

典型返回再入体位对HUMOS假人动态响应影响研究

孙浩¹, 马红磊^{2*}, 刘炳坤², 王健全², 肖艳华², 祝郁², 费锦学², 邓金辉², 李富柱³, 孙靖超⁴

¹航天工程大学, 北京

²中国航天员科研训练中心, 北京

³江苏大学, 江苏 镇江

⁴Altair工程有限公司, 上海

Email: *mahlei@163.com

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月30日

摘要

为探索飞船返回再入加速度过载下人体姿态对乘员动力学响应的影响, 本文利用Pro-E和HyperWorks软件建立了仰姿和躺姿两种典型人体姿态的假人-座椅系统模型。模型中使用了HUMOS II (Human Model for Safety Version II)人体生物力学模型。根据实际离心试验数据对假人-座椅系统模型进行了标定和验证。论证并分析了在高加速度过载(峰值为6.4 g)条件下, 人体姿态对人体关键器官包括心脏、肺、膈肌、肝脏和腹部脏器过载响应的影响。仿真结果表明, 膈肌的位移和变形是影响人体对再入过载耐受力的最重要因素。膈肌在卧姿时受到其他器官的作用力大于躺姿时的作用力。因此, 飞船设计人员应更多地关注人体内部器官的受力状态, 选择一个在飞船返回时对乘员具有更好保护作用的体位姿态, 本文建议飞船乘员的姿态设计应优先选择躺姿。

关键词

人体安全, 动态响应, HUMOS假人, 身体姿态, 返回再入过载

Study on Responses of HUMOS Dummy in Typical Body Posture under Spacecraft Re-Entry Overload

Hao Sun¹, Honglei Ma^{2*}, Bingkun Liu², Jianquan Wang², Yanhua Xiao², Yu Zhu², Jingxue Fei², Jinhui Deng², Fuzhu Li³, Jingchao Sun⁴

¹China Astronaut Research and Training Center, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 孙浩, 马红磊, 刘炳坤, 王健全, 肖艳华, 祝郁, 费锦学, 邓金辉, 李富柱, 孙靖超. 典型返回再入体位对HUMOS假人动态响应影响研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4): 86-92. DOI: 10.12677/jast.2020.84011

²Space Engineering University, Beijing

³Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

⁴Altair Engineering Inc., Shanghai

Email: *mahlei@163.com

Received: Nov. 24th, 2020; accepted: Dec. 23rd, 2020; published: Dec. 30th, 2020

Abstract

To demonstrate the effect of body posture on the occupant dynamic response under a spacecraft high-level re-entry acceleration overload, seat-dummy system models with typical body positions, including supine and lying positions, are established in this study using Pro-E and Hyper Works software. A human model for safety (Version II) dummy was used in the model. Seat-dummy system models were calibrated and validated according to actual centrifugal test data. The effect of body posture on the overload response of key body organs, including the heart, lung, diaphragm, liver, and abdominal viscera are demonstrated and analyzed under a high-level acceleration overload (a peak value of 6.4 g as input). Simulation results show that the displacement and deformation of the diaphragm are the most important factors affecting human tolerance to re-entry overload. The acting force of the diaphragm from other organs' inertial reaction in supine position is larger than that in the lying position. Therefore, spacecraft designers should focus more on the mechanical status of human internal organs and provide a body posture for better protection of the crew during spacecraft re-entry.

Keywords

Human Safety, Dynamic Response, HUMOS Dummy, Body Posture, Spacecraft Re-Entry Overload

