

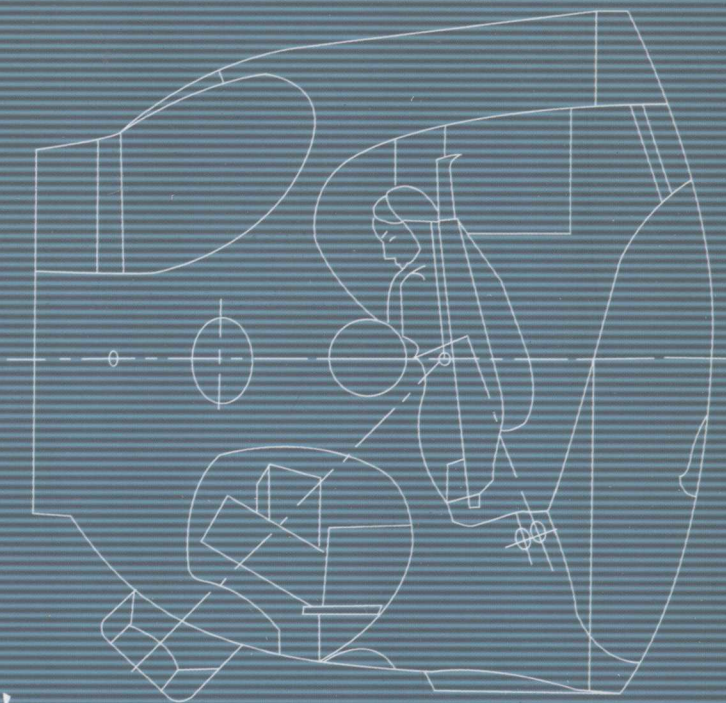
航空宇航科学与技术



国防
科技工委
第十五
规划
教材

载人航天生命保障技术

●林贵平 王普秀 编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

V528/1005



2008020933

V528
1005-1



国防科工委“十五”规划教材. 航空宇航科学与技术

载人航天生命保障技术

林贵平 主 普秀 编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

2008020933

内容简介

本书是航空航天院校飞行器环境与生命保障工程专业载人航天生命保障技术课程选用教材,系统介绍了载人航天环境控制与生命保障技术的基本理论。内容包括:空间环境因素、环控生保系统的功能组成、载人航天生命保障系统的设计基础、供气调压分系统、座舱大气再生与污染控制、温湿度控制分系统、水管理技术、废物管理系统、火情探测与灭火系统、航天服系统以及生物生命保障系统等。为了便于对基本内容的深入理解,编入了一定数量的思考题。

本教材既可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的课程教材,也可供从事相关领域研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

载人航天生命保障技术/林贵平,王普秀编. —北京:

北京航空航天大学出版社,2006.12

ISBN 7-81077-964-8

I. 载… II. ①林…②王… III. 载人航天飞行—飞行安全 IV. V528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 150925 号

载人航天生命保障技术

林贵平 王普秀 编

责任编辑 王媛媛

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: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:15.25 字数:342 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数:3 000 册

ISBN 7-81077-964-8 定价:26.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题



当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱



石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

自从人类首次进入太空以来,载人航天技术已有了很大的发展。我国也于1999年11月成功发射了第一艘试验飞船,使载人航天技术的研究迈上了一个新台阶,也为进一步开展该领域的研究提供了良好的机遇。

载人航天技术是指有人参与的,对空间进行探索以及利用空间的特有环境进行科学研究、资源开发与应用的综合性工程技术。载人航天技术体现在载人航天系统中。载人航天工程与无人航天工程的最大区别在于人是载人航天飞行器的核心组成部分。载人航天工程是以保证航天员的生命安全为第一要求的,即不仅要保证航天员顺利进入太空,而且要保证航天员安全地在空间工作以及安全地返回地面。因此,环控生保系统是最具载人航天特色的一个重要系统,直接关系到航天员身体健康、工作效率和生命安全,是载人航天技术的重大关键技术之一。

