



“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 气动流场特性分析

Characteristic Analysis of
Pneumatic Flow Field of Field Rocket

韩珺礼 陈志华 薛大文 著 I



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点出版规划项目

野战火箭装备与技术

野战火箭气动流场特性分析

韩珺礼 陈志华 薛大文 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

野战火箭表面的流体分离及其气动流场特性是提高其机动飞行能力的重要因素,本书对野战火箭超声速飞行的流场特性及其表面流体分离与控制进行了系统分析与研究。全书共分为7章,其中:前3章主要介绍野战火箭弹的基本流场结构以及进行数值研究所需的主要基础知识;第4章讨论了偏转头火箭弹的流场及其控制原理;第5章讨论了典型钝体的绕流特性与流体分离控制方法;第6章与第7章分别讨论了超声速野战火箭弹表面气体分离的被动与主动控制方法及其原理。

本书可作为从事飞行器总体技术等相关工程技术人员参考用书,也可供兵器科学与技术、流体力学等相关专业的研究生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

野战火箭气动流场特性分析/韩珺礼,陈志华,薛大文著.
—北京:国防工业出版社,2015.12
(野战火箭装备与技术)
ISBN 978-7-118-10595-7

I. ①野... II. ①韩... ②陈... ③薛... III. ①野
战—火箭—流场—气动特性—研究 IV. ①V411

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284134 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 13 字数 270 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 65.00 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点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。

自序

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

随着世界新军事变革与技术的迅猛发展,野战火箭弹性能得到了质的飞跃,特别是制导技术的应用,使火箭弹从远距离的面打击转变成精确打击。随着制导精确化以及对火箭弹机动性能要求的提高,野战火箭弹的飞行品质需要进一步提高,因此开展火箭弹飞行的气动流场特性研究与控制对提高火箭弹的机动飞行、确保其精确打击具有非常重要的意义。

野战火箭气动流场特性和控制综合了弹箭飞行力学、计算流体力学、超声速空气动力学以及流体分离与控制等学科。其主要内容包括:超声速空气动力学与飞行力学、超声速流动的数值模拟方法;偏转头弹箭的流场及控制原理;火箭弹典型流场特性及其被动与主动控制方法。

与类似著作相比,本书应用飞行力学的基本理论与计算流体力学的超声速流场数值计算方法研究野战火箭弹的气动流场,针对因其表面流体边界层分离诱导的弹体振动及扰动现象,开展弹体表面的流体分离的涡发生器被动与主动控制研究,并对涡发生器的微楔与微叶控制片被动控制以及射流主动控制的流体控制机理进行了细致研究。本书可作为火箭弹飞行流场特性基础研究的教材,同时还对从事火箭弹与导弹等飞行器的总体设计与研究的科技工作者具有一定的参考价值。

本书主要章节为课题组近年针对火箭弹流场控制开展研究的成果积累,其中主要包括课题组马杰博士对火箭弹流体分离的被动与主动控制研究、郭玉洁硕士对偏转头弹箭的流场特性研究等。

由于时间与水平有限,书中难免有错误,敬请读者批评指正。

作者

目录

第1章 绪论	001
1.1 引言	001
1.2 野战火箭的主要结构	001
1.3 野战火箭的流场结构	002
第2章 空气动力学基本理论	004
2.1 引言	004
2.2 气体特性	004
2.2.1 气体的可压缩性	004
2.2.2 气体的状态方程	005
2.2.3 理想气体的热力学关系式	006
2.3 空气动力学控制方程	009
2.3.1 连续方程	010
2.3.2 动量方程	012
2.3.3 能量方程	014
2.3.4 可压 N-S 方程的求解	017
2.4 激波动力学	019
2.4.1 气体声速	019
2.4.2 正激波	021
2.4.3 斜激波	022
2.4.4 激波相交与反射	028
2.5 边界层理论	033
2.5.1 层流边界层理论	035
2.5.2 湍流边界层理论	038
2.5.3 边界层分离	043

