CRC Press
Taylor & Francis Group

〔乌克兰〕Oleksandr Zaporozhets
〔乌克兰〕Vadim Tokarev 著
〔英〕Keith Attenborough
孙学德 郭天鹏 唐丽君 贾 康 译



飞机噪声：评估、预测和控制

Aircraft Noise
Assessment, prediction and control

北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

飞机噪声：评估、预测和控制

Aircraft Noise

Assessment, Prediction and Control

[乌克兰] Oleksandr Zaporozhets
[乌克兰] Vadim Tokarev 著
[英] Keith Attenborough
孙学德 郭天鹏 唐丽君 贾 康 译

北京航空航天大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

飞机噪声：评估、预测和控制 /（乌克兰）亚历山大·扎巴罗日茨，（乌克兰）瓦吉姆·托卡列夫，（英）基思·爱登堡著；孙学德等译. -- 北京：北京航空航天大学出版社，2020.1

书名原文：Aircraft Noise：Assessment，Prediction and Control

ISBN 978-7-5124-3006-8

Ⅰ. ①飞… Ⅱ. ①亚… ②瓦… ③基… ④孙… Ⅲ. ①飞机噪声－评估②飞机噪声－噪声预测③飞机噪声－噪声控制 Ⅳ. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 103515 号

版权所有，侵权必究。

飞机噪声：评估、预测和控制

Aircraft Noise

Assessment, Prediction and Control

[乌克兰] Oleksandr Zaporozhets

[乌克兰] Vadim Tokarev 著

[英] Keith Attenborough

孙学德 郭天鹏 唐丽君 贾 康 译

责任编辑 王 瑛 曹春耀

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) http://www.buaapress.com.cn

发行部电话：(010)82317024 传真：(010)82328026

读者信箱：emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话：(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本：710×1 000 1/16 印张：21 字数：448 千字

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-3006-8 定价：69.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题，请与本社发行部联系调换。联系电话：(010)82317024

内 容 简 介

本书是关于飞机噪声评价、预测和控制的专业书籍，共计7章。所述内容既包括飞机噪声发展沿革、声源简介和影响分析，也具体到数学建模、预测分析，还详细阐述了基于噪声源、传递路径和接受者的不同降噪方法和监测知识。

本书内容详实，适用于从在校学生到普通大众再到专业学者的广大读者：于学生，抽丝剥茧的推演过程是物理学、声学乃至数学物理等学科的良好补充；于普通大众，飞机噪声是影响乘客和机场区域居民舒适性越来越重要的因素之一，本书深入浅出的介绍不失为很好的科普读物；于专业学者，详实的飞机噪声产生、传播和控制知识是飞机整机和系统设计、机场乃至城市规划等必不可少的重要参考。

Aircraft Noise: Assessment, Prediction and Contro/ISBN: 9780415240666

Copyright © 2011 by Taylor & Francis Group, LLC.
Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

Beijing University of Aeronautics and AstronauticsPress is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由北京航空航天大学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

前　言

飞机噪声会对乘客、机场员工和附近居民造成不利影响，这些影响限制了区域机场和国际机场的机场容量。降低飞机噪声包括噪声源降噪、传递路径降噪和接受者降噪等。

有效的噪声控制需要技术水平高超的专业工程师。本书就是为他们而写的。本书讲述了如何通过恰当的发生、传播模型和有效的监测系统尽可能精确、可靠地计算和测量飞机噪声水平；也讲述了如何处理大气情况、自然或人工的地理环境及必要的细节测量因素等。

1984 年 12 月，Oleksandr Zaporozhets 凭借论文“基于环境影响最小化的飞机运营程序优化”获基辅民航工程师学会博士学位；1997 年 10 月，他又凭借论文“民用航空对环境保护影响的模型开发及信息获取方法”获基辅国际民用航空大学理学博士学位。1987 年，因在国民经济方面的贡献，他和 Tokarev 博士一起被苏联授予银质奖章，目前任乌克兰国立航空大学全职教授。

Tokarev 博士全名 VadimTokarev，于 1969 年、1990 年分别获基辅国际民用航空大学科学博士和理学博士。目前他在乌克兰国立航空大学做全职教授。

Keith Attenborough 是开放大学声学领域的研究教授，也是英国声学研究所教育经理，曾在 2000 年到 2010 间，担任《应用声学》主编；1998 年到 2001 年期间担任赫尔大学工程系系主任，1996 年因对声学研究和声学教育的杰出贡献而获得英国声学研究所瑞利金奖，现任特许工程师、英国声学研究所荣誉研究员和美国声学协会研究员。

目　录

第 1 章　飞机噪声问题综述 …… 1

1.1　机场环境影响 …… 1
1.2　噪声描述 …… 4
1.3　基本方程组 …… 12
1.4　飞机噪声评估标准和降噪方法 …… 26
1.5　噪声影响的控制 …… 29
1.6　飞机噪声规章和标准 …… 32

