

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2015.09.036

· 心理学 ·

模拟飞行任务负荷对人体姿势控制的影响*

程 珊 马 进 孙继成 杨忠良 胡文东[△]

(第四军医大学航空航天医学院医学装备教研室 陕西 西安 710032)

摘要 目的:研究在机体不同站立姿势下,模拟飞行任务负荷对姿势控制能力的影响,并初步总结其变化规律。**方法:**从某航空院校学员中随机抽取 30 名,要求其持续进行 4 小时的模拟飞行任务负荷,并同时在 0 h、1 h、2 h、3 h 与 4 h 时,测试 4 种不同站立姿势下的静态立位平衡参数,比较不同姿势晃动的变化规律。**结果:**随着模拟飞行任务的持续,4 种站立姿势下,被试的立位平衡能力发生了不同程度的变化,并呈现出一定的变化趋势。其中睁眼站立于脚垫上的姿势晃动程度变化最明显,并有重心前倾的趋势;另外,在暴露于飞行任务负荷下,机体视觉信息通道的关闭有可能激发视觉、前庭、本体与肌肉控制等系统对平衡维持能力的代偿性增强作用,而下肢本体感觉信息的阻碍又同时会损坏视觉、前庭、本体等系统对立位平衡能力的控制作用。**结论:**模拟飞行任务负荷下,机体的姿势晃动会呈现一定的变化规律,即身体可能会代偿性的向前倾斜,来维持身体的立位平衡状态。同时,视觉通道与下肢本体感觉通道对任务负荷条件下立位平衡功能的代偿能力发挥不同的作用。这种变化规律的初步阐述对我们下一步的立位平衡与飞行疲劳评估的研究打下一定的理论基础。

关键词:模拟飞行;姿势;立位平衡;代偿机制;疲劳评估

中图分类号:R857.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2015)09-1735-05

The Effect of Simulated Flight Tasks on Postural Control*

CHENG Shan, MA Jin, SUN Ji-cheng, YANG Zhong-liang, HU Wen-dong[△]

(Department of Medical Equipment, School of Aerospace Medicine, the Fourth Military Medical University,
Xi'an, Shaanxi, 710032, China)

ABSTRACT Objective: To study the changing traits of body postural control and its compensatory mechanism due to simulated flight tasks. **Methods:** 30 volunteers who were selected randomly from X aviation college were asked to perform about 4 hours simulated combined flight tasks consecutively. And then their balance function was tested at 0 h, 1 h, 2 h, 3 h and 4 h during the period. And then, the different changing traits of the four postures were analyzed. **Results:** With the simulated flight tasks going on, there were the different changing characteristics among the four standing postures, and postural control of the volunteers who stand on the pad with eyes open (PC) was the most instable. Besides, when the visual information was unavailable, the function of the other subsystems like vestibular organs and proprioceptive sense of lower extremity on postural control might get enhanced compensatorily. While the proprioceptive sense of lower extremity was limited, the other subsystems' function was weak to maintain standing balance. **Conclusion:** Under the tasks load, body would regain standing balancing state by body's leaning forward. As far as the compensatory mechanism of flight tasks load, the visual channel and proprioceptive sense of lower extremity were different. These results would lay the foundation to construct assessing model for flight fatigue with standing balance function.

Key words: Simulated flight; Postures; Standing balance; Compensatory mechanism; Fatigue assessment

Chinese Library Classification (CLC): R857.1 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2015)09-1735-05

前言

飞行活动是一种高强度的任务负荷,飞行人员不仅脑力上承受巨大压力,体力上也消耗很大。尤其,随着我军战机动性能的不断提升,飞行环境复杂程度的不断加大,巨大任务负荷所造成的飞行人员疲劳被认为是航空事故的重要原因之一^[1,2],

此问题也就成为了航空医学研究的重要课题之一。而国内外学者对疲劳的定义、发生机制及评估方法并没有统一的认识。一些主观疲劳的评定方法易受个人动机、自身经历等因素的影响,并不能客观准确地反映疲劳人员的生理心理状态^[3]。而大家比较认可的脑电图^[4]及其他一些客观的评定方法,如功能磁共振成像^[5]等,因使用不便、结果解释困难等原因在基层部队并不

