

空间环境建模 与可视化仿真技术

王 鹏 徐 青 李建胜 编著
周 杨 蓝朝桢 刘立娜

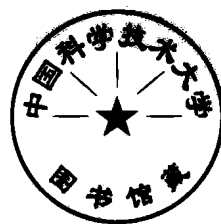


國防工業出版社

National Defense Industry Press

空间环境建模 与可视化仿真技术

王 鹏 徐 青 李建胜 编著
周 杨 蓝朝桢 刘立娜



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

航天器飞行所处的空间环境,不仅对航天器平台及其载荷的工作效能有重要影响,也会影响到整个空间信息系统的信息获取、传输和处理等环节,最终影响航天任务的有效实施。复杂多变的空间环境造成了物理实验与验证的困难,而通过可视化仿真模拟来推演其物理机理则可成为一种有效的实验手段。本书遵循理论与实践相结合的原则,采用理论分析与仿真实验相结合的方法,系统阐述了空间环境仿真的相关理论、方法、技术及应用。全书共12章,主要介绍了空间环境及其建模仿真实论,空间环境数值建模与仿真,空间环境三维建模与可视化仿真和基于HLA的分布式空间环境仿真应用。

本书适用于从事航天技术研究的专业人员和相关应用领域的科技人员,也可作为高等院校航空宇航科学与技术、空间科学、系统建模与仿真等学科的研究生教材,同时可供从事空间环境和建模仿真领域研究工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间环境建模与可视化仿真技术/王鹏等编著. —
北京:国防工业出版社,2012.7
ISBN 978-7-118-08102-2

I. ①空... II. ①王... III. ①航天器环境—研究
IV. ①V419

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第121883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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张18¼ 字数413千字

2012年7月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价56.00元

(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

前 言

在 20 世纪的最后 20 年,世界各国已经成功地利用信息技术、遥感探测技术、可视化技术、系统仿真技术来研究陆地、海洋和空中环境,帮助人类认识、分析和利用环境,从而为人类的活动提供环境保障。随着人类活动范围的扩大与航天活动的日益增强,空间环境及其研究也越来越被人们所重视,正日益成为人类探索空间科学技术发展的新焦点。开展空间环境及其对航天任务影响效应的研究,从中掌握和发现其科学规律与变化机理,可以为人类进入和开发空间,进而有效利用空间奠定坚实的基础。

本书主要分为四大部分,第 1 部分是空间环境及其建模仿真的概况,包括第 1 章;第 2 部分是空间环境建模仿真的理论与数据基础,包括第 2、3 章;第 3 部分是空间环境数值建模与仿真,包括第 4~7 章;第 4 部分是空间环境三维建模与仿真,包括第 8~11 章;第 5 部分是基于 HLA 的分布式空间环境仿真应用,包括第 12 章。

第 1 章主要介绍空间环境、航天可视化仿真等概念以及发展趋势,界定了书中研究问题的主要对象;第 2 章介绍空间环境探测的主要方法手段,包括高层大气、电离层等离子体、地球磁场、地球辐射带和空间碎片探测的主要要素,明确了空间环境数据的实测来源方式;第 3 章介绍空间环境仿真的相关理论基础,包括基于“数字地球”原理设计的空间环境信息系统 SpenIS 理论框架、多维动态空间环境模型、时空语义和空间环境数据库,该部分为进行空间环境数据组织、仿真建模和系统设计提供了理论基础;第 4 章介绍空间自然环境模型及数值计算,包括太阳与恒星位置计算、各种空间自然环境数值模型,为开展可视化仿真奠定了自然环境数据基础;第 5 章介绍空间碎片环境模型与数值计算,包括空间碎片短期工程模型、空间碎片长期演化模型和空间碎片影响仿真模型;第 6 章介绍航天器轨道及其数值计算,包括航天器轨道、航天器位置描述模型、航天器轨道计算模型,为仿真提供了主要的空间目标轨道计算支持;第 7 章介绍空间环境效应数值仿真,主要包括空间环境效应研究、航天器轨道大气阻力摄动数值仿真、轨道寿命估计、空间辐射累计效应仿真、电离层等离子体对航天器信号传输衰减分析和航天器空间安全分析;第 8 章介绍空间环境数据场的几何建模,主要包括空间环境数据场几何建模理论和几何建模方法;第 9 章介绍空间环境三维可视化引擎,包括常见的可视化引擎介绍、空间环境三维可视化引擎总体设计、目标可见性判断与剔除、脚本驱动技术和场景浏览与控制技术;第 10 章介绍空间环境可视化仿真,包括空间环境信息动态可视化的理论、复杂数据场可视化流程、空间环境数据预处理方法、三维数据场的直接体绘制、三维数据场的面绘制、三维星空可视化仿真、地磁场 MHD 可视化仿真、地球辐射带可视化仿真、特殊效果绘制和空间环境在空

