

进气道空气动力学

进气道空气动力学

(英) J. 塞登 E.L. 戈德史密斯 著

骆长天 涂鼎立 译
程大光 于业波

张世英 骆长天 审校

译 者 序

自从喷气式飞机问世以后，进气道就成为喷气式飞机的一个重要部件。随着飞行速度的增大，甚至成倍于音速的增加，进气道的设计就显得越来越复杂，越来越重要。今天，随着航空航天事业的发展，进气道不仅是喷气式飞机，而且也是装有吸气式发动机的战术导弹、巡航导弹乃至航天飞机的重要部件。因此，可以说进气道设计不仅在航空领域已有广泛的应用，而且在航天领域也有着不可估量的前景。

进气道是连系飞机（或飞行器）和发动机的部件，学科上偏重于内流空气动力学，在气动力上它与飞机和发动机都有所不同，因此多年来在专业上处于飞机和发动机的边缘。随着航空事业的发展，进气道设计越来越显示出它的独特性质，进气道空气动力学作为一门学科在理论上和实践上也越来越丰富和发展，因此很需要有一部完整的进气道空气动力学论著为教学、科研和工程设计服务。J.塞登和E.L.戈德史密斯的《进气道空气动力学》一书问世为该学科的发展填补了空缺，是第一部全面论述进气道空气动力学的专著。

本书全面论述了各种不同型式进气道内、外流动的基本理论；外部和内部超音速压缩；超音速进气道的附加损失；附面层控制；进气道外部阻力；进气道嗡鸣、畸变与旋流；进气道与发动机匹配和进气道调节；迎角影响；进气道的特殊设计措施以及进气道的风洞试验技术等。本书综合、实用，既有理论，又有实践，重视流动现象的物理描述，列举了大量的计算和试验资料，分析中所用公式也主要是一些比较简单实用的理论公式和经验公式，从而能够从基本的流体动力学上分析和认识问题的实质。本书不仅收集了国外的大量研究成果，也收入了我国专家的部分研

究成果，特别是南京航空学院郭荣伟教授（现任南京航空学院副院长）在研究进气道旋流问题上获得的成果，已成为本书第十一章中的重要内容。本书每章末尾列出了许多有关的参考文献，可供读者深入研究使用。本书对于从事各种进气道研究和设计的科研人员、工程师来说无疑是一部很有价值的专业书；对于高等院校有关专业的师生也可作为辅助教材和参考书。

翻译过程中发现了原书有少量错误，我们已做了改正。

本书由骆长天翻译第九、十、十一章；涂鼎立翻译原版前言、作者序言、符号表和第三、四、五、六章；程大光翻译第十二、十三、十四、十五章；于业波翻译第一、二、七、八章。涂鼎立、刘守仁、程大光、于业波分别担任了初校工作。全书最后由张世英、骆长天总审校。由于水平有限，疏漏错误在所难免，肯请读者批评指正。

在本书的翻译出版过程中，得到航空航天工业部科学技术研究院顾诵芬副院长的支持和指导，并得到六〇一所科技情报档案室高惠芳主任和编辑出版组张文占、李广恩等同志的支持和协助，在此深表感谢。

骆长天

1991年12月

目 录

前言	1
序言	2
符号表	6
缩略语表	15
第一章 绪论	17
1.1 实用的流动关系式	17
1.2 不可压流	19
1.3 动量定理	20
1.4 空气动力管道概念	22
1.5 通过空气动力管道的流量	23
1.6 进气道压力恢复	27
1.7 进气道阻力：设计上的折衷	31
第二章 亚音速进气道的压力恢复	35
2.1 引言	35
2.2 收集的数据	38
2.3 摩擦损失的近似理论	38
2.4 μ^3 变化的研究	45
2.5 扩压段的系统研究	49
2.6 压力恢复特性	49
2.7 集气室	53
2.8 涡轮螺桨发动机	56
2.9 双进口进气道的流动稳定性	60
2.10 直升机进气道	63
第三章 进口前流动中的跨音速效应	68

3.1	初步预计	68
3.2	戴维斯等人的试验	70
3.3	进口前流动的实际特征	71
3.4	分离处的压力系数	73
3.5	分离对进气道压力恢复的影响	80
3.6	正激波和紊流附面层干扰的基础	84
第四章	唇缘分离和跨音速喉道流动	95
4.1	引言	95
4.2	计算方法	96
4.3	$A_\infty/Ac < 1$ 时的跨音速喉道流动	98
4.4	$A_\infty/Ac > 1$ 时的唇缘设计	100
4.5	总压损失的估算	110
4.5.1	进口附着流	110
4.5.2	进口分离流	113
4.5.3	分离流动的特殊状态	120
4.6	实际进气道的静态损失	126
第五章	外部超音速压缩	131
5.1	皮托管式进气道	131
5.2	二波系进气道	135
5.3	多波系进气道	142
5.4	等熵压缩	147
5.5	外压缩限制	149
5.5.1	在没有管道偏转角条件下的外部激 波附体	149
5.5.2	内部激波附体	151
5.5.3	激波结构	155
5.6	进气道A和进气道B	157
5.7	亚临界工作状态下的正激波位置	159

