

目 录

绪 论	(1)
一、航空航天生物动力学定义	(1)
二、航空航天生物动力学的研究内容	(1)
三、航空航天生物动力学研究方法	(2)
第一章 加速度概论	(8)
第一节 加速度	(8)
一、直线运动中的加速度	(8)
二、曲线运动中的加速度	(9)
三、角加速度	(10)
四、科里奥利加速度	(10)
五、加速度的 G 单位制	(10)
第二节 惯性力	(11)
一、参考系	(11)
二、惯性力	(12)
三、角加速度与惯性力	(13)
四、科里奥利加速度与科里奥利力	(14)
第三节 重量	(17)
一、万有引力与物体重量	(17)
二、广义重量概念	(18)
第四节 加速度分类与命名	(18)
一、直线加速度、法向加速度的分类命名方法	(18)
二、角加速度的术语及矢量符号	(20)
第五节 飞行器做加速度运动时人体受力分析	(21)
一、飞行器做直线加速度运动时人体受力情况	(21)
二、飞行器做曲线飞行时人体受力情况	(22)
第六节 决定加速度生物动力学效应的基本因素	(26)
一、机体方面的因素	(26)
二、加速度方面的因素	(27)

第二章 持续性正加速度对人体的影响	(31)
第一节 概述	(31)
一、主要生物动力学效应	(31)
二、主观反应	(32)
三、对操纵动作的影响	(32)
第二节 对循环系统的影响	(33)
一、血压变化	(33)
二、心脏机能改变	(38)
三、循环系统代偿机能	(42)
第三节 对呼吸系统的影响	(43)
一、肺通气功能改变	(43)
二、肺气体交换功能障碍	(43)
三、加速度性肺萎陷	(46)
第四节 对视觉功能的影响	(47)
一、视觉基本功能改变	(48)
二、视力改变	(49)
第五节 对脑功能的影响	(51)
一、意识丧失	(51)
二、脑电图	(53)
第六节 病理影响	(53)
一、对神经系统的病理性影响	(54)
二、对心脏的病理性影响	(54)
三、对肺脏的病理性影响	(54)
四、对脊柱和颈部的病理性影响	(55)
五、腹股沟疝和膈疝	(55)
第三章 持续性正加速度的耐力与防护	(56)
第一节 耐力及影响因素	(56)
一、耐力	(56)
二、影响耐力的因素	(62)
第二节 防护	(64)
一、抗荷装备(抗 G 装备)	(64)
二、抗 G 动作	(68)
三、加压呼吸	(71)
四、后倾座椅	(71)

五、综合防护措施	(72)
六、选拔与训练	(73)
七、发展自动恢复系统	(75)
第四章 持续性负加速度	(77)
第一节 概述	(77)
第二节 主要影响	(78)
一、循环系统机能改变	(78)
二、呼吸系统机能改变	(80)
三、视觉及脑功能改变	(81)
第三节 耐力与防护	(82)
一、耐力	(82)
二、防护	(82)
[附]负加速度暴露典型事例	(83)
第四节 推-拉效应	(83)
一、基本概念	(83)
二、主要生理影响	(84)
三、发生机理	(84)
四、防护	(85)
第五章 持续性横加速度	(86)
第一节 航空航天飞行中的横加速度	(86)
第二节 $+G_x$ 的主要影响	(87)
一、一般影响	(87)
二、对呼吸系统的影响	(88)
三、对循环机能的影响	(93)
四、对视觉和脑功能的影响	(93)
第三节 耐力与防护	(94)
一、耐力	(94)
二、防护措施	(95)
第四节 向后加速度 ($-G_x$) 的效应	(96)
第五节 侧向加速度 ($\pm G_y$) 的效应	(97)
第六章 弹射离机	(99)
第一节 概述	(99)

一、航空救生的概念和意义	(99)
二、航空救生基本程序和离机方式	(99)
三、航空救生过程中的生物动力学因素	(101)
第二节 弹射冲击过载	(101)
一、弹射冲击过载的特点	(101)
二、弹射冲击过载对人体的影响	(102)
三、人体对弹射冲击过载的耐力	(106)
四、防护措施	(110)
第三节 高速气流吹袭	(112)
一、气流的速压	(112)
二、高速气流吹袭对人体的影响	(113)
三、防护措施	(115)
第四节 气动力减速过载	(117)
一、气动力减速过载的作用特点	(117)
二、减速过载对人体的影响	(119)
三、人体对减速过载的耐力	(119)
四、防护措施	(120)
第五节 快速旋转	(120)
一、旋转作用的特点	(120)
二、旋转对人体的影响及耐受限度	(121)
三、防护措施	(122)
第七章 开伞与着陆	(124)
第一节 降落伞概述	(124)
一、功用与分类	(124)
二、人用伞简介	(124)
三、人用伞的工作过程	(125)
四、空间技术用伞	(126)
五、跳伞分类	(127)
第二节 开伞前的坠落过程	(127)
一、自由坠落运动	(128)
二、自由坠落物体的临界速度	(129)
三、影响物体坠落速度的因素	(129)
第三节 开伞冲击过载	(131)
一、开伞冲击过载的特点	(131)

