DOI: 10.3901/JME.2019.24.001

游乐设施乘员加速度耐受能力研究进展及展望*

肖原¹ 沈功田¹ 胡斌¹ 陈涛² 刘书娟³

(1. 中国特种设备检测研究院 北京 100029;

2. 中山市金马科技娱乐设备股份有限公司 中山 528437;

3. 中国航天员科研训练中心航天医学基础与应用国家重点实验室 北京 100094)

摘要: 游乐设施是改善人民群众的精神文化生活质量的重要设施,近年来,在乘坐高速、高加速度游乐设施过程中,乘员人身伤害事故偶有发生;为了减少游乐设施的意外伤害现象,在分析、总结了前人研究成果的基础上,揭示了游乐设施运行过程中的各种加速度对乘员的生理影响规律,对直接影响乘员安全的加速度推拉效应、科氏加速度和颈椎伤害风险,给出了针对性的防护和控制措施;在此基础上,提出符合我国生理人群特征的乘员Z方向加速度耐受阈值,初步解决了困扰我国游乐设施加速度风险控制的难题。

关键词: 游乐设施;乘员;加速度;耐受能力;风险控制

中图分类号: R852; X924

Research Advances and Prospects on Acceleration Tolerance of Amusement Rides Passengers

XIAO Yuan¹ SHEN Gongtian¹ HU Bin¹ CHEN Tao² LIU Shujuan³

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029;

2. Golden Horse Technology Entertainment Co., Ltd., Zhongshan 528437;

3. State Key Lab of Space Medicine Fundamentals and Application,
China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094)

Abstract: Amusement rides are important facilities to improve the quality of people's spiritual and cultural life. In recent years, personal injury accidents have occurred occasionally in the process of taking high-speed and high-acceleration amusement rides. In order to reduce accidental injury of amusement rides, the physiological influence law of various accelerations on passengers during the operation of the amusement rides are revealed based on the analysis of the previous research results and the protection and control measures are given on the push-pull effect of acceleration, the effect of Coriolis acceleration and the neck vertebrae injury risk that directly affect the passengers safety. On this basis, the Z direction acceleration tolerance threshold are proposed in accordance with China's population physiological characteristics, which preliminarily solves the problem of acceleration risk control of amusement rides in China.

Key words: amusement rides; passenger; acceleration; tolerance; risk control

0 前言

游乐设施是改善人民群众的精神文化生活质量的重要设施,深受国内外人民群众喜爱。截至2018年底,我国现有大型游乐设施,如过山车、摩天轮、旋转木马等2.4万台套,年乘坐人数6亿多人次。乘客通过参与游乐过程,感受各种视听、超重和失

重等感官刺激,体验“真实”的乘坐感觉。这些外界刺激一方面通过交感神经、副交感神经系统和前庭等器官作用于人体,给乘客带来生理和精神上的愉悦;另一方面,为了追求逼真、刺激的乘坐效果,给游乐设施运行参数提出了高度更高、速度更快、加速度更强,感官更刺激的要求,但这些高参数要求有时会给乘客带来风险,引起乘客惊吓、不适甚至伤害。

据我国市场监管总局统计,2008—2017年间,我国大型游乐设施万台伤亡率为年均3.64~5.24

* “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFF0203105)。20190917收到初稿,20191120收到修改稿

人/万台。与此同时,据国际游乐园和景点协会和美国消费品安全委员会统计,2017 年北美乘坐游乐设施的乘员事故致伤率为 3.48~4.37 人/百万人,乘坐游乐设施送医就诊为 8 978 人;其中,接受伤部位数量统计,前三类症状为颈部扭挫伤,头部伤害和后腰扭伤,按事故设备类型统计,这些事故设备大都是高速、高加速度游乐设施。上述数据说明游乐设施加速度既是游乐设施的关键参数,也是重大风险源,因此,揭示游乐设施加速度对人体和游乐设施本体的作用规律,实现游乐设施刺激性、安全性和舒适性的协调统一,是游乐设施研究领域亟待解决的重大科学问题和本质安全问题。

1 人体加速度定义和分类

乘员在运动过程中会受到加速度的作用,这些加速度会影响乘员的感觉和任务控制能力,为了便于研究,GELL^[1]在 20 世纪 60 年代提出了人体体轴坐标系的概念,按右手坐标系,把人体方向分为 X 轴向(前后)、 Y 轴向(左右)和 Z 轴向(上下),其中, Z 轴向平行于人体脊椎方向,如图 1 所示。为了描述游乐设施乘员所承受加速度的特征,通常把沿着 X 轴向的线加速度表示为 G_x ,沿着 Y 轴向的线加速度表示为 G_y ,沿着 Z 轴向的线加速度表示为 G_z ,加速度的正方向与上述人体坐标系的正方向相反。在运动医学领域,常用的加速度单位是“ G ”来表征加速度的大小,由公式 $G = a/g$ 定义,其中 a 是加速度, g 是地球表面的重力加速度(9.81 m/s^2)。

图 1 人体坐标系(ISO/TS 17842-2015)

由于座舱的约束限制,正常坐姿乘员的胸、足

和头部的加速度过载曲线基本重合,峰值差别最大为 G_y ,约为 2%^[2]。因此,当忽略人体在加速度环境中心功能(主动脉输出压)的变化时^[3],可以用乘员胸部(心脏)过载曲线描述头部等人体部位所处的加速度环境,此时加速度 G 的测量误差在 $\pm 5\%$ 以内,在工程领域内是可以接受的。

