

卧姿半弹道式再入过载假人动态响应研究

王健全¹, 肖艳华¹, 刘炳坤¹, 祝郁¹, 邓金辉¹, 付文文², 马红磊^{1*}

¹中国航天员科研训练中心, 北京

²北京航天飞行控制中心, 北京

Email: *mahlei@163.com

收稿日期: 2021年1月5日; 录用日期: 2021年2月24日; 发布日期: 2021年3月3日

摘要

为了探索卧姿半弹道式再入时的人体动态响应, 通过载人离心机模拟飞船半弹道式返回再入大气层过载曲线, 对比分析卧姿状态下HybridIII生物力学假人头部、胸部及腰部的动力学响应。结果显示假人各部位胸-背向响应占优势。头部、胸部、腰部沿胸-背向的加速度由低到高, 增长幅度较小; 而沿头-盆向是由高到低, 差异性明显, 头部最高, 胸部和腰部加速度较为接近。该实验研究为载人深空探测工程实践提供了数据基础, 为载人加速度耐限制定及安全防护设计提供指导。

关键词

半弹道式再入, 持续性加速度, 生物力学假人, 加速度防护

Study on Response of Dummy in Supine Position under Semi-Ballistic Reentry Overload

Jianquan Wang¹, Yanhua Xiao¹, Bingkun Liu¹, Yu Zhu¹, Jinhui Deng¹, Wenwen Fu², Honglei Ma^{1*}

¹China Astronaut Research and Training Center, Beijing

²Beijing Aerospace Command Control Center, Beijing

Email: *mahlei@163.com

Received: Jan. 5th, 2021; accepted: Feb. 24th, 2021; published: Mar. 3rd, 2021

Abstract

To explore the dynamic response of human body in supine position under semi-ballistic reentry,

*通讯作者。

文章引用: 王健全, 肖艳华, 刘炳坤, 祝郁, 邓金辉, 付文文, 马红磊. 卧姿半弹道式再入过载假人动态响应研究[J]. 国际航空航天科学, 2021, 9(1): 1-7. DOI: 10.12677/jast.2021.91001

simulating acceleration loading of typical enter by manned centrifuge, the dynamic responses of dummy head, chest and lumbar were obtained and analyzed. The Gx response of each part of the dummy was dominant. The acceleration of the head, chest and lumbar along Gx is from low to high, and the increase range is small; while the acceleration along Gz is from high to low, the difference is obvious, the head is the highest, and the acceleration of chest and waist is relatively close. This paper provides an experiment basis for the designing on the enter strategies of spacecraft. Based on this result, the designer could choose the optimal strategies, to avoid injury.

Keywords

Semi-Ballistic Reentry, Sustained Acceleration, Biomechanical Dummy, Acceleration Protection

Copyright © 2021 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

载人探月飞船返回地球时，飞船将以第二宇宙速度进入大气层，航天员将暴露于高水平再入加速度过载环境，严重威胁航天员健康安全，因此月地返回再入加速度安全成为航天载人登月的关键之一。虽然 20 世纪 70 年代，美国已实现了载人登月返回，苏联实施了无人飞船绕月飞行并返回，我国经过多年发展，已掌握近地轨道载人航天器返回与回收技术，成功完成多颗返回式卫星、多艘载人飞船返回与回收以及嫦娥五号飞行试验器任务，但是以第二宇宙速度载人月地返回再入仍有诸多重大问题尚待解决[1] [2] [3] [4]。

根据国外载人登月工程实践特点分析认为，载人探月飞行任务的返回再入区别于近地轨道载人飞行返回，与近地轨道返回相比，航天员要承受更为严酷的再入加速度过载环境。目前根据飞行器负荷和再入速度不同主要选用两种返回方式[3]，一是钱学森式弹道经受高温直接冲过大气层，该方式适合第一宇宙速度以下的近地轨道返回，如联盟号和神舟载人飞船；二是通过桑格尔弹道跳跃式来减速降温，如阿波罗登月载人飞船[5] [6]、嫦娥五号 T1 试验返回器(CE-5T1)以接近第二宇宙速度跳跃式返回再入[7] [8]。如果不采用跳跃式飞船加速度可达 15 g 左右，严重威胁航天员的生命安全。再入方式不同，飞行器所经历升阻力不同，相应所受加速度不同。相比而言，载人登月返回过程中，乘员将会经受更高峰值、增长率及复杂波形的加速度作用，导致乘员损伤风险显著增加，如有应急情况，过载安全问题更为突出。目前，美国 NASA 仍在进行返回再入加速度耐受性问题的相关研究。根据我国载人登月计划需求，及时开展返回再入加速度耐受性及防护技术研究，对明确登月任务返回再入乘员安全性设计具有重要意义。

