

研究论文

基于层次分析法和质量功能展开的民机降噪技术评价

周飞¹, 张涛², 瞿丽霞³, 陈超⁴, 张颖哲^{2,5}, 李晓东^{1*}

摘要 为系统评估并优化民用飞机降噪技术的发展路径,构建了基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和质量功能展开(quality function deployment, QFD)的综合评价体系。从典型飞机噪声源出发,梳理形成包含 23 项技术的民机降噪技术清单,围绕适航性、总降噪量、技术成熟度等 7 个关键评价维度,利用 AHP 方法确定权重并进行一致性检验。在此基础上,采用 3 种基于 QFD 的计分方式,对比个人判断矩阵权重与综合判断矩阵权重对技术评分结果的影响。结果表明,在各专家个人判断矩阵均满足一致性的前提下,3 种计分方式下的技术总得分与排序总体保持稳定。最终,基于计分方式 1 的结果分别形成层级降噪技术发展清单和重点发展降噪技术清单,其中短舱声衬、增压装置低噪声外形设计等技术被推荐为优先发展方向,可为民机降噪技术的规划布局与优先发展提供定量决策依据。

关键词 民机降噪技术;层次分析法;质量功能展开;技术评价体系;发展优先级

随着全球航空运输量的持续增长,航空噪声污染问题日益严峻,已成为制约民用航空产业可持续发展的关键瓶颈^[1]。同时,适航认证标准和环境法规对噪声控制的要求日益严格^[2],进一步加剧了降噪技术优化与创新的紧迫性。尽管目前已有多种针对民机不同噪声源的降噪技术路径^[3],但由于技术体系复杂,缺乏统一且系统化的评价标准,难以科学地确定各项技术的发展优先级。类似的噪声控制技术体系复杂性在道路交通^[4]与轨道交通^[5-6]等地面交通领域同样存

在。因此,亟需构建一套多维度、量化的综合评价方法,为降噪技术的选择与优化提供科学依据。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是由美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的多准则决策方法^[7]。AHP 方法能够有效解决评价指标间权重不明确、主观判断难以量化等问题,已被广泛应用于工程技术评价、项目管理和资源优化等领域^[8]。质量功能展开(quality function deployment, QFD)由日本学者赤尾洋二提出,其核心在于通过矩阵分析,将客户需求(即“客户之声”^[9])逐层分解到产品设计、工程实施和质量控制等各个环节。这一方法最初应用于汽车和造船等行业,帮助企业在早期识别和解决潜在问题,从而缩短开发周期、降低成本并提高产品质量。

近年来,AHP 与 QFD 方法已广泛应用于产品创新与开发、规划与决策等领域,为多准则决策中的权重分配与需求分析难题提供了强大的工具支持。国内,赵擎天等^[10]提出一种基于 QFD 和证据推理的信度

1. 北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京 100191
2. 中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心,北京 102211
3. 中国航空研究院,北京 100086
4. 北京航空航天大学航空发动机研究院,北京 100191
5. 北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京 100191

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-11-25

作者简介: 周飞,博士研究生,研究方向为气动声学,电子邮箱: zhoufei1995@buaa.edu.cn; 李晓东(通信作者),教授,研究方向为气动声学,电子邮箱: lixd@buaa.edu.cn

引用格式: 周飞,张涛,瞿丽霞,等. 基于层次分析法和质量功能展开的民机降噪技术评价[J]. 科技导报, 2026, 44(4): 145-154; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.09.00084

规则库推理(belief rule base inference methodology using evidential reasoning, RIMER)的组合方法,提高了评估武器装备体系使命任务需求满足度的准确性;熊婷婷等^[11]和唐琳等^[12]基于 AHP-QFD 方法,分别完善了履带式移动破碎机和老年人健身器械的设计流程;吴安琪等^[13]和王南轶等^[14]则在采用 QFD 和 AHP 方法的基础上,进一步融合了发明问题解决理论(teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch, TRIZ),分别完成了景区共享代步车和可伸缩式餐桌的设计工作。国外, Bhattacharya 等^[15]结合 AHP 与 QFD 方法,解决了多准则决策环境中的供应商选择问题。Kamvysi 等^[16]将模糊 AHP 方法融入 QFD 框架,通过优化学生课程需求的优先级排序,提高了课程设计的科学合理性。Haber 等^[17]则将 QFD 与 Kano 模型及模糊 AHP 方法相结合,提出了一种适用于产品-服务系统开发的系统化框架,并在医疗设备领域对该框架进行了实践验证研究。

基于上述实践启示,本研究构建了一套针对民航降噪技术的多维度、系统化、快速的评价方法,通过对降噪技术进行量化评估与优先级排序,为民用航空降噪技术的优化与发展路径提供科学决策依据。

1 研究方法

1.1 研究路线

本研究基于 AHP 与 QFD 方法构建了一套民航降噪技术评价体系,研究实施路径如图 1 所示。首先,围绕民航降噪需求,结合国家“双碳”目标和民航发展规划等顶层要求,通过文献调研的方式总结出针对典型飞机噪声源的降噪技术清单,为后续评估提供数据支持。在需求量化分析阶段,运用 AHP 根据利益相关方对降噪技术的需求,确定评价维度及其权重,并通过一致性检验确保权重分配的科学与合理性。评价模型采用 QFD 方法,构建了降噪技术效益评价模型,再将 AHP 分析结果嵌入 QFD 质量屋,结合专家评分结果,搭建出量化评估框架。依据评价结果和评分排名,形成层级降噪技术发展清单,在此基础上,整合专家意见并按噪声源特征分类,最终确定出重点发展降噪技术清单。

