

内 容 简 介

本书概括地介绍了宇航学的主要内容,对宇航学中的各种物理现象进行了分析,重点论述宇航学的物理概念、理论和研究方法。全书共10章,包括绪论、宇航运动学基础、宇航动力学基础、推进动力学基础、空间热物理学基础、空间电磁学基础、空间电子学基础、制导与控制原理、空间遥感物理基础以及空间高能物理基础等。

本书是广大科技人员了解宇航学的人门向导,可作为从事宇航科技方面的大学生、研究生的教材或参考书,对有关科研、工程技术人员、管理人员和从事空间科学、卫星广播、通信、气象、环境、遥感等的科技人员,也是有益的参考书,还可供物理专业人员阅读。

宇 航 物 理

贾乃华 编著

责任编辑 张英娥

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

1990年12月第1次印刷 开本:787×1092 1/16

印张:34

字数:781 000

ISBN 7-03-001793-5/V·3

定价:29.00元

目 录

序言

编著者的话

第一章 绪论	1
1-1 宇航物理学的任务和特点	1
1-2 宇航的空间环境	1
1-2-1 地球大气	1
1-2-2 太阳的电磁辐射	7
1-2-3 地球磁场	10
1-2-4 粒子辐射	12
1-2-5 微流星	15
1-2-6 宇宙空间的无线电噪声	17
1-2-7 空间真空	19
1-2-8 空间失重	20
1-2-9 空间环境模拟	26
第二章 宇航运动学基础	29
2-1 力学基本定理	29
2-1-1 牛顿定律	29
2-1-2 万有引力定律	30
2-1-3 开普勒行星运动三定律	31
2-1-4 引力势能	31
2-1-5 第一、二、三宇宙速度	32
2-2 轨道参数	35
2-3 中心引力场内的运动	37
2-4 轨道方程	39
2-5 宇航器空间位置的确定	42
2-6 宇航器的飞行速度	43
2-7 椭圆轨道上卫星的周期	45
2-8 同步轨道	46
2-9 空间站	49
2-10 行星际航行	51
2-11 恒星际航行	56
2-11-1 恒星际运动方程	56
2-11-2 飞向恒星际	59
第三章 宇航动力学基础	62
3-1 作用在宇航器上的力与势能	62

3-2 n 体问题	64
3-2-1 n 体运动方程	64
3-2-2 n 体问题的十个积分	67
3-2-3 三体问题	69
3-3 拉格朗日方程	69
3-3-1 达朗伯原理	70
3-3-2 广义坐标	71
3-3-3 拉格朗日方程	71
3-3-4 哈密顿方程	74
3-4 反作用飞行器的运动方程	75
3-4-1 齐奥科夫斯基公式	76
3-4-2 质量可变系统的动力学概念	76
3-4-3 反作用飞行器的运动方程	77
3-5 轨道摄动	79
3-5-1 非引力摄动	79
3-5-2 三体相互作用的摄动	81
3-5-3 质量分布非球性摄动	81
3-5-4 人造卫星的寿命	82
3-6 轨道调整与过渡	84
3-6-1 单冲量调整	84
3-6-2 轨道过渡	85
3-6-3 轨道平面的过渡	86
3-6-4 轨道机动	87
3-7 轨道交会	88
3-8 飞向月球的动力学问题	89
3-9 飞行器的返回再入	91
3-10 姿态动力学基础	93
3-10-1 无力矩运动	94
3-10-2 力矩响应	95
3-10-3 旋转动能	96
3-10-4 姿态扰动力矩	96
3-10-5 姿态的动力学方程	99
3-10-6 挠性卫星的动力学问题	100
第四章 推进动力学基础	102
4-1 中国古代火箭	102
4-2 火箭与宇航	104
4-3 反作用运动的基本原理	105
4-3-1 变质量物体运动方程	105
4-3-2 火箭发动机的推力	107
4-3-3 比推力	107
4-3-4 火箭的理想速度	108