借助载人飞行来获得高速再入人体加速度响应和生理效应等规律，实施代价高、安全风险大，通常先期采用地面分析、仿真和试验进行验证。我国目前也在开展相应研究，有学者采用 HUMOS 生物力学假人，开展再入过载条件下典型体位响应仿真研究，分析认为体位姿态对膈肌的位移和变形是影响人体对再入过载耐受力的重要因素，并建议飞船乘员的姿态设计应优先选择躺姿[9]。文献[10]利用离心机模拟 Apollo10 返回再入过载环境，获得躺姿 Hybrid III 生物力学假人半弹道式再入时的人体动态响应，结果显示假人重要部位的动态响应与再入模式下的过载曲线变化趋势基本一致，各部位合成加速度值较为接近。但从保持工程继承性和节省经费角度考虑，如果采用现有联盟号飞船或神舟飞船卧姿和嫦娥返回方式，是否有利于人体对抗再入加速度，需要进一步研究。本研究通过地面设备模拟躺姿阿波罗再入

加速度环境,按联盟号飞船的乘员座椅姿态设计乘员方案,分析其再入方式过载条件下 HybirdIII 生物力学假人头部、胸部及腰部等重要部位的动力学响应规律,为载人飞行器第二宇宙速度返回再入的人体安全性和防护设计提供试验基础,为飞行设计提供设计备选方案。

2. 方法

2.1. 载荷设计

载人探月飞船以接近第二宇宙速度返回再入,为了进行热防护管理,飞船以半弹道式载入返回方式。载入环境具有重复、长时、高过载特点。CE-5T1 返回中,其过载最大峰值达到 9 G,减速后再入的二次过载峰值约 4 G,两峰值间经历了接近较长时间 0 G 的开普勒段。以 CE-5T1 再入过载曲线为基准设计离心机参数。考虑到离心机的实际模拟情况,离心机的启动过载至少要求 1.4 G。为了研究在不同载荷下假人响应的变化规律,分别设置四组不同峰值的模拟过载曲线。

2.2. 测试布点

模拟采用 50 百分位男性 HybirdIII 假人,体位为卧姿。在离心机座舱内安装类似联盟号飞船的座椅,座椅安装背角与座舱水平面夹角约 20° ,座椅内放置缓冲坐垫,将 HybirdIII 假人以仰卧姿态放置在座椅内,并收拢假人双脚放置在脚蹬上,头部放置于头靠上,然后在用四点式安全带固定假人胸部,膝盖和脚部分别用安全带固定(图 1)。使用 MSR165 三向加速度记录仪,最大量程 ± 15 g 记录人体加速度响应,分别在假人的头部质心位置、胸骨、腰部,采样频率为 800 Hz/CH。



Figure 1. Seat-dummy system in supine position

图 1. 假人离心实验姿态

3. 结果

3.1. 离心机输出

根据探月飞船返回跳跃式再入轨迹规划[7],编制离心机 G 值文件,调试各设备控制参数,模拟载人登月再入过程持续变化的加速度作用环境。得到重复性良好的四组输出过载曲线,如图 2 所示。四组过载输出第一峰值分别为 10.4 G、8.07 G、6.4 G 和 4.2 G,总作用时间约 550 s。离心机模拟的半弹道式返回再入过载曲线满足设计要求。

3.2. 假人加速度响应

假人头部、胸部及腰部加速度结果见图 3。结果显示随着载荷增加,三个部位的合成加速度也相应增加,趋势和输入载荷一致,其中四个过载输入下假人不同部位的最大响应见表 1。

