

飞行器人-机-环境系统工程系列专著

人-机-环境系统工程 生理学基础

主编 陈 信 袁修干

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是飞行器人-机-环境系统工程生理学基础的专著,着重阐述飞行环境对人的影响及防护。著者们在多年研究成就与实践经验的基础上,综合了国外研究进展,系统地阐述了该专业的基本内容与最新成就。全书共分 11 章,分别为:大气环境因素(压力、生理气体、惰性气体、有害物质、温度),力学环境因素(超重、失重、冲击负荷、振动、噪声与宇宙辐射)以及照明、供水与营养。本书内容新颖、广泛,学术性与实用性强,并体现了航空与航天两大领域、人体与工程两大学科有关内容的紧密结合,具有特色。

本书适用于航空、航天医学与工程的技术研究人员、教学人员、研究生以及感兴趣的读者。

图书在版编目(CIP)数据

人-机-环境系统工程生理学基础/陈信主编. - 2版.

北京:北京航空航天大学出版社, 2000. 10

ISBN 7-81077-105-1

. 人... . 陈... . 航空航天生理影响

. R852

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 057737 号

人-机-环境系统工程生理学基础

陈 信 袁修干 主编

责任编辑 赵延永

责任校对 陈 坤

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010- 82317024 传真:010- 82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本: 787× 1092 1/16 印张: 34.75 字数: 890 千字

2000 年 10 月第 2 版 2000 年 10 月第 1 次印刷 印数: 700 册

ISBN 7-81077-105-1/V·003 定价: 54.00 元

飞行器人-机-环境系统工程系列专著
编 委 会

主编 陈 信 袁修干

编委 (按姓氏笔画排序)

于志深	王玉兰	方振平	龙升照
孙长祝	孙洪元	庄祥昌	刘建中
吴文灿	吴国兴	陈延航	陈 信
余和	杨春信	沙 斌	庞 诚
周笃强	贾司光	袁修干	钱维权
顾鼎良	谢宝生	滕育英	

本书作者

贾司光	庞 诚	顾鼎良
于志深	庄祥昌	谢宝生
王玉兰	滕育英	刘建中
钱维权	周笃强	吴文灿
吴国兴		

代 序

人-机-环境系统工程是很重要的一项工作。这个问题之所以重要,是因为过去我们对于精神与物质、主观与客观、人与武器这些问题,只能在哲学的高度来论述,要具体应用到某个问题,如国防科技问题,就没有什么办法了,不能定量,也不能进行严格的科学分析。这么一个状态,在最近十年已开始有变化,一个是由于自然科学技术的发展,对于人,在人的生理、功能、心理,以至于脑科学方面,最近十几年的发展是很大的,幸而在这些方面发展的同时还有另一方面的发展,即系统科学的发展。现在有办法将各个领域里的发展综合起来。这一综合就由量变到质变,有一个飞跃,以至于我们所今天可以提出人-机-环境系统工程,把人、机器与整个客观环境联在一起来考虑。联系在一起考虑就跟单个地考虑人、单个地考虑机器、单个地考虑环境不一样,这就是辩证法,总体辩证法。因此,我们提出的这个观点,对于我国的国防科学技术有深远的意义,这包括两个方面:一是从武器系统来讲,人与机器结合起来,而这种结合是越来越深入了。由于人工智能、专家系统这些方面的发展,现在已经将很复杂的武器系统里人操作这个系统中忙不过来或来不及解决的很多问题让电子计算机来解决了。也就是说,人的操作已经分了工,一部分操作即控制武器的功能已经让机器去做了,人要腾出手来做更高级的判断或决策,所以人-机-环境这个系统里人与机器的分工跟过去不一样,这是一个大的问题。举例来讲,里根提出的 SDI,那个东西差不多全是人工智能机器、计算机在操作的,因为不可能由人来操作,要在两三分钟之内打掉几万个目标,那是不可能由人来操作的,这是个极端的例子。当然他做得成做不成还是个问题,但他想那么做,朝那个方向走了。实际上他朝那个方向走是有基础的,就是现在更简单一点的系统,最简单的如飞机的操作,大概在十几年前,曾经争论得很厉害的一个问题是,是否把驾驶舱里仪器的信息综合起来,经过电子计算机处理,然后显示给驾驶员。这是条理很清楚的一种显示,而不是像过去,驾驶员得一个个地读仪表。实际上有这个需要,因为驾驶员实在忙不过来读几百个仪表。刚提出这个问题时,也有人反对,说机器靠不住,计算机不如人靠得住。经过十几年的争论,实际上飞机的驾驶舱里已经完全用计算机处理了。

就这一个问题来看,人与机器的关系有了很大的变化。在复杂的武器系统里完全靠人去操作,不大可能,人没有这个本事。所谓更高级的自动化,甚至叫自主化,即对一些简单的操作,不需要人去参与,它就可以执行。这在武器系统里已经

开始,将来一定是朝这个方向发展。因为武器系统越来越复杂,比现在还要复杂,不得不这样做,所以人-机-环境系统工程已提到日程上来了。另一个问题是更高级的,到了指挥系统,就是我们所说的C³I这些系统。一个指挥员当然是指挥战斗的,但指挥员要是离开了C³I,他也没法子工作。这是更高一级的指挥作战。无论从哪方面来看这个问题,我们都应意识到,在今天20世纪80年代要预见到21世纪国防科学技术的发展,不能再忽视人-机-环境系统工程了。

人-机-环境系统工程对于我们来说,首先是用于国防建设,当然还有其他的应用。这么一个方向,现在已经得到领导的同意,定下来了。这个事大家虽然做了多少年了,但这方面的研究工作份量要加重,因为在这方面国外在发展,我们自己做的工作也是不少的。国外的发展运用到国防技术方面和民用方面的量都很大,特别是他们最近的发展道路是:人和武器的中间还得再加一个,即人加电子计算机加武器加环境这样一个系统。我们也是这样想的,虽然我们没说人-电子计算机-武器-环境系统,但我们的人-机-环境系统是包括这个内容的。这方面的发展看来已提到日程上来,我们要注意了。今后的国防技术的发展恐怕必然要走这条路。人、机要结合起来,这中间要有电子计算机。人、电子计算机和武器装备要结合起来。这个问题已经很重要了,光是人加武器装备已经不行了,还要加一个电子计算机。这个电子计算机要能尽量代替人的一部分工作,也就是采用专家系统、人工智能机这类东西。国外在这些方面的发展也是很多的,你们一定看过了,我最近拿到一本《人-机系统研究的最近发展》,这是1984年的,恐怕每年一本。其中内容就是我们说的这些。这样,我们的讨论会恐怕得把这个内容加进去,因为人-机-环境系统是我们自己讲的,现在这个任务已经不是我们自己讲的,是领导给我们的任务,而且认为这是国防科学技术发展的一个重要方面。