根据作用时间长短,人体加速度通常分为持续加速度,冲击加速度和振动加速度三种类型,持续加速度通常定义为持续时间超过 1 s 的加速度,冲击加速度通常定义为持续时间少于 1 s 的加速度,振动加速度通常定义为持续时间 0.1s 甚至更短时间的加速度;另外,根据加速度的变化速率,可以将加速度分为渐变加速度(GOR, $\leq 1 \text{ G/s}$),快变加速度(ROR, $1 \sim 6 \text{ G/s}$)和跃变加速度(HOR, $> 6 \text{ G/s}$)^[4]。由于不同类型加速度对人体产生的生理效应有很大区别,以下将分别讨论各种类型的加速度对人体的生理影响。

2 持续加速度生理影响和耐受范围

2.1 $\pm G_z$ 加速度

乘员在绕 Y 轴向的仰俯运动、沿 Z 轴向的垂直升降运动会经常承受 $\pm G_z$ 加速度,这种加速度也是游乐设施运动过程中最常见的、后果最严重的加速度。对于一个正常体格坐姿乘员,其心-眼垂直距离(h)平均为 30 cm,心脏主动脉处的平均血压(P_a)为 100 mm/Hg,在 $+1G$ 作用下,眼压(P_{ae})比心脏主动脉平均血压低 22mm/Hg(78mm/Hg),每增加一个 $+1G$,眼压相应降低约 22 mm/Hg,由于眼睛内压的存在(平均 16 mm/Hg),当增至 3.8 G 时,首先会出现灰视、黑视,当增至 4.5 G 时,此时眼压和脑压都降低为 0,会导致眼、脑缺血;当缺血时间超过 5 s,大脑就会耗尽血氧储备,神经系统进而会产生缺血性反应,然后大脑会从几乎失去意识发展到完全失去意识^[5-6]。

因此,如果仅考虑心脏供血能力和缺血反应对眼、脑功能的影响,在 $+G_z$ 加速度作用下,乘员耐受能力的理论上限约为 4.5 G ,由于存在血氧储备,短时间($t \leq 5 \sim 7 \text{ s}$)内,人体可以安全的承受 $+14 \sim 15 G$ 的加速度^[7-9]。人体在 $2 \sim 6 G$ 范围内的耐受时间约为 45 s, $+G_z$ 加速度越大,耐受时间越短^[10-12];由于乘员耐受能力与心眼距离(h)大致呈线性关系^[13-14],在 $0^\circ \sim 75^\circ$ 范围内,增大座椅倾斜角度 θ 可以降低心眼距离,显著提高耐受能力。考虑座椅倾斜角度因素后,乘员 $+G_z$ 耐受能力可以用式(1)所示^[15]

$$G = \frac{13.6P_a - P_{ae}}{h \cos \theta} \quad (1)$$

式中, 血压以 mmHg 为单位, 血液密度取为 $1/13.6$ 汞密度。

一般来说, 加速度对乘员身体的影响主要是体现在心血管和呼吸系统, 有时也会引起神经系统症状。与 $+G_z$ 暴露相关的最常见的心血管症状是窦性心律失常, 室性早搏和早发性心房收缩^[16-17], 这些症状大都是可恢复的^[18-19]。随着 $+G_z$ 的增加, 乘员心率和血压增加, 肺部出现了换气压力梯度变化, 造成肺灌注/通气比失衡和通气功能降低, 导致动脉血氧分压 PaO_2 降低, 进一步恶化了脑部供血能力^[20]。为了进一步研究在 $+G_z$ 作用下, 乘员出现灰视、黑视、GLOC 等异常现象与 $+G_z$ 阈值、变化率和耐受时间的关系, 各国研究人员进行了大量的人体试验。1978—1992 年间, 美国相关单位利用离心机对 888 名在加速度耐力试验中出现 GLOC 症状的飞行人员的分析结果表明^[21-24]: 由于血氧储备存在, 乘员在 5 s 内不会出现 GLOC, 当 $+G_z$ 小于 $2G$ 时, 120 s 内也不会出现 GLOC; 当 $+G_z$ 变化率在 $0.2 \sim 5 G/s$ 时, $+G_z$ 耐受时间为 $9 \sim 74 s$ ^[4,25], $+G_z$ 变化率与耐受时间关系为负相关; 另外, $+G_z$ 变化率过大容易造成乘员视网膜充血, 脊柱、肌肉和肺部损伤^[26-27], 因此, 跃变加速度(HOR)一般不大于 $9 G/s$ ^[28-29,47]。与此同时, 1978—1981 年间, 我国相关单位利用离心机对 750 名飞行人员进行了 $+G_z$ 加速度耐力测试, 测试结果表明耐力不良组的 $+G_z$ 平均基础耐力/耐受时间为 $3.45 G/10.0 s$, 耐力健康组 $+G_z$ 平均基础耐力/耐受时间为 $4.6 G/14.3 s$ ^[30-32]。在上述研究的基础上, 根据耐力不良组的测试结果, 确定了我国战斗机飞行人员的加速度耐受能力测试的合格阈值 ($3.45 G/10.0 s$)^[33]。

在 $-G_z$ 加速度的作用下, 会导致心脏和颅内血压显著增高, 乘员容易出现面部水肿、视野发红和头痛等症状^[34]。当乘员头部姿态方向背离回转中心时, 乘员经常会承受 $-G_z$ 加速度, 离心机试验表明, 人体暴露在 $-G_z$ 环境下 $2 \sim 4 s$ 后容易出现心动过缓和心率下降, 当 $-G_z$ 加速度小于 $-1G$ 时, 乘员除了心动过缓, 还有其他形式的心律失常^[35-37]。人体试验表明, $-G_z$ 的耐受范围/耐受时间约为 $-4.5 G/15 s$, $-3G/30 s$ ^[38]。