4-3-5	火箭的飞行高度	109
4-3-6	多级火箭	110
4-4	液体火箭发动机原理	112
4-4-1	推进剂的焓	112
4-4-2	喷气速度	114
4-4-3	燃气压力	116
4-4-4	火箭发动机的喷管	117
4-4-5	推力系数	119
4-4-6	低重力液体推进剂的晃动	121
4-5	固体火箭发动机的基本原理	123
4-5-1	固体燃料火箭发动机的主要特点	124
4-5-2	固体推进剂的点火	125
4-5-3	固体推进剂燃烧时的物理化学变化	125
4-5-4	燃速	127
4-5-5	固体火药的燃烧定律	128
4-5-6	固体推进剂的物理参数	129
4-5-7	工作压力	131
4-5-8	固体推进剂的比冲	132
4-5-9	燃烧室的一维两相流	133
4-5-10	运载火箭捆绑助推器	135
4-6	电火箭	137
4-6-1	电火箭的三种类型	138
4-6-2	电火箭的排气速度	140
4-6-3	等加速度飞行	143
4-6-4	电火箭发动机的推进效率	144
4-6-5	电火箭的推力	145
4-7	核能火箭	146
4-7-1	原子能火箭	146
4-7-2	氘火箭	146
4-8	其他类型的推进系统	147
4-8-1	光子火箭	147
4-8-2	太阳帆	148
4-8-3	场共振推进	148
4-9	几种推进系统的分析比较	149
第五章	空间热物理学基础	153
5-1	热传导	153
5-1-1	热导的基本原理	153
5-1-2	热导方程式	155
5-1-3	热导计算	157
5-1-4	高温喉衬的热导	159
5-1-5	低温热导	160
5-1-6	热管	161

5-2 热辐射	163
5-2-1 四次方定律	164
5-2-2 普朗克定律	164
5-2-3 辐射亮度	164
5-2-4 有效辐射和净辐射热流密度	166
5-2-5 角系数	166
5-2-6 空间两物体间的辐射换热	167
5-2-7 航天器的空间外热流	168
5-2-8 热辐射防护	169
5-2-9 周期性热源变化的辐射-传导换热	170
5-3 对流热交换	171
5-4 稀薄气体换热	172
5-5 再入气动加热	174
5-5-1 边界层的温度	174
5-5-2 再入气动的加热量	174
5-6 热防护	175
5-6-1 辐射防热系统	175
5-6-2 烧蚀防热	176
5-6-3 隔热材料	177
5-7 热应力-应变	178
5-7-1 热应力平衡方程式	179
5-7-2 热应力	179
5-7-3 热应变位移	180
5-7-4 热断裂破坏	181
第六章 空间电磁学基础	183
6-1 电场、磁场中的带电粒子	184
6-1-1 带电粒子在静电场中的运动	184
6-1-2 带电粒子在均匀磁场中的运动	185
6-1-3 带电粒子在均匀电场和磁场中的运动	186
6-2 磁流体力学基础	188
6-2-1 流体力学方程	188
6-2-2 麦克斯韦方程	188
6-2-3 磁流体力学方程	189
6-2-4 均匀磁场中的磁流体	190
6-3 空间的地球磁场	191
6-3-1 地球磁场的球谐分析	192
6-3-2 地球上空的磁场	192
6-3-3 地磁场的日食效应	194
6-4 电离层的物理特性	197
6-4-1 电子的生消过程	197
6-4-2 电离层中的地球磁场	198
6-4-3 电离层中电子浓度与黑子的关系	198

6-4-4	电离层中电子浓度与太阳天顶角的关系	199
6-4-5	电离层总电子含量	199
6-4-6	电离层与空间飞行器的相互作用	199
6-5	空间等离子体	201
6-5-1	等离子体的物理特性	201
6-5-2	等离子体温度与密度的探测	204
6-5-3	再入等离子鞘	206
6-6	磁层	208
6-6-1	磁层边界	208
6-6-2	磁层顶物理模型	211
6-6-3	磁层的物理方程	212
6-6-4	磁层顶对磁层磁场的影响	213
6-6-5	磁层与电离层耦合	214
6-6-6	太阳风和磁层能量耦合	215
6-6-7	磁层亚暴	217
6-6-8	近地空间的电状态	218
6-6-9	空间飞行器的带电及其控制	221
6-7	太阳磁场	223
6-7-1	太阳风	223
6-7-2	太阳黑子磁场的物理特征	224
6-7-3	太阳耀斑冲击波及其对行星磁场的作用	226
6-8	太阳系磁场	227
6-8-1	行星际空间磁场	227
6-8-2	行星磁场	228
6-9	空间的电磁测量	229
6-9-1	磁场的测量	229
6-9-2	电场的测量	231
6-9-3	卫星的磁矩测量	232
第七章	空间电子学基础	236
7-1	信息	236
7-1-1	信息的概念	236
7-1-2	信息系统	236
7-1-3	信息的量度	237
7-1-4	信号	239
7-1-5	传感器	247
7-2	电磁波传播	254
7-2-1	电磁波传播	254
7-2-2	无线电波的传播方式	260
7-2-3	等离子体对电磁波的衰减	263
7-3	天线	264
7-3-1	天线的基本辐射单元	264
7-3-2	天线波束的电子控制与扫描	265