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81202178)

作者简介:程珊(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向:生理心理训练与评估,电话:15991644602, E-mail:chengshan-2007@163.com

△ 通讯作者:胡文东, E-mail: doatea@fmmu.edu.cn

(收稿日期:2014-08-27 接受日期:2014-09-15)

能被广泛推广应用。因此,对飞行人员疲劳的评估急需一种易于推广、方便快捷及比较客观的方法,而立位平衡功能就成为一种可能的手段^[6]。

健康人的姿势控制主要由视觉、下肢本体感觉及前庭反馈的信息等来维持的^[7]。人体立位平衡功能广泛应用于临床有关平衡功能疾病的诊断^[8]、康复与运动医学中^[9]。已有研究表明,人体在疲劳状态下,平衡功能会受到一定的损害^[10,11],身体稳定程度会降低。若被试在闭眼站立条件下,视觉信息对姿势控制的作用受限制,造成姿势稳定性受损程度大于睁眼站立条件下的损伤程度^[10,12,13];若被试闭眼条件下直接站立于测试平板上,身体稳定性要小于站立于海绵垫上的稳定程度^[8]。Morad, Y 等研究还发现,被试在疲劳状态下,闭眼站立条件时的平衡指标与斯坦福嗜睡量表得分(Stanford Sleepiness Score)显著相关^[14];Avni, N.等则证明了疲劳导致的平衡功能的变化与认知能力得分也有相关性^[5]。

本实验主要将立位平衡功能应用到飞行活动相关疲劳评估中,探索模拟飞行任务负荷下,人体不同立位姿势控制的变化规律,并初步探讨变化规律的机制,从而能够从不同的站立姿势中筛选出一种对飞行任务负荷较为敏感的立位姿势,为进一步研究立位平衡与飞行疲劳评估模型构建做铺垫。

1 对象与方法

1.1 研究对象

研究对象在某航空院校男性学员中取样,对被试的要求主要有:首先,所要选取的被试应该在近3个月没有出现骨折、肌肉损伤、前庭功能异常等影响立位平衡的疾病;其次,所选被试能够做到在测试前2天,按照学校作息制度就寝,不得服用任何影响中枢神经系统的药品或饮品,如咖啡、浓茶等;最后,欲参加的被试须答应签署《知情同意书》。研究选取30名符合条件的被试者,年龄(19.30 ± 0.79)周岁,身高(174.43 ± 4.72)cm,体重(64.77 ± 7.61)Kg,体重质量指数BMI(21.27 ± 2.09)Kg/m²。

1.2 实验工具

立位平衡测试仪可根据人体双足压力中心(Center of Pressure, COP)的变化来反映人体重心的晃动情况,最后可得出的姿势摇摆参数^[15]如,姿势晃动轨迹的总轨迹长(Whole Path Length, WPL)、有效值面积(Effective Value Area, EVA)、左右摇摆平均中心变位(Mean Displacement of COP on the Lateral Axis, Mx)、前后摇摆平均中心变位(Mean Displacement of COP on the Anterior-Posterior Axis, My)、及其左右方向上的标准差(Standard Deviation in the lateral direction, SDx)和前后方向上标准差SDy、双足前后部重力分布(Weight Distribution, WD)即左脚跟、左脚掌、右脚跟和右脚掌部的重力分布分别记为WD1, WD2, WD3 和 WD4 以及和双足重力(F1至F8)分布参数,以及傅里叶频率转换参数(F1至F8)。

在实验中,要求每名被试者双脚脚跟靠拢,脚尖平齐并分开约60度站立于测试平板上,双手自然下垂,并置于身体两侧,进行4种姿势的测试,即睁眼站立(Normal standing with eyes open, NO)、闭眼站立(Normal standing with eyes closed, NC)、睁眼站立于脚垫上(Standing on pad with eyes open, PO)

