

人体对三级起飞加速度的反应

谢宝生 刘光远 程学尧 薛月英

(航天医学工程研究所)

摘 要

航天员在飞船起飞时,常会遇到二级或三级加速度作用。为了解这种类型加速度对人体的影响,在人体离心机上,在背角为 15° 情况下,十名健康的青年被试者承受了峰值分别为 $+4G_x$ 、 $+6G_x$ 和 $+5G_x$ 、每级作用时间为 150 秒的三级加速度作用。实验中记录了被试者的心电、血压、心振动图、脑阻抗图和呼吸情况,分析和讨论了某些重要的生理指标的变化。结果表明,被试者的主观感觉是良好的,生理指标变化处于正常代偿范围之内,较好地耐受了上述三级起飞加速度的作用。

一、引 言

宇宙飞船要想在离地球表面 200—250 公里高度上飞行,需要具有大约 8 公里/秒的地球轨道速度,这就要大约 828G 秒才能获得,因此,在飞船起飞时必须采用多级运载工具加速。

不论是三级还是二级加速曲线,都具有以下几个特点:1. 加速度作用的总时间较长;2. 每一级的加速度增长率较小;3. 两级交替时加速度的减小很剧烈。

对于这种类型的加速度,航天员能否耐受,对航天员的生理功能和工作效率会带来哪些影响,苏美两国在送人上天之前却曾做过不少的实验^[1-3],结果表明,大部分被试者能较好地耐受这种加速度作用,但在 $+G_x$ 值较高时,也会产生不良影响。

下面介绍我们所作实验情况。

二、实 验 方 法

实验设备:1. 一台大型人体离心机,半径 6 米,吊篮里装有背角 (α) 为 15° 、大腿与躯干夹角为 110° 的固定躺床,躺床上放有半合体式泡沫塑料床垫。2. 记录仪器为意大利 PA8a 型多导生理记录仪一台。

实验对象为 10 名 18—23 岁健康青年,无心血管疾病,前庭功能良好。

加速度的作用方向为背-胸向,即 $+G_x$,加速度的变化规式为三级曲线(图 1): 第一级峰值为 $+4G_x$,第二级峰值为 $+6G_x$,第三级峰值为 $+5G_x$,每级作用时间为 150 秒,从

前一级峰值到下一级最低值时间约为 10 秒,即每一级上升率不大于 $1G/20\text{sec}$,下降率不大于 $1G/2\text{sec}$ 。

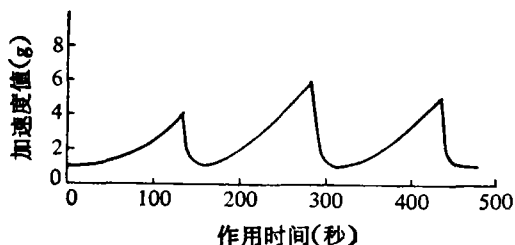


图 1 三级加速度曲线模式图

Fig. 1 Three stage acceleration profile

值时各以低速为 50mm/sec 的速度记录 10 秒外,其它部分均以 5mm/sec 的速度连续记录。

为了保证实验过程中主试人员能及时了解被试者的生理机能状态和面部表情,我们进行了心电、心率和电视监视,并安装了通话和警铃,以保证主试人与被试者和机务员随时联系和实验安全。在实验过程中,如果被试者出现心率大于 160次/min 或小于 50次/min 或频发性期前收缩 8 次以上/全实验或胸痛和呼吸难以忍受或前庭症状较重,便终止实验。

实验安排: 每一名被试者在离心机上做三次实验,第一次是在离心机上体验,熟悉离心机环境,离心机按三级曲线中第一级曲线旋转。第二次对三级起飞曲线体验,不做生理指标记录。第三次为正式实验。二次实验间隔不少于二天。

三、实验结果

一般耐受情况

在本实验中,包括三级 $+G_x$ 加速曲线的正式实验和实验前的熟悉体验在内,10 名被试者共进行了 30 次实验,全部顺利通过。大部分被试者感到胸部有些压力,有 7 名被试者心窝处有轻微疼痛感,其中一名较重。部分被试者颈部感到有些压力,对呼吸有些妨