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

身体姿态直接影响一个人对加速度的耐力。加速度会造成体液的转移集中,引起头部(包括大脑和眼睛)的血液灌注,分别导致意识和视觉丧失。以往许多对加速的耐力的研究都是基于实验探索。人体的姿态,主要由座椅背角、腿部的弯曲程度、心脏至眼睛的垂直距离等决定。对于坐姿,后背直立略有倾角,对于背角从 -13° 到 5° 的加速度耐力也有文献的报道[1] [2] [3]。对于仰卧姿态,一般是后背与水平方向呈一定夹角。Ballinger 等人进行了背角从 17° 到 35° 人体加速度耐力实验研究,结果表明合理设置人体背角有助于提升加速度过载峰值耐受和延长持续时间。俯卧姿态一般是指趴着面对支撑系统,背角 -20° 到 20° ,由于这种姿态对于人机工效影响较大,因此被应用的工况相对较少[4] [5] [6] [7]。Clarke 报道了同一种体位不同眼睛水平位置对其耐力的影响,认为眼睛水平位置高于膝盖和心脏相对持续耐受时间较长[5]。在“联盟”号[8] [9] [10]和“阿波罗”号[11] [12]航天器发射和着陆时使用的身体姿势成功地提高了航天员对加速的耐受力,其姿势分别为卧姿和躺姿。事实上,由于惯性力对血液的作用、内部器官的位移和变形等,人体在这些体位中对返回加速度的耐受力要大于坐姿。

然而, 量化心脏、肺、膈肌和其他腹部器官之间相互作用问题仍然没有得到解决。在实际工作中, 人体内部器官对加速度的响应并不能通过人体实验和高水平的过载试验轻易地可视化。为了研究上述实验中人体动态响应与人体姿态的关系, 常采用惯性力理论方法对心脏负荷进行评估和分析, 然而, 这些解释并不全面。在生物力学技术的发展中, 假人由于具有人体的基本结构和形状, 是系统动力学和动态生物力学安全评估的理想替代品。此外, 它还可以减少复杂试验的数量并使成本最小化。近年来, 随着拟人技术和测量技术的发展, 人们构建了一种数字假人模型, 即第二版人体安全模型(HUMOS II)。本研究目的就是利用 HUMOS II 来分析在相同的模拟过载条件下, 卧姿和躺姿下人体不同关键内脏器官的加速度响应和器官之间相互作用机制。

2. 方法

2.1. 座椅假人系统模型描述

使用 Pro/E5.0 软件建立卧姿“联盟”号飞船椅垫的三维几何模型, 使用 HyperMesh13.0 软件进行网格化。所述坐垫包括两层: 环氧层和聚氨酯泡沫层。座椅与环氧树脂层采用 mixed-shell 单元进行网格划分, 坐垫的聚氨酯泡沫层采用 eight-node solid 单元进行网格划分。座椅使用的材料为铝合金, 其弹性模量为 90 GPa, 屈服强度为 0.65 GPa。聚氨酯泡沫层的初始弹性模量为 0.00425 GPa, 密度为 0.07782 g/cm³。环氧层的弹性模量为 8 GPa, 密度为 1.275 g/cm³。在该模型中, 座椅和环氧树脂层采用 Johnson-Cook 弹塑性本构方程, 而聚氨酯泡沫层采用粘弹性本构方程(通过 RADIOSS 瞬态显式求解器)。座位模型共由 71137 个单元和 77,210 个节点组成。座椅模型的雅克比为 0.6。躺姿“阿波罗”模拟座椅的建立方式与“联盟”号座椅模型相同。它由 76,413 个单元和 87,867 个节点组成。座椅模型的雅克比为 0.32。

目前, 世界上两类顶级的生物力学假人, 一个是美国韦恩州立大学为日本丰田公司研发的 THUMBS 生物力学假人, 另一个是由 Altair 公司与法国 LBA (Laboratoire de Biomécanique Appliquée, 即应用生物力学实验室)合作开发 HUMOS II (Human Model for Safety version II)柔性假人。鉴于我们实验室目前配备了 Altair HyperWorks V2018 软件的条件, 选择使用 HUMOS 数字假人代替真人。它是一个接近于人体生理结构(包括: 骨骼、肌肉韧带系统、内脏等结构组织)的有限元生物力学模型。由于目前广泛使用的 Hybrid III 假人, 不具备有内脏结构, 所以未被采用。通过 HyperCrash 的姿势调整功能, 将 HUMOS II 假人调整为卧姿和躺姿, 如图 1 所示。基于非线性惩罚函数法, 假人与座垫之间、座垫与座椅之间的接触为 (/INNER/TYPE7)。摩擦系数根据工程经验设定为 0.3, 即尼龙-尼龙滑动摩擦系数。进行了基于实际加载条件的标定试验和仿真。