2.2 $\pm G_x$ 加速度

乘员沿 X 轴向的加减速运动中, 如初始段加速过程或者在减速段的制动过程, 会经常承受 $\pm G_x$ 加速度。

$+G_x$ 加速度作用下, 乘员被紧紧压在座椅上, 肢体难以动作。 $+G_x$ 加速度对心血管和呼吸系统的影响很少, 人体试验表明, $+G_x$ 耐受范围/耐受时间

约为 $15G/0.2 s$, $8G/150 s$ ^[39-40]。

$-G_x$ 加速度作用下, 可能导致乘员眼压增高和视网膜症状^[47-48], 人体试验表明, $-G_x$ 耐受范围/耐受时间约为 $-3G/30 s$, $-5G/10 s$ ^[39-40,46,77]。

在游乐设施运行过程中, 除头颈部外, 在座舱、安全把手和安全带等安全装置的约束下, 乘员的手脚和躯干部位均得到良好的防护; 但如果在运行中乘员的头部不能紧贴座椅靠枕或保持正确的位置, 加速度会给乘员颈部带来额外的作用力。通过对暴露在加速度环境下的 1 912 名飞行人员的调查结果表明, 71.3% 的乘员曾有过颈部不适症状, 有 33.7% 的乘员曾有过颈部疼痛症状^[56]。在 $-G_x$ 加速度作用下, 乘员躯体和头部会有前倾趋势, 在安全带和安全压杠的约束下, 乘员躯体和头部不能和头颈部同步向前移动, 于是乘员头部会发生向前鞭甩动作, 引起颈部不适。当头部和躯体相对加速度超过 $1 G$ 时, 有可能造成颈肌拉伸率超过其极限, 导致颈肌拉伤, 甚至产生颈椎骨折、韧带撕裂、椎间盘退变和椎间盘突出等症状^[44-48]。进一步研究表明, 由于人体颈部生理结构特点, 在 $+G_z$ 加速度作用下, 每 $+1 G_z$ 可以衍生出 $-0.12 G_x$ ^[43], 乘员暴露在持续 $2G \sim 5G$ 的 $\pm G_x$ 、 $\pm G_y$ 、 $\pm G_z$ 加速度环境中都会有颈部受伤的风险^[41]。

2.3 $\pm G_y$ 加速度

乘员绕 Y 轴向的偏转运动中, 游乐设施沿着水平轨道左右转弯时, 会经常承受 $\pm G_y$ 加速度。

$\pm G_y$ 加速度作用下, 乘员容易产生侧向晃动或者位移, 造成磕碰损伤。单纯的 $\pm G_y$ 加速度对人的生理影响较小, 乘员对 $\pm G_y$ 的耐受能力一般不超过 $\pm 2G$, 耐受时间为 $30 \sim 45 s$, 由于人体心脏位置因素, 乘员承受 $+G_y$ 加速度时比 $-G_y$ 加速度难受^[49]。

2.4 $\pm G_y$ 加速度的推拉效应

在运动过程中, 乘员会经常从承受小于 $+1 G_z$ 的加速度环境, 迅速转入承受大于 $+1 G_z$ 的加速度环境, 这种过程俗称叫做“推拉动作”(PPM), 由此产生的加速度效应称为“推拉效应”(PPE)^[50]。大量的旋转床、离心机试验和飞行实践表明, 在推拉动作中, $-G_z$ 加速度环境下会引起头部血压增高, 心率下降, 血管扩张等症状, 在转入 $+G_z$ 环境时, 由于人体生理代偿机制对加速度变化难以迅速反应^[4,25], 这些生理效应不能立即消除, 造成 $+G_z$ 耐受能力降低^[51]; 乘员暴露在 $-G_z$ 环境下时间超过 $2 s$ 时, 会导致乘员 $+G_z$ 耐受能力降低 $1G$ 以上, 且 $-G_z$ 暴露时间越长, $-G_z$ 值越大, $+G_z$ 耐力下降越明显^[52-54], 当人体处于从 $-G_z$ 到 $+G_z$ 的快速过渡的加速度环境下,

推拉效应会显著增加乘员发生 ALOC 和 GLOC 的风险^[55-57]。

对于诸如模仿船舶波涛起伏运动的“海盗船”、“弹跳机”等游乐设施,其运动过程中 G_z 幅值范围一般为 $0 \sim 2.5 G$,当游乐设施开始运行 10 s 左右后,乘员的 $+G_z$ 的耐受能力降低为 $2G$ ^[50-54],在推拉效应作用下,乘员的 $+G_z$ 耐受能力会进一步降低,有时甚至小于设备运行产生的 G 值,如图 2、3 所示,乘员容易出现眩晕、呕吐甚至 ALOC 现象,严重威胁身体安全。因此,乘坐海盗船等 $\pm G_z$ 反复切换的游乐设施,推拉效应的影响不容忽视,单次运行时间以不超过 120 s 为宜^[4]。

图 2 典型推拉作用的游乐设施——海盗船

图 3 海盗船加速度实测曲线

对于加速度变化更剧烈的过山车,在设计俯冲+爬升段轨迹时,应增加一个螺旋环段作为过渡段,可以把爬升段顶部和后续俯冲段的 $-G_z$ 加速度变为 $+G_z$ 加速度,增加乘员的加速度耐受能力和耐受时间,如图 4 所示。

2.5 多轴加速度复合效应

为了提高游乐的刺激性,游乐设施的运动轨迹和运动速度会经常变化,在这种情况下,乘员会同时承受 $\pm G_x$ 、 $\pm G_y$ 、 $\pm G_z$ 加速度和各种角加速度,这种多轴持续加速度在游乐设施运动中广泛存在,如图 4、5