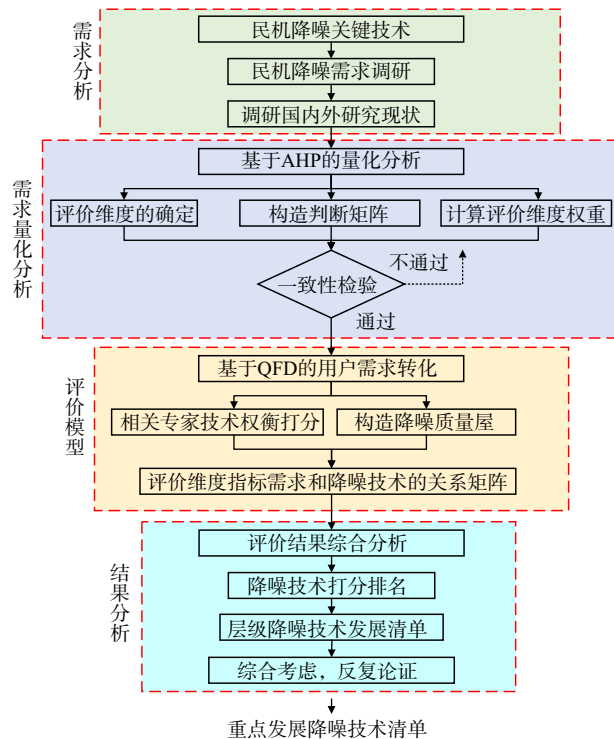


图1 民航降噪技术评价体系

质量屋是 QFD 方法中的核心工具,作为实现用户需求与技术特性耦合的重要载体,它是整个评价体系中最关键的一环。如图 2(a)所示,在经典质量屋模型中,左墙代表客户需求,即用户或利益相关方对产品或技术的核心需求,这些需求通过市场调研、问卷调查等方式获取,是产品设计与开发的起点。与需求相邻的是需求权重,表示不同需求的重要程度。质量屋的顶部为技术特性,指满足客户需求所需的技术规格或设计参数。屋顶显示技术特性之间的相互作用关系,包括正相关、负相关或无明显关联。中心的关系矩阵反映客户需求与技术特性之间的关联程度。右侧显示客户重要性评分和市场竞争对比,底部则包括技术特性评价和特性权重,全面展示了用户需求的转化过程以及技术方案的优劣。为适应民航降噪技术评价需求,本研究对经典质量屋进行了简化与调整,形成了降噪技术评价质量屋,如图 2(b)所示。左墙列出了技术评价维度及其权重,顶部展示了各类降噪技术,中心部分通过专家评分形式量化各降噪技术在不同评价维度下的表现,底部则展示了技术的总评分与排名。

1.2 民航降噪关键技术

为全面评估民航降噪技术的现状与发展潜力,通

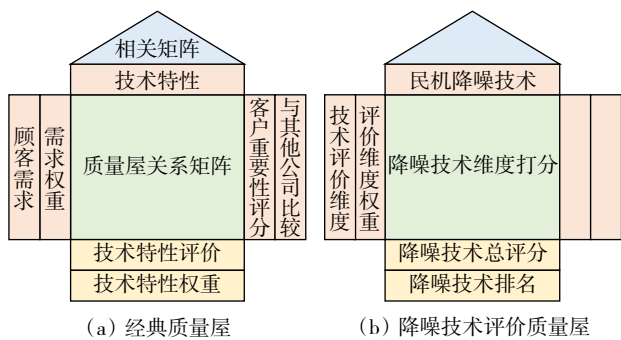


图2 经典质量屋与降噪技术评价质量屋

过文献调研、技术资料整理与专家咨询等方法,整理了针对不同噪声源的民机降噪技术,形成了一套完整的技术清单。降噪技术根据噪声源类别划分,包括增升装置噪声、起落架噪声、短舱噪声、舱内噪声、螺旋桨噪声及新型技术6大类,共23项降噪技术,具体技术清单见表1。

表1 民机降噪关键技术清单

技术大类	序号	降噪技术
增升装置	1	增升装置低噪声外形设计技术
	2	增升装置吹吸气降噪技术
	3	增升装置吸声材料降噪技术
起落架	4	起落架整流罩技术
	5	起落架部件外形优化降噪技术
	6	起落架吸声降噪技术
	7	空气幕及内部吹气
	8	等离子体控制技术
短舱	9	高效低阻声衬技术
	10	进气道唇口声处理技术
	11	锯齿形喷管技术
	12	飞发安装效应降噪设计技术
	13	倾斜喷管技术
舱内	14	壁板非等间距框桁设计技术
	15	复材壁板结构隔声一体化设计技术
	16	轻质绝热吸声层降噪技术
	17	涡桨飞机防冰板功能一体化设计技术
	18	舱内主动降噪技术
螺旋桨	19	低噪声叶型优化设计技术
	20	螺旋桨相位控制降噪技术
新型技术	21	声学超材料技术
	22	分布式电推进系统低噪声设计技术
	23	环形(异型)螺旋桨技术

需说明的是,发动机作为飞机的主要噪声源,风扇与喷流噪声在整体噪声中占主导地位,从多类发动机降噪措施中筛选出5项最具代表性的技术,将其归入短舱技术大类,分别包括用于抑制风扇噪声的高效低阻声衬技术、用于降低进气道声辐射的唇口声处理技术、用于抑制喷流噪声的锯齿喷管技术、用于降低安装效应噪声的飞发安装效应降噪设计技术,及用于降低喷流及干涉噪声的倾斜喷管技术。

