

航天医学工程理论与实践

陈善广

(中国航天员科研训练中心,北京 100094)

[摘要] 航天医学工程是伴随着我国近40年载人航天的发展,孕育催生的一门新兴学科,具有特色鲜明的学科理论体系和实践技术方法。概述了航天医学工程的体系构成、研究内容和学科特点。

[关键词] 航天医学工程;载人航天;系统工程

[中图分类号] R85 [文献标识码] A [文章编号] 10009-1742(2007)09-0030-05

航天事业是人类开创的最宏伟、最激动人心的事业之一。月球登陆、火星探险、星际遨游是21世纪人类共同追求的梦想。回顾40多年的载人航天史,人类在实现了将航天员送上地球轨道、踏上月球、建立空间站的伟大壮举的同时,在相关的空间科学与技术研究领域也取得了累累硕果。中国载人航天经过近40年独立自主的发展与实践,取得了举世瞩目的辉煌成就,逐步形成了有鲜明中国特色的工程技术和理论基础体系。其中孕育催生的新兴学科——航天医学工程(space medico-engineering)便是突出代表。

1 航天医学工程的诞生

20世纪60年代末到70年代初,为适应中国载人航天事业的需要,国家专门组建了航天医学工程研究所(现为中国航天员科研训练中心),主要研究载人航天领域与人(航天员)直接相关的医学、工程问题。在充分吸收国际上航天医学、空间生命科学、环境控制与生命保障工程技术(简称环控生保)的理论知识和工程技术经验的基础上,形成了以航天医学、重力生理学、环境医学、环控生保工程技术、航天食品工程技术为主要内容的医学工程知识理论和技术交叉融合的学科体系,突出体现了以航天员为中心的系统论和系统工程的原理,其目的是把研究和解决航天中人的安全、健康和工作效率的医学工

程问题汇集于一体,从系统的高度寻求航天器人机环境系统最佳组合方案,以使工程系统达到安全、高效和经济的总目标,这就是航天医学工程。国家航天“八六三”计划中的载人航天器环控生保及医学防护技术的预研项目的实施,促进了航天医学工程的积累与成熟;至20世纪90年代初国家载人航天工程正式启动后,航天医学工程得以飞速发展^[1,2]。

2 航天医学工程的学科体系结构

航天医学工程既源于航天医学、空间生命科学、环控生保工程等学科,又具有多学科交叉融合的特点及飞行任务应用背景^[3,4]。

航天医学工程遵循应用基础研究、应用技术攻关、应用技术工程化实践的发展规律,综合集成生物学、医学、电子学、机械工程等多学科的理论和技术,通过医学工程技术的交叉融会,形成了以确保航天员安全、维护航天员健康、提高航天员工作能力为主体的、具有鲜明系统工程特征的新型学科体系(如图1所示)。

基于机械设计及理论、机械电子工程、材料学、流体力学、航天医学等学科的环控生保技术、航天服技术和航天环境医学,构成了飞行中保障航天员安全的工程任务体系,即在航天环境医学提出座舱中满足人体安全需要的医学要求的基础上,通过环控生保技术和航天服技术,为航天员提供空间飞行中