二、开伞冲击过载对人体的影响	(132)
三、人体对开伞冲击过载的耐力	(133)
四、防护措施	(133)
第四节 着陆冲击过载	(134)
一、着陆冲击过载的特点及影响因素	(134)
二、着陆冲击过载对人体的影响	(135)
三、人体对着陆冲击过载的耐力	(137)
四、防护措施	(137)
第八章 弹射救生的医学保障	(140)
第一节 被迫弹射跳伞失败的原因分析	(140)
第二节 低空弹射跳伞的医学保障	(142)
一、弹射跳伞最低安全高度	(142)
二、影响最低安全高度的因素	(143)
三、低空救生的保障措施	(145)
第三节 跳伞训练的医学保障	(146)
一、地面弹射训练的医学保障	(146)
二、跳伞训练的医学保障	(147)
第九章 碰撞和头部损伤	(150)
第一节 航空中碰撞的动力学	(150)
一、摔机时作用于乘员的力	(150)
二、突然减速度的生理效应和人体耐力	(152)
三、突然减速度的防护	(153)
第二节 头部损伤	(157)
一、航空中头部损伤的严重性	(157)
二、头部损伤力学	(157)
三、头颈部抗冲击的耐限	(161)
四、头部损伤的预防方法	(162)
第三节 保护头盔	(163)
一、用头盔保护头部的机理	(163)
二、头盔的基本结构和保护作用的评定	(165)
三、保护头盔的其他功能	(166)
四、设计保护头盔的生理卫生学要求	(166)

第十章 着陆(水)后的应急生存与营救	(168)
第一节 概述	(168)
一、生存的定义	(168)
二、生存的基本原则	(168)
三、决定生存成败的关键	(171)
第二节 海上生存	(172)
一、淹溺	(173)
二、冷水浸泡	(176)
三、缺乏淡水	(179)
四、缺少食物	(179)
五、有害生物侵袭	(180)
第三节 寒区生存	(183)
一、寒区环境特点	(183)
二、对机体的影响	(183)
三、防护措施	(184)
第四节 沙漠生存	(184)
一、沙漠地区的环境特点	(184)
二、对机体的影响	(185)
三、防护措施与生存技能	(185)
第五节 热带丛林生存	(187)
一、热带丛林的环境特点	(187)
二、对机体的影响及防护	(187)
三、热带丛林生存技能	(189)
第六节 营救	(189)
一、制定营救方案	(190)
二、搜索	(190)
三、救援	(192)
四、救回	(192)
第十一章 航天救生	(193)
第一节 概述	(193)
第二节 航天器的应急救生	(194)
一、发射台到低空阶段救生	(194)
二、高空阶段救生	(196)
三、轨道航行阶段救生	(196)

四、返回着陆阶段救生	(198)
第三节 保证航天员安全返回的措施	(198)
第十二章 失重对人体的影响与防护	(200)
第一节 概述	(200)
一、失重的概念	(200)
二、失重生理的研究方法	(201)
三、失重时人体生理系统变化的起因	(203)
四、生理系统对失重的适应和再适应	(205)
第二节 失重的主要影响	(207)
一、水盐代谢的变化	(207)
二、心血管功能的变化	(209)
三、血液系统的变化	(216)
四、肌肉系统的变化	(219)
五、骨骼系统的变化	(222)
六、免疫系统的变化	(227)
七、前庭系统的变化	(228)
八、太空中人的工作能力	(229)
第三节 防护措施	(231)
一、严格的选拔	(231)
二、航天员的训练	(232)
三、飞行中的医学保障	(233)
四、人工重力	(236)
第十三章 振动对人体的影响与防护	(237)
第一节 振动的物理学基础	(237)
一、振动的定义	(237)
二、振动的物理参量	(237)
三、振动类型	(239)
四、人体振动模型	(239)
五、影响振动对人体作用的主要因素	(240)
第二节 航空航天振动环境	(242)
一、航空振动环境	(242)
二、航天振动环境	(243)
第三节 振动对人体的影响	(243)