2 AHP 层次分析法

评价维度的权重通过 AHP 进行计算,具体过程分为以下4个步骤。

2.1 评价维度的确定

评价维度围绕民机降噪技术发展的多方利益需求,涵盖国家战略、民机制造商、适航当局、航空公司、机场及维修单位等关键利益相关方。通过明确各方对降噪技术的需求,确保评价体系全面涵盖民机设计、制造、维修、运营及培训等全链条,同时兼顾适航性、成本、收益、风险、支撑条件及技术成熟度等关键维度指标。如图3所示,最终确定的技术评价维度包括7个方面:适航、总降噪量、代价、成本、技术成熟度、风险和支撑条件。

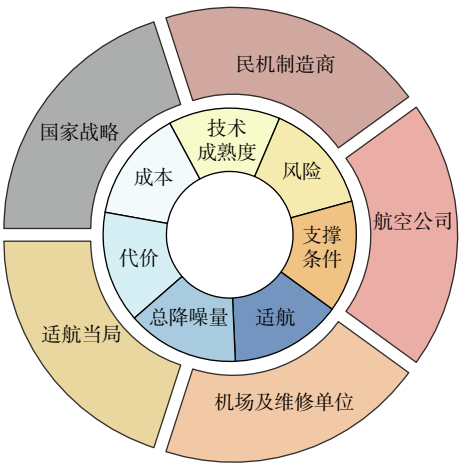


图3 需求方及评价维度

2.2 建立层次结构模型

本研究构建的评级体系以7个评价维度为AHP的核心分析对象,进而建立了民机降噪技术的层次结构模型,如图4所示。

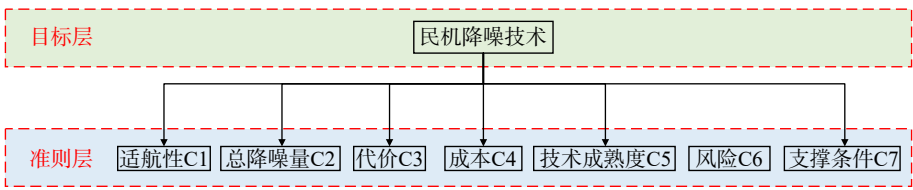


图4 降噪技术层次结构模型

2.3 构造判断矩阵和权重计算

为比较不同评价维度的重要程度即权重,通过构建判断矩阵,并采用1~9标度。表2为不同分值对应的含义说明。当2个维度的重要性相当时,取值为1;当前者相对后者的重要性逐渐增强时,可依次选择3、5、7、9分,分别对应“稍重要”“明显重要”“极其重要”和“强烈重要”。对于1~9中每个整数值,其倒数用于表示两维度交换顺序时的重要性判断。

表2 维度比较标度值

分值	含义
1	表示两维度相比,具有同样的重要性
3	表示两维度相比,前者比后者稍重要
5	表示两维度相比,前者比后者明显重要
7	表示两维度相比,前者比后者极其重要
9	表示两维度相比,前者比后者强烈重要
1~9的倒数	表示相应两维度交换次序比较的重要性

为确保评估的全面性与权威性,邀请了来自行业内的18位专家参与,为研究结果提供了充分的权威支持。专家根据评分细则(表2)对各评价维度的重要性进行评估,并对准则层指标C1~C7进行两两比较。依据评分结果构建出判断矩阵,表3为某位专家的个人判断矩阵,通过18位专家的个人判断矩阵,进一步得到综合判断矩阵。

表3 个人判断矩阵示例

a_{ij}	适航	总降噪量	代价	成本	技术成熟度	风险	支撑条件
适航	1	5	7	1	3	5	9
总降噪量	1/5	1	3	5	1	1	5
代价	1/7	1/3	1	7	5	1	1
成本	1	1/5	1/7	1	1	5	7
技术成熟度	1/3	1	1/5	1	1	3	5
风险	1/5	1	1	1/5	1/3	1	5
支撑条件	1/9	1/5	1	1/7	1/5	1/5	1

综合矩阵中的元素满足:

$$q_m = \frac{CR_m^{-1}}{\sum_{m=1}^{18} CR_m^{-1}} \tag{1}$$

$$A_{c(i,j)} = \sum_{m=1}^{18} Q_m \cdot A_{m(i,j)} \tag{2}$$

式中, q_m 为第 m 位专家判断矩阵在综合矩阵中的权重; CR 为一致性比率(consistency ratio),参考式(5); Q_m 为 q_m 归一化后的权重; $A_{c(i,j)}$ 为综合判断矩阵第 i 行第 j 列的元素; $A_{m(i,j)}$ 为第 m 位专家判断矩阵第 i 行第 j 列的元素; m 为专家数,取值18。

根据个人判断矩阵和综合判断矩阵,分别求出个人维度权重和综合维度权重。首先计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$, 其对应的特征向量 $w = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7]^T$ 代表各评价维度的重要性。为便于实际应用,需对特征向量进行归一化处理,使其满足:

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1 \tag{3}$$

式中,归一化后的 w_i 即为各评价维度的权重系数,反映了各维度在整体评价体系中的相对重要性。

2.4 一致性检验

为确保评分结果的科学性与合理性,必须对维度评分进行一致性检验。权重系数直接影响后续QFD模型中的技术评分,因此该步骤也是评价体系构建中的核心环节。首先计算一致性指标(consistency index),公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