与闭眼站立于脚垫上(Standing on pad with eyes closed, PC),每种姿势测试32s。

1.3 模拟复合飞行任务的设置

飞行活动是一种复杂的、多任务的高负荷活动,需要持续监控任务、多重任务、准确控制和追踪任务、协作任务与飞行耐力等。任何一种单一的任务并不能全面、真实地模拟出飞行活动的任务负荷;因此,本实验应将飞行任务设置为复合任务,即包括 Sternberg 双任务、人机功能分配任务、团队协作任务与蹬力任务等四种基本飞行任务。

Sternberg 双任务主要模拟飞行活动中短时记忆与准确瞄准和控制任务等;人机功能分配任务主要模拟飞行活动中的多重任务与注意力分配任务,包括持续事件离散控制任务、持续追踪任务、突发任务等3个主任务与1个辅助任务;蹬力任务主要模拟飞行活动中,飞行人员在高性能战机动动作时需要配合抗荷动作才能有效降低高G负荷对人体的影响,而其中抗荷动作重要组成部分就是蹬力动作。在预实验中,经过被试的多次试验,我们将蹬力任务设置为10分钟进行6次,每次120Kg,持续35秒,停歇1分钟,再进行下一次;团体协作任务则是模拟多机编队飞行或共同执行任务时协同配合环节。根据飞行过程中,这些任务的重要性,在每小时的模拟飞行任务中,需要3名被试同时进行,并要求每一名被试者前30分钟先后不间断地完成 Sternberg 双任务、人机功能分配任务与蹬力任务,紧接着在最后的20分钟内进行3名被试的团体协作任务。

1.4 实施过程

本实验分多次实施,每次3名被试参加,时间安排在下午14:00至19:00之间。在每次实验正式开始前要求被试进行标准统一的练习,约1h。每次实验期间,要求每名被试持续进行4小时的模拟复合飞行任务。在每小时任务结束后,被试进行立位平衡功能的测试,测试的指标包括:WPL, EVA, Mx, My, SDx, SDy, WD1-4, 以及F1-8。在整个实验过程中,每名被试者分别在0h、1h、2h、3h与4h共接受了5次测试。另外,所有被试在实验期间不得随意进行交谈、说笑和饮食等。

1.5 统计分析

采用重复测量多变量方差分析比较不同时刻间的差异,站立姿势与时间的交互作用;另外,任务负荷中的不同时刻与0h的Post Hoc多重比较,采用LSD法。

2 结果

2.1 模拟飞行任务负荷对不同站立姿势控制的影响

2.1.1 任务负荷对身体重心晃动轨迹的影响 随着模拟复合飞行任务负荷的持续,不同站立条件下身体晃动的总轨迹长WPL并没有出现明显的改变,也就是说这几种条件下重心晃动的速率基本上是一样的,而重心晃动轨迹所围成的面积却是不一样的。这说明身体晃动的重心轨迹点分布密集程度发生了变化。如图1所示,有效面积EVA在四种姿势间,随着任务负荷的持续,变化趋势是不一样的,它们之间存在交互作用($P < 0.01$)。其中,在任务负荷前后变化显著的PO姿势下,晃动轨迹变得离散,面积增加了,而NC姿势则出现了相反的变化趋势,反而变得比较密集;但是,在同样闭眼条件下的PC姿势,虽然没有太明显的差异,但晃动轨迹有离散的趋势。

