



·总装部队军事训练“十二五”统编教材·

载人航天环境模拟舱

ZAIREN HANGTIAN HUANJING MONICANG

(上册)

马爱军 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十二五”统编教材

载人航天环境模拟舱

(上册)

马爱军 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

载人航天环境模拟舱:全2册/马爱军主编. —北京:
国防工业出版社, 2014. 10

总装部队军事训练“十二五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 09587 - 6

I. ①载... II. ①马... III. ①载人航天飞行 - 航天环
境模拟 - 教材 IV. ①V524.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 192943 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 1/4 字数 231 千字

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1000 册 总定价 55.00 元(上、下册)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2012)

主任委员 于建平

副主任委员 陈志敏 栗根文 蔡洙虎

委 员 王家伍 张海洋 李恒年

王泽民 姚志军 闫章更

白凤凯 康建勇 姜世忠

黄伟强

秘 书 石根柱 余敬春

载人航天环境模拟舱

主 编 马爱军

副 主 编 徐水红

编写人员 (按姓氏笔画排序)

马爱军 闫 利 毕建智

周永康 徐水红 徐永忠

逯忠国

主 审 沈力平

前 言

载人航天环境是指航天员在发射段、地球轨道空间飞行段舱内活动以及地球轨道空间飞行段出舱活动、返回段着陆等可能遇到的环境因素。载人航天环境模拟中将与载人相关的主要航天环境分类为:力学环境、乘员舱大气环境、空间环境、航天产品试验环境,其中乘员舱大气环境和空间环境一般用试验舱(即模拟舱)模拟。载人航空气间环境模拟舱主要模拟以人为试验训练对象的太空环境;人工大气环境模拟舱主要模拟飞行过程中飞船、空间站、航天服等内部环境,也可模拟地球表面高原、高寒、湿热等环境。

本书介绍载人航天环境模拟舱相关模拟技术和工程设计方法,强调了安全性和人机工效设计。本书共 11 章,第 1 章为概论,介绍了载人航天环境模拟舱的作用和意义、分类、组成与功能,介绍了国内外载人航天环境模拟舱现状。第 2~10 章分别介绍载人航天环境模拟舱研制和使用中应该掌握的舱体设计、载人低压舱真空系统设计、紧急复压与爆炸减压、温湿度环境模拟、气体成分模拟、空间冷黑环境模拟、空间外热流模拟、测控系统设计、安全性和人机工效等方面的知识。第 11 章为典型设备介绍,介绍了国内外典型的载人航天环境模拟舱。

本书由马爱军任主编,徐水红任副主编。第 1 章、第 3 章 3.7 节、第 4 章 4.4 节、第 6 章、第 7 章 7.1 节、7.2 节、7.6 节、第 8 章、第 9 章 9.2~9.4 节、第 10 章(除第 10.2.3 节和 10.3.3 节外)和第 11 章 11.2 节由徐水红编写,第 2 章(除第 2.3.7 节外)由毕建智编写,第 2 章 2.3.7 节由马爱军编写,第 3 章 3.1~3.6 节和第 4 章 4.1~4.3 节由周

永康编写,第5章和第7章7.3~7.5节由逯忠国编写,第9章9.1节和第11章11.1节由闫利编写,第10章第10.2.3节和第10.3.3节由徐永忠编写。全书由马爱军统稿,沈力平审稿。

编者水平有限,热忱欢迎同行专家对书中不当之处批评指正。

编者

2014年4月

目 录

(上册)

第1章 概论	1
1.1 载人航天环境模拟舱作用和意义	1
1.1.1 载人航天环境模拟方法	2
1.1.2 载人航天环境模拟舱主要模拟参数及意义	4
1.1.3 载人航天环境模拟舱用途	12
1.2 载人航天环境模拟舱分类	15
1.2.1 大气环境模拟舱	16
1.2.2 载人空间环境模拟舱	19
1.3 国内外载人航天环境模拟舱现状	20
1.3.1 国内载人航天环境模拟舱	20
1.3.2 俄罗斯载人航天环境模拟舱	23
1.3.3 美国载人航天环境模拟舱	24
1.4 载人航天环境模拟舱组成与功能	26
1.4.1 大气环境模拟舱组成	26
1.4.2 大气环境模拟舱功能及模拟方法	26
1.4.3 载人空间环境模拟舱组成	30
1.4.4 载人空间环境模拟舱功能及模拟方法	31
1.5 本书结构	33
参考文献	34
第2章 舱体设计	35
2.1 概述	35
2.1.1 舱体分类和作用	35
2.1.2 模拟舱的组成	35

