

· 学科进展与展望 ·

中国载人航天催生的新学科

——航天医学工程学

陈善广*

(中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

[摘要] 航天医学工程学是中国载人航天任务催生的一门旨在研究解决载人航天中与人密切相关的医学/工程问题的多学科交叉融合的应用基础学科,为我国载人航天技术的突破和发展做出了极其重要的贡献。本文全面论述航天医学工程学学科概念、发展阶段、研究内容以及主要特色,重点阐述了该学科在中国载人航天工程中的重要地位和作用以及工程任务对学科发展的促进作用,展望了学科发展的未来前景。

[关键词] 航天医学工程学, 航天医学, 空间生命科学, 载人航天, 交叉学科

自1961年4月12日前苏联航天员加加林首次太空遨游至今,人类载人航天走过了49年的光辉历程,相继实现了将人送上地球轨道、踏上月球、建立空间站的历史壮举。中国载人航天在奋力追赶世界先进水平中随着社会经济的发展变化也走过了坎坷而独特的发展历程,取得了累累硕果,尤其是20世纪90年代初实施的载人航天工程取得了令世人瞩目的辉煌成就。航天事业的发展极大地带动与推进了科学技术和学科体系的发展,我国40余年的载人航天发展与实践也催生和促进了相关领域新学科和新技术的发展。其中一门旨在研究解决载人航天中与人密切相关的医学/工程问题的新兴多学科交叉融合的应用基础学科——航天医学工程学也应运而生,经过40余年的发展,形成了一套较为完整,特色鲜明的科学理论体系和工程实践技术,为我国载人航天的突破和发展做出了极其重要的贡献^[1]。

1 航天医学工程学概念

1.1 学科定义

航天医学工程学是以系统论为指导,利用现代科学技术以及与之相适应的方法体系,研究载人航天活动对人体的影响及其特征规律,研制可靠的工程对抗防护措施,设计和创造合理的人机环境,寻求

载人航天系统中人(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,确保航天活动中航天员的安全、健康和高效工作的学科^[2]。

1.2 学科基本构成

航天医学工程学主要由13个分支学科构成(图1)。

航天医学工程学理论基础和技术体系在预先研究的学术成果的积累提炼及工程型号任务的强有力驱动下,逐步完成了从理论预研到承担型号任务的过渡,构成了载人航天工程的重要支撑。

(1) 航天环境医学主要研究航天环境因素作用于人体所产生的生理学和病理学效应、作用机理及其防护措施,内容包括座舱大气环境医学、座舱环境化学和卫生毒理学、温度医学、振动医学与工程、声环境医学与工程、辐射环境医学与工程及载人航天器医学评价技术等^[3]。

(2) 重力生理学主要研究航天飞行中微重力和超重的生理效应、作用机制及其防护措施。内容包括微重力体液头向分布时心血管功能改变、空间运动病、肌肉萎缩、骨丢失、免疫功能下降、神经和内分泌功能紊乱的机理及其防护研究等^[4]。

