



航天科技图书出版基金资助出版

航天器操作的 微重力环境构建

朱战霞 袁建平 等 著



中国宇航出版社

013027554

V448.2
09

航天科技图书出版基金资助出版

航天器操作的微重力环境构建

朱战霞 袁建平 等著



中国宇航出版社

· 北京 ·



北航

C1635372

V448.2
09

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器操作的微重力环境构建 / 朱战霞等著. --北京:中国宇航出版社,2013.2

ISBN 978-7-5159-0392-7

I. ①航… II. ①朱… III. ①航天器—操作方式 IV. ①V448

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 041486 号

责任编辑 马 航 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出 版	中国宇航出版社	
发 行	北京市阜成路 8 号	
社 址	(010)68768548	邮 编 100830
网 址	www.caphbook.com	
经 销	新华书店	
发行部	(010)68371900	(010)88530478(传真)
	(010)68768541	(010)68767294(传真)
零售店	读者服务部	北京宇航文苑
	(010)68371105	(010)62529336
承 印	北京画中国画印刷有限公司	
版 次	2013 年 2 月第 1 版	2013 年 2 月第 1 次印刷
规 格	880 × 1230	开 本 1/32
印 张	12. 125	字 数 384 千字
书 号	ISBN 978-7-5159-0392-7	
定 价	98. 00 元	

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

前 言

由于航天器发射和运行的空间环境特点,决定了航天任务具有高风险、高成本的特征,因而,航天器及其元器件不能在空间进行多次重复试验。这样一来,地面的实验和验证就显得特别重要。

地面实验伴随着航天器的设计、制造和运行过程,是进行总体性能评价、关键参数确定、元器件测试、各种系统验证的必不可少的环节之一。随着空间操作技术的出现,地面实验更成为各种复杂空间操作活动可行性、可靠性、最优性等评价和验证的重要手段。而地面实验的置信度(亦即地面实验反映空间真实情况的接近程度)取决于地面实验条件和环境的构建。

对航天器的飞行、操作和运行来说,力学环境的影响是最主要的,它不仅影响诸如轨道、姿态等航天器总体特性,还会影响诸如太阳帆板、机械臂等活动部件的动态特性和操作过程,影响结构、机构、材料、电子器件等性能。由航天器与地球等星体的时空关系和运动特性形成的微重力环境构建,是航天器设计、制造、测试,特别是运行、操作过程验证与重现最为必要的地面设施。

地面微重力环境实验可以解决航天器设计、测试、操作等过程中诸多问题。在空间力学效应的地面模拟中可以实验轨道特征,如非线性状态的非开普勒轨道、多引力场作用轨道、强控制作用轨道、连续推力轨道、多模拼接轨道等;姿态特征,如强控制作用下的大姿态运动、姿态/轨道耦合运动、复合体运动、变构型运动、变质量体运动等;协同特征,如多体、柔/刚复合的航天器协同控制,多航天器的编队、绕飞、停靠等相对运动控制,中/远程交会式相对运动控制,近距离交会(加注、维修状态)式协调控制等;操作特征,如空间机器人(机械臂)操作

过程模拟,表面力/体积力模拟,系统/子系统操作过程模拟,机械运动、表面运动、间隙运动、润滑效果的天/地差异性模拟等。

在地面构建或模拟空间微重力环境/效应并不是现在才开始的,但面向空间操作的微重力环境/效应构建是本研究团队近十年来研究的主要内容。本书首先综合介绍了已有的实验方法,包括失重飞机实验、落塔实验、吊丝系统、气浮台实验、中性浮力实验,它们目前正在大量应用之中。然后介绍了本团队研究的成果:液体浮力/电磁力混合悬浮系统、空间操作地面实验的相似性理论研究、基于键合图理论的地面实验相似程度分析、混合悬浮实验测试方法、Cyber 空间辅助的模拟实验方法等。此外,我们还在实验室搭建了混合悬浮原理性实验系统,取得了可信的数据和实验结果。

第2章到第6章主要对现有的方法进行了介绍。其中第2章“失重飞机实验”由杨鹏飞、朱战霞和商澎完成,商澎曾带领研究生赴法国参加了失重飞机的飞行实验。第3章“落塔实验”由陈小前、黄奕勇、李京浩和李晓龙完成,他们曾在中科院空间中心的落塔上进行了在轨加注系统的实验。第4章“吊丝系统”由黄攀峰和孟中杰完成。第5章“气浮台实验系统”由黎康、牟小刚和朱志斌完成,他们都曾完成过类似实验。第6章“中性水池实验”由黄英和朱战霞完成,其中关于浮力控制部分反映了其最新研究成果。