所示。 $G_y \sim G_z$ 复合加速度可以增强 G_z 耐受范围 ($+0.5 G$); $G_x \sim G_z$ 复合加速度可以降低 G_z 耐受范围 ($-0.25 G$)^[62,63],在持续 30 s 的 $\pm G_y \sim G_z$ 作用人体时,峰值作用持续 10~20 s 之后,动脉血氧饱和度开始下降,从而会导致 $+G_z$ 耐力下降^[49];在多轴加速度的作用,乘员身体会侧倾或前俯,安全压杠和扶手等约束装置有助于乘员保持身体姿态稳定,客观上也收紧了肌肉,相应提高了眼脑部的供血能力和加速度耐受能力,多轴加速度对人体生理影响如表 1 所示。

图 4 过山车(爬升段+螺旋段)

图 5 过山车俯冲段+螺旋段加速度实测曲线

目前多轴加速度对人体的生理影响原因尚不明确^[64],为了描述在多轴加速度环境下的加速度风险,可以利用人体头部冲击伤害 HIP 指数^[65]来反映加速度、速度和时间对人体的综合效应,如式(2)所示

$$\begin{aligned} HIP = & 4.5a_x \int_{t_0}^{t_1} a_x dt + 4.5a_y \int_{t_0}^{t_1} a_y dt + \\ & 4.5a_z \int_{t_0}^{t_1} a_z dt + 0.016a_x \int_{t_0}^{t_1} a_x dt + \\ & 0.024a_y \int_{t_0}^{t_1} a_y dt + 0.022a_z \int_{t_0}^{t_1} a_z dt \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 人体持续加速度耐受范围

加速度类型	加速度耐受值/耐受时间	加速度生理影响	加速度控制措施
$+G_z$	2~6G/45 s	ALOC, GLOC	安全带、安全压杠, 收紧肌肉, 调整呼吸
$+G_z$	-4.5G/15 s -3G/30 s	心脏和颅内血压增高, 面部水肿、视野发红、头痛	安全带、安全压杠, 收紧肌肉, 调整呼吸
$+G_x$	15G/0.2 s, 8G/150 s	肢体运动受限, 颈部不适	安全带、安全压杠
$-G_x$	-5G/10 s, -3G/30 s	结膜炎、视网膜症状、颈部不适	安全带、安全压杠, 收紧肌肉
$\pm G_y$	$\pm 2G/35\sim 40$ s	左右摇摆造成磕碰损伤	安全带、安全压杠
$G_y \sim G_z$	$G_z: -2G\sim 6G,$ $G_y: \pm 3G/40\sim 50$ s	ALOC, GLOC, $\pm G_y$ 提高了 G_z 阈值	安全带、安全压杠, 收紧肌肉, 调整呼吸
$G_x \sim G_z$	$G_z: -2G\sim 6G,$ $G_x: -2\sim 6/40\sim 50$ s	ALOC, GLOC, $\pm G_x$ 降低了 G_z 阈值	安全带、安全压杠, 收紧肌肉, 调整呼吸
科氏加速度	Ac	恶心、头晕等不适	安全带、安全压杠, 收紧肌肉, 调整呼吸

式中, $t_0\sim t_1$ 为游乐设施运行时间, $a_{x,y,z}$ 为 X, Y, Z 三轴线加速度, $a_{x,y,z}$ 为围绕 X, Y, Z 三轴旋转的角加速度。

式(2)表明, HIP 指数和加速度幅值、作用时间正相关, 加速度作用时间越长, 作用强度越大, 乘员面临的风险也越大, 因此也可以把 HIP 指数作为游乐设施加速度的风险控制指标。

3 科氏加速度生理影响和耐受范围

科氏加速度(Coriolis acceleration)是指乘员身体围绕 Z 轴作偏转时, 其头部围绕另一个相互垂直的轴(X 轴、 Y 轴)同时做滚转或者仰俯运动所产生的一种附加加速度。乘员在乘坐游乐设施或者乘坐车、船、飞机时, 常处于摆动、回转和滚转复合运动状态, 这些运动产生的科氏加速度作用于大脑前庭器官, 容易引起诸如头晕、恶心等运动病^[66-68], 如图 6、7 所示。

人体对科氏加速度普遍易感, 严重影响游乐设施的乘坐安全和乘坐体验, 据统计, 健康人员中科氏加速度不耐受者约占 31%, 耐受时间小于 90 s^[69]。

图 6 典型科氏加速度游乐设施——大摆锤

图 7 大摆锤加速度测试曲线

在游乐设施中, 科氏加速度耐力可以用来表征乘员前庭系统对各种加速度刺激的耐受程度, 由于该耐力水平与眩晕反应程度之间具有高度的相关性, 也可以用来表征乘员对眩晕反应程度^[70]。科氏加速度主观感觉的量值与乘员角速度的大小和科氏加速度作用时间长短有关, 科氏加速度耐力值 Ac ^[71] 可以用式(3)计算。

$$A_c = 0.3\Omega\omega t \leq 6.0\pi^2 \tag{3}$$

式中, Ω 为摆动角速度, ω 为自转角速度, t 为运行时间。

从式(3)可以看出, 科氏加速度耐力值 A_c 与摆动角速度 Ω , 自转角速度 ω 之间关系为正相关。因此, 可以通过限制游乐设施的运转时间、摆动角速度 Ω 或自转角速度 ω 来降低科氏加速度对乘员的影响, 这一结论对提高游乐设施的乘坐体验和安全性具有重要意义。