一、全身性效应	(244)
二、局部性效应	(245)
三、心理学效应	(246)
第四节 振动的容许标准及防护措施	(248)
一、振动的耐力标准	(248)
二、对振动危害的预防	(250)
第十四章 噪声对人体的影响及防护	(252)
第一节 声音的物理学基础	(252)
一、声音与噪声	(252)
二、声压与声压级	(253)
三、响度级与等响曲线	(254)
四、声音的频谱	(254)
五、计权网络	(256)
第二节 航空航天噪声环境	(256)
一、飞机的噪声源	(256)
二、飞机的内部与外部声场	(258)
三、航天噪声环境	(259)
第三节 噪声对人体的影响	(260)
一、噪声对听觉器官的影响	(260)
二、噪声对非听觉器官的影响	(262)
三、对工效及语言通讯的影响	(263)
第四节 噪声的容许标准和防护措施	(264)
一、容许标准	(264)
二、防护措施	(266)
主要参考书目	(268)
附 录	(269)
一、常用物理量及单位	(269)
二、常用英汉词汇对照表	(271)

绪 论

一、航空航天生物动力学定义

航空航天生物动力学是研究生物体在航空航天动力环境中生理机能变化规律及其防护措施的学科。它既属于特殊环境生理学的范畴,又属于生物力学范畴。

航空航天动力环境指的是飞行过程中速度和(或)加速度骤变,对飞行器上搭载成员所产生的影响。生长在地球表面上的人和其他生物体,在世的进化过程中已完全适应 1G 的重力环境。即当生物体处于匀速直线运动时,不会产生任何不良反应和不适感觉。但如果这种动力状态发生变化,即有了加速度运动时,必将引起生物体相应的改变。在日常生活中,能引起速度变化的场合很多,当其数值变化不大或持续时间不长时,如奔跑或行走中发生摔倒等情况,不足以产生明显的影响。倘若动力环境变化太大,如地面车辆在高速行驶时相碰撞,或硬物从高处坠落等,可能产生有害影响,甚至造成伤害或死亡。探讨在加速度运动环境中机体的生理反应变化规律,称为加速度生理学(acceleration physiology)。

研究在飞行活动过程的各种动力环境因素作用下机体的生理效应、耐受限度以及采取相应的防护措施,以保证飞行安全,提高飞行耐力,增强工作效能是本门学科的任务。

二、航空航天生物动力学的研究内容

(一)飞行中的持续性加速度 持续性加速度通常是指作用时间超过 1 秒钟,甚至持续数分钟的长时间加速度。这在日常生活中经常可以遇到,如乘坐交通工具时,当其运动速度的大小(加速度或减速度)或方向发生改变时,人体就要受到加速度的影响,当这种加速度值比较小时,一般不会引起严重的生理效应。若产生的加速度值比较大,如现代高性能战斗机的各种特技动作和机动飞行,航天器在发射和返回期间都有相当大的持续性加速度发生,加速度值可高达 10G,大大超过人体的耐受限度。其生理效应主要表现在人体的组织器官沿着惯性力方向发生变形、移位和增加重量,以及血液和体液发生惯性转移和重新分配,从而导致各种生理机能障碍。例如,足-头向的持续性加速度(+G_z)的血液动力学改变,致使心水平以上部位血压降低,造成视觉机能障碍和意识丧失,严重威胁飞行安全。

(二)冲击性加速度 冲击性加速度是指突然猛烈的加速或减速运动所产生的加速度,其特点是加速度峰值很高(高达几十个 G 值)、作用时间很短(通常 < 1s),如飞机迫降或坠毁,从高速飞行或飞船中弹射救生,以及弹射离机后自由降落过程的开伞或着陆减速过载时都会有此类加速度的产生。冲击性加速度对人体作用的主要表现形式是机械力的影响,当这种机械力超过一定限度时可引起器质性损伤,如骨折、脏器挫伤撕裂、出血、外伤性休克等,避免这种伤害,或把其影响限定在可耐受范围内,是航空航天工程设计和航空航天医

学的重要课题。

(三)航空航天振动环境 振动是加速度的另外一种表现形式。其系一种峰值比较低,而频率比较高,且连续性交替变换的加速度。航空航天振动环境主要是由飞行器的动力系统和大气湍流所引起的。其主要生理效应是致使全身性和局部性慢性损伤,损害工作能力。由振动引起的噪声环境对听觉器官、语言通讯、神经系统和工效都有一定的不良影响。