第7章到第11章介绍了本团队的研究成果。其中由袁建平、朱战霞和明正峰完成的第7章“混合悬浮系统”介绍的系统克服了现有系统的不足,提出的新方法具有提供长时间、三维微重力模拟、大范围六自由度运动空间、悬浮高度任意调节的能力。第8章“空间操作地面实验的相似性理论研究”由袁建平、赵育善、朱战霞和何兆伟完成,该章与赵育善、何兆伟和朱战霞完成的第9章“基于键合图理论的地面实验相似程度分析”,系统地给出了地面微重力实验和实际空间运动之间的相似度分析方法。第10章“混合悬浮实验测试方法”由朱战霞和明正峰完成,主要介绍了悬浮系统整体性能测试方法和实验过程的参数测量方法。第11章“Cyber 空间辅助模拟

实验方法”由宁昕和朱战霞完成,他们将数字空间技术用于微重力实验,并将二者有机地结合起来。最后要说的是,第1章“绪论”由朱战霞和袁建平完成,其中朱战霞除参加本书其他章节的写作外,还负责全书的策划和统稿工作。

本书适合航天领域和其他与微重力环境相关专业的技术人员和科研工作者阅读,也适合相关院校的高年级学生和研究生参考。

作 者

2012 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间操作与地面实验	1
1.2 空间环境对航天器的影响	3
1.2.1 空间环境的范围	3
1.2.2 空间环境对航天器本体性能的影响	4
1.2.3 空间环境对航天器运动特性的影响	9
1.3 微重力实验的意义	11
1.3.1 微重力实验对科学研究的重要意义	11
1.3.2 微重力实验对载人航天的重要意义	13
1.3.3 微重力实验对新型航天器研制的意义	14
1.3.4 微重力实验对空间操作的意义	16
1.4 微重力环境模拟和构建的方法与种类	17
1.4.1 地面微重力环境构建的范围	17
1.4.2 地面微重力实验需要解决的基本问题	18
1.5 本书主要内容	20
参考文献	22
第 2 章 失重飞机实验	23
2.1 实验简介及国内外现状	23
2.1.1 失重飞机的原理	23
2.1.2 失重飞机的优缺点	24
2.1.3 国内外发展	26
2.2 系统结构和实验方法	28
2.2.1 系统构成	29
2.2.2 实验项目实施方法	31

2.3 失重飞机实验案例分析	34
2.3.1 案例一:不同重力水平、重心以及重量对人体 运动生物力学的影响	35
2.3.2 案例二:骨细胞对变重力水平的响应研究	38
2.4 结束语	41
参考文献	42
第3章 落塔实验	43
3.1 落塔实验原理及国内外发展现状	43
3.1.1 实验原理	43
3.1.2 国内外现状	44
3.2 落塔系统结构和实验方法	64
3.2.1 落塔系统结构	65
3.2.2 实验方法	70
3.3 落塔实验案例分析	70
3.3.1 实验目的	71
3.3.2 实验模型和平台	71
3.3.3 实验内容	74
3.3.4 实验步骤	75
3.3.5 实验结果和数据处理	75
3.4 发展趋势	79
3.4.1 提高实验精度	79
3.4.2 实验方案创新	79
参考文献	81
第4章 吊丝系统	83
4.1 吊丝系统的原理及国内外发展现状	83
4.1.1 吊丝系统概念及原理	83
4.1.2 吊丝系统应用范围及优缺点分析	84
4.1.3 吊丝系统的国内外现状	85
4.2 吊丝系统结构和实验方法	89
4.2.1 吊丝系统的系统组成及构架	89
4.2.2 吊丝系统的实验方法	97

4.3 典型实验系统	100
4.3.1 SM ² 的吊丝实验系统	100
4.3.2 EMR 的吊丝实验系统	105
4.4 结束语	107
参考文献	109
第5章 气浮台实验系统	111
5.1 气浮台物理仿真原理	111
5.1.1 单轴气浮台	112
5.1.2 三轴气浮台	114
5.1.3 三自由度气浮平台	118
5.1.4 五自由度气浮平台	119
5.2 气浮台物理仿真的国内外现状	122
5.2.1 单通道姿态控制物理仿真	122
5.2.2 三通道姿态控制物理仿真	124
5.2.3 编队飞行控制物理仿真	129
5.3 航天器相对运动物理仿真试验系统典型配置	135
5.3.1 航天器相对运动模拟器	136
5.3.2 相对运动测量系统	138
5.3.3 第三方位姿测量系统	138
5.4 典型试验情况	139
5.4.1 试验技术要求	139
5.4.2 气浮台上系统方案设计	140
5.4.3 地面测控系统技术方案设计	147
5.4.4 典型试验结果	152
5.5 结束语	153
参考文献	154
第6章 中性水池实验	155
6.1 原理、优缺点及国内外现状	155
6.1.1 中性浮力的概念和原理	155
6.1.2 中性浮力实验的优缺点	155
6.1.3 中性浮力实验的应用范围	157