* 中国航天员科研训练中心主任,中国载人航天工程航天员系统总指挥兼总设计师。
本文于2010年3月6日收到。

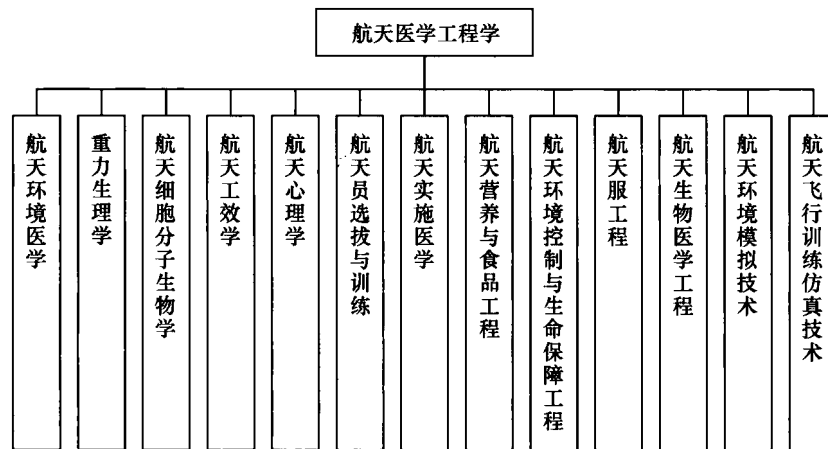


图1 航天医学工程学分支学科组成图

(3) 航天细胞分子生物学主要针对中长期航天活动中空间环境因素导致的有机体生理、病理变化,着重从细胞、分子水平研究其变化的规律及其内在机制,致力于发展分子靶点型对抗防护措施,内容包括重力、辐射等环境因素条件下,细胞内信号途径、基因表达调控等基本生物学问题^[5]。

(4) 航天工效学是研究航天员工作规律的一门新兴学科。内容包括不同状态下航天员形态参数和力学参数测量技术、工作能力分析与测试技术、人机界面设计与评价技术等。

(5) 航天心理学主要研究航天飞行对航天员心理活动的影响及其变化规律,它将心理学的理论和方法应用于航天员心理选拔、心理训练、心理健康维护与支持以及工程设计等方面,内容包括航天生理心理学、航天心理卫生学及航天员训练心理学。

(6) 航天员选拔与训练主要针对载人航天飞行环境和任务对人的要求,研究航天员选拔与训练的方法、标准和程序等,内容包括预备航天员选拔技术研究、飞行乘组选拔技术研究、训练技术研究等^[6]。

(7) 航天实施医学以保障并促进航天员的健康、解决航天中的医学问题为目标,主要进行航天员健康维护、医学鉴定、医学监测等相关的技术研究。

(8) 航天营养与食品工程是一门研究航天员营养需求与营养保障的技术学科,主要研究航天环境下的物质代谢规律以及航天食品加工、包装和安全管理等内容。

(9) 航天环境控制与生命保障工程主要研究创造适合人生存和工作的人工环境,维持与人相关的

物质流和能量流平衡的技术,内容包括座舱大气压力控制、大气净化、大气温湿度控制、空气通风、在轨生活保障、测量控制、防火与灭火安全等^[7]。

(10) 航天服工程是一门研究空间个体防护技术及其系统实现的应用学科,重点开展压力防护、工效保障、热控、特种织物材料、特种工艺及系统集成等方面的研究^[8]。

(11) 航天生物医学工程是一门研究航天条件下生物医学信号检测、传输、处理、建模与仿真等方面的理论和技术的应用学科,内容包括生物医学传感器技术、生物医学信号测量与处理技术、生物医学遥测技术、生理仿真与建模、生物医学图像处理技术等。

(12) 航天环境模拟技术是研究在地面上人工等效再现或模拟载人航天环境的技术和方法,内容包括压力环境、大气环境、热真空环境、动力学环境的模拟技术等。

(13) 航天飞行训练仿真技术是以相似原理、控制理论、计算机技术、航天器飞行专业技术等为基础,采用实物、半实物和数字仿真的方法,研究与构建人在回路中的航天器模拟飞行系统^[9]。

1.3 学科主要特征

(1) 任务牵引特性

航天医学工程学在明确的任务牵引下,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和科学的方法体系,综合集成生物学、医学、电子学、数学、力学、机械工程等多学科知识、理论和技术,通过医学与工程技术的交叉融合,形成确保学科目标实现的实施体系(图2),有着很强的工程应用背景^[10]。

