

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



载人航天出版工程

总主编：周建平
总策划：邓宁丰

空间模拟器设计技术

黄本诚 刘波涛 李志胜 著



中国宇航出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

空间模拟器设计技术

黄本诚 刘波涛 李志胜 著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间模拟器设计技术 / 黄本诚, 刘波涛, 李志胜著
--北京:中国宇航出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1335 - 3

I. ①空… II. ①黄… ②刘… ③李… III. ①航天模
拟器—设计 IV. ①V524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 133490 号

责任编辑 侯丽平

封面设计 宇星文化

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号

邮编 100830

(010)60286808

(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)68371900

(010)60286887

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2017 年 5 月第 1 版

2017 年 5 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 23.625

字数 680 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1335 - 3

定价 288.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自 1992 年立项以来，已经走过了 20 多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了 10 艘神舟飞船和 1 个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

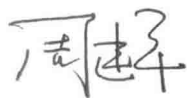
我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

序 一

20 世纪 80 年代以来,世界航天事业迅速发展,我国航天活动从试验阶段进入应用阶段,并积极开发各种新型航天器,特别是载人航天工程、探月工程的发展及新一代通信卫星、导航卫星、资源卫星、气象卫星与各类小型卫星的发展,与此同时,空间模拟器技术也得到不断的研究开发,以适应航天技术发展的要求。

在地面模拟太空环境,建立中、大型空间模拟器,以供航天器整星(船)在发射之前进行检验与验证的真空热试验,并开展空间环境模拟技术、试验技术的研究,这是保证卫星或飞船在轨道运行的长寿命与高可靠的必不可少的重要工作,是航天器研制工作的重要程序之一。大型空间环境模拟器规模庞大,技术复杂,难度大,世界上只有几个航天大国才能独立研究与研制,它是我国航天技术发展中必需的重大基础设施。

本书从模拟理论、总体设计,到各分系统设计、计算、工艺技术研究,以及国内外发展概况方面论述了空间模拟器,并结合空间环境模拟与试验技术,获得了系统设计理论与工程设计知识。

本书主要作者黄本诚先生是我国 KM1 \ KM2 \ KM3 \ KM4 空间模拟器研制的主要技术负责人,也是 KM6 工程的总设计师。

我国建成的 KM6 载人航天器空间环境试验设备,又称 KM6 特大型空间模拟器;主模拟室直径 12 m,高 22.4 m,是我国 20 世纪最大的空间模拟器,也是国际上四大空间模拟器之一,其真空容器的设计、超高真空系统的设计、热沉的设计、氮系统的设计、氦系统的设计、载人试验系统的设计、测试系统的设计等都达到了当前

国际先进水平。本书作者具有丰富的工程与实践经验，因此书中的许多内容都是工程实践经验与国内外先进技术的总结，本书与已出版的其他相关方面的著作相比，有显著的特点——工程性强、专业性强、针对性强，有创新性，技术水平与学术水平高。

20 世纪 90 年代以来，由于我国航天技术的发展，从事航天器技术的研究、试验与研制单位逐年增加，书中列举的各种理论、方法、技术以及有关工程数据，对从事航天器技术与研制人员，航天器环境工程的研究、研制与试验人员和其他相关专业的科技人员具有重要参考意义，也可作为高等院校相关专业的本科生与研究生的教学参考书。

王 浚

中国工程院院士

序 二

航天器与地面设备的最大差别是所处的环境不同，航天器在轨道飞行的空间环境十分复杂。为了确保航天器的质量与可靠性，在发射前必须完成地面环境模拟试验。这是航天器研制过程中的重要环节。《空间模拟器设计技术》是作者多年来从事航天器空间模拟器设计、研制，空间环境试验技术研究与实践的经验与理论的总结，并反映了国内外最新技术进展，论述深入，具有针对性，有很高的实用价值。本书内容新颖、实例丰富、概念清楚、系统性强，有创新性。在国内外尚未见到同类专著出版，是一本高水平的学术著作。

空间模拟器设计技术是一门多学科交叉的新兴技术，它涉及真空、低温、辐照、光学、测控、机械、计算机、空间环境模拟等多项专业技术，并涉及普通物理、高能物理、空间物理、化学、材料学、机械学、真空科学、深冷科学等多种学科，它的发展将推动许多基础学科的发展。

本书的出版为从事航天技术科研与设计人员、试验技术人员提供了十分有价值的参考资料，也可以作为相关专业本科生与研究生教学用参考资料。

张履谦

中国工程院院士

前 言

航天器在发射前,必须在地面模拟的空间环境中进行空间环境模拟试验,以确保其可靠性。国内外所有新研制的航天器都要在空间模拟器中做热真空、热平衡试验(简称真空热试验),同时根据功能不同、要求不同做特殊空间环境试验。因此,空间环境模拟器是各国发展航天技术所必需的、重要的基础设施。目前世界上模拟室直径10 m左右的空间模拟器有30多台,模拟室直径6 m以上的有300多台,模拟室直径2 m以上的有1 000多台。空间模拟器设计技术是航天技术中重要的分支学科。

