

中文引用格式:王莉莉,顾秋丽. 管制员个体工作负荷多维量化研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(6):1-9.

英文引用格式:WANG Lili, GU Qiuli. Study on multidimensional quantification of individual workload of controllers [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 1-9.

# 管制员个体工作负荷多维量化研究\*

王莉莉<sup>1</sup>教授, 顾秋丽<sup>\*\*2,3</sup>讲师

(1 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300; 2 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300; 3 中国民航大学 计算机科学与技术学院, 天津 300300)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.06.1562

资助项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1633124)。

**【摘要】** 为提高空管系统高效运行, 聚焦管制员个体工作负荷建立量化模型; 首先设计试验采集一线16名区域管制员的岗前与岗后各项指标数据, 根据测试数据变化, 选择出敏感变量, 描述个体工作负荷; 其次建立包含心理感知负荷、生理反应负荷与脑力工作负荷3个维度的综合评估指标体系, 构建管制员个体工作负荷指数模型; 然后通过熵权-客观组合法求解个体工作负荷指数最优权重, 最终得出管制员个体工作负荷量化模型; 最后进一步根据管制员个体工作负荷综合指数进行K-Means聚类分析, 结果表明: 管制员因个体不同岗后工作负荷存在差异。依据个体工作负荷指数大小, 管制员可分为3类, A类管制员数量占总人数50%, 岗后个体工作负荷增长最小; B类管制员数量占总人数43.75%, 岗后负荷增长居中; C类管制员数量占总人数6.25%, 岗后负荷增长最大, 与教员对管制员能力的评分结果一致。

**【关键词】** 空中交通管制员; 个体工作负荷; 配对样本T检验; 熵权-客观组合法; K-Means聚类

## Study on multidimensional quantification of individual workload of controllers

WANG Lili<sup>1</sup>, GU Qiuli<sup>2,3</sup>

(1 College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
2 College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
3 College of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to enhance the efficacious operation of the air traffic control system, a quantitative model was established by focusing on the individual load of controllers. Tests were designed to collect pre-service and post-service data on various indicators from 16 area controllers in the front line. Sensitive variables were selected to describe individual loads based on changes in test data. A comprehensive assessment index system was established that included three dimensions: psychological perception load, physiological reaction load, and mental workload. The controller individual load index model was developed. The optimal weights of the individual load index were determined by the the entropy-critic combination weighting method. The quantitative model of the controller's individual workload was finally derived. Further K-Means clustering analysis was performed based on the controller's individual load composite index. There were evident discrepancies in the workload changes of the controllers due to

\* 文章编号: 1003-3033(2024)06-0001-09; 收稿日期: 2023-12-13; 修稿日期: 2024-03-16

\*\* 通信作者: 顾秋丽(1988—), 女, 辽宁锦州人, 硕士, 讲师, 主要从事空中交通人为因素方面的研究。E-mail: qlgu@cauc.edu.cn。

different individual postures. The results indicate that the post-post individual workload changes of the controllers could be classified into three distinct groups. The first group, comprising 50% of the total number of controllers, exhibited the smallest post-post individual workload growth. The second group, accounting for 43.75% of the total number of controllers, exhibited a moderate post-post individual workload growth. The third group, comprising 6.25% of the total number of controllers, exhibited the largest post-post individual workload increase. These findings align with the instructor's ratings of controller competence.

**Keywords:** air traffic controller; individual workload; paired-sample *T*-test; entropy-critic combination weighting method; K-Means cluster analysis

## 0 引言

新型冠状病毒感染“乙类乙管”后,2023年上半年国内和国际航班量持续上升,已超过2019年同期水平<sup>[1]</sup>。随着航班流量的持续增加,不安全事件也随之增加,主要原因之一是空中交通管制员(简称管制员)不适应低负荷到高负荷的工作量变化产生的,由此可以发现,管制员的个体负荷是影响空中交通安全高效运行的关键因素。因此,如何科学量化与精细评估管制员个体工作负荷具有重要意义。

总结国内外学者研究成果发现,关于管制员的工作负荷评估方式主要包括4种:①主观量表评估法,通过量表采集数据操作简单、方便,但数据具有滞后性且受主观影响较大<sup>[2]</sup>。②主任务测量法,通过统计管制员发出的指令种类和时间计算负荷,但不同管制区域差别较大,此种方法只能针对特定空域进行计算,又陆空通话语音具有特殊性,常规软件分析困难,人工分析工作量大<sup>[3]</sup>。③基于空中交通复杂度评估法,通过扇区动态变化或扇区内航空器的数量进行评估,但因管制过程中常出现各类特殊情况很难评估任务难度以及产生的工作负荷<sup>[4]</sup>。④生理数据测量法,是目前比较新颖的测量方法,通过测量管制员眼动数据与生理数据实时评估管制员的工作负荷<sup>[5]</sup>。眼动行为是评价管制员信息搜索能力的一个重要指标,对于管制员做决策至关重要<sup>[6]</sup>,学者们通常通过管制员的注视、扫视行为以及瞳孔直径评估管制员的工作负荷。WANG Yanjun等<sup>[7]</sup>通过对比管制员的注视与扫视等行为发现,成熟管制员比新手管制员的搜索效率更高;AHLSTROM等<sup>[8]</sup>发现管制员的工作负荷随着航班数量的增加而线性增加,眨眼时间和平均扫视距离减小,平均瞳孔直径增加;WEE等<sup>[9]</sup>发现随着飞行流量的增大,管制员的平均注视持续时间更长,注视时间占比更大。脑电信号(Electroencephalogram,

