

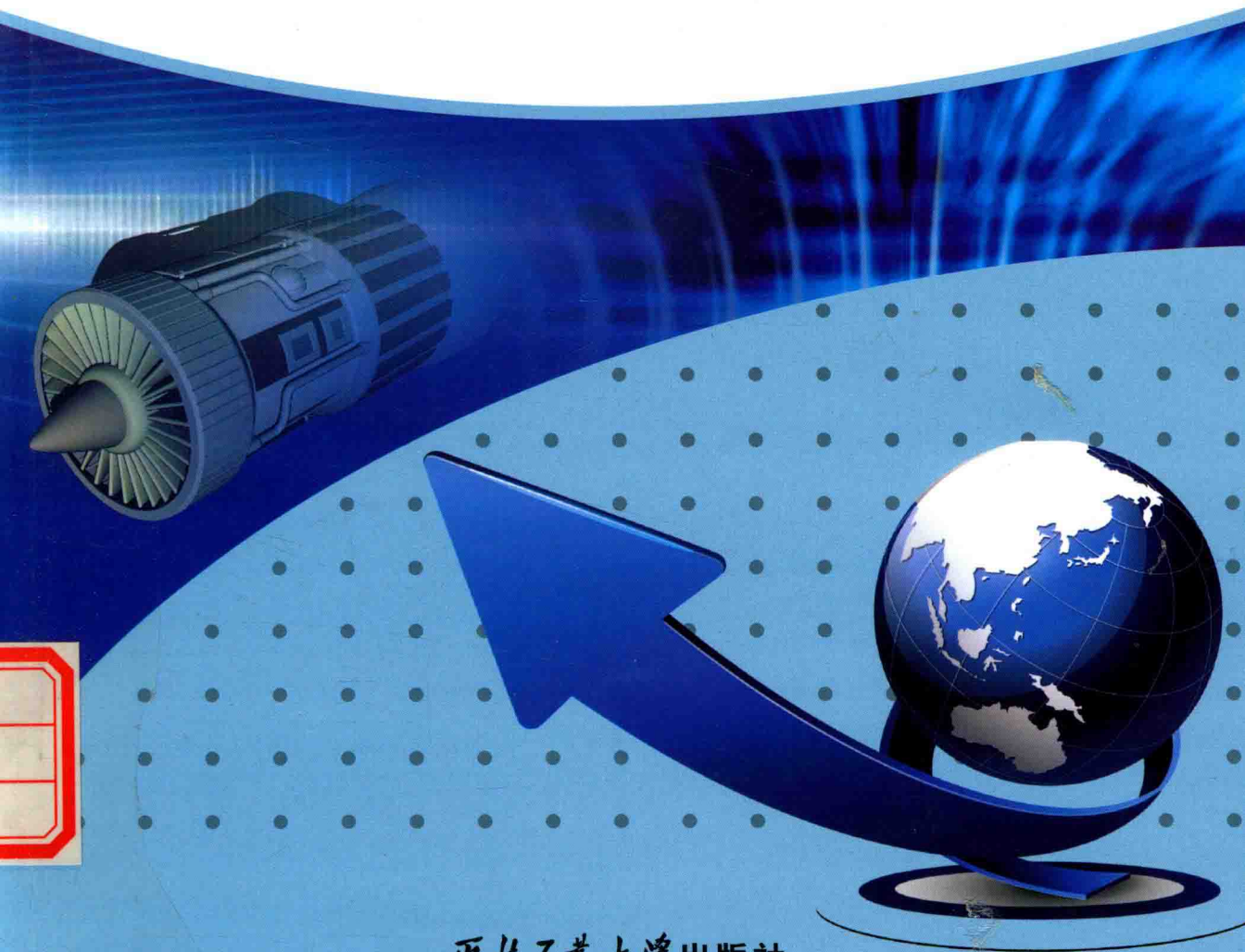


工业和信息化部“十二五”规划教材

航空发动机气动声学

(第2版)

乔渭阳 王良锋◎编著



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

HANGKONG FADONGJI QIDONG SHENGXUE

航空发动机气动声学

(第2版)

乔渭阳 王良锋 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 气动声学是气动力学和声学交叉产生的一门新兴的航空科学技术领域分支学科,航空发动机气动噪声则是气动声学的主要研究对象。本书从气动力学和气动声学的基本理论出发,研究了当代航空动力装置(叶轮机、喷流、燃烧、螺旋桨等)气动噪声产生的物理机制,系统分析了航空发动机气动噪声的基本特征。通过对国内外有关航空发动机气动声学研究工作的总结和分析,给出了航空发动机主要噪声源流动噪声的理论分析模型,介绍了航空发动机气动噪声控制的原理和方法,最后,专门介绍了气动声学数值计算(CAA)和实验测量新方法和新技术。

