

文章编号:1008-1534(2018)01-0043-06

空间定向障碍评价方法研究

郝晨汝,池子强,赵瑞斌,张敬晶,吴艳茹,张 晶,孟燕军

(河北医科大学医学影像学院,河北石家庄 050011)

摘要:空间定向障碍(SD)是指飞行员在三维空间飞行中对飞行姿态、位置和运动状况发生的错误判断。SD严重影响着飞行安全,虽然SD被很多学者关注,但针对不同类型SD的研究不多,尤其缺乏不可认知型SD的相关研究。为解决上述问题,在详细分析国内外已有研究成果的基础上,结合SD的产生原因和认知学分类,将现有SD的评价方法归纳总结,概述了主观评价法、生理心理参数专项检测法、行为学评价法和认知学评价法的优缺点及其适用的SD类型。以4种评价方法为基础,提出一种集主观评价和行为学足底压力中心评价为一体的、针对认知阈下的不可认知型SD评价方法。所提出的新方法不仅可以从主观上区分认知类型,还将客观行为学数据作为是否出现SD的评价依据,适用于不可认知型SD,为其鉴定及后续的对抗训练提供了重要依据。

关键词:航空航天医学;空间定向障碍;评价方法;认知;压力中心

中图分类号:R852 文献标志码:A doi: 10.7535/hbgykj.2018yx01008

Research of spatial disorientation evaluation method

HAO Chenru, CHI Ziqiang, ZHAO Ruibin, ZHANG Jingjing, WU Yanru, ZHANG Jing, MENG Yanjun

(School of Medical Imaging, Hebei Medical University, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: Spatial disorientation refers to an erroneous perception of position, altitude, motion related to the plane of the earth's surface or a false perception relative to gravitational vertical and with respect to the aviator's own or other aircraft. Although spatial disorientation which has a strong impact on air safety, gets a lot attention by many scholars, little studies pay attention to different types of spatial disorientation, especially unrecognized spatial disorientation. In order to solve the above problems, the reason and classification of spatial disorientation are generalized based on detailed analysis of the existing researches. And the evaluation methods of SD are summarized by subjective assessment, psychophysiological assessment, behavioural assessment and cognitive assessment. Based on the 4 existing evaluation methods, a new evaluation method is put forward to measure unrecognized SD. The subjective reports and the canter data of foot pressure are combined together in the new method. The proposed new method can not only distinguish the type of spatial disorientation subjectively, but also be used as the judgement basis for objectives behavioristics data to evaluate the SD existence. The new optimization design method will provide important basis for the test of unrecognized SD and countermeasure training.

Keywords: aerospace medicine; spatial disorientation; evaluation method; cognition; COP

收稿日期:2017-11-11;修回日期:2017-12-28;责任编辑:李 穆

基金项目:河北省教育厅高校科学与技术研究项目(QN2015013)

第一作者简介:郝晨汝(1988—),女,河北石家庄人,硕士,主要从事空间定向与功能磁共振成像方面的教学与研究。

通信作者:池子强。E-mail:17792738@qq.com

郝晨汝,池子强,赵瑞斌,等.空间定向障碍评价方法研究[J].河北工业科技,2018,35(1):43-48.

HAO Chenru, CHI Ziqiang, ZHAO Ruibin, et al. Research of spatial disorientation evaluation method[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(1): 43-48.

空间定向障碍 (spatial disorientation, SD) 是指飞行人员在飞行中对飞行姿态、位置和运动状况发生的错误判断。GILLINGHAM^[1] 将 SD 定义为对相对于地平面的姿势、高度以及运动情况的错误认知 (狭义定义)。之后 BENSON^[2] 又在这基础上加上了飞行员本身对重力垂线的错误认知以及相对于其他飞机对本身飞行姿态的误判 (广义定义)。

