DOI:10.16016/j.2097-0927.202307060

旋翼飞行器飞行人员空间定向障碍研究进展及展望

畅 通[1,2],王小成[1,2] 710032 西安,空军军医大学:航空航天医学系航空航天临床医学中心,教育部航空航天医学重点实验室[1],第一附属医院空勤科[2]

[摘要] 空间定向障碍(spatial disorientation,SD)的发生率较高,对飞行安全构成了重大威胁。目前对于旋翼飞行器飞行员在空间定向方面的研究相对较少,在领域内缺乏足够的关注。与固定翼飞行器飞行员不同,旋翼飞行器飞行员面临的空间定向障碍具有明显的特点和不同的挑战。在过去的百年中,通过模拟训练旋翼飞行器飞行员可以有效地减少空间定向障碍相关的飞行事故。这方面已经取得了长足的进展。随着虚拟现实技术和人工智能的迅猛发展,这一方法在未来仍有许多值得关注的领域。近些年,研究人员从认知形成过程的角度探究空间定向障碍的发生机制,为其预警提供新的针对性靶点。从此类人员空间定向障碍发生特点、针对性模拟训练和发生机制三方面回顾相关研究进展并展望未来探索方向,对有效降低相关空间定向障碍的发生率以及导致的事故率具有重要的军事意义。

[关键词] 空间定向障碍;旋翼飞行器;模拟训练;认知

[中图法分类号] R852.32 [文献标志码] A

Progress and prospects in spatial orientation disorders in rotorcraft pilots

CHANG Tong[1,2], WANG Xiaocheng[1,2] [1]Clinical Center of Aerospace Medicine, School of Aerospace Medicine, Key Laboratory of Aerospace Medicine of Ministry of Education; [2]Department of Aviation Medicine, The First Affiliated Hospital, Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi Province, 710032, China

[Abstract] The incidence rate of spatial disorientation is quite high, and it poses a significant threat to flight safety. However, current research on spatial orientation for rotary-wing aviators is still lack, and attention to the field remains in sufficient. Unlike fixed-wing aircraft pilots, the rotary-wing aviators face unique characteristics and challenges in disorders of spatial orientation. Over the past century, significant progress has been made in reducing flight accidents related to spatial disorientation through simulation training for rotary-wing aviators. With the rapid development of virtual reality technology and artificial intelligence, this approach holds great potential for further exploration in the future. In recent years, researchers have been studying the occurrence mechanism of spatial disorientation from the perspective of cognitive formation processes, which providing new targeted focal points for early warning. In terms of characteristics, targeted simulation training, and underlying mechanisms of spatial disorientation, we review the progress in the research on the aspect and prospect future research directions, which is of great military significance in effectively reducing the occurrence rate of spatial disorientation and the resulting accidents.

[Key words] spatial disorientation; rotorcraft aircraft; simulation training; cognition

Supported by the Talent Boosting Program of Air Force Medical University (2022LJJH001) and the Guiding Special Project for Supporting Excellent Doctoral and Master Students From First-Rate Discipline Construction for Aerospace Medicine (2022YSZC04). Corresponding author: WANG Xiaocheng, E-mail: wxcnose@126.com

[基金项目] 空军军医大学人才助推计划(2022LJJH001);航空航天医学一流学科建设引导专项优博优硕支持计划(2022YSZC04)

[通信作者] 王小成,E-mail: wxcnose@126.com

2097-0927/Copyright © 2024, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

空间定向障碍(spatial disorientation,SD)指的是一种无法分辨位置方向,或者无法在陌生环境中明辨方向的状态。以往的研究中,研究者更多关注的是病理性的空间定向障碍。而在飞行活动中,由于人体长期适应地面生活的局限性,哪怕飞行员的感觉和神经系统健康,也会不可避免SD的发生[1]。经历SD的飞行员无法准确感知飞机相对于地面外部坐标系和垂直重力线的位置,或对飞机飞行状态、姿态的感觉和实际状态不一致[2]。

SD最常见和最主要的表现形式是飞行错觉,此外定向判断失能和部分情况下的情景意识丧失(loss of situation awareness,LSA)也属于SD[3]。同时SD也是导致致命飞行事故的最主要因素,严重威胁飞行安全[4]。目前针对固定翼飞机的空间定向障碍研究较多,而与固定翼飞机相比,旋翼飞行器飞行方式与其完全不同[5],其保障方式也存在差异[6],所以针对旋翼飞行器空间定向障碍发生的情况更需引起航卫保障人员的关注。