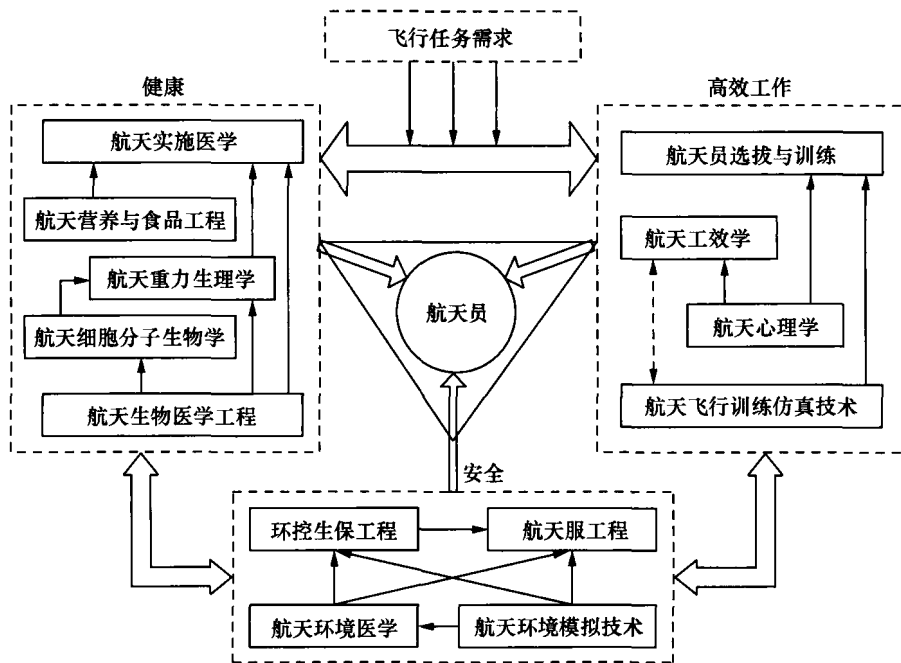


图2 航天医学工程学与载人航天任务关系示意图

(2) 以人为本理念

以人为本是航天医学工程学的核心理念。人始终是航天医学工程学关注的焦点和核心,各分支学科的研究都是围绕人而展开的。

(3) 医工结合特色

医工结合(多学科交叉融合)既是航天医学工程学学科构成特色,也是学科的方法学特色。在医学研究过程中借鉴工程化的方法,强化研究的边界条件和过程控制,使研究结果更具工程可行性;在工程研制中充分考虑医学需求,以人为中心展开设计,工程研制的结果通过有人参与的试验加以验证。

(4) 明晰的学科目标

安全、健康和高效工作是航天医学工程学的学科目标。以安全、健康和高效工作为目标牵引的三大模块存在着相互影响、相互支撑的内在联系,且层次递进。

(5) 鲜明的系统特性

坚持系统论为指导,在航天医学工程学分支学科设置、研究内容和研究方法确定、学科发展规律探索等方面,始终贯彻系统论的指导思想^[11]。设置的13个分支学科,紧紧围绕载人航天中航天员安全、健康和高效工作的目标开展协同研究,既有基础学科又有应用基础和工程技术学科,各学科之间相互关联,相互渗透,相互融合,构成一个综合性、交叉的学科群(体系),共同解决载人航天复杂人机系统问题。

2 航天医学工程学的形成

航天医学工程学伴随我国载人航天事业的发展

历程,经历了萌芽、初步形成、发展充实、日趋成熟4个发展阶段。

(1) 航天医学工程学萌发于20世纪50年代初期的宇宙医学研究,后来随着国内研究领域的拓宽,宇宙医学演变为宇宙医学及工程,从20世纪60年代末70年代初起国内学者基本上都开始把这一学科领域称为航天医学工程。

(2) 从20世纪70年代初至90年代初,经过国家“曙光”号任务、返回式1型卫星(FSW-1),CBS-1生物搭载舱实践和国家“863”计划领域设立的载人航天器环控生保及医学防护技术预先研究课题,初步形成了航天医学工程学科的基本脉络。