间链路上的可视化仿真等;第 11 章介绍空间目标及轨道的可视化仿真,包括地球可视化、地球的视运动、航天器三维建模与可视化、航天器在轨飞行显示、航天器运行控制和航天器视点控制等;第 12 章介绍基于 HLA 的空间环境仿真,包括 HLA 及仿真联邦、仿真联邦成员设计、“空间环境仿真”联邦成员设计和“空间环境可视化”联邦成员设计等。附录给出了相关网址,以及空间环境模式接口定义、空间环境数据库表结构设计和空间环境仿真成果。

本书是作者在总结“十一五”期间承担多项国家 863、国防预研、国防重点实验室探索项目研究成果、从事空间信息处理与可视化仿真教学等的基础上提炼而成的学术研究成果,书中大部分内容是作者工作实践中的创新性研究成果。项目的研究得到国家 863 - 703 专家组的有力支持,得到中国电子科技集团二十二所副所长吴健研究员、副总师李清亮研究员,北京“电波传播特性与模化”国防重点实验室索玉成研究员、许正文博士,中科院空间科学与应用研究中心龚建村研究员、韩建伟研究员、刘文利工程师,北京大学地球物理系肖佐教授,哈尔滨工业大学崔平远教授,国防科技大学黄健博士、郝建国博士,武汉大学赵正予教授、倪彬彬博士,北京航空航天大学韩潮教授等有关专家的指导和帮助。在项目的研究过程中,还得到了信息工程大学课题组成员姜挺教授、龚志辉教授、马东洋副教授、江刚武副教授、谢金华硕士、陶冶宇硕士、罗依萍硕士、翁慧慧硕士等的大力支持,本书中很多内容也是大家共同努力研究的成果。本书编撰过程中,得到了装备指挥技术学院冯书兴教授、蔡远文主任、白杨政委、廖学军教授、秦大国教授、曹裕华高工、李智教授、熊伟教授、陈勇教授、张海波副教授、黄文清副教授、汪荣峰副教授等的大力帮助。本书参考或直接引用了国内外专家学者的有关文献,在此,作者一并致以衷心感谢。

本书的内容尚处在研究和探索中,由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者
2012 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 空间及空间环境	2
1.2.1 高层中性大气	3
1.2.2 电离层等离子体	4
1.2.3 地球磁场	5
1.2.4 地球辐射带	6
1.2.5 空间碎片与微流星体	7
1.2.6 空间环境研究现状与趋势	8
1.3 分布式交互仿真	9
1.3.1 分布式交互仿真发展历程	10
1.3.2 分布式交互仿真发展趋势	11
1.4 航天可视化仿真	12
1.4.1 科学计算可视化	12
1.4.2 可视化仿真技术	13
1.4.3 航天可视化仿真技术	13
1.5 空间环境可视化仿真	16
第2章 空间环境探测	19
2.1 引言	19
2.2 空间环境探测	20
2.3 高层中性大气探测	20
2.4 电离层等离子体探测	22
2.5 地磁场探测	23
2.6 地球辐射带探测	24
2.7 空间碎片和微流星体探测	25
2.7.1 空间碎片的分类	26
2.7.2 空间碎片的地基观测	26
2.7.3 空间碎片的天基观测	27
第3章 空间环境仿真相关理论基础	29
3.1 引言	29