表 1 在 $+G_x$ 三级加速曲线作用下,被试者的主观感觉

被试者	胸部感觉	呼吸情况	视觉变化	前庭反应	其 它
宋××	感到压力	费力	无	轻度头晕	下滑时有站立感 下滑时有站立感 下滑时有站立感
陈××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
吕××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
高××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
张××	感到压力	费力	无	无	
潘××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
赵××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
裴××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	下滑时有站立感
李××	剑突下痛感	费力	无	轻度头晕	
潘××	感到压力	费力	无	无	

碍,采取吞咽动作后有些改善。大部分被试者呼吸感到费力,没有出现视觉症状现象。在离心机急剧减速时,大部分被试者感到轻度头晕,部分有站立感,出仓后有头重脚轻飘浮感,但休息一段时间后即消失。总之,10名被试者感觉是良好的,较好地耐受+G_x 三级起飞曲线的作用(表1)。

各种生理指标的变化:

在三级+G_x起飞曲线作用下,被试者各种生理指标的变化虽因个体差异有所不同,但基本的变化趋势大体一致,一般都在代偿范围之内,不致影响对三级起飞曲线耐力的评价。

图2为10名被试者在三级+G_x曲线作用下,心率平均值的变化曲线。从中可以看到,在超重作用下,心率比转前对照值为高,但变化的幅度不大,大体在65—85次/min的范围内,并且有随着G值的增高而增加的趋势。当离心机停车后,心率很快降到转前对照水平。同时观察到了个体差异,发现了三种不同类型的心率反应类型,第一种类型表现为心率随着G值的升高而增加,具有三级曲线的规式,属于这种类型的人有6名被试者。第二种类型表现为心率变化不明显,整个实验过程心率维持在一个较稳定的水平上,属于这种类型的人有3名被试者。最后一种类型表现在每级开始时心率较高,每级中间心率降低,并且低于平时基础水平,随后又逐渐升高,属于这一类型的被试者仅有1名(图3)。

图4为10名被试者在三级+G_x曲线作用下,心脏活动时相的变化趋势。结果表明,不论是等容收缩期还是排血期,都在+G_x作用下而缩短,并且随着G值的升高而减小。利用 Agress 公式 $SV = -0.48[ICT] + 0.31[ET] + 16.7$ 算出心搏量^[6],发现心脏的每搏量在+G_x作用下比转前对照值略有降低。如果转前对照值为79ml/每搏,则在超重时波动在71—76ml/每搏的范围内。将每搏量乘以心律得出心输出量,又发现在三级+G_x曲线作用下,心脏每分钟输出量比转前对照值有些增加,变化的趋势和心率变化规律相似(图2)。

图5为+G_x 三级加速曲线作用下,中胸水平肱动脉血压与G值的变化关系。由图

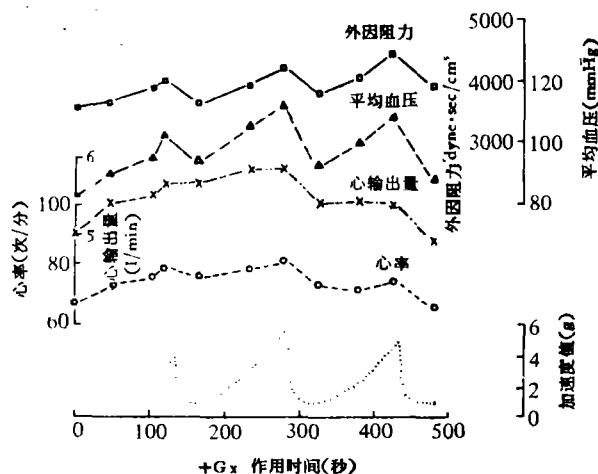


图2 三级加速度作用下心率、心输出量、平均血压及外周循环阻力的变化

Fig. 2 Changes in heart rate, cardiac output, mean arterial blood pressure and peripheral vascular resistance under three stage acceleration

