

空中交通管制专家与新手眼动行为的统计分析研究

王艳军, 刘银鑫

(南京航空航天大学民航学院 南京 211106; 国家空管飞行流量管理技术重点实验室 南京 211106)

【摘要】数据科学的迅速发展促进了心理学、管理学等各学科研究范式的转变。通过对实证数据的深入研究,能够发现传统方法不能发现的规律。该文以管制员眼动行为为研究对象,通过faceLAB眼动仪采集不同级别管制员的眼动行为数据,综合统计分析方法和MF-DFA时间序列分析方法对数据进行了深入分析,探讨不同级别管制员在信息获取行为上的差异。分析结果表明:1)专家比新手具有更长的平均注视持续时间、更少的注视点、更少的平均扫视持续时间和更小的扫视幅度;2)管制员的注视持续时间、扫视持续时间和扫视幅度的时间序列有多重分形特征,多重分形奇异谱图表明新手的波动强度大于专家。研究结果说明管制员的信息获取行为具有差异性,管制经验对管制员行为特征具有显著影响。

关键词 空中交通管理; 复杂系统; 数据分析; 眼动行为; 人为因素

中图分类号 V355 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.04.022

Statistical Analysis of Eye Movements between Air Traffic Control Experts and Novices

WANG Yan-jun and LIU Yin-xin

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 211106;

National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management Nanjing 211106)

Abstract The advancement of data science has been prompting the shift of research paradigms in various fields, including psychology, management etc. Investigations on the large empirical datasets have uncovered astonishing regularities and universalities which cannot be revealed through classic methods. This paper aims to explore the fundamental differences in air traffic controllers' information seeking behavior based on the analysis of their eye movements' data. The faceLAB is used to collect eye movements' data recorded from 14 air traffic controllers. Statistical analysis and multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA) are carried out to investigate the fundamental properties of eye movements. The analytical results show that 1) expert controllers have longer mean fixation duration, less fixation points, shorter mean saccadic duration, and smaller mean saccadic velocity than novices; 2) Controllers' fixation time series, saccadic duration time series, and saccadic amplitude time series, all exhibit multifractal characteristics, and multifractal singularity spectrum demonstrates that there are stronger fluctuations in novices' fixation activities. Our work indicates that controller's information seeking dynamics are different. Work experience does have a significant impact on controllers' behavior.

Key words air traffic management; complex systems; data analysis; eye movement; human factors

随着信息技术的进步,各种海量数据的存储和可获取为科学研究提供了新的平台。近十年来,科学研究已经进入了大数据时代^[1-2]。在心理学、生物学、信息学等各个领域,通过对实证数据的深入挖掘和研究,发现了传统研究方法不能发现的新模式和新规律。例如,通过对人类行为的时空特征进行分析,大量的研究表明人类行为存在与假设的随机分布不同的重尾分布特征,产生了人类行为动力学

这一新的研究方向^[3-5]。对于人类执行特定任务行为的研究却寥寥无几。本文以空中交通管制员(简称“管制员”)为研究对象,通过分析管制员执行管制任务时的眼动行为数据研究其信息获取行为,对于理解人类执行任务的信息获取机制以及提高航空运输运行效率等具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

人类有80%~90%的信息是通过视觉系统提供

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61304190); 江苏省自然科学基金(BK20130818)

作者简介: 王艳军(1982-),男,副教授,博士,主要从事航空运输、复杂网络及人类动力学方面的研究。

的, 视觉是用户和外界进行交互的重要途径^[6]。心理学研究表明, 眼动可以反映视觉信息的选择模式, 具有一定的规律性, 而这些规律有助于揭示人类对外界事物认知加工过程的心理机制^[7]。