7-3-3	微波天线聚焦特性	266
7-3-4	振子天线	267
7-3-5	消旋天线	269
7-3-6	表面波天线	269
7-3-7	多波束卫星天线	270
7-3-8	微带天线	274
7-3-9	天线罩对电磁波的折射	275
7-3-10	卫星天线波束的地面覆盖	276
7-3-11	地面站天线	278
7-4	空间通信	280
7-4-1	空间通信系统的功能	281
7-4-2	空间通信的分类	282
7-4-3	空间通信的基本参数	283
7-4-4	空间通信的基本原理	287
7-4-5	行波管及其功率放大器	288
7-4-6	低噪声参量放大器	289
7-4-7	卫星转发器	292
7-4-8	混频器	293
7-4-9	调制器	294
7-4-10	卫星通信的多址连接	298
7-5	激光	301
7-5-1	激光的产生	301
7-5-2	激光的特性	303
7-5-3	激光的空间应用	303
7-6	超导电子学基础	305
7-6-1	约瑟夫森效应	305
7-6-2	约氏效应器件的应用	308
第八章	制导与控制的基本原理	311
8-1	导航	311
8-1-1	卫星导航	311
8-1-2	惯性导航	313
8-1-3	回转仪	315
8-1-4	加速度表	321
8-1-5	天文导航	322
8-1-6	天文-惯性组合式导航	323
8-2	弹道控制	326
8-3	轨道控制	329
8-3-1	轨道捕获	330
8-3-2	轨道保持	332
8-3-3	轨道转移的控制	334
8-3-4	地形辅助制导	334
8-4	姿态控制	335

8-4-1	飞行器的姿态确定	335
8-4-2	姿态稳定	343
8-4-3	姿态机动控制	347
8-4-4	姿态捕获	353
8-4-5	中继卫星姿态控制	358
8-4-6	姿态控制系统模块化	360
8-4-7	姿控系统的微处理机	361
8-5	飞行器再入的制导与控制	364
8-5-1	再入飞行的控制类型	364
8-5-2	制导规律	364
8-6	宇航测控基础	368
8-6-1	宇航测控的组成	368
8-6-2	多普勒测速原理	370
8-6-3	雷达	371
8-6-4	跟踪	376
8-6-5	伪码测距原理	378
8-6-6	干涉仪测角与定位原理	379
8-6-7	误差传播系数	380
8-7	制导与控制系统	382
8-7-1	运载火箭的制导与控制系统	382
8-7-2	卫星太阳电池阵的定向控制系统	385
8-7-3	双自旋卫星的双脉冲控制系统	389
8-7-4	重力梯度卫星的控制系统	390
8-7-5	绳索卫星的控制系统	394
8-7-6	航天飞机的制导与控制系统	395
8-7-7	我国同步试验通信卫星的控制系统	396
8-8	空间计算机	398
第九章	空间遥感的物理基础	401
9-1	电磁波辐射	403
9-1-1	太阳的辐射	403
9-1-2	地球的辐射	405
9-1-3	物体的微波辐射	407
9-1-4	电磁波传递信息	410
9-2	大气效应	410
9-2-1	大气透过特性	410
9-2-2	电磁波的吸收	411
9-2-3	电磁波的散射	412
9-2-4	大气对遥感数据的影响	414
9-2-5	微波辐射的大气传输	416
9-3	遥感的基本原理	421
9-3-1	地物波谱	421
9-3-2	遥感的基本原理	428

9-3-3	光学遥感方程	429
9-3-4	遥感作用距离	431
9-4	遥感器	432
9-4-1	摄影成象	434
9-4-2	扫描成象	437
9-4-3	主-被动双模红外成象	443
9-4-4	微波遥感	444
9-4-5	遥感卫星	449
9-5	图象处理	449
9-5-1	图象处理的原理	449
9-5-2	解释卫星图象的理论	452
9-5-3	光学信息处理	452
9-5-4	自射线照相强化影象	457
9-5-5	卫星图象经激光增强处理后的假彩色合成	458
9-5-6	数字图象处理	461
9-5-7	遥感图象处理技术的发展	463
9-6	遥感的应用	463
第十章	空间高能物理基础	466
10-1	宇宙射线	466
10-1-1	宇宙射线的组成	467
10-1-2	能密度	467
10-1-3	宇宙射线的化学成分	469
10-1-4	宇宙射线粒子的运动与加速	469
10-1-5	宇宙射线粒子的能量损失	471
10-1-6	宇宙射线空气簇射	473
10-1-7	空间粒子辐射效应的模拟	474
10-2	宇宙射线质子	474
10-2-1	太阳宇宙射线的传播	475
10-2-2	太阳质子事件	476
10-2-3	质子、 α 粒子效应	478
10-3	宇宙射线电子	478
10-3-1	电子的产生	479
10-3-2	电子的能量辐射	479
10-3-3	电子的效应	481
10-3-4	大气中宇宙射线绝对电离量	481
10-4	γ 射线	482
10-4-1	γ 射线的发生	483
10-4-2	宇宙 γ 射线源	484
10-4-3	高能 γ 射线的特性	484
10-4-4	超高能 γ 射线	486
10-4-5	光子对物质的作用	486
10-5	中子	488