(四)微重力状态 当物体做加速度运动时所产生的惯性力与地心引力(重力)的矢量合力为0时,物体处于无重量状态,称为失重。但实际情况下,惯性力与地心引力的矢量合力并不等于0(等于0时,这是失重状态的极端),而只能接近于0,故称之为微重力状态。例如,地球卫星、宇宙飞船、航天飞机绕地球轨道飞行时,所产生的惯性离心力与地心引力方向相反,形成了微重力状态。长时间失重的生理效应主要引起航天运动病、心血管功能失调、肌肉萎缩、骨质脱钙等变化。

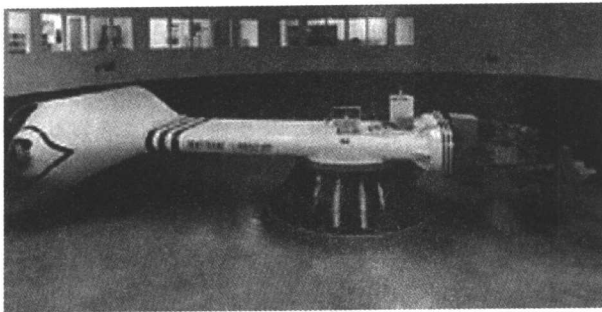
三、航空航天生物动力学研究方法

本领域涉及的内容范围独特,学科跨度大,决定了研究方法的特殊性和多样性。

(一)试验性测试设备 为了研究飞行中各种特殊作用力对人体的影响及耐受限度,以及为了评价个人防护装备的防护作用效果及性能指标,必须在地面条件下建立一些模拟设备。例如模拟惯性离心力的载人或动物离心机,模拟弹射冲击力的弹射塔,模拟高速气流吹袭和减速制动过载的高速风洞和火箭滑车,以及模拟飞机碰撞或坠地的冲击台等。总之,模拟各种重力研究的特殊设备很多,按其作用意义可分为:

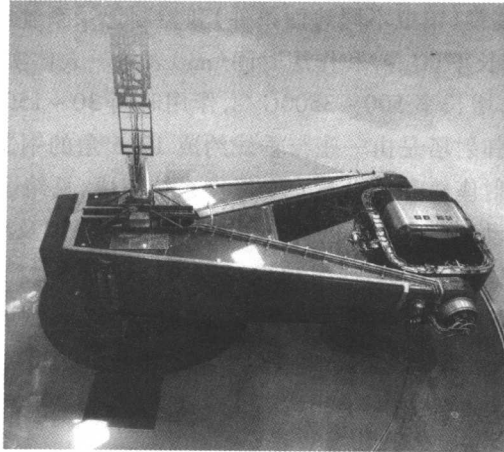
1. $G > 1$ 的模拟方法 $G > 1$ 称为超重状态。模拟这种重力状态的常用设备有:

(1) 载人离心机 载人离心机是航空航天医学专用大型地面实验设备(绪图1,绪图2)。离心机一般由中央转台、旋臂和吊舱构成。其工作原理是:当旋臂绕固定轴旋转时产生的惯性离心力提供可变重力场,以模拟飞机机动飞行和飞船起飞、返回阶段出现的持续性加速度环境。通过调整被试者体位,可使其受到不同轴向的加速度作用;调整控制系统,可产生不同 G 值、 G 增长率和作用时间的加速度。



绪图1 美国空军航空航天医学院的载人离心机

现代载人离心机的主要用途:研究持续性加速度对人体的影响及其机理;飞行员、航天员的医学选拔、锻炼和训练;飞行员、航天员所使用装备(如抗荷服、航天服、救生及其他生命保障系统等)的评价实验等。一般载人离心机的主要性能参数为:最大 G 值 $20G$, 精度

