



“十二五”国家重点出版规划项目

野战火箭装备与技术

# 野战火箭 飞行力学

Flight Dynamics of Field Rocket

王良明 韩珺礼 陈志华 傅健 钟扬威 编著 |



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

野战火箭装备与技术

# 野战火箭飞行力学

王良明 韩珺礼 陈志华 傅健 钟扬威 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书较为全面地介绍了无控和有控野战火箭飞行力学,包括:野战火箭飞行的大气环境;野战火箭的空气动力特性;作用在野战火箭上的力与力矩;野战火箭飞行运动方程;野战火箭的基本飞行性能;野战火箭在稀薄大气中的运动特性;野战火箭的非线性运动分析;野战火箭柔体飞行力学分析;野战火箭随机飞行力学分析;野战火箭控制力学方法;制导野战火箭的控制特性、野战火箭子母弹飞行力学分析;等等。本书适合作为外弹道、飞行力学、弹箭等专业的本科生和研究生的教材使用,也可供有关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

野战火箭飞行力学/王良明等编著. —北京:国防工业出版社,2015.12

(野战火箭装备与技术)

ISBN 978-7-118-10632-9

I. ①野... II. ①王... III. ①野战—火箭—飞行力学 IV. ①V412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284173 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 19½ 字数 400 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 98.00 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

# 《野战火箭装备与技术》丛书编委会

顾 问	刘怡昕	包为民	杨绍卿	
主 编	韩珺礼			
副主编	汤祁忠	周长省		
编 委	(按姓氏笔画排序)			
	马 幸	王文平	王良明	王雪松
	史 博	刘生海	汤祁忠	李 鹏
	李臣明	李照勇	杨 明	杨晓红
	陈四春	陈志华	周长省	郝宏旭
	韩 磊	韩珺礼	蒙上阳	樊水康
秘 书	杨晓红	韩 磊		

炮兵是陆军火力打击骨干力量,装备发展是陆军装备发展的重点。野战火箭是炮兵的重要装备,以其突然、猛烈、高效的火力在战争中发挥了重要作用。随着现代高新技术的飞速发展及其在兵器领域的广泛应用,20世纪90年代初,国外开始应用制导技术和增程技术发展制导火箭,使火箭炮具备了远程精确打击和精确面压制能力,推动了炮兵由覆盖式面压制火力支援向点面结合的火力突击转变。同时,随着贮运发箱模块化发射技术的应用,火箭炮摆脱了集束定向管的束缚,实现了不同弹径、射程、战斗部种类火箭弹的共架发射,具有射程远、精度高、火力猛、点面结合、毁伤高效、反应快速、机动灵活和保障便捷的特点,标志着野战火箭装备技术水平发展到了一个新的高度,夯实了野战火箭在陆军火力打击装备中的重要地位。

我国一直重视野战火箭装备技术发展,近年来更是在野战火箭武器的远程化、精确化、模块化和信息化等方面取得了长足进步,野战火箭装备技术总体水平达到了世界先进水平,部分达到领先水平。韩珺礼研究员带领的陆军火箭科研创新团队,长期从事野战火箭武器装备论证、预先研究、型号研制和作战运用研究等工作,取得了大量成果,相继推出的多型野战火箭武器系统均已成为陆军炮兵的火力骨干装备。

《野战火箭装备与技术》丛书(共14册)系统分析了未来战争形态的演进对陆军炮兵远程精确打击装备的需求,明晰了我国野战火箭武器装备的发展方向,从多角度研究了我国野战火箭武器装备的理论技术与运用问题,是对我国近年来野战火箭特别是远程火箭发展的总结与升华。该丛书在国内首次系统建立了涵盖野战火箭论证、设计、制造、试验和作战运用等多个方面的理论体系和技术体系,是近年来国内野战火箭装备技术和作战运用研究的理论结晶,为野战火箭向更远程、更精确、更大威力发展奠定了坚实理论与技术基础。《野战火箭装备与技术》丛书对于推动我国野战火箭武器深入发展具有重大意义!相信在各级机关的支持下,在广大科研人员的共同努力下,我国野战火箭武器将更加适应基于信息系统的打击需求,在未来信息化战争中将发挥更重要的作用!