EEG)与管制员的工作负荷变化也有较强关联,能够较好地评估管制员的工作负荷<sup>[10]</sup>,ARICO等<sup>[11]</sup>通过分析12名在校管制学员在模拟管制过程中的脑电信号,建立基于脑电数据的工作负荷模型;陈彦峰<sup>[12]</sup>研究发现,成年人在进行需要智力支撑的有目的的活动或有意识的视觉活动时,脑电波中的 $\alpha$ 波会被低幅高频的 $\beta$ 波代替,因此,脑电 $\beta$ 波能更敏感与有效地评估管制员的工作负荷。陈凤兰等<sup>[13]</sup>通过生理仪器测量发现,较大的工作负荷导致人体的皮肤导电能力降低。

综上,学者们都是在一个测试场景下采用生理数据测量法研究管制员负荷随流量或复杂任务变化,测试结果呈现了参与测试管制员群体的平均工作负荷的变化过程。但实际上连续工作带来的工作负荷的增长率因个体不同而存在差异,关于进一步精细化研究管制员的个体工作负荷内容还未见文献发表。鉴于此,笔者拟聚焦管制员的个体工作负荷,通过测量同一管制员经过24h工作周期累积后岗前与岗后的个体工作负荷的变化,构建综合心理感知负荷、生理反应负荷与脑力工作负荷的评价指标体系,根据管制员工作实际情况与岗位能力要求建立管制员个体工作负荷指数研究模型,并通过试验数据量化与聚类分析模型,评估管制员岗后个体工作负荷变化差异,以期关注岗后负荷增长较大的管制员群体,避免发生不安全事件。

## 1 个体工作负荷评价指标体系构建

为构建科学与有效的管制员个体工作负荷评价体系,通过访谈一线管制员,并利用美国航空航天局(National Aeronautics and Administration, NASA)-任务负荷指数(Task Load Index, TLX)量表进行问卷调查,发现管制员在工作中为保障航空器安全、有序与高效地运行,内心会产生一定的心理压力;同时长期昼夜轮班工作,身体会产生明显的生理反应;工作中

需要保持注意力高度集中,并快速提取关键信息发出指令,大脑持续运转会产生较强的脑力工作负荷。因此,基于管制员工作实际选取以上3个对于管制员个体工作负荷影响较大关键因素,建立心理感知负荷、生理反应负荷和脑力工作负荷的三维综合评价指标体系。

心理感知负荷指管制员当前所承受的心理负担量,包括管制员自身的紧张感和由工作产生的压力感,研究表明:压力知觉(Perceived Stress Scale, PSS)量表能够有效评估管制员内在压力状态<sup>[14]</sup>, NASA-TLX工作负荷量表能够有效评估管制员主观感知的工作负荷<sup>[15]</sup>,因此,选取上述2个量表综合量化管制员的心理感知负荷。

生理反应负荷指管制员工作中身体产生的反应,脑电 $\beta$ 波可以反应大脑思维活跃性<sup>[16]</sup>,皮肤电信号是由交感神经控制皮肤分泌汗液反应管制员警觉性<sup>[17]</sup>,瞳孔直径在光照不变情况下也会产生变化反应管制员注意力集中性,因此,上述3个指标能够量化管制员的生理反应负荷。

脑力工作负荷指管制员在管制过程中信息处理速度,即决策速度与决策的困难程度,其与管制员在工作中的剩余能力负相关。结合区域管制员的工作实际,管制员的反应能力、搜索目标航班能力以及关键信息提取能力十分重要。首次注视反应时间(First Fixation Duration, FFD)指航空器进入其管辖范围内到管制员首次识别航空器的时间间隔,时间短说明反应快,因此,能够有效评估管制员反应能力。总注视时间(Total Fixation Duration, TFD)指管制员识别航空器提取关键信息到作出决策向飞行员发出正确的指令时间间隔,注视时间(大于100 ms)短说明信息提取能力强,因此,能够有效评估管制员的决策能力。扫视目标时间(Saccades Duration, SD)指眼球从一个注视运动结束到下一个注视运动开始的时间,即管制员搜索目标时间,扫视时间短说明搜索能力强,因此,可有效评估管制员目标搜索能力。综上,首次FFD、TFD和SD能够量化管制员的脑力负荷。