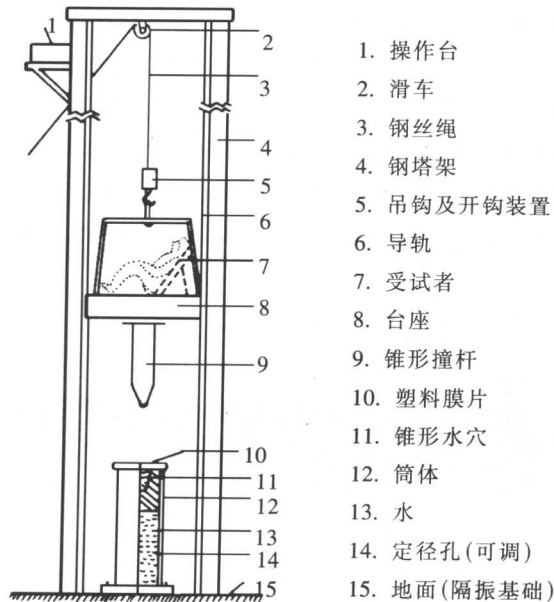


绪图 2 我国空军航空医学研究所的载人离心机

$\pm 0.05G$, G 增长率 $1 \sim 6G/s$ 。

离心机的半径越大,角加速度和科里奥利加速度的影响越小,沿受试者身体纵向各部分的 G 梯度也越小,但所需要的动力就越大。一般载人离心机半径为 $5 \sim 7m$ 。大型载人离心机半径可达 $15m$,最大 G 值可达 $40G$, G 增长率为 $10G/s$,吊舱能做三个自由度转动,用电子计算机控制,可模拟高性能战斗机特技飞行及航天时各种加速度的综合作用。在实验中可用电视、心电图、脑电图、耳脉搏、X 线等观察和记录受试者的生理心理反应。

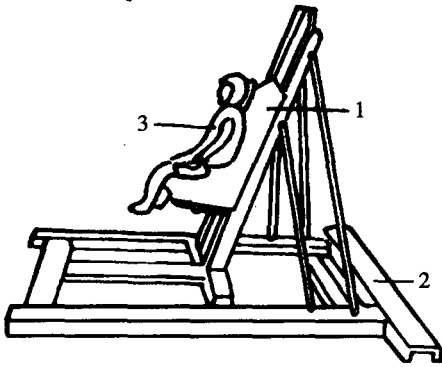
(2) 冲击塔 能在严格控制条件下,让落体(包含人体)与一定迎面物体相碰撞而产生迅猛减速过载的冲击实验设备(绪图 3)。冲击塔一般由高十几米至三、四十米直立钢塔架、



绪图 3 冲击塔

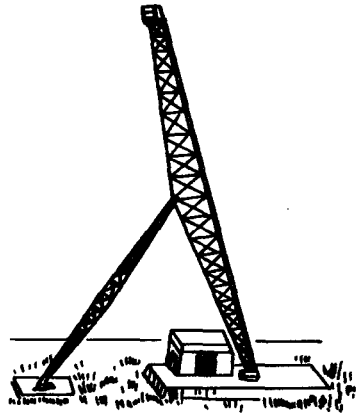
台座(模拟落体)、制动装置(模拟不同地面条件)和控制记录系统组成。冲击实验数据以加(减)速度最大值(G)、增长率(G/s)和作用时间(ms)表示。人体实验冲击塔的性能指标为:加(减)速度值 15~60G,增长率 500~3500G/s,作用时间 30~150ms。

(3)弹射塔(架) 弹射塔是由一座与垂线约成 17.5°角的钢制塔架(小型塔高 6~7m,大型塔高 30~40m)、弹射座椅和操纵与安全保护系统组成,见绪图 4 和绪图 5,可用于研究人体对弹射过载的生物动力学反应,进行飞行员弹射练习,以及测定弹射系统的动态特性等。弹射加速度和增长率视弹射弹(或气动炮)和火箭类型、弹射筒行程、受试者重量及气候条件等而定。人体弹射塔的性能指标为:最大过载值 20~25G,增长率 250~350G/s,作用时间 $\leq 0.2 \sim 0.3s$ 。



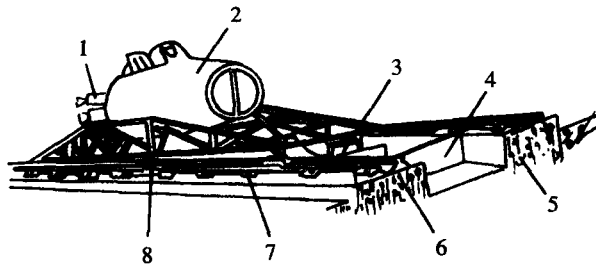
1. 弹射座椅 2. 弹射架 3. 假人

绪图 4 弹射架



绪图 5 大型弹射塔

(4)火箭滑车 又称火箭橇,是利用强大推力将载着受试对象(人、假人或实验动物)的橇车沿着水平轨道高速滑行,并适时平稳滑行停车或强力制动停车,使受试者承受巨大的加(减)速度作用的实验设备。它由推进器、车体、轨道、制动停车装置和有关设备组成(绪图 6)。轨道长度由数十米至 10km 以上不等。主要用于模拟舰载飞机弹射起飞及飞行器制动着陆、迫降、碰撞、突然减速和气流吹袭等情况下的冲击过载的实验研究,以及安全带系统和有关设备的动态试验等,也用于工程上的振动环境、气动力等试验。人体实验用的火箭滑车性能指标为:最高 G 值不低于 40~100G,增长率不低于 1000~4000G/s,冲击时间不少