第 2 章　主要飞机噪声源 …… 49

2.1　喷流噪声 …… 49
2.2　风扇和涡轮噪声 …… 55
2.3　燃烧室噪声 …… 60
2.4　机身噪声 …… 61
2.5　螺旋桨和直升机噪声 …… 66

第 3 章　飞机噪声传播 …… 68

3.1　影响户外声音的因素 …… 68
3.1.1　扩散损失 …… 68
3.1.2　大气吸收 …… 69
3.1.3　地面效应 …… 70
3.1.4　风和温度梯度造成的折射 …… 71
3.2　预测地面影响 …… 73
3.2.1　匀质地面 …… 73
3.2.2　表面波 …… 76
3.2.3　近地面的多极声源 …… 77
3.2.4　地面阻抗模式 …… 79
3.2.5　地表粗糙度效果 …… 80
3.2.6　阻抗不连续的影响 …… 80
3.2.7　横向衰减计算 …… 81
3.3　测量和预测地面影响的比较 …… 82

3.3.1 近　程 …… 82
3.3.2 Parkin 和 Scholes 数据 …… 83
3.3.3 飞机发动机测试噪声 …… 83
3.4 阴影区 …… 85
3.5 气象影响分类 …… 88
3.6 典型的声速剖面 …… 90
3.7 在湍流中的声音传播 …… 94
3.8 声音越过噪声屏障的传播 …… 100
3.8.1 噪声屏障 …… 100
3.8.2 单刃衍射 …… 101
3.8.3 地面对屏障性能的影响 …… 103
3.8.4 有限长屏障和建筑衍射 …… 105
3.9 声音经过树木的传播 …… 106

第 4 章　噪声预测方法 …… 108

4.1 引　言 …… 108
4.2 一种飞机噪声模型 …… 114
4.3 飞机声学模型的评估 …… 121
4.4 飞行路径下方的噪声预测：轨迹模型 …… 128
4.5 地面、大气的影响及机翼和机身的遮蔽效应 …… 138
4.5.1 地面的影响 …… 138
4.5.2 折射作用 …… 140
4.5.3 机翼的遮挡和反射 …… 148
4.5.4 喷气排气折射 …… 156
4.5.5 折射、干涉和与数据的比较 …… 158
4.5.6 机身对声音的散射 …… 166
4.6 地面运行状态下飞机噪声的预测 …… 167
4.7 机场周围噪声的预测 …… 185

第 5 章　操作因素对飞机噪声水平的影响 …… 195

5.1 地面上的飞机 …… 195
5.2 在飞行路径下 …… 199
5.3 起飞和爬升 …… 208
5.4 下降和着陆 …… 213

第 6 章　噪声源的降噪 …… 218

6.1　动力装置的降噪 …… 218
6.2　飞行路径下及机舱内的降噪 …… 225
6.3　在发动机测试时使用消声器 …… 226
6.4　飞行路径下的降噪 …… 228
6.4.1　数学公式 …… 228
6.4.2　飞机降落阶段 …… 230
6.4.3　飞机起飞阶段 …… 235
6.5　机场附近的降噪 …… 237
6.6　隔音屏障在减少机场地面运作噪声方面的效果 …… 243
6.7　通过优化飞机运行规划以降低噪声影响 …… 252

第 7 章　监测噪声的原因 …… 258

7.1　用于飞机噪声监测的仪器 …… 264
7.2　测量和预测中的不确定度 …… 276
7.3　噪声源识别 …… 289
7.4　噪声与民用航空相关的其他环境因素之间的依赖与制约 …… 299

注　　释 …… 311

第1章
飞机噪声问题综述

1.1 机场环境影响

21世纪，航空业是造成环境变化的重要产业之一，影响因素包括噪声和空气污染等。与各种社会和经济问题一样，环境问题已经成为限制机场运营和增长的潜在制约因素之一，这些限制又在整体上影响民用航空系统。很多国际机场都在其最大容量下运营，甚至有一些已经达到运营环境的极限。随着民用航空的继续增长，这种情形会更加普遍。对于全世界来说，飞机噪声已经成为影响区域机场和国际机场容量的重要限制因素。

考虑到运营、飞行安全、经济性和环境等多种因素，机场容量定义也各不相同。每个因素还取决于机场所在地、所在区域和所在国家等国情（见图1.1）。从环境角度看，机场容量取决于环境能够接受、容忍、消化、忍受并确保航空活动顺利开展的能力。具体到某个地方，当地机场环境容量可以理解为在特定的环境限制下确保飞机安全运行的单位时间架次、乘客和货运吞吐量。[1,2] 例如，机场噪声容量表示为机场周围特定区域一定时间内确保飞机噪声声压级不超过规定限制的最大可运营飞机架次。

飞机噪声是机场运行或发展过程中产生的影响当地民众的噪声，尤其是飞机运行过程中产生或衍生的噪声。这是现今影响最显著的环境限制，而且这种限制很可能在将来变得更加严格。