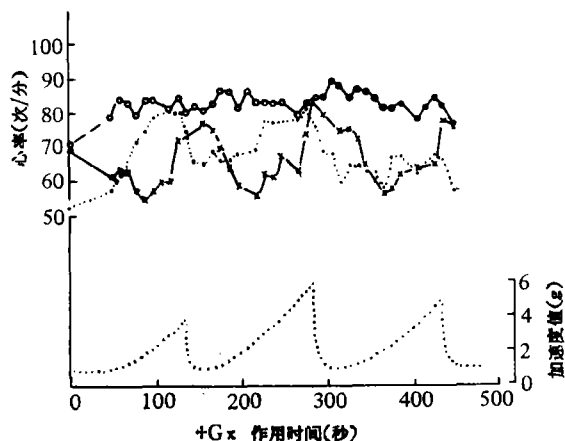


图3 三级加速度作用下心率反应的类型

○---○, ●-----●, X-X-X 分别表示三个被试者的情况

Fig. 3 Types of response of heart rate under three stage acceleration

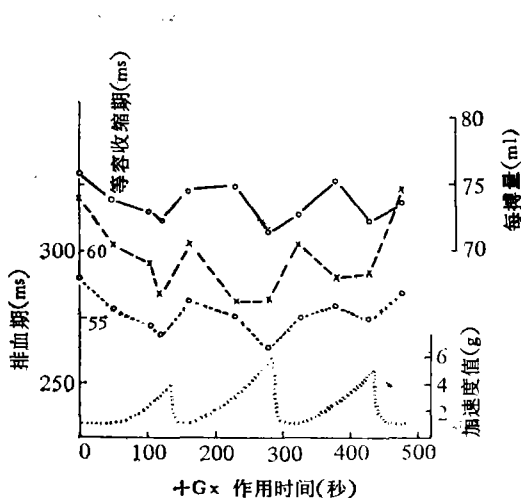


图4 三级加速度作用下心动时相及搏出量的变化

其中○—○表示每搏量, X—X表示等容收缩期,
○-----○表示排血期

Fig. 4 Changes in the dynamic phases of left ventricle and stroke volume under three stage acceleration

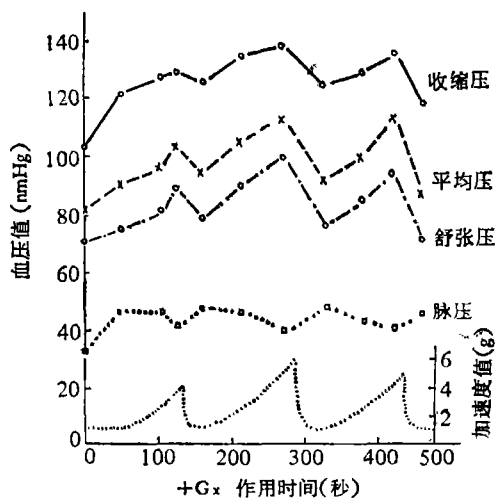


图5 三级加速度作用下被试者肱动脉血压的变化

Fig. 5 Change in blood pressure in brachial arterie under three stage acceleration

可见不论是收缩压,舒张压还是平均血压,都是随着G值的增加而增高,整个实验,血压的变化规律与三级加速度曲线的规式有很大相似,而脉压虽在+Gx作用下比转前对照值高,但有随着G值的升高而降低的表现。

如果将平均血压除以心输出量来计算外周阻力,在+Gx三级起飞曲线作用下,被试者的外周阻力是增加的,并且随着G值的升高而增加(见图2)。

从记录的心电图来看,大部分被试者有呼吸性心律不齐现象,只有一名被试者在一次实验中断断性地出现了6次房性早跳,很可能与实验前一天运动量过大、休息不好有关。

在被试者身上测量脑阻抗图时,除一名被试者外,其余九名脑阻抗图较好地记录下来。从中发现,被试者脑阻抗图的波幅在 $+G_x$ 作用下增高,并且随着 G 值的增加而升高,实验过程呈现三级曲线形式(图6)。从脑阻抗图的波形来看, G 值作用下的脑阻抗图波幅高,上升的快,下降的也快,形成一种陡峻的波形。

此外,还观察了鼻腔呼吸的变化。结果表明,随着 G 值的升高,呼吸频率有些加快,呼吸幅度有变浅的现象,少数人有呼吸不规则的现象发生,这与被试者主观感觉呼吸费力有关(图7)。