2.6	激波与边界层相互作用及其诱导的分离	044
2.7	高超声速空气动力学	046
第3章 野战火箭飞行主要参数与计算方法		051
3.1	引言	051
3.2	野战火箭气动参数	052
3.2.1	主要气动力分析	052
3.2.2	推力与重力分析	055
3.3	火箭弹运动方程的求解	056
3.4	野战火箭流场的数学模型	057
3.4.1	可压大涡模拟方程	057
3.4.2	Smagorinsky 模型	058
3.4.3	动力学模型	059
3.4.4	尺度相似模型	059
3.4.5	拉伸涡模型	060
3.5	超声速流场的数值模拟方法	061
3.5.1	有限差分法	061
3.5.2	有限体积法	063
3.5.3	分裂格式	066
3.5.4	间断分解算法——Godunov 差分格式	067
3.5.5	迎风型 Roe 算法——Roe 格式差分格式	068
3.5.6	混合 Roe/HLL 格式	069
3.5.7	WENO 格式	072
3.5.8	高阶精度间断分解算法——MUSCL 格式	074
3.5.9	龙格-库塔格式	075
第4章 偏转头火箭弹典型流场与控制原理		076
4.1	引言	076
4.1.1	物理模型	077
4.1.2	网格生成	078
4.2	偏转头火箭弹典型二维流场结构	080
4.2.1	偏转头火箭不同偏转角时的波系结构	080
4.2.2	偏转头火箭不同偏转角周围速度场特征	084
4.2.3	不同偏转角时偏转头弹周围的温度分布	085
4.2.4	不同偏转角时偏转头火箭周围的密度分布	086

4.3	零攻角时偏转头弹箭的三维流场及气动特性分析	087
4.3.1	压力分布特性	088
4.3.2	其他主要流场的分布	090
4.3.3	偏转头弹箭的气动力系数分析	093
4.4	不同攻角时偏转头弹箭的流场及气动特性	094
4.4.1	不同攻角时偏转头弹流场特性分析	094
4.4.2	不同攻角时偏转头弹升阻力系数分析	100
4.4.3	不同攻角时偏转头弹箭俯仰力矩系数分析	101
4.5	高空中偏转头弹箭的流场及气动特性分析	104
4.5.1	高空中的气象条件	104
4.5.2	高空中偏转头弹箭的压力场分析	105
4.5.3	高空中偏转头弹箭的其他主要流场特性	107
4.5.4	高空中偏转头弹箭的气动力特性分析	111
第5章 钝体绕流的分离与控制		113
5.1	引言	113
5.2	圆柱绕流特性	114
5.2.1	圆柱绕流的分离	115
5.2.2	圆柱绕流的典型流场结构与参数	117
5.2.3	圆柱绕流的电磁控制	118
5.3	细长体绕流特性	122
5.4	流体分离的主要控制方法	123
第6章 火箭弹流体分离的被动控制		125
6.1	引言	125
6.2	微楔作用下三维流场结构及其分离控制	130
6.2.1	微楔作用下三维流场结构	130
6.2.2	翼型流动分离的微楔控制	136
6.3	微楔和微叶片流动分离控制的不同机理	140
6.3.1	微楔与微叶片的物理模型比较	140
6.3.2	微楔与微叶片的流动分离控制机理	141
6.4	涡流发生器对激波边界层作用所诱导的分离控制研究	145
6.4.1	无控制条件下激波边界层特性	145
6.4.2	涡流发生器控制下激波边界层作用特性	150
6.5	野战火箭弹流体分离的涡流发生器控制研究	158

6.5.1	微楔控制对火箭弹气动系数的影响	160
6.5.2	火箭弹微楔控制机理分析	162
第7章	火箭弹表面流体分离的主动控制	166
7.1	引言	166
7.2	壁面射流与超声速主流作用时的流场结构特性	169
7.2.1	壁面射流物理模型	169
7.2.2	壁面射流结构	170
7.3	激波边界层诱导流体分离的射流控制	180
7.3.1	激波边界层射流的物理模型	180
7.3.2	激波边界层射流控制机理	180
7.4	火箭弹边界层流体分离的射流控制	185
7.4.1	火箭弹边界层射流控制的物理模型	185
7.4.2	火箭弹边界层射流控制分析	186
参考文献		189

第1章

绪论

1.1 引言

野战火箭弹一般指依靠火箭发动机推进的非制导弹药。随着战争的发展与需要,制导火箭弹(Guided Rocket)开始出现,它是在常规火箭弹上加装简易制导装置而成的灵巧弹药。由于常规火箭弹发射管较短,炮口速度低,且在外弹道上仍有推力作用,因而它在飞行过程中受到的扰动因素较多,易偏离预定弹道,从而产生较大的落点散布,导致其不能对点目标进行攻击。而如果用导弹来攻击某些点目标,则在效费方面不合算,且浪费巨大。因而,用常规火箭弹改造而成的制导火箭弹具有非常重要的实用意义。

然而,虽然可通过对常规火箭弹进行简易制导改装,使之成为一种可对点目标具有较高命中概率的低成本灵巧弹药,并以较低代价显著提高其作战效能和作战效费比,但制导火箭弹不是导弹,它的制导能力比导弹弱,且常规的制导方法主要为弹道初始段用简易惯性制导,末段同样采用简易制导修正技术,因而其打击精度比导弹弱。另外,与导弹相比,制导火箭弹仍具有成本低、结构简单、生产使用与维护都很方便等特点。

