

基于眼动数据的飞行姿态重要性验证

董锐 李秀易 王有坤 赵巍巍

中国民用航空飞行学院, 中国·四川 广汉 618307

摘要: 本研究旨在通过眼动追踪技术, 实证验证飞行姿态监控在飞行操作中的核心重要性。研究以 30 名处于理论学习阶段的飞行学员为对象, 利用 Tobii Glasses 3 眼动仪采集其在模拟飞行任务中的视觉注意力数据, 并结合自动化评分系统记录飞行绩效。研究结果表明: 姿态仪是视觉注意力的焦点, 数据分析显示, 学员超过 50% 的注意力都集中在姿态仪上, 这从视觉分配层面直接证明了飞行姿态是飞行员监控和操作的核心。通过对比初次与再次实验, 发现学员在熟悉任务后, 视觉扫描模式从杂乱无章转变为符合标准仪表布局的规律性“T”型分布, 且对姿态仪的关注更为集中; 与此同时, 团队平均飞行成绩显著提升。这证明良好的、以姿态为核心的注意力分配是提升飞行绩效的关键前提。眼动热点图与绩效分数的共同变化证实, 将主要注意力集中于姿态监控, 能够有效保障飞行的平稳性与安全性。

关键词: 注意力分配; 飞行姿态; 眼动仪; 眼动特征

Verification of the importance of flight attitude based on eye movement data

Dong Rui, Li Xiuyi, Wang Youkun, Zhao Weiwei

Civil Aviation Flight University of China, China Sichuan Guanghan 618307

Abstract: This study aims to empirically verify the core importance of flight attitude monitoring in flight operations through eye-tracking technology. The research targets 30 flight cadets in the theoretical learning stage, using Tobii Glasses 3 eye tracker to collect their visual attention data during simulated flight tasks, and combines automated scoring system to record flight performance. The research results show that the attitude indicator is the focus of visual attention. Data analysis shows that more than 50% of the cadets' attention is concentrated on the attitude indicator, which directly proves from the visual allocation level that flight attitude is the core of pilot monitoring and operation. By comparing the initial and repeated experiments, it is found that after familiarizing with the task, the visual scanning mode of the cadets changes from disorderly to a regular "T" distribution that conforms to the standard instrument layout, and the attention to the attitude indicator is more concentrated; at the same time, the team's average flight performance significantly improves. This proves that good attention allocation with attitude as the core is a key prerequisite for improving flight performance. The common changes in eye-tracking heatmap and performance scores confirm that focusing the main attention on attitude monitoring can effectively ensure the stability and safety of flight.

Keywords: Attention allocation; Flight attitude; Eye tracker; Eye movement characteristics

0 引言

飞机的空间姿态, 由其俯仰、滚转与偏航三个轴向的角度共同定义, 它远非普通的技术指标, 而是贯穿于每次飞行的始终、攸关安全与任务达成的决定性因素。姿态如同飞行的无声语言, 是力学与平衡交互的艺术, 也是保障安全与提升效率的根本支撑。从气动原理上看, 姿态直接控制升力的生成。机翼能否产生足以抗衡重力的升力, 关键在于迎角——这本质上就是俯仰姿态的体现。一个与当前空速及载荷精准对应的迎角, 是维持平稳飞行的前提;

而即便是微小的角度失调, 也可能造成升力突然丧失, 引发失速, 或者导致阻力激增与机体受力恶化。与此同时, 姿态也预设了飞行的路径与目的。飞行员并非直接指令飞机升降, 而是通过调整姿态间接实现: 向后带杆使机头上仰, 飞行路径转为上升; 向前推杆使机头下俯, 飞行路径转为下降。同理, 通过压杆产生滚转姿态, 飞机方能实现圆滑、高效的转向, 缺失了这一姿态基础, 飞行将陷入效率低下且充满风险的侧滑状态。在安全保障层面, 姿态的作用尤为关键。当飞行进入仪表气象条件, 外界视觉参考