局部空气质量在欧洲一些机场也作为机场容量的考量之一，而且近期或不久的将来越来越多的机场将考量这个因素。继飞机噪声之后，局部空气质量似乎正成为限制机场增长的重要潜在影响环境因素。

飞机噪声问题综述：

第三方风险是邻近建筑群的较大机场的未来潜在限制，这些机场周围的居民很

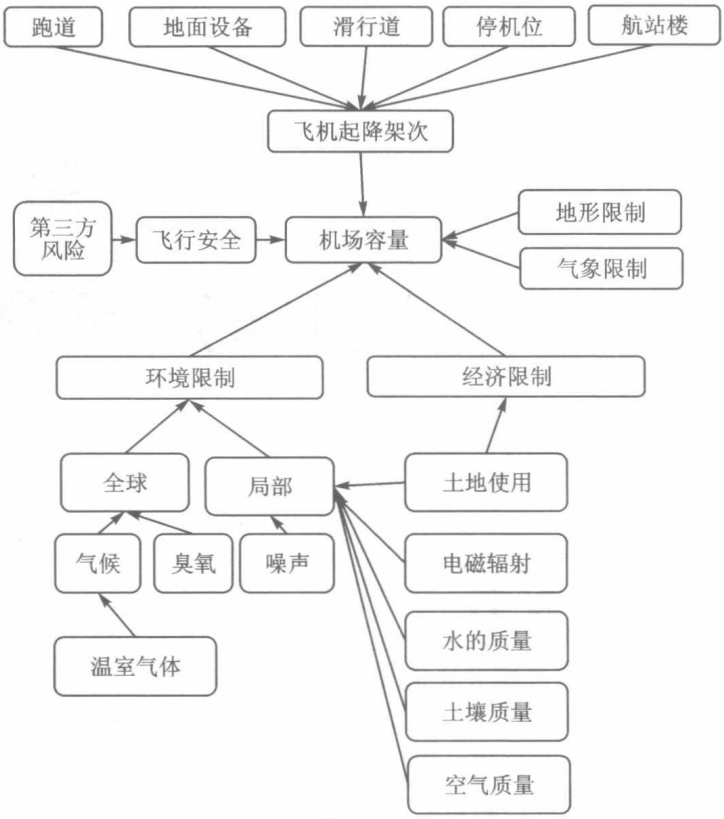


图 1.1　环境对机场容量的影响

难承受飞机坠落的风险。

水的使用及污染在某些欧洲机场已成为潜在限制之一，有些机场已经出台了相关限制。

周围土地使用和栖息价值是许多欧洲机场已存在和潜在的限制。

温室气体排放则长期以来一直是潜在的制约。

机场容量是由许多不同因素和机场建设共同作用的结果，后者包括机场布局（跑道数量、滑行道范围、停机坪开发），航站楼和地面设备，空中交通管制程序，地面操作程序和气象条件等。具体到每个机场，其容量取决于飞机起降时间、机场在一定延误内可容纳飞机的能力、机场空中管制系统和跑道进场设备等。

2001 年，国际民用航空组织开发过一个机场噪声管理的平衡办法。该平衡办法包括四个部分：噪声源降噪、着陆计划和管理、降噪操作流程和飞机运行限制。该平衡办法已通过 EU Directive 2002/30/EC 相关条款和程序应用于欧洲机场。这些降噪措施的具体实施还应充分考虑机场的特征和最佳效益。

噪声源降噪潜力有限，着陆计划和管理很难在人口密度大的区域施行，降噪操作流程主要依靠飞行员的行为，这些行为很可能导致飞行安全水平的降低。同时，空中

交通的发展速度远比新技术和降噪方式的发展更快。

目前，只有 2%的人受到飞机噪声影响。相比之下，45%的人受到道路噪声的影响，30%的人受到工业噪声的影响。然而，国际民用航空组织分析显示，到 2020 年受飞机噪声影响的人口将会增长 42%。

机场周围由于飞机运行产生的噪声会产生一系列严重的社会、生态、技术和经济问题。过高的噪声环境会损害人体健康、降低生活质量和工作能力（比如，过高的噪声会干扰人们说话交流）。在接近机场的区域，飞机噪声还会影响地面维护、飞行运行、乘客和当地居民。飞机降噪应当考虑生态、技术、经济和社会等多个标准，降噪方法应当尽量满足如下需求：