空间模拟器设计涉及的专业面很宽,包括:航天器总体设计技术、空间模拟器试验技术、热物理学、真空技术、低温技术、光学技术、结构力学、载人航天技术、自动控制技术、机械工程技术、计算机应用技术、试验数据处理及数据挖掘技术等。它的系统组成有:真空容器系统、真空系统、热沉系统、液氮系统、气氛调温系统、氨系统、太阳模拟器系统、红外模拟器系统、运动模拟器系统、载人航天试验系统、测量控制系统、数据采集与试验管理系统等。

本书共有15章,论述中、大型空间模拟器的设计与制造技术,对各分系统的设计、工艺与性能分析做了阐述,并介绍了国内外的新科技成果等。

本书可供从事空间环境模拟技术研究、设计、研制的专业人员参考,同时可供从事航天技术研究、设计、研制、试验的工程技术人员参考,亦可作为高等院校相关专业的本科生与研究生的教学参考书。

刘国青同志参加了本书的撰写工作，并对相关章节提出了修改意见。下列同志对本书相关章节进行了认真的审核并提出修改意见：陈金明、杨晓宁、杨林华、祁妍、王晓冬、刘敏、茹晓勤、王紫娟、李高、臧友竹、吴树迎、刘劲松、童靖宇、孙蓓新、冯伟泉、钱北行、李虎等。此外，张立伟、郝宁为本书的出版做了很多工作，在此一并表示感谢！

作 者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 近地空间环境	2
1.3 空间环境及其效应	2
1.3.1 真空环境及其效应	2
1.3.2 原子氧环境及其效应	4
1.3.3 粒子辐射环境及其效应	5
1.3.4 太阳辐射环境及其效应	7
1.3.5 热环境及其效应	10
1.3.6 微流星与空间碎片环境及其效应	11
1.3.7 地球磁场环境及其效应	12
1.3.8 空间引力场环境及其效应	14
1.3.9 空间冷黑环境及其效应	14
1.3.10 空间污染及其效应	15
1.3.11 空间等离子体环境及其效应	15
1.3.12 空间微重力环境及其效应	16
1.3.13 空间大气环境及其效应	16
1.4 航天器经历的环境	17
1.5 空间模拟器	17
1.5.1 空间模拟器的分类	17
1.5.2 热真空试验设备	18
1.6 空间环境工程学研究的主要内容	19
1.7 空间模拟器与整星空间环境试验技术	20

1.7.1	空间模拟器是航天器环境试验验证工作的 必要手段	20
1.7.2	空间环境试验的必要性	21
1.7.3	空间环境试验方法与使用程序	22
1.7.4	空间环境模拟试验技术的主要研究方向	23
1.7.5	在空间环境模拟器中进行典型试验的项目	25
1.8	空间模拟器的主要环境参数	29
1.8.1	真空环境	29
1.8.2	冷黑环境	30
1.8.3	空间外热流环境	30
1.8.4	航天器真空热试验环境模拟参数	31
1.9	建立空间模拟器的必要性	31
1.9.1	热真空、热平衡试验的需要	31
1.9.2	载人航天器试验的需要	31
1.9.3	航天器特殊组件试验的需要	32
1.9.4	航天器可靠性与经济上的需要	32
1.9.5	航天器研制性试验与改进性试验的需要	32
1.10	空间模拟器的国内外进展	32
1.10.1	中国空间模拟器的发展概况	32
1.10.2	国外空间模拟器的发展	39
第2章	空间模拟器总体设计	43
2.1	概述	43
2.2	总体设计主要技术指标的确定	43
2.2.1	明确服务对象	43
2.2.2	总体技术指标要求	44
2.3	总体技术指标中特殊要求的确定	46
2.3.1	根据不同特殊使用要求增加对应分系统的 特殊要求	46
2.3.2	满足各分系统间的相互约束的特殊要求	47

2.3.3	环境、污染与安全的特殊要求	48
2.3.4	制造与工艺的特殊要求	49
2.3.5	优化设计与计划进度的特殊要求	50
2.3.6	测试与维修的特殊要求	51
2.3.7	发展与接口的特殊要求	51
2.4	总体方案设计任务与步骤	51
2.4.1	总体方案设计的宗旨	51
2.4.2	总体方案设计的步骤	52
2.4.3	总体方案设计任务	52
2.4.4	总体对分系统方案类型的选择和要求	53
2.5	空间模拟器分系统组成	53
2.6	总体设计方法与优化	58
2.6.1	总体方案设计的基本任务	58
2.6.2	总体综合设计	59
2.6.3	优化设计	59
2.6.4	预先研究	60
2.6.5	总体方案可行性论证	63
2.6.6	提出初步设计要求	65
2.6.7	总体设计中的反馈与评审	65
2.6.8	关键技术分析	68
2.6.9	总体设计基本原则与质量保证	69
2.7	分系统的设计原则	77
2.7.1	真空容器的设计原则	77
2.7.2	真空系统的设计原则	79
2.7.3	热沉的设计原则	82
2.7.4	液氮系统的设计原则	86
2.7.5	气氮系统的设计原则	87
2.7.6	氦系统的设计原则	88
2.7.7	太阳辐照环境的设计原则	88