10-6 高能辐射的探测.....	489
10-6-1 宇宙射线成分探测仪	491
10-6-2 太阳质子、 α 粒子探测仪	491
10-6-3 宇宙射线的地下探测	492
10-6-4 宇宙射线的年龄	492
10-7 空间高能辐射防护.....	494
10-7-1 辐射量和单位	494
10-7-2 高能辐射对空间飞行的影响	495
10-7-3 辐射防护	497
附录	499
参考文献	519
汉英术语对照	524

第一章 绪 论

1-1 宇航物理学的任务和特点

宇航物理学是研究与宇航技术相关的物理问题的科学。它的任务是

(1) 阐明和宇航技术有关的物理概念、理论、公式和计算方法。

(2) 研究宇航过程中所遇到的新的物理现象,为宇航技术提供新的物理学论据,促进宇航学的发展。

宇航学的发展与物理学的发展有十分密切的关系。17 世纪,开普勒(J. Kepler)通过计算,发现行星沿椭圆轨道运行,此后,牛顿提出了万有引力定律。这些物理学的成就,为后来确定人造卫星的轨道提供了理论准备。20 世纪,齐奥尔科夫斯基关于火箭运动的基本定律,以及不久后问世的陀螺理论,又为宇航器的发射奠定了基础。由于宇航学与物理学有着如此密切的关系,因而宇航物理学具有如下特点:

(1) 与宇航过程中所遇到的大量物理问题紧密相关

例如,宇航器在稠密大气层中飞行时,气动加热将使宇航器表面出现高温。为了改善导热过程,消除高温,必须充分地运用和研究热物理学的理论与技术。

宇宙空间是一个巨大的辐射场,其中存在着电磁辐射和多种其它粒子的辐射。这些辐射,对宇航器发射或接收信号有相当大的影响。为了维持宇航器与地面的正常联系,人们需要对空间电磁学有足够的了解。

(2) 涉及到许多新的物理现象

例如,人们成功地发射了人造地球卫星后,通过星载辐射仪的探测,发现存在着一个高能粒子区,它称为地球辐射带,它是一个新的物理现象。地球辐射带是怎样形成的?有什么作用?变化规律如何?这些问题,为物理学提出了新的课题。

宇航物理学是一门年轻的边缘学科。在这一学科领域中,有许多新的课题有待于人们去深入研究和探索。

1-2 宇航的空间环境

宇航器在飞行中,会遇到十分复杂的空间自然环境。例如,它将遇到失重、真空、高温、地磁干扰、高能粒子辐射、微流星袭击等。宇航物理学的任务之一,就是考察空间环境中各种复杂的物理现象,研究其本质、变化规律以及对宇航过程的影响。