刘怡昕

二〇一五年十一月

刘怡昕:中国工程院院士、南京炮兵学院教授。

炮兵是陆军火力打击力量的重要组成部分,具备突然、猛烈、密集、高效的火力特点,在历次战争中发挥了重要作用,有“战争之神”的美誉。随着制导技术、电子信息技术等诸多高新技术在炮兵装备中的应用,陆军炮兵的远程精确打击能力得到大幅提升,炮兵已由过去的火力支援兵种向火力主战兵种转型,这与野战火箭武器的发展密不可分。为适应现代战争需求,野战火箭武器系统正朝着远程压制、精确打击、一装多能、高效毁伤、模块通用的方向发展。

为了提高我军炮兵作战能力,我国十分重视野战火箭武器的发展,从装备仿研、技术引进到自主研发,经过多年的积累与创新,在远程化、精确化、模块化、信息化等方面达到了较高水平。在基于信息系统的体系作战中,野战火箭主要担负战役战术纵深内对面目标精确压制和点目标精确打击任务。以贮运发箱模块化共架发射和精确化为主要特征的先进远程野战火箭武器系统,集远程综合压制、精确打击、实时侦察和效能评估于一体,为复杂战场环境下远程精确火力打击提供了重要保证,是我国陆军未来火力打击装备发展的重点。

野战火箭装备技术的发展已进入到一个新的更高阶段,立之弥高,逾之弥艰,需要有完整的基础理论加以支撑,需要有关键技术不断突破和创新,需要在基础研究上下功夫。但是,目前该领域的学术理论、技术研究成果相对分散,成系统的装备技术和理论文献很少,不利于野战火箭武器装备的优化发展。因此,迫切需要对该领域的理论与技术进行系统梳理、结集出版,以满足论证、研制、生产、作战使用等各领域参考资料缺乏的急需,为野战火箭领域人才培养和装备发展提供系统的理论与技术支撑。《野战火箭装备与技术》丛书立足野战火箭发展,填补了国内野战火箭理论与技术体系空白,被列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,并得到了国家出版基金的资助。本丛书共有14个分册,全面系统地对我国陆军野战火箭研究成果和国内外该领域的发展趋势进行了阐述,着重对我国野战火箭基础研究和工程化研究方面取得的创新性成果进行了提炼,是我国野战火箭领域科技进步的结晶。本丛书的出版,对推动我国野战火箭装备技术不断自主创新、促进陆军武器装备发展、提升我国武器装备竞争力以及培养野战火箭领域专业人才具有重要意义。

本丛书的撰写得到了机关和广大专家的指导和帮助。感谢中国科学院院士包为民和中国工程院院士刘怡昕、中国工程院院士杨绍卿的悉心指导,感谢徐明友教授等我国野战火箭领域老一辈科研工作者奠定的基础,感谢总装备部某研究所各位领导和诸位同事的支持,感谢南京炮兵学院、南京理工大学、北京理工大学、兵器工业导航与控制技术研究所、国营 743 厂、国营 5137 厂等单位领导和科研工作者的支持,感谢国防工业出版社和陆军火箭科研创新团队为本丛书所做出的大量工作!在本丛书的撰写过程中参考了相关文献和资料,在此对相关作者一并表示感谢!

由于水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者不吝赐教。

韩珺礼

二〇一五年十一月

# 前言

野战火箭飞行力学是研究野战火箭在空中运动规律及飞行性能的一门学科。它建立在空气动力学理论、运动稳定性、非线性理论、振动理论等基础之上,又依赖于现代控制理论和计算技术的发展,并且与测量技术密切相关。可见,要使野战火箭具有良好的飞行性能,必须对其飞行力学系统进行综合分析,以获得良好的设计参数和相应的最佳飞行状态。

野战火箭在大气中飞行,受到大气环境的影响,必须分析大气的一些特性。根据研究,大气温度、密度、压强、雷诺数、黏性系数、声速等随高度的分布存在一定的规律,可以用标准气象条件进行概括。此外,火箭在大气中飞行,还受到风和大气湍流的影响。风和大气湍流可视为随机过程,它们的数学描述、统计特性和数值模拟及对火箭飞行影响,本书也做了一些介绍。

作为刚体的野战火箭的飞行运动包括质心运动和绕质心的转动。质心运动位置由三个坐标确定,质心运动规律取决于作用在火箭上的力,包括重力、发动机推力、空气动力、控制力等。绕心运动取决于作用在其上的力矩,包括空气动力矩、发动机推力对质心的力矩,控制力矩等。野战火箭飞行运动方程组为非线性的微分方程组,很难求得解析解。由于解析解中包含了各种飞行参数和气动参数,线性化有利于分析参数对火箭性能的影响。常采用小扰动法将微分方程线性化。考虑到火箭的空间运动可以看成是铅直面内的运动与侧向平面内运动的合成,故将纵向运动和侧向运动分开进行线性化。