本书在总结我国载人航天环控生保系统研制成果与经验的基础上,广泛吸收国外载人航天器环境控制与生命保障技术的先进研究成果,从航天器环控生保系统设计的理论基础、设计依据到系统总体和各个分系统的设计方法进行了系统的阐述,力求做到内容全面、深入浅出。全书共分11章。第1章绪论部分对环控生保系统的功能与组成作了简要介绍,并对生物生保系统作了技术展望。第2章主要介绍了空间环境的基本知识,包括近地空间大气环境、辐射环境、失重环境、月球与火星环境等。第3章论述了载人生保系统的设计基础,并对系统的设计方法进行了说明。第4~11章则分别对各子系统的功能组成、原理特点等进行了详细的阐述,即供气调压分系统、座舱大气再生与污染控制系统、温湿度控制分系统、水管理技术、废物管理系统、火情探测与灭火系统、航天服系统以及生物生命保障系统。

环控生保系统发展的根本目的是保障人类能在空间生存。从初期简单的载人飞船到现代的航天飞机和空间站复合体,随着乘员人数的增加和在轨时间的延长,环控生保系统的复杂程度也将发生质的变化,这就使



我们对此领域相关知识的需求更为迫切。此教材是作者在多年实际教学经验的基础上总结编写而成的,以求满足相关专业高年级本科生、研究生及广大科研人员对这一领域知识的需要。教材的部分内容参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此向他们致以诚挚的谢意!

本书由北京航空航天大学林贵平、总装备部航天员中心王普秀编写,林贵平为主编。其中第8、9、10章以及第3章的部分内容由王普秀编写,其余部分由林贵平完成。

由于载人航天技术的飞速发展和作者水平所限,书中不妥和错误之处,恳请广大读者批评、指正。

感谢北京航空航天大学出版社在本教材出版过程中给予的大力支持,感谢在本教材撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

编 者

2006年12月

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 环控生保系统的功能和组成	1
1.1.1 环控生保系统的功能	1
1.1.2 环控生保系统的组成	2
1.1.3 环控生保系统的分类	3
1.2 ECLSS 技术的发展及展望	4
1.2.1 飞机环控生保系统	5
1.2.2 潜艇环控生保系统	5
1.2.3 阿波罗飞船的环控生保系统	7
1.2.4 载人航天生保系统发展展望	11

第 2 章 空间环境

2.1 近地空间大气环境	14
2.1.1 地球大气的结构	14
2.1.2 地球大气的物理特性	15
2.1.3 真空环境的影响	17
2.2 辐射环境	18
2.2.1 基本概念	19
2.2.2 空间电离辐射源	19
2.2.3 空间辐射与轨道的关系	23
2.2.4 空间辐射剂量	23
2.2.5 空间辐射防护	27
2.3 失重环境	30
2.3.1 失重的物理原理	30
2.3.2 失重生理效应	31
2.3.3 微重力环境对环控生保系统工作的影响	32
2.4 其他环境因素	33
2.4.1 磁 场	33
2.4.2 流星与微流尘	33
2.4.3 原子氧	33
2.5 月球与火星环境	34
2.5.1 月 球	34
2.5.2 火 星	35



第3章 载人航天生命保障系统的设计基础

3.1 人同环境的物质和能量交换	37
3.1.1 人的物质需求	37
3.1.2 人体生理代谢产物	40
3.1.3 人体与环境的物质和能量交换	41
3.2 适居的环境条件	41
3.2.1 大气条件	42
3.2.2 其他物理因素	46
3.3 微重力环境中的气液分离	46
3.3.1 表面张力与毛细现象	46
3.3.2 失重状态下的气液分离	49
3.4 载人航天环控生保系统设计方法	51
3.4.1 应用系统工程学的方法论进行环控生保系统设计	51
3.4.2 利用最优化设计技术进行环控生保系统设计	53
3.4.3 环控生保系统的计算机仿真技术	55
3.4.4 环控生保系统安全性和可靠性设计准则	56
3.4.5 环控生保系统试验技术	58

第4章 供气调压分系统

4.1 座舱压力制度	61
4.1.1 总压选择	61
4.1.2 稀释气体选择	62
4.1.3 氧分压允许值	62
4.1.4 舱压变化速率要求	63
4.2 气体的储存	63
4.2.1 氧气的储存	63
4.2.2 氮气的储存	69
4.3 供气调压系统工作原理	70
4.3.1 座舱供气调压系统的组成	70
4.3.2 “神舟”号飞船供气调压系统的工作原理	74
4.4 供气调压系统的设计计算	78
4.4.1 系统设计参数	78
4.4.2 储气量计算	78
4.4.3 供气自锁阀流通能力计算	80
4.5 供气调压分系统分析建模	80
4.5.1 系统描述与基本假设	81
4.5.2 建立舱压变化数学模型	81
4.5.3 自动供气特性分析	82