下面,我们对宇航过程中所遇到的各种空间环境逐一地进行介绍。

1-2-1 地球大气

1. 地球大气的结构

包围着地球的空气层统称为地球大气。根据其温度、运动特征等,地球大气可分为

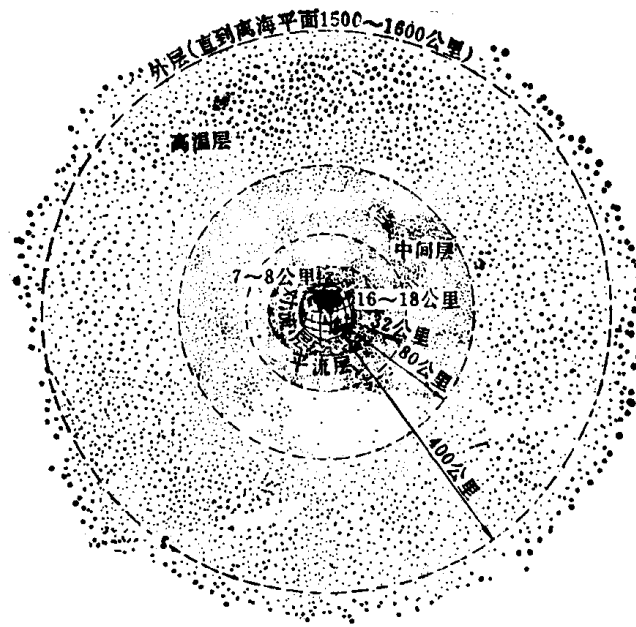


图 1-1 地球大气分层示意图

若干层,如图 1-1 所示。

(1) 对流层

这是最接近海平面的一层,其厚度随纬度与季节等因素而变化,在地球的南北极约为海拔 7—8 公里,在赤道上约为海拔 16—18 公里,在中纬度和高纬度约为海拔 8—12 公里。这一层的空气质量,几乎占地球大气全部质量的四分之三,层内的风速、风向、压强、密度、温度和湿度等经常变化。风、雨、雷、雹等气象变化均发生在这一层。

(2) 平流层

从对流层顶端到海拔约 50 公里之间,大气无上下对流,只有水平方向的流动,称为平流层。这一层的空气质量约占地球大气全部质量的四分之一。海拔 20 公里以下,层内气温一般保持在 216.65K;海拔 20—32 公里之间,气温随高度而上升。层内另一特点是水蒸汽很少。

(3) 中间层

从平流层顶端到海拔约 80 公里之间为中间层。该层空气质量仅占地球大气全部质量的三千分之一。在海拔 50—53 公里之间,气温随高度而上升,到海拔 53 公里处温度最高,可达 282.66K,高度继续增加时气温反而下降,到 80 公里处降为 196.86K。

(4) 高温层

海拔 80 公里以上,大气温度又急剧上升,到海拔 150 公里左右,可达 1000K,在海拔 400 公里左右,可达 1500—1600K。故海拔 80—400 公里之间称为高温层,亦称热层。

(5) 外层

海拔 400 公里到 1600 公里之间为外层。层内空气质量仅占地球大气全部质量的 10^{-11} 。据测量数据推算,大气边界约位于海拔 2000—3000 公里处。

(6) 电离层

从海拔 60 公里开始,部分大气分子受太阳电磁辐射和其它粒子的辐射而电离,形成由电子、正离子、负离子及中性粒子组成的电离介质区,它一直延伸到地球大气层的外缘,称为电离层。

根据电子浓度的不同,电离层又可分为若干层:

D层:在海拔 60—90 公里之间是电离层的最低层。层内电子浓度约为 10^3 — 10^4 电子/厘米³,中性粒子浓度比其它各层大得多。这一层仅在白天存在。

E层:在海拔 90—140 公里之间,电子浓度约为 10^5 — 2×10^5 电子/厘米³,且昼大夜小。

F层:分为 F₁ 层与 F₂ 层。F₁ 层在海拔 140—200 公里之间,电子浓度约为 3×10^5 电子/厘米³,大多在夏季白昼存在。F₂ 层在海拔 200—1000 公里或 2000 公里之间,是电离层中经常存在的一层,电子浓度约为 10^6 — 2×10^6 电子/厘米³,且昼大夜小,冬季大,夏季小。

由于电离层处于地磁场内,受地磁场影响,故层内电子浓度还随纬度不同而变化。太阳活动对电离层也有很大影响,表现为电离层突然发生骚动和电离层暴,在极区发生极盖吸收和极光带吸收等情况。

众所周知,短波通信是靠电离层反射实现的,而电离层是一种不均匀介质,电波通过它传播时会发生所谓电离层闪烁现象。此外,太阳活动所引起的电离层反常现象,可使地球向阳的半球上中、短波无线电讯号衰减,甚至完全中断,有时可中断数小时之久,这对卫星通讯是十分有害的。

2. 地球大气的物理性能

(1) 密度

海平面大气密度的标准值 $\rho_0 = 1.225 \times 10^{-3}$ 克/厘米³。不同海拔高度的大气密度见表 1-1 所示^[1]。

表 1-1 不同海拔高度的大气密度

大气密度(克/厘米 ³)	海拔高度(公里)	大气密度(克/厘米 ³)	海拔高度(公里)
$\rho_0 = 1.225 \times 10^{-3}$	0	$10^{-1} \rho_0$	165
$10^{-1} \rho_0$	18	$10^{-10} \rho_0$	245
$10^{-2} \rho_0$	33	$10^{-11} \rho_0$	370
$10^{-3} \rho_0$	49	$10^{-12} \rho_0$	540
$10^{-4} \rho_0$	67	$10^{-13} \rho_0$	730
$10^{-5} \rho_0$	82	$10^{-14} \rho_0$	980
$10^{-6} \rho_0$	96	$10^{-15} \rho_0$	1600
$10^{-7} \rho_0$	110	$10^{-16} \rho_0$	2750
$10^{-8} \rho_0$	125		