式中, n 表示判断矩阵的阶数,同时也表示评价维度数量, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值, n 越高,其一致性要求越难满足,因此, AHP 的创始人 Saaty 引入随机一致性指标 RI (random index) 来修正 CI 。根据矩阵阶数 n , 可以通过查找对应的 RI 值(表4)。

CR 值则通过下式计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{5}$$

式中,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性可以接受,表明专家打分结果符合逻辑一致性,评价维度权重的计算结果有效;若 $CR \geq 0.1$,则需调整判断矩阵并重新进行打分^[10]。

表 4 R/I 指数对应

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

表5为18位专家的打分矩阵一致性检验结果,所有专家个人CR值均满足一致性检验要求。根据18位专家的打分,形成的综合判断矩阵CR值为0.2163,未能通过一致性检验,尽管每位专家的打分满足一致性要求,但由于专家间的意见差异,且评价维度较多,故导致整体一致性较难满足。经过进一步分析,发现实际应用中只需确保每位专家个人判断矩阵满足一致性检验标准,便可保证结果的科学性与合理性。

表 5 维度权重专家打分情况

专家	矩阵CR	权重 $Q_m/\%$	专家	矩阵CR	权重 $Q_m/\%$
专家1	0.059	1.89	专家10	0.09	0.16
专家2	0.057	2.30	专家11	0.017	56.05
专家3	0.056	2.49	专家12	0.067	0.98
专家4	0.086	0.22	专家13	0.087	0.20
专家5	0.035	13.63	专家14	0.071	0.73
专家6	0.062	1.46	专家15	0.055	2.64
专家7	0.072	0.67	专家16	0.083	0.27
专家8	0.048	4.54	专家17	0.067	0.98
专家9	0.079	0.39	专家18	0.038	10.41

根据专家的打分,最终确定出评价维度的权重系数,如图 5 所示,评价维度的重要性由高到低依次为:

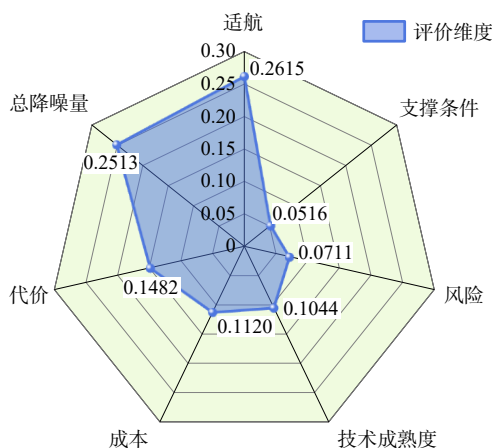


图 5 评价维度权重系数

适航性、总降噪量、代价、成本、技术成熟度、风险和支撑条件,对应的维度权重分别为 0.2615、0.2513、0.1482、0.1120、0.1044、0.0711 和 0.0516。

3 QFD 质量功能展开

3.1 质量屋展开

通过调查问卷的方式,邀请专家对各技术进行维度打分,评分标准为 1、3、5、7、9,表示技术在各评价维度上的表现,分值从低到高递增。

将专家评分按照对应关系填入质量屋,结合 AHP 计算得到的各评价维度权重,从而确定不同降噪技术的综合评分,并基于评分结果确定技术发展的优先级。考虑到表 5 中多数专家维度矩阵的权重较小,对综合权重的影响有限,且出现综合矩阵 $CR>0.1$ 的情况,因此进一步探讨不同计分方式对降噪技术评分的影响。本研究采用了 3 种计分方式,方式 1 为常规质量屋展开方式,利用综合矩阵计算的维度权重,方式 2、3 则未利用综合矩阵结果,仅利用专家个人矩阵计算所得维度权重,3 种方式计算公式如下:

$$S_{\text{total}_1} = \sum_{j=1}^n \left(W_{c_j} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m S_{ij}}{m} \right) \quad (6)$$

$$S_{\text{total2}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \cdot S_{ij}}{m} \quad (7)$$

$$S_{\text{total3}} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^m W_{ij}}{m} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m S_{ij}}{m} \right) \quad (8)$$

式中, S_{total} 为技术总评分, 下标对应 3 种评分方式; m 为专家人数, 用 $i=1, 2, \dots, m$ 表示, 取值 18; n 为维度数量, 用 $j=1, 2, \dots, n$ 表示, 取值 7; S_{ij} 为第 i 位专家对第 j 个维度的技术评分; W_{ij} 为第 i 位专家第 j 个维度的权重; W_{ci} 为综合矩阵第 j 个维度的权重。

图6为3种评分方式下各项降噪技术排名情况(序号对应关系见表1)。尽管采用3种不同的评分方式,但3种方式下排名区别较小,方式1与方式3的技术排名完全一致,而方式2与方式1、3的排名相同的技术超过1/2,其余技术的最大排名差仅为2位。