由 SD 引发的飞行事故很多, 近 10 年间所发生的飞行事故中有 54% 与 SD 有关^[3], 平均每百万飞行小时出现 1 次 A 类事故^[4]。随着飞机速度的不断提升, 由 SD 引发的事故比率也不断提升, 而在这些由 SD 引发的事故当中, 致命事故又占绝大比例。各国虽然都开展了 SD 机理研究以及对抗 SD 的训练并取得了一些进展^[5-6], 但仍然存在一些问题和不足。

本文通过对现有 SD 评价方法的总结, 提出一种评价不可认知型 SD 的方法, 帮助飞行员了解 SD 发生时的飞行条件和自身感觉, 从而使飞行员正确对待 SD, 对减少飞行事故是具有极大意义的。

1 空间定向障碍 (SD)

1.1 引发 SD 的原因

空间定向障碍从本质上来讲是由于飞行员在飞行时所处的三维空间运动中心理和生理上的不足导致的^[2]。正常情况下, 人类对于方位以及自身状态的信息收集主要通过视觉系统、前庭系统和本体感觉系统来完成^[7], 大脑需要对这些系统所提供的各种信息进行正确的综合分析后, 人类才能正确的认知。视觉、前庭、本体任何一个系统提供了不恰当信息后, 都会影响定向的能力, 也正是由于这些系统所提供的信息发生了冲突^[8], 进而导致了 SD 的发生^[9]。空间定向障碍发生时症状很多, 从轻微的烦躁不安到眩晕再到行为能力失常都属于 SD。

1.2 SD 的分类

近年来国外的研究学者综合分析 SD 产生原因以及大脑认知过程后, 对引发事故的 SD 按认知过程进行了分类, 其中认知阈下的一类 SD 成为最近的研究热点, 但中国对 SD 的细分及研究很少。SD 按认知水平可分为以下 3 种^[10-12]。

1) 不可认知型 (Unrecognized) SD, 指飞行员已经对飞行姿态、位置和运动状况产生了错误判断, 但自己并不认为飞行中存在问题。目前一般认为这一类 SD 的发生原因是外界刺激信号不足使得飞行员

没有正确认知而导致的, 因此, 不可认知型 SD 也通常被称之为方向迷失。即飞行员未意识到发生了空间定向障碍。

2) 可认知型 (Recognized) SD, 即飞行员对飞行姿态、位置和运动状况产生了错误判断, 并且自己也意识到了这些问题, 同时体验到与实际空间状态或仪表视觉空间状态之间的矛盾冲突; 现有的对抗训练方法大多是针对这类 SD 的, 并且已经取得了一些进展。

3) 不可对抗型 (Incogitative) SD, 是指飞行员对飞行姿态、位置和运动状况产生了错误判断, 自己也意识到了这些错误, 但是心智失能, 无法正确操控飞机。这类 SD 一旦发生其后果极其严重。

近年来的研究更倾向于认为这 3 类 SD 是一个连续的过程, 由于大脑的认知程度不同, 而被划分为 3 类^[9]。其中由不可认知型 SD 导致的飞行事故占所有 SD 引发事故的 80%^[3]。但目前对不可认知型 SD 的研究很少, 其主要原因在于评价方法不完善。

2 SD 评价方法的研究现状

国内外学者都开展了 SD 评价方法的研究, 包括: 主观问卷调查、生理心理情况的专项检测、行为学评价方法、认知学分析方法。其中主观问卷调查是最早应用于 SD 评价的方法, 虽然在实际应用中表现出了明显的优越性, 但同时由于其主观性较大, 在一定程度上缺失客观数据。生理心理情况的专项检测比问卷调查更为客观, 既可以从身体基础参数的变化了解飞行员的身体状况, 又可以从心理学角度分析飞行中心理准备情况。行为学评价和认知学评价是近些年兴起的客观评价方法, 这两种评价手段分别从身体姿态平衡和大脑电信号变化上判别 SD 的发生与否, 其结果客观, 因而越来越多的研究者都在采用上述方法。

