

中文引用格式:王燕青,张承越,任景瑞,等. 基于眼动测量的通航飞行员绕机检查特征[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):42-48.

英文引用格式:WANG Yanqing, ZHANG Chengyue, REN Jingrui, et al. Eye-tracking-based analysis of walk-around inspection behavioral characteristics in general aviation pilots [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 42-48.

基于眼动测量的通航飞行员绕机检查特征*

王燕青¹教授, 张承越¹, 任景瑞^{**2,3}讲师,
张书瀚⁴, 刘迪⁵工程师

(1 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300; 2 中国民航大学 飞行分校, 天津 300300;
3 民航航空公司人工智能重点实验室, 天津 300300; 4 深圳航空责任有限公司 飞行部,
广东 深圳 518128; 5 天津杰普逊国际飞行学院有限公司 朝阳飞行训练基地, 辽宁 朝阳 122000)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0542

基金项目:中国交通教育研究会 2024—2026 年度教育科学研究课题重点课题(JT2024ZD016); 教育部人文社会科学规划基金资助(23YJA190010); 中央高校基本科研业务费-自然科学一般项目(3122022084); 中央高校人文社科重点项目(3122022035)。

【摘要】 为提升通航飞行员绕机检查水平,保障通航安全,利用眼动仪,测量并分析不同经验水平下通航飞行员执行绕机检查的完成率和注视行为特征差异;根据绕机检查单和绕机检查流程,将钻石 DA-40D 飞机划分为发动机、机翼、机身、起落架、尾翼等 6 个兴趣区(AOI),通过眼动仪记录被试绕机检查过程中 6 个 AOI 的绕机检查完成率与注视行为特征。结果表明:老手组在尾翼、发动机、右机翼、左机翼和左起落架等 5 个 AOI 的检查完成率显著高于新手组,随着飞行经验增加,通航飞行员的绕机检查完成率逐渐提升;老手组在发动机、右起落架、右机翼、左机翼、左起落架等 5 个 AOI 的总注视时长、总注视次数均显著高于新手组;新手组在发动机 AOI 的平均注视时长显著高于老手组。建议在培训时加强通航飞行员对尾翼、右机翼、左机翼、左起落架区域的重视,同时应提升新手在发动机、左起落架区域的检查能力。

【关键词】 眼动测量; 通航飞行员; 绕机检查; 检查完成率; 注视行为

Eye-tracking-based analysis of walk-around inspection behavioral characteristics in general aviation pilots

WANG Yanqing¹, ZHANG Chengyue¹, REN Jingrui^{2,3}, ZHANG Shuhan⁴, LIU Di⁵

(1 School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2 Branch of Flight Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3 Key Laboratory of Artificial Intelligence for Civil Aviation Airlines, Tianjin 300300, China;
4 Flight Department, Shenzhen Airlines, Shenzhen Guangdong 518128, China; 5 Chaoyang Flight Training Base, Tianjin Jeppesen International Flight College Co., Ltd., Chaoyang Liaoning 122000, China)

Abstract: In order to enhance the proficiency of general aviation pilots in walk-around inspections and ensure aviation safety, eye-tracking technology was employed to measure and analyze the completion rates and fixation behavior characteristics of pilots categorized by experience level. Based on the walk-around

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0042-07; 收稿日期:2025-07-14; 修稿日期:2025-09-18

** 通信作者:任景瑞(1993—),男,河北沧州人,硕士,讲师,主要从事飞行训练安全、飞行人为因素等方面的研究。E-mail: renjingrui20@163.com。

checklists and inspection procedures, Diamond DA-40D aircraft was divided into six Areas of Interest (AOI), including the engine, wings, fuselage, landing gear, and empennage. During the participants' walk-around inspections, the completion rates of the walk-around checks and the characteristics of fixation behavior for these six AOI were recorded by means of an eye tracker. The results show that the completion rates of inspections in five AOI, including the empennage, engine, right wing, left wing, and left landing gear, were significantly higher in the veteran group than in the novice group. With the increase in flight experience, the completion rates of general aviation pilots' walk-around inspections gradually improve. Significantly higher total fixation durations and total fixation counts were observed in the experienced group compared to the novice group across five AOI: the engine, right landing gear, right wing, left wing, and left landing gear. A significantly longer average fixation duration on the engine AOI was demonstrated by the novice group relative to the experienced group. Recommendations are provided for training to place greater emphasis on the empennage section, right wing, left wing, and left landing gear areas. Additionally, enhancement of novices' inspection capabilities regarding the engine and left landing gear areas is suggested.