不能等人体科学都解决了问题再搞人-机-环境系统工程,现在摆着这些问题,不得不用简单、简化的理论和简单、简化的模型去做,但要用得合适,就解决问题;用得不合适,就解决不了问题,就会失败。这里重要的是经验因素。可能要有好多模型,什么样的模型在什么场合用起来合适,这恐怕要你们使出看家老本了。

老人有个缺点,反应慢,我想假如仅仅是反应慢这么一个问题,是可以解决的。就是在一个系统即机器和人之间加一个智能机,现在称人工智能。智能机可以解决反应慢的问题。因为反应慢是有规律的,就可以用机器,这个问题很重要。实际上,年轻人遇到很紧张很复杂的情况,如果他们的反应也跟不上,中间也可加智能机。现在光是人操作武器不行,人操作武器时要有智能机的帮助。所以将来人-机-环境系统工程上还要加一个,要考虑的不能光是人、环境、机器;人、环境、机器中间还要加一个智能机,即人工智能,作为人的辅助手段,帮助人做工作。我们现在考虑人-机-环境系统工程似乎应该有这么一个因素。人-机-环境系统工程现在的内容更复杂了,加了一个智能机,人工智能这些东西。

人工智能,或叫专家系统,就是中间加上有智能的电子计算机。国外考虑的新式武器大概都包括这个内容,没有什么人直接操纵武器,人操纵武器之间还有一个环节——智能机。这个智能也不是很高的智能,只是将有经验的人或者用武器打仗的这套经验形成电子计算机能够使用的一些规律,在实际操作中电子计算机就可以显示出该怎么打。这样就使一般的人因经验不够出错和情况复杂引起紧张出错的情况得以避免,并提高其作战操作能力,这是很重要的。现在美国已经在考虑这个问题,它的战斗机已有这种功能,不完全靠驾驶员自己,还靠机器,机器总结了以前所有使用这种飞机的最好经验。对这个问题,我们是应该考虑的。我们完全有这个条件,我们不是有很多搞计算机和电子的人吗,也有搞心理的人。这是个好机会,也是人-机-环境系统工程这个总题目里需要的。

人-机-环境系统工程要想得更远一些,想到 2000 年,想到 21 世纪。我们想的这个人-机-环境系统工程也是国防科学技术方面的问题。现在有一些迹象或苗头给我们一些启示,就是说到了 21 世纪,好像作战的系统决不是我们现在熟悉的作战系统。打仗,当然要靠人,但人跟机器,跟人-机使用的环境关系更错综复杂,或者说人跟机器更紧密。这个机器包括计算机。这样一个问题恐怕要考虑,譬如说机器人也会出现在我们这个人-机-环境系统工程里面,而且一个美国人在考虑空间站的进一步发展所说的机器人不是现在的这种机器人。现在的机器人大概只有一个胳膊,单臂,做一件事情。比如生产线上用来喷漆的机器人,再有搞装配的机器人,大概就是一个胳膊一只手。但将来要考虑的机器人,要好多个胳膊,实际上是好多个机器人协同工作的。这个问题就复杂得多了。两个胳膊都在那儿工作别打架呀!何况多臂多个机器人在那儿工作,是一个新问题。再说计算机,计算机现在最热的一个热门是让计算机有智慧,或者有一部分人的智慧,叫智能机。这是最热门的一个事情。现在像美国、日本、西德、欧洲都在搞这个事情,搞竞赛。我认为这个问题可以这样说,现在的计算机可以说是最笨的机器。就是这么一个笨的机器已经对我们技术的发展起了这么大的作用,这是在计算机早期包括我这样的人所从来没有想到的。那个时候认为计算机么,无非是计算计算,但现在很清楚,计算机影响了整个科学技术,影响了社会发展。假如它有智能了,那简直是不得了的事情。各国都在做这个事情,也就是说把计算机变成高度并行的运算是。人的神经系统是高度并行的。所谓人的创造性——智能,最主要的恐怕就是这个。我们常常说一个人想问题简单,就是单线的想问题。如果这个人聪明,他就不是单线,而是好多线的想问题。这就是说人的智能是高度并行的。现在国外研究的就是高度并行的计算机,比我们的银河 I 号还要快。

我们说到了 2000 年,同志们如果觉得有道理,就在人-机-环境系统工程的题目下有一个远期的设想,就要作预先研究。

前 言

本书是国家教委“八五”期间重点图书飞行器-机-环境系统工程系列专著(共三本)之一。按航空航天环境人体工程在飞行器(航空器与航天器)人-机-环境系统工程中的作用与地位,共分11章,分别阐述该专业的基本内容与最新成就。

航空航天环境因素在广度上、危害性上(特别是空间自然环境)远远超过地面上的任一领域。该环境的人体工程是在阐明诸种环境因素人体效应的基础上,通过工程技术和医学保障实现对环境因素的防护,从而保证飞行员与航天员能够健康地生存和高效地执行任务。因此,环境人体工程在航空航天中具有重要作用,并占有重要地位,但在国内外尚缺乏系统的专著。基于飞行器-机-环境系统工程生理学的研究历史久,资料分散,但多有记载。本书仅在体现航空航天两大领域相关性(连续性、继承性,在成就上相辅相成)的基础上,侧重有关航天器(飞船、航天飞机、空间站)的内容。

第一章是本书的总论。从整体和系统高度阐述在各章中难以提及的、各种航空航天环境因素作用于人体产生的反应特征与规律(包括共性与特性),俾使在各论的基础上将人-环关系提到更高层次的认识。

第二、三章是阐述大气环境(舱内人工环境与舱外高空及宇宙空间的自然环境),包括压力、生理气体、惰性气体、有害物质、温湿度的人体效应及其防护。压力与温度应急是航空器与航天器备受关注的意外事件,在这两章里得到充分讨论。