眼动行为研究在交通心理学和航空心理学领域已经得到了广泛应用。自20世纪60年代以来, 国内外学者开始对驾驶员的眼动行为进行研究。研究发现, 有经验的驾驶员和没有经验的驾驶员的注视点数量、注视持续时间及搜索广度等眼动指标存在明显差异^[8-14]。1996年~2009年, 国内外学者^[15-19]通过研究飞行员专家和新手执行飞行任务时的眼动数据, 发现专家比新手有更多的注视点和更短的注视时间, 而且专家的搜索范围更广。以专家的眼动模式为模板训练学员, 发现被训练过的学员比没有训练过的学员飞行绩效高。然而, 眼动技术在管制员方面的研究还处于起步阶段, 相关研究工作主要包括两个方面: 1) 管制员认知负荷方面的研究。如文献[20]通过研究管制员眼动行为和认知负荷的关系, 发现眼动指标可以很敏感地表征管制员的认知负荷。2) 管制员进行航空器冲突探测方面的研究。如文献[21]研究了在有限的感知和认知资源下, 航空器发生冲突时, 管制员如何搜索目标、选择目标。文献[22]分析了不同级别管制员在不同难易程度场景下, 对航空器进行冲突探测, 寻找存在冲突的航空器对的准确度。结果发现在简单的场景下, 级别高和级别低的管制员都能很容易地发现存在冲突的航空器对; 在困难的场景下, 只有级别高的管制员能够准确地发现存在冲突的航空器对。

尽管学者们在交通心理学和航空心理学进行了大量的眼动研究, 但是研究工作主要集中在驾驶员和飞行员的眼动行为差异, 关于管制员的眼动行为研究甚少。相关的管制员眼动研究则集中在管制员负荷与眼动行为的关系, 尚未深入探讨具体眼动行为^[20, 23-24]。另一方面, 现有研究大多是确定场景、或者采用静止图片的方法, 没有研究对比在实际管制场景下, 管制员眼动行为的差异, 研究结果缺乏普世化。

本文在前期研究工作的基础上, 研究不同经验管制员在管制工作中的眼动行为差异, 并探讨造成这种差异的原因; 然后使用MF-DFA时间序列分析方法进一步研究管制员眼动行为的特征。研究结果对于培训和提高管制学员的业务水平, 保障航空工作的有效性具有重要的理论价值和现实意义。

1 实验方法

1.1 实验人员

14名来自华东地区空中交通管理局江苏分局的管制员参与了本次仿真实验, 包括2名二级管制员, 1名三级管制员, 3名四级管制员和8名五级管制员。管制员的年龄范围是23~33岁, 平均年龄27.5岁。所有管制员均为自愿参与此次仿真实验。实验开始之前参与者没有进行剧烈活动, 情绪稳定。本文将二级、三级和四级管制员划分为专家管制员, 其他8名五级管制员作为新手管制员。详细信息见表1。

表1 管制员信息

被试	人数/个	年龄均值/岁	工作年限均值/年
专家	6	30.33	8.17
新手	8	26	3.25

1.2 实验设备

本次仿真实验所使用的空中交通管理综合环境仿真实验平台能够高逼真地模拟空中交通管制的运行, 使用Seeing Machines公司生产的faceLAB5.0对管制员眼动数据进行采集。faceLAB5.0已经被用于心理学、产品设计和交通等应用领域。

1.3 实验场景

本次仿真实验中的空域为武汉进近管制扇区。水平边界范围为: 安陆-河口-乘马岗-浠水-咸宁-龙口-老沔阳城-天门-安陆; 垂直范围为标准大气高度5 100 m(含)以下除去塔台管制区以外区域。武汉进近主要负责完成航空器在航路空域和机场空域之间的飞行转换。空域场景如图1所示。

