



# 导弹空气动力学

## Missile Aerodynamics

苗瑞生 居贤铭 吴甲生 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 导弹空气动力学

Missile Aerodynamics

苗瑞生 居贤铭 吴甲生 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

导弹空气动力学 / 苗瑞生等编著. —北京:国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-03914-4

I. 导... II. 苗... III. 导弹-空气动力学  
IV. TJ760.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 055085 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 19 $\frac{1}{8}$  500 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 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)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

# 前 言

空气动力学是研究在大气中运动的飞行器与空气流之间的相互作用的科学。飞行器包括:浮空器(气球、飞艇),固定翼航空器(飞机、滑翔机),旋翼航空器(直升机、旋翼机),无人驾驶飞行器(火箭、导弹),航天器(航天飞机、飞船、人造卫星)等。空气动力学与所有飞行器的设计都有密切联系。本书主要偏重在火箭、导弹和制导兵器方面。

导弹的气动设计是总体设计的一部分,应满足战术技术指标的规定,沿着预期弹道,按所要求的速度和精度,将有效载荷运送到目标区。导弹一般由弹身、主升力面、稳定面和操纵面等部件组成,应当合理选择它们的几何参数和相对位置,使其具有适当的升阻比、稳定性和操纵性。空气动力设计人员的主要任务是综合应用空气动力理论分析、数值模拟、工程计算、风洞试验和飞行试验等手段,为导弹选择最有利的气动外形布局和几何参数,给出空气动力和力矩随飞行速度、高度和姿态变化的规律,与导弹总体、结构、控制、弹道、推进与发射等学科专业密切配合,共同完成飞行器综合优化设计工作。

本书努力将空气动力学理论、计算和设计在一定篇幅下有机地结合在一起。重点介绍空气动力学在飞行器设计中的应用,帮助读者进一步掌握空气动力学理论,学会从软件计算得到的浩瀚数据中分析出气动机理和气动特性变化的基本规律。

本书共分为9章。第1章~第5章为空气动力学基础,包括基本知识、低速流动、高速流动、薄翼-细长体绕流和粘性流动。第6章~第9章为飞行器气动设计与计算,包括气动外形布局分

析、空气动力和力矩系数计算方法、气动部件选形与设计等。

中国工程院于本水院士对本书编写给予了热情帮助,并对书稿进行了评阅和指导。在此表示诚挚的感谢。

本书主要为航天、航空和兵器部门从事战术火箭、导弹与制导兵器研制工作的科技人员和高等院校研究生与高年级本科生编写,也适用于飞行器总体设计、系统工程、空气动力学与飞行力学、控制系统与仿真等专业。

本书内容曾作为研究生教材讲授过多次,但正式成书出版尚属首次。限于水平,书中难免有失误和处理不当之处,欢迎专家和广大读者不吝指正。

苗瑞生 居贤铭 吴甲生

2005年6月

于北京理工大学



# 目 录

主要符号表	1
第 1 章 基本知识	3
§ 1.1 空气动力学的对象和任务	3
§ 1.2 气体的物理性质	7
§ 1.3 地球标准大气	15
§ 1.4 连续方程	17
§ 1.5 动量方程	18
§ 1.6 位流方程	26
§ 1.7 能量方程	28
§ 1.8 流体动力相似准则	31
§ 1.9 空气与飞行器的相互作用	35
第 2 章 低速流动	40
§ 2.1 旋涡运动定理	40
§ 2.2 平面不可压缩位流	51
§ 2.3 流体作用在刚体表面的力	65
§ 2.4 保角转绘法	68
§ 2.5 库塔条件	72
§ 2.6 翼型绕流的涡层理论	80
§ 2.7 三维薄翼理论	88
第 3 章 高速流动	104
§ 3.1 一维定常等熵流动	104
§ 3.2 正激波与斜激波	109
§ 3.3 二维超声速定常等熵位流	119
§ 3.4 轴对称超声速定常等熵位流	127