(3) 1992年国家“载人航天工程”正式启动,以明确的任务需求为牵引,航天医学工程学科得以快速发展^[12]。张汝果研究员主编出版了《航天医学工程基础》,逐步形成了航天医学工程学科的总体框架^[13]。

(4) 2003年“神舟”5号首次载人航天飞行的实践使这一学科理论得到实际工程的有效检验。2005年“神舟”6号多人多天飞行及航天员进入轨道舱参与科学实验,标志着这一学科日趋成熟。2008年,在全面总结、梳理了航天医学工程学科发展脉络的基础上,本文作者在《航天医学与医学工程》期刊上发表专题文章“中国航天医学工程学发展与回顾”,提出了航天医学工程学的概念,并系统阐释了具有中国特色的航天医学工程学学科理论体系和技术方法,概述了航天医学工程学的体系构成、研究内容、学科特点和发展目标。2008年“神舟”7号航天员出舱活动成功,展

示了航天医学工程学在载人航天工程中的重要作用。

3 航天医学工程学的实践

航天医学工程学的发展充分体现了“任务带学科,学科促任务”的指导思想,是“载人航天工程”的重要支撑,在其基础上创建了两个最具载人特色的工程系统——航天员系统和航天器环境控制与生命保障(以下简称环控生保)分系统。在“载人航天工程”研制实践中,从4次无人飞行验证到3次载人飞行成功,一方面工程技术体系不断完善,另一方面伴随工程研制的进展,航天医学工程学的学科体系和内容也日趋丰富、充实,特别是3次载人飞行使其在成熟中获得跃升。

3.1 首次载人航天飞行使航天医学工程学理论与技术经受住第一次实战考验,并在工程化方面获得新突破

(1) 创建了以教育训练学原理为基础的航天员选拔训练体系。开展了包含基本条件、临床医学、生理功能、心理品质及综合评价等内容的选拔方法和选拔标准的研究,从政治思想、医学、心理素质和训练成绩4个方面对航天员实施了考评和综合评定,最终选出了执行首飞任务的航天员。建立了以胸背向超重对抗、飞行程序与任务模拟、心理放松与表象技术为主体的训练专项技术体系;逐步形成了以基础理论、体质训练、航天环境适应性训练、心理训练、专业技术训练、飞行程序与任务模拟训练、救生训练及大型联合演练等为核心内容的训练技术体系基本框架;研制了飞船飞行训练模拟器,发展了航天飞行训练模拟技术,培养出了一支优秀的航天员队伍,选拔训练出了合格的首飞航天员。

(2) 创建了航天员医监医保体系。开展了航天员健康监测方法与评价标准研究,研究制定了以心电、呼吸、体温、血压“4大生理指标”为核心的在轨医学监测指标体系,并指导工程实现;研究制定了航天员医学鉴定标准、飞行任务放飞与中止飞行标准;将中医理论和辨证方法与航天员医学保障技术有机结合,开展了中医药在载人航天中的应用研究,研制了适应航天员医监医保要求的中药制剂;运用航天生物电子技术,开发了生物信息提取、传输、分析识别与辅助诊断技术,研制了舱载医监设备,为医监医保创建了遥医学平台。