高空大气密度随时间、季节、纬度、太阳活动和地磁活动情况而变化,在磁暴期间,大气密度能在数小时内猛增数倍(甚至 10 倍),磁暴结束后又迅速复原。

(2) 温度

海平面气温度的标准值是 15℃(288K)。不同海拔高度处的大气温度见表 1-2 所

示。海拔 120—300 公里之间,温度与高度有如下经验关系式:

$$T = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_{120}) \exp[-S(Z - 120)] \quad (1-1)$$

式中 T_{∞} ——外层大气的温度;

T_{120} ——海拔 120 公里处的温度;

Z ——海拔高度(以公里为单位);

T ——高度 Z 处的温度(以 K 为单位);

S ——常数,它等于 $0.0291 \exp\left(-\frac{q^2}{2}\right)$, $q = \frac{T_{\infty} - 800}{750 + 1.722 \times 10^{-4}(T_{\infty} - 800)^2}$ 。

表 1-2 各高度点的温度值

高度(公里)	温 度 (K)	高度(公里)	温 度 (K)
0	288.15	250	1400
11	216.65	300	1500
20	216.65	400	1500
32	228.65	500	1600
47	270.65	700	1600
52	270.65	1000	1600
61	252.65	2000	1800
69	220.65	3000	2000
79	190.65	5000	3000
90	190.65	10000	15000
110	254.25	20000	50000
118	382.24	30000	100000
150	780	50000	200000
200	1200		

由式(1-1)可知: 当 T_{120} 为定值时, T_{∞} 是决定温度随高度分布的唯一因素。 T_{∞} 的值是受太阳活动等多种因素影响的。

在海拔 300—1000 公里之间,接近等温, 1000 公里以上的温度又随高度增加。

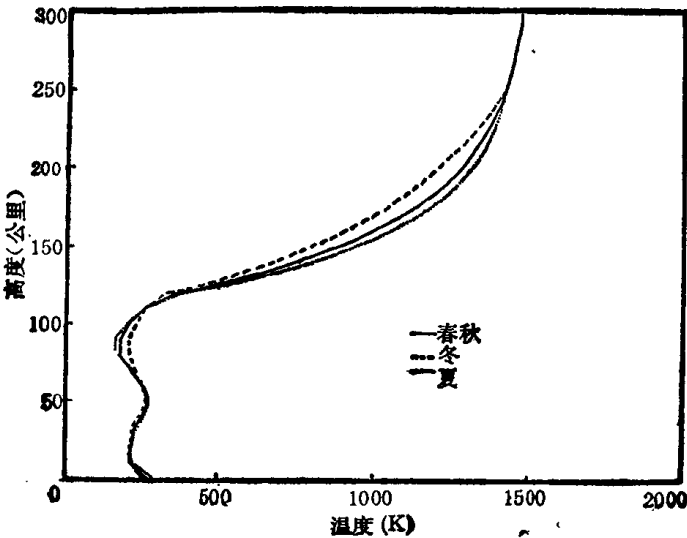


图 1-2 0—300 公里高度内的温度分布

海拔 0—300 公里之间的温度与海拔高度的关系,见图 1-2 所示。

(3) 压力

海平面大气压力的标准值为 $P_0 = 101325$ 帕(1.03323 千克力/厘米²)。不同高度时的压力见表 1-3 所示。表中是中纬度、春秋时节及在中等太阳活动情况下的平均值。

表 1-3 大气压力的指数律递减趋势

大气压力(毫巴)	海拔高度(公里)	大气压力(毫巴)	海拔高度(公里)
$P_0 = 1.01325 \times 10^3$	0	$10^{-1}P_0$	135
$10^{-1}P_0$	16	$10^{-2}P_0$	220
$10^{-2}P_0$	31	$10^{-3}P_0$	350
$10^{-3}P_0$	48	$10^{-4}P_0$	520
$10^{-4}P_0$	65	$10^{-5}P_0$	730
$10^{-5}P_0$	80	$10^{-6}P_0$	1100
$10^{-6}P_0$	92	$10^{-7}P_0$	2100
$10^{-7}P_0$	108		

由表 1-3 可知,在海拔 120 公里以下,平均每升高 16 公里,大气压降低一个数量级。

大气压力不仅与高度有关,而且还随着纬度、季节及太阳的活动情况变化而有所不同。

3. 地球大气的成分

从海平面到海拔大约 80 公里高空,大气中各种气体的比例大致是恒定的,空气的平均分子量为 28.96。其中,海拔 20—50 公里之间,因大气中臭氧的含量最大,故称为臭氧层。海拔 120 公里以上,大气中某些成分开始分解,部分氧分子离解成氧原子^[2]。海拔 300 公里以下,大气的主要成分是氧原子、氧分子和氮分子。海拔 600—700 公里以上,主要成分是氮。