§ 3.5	圆锥激波与绕流 .....	130
<b>第 4 章</b>	<b>薄翼 - 细长体绕流</b> .....	<b>137</b>
§ 4.1	薄翼型的亚声速绕流 .....	137
§ 4.2	薄翼型的超声速绕流 .....	142
§ 4.3	薄翼型的跨声速绕流 .....	149
§ 4.4	三维薄翼的亚声速绕流 .....	151
§ 4.5	三维薄翼的超声速绕流 .....	155
§ 4.6	三维薄翼绕流相似准则 .....	172
§ 4.7	细长弹身的亚声速绕流 .....	178
§ 4.8	细长弹身的超声速绕流 .....	195
§ 4.9	翼 - 身组合体的绕流 .....	205
§ 4.10	舵 - 身组合体的绕流 .....	222
<b>第 5 章</b>	<b>粘性流动</b> .....	<b>234</b>
§ 5.1	粘性层流 .....	234
§ 5.2	准定常粘性湍流 .....	239
§ 5.3	粘性附面层 .....	247
§ 5.4	附面层微分方程 .....	251
§ 5.5	附面层积分方程 .....	260
§ 5.6	分离流动 .....	267
<b>第 6 章</b>	<b>飞行器气动布局分析</b> .....	<b>279</b>
§ 6.1	气动布局方案 .....	279
§ 6.2	操纵机构的类型 .....	291
§ 6.3	平面翼与十字翼 .....	299
§ 6.4	平直翼与卷弧翼 .....	309
§ 6.5	空气动力特性的比较 .....	322
§ 6.6	飞行力学特性的比较 .....	335
§ 6.7	结构布局的比较和总的评价 .....	342
§ 6.8	面面导弹气动布局 .....	345
§ 6.9	面空导弹气动布局 .....	353
§ 6.10	空面导弹气动布局 .....	359

§ 6.11 空空导弹气动布局·····	362
<b>第 7 章 空气动力系数及导数</b> ·····	<b>364</b>
§ 7.1 升力系数 ·····	364
§ 7.2 升力系数对攻角的导数 ·····	366
§ 7.3 升力系数对舵偏角的导数 ·····	393
§ 7.4 大攻角下的升力系数 ·····	401
§ 7.5 “十”字形翼导弹的升力系数 ·····	409
§ 7.6 侧向力系数 ·····	418
§ 7.7 阻力系数 ·····	419
§ 7.8 弹身零攻角下的阻力系数 ·····	421
§ 7.9 升力面零攻角零舵偏角下的阻力系数 ·····	441
§ 7.10 诱导阻力系数·····	453
<b>第 8 章 空气动力矩系数及导数</b> ·····	<b>463</b>
§ 8.1 俯仰力矩系数 ·····	463
§ 8.2 导弹对攻角的焦点 ·····	474
§ 8.3 导弹对舵偏角的焦点 ·····	482
§ 8.4 大攻角和大舵偏角时的压心 ·····	483
§ 8.5 导弹绕 $z$ 轴转动时的俯仰力矩 ·····	484
§ 8.6 偏航力矩系数 ·····	497
§ 8.7 滚转力矩系数 ·····	509
§ 8.8 舵面的铰链力矩 ·····	538
<b>第 9 章 气动部件的选形与设计</b> ·····	<b>546</b>
§ 9.1 弹翼几何参数的选择 ·····	547
§ 9.2 舵面与旋转弹翼几何参数的选择 ·····	564
§ 9.3 弹身几何参数的选择 ·····	566
§ 9.4 导弹的稳定与平衡 ·····	573
§ 9.5 减少气动加热的空气动力学方法 ·····	583
§ 9.6 气动弹性对导弹气动布局的影响 ·····	585
<b>参考文献</b> ·····	<b>590</b>

# Contents

<b>Noneclature</b> .....	1
<b>Chapter 1 Some Introductory Knowledge</b> .....	3
1.1 Object and Mission of Aerodynamics .....	3
1.2 Physical Properties of Gas .....	7
1.3 Standard Atmosphere .....	15
1.4 Continuity Equation .....	17
1.5 Momentum Equation .....	18
1.6 Velocity Potential Equation .....	26
1.7 Energy Equation .....	28
1.8 Fluid Dynamic Similarity Rule .....	31
1.9 Interaction of Air Flow with Flying Vehicle .....	35
<b>Chapter 2 Low Speed Flow</b> .....	40
2.1 Theorem of Vortex Motion .....	40
2.2 Planar Incompressible Potential Flow .....	51
2.3 Fluid Force acting on a Solid Surface .....	65
2.4 Conformal Mapping .....	68
2.5 Kutta Condition .....	72
2.6 Vortex Layer Theory of Thin Aerofoil .....	80
2.7 Three-Dimensional Thin Wing Theory .....	88
<b>Chapter 3 High Speed Flow</b> .....	104
3.1 One-Dimensional Steady Isentropic Flow .....	104
3.2 Normal and Oblique Shock Waves .....	109
3.3 Two-Dimensional Supersonic Steady Isentropic Potential Flow .....	119