Keywords: eye-tracking measurement; general aviation pilots; walk-around inspection; inspection completion rate; fixation behavior characteristics

0 引言

安全是低空经济发展的生命线^[1-2]。中国民用航空局发布的《通用航空飞行组织与实施安全指南》^[3]、美国联邦航空管理局发布的《通用航空飞机所有者的飞机检查指南》^[4]均要求绕机检查作为飞机起飞前必要的程序,必须按照“口到、手到、眼到”的标准操作,确认飞机外部各系统和各部件是否符合安全飞行标准,即确保飞机处于适航状态,方可执行后续飞行任务。尽管已有相关文件对绕机检查做出相关规定,但由于绕机检查不善而导致的不安全事件仍屡见不鲜^[5-6],因此,通航飞行员起飞前的绕机检查工作必须得到充分重视。

目前,对于绕机检查的研究,国内外学者更关注采用创新技术和设备、增加辅助检查手段等方式,以减少人为差错,如李忠良等^[7-8]提出采用图像处理技术实现民航运输类飞机外表面地检,从而实现绕机检查的智能化,以降低漏检事件的发生;张迪等^[9]提出基于无人机与 YOLO 算法的智能化外观损伤检测方法,为解决传统人工巡检效率低、主观性强等问题提供技术参考;官剑文^[10]采用无人机绕机视频检查,从而提高飞机绕机检查的质量;DIDIER 等^[11]提出采用无人机代替传统绕机检查;YASUDA 等^[12]提出结合机器人技术与计算机视觉的自动化方案,有望提升检查效率和可靠性,推动航空维护的智能化转型。

目前,由于国内民航规章等限制,无法实现利用

无人机等辅助设施进行绕机检查,通航飞行员仍是起飞前绕机检查主要执行者,因此,有必要深入探究通航飞行员的起飞前绕机检查。鉴于此,笔者拟招募通航飞行员为被试,按照飞行经验和飞行执照类型进行分组,基于真实通用航空飞机开展结合眼动测量的绕机检查试验,分析不同组别通航飞行员绕机检查完成率、目视注视特征的差异,以期提高绕机检查能力及改善绕机检查培训方案。

1 飞行员绕机检查

起飞前绕机检查需要通航飞行员根据绕机检查单,对其执飞的机型外部做一次详细的检查。每种机型都有其对应的检查单。一般情况下,检查单所列出的检查区域和项目包括前机身、前起落架、机腹、右起落架、右侧机翼、右侧机身、尾翼、左侧机身、左侧机翼、左起落架等。表 1 为部分钻石(Diamond, DA-40D)机型的前机身和前起落架的检查项目和检查方式/状态。

表 1 DA-40D 绕机检查单(部分)

Table 1 DA-40D walk-around inspection checklist

检查区域及编号	检查项目	检查方式/状态
1. 前机身	滑油量	量尺检查
	变速箱滑油量	检查
	发动机蒙皮	外观检查
	进气口	无异物
	螺旋桨	检查
	螺旋桨整流罩	外观检查

续表 1

检查区域及编号	检查项目	检查方式/状态
2. 前起落架	前起落架支柱	外观检查
	起落架支柱整流罩	外观检查
	轮胎、轮毂、刹车盘	外观检查
	轮舱整流罩	外观检查
	牵引杆	移走
	轮胎充气压力	压缩量正常,无超量磨损
	轮挡	移走