(3) 航天环境医学与工效学指导飞船适人性设计。航天环境医学深刻认识航天环境特点及对人的影响,结合工程实际,提出了适合我国载人飞船工

程设计的医学要求和数据,包括大气环境、力学环境、电离和非电离辐射环境要求及人体代谢参数等,作为“神舟”号飞船设计依据;制定出对飞船乘员舱医学评价标志和方法,并结合飞船真空热试验、返回舱空投和着陆冲击试验、海上漂浮试验、环控生保载人模拟飞行试验等工程研制试验,实施了全面评价,成为决定“神舟”5号飞船能否载人飞行的关键因素。航天工效学是应用工效学的理论、原则和方法,解决“载人航天工程”系统的安全和效率问题,使航天飞行中人-机系统达成高度的协调统一,充分发挥航天员的能力和特长。在载人飞船工程型号任务中,根据航天员的作用和人机功能分配方案及航天员不同时段操作工况,开展了航天员人体参数测量,并对飞船结构布局、人工控制、显示与照明、报警等设计提出了工效学要求,作为飞船工程设计的依据。完成了座舱工效性能测试、评价;在历次人船联试中,通过组织航天员进舱进行实际操作验证、评价与改进,使飞船逐步提高和完善工效设计。载人飞行试验结果表明飞船工效学设计与评价正确,充分体现了航天工效学研究成果和发展水平。

(4) 舱内航天服装研制成功,标志航天服工程发展进入一个新阶段。舱内航天服是载人飞船舱内使用的极为重要的压力应急防护装备,一旦发生飞船座舱压力应急(失压)事件时,可为航天员建立一个适于生存的压力和微小大气环境。2003年10月15日,航天英雄杨利伟穿着由航天员系统负责研制的我国首套舱内航天服遨游了太空。在载人飞行任务中,舱内航天服工作正常,功能、性能良好,接口匹配,满足载人飞行任务需要,整体技术水平与国外相当。

3.2 神舟6号实现“多人多天”飞行,航天医学工程学走向成熟

(1) 环控生保工程突破了微重力适应难题

环控生保工程主要研究如何保障与人相关的物质流和能量流的平衡问题,解决失重环境下物质的存储、传输、分配以及废弃物管理与再利用,使之全面满足医学要求。

环控生保系统的主要功能是:(i) 确保座舱内具有合适的大气总压和氧分压;(ii) 排除航天员代谢产生的CO₂,控制座舱内有害气体浓度;(iii) 控制舱内气体的温度、湿度,提供必要的通风环境;(iv) 在压力应急情况下给航天服通风供氧;(v) 具有烟火检测与灭火能力;(vi) 为航天员提供微重力环境下的饮水、就餐、大小便等生活设施。该系统是“神舟”飞船系统中最新的系统之一,也是我国载人航天需

要突破的多项关键技术之一。

相对“神5”，“神6”攻克了环控生保系统中的高压气态储氧、强迫对流换热、冷凝除湿、微重力环境气液管理、安全可靠性等关键技术，研制出了飞船环控生保系统。整体技术水平达到国际先进水平，并带动了航天工效学、航天环境医学的进一步发展完善。为满足环控生保的研制和地面试验需求，研制了一大批有特色的地面模拟设备，促进了航天环境地面模拟技术的发展。“多人多天”飞行中，2名航天员进入轨道舱工作和生活，更全面地考核了飞船环控生保的功能和性能。

(2) 掌握了多人乘组选拔训练与医学保障技术

创建了多人飞行乘组选拔的指标体系、标准和方法，在选拔中首次引入模糊数学模型，研发了乘组选拔评价辅助决策支持系统，建立了专家经验与科学算法相结合的选拔机制；提出了适应于多人多天飞行任务的航天员心理素质综合评价方法，解决了乘组心理相容性的定量评价和岗位胜任特征的评价难题；探索和提出了失重效应的地面模拟、在轨生活照料、对抗空间运动病以及纠正失重定向错觉等训练方法，有效地提升了乘组的整体工作效能；创建了飞行乘组飞行前状态调整和综合保障技术和行之有效的实施模式，确保乘组训练合格率100%、零伤病率、飞行乘组达到最佳临战状态；首次将中医理论应用于航天中生理功能变化的防护，有效增强了航天员对失重环境的适应和返回后的再适应能力；针对“神6”任务“多人多天”飞行任务特点，研制出7大类近50种航天食品；“神6”飞行经受了乘组5d太空微重力生活实际考验，身体健康状况良好，圆满完成飞行任务。首次开展在轨有人参与的空间细胞分子生物学实验研究，空间细胞实验装置经受了飞行任务的考核。