2.2 舱体结构设计基础	36
2.2.1 舱体结构设计的基本要求	36
2.2.2 材料选择及其性能要求	37
2.2.3 舱体结构设计相关参量	37
2.3 舱体结构设计	38
2.3.1 筒体设计	38
2.3.2 加强圈设计	43
2.3.3 封头设计	45
2.3.4 开孔加强设计	48
2.3.5 法兰设计	52
2.3.6 卧式容器鞍式支座	59
2.3.7 有限元算法	59
2.4 载人低压舱特有部件设计	65
2.4.1 常见的舱门及锁紧开启机构	65
2.4.2 舱外航天服试验舱舱门快开机构设计	67
2.4.3 双铰链封头大门设计	72
2.4.4 组合体试验舱双向门设计	76
2.4.5 矩形舱门锁紧机构	78
2.4.6 观察窗	78
2.4.7 传递窗	79
参考文献	80
第3章 载人低压舱真空系统设计	81
3.1 概述	81
3.1.1 真空基础	81
3.1.2 真空系统组成和主要性能参数	86
3.1.3 载人低压舱真空系统特点	89
3.1.4 国内外载人低压舱真空系统介绍	91
3.2 中低真空获得设备和系统设计	92
3.2.1 水环真空泵和大气喷射真空泵组	93
3.2.2 油封式旋转机械真空泵	93
3.2.3 罗茨真空泵	94

3.2.4	干式真空泵	95
3.2.5	真空机组	96
3.2.6	中低真空系统设计计算	101
3.2.7	实例	104
3.3	高真空获得设备和系统设计	108
3.3.1	油扩散泵	108
3.3.2	涡轮分子泵	108
3.3.3	低温泵	109
3.3.4	高真空系统设计计算	115
3.3.5	实例	118
3.4	载人低压舱压力相关参数测量方法	121
3.4.1	常用真空测量方法	121
3.4.2	常用真空计介绍	124
3.4.3	载人低压舱常用航空仪表介绍	127
3.4.4	载人低压舱压力测量装置选用	128
3.5	舱压调控技术	129
3.5.1	增减压速率调控方法概述	129
3.5.2	定压维持技术	132
3.5.3	按定曲线泄复压的控制方法	133
3.5.4	控制部件选取及设计计算	134
3.5.5	实例	138
3.6	大量水汽抽除技术	139
3.6.1	大量水汽抽除需求	139
3.6.2	大量水汽抽除手段比较	139
3.6.3	液氮冷阱抽除大量水蒸气技术	140
3.6.4	实例	142
3.7	中长期低压试验压力控制	143
3.7.1	气闸舱与传递窗压力控制	144
3.7.2	污水等收集与排放技术	144
3.7.3	容腔设备在线切换压力控制	146
	参考文献	147

第4章 紧急复压与爆炸减压	148
4.1 紧急复压概述	148
4.1.1 紧急复压功能	148
4.1.2 国内外载人低压舱紧急复压系统介绍	149
4.1.3 紧急复压技术方案比较	150
4.2 直接大气复压	152
4.2.1 大气复压系统组成	153
4.2.2 复压有效口径计算	153
4.2.3 快开阀门选择	156
4.2.4 消声器和散流器选择	160
4.2.5 过滤器选择	163
4.2.6 安全可靠措施	164
4.2.7 实例	164
4.3 其他紧急复压方案	167
4.3.1 压缩干空气复压及应用情况	167
4.3.2 氮氧混合气复压及应用情况	170
4.4 爆炸减压模拟	174
4.4.1 爆炸减压模拟的用途	174
4.4.2 爆炸减压模拟方法	175
4.4.3 国内外爆炸减压设备	180
参考文献	182
第5章 温湿度环境模拟	184
5.1 概述	184
5.1.1 乘员舱温湿度环境技术要求及模拟方法	184
5.1.2 高寒环境模拟技术要求及方法	185
5.1.3 湿热环境模拟技术要求及方法	185
5.2 舱内通风技术	186
5.2.1 舱内通风的特点	187
5.2.2 通风量计算及设备选型	187
5.2.3 送风方式的选择	188
5.2.4 孔板送风设计计算	188