1.2 野战火箭的主要结构

目前主要研制的野战火箭弹结构一般包括细长体,主要由战斗部、火箭发动机、制导装置与稳定装置组成。雷声公司激光制导火箭弹的典型结构组成如图1-1所示。

战斗部是火箭弹在终点爆炸发挥作战效能的部件,可根据作战目的而采用不同类型的战斗部。目前较流行的有杀爆弹、子母弹、穿甲弹以及云爆战斗部等。战斗部还根据其类型而配备不同类型的引信。火箭发动机则能推动火箭



图 1-1 激光制导火箭弹典型结构

飞行,野战火箭弹的发动机主要采用固体火箭发动机。制导装置是指能控制火箭弹按预定姿态及弹道飞行的装置。稳定装置是指能保障火箭弹稳定飞行的装置,主要包括涡轮稳定装置与尾翼稳定装置。

制导火箭弹是一种介于无控火箭弹与导弹之间的武器弹药,具有发射方便、射程远等特点。火箭弹由于自带火箭发动机,因而可通过设计来提高其射程。另外,它发射过载小,因而可适用于各种不同的发射装置,如管式、轨式、厢式等。另外,制导火箭弹既可对面目标,还可对点目标进行攻击。制导火箭弹对面目标的攻击精度比无控火箭弹高;由于制导火箭弹可在弹道的初始与末端实施制导,依靠导引头接收到的目标反射信号得到目标与弹体之间的偏差信息,通过综合解算处理得出控制指令,控制制导火箭飞向目标,还可实现对点目标的精确打击。

1.3 野战火箭的流场结构

野战火箭主要在空气中飞行,因此其气动流场结构是影响其飞行特性的主要因素之一。空气动力学是流体力学的一个重要分支,主要研究气体的运动以及它们与物体相对运动时相互作用的规律,特别指飞行器在气体中的飞行原理。制导火箭弹飞行过程因其直接力或气舵等产生的气动力作用,其弹道飞行轨迹较常规弹道不同,因而它与气体相互作用的规律更为复杂,需进一步研究以揭示其潜在原理,更好地为未来火箭弹的设计服务。

野战火箭弹的流场结构主要包括火箭弹在各种飞行条件下流场中气体的速度、压力和密度等参数的变化规律。另外,火箭弹所受气动力及其变化规律,以及高超声速条件下气体介质与火箭弹之间所发生的物理化学变化及传热传质规律等内容在研究火箭弹飞行过程中同样必须涉及。

现有弹箭的流场结构研究主要基于计算流体力学领域中的计算空气动力学。空气动力学的发展与航空航天的发展密不可分,航空航天领域要解决的主要问题是减少飞行器阻力,提高其升力及其飞行速度。从理论和实践上研究飞行器与气体相对运动时作用力的产生及其规律,因而需研究飞行器与空气及其他气体之间的相互作用力的产生与变化规律。自从飞机的发明开始,人类一直没有停止过相关研究。关于空气动力学的发展史,相关文献及网上都

有许多介绍,这里不再赘述。值得提出的是,1904年德国著名科学家普朗特(Prandtl)首先提出的边界层概念,极大地推动了空气动力学的发展。空气动力学按流动速度分为亚声速、跨声速、超声速以及高超声速空气动力学。当气体的流动速度小于其声速时,称为亚声速流动;当速度接近或略超声速(即马赫数约等于1)时,称为跨声速流动,跨声速流动的典型特征是激波和膨胀波;顾名思义,超声速空气动力学则研究当流动速度大于声速时的情形;而高超声速流动则指流动速度等于或超过5倍声速(即马赫数等于或大于5)。

一般地,亚声速空气动力学主要用于商用飞机与陆地高速运动体(如赛车及部分商用车等)的设计研究,跨声速及超声速流动主要涉及战斗机、弹箭等飞行器,高超声速流动则主要针对大气层再入飞行的弹箭与航天飞行器等。超声速流动和亚声速流动明显不同。亚声速时,压力波动可以从流场后方传递至前方,而超声速流动的压力波动则无法向上游传递,并被压缩在一个极小的范围内,形成激波。

基于空气动力学得到的控制方程一般为非线性的偏微分方程组。在绝大多数情况下都难以得到解析解,因而需进行数值求解。近年来,随着计算机技术的高速发展,计算空气动力学成为研究弹飞行器气动力作用的主要手段。利用数值方法以及计算流体力学方法,通过计算编程对非线性偏微分方程进行数值求解,得到所需要的各种数据,可省去大量试验所带来的高额成本。最近,因数学模型与数值计算格式的不断完善,加上计算机计算能力的大幅提高,现在已经可以数值模拟流场的方式来取代大部分的空气动力学试验,从而加快了相关飞行器的研制过程,并节省了大量成本。