3.3 神舟7号首次突破出舱活动技术，充分展示了航天医学工程学的关键作用^[14]

圆满完成空间出舱活动是“神7”任务的主要目标。在“神7”任务中，航天员系统和环控生保分系统面临前所未有的挑战。伴随中国载人航天工程发展成熟的航天医学工程学在这一关键时刻，围绕出舱活动的新要求，强调学术研究和工程研制相互促进提升的学科思想和学科特点，在圆满完成任务中发挥了重要的理论指导作用，取得了主要理论与技术突破：

(1) 突破并掌握舱外服研制技术，建立了先进的舱外服体系结构和研发平台，“飞天”舱外服的整体性能达到国际先进水平^[15]；

(2) 掌握气闸舱研制技术，泄复压系统和舱载

支持设备工作可靠，与舱外服接口匹配；

(3) 建成出舱活动大型地面设备，舱外航天服试验舱、模拟失重训练水槽、出舱活动程序训练模拟器均填补国内空白；

(4) 建立出舱训练技术体系，培养出优秀的出舱活动乘组，圆满完成首次出舱任务^[16]；

(5) 掌握出舱活动医学问题防护技术，中医药首次在航天飞行中得到应用，从训练到飞行、从地面到天上，综合解决了空间运动病高发期与出舱时间重合的难题；

(6) 掌握航天员出舱活动总体设计技术，达到了系统接口匹配、整体性能最优；

(7) 在完成的同时获得了对航天医学工程学的学科体系和知识内涵的新认识：(i) “飞天”舱外航天服在较短时间内研制成功，不仅充分彰显了医工结合的高效率，也标志着形成了完整的航天服工程学科，同时带动了相关分支学科的发展，极大促进了航天医学工程学的发展；(ii) 创建了出舱活动航天员训练技术体系，包括面向出舱活动训练的独特方法、标准和评价指标，丰富了航天员选拔训练学科内容；(iii) 航天基础医学与实施医学经历了学科层面新的洗礼，在航天医学难题——空间运动病的综合防护上积累了宝贵经验，认识上有了新的提高，航天中医药学初显风采；(iv) 航天员系统中多学科融合、载人地面试验设计、飞行中联合技术支持与保障的高效性不仅进一步彰显了医工结合模式的优势而且也丰富了其内涵，尤其是医学工程化在本次任务中得以理性运用和提升。

4 航天医学工程学发展展望

我国载人航天工程的后续目标和发展方向明确，随着我国载人航天“三步走”战略规划的实施，我国的载人航天将沿着空间实验室—空间站—载人登月和火星探测的路线发展。新目标、新任务为学科的发展带来新的挑战，航天医学工程学的研究与发展面临着更新的任务，在科学问题的纵深研究探索上将迎来更大的挑战^[17]。

围绕航天员安全、健康和高效工作目标，航天医学工程学需解决针对中长期航天飞行的航天员选拔训练及健康维护、航天特因环境效应防护^[18]、舱外航天服研制、空间站居住系统医学工程、空间站再生式环控生保^[19]、航天医学空间实验研究、空间站医学和工效学设计评价等一系列科学问题。

围绕登月和月球居留面临的特殊重力环境、空

间时间环境的生理适应、辐射危害与防护、心理健康维护、遥医学、人-机工效学和生命保障的医学工程等科学问题,航天医学工程学需针对载人登月和建基月球,探索载人登月航天员健康保障、登月航天服、受控生态生保等一系列科学问题。开展长期月球居留辐射生物学、月球重力环境生理/心理效应及防护研究;开展空间时间生物学研究,探索生物节律变化对人体心理、行为的影响及节律导引问题^[20];解决月球基地环控生保和月球农场、月球资源利用、月球基地生保物质闭合循环等系列科学问题。