（1）噪声源一定要离建筑区域越远越好。

（2）噪声在特定情况下应降低到可以达到的最低水平。

（3）飞机降噪涉及到飞机气流、发动机风扇、涡轮、燃烧室、螺旋桨（包括直升机上的转子和尾部转子的数量）和机身等多种声源。

（4）机场附近的飞机噪声视服务的飞机种类、每种航班架次数、每日架次数及气象条件而定。

（5）从飞机到接受者的声音传播包括通过空气的直接传播，在地面、屏障和建筑表面及通过湍流和不均匀大气的反射、衍射和散射。

（6）除了住宅外，在实验室、学校和医院等位置可能会有对声音特别敏感的接受者。同时，在制定机场附近降噪的措施时，一定要考虑机场发展的短期和长期预期。

（7）降噪过程不仅需要考虑声压级，而且要平衡接受者对不同的频段噪声的不同反应。

（8）飞机降噪可以在不同的阶段实现，包括设计阶段、生产阶段、运营阶段和维修阶段。在运营阶段，降噪方式又包括噪声源降噪、传递路径降噪和接受者降噪等。其中最有效的是噪声源降噪和设计阶段降噪。[4]

（9）降噪首先要识别噪声源并评估每个声源的贡献，降噪设计需要对噪声知识不断加深理解和积累。

（10）与噪声污染相关的所有成本（包括监控、管理、降噪和监管等）应当由对相应噪声负责方承担。

尽管飞机不是机场附近环境噪声的唯一噪声源，但也是最主要的噪声源。每个飞行任务循环可细分为发动机启动、发动机预热、经滑行道到起飞位置、以最大起飞推力或最大连续推力在跑道上加速、起飞和爬升、完成整个任务剖面、着陆、泄压及发动机试车等。最大噪声水平一般发生在滑跑加速、起飞和爬升等阶段，但是这些阶段持续时间相对较短。除此之外，在发动机测试、飞机维护、临时维修和发动机更换等工况下也会产生噪声。维护和发动机试车持续时间较长，且发生在离住宅区、乘客和技术人员相对较近的区域。因此，尽管这些噪声声压级相比运动中的飞机相对较低，但也必须考虑。

表 1.1[5] 反映了民航发展过程中各经营要素优先次序的历史变化。

表 1.1　民航发展过程中各经营要素优先次序的历史变化

1950—1970 年	1970—1990 年	1990—2020 年
飞行安全	飞行安全	飞行安全
速度	经济性	环境保护(含噪声)
航程	机场周围的噪声	自然资源
经济性	操作的规律性	操作的规律性
舒适性	舒适性	经济性
操作的规律性	速度	舒适性
机场周围的噪声	航程	速度和航程

尽管飞行安全依然是重中之重，但降噪的飞机操作和环境保护也越来越成为重要的考虑因素。通过飞行操作降噪会加大飞行员工作负荷和空管工作量，这些都会导致航空公司运营成本的增加。在飞行操作中，相比降噪，飞行安全始终是第一优先级。如果降噪措施会影响飞行安全，飞行员可以决定不使用该措施。例如，起飞阶段中，飞行员会在发动机故障或熄火、设备故障或其他可能引起明显性能损失的情况下直接忽略最小噪声影响需求。起飞阶段的降噪操作(如降低动力)也将在如下工况下不予执行：如跑道污染、能见度小于 1.9 km、遭遇时速 28 km/h 的侧风(含阵风)、遭遇超过 9 km/h 的顺风(含阵风)、风切变或暴风雨可能影响飞机进场和起飞。

1.2　噪声描述

飞机噪声源非常复杂(见图 1.2)，因此机场附近采用了各种噪声保护措施，包括组织的、技术的、运营的等，也包括分区域性的方法。飞机在飞行状态时的噪声源主要包括发动机噪声和气动噪声。当发动机在推力相对较低时，气动噪声在重型喷气

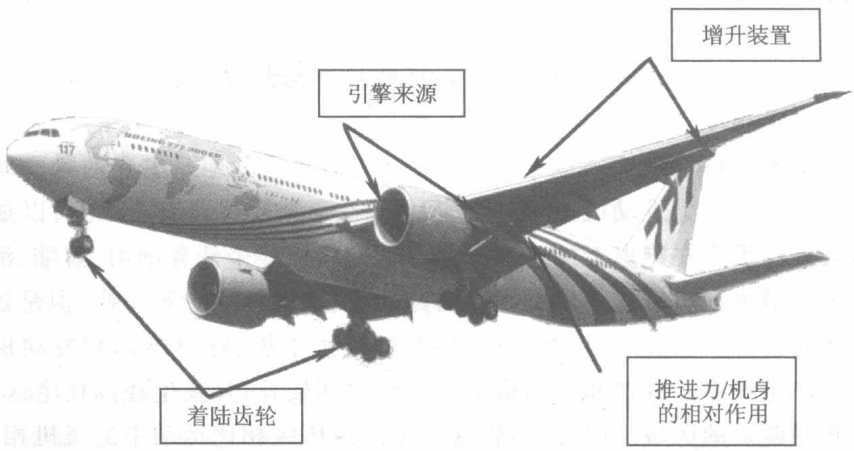


图 1.2　飞机噪声源分布示意图

式飞机着陆时变得尤其明显。

飞机降噪的科学原理与气动声学的最新成就紧密相关。与经典声学(经典声学研究主要由表面振动引起的声音)不同,气动声学主要研究非稳态湍流引起的噪声,典型的像喷流噪声、核心机噪声、入口和出口风扇噪声、涡轮噪声和机身噪声等。表 1.2 列出了典型飞机噪声源。