3.2	数字地球与数字空间	29
3.2.1	数字地球	29
3.2.2	数字空间	31
3.3	空间环境信息系统	33
3.3.1	相关研究回顾	33
3.3.2	多维动态空间环境模型	36
3.3.3	空间环境信息系统的概念	38
3.3.4	空间环境信息系统的研究对象	39
3.3.5	基于 GIS 的空间环境信息系统分析	41
3.4	空间环境信息的时空语义	43
3.4.1	空间坐标系	43
3.4.2	时间基准系统	46
3.5	空间环境数据库	48
3.5.1	静态空间自然环境数据库	48
3.5.2	日地天体活动指数数据库	49
3.5.3	空间目标数据库	51
3.5.4	空间自然环境及其效应模型数据库	52
第 4 章	空间自然环境模型与数值计算	53
4.1	太阳位置的解析法描述	53
4.1.1	太阳在惯性空间的坐标计算模型	53
4.1.2	太阳黄经计算模型	54
4.2	恒星位置与绝对星等的计算	55
4.3	空间自然环境分布模式	56
4.4	高层中性大气数值计算	57
4.4.1	MSIS2000 模式	57
4.4.2	MET 模式	58
4.4.3	HWM93 模式	59
4.4.4	CIRA86 模式	59
4.5	电离层等离子体数值计算	60
4.5.1	IRI2007 模式	60
4.5.2	Chiu 模式	60
4.6	地球基本磁场数值计算	60
4.6.1	IGRF 模式	60
4.6.2	IGRF2010 计算模式	60
4.7	地球辐射带数值计算	62
4.7.1	AE8 和 AP8 模式	62
4.7.2	地球辐射带计算模型	62
4.7.3	由经纬度计算磁坐标	63

4.8	基于 UML 和 COM 设计空间自然环境计算模型	64
4.8.1	利用面向对象技术重新设计与封装计算模式	65
4.8.2	利用 COM 组件技术设计工具包接口和属性	66
4.8.3	计算模式选择中的智能化处理	67
4.8.4	利用外部数据文件和组件接口实现动态数据更新与扩展	68
第 5 章	空间碎片环境模型与数值计算	69
5.1	引言	69
5.2	空间碎片模型	70
5.3	NASA89/91 模型	72
5.4	ORDEM 系列模型	73
5.4.1	ORDEM96 模型	73
5.4.2	ORDEM2000 模型	74
5.4.3	ORDEM2008 模型	81
5.5	MASTER 模型	83
5.6	SDPA 模型	85
5.7	长期演化模型	86
5.7.1	EVOLVE 模型	86
5.7.2	CHAIN/CHAINED 模型	87
5.8	空间碎片模型数值计算接口设计	87
5.8.1	现有模型接口参数比较	87
5.8.2	通用型参数方案	88
5.9	空间碎片影响仿真模型	89
5.9.1	大空间碎片模型输入/输出	89
5.9.2	中空间碎片模型输入/输出	90
5.9.3	空间碎片模型输入/输出	91
第 6 章	航天器轨道数值计算	92
6.1	航天器轨道	92
6.1.1	地球低轨道	93
6.1.2	地球中轨道	94
6.1.3	地球高轨道	94
6.1.4	地球同步轨道	95
6.2	航天器位置描述模型	95
6.2.1	轨道瞬时状态描述法	95
6.2.2	轨道长期状态描述法	97
6.2.3	航天器描述模型间的相互转换	98
6.3	航天器轨道计算模型	102
6.3.1	解析法轨道计算模型	102

6.3.2	标称 Kepler 轨道计算模型	102
6.3.3	考虑 J2/J4 项的轨道计算模型	103
6.3.4	NORAD 两行轨道要素轨道计算模型	108
6.3.5	数值法轨道计算模型	114
第 7 章	空间环境效应与数值仿真	117
7.1	引言	117
7.2	空间环境效应	118
7.2.1	空间环境对航天器的影响	118
7.2.2	不同轨道航天器受空间环境的影响	120
7.2.3	典型的空间环境效应	121
7.3	航天器轨道的气动力数值仿真	124
7.3.1	中高层大气与太阳活动有关的变化	125
7.3.2	航天器轨道大气阻力摄动模型	126
7.3.3	仿真实验与分析	128
7.4	航天器空间辐射累积效应仿真	131
7.4.1	航天器轨道积分通量或注量	131
7.4.2	仿真实验与分析	131
7.5	电离层等离子体对航天器信号传输衰减的分析	133
7.6	航天器空间安全分析	134
7.6.1	空间目标接近分析	134
7.6.2	空间目标碰撞分析	136
第 8 章	空间环境数据场的几何建模	140
8.1	引言	140
8.2	空间环境数据场几何建模理论	140
8.3	空间环境数据场的几何建模方法	142
8.3.1	基于散乱数据的几何建模	142
8.3.2	基于 CRG 数据的几何建模	147
8.3.3	散乱数据模型到 CRG 数据模型的变换	150
第 9 章	空间环境三维可视化引擎	153
9.1	引言	153
9.2	常用的可视化引擎	153
9.3	总体设计	155
9.3.1	三维引擎的复杂性分析	155
9.3.2	总体框架设计	155
9.3.3	功能模块分析	156
9.4	三维图形处理技术	157