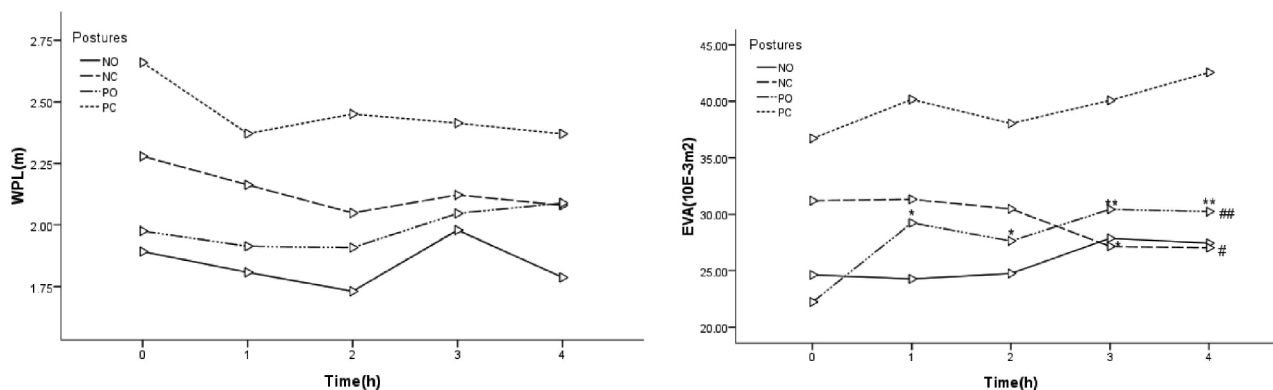


图1 随着任务负荷的持续,不同站立姿势身体重心晃动轨迹的变化

Fig. 1 With the task-load continuing, the changing of COP track for different postural control

注: * $P < 0.05$ 与 ** $P < 0.01$, 表示与 0h 比较; # $P < 0.05$ 与 ## $P < 0.01$, 表示线性变化趋势。

Note: * $P < 0.05$ or ** $P < 0.01$, as compared with 0h; # $P < 0.05$ or ## $P < 0.01$, linear estimation.

2.1.2 任务负荷对不同站立姿势下, 身体横向与纵向偏离程度的影响 在前后方向上的晃动 My 上, 四种站立姿势和不同程度的任务负荷之间存在交互作用 ($P < 0.05$), 同样在前后方向晃动变异程度 SDy 上, 两者也存在交互作用 ($P < 0.01$); 而在左右方向上的晃动偏离大小 Mx 与变异程度 SDx 并不存在交互左右。这就说明在不同站立姿态下, 左右方向上的晃动随着任务负荷的增加变化趋势是一样的, 而前后方向上的身体晃动变

化趋势则不一样。如图 2 所示, 在四种姿势中, 在前后方向上, 身体晃动以 PO 姿势在任务负荷前后变化差异较大, 并且线性变化趋势较明显, 对于其他姿势则没有太大的差异。总的来看, 在模拟复合飞行任务负荷下, 闭眼条件下的身体晃动程度是减弱的, 而睁眼条件下的姿势晃动程度反而增强。但是, 在相同的闭眼条件下, 正常站立条件下比站立于脚垫上身体晃动程度的降低更为明显。