消失时，飞行员唯有依靠驾驶舱中的姿态指示仪来重建天地基准。维持正确的水平姿态或标准的爬升 / 下降姿态，是防止空间定向障碍、避免由此引发的严重事故（例如可控飞行撞地）的生命线。波音 737 MAX 系列的空难更是以惨痛的代价揭示：一个被系统错误判定或强行控制的俯仰姿态，即便对于现代化客机，也足以酿成致命后果。此外，飞行姿态也与经济效率和乘员体验密不可分。一个稳定且经过优化的巡航姿态能有效降低阻力，从而实现燃油节约；而柔和、连贯的姿态调整则能最大限度减少过载变化，保障乘机的舒适感。无论是军机飞行员在格斗中抢占有利阵位，还是民航飞行员在着陆时完成精准的拉平接地，其核心都在于对飞行姿态进行毫厘不差的精细控制。正因如此，对姿态的掌控，即是对飞行本质的掌控。它不仅仅是理论教材中的一个知识点，更是所有飞行员与飞行控制系统必须持续理解、敏锐感知并精准驾驭的飞行核心所在。

在飞行中，姿态一旦发生变化，飞机所受的气动力就要变化，速度、高度、航向等参数都要随之改变。可以说，飞机的飞行是以姿态为主的飞行。飞行员的注意力大部分时间都集中在对姿态的监控上。本研究的目的是用眼动数据来验证姿态在飞行中的重要性，为实际飞行训练和安全提供实证依据。

近年来，用眼动追踪技术研究注意力分配的技术发展迅速。T. J. M. van Dijk^[1] 等研究了飞行员如何通过视觉扫描来获取信息以维持飞行姿态。它为飞行训练提供了实证依据，强调训练不仅要关注操作技能，更要培养飞行员高效的视觉注意力管理习惯；S. J. Landry^[2] 等强调不仅要关注基础姿态控制，更关注在任务负荷增加和新技术引入的情况下，飞行员的情境感知和注意力如何变化。孙瑞山^[3] 等从人机工效学角度出发，探讨不同驾驶舱显示界面设计如何通过影响飞行员的眼动行为和情境意识，进而影响飞行决策与绩效。刘双^[4] 等聚焦于极端复杂和危险的飞行任务，研究了飞行员在不同着舰阶段注意力分配的动态变化。

1 数据采集

本文以教学班学员为实验对象，用眼动仪采集学员的眼动数据，用电脑评分软件自动评分。每个学员采集两次数据，研究学员飞行绩效和姿态注意力分配的关系，被试情况如表 1 所示。Tobii Glasses 3 是 Tobii 公司推出的第三代穿戴式眼动仪，专为在真实世界环境中进行眼动追踪研究而设计。它被誉为该领域的黄金标准，广泛应用于用户体验、人体工程学、体育科学、心理学和市场研究等领域，如图 1 所示。Tobii 采用最先进的眼动追踪核心算法，即使

在头部快速移动、光线变化等复杂场景下，也能保持数据的高精确度（约 0.6° 视觉角度）和高采样率（100Hz）。

表1 被试者信息

类别	数量	年龄（均值）	飞行时长（均值）/h
飞行学员团队	30	19	0（理论学习阶段）



图1 Tobii Glasses 3 眼动仪



图2 飞行评分软件

图 2 为飞行评分软件，按照规定的标准对学生们的模拟飞行进行效果评价，评价为百分制，所得分数即为学生模拟飞行的成绩。其中，训练时最长飞行时间为 12 分钟，超时则取消成绩。在飞行中如果系统判定飞机出现损毁，或者飞机状态已无法正常操作，被判定为飞机结构损坏，成绩记为 0。且跑道入口处必须高于跑道标高 50 英尺以上，若低于此高度进入跑道则扣 10 分。

2 数据分析与结果比较

2.1 眼动数据处理

通过眼动仪采集眼动数据，根据各个仪表关注情况记录被试在各个飞行仪表的注意力时间，如图 3 所示。根据数据结果，可以明显看出每个被试的注意力几乎 50% 以上都集中在对姿态仪的关注上。这也印证了姿态对平稳安全飞行的重要作用。