Figure 1. Physical dummy calibration test on a manned centrifuge
图 1. 在载人离心机上的物理假人标定试验

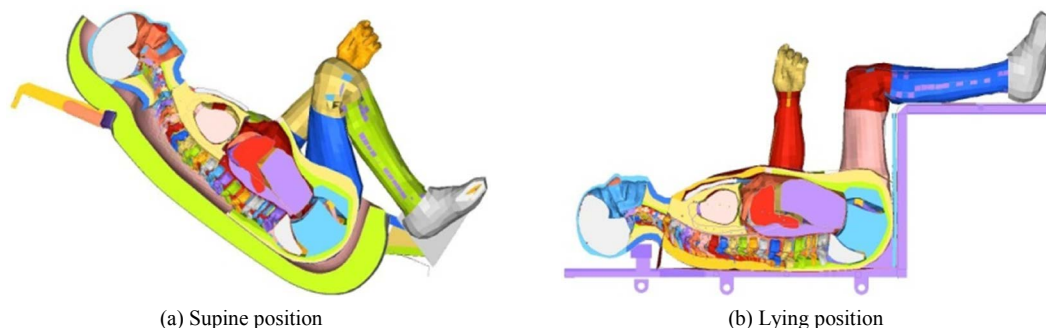


Figure 2. Seat-dummy system model in supine and lying positions
图 2. 卧姿和躺姿的座椅假人系统模型剖面

2.2. 假人-座椅系统模型的标定

依托航天员科研训练中心 98 型载人离心机提供半弹道式返回过载环境, 以 50th 男性 Hybrid III 物理假人为实验对象, 分别开展卧姿和躺姿的超重实验, 如图 2 所示。假人被调整成卧姿或躺姿并放置在座椅上。两种模型的输入载荷曲线如图 3 所示, 其中加速度峰值接近 4.4 g, 持续时间约为 100s。

3. 结果

3.1. 标定与验证

以离心机输出过载曲线(最大峰值为 4.4 g)作为卧姿和躺姿模型的输入, 通过调整模型参数, 使得仿真计算结果和离心机实验结果相符合。本文通过用假人的头部、胸部、腰部等三个关键部位实验与仿真结果对比标定, 检验模型的准确性。由假人-座椅系统模型的标定结果(图 3), 可以看出本研究建立的模型准确和可靠, 仿真计算和实验测量的曲线的一致性满足要求。此外, 该卧姿模型曾被用于研究不同着陆冲击水平下的人体动力响应[10]。