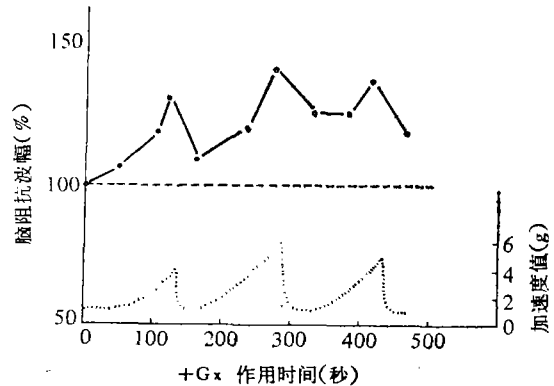


图6 三级加速度作用下被试者脑阻抗图的变化

Fig. 6 REG changes in subjects under three stage acceleration

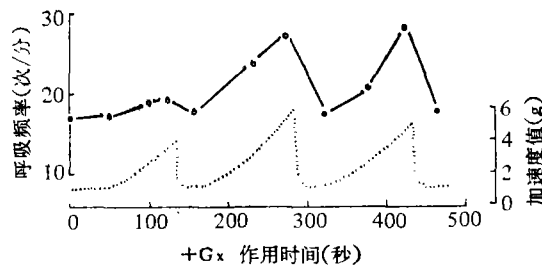


图7 三级加速度作用下呼吸频率的变化

Fig. 7 Change in respiratory rate under three stage acceleration

四、讨 论

关于 $+G_x$ 加速度对人体的影响,文献上的报道不少,概括起来主要有以下三个方面:(1)由于体位改变和全身的挤压作用,使静脉系统、肺循环系统和右心(简称循环系统低压区)压力升高;(2)由于肺内血液的重新分配,造成肺内气血分离和气体交换障碍,引起动脉血 O_2 饱和度下降;(3)由于植物神经调节功能发生紊乱,产生心脏节律失常。这些变化都是与 $+G_x$ 条件下惯性力的直接或间接的作用分不开的。

在这次实验中,虽然心率的变化值不大,但初步观察到了三种不同的心率变化类型。尽管心率的变化与惯性力的直接作用(器官牵扯、变型和位移等)有关,但我们认为应主要归结于植物神经反射性的调节作用,即不同的心率变化类型反映了植物神经调节的不同类型。

根据现代生理学的观点,在腔静脉入口处,右心房和肺循环系统中,具有大量的、丰富的神经末梢(感受器)分布^[7-10]。这些感受器,当低压区压力明显改变时对全身心血管系统

起着重要的调节作用。Heymans 认为,主要是起保护心脏的作用。在一般的情况下,这个区域的调节作用不大明显,但在 $+G_x$ 情况下,当腔静脉,右心房和肺循环系统压力随着 G 值的增加而升高时,这个区域的调节作用便突出出来,看来,在 $+G_x$ 条件下低压区的调节作用是十分重要的。由于此实验具有 15° 背角,因此,在 $+G_x$ 作用的同时,也存在着沿着头-盆方向的分力作用,其数值等于 $G_x \sin \alpha$,所以也存在影响头部血液供应问题。本实验中观察到的心率加快,中胸水平动脉血压升高和外周循环阻力增加的现象,除与低压区的调节作用有关外,看来颈动脉窦、主动脉弓的调节作用也是重要原因。此外,高级神经活动,体液的调节作用也是不可忽视的。综上所述,我们认为,上述三种不同心率类型,实际上是多种调节作用的综合结果,由于这些因素在不同被试者身上起的作用不同,而表现了不同的心率类型。由于超重值较小,刺激量不大,对每种类型的优劣和发展趋势难下结论,结合以前的工作^[11,12],初步认为第三种类型容易受非特异性因素干扰,可能是植物神经稳定性较差的缘故。

在本实验中,观察到了中胸水平肱动脉平均血压是随着 G 值的增加而升高的。折合头部水平动脉血压,则发现变化不大。以 $+6G_x$ 峰值为例,设眼部到测压部位的距离为 35cm,则在 $+G_x$ 时头部血压为 73mmHg,与转前对照值 76.5mmHg 相比,差别不大,说明了上述三级起飞曲线对被试者头部血压影响不大。

从观察到的脑阻抗图来看,波幅随着 G 值的作用而升高,波形陡峻。根据文献报告^[13,14],在 $+G_x$ 加速度作用下,由于惯性力的作用,肺部发生气血分离的现象,肺上部气多血少,肺下部血多气少,使肺部气体交换发生障碍,引起血氧饱和度下降。一般在 $+4G_x$ 时,下降到 85% 左右,在 $+6G_x$ 时,下降到 80% 左右。结合前述头部血压改变不大的现象来看,脑阻抗图波幅增高和波形变化,很可能与 $+G_x$ 作用下血氧饱和度的下降,血中 CO_2 张力增加引起脑血管舒张反应有关。