2.1 问卷调查

问卷调查是进行 SD 的鉴定和对抗能力评测的重要手段, 同时也是确定 SD 性质的重要依据。各国都制定了比较详细的主观评价量表, 内容涉及 SD 发生的经过、当时所处的环境、所采用的飞行动作、身体状况、实际飞行状态和自主感觉等^[13-14]。

主观问卷调查从飞行员在飞行中的实际状态、自身感受、是否出现 SD、是否出现不适症状等方面进行综合评价, 发现飞行员在某种飞行环境中出现 SD 或出现错误的飞行操作时, 可以针对飞行员制定个性化的模拟飞行训练。从问卷调查的结果可以很直观地了解飞行员的状态, 尤其在对抗训练中飞行

员一旦出现SD感受,可以及时提醒飞行员正视并调整自身状态。因此这种评价方法最早应用于SD的研究,主观评价量表在一定程度上为研究人员提供了SD发生时的场景,飞行员自身感受以及飞行员所采取的对抗措施等信息,但这种评价方法仍然存在一定的问题。

问卷调查方法的主观成分很大,随飞行员的不同而变化,且很难得到一致的飞行环境及当下SD感受。该方法前提是受试者明确自己已经发生SD,对于主观没有SD发生的调查结果,统一认定为无SD发生。但依据SD分类,不可认知型SD发生时,无主观SD感受,不能从问卷调查评价方法中认定不可认知型SD发生。故该方法所针对的SD类型属于受试者已经认知到的可认知型SD和不可对抗型SD。但对于受试者无法认知的不可认知型SD,问卷调查不能给出有效评价。

2.2 生理心理情况的专项检测

发生严重空间飞行障碍时,常常伴随有生理心理的病理学因素,因此根据空间定向障碍知觉形态、性质,对相关系统的功能进行专项检查,有助于SD的鉴定。

目前,心电信号(ECG)检测^[15]、胃电信号(EGG)检测^[16]、生理心理储备情况^[17-18]等,都已经用于SD的评测。其中生理心理储备情况由心电、眨眼、呼吸等生理参数和注意力分配、情绪稳定性等心理指标结合评判。对于生理参数,着重从心电图、眨眼频率和呼吸频率及通气量分析飞行员的生理紧张程度^[15,19],心理指标关注于注意力分配、观察能力、定向能力、判断能力、修正能力^[20]等方面。研究发现,出现SD时,飞行员心理生理储备情况比未发生SD有显著性下降。

生理心理情况的专项检测是一种较为客观的评价方法,SD的出现伴随头晕、炫目、恶心、呕吐、面色苍白甚至无法控制身体等症状,同时在生理参数中体现出心跳加速、眨眼频率升高、呼吸频次加大等异常现象,心理储备中出现注意力不集中、观察能力下降、判断能力变弱、修正能力迟缓等心理指标下降。这些客观参数的变化可以及时评判飞行员是否出现SD,相对于主观问卷调查更加客观,不受飞行员主观因素影响。目前,生理心理情况的专项检测手段适用范围依旧是受试者认知到SD并出现明显不适症状后,但从认知学角度分析大脑接受SD刺激到认知SD,出现明显的SD症状是一个过程,出现SD症状之前的认知阶段也可能出现生理及心理信号的变化,故该评价方法理论上可以更早、更及时、更客观地观测到SD的出现。

2.3 行为学评价方法

模拟飞行条件下的行为学评价是飞行员对抗SD能力评测的重要手段,包括对模拟飞行错觉的认知准确性、对抗操作的正确性及效率、飞行错觉下的行为模式特征等,所采用的设备包括特殊设计的行为运动分析设备^[21]以及眼震仪^[22-23]等。运动分析设备的应用是近年来国外开始采用的方法。

从2002年至今,多项关于视觉诱发相对运动错觉中姿态偏移的研究中^[24-25],使用测力台采集受试者实验过程中足底压力中心(the center of foot pressure,COP)的变化,得出受试者主观发生相对运动错觉比主观没有发生相对运动错觉时,COP的偏移量更大。