4 冲击加速度生理影响和耐受范围

游乐设施运动过程中, 尤其是在弹射、制动、

碰撞等阶段往往会产生冲击, 过大的冲击加速度会引起人体器官的损伤, 进而引起乘员丧失行动能力, 甚至造成乘员的伤亡。因此, 降低乘员冲击加速度, 避免冲击损伤或者将损伤风险降到最低, 成为游乐设施乘员抗冲击设计的基本原则^[72]。在人体试验的基础上, 从舒适性角度出发, $+G_z$ 冲击加速度不宜超过 $3 G$, ROR 不宜超过 $3 G/s$ 。详见图 8、9。

图 8 典型冲击加速度游乐设施—弹跳机

图 9 弹跳机 Z 方向冲击加速度测试曲线

影响乘员冲击加速度耐受能力的因素主要是冲击载荷特性、乘员体质差别、承受冲击姿态和个体防护状况, 对乘员进行充分约束, 避免头、胸部等关键部位与周围结构的撞击, 可以有效降低冲击的伤害。人体在承受不超过 $0.2s$ 的冲击加速度时^[73], 人体对各方向的冲击加速度耐受能力如表 2 所示。50%的假人试验和人体试验表明, 在 30° 的仰俯位置, 人体 $+G_z$ 和 $+G_x$ 方向上可以承受 $11 G$ 左右的复合冲击加速度作用, 为了降低人体在 Z 方向上的垂直运动时的滚转运动, 降低 $\pm G_z$ 的推拉效应, 乘员座椅倾角应限制在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 范围内, 在此范围内人体重心变化范围不超过 $10 cm$, 冲击力应尽量通过人体重心^[74-75]。

表 2 人体全身冲击加速度耐受范围

加速度方向	冲击加速度耐受阈值(G)/持续时间(s)	加速度生理影响	加速度控制措施
$+G_x$	40/0.1, 10-40/0.1~1	擦伤、青肿, 头颈部不适	乘员充分约束
$-G_x$	40/0.1	擦伤、青肿, 头颈部不适	乘员充分约束
$+G_y$	9/0.1	擦伤、青肿, 头颈部不适	乘员充分约束
$-G_y$	9/0.1	擦伤、青肿, 头颈部不适	乘员充分约束
$+G_z$	18/0.1	擦伤、青肿, 腰椎不适	乘员充分约束, 作用力通过人体或座舱重心
$-G_z$	10/0.1 5~6/0.1~0.2	擦伤、青肿, 肩部不适	乘员充分约束, 作用力通过人体或座舱重心

在上述研究的基础上, 基于乘员加速度耐受性考虑, 国内外游乐设施标准, 如美国 ASTM F2291-2019^[58]、欧盟 EN13814-2019^[59]、ISO/TS 17929-2014^[60]和中国 GB8408-2018^[61]标准中均将乘员的 $+G_z$ 的耐受范围/耐受时间规定为 $6 G/1 s$ 和 $4G/4 s$ 。为了进一步降低乘员加速度和运动病风险, 考虑乘坐安全性、刺激性和舒适性、飞行人员与普通健康人群耐受能力区别和中外人种身体素质差异等因素, 中国特种设备检测研究院提出: 中国游乐设施乘员 G_z 的耐受阈值应在中国飞行人员加速度耐力不良组耐受能力试验结果($3.45 G/10.0 s$)^[33]的基础上进一步降低, 从 $6 G/1 s$, $4G/4 s$, $3G/12 s$ ^[60-61], 降低到 $6 G/1 s$, $3.4G/4 s$, $3G/10 s$ ^[30-33,76], 在存在推拉效应的场合, G_z 的耐受阈值还应进一步减小至 $5G/1.5 s$, $2G/6 s$ ^[37,52-54,76], 如图 10 所示。

5 结论和展望

游乐设施加速度会给乘员带来潜在的伤害, 为了保证乘客安全, 最重要的就是在设计阶段合理限制加速度幅值, 保持正确乘员的约束方式, 避免乘员暴露在 $\pm G_z$ 加速度反复切换的加速度环境中, 降低加速度推拉效应和科氏加速度的影响。在使用阶段通过正确的引导, 进一步降低加速度的危害, 减少乘员不必要的风险。

本文依据人体加速度生理学理论, 结合游乐设施的自身特点, 在分析、总结了前人研究成果的基础上, 揭示了游乐设施各方向的加速度、加速度推拉效应和科氏加速度对乘员的生理影响, 给出了针对性的加速度风险控制措施和符合我国生理人群特征的游乐设施 Z 方向加速度耐受阈值曲线, 初步解

决了困扰我国游乐设施设计过程中加速度风险控制
的难题, 为游乐设施设计提供了理论指导。

本文的乘员加速度耐受数据主要是基于成年健康男性飞行人员的生理试验数据提出的, 由于人体生理数据具有时效性和差异性, 因此, 游乐设施加速度对乘员的生理影响和设计方法的研究仍处在起步阶段, 在乘员加速度相关理论、技术和应用仍需要进行大量的研究工作。为了提高游乐设施的设计水平, 提高游乐设施使用管理水平, 还需对如下重大科学问题和关键技术开展研究。

(1) 游乐设施加速度刺激对普通健康人群组, 不同年龄组, 不同性别组、东西方人种组和符合我国生理人群特征乘员组之间加速度耐受能力的影响机理。

(2) 游乐设施特有短周期、重复加速度刺激对乘员耐受能力累加效应和游乐设施冲击、振动载荷对乘员生理影响机理。

(3) 游乐设施乘员约束方式、乘员加速度风险之间的内在联系和作用机理, 研究基于风险控制的游乐设施加速度分级设计方法和游乐设施制造、使用过程的分级管理方法, 实现游乐设施刺激性、安全性和舒适性的协调统一。