在攻角 $\delta$ 很小的情况下,空气动力和力矩系数都是攻角的线性函数,得到野战火箭的角运动方程为线性方程,对此方程求解可以得到火箭姿态运动规律。这种分析方法在小攻角情况下是正确的,但随着攻角的增大,气动力和力矩系数一般为攻角的非线性函数,再用线性理论分析弹丸的运动会导致本质上的错误。本书从火箭非线性气动力和力矩计算出发,建立了火箭非线性姿态运动学方程,通过相平面法定性分析火箭非线性运动特性。

随着现代增程理论和技术的不断发展,远程火箭的弹道高早已超过了30km,在大高度上空气稀薄,空气动力特性与稠密大气不同,涉及稀薄气体动力学的



知识。目前,稀薄气体气动力计算,稀薄气体中的控制,大高度下弹道特性和飞行性能如何设计都成为了飞行力学领域研究的新课题。本书就稀薄气体中火箭受力特性、运动方程及其控制特性做了一些初步介绍。

传统的火箭飞行力学理论是建立在刚体火箭上的,本书突破刚体飞行动力学的框架,拓展到柔体飞行动力学模型。引入“平均弹轴”的概念,分析了火箭在柔性弯曲下的气动力计算方法。建立了火箭柔性弯曲时的质心运动方程、绕心摆动方程和弯曲变形动力学模型,推导了火箭在准静态变形情况下的攻角方程,给出了准静态变形情况下的飞行稳定性判据。

精确化是现代野战火箭的发展方向,目前各国都出现了不同型号的制导火箭。制导火箭不管以何种制导律进行飞行,都需要火箭的控制系统执行。火箭的控制执行机构通常分为燃气控制和空气动力控制。这些执行机构的优缺点、工作原理、参数设计等都是需要研究的课题。

对于有控火箭,需要研究其动态特性问题,即:在干扰作用下,能否保持原来的飞行状态?在操纵机构作用下,火箭改变飞行状态的能力和速度如何?也就是研究火箭的稳定性、操纵性、机动性问题,本书也做了介绍。

在进行大面积、多目标打击方面出现了子母弹,它与传统的火箭有了很大的差别,技术含量大为提高,包括了母弹的飞行动力学、子母弹分离动力学、子弹飞行动力学,对于末敏子弹还要分析伞弹系统飞行动力学。其飞行理论除了要用到力学知识,还涉及内弹道、制导与控制等方面,这大大促进了弹道、飞行力学、制导控制等学科的融合和交流。

综上所述,野战火箭飞行力学是弹道、飞行力学、火箭总体设计、制导与控制等专业的基础课。其与高等数学、理论力学、空气动力学、自动控制理论、制导系统原理、地球与大气物理学等方面的知识密切联系。

作者

# 目录

第1章 野战火箭飞行的大气环境 .....	001
1.1 大气的基本特性 .....	001
1.1.1 大气的组成 .....	001
1.1.2 大气的结构 .....	002
1.1.3 标准大气参数 .....	004
1.2 风和大气湍流 .....	005
1.3 临近空间稀薄大气特性 .....	006
第2章 野战火箭的空气动力特性 .....	008
2.1 亚声速绕流的气动特性 .....	008
2.2 跨声速绕流的气动特性 .....	010
2.3 超声速绕流的气动特性 .....	011
2.4 高超声速绕流的气动特性 .....	012
2.5 高超声速气动加热特性 .....	013
2.6 弹箭气动系数耦合计算方法 .....	014
第3章 作用在野战火箭上的力与力矩 .....	020
3.1 地球重力 .....	020
3.2 发动机推力 .....	021
3.3 空气动力与力矩 .....	022
3.3.1 空气动力表达式 .....	022
3.3.2 空气动力矩表达式 .....	026
3.4 燃气控制力与力矩 .....	028
第4章 野战火箭飞行运动方程 .....	030
4.1 概述 .....	030
4.2 常用坐标系 .....	030