本书可供从事航空发动机、流体机械、飞行器设计和动力工程及工程热物理等专业的科研及工程设计人员参考,同时可作为相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机气动声学/乔渭阳,王良锋编著.—2版.—西安:西北工业大学出版社,2016.4
ISBN 978-7-5612-4819-5

I. ①航… II. ①乔…②王… III. ①航空发动机—气动技术—声学 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 085086 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:21

字数:504 千字

版次:2016 年 4 月第 2 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定价:55.00 元

第2版前言

本书第1版是在国家国防科技工业局“十一五”国防特色学术专著出版计划资助下,于2010年由北京航空航天大学出版社与北京理工大学出版社、西北工业大学出版社等联合出版的。自出版以来,本书一直作为西北工业大学航空宇航推进理论与工程、飞行器设计等专业的研究生“气动声学”课程的主要参考书籍,在研究生培养教育中发挥了重要的作用,并为国内同行,特别是为从事国家“大型飞机”重大专项有关飞机噪声问题的相关工程技术人员进行相关科学研究工作提供了必要的参考资料,2010年获得中国大学出版社图书奖第二届优秀学术著作奖一等奖。

一方面,由于第1版印量有限,随着时间的推移,目前已经不能满足研究生教学的需要;另一方面,作为当代航空科学和流体力学学科重要前沿热点研究领域,气动声学学科理论和技术的发展非常快,例如,过去5年,计算气动声学(CAA)等领域取得了重要进展,而第1版并未纳入这一重要内容;再一方面,第1版在内容编排中还有不尽完善的方面,例如,缺少对螺旋桨这一类重要气动噪声源的分析介绍等。考虑到以上几个方面的原因,在西北工业大学研究生高水平课程建设专项支持计划的资助下,笔者对本书第1版进行了修订。

修订后的第2版主要增加了计算气动声学(CAA)和螺旋桨噪声两章内容,CAA是目前气动声学领域最热门的研究方向,第8章“计算气动声学基础”对CAA的基本原理和方法做了系统的介绍;涡桨发动机作为一类低油耗的航空动力设备,目前和未来长时间内仍然具有重要的应用价值,而涡桨飞机的重要技术问题就是螺旋桨噪声,因此增加了第5章“螺旋桨噪声”,对螺旋桨噪声的机理、预测模型等做了系统介绍。

第2版其他次要的修订包括,在第1章增加对飞机机体噪声基本情况的介绍;将第2章和第5章合并,构成新的第2章“流体与声波基本概念和基本方程”;将第6章与第7章合并,删除已经陈旧、也很少使用的叶轮机噪声模型等内容,构成新的第6章“叶轮机噪声”。

第2版新增加的第8章,以及第6章中“基于CFD技术的叶轮机噪声计算方法”一节的“计算实例分析”等,由笔者指导的博士研究生王良锋编著。

希望本书第2版的出版,能够进一步提升航空宇航推进理论与工程、飞行器

设计等专业研究生培养的水平,适应社会和工业部门对高水平专门研究人才的需求,并促进航空宇航科学技术领域前沿基础学科的发展,为我国正在开展的“大型飞机”和“民用大涵道比涡扇发动机”等重大工程专项的发展提供支持。

乔渭阳

2015年3月于西安

第 1 版前言

飞机噪声问题是目前航空界普遍关心的问题之一。对于民用飞机,噪声辐射指标已经成为飞机适航审定的强制性指标,飞机噪声级的大小直接关系到适航签证的获取;对于军用飞机,噪声辐射则会影响到飞机的隐身以及结构声疲劳等。随着人类环境保护意识的不断增强和国际间航空市场竞争的日益激烈,特别是随着空中运输能力的不断提高、大型客机发动机推力和功率的不断增大、飞行速度的进一步加快等,飞机噪声问题变得更为突出。

飞机的主要噪声源是航空发动机气动噪声。航空发动机既是飞机的动力源,也是飞机巨大噪声的产生源。飞机噪声问题真正引起人们的关注也是 20 世纪 50—60 年代喷气式发动机开始投入使用的时候,第一代涡轮喷气发动机产生的巨大喷气噪声一方面引起了强烈的社会反响,另一方面也激发了研究人员对此问题的广泛关注。从这个时期开始,人们便以研究航空发动机内部气流(燃气)流动过程产生的噪声为主要对象,研究飞机/发动机噪声源的机理、气流和结构参数的影响、噪声级的理论预测方法以及降低噪声的方法等,并以研究开发基于气动声学设计方法来制造出低噪声发动机(也常称之为安静发动机 Quiet Engine)为主要目的,形成了航空宇航科学与技术领域一个独立的学科分支——气动声学。

