

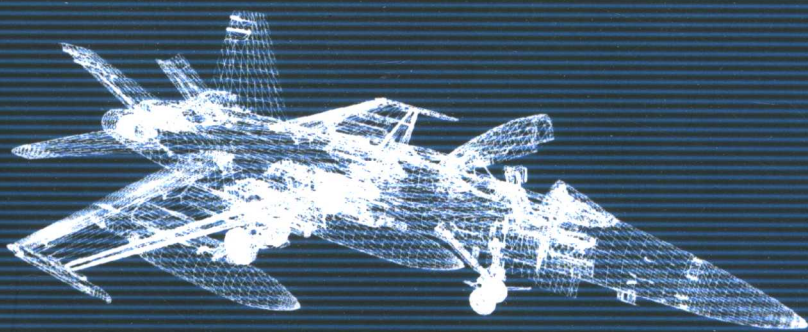
力学



国防科工委「十五」规划教材

# 空气与气体 动力学引论

●李凤蔚 主编



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·力学

# 空气与气体动力学引论

李凤蔚 主编

李凤蔚 宋文萍 杨 永 编著  
李 杰 桑为民

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书阐述空气动力学、气体动力学的基础理论和基本知识。在论述中涉及的速度范围从低速、亚声速、超声速到高超声速；流体流动状态从无黏流、黏性层流到湍流以及旋涡分离流，定常流到非定常流；外流从翼型、机翼、机身、翼身组合体绕流到翼型设计、边条翼和鸭式翼布局；内流从喷管、扩压器流、风洞流到空气动力风洞实验。全书的内容为读者提供了较完整的空气与气体动力学的基础知识。

本书可作为航空、航天院校的飞行器设计与工程专业及兵器、船舶等院校相关专业本科生的教材，亦可供有关专业的研究生、教师、科研人员和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

空气与气体动力学引论/李凤蔚主编. —西安:西北工业大学出版社, 2007. 5

国防科工委“十五”规划教材·力学

ISBN 978-7-5612-2154-9

I. 空… II. 李… III. ①空气动力学—高等学校—教材 ②气体动力学—高等学校—教材 IV. V211.1 O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 056902 号

## 空气与气体动力学引论

李凤蔚 主编

责任编辑 王夏林

责任校对 张蕊

西安工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:020-88493844,88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:37.125 字数:806千字

2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

印数:1~3000册

ISBN 978-7-5612-2154-9 定价:50.00元(平装) 65.00元(精装)

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技





新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴



国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

本书是根据国防科工委“十五”重点教材建设规划的要求编写的。计划学时数为80~120学时。其内容着重于帮助学生理解空气与气体动力学的基本物理概念,讲清问题的实质;在进行严格的理论分析和数学推导的同时,注重阐明其物理内涵,以使学生在学习过程中,既不会感到抽象、乏味,同时又能打下比较坚实的关于空气与气体动力学的理论基础。

在内容安排上,本着循序渐进,以便于学生对知识的消化与吸收的原则。在每一章开始,都先介绍本章的主要内容及各主要内容间的相互联系,并配以图表,形象地表示,使学生先有一个清晰的概念,便于理解与掌握。在每一章节的结束,也都做一个简要的小结,以进一步引导学生有一个系统、深入的理解。每章后均有习题,便于学生加深与巩固对所学知识的理解,同时可培养其独立解决科学与技术问题的能力。

在教材的编写过程中,参考了国内外多种相关教材和讲义,参阅了代表本学科最新发展动态的国内外著作、文献,并融入编者多年教学和科研工作之中的经验与成果。

本书共20章,其中,第1,14,19,20章由李凤蔚教授编写,第9,12,13,15,18章由宋文萍教授编写,第4,5,6,7,8,16章由杨永教授编写,第2,3,10,11,17章由李杰教授、桑为民副教授编写。李凤蔚教授任主编,拟定了编写大纲与目录,并进行了全书的统稿。

在编写过程中,博士、硕士研究生周志宏、李广宁、李少飞、刘强、张坤、解福田、郝海兵、苏剑等同学帮助编著者完成了教材的插图描绘及部分文字录入工作,在此表示感谢。





全书稿由庄礼贤教授、杨岷生教授审阅,提出了许多宝贵意见,在此对他们表示诚挚的谢意。

由于水平有限,本书难免存在缺点和不足,诚请广大读者批评指正。

编著者

2006年9月于西北工业大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 空气与气体动力学的任务、重要性与发展 .....	1
1.2 流体和连续介质假设 .....	4
1.3 流动的类型 .....	14
1.4 流体静力学 .....	17
1.5 流体中运动物体所受的力和力矩 .....	20
1.6 压力中心 .....	21
1.7 小结 .....	22
习题 .....	23
参考文献 .....	23
<b>第 2 章 流体力学的基本原理与基本方程</b> .....	25
2.1 引言 .....	25
2.2 标量场、矢量场及其运算 .....	26
2.3 流体流动的描述方法 .....	33
2.4 连续方程 .....	35
2.5 动量方程 .....	37
2.6 能量方程 .....	38
2.7 流体的流线、流管、迹线 .....	38
2.8 流体运动的加速度、变形、散度和旋度 .....	39
2.9 无旋流、速度势 .....	43
2.10 流函数 .....	44
2.11 环量 .....	45
2.12 涡线、涡面、涡管、毕奥-沙瓦定理 .....	46
2.13 汤姆森定理 .....	48
2.14 亥姆霍兹定理 .....	49
2.15 动量定理 .....	51
2.16 小结 .....	52