4.3	各坐标系之间的关系 .....	031
4.3.1	弹道坐标系与平动坐标系的关系 .....	035
4.3.2	第二弹轴坐标系与弹道坐标系间的关系 .....	036
4.3.3	弹体坐标系与第一弹轴坐标系间的关系 .....	037
4.3.4	坐标变换矩阵的通用形式 .....	037
4.4	力和力矩的分量表达式 .....	038
4.4.1	重力 .....	038
4.4.2	科里奥利惯性力 .....	039
4.4.3	推力和推力矩 .....	039
4.4.4	风的影响 .....	040
4.4.5	有风时的空气动力 .....	041
4.4.6	有风时的空气动力矩 .....	042
4.5	野战火箭质心运动方程 .....	044
4.6	野战火箭转动运动方程 .....	045
4.7	野战火箭运动方程组 .....	049
<b>第5章 野战火箭的基本飞行性能 .....</b>		<b>051</b>
5.1	自由扰动运动特性 .....	051
5.1.1	纵向自由扰动运动方程组 .....	051
5.1.2	特征方程式及其根的特性 .....	052
5.1.3	自由扰动的振荡周期及衰减程度 .....	054
5.1.4	自由扰动的短周期和长周期运动 .....	054
5.1.5	侧向自由扰动的动态特性分析 .....	055
5.2	弹道飞行稳定性 .....	056
5.2.1	稳定性的概念 .....	056
5.2.2	稳定性准则 .....	057
5.2.3	弹道飞行的稳定性 .....	057
5.3	弹体纵向和侧向动态特性 .....	058
5.3.1	纵向扰动运动的简捷处理 .....	059
5.3.2	纵向扰动纵向动态特性分析 .....	060
5.3.3	侧向扰动运动的传递函数 .....	063
5.3.4	轴对称火箭侧向运动特性 .....	064
<b>第6章 野战火箭在稀薄大气中的运动特性 .....</b>		<b>066</b>
6.1	野战火箭在稀薄大气中飞行的受力特性 .....	066

6.1.1	气体分子运动的动力学方程 .....	066
6.1.2	流动领域的划分及玻耳兹曼方程的求解方法 .....	069
6.1.3	自由分子流领域气动力计算方法 .....	072
6.1.4	过渡领域和滑流领域气动力工程计算方法 .....	075
6.1.5	气动力系数随高度变化特性分析 .....	076
6.1.6	弹体无黏流空气动力计算的激波膨胀波理论 .....	076
6.1.7	弹翼无黏流空气动力计算的点源法 .....	078
6.2	野战火箭在稀薄大气中飞行的力学模型 .....	080
6.2.1	稀薄气体中野战火箭的刚体弹道方程组 .....	080
6.2.2	飞行高度及射程的计算 .....	081
6.3	野战火箭在稀薄大气中的运动 .....	084
6.3.1	地表为椭球面对弹道计算的影响 .....	084
6.3.2	空气动力系数随高度变化对弹道计算的影响 .....	085
第7章 野战火箭非线性运动分析 .....		087
7.1	概述 .....	087
7.2	弹箭非线性空气动力学特性 .....	088
7.2.1	简介 .....	088
7.2.2	非线性阻力系数 .....	088
7.2.3	非线性俯仰力矩系数 .....	089
7.2.4	立方马格努斯力矩系数 .....	092
7.2.5	双立方和三立方马格努斯力矩 .....	093
7.3	复数形式的野战火箭非线性姿态动力学方程 .....	096
7.3.1	复攻角的定义 .....	096
7.3.2	火箭的非线性姿态运动方程 .....	097
7.4	一般形式的野战火箭非线性姿态方程 .....	104
7.5	野战火箭非线性动力学特性分析 .....	106
7.5.1	非线性系统分岔分析概述 .....	106
7.5.2	相平面的平衡点和极限环 .....	106
7.5.3	极限环的定义及存在性 .....	110
7.5.4	分岔理论 .....	111
7.5.5	中心流形定理 .....	114
7.5.6	PB 规范形理论 .....	115
7.5.7	火箭非线性姿态运动特性分析 .....	119
7.6	算例 .....	122