如果以 1952 年英国首先研制成功的第一代喷气式民用飞机——彗星号(Comet)为标志,那么过去 50 多年的时间里,民用航空燃气涡轮喷气发动机技术的发展大致经历了三次更新换代,航空燃气涡轮发动机技术水平得到了很大提高。而噪声级大小作为航空发动机主要的技术指标之一,每一次技术上的更新换代,气动声学设计都起了重要的作用。在 2003 年全球共同庆祝人类动力飞行 100 周年的时候,面对未来迅速发展的航空运输市场,特别是面对未来人类对环境保护的要求,国内外众多航空研究机构都将航空发动机气动声学设计列为未来航空发动机发展的关键技术之一。

我国航空发动机的发展水平与先进国家相比仍然具有很大的差距,特别是在民用航空发动机和飞机领域,与国外的技术差距非常明显。2005 年度我国启动的中长期科技发展战略,将“大型运输机”列入了国家重大技术专项,其中大型客机的发动机及其噪声问题将是我国大型客机研制发展中的重大技术基础问题之一。

面对现实,展望未来,航空动力界的科研人员必须重视和关注航空发动机的气动噪声研究。

笔者从20世纪90年代开始进行航空发动机气动声学研究,从理论、实验和数值预测等方面,对航空发动机气动声学问题开展了系统的研究。1995年,笔者与其他学者合作编著了我国第一部飞机噪声入门书——《飞机噪声基础》。此后,笔者作为高级访问学者,曾经先后三次到国际著名航空研究机构——德国宇航院(DLR)进行学术访问研究,在德国宇航院推进技术研究所柏林发动机声学分部工作期间,通过广泛的学术交流和深入系统的学术讨论,对航空发动机气动声学领域国际前沿及发展方向有了清晰的认识。

在德国柏林施普雷河畔,笔者就萌生了撰写《航空发动机气动声学》一书的念头,考虑到1995年出版的《飞机噪声基础》,距离航空发动机气动声学设计的目标还有相当大的距离,并考虑到迄今国内还没有一本专门综合论述航空发动机气动声学的专著,因而进一步促使笔者提出了撰写该书的计划。近两年来,笔者在参阅国外相关论文的基础上,查阅、筛选了散见于国内外主要期刊、论文集上公开发表的研究成果,并予以归纳、整理,最终完成撰写《航空发动机气动声学》一书。

本书从气动力学和气动声学的基本理论出发,研究分析了当代先进航空燃气涡轮发动机气动噪声产生的物理机制,揭示了航空发动机气动噪声的基本特征,给出了航空发动机主要噪声源流动噪声的理论分析模型,介绍了航空发动机气动声学实验研究测量的新方法和新技术,分析了航空发动机气动噪声控制的原理和方法。本书内容基本上反映了高性能航空燃气涡轮发动机气动声学的基本理论架构和研究进展,对于先进航空发动机设计和研制具有重要的指导意义。

全书共分9章。第1章,引论,主要介绍了飞机和发动机噪声的工程背景和社会背景;第2章,声学基本概念和基本方程,从流体力学基本方程出发,介绍了声学基本方程和声学方程的求解,分析了声源基本理论和运动声源的特点;第3章,气动声学理论,这是本书的重点之一,从Lighthill气动声学基本方程的推导出发,介绍了不同形式气动声学方程的求解,并详细讨论了静止固体边界和运动固体边界对流体发声影响的基本方程和求解方法等;第4章,发动机喷流噪声,以Lighthill方程对喷流流场的应用开始,讨论了喷流噪声声功率计算、喷流噪声远场声压时间平均解、喷流噪声比例律关系、超声速喷流噪声特性、喷流噪声的预测方法等,最后研究了喷流噪声抑制方法;第5章,发动机管道声学理论分析,对管道内声波传播的基本理论和分析方法进行了讨论和分析;第6章,叶轮机噪声产生和传播的物理机制,这是本书的重点之一,从叶轮机流动噪声源和噪声传播物

理过程分析开始,分别介绍了叶轮机单音噪声、宽频噪声、叶轮机管道声模态等的产生、传播和辐射等;第 7 章,叶轮机噪声预测模型与控制方法,这也是本书的重点之一,分别介绍了叶轮机噪声的经验关联分析、叶轮机管道声学模型、基于线化非定常流理论的叶轮机噪声计算方法、基于 CFD 技术的叶轮机噪声计算方法等噪声分析模型,并介绍了叶轮机噪声控制方法;第 8 章,发动机燃烧与核心噪声,从燃烧噪声产生的机理入手,分别介绍了燃烧室几何和工作状态变化对噪声的影响、燃烧噪声特征和燃烧噪声源分析、燃烧噪声理论分析、燃烧噪声诊断技术、燃烧噪声控制方法等;第 9 章,航空发动机气动噪声实验测试技术,分别介绍了航空发动机气动声学实验环境和测试方法、噪声源声功率测量技术、发动机管道声模态识别测量技术、基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量技术等。

