

长期载人航天中人机功能分配计算模型的探讨

周前祥 姜国华

摘要 为探讨长期载人航天中人机功能分配的机理,根据国内外相关文献,分析了长期航天中的人的工作任务及其工作能力的影响因素。在此基础上,提出了基于工作负荷应力-强度的人机功能分配计算模型。

关键词 长期航天 人的工效 人-机功能分配 数学模型

中国图书资料分类法分类号 R857.14

Theoretical Exploration of Man-machine Role Distribution in Long Term Manned Space Flight. ZHOU Qianxiang, JIANG Guohua. Space Medicine & Medical Engineering, 1997; 10 (6): 417 ~ 420

Abstract To explore the principle of man-machine role distribution in long duration manned space flight, the human tasks and factors affecting human performance capability were analyzed, and a man-machine functional allocation model based on stress-strength was put forward.

Key words Long duration space flight human performance Man-machine functional allocation mathematical models

Address reprint requests to ZHOU Qianxiang, Institute of Space Medico-Engineering, Beijing 100094, China

目前,对于载人航天活动中的人、机功能分配,还没有一个系统的、可普遍采用的决策方法。一般认为决定功能分配的主要准则是在定义系统及分系统功能的基础上,按功能的属性与重要性进行分类,然后结合人所特有的能力限制,确定究竟是由人还是自动化系统操作才能最好地完成该功能^[1,2]。而且,这种基于航天员与自动化各自特点的人机功能分配还是一个不断反复、连续的决策过程,并紧密联系于系统设计过程的各环节中。尽管如此,这种分配过程定性的变量太多,缺乏有效的定量计算依据,因而有必要在此基础上探讨一种新的功能分配计算模型。

据统计(肖名鑫,周以蕴,1996),30多年的载人航天实践证明:尽管机器的自动化技术能解决许多人不能解决的难题,但只要上面有了

人,在任务分配合理的情况下,可以使载人航天器更可靠、工效更高、使用寿命更长以及完成任务的成功率更大。因为由于航天员的存在,他能成为飞船系统的一个高度智能的冗余系统,从而会大大提高飞船的安全性和可靠性,主要表现为^[3,4]:(1)人在航天中能对意外情况作出迅速而正确的反应;(2)在与地面失去联系时能独立自主地完成飞行任务;(3)在设备发生故障时,能及时发现,检查修理,保证设备的正常工作;(4)进行科学研究和科学观测时,能随时调整仪器,主动选择目标,提高观测效果。因此,分配给航天员合适的工作负荷将简化系统设计、操作的复杂性以及提高系统的可靠性。

随着载人航天技术的发展,预计下世纪初国际永久空间站将建成,它的主要任务是进行空间科学实验,包括空间生命科学和物理学实验、空间制药和材料加工等,这些任务单靠自动化操作是不行的,需要有人参与^[5,6]。但是,在长期航天中,航天员的作用从简单、被动的活

动逐渐发展到参与多方面复杂的工作,其主要精力将集中于信息管理和决策。据分析,空间站与航天飞机相比,仪表板增加一倍,控制台增加四倍,信息量也增加一倍。估计空间站航天员搜集和处理这些信息的时间每天约需 3.8 h,而每名航天员每天的工作时间至多为 10 h^[1]。除完成信息的搜集、处理和决策外,还要完成科学实验、科学观测、空间加工生产、有效载荷装卸、空间机动、会合、对接和通信联系以及其它各种舱内、舱外活动。然而,人特有的能力限制常常是固定的,这样,在长期载人航天工效学研究中,应全面研究航天员的工作特点和工作能力,协调人和飞船的关系,进行人机功能的最优分配,以确保飞行的顺利进行。

影响航天员工作能力的主要因素

在长期飞行中,影响航天员工作能力的主要因素是太空飞行中的物理因素(失重、噪声、辐射等)、生理因素(心血管功能失调、肌肉萎缩、骨质疏松、航天员运动病等)以及心理因素(飞行的危险性、环境狭小、隔绝、生活单调等)^[7,8],即:

(1) 航天员进入太空以后,约有一半以上出现了航天运动病症状,即类似于地面上晕车、晕船的植物性神经反应(如呕吐、厌食和嗜睡等)以及出现错觉和幻觉。美国和前苏联飞行实践表明,对于前一种症状在飞船入轨后 15 min~2 h 开始出现,24~48 h 达到高峰,48~96 h 后症状逐渐消退。但有的航天员在飞行中和飞行后仍有上述反应,尤其在头动或身体运动时加剧。对于后者大约有 70%~80% 的航天员在飞行初期出现了不同程度的运动和体位性错觉。运动病的出现影响到航天员的健康,也降低了航天员的工作能力并使其精神和肌肉总是处于紧张之中。