注:来自 DA-40D 飞机飞行手册。

通航飞行员需手持检查单,按照图 1 流程,从前机身开始到左起落架结束对飞机进行绕机检查。

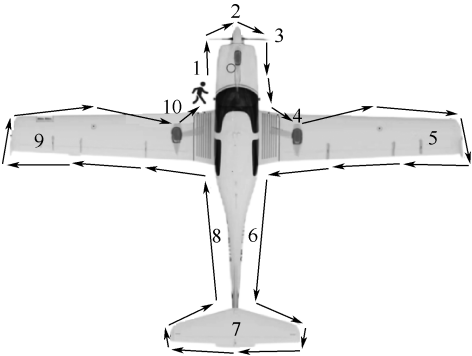


图 1 绕机检查流程

Fig. 1 Procedure for walk-around inspection

在执行绕机检查的过程中,通常要求通航飞行员做到口到、手到、眼到。其中,口到要求逐条朗读绕机检查单内容;手到要求通航飞行员通过直接接触或操作关键部件,验证其状态是否符合安全标准;眼到要求通航飞行员视线准确扫描检查单规定的位置,识别潜在风险,是绕机检查的核心环节。

2 基于眼动测量的绕机检查试验设计

2.1 被 试

选取 20 名男性通航飞行员作为被试,年龄为 21~24 岁,均持有民用航空人员 I 级体检合格证和航空器驾驶员执照。被试施测当日状态符合通用航空作业要求^[13]。

2.2 试验设备

DA-40D 航空器是一款 4 座、单引擎、螺旋桨驱动的下单翼飞机,其性能和稳定性出色,是国内通用航空的主力机型^[14]。

眼动测量所采用的眼动仪,配备高速眼动相机、广角场景相机和惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)等硬件设备,实时眼动追踪采样率为

200 Hz,场景相机为 30 Hz,IMU 为 110 Hz。校准精度 1.8~2.4°,且拥有自动校准功能,用户使用前无需手动校准^[15-17],如图 2 所示。



图 2 眼动仪

Fig. 2 Eye tracking hardware

2.3 试验场所

试验场所为机库内安全区域。机库内光照度约为 500 lx,对被试瞳孔直径的影响较小^[18],同时,机库内环境光亮度恒定,无需考虑亮光、暗光对被试瞳孔直径的影响。

2.4 试验变量

2.4.1 自变量

根据被试的飞行总小时数和所持有的执照类型(私照、商照),将其分为新手和老手 2 组,即将总飞行小时数超过 80,且持有商照的被试划分为老手组,飞行小时数不足 80,且持有私照的被试划分为新手组。

2.4.2 因变量

因变量为被试在各兴趣区(Area Of Interest, AOI)执行绕机检查任务的完成率和通过眼动测量获取的注视行为指标。检查完成率为被试完成目视检查项目数与检查单要求检查总项目数之比。注视行为指标选取各 AOI 内检查项目的总注视时长^[19]、总注视次数^[20]、平均注视时长^[21]和平均瞳孔直径^[22]等指标。其中,检查项目完成率是指被试在特定 AOI 内,执行口到、手到、眼到执行标准,正确完成的检查项目数占总项目数的占比;总注视时长是指被试在特定 AOI 内完成检查项目时,所有注视点持续时间的总和;总注视次数为被试在特定 AOI 内完成检查项目时注视点的总数量;平均注视时长为总注视次数与总注视时长的比值;平均瞳孔直径大小反映被试在试验中认知负荷水平。

2.5 试验步骤

步骤 1:设备连接与准备。将眼动仪与试验手机连接,打开 NEON COMPANION APP,确认眼动仪与手机之间的连接正常。

步骤 2:建立被试档案。被试佩戴眼动仪后,为

其建立被试档案,以确保记录并追踪每一名被试的试验数据。

步骤 3:绕机检查。因眼动仪拥有自动校准功能,准备就绪后,即可启动眼动仪的记录功能,记录被试的绕机检查眼动数据。

步骤 4:保存数据。当被试自述已完成绕机检查任务后,点击“停止记录”按钮,保存试验数据。

2.6 数据分析方法

利用智通软件数据分析平台,提取通过眼动测量采集到的各 AOI 中的眼动数据,利用 SPSS 软件统计分析数据。采用 S-W 方法正态性检验不同飞行经验通航飞行员项目检查完成率和注视行为数据,符合正态性的指标采用独立样本 t 检验,不满足正态性的指标采用 Mann-Whitney U 检验进行差异分析。