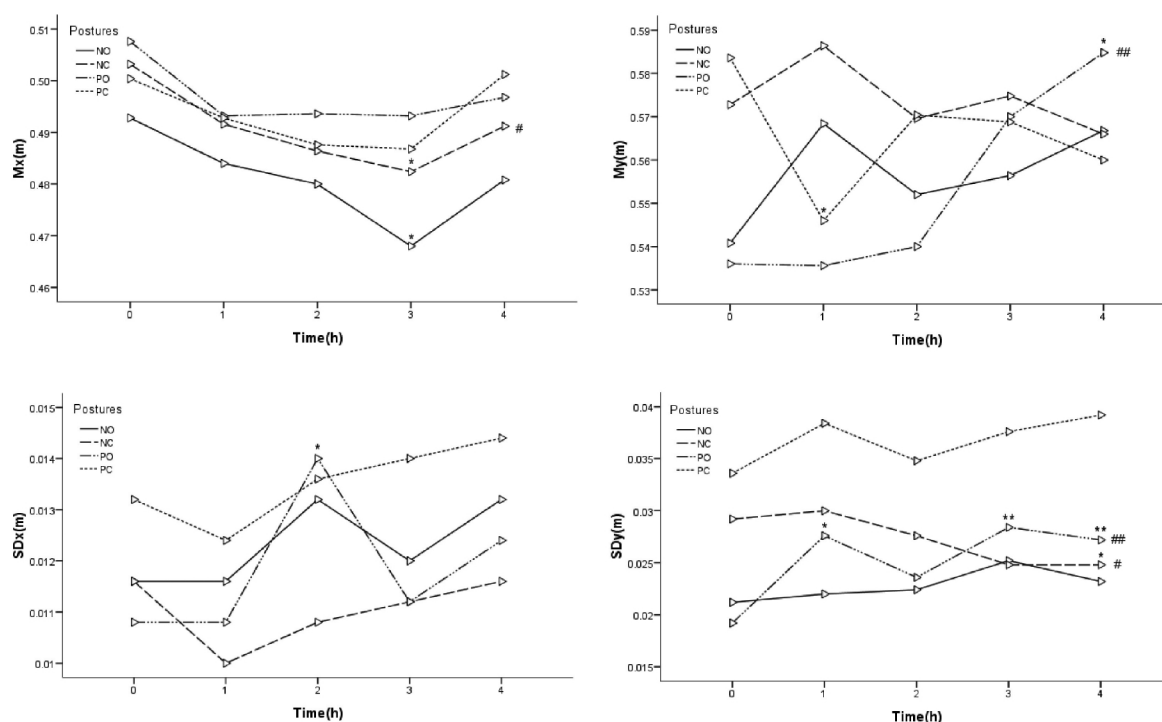


图2 随着任务负荷的继续,身体横向与纵向晃动程度的变化

Fig. 2 With the task-load continuing, body sway of COP at X and Y axis for different postural control

注: * $P < 0.05$ 与 ** $P < 0.01$, 表示与 0h 比较; # $P < 0.05$ 与 ## $P < 0.01$, 表示线性变化趋势。

Note: * $P < 0.05$ or ** $P < 0.01$, as compared with 0h; # $P < 0.05$ or ## $P < 0.01$, linear estimation.

2.1.3 模拟飞行负荷对双足重力分布的影响 根据结果显示, 在左脚脚跟上的重力分布 WD1 上, 四种站立姿势和不同程度的任务负荷之间存在交互作用 ($P < 0.01$), 同样在左脚脚掌部位的重力分布 WD2 上, 两者也存在交互作用 ($P < 0.01$)。这就说明

在不同站立姿态下, WD1 和 WD2 随着任务负荷的增加变化趋势不一样。如图 3 所示, 在四种姿势中, PO 姿势前后变化差异较大, 变化趋势较明显, 并且这种变化呈线性趋势。具体来讲, 左脚脚跟和右脚脚跟部的重力分布 WD1 和 WD3 随着任务负