表 1.2　飞机噪声源的分类

飞机种类及起降方式		主要噪声源	
		动力装置	机　身
常规起飞和降落	涡轮喷气发动机	喷口、风扇、核心噪声	襟翼和机翼后缘、襟翼侧边缘、缝翼、齿轮、机身和机翼的湍流边界层
	涡轮螺桨发动机	螺旋桨、桨扇发动机、发动机排气	
短距起飞和降落	涡轮喷气发动机	风扇、发动机排气	与襟翼相互作用的喷流
	涡轮螺桨发动机	螺旋桨	
超声速飞机		喷口	气流与机身的相互作用
直升机		主转子叶片、发动机排气	不重要
通用航空飞机	涡轮喷气发动机	喷口、风扇	不重要
	涡轮螺桨发动机	螺旋桨、发动机排气	

无论是何种飞机、何种飞行模式或维护状态,机场附近的噪声评估通常都会用三分之一倍频谱。在此基础上在飞行剖面或地面工况(启动、滑行、等待起飞等)沿飞机和噪声控制点间最短路径对声波计算积分。

测量经验显示,即使飞机处于固定高度、固定速度、固定姿势的巡航状态且发动机正在穿过均匀的大气层,将其视为稳态随机过程也是不合适的。对固定的麦克风而言,接收到的运动中的飞机声波信号明显是非稳态的。接收信号的频谱特性会随着声源各向异性、球面传播、大气吸收与折射、多普勒效应和地面反射与衰减而改变。因此,接收到的声波信号仅仅在足够小的时间间隔内可以近似认为是接近稳态的。然而,太小的时间区间又会导致统计自由度过小,从而影响声压级计算的置信度。

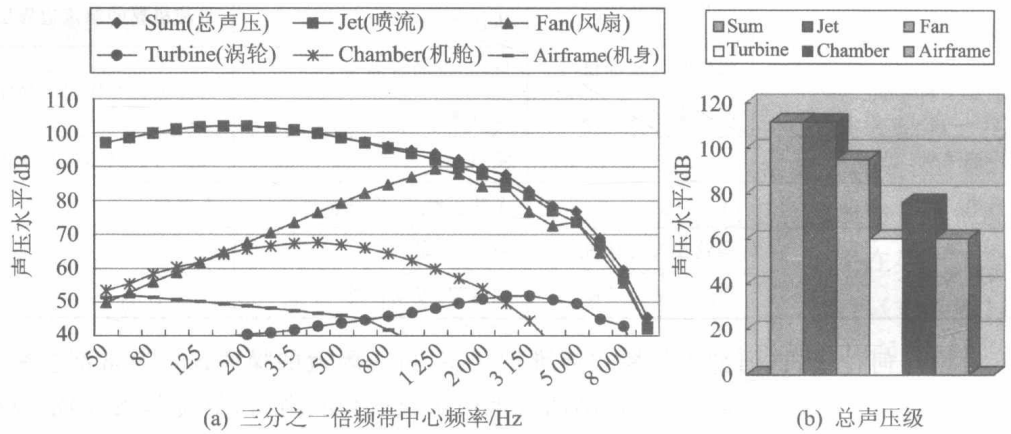
任何一种飞机噪声标准或指标都是根据其声学频谱进行估计的(如 50～10 000 Hz 间的三分之一倍频谱),一般时间间隔 0.5 s,当然时间间隔也会随着噪声活动种类的不同而改变。关于声压级还会根据频段不同采用不同的处理方法,在飞机噪声中比较合适的是 A 计权校正,该方法同时考虑了声音响度、计算方案和噪度。

对发动机而言,喷流和风扇是最重要的噪声源。发动机一般有内外两个涵道,涵道比 m 表示涡扇发动机外涵道与内涵道空气流量的比值。对高涵道比发动机($m>3$),典型如现代亚声速重型飞机,风扇是主要噪声来源,在进气口和排气口处噪声分别向前、向后传播。对低涵道比发动机($m<2$),例如第一阶段超声速飞机,喷流噪声成为主要声源。提升涵道比可以减小喷流噪声在整个生产中的贡献,当然也会增大

风扇和涡轮噪声。

图 1.3 所示为有低频率的支路引擎的飞机和总体的声压水平在起飞引擎模式下测量的监测点 1 距跑道轴线 450 m 的噪声。图 1.4 显示了相同飞机在低空飞行时监测点 2 的噪声。引擎模式是名义上的。对于同样的飞机，图 1.5 显示了在噪声监控点 3 测量的着陆噪声特点。引擎模式大约是标称推力的 60%。