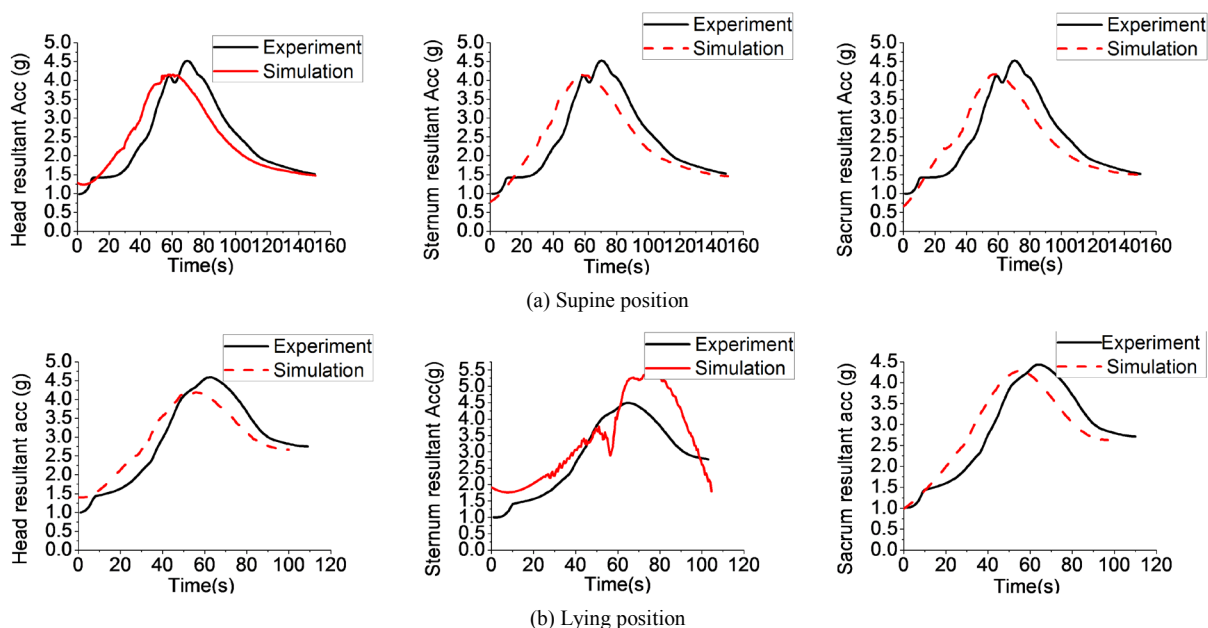


Figure 3. Calibration results of the dummy-seat system model
图 3. 假人-座椅系统模型标定结果

3.2. 人体重要脏器响应模拟

本研究比较了在加速度过载 6.4 g, 持续 100 s 的情况下, 卧姿模型和躺姿模型假人的心脏、肺、膈肌、肝脏和腹部各关键器官的加速度响应。这个输入模拟“阿波罗”10号任务的过载值[12], 其第一次加速度峰值达到 6.73g。结果如图 4 和图 5 所示。

1) 图 4 为人体暴露于峰值 6.4 g 时两种姿态的剖面图。人体在受到返回过载作用的过程中, 背角对器官的移位和变形有较大的影响, 将会直接影响着体液转移和呼吸运动。所有重要脏器变形, 因为器官在这个时候经受了较大的压力和牵拉。卧姿体位下, 上身沿头盆向(从头部到 - 盆腔, +Gz)方向下移, 脏器被压缩和挤压变形。躺姿体位时各脏器仅沿胸 - 后背方向(+Gx)下陷运动和压缩变形。

2) 腿部屈曲的程度影响膈肌和腹部脏器的变形和运动。如图 4(a)所示, 卧姿状态下, 由于座椅存在一定的安装背角, 虽然人体的合加速度基本一致, 但这种状态下存在一定的头盆向分量(+Gz)载荷, 此时大腿向后屈至腹部, 限制和抑制了腹部器官的向下移动, 膈肌和腹腔脏器的活动空间明显减小。如图 4(b)所示, 躺姿状态下, 过载主要沿胸背向, 头盆向的过载可以忽略不计, 因此人体从整体上来说, 以胸背向压缩变形为主, 其内部脏器也同样以胸背向受压变形为主。

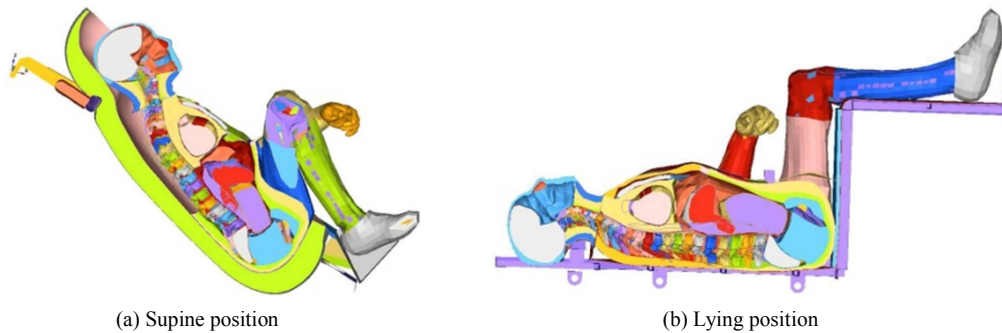


Figure 4. Acceleration responses for supine- and lying-position body postures in a three-axis cutting view
图 4. 在三轴剖视图中卧姿和躺姿身体姿势的加速响应