3 绕机检查特征分析与评价

由于 1 名新手因未完成全部试验,其试验数据不予采用。其他 19 名被试均完成全部的绕机检查项目,故最终采集到 19 名被试的有效数据。

3.1 分组有效性验证

为验证新老手分组的有效性,采用 K-Means 聚类算法,聚类分析被试的绕机检查完成率。分析结果见表 2,由表 2 可知:聚类效果显著(影响程度 $F=59.11$,显著性值 $p=0.00<0.05$),且聚类类别 1 与老手组一致,聚类类别 2 与新手组一致,因此,试验分组有效。

表 2 聚类分析结果

Table 2 Results of Cluster Analysis			
聚类类别(平均值±标准差)		F	p
类别 1	类别 2		
0.94±0.04	0.67±0.11	59.11	0.00

表 3 通航飞行员绕机检查完成率的描述性统计(M±SD)

Table 3 Descriptive statistics of task completion rates for general aviation pilots							
AOI		尾翼	发动机	右机翼	右起落架	左机翼	左起落架
检查项数		13	6	16	6	20	4
被试	老手	0.91±0.12	1.00±0.00	0.95±0.05	1.00±0.00	0.93±0.06	0.90±0.32
	新手	0.65±0.18	0.39±0.47	0.75±0.12	0.98±0.06	0.64±0.08	0.36±0.49

从表 3 和图 4 可以看出,老手在尾翼、发动机、右机翼、左机翼和左起落架 5 个 AOI 的绕机检查显著高于新手的检查率($p=0.005<0.01$, $p=0.003<0.01$, $p=0.002<0.01$, $p=0.000<0.01$, $p=0.016<0.05$),可见:飞行经验对通航飞行员绕机检查的完成率有显著影响,即随着飞行经验水平的提升,通航

3.2 AOI 划分

根据绕机检查单和绕机检查流程,划分 DA-40D 的 AOI。DA-40D 飞机按照其结构分为发动机、机翼、机身、起落架、尾翼 5 个区域。由于机身采用的是复合材料,绕机检查时只需要检测蒙皮、舷窗和舷门是否有裂痕,所以将其合并至机翼 AOI。此外,按照检查单检查流程规定,左右机翼属于不同检查区域,故将机翼区分为左机翼、右机翼 2 个 AOI。发动机、前机身、前起落架和机腹在结构上位置相近,为方便眼动测量数据的提取,统一归类为发动机 AOI。根据上述原则,最终将 DA-40D 的发动机、右起落架、右机翼、尾翼、左机翼、左起落架 6 个检查部位作为用于眼动特征分析的 AOI,如图 3 所示。