9.4.1	基于可编程图形硬件的绘制流程	157
9.4.2	坐标空间	158
9.4.3	三维空间几何操作	160
9.5	目标可见性判断与剔除	162
9.5.1	筛选或背面剔除	162
9.5.2	基于物体外包围球视见体裁减	163
9.5.3	考虑地球遮挡的物体可见性判断	164
9.5.4	基于屏幕空间的物体可见性判断	165
9.6	脚本驱动技术	166
9.6.1	脚本驱动命令	166
9.6.2	脚本描述方法	167
9.6.3	脚本执行	167
9.7	场景浏览与控制	168
第 10 章	空间环境可视化仿真	170
10.1	引言	170
10.2	空间环境信息动态可视化	170
10.2.1	空间环境数据场可视化方法	170
10.2.2	数据场可视化参考模型	172
10.2.3	空间环境数据场可视化流程	174
10.3	空间环境数据场的数据预处理	176
10.4	空间环境数据场的直接体绘制	177
10.4.1	体光照模型	177
10.4.2	体绘制算法	177
10.4.3	仿真实例	178
10.5	空间环境数据场的面绘制	179
10.5.1	基于空间剖面的面绘制	179
10.5.2	基于空间分层的表面绘制	181
10.5.3	仿真实例	186
10.6	三维星空可视化仿真	187
10.6.1	相关研究回顾与改进方法	187
10.6.2	空间八叉树恒星数据组织	188
10.6.3	恒星可见性判断	189
10.6.4	仿真实例与分析	189
10.7	地磁场及磁层的 MHD 可视化仿真	190
10.7.1	磁层与磁层磁场的数学模型	190
10.7.2	磁流体动力学建模	192
10.7.3	地磁场的可视化表达	192
10.7.4	MHD 模型的可视化仿真实验	195

10.8	地球辐射带可视化仿真	195
10.8.1	地球辐射带积分通量的可视化	195
10.8.2	结合 Billboarding 技术的纹理映射	196
10.9	特殊效果绘制	198
10.9.1	大气效果绘制	198
10.9.2	粒子系统模拟	201
10.10	空间环境在空间链路上的可视化	202
10.10.1	仿真流程	202
10.10.2	仿真实例	204
第 11 章	空间目标及其轨道可视化仿真	205
11.1	引言	205
11.2	地球实体可视化	206
11.2.1	地球运行可视化的数学模型	206
11.2.2	地球三维建模	207
11.3	地球的视运动控制	211
11.3.1	空间视点坐标系	211
11.3.2	视点坐标与空间坐标的变换	211
11.3.3	椭球体的旋转	213
11.3.4	椭球体的平移	214
11.3.5	椭球体的缩放	216
11.4	航天器三维建模与可视化	217
11.4.1	面向对象的航天器三维建模	217
11.4.2	复杂形状航天器的三维建模	230
11.4.3	空间目标纹理数据的生成	230
11.5	航天器在轨飞行显示	231
11.6	航天器运行控制	232
11.7	航天器的视点控制	233
11.7.1	基本原理	233
11.7.2	视点追踪	234
11.7.3	基于球形线性插值的视点自动漫游技术	235
第 12 章	基于 HLA 的空间环境仿真	236
12.1	引言	236
12.2	高层体系结构	236
12.2.1	高层体系结构的组成	237
12.2.2	高层体系结构的基本思想与主要特点	238
12.2.3	联邦运行支撑环境	239

12.2.4	HLA – RTI 的配置文件	240
12.2.5	联邦对象模型	240
12.3	“空间环境仿真平台”联邦设计	242
12.3.1	定义联邦目标	242
12.3.2	开发联邦概念模型	243
12.3.3	设计联邦	246
12.3.4	开发联邦	247
12.3.5	开发联邦对象模型	248
12.4	仿真联邦成员设计	249
12.4.1	联邦成员的仿真 Agent	249
12.4.2	联邦成员开发的一般流程	249
12.4.3	联邦成员运行的程序流程	250
12.5	“空间环境仿真”联邦成员设计	252
12.5.1	成员设计	252
12.5.2	仿真对象模型设计	253
12.5.3	利用 KD – FedWizard 工具开发联邦成员	260
12.6	“空间环境可视化”联邦成员设计	261
12.6.1	联邦对象模型设计	261
12.6.2	联邦成员开发	262
12.6.3	联邦成员执行流程	262
附录 A	空间环境模式接口定义	264
附录 B	空间环境数据库中的数据表结构设计	270
附录 C	空间环境仿真成果	274
参考文献		277