6.1.4 中性浮力水池的国内外现状	160
6.2 系统结构和实验方法	162
6.2.1 中性浮力实验设施的组成和结构	162
6.2.2 中性浮力实验方法	166
6.3 典型中性浮力设施及实验案例	168
6.3.1 典型的中性浮力设施	168
6.3.2 典型的中性浮力实验案例	171
6.4 浮力控制技术	178
6.4.1 磁流体的制备及密度调节方法	178
6.4.2 磁性离子液体的合成及密度调节方法	187
6.4.3 改变溶液对比对液体密度的影响	194
6.4.4 液体介质浮力特性变化的控制技术	196
6.5 存在的问题	199
参考文献	201
第7章 混合悬浮系统	203
7.1 混合悬浮原理	204
7.1.1 混合悬浮的基本原理	204
7.1.2 混合悬浮非接触力源的选择	204
7.1.3 液磁混合悬浮的优缺点	210
7.2 液磁混合悬浮的微重力效应模拟系统构建	211
7.2.1 液浮系统组成	212
7.2.2 电磁系统组成	212
7.2.3 实验模型系统组成	217
7.2.4 测量系统组成	219
7.2.5 支持保障系统	220
7.3 混合悬浮系统实验方法	220
7.3.1 电磁力控制方法	220
7.3.2 阻力预估与减阻方法	224
7.4 混合悬浮系统设计及实验实例	226
7.4.1 混合悬浮微重力效应模拟系统设计	226
7.4.2 混合悬浮实验实例	229

参考文献	233
第 8 章 空间操作地面实验的相似性理论研究	235
8.1 相似性的基本概念	235
8.2 相似三定律及其发展历程	236
8.3 相似性与模型实验研究	239
8.4 相似准则的导出方法	241
8.5 Buckingham π 定理	243
8.5.1 Buckingham π 定理的表述	243
8.5.2 Buckingham π 定理的证明	244
8.6 空间操作地面实验相似准则的建立	248
8.6.1 基于 Buckingham π 定理的相似准则	248
8.6.2 轨道动力学问题的相似准则	253
8.6.3 姿态动力学问题的相似准则	254
8.7 基于相似准则的地面实验规划与设计	255
8.7.1 近距离空间操作地面实验	255
8.7.2 环绕运动地面实验	264
8.8 混合悬浮实验环境影响相似程度的因素	274
8.8.1 环绕实验干扰因素分析	274
8.8.2 相对运动实验干扰因素分析	276
8.9 结束语	277
参考文献	279
第 9 章 基于键合图理论的地面实验相似程度分析	281
9.1 基于键合图理论的相似度量方法	281
9.1.1 近似相似程度的量化度量	282
9.1.2 状态变量的活性分析	284
9.1.3 度量函数的改善	285
9.1.4 相似性分析的流程	286
9.2 环绕实验干扰对相似度的影响分析	288
9.3 近距离操作实验干扰对相似度的影响分析	298
参考文献	312

第 10 章 混合悬浮实验测试方法	313
10.1 系统液体浮力特性测试方法	313
10.2 系统电磁力特性测试方法	314
10.2.1 力的基本测量原理	314
10.2.2 电磁力特性的测试方案	316
10.3 系统微重力水平测试方法	322
10.3.1 测试方法介绍	322
10.3.2 测试方案	323
10.4 面向空间操作地面实验的测试	324
10.4.1 测试方法分析与选择	325
10.4.2 IMU 测量误差机理与补偿	326
10.4.3 绝对运动测量方案	332
10.4.4 相对运动测量方案	335
参考文献	338
第 11 章 Cyber 空间辅助模拟实验方法	339
11.1 概述	339
11.1.1 Cyber 空间与 Cyber 性	339
11.1.2 空间操作系统的 Cyber 性	339
11.1.3 Cyber 与地面实验系统结合下的空间操作 实验验证	341
11.2 空间操作地面实验与 Cyber 实验的结合	343
11.3 基于 Cyber 的空间操作地面实验系统总体框架	345
11.3.1 系统总体框架	345
11.3.2 系统层次结构	348
11.3.3 系统功能模块设计	349
11.4 基于 Cyber 空间操作的地面实验模型动力学建模	351
11.4.1 坐标系定义	352
11.4.2 单柔性体动力学方程	354
11.4.3 舱段邻接递推关系	358
11.4.4 实验体系统动力学方程	360