1 旋翼飞行器飞行人员空间定向障碍特征:复杂且易被忽视

研究表明,旋翼飞行器飞行员中SD的发生率高于固定翼飞机飞行员[7]。根据一份调查报告,英军旋翼飞行器每飞行小时的SD事故率远高于其他飞机类型,尤其是喷气式战斗机的两倍[8]。相比于固定翼飞行器如战斗机,旋翼飞行器飞行员的任务频繁,起降准备时间短,起降和飞行环境更为复杂[9]。且由于旋翼飞行器飞行员未配置与战斗机飞行员同等规格的防护设备,热负荷、噪声和振动会增加飞行错觉发生的潜在风险[9-10]。随着技术进步,尤其是在夜视镜目视条件、超低空飞行等极具挑战性的飞行环境中,SD仍然是旋翼飞行器机组人员生命安全的最大威胁。

国内调查研究报道显示,直升机飞行员经常发生视觉飞行错觉,其中夜航和暗舱仪表飞行以及新飞行员更容易发生[11]。另一项调查报告表明,直升机飞行员的SD更常发生在平飞转弯时,且多以倾斜错觉为主,而在上升、下滑、悬停时发生率较低[12]。这可能与平飞转弯时产生了双轴向的加速度刺激到飞行员感觉器官有关。另外,研究还表明,在舰载直升机飞行员中,发生飞行错觉的比例高于陆基直升机飞行员,但二者之间的飞行错觉发生比例没有统计学差异[13]。当然,也有研究表明直升机飞行员的飞行错觉发生率低于战斗机等固定翼飞行器,但由于参与调查的直升机飞行员数量较少,二者之间的差异没有统计学意义[14]。

因此,可以发现旋翼飞行器飞行员面临着许多特殊的风险因素,这些因素可能会导致SD的发生。然而,关于这类人员SD发生的研究非常有限,也缺乏足够的关注。随着高性能直升机的发展和飞行任务的更高要求,寻找适当的方法来避免SD导致的飞行事故变得尤为重要。

2 减少SD引起的飞行事故的有效措施之一:开展模拟训练

一直以来,航空医学研究人员采取了多种措施来防止SD相关飞行事故的发生。巴拉尼座椅(Barany chair)是一种通过刺激人体前庭器官来进行试验,并证明在发生SD时应该更加相信飞行仪表的设备[7]。早在20世纪初,航空医生就使用简易的三平面运动飞行模拟器对飞行员进行训练。随着科技的发展,更先进的六自由度模拟器也被应用于SD模拟训练。例如,美国陆军航空医学研究所的旋翼模拟器可以模拟18种常见的飞行错觉;印度空军利用此类模拟器进行了SD演示,参与的机组人员的SD处理能力明显提高;英国皇家空军也进行了类似模拟器演示训练,并根据飞行员对模拟器真实性的建议不断推进模拟器的发展,包括加入离心臂作为第七自由度,通过计算机算法模拟更真实的飞行环境等先进技术[7]。

因此我们认为,通过不同的诱发装置让飞行员体验不同类型的SD,以增加他们对飞行中发生SD的风险意识,并使他们能够及时发现自己是否发生了SD并做出正确处理,这仍是目前应对SD的最佳实践方式。

模拟器训练已经被广泛应用于减少SD相关的飞行事故[15],但在模拟装备更新和模拟方案设计等方面仍需深入研究。一方面,需要将最新的虚拟现实技术应用于模拟器训练,以增加训练的真实性和沉浸感。通过更逼真的虚拟场景和交互体验,飞行员可以更真实地感受SD引起的生理心理反应,进而可以在遇到SD引起时更好地应对。另一方面,模拟器训练应该更