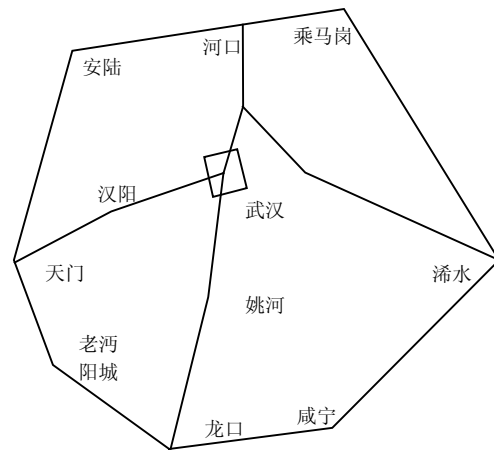


图1 武汉进近管制扇区示意图

1.4 数据采集过程

本次仿真实验连续进行7天, 每天各有两名管制员参与。实验开始之前, 首先向参与者介绍有关管

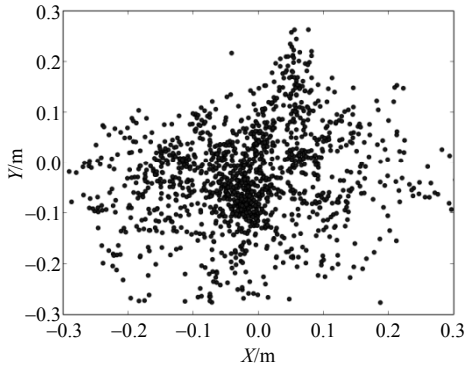


图5 新手组注视点分布图

总体上, 专家的平均注视持续时间比新手长, 注视点个数比新手少, 其原因可能是专家倾向于花费较长的注视时间在较少的兴趣点, 结合扇区的空域结构, 记住航空器的高度、速度和航向等信息, 合理地分配注意力, 从而迅速做出决策以获得最大的管制效率。通过与专家访谈得到: 1) 专家在视觉搜索策略更多采用集中注意力方法和知觉组块方法。一方面专家会把相关的和不相关的信息区分开以至于集中注意力解决重要的信息; 另一方面专家会把更多的相关信息聚集在一起比较分析, 需要较少的努力处理所有的信息。2) 专家倾向于使用纯粹的搜索策略, 在搜索目标过程中, 会记住前一个目标的信息, 观察下一个目标时只需与前一个目标信息比较做出决策; 新手在搜索目标过程中比较随机, 处理目标时没有记住目标信息, 使得注视点分布在整个雷达屏幕上。因此, 在管制员培训过程中, 新手应该学习专家的视觉搜索策略, 即集中注意力方法、知觉组块方法和纯粹的搜索策略。

2.4 平均扫视持续时间

扫视持续时间是指上一次注视结束到下一次注视开始的持续时间, 扫视持续时间越短说明被试搜索目标所需的时间越短, 搜索效率越高。从图6中可以看出专家的平均扫视持续时间比新手短。由于专家搜索信息和处理信息已趋向于程序化, 采用的都是自上而下的信息处理方式, 所以, 专家对一架航空器发出管制指令之后, 能够很快地跳到下一个即将需要管制的航空器上。而新手更多地使用自下而上的信息处理方式, 当指挥完一架航空器之后, 需要时间搜索下一个将要管制的目标。

图7是管制员的扫视持续时间分布情况, 由图可知专家和手扫的扫视持续时间主要集中在0 ms~400 ms之间, 他们在这段时间内所占的比例分别是82.6%和71.71%, 达到400 ms以上的扫视持续时间, 专家所占比例小于新手, 表明专家绝大部分时间都