5.7.1	皮托管式进气道	159
5.7.2	二波系进气道	164
5.8	亚临界状态压力恢复的计算	167
第六章	内部超音速压缩	171
6.1	气流启动问题	171
6.2	收缩比限制	173
6.3	多孔式进气道	175
6.4	保证气流启动而设计的可变几何形状 进气道	177
6.5	进气道型式和压力恢复限制	177
6.6	混合压缩进气道: C型和D型	181
6.7	某些设计、性能和工作问题	183
第七章	超音速进气道的附加损失	193
7.1	引言	193
7.2	皮托管式进气道	193
7.3	侧面进气道	194
7.4	外压缩进气道: 干扰公式的运用	195
7.5	轴对称进气道拐弯损失的经验分析	198
7.6	对于圆柱形外罩特殊情况的无粘流理论	202
7.7	二元进气道的情况	204
第八章	附面层抽吸装置和隔道	215
8.1	概述	215
8.2	与进气道性能相关的参数	220
8.3	飞机附面层的排除	221
8.3.1	正激波进气道	221
8.3.2	外压缩进气道	223
8.4	压缩面抽吸	226
8.4.1	外压缩	226

8.4.2	内压缩或混合压缩	231
8.5	抽吸阻力	234
8.5.1	流动型式	234
8.5.2	动量方程的应用	235
8.6	隔道阻力	240
第九章	进气道外阻	246
9.1	引言	246
9.2	推力和阻力的定义	246
9.3	低于临界马赫数的亚音速进气道阻力	250
9.4	高的阻力增长马赫数外罩的设计	254
9.4.1	亚临界设计	254
9.4.2	超临界设计	258
9.5	溢流阻力	261
9.5.1	一般原理	261
9.5.2	亚音速时的皮托管进气道	266
9.5.3	跨音速皮托管进气道	266
9.5.4	超音速皮托管进气道	270
9.5.5	预估方法	272
9.5.6	外压缩进气道	275
9.6	外罩压力阻力	281
9.6.1	轴对称尖唇口外罩	282
9.6.2	二元尖唇口外罩	293
9.6.3	钝唇口外罩	294
第十章	超音速进气道的激波振荡	301
10.1	引言	301
10.2	概述	302
10.3	嗡鸣的产生	303
10.3.1	费里涡面准则	303

10.3.2	压缩面气流分离	308
10.3.3	压力斜率准则	309
10.3.4	动态稳定性理论	312
10.4	嗡鸣的防止	313
10.5	其它激波振荡形式	321
第十一章	畸变和旋流	327
11.1	引言和历史记载	327
11.2	总压畸变	330
11.2.1	稳态流动准则	330
11.2.2	动态畸变	334
11.2.3	进气道需要考虑的问题	335
11.3	旋流	344
11.3.1	流动的内在本质	345
11.3.2	敏感性和潜在的相关性	348
第十二章	匹配和调节	356
12.1	亚音速进气道	356
12.2	超音速进气道问题的性质	357
12.3	可用流量和需用流量	359
12.4	可变几何形状及实例	362
12.5	其他复杂问题: 一个实例	364
12.5.1	协和号进气道	366
12.5.2	高速飞行时的匹配	369
12.5.3	瞬变过程	371
12.6	冲压发动机进气道的匹配	373
第十三章	迎角状态下的进气道	377
13.1	引言	377
13.2	分离和再附着边界	380
13.3	内部损失	385

13.4	进口形状的影响	387
13.4.1	唇口形状	387
13.4.2	可变几何形状唇口	389
13.4.3	横截面形状	389
13.4.4	斜罩形进口	390
13.5	超音速时迎角的影响	394
13.5.1	皮托管式进气道	394
13.5.2	楔面压缩进气道	395
13.5.3	锥体压缩进气道	399
13.6	进气道的遮蔽	400
第十四章	新颖的设计方案和措施	411
14.1	引言	411
14.2	进气道几何形状	411
14.2.1	从平面激波流场导出的压缩面	411
14.2.2	隆起式进气道	413
14.2.3	扁斗式进气道	415
14.3	改善特定性能特性的设计方案	419
14.3.1	增大迎角状态下的压力恢复	419
14.3.2	减少外罩波阻	423
14.4	可变几何形状	427
14.4.1	台阶抽吸式进气道	427
14.4.2	锥形流设计措施	428
14.4.3	多功能可变几何形状	432
14.5	流体喷射	433
14.5.1	附面层吹除	433
14.5.2	等温压缩	434
14.5.3	喷水辅助匹配	440
第十五章	风洞试验和分析技术	444