(4) 各国游乐设施乘员加速度标准比较研究。

参考文献

- [1] GELL C F. Table of equivalents for acceleration terminology recommended for general international use by the Acceleration Committee of the Aerospace Medical Panel, AGARD[J]. Aerospace Medicine, 1961, 32(32):

- 1109-1111.
- [2] 王亚伟, 柳松杨, 都承斐, 等. 基于飞行仿真的 Herbst 机动飞行员过载分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(4): 346-350.
- WANG Yawei, LIU Songyang, DU Chengfei, et al. Pilot load analysis under Herbst maneuver based on flight simulation[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2014, 29(4): 346-350.
- [3] BURTON R R. A conceptual model for predicting pilot group G tolerance for tactical fighter aircraft[J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 1986, 57(8): 733-744.
- [4] WHINNERY F. The $+G_z$ -induced loss of consciousness curve[J]. Extreme Physiology & Medicine, 2013, 19(2): 1-10.
- [5] ZUIDEMA M D, GEORGE D. Gravitational stress in aerospace medicine[J]. Postgraduate Medical Journal, 1962, 38: 361.
- [6] WOOD E H. Some effects of the force environment on the heart, lungs and circulation[J]. Clinical and Investigative Medicine, 1987, 10(5): 401-427.
- [7] BURTON R R, LEVERETT S D, MICHAELSON E D. Man at high sustained $+G_z$ acceleration: A review[J]. Aerospace medicine, 1974, 45(10): 1115-1136.
- [8] BURTON R R. Biodynamics: sustained acceleration [M]. Philadelphia: Fundamentals of Aerospace Medicine, 2002.
- [9] WHINNERY J E, SHAFFSTALL R M. Incapacitation time for $+G_z$ -induced loss of consciousness[J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 1979, 50(1): 83-85.
- [10] WOOD E H, HOFFMAN E A. The lungs, 'Achilles Heal', of air breathers in changing gravitational-inertial force environments[J]. Physiologist, 1984, 27(1): 47-48.

- [11] BURTON R R, SMITH A H. Adaptation to acceleration environments[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [12] HREBIEN L. Blood flow measurements under high-g conditions: Early prediction of G_z tolerance[R]. New York: Naval Air Development Center, 1983.
- [13] BURNS J W. Re-evaluation of a tilt-back seat as a means of increasing acceleration tolerance[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1975, 46(1): 55-63.
- [14] BURTON R R. Mathematical models for predicting G-level tolerances[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2000, 71(5): 506-513.
- [15] VOGEL V M. Comparison of several G-tolerance measuring methods at various seatback angles[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1978, 49(2): 377-383.
- [16] PRINGLE S D, MACFARLANE P W, COBBE S M. Response of heart rate to a roller coaster ride[J]. BMJ: British Medical Journal, 1989, 299(6715): 1575-1579.
- [17] KUSCHYK J, HAGHI D, BORGGREFE M, et al. Cardiovascular response to a modern roller coaster ride[J]. JAMA, 2007, 298(7): 739-741.
- [18] WHINNERY J E, LAUGHLIN M H, UHL G S. Coincident loss of consciousness and ventricular tachycardia during + G_z stress[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1980, 51(8): 827-831.
- [19] BANKS R D, BRINKLEY J W, ALLNUTT R, et al. Human response to acceleration[M]. 4th ed. Philadelphia: Fundamentals of Aerospace Medicine, 2008.
- [20] LEVERETT S D, WHINNERY J E. Biodynamics: sustained acceleration[M]. Philadelphia: Fundamentals of Aerospace Medicine, 1985.
- [21] WHINNERY J E, WHINNERY A M. Acceleration-induced loss of consciousness: A review of 500 episodes[J]. Archives of Neurology, 1990, 47(7): 764-776.
- [22] GREEN N D C, FORD S A. G-induced loss of consciousness: Retrospective survey results from 2259 military aircrew[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2006, 77(6): 619-626.
- [23] FORSTER E M. A database to evaluate + G_z acceleration-induced loss of consciousness (GLOC) in the human centrifuge[R]. Warminster, PA: Naval Air Warfare Center, 1993.
- [24] FORSTER E M, WHINNERY J E. Statistical analysis of the human strangulation experiments: Comparison to + G_z - induced loss of consciousness[R]. New York: Naval Air Warfare Center, 2019.
- [25] MOORE T W, JARON D, HREBIEN L, et al. A mathematical model of G time-tolerance[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1993, 64(10): 947-951.
- [26] PELLETIER A R, GILCHRIST J. Roller coaster related fatalities, United States, 1994-2004[J]. Injury Prevention, 2005, 11(5): 309-312.
- [27] FREEMAN M D, CROFT A C, NICODEMUS C N, et al. Significant spinal injury resulting from low-level accelerations: A case series of roller coaster injuries[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2005, 86(11): 2126-2130.
- [28] ARAT Y Ö, VOLPI J, ARAT A, et al. Bilateral internal carotid artery and vertebral artery dissections with retinal artery occlusion after a roller coaster ride case report and a review[J]. Ulus. Travma. Acil. Cerrahi. Derg., 2011, 17: 75-78.
- [29] GREEN N D C. Effects of long-duration acceleration[J]. Ernsting's Aviation Medicine, 2006, 1(4): 137-158.
- [30] 陆霞, 王璇, 颜桂定, 等. 高性能战斗机飞行员加速度耐力选拔方法和标准的探讨[J]. 中华航空医学杂志, 1995, 6(1): 14-17.
- LU Xia, WANG Xuan, YAN Guiding, et al. Exploration of screening method and standard for + G_z tolerance of high performance fighter pilots. Chinese Journal of Aerospace Medicine [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2006, 17(3): 185-190.
- [31] 金朝, 耿喜臣, 陆霞, 等. 580 例歼击机飞行员的基础 + G_z 耐力检查结果分析[J]. 中华航空航天医学杂志, 2006, 17(3): 185-190.
- JIN Zhao, GENG Xichen, LU Xia, et al. Analysis of the relaxed + G_z tolerance records of 580 fighter pilots. Chinese Journal of Aerospace Medicine [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2006, 17(3): 185-190.
- [32] 耿喜臣, 颜桂定, 金朝. 航空加速度生理学的应用[J]. 航空军医, 2004, 1(4): 189-196.
- GENG Xichen, YAN Guiding, JIN Zhao. Research and application of aviation acceleration physiology[J]. Flight Surgeon, 2004, 1(4): 189-196.
- [33] 中国人民解放军总后勤部. 飞行员持续性正加速度耐力的检查方法和评定: GJB 3293-1998[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 1998.
- General Logistics Department of the Chinese People's Liberation Army. Assessment and test methods of sustained positive acceleration tolerance for pilots: GJB 3293-1998[S]. Beijing: General Logistics Department of the Chinese People's Liberation Army, 1998.
- [34] HOWARD P. The physiology of negative acceleration[R]. AIAA, 1965.
- [35] BANKS R D, GRAY G. "Bunt bradycardia": two cases of