2015年的一项研究中,采用了视频运动分析设备,来分析实验中受试者头部和躯干的偏移情况,也得出了相对运动错觉产生时身体姿态平衡会受到影响^[26]的结论。

由上述研究表明躯体偏移量的大小与SD的发生与否密切相关。从人体姿态平衡分析定向功能是否正常的方法也常用于医疗领域,其数据客观且不受主观因素影响,躯体偏移量的大小还能体现定向能力的强弱,人体出现定向障碍时头部或躯干首先出现姿态不自主偏移,其结果就导致了人体重心位置的偏移,这种偏移包含2种情况:受试者自己没有认知到躯体偏移和认知到躯体偏移。对于没有认知到躯体偏移的情况,属于不可认知型SD范畴;对于认知到躯体偏移的情况属于可认知型SD或不可对抗型SD范畴。因此,结合运动分析设备的行为学评价方法既可以应用于不可认知型SD,又适用于可认知型SD。

2.4 认知学分析方法

认知学分析的方法可以较为客观地研究SD,认知学分析的方法通常采用脑电技术,通过分析大脑对事物感知、认知过程中大脑皮层电信号的变化情况,明确SD认知的过程及程度。国内外的一些研究者已经将脑电信号分析技术应用于SD的产生机制及其类型的识别,尤其是对视觉错觉所诱发的SD情况。

2015年的一项研究通过对脑电信号分析,对2种不同的SD(流场错觉和旋转错觉)进行了初步的研究和分析表明, θ 波的出现频率整体减小,标志着SD的发生^[27]。

HORNG等^[28]利用脑电信号对飞行员在发生SD(科里奥利错觉)时认知能力进行了分析,发现大脑的视觉相关脑区的信号会有一定的增强。

MICHEAL^[9]使用脑电技术采集11名飞行员

在模拟飞行中诱发 SD 时的脑电信号分析后,得出 F3 导联上的 β 波有显著性的改变可以作为有无 SD 发生的依据。

脑电信号分析方法的优越性很明显,既可以对主观认知到的 SD 做出评价,明确可认知型 SD 发生时的脑电特征信号,又可以通过检测大脑认知过程的电信号变化为不可认知型 SD 的评价提供参考,但这种方法的使用环境有限。由于脑电信号很微弱,易受肌电、眼电信号的影响,脑电信号采集中必须保证躯体无相对运动、注意力集中、尽量避免眨眼等,因此这种评价方式对 SD 的诱发条件要求很高,现有的研究也都是针对视错觉诱发 SD,并且需要大量重复实验才能得到理想的统计学结果。因此,认知学分析法虽适用于不可认知型 SD 的评价,但因其对实验条件要求较高,不适用于运动型实验的分析。

2.5 评价方法分析

综合上述分析,4 种评价方法各有其优势,适用类型不同。

主观问卷调查评价方法可以全方面了解飞行员的飞行状态、飞行体验以及自身是否发生 SD,有助于综合评价飞行员出现 SD 的频次和飞行场景,但该方法的主观成分很大,随飞行员的不同而变化,因其前提是飞行员主观有 SD 发生,故这类评价方法适用于认知阈上的可认知型 SD 和不可对抗型 SD。

生理心理情况的专项检测相对于主观问卷调查的方法更为客观,SD 出现后机体表现为异常生理现象和心理储备能力下降。这些客观参数的变化可以及时评判飞行员是否出现 SD,不受飞行员主观因素影响。这类评价方法的现有研究关注于可认知型 SD 和不可对抗型 SD,其前提是受试者认知到 SD 并出现明显不适症状。但从认知学角度分析大脑接受 SD 刺激到认知 SD,直到出现明显症状是一个连续的过程。出现 SD 症状之前的认知阶段也可能会伴随生理及心理信号的变化,故该评价方法理论上可以更早、更及时、更客观地评价 SD。