此外,观察到的心脏等容收缩时相在 $+G_x$ 作用下缩短的现象,说明了心脏收缩机能有些亢进。

总之,十名被试者在背角为 15° 、峰值分别为 $+4G_x$ 、 $+6G_x$ 和 $+5G_x$ 的三级起飞曲线作用下,在半合体床垫的防护下,感觉是良好的,生理指标的变化属于代偿范围之内,说明了他们对上述三级加速度能够较好地耐受。从这次离心机上的模拟实验与实际飞行的比较来看,有两点值得注意:第一,这次离心机上的实验总 G 秒数接近 900 G 秒,大大超过第一宇宙速度;第二,在离心机加速时,存在着科氏力和角加速度的作用,会给被试者前庭功能带来不良影响,而这种情况航天员在实际飞行的主动段是遇不到的。

五、结 论

在十名被试者身上做了峰值分别为 $+4G_x$ 、 $+6G_x$ 和 $+5G_x$ 、背角为 15° 、每级作用时间为 150 秒的三级加速实验,被试者们主观感觉良好,生理指标变化处于正常范围之内,顺利地耐受了上述 $+G_x$ 三级起飞加速度作用。

在这次实验中,观察到了心率随着 G 值的增高而增加的总体变化和三种不同的心率变化趋势。观察到了中胸水平动脉平均血压随着 G 值的增加而升高的现象,通过计算了

解到了心输出量和外周阻力随着 G 值的增大而增加的趋势。此外, 还看到了心脏等容期随着 G 值的增加而缩短以及脑阻抗图在 $+G_x$ 作用下波幅增高, 波形变陡峻的现象。

本工作曾得到曹其鉴、朱世玉等同志的协助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Stapp, T. P., Acceleration of Space Flight, 13th Annual Meeting, N. Y., 1958.
- [2] Nerillep, Clarke et al., *J. Aviation Med.*, Vol. 30, p. 1, 1959.
- [3] Chambers, R. M. et al., NADC-MA-6110, AD-269, p. 487, 1961.
- [4] Bergeret, P., Bio-essay Techniques for Human Centrifuges and Physiological Effects of Acceleration, Pergamon Press, p. 119, 1961.
- [5] Сепреев, А. А., Физиологический механизмы действия Наука, стр. 275, 1967.
- [6] Agress, C. M. et al., *Aerospace Med.*, Vol. 38, p. 1284, 1967.
- [7] Heymans, C. et al., Reflexogenic Areas of Cardio-vascular System, London, Churchill, 1958.
- [8] Meehan, T. P. et al., *AI'AA*, No. 71, p. 883, 1971.
- [9] Lloyd, T. C. et al., *J. Appl. Physiol. Resp. Environ Exer. Physiol.* Vol. 43, p. 107, 1977.
- [10] Donald, D. et al., *Cardiovascular Res.*, Vol. 12, p. 449, 1978.
- [11] 谢宝生等, 论文汇编第二集, 航天医学工程研究所, 第 66 页, 1980 年。
- [12] 刘光远等, 论文汇编第二集, 航天医学工程研究所, 第 60 页, 1980 年。
- [13] Hatalio, Banhero and Wood, E. H., *Aerospace Med.*, Vol. 36, p. 608, 1965.
- [14] Alexander, W. G. and Sever, R. J., *Aerospace Med.*, Vol. 35, p. 257, 1964.

Human Reactions to Three Stage Launching Acceleration

Xie Bao-sheng Liu Guang-yuan Cheng Xue-yao Xue Yue-ying

(Institute of Space Medico-Engineering)

Abstract

Three or two stage acceleration profiles are often encountered by astronauts during launching of space vehicles. In order to study the effects of this type of acceleration on human body, ten healthy young subjects were exposed to a three stage acceleration profile on a human centrifuge with a back angle of 15° . The three stages lasted 150 seconds each, with successive peak of 4.6 and 5G respectively.

Electrocardiogram, blood pressure vibro-cardiogram, rheoencephalogram and respiration were recorded. Analysis and discussion of change of some important physiological parameters were made. Results showed that subjective feelings of the subjects were fairly good. Changes of the physiological parameters were within the range of a compensatory regulation. All subjects tolerated this profile of acceleration successively.