本书可供从事航空发动机、流体机械、飞行器设计和动力工程及工程热物理等专业的科研及工程设计人员参考,也可作为相关专业的教师、研究生和大学生的参考书。书中各章后面都附有详尽的参考文献,可为有兴趣进一步研究的读者检索文献资料提供方便。

特别感谢笔者的导师、德国宇航院 U. Michel 教授。在本书规划、内容编排等方面,U. Michel 教授给予了笔者很多有益的建议,为笔者提供了大量研究资料。

感谢德国宇航院 W. Neise 教授,他为笔者提供了本书中有关发动机管道声学理论分析以及叶轮机噪声控制方法等方面的详细材料。燃烧噪声不是笔者研究的重点,但为了本书内容上的完整,本书安排了《发动机燃烧和核心噪声》一章。这一章内容主要参考了由 Harvey H. Hubbard 教授主编的、以 NASA TR90-3052 报告形式发表的 *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice* 一书中的相关内容,笔者特此说明,并致感谢。

尽管笔者努力按照能够全面反映高性能航空燃气涡轮发动机气动声学设计的技术特点、实用新颖的要求组织内容,但是限于水平,不妥甚至错误之处在所难免,诚挚欢迎读者批评指正。

编者

2009 年 7 月于西安

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 飞机噪声问题	1
1.2 航空发动机噪声	6
1.3 飞机机体噪声源在未来航空噪声研究中的重要性	9
1.4 飞机噪声评价参数	11
第 2 章 流体与声学基本概念及基本方程	20
2.1 流体动力学基本方程	20
2.2 声学基本方程	25
2.3 声波方程的解	34
2.4 声源分析	42
2.5 运动声源问题	43
2.6 流动管道的声波方程	49
2.7 无流动矩形硬壁管道中的声传播	51
2.8 无流动圆柱或环形硬壁管道中的声传播	56
2.9 具有均匀流动的矩形管道内的声传播	60
第 3 章 气动声学理论	62
3.1 气动声学理论的产生及发展	62
3.2 Lighthill 声类比理论	64
3.3 Lighthill 方程解	72
3.4 时间平均解	77
3.5 静止固体边界对气动声源声辐射的影响	82
3.6 运动固体边界对气动声源声辐射的影响——FW-H 方程	90
第 4 章 发动机喷流噪声	94
4.1 引论	94
4.2 喷流噪声声功率分析	96
4.3 喷流噪声远场声压时间平均解	101
4.4 喷流噪声比例律关系	106

4.5	超声速喷流噪声	110
4.6	喷流噪声的预测	117
4.7	喷流噪声抑制	118
4.8	本章小结	123
第 5 章	螺旋桨噪声	124
5.1	引论	124
5.2	螺旋桨噪声机理和特征	126
5.3	螺旋桨单音噪声时域预测方法	133
5.4	螺旋桨单音噪声频域预测方法	139
5.5	螺旋桨宽频噪声预测方法	150
第 6 章	叶轮机噪声	155
6.1	引论	155
6.2	叶轮机流动噪声源和噪声传播物理过程分析	156
6.3	叶轮机定常和非定常气动力产生的单音噪声	158
6.4	叶轮机随机非定常流动产生的宽频噪声	165
6.5	叶轮机管道声模态的产生	171
6.6	叶轮机管道声模态的传播和辐射	177
6.7	叶轮机管道声学模型	182
6.8	基于 CFD 技术的叶轮机噪声计算方法	189
6.9	叶轮机噪声控制方法	199
6.10	结束语	214
第 7 章	发动机燃烧与核心噪声	215
7.1	引论	215
7.2	燃烧室几何和工作状态变化对噪声的影响	217
7.3	燃烧噪声特征和燃烧噪声源分析	219
7.4	燃烧噪声理论分析	224
7.5	燃烧噪声诊断技术	229
7.6	燃烧噪声控制	236
第 8 章	计算气动声学基础	237
8.1	计算气动声学的基本概念	237
8.2	有限差分法	240
8.3	最优的空间和时间离散化	243

8.4	线化 Euler 方程的有限差分解	249
8.5	利用 DRP 方法求解线化 Euler 方程	255
8.6	有限差分方法中的短波分量	260
8.7	选择性的人工阻尼(SAD)	265
8.8	DRP 格式的滤波方法	269
8.9	高阶有限差分格式的壁面边界条件	275
8.10	无反射边界条件	278
8.11	非线性 CAA	285
第 9 章	航空发动机气动噪声实验测试技术	288
9.1	引论	288
9.2	航空发动机气动声学实验环境和测试方法	289
9.3	噪声源声功率测量技术	298
9.4	发动机管道声模态识别测量技术	304
9.5	基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量技术	308
9.6	基于传声器阵列的发动机噪声源识别测量实例	316
参考文献	322