[收稿日期] 2007-01-19;修回日期 2007-06-02

[作者简介] 陈善广(1962-)男,湖南祁东县人,中国航天员科研训练中心研究员,博士生导师

的环境安全保障。

针对航天飞行中影响航天员健康的医学问题,通过重力生理学、航天细胞分子生物学等航天医学基础的前期预研,提出航天实施医学措施,根据不同

的任务特点,实施飞行任务和日常工作中的医学监督与医学保障,确保航天员在飞行中的健康;通过航天医监工程技术的应用,为航天员的健康提供监测手段。

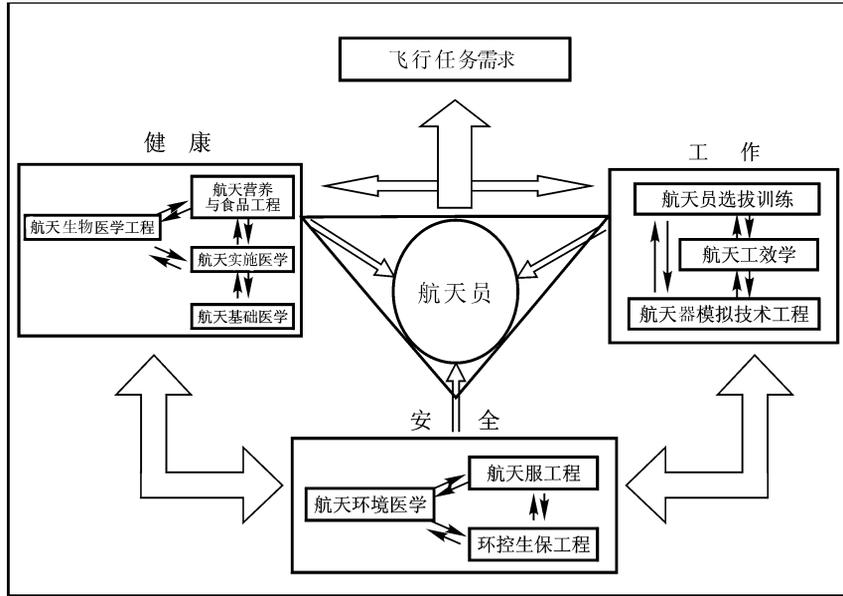


图1 航天医学工程体系框架示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Space Medico - Engineering System

基于工效学设计要求与理论的航天器模拟技术,为航天员选拔训练提供了有效的技术手段;基于教育训练学原理并结合不同飞行任务发展起来的航天员选拔训练技术,是保证航天员高效工作的有效措施。

3 航天医学工程研究的主要内容

航天医学工程的主要任务是为发展我国的载人航天事业提供理论支持和技术储备;承担载人航天工程研制任务,确保航天活动中航天员的安全、健康和高效工作。主要内容涉及研究航天环境对人体的影响,提出医学防护对抗措施;承担航天员的选拔训练;提出载人航天器设计的医学、工效学要求进行评价;研制为航天员服务的航天器环境控制与生命保障系统、医学健康监测设备、航天服装备、航天食品、航天环境模拟训练设备等。

3.1 航天员选拔和训练学

研究航天员选拔和训练的技术问题,包括选拔方法和标准、训练方法、规律、管理等,制定航天员选拔训练大纲和方案并组织实施。

3.2 航天实施医学

基于预防医学、临床医学、心理医学和航空航天医学等多学科知识、原理和方法的应用医学学科,承担航天员医学选拔,飞行前、飞行中及飞行后保障航天员安全、健康的相关医学措施的研究与实施,发展以中医药为代表的具有中国特色的航天员健康保障技术。

3.3 航天环境医学

开展航天环境有害因素(低压缺氧、舱内污染物、高低温、振动、噪声、电离辐射和非电离辐射等)的人体效应及其防护研究,制定环境医学标准,提出舱内环境工程设计的医学要求,开展医学评价。

3.4 航天医学基础

针对航天环境(特别是微重力)严重影响航天员的健康、安全和工作能力这一问题,利用当前生物医学领域先进的研究思路和技术手段,从生理、细胞和分子层面研究航天因素特别是中长期飞行对机体的影响,并探讨其发生、发展的内在机理,提出和制定有针对性的防护措施。

3.5 航天心理学

研究航天因素对人的心理的影响,探讨航天员

在太空中心理活动的特殊规律,提出对各类航天员心理素质的要求,为航天员选拔训练提供理论和方法,为在训练和执行任务中的航天员提供心理支持,解决他们出现的各种心理问题。

3.6 航天工效学

研究航天因素对人的各种工作能力和效率的影响,提供工程设计所需的各种人体参数,提出设计的工效学要求,搞好人-机功能分配和人-机界面匹配设计,以便更好地发挥人在航天中的作用,提高载人航天的可靠性和安全性。

3.7 航天营养与食品工程

研究航天因素特别是失重对航天员消化吸收功能的影响,根据空间飞行的时间确定各类营养物质的需求,制定营养素供给量标准和饮食制度,研制适应航天需要的航天食品和饮用水。

3.8 航天环境控制与生命保障工程

研究载人航天器座舱大气环境控制,包括压力和温度、气体成分、O₂ 供应、CO₂ 净化处理,食品和饮用水供应,卫生设施,防火及灭火等技术和设备研制。研制面向长期航天飞行的再生方式及受控生态生保技术。

3.9 航天服工程

航天服分为舱内航天服和舱外航天服。舱内航天服用于座舱因结构损坏或机械故障发生减压、因大气严重污染或失火导致泄压等情况下,保护航天员的生命安全,提供适合于人体生存的人工微小大气环境,避免低压、缺氧、极端温度和中毒的危险。舱外航天服是航天员进行舱外活动时的个人防护装备,是适合于舱外空间环境和舱外作业任务特点的航天服。