5.2.5	循环风系统阻力计算	190
5.2.6	系统的保温设计	194
5.2.7	特殊环境风机及通风管道设计要求	202
5.3	乘员舱温湿度环境模拟系统设计	202
5.3.1	系统热负荷的计算	202
5.3.2	表冷器的冷却热负荷	205
5.3.3	送风温差的确定	206
5.3.4	根据热负荷计算送风量	206
5.3.5	加热器加热功率的计算	206
5.3.6	制冷装置的设计	207
5.4	航天服地面气源温湿度控制系统	208
5.4.1	航天服地面气源温湿度控制系统特点	208
5.4.2	航天服地面气源系统设计	209
5.5	高寒环境模拟	210
5.5.1	高寒环境模拟特点	211
5.5.2	高寒环境模拟系统设计	211
5.6	湿热环境模拟	215
5.6.1	湿热环境模拟特点	216
5.6.2	湿热环境模拟系统设计	217
	参考文献	220
第6章	气体成分模拟	221
6.1	概述	221
6.1.1	大气成分模拟内容及用途	221
6.1.2	常压低氧环境模拟的用途	222
6.2	大气成分模拟	223
6.2.1	氧浓度(分压)控制及供氧	224
6.2.2	有害气体净化	231
6.2.3	微量有害气体定量模拟	235
6.3	常压低氧环境模拟	237
6.3.1	常压低氧环境模拟原理	237
6.3.2	常压低氧环境模拟设备设计	238

参考文献	247
------------	-----

(下册)

第7章 空间冷黑环境模拟	249
7.1 概述	249
7.1.1 空间冷黑环境	249
7.1.2 国内外空间冷黑环境模拟方法	249
7.2 液氮热沉模拟误差分析	250
7.2.1 液氮热沉模拟空间冷黑背景误差分析	250
7.2.2 热沉及航天器表面温度引起的误差分析	252
7.2.3 热沉及航天器表面发射率引起的误差分析	253
7.2.4 热沉尺寸及无热沉面积引起的误差分析	255
7.2.5 有外热流条件下模拟误差分析	255
7.3 热沉	256
7.3.1 热沉热负荷计算	256
7.3.2 热沉结构	258
7.4 液氮系统	264
7.4.1 液氮系统供液方式	264
7.4.2 液氮系统组成	266
7.4.3 液氮系统保温及热负荷计算	267
7.4.4 液氮系统流量	269
7.4.5 液氮系统压力损失计算	270
7.4.6 液氮循环泵的选型	272
7.4.7 液氮消耗计算	273
7.4.8 液氮循环温度压力参数的确定	274
7.5 气氮系统	274
7.5.1 气氮系统原理及组成	275
7.5.2 气氮系统热负荷计算	275
7.5.3 气氮系统流量及管道直径计算	277
7.5.4 气氮系统压力损失计算	277
7.5.5 气氮调温液氮消耗计算	278

7.6 其他	279
7.6.1 液氮系统	279
7.6.2 气氮制冷系统	284
7.6.3 制冷机冷头组合冷板	287
参考文献	288
第8章 空间外热流模拟	289
8.1 概述	289
8.1.1 空间热辐射环境	289
8.1.2 太阳模拟器和红外模拟器分析比较	291
8.1.3 国内外空间外热流模拟设备概述	292
8.2 太阳模拟器	296
8.2.1 太阳辐照模拟标准	296
8.2.2 太阳模拟器分类、功能组成及主要参数	298
8.2.3 太阳模拟器光学系统设计	301
8.3 红外模拟器	314
8.3.1 红外模拟基本原理	314
8.3.2 红外模拟器组成及分类	315
8.3.3 红外加热笼设计	317
8.3.4 表面接触式电加热器及红外灯阵设计	330
8.3.5 红外模拟测量技术	333
参考文献	336
第9章 测控系统	338
9.1 概述	338
9.1.1 载人航天环境模拟舱常用测控方法	338
9.1.2 载人航天环境模拟舱通话摄像监视	343
9.1.3 载人航天环境模拟舱生理参数监控	344
9.2 大气环境模拟舱测控技术	344
9.2.1 压力参数控制	345
9.2.2 温湿度参数控制	349
9.2.3 气体成分参数控制	351
9.2.4 风速及通风流量控制	353