Total dura ⁺	升降速度 ⁺	姿态仪 ⁺	机外目视 ⁺	空速表 ⁺	航向表 ⁺	转弯仪 ⁺	高度表 ⁺	Total Tim ⁺	Total Rec ⁺
被试 1 ⁺	10.00 ⁺	38.64 ⁺	6.16 ⁺	5.49 ⁺	15.73 ⁺	6.17 ⁺	0.11 ⁺	82.3 ⁺	543.54 ⁺
被试 2 ⁺	18.97 ⁺	46.55 ⁺	5.34 ⁺	0.57 ⁺	17.08 ⁺	2.35 ⁺	32.70 ⁺	123.56 ⁺	672.76 ⁺
被试 3 ⁺	17.23 ⁺	33.08 ⁺	5.85 ⁺	2.57 ⁺	7.81 ⁺	0.71 ⁺	26.73 ⁺	96.50 ⁺	575.40 ⁺
被试 4 ⁺	3.68 ⁺	43.41 ⁺	0.72 ⁺	8.45 ⁺	4.94 ⁺	2.65 ⁺	2.77 ⁺	66.62 ⁺	489.17 ⁺
被试 5 ⁺	0.77 ⁺	39.45 ⁺	15.19 ⁺	18.39 ⁺	4.93 ⁺	1.50 ⁺	4.58 ⁺	84.81 ⁺	392.26 ⁺
被试 6 ⁺	0.18 ⁺	90.98 ⁺	0.40 ⁺	0.65 ⁺	3.72 ⁺	1.48 ⁺	2.57 ⁺	99.98 ⁺	500.42 ⁺
被试 7 ⁺	2.46 ⁺	45.73 ⁺	7.85 ⁺	4.14 ⁺	22.00 ⁺	2.05 ⁺	2.69 ⁺	86.92 ⁺	495.07 ⁺
被试 8 ⁺	1.47 ⁺	77.02 ⁺	6.78 ⁺	0.91 ⁺	14.61 ⁺	9.71 ⁺	6.14 ⁺	117.81 ⁺	689.69 ⁺
被试 9 ⁺	1.03 ⁺	97.23 ⁺	5.80 ⁺	4.83 ⁺	9.47 ⁺	1.04 ⁺	0.75 ⁺	120.15 ⁺	518.02 ⁺
被试 10 ⁺	1.29 ⁺	58.28 ⁺	0.30 ⁺	3.15 ⁺	8.75 ⁺	2.45 ⁺	6.02 ⁺	80.24 ⁺	447.99 ⁺
被试 11 ⁺	0.88 ⁺	128.06 ⁺	5.76 ⁺	2.03 ⁺	1.45 ⁺	1.55 ⁺	1.25 ⁺	140.98 ⁺	684.58 ⁺
被试 12 ⁺	0.94 ⁺	1.23 ⁺	5.05 ⁺	2.32 ⁺	1.59 ⁺	0.27 ⁺	1.54 ⁺	59.31 ⁺	437.43 ⁺
被试 13 ⁺	1.56 ⁺	39.03 ⁺	2.37 ⁺	1.97 ⁺	7.82 ⁺	0.55 ⁺	7.13 ⁺	105.71 ⁺	603.62 ⁺
被试 14 ⁺	8.80 ⁺	39.26 ⁺	0.28 ⁺	0.30 ⁺	42.17 ⁺	0.45 ⁺	6.28 ⁺	113.31 ⁺	520.18 ⁺

图3 部分被试注意力分配数据

2.2 成绩分析

采集眼动数据后可以从表 3 中看出，相比于第一次实验，被试再次实验成绩有了大幅度提高，团队平均提高了 19.8267 分，最高分与最低分也明显有了大幅度提升。在标

准差上,再次实验的标准差值更大,表明被试间分数差距更大,被试飞行效果存在差异性。

表3 成绩对比

		初次实验成绩	再次实验成绩
学员成绩	均值	30.3180	50.1447
	最高分	49.5800	94
	最低分	0	28.8200
	标准差	13.7569	16.0166
	均值	30.0870	51.7097

绝大部分被试成绩提升幅度较大,最大提升幅度分别为 94 分。两组实验数据表明,后一次实验中,绝大部分被试都有了明显的进步,飞行绩效显著提升。为验证后一次实验中,姿态仪注意力分配的明显变化和改进情况,从眼动软件中截取被试眼动热点图,观察前后两次实验姿态仪注意力分配的变化特点,如图 5 所示。