11.5 基于 Cyber 的空间操作地面实验系统动力学	
预测建模	360
11.5.1 动态贝叶斯网络推理模型	360
11.5.2 动态贝叶斯网络推理	362
11.6 系统中的时延分析	365
11.6.1 影响网络时延的因素	365
11.6.2 基于 Cyber 的空间操作地面实验系统	
时延分析	368
11.6.3 星地视频和指令数据传输模拟	369
11.6.4 星地视频和指令数据传输方式	370
11.6.5 影响星地通信时延的主要因素	370
11.6.6 星地通信时延模拟	372
11.7 Cyber 环境建模技术研究	372
参考文献	374

第1章 绪 论

人类长期以来对广袤无垠的宇宙空间充满了向往和遐想，渴求了解深奥的宇宙和遥远的星球。随着科技水平的逐渐提高，几十年来，空间技术和工程的蓬勃发展，使人类登上月球、探测火星并准确撞击彗星，所有这些空间活动都说明了人类已经开始将脚步成功迈向深空。

随着人类空间活动的深入和范围的扩大，满足各类应用的空间飞行器应运而生，其中包括各种用途和功能的航天器、航天飞机、大型空间站，以及近年来发展起来的强调机动能力的新概念空间航天器等。

纵观每一种空间飞行器的研制过程，都经历了概念研究、总体设计、关键技术攻关和验证、地面实验、飞行实验等过程。其中在地面进行相关关键技术的验证是一个非常重要且必不可少的环节。考虑到航天器运行环境的特殊性，要求地面实验必须考虑空间的环境特点，通过对不同空间环境的地面模拟，完成航天器及其设备在该环境中的性能测试和运行情况的检验，以便及时发现和消除设计和制造过程中的某些缺陷，确保航天器入轨之后在真实空间环境中的正常运行。因此，在进行地面物理实验时，必须首先解决空间环境的模拟和构建技术，包括空间微重力环境、空间辐射环境、空间粒子环境等。对航天器的飞行、操作和运行来说，力学环境的影响是最主要的，因此，需要首先模拟和构建空间力学环境效应，其中最主要的就是构建微重力环境效应。

1.1 空间操作与地面实验

航天技术发展的强大生命力首先来自于它旺盛的应用需求。时

至今日,人类不仅初步掌握了进入空间和利用空间的技术,而且将由简单的空间应用进步到通过空间操作完成复杂的、系统的、战略/战术的、军事/民用的、政治/经济的使命,空间设施的功能将由辅助、支援、协同上升为主导、主宰,同时空间操作也更加强调各种空间设施的能力。

空间操作(Space Operation)包罗了几乎所有的空间活动,并且其内涵仍在扩展之中,因此,目前还没有统一的定义。广义讲,空间操作是指执行复杂空间任务所进行的一系列空间活动,例如空间交会对接、碎片规避、来袭规避、反侦察反干扰机动、轨道转移/提升、轨道与姿态重置、近距离观察与检查、在轨释放有效载荷、在轨维修、模块更换、燃料补充、在轨装配与重构、报废与销毁机动等,涉及的空间范围可以从地球附近一直延伸到深空,涉及的关键技术包括操作任务规划、新型轨道设计技术、推进技术、自主导航与控制、新型能源技术、遥远测控通信技术等。空间操作活动的分类如图1-1所示^[1]。空间操作技术水平是空间系统能力提升的体现,并通过合适的空间机动完成动作体现。因此,空间操作是未来空间活动的必然。