现代野战火箭弹的飞行主要为超声速以及高超声速飞行,因而其气动流场结构非常复杂,其中包括头部与尾部激波结构、弹体表面层流向湍流转捩、弹体表面流动分离等,所有这些最终导致对其流场的数值模拟与计算非常复杂,因此迫切需要开展相关研究,揭示其流动机理,提高火箭弹的飞行品质。

第2章

空气动力学基本理论

2.1 引言

野战火箭一般在大气中飞行,因而其与气体之间的相互作用对其飞行过程的影响至关重要。主要表现为火箭的气动力及其产生的各项力矩,它们是保证火箭弹飞行品质的重要参数,因此非常有必要介绍空气以及空气动力学的一些相关知识,以进一步了解火箭弹的飞行特性以及与空气的相互作用过程。

地球被一层很厚的大气层包围,自然状态下,大气由混合气体、水汽和杂质组成。除去水汽和杂质的空气称为干洁空气。干洁空气的主要成分为 78.09% 的氮,20.94% 的氧,0.93% 的氩。这三种气体占总量的 99.96%,其他气体含量合计不到 0.1%,这些微量气体包括氦、氖、氦、氙等稀有气体。在近地层大气中,上述气体的含量几乎不变,称为恒定组分。

大气层的空气密度随高度而减小,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。整个大气层随高度不同表现出不同的特点,分为对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层。除此之外,还有两个特殊的层,即臭氧层和电离层。臭氧层距地面 20 ~ 30km,实际介于对流层和平流层之间。这一层主要是由于氧分子受太阳光的紫外线的活化作用造成的,使氧分子变成了臭氧。电离层很厚,大约距地球表面 80km 以上。火箭弹飞行于大气层不同层内时所受的气动力及其飞行特性需分开进行研究。

2.2 气体特性

2.2.1 气体的可压缩性

气体为可压流体,即其密度可在一定范围内变化。严格来讲,真实流体包

括液体都为可压流体,因此真正的不可压流体只是一种理想情况。然而,几乎所有液体以及一些低速流的气体,密度变化相对较小,因而可视为不可压流体。流体的可压性则可通过定义可压系数 τ 来表达:

$$\tau = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2-1)$$

式中: V 为流体控制单元体积; p 为控制单元周边对其的压力。可压系数 τ 根据压缩过程中的情况可定义为等温可压系数 τ_T 与等熵可压系数 τ_s 。

可压系数 τ 为流体的重要特性。一般地,液体的可压系数非常小,如常压下水的等温可压系数 $\tau_T = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, 而气体则为 $\tau_T = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{N}$, 比水大 4 个量级以上。对于单位质量的流体,则 V 变为比容,而密度 $\rho = 1/V$, 因此式 (2-1) 则变为

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (2-2)$$

因此,当流体受到外力 dp 时,其相应的体积变化为 $d\rho = \rho \tau dp$ 。流体因受力而产生流动时,会导致其压力变化。特别对于高速流,压力梯度变化较大。对于液体而言,其密度变化较小,但气体的密度则较大。因而,液体较高的压力梯度在密度变化不大的情况下会产生高速流动,此类流动常视为不可压流动,而气体因其可压系数 τ 较大,较大的压力梯度则可导致密度的变化,同时会产生大速度流动,此类流动则视为可压流动。对于气体,当其流动速度小于声速的 0.3 倍时,即使其可压系数较大,可证明其压力梯度变化较小,因而其密度变化小,此时仍可视为不可压流动。

本书所研究的弹箭飞行速度一般高于马赫数 0.3, 属于可压流动范围,因而其密度为变量。一般地,对于实际情况,若在流动的某一特征尺度范围内的压力变化 dp , 导致密度变化 $d\rho/\rho$, 超过 5% 时的流动则视为可压流动。可压流动常见于弹箭与飞机的飞行和推进流动,并可根据流速的不同分为亚声速、跨声速、超声速以及高超声速流动。

2.2.2 气体的状态方程

空气动力学将气体视为连续介质,只有当气体密度非常低或稀薄流,气体分子之间的平均自由程远大于控制域的特征尺度,且流场中基本没有分子碰撞时,才视为自由分子流。此类流动仅见于高空或特殊实验室的电子束流与低压激光气体流,本书不予讨论。连续介质气体的运动与能量密切相关,因而气体的特性与热力学定律紧密联系。以下结合热力学定律来对气体特性进行相关介绍。

一般地,气体分子在做无规则自由运动时,相互之间存在分子作用力,且力