管制员个体工作负荷的指标体系如图1所示。

## 2 个体工作负荷试验设计

### 2.1 个体工作负荷试验方案

为建立管制员个体工作负荷量化模型,试验组根据某管制单位管制中心轮班时间设计了岗前和岗

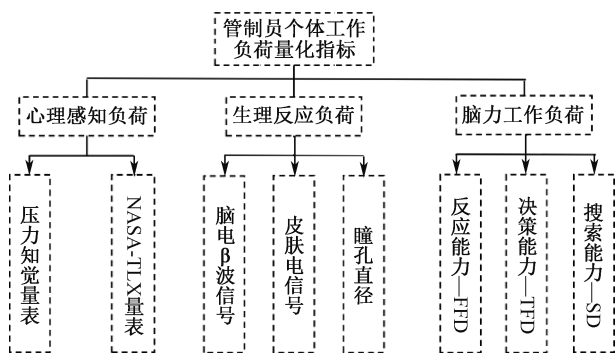


图1 管制员个体工作负荷指标体系

Fig.1 Individual controller workload indicator system

后的个体工作负荷测试。根据该管制中心管制员工作24 h休息48 h安排,在管制员上岗前进行岗前测试,时间为上午08:00—12:00;管制员结束24 h工作后进行岗后测试,时间为凌晨01:00—05:00,具体测试时间为管制员当晚结束工作时间。岗前和岗后测试内容相同,包括测试前填写PSS量表,进行模拟管制指挥40 min,测试后填写NASA-TLX工作负荷量表。为减少额外变量对试验的影响,测试前告知被试人员测试流程与试验注意事项。

### 2.2 个体工作负荷试验对象

试验组聘请管制中心一线区域放单管制员16名参与试验,均为男性,右利手。年龄为25~48岁,平均年龄29.88岁;岗龄分布为3~26年,平均岗龄7.06年,具体情况如图2所示。

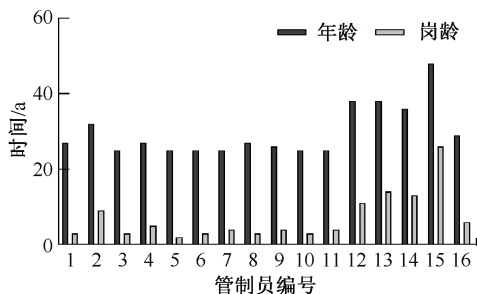


图2 管制员年龄和岗龄分布

Fig.2 Distribution of controllers by age and length of service

### 2.3 个体工作负荷试验平台

试验地点为管制中心复训模拟管制室,设备为空中交通管制模拟机、眼动仪和多导生理仪。眼动仪用于采集模拟管制过程中管制员的眼动行为数据,多导生理仪用于采集管制员的脑电信号和皮肤电信号。

## 2.4 个体工作负荷试验过程

模拟管制测试时长为 40 min,空域为中等复杂扇区空域,交通流量由中等增加到超大流量(10~30架次),期间发生特情 3~4 次。特情种类包括:紧急下降、发动机一发失效、航空器低油量运行、航空器无线电失效等,被试管制员事先不知晓特情发生时间与类型。测试过程中,管制教员实时观察管制员的工作状态,记录特情发生反应时间和处置效果,同时根据《雷达管制基础模拟机培训大纲》<sup>[18]</sup>对管制员的综合表现进行评分。

## 2.5 个体工作负荷试验数据结果处理

### 2.5.1 心理感知负荷数据分析

根据心理感知负荷量化指标,按照 PSS 量表和 NASA-TLX 量表计算规则,16 名管制员岗前和岗后个体量表分数见表 1。由表 1 可知:管制员工作

24 h 后,心理压力和工作感知负荷均有不同程度增加。运用 SPSS. 26 进行配对样本  $T$  检验,见表 2。PSS 量表  $p=0.031$ ,NASA-TLX 量表  $p=0.000$ ,两者均小于 0.05,说明管制员岗前与岗后的心理压力和感知负荷对比后均有显著性差异,2 个指标能够有效反映心理感知负荷变化。

表 1 PSS 和 NASA-TLX 量表分数统计示例

Table 1 Examples of statistics of PSS and NASA-TLX scale scores

量表名称	01	02	...	08	09	...	15	16
PSS 岗前	38	31	...	33	32	...	41	31
PSS 岗后	39	39	...	40	34	...	41	33
NASA-TLX 岗前	72	102	...	79	71	...	66	79
NASA-TLX 岗后	80	107	...	91	93	...	89	98

表 2 PSS 与 NASA-TLX 量表配对样本  $T$  检验

Table 2 PSS and NASA-TLX scales paired samples  $T$ -tests

主观量表	岗前岗后配对检验					$t$	自由度	Sig. 双尾
	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95% 置信区间				
				下限	上限			
PSS	-2.875 00	4.814 91	1.203 73	-5.440 68	-0.309 32	-2.388	15	0.031
NASA-TLX	-14.875 00	8.196 54	2.049 14	-19.242 6	-10.507 3	-7.259	15	0.000