1. 火箭发动机 2. 火箭滑车车体 3. 庖斗 4. 水槽隔板
5. 基础梁 6. 轨道 7. 扣件 8. 滑块

绪图 6 火箭滑车

于 50ms, 精度 $\pm 5\%$ 。随着火箭滑车试验技术的发展, 对试验的速度要求越来越高, 高速单轨滑车正在逐步发展, 目前已开始研制和采用空气轴承火箭滑车和磁悬浮火箭滑车, 以达到马赫数为 10 的速度。

(5) 高速风洞 风洞是研究气流和物体(如救生装备、人体、模型等)之间相互作用的实验设备。风洞可分为低速风洞(气流速度小于 135m/s)和高速风洞(气流速度大于 170m/s)两种。在航空航天医学研究中, 风洞主要用于: ①研究高速气流对人体的影响, 如气流吹袭直接损伤和气流甩打伤的致伤机理; ②研究在有防护的情况下, 人体抗气流吹袭的能力, 如采用何种形式的弹射座椅和防护装备才能保证飞行人员在敞开放式弹射中的安全等; ③观察人体暴露部位变形、受损伤情况及飞行人员服装和装备抗气流吹袭强度的实验等。

(6) 振动台 不同类型振动设备的结构和性能差别很大, 常见的有单自由度振动台、垂直加速器和六自由度振动台。其用于研究振动对人体生理功能和工作效率的影响, 以及试验减振措施和个人防护装备的性能等。

2. $G < 1$ 的模拟方法 由于在地球表面无法摆脱地球引力场的影响, 模拟 $G < 1$ 的重力状态是非常困难的。根据实验目的和要求的不同, 可以考虑采用下述不同方法。

(1) 自由降落 物体在空中向地面自由降落时重力为 0, 但由于可能达到高度的限制, 降落时间难于维持很长, 一般只能维持数秒钟。并且由于受到空气的阻力, 也难于做到真正的 $G = 0$ 。近来有人设计了一种同温层气球, 可以从 40km 的高度上放下实验舱。由于高空空气密度很小, 可以在下落过程中获得 $10^{-5} \sim 10^{-3}G$ 的微重力, 持续 25s。还有人设计了一种真空落塔, 高 146m, 内径 3.5m, 可以抽至约 1.33Pa 的真空, 其中的落舱可以获得 $10^{-6} \sim 10^{-3}G$, 4.74s 的微重力。其主要缺点是失重时间太短。

(2) 卧床实验 受试者取平卧位或头低位 ($-2^\circ \sim -10^\circ$) 卧床, 使卧床时沿 Z 轴方向走行的大血管内血液柱的流体静压差大部以至全部消失; 脊椎骨、下肢骨骼所承受的负荷及牵拉活动大大减轻或消失; 抗地心引力肌的张力及收缩活动也大大降低。这些情况与失重时相类似。卧床实验主要用于模拟中、长期失重所致的人体结构及生理机能变化与对抗措施的研究。

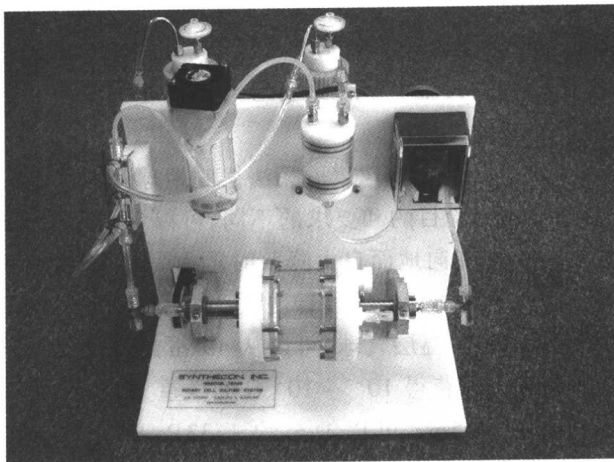
(3) 浸水实验 浸入液体中的物体所受到的浮力与物体排开该液体的重量相等。改变液体比重可使物体受到的浮力与其重量大致相等。进行浸水实验时, 常使用与人体比重相似的 1% ~ 2% 盐水, 水温可根据需要调节(一般以 33 ~ 34℃ 为宜)。浸水时, 人犹如处于失重环境之中, 可做 6 个自由度活动, 其模拟失重具有逼真的特点。浸水实验多用于航天员定向定位能力训练、出舱活动训练及空间安装操作训练等方面。