第六、七、八、九、十章分别阐述力学环境的人体效应与防护。重力环境中的失重(微重力)是载人航天中惟一独特存在的力学因素,对其认识尚鲜为人知;人体效应更欠深入探讨,故占主要篇幅。航天飞机升空以来,在上升段与返回段存在的强大超重问题,已得到解决。在飞船上存在的超重问题,已得到缓解。挑战者号航天飞机空中爆炸,促进了对航天救生的关注。振动、噪声、照明是飞行器经常存在的环境因素。航天器舱壁对宇宙辐射具有一定的屏蔽作用,在一般情况下人在舱内接受到的剂量不超过安全限。对这些在地球上、航空中已存在的环境因素,文中仅侧重载人航天的特点与需要,分别立章简述。

第十一章专题论述航空航天中上述各种环境因素对人体作用的复合效应和其在工程与医学上的防护。人生存于多种环境因素,经常受到多种因素的同时或相继作用。通过本章与上述各章的阐述,可以对人-环境关系得到全面认识。

第四与第五两章是阐述人与生存环境之间的物质与能量相关问题,这在航天领域具有不同于在地球上与航空中的独特意义,是在长期航天中生态密闭环境系统中的关键组成环节。

本书的内容,除了具有学术与理论(环境生理学、人体工程学)意义外,也是飞行器(主要是航天器)人-机-环境系统工程中生命保障、环境控制与安全救生三大系统的工程设计、使用与评价的理论基础与人的因素的依据;还可用于航天工效学与医学保障(选拔、训练和飞行中监督)的方案设计,具有广泛的应用价值。

第一章 绪 论

本章体现总论特点, 仅从整体角度, 重点讨论各章中难以涉及的关键内容。

一、航空航天中的环境因素

飞行员与航天员在整个飞行中, 将会遇到多种环境因素(自然的、人为的、常态的、异常的, 见图 1. 1)。这些因素的存在, 表明航空航天飞行环境的特殊性与严峻性。因素种类的广泛性远远超过地面上的任何领域, 其理化属性包括光、电、辐射、高温、低温、重力、力学、气体(生理的、惰性的和有害的)、污染物质、振动、噪声、毒性作用、氧化等; 其危害性由影响健康、工作效率到损伤人体, 甚至危及人的生命。阐明存在环境(条件)与人体效应(生理的、病理的、工效的和心理的), 明确其在系统中的作用与地位, 即可充实航空航天环境人体工程理论与实际, 深化对人-环关系的认识, 并可为制订防护(医学与工程)方案提供坚实的、先进的科学依据, 为实现飞行器-机-环境系统工程的优化设计与系统要求, 奠定基础。

飞行员-	舱内-	常态- 超重、噪声、振动、低压、缺氧、高温或低温 应急- 低压、缺氧、加压供氧、污染、爆炸减压
	舱外-	高速气流吹袭、冲击性过载、碰撞、低压、缺氧、加压供氧、低温
	非密闭舱内-	噪声、振动、高温或低温、缺氧
航天员-	舱内-	常态- 失重、辐射、噪声、有害物质、压力波动、高温(偶尔) 应急- 低压、高氧、缺氧、高温、低温、快速减压
	航天服内-	环境- 纯氧、高温高湿、有害气体
	空间与天体上-	环境- 真空、太阳辐射、宇宙线、热沉、微流尘

图 1. 1 飞行员与航天员在飞行中可能遇到的环境因素

(一) 环境因素的存在环境与条件

飞行器(航空器与航天器)在不同的飞行阶段与条件下, 会遇到或暴露出相应的环境因素。

1. 常见因素

飞行员在机场起飞前, 依地区、季节的不同, 会遇到高温(高湿)或低温; 起飞后, 在密封增压舱里会受到振动、噪声、加速度、低压高温(夏季)的作用。在战斗机的座舱里还存在武器射击后排出的废气。在 15 km 以上高空飞行, 舱内臭氧浓度会增加。身居非密闭座舱的飞行员, 当高度超过 1.5 km 时, 会受到低氧作用, 高度越高, 影响越严重。

航天员在上升段受到振动、噪声与加速度作用; 进入轨道后, 重力消失, 处于失重状态。由于人长期处于地球重力环境, 失重对机体会产生很大影响, 对重力器官, 影响尤甚。舱内风机、仪器设备的电动机, 以及航天器定向用的发动机等产生的噪声, 虽然没有飞机的音强高, 但作用时间长, 平均在 70 dB 左右, 足以引起人体疲劳与听力疲劳。由上述产生噪声的动力系统产

生的振动,强度轻微,不足以明显地影响人体的生理与心理功能。发射段人舱受到的振动强度高,返回段次之。

舱外空间环境恶劣,含有危及生命的真空、强烈的太阳辐射(面向太阳侧的物体表面高达 $+176^{\circ}\text{C}$)、危害极大的宇宙辐射、热沉(背阳侧低到 -121°C)、满天飞的微流尘与沙粒,还有逐年迅速增加的宇宙垃圾(人工发射的卫星等飞行体与其碎片)。航天员在整体飞行过程中,必须保护在增压密封舱里,在舱外或天体上(如月球)执行任务时,必须穿着具有防护功能的航天服。

2. 不常见因素

图 1.1 中列举的其他因素(上面叙述以外的),存在于航天器偶发事件、机械故障,或飞机在空战中发生的应急状态。

飞机座舱(密封增压)因故(被击穿或密封遭到破坏以及增压系统故障等)快速丧失压力时,发生爆炸减压(又称迅速减压),导致飞行员处于低压与缺氧状态。发生在 12 km 以上大高度时,还要受到高空加压供氧的异然作用。当需要被迫弹射离机时,在瞬间内受到强大的气流吹袭与高空低温的危害。

原苏联联盟 11 号飞船,在返回段人舱因故丧失压力,产生压力应急,3 名未穿航天服的航天员因爆发性缺氧而丧生。

温度应急也多次出现。美国水星 7 号飞船人舱冷却系统故障,舱温升到 40°C 。天空实验室入轨后,太阳能电池帆板故障,舱内电力不足,被动温控系统不能良好运行,导致工作舱内平均温度高达 $49\sim 55^{\circ}\text{C}$ 。

美苏早期出舱活动的航天员,因活动量大,航天服活动性能差,严重限制肢体活动,导致代谢水平过高,产热量过大,服内通风结构又不能迅速散热,航天员汗流浹背,极度疲劳,被迫提前返回舱内。后来增添水冷服,改善了散热能力和服装活动性能,再加上在地面进行了适当的适应性训练,舱外执行任务能力得到明显提高,持续时间由初期的 $10\sim 40\text{ min}$ 延长到 7 h 有余。