第1章 绪论

1.1 引言

随着科学技术的发展,人类不断扩大自身的活动空间,从陆地走向海洋、天空。1957年世界首颗人造卫星上天,标志着人类开始进入了空间时代,1981年在国际宇航联合会第32届大会上,空间被称为与陆地、海洋和大气层并列的第四环境。

通常,人们认为空间环境近似于真空环境,但实际上空间环境包含了很多对航天器造成不利影响的因素,如光子、离子辐射、流星体、分子或离子与原子的相互作用、变化的热环境和轨道上的碎片等,它们极有可能降低航天器的性能,甚至发生致命性故障。50多年来的航天实践证明,空间环境是诱发航天器异常和故障的主要原因之一,在空间运行的航天器首先受到空间环境的威胁。任何一个航天任务,从可行性分析开始到最终完成任务的各个阶段都离不开空间环境。正是由于空间环境的复杂多变,人们就必须在航天任务之前进行各种空间环境试验,但是由于空间环境的复杂性和敏感性造成了试验与验证的困难,而通过仿真模拟手段将这些空间环境以及空间环境效应在实验环境内展现,推演其物理机理,将室外试验和室内仿真相结合,既可减少试验成本,又能加快装备化研制过程。

离散化技术和建模描述方法是开展空间环境仿真实理论建模和代码开发的关键技术。倘若模型不对,仿真就没有意义。为了提高仿真应用的互操作性、可重用性、仿真规模的可伸缩性和性能等,美国国防部提出了基于高层体系结构(High Level Architecture, HLA)的分布式结构。HLA是用于产生计算机仿真系统的通用技术框架,它提高了仿真应用的互操作性和仿真资源的可重用性。它将多个小的仿真系统联合起来构成一个大型复杂仿真系统,利于完成已有仿真系统的扩展。

随着科学技术的进步,特别是探测能力、计算机水平和通信能力的飞速提高和发展,人类积累了大量的空间科学数据,而这些枯燥的数据,以及根据这些数据所绘制的静态图形和曲线,并不能让人们直观地了解空间环境,这无形中阻碍了对空间环境规律的认识。而科学计算可视化和可视化仿真的兴起,无疑是改变这一状况的契机。可视化仿真技术提供了直观地处理研究结果的技术方法,成为空间科学研究过程中的重要组成部分。它可以利用计算机实现多维空间和时间数据的视觉化,使研究者既能够在三维环境中交互操作控制研究对象,更可以在仿真模拟等科学计算过程中实时得到正在处理的动态过程的反馈。

先进、快速和逼真的空间环境建模与可视化技术将使大量基础测量数据及各种模式输出结果迅速转变为科研人员和各类实际用户迫切需要的产品,使这些科学数据发挥最大的效益,创造出应有的科学和使用价值。空间环境科学数据的处理、分析与可视化已成为当前空间环境领域中科学研究和技术应用的重要内容。

1.2 空间及空间环境

科学家们从来就没有间断过对空间本质的思索:牛顿认为,空间是一个内在虚无的客观实体,而爱因斯坦则证明物质的存在确实包含着空间。在《辞海》中空间的定义是“包含所有物质的三维空间的无限延伸”。“空间”这个概念包含的范围很广,每种事物及事态都存在于一定意义上的空间中。从航天学和空间科学的角度来讲,空间是人类能观测到的整个宇宙空间。通常,将地球大气层以外的领域称为宇宙空间,也称为外层空间或太空。而将太阳系以内的宇宙空间分为行星空间和行星际空间。

在航天技术中,行星空间常指行星引力所作用的范围。根据行星空间的概念,地球空间是以地球为中心,半径达 $9.3 \times 10^5 \text{ km}$ (约 150 个地球半径) 的球体。显然,在地球空间以内存在着月球轨道,月球到地球的距离为 $3.84 \times 10^5 \text{ km}$,月球相对于地球有自身的作用空间,其半径为 $6.6 \times 10^4 \text{ km}$ 。一般将距地球等于或大于地月距离的空间称为深空,将地球静止轨道高度 35786 km 及其以下空间称为近地空间,通常情况下将近地空间的最低高度取为距地面 100 km。关于近地空间,不同的人会有略微不同的定义,如有人认为它是距地面 90 km ~ $6.5 \times 10^4 \text{ km}$ (约 10 个地球半径) 的地球空间。实际上,从航天活动来看,近地空间可以是航天器环绕地球做轨道运动的整个空间范围。在本书中,将所研究的“空间”限定于航天器运行的近地空间。有了“空间”这个概念和具体的空间限定范围,能进一步说明空间环境的概念。