大气密度是随海拔高度增加而降低的,从海拔 100 公里到 200 公里,氮分子密度由 10^{13} 个/厘米³降为 10^9 — 10^{10} 个/厘米³;氧分子由 10^{12} 个/厘米³降为 10^8 — 4×10^8 个/厘米³;

表 1-4 某些海拔高度处大气的平均分子量

海拔高度(公里)	大气的平均分子量
0	28.96
120	26.90
200	23.51
500	16.19
800	10.63
1000	6.23
1500	4.03
2000	3.92
2500	3.84
3000	3.70

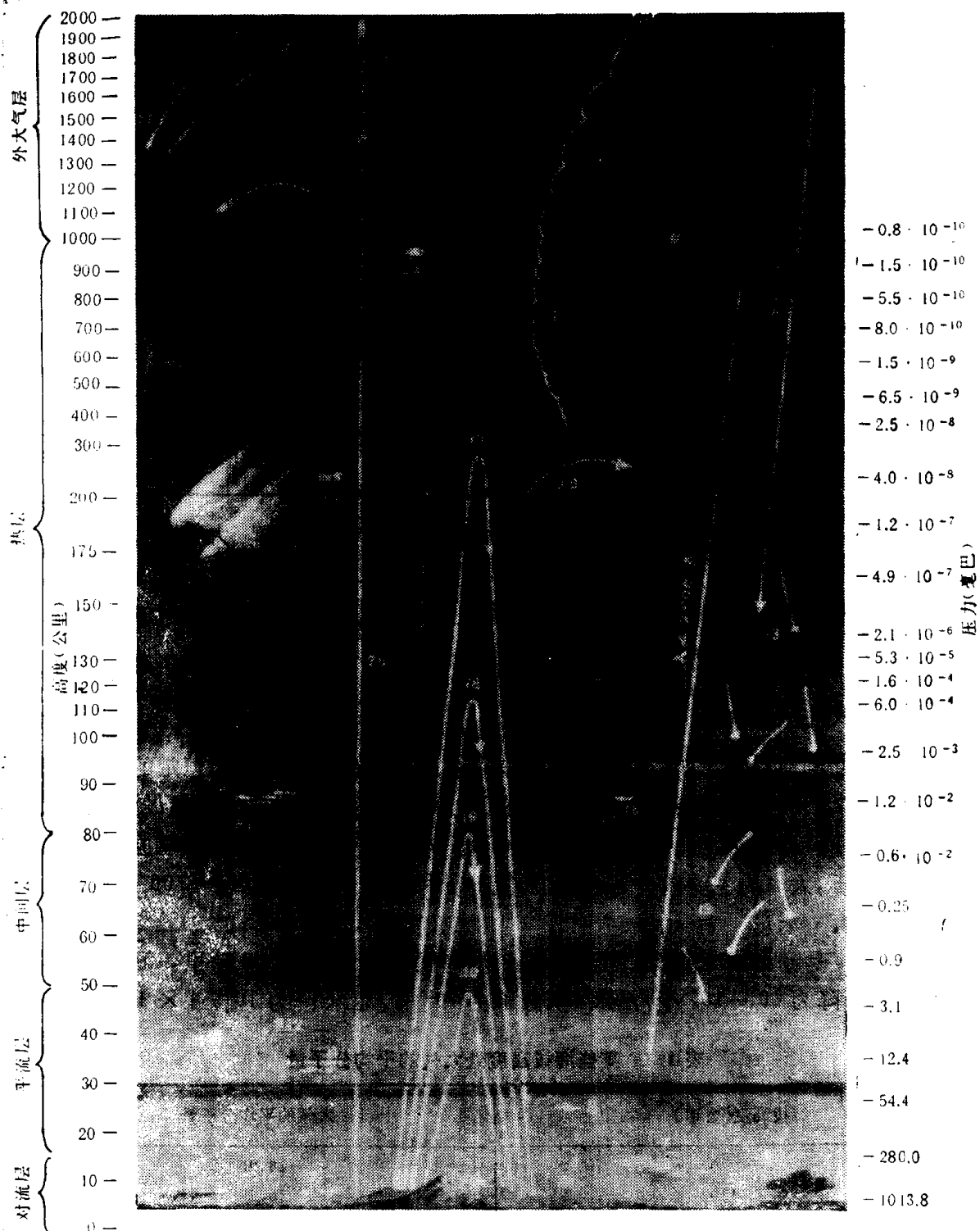


图 1-3 地球大气结构图

1—海平面, 2—地球最高点(珠穆朗玛峰高 8848 米), 3—晴天积云, 4—浓积云, 5—阵雨(雷雨)云, 6—雨层云, 7—卷云, 8—飞机, 9—臭氧最大凝结层, 10—贝母云, 11—平流层气球, 12—无线电探空仪, 13—流星, 14—夜光云, 15—极光, 16—美国 X-15 火箭飞机, 17、18、19—由电离层反射回地面的无线电波, 20—由热层反射回地面的声波, 21—第一颗苏联人造地球卫星, 22—洲际弹道火箭, 23—地球物理探测火箭, 24—气象卫星, 25—苏联“联盟-4号”和“联盟-5号”飞船, 26—飞出大气层的火箭, 穿透电离层并脱离大气层的无线电波, 27、28—H 和 He 原子的散逸, 29—太阳质子轨迹, 30—紫外线(波长 $\lambda > 2000$ 埃和 $\lambda < 900$ 埃)透射

氧原子由 $2 \times 10^{11} - 8 \times 10^{11}$ 个/厘米³ 降到 $10^9 - 5 \times 10^9$ 个/厘米³。海拔 125 公里处，测得一氧化氮的分子密度为 6×10^6 个/厘米³。

由于大气的成分、密度都随海拔高度而变化，所以海拔高度不同大气的平均分子量也不同，表 1-4 列出了某些海拔高度处的大气平均分子量。

地球大气的结构概况，如图 1-3 所示。