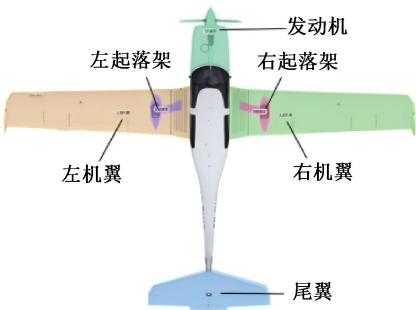


图 3 AOI 划分
Fig. 3 AOI diagram

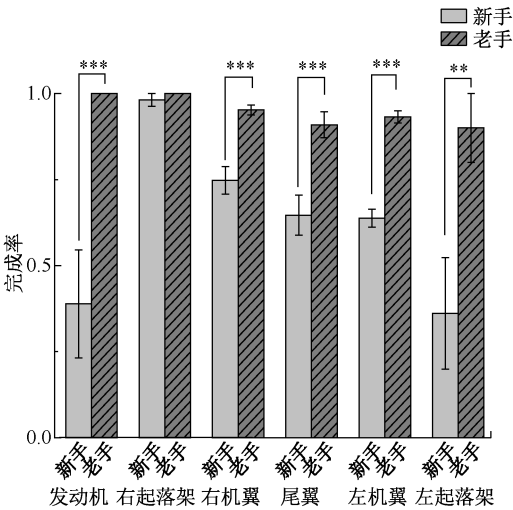
3.3 检查完成率

描述性统计 2 组被试对绕机 DA-40D 的 6 个 AOI 的检查完成率,结果见表 3。

采用 S-W 方法正态性检验新手和老手 2 组被试在不同 AOI 的完成率,结果表明:各个 AOI 的被试绕机检查完成率均不满足正态性。因此,采用 Mann-Whitney U 非参数检验方法分析新手、老手在 6 个 AOI 的检查完成率差异,如图 4 所示。

飞行员的绕机检查完成率会逐渐提升。

由表 3 可知:新手与老手在发动机 AOI 和左起落架 AOI 完成率的差异较大,且新手在这 2 个区域的完成率均低于 50%。结合绕机检查实际工作,并访谈被试,发现发动机 AOI 检查项目细节多、难度大、需要进行一些动手操作,新手难以完成,所以导



注：* 表示 $P<0.05$ ，** 表示 $P<0.01$ ，*** 表示 $P<0.001$ ，
误差线代表总注视时长的标准误；图 5 同。

图 4 不同飞行经验通航飞行员在各 AOI 的完成率
Fig. 4 Task completion rates across areas of Interest for
general aviation pilots with varying flight experience

表 4 通航飞行员的注视行为指标描述性统计 ($M\pm SD$)

Table 4 Descriptive statistics of fixation behavior metrics for general aviation pilots

注视行为指标	被试	发动机	右起落架	右机翼	尾翼	左机翼	左起落架
总注视时间/s	老手	88.10±40.02	8.94±7.76	35.54±17.22	12.50±4.88	40.22±22.55	8.18±5.91
	新手	69.51±38.50	2.03±1.39	21.48±9.64	13.77±5.43	18.23±3.37	2.59±2.00
总注视次数	老手	166.30±64.27	21.20±9.58	89.90±22.48	33.20±12.01	103.70±30.32	21.00±13.57
	新手	93.22±51.82	6.33±3.71	56.33±19.76	40.11±15.07	51.67±11.92	7.11±4.01
平均注视时间/s	老手	0.53±0.17	0.39±0.15	0.38±0.09	0.38±0.10	0.37±0.11	0.37±0.14
	新手	0.74±0.27	0.32±0.09	0.38±0.09	0.36±0.10	0.36±0.09	0.34±0.13
平均瞳孔直径/mm	老手	4.35±0.643	4.40±0.69	4.04±0.61	4.66±0.72	4.47±0.71	4.57±0.80
	新手	4.27±0.68	4.24±0.75	3.88±0.63	4.71±0.74	4.34±0.71	4.43±0.68

采用 S-W 方法正态性检验 2 组在不同 AOI 的注视行为指标,结果表明:各个 AOI 的被试注视行为指标均不满足正态性。因此,仍采用 Mann-Whitney U 非参数检验方法分析新手和老手在 6 个 AOI 的总注视时长、总注视次数、平均注视时长和平均瞳孔直径进行差异分析,结果如图 5 所示。

从表 4 和图 5 可以看出,新手在右机翼、右起落架、左机翼和左起落架 AOI 的总注视时长均显著低于老手($p=0.011<0.05$, $p=0.001<0.01$, $p=0.002<0.01$, $p=0.034<0.05$);新手在右机翼、右起落架、左机翼、左起落架 AOI 总注视时长显著低于老手($p=0.011<0.05$, $p=0.001<0.01$, $p=0.002<0.01$, $p=0.034<0.05$);新手在发动机、右机翼、右起落架、左机翼、左起落架 AOI 的总注视次数显著低于老手($p=0.015<0.05$, $p=0.003<0.01$, $p=0.000<0.01$, $p=0.000<0.01$, $p=0.033<0.01$);2 组被试平均注