空间环境则是航天器在空间飞行时所处的环境(包括自然环境和人为环境)。从技术系统的角度讲,空间环境研究主要关心近地空间区域中对技术系统有影响的环境要素,包括由于太阳的辐射和爆发而引起的地球空间(弓形激波、地球磁层、电离层、热层、中层、对流层),高能粒子、电场电流及其电磁特性剧烈变化,以及人类航天活动留下的空间碎片等参数。具体来讲,空间环境包括大气环境、空间等离子体环境、高能带电粒子辐射环境、空间磁场环境、空间引力场环境、空间光辐射环境、空间碎片及微流星体环境、空间电波环境等,这些具体的物质形态构成了空间环境。

狭义地讲,未来几十年,在空间环境中主要关注同步轨道以下的航天器的飞行环境和这些航天器之间,以及它们对地球的信息链路的空间环境要素。这些空间环境要素主要有高层中性大气、电离层等离子体、地球基本磁场、高能带电粒子(太阳宇宙射线、银河宇宙射线、地球辐射带)、空间碎片与流星体等,由这些空间环境要素所组成的空间环境如图 1-1 所示。

这些空间环境区域中并不是完全的“真空”,而是“充满”着大量的等离子体、高能粒子、微流星体、尘埃、空间碎片、中性原子和电磁射线等物质。当航天器运行在这样的空间环境中时,这些物质会对其有一定的影响作用,其作用形式及效应与这些物质的分布状态及运动状态有极大的关系。在近地空间环境范围内,影响航天器活动的主要空间环境要素包括高层中性大气、电离层等离子体、地球磁场、地球辐射带以及空间碎片等^①。

^① 书中不再具体区分空间环境与空间环境要素,统一用空间环境来表述。书中所述“空间环境”指近地空间环境。

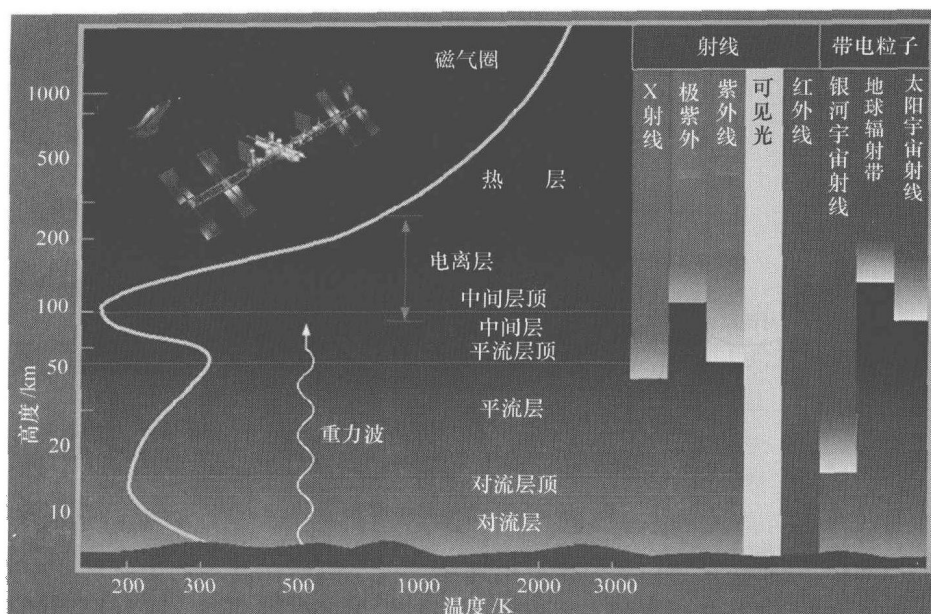


图 1-1 空间环境结构示意图

空间环境的状态并不是平静的,而是各种形态、各种时间尺度的扰动。空间环境扰动的源头是太阳,太阳的各种活动直接影响行星际空间和地球空间的环境状态,各种太阳爆发产生的高能辐射和粒子流在地球附近引起多种地球物理效应。空间环境是太阳风和行星际磁场以及地磁场和地球大气之间相互作用而形成的一种特定地球物理环境,它是由中高层大气、电离层、磁层和行星际空间等几个相耦合的部分组成的复杂动力学系统。