2.7.8 测控系统的设计原则	90
2.8 空间模拟器的投资与运转费用	91
2.8.1 空间模拟器的投资	91
2.8.2 空间模拟器的运转费用	92
第3章 真空容器设计技术	94
3.1 概述	94
3.2 真空容器的结构设计及计算	95
3.2.1 真空容器的结构设计及稳定性计算	95
3.2.2 真空容器壳体及封头设计	100
3.2.3 球形真空容器设计	112
3.2.4 箱型真空容器设计	114
3.2.5 有限元计算在大型真空容器设计中的应用	115
3.3 大型圆柱形真空容器参数简要说明	116
3.3.1 真空容器参数说明	116
3.3.2 容器壳体设计计算参数	118
3.4 大型真空容器的制造工艺	120
3.4.1 大型真空容器的制造流程	120
3.4.2 真空容器筒体制造工艺	121
3.4.3 法兰制造工艺	127
3.4.4 大型真空容器开孔补强与对接焊接工艺	133
3.4.5 门与封头制造工艺	136
3.4.6 KM6大型喇叭形、锥形圆筒的焊接工艺	140
3.5 球形真空容器的制造工艺	140
第4章 热沉设计技术	145
4.1 空间冷黑环境	145
4.2 热沉模拟的有效性研究	146
4.3 热沉模拟的热辐射	147
4.3.1 有外部热源时,热沉温度对航天器的热辐射	147

4.3.2	由压力、剩余气体引起的热传导误差	148
4.3.3	没有外部热辐射时, 热沉温度、尺寸与发射率 对航天器热试验的影响	148
4.4	热沉热负荷计算分析	150
4.4.1	航天器对热沉的辐射与反辐射的数值模拟	150
4.4.2	用太阳模拟器进行真空热试验对热沉辐射热的 计算	151
4.4.3	用红外模拟器进行真空热试验对热沉辐射热的 计算	151
4.4.4	热沉接受圆柱体真空容器壁辐射热的数值模型	152
4.4.5	热沉传导漏热的计算	153
4.4.6	容器内剩余气体的传导漏热	153
4.5	热沉模拟的结构设计	153
4.5.1	热沉的形式	154
4.5.2	热沉壁板形式	154
4.5.3	热沉材料的选择	156
4.5.4	热沉支管间距设计	160
4.5.5	热沉液氮进出口管设计	160
4.6	分子沉模拟技术	161
4.6.1	分子沉模拟的结构形式	162
4.6.2	深冷抽气速率计算	165
4.6.3	深冷泵的热负荷	175
4.7	热沉制造工艺	177
4.7.1	材料的检验	178
4.7.2	焊接工艺及质量控制	178
4.7.3	热沉的检漏	179
4.8	热沉总装技术	180
4.9	热沉测温技术	181

第 5 章 真空系统设计技术	182
5.1 概述	182
5.2 真空系统设计流程	183
5.3 真空获得系统组成	186
5.3.1 概述	186
5.3.2 空间环境模拟设备常用真空获得设备	187
5.3.3 真空机组及其应用说明	194
5.4 被抽气体分析及计算	197
5.4.1 真空抽气过程	197
5.4.2 粗抽阶段气体分析及计算	199
5.4.3 高真空阶段气体分析及计算	199
5.5 抽气时间和压力的计算	202
5.5.1 气体流动状态及其判别	202
5.5.2 容器有效抽速及管道流导	204
5.5.3 抽气时间的计算	207
5.5.4 真空容器压力计算	210
5.6 真空获得系统的选择与匹配计算	212
5.6.1 高真空系统的选择	212
5.6.2 过渡系统	214
5.6.3 粗抽系统设计计算	215
5.7 复压系统设计	217
5.8 换气系统	218
5.9 尾气排放系统	219
5.10 真空测量	220
5.10.1 概述	220
5.10.2 真空测量的特点及真空计的选用原则	220
5.10.3 常用真空测量设备	221
5.10.4 真空测量系统设计	224
5.11 污染测量和控制	227

5.11.1	概述	227
5.11.2	污染测量方法	227
5.11.3	降低污染的方法及措施	229
5.12	真空检漏	230
5.12.1	概述	230
5.12.2	检漏规划与指标设计	231
5.12.3	检漏方法的说明与选择	236
5.12.4	大型真空系统检漏说明	246
5.13	大口径低温泵研制	252
5.13.1	研制流程说明	253
5.13.2	低温泵总体设计	254
5.13.3	设计计算	262
5.13.4	制造及装配工艺	262
5.13.5	低温泵测试	266
第 6 章	液氮系统设计技术	272
6.1	概述	272
6.2	方案设计	272
6.3	系统热负荷的计算	276
6.4	典型液氮系统举例	284
第 7 章	气氮系统设计技术	291
7.1	概述	291
7.2	气氮回温系统	291
7.2.1	方案设计	291
7.2.2	设计计算	293
7.2.3	典型气氮回温系统举例	295
7.3	气氮调温系统	298
7.3.1	气氮调温系统的应用目的与技术指标	298
7.3.2	热沉调温方法	299