### 2.5.2 生理反应负荷数据分析

根据生理反应负荷量化指标,计算管制员岗前岗后脑电  $\beta$  波、皮肤导电均值以及瞳孔直径。以往研究表明:右利手的人主视眼一般是右眼<sup>[19]</sup>,因此,选择管制员的右眼瞳孔直径进行分析。为对比岗前与岗后生理指标变化差异,平均处理所有被试的 3 个指标,处理结果如图 3 所示。管制员在工作 24 h 后,脑电  $\beta$  波值降低、皮肤导电均值降低、右眼瞳孔直径增加,说明管制员大脑的活跃性降低、警觉性减弱、注意力变分散。对 3 个指标进行岗前与岗后配对样本  $T$  检验, $\beta$  波  $p=0.012$ ,皮肤导电均值  $p=0.028$ ,右眼瞳孔直径均值  $p=0.007$ ,三者均小于 0.05,具体见表 3。说明岗前与岗后管制员的 3 项指标均有显著性差异,能够有效评估管制员的生理反应负荷变化。

### 2.5.3 脑力工作负荷数据分析

根据脑力工作负荷量化指标定义,首次 FFD 均值计算公式:

$$\overline{F_f} = \frac{1}{N} \sum_i x_i \quad (1)$$

式中: $\overline{F_f}$  为首次 FFD 均值,s; $x_i$  为首次注视第  $i$  架航空器的反应时间,s; $N$  为航空器的架次, $N=1,2,\dots,i$ 。

TFD 均值计算公式:

$$\overline{T_f} = \frac{1}{N} \sum_i y_i \quad (2)$$

式中: $\overline{T_f}$  为 TFD 均值,ms; $y_i$  为注视第  $i$  架航空器的总时间,ms。

SD 均值计算公式:

$$\overline{S_f} = \frac{1}{M} \sum_j z_j \quad (3)$$

式中: $\overline{S_f}$  为 SD 均值,ms; $Z_j$  为第  $j$  个扫视运动的时间,ms; $M$  为扫视的次数, $M=1,2,\dots,j$ 。

根据式(1)~式(3),计算管制员岗前与岗后  $\overline{F_f}$ 、 $\overline{T_f}$  和  $\overline{S_f}$ ,如图 4 所示。从图 4 可以看出,管制员工作 24 h 后,其反应时间、注视时间和扫视时间均有增加,说明管制员的反应能力、决策能力与目标搜索能力均有不同程度下降。其中,FFD 增加 38 s,TFD 增加 40 ms,SD 增加 8 ms。经过配对样本  $T$  检验后, $\overline{F_f}$ 、 $\overline{T_f}$  和  $\overline{S_f}$  的  $R$  值均小于 0.05,具体见表 4。通过岗前与岗后对比,脑力工作负荷 3 项指标都具有显著性差异,说明 3 个指标能够有效评价管制员的脑力负荷变化。