3.10 航天生物医学工程

对航天员进行医学监督,设计与研制相应的舱载医学健康监测设备,包括航天医学信息采集技术、处理技术、储存技术、显示技术和分析技术。要求具有极高的可靠性,能够经受航天中各种环境的考验。

3.11 载人航天环境和飞行训练模拟工程

载人航天环境模拟技术是一门应用多种学科和多项技术的相关理论与方法,以人工方式重现载人航天物理环境条件的综合性技术。它是载人航天环境地面实验(试验)设备的技术基础。

4 航天医学工程的学科特点

载人航天是一项巨大而复杂的系统工程,航天

医学工程的核心目标是以人为中心,为载人航天任务提供相关的人员、理论、技术和产品,涉及航天员和工程系统间的最佳适配和多层次技术整合,因此必须遵循系统工程的指导思想,即以系统论为指导,根据系统工程的原理和方法,建立系统目标,确立适应不同任务发展的航天医学工程总体目标和阶段目标;建立系统框架。必须把握两个要点:一是以航天员为中心,一切为保障航天员的安全、健康和工作效率服务;二是充分体现医学理论与工程技术、研究探索与工程实践的交叉、渗透和融合,在航天医学研究与工程研制的相互结合、依存和促进中产生新理论,发展新技术。

4.1 航天医学工程的思想方法

相对于国际而言,我国的载人航天事业起步较晚,因此必须充分学习借鉴国际先进经验,结合中国国情,坚持又好、又省、又快的指导思想,并遵循以下思想方法。

4.1.1 强调系统思想,明确系统观念 面对复杂庞大的系统任务,必须清楚地了解系统要实现的总体目标以及个体承担的工作在整个系统中的地位和作用。

4.1.2 明确的目标性和应用性 航天医学工程理论和技术具有明确的应用背景和阶段任务特征,必须针对载人航天任务的不同发展阶段的需求,确定任务目标,实现资源整合优化。

4.1.3 凸显医学与工程结合性 航天医学的需求和目标是开展任务研究与研制的基础,工程技术是保障目标实现的途径和手段,因此在发展这一学科、利用这一学科解决载人航天中的理论和实践问题时,必须时刻强调医学和工程的密切结合。

4.1.4 运用系统工程管理方法 航天医学工程涉及多学科、多内容、多接口、多层次,在实际的运行过程中需要统筹规划,特别是解决多界面的接口关系中的理论和实践问题,形成标准化、规范化的管理运行体系,即系统工程化管理。

4.2 航天医学工程的学科特点

多学科交叉与渗透是当今知识集成的重要特征,这种交叉与渗透不但促进了原有学科领域的不断延伸,还带动着新学科的产生和发展。经过 40 余年的实践,我国的航天医学工程已逐步形成了一套科学的指导思想和科研方法,具有如下鲜明的学科特点^[3,4]。

4.2.1 是以航天员为中心的应用学科 以航天多

因素环境为背景,研究对象和内容具有明确的应用特殊性、目标需求性和阶段实施性。以确保人的安全、健康和高效工作为目标,以医学需求为牵引,通过对具有明确任务目标的科学问题开展机制、原理、技术、方法的研究,遵循应用技术研究、应用技术突破和应用技术工程化实践的发展规律,通过预先研究——技术攻关——型号实施的技术途径,开展充分的预先研究工作,突破关键技术,应用于型号任务。

4.2.2 具有综合交叉性 在国家教委颁布的学科专业目录中,航天医学工程涉及的一级学科有心理学、生物学、基础医学、公共卫生学、中医学等,涉及的二级学科有10多个,专业有70多个。不仅具有医学研究的特点,同时又遵循工程设计、研制与发展的规律,集中体现为医工结合、相辅相成的多学科集成。以实现载人航天系统人(航天员/载荷专家)、机(载人航天器及运载器)和环境(航天环境和飞行器内环境)之间的优化组合为目标,在不同学科领域的渗透融合中,触发学术新思想、新理论的产生。

4.2.3 具有鲜明的系统工程特点 遵循系统论、控制论的思想,不仅重视系统的分解,更注重系统的集成研究;不仅要阐释人体机能系统的变化规律,更要实现对人体机能系统的调节和控制。以深刻认识人体在航天特殊环境因素作用下的变化规律为目标,利用分子细胞、组织器官、整体生理效应等不同系统层次的研究技术和成果,将航天特殊环境下的宏观生理学效应与微观细胞分子本质机理认识相结合,在实现系统回归与局部深入统一认识的基础上,提出满足特殊环境条件的机体适应、调节与防护对抗措施。

