

双级风扇转 - 静干涉单音噪声研究

高瑞彪, 陈伟杰, 同航, 连建欣, 乔渭阳*

西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月10日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月21日

摘要

单音噪声是风扇的重要声源之一, 风扇单音是叶片的粘性尾迹与下游叶片的周期性相互作用产生的。双级风扇中有四排叶片, 声源更多。为降低双级风扇的噪声, 首先需要研究双级风扇中的声源分布情况。本文主要研究双级风扇中R1-S1和R2-S2之间的尾迹干涉, 分析了S1和S2叶片前传的单音噪声。采用非定常雷诺时均(URANS)和声类比方法(Goldstein方程)的混合方法, 对比分析了三种单音噪声的强弱。结果表明: 第2级处于“截通”状态的模态数量高于第1级, 导致了S2产生的单音噪声高于S1。在1BPF处, S2在声功率级比S1高了13.09 dB。

关键词

单音噪声, 双级风扇, 转 - 静干涉

Investigation on Rotor-Stator Interaction Tonal Noise of Two-Stage Fan

Ruibiao Gao, Weijie Chen, Hang Tong, Jianxin Lian, Weiyang Qiao*

School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 10th, 2023; accepted: Sep. 14th, 2023; published: Sep. 21st, 2023

Abstract

The tone noise is one of the important sound sources of fan. Tone noise is generated by the interaction between the viscous wake of blade and the downstream vanes. There are four rows of blades in the two-stage fan, and the sound source is more. In order to reduce the noise of the two-stage fan, it is necessary to study the sound source distribution of the two-stage fan. This paper mainly studies the interaction between R1-S1 and R2-S2 of two-stage fan, and analyzes the tone noise of S1 and S2 blade forward transmission. The acoustic performance of the fan is nu-

*通讯作者。

merically investigated using a hybrid unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes (URANS)/acoustic analogy method (Goldstein equations). The result show that the number of “cut-on” modes of the second stage is higher than that of the first stage, resulting in higher tone noise of S2 than that of S1. The sound power level of S2 is 13.09 dB higher than that of S1 at 1BPF.

Keywords

Tone Noise, Two-Stage Fan, Rotor-Stator Interaction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

面对航空运输市场的迅速发展，特别是面对未来对环境要求的不断提高，飞机适航噪声标准进一步严格。大型客机及其发动机的气动噪声控制，已成为目前影响飞机研制和适航取证的关键技术之一[1]。航空发动机是飞机强烈噪声辐射的根源，为了适应未来更加严格的飞机适航噪声标准，满足人类对超安静飞机设计的需要，并取得市场竞争的优势，必须进一步降低航空发动机噪声辐射[2]。其中，轴流式压缩机(风扇、压缩机)作为现代高性能航空燃气涡轮喷气发动机的重要部件，是当代民用大涵道比涡扇发动机主要噪声部件[3]。

风扇噪声由单音噪声和宽频噪声组成，每一种噪声大概占据高涵道比涡扇发动机产生的总声功率的一半。风扇单音噪声主要由风扇产生的黏性尾迹与下游静子叶片干涉而产生的周期性非定常载荷造成。与风扇单音噪声相比，风扇宽频噪声的产生机理要复杂得多，如来流湍流与转子的相互作用、转子的粘性尾流与下游静子的相互作用、边界层湍流与转子叶片的相互作用、边界层湍流与静子叶片的相互作用等[4] [5]。本文主要分析双级风扇的单音噪声。

在航空发动机气动声学研究发展的历史长河中，Tyler 和 Sofrin [6]发展的管道声模态传播与截止理论，以及 Goldstein [7]基于 Lighthill 声类比理论和广义格林函数发展的叶轮机管道声模态基本方程，是两个的重要里程碑。Tyler 和 Sofrin 首次利用理论分析和实验测量方法系统揭示了轴流风扇/压气机管道内噪声的产生、传播和辐射过程，通过将圆形或者环形管道内的声场分解成不同的周向模态和径向模态，最终给出了管道声模态沿轴向传播的“截止”判据，成为目前发动机管道声学研究的通用理论[8] [9] [10]。基于 Goldstein 管道声学模型，人们认识到影响叶轮机(风扇/涡轮)噪声的主要声源是转子叶片和静子叶片表面非定常载荷形成的声学偶极子，因此对叶轮机噪声预测的问题就主要集中在对转静子叶片非定常气动载荷的预测计算。基于 URANS 和 Goldstein 方程的混合方法可以预测风扇转静子干涉产生的单音噪声 [11] [12] [13]。