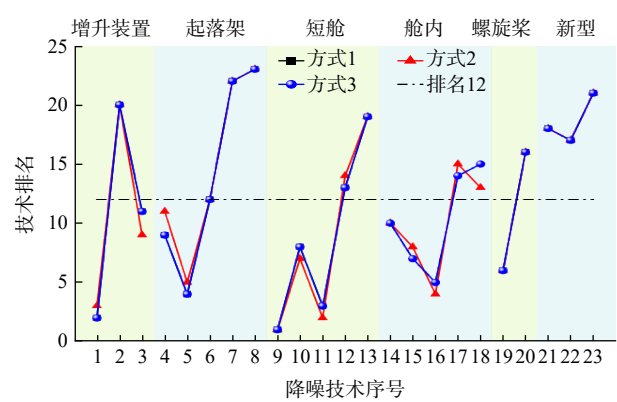


图6 3种方式下技术排名

如图7所示,降噪技术在3种不同评分方式下的总评分分布趋势基本一致。横轴为技术序号,纵轴为技术总评分,整体评分范围在3~8波动。结合图6排名结果可知,无论采用个人维度权重还是综合维度权重,打分结果均能全面反映18位专家的观点。同时,结果验证了在评估中仅需确保每位专家的个人判断矩阵CR满足一致性检验,无论综合矩阵CR值一致性通过与否,所得结果仍具备较高的可靠性和稳定性。

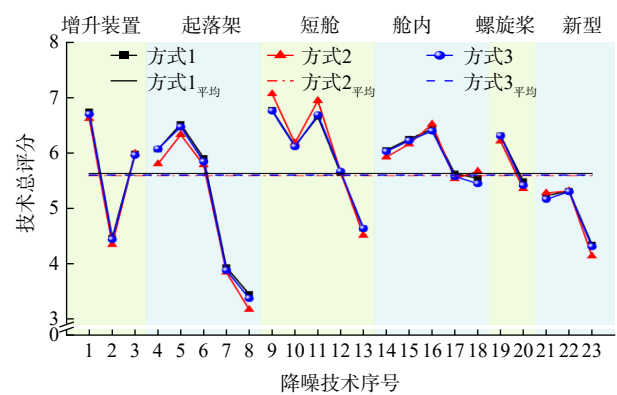


图7 3种方式下综合评分

以下将以方式1即常规质量屋展开的结果进行分析。表6~表10为采用方式1降噪技术质量屋。

3.2 层级降噪技术发展清单

根据评估结果,将技术优先级按排名升序划分为4个层级:第1~6名为最高优先级,第7~12名为中高优先级,第13~18名为中优先级,第19~23名为低优先级,形成层级降噪技术发展清单,详见表11。

观察降噪质量屋与层级发展清单,23项降噪技术中,短舱类技术整体表现突出,尤其是高效低阻声衬技术位列第1,表明其在各维度下优势显著^[18]。增升装置低噪声外形设计^[19]和起落架部件外形优化^[20]等技

表6 增升装置降噪技术质量屋

评价维度	维度权重	增升装置降噪技术		
		增升装置低噪声外形设计技术	增升装置吹吸气降噪技术	增升装置吸声材料降噪技术
适航	0.2615	6.44	4.00	5.67
总降噪量	0.2513	6.89	4.67	6.00
代价	0.1482	6.89	5.44	6.56
成本	0.1120	7.22	3.89	6.00
技术成熟度	0.1044	7.00	3.89	6.22
风险	0.0711	6.67	5.33	6.33
支撑条件	0.0516	5.56	4.22	4.78
总评分		6.74	4.46	5.98
排名		2	20	11

表7 起落架降噪技术质量屋

评价维度	维度权重	起落架降噪技术				
		起落架整流罩技术	起落架部件外形优化降噪技术	起落架吸声材料降噪技术	空气幕及内部吹气技术	等离子体控制技术
适航	0.2615	6.11	6.22	5.22	3.33	2.89
总降噪量	0.2513	6.00	6.56	6.33	4.22	4.11
代价	0.1482	6.00	7.11	6.44	5.11	4.33
成本	0.1120	6.56	6.78	6.00	3.33	2.89
技术成熟度	0.1044	5.56	6.67	6.11	3.78	2.33
风险	0.0711	6.44	6.56	6.33	4.56	4.22
支撑条件	0.0516	5.67	5.11	4.44	3.00	3.00
总评分		6.06	6.51	5.90	3.94	3.45
排名		9	4	12	22	23

表8 短舱降噪技术质量屋

评价维度	维度权重	短舱降噪技术				
		高效低阻声衬技术	进气道唇口声处理技术	锯齿形喷管技术	飞发安装效应降噪设计技术	倾斜喷管技术
适航	0.2615	6.22	5.78	6.22	5.22	4.44
总降噪量	0.2513	6.78	6.22	5.89	5.33	4.44
代价	0.1482	7.11	6.44	6.89	6.00	5.22
成本	0.1120	6.78	6.00	8.11	5.89	4.89
技术成熟度	0.1044	7.78	6.78	8.11	6.56	4.78
风险	0.0711	6.89	6.33	6.89	6.33	5.22
支撑条件	0.0516	6.22	5.11	5.33	4.67	3.22
总评分		6.77	6.12	6.65	5.63	4.64
排名		1	8	3	13	19

表 9 舱内降噪技术质量屋

评价维度	维度权重	舱内降噪技术			
		壁板非等间距框桁设计技术	复材壁板结构隔声一体化设计技术	轻质绝热吸声层技术	壁板非等间距框桁设计技术
适航	0.2615	5.89	6.11	6.00	5.22
总降噪量	0.2513	6.00	6.22	6.56	5.67
代价	0.1482	6.78	6.78	6.89	6.44
成本	0.1120	5.67	6.00	6.22	5.78
技术成熟度	0.1044	6.44	6.89	7.11	5.44
风险	0.0711	6.22	6.11	6.44	5.89
支撑条件	0.0516	4.67	4.89	5.56	4.67
总评分		6.04	6.24	6.42	5.62
排名		10	7	5	14