5 航天医学工程在中国载人航天工程中的实践与贡献

航天医学工程的发展,对载人航天任务的完成起到了极大的保障和促进作用,在实现中国载人航天零的突破、圆千年飞天梦中做出了重要贡献^[5-10]。

在航天医学工程的发展中,积累了大量的预研理论成果、技术方法、应用标准,建设了一系列适用于航天特殊环境的实验模型、设备设施,形成了一支热爱航天事业、掌握航天医学工程技术与理论的人才队伍,是国家载人航天工程启动的技术基础。在以人为主体的载人航天任务中,建立了有中国特色

的航天员系统,为我国载人航天飞行做出了重要贡献,标志着航天医学工程的日趋成熟,实现了从学科理论到工程应用的成功转换;同时工程研制任务中产生的新的理论与技术问题,又成为促进学科发展的新的增长点。

形成了适合中国国情的航天员选拔训练体系、标准、程序和方法,研制了相关的航天员训练设备设施,选拔出合格的飞行乘组并确保其达到最佳临战状态,圆满完成了神五、神六飞行任务。

建立了具有中国特色的健康维护体系和飞行后健康康复体系,将中医药理论、方法与航天医学相结合,创立了独具特色的航天员个体化诊疗方法,确保了在飞行任务中的航天员的健康。

提出并建立了行之有效的飞船环境的医学、工效学体系和评价方法,制定了满足医学要求的飞船医学、工效学标准,为后续任务中载人航天器的工程设计奠定了坚实基础。

研制了具有自主知识产权的航天员生活保障系统;飞船环控生保系统和航天服经受了空间飞行的考验;设计了具有中国饮食文化特色的航天食品,实现了从“单人一天”到“多人多天”的跨越。

系统研究了失重生理效应和防护对抗措施,建立了一系列重力环境地面模拟技术。在国际上首次开展了心肌细胞的微重力效应和空间实时条件下的药物作用研究,建立了适合于我国现有空间实验条件的医学实验工程化技术,实现了我国航天医学从地基研究到空间实验的突破。

6 结语

“神舟五号”任务中杨利伟的自主出舱,标志着我国航天医学工程的发展翻开了新的历史篇章;“神舟六号”任务中费俊龙、聂海胜的健康出舱,“多人多天”飞行、有人参与的跨舱科学实验,实现了我国载人航天的新飞跃。国际空间站、重返月球和载人火星登陆已成为国际载人航天发展路线图的明确站标。根据我国“载人航天三步走计划”,我们的载人航天活动也正向出舱活动、交会对接、空间实验室、空间站和载人登月的方向发展。这一切都对航天医学工程提出了新任务和新挑战。围绕保证航天员安全、健康和工效任务,航天员系统及航天医学工程的理论研究和工程研制重点将从短期载人航天飞行过渡到出舱活动和中长期载人航天。航天医学工程学科也必将在后续载人航天任务的实施中得到应

用、丰富和发展,同时航天医学工程学科的发展也将进一步促进载人航天工程型号任务的完成和载人航天技术的发展。

参考文献

- [1] 魏金河,黄端生. 航天医学工程概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2005
- [2] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990,13:3~10
- [3] Chen Shanguang. Theory and practice of space medico-engineering in China[A]. 16th IAA Human in Space Symposium[C], Beijing, 2007
- [4] 陈善广,李莹辉. 中国太空(空间)学科发展报告[R],2006
- [5] 李莹辉,白延强,姜世忠. 中国医药卫生发展科技报告[R],2006
- [6] Xiong Jianghui, Simon Rayer, Luo Kunyi, et al. Genome wide prediction of protein function via a generic knowledge discovery approach based on evidence integration[J]. BMC Bioinformatics, Open Access ,2006,7:268
- [7] Li Yinghui, Qu Lina, Xiong Jianghui, et al. An outline of investigation of space medicine problem and mechanism[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24: 150 ~ 156
- [8] 李莹辉. 21世纪的航天医学细胞分子生物学[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(特刊): 588 ~ 592
- [9] 李勇枝. 从载人飞行实践看航天员医监医保的发展[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16: 556 ~ 561
- [10] 沈学夫,付 兰,邓一兵. 飞船控制与生命保障系统[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(sup): 543 ~ 549

Theory and Practice of Space Medico-engineering

Chen Shanguang

China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

[**Abstract**] Space Medico-Engineering is a newly emerged subject with its own characteristic theoretical system and technological methods. With 40 years' development and practice of manned space flight in China, it gradually comes into being. This paper briefly introduces its concept, system structure, research content and characteristics.

[**Key words**] space medico-engineering; manned space flight; system engineering