关于风扇转 - 静干涉单音噪声的研究，本课题组针对单个风扇级已经做了一些相应的工作[14] [15] [16]。本文的研究目标是一个双级风扇，双级风扇中有四排叶片，其中的声源更多。为降低双级风扇的噪声，首先需要研究双级风扇中的声源分布情况。本文基于流场(URANS)/声场(Goldstein 方程)混合预测模型，分析双级风扇中转 - 静干涉产生的单音噪声。

2. 双级风扇模型

本文研究的是一个双级轴流风扇，如图 1 所示。表 1 给出了双级风扇的重要设计参数。双级风扇有

4排叶片,第1级转子(R1)的叶片数为18,第1级静子(S1)的叶片数为20,第2级转子(R2)的叶片数为22,第2级静子(S2)的叶片数为24。

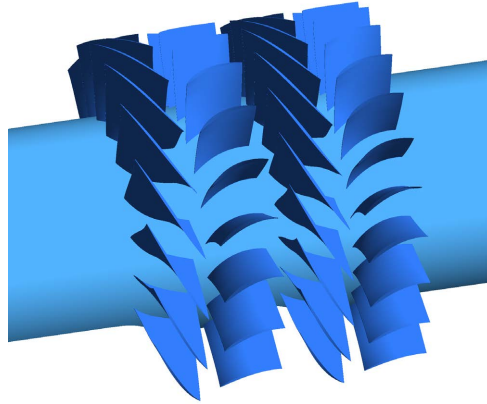


Figure 1. Physical model of two-stage fan
图 1. 双级风扇模型

Table 1. Key design parameter of two-stage fan
表 1. 双级风扇的关键参数

Parameter	Data
Numberof R1 blades	18
Numberof S1 blades	20
Numberof R2 blades	22
Numberof S2 blades	24
Shroud diameter/mm	250
Hub diameter/mm	150
Tip clearance/mm	1
Design speed/rpm	5000
Design mass flow/kg·s ⁻¹	8.5
Total pressure ratio	1.1
Isentropic efficiency	83.5

3. 数值方法

3.1. 非定常流场计算方法

在目前的方法中,通过CFD方法获得流场中的非定常压力脉动。风扇单音噪声主要是转子叶片的粘性尾迹作用在静子叶片上产生的。*URANS*方法可以捕捉到转子叶片尾迹的周期性特征。所以,本文采用*URANS*方法来获得单音噪声源。采用*SST k- ω* 湍流模型进行流场计算,瞬态计算采用二阶欧拉方法[17]。

时间步长的设置非常重要,时间步长过大会导致无法完全捕捉压力的波动,时间步长过小会严重增加计算时间。所以,非定常计算需要合适的时间步长。图2显示的是S1叶片吸力面80%和20%监控点处压力随时间的波动。三个不同的时间步长($2e-5$, $1e-5$, $0.5e-5$)被研究。叶片80%和20%监控点处的压力波动非常相似在 $1e-5$ 和 $0.5e-5$ 的时间步长,并且波谷处的压力波动被捕捉到。然后,时间步长为 $2e-5$,80%处的波谷处压力波动与 $1e-5$ 和 $0.5e-5$ 时间步长的不同,并且80%处的波谷处压力波动没有被捕捉。