行为学评价方法是基于躯体姿态平衡检测的客观评价方法,人体出现定向障碍时伴随着躯体位置的偏移,在大脑未认知到 SD 前和认知到 SD 后都会出现躯体偏移。因此,对于没有认知到 SD,但躯体出现偏移的情况属于不可认知型 SD 范畴;对于认知到躯体偏移的情况属于可认知型 SD 或不可对抗型 SD 范畴。故,结合运动分析设备的行为学评价方法既可以应用于不可认知型 SD,又适用于可认知型 SD。

认知学评价是基于大脑电信号变化的评价手

段,大脑电信号变化是由大脑皮层不同区域的神经元兴奋或抑制导致的,反映出大脑对外界事物的感知和认知过程,因此这种评价方法有可能从认知过程中区分出不同类型的 SD。但脑电信号的采集易受周围环境因素影响,对实验条件要求较高。

对于已有研究的总结可见,虽然已有文献大多针对主观可以认知到的 SD 类型,但现有的评价方法较为单一,对不可认知型 SD 的研究很少,其评价方法更是鲜有研究。随着行为学和认知学评价手段的持续发展,学者将更加重视对认知阈下 SD 的研究,因此不可认知型 SD 将会被更多的学者关注,成为 SD 的研究热点。

3 不可认知型 SD 评价方法

目前对 SD 的研究很多,但现有的评价方法较为单一,且大多研究认知阈上的可认知型 SD,没有针对不可认知型 SD 的评价方法,无法从根本上解决由不可认知型 SD 引发的飞行事故。作者采用主观评价和行为学评价结合来实现不可认知型 SD 的评价,其中主观评价的方法从认知学领域可以区分出已经认知到的这一类 SD,主观无 SD 的情况还可以细分为确实没有发生 SD、发生 SD 但未认知(不可认知型 SD)。对于这 2 种情况,可以由 COP 的偏移与否来证实。在 SD 诱发中,确实没有发生 SD 的情况,COP 理论上不会有统计学偏移;对于发生 SD 但未认知的情况,在有一定样本量的统计学规律中,COP 理论上会有统计学偏移。

笔者综合主观评价和行为学评价方法,提出采用主观问卷调查结合躯体压力中心(COP)偏移程度(行为学评价)来判断不可认知型 SD 的发生与否。方法如下:SD 诱发中,采集 COP 数据,经统计学分析会出现 COP 的偏移情况同正常 COP 有显著性差异(有)及无显著性差异(无);是否发生 SD 的主观回答会出现有 SD 发生(Y)及无 SD 发生(N),如表 1 所示,共有如下 4 种情况。

1)受试者主观有 SD(Y),COP 有显著性差异(有),发生可认知型 SD。受试者出现 SD,主观明确自身对方位的感知有偏差,无法调节躯体的较大偏移度。

2)受试者主观有 SD(Y),COP 无显著性差异(无),发生可认知型 SD。受试者出现 SD,主观明确自身对方位的感知有偏差,可以通过视觉信息的摄取调节躯体偏移情况。

3)受试者主观无 SD(N),COP 无显著性差异(有),发生不可认知型 SD。受试者出现了较大躯体

偏移度,但自身没有认知到。

4)受试者主观无SD(N),COP无显著性差异(无),没有发生SD。

表1 不可认知型SD的判定方法

Tab.1 Determination of unrecognized SD

编号	主观有无SD	COP有无显著性差异	结果
1	Y	有	可认知型SD
2	Y	无	可认知型SD
3	N	有	不可认知型SD
4	N	无	未发生SD

由此,通过主观判断及客观判断相结合,可以明确不可认知型SD的发生与否。

在综合前人工作的基础上,笔者提出的使用主观问卷调查结合躯体压力中心偏移程度(行为学评价)作为认知阈下的不可认知型SD的判断方法,即有主观评判,又有客观标准,可以为认知型SD的评价提供理论依据。作者拟通过后续的SD诱发实验和统计学分析,验证不可认知型SD评价方法的可行性。