- slowing of heart rate inflight during negative G_z [J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1994, 65(4): 330-331.
- [36] BANKS R D, BRINKLEY J W, ALLNUTT R, et al. Human response to acceleration[M]. 4th ed. Philadelphia: Fundamentals of Aerospace Medicine, 2008.
- [37] SHERIFF D D, NADLAND I H, TOSKA K. Hemodynamic consequences of rapid changes in posture in humans[J]. Journal of Applied Physiology, 2007, 103(2): 452-458.
- [38] CHRISTY R L. Effects of radial, angular, and transverse acceleration[J]. Aerospace Medicine, 1971, 1(2): 167-197.
- [39] KUMAR K V, NORFLEET W T. Issues on human acceleration tolerance after long-duration space flights[R]. New York: NASA, 1992.
- [40] SMITH S D. Cockpit seat and pilot helmet vibration during flight operations on aircraft carriers[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2004, 75(3): 247-254.
- [41] GREEN N D C. Acute soft tissue neck injury from unexpected acceleration[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2003, 74(10): 1085-1090.
- [42] LEWIS S. Human tolerance to abrupt deceleration[R]. Florida: Crash Survival Investigator's School, 1974.
- [43] COAKWELL M R, BLOSWICK D S, MOSER R. High-risk head and neck movements at high G and interventions to reduce associated neck injury[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2004, 75(1): 68-80.
- [44] 张选斌, 唐勇, 岳洪梅. $\pm G_x$ 加速度对航母舰载机飞行员的影响及防护对策[J]. 人民军医, 2013, 56(10): 1124-1125.
- ZHANG Xuanbin, TANG Yong, YUE Hongmei. Influence of $\pm G_x$ acceleration on pilots of carrier-borne aircraft of aircraft carrier and protective measures[J]. People's Military Surgeon, 2013, 56(10): 1124-1125.
- [45] 柳松杨, 丛红, 王鹤, 等. 军机飞行员的颈部损伤研究[J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 262-265.
- LIU Songyang, CONG Hong, WANG He, et al. Study on neck injuries in military pilots [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2010, 25(4): 262-265.
- [46] 包佳仪, 王兴伟, 周前祥, 等. 阻拦着舰过程中飞行员颈部的损伤分析与预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(3): 499-507.
- BAO Jayi, WANG Xingwei, ZHOU Qianxiang, et al. Analysis and prediction of neck injury of pilots during carrier aircraft arrest deck-landing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45 (3) : 499-507.
- [47] 徐立. 高性能飞机飞行员非冲击性颈部损伤的研究进展[J]. 中华航空医学杂志, 1996, 7(2): 120-122.
- XU Li. Non-impact cervical injuries in pilots of high performance aircraft. [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1996, 7(2): 120-122.
- [48] PANJABI M M, ITO S, IVANCIC P C, et al. Evaluation of the intervertebral neck injury criterion using simulated rear impacts[J]. Journal of biomechanics, 2005, 38(8): 1694-1701.
- [49] 徐艳, 雍伟, 卫晓阳. $\pm G_x$ 或 $\pm G_y$ 与 $+G_z$ 复合作用对人体抗荷耐力的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2015, 28(5): 336-340.
- XU Yan, YONG Wei, WEI Xiaoyang. Effects of combining $\pm G_x$ or $\pm G_y$ with $+G_z$ acceleration on anti-G tolerance. [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2015, 28(5): 336-340.
- [50] 张五星, 詹长录, 耿喜臣. 在加速度作用中的推拉效应[J]. 中华航空航天医学杂志, 1999, 10(1): 54-57.
- ZHANG Wuxing, ZHAN Changlu, GENG Xichen. The push-pull effect during acceleration stress [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1999, 10(1): 54-57.
- [51] 张五星, 詹长录, 耿喜臣, 等. 旋转床模拟推拉动作的心血管效应[J]. 中华航空航天医学杂志, 2000, 11(3): 149-152.
- ZHANG Wuxing, ZHAN Changlu, GENG Xichen, et al. Cardiovascular responses to rotation table simulated push-pull maneuver[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2000, 11(3): 149-152.
- [52] LEHR A K, PRIOR A R J, LANGEWOUTERS G, et al. Previous exposure to negative G_z reduces relaxed $+G_z$ tolerance[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1992, 63(5): 405-405.
- [53] PRIOR A R J. Negative to positive G_z acceleration transition[R]. SEEN95-3405012-54, 1995.
- [54] ZHANG W X, ZHAN C L, GENG X C, et al. Decreased $+G_z$ tolerance following lower body positive pressure: simulated push-pull effect[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2001, 72(11): 1045-1047.
- [55] MICHAUD V J, LYONS T J. The "push-pull effect" and G-induced loss of consciousness accidents in the US Air Force[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1998, 69(11): 1104-1106.
- [56] BANKS R D, GRISSETT J D, SAUNDERS P L, et al. The effect of varying time at $-G_z$ on subsequent $+G_z$ physiological tolerance (push-pull effect)[J]. Aviation, Space and Environmental Medicine, 1995, 66(8): 723-727.
- [57] CHEUNG B, BATEMAN W A. The G transition effect revisited-a broader flight safety threat than push-pull [R]. ONTARIO: Defence and Civil Inst. of Environmental Medicine, 1999.

