用的 3 种方法。本文以心率指标和时域指标为基础构建船员心理负荷模型,采用的指标为平均心率(Mean Heart Rate, MHR)、全部 RR 间期的标准差(Standard Deviation of Normal-to-Normal RR Intervals, SDNN)和连续 RR 间期差值的均方根(Root Mean Square of Successive RR Interval Differences, RMSSD)。其中: MHR 是在观测时间段内的所有心率之和除以观测心率值的个数所得的值,能够从本质上,客观、直接地反应船员航行时的心理紧张程度;SDNN 是 RR 间期的标准差,反应被试的迷走神经状态;RMSSD 是全程相邻 RR 间期的差值均方平方根,反应被试的副交感活性。

HRV 频域指标是由 RR 间期通过快速傅里叶变换或自回归变换得到的。主要划分为 4 个频段:小于 0.003 Hz 为超低频段(Ultra Low Frequency, ULF);0.003 ~ 0.040 Hz 为极低频段(Very Low Frequency, VLF);0.040 ~ 0.150 Hz 为低频段;0.150 ~ 0.400 Hz 为高频段。研究表明:随着负荷逐渐增加,LF/HF 数值呈增加趋势。^[15] 通过频域指标的分析,验证船员心理负荷模型的可信性。

2 船员心理负荷模型构建

因数分析利用降维思想,将多个实测变量转换为少数几个相互独立且包含原有变量大部分信息的因数,以再现原始变量与因数之间的相互关系。因数分析根据原始变量的信息重新组合,可通过旋转使得因数变量更具有可解释性。因此,对所提取的被试船员的心率和 HRV 指标进行分析,即 MHR、SDNN 和 RMSSD,量化船员在航行过程中的心理负荷值。

因数分析要求各变量指标间应具有相关性,使用 SPSS25.0 软件进行皮尔逊相关性分析,判断指标间的相关性。结果表明:MHR 与 SDNN 呈显著负相关关系($r = -0.364$, Sig. = 0.024 < 0.050),与 RMSSD 呈极显著负相关关系($r = -0.514$, Sig. =

0.000),而 RMSSD 与 SDNN 呈极显著正相关关系($r = 0.780$, Sig. = 0.000)。各变量间的相关性结果表明可进行因数分析。

相关研究表明:当心理负荷增加时,心率增大,HRV 减小。^[16] 使用 DSDNN 和 DRMSSD 分别表示 SDNN 和 RMSSD 的倒数,将极小型指标转化为极大型指标。在进行因数分析前,使用 Z-score 法对数据进行标准化预处理,以消除变量量纲的影响。

检验统计量(Kaiser Meyer Olkin, KMO)和 Bartlett 球形检验结果见表 2。Bartlett 球形检验结果表明应拒绝各个变量独立的原假设。KMO 统计量为 0.609 > 0.600,小于 0.700,且 Sig. < 0.010,说明各变量间没有特别完美的信息重叠度,需进一步分析。

表 2 KMO 和 Bartlett 球形检验结果

KMO 取样足够检验	0.609	
Bartlett 球形检验	近似卡方值	48.493
	自由度	3.000
	显著性	0.000

公因数方差见表 3,所有变量的共同度都在 90% 以上,表明各变量所包含的信息能被提取的公因数表示的程度很高,提取的公因数的解释性极强,且特殊因数可忽略不计。各个指标间存在较高的相关性,可进行因数分析,从原始变量提取公因数。

表 3 公因数方差

标准化变量	初始	提取
Z_{MHR}	1.000	0.995
Z_{DSDNN}	1.000	0.945
Z_{DRMSSD}	1.000	0.928
提取方法:主成分分析法		

总方差解释见表 4,在因数旋转前后,第 1 个公因数的方差贡献率分别达到 72.519% 和 59.291%,表明因数分析效果比较好。因数旋转前,方差贡献率为 72.519%,对应特征值为 2.176,应当选择第 1 个公因数,而第 2 个公因数对应特征值小于 1,未达到选取要求。当采用方差最大正交旋转(Varimax)后,前 2 个公因数的特征值均大于 1,累积方差贡献率为 95.618%,应取前 2 个公因数。最终需结合公因数与指标间的关系,是否可解释心理负荷与 HRV 指标间的关系,从而确定选择因数旋转前的第 1 个公因数或是旋转后的前 2 个公因数。

表 4 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%
1	2.176	72.519	72.519	2.176	72.519	72.519	1.779	59.291	59.291
2	0.693	23.100	95.618	0.693	23.100	95.618	1.090	36.327	95.618
3	0.131	4.382	100.000	—	—	—	—	—	—