15.1	模型和试验的类型	444
15.2	内流特性	450
15.2.1	流量比和压力恢复的测量	450
15.2.2	压力恢复的计算	453
15.2.3	流量比的计算	458
15.2.4	流量测试装置的标定	461
15.3	相容性特性	462
15.4	外部力和力矩	467
15.4.1	内流影响的修正	467
15.4.2	用测力法测量阻力	468
15.4.3	用尾流参数的横向分布计算溢流阻力	474
15.4.4	用测压曲线计算外罩阻力	474
15.5	进气道部位的局部流场	475

前 言

《进气道空气动力学》是英国国防部前任科研局（航空）局长 J. 塞登和皇家航空研究院（英，贝德福德）的 E. L. 戈德史密斯所著，由美国航空航天学会（AIAA）出版，作为其新近设立的教科书和专论教育丛书的新增书刊。塞登和戈德史密斯对飞机和导弹燃气涡轮发动机或冲压发动机的进气道内部及其周围的流体力学问题作了全面论述。这本书是以前出版的这一丛书中《燃气涡轮和火箭推进系统气动热力学》与《飞机发动机部件气动热力学》等教科书的姐妹篇。

AIAA 教育丛书体现了该学会对航空与航天学中一些专业性很强的学科所需要的教科书与专著的重视。这本书包罗了广泛、重要的题目，涉及到把进气道设计集成到推进系统，保证最大的气动力和推进效率。这些题目包括：在各种不同型式的进气道内及其周围的亚音速、跨音速和超音速流的基本理论；外部和内部超音速压缩；超音速进气道损失；附面层抽吸与隔道；进气道外部气动阻力；进气道激波振荡；畸变与旋流；进气道匹配与调节；迎角的影响；进气道的特殊措施以及进气道吹风模型的风洞试验与分析技术。塞登和戈德史密斯的这本书对于从事实际设计工作的工程师和气动力研究专家探索更好的进气道设计方案将有重大价值。

本书由美国航空航天学会和联合王国柯林斯专业与技术书社联合出版。

AIAA 教育丛书主编：J. S. 普尔泽梅尼斯克

序 言

就本书的书名，作者需要对大西洋彼岸的读者作一简要解释。对多年来各国之间已作了许多有价值的交流和合作的一个技术领域，使用英语的国家对本书的主题一直坚持使用不同的名称，这一点是令人感到惊讶但又确实是存在的。在英国，我们把研究的对象称作“intake”，在美国则称作“inlet”。至于空气是取入还是让入，在语义上无疑是有争议的，从逻辑上看，争议的优势显然在美国一方，但经过适当考虑后，出于对祖国的忠诚还是保留了英国传统的专用术语。

进气道空气动力学这门学科自第二次世界大战以来，随着喷气发动机本身的发展而同时发展起来，但最初大量吸取了活塞式发动机飞机冷却系统空气动力学的早期经验和背景材料。40年代后期超音速飞行的出现使进气道的研究进入了开始发展的阶段，所围绕的中心题目是激波系的效率。基于内流与外流要求之间必要的折衷，评定了激波系所能达到的实际极限效率。之后，便开始了飞机姿态和局部流场影响的研究，对进气道与发动机之间气流相容性的问题更加关注。研究工作者对这一学科一直是十分关注的，而且大体上每10年出现一次重大突破。40年代和50年代的两个突破是：（1）溢流阻力的客观存在——溢流阻力问题不仅限于超音速，但在该学科研究进入到超音速领域之前，实际上是不知道的；（2）进气道激波振荡现象——这一现象美国口语称作“嗡鸣”，已被广泛采用，本书中也采用了这一术语。60年代后期，动态畸变的重要性变得明显起来。到70年代后期，又意外地出现了旋流问题。这一问题仅限于某些型式的进气道，但在亚音速和超音速条件下都会出现。上述问题没有一个得到完全解