第 5 章 座舱大气再生与污染控制

5.1 二氧化碳净化技术	84
5.1.1 非再生式二氧化碳净化技术	85
5.1.2 再生式二氧化碳净化技术	89
5.1.3 二氧化碳还原技术	100
5.2 空间制氧技术	103
5.2.1 固态聚合物电解质水电解系统 SPWE	104
5.2.2 静态供水电解系统 SFWE	104
5.2.3 还原法制氧	106
5.3 微量污染控制	107
5.3.1 微量污染控制方法	107
5.3.2 典型的乘员舱内微量污染控制方案	108

第 6 章 温、湿度控制分系统

6.1 温、湿度控制分系统概述	115
6.1.1 设计要求	115
6.1.2 被动热控与主动热控技术	116
6.1.3 热控系统的内回路和外回路	116
6.1.4 热设计基本原则	117
6.2 航天器热载荷计算	118
6.2.1 航天器在轨道空间的热平衡	118
6.2.2 空间热流	119
6.2.3 航天器内热流	121
6.3 被动热控技术	122
6.3.1 热控涂层	122
6.3.2 多层隔热材料	124
6.3.3 热 管	126
6.3.4 相变储热	129
6.4 主动热控技术	130
6.4.1 辐射式主动热控技术	130
6.4.2 传导式主动热控技术	131
6.4.3 对流式主动热控技术	133
6.5 热控系统冷源	137
6.5.1 空间辐射器	137
6.5.2 消耗性冷源	138
6.6 湿度控制技术	142
6.6.1 冷凝热交换器	142
6.6.2 气/液分离装置	143



6.7 典型温、湿度控制系统	145
6.7.1 天空实验室热控分系统	145
6.7.2 美国载人飞船的温、湿度控制分系统	147
第7章 水管理技术	
7.1 水的物质平衡	149
7.2 水储存技术	150
7.2.1 饮用水储存	150
7.2.2 废水储存	152
7.3 供水技术	153
7.3.1 供水增压技术	153
7.3.2 饮水工具	155
7.4 水的微生物控制及灭菌技术	157
7.4.1 巴式法灭菌技术	157
7.4.2 “卤族元素”(氯、碘等)灭菌技术	157
7.4.3 银离子消毒技术	158
7.5 水回收再生技术	159
7.5.1 尿液回收再生	159
7.5.2 卫生废水的回收再生	162
7.6 水质监测技术	164
第8章 废物管理系统	
8.1 尿的收集	167
8.1.1 接触式尿收集器	167
8.1.2 液/气流式尿收集器	168
8.1.3 气流式尿收集器	168
8.1.4 冷凝水和卫生用水的收集	169
8.2 固态废物的收集和处理	171
8.2.1 粪便的收集处理	171
8.2.2 呕吐物的收集处理	172
8.2.3 其他固态废物的收集处理	173
8.2.4 固态废物的处理	173
第9章 火情探测和灭火系统	
9.1 微重力下燃烧的基本特点	174
9.2 火情探测	175
9.2.1 火情探测器	175
9.2.2 火情探测器的选用与布置	176
9.3 灭火系统	176
9.3.1 灭火剂	177



9.3.2 灭火方法	177
9.3.3 失火后的清扫	179
第 10 章 航天服	
10.1 舱内航天服	180
10.1.1 舱内航天服的结构	181
10.1.2 舱内航天服的生保系统	184
10.2 出舱航天服	186
10.2.1 出舱航天服的结构	186
10.2.2 航天服材料	189
10.2.3 工效学要求	189
10.3 出舱航天服生保系统	192
10.3.1 概 述	192
10.3.2 供气调压系统	193
10.3.3 通风与气体成分控制	196
10.3.4 航天服的温控系统	198
10.4 两种典型航天服的比较	201
10.4.1 两种航天服的结构	202
10.4.2 两种航天服的主要区别	203
10.4.3 生保系统	204
10.5 过渡舱系统	209
10.6 航天员舱外活动的辅助装备	210
10.6.1 固定及保险装置	210
10.6.2 载人机动装置	211
第 11 章 生物生命保障系统	
11.1 概 述	214
11.2 CELSS 的基本构成和工作原理	215
11.2.1 以微生物为基础的 CELSS	215
11.2.2 以藻类为基础的 CELSS	216
11.2.3 以低等植物为基础的 CELSS	217
11.2.4 以高等植物为主体的综合 CELSS	217
11.3 CELSS 研究的基本内容和方法	219
11.3.1 CELSS 研究的基本内容	219
11.3.2 CELSS 研究的基本方法	220
11.4 CELSS 关键技术研究概况	220
11.4.1 空间植物品种选育研究	221
11.4.2 空间植物栽培有关技术简述	222