在近地球空间,有体积大小不等的陨石和微流尘。航天器碰撞直径大到数百米的陨石的几率甚低,据统计,平均百年飞行可能遇到一次。但微流尘(百万分之一克到千万分之一克)满天飞,可把航天器表面打得斑斑点点,虽然其动能还不致于穿透舱壁。1984 年美国发射的一颗卫星外壳上,有 16 个微小的坑,是铁质微小沙粒碰撞造成的。显然,这对航天服构成威胁。在月球(人类即将经常光临的最近的天体)上,由于没有大气层的屏蔽,有可能遇到已减速到 $1\sim 1.5\text{ km/s}$ 的流星碎片,仍具有一定的破坏力,故登月服的外层将采用特殊的防护材料。

原苏联火星 1 号在距地球 640 000 km 的高度上,曾记录到微流星群,在 1 m^2 面积上平均每分钟遇到一次冲击,但还未能穿透舱壁。诸如此类以 $50\sim 70\text{ km/s}$ 高速飞行的流星群,可穿透 $8\sim 20$ 倍于自身直径的金属板,即直径为 1 mm 的粒子可穿透厚度为 20 mm 的舱壁。这对在 21 世纪实现人类飞往火星的航天器舱壁厚度设计,是重要依据。

更严重的问题是,迄今所谓的太空垃圾成灾。人类在进行航天活动中抛入太空的各种物件及其碎片,多数停留在地球表面 $200\sim 1\ 000\text{ km}$ 的轨道上,可分为大、中、小三类。大的是卫星(包括尚在工作与已不工作的)与其附件。到 1994 年 7 月底,各国已向太空发射了 4 511 颗地球卫星。中小的是卫星、火箭发动机等在空间爆炸形成的大小不等的碎片,其数量无法估计。仅法国阿里安火箭第三级发动机的一次爆炸,就产生了 460 多块碎片。1983 年美国挑战者号航

天飞机在空间飞行时,窗口曾被一块空间碎片击中,幸免遇难。但这对舱外用航天服设计,是一个重要信息。

(二) 人体效应

各种环境因素作用于人体产生的人体效应(生理的、生化的、毒理的、病理的、心理的、工效的)可分为两大类(见图 1.2)。单一因素效应中的单独效应在各章(各论)由纵向角度分别阐述;这里仅体现总论特点,从整体上,即由横向联系上分析比较各种不同单一因素作用于人体某一系统或器官的效应,这些效应有共性,也有特性。从整体上看,特性即特殊效应占优势。各单一因素自身的理化特性不同,机体反应随之而异。此类特殊效应,既反映环境因素本身的特性,又反映人体在结构与功能调节上的特性,同时,也反映人-环境界面的特性与规律。为利于系统分析,我们从如下三个侧面(角度)进行讨论。

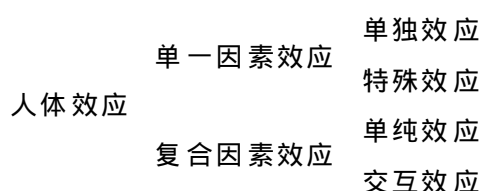


图 1.2 环境因素人体效应的分类

1. 亲和性、选择性和特殊性

尽管机体作为一个整体的多层次(水平)系统进行着机能活动,但实际上,各单一环境因素与人体之间的活动,却体现了该三性的相互关系。

亲和性和选择性的具体体现是:有的因素有选择地同具有亲和性的某一个或数个系统或器官发生作用(见图 1.3)。

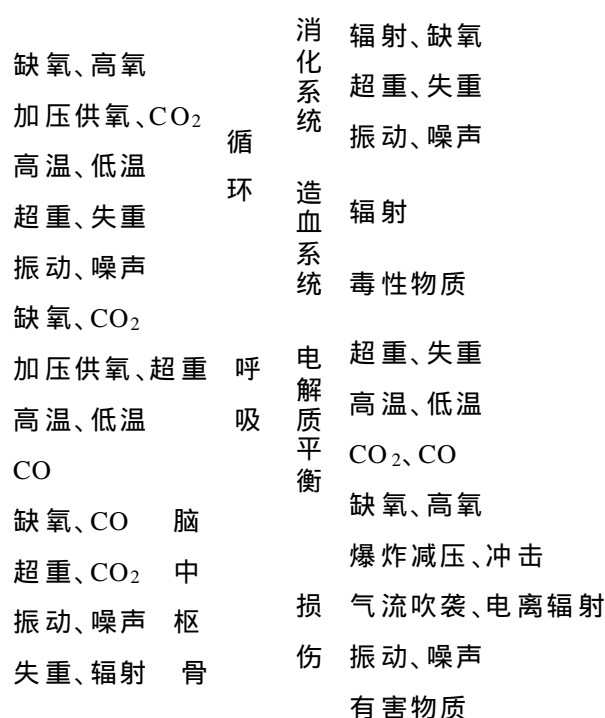


图 1.3 单一因素作用部位与效应

特殊性体现在:各系统或器官可以接受多种因素,但对不同因素的反应,在形式上、特征上、规律与机理上,并非一种,而是多种模式。下述各系统的反应模式(第(2)项)体现此类多种模式特殊性。不同的环境因素,依其量级水平(强度)能够同时或相继作用于具有亲和性的多个系统或器官,并产生相应的效应。全面分析和比较这些特殊性,可提高对环境效应的认识

水平。

2. 各系统的反应模式

(1) 循环系统

该系统具有对体内外环境因素与心理因素反应最广泛、最灵敏和快速的特征。按其反应规律(模式),可粗分为如下三大类:

一是突变型。失重属于此型。遵循突变-适应模式。随着进入轨道失重状态,流体静压消失,在地球重力环境多年进化而成的循环调节机理完全失灵,代之以适应失重状态的新机理。血液重新分配便是其中有代表性的一个方面。约有 1.5~2L 的血液,从下肢涌向上半身。由于静脉淤血,组织液增加,形成面部水肿,面貌改变,视若二人。

二是代偿型。缺氧、高低温、加压供氧、正向超重属于该型。缺氧与加压供氧通过心率与心输出量等主要功能的增强,提高生命主要器官(心脏与大脑)的供氧水平。缺氧是通过血液重新分配,将皮肤与内脏血液,增调到心脏与大脑。高温与低温是通过血液重新分配,增加或减少皮肤等暴露部位的血流量,调控散热量的多寡。