3.4	Axially Symmetric Supersonic Steady Isentropic Potential Flow .....	127
3.5	Conical Shock Wave and Cone Flow .....	130
<b>Chapter 4</b>	<b>Thin Wing-Slender Body Aerodynamics</b> .....	137
4.1	Thin Aerofoil at Subsonic Speeds .....	137
4.2	Thin Aerofoil at Supersonic Speeds .....	142
4.3	Thin Aerofoil at Transonic Speeds .....	149
4.4	Three-Dimensional Thin Wing at Subsonic Speeds .....	151
4.5	Three-Dimensional Thin Wing at Supersonic Speeds .....	155
4.6	Similarity Rule of Three-Dimensional Thin Wing .....	172
4.7	Slender Body at Subsonic Speeds .....	178
4.8	Slender Body at Supersonic Speeds .....	195
4.9	Flow around Wing-Body Combination .....	205
4.10	Flow around Control Surface-Body Combination .....	222
<b>Chapter 5</b>	<b>Viscous Flow</b> .....	234
5.1	Viscous Layer Flow .....	234
5.2	Quasi-Steady Turbulent Flow .....	239
5.3	Viscous Boundary Layer .....	247
5.4	Differential Equations of Boundary Layer .....	251
5.5	Integration Equations of Boundary Layer .....	260
5.6	Separated Flow .....	267
<b>Chapter 6</b>	<b>Analysis on Aerodynamic Configuration</b> .....	279
6.1	Aerodynamic Configuration Scheme .....	279
6.2	Classification of Control Mechanism .....	291
6.3	Planar and Cruciform Wing .....	299
6.4	Planar and Wrap-around Wing .....	309

6.5	Comparison of Aerodynamic Characteristics .....	322
6.6	Comparison of Flight Mechanic Characteristics ...	335
6.7	Comparison of Structural Arrangement and Overall Evaluation .....	342
6.8	Aerodynamic Configuration Scheme of Surface-to-Surface Missiles .....	345
6.9	Aerodynamic Configuration Scheme of Surface- to-Air Missiles .....	353
6.10	Aerodynamic Configuration Scheme of Air-to- Surface Missiles .....	359
6.11	Aerodynamic Configuration Scheme of Air-to-Air Missiles .....	362
<b>Chapter 7</b>	<b>Aerodynamic Coefficients and its Derivatives ...</b>	<b>364</b>
7.1	Lift Coefficient .....	364
7.2	Derivative of Lift Coefficient at Angle of Attack .....	366
7.3	Derivative of Lift Coefficient at Angle of Control Deflection .....	393
7.4	Lift Coefficient at Large Angle of Attack .....	401
7.5	Lift Coefficient of Missile with Cruciform Wing ...	409
7.6	Side-Wind Force Coefficient .....	418
7.7	Drag Coefficient .....	419
7.8	Drag Coefficient of Body at Zero Angle of Attack .....	421
7.9	Drag Coefficient of Lift Surface at Zero Angle of Attack and Zero Angle of Control Deflection .....	441
7.10	Induced Drag Coefficient .....	453
<b>Chapter 8</b>	<b>Aerodynamic Moment Coefficients and Its Derivatives .....</b>	<b>463</b>
8.1	Moment Coefficient in Pitch .....	463