荷时间的持续,都降低了,而左右脚掌部的重力分布 WD2 和 WD4 增加了。从双足重力分布总的结果来看,随着任务负荷时

间的持续,被试身体会向前倾斜来重获站立平衡。

2.2 任务负荷对不同频段晃动频率的影响

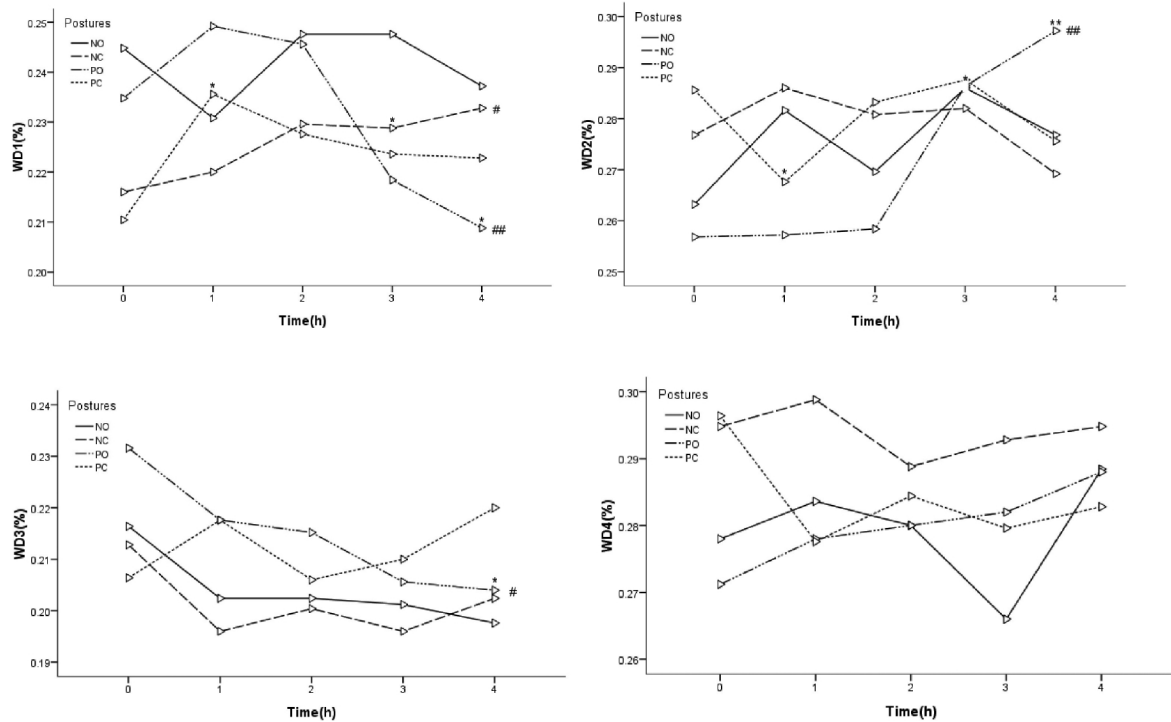


图3 随着任务负荷的持续,不同站立条件双足重力分布的变化

Fig. 3 With the task-load continuing, the changing weight distribution of both feet for different postural control

注: * $P < 0.05$ 与 ** $P < 0.01$, 表示与 0h 比较; # $P < 0.05$ 与 ## $P < 0.01$, 表示线性变化趋势。

Note: * $P < 0.05$ or ** $P < 0.01$, as compared with 0h; # $P < 0.05$ or ## $P < 0.01$, linear estimation.

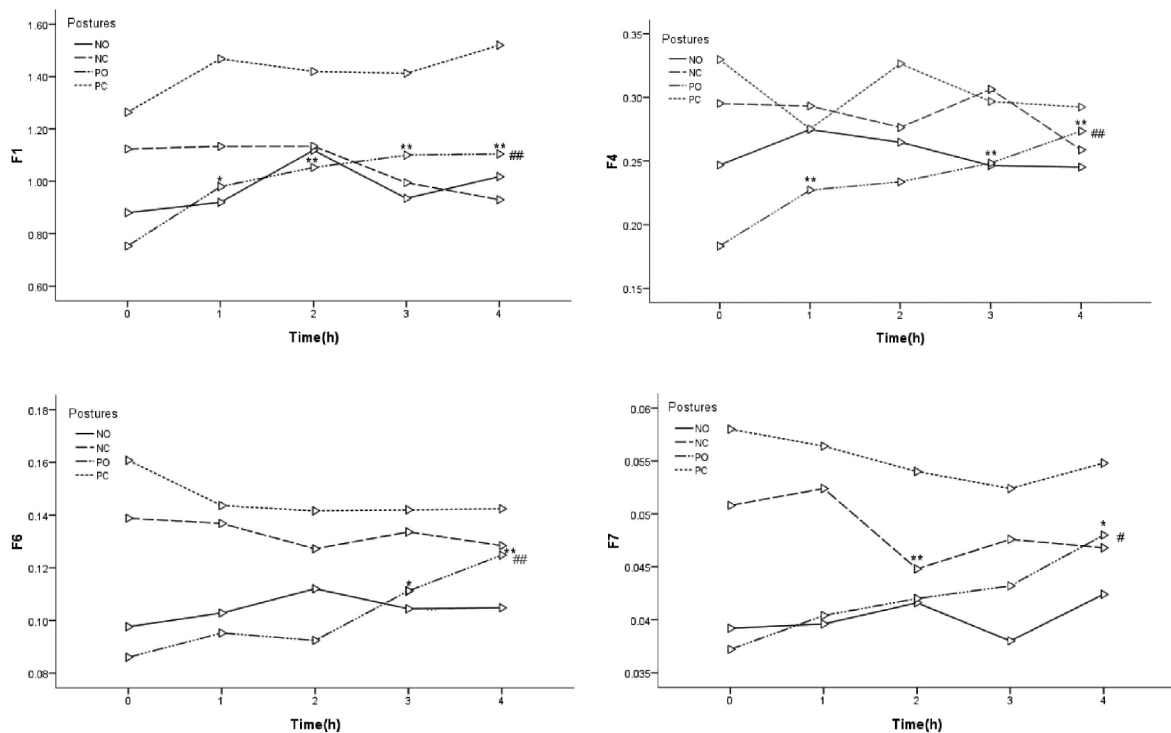


图4 随着任务负荷的持续,不同频段摇摆程度的变化

Fig. 4 With the task-load continuing, the changing body sway at different frequency for different postural control