+ G_z 作用时,引起心血管系统的代偿反应,增强循环功能,从而改善视网膜与脑中枢的血液供应。

当这 4 种因素的量级水平达到一定程度时,发生代偿障碍,循环功能突然大幅度降低,严重时,导致意识丧失。

三是应激型。振动、噪声属于该型。量级水平达到一定程度时,某些循环功能随之增强,但其增强程度并没有像缺氧、加压供氧、高低温那样规律性强。由对机体利弊角度考虑,也难以找到上述 4 种因素(代偿型)那样具有显著的生理学意义。

(2) 呼吸系统

呼吸对不同环境因素的反应,具有如下两种模式:

一是代偿型。缺氧、加压呼吸、高二氧化碳、一氧化碳中毒、高温、低温属于该型。

随着缺氧程度增强,肺通气量相应增加,外呼吸(氧与二氧化碳交换)增强,氧摄入量随之增加,改善机体缺氧情况。但当缺氧水平提高到一定程度时,呼吸代偿功能不能胜任,障碍随之而生,节律严重紊乱,进而发展到严重的周期性呼吸。

一氧化碳中毒与高二氧化碳引起的呼吸代偿性增强与障碍,同缺氧相似。当吸入气中二氧化碳浓度为 3% 时,肺通气量已略高于正常值;当高到 6.7% 时,已低于正常值,即陷入呼吸代偿障碍状态。

高温与低温的呼吸效应在于通过增减呼吸量,调控体内热量排出的多寡。在对高温耐力差的个体,会因过热引起呼吸的过度换气,进而导致呼吸性碱血症,抑制呼吸中枢的兴奋性。

二是应激型。超重属于该型。呼吸对 + G_z 作用非常敏感。由于解剖学与生理学上的特点,在 + G_z 作用时,将产生一系列机能障碍。采用穿抗荷服、做抗 G 动作等多种对抗措施,更会加重肺功能障碍的发展。在高值 + G_x 作用下,胸肺效应尤为突出,肺后底部高度淤血,肺各部通气灌流比例失调,出现“有气无血”与“有血无气”等严重影响外呼吸现象。

低频与一定强度的 z 轴振动,可引起明显的过度换气,动脉血中二氧化碳分压降低,进而影响飞行工效。

三是防御功能。在轨道上的人舱内大气环境里,存在着气溶胶与粒子。即使是无毒的,在航天失重作业中也是有害的。幸而呼吸系统(鼻腔、气管、支气管、肺)对粒子进入肺泡有屏障作

用。在失重环境,直径在 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的粒子状或水滴状污染物的沉着率,远远低于在地面上。进入到不存在纤毛的下呼吸道末端的粒子量甚少,即失重对一定范围直径的粒子危害有防御作用,但对 $0.5 \mu\text{m}$ 以下的,无明显作用。

(3) 中枢神经系统

该系统的中枢是体内外信息的处理和全身功能的调控中心。接受多种环境因素(超过图 1.3 中列举的)的作用。其反应特征与规律极其复杂。在各论里都已阐述。这里仅以最多见、最易表达、属于最严重反应层次的意识丧失为例,略加系统描述有关因素的特殊效应,包括意识丧失原因与机理。大致上可分为如下四类模式:

一是直接作用型。缺氧与一氧化碳中毒属于此型。机体达到严重缺氧水平时,脑组织氧分压低到意识丧失界限值(判定客观标准是肺泡氧分压降到 4 kPa 以下,或脑回流静脉(如颈静脉)血氧分压降到 2.53 kPa 以下)时,意识便会丧失。在大高度(13 km)以上发生爆发性缺氧时,经 10 余秒钟,意识就会丧失。但当血中氧分压提高到界限值以上时,意识立即恢复。一氧化碳中毒引起的意识丧失模式同属于直接作用型,但意识丧失发展与恢复较慢。

二是循环障碍型。缺氧、加压供氧、高温属于此型。当严重缺氧导致植物神经功能失调,即由交感神经占优势转为迷走神经占优势时,心率与血压迅速大幅度降低,脑供血不足的同时血中氧分压又低,这双重作用会迅速导致意识丧失。加压供氧的加压值高于耐限值(4 kPa 以上)引起的意识丧失,也是属于该型,但机理不同。在高温耐力差的个体,会因过热引起循环代偿障碍,使外周血管持续扩张,突然发生脑部供血不足,产生虚脱,进而意识丧失。

三是脑贫血型。 $+G_z$ 超重可引起脑贫血性缺氧。当超重值过高引起的脑血流量减少到界限值时,所发生意识丧失称为 G 引起的意识丧失,简称 G-LOC。

四是血管型。低二氧化碳症(通常是因某些刺激或诱因引起的过度换气的继发证)可引起脑血管收缩。当脑血流量减少到界限值,即血中氧分压低到意识丧失界限值时,意识随之丧失。

(4) 消化系统

在航空航天领域,有关环境因素对胃肠的作用,主要表现为如下两种模式:

一是功能减退型。消化系统对缺氧敏感。由相当于 $3 \sim 4 \text{ km}$ 高空缺氧开始,唾液分泌量减少,胃液分泌开始改变,在 4 km 缺氧水平,胃液虽然减少,游离酸和总酸度提高。缺氧对胰腺和胆汁分泌的影响,尚缺乏一致性,有报导说,在 $2.5 \sim 4 \text{ km}$ 高度上胰腺分泌受到抑制,在 4.5 km 高度上反而增强。在 $6 \sim 8 \text{ km}$ 高度上胆汁分泌才受到抑制。肠腺对缺氧敏感性低,在 $6 \sim 8 \text{ km}$ 高度上分泌明显减少。

振动对消化道有明显影响。在 $2.5G$ 振幅与 $9.5 \sim 12.5 \text{ Hz}$ 的振动范围内,在 9.5 Hz 时,胃有振动感觉;达到 12.5 Hz 时,该感觉反而消失。但在 0.5 km 高度上人为的颠簸飞行,却对肠腺分泌产生了明显抑制效应。强噪声对胃肠道有明显作用,这对长期在强噪声环境作业的防护,不容忽视。