但这种方法还有一些副作用, 例如水对皮肤的刺激、体热平衡不易维持等。有人采用“干浸法”, 可以减少水对皮肤的刺激, 比较安全。

(4) 动物悬吊实验 动物模拟实验可以弥补人体实验的不足, 因而成为长期失重的一个重要研究途径。例如, 大鼠悬吊法进行模拟失重实验, 将大鼠以头、躯干向前下倾斜 30° 的姿势进行尾部悬吊, 后肢离开地面, 不承受体重; 前肢着地, 可自由活动; 自由进水进食。其作用是: 悬吊实验时, 头及躯干向前下倾斜, 使血液、体液的分布及血液动力学改变类似于失重及地面卧床实验时的情况。动物限动也是模拟失重的方法之一,

但这种方法应激太大,现已很少采用。

(5)细胞回转器 细胞回转器(绪图7)可用于在地面模拟失重条件下的生物效应。细胞回转器模拟失重的原理是:培养的贴壁或悬浮细胞在电机的带动下不停地绕固定轴做匀速旋转,重力矢量相对于细胞的方向在连续改变,在每个方向上停留的时间不超过1秒,使得样品处在不断改变方向的力场中。在适当转速及不产生离心力的情况下,样品总是来不及对重力做出响应,从而达到模拟微重力条件下生物效应的结果。其优点是:①简单,方便,低廉;②没有时间限制;③容易控制各种环境条件;④排除在空间条件下的强辐射环境,排除在航天器发射和回收时的振动等严酷的力学环境。



绪图7 细胞回转器

(二)建模实验 将人体暴露在动力环境中做实验受到一定限制,也不够安全。所获得的数据资料也远不能满足人-机-环境系统工程设计和防护装备发展的需要。随着电子计算机技术的发展,一些学者把工程上的模型方法用于研究人体对各种动力环境因素的反应,这方面工作包括:

1. 机械模型 人体的结构组成与强度可简化成机械系统来研究。人体和人体的器官系统可被看成是由质量块、弹簧和阻尼组成的机械系统。其中,肌肉、韧带及其他有关软组织可看成为弹簧和阻尼。这样,人体结构与机械系统一样,其运动规律可用二阶线性常系数微分方程来表示。因此,可用机械系统(单自由度或多自由度)来模拟人体结构,称为机械模型。通过测定所模拟的机械系统的反应就能了解人体的反应。

2. 数学模型 一个具有输入和输出的研究对象可被视为一个系统。机械系统和人体器官系统在外力作用下的运动规律,可用若干数学表达式(如代数方程、微分方程、差分方程、逻辑关系式或计算机程序等)来表示,这种表达式即为数学模型。按这种表达式得到某些变量的变化规律和实际系统中相应特性的变化规律是一致的。用数学模型测得的数据还需要用人体试验或动物实验的数据或者用飞行事故中人体损伤的资料来进一步验证。通过数学模型可以求出人体系统对动力学因素反应的规律,为制订人体的生理耐受限度及防护的工程设计提供科学依据。因此,一个实际系统的数学模型就是对其中某些特性变化规律

的最精练总结,并且还可以由此预测新的现象,启发人们进行新的研究,观测在不同条件下的发展趋势。

3. 电子模型 具有相同固有频率和阻尼比的机械系统和电子振荡线路当受到阶跃信号(或阶跃外力)作用时,二者的机械运动规律及电流运动具有相同的特性,都可用形式相同的微分方程表达。因此,可用与人体器官系统有相似传递函数的电子振荡线路来模拟人体器官系统在动力环境因素作用下的生物学效应。此种电子振荡线路称为电子模型。由电子模型所得到的数据也需要用人体实验资料进行验证。国内学者在脊柱对弹射过载和开伞冲击力的研究中都采用了电子模型实验,获得了满意结果。

其他尚有仿生学与电子仿生学模型等。

(三) 替代试验 在一些情况下,由于载荷大大超过人体耐受限度,以及为了验证有关装备防护性能可能达到的限度,故不可能用活人做试验,而采用了假人、尸体或动物进行替代试验。生物力学试验的假人多为结构假人。这种假人可以模拟人体机械结构和生物力学特性,但是真实人体是一个极为复杂的有机整体;尸体失去了生理反应性,受力后应变率不足,组织的物理化学特性发生改变等等,故很容易导致错误的结论。将替代试验所获得的数据资料用在真人身上,应持十分慎重的态度。最可靠的实验数据总是来源于有充分代表性的条件下,真人受试者所做的试验结果。

航空航天科学技术的发展将有力地推动对生物体,特别是人体在特殊环境中的力学现象及其规律的研究。深入揭示人体受机械外力作用时的动态变化特征,以及研制新的理想的防护系统,对保证飞行人员的安全与健康,延长飞行年限,促进航空航天事业的发展具有重要意义。