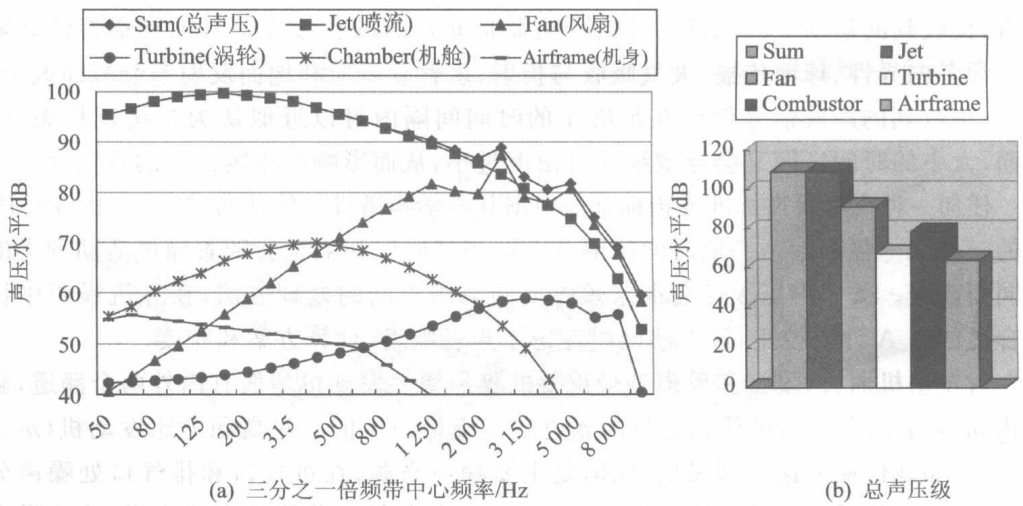
图 1.3 显示了一架低涵道比($m=1$)飞机起飞阶段在监测点 1(距跑道轴线 450 m)的三分之一倍频带中心频率和总声压级(OASPL)。图 1.4 显示了相同飞机低空状态在监测点 2(飞机起飞时起落架释放状态，测试点在跑道上，距飞机 6 500 m)的噪声特性，发动机模式为最小起飞推力。图 1.5 显示了相同飞机在监测点 3(位于离跑道边缘前 2 000 m)的着陆噪声，发动机模式为最小起飞推力约 60%。



(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.3　低涵道比($m=1$)飞机监测点 1 的声源贡献

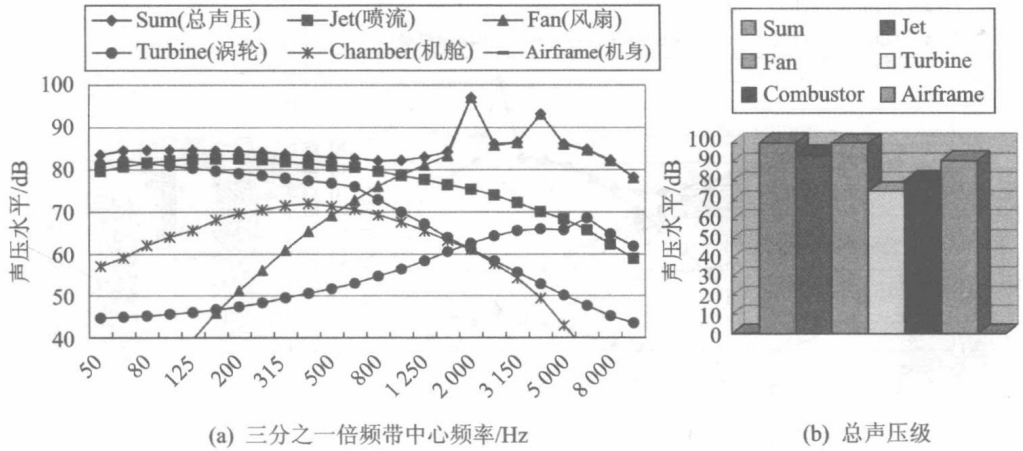
(起飞质量 160 t，距跑道轴线 450 m，最大起飞推力，不考虑横向衰减)



(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.4　低涵道比($m=1$)飞机监测点 2 的声源贡献

(起飞质量 160 t，距跑道轴线 450 m，最大起飞推力，不考虑横向衰减)