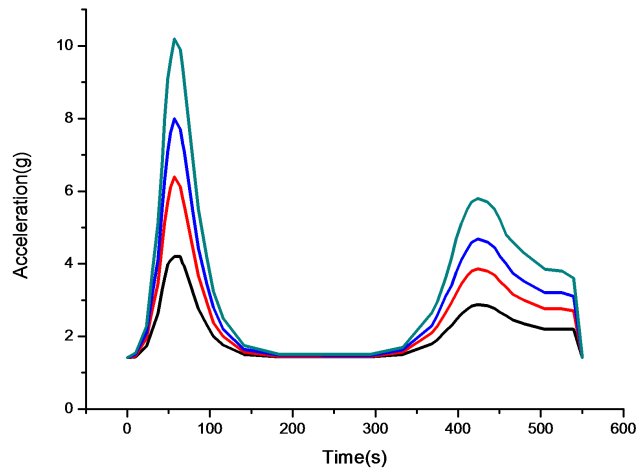
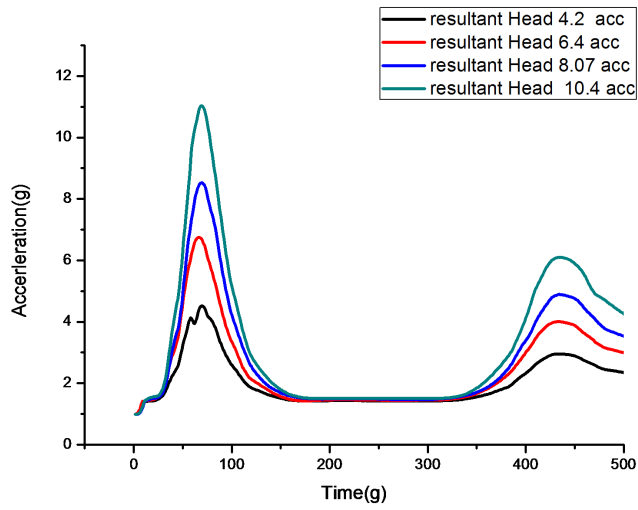
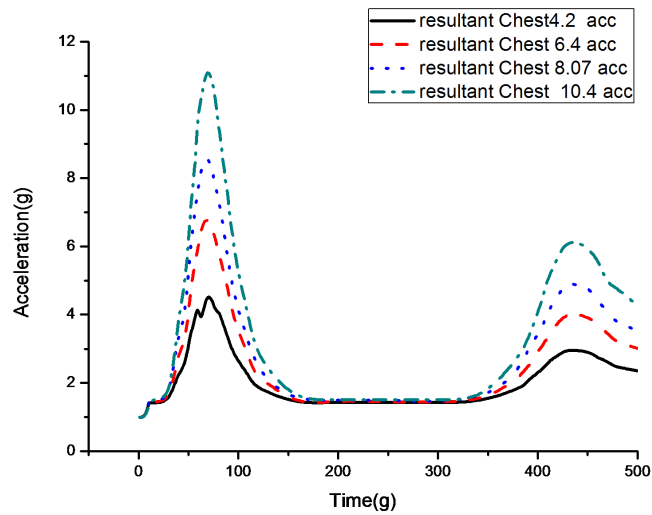