未旋转前的初始因数载荷阵见表 5,反映了公因数与原始变量之间的相关程度。第 1 个公因数中,MHR、DSDNN 和 DRMSSD 的载荷分别达到 0.692、0.891 和 0.950,在量化船员心理负荷时 3 个指标均为正向指标,且 DRMSSD 指标的贡献率最大,DSDNN 指标次之,MHR 指标的贡献率最小。

表 5 初始因数载荷阵

标准化变量	公因数 1(主成分 1)
Z_{MHR}	0.692
Z_{DSDNN}	0.891
Z_{DRMSSD}	0.950

主成分得分的表达式为

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{2.176}}(0.692 \times Z_{MHR} + 0.891 \times Z_{DSDNN} + 0.950 \times Z_{DRMSSD})$$

(1)

式(1)中: Z_{MHR} 、 Z_{DSDNN} 和 Z_{DRMSSD} 为标准化后的原始变量。

因数模型为

$$\begin{aligned} Z_{MHR} &= 0.692Y_1; Z_{DSDNN} = 0.891Y_2; \\ Z_{DRMSSD} &= 0.950Y_3 \end{aligned}$$

(2)

为使因数载荷矩阵中系数更加显著,对初始因数载荷矩阵进行旋转,见表 6,前 2 个公因数均与 3 个指标呈正比关系。公因数 1 中,DSDNN 的载荷为 0.964,DRMSSD 的载荷为 0.895,而 MHR 的载荷仅为 0.220;在公因数 2 中,MHR 的载荷为 0.973,而 DSDNN 与 DRMSSD 的载荷分别为 0.128 和 0.356。结合现实意义,公因数 1 是以 HRV 为关键的量化指标,公因数 2 是以心率为关键的量化指标。由表 4 可知:2 个公因数的累积贡献方差达到 95.618%,而旋转前的第 1 个公因数的贡献率为 72.519% <

表 6 旋转后的成分矩阵

标准化变量	公因数 1	公因数 2
Z_{MHR}	0.220	0.973
Z_{DSDNN}	0.964	0.128
Z_{DRMSSD}	0.895	0.356

95.618%,表明旋转后的因数载荷阵更能够合理地解释船员心理负荷内容。因此,选取方差最大正交旋转的前 2 个公因数作为计算船员心理负荷量化模型的基础。

旋转后的因数模型为

$$\begin{cases} Z_{MHR} = 0.220Y'_1 + 0.973Y'_2 \\ Z_{DSDNN} = 0.964Y'_1 + 0.128Y'_2 \\ Z_{DRMSSD} = 0.895Y'_1 + 0.356Y'_2 \end{cases}$$

(3)

式(3)中: Y'_1 和 Y'_2 分别为旋转后的公因数得分。

用回归法计算得到的因数得分系数矩阵见表 7。

表 7 因数得分系数矩阵

标准化变量	公因数 1	公因数 2
Z_{MHR}	-0.264	1.052
Z_{DSDNN}	0.641	-0.268
Z_{DRMSSD}	0.492	0.030

2 个公因数的得分函数为

$$\begin{cases} Y'_1 = -0.264Z_{MHR} + 0.641Z_{DSDNN} + 0.492Z_{DRMSSD} \\ Y'_2 = 1.052Z_{MHR} - 0.268Z_{DSDNN} + 0.030Z_{DRMSSD} \end{cases}$$

(4)

以公因数的方差贡献率占累计方差贡献率的比重作为权重,将公因数得分进行加权汇总,最终得到船员心理负荷量化指标 Q 为

$$Q = \frac{1}{0.95618}(0.59291Y'_1 + 0.36327Y'_2)$$

(5)