4 结 语

SD严重影响着飞行安全,虽然SD已被很多学者关注并研究,但针对不同类型SD的研究不多,尤其缺乏不可认知型SD的相关研究,其原因在于不可认知型SD属于认知阈下,现有的评价方法较为单一,且适合于认知阈上的可认知型SD,没有针对不可认知型SD的评价方法,无法从根本上解决由不可认知型SD引发的飞行事故。

为解决上述问题,在详细分析国内外已有研究成果的基础上,结合主观评价法、生理心理参数专项检测法、行为学评价法和认知学评价法的优缺点及其适用的空间定向障碍类型,提出了一种集主观评价和行为学足底压力中心评价为一体的、针对认知阈下的不可认知型空间定向障碍评价方法。这种基于主观评价和行为学客观评价的方法,既可以了解飞行员是否认知到SD,又可以对未认知到SD的这类行为学数据做进一步分析,以明确是否有不可认知型SD发生。所提出的新方法不仅可以从主观上区分认知类型,还将客观行为学数据作为评价是否出现空间定向障碍的依据。

笔者拟通过模拟飞行中的相对运动错觉诱发SD实验来验证这种评价方法的可行性,用于帮助各类飞机驾驶员尽早了解不可认知型SD发生时的飞行条件和自身感觉,从而正确认知SD。为鉴定不可

认知型SD、筛选认知阈下的飞行员以及不可认知型SD的对抗训练提供客观的依据。

参考文献/References:

- [1] GILLINGHAM K. A primer of vestibular function, spatial disorientation, and motion sickness [J]. *Aeromedical Reviews*, 1966, 4(6):1-5.
- [2] BENSON A J. Spatial orientation-general aspects [C]// *Aviation Medicine Physiology and Human Factors*. London: Tir-Med Books, 1978: 405-433.
- [3] MILE S, JOHN E. Factors associated with delayed ejection in mishaps between 1993 and 2013[J]. *Aerospace Medicine & Human Performance*, 2015, 86(9):774-781.
- [4] POISSON J, MILLER E. Spatial disorientation mishap trends in the U.S. air force 1993—2013[J]. *Aviation Space & Environmental Medicine*, 2014, 85(9):911-924.
- [5] KLYDE D H, LAMPTON A K, SCHULZE P C. Development of spatial disorientation demonstration scenarios for commercial pilot training [C]// *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016:347-351.
- [6] POWELL N, BUSHBY A, LELAND R A. Spatial disorientation training in the rotor wing flight simulator[J]. *Aerospace Medicine & Human Performance*, 2016, 87(10):21-26.
- [7] BLES W, VAN H, KOTAKA S, et al. Some modelling aspects of nystagmus due to somatosensory-visual-vestibular interactions in stepping around[J]. *Vestibular & Visual Control of Posture & Locomotion Equilibrium*, 2015, 23(5):38-42.
- [8] NEWMAN D G, BREAU A T S. An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents [R]. Canberra: Australian Transport Safety Bureau, 2007.
- [9] MICHEAL S. Electroneurophysiologic Diagnosis of Aircraft Pilot Spatial Disorientation[D]. Dayton: Wright State University, 2003.
- [10] NEUBAUER J C. Classifying spatial disorientation mishaps using different definitions[J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2000, 19(2): 28-34.
- [11] WILLEM B. Spatial disorientation training demonstration and avoidance [R]. Hague: TNO Defence, Security and Safety, 2008.
- [12] HEINLE T E, ERCOLINE W R. Spatial disorientation: Causes, consequences and countermeasures for the USAF [C]// *RTO HFM Symposium*. La Coruna: RTO-MP-086, 2002: 15-17.
- [13] KALLUS K W, TROPPER K. Evaluation of a spatial disorientation simulator training for jet pilots[J]. *International Journal of Applied Aviation Studies*, 2004, 4(1): 45-55.
- [14] BAIJAL R, JHA V N, SINHA A, et al. Simulator based spatial disorientation training in the Indian Air Force[J]. *Indian Journal of Aerospace Medicine*, 2006, 50(2): 1-6.
- [15] CARVIL P, BAPTISTA R, RUSSOMANO T. The human body in a microgravity environment: Long term adaptations and countermeasures[J]. *Aviation in Focus-Journal of Aero-*