只需要花费极少的时间来搜索目标, 说明专家的视觉搜索效率更高。

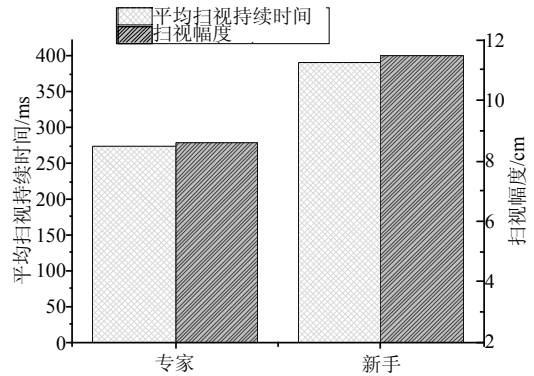


图6 专家和新手平均扫视持续时间和扫视幅度图

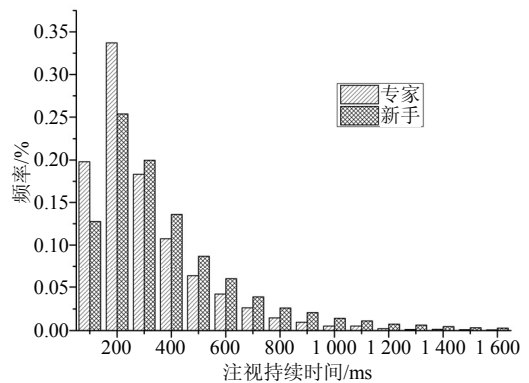


图7 专家和新手扫视持续时间分布图

2.5 平均扫视幅度

扫视幅度是注意力从一个注视点移动到下一个注视点所转过的角度或者弧度。实验数据中的扫视幅度用米制单位表示。分析认为, 专家在从一个目标获取有用信息之后, 会直接转移到下一个邻近的目标, 在这之间不会注视其他的目标, 而新手在从一个目标获取完有用信息之后, 往往还会注意刚刚进入管制扇区或者刚刚起飞的航空器, 然后再注意需要管制的目标。这样使得专家的扫视幅度比新手的小, 如图6所示。

综上, 专家的平均扫视持续时间比新手短, 扫视幅度也比新手小。表明专家搜索目标的效率更高, 从信息的获取、认知到做出决策的每一步都比新手快。

专家更多地使用自上而下的信息处理方式, 在不关注目标的情况下建立一种解决方案; 新手更多地使用自下而上的信息扫视策略, 需要较长的时间搜索目标和定位目标。扫视时间和扫视幅度的不同可以表明专家和新手在扫视目标中所使用的不同视觉扫视模式, 这一发现可用于提高新手管制员的管制训练方法, 学习专家有效和先进的扫视模式, 使训练更有效率。

3 眼动数据的多重分形特征

3.1 MF-DFA方法描述

为了进一步研究管制员眼动行为的基本特征, 本文使用经典的时间序列分析方法: MF-DFA方法, 该方法是文献[27]在去趋势波动分析的基础上提出的, 被用于描述时间序列在不同时间尺度上的统计特征。

对于给定的时间序列 $X=\{x_k, k=1, 2, \dots, N\}$, MF-DFA方法如下。

1) 求序列对于均值的累积离差:

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k$ 。

2) 将时间序列 $Y(i)$ 划分为 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个不重叠的小区间, 每个小区间均有 s 个数据。但时间序列的长度 N 不一定整除 s , 那么 $Y(i)$ 会有剩余数据, 为了能够计算时间序列 $Y(i)$ 的全部数据, 可以对时间序列 $Y(i)$ 逆向重复这一分割过程, 最终得到 $2N_s$ 个小区间。

3) 对每个区间 $v(v=1, 2, \dots, 2N_s)$ 里的 s 个数据点, 使用最小二乘法进行多项式拟合, 得到 k 阶拟合多项式:

$$y_v(i) = a_1 i^k + a_2 i^{k-1} + \dots + a_k i + a_{k+1} \quad (2)$$

4) 计算均方误差: 当 $v=1, 2, \dots, N_s$ 时,

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2 \quad (3)$$

当 $v=N_s+1, N_s+2, \dots, 2N_s$ 时,

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N-(v-N_s)s+i] - y_v(i)\}^2 \quad (4)$$

5) 求 q 阶波动函数 $F_q(s)$:

当 $q \neq 0$ 时,

$$F_q(s) = \left[\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right]^{1/q} \quad (5)$$

当 $q=0$ 时,

$$F_0(s) = \exp \left[\frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln[F^2(s, v)] \right] \sim s^{h(0)} \quad (6)$$

式中, $F_q(s)$ 是时间序列长度 s 和阶数 q 的函数, 即 $F_q(s) \sim s^{h(q)}$, $h(q)$ 叫做广义Hurst指数, 当 $q=2$, MF-DFA就退化成DFA, DFA适合非平稳时间序列的长程幂律相关分析。

标度指数可以由广义Hurst指数得到:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (7)$$

根据勒让德变换式: $\alpha = \tau'(q)$ 和 $f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$ 和式(7), 得到多重分形谱 $f(\alpha)$ 和广义Hurst指数的关系式:

$$\alpha = h(q) + qh'(q) = h(q) + q \frac{dh(q)}{dq} \quad (8)$$

和

$$f(\alpha) = q[\alpha - h(q)] + 1 \quad (9)$$

3.2 MF-DFA结果分析

通过使用多重分形消除趋势波动分析方法研究管制员眼球运动的基本特征, 发现工作经验对管制员的眼球运动模式有显著影响。图8显示的是对于不同的阶数 q 值和不同的时间序列 s 值, 专家管制员注视持续时间数据的波动函数图。