习题 .....	52
参考文献 .....	53
<b>第3章 无黏、不可压缩流动基础</b> .....	<b>54</b>
3.1 引言 .....	54
3.2 伯努利方程及其应用 .....	56
3.3 无旋、不可压缩流动控制方程及其边界条件 .....	64
3.4 流动的叠加 .....	67
3.5 均匀流中的源 .....	68
3.6 偶极子 .....	74
3.7 绕圆柱无升力流动 .....	76
3.8 旋涡流 .....	80
3.9 绕圆柱有升力流动 .....	82
3.10 库塔-儒可夫斯基定理 .....	87
3.11 绕任意物体的无升力流动 .....	88
3.12 复变函数在平面势流中的应用 .....	92
3.13 小结 .....	95
习题 .....	98
参考文献 .....	99
<b>第4章 绕翼型不可压缩流动</b> .....	<b>100</b>
4.1 引言 .....	100
4.2 翼型的几何描述 .....	101
4.3 翼型的气动特性 .....	102
4.4 低速翼型绕流解的面涡理论 .....	104
4.5 库塔条件 .....	108
4.6 薄翼理论及无弯度薄翼绕流气动特性 .....	111
4.7 有弯度薄翼绕流气动特性 .....	117
4.8 任意形状翼型绕流的涡面元数值方法 .....	121
4.9 小结 .....	125
习题 .....	127
参考文献 .....	127
<b>第5章 绕有限翼展机翼不可压缩流动</b> .....	<b>128</b>
5.1 引言 .....	128
5.2 下洗和诱导阻力的概念 .....	129



5.3 线涡及其诱导速度 .....	132
5.4 经典升力线理论 .....	134
5.5 小结 .....	151
习题 .....	152
参考文献 .....	153
<b>第 6 章 可压缩流动基础知识 .....</b>	<b>154</b>
6.1 引言 .....	154
6.2 热力学基础知识 .....	156
6.3 无黏、可压缩流动的控制方程 .....	162
6.4 声速 .....	163
6.5 滞止参数的定义 .....	166
6.6 超声速流动的特征——激波 .....	168
6.7 小结 .....	169
习题 .....	171
参考文献 .....	171
<b>第 7 章 正激波 .....</b>	<b>172</b>
7.1 引言 .....	172
7.2 正激波的基本关系式 .....	173
7.3 能量方程的特殊形式、滞止参数、临界参数 .....	175
7.4 流体压缩性的影响 .....	179
7.5 正激波状态参数的计算 .....	181
7.6 可压缩流动中速度的测量 .....	186
7.7 小结 .....	189
习题 .....	190
<b>第 8 章 斜激波与膨胀波 .....</b>	<b>192</b>
8.1 引言 .....	192
8.2 小扰动影响区的划分——马赫锥 .....	193
8.3 斜激波关系式 .....	195
8.4 楔形体和圆锥体的超声速流动 .....	205
8.5 激波干扰与反射 .....	208
8.6 钝头体前的脱体激波 .....	212
8.7 普朗特-迈耶膨胀波 .....	213
8.8 激波-膨胀波理论对超声速翼型的应用 .....	217



8.9 小结 .....	220
习题 .....	221
参考文献 .....	222
<b>第9章 通过喷管、扩压器和风洞的可压缩流动 .....</b>	<b>223</b>
9.1 引言 .....	223
9.2 准一维流动的控制方程 .....	225
9.3 喷管流动 .....	230
9.4 扩压器中的流动 .....	239
9.5 超声速风洞中的流动及边界干扰 .....	241
9.6 小结 .....	246
习题 .....	247
参考文献 .....	248
<b>第10章 绕翼型的可压缩流动 .....</b>	<b>249</b>
10.1 引言 .....	249
10.2 速度势方程 .....	249
10.3 线化的速度势方程 .....	251
10.4 普朗特-格劳尔特压缩性修正 .....	253
10.5 临界马赫数 .....	256
10.6 阻力发散马赫数、音障 .....	257
10.7 超临界翼型 .....	258
10.8 超声速流中的翼型 .....	260
10.9 薄翼型超声速气动特性的线化理论 .....	264
10.10 小结 .....	271
习题 .....	272
参考文献 .....	272
<b>第11章 可压缩流动中的面积律和相似律 .....</b>	<b>273</b>
11.1 引言 .....	273
11.2 可压缩流动中的机翼和机身 .....	273
11.3 后掠角的影响 .....	277
11.4 翼身组合体的跨声速面积律 .....	279
11.5 小结 .....	281
习题 .....	281
参考文献 .....	281