第 1 章 引 论

1.1 飞机噪声问题

1.1.1 涡轮喷气发动机的出现开辟人类航空运输的新纪元

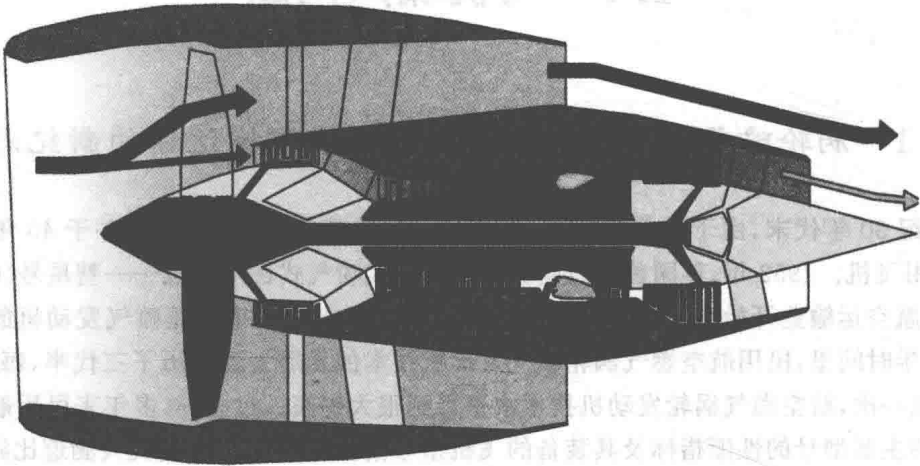
20 世纪 30 年代末,由于战争的需要,航空燃气涡轮喷气发动机问世,并于 40 年代末首先应用于军用飞机。1952 年,英国首先研制成功了第一代喷气式民用飞机——彗星号(Comet),从此,人类的航空运输业开始进入喷气时代。从第二次世界大战结束涡轮喷气发动机的出现到现在的 50 多年时间里,民用航空燃气涡轮喷气发动机技术的发展大致经历了三代半,每隔 10 年左右更新换代一次,航空燃气涡轮发动机技术水平得到很大提高。过去 50 多年来民用航空燃气涡轮发动机的主要型号的性能指标及其装备的飞机型号情况见表 1-1。当代大涵道比涡扇发动机结构示意图见图 1-1(a),过去 50 多年来民用航空发动机变化趋势见图 1-1(b)。

表 1-1 典型民用航空燃气涡轮发动机

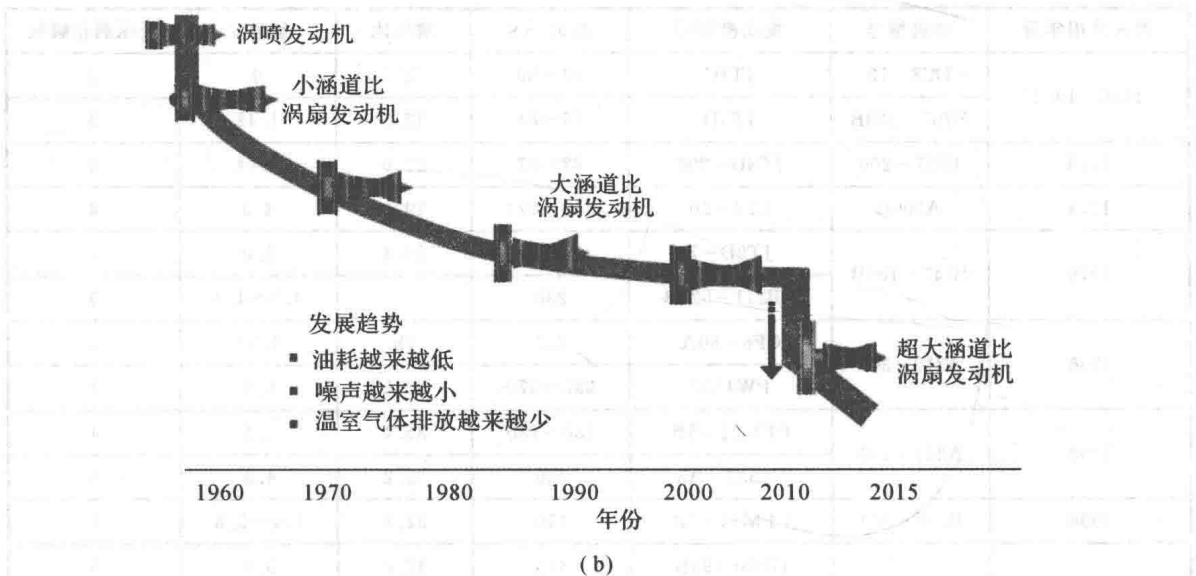
投入使用年份	客机型号	发动机型号	推力/kN	增压比	涵道比	低压涡轮级数
1959—1962	DC8-10	JT3C	53~60	12.5	0	2
	B707-320B	JT3D	75~84	12.5	1.42	3
1968	B737-200	JT8D-200	82~97	21.0	1.74	2
1974	A300B	CF6-50	230~274	29.3	4.3	4
1979	B747-100B	JT9D-7	200	23.4	5.0	4
		RB211-524B	230		4.1~4.3	3
1986	A310-300	CF6-80A	222	28	4.66	4
		PW4152	230~275	27.5	5.0	4
1993	A321-100	CFM56-5B	130~150	35.4	5.5	4
		V2533-A5	150	35.2	4.5	5
1998	B737-800	CFM56-7B	110	32.8	5.1~5.3	5
1997	B777-200ER	GE90-94B	416	42.0	9.0	6
		Trent895	415	39.0	6.0	5
2000	B767-400	CF6-80C	270	31.4	5.0	5
2007	A380	Trent900	318~348	37~39	8.5	5
		GP7270	310	44	8.7	6