1.2.1 高层中性大气

地球中性大气的气体主要集中在 $0 \sim 50\text{km}$ 的高度范围内,约占地球大气总量的 99.9% ,而在高度大于 100km 的空间仅占 0.0001% 左右。其中高度在 90km 以上的大气称为中高层大气。

根据大气的密度、温度和热力学特性,地球大气由地面向上大致可分为对流层($0 \sim 20\text{km}$)、平流层($20\text{km} \sim 50\text{km}$)、中间层($50\text{km} \sim 85\text{km}$)、热层($85\text{km} \sim 300\text{km}$)和外逸层($300\text{km} \sim 500\text{km}$),如图 1-2 所示。

(1) 对流层:从地面向上至温度出现第一次极小值所在高度的大气层。该层大气处于与地球表面辐射、对流平衡状态,湍流是它主要的能量耗散过程。对流层内温度随高度的增加而较均匀地下降,温度递减率大约为 6.5K/km 。对流层顶的高度从极地至赤道是倾斜的,极地为 $6\text{km} \sim 8\text{km}$,赤道地区为 $16\text{km} \sim 18\text{km}$,极地和赤道对流层顶的大气温度可分别下降到 220K 和 190K 。

(2) 平流层:从对流层顶以上至温度出现极大值所在高度的大气层。地球大气中的臭氧主要集中平流层内,臭氧吸收太阳紫外辐射,平流层内温度随高度的增加而升高,平流层顶的高度约在 50km 处,其平均温度约为 273K 。

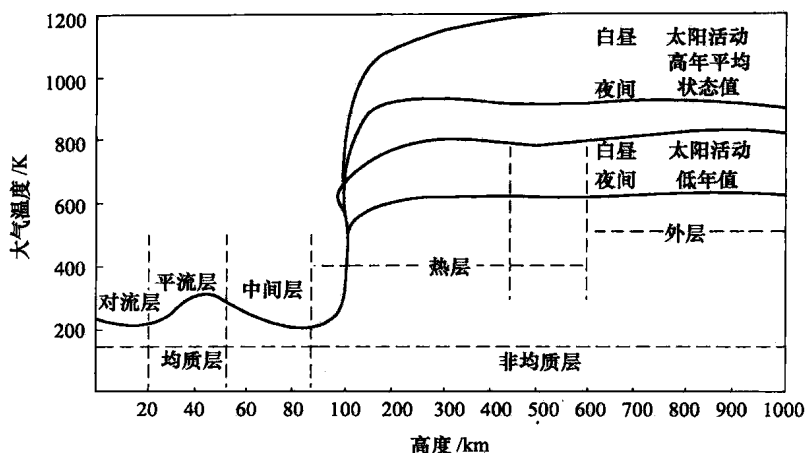


图 1-2 大气结构示意图

(3) 中间层:从平流层顶以上至温度出现第二极小值所在高度的大气层。中间层内温度随高度升高而下降,其降温的主要机制是 CO_2 发射的红外辐射。中间层顶的高度约在 85km 处,其平均温度约为 190K,高纬地区中间层温度有强烈的季节变化,夏季可降至 160K。

(4) 热层:从中间层顶以上大气温度重新急剧上升,直至包含一部分温度不再随高度变化的高度区间的大气层。在 90km ~ 200km 高度,由于大气吸收太阳辐射总波长小于 200nm 的远紫外辐射,引起大气分子的光化、电离,并伴随着放热过程,使得大气温度随高度有陡峭地增高。

(5) 外层:热层顶以上的等温大气层。它的低层主要是原子氧,再向上主要是氮,在更高的高度上主要是原子氢。太阳活动和磁暴对外层大气也有较大的影响。

根据大气成分的均一性质划分,地球大气由地面向上大致可分为均质层和非均质层。

(1) 均质层:从地面至约 90km 高度的大气层,基本上包含对流层、平流层和中间层。均质层大气通过湍流使大气成分均匀混合,大气成分基本均一。均质层遵从流体静压方程和理想气体状态方程。