8.2	Aerodynamic Focus of Missile due to Angle of Attack .....	474
8.3	Aerodynamic Focus of Missile due to Angle of Control Deflection .....	482
8.4	Center of Pressure at Large Angle of Attack and Large Angle of Control Deflection .....	483
8.5	Moment in Pitch due to Rotation about oz axis ...	484
8.6	Moment Coefficient in yaw .....	497
8.7	Moment Coefficient in roll .....	509
8.8	Hinge Moment of Control Surface .....	538
<b>Chapter 9 Selection and Design of Aerodynamic Components .....</b>		
	<b>Components .....</b>	<b>546</b>
9.1	Selection of Geometric Parameter to Wing .....	547
9.2	Selection of Geometric Parameter to Control Surface and Rotating Wing .....	564
9.3	Selection of Geometric Parameter to Body .....	566
9.4	Stability and Balance of Missile .....	573
9.5	Aerodynamic Method to Reduction of Aerodynamic Heating .....	583
9.6	Effect of Aerodynamic Elasticity to Aerodynamic Configuration Scheme .....	585
<b>References .....</b>		<b>590</b>

# 主要符号表

$a$	声速;系数	$I$	旋涡强度;冲量
$A$	面积;系数	$J$	热功当量
$b$	翼弦;系数	$k$	系数
$b_A$	平均气动弦	$k_T$	气流阻滞系数
$c$	翼型厚度;系数	$K$	升阻比
$c_f$	摩阻系数	$K_n$	克努森数
$c_F$	吸力系数	$l$	翼展;特征尺寸;分子平均自由程
$c_p$	压力系数	$l_k$	外露翼展
$c_x$	轴向力系数	$L$	长度
$c_y$	法向力系数	$m$	质量;系数
$c_z$	横向力系数	$m_x$	滚转力矩系数
$c_{xa}$	阻力系数	$m_y$	偏航力矩系数
$c_{ya}$	升力系数	$m_z$	俯仰力矩系数
$c_{za}$	侧向力系数	$M$	力矩
$C_p$	比定压热容	$Ma$	马赫数
$C_v$	比定容热容	$n$	过载;舵相对效率
$D$	直径;特征尺寸	$Nu$	努塞尔数
$e$	比内能	$p$	压强
$E$	物理量;弹性模量	$P$	推力
$f$	质量力;翼型弯度;函数	$Pr$	普朗特数
$f_c$	频率	$q$	热量;动压
$F$	力;函数;面积	$Q$	体积流量
$Fr$	弗劳德数	$R$	气体常数;合力
$h$	比焓	$Re$	雷诺数
$H$	总焓;高度		



$s$	比熵	$\rho$	密度
$S$	面积	$\sigma$	面积;湍流度;系数
$St$	斯特劳哈尔数	$\tau$	摩擦应力;翼型后缘角
$St$	斯坦顿数	$\phi$	速度位;安装角
$t$	时间;摄氏温度	$\chi$	后掠角
$T$	绝对温度;周期	$\psi$	流函数;上反角
$U$	流速	$\omega$	角速度
$V, v$	体积;速度	下标:	
$W$	功;加速度;复位函数	$o$	气流滞止参数;原点;初始值
$u, v, w$	速度分量	$a$	喷管出口气流参数;副翼参数
$x, y, z$	直角坐标	$av$	平均值
$X, Y, Z$	空气动力分量	$b$	底部
$x_F$	焦点坐标	$B$	弹身
$x_p$	压力中心坐标	$c$	圆柱部
$x_m$	质心坐标	$cr$	临界状态参数
$\alpha$	攻角;热交换系数	$e$	边界参数
$\beta$	侧滑角;激波倾斜角	$l$	下表面;层流
$\gamma$	滚转角;热容比	max	最大值
$\Gamma$	速度环量	min	最小值
$\delta$	附面层厚度;舵偏角	$n$	法向;头部
$\epsilon$	气流下洗角	opt	最优值
$\zeta$	Z向坐标;系数	$r$	舵面
$\eta$	Y向坐标;根梢比;收缩比; 系数	$s$	侧面
$\theta$	倾斜角	sec	剖面
$\kappa$	热传导率;升力比	$t$	湍流;转捩;尾部
$\lambda$	速度系数;展弦比;长径比	$T$	尾翼
$\mu$	动力粘性系数;马赫角;相 对质量	$u$	上表面
$\nu$	运动粘性系数;系数	$w$	壁面;波
$\xi$	X向坐标;系数	$W$	弹翼
$\Pi$	位能	$\infty$	未扰动气流参数
		$x, y, z$	沿 $x, y, z$ 方向的分量
		$\tau$	切向