致新手在发动机 AOI 的项目检查完成率降低较多;另外,新手按照检查单执行绕机检查到最后一个 AOI——左起落架 AOI 时,往往会出现麻痹、侥幸等危险心理,从而导致该 AOI 的检查完成率降低。因此,培训时应重点强化发动机区域的检查教学,同时,还应着重关注通航飞行员心理特征培训。尽管所有被试均自述完成了所有项目的检查,但通过眼动追踪数据发现,老手仍存在错检、漏检等现象,在尾翼、左机翼、左起落架 AOI 的完成率均未达到 100%。分析其原因,一是通航飞行员未能做到弯腰或下蹲深入检查这些区域;二是前期针对尾翼、左机翼、左起落架区域的培训重视度不足。

3.4 注视行为指标

描述性统计 2 组被试的注视行为指标,即总注视时长、总注视次数、平均注视时间和平均瞳孔直径,结果见表 4。

视时长仅在发动机 AOI 有显著差异($p=0.051<0.1$),表明 2 组被试对除发动机 AOI 外的其他 AOI 重视程度没有显著差异,而新手组平均注视时长显著大于老手组,是由于发动机 AOI 内的检查项目细节较多,新手组打开与关闭滑油盖和齿轮箱油盖不熟练,视线固着,造成新手平均注视时长较长。

2 组被试的平均瞳孔直径在所有 AOI 均无显著差异($p>0.05$),这表明:一旦通航飞行员接受了相关培训,绕机检查任务需要的认知深度并无显著差异,即通航飞行员为绕机检查所付出的努力程度不受飞行经验的影响。