通过最大位置和初始位置(每个图中用黑色网格表示)比较两种姿态的位移和变形, 如图 5 所示, 左右器官分别属于卧姿和躺姿模型。可以发现, 无论是躺姿还是卧姿, 脏器在加速度过载中都有较大的变形和相对运动。

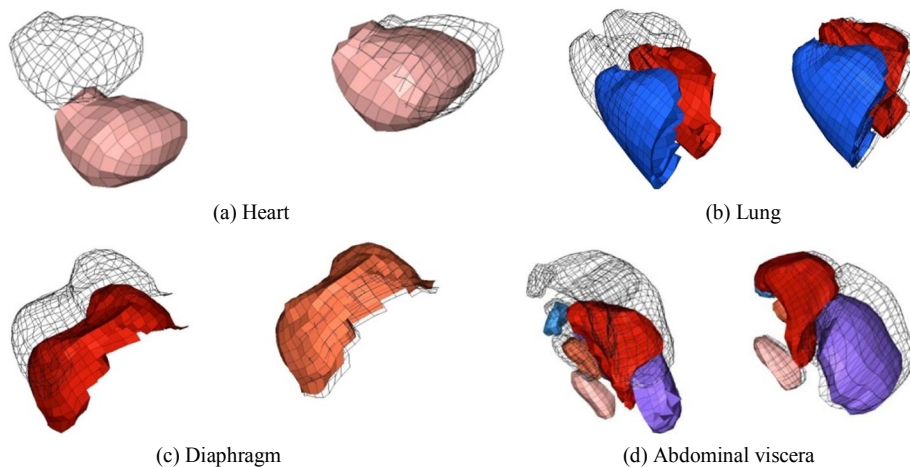


Figure 5. Acceleration responses of the heart, lung, diaphragm, and abdominal viscera in three-axis view
图 5. 心、肺、膈肌和腹部脏器三轴视图加速度响应

4. 讨论

Clarke 等人(1959)实验研究身体体位姿态和加速耐受力之间的关系。实验招募了 3 名志愿者, 志愿者背角 25°, 过载 6 g, 持续时间 200 多秒。实验结果记录为“S”。根据文献当志愿者因为疼痛、疲劳、呼吸困难而终止实验, 或者因为心率、心电图异常变化或停电而被禁止继续实验时, 记录下“S”符号。Creer 等人(1960 年)和 Giovanni 等人(1964 年)利用改良的水星座椅进行了一项躺姿研究, 其中过载为 6 g, 背角约为 5°, 持续时间为 390 s。记录的终止原因为“S”, 但在志愿者中未观察到外伤。所有的志愿者都被束缚带约束, 没有使用抗荷服或其他对抗措施。在本文研究中, 假人姿态与 Clarke 和 Creer 的实验相似。仿真结果表明, 在卧姿时心脏和肺的位移和变形比躺姿时更严重。特别是腿部弯曲将更多的压力传递到腹部和膈肌。腹式呼吸是一种对抗加速度负荷和提高人的耐受性的有效方法, 其中膈肌对腹式呼吸运动尤为重要, 但在过载时被心脏和肺从上而下挤压, 被腹部从下而上挤压, 这种挤压将导致腹式呼吸困难。因此, 它可能是卧姿的一个不利影响, 很容易导致实验被终止。

在同样的条件下, 除了较低的过载 4 g 和 660 s 的持续时间外, Clarke 记录了志愿者的反应。然而, 实验同样被终止并记录为“S”, 因为实验造成志愿者经历了 24 小时的腿部疼痛创伤。在卧姿, 因为腿的弯曲限制和影响了血液的流动。在平躺姿势下, 躯干与大腿、大腿与小腿的角度近似垂直, 因此血液没有受到严重影响。这可能是卧姿与躺姿相比的另一个不利方面。

通过对卧姿与躺姿器官位移变形的比较, 可以看出卧姿器官位移变形较大。这可以归因于几个原因。首先, 在卧姿的器官上有一个附加的+Gz 作用(头 - 盆向的加速度分量), 导致了在这个方向上的附加影响。其次, 在平躺姿势下, 器官上只有+Gx 加速度作用, 导致胸 - 背方向扁平变形。位移和挤压变形对提高加速度耐受力都极为不利。相比之下, 躺姿可能更适合提高乘员的加速耐力。