二是损伤型。胃肠道上皮细胞对电离辐射甚敏感。如照射量为 $0.5 \sim 1.0G_y$ 作用 $1 \sim 2 \text{ h}$ 后,出现腹泻等消化道症状。如果航天员直接暴露在宇宙空间,由于高能电子流的作用,胃肠接受剂量可能为 $0.13G_y$,这样的剂量已足以引起胃肠功能改变。幸好航天员是被保护在具有屏蔽功能的人舱里。但最大的威胁是长期航行,接受太阳大耀斑的可能性大。爆炸减压、气流吹袭均有可能损伤胃肠,见下述。

(5) 骨

作用于骨组织的因素有电离辐射与失重。骨组织对电离辐射效应属于高敏感范围(同胃肠上皮细胞相似),辐射损伤骨组织造血功能,白细胞与血小板减少,剂量越大,越严重。失重对骨组织的作用是非病理性的,限于以脱钙为主的骨矿物质丧失。对这两种因素的作用机理,尚不明确,因而对其防护,尚无良策。

(6) 体温调节系统

除了环境温度之外,能够对人体体温调节系统有如对上述各系统那样明显作用的因素,尚欠研究。最明确的是低压可提高人体水的蒸发散热。有的报导还提出某些因素影响温度快感带(在人-环境界面感兴趣的)问题,如低压可提高快感带,某些惰性气体能降低快感带,失重有降低快感带的趋势等。试验结果表明,在含有不同比例的氧、氮和氦混合气的环境里,舱温 18~24 。停留 10 余小时,受试人员的快感带降低 3 。显然,快感温度的主观性强,需要有大量统计学资料的支持。

3. 各系统的损伤

多种因素的量级水平过大,达到人体病理性效应时,可引起具有亲和力的系统或器官在结构上损伤,或理化水平的改变。这里仅列举损伤强的因素。

飞机在高空飞行中,气密座舱因故突然破裂或丧失气密时,在发生爆炸减压瞬间,可发生两种类型的气压性损伤:一是气浪冲击(暴风)。舱体破口越大,危害越大。乘员在舱内将会受到强烈的震荡或碰撞,伤筋动骨时常发生。在近破口处,人可被抛出舱外。二是空腔器官的损伤。肺脏最易受伤,胃肠次之。当气胀严重时(在大高度上),肺内压过高,常见肺组织出血、气肿、气胸等。仅在受到极严重减压时,胃肠因内压过高而受到损伤。

冲击过载所致损伤,多限于脊柱骨折。当飞机座舱遭到破坏,飞行员弹射离机瞬间,在+ G_z 过载作用下,发生脊柱压缩性位移,严重时,导致椎体骨折。高速气流吹袭造成的损伤较广泛,有表层软组织撕裂出血。若强大的气流从口鼻冲入,甚至可造成肺和胃的损伤。胸腹部受到气流冲击时,血液被挤向头部,可能造成脑血管破裂。甩打伤(甩扭伤)主要是四肢的长骨、肌肉、韧带、肌腱撕裂和扭伤。

上述这些力学环境因素作用的特点是:时间很短,作用力很大,通常是超出人体耐限,宜研究更先进的防护对策。

二、环境因素在人-机-环境系统中的作用与地位

飞行员在座舱环境里执行高空飞行任务,航天员在乘员舱内外的航天环境执行航天任务,均是处于人-机-环境系统中。航空航天实践表明,系统当中的任一要素工作不正常或发生故障,均危及整个系统的工作状态或安全性,甚至造成头等事故。一系列的安全措施与防护方案虽然有一定成效,但由于缺乏系统工程观点,难以做到最佳方案。按人-机-环境系统工程理论^[1]:“最根本的出路在于……研究整个系统各环节(要素)间信息传输的相互关系,从中分析、权衡、寻找出最佳工作状态,使该系统在安全、高效、经济诸方面获得最佳效果,……”。

本节中心议题是环境因素在人-机-环境系统中的作用与地位。由图 1.4 可知,航空航天环境因素与防护,贯穿到系统的始终,最后是按制定的环境标准与要求,通过人体和模拟实验进行全面评价。