表 10 螺旋桨和新型降噪技术质量屋

评价维度	维度权重	螺旋桨和新型降噪技术				
		低噪声叶型优化设计技术	螺旋桨相位控制技术	声学超材料技术	分布式电推进系统低噪声设计技术	环形(异型)螺旋桨技术
适航	0.2615	6.22	5.11	4.56	5.00	4.22
总降噪量	0.2513	6.56	6.00	5.67	5.56	4.67
代价	0.1482	6.00	5.67	6.11	5.89	5.11
成本	0.1120	6.22	5.33	4.22	4.44	3.33
技术成熟度	0.1044	6.78	5.78	5.89	5.22	3.89
风险	0.0711	6.44	5.33	5.33	5.78	4.78
支撑条件	0.0516	5.44	4.22	4.56	5.44	3.67
总评分		6.31	5.48	5.22	5.31	4.34
排名		6	16	18	17	21

术则通过优化气动外形和影响流场结构,展现出较高的降噪潜力,均为最高优先级发展技术。

复材壁板结构隔声一体化设计技术和壁板非等间距框桁设计技术在舱内降噪领域展现了良好的适用性与工程化前景,此外,增升装置吸声材料降噪技术作为一种材料类降噪技术,因其较低的实现成本,同样具备较高的工程应用潜力,故上述 3 种技术被归类为中高优先级发展技术。然而,中高优先级技术整体得分较高,实际应用中却仍存在一些不足。例如,起落架整流罩技术需要一定的连接固定装置,可能会导致一定的安全风险^[21],增升装置吸声材料降噪技术

表 11 层级降噪技术发展清单

排名	降噪技术	发展优先级
1	高效低阻声衬技术	最高优先级
2	增升装置低噪声外形设计技术	
3	锯齿形喷管技术	
4	起落架部件外形优化降噪技术	
5	轻质绝热吸声层降噪技术	
6	低噪声叶型优化设计技术	
7	复材壁板结构隔声一体化设计技术	中高优先级
8	进气道唇口声处理技术	
9	起落架整流罩技术	
10	壁板非等间距框桁设计技术	
11	增升装置吸声材料降噪技术	
12	起落架吸声降噪技术	
13	飞发安装效应降噪设计	中优先级
14	涡桨飞机防冰板功能一体化设计技术	
15	舱内主动降噪技术	
16	螺旋桨相位控制降噪技术	
17	分布式电推进系统低噪声设计技术	
18	声学超材料技术	
19	倾斜喷管技术	低优先级
20	增升装置吹吸气降噪技术	
21	环形(异型)螺旋桨技术	
22	空气幕及内部吹气技术	
23	等离子体控制技术	

则可能引发额外的气动损失^[22]。

在中优先级发展技术中,飞发安装效应降噪设计技术^[23]和涡桨飞机防冰板功能一体化设计等技术可针对特定场景下的噪声源优化,展现出良好的降噪潜力。中优先级发展技术大多具备一定的降噪能力,但由于设计复杂性较高、环境适应性不足等问题,这些技术的适用性相对较为局限,通常需要针对特定飞机构型进行设计和调整。

相比之下,增升装置吹吸气降噪技术^[24]、空气幕及内部吹气^[25-26]、等离子体控制技术^[27]等技术需要额外的驱动机构和能量消耗,且伴随风险的增加,距离工程化还有很长一段路要走,故均为低优先级发展技术。

需注意的是,部分综合排名较低的技术在某些关键评价维度上的得分较低,这可能限制其短期内的的发展,发展时还需结合实际情况进一步考量。例如,新

型超材料技术因加工难度大、技术成熟度低,短期内难以实际应用,但随着相关技术的进步与成熟度的提高,其实际应用价值有望显著提升^[28]。整体看,多数短舱类及增升装置类降噪技术综合表现突出,起落架类和舱内降噪技术同样具有较大的发展潜力,而新型降噪技术则需要进一步突破技术瓶颈。

3.3 重点发展降噪技术清单

根据噪声源特征分类,对评分结果和技术排名进行综合分析权衡。

增升装置类降噪技术主要针对前缘缝翼和后缘襟翼进行降噪处理。其中,增升装置低噪声外形设计技术通过翼型外形优化可显著降低噪声^[29],随着仿真能力和计算机技术的不断发展,该技术有望成为增升装置降噪的关键方向。此外,增升装置声学处理技术则通过在装置特定部位引入声学材料或声衬结构,可有效降低局部噪声,故将上述技术列为重点发展技术。

起落架降噪技术中,部件优化降噪技术被认为是一种潜力较大的降噪方案。国外研究表明,通过优化起落架的布局、支杆及管线等结构,可显著改善噪声性能,且在不同项目阶段已完成了部件优化降噪技术的升级迭代,形成了一定的设计方法和经验积累^[30],国内尽管在此领域已有一定基础,但整体研究深度不足。另外,整流罩降噪技术在国内仍处于传统降噪效果探索阶段,尚未形成系统化的研究体系,但其工程实用性较强,仍是目前最成熟的起落架降噪方案,具有良好的应用前景。起落架吸声材料降噪技术^[31]则通过舱盖遮蔽吸收噪声,从而降低远场噪声强度,且该技术实施成本较低。上述3种技术同样被列为重点发展方向。

短舱降噪技术中,各类声衬及锯齿形喷管技术不仅具备较高的技术成熟度和良好的试验验证基础,还展现出显著的降噪效果,建议重点发展。相较之下,其余技术因成熟度较低,且实现难度较大,不建议优先发展。