本研究建立的假人 - 座椅系统模型也有一定的局限性。模型中使用的假人是基于 HUMOS II 生物力学假人, 然而, 用于标定的物理假人是 Hybrid III 假人。虽然两个假人都用于仿真分析, 但从物理 Hybrid III 假人标定测试的数据更适合数字 Hybrid III 假人。由于 Hybrid III 是一个没有内部器官的半刚性假人, Hybrid III 假人实验的响应结果略高于 HUMOS II。在两种假人的性能对比方面, 值得进一步研究。

此外, 座垫也是一个影响因素。本实验使用的座垫是以亚洲人体体型为基础设计的, 而 Hybrid III 假人是基于欧美人体体型为基础, 座垫与假人的匹配性也有一定的影响。当亚洲假人被开发出来后, 座垫会更加适合, 无论是假人实验还是仿真计算都会更加准确可靠。

5. 结论

仿真结果表明, 膈肌的位移和挤压受力是影响人体返回过载耐力的最重要因素。相对其它器官而言, 膈肌在卧姿时所受的力要比在躺姿时大。因此, 飞船设计师应更多地关注人体内部器官的受力状态, 为航天员在航天器返回过程中提供更好保护作用的体位。通过对比相同返回过载作用下人体内脏器官移位和变形程度, 建议飞船乘员的姿态设计应优先选择躺姿。

基金项目

中国载人航天领域预先研究项目(020101)。

参考文献

- [1] Miller, H., Riley, M., Bondurant, S. and Hiatt, E. (1959) The Duration of Tolerance to Positive Acceleration. *Journal of Aviation Medicine*, **30**, 360-366.
- [2] Sieker, H.O. (1952) Devices for Protection against Negative Acceleration: Part 1, Centrifuge Studies. WADC TR 52-87. Part 1 (AD 2135). Wright Air Development Center, Ohio. <https://doi.org/10.21236/AD0002135>

-
- [3] Creer, B., Smedal, H. and Wingrove, R. (1960) Centrifuge Study of Pilot Tolerance to Acceleration and the Effects of Acceleration on Pilot Performance. NASA TN D-337 (AD 245411), National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.
- [4] Clarke, N., Bondurant, S. and Leverett, S. (1959) Human Tolerance to Prolonged Forward and Backward Acceleration. *Journal of Aviation Medicine*, **30**, 1-21.
- [5] Gray, R. and Web, M. (1960) High G Protection. NADC-MA-5910 (AD 235338). US Naval Air Development Center, Pennsylvania.
- [6] Harris, C. and Sommer, H. (1971) Centrifuge Record Books. AMRL-70-21. Aerospace Medical Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [7] Ballinger, E. and Dempsey, C. (1952) The Effects of Prolonged Acceleration on the Human Body in the Prone and Supine Positions. WADC TR 52-250 (AD 5352). Wright Air Development Center, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. <https://doi.org/10.21236/AD0005352>
- [8] Liu, B., Ma, H. and Jiang, S. (2008) Dynamic Responses to Landing Impact at Different Key Segments in Selected Body Positions. *Aerospace Science and Technology*, **12**, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.08.004>
- [9] Ma, H., Zhu, Y., Xiao, Y., Liu, B., Jin, X., Yang, K. and King, A. (2014) Biomechanical Sex Differences of Crewmembers during a Simulated Space Capsule Landing. *Aviation Space Environment Medicine*, **85**, 1-5. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3890.2014>
- [10] Fu, W., Zhang, X. and Ma, H. (2017) Simulation Study on the Gender Differences of the Occupant Dynamic Response during Spacecraft Landing Impact Condition. *International Journal of Crashworthiness*, **4**, 1-7.
- [11] Brown, W., Rothstein, J. and Foster, L. (1966) Human Response to Predicted Apollo Landing Impacts in Selected Body Orientations. *Aerospace Medicine*, **37**, 394-398.
- [12] Graves, C. and Harpold, J. (1972) Apollo Experience Report Mission Planning for Apollo Entry. NASA TN 6725.