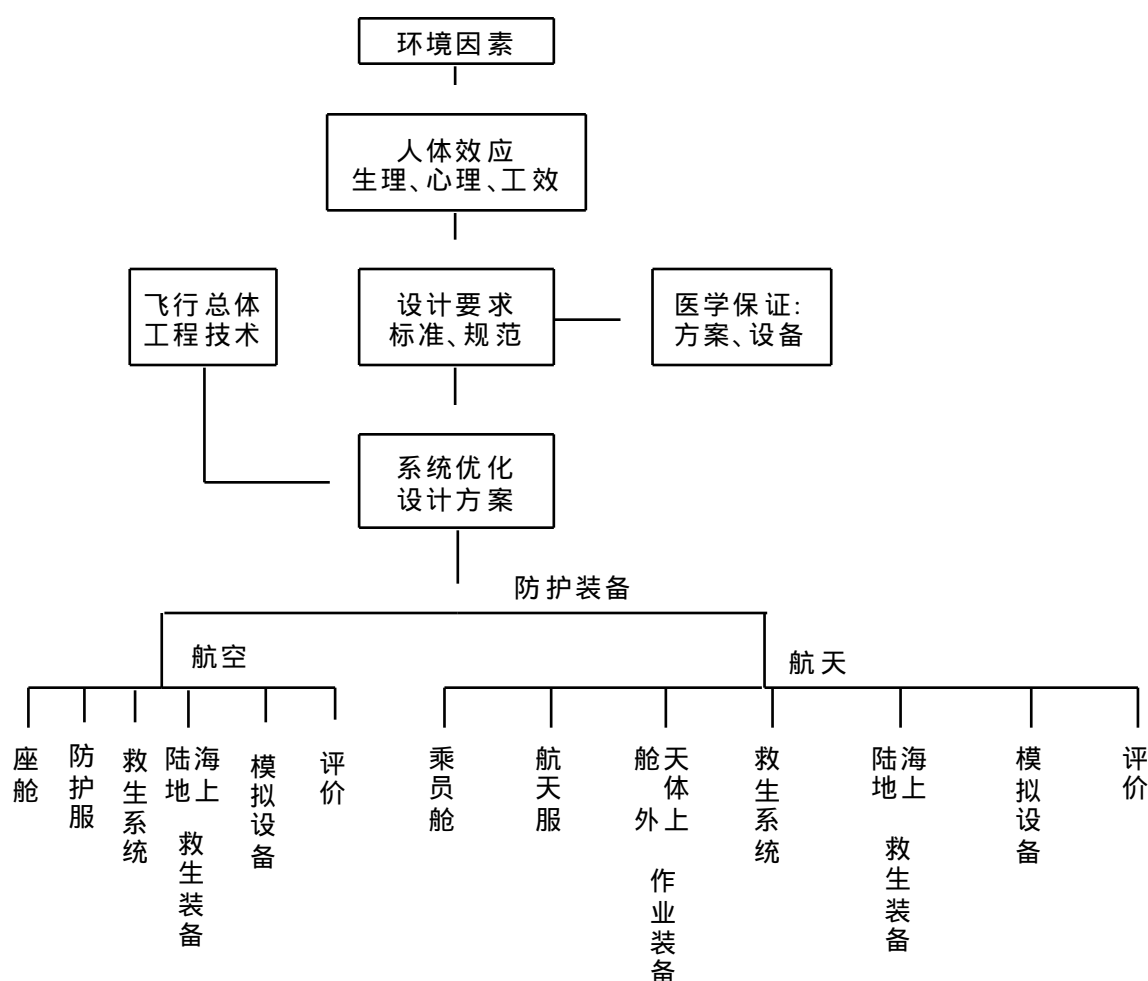


图 1.4 环境因素在飞行器人-机-环境系统中的作用与地位示意图

为实现系统上的最佳状态,各基础环节必须做到先进、科学。人体效应已叙述过了。在此基础上制定的设计要求,必须符合系统要求(安全、高效、经济)。由人-环境界面考虑,对于系统要求,有如下几项技术关键,值得关注。

(一) 不安全因素分析

航空航天是风险性职业。存在三类不安全因素的来源。

一是人本身。如心理或生理功能不稳定,适应新环境能力差,存在潜在性疾患等会影响执行任务,或造成操作错误。

二是人-机关系。人用的仪器设备设计不符合要求,易造成操作失误,或难以操作。

三是仪器、设备、防护装备故障或失灵。

1. 不安全因素

在航空航天实践中,仅在环境人体工程范围,已发生了大量事故。

(1) 国内飞行事故分析表明,在某一阶段内飞行人员由于功效降低而导致的操作错误占 58.3%。

(2) 据我国某空军部队统计,进入夏季后发生的 14 起飞行事故和事故征候中,有 8 起与高温有关。

(3) 美国 1965 ~ 1977 年间飞行事故或失事统计结果表明,约 1/4 事故发生在暮色微暗或黑暗时刻。

(4) 据英国一个空军部队 10 年间统计,因供氧装备失灵和使用不当发生的缺氧事故达 400 起,我国也发生多起。

(5) 飞机座舱突然减压,弹射离机后事故(开伞等),在国内外已非少见。

载人航天历史虽短(迄今不过 33 年有余),航行次数与航天人员均有限,但基于人的因素与属于对飞行环境因素防范不利而引起的事故,已有多起。原苏联联盟 11 号飞船在返回段乘员舱丧失压力,发生爆发性缺氧,3 名未穿航天服的航天员丧生。联盟 23 号在返回中因遇到暴风雪,被迫溅落在湖里。联盟 T-14 号与 TM-3 号飞船航天员因病提前返回。联盟 1 号飞船在返回下降到 6.7 km 高度上主伞失灵,飞船坠毁,一名航天员被烧死。

美国双子座 8 号在轨道飞行段,由于航天员操作失误,飞船失控,中止飞行,应急返回。阿波罗 4 号人舱为 1/3 大气压纯氧环境,在发射台因舱内仪器打火,发生火灾,3 名航天员被烧死。天空实验室在进入轨道后,由于太阳能电池帆板未张开,舱内电力严重不足,导致乘员舱平均温度 49~55℃,最高达到 88℃。

此外,尚存在潜在性(即尚未得机暴露的)危险。按地面上大量试验结果和飞行员大量飞行实践所得出的结论,由于人-环境界面防范方案不利(实际上是由于现代科学技术发展水平受限),减压病与空间救生等均是潜在性威胁。

2. 安全准则

按最新观点,标准具有广泛内涵,包括具体限值(这是一般公认的)、要求和准则三个层次。在分析不安全因素的基础上,制定这三个层次的内容,可为防护方案与装备提供既有具体限值,又有限定条件的设计依据。在下述各章中对限值与要求均有具体阐述,这里仅对安全准则简要说明。准则包括定性与更高层次的定量两大内容。关于定性例子,在此列举美国 NASA 标准中乘员舱总的振动设计准则^[2]:

(1) 总的振动设计。应当控制振动的产生和穿透,使振动能量达到这种程度,即在载人期间不引起人的损伤,不干扰工作效能,不引起疲劳或不使整个的人-机效率降低。

(2) 设备振动

应当固定或安置好所有受振的设备,以降低乘员舱的振动。

系统设计应当包括振动控制系统。

应当提供易于定期测量振动水平的手段,以证实未超过振动暴露界限。

关于定量的例子,列举防减压病发生的安全准则。在制定乘员舱与航天服压力制度时,按最新研究成就,以减压病最低发生率与氮过饱和最大容许系数(简称 R 值,或减压病安全系数)为防减压病的安全准则,R 值是舱压与航天服压或组织氮分压与最终总压(减压后压力)之间的比值,基于计算单位的量值不同,前者的比值略高于后者。R 值的内涵是,舱压越高(组织氮分压越高),航天服工作压力应相应提高,即 R 值相应降低,才能达到安全目的。如果减压病发生率容许为 1%(很严格,要求高),舱压又高(如果为 1 atm),则 R 值必须降到 1.2 以下,航天服工作压力高达 0.5 atm 以上,才有可能保证发病率不超过 1%。但依国情与观点之不同,各航天国采用的安全准则略有不同,即容许发病率的高低不同,即使发病率容许程度相同,规定的 R 值也有差异。如按 NASA 对空间站舱外活动方案的报导:舱压为 1 atm,R 值定为 1.4 的条件下,允许严重发病率为 1%。而欧洲舱外活动方案的 R 值定为 1.2,允许发病率同为 1%,但不限于严重的减压病。在 NASA 最新修订的标准中^[2],进而指出 R=1.22 时不产生减压病。原苏联舱外航天服工作压力,高于美国,低于欧洲方案,其容许发病率最高,超过 5%。应当指明的是,尽管各国采用的防减压病的安全准则有差异,但为预防减压病的发生,均采用行