(2) 航天中视觉功能发生一些适应性变化,例如,有的航天员出现了眼花和看错地平线

的现象^[9]。前苏联研究证明飞行第 1 d,主要视觉功能降低 5%~30%,然后逐渐恢复。反应敏感度在进入失重后即刻丧失 10%,5 d 后丧失 40%。

(3) 载人航天处于微重力环境,这样将会影响到人的空间定向和运动控制能力^[10],因此,航天员在地面重力情况下形成的习惯,在航天失重情况下会成为一种干扰,尤其在舱外无支持物的空间干扰更大,致使航天员在运动或作业时常出现用力过度、失定向以及肌紧张度过高等现象,从而导致工作能力下降。这种运动性协调障碍通过一段时间适应,将会建立新的协调,运动系统的紊乱也会逐渐消失^[1]。

(4) 随着对失重环境的适应,心理紧张所引起的生理性反应将下降,而肌肉萎缩和骨质疏松所引起的运动器官功能下降却越来越明显。航天员出现了肌肉工作能力下降、硬度降低以及下肢围径减小^[9]。长期飞行会导致航天员工作和运动后十分疲劳,以致于不得不减轻工作量,缩短工作时间,因此,可以推测,在长期航天中,失重下的生理功能失调将会引起更大的工作能力降低。

(5) 航天员长期生活在狭小、密闭的座舱中,与地面完全不一样的工作方式,将会使航天员出现一系列的心理障碍,如忧虑、抑郁等,从而影响到其健康和工作效率。

任务分析

人在长期航天中的操作,可大体分为飞行操作、科学试验以及其它的大型航天活动等^[1]。

飞行操作 航天员接收信息对飞船姿态进行判断;利用全姿态仪判定飞船相对地球的姿态;通过舷窗观察地球或星空,根据地物景像判定飞船姿态;飞船位置指示器向航天员显示飞船相对地球的位置及某些状态(姿态除外),使航天员能够及时地了解飞船位置及状态的信息。

对飞船实施的姿态控制,主要是通过操纵

杆经过飞船运动方程控制其三个姿态(俯仰、偏航、滚转)及变化速度,来对飞船进行姿态调整和姿态保持。

在交会对接过程中,航天员必须不断地控制飞船状态、测定和修改与目标船的距离及接近速度来实现其与目标船的接上。

航天员有时需要在舱外进行空间维修、装配、转移和营救等工作。出舱活动时会遇到很大的情绪负荷和能量消耗,需要在无支持状态下进行空间定向,借助操纵装置维持身体状态。例如,“双子星座”的航天员在出舱过程中的能量消耗明显地超过预估值,而致使有些任务未按计划完成。

飞船内有大量的显示和控制设备,航天员除直接参加部分操纵控制外,必须对系统做出监视,必要时进行干预和决策。

科学试验 在长期航天条件下,可进行地球观察、天文研究、材料试验以及生命科学试验等研究。

航天站活动 在未来的长期航天活动中,初期的巨型航天站可能建立在地球与月球之间的轨道上,另外,也可能进行星际飞行,因而航天员的工作将会有新的不同特点。

人机功能分配在长期飞行中的作用

航天员在载人航天器中的作用变化是在航天活动中对人的功能(如想象力、理解判断力、预见应变能力以及思想表达等)进行开发和利用的结果。与载人航天初期相比,人的作用发生了很大变化,其主要精力将集中于信息的管理和决策。此外,在未来的载人空间站上,将会有多个航天员同时长期在上面生活和工作,劳动复杂程度也越来越高。然而人的脑力和体力,尤其是信息接收和分析处理能力却有一定的限度,并且,飞行过程中,航天员亦需迅速处理大量受不可确切预知空间环境影响的复杂信息^[1]。因而,一旦赋予人的工作任务超过他的

能力限度,就会出现工作超负荷的情况。在超负荷条件下,人的工作效率会明显下降,往往容易出现人为差错,而超负荷严重时,还会出现惊慌失措等现象,从而影响飞行器的安全工作。

因此,在长期航天中,基于人的能力特性和影响因素,通过最佳的人-机功能分配,将航天员尽可能从一些重复性的常规工作任务中解脱出来,使他们能集中精力搞好信息搜集、处理和决策,只有这样,才是真正地发挥人的作用,并确保飞行任务的完成。

人机功能分配的数学模型

目前,进行人机功能分配的主要依据是人的工作负荷或称任务所需的体力负荷和脑力负荷值^[1-8]。亦即人的能力、限度和行为特点,其中,人的能力包括其智力和心理、运动能力等。从理论上讲,只有在适度的工作负荷条件下,才能保持良好的工作效率。因为工作负荷过低,航天员的觉醒水平降低,持续注意能力变差,对目标信号或紧急事件的发觉与处理发生延迟或错误,并有可能导致严重事故发生;而过高负荷时,由于时间太紧,或作业要求超出操作者的信息处理能力,会使工效严重破坏,不仅任务无法完成,也有可能引起严重事故。因此,在进行长期航天中的人机功能分配时,必须考虑是否存在工作负荷过高或过低的情况。