舱内降噪技术包括壁板隔声、隔热吸声及主动降噪等多个方向^[32]。其中,主动降噪技术^[33]通过在舱内布置麦克风、激振器、误差传声器等仪器设备,产生与噪声场的声模态相位相反、幅值相等的信号来控制舱内声模态,在中低频段内可获得较好的噪声控制效果。此外,壁板结构隔声一体化设计技术通过优化舱

内壁板结构,能够显著提升其隔声性能。绝热吸声层设计技术则凭借其在隔热与吸声方面的卓越性能,能在降噪的同时提升乘客的舒适性,因此推荐将上述技术列为重点发展方向。

螺旋桨降噪技术正逐步向多目标、多学科一体化设计方向发展^[34]。其中,基于低噪声叶型优化的设计技术是目前该领域的热门方向,随着计算机技术的不断发展,该技术有望获得更大的发展前景。

在新型技术领域,尽管声学超材料技术得分略低于分布式电推进降噪技术,但其基于亚波长尺度设计的人工结构单元,能够调控特定频段声波,为低频宽带噪声控制提供了全新路径。作为未来噪声抑制的潜力技术,建议作为中长期重点研究方向。

最终形成重点发展降噪技术清单,见表12(排名不分前后)。

表 12 重点发展降噪技术清单

序号	技术大类	降噪技术
1	增升装置	增升装置低噪声外形设计技术
2		增升装置声学处理技术
3	起落架	起落架整流罩技术
4		起落架部件优化降噪技术
5		起落架吸声材料降噪技术
6	短舱	高效低阻声衬技术
7		锯齿形喷管技术
8	舱内	壁板结构隔声一体化设计技术
9		绝热吸声层设计技术
10		舱内主动控制技术
11	螺旋桨	低噪声叶型优化设计技术
12	新型	声学超材料技术

4 结论与展望

针对23项民机降噪技术,提出了一种基于AHP与QFD的综合评价体系,通过多维度量化评分与优先级排序,最终形成重点发展降噪技术清单。本研究为民机制造商、研究机构及政策制定者提供了理论依据,助力中国民机产业实现低噪声、低排放的可持续发展目标,主要结论如下。

(1) 研究表明,3种评分方式均能全面反映18位专家的观点,且在计算评价维度权重时,只需确保个

人判断矩阵的一致性检验结果 $CR < 0.1$, 即可保证结果的可靠性和稳定性, 综合矩阵 CR 值对结果准确性没有显著影响。(2) 评价结果表明, 短舱类技术整体表现优异, 其中“高效低阻声衬”技术总评分第一。多数增升装置类和起落架类降噪技术也表现出较高的降噪潜力。然而, 部分技术因需要额外的驱动机构且伴随较高的运行风险, 发展时需权衡考虑。(3) 声学超材料等新兴降噪技术由于技术成熟度和可行性方面的限制, 整体综合评分较低, 但其在降噪领域展现出巨大潜力, 值得重点关注。随着未来研究的不断深化和产业配套的完善, 这些技术有望带来颠覆性进展。

未来研究可从3方面进一步拓展。

(1) 不同机型的噪声表现具有差异性, 后续研究可结合不同典型机型的实际应用场景, 对评价结果进行工程层面的对比验证, 以进一步提升方法体系的适用性和工程有效性。(2) 鉴于降噪技术的成熟度会随时间变化, 未来可探索采用德尔菲法等多轮专家意见收敛机制, 定期更新评价维度权重, 使评价体系具备随技术演化动态调整的能力。(3) 本研究提出的AHP-QFD综合评价框架具有良好的可扩展性, 未来可进一步扩展至民机减阻、节能和地面交通降噪等其他关键技术领域, 为相关设计与布局优化提供科学支持。

致谢: 参与本研究的中国商飞上海飞机设计研究院张美红、中国空气动力研究与发展中心刘红阳、中国飞机强度研究所延浩、中国航空工业空气动力研究院李春鹏和西北工业大学杨体浩等以及参与技术评价打分的专家学者。

参考文献 (References)