注: * $P < 0.05$ 与 ** $P < 0.01$, 表示与 0h 比较; # $P < 0.05$ 与 ## $P < 0.01$, 表示线性变化趋势。

Note: * $P < 0.05$ or ** $P < 0.01$, as compared with 0h; # $P < 0.05$ or ## $P < 0.01$, linear estimation.

对视觉敏感的低频段^[14] F1 在 4 种站立条件下,随着任务负荷的持续,呈现出了不同的变化趋势($P<0.01$)。在四种姿势中,维持平衡的视觉作用任务负荷前后变化较为显著,且呈线性趋势(如图 4),而其它姿势虽然也呈现出来一定的变化趋势,但并不显著;同时,当被试持续处于此类认知操作任务负荷下时,闭眼条件下的 NC(或 PC)姿势视觉作用对平衡的维持作用似乎比睁眼条件下的 NO(或 PO)代偿性增强了,身体晃动程度似乎小了;然而,只有睁眼站立于脚垫上的 PO 姿势具有显著性的差异;在图 4 中,对前庭功能敏感的 F4、代表本体信息和肌肉控制作用的 F6 和中枢疲劳的 F7 同样呈现出来与视觉作用相似的变化趋势。

3 讨论

正常人的姿势控制主要有视觉、前庭与下肢本体感觉等系统维持^[14-16]。任何维持平衡的系统出现了异常,都会对人体正常的姿势控制产生不利的影响。前言中提到,24h 或更长时间的睡眠剥夺下,闭眼条件下的站立姿势的晃动程度要比睁眼条件下的程度要大一些,而在实验中我们则证实,阻断人体的视觉信息对平衡功能的提示作用后,闭眼条件下姿势控制的稳定性要高于相应的睁眼站立条件。这种相反的结果看似违背常理,但它是在不同条件下得到的。本实验中采用 4h 持续的模拟任务负荷,应该属于短期的急性疲劳的范畴,视觉通道的关闭可能激发其他维持平衡的系统如前庭、中枢等会发生相应的代偿性增强作用。另外,无论是视觉信息、前庭信息,还是本体深感觉信息,最终都要通过下肢效应器官来控制姿势。因此,在实验中我们通过站立在脚垫上来限制下肢肌肉系统对姿势控制的作用,人体立位姿势控制稳定性要比相应的直接站立于压力平板上差一些。

在实验中,在变化敏感的 PO 姿势下,人体的姿势控制变化呈现出一定的规律。实验结果表明,在模拟飞行疲劳下,人体会不自主地向前倾来维持静态立位平衡能力,从而导致重心向前脚掌移动,前后方向上的晃动程度增大,晃动面积增大。一方面,这可能和足部踝关节的特殊结构有关。在足踝部解剖学中,踝关节有胫骨和腓骨下端组成的关节窝与其容纳的足部距骨滑车构成的,由于此滑车关节面前宽后窄,足部背屈时,较宽的前部进入关节窝,关节较稳定,而足部趾屈时,较窄的后部进入关节窝,则关节易晃动,故人体在不利的条件下站立时,为了保持足部的稳定,身体会不由自主的前倾。另外,人体的平衡功能还和双足接地面积有关^[17]。在测试中,被试者双足脚跟靠拢,脚尖分开约 60 度站立,其接地面的横向距离要比纵向距离长,所以前后方向晃动就大一点。这些在不利条件下变化显著的指标,可以作为我们在下一步疲劳评估的敏感指标,这也提示我们,人体立位平衡功能在一些机体生理或病理状态评估中具有一定的应用价值。