针对载人登陆火星,航天医学工程学需探索自主心理健康维护科学问题;解决建立自主医疗体系、火星飞行任务环控生保系统、火星舱外航天服技术、火星探索辐射防护和以人工重力为主的失重防护体系、火星环境医学和工效学设计评价标准体系、地外生命探测体系等一系列科学问题。

在所面临的诸多科学问题中研究重点涉及:人在空间环境(含未来月球表面、火星表面环境)长期驻留的医学、生理学、心理学、卫生学等问题及防护技术研究;空间站、登月/火星探测等新型载人航天器以及未来月球/火星基地设施工程设计的医学、工效学要求与评价标准体系研究及其“人-机-环境”整合设计;适用于空间站、新型载人航天器和未来月球/火星基地的新型环控生保技术研究;先进舱外航天服、登月服、火星服技术研究;长期飞行或未来月球/火星探测活动中航天员任务分析及与之适应的航天员选拔训练与在线医学保障技术研究;长期飞行的航天员营养、食品保障、航天药品和在线医监医保设备研制;面对未来载人航天任务的环境模拟试验技术和航天员任务模拟训练技术研究等等。

长期载人飞行和载人登月已成为 21 世纪世界

载人航天发展的热点,也必将是我国载人航天发展的重要目标。毋庸置疑,航天医学工程学在后续载人航天任务实施中必然得到进一步应用、丰富和发展,同时航天医学工程学的发展也将进一步促进载人航天工程未来型号任务的完成和载人航天技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 陈善广. 航天医学工程学发展 60 年. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 陈善广. 中国航天医学工程学发展与展望. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3): 157—166.
- [3] 虞学军. 我国航天环境医学研究的实践与成就. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3): 188—191.
- [4] 沈羨云, 薛月英. 航天重力生理学与医学. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [5] 李莹辉. 航天医学细胞分子生物学. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [6] 黄伟芬. 航天员选拔与训练. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [7] 汤兰祥, 高峰, 邓一兵等. 中国载人航天器环境控制与说明保障技术研究. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3): 167—174.
- [8] 陈景山. 航天服工程. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [9] 薛亮. 航天飞行训练模拟器技术. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [10] 陈善广. 航天医学工程理论与实践. 中国工程科学, 2007, 9(9): 30—34.
- [11] 钱学森. 论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [12] 魏金河, 黄端生. 航天医学工程概论. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [13] 张汝果. 航天医学工程基础. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [14] 陈善广. 航天员出舱活动技术. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- [15] 李潭秋. 飞天舱外航天服研制. 载人航天, 2008, (4): 8—18.
- [16] 黄伟芬. 神舟七号载人航天飞行任务航天员选拔与训练. 载人航天, 2008, (4): 19—26.
- [17] 李莹辉. 21 世纪的航天医学细胞分子生物学. 航天医学与医学工程, 2003, 16(特刊): 588—592.
- [18] 李莹辉, 白延强, 陈善广等. “地星”1 号——60d 头低位卧床实验研究概况. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3): 291—294.
- [19] 周抗寒, 傅岚, 韩永强等. 再生式环控生保技术研究及进展. 航天医学与医学工程, 2003, 16(s): 566—572.
- [20] 陈善广, 王正荣. 空间时间生物学. 北京: 科学出版社, 2009.

A NEW DISCIPLINE ARISING FROM CHINA'S MANNED SPACE PROJECT —Space Medico-Engineering

Chen Shanguang

(China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract Space Medico-Engineering is a new-born basic applied discipline considering human medical and engineering issues in manned space flight, producing from merging and combination of multi-scientific areas and growing with the development and practice of China's manned spaceflight. And it has contributed to the breakthrough of China's manned spaceflight. This article outlines the concept, stages of its development, research area and characteristic of the Space Medico-Engineering. The important role and status in the Chinese manned space mission and the promotion of the engineering task is expounded in this article. A subsequent prospect is depicted.

Key words Space Medico-Engineering, space medicine, space life science, manned spaceflight, cross-discipline