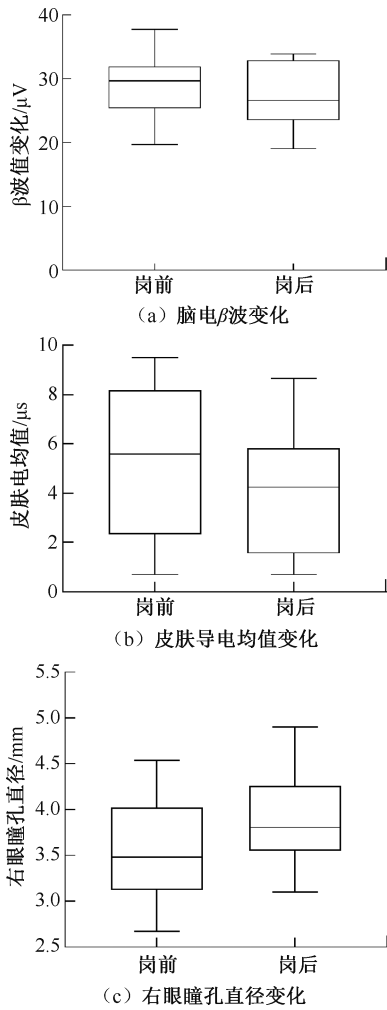


图 3 管制员生理信号变化

Fig. 3 Controller physiological signal change chart

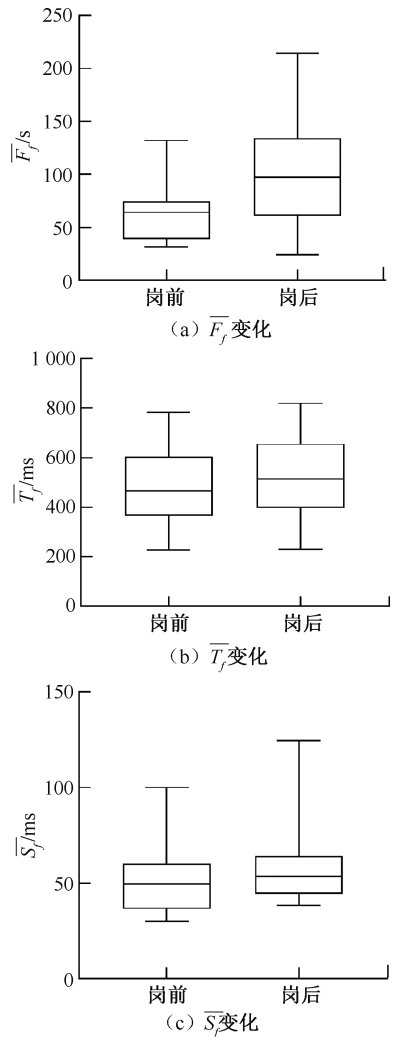


图 4 管制员脑力工作负荷变化

Fig. 4 Controller brain workload variation chart

表 3 生理负荷指标配对样本 T 检验

Table 3 Physiological load indicator paired samples T-tests

生理指标	配对差值					t	自由度	Sig. 双尾
	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95%置信区间				
				下限	上限			
β波均值	1.896 76	2.655 50	0.663 87	0.481 75	3.311 78	2.857	15	0.012
皮肤导电均值	1.269 97	2.088 88	0.522 22	0.156 89	2.383 06	2.432	15	0.028
右眼瞳孔直径	-0.281 47	0.356 77	0.089 19	-0.471 58	-0.091 36	-3.156	15	0.007

表 4 脑力工作负荷指标岗前后配对样本 T 检验

Table 4 Pre-post paired samples t-test for brain workload indicators

认知负荷指标	配对差值					t	自由度	Sig. 双尾
	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95%置信区间				
				下限	上限			
$\bar{F}_f$	-38.017 19	28.742 92	7.185 73	-53.333 20	-22.701 17	-5.291	15	0.000
$\bar{T}_f$	-40.115 06	63.004 32	15.751 08	-73.687 69	-6.542 42	-2.547	15	0.022
$\bar{S}_f$	-8.097 09	8.938 15	2.234 54	-12.859 89	-3.334 29	-3.624	15	0.003

### 3 管制员个体工作负荷多维量化研究

#### 3.1 管制员个体工作负荷模型的构建过程

根据管制员个体工作负荷评价指标分析可知：管制员在工作 24 h 后，各项指标均有显著变化，通过个体负荷指数 (Individual Load Index, ILOI) 进一步直观量化管制员岗前和岗后的个体工作负荷变化。将管制员岗前测试的状态视为初态，岗后测试的状态视为末态。因此，ILOI 定义为管制员工作期间累积的负荷值，即末态与初态之间的差值。

首先，计算评估管制员个体负荷的 8 个指标岗前与岗后的差值，具体计算公式如下 (1 表示初态，2 表示末态)：

PSS 量表得分差值  $\Delta L_{PSS}$ ：

$$\Delta L_{PSS} = L_{PSS_2} - L_{PSS_1} \quad (4)$$

NASA-TLX 量表得分差值  $\Delta L_{TLX}$ ：

$$\Delta L_{TLX} = L_{TLX_2} - L_{TLX_1} \quad (5)$$

脑电  $\beta$  波差值  $\Delta\beta$ ：

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (6)$$

皮肤导电均值差值  $\Delta K_{SCL}$ ：

$$\Delta K_{SCL} = K_{SCL1} - K_{SCL2} \quad (7)$$

右眼瞳孔直径差值  $\Delta P_d$ ：

$$\Delta P_d = P_{d_2} - P_{d_1} \quad (8)$$

首次注视目标反应时间均值差值  $\Delta F_f$ ：

$$\Delta F_f = F_{\bar{f}_2} - F_{\bar{f}_1} \quad (9)$$

注视目标持续时间均值差值  $\Delta T_f$ ：

$$\Delta T_f = T_{\bar{f}_2} - T_{\bar{f}_1} \quad (10)$$

扫视持续时间均值差值  $\Delta S_f$ ：

$$\Delta S_f = S_{\bar{f}_2} - S_{\bar{f}_1} \quad (11)$$

表 5 熵权法、客观权重法及组合法指标权重值

Table 5 Entropy weighting, critic weight method and combination method indicator weight values

算法	$\Delta L'_{PSS}$	$\Delta L'_{TLX}$	$\Delta\beta'$	$\Delta K'_{SCL}$	$\Delta P'_d$	$\Delta F'_f$	$\Delta T'_f$	$\Delta S'_f$
熵权法	0.104 8	0.073 7	0.088 8	0.112 4	0.072 7	0.153 3	0.238 8	0.155 5
CRITIC	0.126 2	0.124 6	0.139 0	0.113 4	0.100 7	0.139 5	0.120 5	0.136 1
组合法	0.104 9	0.074 0	0.089 1	0.112 4	0.072 9	0.153 2	0.238 1	0.155 4