综上所述,在本实验中,模拟持续飞行任务负荷对睁眼站立于脚垫上的 PO 姿势影响最大,并且机体通过身体前倾来维持平衡能力。另外,随着模拟任务负荷程度的增加,视觉信息通道的关闭有可能激发视觉、前庭、本体与肌肉控制与中枢控制对维持平衡作用的代偿性增强,而下肢本体感觉信息的阻碍又同时会损坏视觉、前庭、本体与中枢对平衡能力的控制作用。

参考文献(References)

- [1] 郝兵. 飞行疲劳的成因及应对措施[J]. 中国民用航空, 2011, (11): 44-46
Hao Bing. The cause of flight fatigue and the countermeasures [J]. Chinese Civil Aviation, 2011, (11): 44-46
- [2] Ma J, Yao Y J, Ma R M, et al. Effects of sleep deprivation on human postural control, subjective fatigue assessment and psychomotor performance[J]. J Int Med Res, 2009, 37(5): 1311-1320
- [3] Avni N, Avni I, Barenboim E, et al. Brief posturographic test as an indicator of fatigue [J]. Psychiatry Clin Neurosci, 2006, 60 (3): 340-346
- [4] Zhao C, Zhao M, Liu J, et al. Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator [J]. Accid Anal Prev, 2012, 45: 83-90
- [5] Dai X J, Min Y J, Gong H H, et al. Evaluation of the post-effect of acupuncture at Sanyinjiao (SP 6) under sleep deprivation by resting-state amplitude of low-frequency fluctuation: a fMRI study[J]. Chinese Acupuncture & Moxibustion, 2012, 32(1): 47-52
- [6] Morad Y, Azaria B, Avni I, et al. Posturography as an indicator of fatigue due to sleep deprivation [J]. Aviat Space Environ Med, 2007, 78(9): 859-863
- [7] Chow D H, Leung D S, Holmes A D. The effects of load carriage and bracing on the balance of schoolgirls with adolescent idiopathic scoliosis[J]. Eur Spine J, 2007, 16(9): 1351-1358
- [8] Ortuno-Cortes M A, Martin-Sanz E, Barona-De G R. Static posturography versus clinical tests in elderly people with vestibular pathology [J]. Acta Otorrinolaringol Esp, 2008, 59(7): 334-340
- [9] van Dieen J H, Luger T, van der Eb J. Effects of fatigue on trunk stability in elite gymnasts [J]. Eur J Appl Physiol, 2012, 112 (4): 1307-1313
- [10] Patel M, Gomez S, Berg S, et al. Effects of 24-h and 36-h sleep deprivation on human postural control and adaptation [J]. Exp Brain Res, 2008, 185(2): 165-173
- [11] Quarck G, Ventre J, Etard O, et al. Total sleep deprivation can increase vestibulo-ocular responses [J]. J Sleep Res, 2006, 15 (4): 369-375
- [12] 马如梦, 马进, 李津强. 24 h 睡眠剥夺前后平衡能力变化的初探[J]. 医学研究杂志, 2010, 39(10): 26-27
Ma Ru-meng, Ma Jin, Li Jin-qiang. Research of Changes in Balance Capability after 24 Sleep Deprivation [J]. J Med Res, 2010, 39(10): 26-27
- [13] Ma J, Yao Y J, Ma R M, et al. Effects of sleep deprivation on human postural control, subjective fatigue assessment and psychomotor performance[J]. J Int Med Res, 2009, 37(5): 1311-1320
- [14] Morad Y, Azaria B, Avni I, et al. Posturography as an indicator of fatigue due to sleep deprivation [J]. Aviat Space Environ Med, 2007, 78(9): 859-863
- [15] Ortuno-Cortes M A, Martin-Sanz E, Barona-De G R. Static posturography versus clinical tests in elderly people with vestibular pathology [J]. Acta Otorrinolaringol Esp, 2008, 59(7): 334-340
- [16] Patel M, Gomez S, Berg S, et al. Effects of 24-h and 36-h sleep deprivation on human postural control and adaptation [J]. Exp Brain Res, 2008, 185(2): 165-173
- [17] Rosker J, Markovic G, Sarabon N. Effects of vertical center of mass redistribution on body sway parameters during quiet standing[J]. Gait Posture, 2011, 33(3): 452-456