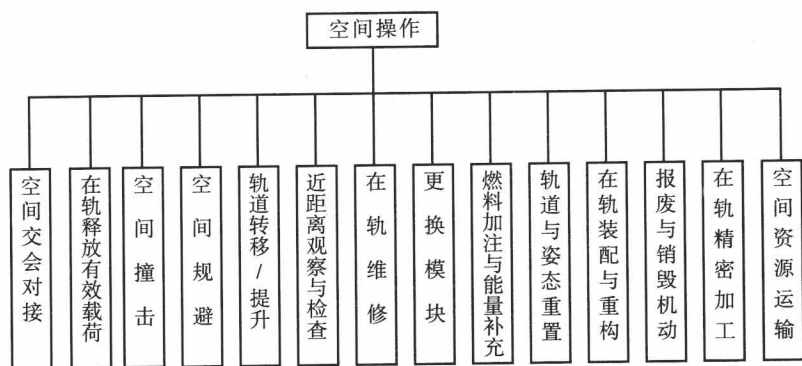


图1-1 空间操作活动的分类

由以上定义可以看出,对于地球轨道范围内的空间操作,空间大范围快速轨道机动和控制技术是实现这类空间操作任务的最基本、

也是最关键的技术。航天器的这种机动需要人为施加控制力,其运行轨道不再符合开普勒定律。基于传统的开普勒理论的轨道机动控制方法和技术亦不能完全满足未来空间操作的要求,需要新的轨道设计方法和机动动力学与控制理论的支撑。但是新理论、新方法的应用必须经过实验的检验。

同样对于深空的空间操作而言,航天器处于复杂的多体力场中,基于二体问题的理论和方法亦不能适应这种复杂力学环境中的轨道设计和精确控制,必须在研究空间多体动力学的基础上寻找新的轨道设计理论和方法。但是由于多体问题本身的高度非线性,目前还不能从理论上精确求解,只能在某些假设下得到特解,从理论上获得多体系统动力学的精确解仍然是一个难题。因此,必须探寻新的解决方式。实验是解决问题最可靠的途径,可以借助于实验手段探索解决问题的方案,同时验证已有理论的正确性。

另外,对于未来的复杂空间操作,还将涉及大量的单项关键技术、新型系统、新型机构等,其可靠性、可用性、适用性都必须经过检验和验证。

因此,从未来空间操作和航天技术发展方面看,地面实验不仅是一个系统测试、评估、性能验证的重要环节,而且前移到系统设计之中。

1.2 空间环境对航天器的影响^[2-5]

1.2.1 空间环境的范围

空间环境是影响空间飞行的基本环境条件,对航天器的运动和各系统的工作有显著影响。空间环境的内容包括真空、电磁辐射、高能粒子辐射、等离子体、微流星体、行星大气、磁场和引力场等。根据空间存在的物质、辐射和力场的时空分布特性,空间环境又可分为行星际空间环境和地球空间环境。

行星际空间是一个广阔的极高真空的环境，存在着太阳连续发射的电磁辐射、爆发性的高能粒子辐射、稳定的等离子体流（称太阳风）及行星际磁场，其环境特性主要受太阳活动的影响，此外，还包括来自外界的银河宇宙射线和微流星体等。

地球空间环境包括地球高层大气、电离层和磁层中的各种环境条件，也存在着太阳电磁辐射、太阳宇宙射线、银河宇宙射线和微流星体等。

1.2.2 空间环境对航天器本体性能的影响

航天器在外层空间飞行时所处的环境条件，可分为自然环境和诱导环境。自然环境指由空间自然物体直接产生、在航天器上引发响应的环境。诱导环境是指航天器某些系统工作时或在空间环境作用下二次产生的环境，例如，轨道控制推力器点火和太阳电池翼伸展引起的振动、冲击环境，航天器上的磁性材料和电流回路在空间磁场中运动产生的感应磁场，航天器上有机材料逸出物沉积在其他部位造成的分子污染等。本节中的空间环境主要是指航天器运行所经历的空间自然环境，包括微重力、真空、太阳辐照、电磁辐射、粒子辐照、磁场、微流星体与空间碎片等环境。

1.2.2.1 微重力环境的影响

重力广泛存在于宇宙空间，但在航天器轨道条件下重力的作用可以忽略。如果航天器是一个质点，且没有非引力场的作用，则它应处于完全失重状态，事实上这是不可能的。因此航天器总是处于微重力条件下，约有 $10^{-4} g$ （ g 为地球的引力加速度值）的重力加速度，形成微重力环境。微重力环境首先对航天器的飞行动态特性产生决定性的影响，其次影响着各种空间操作活动。此外，对植物生长、遗传以及人的内分泌系统、心血管功能、血液和淋巴系统、肌肉和骨骼系统、前庭功能都会产生影响和变化。另外，微重力环境中物体和器件的存放、拿取等也与地面不同，这就影响空间组装、加注、维修等复杂操作活动。空间微重力环境和效应已成为空间技