决，本书将对所有这些问题进行探讨。

可以为过去没有这个学科的教科书作一些解释。进气道处于连接飞机又连接发动机的地位，在空气动力学方面是连续的统一体。但进气道空气动力学作为一门学科，其重要性既不同于飞机也不同于发动机。飞机机体空气动力学和压气机空气动力学都主要基于升力作用，较少基于阻力作用。而进气道则相反，在内流中总压损失起着阻力作用，而在外流中基本上就是阻力，必须对它进行评估，并在设计上往往影响到最终的折衷方案。这种完全偏重于阻力的情况使这一学科受紊流附面层特性的影响很大，因而主要依赖于实验，而且由于附面层常常处于很大逆压梯度下，气流分离很少发散，因而不同于经典的机翼空气动力学。比如，对机翼来说，分离的出现一般标志着使用的极限，而进气道往往需要在分离流状态下满意地工作。因此从实用观点来看，精确理论是很难找到的，设计者比较注重经验总结。但随着更多证据的积累，这类经验的适用性又变成值得怀疑的。

我们感到现在已面临这样一种形势，应为这门学科编辑一套综合实用的论著，以服务于学生的入门教育和作为科研工作者和设计工程师的可靠助手，并显示出对一重要课题的流体动力学所具有的无容置疑的兴趣。本书便是第一部这样的编著。库奇曼和韦伯（1953年）仅仅探讨过这门学科有关亚音速进气道方面的问题；赫尔曼（1956年）建立了无粘流超音扩压器理论；1958年，法布里编纂了一套AGARD丛书，包括一套很好的（虽然有必要精炼）截至当时的有关超音速进气道问题的说明，在北约组织《航空研究与发展咨询组》燃烧专业组的一次学术会议上已发表。接着还有其它AGARD专业会议录出版物，这些出版物都从高的起点探讨了该学科某些特殊问题。本书从一开始就包括亚音速进气道和超音速进气道两者在真实气流中的空气动力学问题，尤其当应用到附面层性质的研究时，其目的是显示通过跨音速范

围时的连续性。书中既探讨了内流也探讨了外流，并包括民用和军用两类应用情况。

本书是根据塞登近几年在布里斯托尔大学对最后一年理学士生和应邀参加的飞机和发动机工业部门来访学者讲课教程编写的。这个教程旨在从基本原理上介绍该学科流体动力学。在本书中，题目论述得较深入而且列入了另外的研究资料，这些资料相当可靠而且新颖，这主要是戈德史密斯所作的贡献。因此，希望这本书作为一本参考书能使大学生和研究生，能使工业部门和研究院所的科研工作者以及设计工作者们都感兴趣。

没有很高深的数学表述，自始至终强调的是描述流动的物理图画。在这一基础上，读者便可进一步详细参看原来作者的论文，对于现代数值计算方法的应用尤其是这样。主要的常用手段是比较简单的公式，这些公式通常是经验性的但对于实际应用是有效的，而且在其推导和所包含的内容范围内展示了基本的流体力学问题，因而能够了解问题的实质。

本书内容的安排，前八章研究内流（进入发动机的气流，从初始自由流状态开始），一般进程是从亚音速经过跨音速到超音速。接下去探讨有关外部阻力的问题，这一部分在逻辑上同样应分成若干章来处理各个不同的方面，但由于大多数项目之间有着紧密的相互联系，我们决定将这一专题放在单独的一章范围内，以便尽可能保证连续性和相互间的联系。这样分节稍多一些，但能大致地保持亚、跨、超音速的顺序。按照这一方法建立内部性能和外部性能的基本原理，此后无论何时需要便可参考。然后，本书转入到有关实际折衷设计研究的其它方面。这些方面涉及到流动品质（畸变、旋流和嗡鸣）、发动机与进气道匹配和迎角的影响。近几年来，这几方面的重要性日益增长。第十四章介绍了近几年来出现的一些新奇的进气道设计概念。第十五章讨论进气道专用的风洞试验与分析技术。

本书没有包括在安装状态下发动机吊舱和机体之间的气动力干扰问题。在亚音速条件下，特别是马赫数接近1.0时，发动机吊舱、支柱和机翼或机身之间存在干扰作用，通常是使阻力增大，但常常又改变了飞机的升力和力矩特性。在超音速下，必须考虑进气道激波碰到机翼或机身的问题。条件适合时，干扰可能是有利的，至少在原理上是这样。然而，除特定情况外，干扰问题很难作出定量分析，而且，一般需要考虑整个发动机舱而不是简单地只考虑进气道，这又涉及到后体和尾喷管气流的空气动力学，而这就超出了本学科的范围。

每一章末尾列出了参考文献，其中许多尚未出版但还是引用了，因为读者可能有机会看到或得到这些文献。正文和参考文献中用的缩略语——大多取研究机构和学会的首写字母构成——可参见缩略语表，表中注明了各机构总部的地址。

我们很乐意收到读者指出的有关任何错误或遗漏的书面意见或看法，以便再版时予以注意。

J. 塞登

E.L. 戈德史密斯