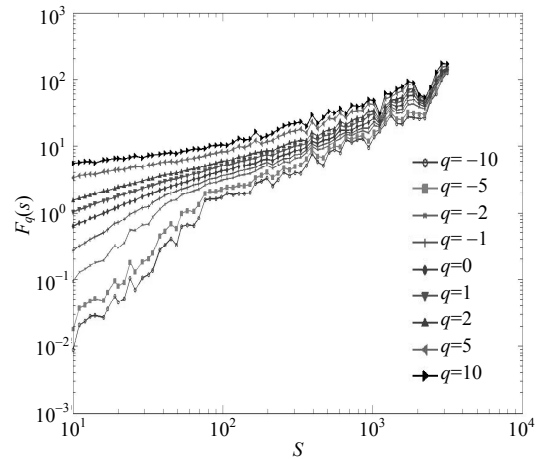


图8 专家的波动函数图

图9显示管制员注视持续时间、扫视持续时间和扫视幅度的原始序列的广义Hurst指数和阶数 q 的关系图, 从图中可以看出, 3种眼动行为的广义Hurst指数均随着阶数 q 的增加而减少。当 $q=2$ 时, 专家和新手的眼动行为的广义Hurst指数在0.7和0.9之间。结果说明专家和新手管制员的注视持续时间数据都是长程正相关, 而且符合长程幂律分布, 这种长程正相关现象说明管制员过去的注视活动会影响以后的注视活动。专家的注视持续时间和扫视幅度的Hurst指数均大于同一 q 值下新手的Hurst指数。相比于其他两种行为, 扫视持续时间的Hurst指数变化有较大差异。当 $q>0$ 时, 专家和新手扫视持续时的Hurst指数均下降很快。尤其是新手, 当 $q \geq 4$, 所有点 $h(q)$ 都小于0.5, 但是专家的 $h(q)$ 依然大于0.5, 表现出多重分形的特征。

为便于对比, 经过重新缩放后, 专家和新手的眼动行为的多重分形奇异谱图如图10所示。由图

可以看出, 专家和新手3种奇异谱形状类似, 注视持续时间和扫视幅度曲线基本重回, 专家的奇异谱宽度略宽于新手的奇异谱宽度。表明专家的注视持续时间和扫视幅度行为的多重分形强度大于新手, 具有较强的抗外界干扰能力。新手扫视持续行为与其他两种眼动行为具有较强的差别(如图9、图10所示)。造成这种现象的原因可能是由于新手个体之间较强的差异, 造成扫视行为数据的异质性。

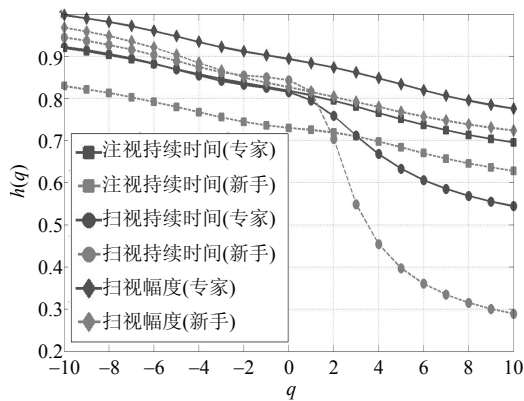


图9 新手和专家的广义Hurst指数图

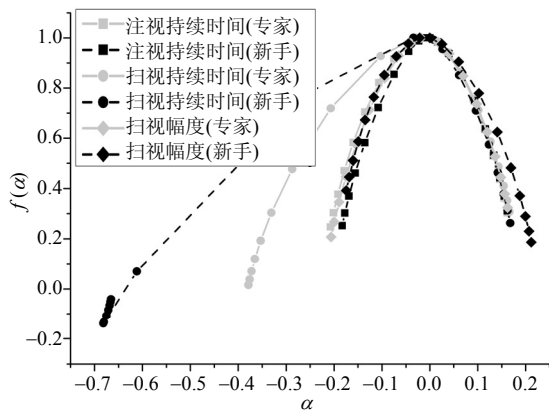


图10 新手和专家的多重分形奇异曲线图

4 结束语

大数据使社会学、心理学和管理学等学科的研究范式发生了转变, 也推动了复杂性科学和多个学科的结合和发展。本文对空中交通管制员的眼动数据进行了分析, 有助于揭示管制指挥过程中管制员眼动行为的变化规律。