续表

投入使用年份	客机型号	发动机型号	推力/kN	增压比	涵道比	低压涡轮级数
2011	B787	GENx-1B	284	41	9.6	7
		Trent1000	240~330	52	11.0	6
	A350-900	TrentXWB	370	52	9.3	6



(a)



(b)

图 1-1 当代典型民用大涵道比涡扇发动机结构及民用航空发动机发展趋势

(a)当代典型民用大涵道比涡扇发动机结构；(b)民用航空发动机发展趋势

第一代民用航空燃气涡轮发动机以涡轮喷气发动机为主,与军用航空发动机技术相当,于20世纪40—50年代研制,50—60年代获得广泛应用。这一代燃气涡轮喷气发动机的推重比是2~4,油耗 $0.1 \text{ kg}/(\text{N} \cdot \text{h})$,无外涵(涵道比0),涡轮前温度为 $1\,200 \sim 1\,300 \text{ K}$ 。典型的发

动机有英国埃汶发动机、美国 JT3C 发动机等,这类发动机当时主要装备的飞机包括 Boeing707,DC8,彗星等第一代喷气式民用运输机。

第二代民用航空燃气涡轮发动机是 20 世纪 50 年代后期研制的,它是由军用涡轮喷气发动机衍生出的低涵道比涡扇发动机(也称第一代涡扇发动机)。由于这类发动机具有较低的耗油率,因此,促使其迅速转换到商用飞机中使用,很快成为民用飞机的主要动力装置。这一代涡轮风扇发动机的涵道比为 1.5~2.5,推重比为 5~6,油耗为 0.07~0.08 kg/(N·h),涡轮前温度为 1 400~1 500 K。典型的发动机有美国的 JT3D,JT4 等,主要装备 Boeing707,Boeing727,Boeing737,DC9,三叉戟等喷气式运输机。

第三代民用航空燃气涡轮发动机为大涵道比涡轮风扇发动机(也称第二代涡扇发动机),与前两代发动机相比,这一代发动机技术上有很大的进步,涵道比达到 5~6,推重比为 5~7,油耗为 0.06~0.07 kg/(N·h),涡轮前温度为 1 400~1 600 K。这一代民用涡轮风扇发动机于 20 世纪 70 年代开始投入使用,典型的发动机有早期的 JT9D,CF6,RB211,主要装备 Boeing747,DC10,A300 等民用运输机,以及 80 年代开始装备的新一代大涵道比涡扇发动机 CFM56,V2500 等,装备的飞机有 Boeing737,A320,A340 等。

第三代民用航空燃气涡轮发动机同第二代相比,性能有了大幅度的提高,技术先进,服役时间比第一、二代发动机服役时间长得多,而且这一代发动机仍然处于不断改进发展之中。20 世纪 90 年代之后,这一代发动机进一步向更高涵道比发展,技术上又有进一步的提高,涵道比达到了 9~10,推重比为 5~7,油耗为 0.05 kg/(N·h)。典型的发动机有 GE90,Trent800 等,装备的飞机有 Boeing777 等。

过去 50 多年的快速发展,使得民用航空燃气涡轮喷气发动机的技术水平得到了很大的提高,发动机推力不断增大,热效率不断提高,耗油率得到了大幅度的降低,发动机寿命得到大幅度提高。目前,民用大涵道比涡扇发动机最大推力超过 500 000 N(GE90),巡航耗油率从涡喷发动机的 0.01 kg/(N·h)下降到 0.005 kg/(N·h)。发动机可靠性和耐久性倍增,民用发动机空中停车率降低到(0.002~0.02)/1 000 飞行小时,发动机热端部件寿命达 7 000~10 000 h。