9.3 载人空间环境模拟舱测控技术	354
9.3.1 舱内环境参数控制	355
9.3.2 温度数据测量记录	357
9.3.3 红外热流模拟	361
9.4 通话摄像及生理参数监控	362
9.4.1 大气环境模拟舱通话摄像系统	362
9.4.2 载人空间环境模拟舱通话摄像系统	366
9.4.3 载人空间环境模拟舱生理参数监控系统	369
参考文献	370
第10章 安全性和人机工效	371
10.1 概述	371
10.1.1 载人航天环境模拟舱安全性	371
10.1.2 载人航天环境模拟舱人机工效	375
10.2 安全性和人机工效要求	376
10.2.1 大气环境模拟舱设计安全性要求	376
10.2.2 载人空间环境模拟舱安全性设计要求	381
10.2.3 载人舱设计的人机工效要求	384
10.3 载人舱安全性和人机工效设计与实现	386
10.3.1 大气环境模拟舱安全性设计与实现	386
10.3.2 载人空间环境模拟舱安全性设计与实现	395
10.3.3 载人航天环境模拟舱人 机工效的设计与实现	402
参考文献	405
第11章 典型设备	406
11.1 国内典型的载人航天环境模拟舱	406
11.1.1 飞船内环境模拟舱	406
11.1.2 航天服试验舱	409
11.1.3 应急生保试验舱	413
11.1.4 环控生保集成演示验证舱	417
11.1.5 舱外航天服试验舱	420
11.1.6 交会对接组合体模拟舱	425

11.1.7	KM6 水平舱	429
11.2	国外典型的载人航天环境模拟舱	432
11.2.1	美联航(HSD)汉密尔顿标准部载人试验舱	432
11.2.2	约翰逊航天中心 B 舱	435
11.2.3	约翰逊航天中心 11 英尺和 2 英尺组合舱	438
11.2.4	约翰逊航天中心 20 英尺试验舱	439
11.2.5	俄罗斯/苏联星星公司低压舱	441
	参考文献	443

第1章 概 论

1.1 载人航天环境模拟舱作用和意义

载人航天工程是以航天员为核心的人(航天员)—机(航天器)—环境(航天环境/航天器内环境)综合系统,由于人的参与,这个系统涉及了广泛的医学问题以及与医学问题密切相关的工程问题。

载人航天环境模拟技术是航天医学工程的重要分支,它研究在地面上模拟载人航天环境以及实施载人航天模拟试验的方法与手段,是航天医学工程的支持性应用技术学科。国际载人航天的实践以及我国载人航天工程的初步实践表明,在地面进行的航天环境模拟试验具有安全可靠、试验条件可控、重复性和经济性好等诸多优点。采用大量地面模拟试验与少量验证性真实飞行试验相结合的方法,可以大幅度减少进行真实航天飞行试验的次数,大量节省经费,并大大降低风险,是提高载人航天工程安全性和可靠性的一种高效、低耗、安全的试验方法,也是各航天国家普遍采用的方法^[1]。

载人航天环境模拟设备包括(乘员舱)大气环境模拟舱、载人空间环境模拟舱、载人超重环境模拟设备、中性浮力模拟设备、人体前庭试验设备和载人振动与冲击模拟设备等。其中大气环境模拟舱和载人空间环境模拟舱都属于载人航天环境模拟舱。

大气环境模拟舱可在试验舱内建立压力、温度、湿度、气体成分及气体流动速度等参数可以调节的人工大气环境,以模拟航天过程中乘员舱内正常情况下以及应急情况下的大气环境,供航天员训练以及航天环境医学研究人员进行研究实验。这种模拟实验方法具有实验参数范围宽且可调节、重复性好和安全措施完备等优点。

空间环境模拟舱主要模拟空间真空、冷黑和热辐射等环境参数,分