研究表明, 管制经验对管制员的眼动行为有着显著影响, 可以通过眼动行为确定他们是否有能力胜任当前管制场景的管制工作。在注视行为分析中, 专家搜索目标时具有更多的注视持续时间, 更少的注视点; 在扫视行为分析中, 专家有更少的扫视持续时间和更小的扫视幅度。在视觉搜索策略方面, 专家倾向于使用集中注意力方法和知觉组块

方法; 在搜索目标过程中, 专家倾向于使用纯粹的搜索策略, 采用自上而下的视觉扫视。

为深入研究专家和新手在视觉搜索策略和视觉扫视模式的不同^[28-31], 有两个问题需要进一步研究。

- 1) 采集不同场景下不同级别管制员的眼动数据, 把场景中的信息以兴趣区域标注, 研究专家和新手在不同兴趣区域内的注意力分配比例和兴趣区域之间的转移行为。
- 2) 研究管制员眼动行为和扇区交通行为的关系, 为研究多种运行情况下管制员的信息获取行为的机制奠定基础。

参 考 文 献

- [1] MARX V. Biology: the big challenges of big data[J]. Nature, 2013, 498(7453): 255-260.
- [2] 周涛. 大数据: 商业革命和科学革命[J]. 半月谈: 时事资料手册, 2013, 98(4): 14-17.
ZHOU Tao. Big data: Commercial revolution and scientific revolution[J]. China Comment: Current data handbook, 2013, 98(4): 14-17.
- [3] WANG Q, GUO J L. Human dynamics scaling characteristics for aerial inbound logistics operation[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(10): 2127-2133.
- [4] GAO L, GUO J L, FAN C, et al. Individual and group dynamics in purchasing activity[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013, 392(2): 343-349.
- [5] OLIVEIRA J G, BARABASI A L. Human dynamics: Darwin and Einstein correspondence patterns[J]. Nature, 2005, 437(7063): 1251-1251.
- [6] 赵新灿, 左洪福, 任勇军. 眼动仪与视线跟踪技术综述[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(12): 118-120, 140.
ZHAO Xin-can, ZUO Hong-fu, REN Yong-jun. A review of eye tracker and eye tracking techniques[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(12): 118-120, 140.
- [7] 陈丽君, 郑雪. 大学生问题发现过程的眼动研究[J]. 心理学报, 2014, 46(3): 367-384.
CHEN Li-jun, ZHENG Xue. A study on the problem behavior graphs of university students in the problem finding process[J]. Acta Psychologica Sinica, 2014, 46(3): 367-384.
- [8] MOURANT R R, ROCKWELL T H. Strategies of visual search by novice and experienced drivers[J]. Human Factors, 1972, 14(4): 325-335.
- [9] CRUNDALL D E, UNDERWOOD G. Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers[J]. Ergonomics, 1998, 41(4): 448-458.
- [10] 田明. 新驾驶员和熟练驾驶员视觉搜索模式比较研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
TIAN Ming. Comparison study of visual search pattern of novice and experienced drivers[D]. xi'an: Changan University, 2007.
- [11] 郭应时, 马勇, 付锐, 等. 汽车驾驶人驾驶经验对注视行为特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5):