- [1] Liu X R, Zhao D, Guan D, et al. Development and progress in aeroacoustic noise reduction on turbofan aeroengines[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2022, 130: 100796.
- [2] 毛玉如, 汪赟, 张建勋. 中国噪声自动监测的现状和发展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 23-31.
- [3] Sadeghian M, Gorji-Bandpy M. Investigation all types of aircraft noises: Review paper[J]. American Journal of Science, Engineering and Technology, 2020, 5(1): 33.
- [4] 袁晏恣, 王彦琴, 邵社刚, 等. 道路交通噪声控制技术研发进展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 85-94.
- [5] 户文成, 刘磊, 康钟绪, 等. 城市轨道交通噪声污染防治进展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 70-84.
- [6] 刘兰华, 李志强, 周铁军, 等. 中国高速铁路噪声控制研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 60-69.
- [7] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.
- [8] Vaidya O S, Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [9] Griffin A, Hauser J R. The voice of the customer[J]. Marketing Science, 1993, 12(1): 1-27.
- [10] 赵擎天, 李立伟, 侯立志, 等. 武器装备体系满足需求程度评估方法[J]. 科技导报, 2025, 43(7): 116-125.
- [11] 熊婷婷, 林莹雪, 安雪琪. 基于AHP-QFD理论的履带式移动破碎机设计[J]. 机械设计, 2023, 40(Suppl 2): 27-32.
- [12] 唐琳, 常瑜, 王子瑞. 基于QFD与AHP的老年人健身器械造型设计[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 199-204.
- [13] 吴安琪, 韩宇翔, 叶文涛, 等. 基于AHP/QFD/TRIZ的景区共享代步车创新设计研究[J]. 包装工程, 2022, 43(Suppl 1): 151-160.
- [14] 王南轶, 石畅, 魏阳阳, 等. 基于AHP/QFD/TRIZ理论的可伸缩式餐桌设计[J]. 包装工程, 2023, 44(2): 90-100.
- [15] Bhattacharya A, Geraghty J, Young P. Supplier selection paradigm: An integrated hierarchical QFD methodology under multiple-criteria environment[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(4): 1013-1027.
- [16] Kamvysi K, Gotzamani K, Andronikidis A, et al. Capturing and prioritizing students' requirements for course design by embedding Fuzzy-AHP and linear programming in QFD[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 237(3): 1083-1094.
- [17] Haber N, Fargnoli M, Sakao T. Integrating QFD for product-service systems with the Kano model and fuzzy AHP[J]. Total Quality Management & Business Excellence, 2020, 31(9/10): 929-954.
- [18] Ma X Q, Su Z T. Development of acoustic liner in aero engine: A review[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(12): 2491-2504.
- [19] 王红建, 田峻源, 罗望. 缝翼结构参数对缝翼噪声影响的三维仿真分析[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1129-1137.
- [20] Kopiev V, Belyaev I, Zaytsev M, et al. Experimental study of truncated-cylinder struts for noise reduction of large-scale landing gears[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 511: 116362.
- [21] Eret P, Kennedy J, Bennett G J. Effect of noise reducing components on nose landing gear stability for a mid-size aircraft coupled with Vortex shedding and freeplay[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 354: 91-103.
- [22] Angland D, Zhang X, Molin N. Measurements of flow around a flap side edge with porous edge treatment[J]. AIAA Journal, 2009, 47(7): 1660-1671.

- [23] 李晓东, 徐希海, 高军辉, 等. 喷流噪声研究进展与展望[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 398–409.
- [24] Koop L, Ehrenfried K, Dillmann A, et al. Reduction of flap side edge noise by active flow control[C]//Proceedings of 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit. AIAA, 2002: AIAA2002–2469.
- [25] Oerlemans S, de Bruin A. Reduction of landing gear noise using an air curtain[C]//Proceedings of 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference). Reston, Virginia: AIAA, 2009: 3156.
- [26] Angland D, Zhang X, Goodyer M. Use of blowing flow control to reduce bluff body interaction noise[J]. AIAA Journal, 2012, 50(8): 1670–1684.
- [27] Huang X, Zhang X, Li Y. Broadband flow-induced sound control using plasma actuators[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(13): 2477–2489.
- [28] Lu Q B, Li X, Zhang X J, et al. Perspective: Acoustic metamaterials in future engineering[J]. Engineering, 2022, 17: 22–30.
- [29] Zhang Y, Cattafesta L, Pascioni K, et al. Slat noise in high-lift systems[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2024, 146: 100996.
- [30] Zhao K, Okolo P, Neri E, et al. Noise reduction technologies for aircraft landing gear—a bibliographic review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 112: 100589.
- [31] Khorrami M R, Lockard D P, Humphreys W M, et al. Flight-test evaluation of airframe noise mitigation technologies[C]//Proceedings of 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2018: 2972.
- [32] 左孔成, 陈鹏, 王政, 等. 飞机舱内噪声的研究现状[J]. 航空学报, 2016, 37(8): 2370–2384.
- [33] Emborg U, Samuelsson F, Holmgren J, et al. Active and passive noise control in practice on the Saab 2000 high speed turboprop[C]//Proceedings of 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1998: 2231.
- [34] 宋翔, 余培汛, 白俊强, 等. 基于Hanson噪声模型的螺旋桨气动与噪声优化设计[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 685–694.

Evaluation of noise-reduction technologies for civil aircraft based on the analytic hierarchy process and quality function deployment

ZHOU Fei¹, ZHANG Tao², QU Lixia³, CHEN Chao⁴, ZHANG Yingzhe^{2,5}, LI Xiaodong^{1*}

1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Beijing Key Laboratory of Simulation Technology for Civil Aircraft Design, Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China

3. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100086, China

4. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China

5. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract To systematically evaluate and optimize the development roadmap of noise-reduction technologies for civil aircraft, a comprehensive assessment framework integrating the analytic hierarchy process (AHP) and quality function deployment (QFD) is established. Starting from representative aircraft noise sources, a technology list consisting of 23 noise-reduction approaches is compiled. Seven key evaluation criteria, including airworthiness compliance, total noise-reduction potential, and technology readiness level, are defined, and the corresponding weights are determined through AHP with consistency verification. Based on these weights, three QFD-based scoring methods are applied to compare the influence of individual judgment matrices and an aggregated judgment matrix on the final technology ranking. The results indicate that, provided all expert judgment matrices satisfy the consistency requirement, both the overall scores and rankings of the technologies remain stable across the three scoring methods. According to the results of Scoring Method I, hierarchical development lists and priority development lists of noise-reduction technologies are formulated. Among these technologies, nacelle acoustic liners and low-noise aerodynamic design of high-lift devices are recommended as priority development directions. This study provides a quantitative decision-making basis for the strategic planning and prioritization of noise-reduction technologies for civil aircraft.

Keywords civil aircraft noise reduction technologies; analytic hierarchy process; quality function deployment; technology evaluation system; development priorities ●



(责任编辑 徐丽娇)