7.6.1	系统参数 .....	122
7.6.2	不同分岔参数对弹箭非线性姿态运动的影响分析 .....	123
7.6.3	数值模拟 .....	136
<b>第8章 野战火箭柔体飞行力学分析 .....</b>		<b>138</b>
8.1	野战火箭细长弹体的柔性变形描述 .....	138
8.2	作用在柔性火箭上的空气动力 .....	139
8.3	野战火箭柔体飞行力学模型 .....	140
8.3.1	柔性弹道的描述 .....	140
8.3.2	火箭柔性变形的动力学方程 .....	141
8.4	野战火箭柔体弹道飞行稳定性 .....	143
8.4.1	准静态变形条件下火箭的攻角运动方程 .....	143
8.4.2	柔性火箭的飞行稳定性条件 .....	144
<b>第9章 野战火箭随机飞行力学分析 .....</b>		<b>145</b>
9.1	随机过程基础 .....	145
9.1.1	单变量随机过程的相关和频谱 .....	145
9.1.2	多变且随机过程的特性 .....	149
9.2	大气湍流的数学描述 .....	151
9.2.1	大气湍流概述 .....	151
9.2.2	大气湍流模型建立的基本假设 .....	153
9.2.3	大气湍流模型 .....	155
9.2.4	大气湍流的尺度和强度 .....	160
9.3	大气湍流引起的野战火箭扰动运动 .....	161
9.4	大气湍流的模拟 .....	163
9.4.1	问题的提出 .....	163
9.4.2	成形滤波器 .....	163
<b>第10章 野战火箭控制力学方法 .....</b>		<b>166</b>
10.1	燃气射流控制 .....	166
10.1.1	燃气射流控制原理 .....	166
10.1.2	燃气推力计算 .....	169
10.1.3	姿态控制系统分析 .....	173
10.2	侧喷脉冲力控制 .....	177
10.2.1	脉冲修正执行机构 .....	177

10.2.2	脉冲控制力和力矩 .....	178
10.2.3	脉冲发动机控制策略分析 .....	182
10.3	鸭舵控制 .....	188
10.3.1	鸭舵控制原理 .....	188
10.3.2	鸭舵式制导火箭弹的结构及特点 .....	189
10.3.3	舵面气动外形设计 .....	189
10.3.4	鸭舵操纵力原理 .....	192
第 11 章 制导野战火箭的控制特性 .....		196
11.1	制导野战火箭的气动力和力矩 .....	196
11.1.1	常用坐标系的定义及其转换关系 .....	197
11.1.2	作用在制导野战火箭上的力 .....	201
11.1.3	作用在制导野战火箭上的力矩 .....	202
11.2	制导野战火箭的运动方程 .....	203
11.2.1	动力学方程 .....	204
11.2.2	运动学方程 .....	209
11.2.3	质量变化方程 .....	210
11.2.4	几何关系方程 .....	211
11.2.5	控制关系方程 .....	213
11.2.6	制导野战火箭运动方程组 .....	218
11.3	制导野战火箭的纵向稳定性和操纵性 .....	220
11.3.1	有控弹箭纵向扰动运动方程的建立及线性化 .....	220
11.3.2	纵向动力系数、状态方程和特征根 .....	223
11.3.3	纵向自由扰动运动两个阶段和短周期扰动运动方程 .....	227
11.3.4	纵向短周期扰动运动的特点、传递函数和频率特性 .....	229
11.3.5	舵面阶跃偏转时导弹的纵向响应特性 .....	236
11.4	制导野战火箭的侧向稳定性和操纵性 .....	244
11.4.1	火箭侧向扰动运动方程和传递函数 .....	244
11.4.2	侧向自由扰动运动的特点和稳定性 .....	248
11.4.3	侧向扰动运动方程的简化和解耦 .....	255
11.5	制导野战火箭的机动性 .....	258
11.5.1	制导野战火箭的机动性和过载概念 .....	258
11.5.2	运动与过载 .....	260
11.5.3	弹道曲率半径与法向过载的关系 .....	262
11.5.4	需用过载、极限过载和可用过载 .....	263

第 12 章 野战火箭子母弹飞行力学分析 .....	267
12.1 子母弹分离力学模型 .....	267
12.1.1 子弹分离方法 .....	267
12.1.2 子弹分离抛撒模型 .....	268
12.2 子弹开伞力学模型 .....	270
12.3 子弹飞行力学模型 .....	273
12.3.1 坐标系和坐标转换 .....	273
12.3.2 风的影响 .....	273
12.3.3 作用在子弹上的力 .....	275
12.3.4 作用在子弹上的力矩 .....	276
12.3.5 子弹运动微分方程组的建立 .....	278
12.4 末敏子弹稳态扫描飞行力学模型 .....	282
12.4.1 末敏子弹坐标系的选取及运动的描述 .....	282
12.4.2 末敏子弹受力分析 .....	285
12.4.3 末敏子弹的伞弹姿态动力学模型 .....	289
参考文献 .....	291