以各公因数对应的方差贡献率为权重乘以因数得分系数矩阵,可得到最终模型中心率和 HRV 指标的贡献率,见图 5。DRMSSD、DSDNN 和 MHR 对船

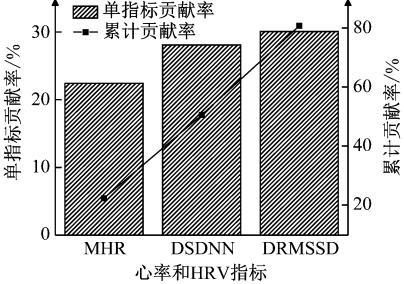


图 5 船员心理负荷模型中各指标贡献率

员心理负荷计算结果的贡献率分别为 30.26%、28.27% 和 22.56%,说明在计算船员心理负荷时 HRV 指标比心率指标具有更高的效度和信度。

由于因数分析计算得到的心理负荷值有正有负,采用离差标准化,使结果值映射到区间 $[0,1]$ 内,以便于观察。

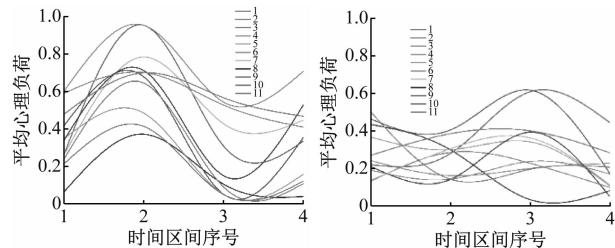
3 船员心理负荷变化特征

3.1 航行初期船员心理负荷变化规律

通过构建的因数模型计算得到船员在航行初期(前 4 min)的心理负荷变化,见图 6a。由图 6a 可知:在航行开始后,11 名被试船员的心理负荷值随着时间的增加而显著增加,在第 2 min 时达到峰值;在第 3 min 时,随着船员适应航行状态(无突发事件),其心理负荷出现明显下降,处于较低水平。分析其原因如下:航行初期,船员需适应陌生设备,眼睛需快速了解航道状况,容易导致船员心理紧张,使精神压力增大,因而会出现一段时间的适应期。但随着时间的推移,船员逐渐放松,心理负荷也随之下降。由图 6a 可知:船员适应航行初期时的常规航行场景(无突发事件)需约 2 min。

3.2 航行末期船员心理负荷变化规律

航行末期(末 4 min)船长的心理负荷变化见图 6b。由图 6b 可知:相较于航行初期,11 名被试船员的心理负荷值均处于较低水平,变化趋势较为平滑,且呈现下降的趋势。分析其原因如下:船员需训练的场景均已操作完毕,后台通知本场训练即将结束,船员可自由操纵船舶,身心较为放松,精神压力较小,心理负荷量也较小。



a) 前 4 min 船员心理负荷变化 b) 末 4 min 船员心理负荷变化

图 6 航行初期和航行末期船员心理负荷变化

3.3 航行过程船员心理负荷变化特征

从 11 名被试船员随机选取 2 名绘制航行过程中的心理负荷变化曲线,并对照试验事件记录进行分析,观察其在突发事件下的心理负荷量。

3.3.1 1[#]被测船员心理负荷变化

观察不同航行环境下 1[#]被试船员心理负荷变化,见图 7a。由图 7a 可知:该船员的心理负荷存在

3 个明显峰值,结合事件记录与试验视频分析其原因如下:

1) 该船员在航行初期(图中①)由于需适应设备与航行环境,心理负荷处于较高水平;

2) 约第 8 min 时(图中②),能见度逐渐不良,该船员的心理负荷有明显上升的趋势;

3) 约第 15 min 时(图中③),后台报警发生舵机故障的突发事件,此时该船员的心理负荷值达到顶峰;

4) 约第 25 min 时(图中④),后台提醒舵机修复完成,该名船员的心理负荷呈现明显下降的趋势;

5) 而第 32 min(图中⑤)的峰值并未发生突发事件,观看试验视频发现当时该船员受他人交流沟通的干扰;

6) 航行末期(图中⑥)由于试验临近结束,该名船员身心较为放松,心理负荷也处于较低水平。

3.3.2 5[#]被测船员心理负荷变化

观察不同航行环境下 5[#]被试船员心理负荷变化,见图 7b。由图 7b 可知:该船员的心理负荷存在 6 个明显峰值,结合事件记录与试验视频分析其原因如下:

1) 在航行初期(图中①)能见度逐渐不良,该船员心理负荷明显上升;

2) 约第 10 min 时(图中②)发生主机故障的突发事件;

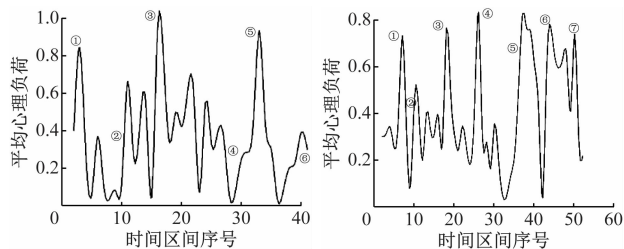
3) 约第 18 min 时(图中③)主机恢复正常工作;

4) 约第 26 min 时(图中④)发生碰撞事件;

5) 约第 37 min 时(图中⑤)发生人员落水事件;

6) 约第 50 min 时(图中⑦)船员进行抛锚操作;