目前民用航空燃气涡轮发动机的发展情况是,采用与军用飞机类似的发动机而形成的第一、二代民用发动机现在已经退役。从第三代开始,民用发动机是专为宽体客机研制的高涵道比涡扇发动机,同军用发动机追求高推重比和高飞行速度相比,民用航空燃气涡轮发动机将技术追求的重点放在了降低噪声辐射、降低油耗、减小排放污染等主要技术目标上,从此,西方民用航空发动机走上了一条与军用航空发动机不同的技术发展道路。目前航线上大部分民用飞机普遍采用该类发动机。

回顾喷气式民用运输机过去 50 年的发展可以看出,航空燃气涡轮喷气发动机的出现和使用,使得人类航空运输事业取得了突飞猛进的发展,目前在全球范围内有近 20 000 架各类喷气式民用飞机在繁忙地飞行中,从能乘坐几人的小型公务机(如奖状飞机)到能乘坐近 600 人的大型 A380 飞机等,人类真正进入到了喷气运输时代,民用航空运输和民用航空工业已经成为当代最大规模的科学技术和工业领域的全人类的活动,航空运输改变了整个人类的生活方式,促进了人类文明的发展。

1.1.2 喷气式民用航空运输带来了航空噪声的新问题

喷气式民用飞机的出现,大大提高了商业飞行的速度和效率。但是,由于早期的喷气发动机都是从军用飞机移植过来的,发动机高速喷流产生的强烈喷流噪声,引起了公众强烈的反应,很快引起了社会的关注,也使得敏锐的科学家注意到了研究民用航空领域噪声问题的重要性。

而从 20 世纪 60 年代开始,由于世界经济的快速发展,国际民用航空运输市场迅速发展,巨型喷气式民用飞机迅速发展并逐渐普及,其带来的巨大的噪声污染,使得飞机的噪声问题日趋严重,引起的社会反响越来越强烈。例如,1958 年首批远程喷气式飞机——Boeing707 问世,1962 年 DC8 远程飞机问世,使得 70 年代初期国际远程航线这两种商用飞机数量达到 1 500 架之多。飞机噪声问题日趋严重,特别是 Boeing707 飞机,在其服役早期曾引起严重的环境问题和政治争论。由美国 PW 公司生产的 JT3 和 JT4 发动机以及英国 RR 公司生产的 Conway 发动机辐射的噪声之大,迫使伦敦希思罗机场和纽约肯尼迪机场制定了严格的噪声限制,并在机场安装监测系统,以监督进港飞机是否遵守机场规定,不能满足这些规定的远程飞机被迫轻载起飞,以便快速爬高和迅速远离居民区,然后在中间机场装满燃油继续完成远程飞行。

除了上述远程喷气式民用飞机巨大的噪声污染问题之外,20 世纪 60 年代中期美国又相继推出 DC9, Boeing727, Boeing737 等中短程喷气式民用飞机,欧洲推出了三叉戟、VC-10 等中短程喷气式民用飞机。到 60 年代末喷气式飞机的数量达到了 2 000 架之多,并超过了螺旋桨飞机数量,又进一步大大增加了飞机噪声污染问题。如图 1-2 所示是喷气式飞机在机场周围产生的噪声污染示意图。

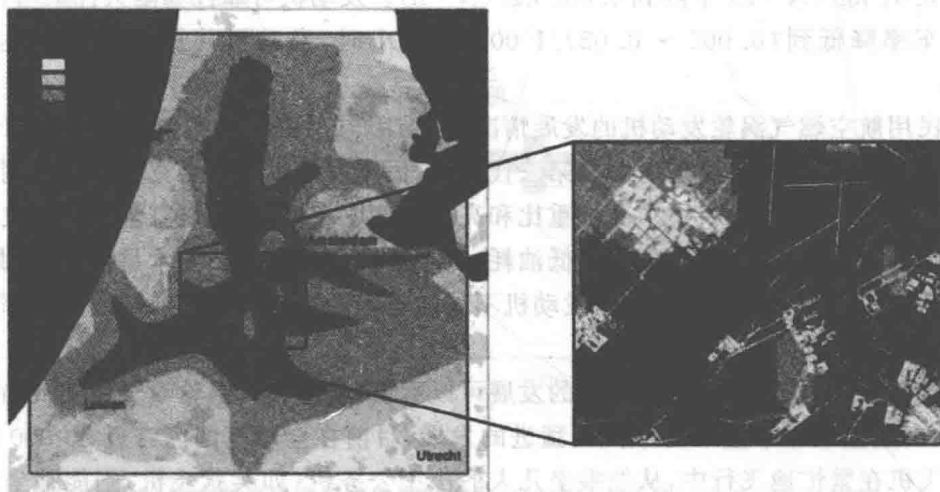


图 1-2 喷气式飞机在机场周围造成的噪声污染

60 年代之后,人类对环境保护问题的日益重视,进一步凸显了世界范围内的喷气式飞机噪声污染问题,飞机噪声引发的抗议不断增多。针对以上工程背景和社会反响,国际航空界不得不开始重视和面对飞机噪声问题。1966 年伦敦国际会议首次签署了通过“审定”的方法对