1-2-2 太阳的电磁辐射

1. 太阳的辐射现象

太阳是太阳系中唯一的强辐射源，它每秒钟向空间辐射的功率为 3.86×10^{25} 千瓦，相当于每平方米太阳可见面积的辐射功率为 6.4×10^4 千瓦。

单位时间内，太阳投射到平均日地距离处并垂直于射线方向的单位面积上的全部辐射能称为太阳常数，单位为瓦/米²或卡/(厘米²·分)[1卡/(厘米²·分) = 697.35 瓦/米²]。在距太阳 1.5×10^8 公里的地球轨道上，太阳常数为 1353 瓦/米²[1.95 卡/(厘米²·分)]；地球近日点的太阳常数为 1444 瓦/米²，远日点的太阳常数为 1349 瓦/米²。

太阳辐射通常有两种测量方法：

一种方法是将太阳的全部辐射用接收器接收，并将其转化为热能或电能的值，该值即为辐射强度。

另一种方法是用分光仪器测定不同海拔高度处阳光中各波长的辐射值，并将该值进行修正，从中获得不同平均日地距离处的太阳辐射光谱曲线，经积分即可得到太阳常数。

太阳辐射的波长，从大约 10^{-4} 埃(γ 射线)到几十千米(无线电波)，可见光只占其中很窄的波长区间，见图 1-4。虽然可见光的波长范围并不宽阔，但其辐射强度却是全部太阳辐射中最强者，可见光与红外辐射能量的总和约占总辐射能量的 90%，如图 1-5 所示。

各种波长的太阳辐射是由不同高度和不同温度的太阳大气层发射的。例如，可见光与红外辐射主要来自太阳光球；1500 埃以下的短波辐射主要来自太阳色球层和日冕的高温辐射；无线电厘米波是色球层发射的；米波则由日冕发射。

2. 太阳的短波辐射

这里介绍的短波辐射主要指紫外辐射和 X 射线辐射。

太阳的紫外辐射可按波长划分为三类：近紫外辐射(3800—3100 埃)，中紫外辐射(3100—1700 埃)和远紫外辐射(1700 埃以下)。太阳的紫外辐射能量只占太阳总辐射能的很小部分，例如，3000 埃以下的紫外辐射能在总辐射能中的比例不到 1%，见表 1-5 所示。

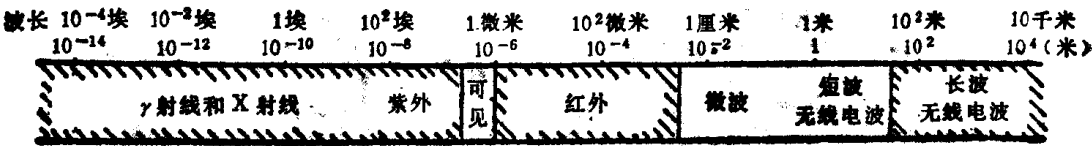


图 1-4 太阳电磁辐射示意图