(孙喜庆)

第一章 加速度概论

在航空航天活动中,人体受到的动力学因素作用都是由于飞行器运动速度改变,即做加速度运动而引起的。如果飞行器做匀速直线运动,则飞行器中的人体就不会受到动力学因素的作用。因此,可以认为,航空活动中各种动力学因素对人体的作用就是加速度的作用。在加速参考系中,加速度对人体(物体)作用的实质是存在于加速参考系中的“惯性力”的作用。

第一节 加 速 度

速度的时间变化率称为加速度。加速度是矢量,可按照平行四边形法则合成和分解。物体的运动速率或方向发生改变,或者二者同时发生改变时,其运动速度即发生了改变,物体获得加速度而做加速度运动。

一、直线运动中的加速度

匀速直线运动是没有加速度的运动。当物体做变速直线运动时,速度的时间变化率称为直线加速度。在匀加速直线运动中,加速度值为恒量;在变加速直线运动中,加速度值为变量。直线加速度值可为正值,也可为负值。物体做加速运动时,加速度值为正值,加速度方向与运动方向一致;物体做减速运动时,加速度值为负值,加速度方向与运动方向相反。在航空航天活动中,飞机起飞滑跑、宇宙飞船和航天飞机发射、航空救生的弹射离机等都是直线加速运动,加速度方向与飞行器(或人体)的运动方向相同;飞机着陆滑跑、宇宙飞船和航天飞机再入、航空救生的开伞和着地等都是直线减速运动,加速度为负值,加速度方向与飞行器(或人体)运动方向相反。

物体做直线加速度运动时,可推导出三个求平均加速度公式:

$$\bar{a} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \bar{a} = \frac{2(S - V_1 t)}{t_2} \quad \bar{a} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2S} \quad (1-1)$$

式中, V_2 和 V_1 分别表示完成位移 S 的末速度和初速度, $t_2 - t_1$ 表示完成位移 S 的时间, $\Delta V / \Delta t$ 比值为时间 Δt 内的平均加速度。

瞬时加速度简称加速度,它是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta V / \Delta t$ 比值的极限,即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1-2)$$

瞬时加速度表示物体在某一时刻（或某一位置）的速度变化率。加速度的单位是米/秒²(m/s²)。

二、曲线运动中的加速度

当物体做曲线（或圆周）运动时，其运动状态为加速度运动，物体运动加速度分解为切向与法向加速度。

（一）变速曲线运动 物体做变速曲线运动时，运动速度的快慢和运动方向都在不断地发生改变。因此，物体所做的运动是包含着两种加速度成分的运动。一种加速度对应于速度大小（速率）的变化，称为切向加速度；另一种加速度对应于速度方向的变化，称为法向加速度。

切向加速度 是物体运动加速度的切向分量，具体描述物体做曲线运动时速度大小（速率）的变化，方向与运动曲线相切，用 a_t 表示。切向加速度数值为

$$a_t = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1-3)$$

法向加速度 是物体运动加速度的法向分量，具体描述物体做曲线运动时速度方向的变化，其方向指向曲率中心，垂直于切向加速度，用 a_n 表示。法向加速度数值为

$$a_n = \frac{V^2}{R} \quad (1-4)$$

式中， V 为运动物体在曲线上某点的速率， R 为该点的曲率圆半径，称为曲率半径。

曲率是定量描述曲线在某一部位弯曲程度的物理量。为了定量描述曲线某一部位的弯曲程度，可将曲线上这一点附近的弧元（弧长趋近于 0）看成半径为 R 的圆的一段弧元，此圆就是曲率圆。曲率圆和曲线有共同的切线。曲率圆的半径 R 就是曲线在该部位的曲率半径。曲率半径 R 的倒数叫做曲线在该部位的曲率。曲率的大小取决于曲线弯曲的程度，曲线弯曲程度越大，曲率半径越小，曲率就越大，如图 1-1 所示。

在任何曲线运动中，速度的方向必然发生变化。速度方向的变化和曲线的形状有关，曲线的曲率越大，其切线方向的改变也越大，则速度方向的改变也越大。所以，物体在曲线某点上的法向加速度大小与曲线在该点的曲率成正比，亦即与曲线在该点的曲率半径成反比。

在航空活动中，飞机的机动飞行就是各种形式的曲线运动，如飞机进入俯冲和俯冲改出时的运动轨迹就是由一系列曲率不等的圆弧所组成。利用曲率和曲率半径这两个概念可