Figure 2. Output of centrifuge
图 2. 离心机输出过载曲线



(a) 头部



(b) 胸部

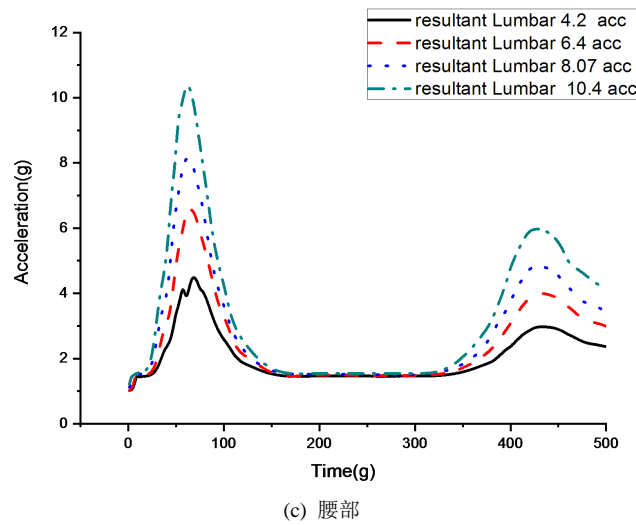


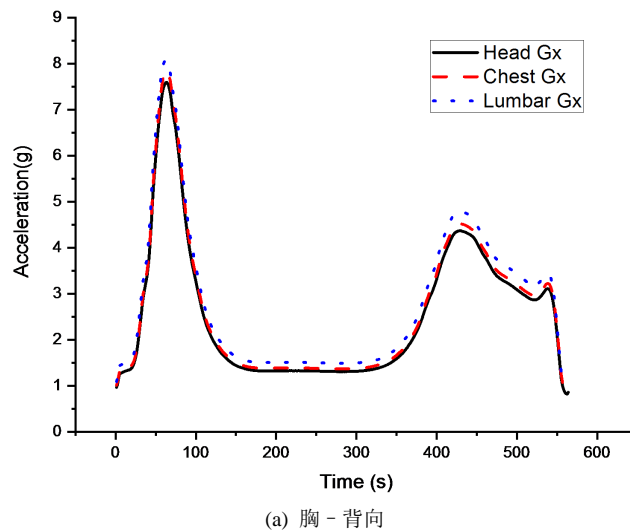
Figure 3. Acceleration response of dummy head, chest and waist
图 3. 假人头部、胸部和腰部的加速度响应

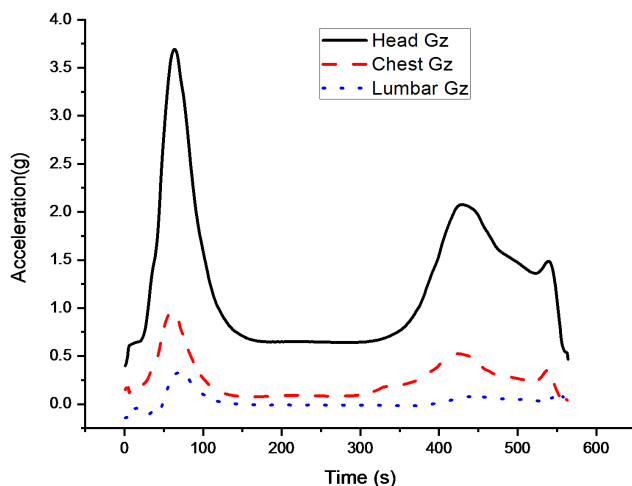
Table 1. Maximum response of different parts of dummy under four overload inputs
表 1. 四个过载输入下假人不同部位的最大响应

离心机输出过载 (最大值时刻/s)	头部	胸部	腰部
	响应最大过载/G (时刻/s)		
4.2 acc (57)	4.52 (69)	4.52 (70)	4.48 (68)
6.4 acc (57)	6.75 (66)	6.77 (69)	6.56 (65)
8.07 acc (57)	8.53 (69)	8.56 (68)	8.16 (63)
10.4 acc (57)	11.04 (69)	11.09 (70)	10.34 (62)

3.3. 假人加速度响应分量

载人离心机输出过载第一峰值为 8.07 G，总作用时间约 550 s。假人头部、胸部和腰部沿胸背向的加速度响应分量见图 4，三个部位沿 G_x 最大过载分别是 7.60、7.86、8.09 (具体见表 2)。





(b) 头 - 盆向

Figure 4. Acceleration response components of dummy head, chest and waist in different directions

图 4. 假人头部、胸部和腰部沿不同方向的加速度响应分量

Table 2. Maximum overload of dummy acceleration in different directions

表 2. 假人沿不同方向加速度最大过载

方向	头部	胸部	腰部
	加速度最大过载/G		
Gx	7.60	7.86	8.09
Gz	3.69	0.96	0.32

4. 讨论

本研究采用模拟联盟号座椅使用姿态，载荷模拟嫦娥返回工况特征，过载由低到高，作用时间保持一致。在这种工况下，随着过载的增加，头部、胸部、腰部加速度响应也增加。头盆向、胸背向加速度响应规律与离心机输出过载峰值间隔时间、持续作用时间、曲线变化趋势基本一致。月地返回跳跃式再入大气层时，过载曲线具有第一峰值高、波形陡峭的显著特征，对人体生理耐受能力和再入安全性影响较大。