- [58] ASTM. Standard practice for design of amusement rides and devices: ASTM F2291-2019[S]. ASTM International, 2019
- [59] CEN/TC 152. Safety of amusement rides and amusement devices. EN13814-2019[S]. London: British Standard, 2018.
- [60] IHS. ISO/TC 254 Safety of amusement rides and amusement devices. Biomechanical effects on amusement ride passengers. ISO TS 17929-2014[S]. Geneva: ISO, 2014
- [61] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化委员会. 大型游乐设施安全规范: GB8408-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State administration for market supervision and administration, China Standardization Administration. Large-scale amusement device safety code: GB8408-2018 [S]. Beijing: China Standard Press, 2018.
- [62] TRIPATHY N K, TYAGI P K. Analysis of multi-axis acceleration profile in a Supermanoeuvrable aircraft[J]. Indian Journal of Aerospace Medicine, 2006, 50(2): 7-12.
- [63] ALBERY W B. Acceleration in other axes affects $+G_z$ tolerance: dynamic centrifuge simulation of agile flight[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2004, 75(1): 1-6.
- [64] TRIPATHY N K. Analysis of combat acceleration profiles and multi-axis acceleration profiles in Sukhoi-30 MKI aircraft[R]. Hamburg: Institute of Aerospace Medicine, 2006.
- [65] PFISTER B J, CHICKOLA L, SMITH D H. Head motions while riding roller coasters: implications for brain injury[J]. The American Journal of Forensic Medicine and Pathology, 2009, 30(4): 339-345.
- [66] COLLINS W E. Coriolis vestibular stimulation and the influence of different visual surrounds[J]. Aerospace Medicine, 1968, 39(2): 125-130.
- [67] SINHA R. Effect of vestibular Coriolis reaction on respiration and blood-flow changes in man[J]. Aerospace Medicine, 1968, 39(8): 837-844.
- [68] GILLINGHAM K K. Some notes on the threshold of the vestibular Coriolis effect and its significance to aircrew[R]. SAM-TR-65-55, Brooks AFB, 1965.
- [69] 刘正, 于立身, 王奎年, 等. 阶梯式累加 Coriolis 加速度刺激法对晕机病易感性的预测[J]. 中华航空航天医学杂志, 1998, 9(2): 97-101.
- LIU Zheng, YU Lishen, WANG Kuinian et al. Using step up cumulative Coriolis acceleration as a method for predicting air sickness susceptibility[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 1998, 9(2): 97-101.
- [70] 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.
- [71] 包德海, 曹祚焕, 况友富, 等. 舰艇人员晕船敏感性检查方法研究[C]//中国生理学会第六届应用生理学委员会全国学术会议论文摘要汇编, 2003.
- BAO Dehai, CAO Zuohuan, KUANG Youfu, et al. A study on sensitivity test of seasickness for ship personnel [C]//Proceedings of the 6th National Conference of Applied Physiology Committee of Chinese Physiological Society, 2003.
- [72] BALASUBRAMANIAN S, SEACRIST T, MALTESE M, et al. Head and spinal trajectories in children and adults exposed to low speed frontal acceleration[J]. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 2009, 1(6): 15-18.
- [73] SHANAHAN D F. Human tolerance and crash survivability[R]. New York: Aircraft Accident Investigation Bureau, 2004.
- [74] 谈诚, 国耀宇, 杨鸿慧, 等. 30° 仰卧位不同 G 值冲击下真人和假人的动态响应输出[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(2): 84-88.
- TAN Cheng, GUO Yaoyu, YANG Honghui, et al. Dynamic responses of human body and human surrogate to different impacts under 30° supine position[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2005, 18(2): 84-88.
- [75] CHAFFEE J W. The effect of acceleration on human centers of gravity[R]. Falls Church: General Dynamics, 1961.
- [76] GOODMAN L S, GROSMAN-RIMON L, MIKULISZYN R. Carotid sinus pressure changes during push-pull maneuvers[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2006, 77(9): 921-928.
- [77] 白净. 血液循环系统仿真[J]. 中国科学基金, 1995(2): 112-116.
- BAI Jing. Digital simulation of circulation system[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 1995(2): 112-116.

作者简介: 肖原, 男, 1972 年出生, 研究员。主要研究方向为机电测控与安全评价技术。

E-mail: xyduong@163.com

沈功田(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为特种设备安全与无损检测新技术。

E-mail: shengongtian@csei.org.cn

胡斌, 男, 1977 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为智能检测监测技术。

E-mail: hubin@csei.org.cn