- 91-99.
GUO Ying-shi, MA Yong, FU Rui, et al. Influence of driving experience on gazing behavior characteristic for car driver[J]. *Transportation Safety Technology of Ministry of Transport*, 2012, 12(5): 91-99.
- [12] LAVALLIERE M, TREMBLAY M, CANTIN V, et al. Aging yields a smaller number of fixations and a reduced gaze amplitude when driving in a simulator[J]. *Advances in Transportation Studies*, 2006 (SPEC ISSUE): 21-30.
- [13] HONG I, KURIHARA T, IWASAKI M. Older drivers' perceptions, responses, and driving behaviours during complex traffic conditions at a signalized intersection[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(11): 1879-1892.
- [14] YEUNG J S, WONG Y D. Effects of driver age and experience in abrupt-onset hazards[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, 78: 110-117.
- [15] FOX J, MERWIN D, MARSH R, et al. Information extraction during instrument flight: an evaluation of the validity of the eye-mind hypothesis[C]//*Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. [S.l.]: Human Factors and Ergonomics Society, 1996, 40(2): 77-81.
- [16] BELLENKES A H, WICKENS C D, KRAMER A F. Visual scanning and pilot expertise: the role of attentional flexibility and mental model development[J]. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 1997, 68(7): 569-579.
- [17] 刘伟, 袁修干, 柳忠起, 等. 飞行员扫视、操作绩效及工作负荷的实验研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2005, 18(4): 293-296.
LIU Wei, YUAN Xiu-gan, LIU Zhong-qi, et al. Experimental study of pilots scan and performance, workload[J]. *Space Medicine and Medical Engineering*, 2005, 18(4): 293-296.
- [18] 柳忠起, 袁修干, 樊瑜波, 等. 模拟飞机着陆飞行中专家和新手眼动行为的对比[J]. *航天医学与医学工程*, 2009, 22(5): 358-361.
LIU Zhong-qi, YUAN Xiu-gan, FAN Yu-bo, et al. Comparison of expert and novice eye movement behaviors during simulated landing flight[J]. *Space Medicine and Medical Engineering*, 2009, 22(5): 358-361.
- [19] SADASIVAN S, GREENSTEIN J S, GRAMOPADHYE A K, et al. Use of eye movements as a feedforward training for a synthetic aircraft inspection task[C]//*Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Portland, Oregon, USA: [s.n.], 2005, 38(10): 141-149.
- [20] 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.
- [21] KANG Z, BASS E J, LEE D W. Air traffic controllers' visual scanning, aircraft selection, and comparison strategies in support of conflict detection[C]//*Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 58th Annual Meeting*. [S.l.]: Human Factors and Ergonomics Society, 2014: 77-81.
- [22] KANG Z, LANDRY S J. An eye movement analysis algorithm for a multielement target tracking task: maximum transition-based agglomerative hierarchical clustering[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2015, 45(1): 13-24.
- [23] BROOKING J B, WILSON G F, SWAIN C R. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control[J]. *Biological Psychology*, 1996, 42(3): 361-378.
- [24] 王超, 于超博. 基于多生理参数的空中交通管制员认知负荷综合评估[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(27): 295-300.
WANG Chao, YU Chao-bo. Air traffic controllers cognitive load comprehensive evaluation based on the multiple physiological parameter[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(27): 295-300.
- [25] FITTS P M, JONES R E. Eye fixation of aircraft pilots, III. Frequency, duration, and sequence fixations when flying air force ground-controlled approach system[R]. Ohio, USA: Wright Air Development Center, 1949.
- [26] GOLDBERG J H, KOTVAL X P. *Advances in occupational ergonomics and safety*[M]. Clifton VA, USA: IOS Press, 1988.
- [27] KANTELHARDT J W, ZSCHIEGNER S A, KOSCIELNY-BUNDE E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 316(1-4): 87-114.
- [28] UNDERWOOD G, CHAPMAN P, BROCKLEHURST N, et al. Visual attention while driving: Sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers[J]. *Ergonomics*, 2003, 46(6): 629-646.
- [29] SADASIVAN S, GREENSTEIN J S, GRAMOPADHYE A K, et al. Use of eye movements as feedforward training for a synthetic aircraft inspection task[C]//*Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Portland, Oregon, USA: ACM, 2005: 141-149.
- [30] VAN MEEUWEN L W, JARODZKA H, BRANDGRUWEL S, et al. Identification of effective visual problem solving strategies in a complex visual domain[J]. *Learning and Instruction*, 2014, 32: 10-21.
- [31] DZENG R J, LIN C T, FANG Y C. Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification[J]. *Safety Science*, 2016, 82: 56-67.