(2) 非均质层:均质层顶之上,大气成分随高度有明显变化的大气层,基本上包含热层和外层大气。105km 以下的非均质层大气湍流混合起主要作用,这部分大气仍满足流体静压方程和理想气体状态方程。105km 以上的大气在重力场作用下,分子扩散作用超过湍流混合,大气处于扩散平衡状态,每种大气成分的分布遵循各自的扩散方程,大气压力、密度随高度增加以指数形式下降。非均质层下部的主要成分是氮气、原子氧和氧气,其上部的主要成分为原子氧、氮和原子氢。

1.2.2 电离层等离子体

航天环境中能量低于 100keV 的带电粒子构成空间等离子体。电离层是空间环境的一个重要等离子体层区。它是由太阳高能电磁辐射、宇宙线和沉降粒子作用于高层大气,使之电离而生成的由电子、离子和中性粒子构成的能量很低的准中性等离子体区域。它处在 50km 至几千千米高度间,温度 180K ~ 3000K,其带电粒子(电子和离子)运动受地磁

场制约,因此又称电离层介质为磁离子介质。在一般情况下,认为电离层具有球面分层结构,最主要的是随着高度和纬度的变化而变化。电离层按照电子密度随高度的变化又分为 D 层、E 层和 F 层,如图 1-3 所示。

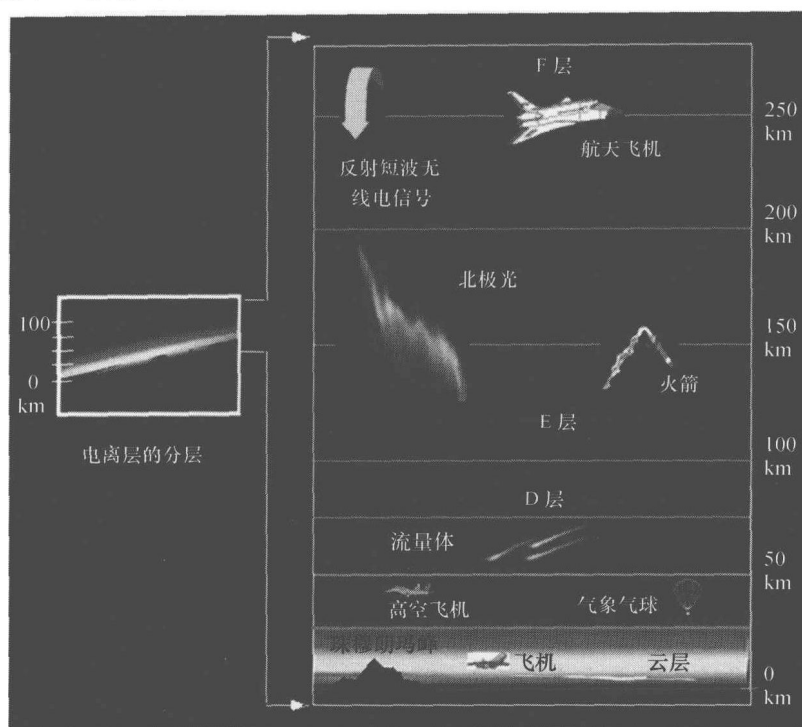


图 1-3 电离层分层示意图

D 层指地面上空 50km ~ 90km 的高度区;E 层指地面上空 90km ~ 130km 的高度区;F 层指从 130km 直至几千千米的广大高度区。在电离层高度区还存在着低能沉降等离子体,它们是引起航天器高充电的源。电离层参量是时间(时、日、季节)、空间(经度、纬度和高度)和太阳活动的复杂函数。所有高度上的电子密度都随地方时、季节和太阳爆发有着巨大的变化,在地理位置上随纬度有很复杂的结构。

1.2.3 地球磁场

近地空间磁场大致像一个均匀磁化球的磁场,它延伸到地球周围很远的空间。在太阳风的作用下,地球磁场位形改变,向阳面被压缩,背阳面向后伸长到很远的地方,如图 1-4 所示。地磁场存在的空间就是磁层。磁层位于行星际磁场的包围中,并受其控制。磁场的变化灵敏地反映空间环境的变化,它是空间环境状态的重要指标。

地球磁场与地球引力场一样,是一个地球物理场,它是由内源场与外源场(变化磁场)两部分组成的。内源场来源于地球内部,它包括基本磁场和外源场变化时在地壳内感应产生的磁场。基本磁场是地球固有的稳定性强的磁场,是地磁场的主要部分,约占 99%。基本磁场十分稳定,只有缓慢的长期变化。外源场起源于地球附近的电流体系,包括电离层电流、环电流、场向电流、磁层顶电流及磁层内其他电流的磁场。它的变化则与