4 结 论

1) 通航飞行员的绕机检查完成率,会随着飞行经验的增长而提升,新手飞行员在发动机 AOI 和左起落架的完成率最低,应加强新手在这 2 个 AOI 检

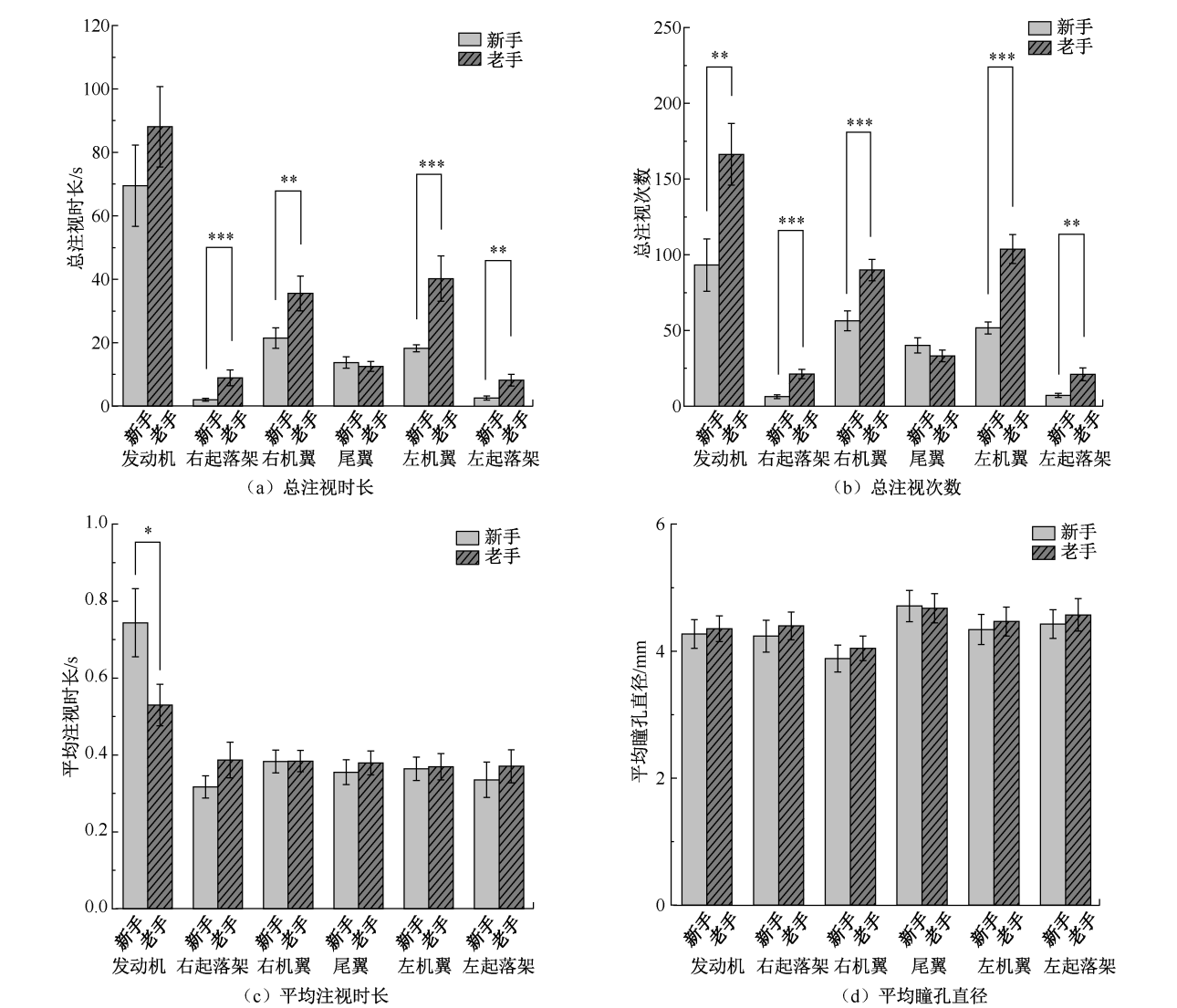


图 5 不同飞行经验通航飞行员在各 AOI 的注视行为指标

Fig. 5 Fixation behavior metrics across AOI for general aviation pilots with varying flight experience

查的培训,以提升其绕机检查能力。

2) 新手在右机翼、右起落架、左机翼和左起落架 AOI 的总注视时长均显著低于老手;新手在发动机、右机翼、右起落架、左机翼、左起落架 AOI 的总注视次数显著低于老手;新手在发动机 AOI 平均注视时长显著大于老手组;2 组被试各 AOI 平均瞳孔直径无显著性差异,表明绕机检查任务所付出的努

力不受通航飞行员飞行经验的影响。

3) 通过回放被试绕机检查视频以及眼动仪所记录的注视位置,人工判断识别被试是否进行目视检查各项目相应部位,此方法是对日常作业质量检查的事后监管,无法实现实际作业中的实时监管。因此,后续研究需要增加智能识别算法,从而提高质量监控时效性。

参 考 文 献

[1] 黄静洋, 潘璇, 付小蓉, 等. 中低空通用航空飞行计划安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (12): 23-30.
HUANG Jingyang, PAN Xuan, FU Xiaorong, et al. Safety risk assessment for low and medium altitude general aviation flight plans[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 23-30.

[2] 孙卫国, 吕人力, 李凌威, 等. 低空经济面临的机遇、挑战与城市空中交通规划展望[J]. 城市交通, 2025, 23(2): 13-19, 127.
SUN Weiguo, LYU Renli, LI Lingwei, et al. Opportunities and challenges for low-altitude economy and future prospects