7) 约第 42 min 时(图中⑥)的峰值并未找到原因。



a) 1[#]被测船员心理负荷变化 b) 5[#]被测船员心理负荷变化

图 7 被测船员心理负荷变化

通过以上实例分析,在考虑到船员个体差异性和其他因素干扰的情况下,该模型对船员的心理负

荷评估效果较好,进一步验证模型的可靠性。在正常航行时,船员心理负荷变化比较平稳;在发生突发事件时,被试船员的心理负荷明显高于正常航行时。外部环境的变化或潜在风险的发生作用于船员,直接或间接导致船员的心理负荷水平升高,影响其行为决策能力。

3.4 模型验证

基于时变 AR 模型功率谱计算方法,利用 Kubios HRV Standard(3.4 版)软件得到所有被试船员在航行初期(前 4 min)的频域指标。为进一步验证模型的有效性,通过研究被试船员的 HRV 频域指标,分析比较其与船员心理负荷模型计算结果的相关性。

相关研究^[17-18]表明:相比于 LF 和 HF,LF/HF 指标能够更直观、敏感地感知驾驶员生理特性的变化。因此,选取 LF/HF 指标验证船员心理负荷模型,见图 8。由图 8 可知:在航行初期,LF/HF 有明显上升趋势,随着船员逐渐适应常规航行状态(未遇突发事件),在约 2 min 后,LF/HF 有明显下降的趋势,此时心理负荷处于较低水平或呈降低的趋势。该结果与上文提出的心理负荷计算模型基本一致。

以 1[#]被试船员为例,绘制其在航行时的 LF/HF 变化图像,见图 9。对照试验事件记录可知:当有突发事件发生时,LF/HF 值处于较高水平。该结果与船员心理负荷模型计算结果一致。皮尔逊相关性分析结果表明:LF/HF 值与船员心理负荷值存在极其显著的正相关关系($r=0.739$, $\text{Sig.}=0.000$)。

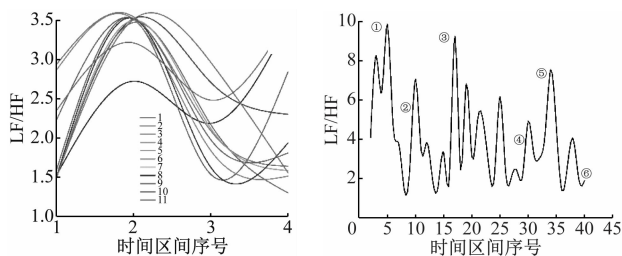


图8 航行前 4 min 船员 LF/HF 变化

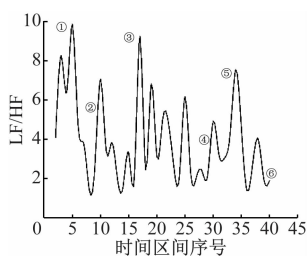


图9 1[#]被测试船员 LF/HF 变化曲线

4 结束语

通过船舶操纵模拟器采集船员在航行状态下的心率和 HRV 数据,构建船员心理负荷模型,可在一定程度上明确船员在航行过程中心理负荷的变化,对于提高船员行为可控性,增强船舶航行安全具有一定的意义。

1) 在计算船员心理负荷时,HRV 指标的有效性和可靠性高于心率指标,各指标的方差贡献率大

小依次为 $\text{DRMSSD} > \text{DSDNN} > \text{MHR}$ 。

2) 船员在航行过程中的心理负荷变化呈现高(航行初期)—低(常规场景)—高(突发事件)—低(航行末期)的变化趋势。

3) 在航行初期前 2 min,船员的心理负荷处于较高水平或呈现升高的趋势,船员适应常规航行场景需要约 2 min。在航行末期,船员的心理负荷处于较低水平或呈现下降的趋势,且变化趋势较为平滑。在发生突发事件时,船员心理负荷受到的影响最为明显。

4) LF/HF 值与船员心理负荷值存在极其显著的正相关关系,进一步验证该模型的有效性。

构建基于心率和 HRV 指标的船员心理负荷模型,避免使用心理量表引起的主观性等问题。但由于船员的心理生理特征具有个体差异性,船员在岗工作的心理负荷特征有待在今后的工作中进一步研究验证。未来可结合眼动、脑电等指标,标定被试船员在不同航行场景下的心理负荷,监测其心理负荷状态并在超过阈值时发送警报信息。