将表 5 中熵权-客观组合权重值代入式 (12) 一式 (15)，得到每名管制员 PPLI、PRLI、BWI 以及 ILOI，具体结果见表 6、图 5。

表 6 管制员 ILOI

Table 6 ILOI for controllers

编号	PPLI	PRIL	BWI	ILOI
01	0.074 4	0.192 7	0.203 9	0.471 0
02	0.105 4	0.163 9	0.243 1	0.512 4
03	0.138 1	0.149 6	0.089 3	0.377 0

然后，将 8 个指标差值进行标准化处理统一量纲，得到标准化后的岗前与岗后的指标差值，分别为： $\Delta L'_{PSS}$ 、 $\Delta L'_{TLX}$ 、 $\Delta\beta'$ 、 $\Delta K'_{SCL}$ 、 $\Delta P'_d$ 、 $\Delta F'_f$ 、 $\Delta T'_f$  和  $\Delta S'_f$ 。

根据管制员个体工作负荷评价指标体系，得到心理感应负荷指数 (Psychological Perceived Load Index, PPLI) 模型：

$$PPLI = a \times \Delta L'_{PSS} + b \times \Delta L'_{TLX} \quad (12)$$

生理反应负荷指数 (Physiological Response Load Index, PRLI) 模型：

$$PRLI = c \times \Delta\beta' + e \times \Delta K'_{SCL} + g \times \Delta P'_d \quad (13)$$

脑力工作负荷指数 (Brain Workload Index, BWI) 模型：

$$BWI = h \times \Delta F'_f + q \times \Delta T'_f + r \times \Delta S'_d \quad (14)$$

管制员个体负荷综合指数模型：

$$ILOI = a \times \Delta L'_{PSS} + b \times \Delta L'_{TLX} + c \times \Delta\beta' + e \times \Delta K'_{SCL} + g \times \Delta P'_d + h \times \Delta F'_f + q \times \Delta T'_f + r \times \Delta S'_d \quad (15)$$

式中  $a, b, c, e, g, h, q, r$  为各个指标的权重。

#### 3.2 采用熵权-客观组合法计算指标权重

熵权法是一种综合评价指标的客观赋权法，通过指标差异变化的程度大小确定权重大小，但计算结果未考虑指标间的相关性，因此，在应用中会出现与实际不相符得情况，需要修正。客观权重法正好弥补了熵权法不足，能够兼顾指标数据间的相关性，利用数据本身所包含信息进行评价。但 2 种方法计算结果有一定差别，为平衡熵权法和客观权重法计算结果，采用博弈论的集结模型，构建熵权-客观组合法，求解基于 2 种方法的最优权重，使评价结果更加准确与符合实际<sup>[20]</sup>，具体见表 5。

续表 6

编号	PPLI	PRIL	BWI	ILOI
04	0.077 3	0.144 0	0.217 4	0.438 7
05	0.044 2	0.126 7	0.252 4	0.423 2
06	0.127 5	0.186 4	0.083 0	0.396 9
07	0.108 0	0.137 0	0.227 4	0.472 4
08	0.117 7	0.086 2	0.267 1	0.471 0
09	0.115 6	0.109 0	0.128 5	0.353 1
10	0.099 5	0.146 2	0.319 8	0.565 4
11	0.096 5	0.172 3	0.233 5	0.502 3

续表 6

编号	PPLI	PRLI	BWI	ILOI
12	0.066 3	0.124 5	0.198 5	0.389 3
13	0.062 9	0.113 2	0.238 2	0.414 4
14	0.159 8	0.174 6	0.088 4	0.422 8
15	0.107 1	0.154 3	0.468 7	0.730 2
16	0.108 0	0.130 2	0.248 7	0.486 9

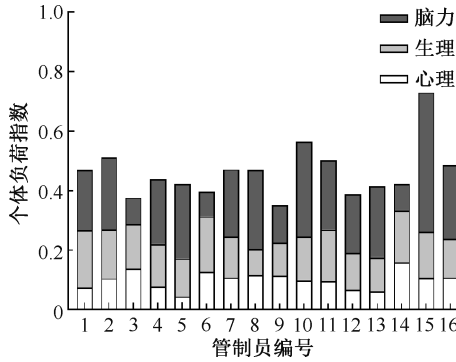


图 5 管制员负荷指数

Fig. 5 Controller load index chart

#### 4 个体工作负荷多维量化结果分析

根据管制员个体综合负荷指数,使用 K-Means 聚类法<sup>[21]</sup>,由肘部法则将 16 名管制员分为 3 个类别,具体如图 6 所示。

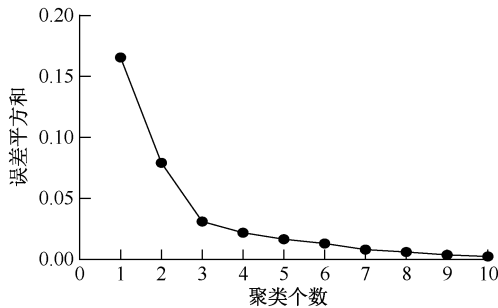


图 6 聚类数对比

Fig. 6 Comparison of the number of clusters

分别计算管制员 PPLI、PRLI、BWI 占 ILOI 比值, K-Means 聚类结果,见表 7。

由表 7 可知:

1) A 类管制员共计 8 人,占总人数 50%。A 类管制员经过 24 h 工作时长后, ILOI 最小。说明该类管制员在 24 h 工作期间能够较好完成管制工作,工作结束后整体负荷感知较少,管制能力能够胜任当前工作负荷。进一步分析发现,03、06 和 14 号管制员的生理感知负荷占比较大,04、05、09、12 和 13 号管制员脑力感知负荷占比更大。

2) B 类管制员共计 7 人,占总人数 43.75%。B 类管制员经过 24 h 工作后, ILOI 增长居中,脑力

表 7 管制员个体负荷聚类结果分析

Table 7 Analysis of controller individual load clustering

编号	PPLI 占比/%	PRLI 占比/%	BWI 占比/%	ILOI	聚类种类
03	36.63	39.68	23.69	0.377 0	A
04	17.62	32.82	49.56	0.438 7	A
05	10.44	29.94	59.64	0.423 2	A
06	32.12	46.96	20.91	0.396 9	A
09	32.74	30.87	36.39	0.353 1	A
12	17.03	31.98	50.99	0.389 3	A
13	15.18	27.32	57.48	0.414 4	A
14	37.80	41.30	20.91	0.422 8	A
01	15.80	40.91	43.29	0.471 0	B
02	20.57	31.99	47.44	0.512 4	B
07	22.86	29.00	48.14	0.472 4	B
08	24.99	18.30	56.71	0.471 0	B
10	17.60	25.86	56.56	0.565 4	B
11	19.21	34.30	46.49	0.502 3	B
16	22.18	26.74	51.08	0.486 9	B
15	14.67	21.13	64.19	0.730 2	C

感知负荷增长占比较大,但管制能力能够满足当前工作负荷。

3) C 类管制员共计 1 人,占总人数 6.25%。C 类管制员经过 24 h 工作后, ILOI 最大,尤其是脑力负荷,说明当前岗位的工作负荷对于管制员压力较大,需要进一步确认管制员管制能力与当前岗位负荷匹配情况,避免不安全事件发生<sup>[22]</sup>。

为进一步验证模型的有效性,根据岗后模拟结果,教员绘制管制员综合表现评分,如图 7 所示。发现编号 03、04、05、06 等 8 名 A 类管制员的评分结果在 90 分及以上,编号 01、02、07、08 等 7 名 B 类管制员的评分结果在 88~90 分,编号 15 的 C 类管制员的评分结果最低为 86 分,这与表 7 管制员分类结果相吻合,说明管制员个体工作负荷量化模型能够有效评估管制员个体工作负荷变化。

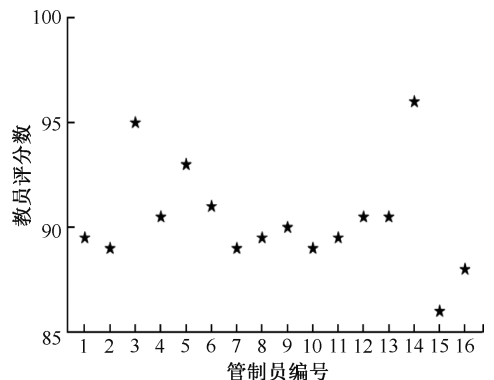


图 7 岗后模拟管制试验教员评分结果

Fig. 7 Post-post simulation control test instructor rating results

## 5 结 论

1) 从心理感知负荷、生理反应负荷和脑力工作负荷 3 个维度建立评价管制员个体工作负荷的综合指标体系。依据指标体系,进一步构建管制员个体工作负荷量化模型,并采用熵权-客观组合法求出最优解。

2) 根据管制员 ILOI,通过 K-Means 聚类法进行

分析,发现 16 名管制员分为 3 个类别。从岗后个体工作负荷增长的角度分析,A 类管制员负荷增长最小,B 类居中,C 类最大。根据教员对管制员能力的评分验证了模型的有效性。

3) 文中依据管制员 ILOI 对管制员进行分类,但未探究导致管制员个体工作负荷变化不同的深层原因,下一步将继续研究导致不同管制员个体工作负荷增长较大的关键因素,并给出改进方案。