# 第1章

## 野战火箭飞行的大气环境

地球的引力使其周围的空气聚集形成大气层。大气总质量约为  $5.136 \times 10^{21}$  g, 仅为地球总质量的 0.86%, 但由于各类飞行器在大气层内飞行时, 空气对这些飞行器产生气动力作用, 从而影响它们的飞行, 特别是对各种导弹、近地卫星等飞行器具有较大影响, 因此需要对大气的基本特性, 如风和大气湍流等有一定的认识, 为保证飞行器的飞行品质提供依据。

### 1.1 大气的基本特性

#### 1.1.1 大气的组成

大气由多种气体混合而成, 此外还包含一些悬浮的含量不定的液体和固体颗粒。一般把大气中除水汽、液体和固体颗粒外的整个混合气体称为干洁空气。在干洁空气中, 氮气和氧气两者就体积而言约分别占总体的 78% 和 21%, 再加上稀有气体氩气, 三者约占干洁空气的 99.96%。其他各项气体含量合计不到 0.1%, 这些微量气体包括氦气、氖气、氩气、氙气等稀有气体。

由于大气存在着空气的垂直运动、水平运动、湍流运动和扩散运动, 使不同高度与不同地区的空气得以对流与混合, 因此从地面到 90km 高空, 干洁空气成分比例基本不变, 大气分子量基本不随高度的变化而发生变化, 约 28.964, 因此将此高度以下的大气层称为同成分层。在 90km 以上, 由于太阳紫外线的照射, 氮气和氧气被逐渐离解成原子, 且随着高度的进一步增加, 轻质气体的相对浓度上升, 分子量逐渐变小, 因而被称为变成分层。

干洁空气中占比例极小的臭氧和二氧化碳的作用也不可忽视, 它们对大气的温度分布有着较大的影响。其中臭氧主要分布在 20 ~ 25km 高空, 由于臭氧对紫外线的吸收极为强烈, 使得 40 ~ 50km 高度大气层上的温度大为增高, 同时



也使得地面上的生物免受紫外线的伤害。二氧化碳为有机物氧化作用的产物,它对太阳辐射吸收很少,但却能强烈吸收被太阳紫外线照射后的地面辐射,同时它又向周围空气和地面放出长波辐射,因此它能使大气和地面保持一定温度。

水蒸气是大气中唯一能发生相变(即固相、液相与气相三态互相转化)的成分,也是最容易变化的成分。水蒸气能大量吸收地面辐射,同时向周围空气释放出长波辐射,在相变过程中又能吸收或放出热量,所有这些都对地面和空气的温度产生一定的影响。

大气中的各种固体颗粒和水滴、冰晶等液体微粒大多集中于大气底层,使得能见度变差。这些固体杂质是水汽凝结的核心,对云、雨、雾的形成起重要作用,同时它们还能减弱太阳辐射和地面辐射,影响地面空气的温度。

### 1.1.2 大气的结构

大气层结构非常复杂,由于地球形状、太阳辐射等原因导致温度随着海拔高度分布不均匀,温度分布的复杂性也将会导致大气的其他参数与物理特性复杂化。

由于地球的引力作用,大气密度随高度而减少,50%的大气总质量集中在离地面 6.5km 以下,而在高度 20km 的范围内则含有全部大气质量的 90%。大气高度越高,空气越稀薄。大气层的厚度大约在 1000km 以上,但没有明显的界限。根据多年的观测,整个大气层随高度不同表现出不同的特点,可分为对流层、平流层(同温层)、中间层、电离层和大气外层。

#### 1. 对流层

对流层位于大气最下层,厚度为 8 ~ 17 km,并随季节和纬度变化,随高度的增加平均温度递减率为  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,对流层内有空气对流和湍流现象。这主要是因为大气直接吸收太阳紫外线的的能力小,大部分太阳热能(约 45%)为地表所吸收,而后以长波红外线的形式辐射出去。因此地球就像个火炉,下层空气上升、膨胀而冷却,上层较冷的空气下降、压缩而受热。这样不仅形成了温度随高度增加而降低的分布,而且使得空气不断地上下对流,产生强烈掺混,称为对流层。

对流层从地球表面开始向高空伸展,直至对流层顶,即平流层的起点为止。它的高度因纬度而不同,在低纬度地区为 17 ~ 18km,在中纬度的地区高 10 ~ 12km,在高纬度地区只有 8 ~ 9km。在高纬度的地区,因为地表的摩擦力会影响气流,形成了一个平均厚 2km 的行星边界层。对流层主要有如下特点:

(1) 温度随高度的增加而降低。这是因为该层不能直接吸收太阳的短波辐射,但能吸收地面反射的长波辐射而从下面加热大气。因而靠近地面的空气