- of urban air mobility planning[J]. *Urban Transport of China*, 2025, 23(2): 13–19, 127.
- [3] 中国民用航空局飞行标准司. 通用航空飞行组织与实施安全指南[Z]. 2021–08–25.
- [4] Federal Aviation Administration (FAA). Advisory circular AC 20–106: aircraft inspection for the general aviation aircraft owner[Z]. 1978–04–01.
- [5] LOPES N M, NEVES F T, APARICIO M. Key insights from preflight planning for safety improvement in general aviation: a systematic literature review[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(9): DOI: 10.3390/app14093771.
- [6] WENNER C A, DRURY C G. Analyzing human error in aircraft ground damage incidents[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2000, 26(2): 177–199.
- [7] 李忠良, 魏麟, 刘晔璐, 等. 飞机外表面地检设备图像处理技术初探[J]. *航空维修与工程*, 2018(5): 56–58.
LI Zhongliang, WEI Lin, LIU Yelu, et al. Preliminary study on image processing technology of ground inspection equipment for aircraft[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2018(5): 56–58.
- [8] 李忠良, 袁宇新, 张明月, 等. 基于压缩感知的机体结构图像特征提取技术分析[J]. *电子技术*, 2024, 53(4): 381–383.
LI Zhongliang, YUAN Yuxin, ZHANG Mingyue, et al. Analysis of feature extraction technology for body structure images based on compressive sensing[J]. *Electronic Technology*, 2024, 53(4): 381–383.
- [9] ZHANG Di, LIU Zhijun, WANG Xuewen, et al. Research on aircraft patrol inspection method using UAV based on YOLO algorithm[C]. 2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer (EIECT), 2024: 412–415.
- [10] 官剑文. 无人机辅助民航飞机外观检查的应用[J]. *航空维修与工程*, 2022(5): 29–30.
GUAN Jianwen. The application of UAV in aircraft surface inspection[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(5): 29–30.
- [11] DIDIER A R D, LOZANO T C, MELO D P F, et al. Inspection of aircrafts and airports using UAS: a review[J]. *Results in Engineering*, 2024, 22: DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102330.
- [12] YASUDA Y D V, CAPPABIANCO F A M, MARTINS L E G, et al. Aircraft visual inspection: a systematic literature review[J]. *Computers in Industry*, 2022, 141: DOI: 10.1016/j.compind.2022.103695.
- [13] 中国民用航空局. 一般运行和飞行规则[Z]. 2022–01–04.
- [14] 中国航空运输协会通用航空委员会. 2023—2024 年中国通用航空发展报告[R], 2024.
- [15] BAUMANN C, DIERKES K. Neon accuracy test report[R]. Pupil Labs, 2023.
- [16] DREWS M, DIERKES K. Strategies for enhancing automatic fixation detection in head-mounted eye tracking[J]. *Behavior Research Methods*, 2024, 56(6): DOI: 10.3758/s13428-024-02360-0.
- [17] SAXENA S, VISRAM A, LOBO N, et al. Social eyes: scaling mobile eye-tracking to multi-person social settings[C]. *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2025. 4: 1–19.
- [18] 徐明伟, 金龙哲, 田兴华, 等. 受限空间不同照度环境下 VDT 作业视觉疲劳[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(12): 1 605–1 612.
XU Mingwei, JIN Longzhe, TIAN Xinghua, et al. Visual fatigue of VDT operation under different illumination conditions in confined space[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(12): 1 605–1 612.
- [19] 张欣悦, 吴晓莉, 王名琚, 等. 有/无人机协同操作界面的最佳交互方式评估[J/OL]. *系统工程与电子技术*: 1–15. [2025–08–06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.tn.20250326.1413.033.html>.
ZHANG Xinyue, WU Xiaoli, WANG Mingjun, et al. Assessing optimal interaction for a cooperative operation interface of manned/unmanned aerial vehicle[J/OL]. *Systems Engineering and Electronics*: 1–15. [2025–08–06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.tn.20250326.1413.033.html>.
- [20] 汪磊, 王朔, 高杉, 等. 面向特情的航线飞行员视觉注意分配研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 214–220.
WANG Lei, WANG Shuo, GAO Shan, et al. A study on airline pilots' visual attention allocation during emergency[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 214–220.
- [21] 柳志起, 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, 539.
LIU Zhongqi, YUAN Xiugan, LIU Wei, et al. Quantitative measuring method of pilots' attention allocation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(5): 518–520, 539.
- [22] 汪磊, 王朔, 邹颖, 等. 基于任务情境的航线飞行员脑力负荷特征研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(4): 1 202–1 208.
WANG Lei, WANG Shuo, ZOU Ying, et al. A study on airline pilots' mental workload characteristics based on task situation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(4): 1 202–1 208.

作者简介: 王燕青 (1974—), 女, 河南安阳人, 博士, 教授, 主要从事航空人因工程、安全管理与行为安全等方面的研究。E-mail: yqwang@cauc.edu.cn。