参考文献

第 1 章 绪 论

现代科学技术的发展使人类进入宇宙空间的梦想成为现实。自从 1961 年东方号首次完成绕地球的载人飞行以来,人类已经成功地进行了一系列的载人航天计划。载人航天是一项集国家政治、经济、军事、科技实力为一体的高难度系统工程,其必须突破的三大技术难题为研制大推力、高可靠性的运载工具,生命保障技术和可靠的救生及安全返回技术。

人类的生存依赖于地球生物圈。人在太空中,宇宙空间恶劣的环境因素如真空、辐射、超低温、微重力等,会威胁人的生命。如果没有一套完善的环境控制与生命保障系统,人不可能在这样的环境中生存。环境控制与生命保障系统 ECLSS(environmental control & life support system),简称环控生保系统,其任务是在航天器密闭座舱内创造一个适居的环境条件,并为航天员的生存提供必要的物质条件,保证航天员在航天器内的正常生命活动及工作效率。所谓适居的环境条件包括大气压力、气体成分、温度、湿度、振动、噪声、辐射、卫生条件等。物质条件包括氧气、水、食品等。环控生保系统同时还要保证航天器内仪表、设备正常工作和维持科学实验的环境条件等。环控生保系统直接关系航天员工作和生活的舒适性,甚至生命安全,是载人航天器一个非常重要的系统,同时也是载人航天区别于非载人航天的一个重要标志。由于航天器中人的存在,使整个航天器的设计更为复杂。

1.1 环控生保系统的功能和组成

1.1.1 环控生保系统的功能

ECLSS 的两大功能包括:① 环境控制功能。实现航天器座舱内的环境控制,即大气压力控制、气体成分控制、温湿度控制。环境控制功能还包括噪声控制、辐射防护、防火等。② 生命保障功能。为航天员提供维持生命必需的物质条件和各种生活支持设施,解决航天飞行条件下,特别是轨道飞行条件下航天员进食、饮水和处理个人卫生所遇到的特殊困难,保证人的正常生理活动。环境控制与生命保障作为 ECLSS 的两大功能,实际上是密不可分的。具体而言,ECLSS 的主要功能包括:

- ① 维持飞行器内适宜的大气总压和氧分压;
- ② 提供航天员代谢所需要的氧气,补充由于座舱泄露等原因而消耗的氧气和氮气;
- ③ 处理二氧化碳和其他微量有害气体成分,保证座舱大气的洁净度;
- ④ 维持座舱内适宜的温度、湿度,保证舱内气体的流通;



- ⑤ 保障航天员饮水和卫生用水的供应,实现水的回收和管理;
- ⑥ 收集处理航天员产生的生理废物和其他废弃物;
- ⑦ 提供航天员个人卫生系统、休息及娱乐设施;
- ⑧ 应急状态下的生命保障;
- ⑨ 出舱活动过程中的生命保障;
- ⑩ 实现烟火检测,提供必要的火情抑制措施。

1.1.2 环控生保系统的组成

为了实现环境控制与生命保障的基本功能,ECLSS 由完成各自特定功能的分系统组成。按照 NASA 规范,ECLSS 可以划分为供气调压、大气净化、温湿度控制、水管理、废物管理、火情检测与灭火、航天服等分系统。

1. 供气调压分系统 ACS(atmosphere control and supply)

ACS 向座舱提供足量的氧、氮气体,按要求控制座舱的大气总压和氧分压;应急工况下,控制压力应急转换时的座舱压力变化速度;实现航天员出舱活动或火情应急时的座舱泄压和复压;提供出舱活动前吸氧排氮的氧源;提供增压式水箱的气源。

2. 大气净化分系统 AR(atmosphere revitalization)