加贴近实际飞行的情境和场景。模拟器中的训练项目应该更加多样化,并根据不同飞行阶段和环境进行定制化。例如,模拟夜航飞行、恶劣天气条件下的飞行、低能见度情况等,以让飞行员在安全的环境下接触到各种 SD 情况,并学习有效的应对策略。有研究表明,通过构建不同的合成定制训练环境,可以有效提高旋翼模拟器训练 SD 的效果。此外,在模拟器训练中应该加入复杂的任务和干扰线索,以提高飞行员在 SD 情况下的处理能力。模拟器训练可以更好地模拟实际飞行中可能遇到的复杂环境,例如通过加入紧急情况、多任务操作[16]、不同感官的冲突[17-18]等,让飞行员在训练中适应和应对这些情况,提高他们的应急反应和决策能力。研究表明,通过在模拟器训练中加入其他干扰线索,可以有效训练飞行员在执行飞行任务时的认知负荷能力[8]。当然,还可以通过引入机器学习和人工智能的技术,对飞行员的 SD 风险进行实时监测和预警。通过对大量实际飞行数据进行分析,建立 SD 发生的模型,并与飞行员的生理参数和飞行行为数据进行实时比对,可以提前预警可能的 SD 发生,并提供相应的建议和支持。这些更先进的模拟器使飞行员能够更真实地体验 SD,从而提高他们在 SD 发生时的应对能力。

与此同时,还有必要进一步改进模拟器训练,并加强模拟器训练与实际飞行的联系。虽然模拟器训练是提高飞行员应对 SD 能力的重要手段,但它并不能完全取代实际飞行经验的积累。因此,模拟器训练应与实际飞行经验相结合,形成一个协同的训练体系,以提高飞行员在 SD 情况下的应对能力和安全性。

3 从认知形成角度探索 SD 发生机制:开拓新干预靶点

目前认为,SD 的发生涉及生理和心理等多方面的因素[19],结合人体认知形成过程来看,SD 可分为 3 型[20]。Ⅰ型为认知不到型,即飞行员未意识到自己发生了 SD,这往往表现为 LSA。Ⅱ型为可认知型,即飞行员意识到发生了 SD,同时体验到与实际的飞机姿态或与仪表视觉所示姿态之间的矛盾。Ⅲ型为失能型,也称为不可抵御型,即飞行员意识到发生 SD,但身心失能,无法操纵飞机。以上 3 型之间存在着相互转换的可能,同时也有可能不经过递增发展,直接出现某一型 SD。而我们需要通过一定的方法使Ⅰ型 SD 尽可能被飞行员认知到,同时又避免Ⅱ型 SD 超出认知负荷进展为Ⅲ型 SD。

目前的理论认为,人体通过视觉系统、前庭系统和本体感觉系统正确地认知位置、运动和方向,而来自各个系统的信息在大脑形成认知的过程中至少经历了感觉、知觉及认知 3 个过程。有学者认为Ⅰ型 SD 可以据此继续被细分为未被感觉的 SD、未被知觉的 SD 和可知觉但认知失败的 SD3 种类型[21]。

对于未被察觉的 SD,常见的是倾斜错觉。由于人体半规管感知角速度的最低阈值为 0.5°/s[22],因此当旋转角速度低于此阈值时,人体无法感知到旋转的发生。有学者认为,这种未被感知的 SD 在脑电图(electroencephalogram, EEG)和功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)检查中所显示的结果都是阴性的,没有明显的差异[21]。类似的观点认为,未被感知的 SD 只能促进初级皮层的活动,尚未经过进一步的加工处理,因此尚未形成知觉,因此可能通过使用 EEG 来区别出发生 SD 与否[23-24]。而可被知觉但认知失败的 SD,由于最终未能在大脑中形成正确的认知,一些学者认为可以通过使用 fMRI 扫描相关的脑区,如前扣带回、内侧前额叶、额叶皮层等来鉴别其是否发生[25]。

所以有学者提出了一种利用主观报告(自述是否发生 SD)与平衡能力评估(评估足底压力中心参数)相结合的方法来评价飞行员是否发生了 SD[26],即首先确定飞行员是否意识到 SD,然后对行为数据进行分析。这与目前韩国空军使用的眼动追踪和口头报告交叉核对 SD 的发生异曲同工[27],这类主观和客观指标相结合的识别方式有望成为识别Ⅰ型 SD 的有力工具。因而,从认知形成角度出发可能成为研究 SD 发生机制的新方向,可以提供新的理论和方法来识别和应对 SD。为了更好地理解 SD 的发生机制,未来的研究可以采用多种技术手段,如 EEG、fMRI 等。通过这些技术的应用,可以深入了解 SD 发生时与之相关的大脑区域和神经活动,以及不同类型 SD 的认知特征。此外,结合生理参数和心理问卷调查等数据,可以更全面地了解 SD 的影响因素和机制。