<b>第 12 章 细长旋成体理论</b> .....	282
12.1 引言 .....	282
12.2 旋成体的几何参数及绕流示意图 .....	283
12.3 柱坐标系下的线化速度势方程 .....	286
12.4 轴对称流中细长旋成体的压力分布 .....	290
12.5 小迎角绕流时细长旋成体的压力分布 .....	298
12.6 细长旋成体的气动特性 .....	302
12.7 大迎角绕流时,旋成体横流理论及 N-S 方程数值模拟 .....	306
12.8 小结 .....	310
习题 .....	312
参考文献 .....	314
<b>第 13 章 高超声速流动基础</b> .....	315
13.1 引言 .....	315
13.2 高超声速流动的空气动力学特点 .....	316
13.3 高超声速流动的近似方法及气动特性计算 .....	319
13.4 高超声速飞行器的气动加热和热防护 .....	330
13.5 小结 .....	331
习题 .....	331
参考文献 .....	332
<b>第 14 章 黏性流体力学基础</b> .....	333
14.1 引言 .....	333
14.2 层流与湍流 .....	334
14.3 黏流绕流的流动现象 .....	338
14.4 绕流物体的阻力 .....	342
14.5 流体运动与变形 .....	344
14.6 流体表面应力张量 .....	349
14.7 牛顿流体的应力与应变变化率之间的关系 .....	351
14.8 黏性流体动力学基本方程 .....	354
14.9 小结 .....	363
习题 .....	366
参考文献 .....	368
<b>第 15 章 不可压缩流动中的管道层流与层流边界层</b> .....	369
15.1 引言 .....	369



15.2	定常、不可压缩黏性流动的相似参数——雷诺数	370
15.3	管道中的层流	372
15.4	不可压缩层流边界层方程	374
15.5	沿平板的层流边界层	380
15.6	沿二维曲面的层流边界层	385
15.7	边界层微分方程的近似解法——动量积分关系式方法	390
15.8	小结	402
	习题	404
	参考文献	404
<b>第 16 章</b>	<b>可压缩流动中的层流边界层</b>	<b>406</b>
16.1	引言	406
16.2	边界层中的能量守恒	407
16.3	边界层中的旋度和熵梯度	409
16.4	可压缩边界层的相似性	409
16.5	普朗特数为 1 时的能量方程解	410
16.6	温度恢复因子	413
16.7	由热传输引起的表面摩擦	416
16.8	速度型、温度型和表面摩擦	418
16.9	小结	420
	习题	420
	参考文献	421
<b>第 17 章</b>	<b>流动稳定性和转捩</b>	<b>422</b>
17.1	引言	422
17.2	雷诺实验	422
17.3	流动稳定性的一般理论	424
17.4	边界层转换及影响转换的因素	429
17.5	自然层流和层流控制	433
17.6	小结	434
	习题	434
	参考文献	434
<b>第 18 章</b>	<b>湍流</b>	<b>435</b>
18.1	引言	435
18.2	湍流的流场特性	437





18.3	湍流的连续方程和雷诺方程 .....	441
18.4	湍流模型 .....	445
18.5	湍流边界层方程 .....	450
18.6	管道中完全发展的湍流流动 .....	453
18.7	湍流平板边界层 .....	459
18.8	压缩性对摩擦阻力的影响 .....	464
18.9	雷诺比拟——边界层中的热传输和温度恢复系数 .....	465
18.10	自由剪切湍流流动 .....	468
18.11	湍流分离 .....	471
18.12	切变湍流的拟序结构 .....	472
18.13	湍流减阻 .....	476
18.14	小结 .....	478
	习题 .....	480
	参考文献 .....	480
<b>第 19 章</b>	<b>翼型设计、旋涡空气动力学基础及应用、非定常升力 .....</b>	<b>482</b>
19.1	引言 .....	482
19.2	翼型的种类与气动特性 .....	484
19.3	翼型设计 .....	490
19.4	旋涡空气动力学基础 .....	495
19.5	旋涡空气动力的应用 .....	505
19.6	非定常升力 .....	512
19.7	非定常旋涡流动的主动控制 .....	519
19.8	小结 .....	528
	习题 .....	530
	参考文献 .....	530
<b>第 20 章</b>	<b>量纲分析、相似理论与空气动力实验 .....</b>	<b>533</b>
20.1	引言 .....	533
20.2	量纲分析 .....	533
20.3	相似理论 .....	538
20.4	空气动力实验 .....	544
20.5	小结 .....	546
	习题 .....	547
	参考文献 .....	548



---

附 录 .....	549
附录 A 等熵流特性 .....	549
附录 B 正激波特性 .....	556
附录 C 普朗特-迈耶函数和马赫角 .....	562
附录 D 场论初步 .....	565
附录 E 笛卡儿张量初步 .....	570