AR 监测和控制座舱大气中二氧化碳和其他微量有害气体的浓度;对于再生式环控生保系统,大气净化系统还要实现二氧化碳的还原和产氧。

3. 温湿度控制分系统 THC(temperature and humidity control)

THC 控制航天器舱内大气的温度和相对湿度,保证舱内气体有一定的流动速度,造成强迫对流,使舱内特别是航天员周围的气体成分、温度和湿度保持均匀;为舱内设备的冷却和食品冷藏提供冷源等。

4. 水管理分系统 WRM(water recovery and management)

WRM 为航天员储存足够的饮水和卫生用水,提供饮水和卫生用水装置;实现水的储存与分配,提供水的加热及冷却手段;收集储存和处理温、湿度控制分系统和航天服循环分系统分离出的冷凝水;对水质进行检测,并对水进行消毒处理;对尿液及其他废水进行回收和处理。

5. 废物管理分系统 WM(waste management)

WM 收集处理航天员的生理废弃物和日常生活的其他废弃物,如食品残渣、包装物、个人卫生用品等,为航天员创造一个卫生的环境。

6. 火情检测和灭火分系统 FDS(fire detection and suppression)

FDS 监测航天器座舱可能出现的烟火异常情况,抑制突发性火情,并及时发出报警信号;为航天员提供必要的灭火装置,设置灭火后相应的处理措施。



7. 航天服分系统(spacesuit)

航天服分为舱内航天服和舱外航天服两种。舱内航天服是座舱内环控系统的应急备份,对确保航天员的生命安全具有重要的意义。在主动段、返回段、变轨飞行和交会对接等事故多发段,航天员穿着舱内航天服;正常状况下处于常压运行状态,由座舱环境控制系统为航天员提供通风、净化、气体成分控制和温湿度控制。当座舱出现压力应急时,航天服自动充压,转入应急工况。舱外航天服则是航天员进行舱外活动的重要装置,包括服装和便携式生保系统两部分。

ECLSS 作为航天器大系统的一个组成部分,其正常工作还需要其他系统的配合,如电源系统、测量控制系统等。电源系统为 ECLSS 提供动力;测量控制系统是 ECLSS 的测量控制中枢,负责系统各主要参数的测量、显示和系统工作状态的监控等。

1.1.3 环控生保系统的分类

航天员在航天活动中所消耗的物质可以通过以下方式获得:

- (1) 在每次航天任务之前,准备好所有的消耗性物质,与航天器一起发射;
- (2) 在执行任务期间由货运飞船补充物质;
- (3) 对消耗的物质进行回收使用;
- (4) 对于星际探索,还可利用当地资源产生氧气等物质。

根据物质是否循环使用,环控生保系统分为非再生式(non-regenerative)和再生式(regenerative)两类。在再生式环控生保系统中,按照物质再生所基于的原理,又可分为物理/化学再生式和生物再生式环控生保系统。生物再生式环控生保系统又称为受控生态生保系统 CELSS(controlled ecology life support system)。

对于非再生式环控生保系统,氧气、水和食品等物质随航天器一起发射,或由货运航天器从地球运到载人航天器上进行再供应,并将废物经过简单处理后收集起来运回地球。这是一种完全开环的生命保障系统,即第一代载人航天生命保障系统。美国和苏联已成功地利用这种生命保障系统完成了短期(水星、双子星、阿波罗、航天飞机及东方号、上升号、联盟号航天计划)和较长期(天空实验室和礼炮 1~5 号空间站)的载人航天任务。非再生式环控生保系统的优点是系统可靠性和技术成熟度高、耗能小,并具有丰富的工程应用经验。缺点是物质的再供应量随任务时间和航天员人数线性上升。

物理化学再生法采用物理和化学方法再生座舱内的大气和水,但食品靠从地球上进行再供应,对废物仍采取收集储存处理的方式。这是部分闭环的生命保障系统,即第二代生命保障系统。苏联从礼炮 6 号空间站上开始第一次试验性使用半闭环生命保障系统,即增加了回收冷凝水和洗涤水的水再生系统。后来,俄罗斯和平号空间站上采用废水再生技术,并采用水电解产氧,可以保证航天员轨道飞行中几乎 100 % 的呼吸用氧和 97 % 的生活用水。但航天员食品是靠进步号飞船进行再供应,废物压实、消毒储存,由进步号飞船带回。美国也在物理/化学