综上所述,通过更加关注 SD 对旋翼飞行器飞行员的具体影响;与实际飞行经验相结合,针对性改进 SD 模拟训练方法和体系;不断引入新的技术和方法深

入研究 SD 的发生机制,都可以进一步提高飞行员对 SD 发生时的应对处置能力,进而能够使旋翼飞行器飞行更加安全可靠,为航空安全做出更大的贡献。

参考文献:

[1] 于立身. 飞行空间定向障碍和防止其飞行事故的医学对策[J]. 空军医学杂志, 2011, 27(2): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2011.02.001.
YU L S. Flying spatial disorientation and medical countermeasures to prevent its flight accidents[J]. Med J Air Force, 2011, 27(2): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2011.02.001.

[2] MEEKS R K, ANDERSON J, BELL P M. Physiology of spatial orientation [M]. Treasure Island: StatPearls Publishing. 2023.

[3] 李鸣皋, 蒲放. 飞行空间定向障碍[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LI M G, PU F. Disorders of spatial orientation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.

[4] POISSON R J, MILLER M E. Spatial disorientation mishap trends in the U.S. Air force 1993-2013[J]. Aviat Space Environ Med, 2014, 85(9): 919-924. DOI: 10.3357/ASEM.3971.2014.

[5] 赵赶超.直升机运行风险因素耦合性分析[J].安全与环境学报,2022,22(4):1783-1789. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1003.
ZHAO G C. Coupling analysis of risk factors in helicopter operation[J]. J Safety Environ, 2022,22(4):1783-1789. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1003.

[6] 刘乾金.陆军航空医学研究进展与热点问题[J]. 中华航空航天医学杂志,2017,28(2): 145-145. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2017.02.1113.
LIU Q J. Advances and Current Topics in Army Aviation Medical Research[J]. Chin J Aerosp Med, 2017,28(2): 145-145. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2017.02.1113.

[7] POWELL-DUNFORD N, BUSHBY A, LELAND R A. Spatial disorientation training in the rotor wing flight simulator [J]. Aerosp Med Hum Perform, 2016, 87(10): 890-893. DOI: 10.3357/AMHP.4638.2016.

[8] BUSHBY A J R, GAYDOS S J. Spatial disorientation scenarios for the AW159 helicopter within a synthetic training environment[J]. Aerosp Med Hum Perform, 2023, 94(5): 377-383. DOI: 10.3357/amhp.6172.2023.

[9] 张建国. 直升机飞行的航空医学问题及航空卫生保障[J]. 航空军医, 2000, 28(6): 246-248.
ZHANG J G. The aeromedical concerns and aviation health support for helicopter flight. [J]. Flight Surg, 2000, 28(6): 246-248.

[10] 肖海峰. 陆军航空兵航空医学需求与发展思考[J]. 空军医学杂志, 2012, 28(1): 59-60. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2012.01.030.
XIAO H F. Army aviation aviation medical needs and development thinking[J]. Med J Air Force, 2012, 28(1): 59-60. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2012.01.030.

[11] 罗新民, 余杰, 李刚, 等. 陆航直升机飞行员飞行错觉特点[J]. 航空军医, 2004, 32(6): 254-255.
LUO X M, YU J, LI G, *et al*. Characteristics of spatial disorientation in army aviation helicopter pilots[J]. Flight Surg,2004, 32(6):254-255.

[12] 侯刚, 王延明. 直-11 飞行员的错觉调查[J]. 中华航空航天医学杂志, 2003, 14(2): 119-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.021.
HOU G, WANG Y M. Investigation of flight illusion H-11 pilots[J]. Chin J Aerosp Med, 2003, 14(2): 119-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-6239.2003.02.021.

[13] 刘浩, 张佳丽, 李鸣皋. 舰载与陆基直升机飞行员健康影响因素调查分析[J]. 解放军医药杂志, 2014, 26(8): 4-7. DOI: 10.3969/j.issn.2095-140X.2014.08.002.
LIU H, ZHANG J L, LI M G. Investigation analysis of influential factors of health of seabased and landbased helicopter pilots[J]. Med Pharm J Chin PLA, 2014, 26(8): 4-7. DOI: 10.3969/j.issn.2095-140X.2014.08.002.