- nautical Sciences, 2013, 4(1): 10-22.
- [16] 徐先荣, 徐华, 李梅, 等. 改装体检直升机飞行员前庭自主神经反应观察[J]. 军医进修学院学报, 2011, 32(9): 894-895.
XU Xianrong, XU Hua, LI Mei, et al. Vestibular autonomic reactions in pilots of modified helicopters detected at physical examination[J]. Journal of Chinese PLA Postgraduate Medical School, 2011, 32(9): 894-895.
- [17] GRESTY M A, GOLDING J F, LE H, et al. Cognitive impairment by spatial disorientation[J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 2008, 79(2): 105-111.
- [18] 宗玉国, 吴岩印, 陈孔彬, 等. 飞行定向的空间认知特征研究[J]. 中华航空航天医学杂志, 2003, 14(2): 87-90.
ZONG Yuguo, WU Yanyin, CHEN Kongbin, et al. Examination of visuospatial cognitive characteristics of orientation in flight[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2003, 14(2): 87-90.
- [19] 张利民, 王奎年, 景百胜, 等. 模拟飞行条件下双重任务时飞行员心理生理参数的变化特点[J]. 中华航空航天医学杂志, 1995, 6(2): 84-87.
ZHANG Limin, WANG Kuinian, JING Baisheng, et al. Changes in psychophysiological indices in pilots during dual task flight on a simulator[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1995, 6(2): 84-87.
- [20] 张利民, 王奎年, 景百胜, 等. 飞行员心理生理储备的检测设备和评价方法[J]. 中华航空航天医学杂志, 1997, 8(3): 144-148.
ZHANG Limin, WANG Kuinian, JING Baisheng, et al. Test equipment and method for evaluating psychophysiological reserve of pilots[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1997, 8(3): 144-148.
- [21] JULIEN M, THIERRY P. Postural effects of vestibular manipulation depend on the physical activity status[J]. PloS One, 2016, 11(9): 21-24.
- [22] PREVIC F H, ERCOLINE W R, EVANS R H, et al. Simulator-induced spatial disorientation: effects of age, sleep deprivation, and type of conflict[J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 2007, 78(5): 470-477.
- [23] 谢溯江, 于立身, 贾宏博, 等. 不同强度的科里奥利加速度刺激对人体主观感觉及眼震的影响[J]. 中华航空航天医学杂志, 2001, 12(2): 77-80.
XIE Sujiang, YU Lishen, JIA Hongbo, et al. The influence of coriolis acceleration magnitude on human oculomotor and perceptual responses[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2001, 12(2): 77-80.
- [24] THURRELL A, BRONSTEIN A. Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses[J]. Experimental Brain Research, 2002, 147(4): 558-560.
- [25] FUSHIKI H, KOBAYASHI K, ASAI M, et al. Influence of visually induced self-motion on postural stability[J]. Acta Otolaryngologica, 2005, 125(1): 60-64.
- [26] KOZHINA G V, LEVIK Y S, SMETANIN B N. Influence of a light tactile contact on vertical posture maintenance under the conditions of destabilization of visual environment[J]. Human Physiology, 2015, 41(5): 539-547.
- [27] LI Y, CHEN Y, LYU X, et al. EEG functional network properties related to visually induced unrecognized spatial disorientation[J]. Bio-medical Materials and Engineering, 2015, 26(sup1): 115-124.
- [28] HORNG C T, LIU C C, KUO D I, et al. Changes in visual function during the coriolis illusion[J]. Aviation Space and Environmental Medicine, 2009, 80(4): 360-363.