## 参 考 文 献

- [1] 每日经济新闻. 2023 年上半年国内航班量已超 2019 年同期水平[EB/OL]. (2023-07-10). <https://baijiahao.baidu.com/s? id=17710173366610393586&wfr=spider&for=pc>.
- [2] PANT R,TAUKARI A,SHARMA K. Cognitive workload of air traffic controllers in area control center of mumbai enroute airspace[J]. *Journal of Psychosocial Research*,2012,7(2):279-284.
- [3] 朱聃,徐晨,刘继新. 基于语音识别的管制员工作负荷评估[J]. *计算机应用研究*,2020,37(增 1):24-26,33. ZHU Dan,XU Chen,LIU Jixin. Evaluation of air traffic controller workload based on automatic speech recognition[J]. *Application Research of Computers*,2020,37(S1):24-26,33.
- [4] 袁霄,杨家忠,吴丹. 基于扇区动态复杂性因素的航空管制员工作负荷计算[J]. *安全与环境学报*,2015,15(2):108-111. YUAN Xiao,YANG Jiazhong,WU Dan. Renovated accounting method for the air traffic controller workload based on the sector division of the dynamic complex factors[J]. *Journal of Safety and Environment*,2015,15(2):108-111.
- [5] 王莉莉,许凌鹏. 基于眼动数据的管制员注意力特征评价[J]. *中国安全科学学报*,2023,33(2):217-224. WANG Lili,XU Lingpeng. Evaluation of air traffic controller's attention characteristics based on eye movement data[J]. *China Safety Science Journal*,2023,33(2):217-224.
- [6] ORDEN V F K,JUNG T,MAKEIG S. Combined eye activity measures accurately estimate changes in sustained visual task performance[J]. *Biological Psychology*,2000,52(3):221-240.
- [7] WANG Yanjun,WANG Liwei,LIN Siyuan,et al. Effect of working experience on air traffic controller eye movement[J]. *Engineering*,2021,7:488-494.
- [8] AHLSTROM U, FRIEDMAN-BERG F J. Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(7): 623-636.
- [9] WEEH J ,LYES W ,PINHEIRO J P . Real time eye tracking interface for visual monitoring of radar controllers[C]. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, 2017:DOI:10.2514/6.2017-1317.
- [10] PAGNOTTA M, JACOBS DM, DE FRUTOS PL, et al. Task difficulty and physiological measures of mental workload in air traffic control: a scoping review[J]. *Ergonomics*,2022,65(8):1095-1118.
- [11] PIETRO A,GIANLUCA B,GIANLUCA F D, et al. Reliability over time of EEG-based mental workload evaluation during air traffic management (ATM) tasks[C]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*,2015:7242-7245.
- [12] 陈彦峰. 睡意对脑电信号的影响[D]. 兰州:兰州理工大学,2013. CHEN Yanfeng. The effect of drowsiness on Electroencephalogram[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2013.
- [13] 陈凤兰. 基于多导生理信号的管制员疲劳分析方法研究[D]. 天津:中国民航大学,2018. CHEN Fenglan. Research on controller fatigue analysis method based on multi-conductor physiological signals [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.
- [14] LEE E H, CHUNG B Y, SUH C H, et al. Korean versions of the perceived stress scale (PSS-14, 10 and 4): psychometric evaluation in patients with chronic disease[J]. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*, 2015, 29(1): 183-192.

- [15] DUNCAN C C, BARRY R J, CONNOLLY J F, et al. Event-related potentials in clinical research: guidelines on eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400 [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2009, 120 (11): 1 883–1 908.
- [16] 钟铭恩, 吴平东, 彭军强, 等. 基于脑电信号的驾驶员情绪状态识别研究[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(9): 64–69.  
ZHONG Ming'en, WU Pingdong, PENG Junqiang, et al. Study on an emotional state recognition technology based on drivers' EEGs[J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(9): 64–69.
- [17] 傅根跃, 陈昌凯, 缪伟, 等. 测谎问题中的“情绪成分”对皮肤电反应的影响[J]. *中国临床心理学杂志*, 2005, 13(3): 321–323.  
FU Genyue, CHEN Changkai, MIAO Wei, et al. The effect of emotionality in lie-detection questions on skin conductance response[J]. *Chinese Journal of Clinical Psychology*, 2005, 13(3): 321–323.
- [18] 中国民用航空局. 雷达管制基础模拟机培训大纲[Z]. 2012.
- [19] SHIM B J, JOO H S, SHIM S H. The direction and level of dominant eye according to the tests[J]. *Journal of Korean Ophthalmic Optics Society*, 2015, 20(3): 363–368.
- [20] 韩礼博, 门宝辉. 基于组合博弈论法的海河流域水资源承载力评价[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(11): 61–64.  
HAN Libo, MEN Baohui. Evaluation of water resources carrying capacity in haihe riverbasin based on combinatorial game theory[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(11): 61–64.
- [21] 李敬强, 王蓓, 赵宁, 等. 基于 K-Means 聚类的管制员注意品质特征研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(6): 13–18.  
LI Jingqiang, WANG Bei, ZHAO Ning, et al. On characteristics of attention quality of controller based on K-Means clustering[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(6): 13–18.
- [22] 杨越, 马博凯, 曹宇轩. 国外空管不安全事件中的人误风险分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32 (12): 38–45.  
YANG Yue, MA Bokai, CAO Yuxuan. Human error risk analysis base on foreign unsafe events in air traffic management[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(12): 38–45.

**作者简介:** 王莉莉 (1973—), 女, 陕西兴平人, 博士, 教授, 主要从事空中交通人为因素、空域规划等方面的研究。E-mail: llwang@cauc.edu.cn。