[14] 黄炜, 吕汽兵, 季思菊. 空军飞行人员飞行错觉发生率比较分析[J]. 中国疗养医学, 2010, 19(5): 470-471. DOI: 10.3969/j.issn.1005-619X.2010.05.068.
HUANG W, LYU Q B, JI S J. Comparison of incidence rate of flight illusion of military flight crew[J]. Chin J Conval Med, 2010, 19(5): 470-471. DOI: 10.3969/j.issn.1005-619X.2010.05.068.

[15] VIMAL V P, PANIC A S, LACKNER J R, *et al*. Vibrotactile feedback as a countermeasure for spatial disorientation [J]. Front Physiol, 2023, 14: 1249962. DOI: 10.3389/fphys.2023.1249962.

[16] FUDALI-CZYZA, LEWKOWICZ R, FRANCUZ P, *et al*. An attentive blank stare under simulator-induced spatial disorientation events[J]. Hum Factors, 2022: 001872082210938. DOI: 10.1177/00187208221093827.

[17] VAN ERP J B F, GROEN E L, BOS J E, *et al*. A tactile cockpit instrument supports the control of self-motion during spatial disorientation[J]. Hum Factors, 2006, 48(2): 219-228. DOI: 10.1518/001872006777724435.

[18] LEWKOWICZ R, BIERNACKI M P. A survey of spatial disorientation incidence in Polish military pilots[J]. Int J Occup Med Environ Health, 2020, 33(6): 791-810. DOI: 10.13075/ijomeh.1896.01621.

[19] 畅通, 王瀚, 张敏, 等. 飞行空间定向障碍发生机制研究进展与展望[J]. 中华航空航天医学杂志, 2022, 33(4): 249-252. DOI: 10.3760/cma.j.cn113854-20220613-00076.
CHANG T, WANG H, ZHANG M, *et al*. Advance and prospect of the occurrence mechanism of the spatial disorientation in flight[J]. Chin J Aerosp Med, 2022, 33(4): 249-252. DOI: 10.3760/cma.j.cn113854-20220613-00076.

[20] GRIEVES R M, SHINDER M E, ROSOW L K, *et al*. The neural correlates of spatial disorientation in head direction cells[J]. eNeuro, 2022, 9(6): ENEURO.0174-22.2022. DOI: 10.1523/ENEURO.0174-22.2022.

[21] HAO C R, FAN X Y, DONG C N, *et al*. A classification method for unrecognized spatial disorientation based on perceptual process[J]. IEEE Access, 2020, 8: 140654-140660. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3012821.

[22] HOUBEN M M J, MESKERS A J H, BOS J E, *et al*. The perception threshold of the vestibular Coriolis illusion[J]. J Vestib Res, 2022, 32(4): 317-324. DOI: 10.3233/ves-210073.

[23] ERGENOGLU T, DEMIRALP T, BAYRAKTAROGLU Z, *et al*. Alpha rhythm of the EEG modulates visual detection performance in humans[J]. Cogn Brain Res, 2004, 20(3): 376-383. DOI: 10.1016/j.cogbrainres.2004.03.009.

[24] BUSCH N A, DUBOIS J, VANRULLEN R. The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception[J]. J Neurosci, 2009, 29(24): 7869-7876. DOI: 10.1523/jneurosci.0113-09.2009.

[25] FEINSTEIN J S, STEIN M B, CASTILLO G N, *et al*. From sensory processes to conscious perception[J]. Conscious Cogn, 2004, 13(2): 323-335. DOI: 10.1016/j.concog.2003.10.004.

[26] HAO C R, CHENG L, GUO L S, *et al*. Detection of unrecognized spatial disorientation: a theoretical perspective[J]. Technol Health Care, 2022, 30(S1): 469-480. DOI: 10.3233/THC-THC228043.

[27] YOHAN, KANG. Crosschecking through verbal reports under spatial disorientation scenarios: evidence from eye tracking metrics[J]. Int J Ind Ergon, 2021, 86: 103202. DOI: 10.1016/j.ergon.2021.103202.

(**收稿**:2023-07-12;**修回**:2023-10-08)

(编辑 栾 嘉)