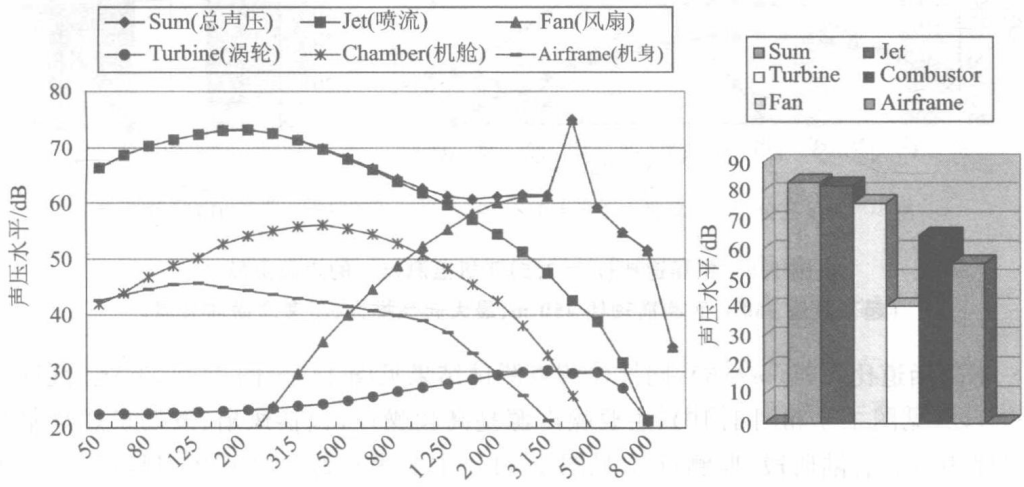


(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.5　低涵道比($m=1$)飞机监测点 3 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)

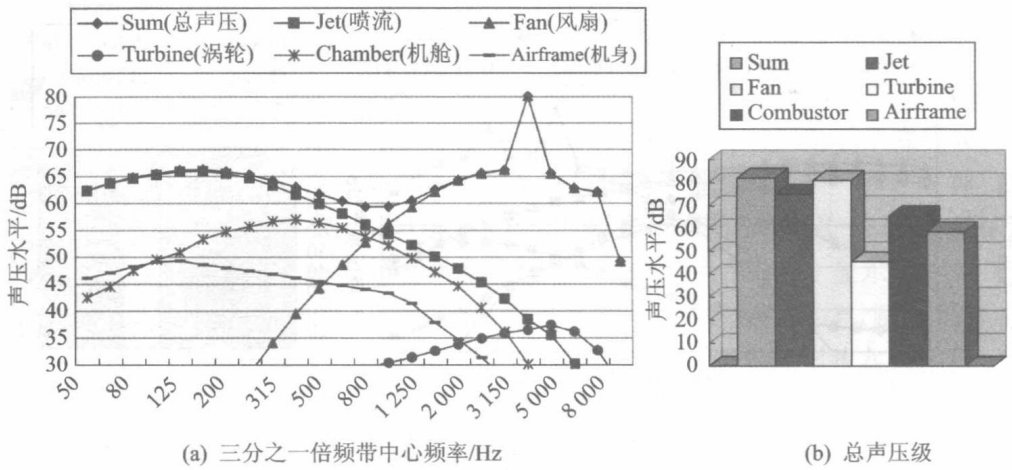
起飞阶段(监测点 1、2 测试结果),主要噪声源是喷流噪声。着陆阶段(监测点 3 测试结果),主要噪声源根据频段不同而不同。高频段主要来源于风扇噪声,而喷流和机身(包括副翼、起落架和其他机身部件产生的噪声)则成为主要低频噪声源。

对中涵道比飞机($m=2.5$),同样监测点测试结果见图 1.6～图 1.8,起飞阶段(监测点 1,2,见图 1.6 和图 1.7),主要噪声源是喷流噪声(低频段)和风扇(高频段)。着陆阶段(监测点 3,见图 1.8),主要噪声源是风扇和机身。



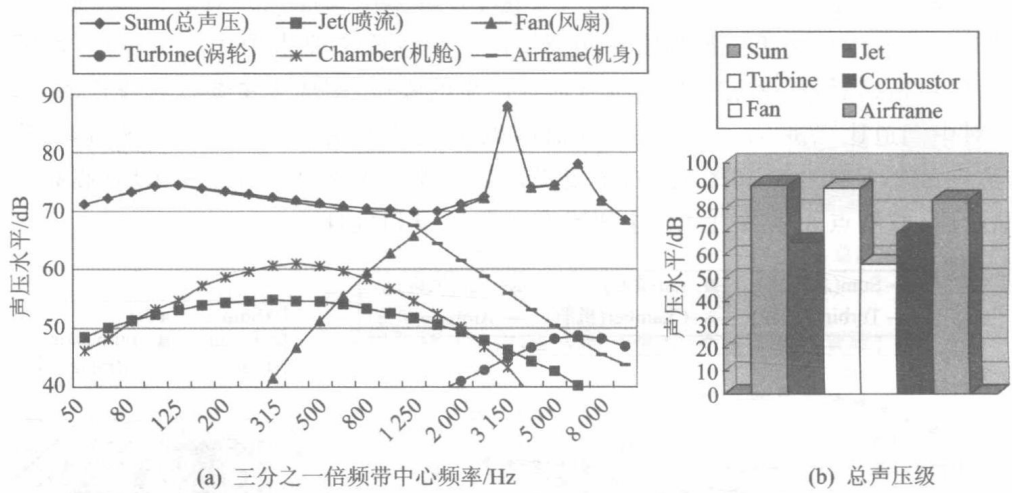
(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.6　中涵道比($m=2.5$)飞机监测点 1 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)