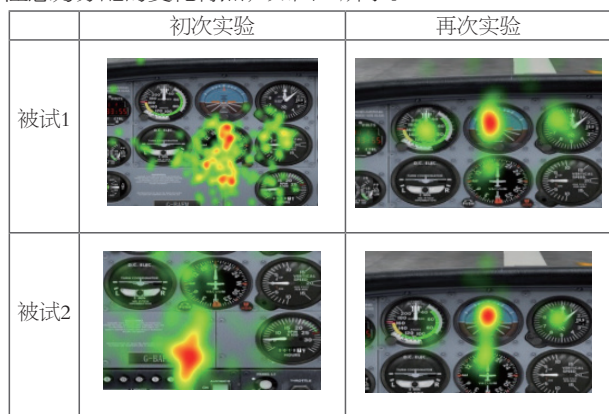


图5 部分被试前后两次实验眼动热点图对比

由于被试数量较多,无法把本次实验的全部热点图呈现出来。从两次实验数据热点图显示对比可知,被试初次实验的注意力分配是杂乱无章的,且不具有任何规律性。再次实验后注意力分配明显呈“T”型,这也与飞行中驾驶领航仪表(也称飞行仪表)的排列规则一致,且关注最多的区域(红区)始终集中在姿态仪上,两次实验注意力分配差别显著。

3 结语

飞行姿态是衔接飞行员操作意图与飞机实际运动状态的关键环节,其意义远超一般飞行参数。它直观反映了飞行器在空中的实时“生命体征”。本研究通过眼动数据证实,无论飞行员经验深浅,其视觉焦点的核心始终落在姿态仪上。这并非单纯的操作习性,而是由飞行力学本质与安全管理要求共同决定的必然结果。因此,将视觉注意力持续聚焦于姿态监视,是飞行员必须掌握的核心素养。这需要建立“以姿态仪表为中心,辅以其他仪表交叉验证”的注意力分配策略。通过本研究,可得出如下结论:

(1) 从被试眼动数据来看,姿态占全部注意力的 50% 以上,可知姿态是飞行中最重要的,飞行中要把主要注意力放在对飞机姿态的监控上。

(2) 从被试两次飞行绩效得分来看,分数与注意力分配的好坏密切相关,表明良好的注意力分配是操纵飞机安全飞行的前提。

(3) 从前后两次实验热点图对比来看,再次实验中被试将主要注意力放在姿态仪上,且飞行得分普遍提升较大,同时分数高的注意力分配具有明显的规律性。进一步证实了姿态对于安全飞行的重要性。

将视觉注意力持续聚焦于姿态监视,是飞行员必须掌握的核心素养。这需要建立“以姿态仪表为中心,辅以其他仪表交叉验证”的注意力分配策略。正如本研究显示,当飞行员的视觉扫描模式从随机观察转变为规律的“T”型分布,且将姿态仪作为视觉中枢时,其飞行操作质量明显改善。这种高效的注意力配置使飞行员能够及时捕捉飞行状态的细微变化,从而实现前瞻性操控,而非事后被动处置。综上所述,掌握飞行在本质上就是掌握姿态。对飞行姿态的持续优先关注,是飞行员应有的本能反应,也是保障飞行安全、精准与效率的根本。无论在基础训练或复杂特情处置中,这一原则都应作为飞行员注意力管理的核心准则。

参考文献:

- [1] T. J. M. van Dijk, H. W. G. K. van Winsum, M. H. W. B. van de Merwe, Visual Scan Patterns During the Control of a Simulated Unmanned Aerial Vehicle, Aviation, Space, and Environmental Medicine (2009).
 - [2] Landry, S. J., Dehkordi, V. G., Chevalley, E. (2015). Pilot attention and flight deck automation: An empirical study. Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero). ACM.
 - [3] 孙瑞山, 范巍巍. 基于眼动追踪的平视显示器人机工效研究[J]. 航空学报, (2018).39(S1), 722216.
 - [4] 刘双, 张磊, 柳忠起, 袁修干, 基于熵方法的舰载机飞行员着舰注意力分配特性分析[J]. 人类工效学, 2019 年 8 月, 第 25 卷, 第 4 期, 1-5 页.
- 基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(编号: U2133209)。