1 atm=101 325 Pa。由于本书内容是建立在许多实验报告的基础上,故保留使用 atm 单位——编者注。

之有效的辅助措施——吸氧排氮,以补充上述安全准则之不足(详见第二章第五节)。

(二) 不同功能状态的确立

1. 单一因素

在图 1.1 中列举的大部分环境因素具有很宽的量级水平,其人体效应也很广,由轻度到严重,甚至损伤或危及生命。此类因素作用于人体必然会引起不同程度(水平)的功能状态的改变。按人体科学理论^[3],人和环境这个超巨系统是辩证统一的,在这个超巨系统中能达到一定的功能状态(正常与不正常)。后来又提出更高层次的功能态观点。

近年来,研究或制订有关人-环境界面标准或阐明环境因素人体效应中,已普遍采用不同类型的功能水平(或称类型、功能区等)。对于深化人-机-环境系统工程的安全、高效要求取得了一定的进展。

(1) 缺氧

缺氧的量级水平宽,人体效应最广泛,也最严重,可明显划分出轻、中、重、严重、极严重各层次。在后者,由缺氧作用开始,经 10 余秒便会丧失意识。著者按急性缺氧的量级全程与其人体效应,制定了 6 个层次的生理界限值:最佳值、夜航安全值、功效保证值、功效容许值、耐限值和极限值,在此基础上进而制定了 10 项用于飞行员的普通供氧生理要求(成为国家军用标准,详见第二章第五节)。

(2) 温度

温度的量级水平最宽,其人体效应的广泛性与严重性次于急性缺氧。表 3.15 的著者针对乘员舱的温度环境医学要求,制定了三个区六种功能水平的标准,即舒适区(正常与维持水平)、工效区(保证与降格水平)与耐受区(安全与极限水平)。

针对飞机座舱温度控制的要求,有的著者按生理限值划分为舒适区、工效保证区和冷热应激区。

(3) 振动

振动强度为(1 ~ 50 Hz, 1 ~ 20G)可导致软组织损伤。国际振动组织(ISO)规定了三种基本标准:保持舒适、保证工作效能与保证身体健康(详见第七章)。按 NASA 标准^[2],在振动暴露准则的设计依据中,对这三种界限水平基本肯定,但结合载人航天环境,做了修正,具体为:

人体对 1 ~ 30 Hz 的振动加速度特别敏感。为了保持舒适、工作熟练和安全(或健康),一般公认的三个界限分别称为舒适性降低界限,疲劳-熟练度降低界限和暴露限度。

暴露限度。振动加速度暴露限度设定在约为痛阈水平的一半上。

疲劳-熟练度降低界限。在该振动加速度界限,一般认为疲劳使工作效能降低,而超过此界限,可认为在多种工作中,该暴露具有损害工作效率的明显危险。该界限是频率和暴露时间的函数,并是暴露限度所定的加速度值的一半(- 6 dB)。

舒适性降低界限。关于舒适以及像吃、读、写这样活动能力的振动加速度界限。该界限是疲劳-熟练降低界限值的 1/3(- 10 dB)。

(4) 模拟失重

在进行立位加下体负压试验时,第六章著者根据耐受时间长短,外周阻力绝对值和变化率,心率的次数和变化斜率进行综合评定,将心血管反应区分为 4 种特征:血管型、混合型、心脏型和欠调型。卧床后试验表明,从不同反应特征,可初步预测失重效应^[4]。

(5) 加压供氧(加压呼吸)

按人体对于加压呼吸反应程度的不同层次可分为五种生理界限值: 阈值、安全值、容许值、耐限值与极限值, 这些界限值是加压呼吸在高空供氧应用的依据(详见第二章第五节)。

2. 复合因素

针对直升机座舱振动与噪声复合效应建立的 NASA 模型, 是按飞行员的感觉, 划分为 6 个等级的舒适度, 用于对飞行员的评价。另有著者利用飞机座舱常见的具有明显交互作用的 4 种环境因素(缺氧、温度、振动与噪声)的复合效应, 建立了人体 4 种功能状态(舒适、功效、安全与耐限)综合评定模型(详见第二章第五节)。

(三) NASA 三种量级水平

近年来, 美国在研究自由号空间站环境控制方案中, 将环境控制系统的关键参数, 按航行状态与时间的不同, 划分为三种量级水平。由表 1.1 可知, 几项关键参量的改变, 对人体效应并不会造成明显差异。由人-机-环境系统工程高度分析, 明显的效益是经济性。携带上天的各项参数的数量与其容器结构重量、体积不同, 这对于长时间航行, 并需要由地面上定期补充给养与燃料等的空间站, 是不容忽视的技术关键。故该三种量级划分, 在除了俄罗斯以外的航天国(欧洲、日本、我国)普遍采用。

表 1.1 美国空间站环境控制系统三种量级水平

参 数	正 常	降 级	应 急
人舱总压/kPa	101.3	101.3	101.3
氧分压/kPa	18.63~22	16.56~22	15.87~26.9
二氧化碳分压/kPa	0.41	1.01	1.62
舱内气温/	18~24	16~30	16~32
露点温度/	4.6~15.8	0.9~21.3	0.9~21.3
通风/($m \cdot s^{-1}$)	0.08~2.0	0.05~0.51	0.025~1.02

注: 在 3 种水平湿度不超过 25%~75% (RH), 降级水平的航行日期为 90 d, 应急水平的日期, 文献推导为 3 种: 21 d、22 d 与 28 d

(四) 原苏联的两种安全水平

对航天服由安全角度出发, 按应急航行与常态航行划分为两种水平的限值。由表 1.2^[5]可知, 应急航行时间虽然短, 但对氧的需求量高, 相当于常态下的重体力负荷时的需氧量。这表明应重视应急状态对生命必需氧的供应; 积热容许量高于常态, 表明适度的过热对生命活动的影响次于缺氧。随着氧需求量的增加, 二氧化碳排出量必然相应增加, 头盔内容许值相应地提高也是容许的。

综观上述各类不同功能状态与水平的划分, 表明客观上需要如此; 而各自的内涵与名称之不同, 代表其思路、观点与意义有差异, 侧重点不同, 不宜规范化。

(五) 代谢平衡

保持航天器环境控制与生命保障系统质量平衡, 是人-机-环境系统工程的一项关键的系统要求, 其中人体代谢平衡则是保证质量平衡的重要内容。按人体科学的基本观点^[3]: “人是一