(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.7　中涵道比($m=2.5$)飞机监测点 1 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)

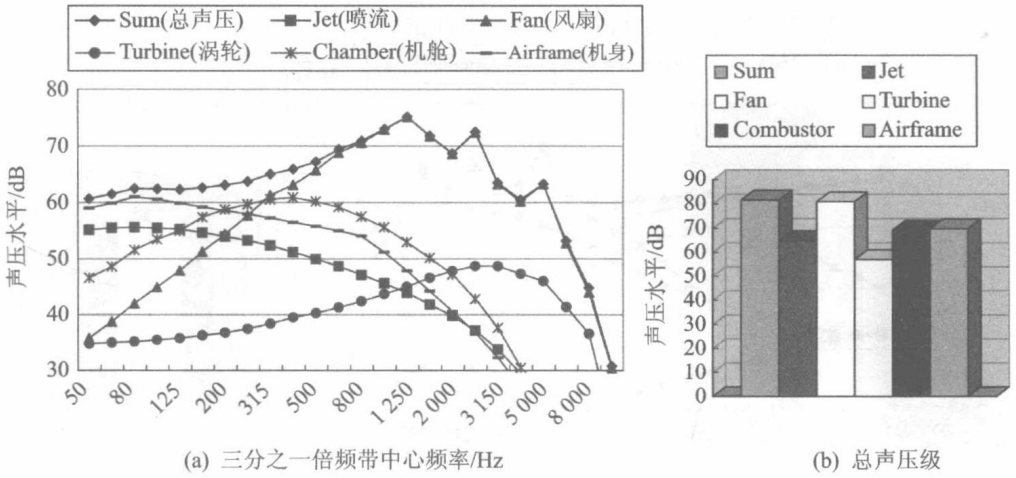


(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.8　中涵道比($m=2.5$)飞机监测点 3 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)

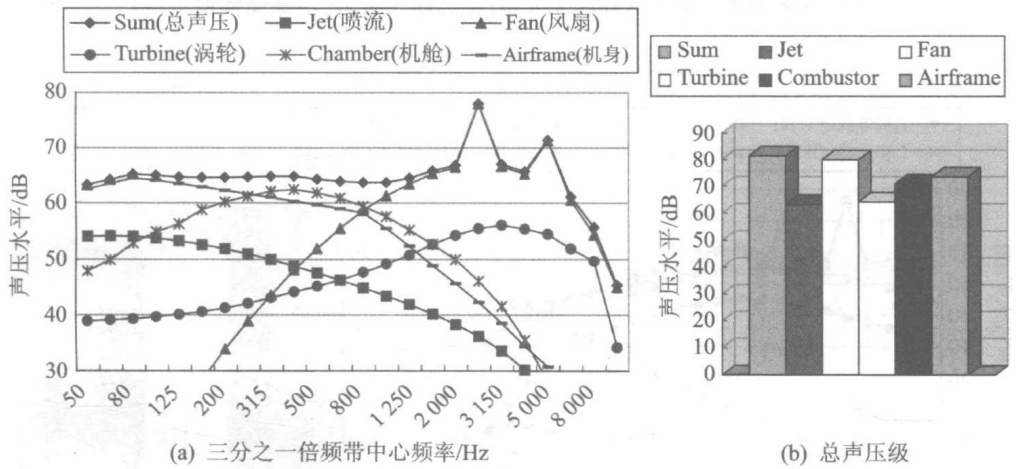
对高涵道比飞机($m=6$),同样监测点测试结果见图 1.9～图 1.11,起飞阶段(监测点 1,2,见图 1.9 和图 1.10),主要噪声源是高频噪声,包括风扇、发动机燃烧室和机身噪声等。着陆阶段(监测点 3,见图 1.11),主要噪声源是高频风扇噪声、发动机燃烧室噪声和机身噪声等。

现阶段,通过声学集成设计优化启动或运行参数,相应降噪尤其需要重点关注,包括叶片优化、通过气动声学集成设计调优启动或运行参数、在进出口加装消声器等。



(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.9　高涵道比($m=6$)飞机监测点 1 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)



(a) 三分之一倍频带中心频率/Hz　　(b) 总声压级

图 1.10　高涵道比($m=6$)飞机监测点 2 的声源贡献
(起飞质量 160 t,距跑道轴线 450 m,最大起飞推力,不考虑横向衰减)

涡桨发动机飞机的噪声特点如图 1.12 和图 1.13(分别表示监测点 2、3)所示,三分之一倍频谱显示宽带噪声掩盖了离散谐波。在起飞和着陆阶段,主要噪声源是螺旋桨,相应声压级超出其他声源 10 dB。

图 1.14 演示了飞机噪声源降噪的完整流程。

机翼上的湍流气流(对应高速和高雷诺数)导致气动噪声的辐射传播。因为涡度、熵和声音等因素,湍流中会产生扰动,扰动间的相互作用可以根据湍流结构、声场特性等的不同在数学上用非线性方程来表述。