制定 21 世纪重大航空科技战略时,启动了一系列的航空发动机低噪声研究计划,这些研究计划的目标就是要使下一代民用航空发动机的耗油率、噪声污染和排气污染等进一步大幅度降低,以适应人类未来更加密集繁忙的航空运输。例如,NASA 在经过先进亚声速飞机(AST)噪声研究计划(1994—2001 年)实现民用飞机降噪目标 8dB 之后,又启动了安静飞机技术(QAT)研究计划,要进一步降低飞机噪声 5dB;未来的目标是使飞机的适航噪声指标有效感觉噪声级下降 20dB。欧盟将在 FP4 和 FP5 规划的基础上启动 FP6 和 FP7 规划,以使得民用飞机噪声进一步大幅度降低。

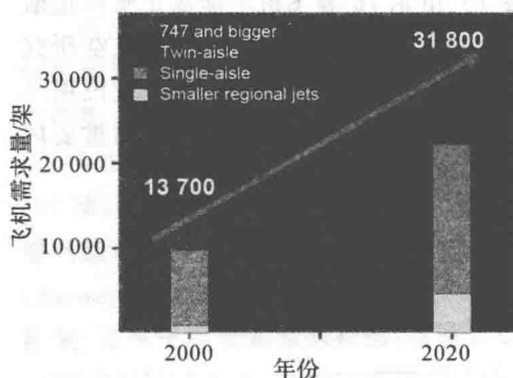


图 1-4 全球航空运输增长趋势对飞机需求量的预测

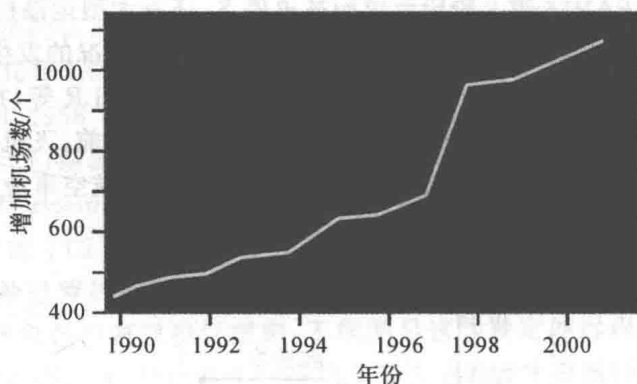


图 1-5 全球范围内对噪声严格限制的机场数增加情况

1.2 航空发动机噪声

飞机噪声源主要有两类,即飞机发动机噪声和飞机空气动力噪声。飞机空气动力噪声是由于空气气流经过机身引起的气流压力脉动产生的,通常称之为机体噪声。在飞机起飞和着陆过程中,当飞机打开各种增升装置和起落架等非流线结构时,会产生较强烈的机体噪声。民用飞机广泛采用的燃气涡轮喷气发动机强烈的噪声辐射,是引起飞机噪声问题的主要原因,在航空燃气涡轮喷气发动机内部,空气和燃气强烈的脉动产生了巨大的流动噪声。

当代民用运输机广泛采用的涡轮风扇发动机主要噪声源有四个,分别是风扇/压气机噪声源、燃烧噪声源、涡轮噪声源和喷流噪声源,如图 1-6 所示。由于涡轮风扇发动机是典型的旋转机械,因此发动机内部周期性旋转的叶轮机与气流(燃气)周期性干涉会产生典型的单音噪声,此外由于空气和燃气在发动机内部流动过程中,由于黏性的作用和强烈的燃烧过程的作用等,在发动机内部气流表现为强烈的湍流脉动,因此发动机的噪声中也包含较强的随机宽频噪声。

通常,喷流噪声和风扇噪声是涡扇发动机主要的噪声源,因为喷流噪声与喷流速度的 8 次方成比例,所以喷流速度越高,喷流噪声就越强烈。早期的涡轮喷气发动机和低涵道比涡扇发动机最强的噪声源就是喷流噪声。为了降低喷流噪声,可以通过增大涵道比和降低喷流速度的方式降低发动机的噪声,随着涡轮风扇发动机涵道比的不断提高,相应的发动机排气速度减小,与风扇压气机噪声以及涡轮噪声相比,排气噪声逐渐减小。图 1-7 给出了小涵道比涡扇发动机和大涵道比涡扇发动机各部件声源强度变化的对比。可以看出,对于当代大型大涵道