头部和胸部合加速度峰值均大于离心机输出的过载峰值(见表 1)。可能由以下两点原因造成：一是过载由离心机做圆周运动所产生的离心力模拟，当离心机输出给定的过载曲线时，速度大小的变化会产生线性加速度，即造成 Gy 方向的加速度从而使合加速度变大；二是对假人约束不完全造成状态的不稳定。腰部的过载峰值稍大于离心机输出，主要受上述第一个原因的影响。假人的响应峰值存在滞后现象：胸部和头部响应峰值滞后约 12 s，腰部滞后相对较小且随离心机输出载荷的增大而减少。

对比头部、胸部、腰部胸背向的加速度，由低到高，增长幅度较小；而头盆向是由高到低差异性明显，头部最高，胸部和腹部加速度较为接近(见表 2)。在头盆向，加速度曲线第一峰值为 3.69 g，其余时间历程头盆向 G 值响应整体水平不高。分析载荷传递方式认为，假人卧姿腰部胸背向高的原因可能是腿部往回弯曲挤压造成；头盆向加速度峰值依次由高到低，较大差异性，主要因为是头部没有约束，自由灵活，活动范围大，加速度响应一般相对与胸腹部较大。对人体生理效应的影响，是较高的头部+Gz 加速度会对视力和脑功能产生负面效应；胸部心肺下沉牵拉并向下挤压膈肌；臀部由于座垫构型和人体卧

姿大腿向腹部回屈挤压, 限制膈肌下移, 可能对超重对抗的腹式呼吸动作效果以及超重过载耐力造成不利影响。通过分析假人不同部位的响应特性, 发现头部响应有较高的+G_x 值外, 头盆向+G_z 也相对较高, 因此载人月地返回再入防护设计时, 还应加强头部的约束与固定。

5. 结论

本文对利用离心机模拟嫦娥返回再入过载, 探讨卧姿人体姿态载入方式对假人动态响应的影响。结果表明模拟嫦娥载入返回过载时, 假人头部、胸部、腰部三个重要部位均有较大+G_x 加速度响应, 验证了文[9]和[10]部分结果和变化趋势。尤其是假人三个部位+G_x 由头部、胸部、腰部载荷逐渐增大, 意味着除了头部和胸部会产生较大生理影响外, 腰腹部过载也将产生重要影响, 这是由卧姿和腿部弯曲造成的, 而且是不利于加速度对抗和提升加速度耐力的。建议下一步在工程设计和制定飞行器医学要求时, 飞船设计师应关注卧姿时人体内部器官的受力状态, 为航天员设计具有更好保护作用的体位, 为飞船再入制定更好的返回策略。

基金项目

中国载人航天领域预先研究项目(020101)。

参考文献

- [1] 叶培建, 杨孟飞, 彭兢. 中国深空探测进入/再入返回技术的发展现状和展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(3): 229-238.
- [2] 左光, 候砚泽, 陈冲, 等. 载人航天器月地返回再入问题研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 112-118.
- [3] 贾世锦. 载人登月返回再入有关问题初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 18-25.
- [4] 龙乐豪. 关于中国载人登月工程若干问题的思考[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(6): 1-5.
- [5] Graves, C.A. (1972) Apollo Experience Report: Mission Planning for Apollo Entry. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.
- [6] James, O.R. (1969) Apollo Entry Summary Document Mission "F". NASA Manned Space Center, Houston.
- [7] 苏杭. 探月飞船返回跳跃式再入轨迹规划与制导研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1-9.
- [8] 王帅帅. 探月飞船跳跃式再入参数在线估计与先进制导方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [9] 孙浩, 马红磊, 刘炳坤, 等. 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.
- [10] 祝郁, 肖艳华, 王健全, 等. 躺姿半弹道式再入假人动态响应研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4): 108-113.