根据前述的任务分析,长期航天操作基本上包括三类活动,即:以技能为主的操作、以规则为基础的作业以及以知识为基础的作业。此外,评价工作负荷的主要指标是航天员的能量消耗或努力程度。因而,基于上述观点,我们将长期航天中某任务要求航天员实际付出的努力程度或能量消耗称为应力,而将航天员在受各种影响其工作能力因素作用的条件下能够付出的努力程度或能量消耗称为强度,所以,这是一个应力-强度模型。

设应力为 s 、强度为 r ,显然, s 、 r 均为随机变量,那么将某一任务分配给人的可靠性

$R(s)$ 为:

$$R(s) = P(s \leq r) = P(s - r \leq 0) \quad (1)$$

假定 s 、 r 的分布函数分别为 $f_s(s)$ 、 $f_r(r)$ ，并令 $y = r - s$ ，则有:

$$\begin{aligned} R(s) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f_s(s) ds \int_s^{+\infty} f_r(r) dr \\ &= P(y \geq 0) = \int_0^{+\infty} f_y(y) dy \\ &= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_r(s+y) f_s(s) ds dy \end{aligned} \quad (2)$$

一般情况下， s 、 r 均服从正态分布^[1, 10]，并设应力、强度的均值、标准差分别为 μ_s 、 $\hat{\sigma}_s$ 和 μ_r 、 $\hat{\sigma}_r$ ，则:

理大
的限
$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \hat{\sigma}_y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\hat{\sigma}_y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中 $\mu_y = \mu_r - \mu_s$ ， $\hat{\sigma}_y = \sqrt{\hat{\sigma}_r^2 + \hat{\sigma}_s^2}$
因而

$$\begin{aligned} R(s) &= P(y \geq 0) \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \hat{\sigma}_y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\hat{\sigma}_y} \right)^2 \right] dy \\ &= 1 - \Phi \left[-\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\hat{\sigma}_r^2 + \hat{\sigma}_s^2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

这样，根据分配的可靠度 $R(s)$ 、任务应力的 μ_s 和 $\hat{\sigma}_s$ ，利用式(4)和标准正态分布表来反推算出航天员需要付出强度的 μ_r 和 $\hat{\sigma}_r$ ，以此来判定任务的功能分配的可行性，即当 $\mu_r \leq \mu_{r0}$ (为航天员实际能付出的能量消耗或努力程度)时，可以将该任务分配给航天员，反之，若 $\mu_r \geq \mu_{r0}$ ，则可考虑利用自动化操作。

在实际研究中，关于 μ_s 和 $\hat{\sigma}_s$ 的获得可通过观测航天员的能量消耗或生理指标来获取^[1, 8]，而另一个指标 μ_{r0} 及 $\hat{\sigma}_{r0}$ 则可根据对航天员能力的统计分析进行判断，因而本模型具有实际价值。

讨 论

(1) 长期航天飞行过程中，航天员、飞船和

航天环境共同构成一个典型的人-机-环境系统。人即航天员，机为座舱及其设备，主要是操纵部件和显示部件，而环境则包括舱内人造环境及舱外航天环境。这样，航天员的机体会受到各种因素的影响，并可能导致其工作效率降低。因此，对工作任务必须采取最优的人-机功能分配，以维持航天员的健康状态和工作能力，进而提高整个系统的可靠性和安全性。

(2) 本文提出的应力-强度分配模型将可靠性同航天员的工作负荷结合起来，这种用定量计算的方法来进行任务由人或机器来完成的功能分配决策是一种新的思路。

(3) 人-机功能分配直接影响着飞船的人-机界面设计，并在很大程度上决定着实际执行飞行任务中人和机器的相互作用。通过功能分配，可以获得合理的人-机界面来确保整个飞行任务完成的成功率。

参考文献数 学

行任
从 1 张汝果主编. 航天医学工程基础. 北京: 国防工业出版社, 1991: 215 ~ 255
2 王希季. 中国返回式航天器发展途径探讨. 中国空间科学技术, 1995; (6): 1 ~ 8
3 吴国兴. 人在航天中的作用. 航天医学与医学工程, 1988; 1(2): 136 ~ 139
4 Brody A R. Space Operation and the Human Factors. Aerospace America, 1993; (10): 18 ~ 21
5 王德汉, 黄伟芬. 载人航天中人的可靠性. 航天医学与医学工程, 1996; 9(4): 295 ~ 301
6 沈美云. 太空飞行中人的工作能力. 中国航天, 1996; (2): 32 ~ 34
7 Nicogossian AE. NASA life sciences strategy and operation considerations. NASA Headquarters Washington D C., 1988: 18 ~ 29
8 沈美云. 航天适应性综合症. 航天医学与医学工程, 1996; 9(5): 389 ~ 390
9 Mathy G. Increase interactional pressure in human during simulated microgravity. The Physiologist, 1992; (1): 184 ~ 190
10 STEVEN A. M. Human performance and control of multiple systems. Human factors, 1996; 38(2): 323 ~ 329