参 考 文 献

- [1] HANZU-PAZARA R, BARSAN E, ARSENIU P, et al. Reducing of Maritime Accidents Caused by Human Factors Using Simulators in Training Process[J]. Journal of Maritime Research, 2008, 5(1): 3-18.
- [2] TZANNATOS E. Human Element and Accidents in Greek Shipping[J]. The Journal of Navigation, 2010, 63(1): 119-127.
- [3] WAARD D D. The Measurement of Drivers' Mental Workload[M]. Groningen: University of Groningen, 1996.
- [4] WILSON G F, RUSSELL C A. Performance Enhancement in an Uninhabited Air Vehicle Task Using Psychophysiologically Determined Adaptive Aiding[J]. Human Factors, 2007, 49(6): 1005-1018.
- [5] FAN S, ZHANG J, BLANCO-DAVIS E, et al. Effects of Seafarers' Emotion on Human Performance Using Bridge Simulation[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 111-119.
- [6] MURAI K, WANG J, WANG Y, et al. Toward Evaluation of Mixed Culture's Team Works: Case Study of Ship Bridge Simulator-Based Training for Cadets[C]. 2017 Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems. IEEE, 2017: 1-5.
- [7] OKAZAKI T, MURAI K, MITOMO N, et al. A Study

on Navigator’s Mental Workload in Ship Handling Simulator[C]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference on. IEEE, 2007.

[8] SUGIMOTO I, KITAMURA K, MURAI K, et al. Study on Relation Between Operator and Trainee’s Mental Workload for Ship Maneuvering Simulator Exercise Using Heart Rate Variability[C]. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE, 2016.

[9] 贾会宾,赵庆柏,周治金. 心理负荷的评估:基于神经人因学的视角[J]. 心理科学进展,2013,21(8):1390-1399.

[10] CAIN B. A Review of the Mental Workload Literature [J]. Defence Research & Development,2007,9(4):1-34..

[11] 崔凯,孙林岩,冯泰文,等. 脑力负荷度量方法的新进展述评[J]. 工业工程,2008,11(5):1-5.

[12] 朱彤,吴玲,胡月琦,等. 基于因数模型的高速公路特长隧道驾驶人心理负荷特性研究[J]. 中国公路学报,2018,31(11):165-175.

[13] TARVAINEN M P, NISKANEN J P, LIPPONEN J A, et al. Kubios HRV-Heart Rate Variability Analysis Software[J]. Computer Methods & Programs in Biomedicine, 2014, 113(1):210-220.

[14] 李增勇,焦昆,陈铭,等. 汽车驾驶员驾驶过程中的心率变异性功率谱分析[J]. 中国生物医学工程学报,2003,22(6):574-576.

[15] DIRK H, KARIN S, ULRICH Z, et al. Characterization of Complex Heart Rate Dynamics and Their Pharmacological Disorders by Non-Linear Prediction and Special Data Transformations[J]. Cardiovascular Research,1996,31(3):434-440.

[16] 成英,高利,高鲜萍. 城市快速路驾驶人注意力分配特征变化[J]. 中国安全科学学报,2014,24(10):71-76.

[17] 龙伟峰. 基于驾驶员工作负荷的公路平面线形设计安全评价研究[D]. 北京:北京工业大学,2010.

[18] 胡江碧,曹新涛. 道路交通事故肇事驾驶员特征分析[J]. 中国公路学报,2009,22(6):106-110.

(上接第 18 页)

8 结束语

货物围护系统是 LNG 运输船的核心,其安全关系到船舶安全和人员安全,能识别出的风险点和影响能够引起船舶管理人和管理公司对 LNG 运输船货物围护系统安全运营的重视分别如表 1 和表 2 所示,风险事前预防措施、事中应急响应和事后补救措施为船舶建造厂、船舶管理人、管理公司、船级社、专利方、船舶修理厂、设备服务商、船员等参与船舶货物围护系统建造、运营和维修等各个环节的相关方提供可遵循、可选用和可参考的风险响应措施分别如表 3、表 4 和表 5 所示,提升应对货物围护系统发生安全风险的能力。

参 考 文 献

[1] 中国船级社. 液化气体运输船检验指南:GD26—2018 [S]. 北京:人民交通出版社,2018.

[2] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范:GD16—2016 [S]. 北京:人民交通出版社,2018.

[3] 段玉龙,胡以怀. LNG 船舶事故分析及风险控制[J]. 船海工程,2013,42(3):191-194.

[4] 洪汇勇,江玉国,魏伟坚,等. LNG 船舶海上运输的风险分析及其控制[J]. 航海技术,2008(4):33-35.

[5] 吴宛青,张彬. 液化天然气船舶液货泄漏风险评价研究[J]. 中国航海,2008,31(3):276-279.

[6] 张彬,吴宛青. LNG 船舶重大事故后果分析研究[J]. 中国航海,2009,32(1):77-81.