所以, 非定常计算的时间步长选取的为 $1e-5$ s, 每个叶片通道划分为 67, 60, 55, 50 (R1, S1, R2, S2) 个时间步。

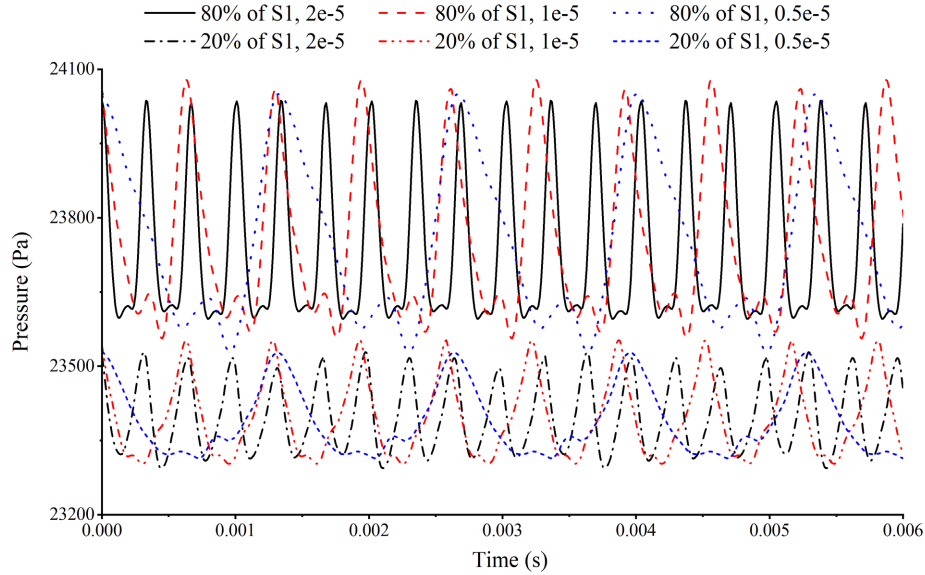


Figure 2. Time histories of stator pressure
图 2. 静子叶片的压力

3.2. 噪声预测方法

单音噪声预测混合方法通过将叶轮机非定常流场数值模拟结果与 *Goldstein* 方程[7]耦合, 实现对叶轮机械单音噪声的模拟。基于气动声学基本理论, 在均匀流动条件下, 运动介质中物体所产生的气动噪声可表示主要由单极子噪声、偶极子噪声和四极子噪声组成。对于真实压气机/风扇来说, 单极子噪声和四极子噪声可以忽略不计, 主要噪声源是由叶片表面非定常载荷产生的偶极子声源, 因此气动噪声声压的公式可写为:

$$p(x, t) = \int_{-t}^t \int_{s(\tau)} \frac{\partial G}{\partial y_i} f_i d_s(y) d_\tau \quad (1)$$

其中, x 和 y 分别代表观测点坐标和声源坐标, $s(\tau)$ 表示运动物体的表面, f_i 表示运动物体表面处的非定常载荷, G 是管道格林函数。

在求解管道声压时, 假设流体无粘, 叶片表面载荷 f 与叶片表面正交, 则 $f = P_n$, 其中 P 为叶片表面非定常载荷, n 为叶片表面外法向量, 于是公式(1)经傅里叶变换后可以写为如下形式。

$$p(x, \omega) = \sum_m \sum_n A_{mn}(\omega) \varphi_{mn}(\kappa_{mn} r) \cdot \exp(im\phi - i\gamma_{mn} x_1) \quad (2)$$

$$\varphi_m(\kappa_{mn} r) = a \cdot J_m(\kappa_{mn} r) + b \cdot Y_m(\kappa_{mn} r) \quad (3)$$

$$A_{mn}(\omega) = \frac{1}{2i\Gamma_{mn}\kappa_{mn}} \int_{S_F} \{n\varphi_m(\kappa_{mn} r') \cdot \nabla[\exp(-im\phi' + i\gamma_{mn} y_1)] P(y, \omega - m\Omega)\} d_s(y) \quad (4)$$

式中 J_m 为第一类贝塞尔函数; Y_m 为第二类贝塞尔函数; κ_{mn} 为管道特征值; a, b 为相应的比例系数; γ_{mn} 为第 (m, n) 阶模态的轴向波数; A_{mn} 为频率 ω 下第 (m, n) 阶模态的声压振幅。

假设第 s 个静子叶片上所受的载荷为 $P_s(y_0, \omega m\Omega)$, 则所有静子叶片对声压振幅 A_{mn} 作出的贡献如下:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{1}{2i\Gamma_{mn}\kappa_{mn}} \int_{S_F} \{ny_0\varphi_m(\kappa_{mn}r') \cdot \nabla[\exp(-im\phi' + i\gamma_{mn}y_1)] \cdot [\sum_{s=0}^{V-1} P_s(y_0, \omega - m\Omega) \exp(\frac{2\pi i m s}{V})]\} d_s(y) \quad (5)$$

可以得到不同模态下的声功率 $\delta_{mn}(\omega)$ 。

$$\delta_{mn}(\omega) = \frac{\pi(r_D^2 - r_H^2)}{\rho_0 U} \cdot \frac{\mp Ma^2(1 - Ma^2)^2 (\frac{\omega}{U}) k_{mn}(\omega)}{[\frac{\omega}{c_0} \pm Mak_{mn}(\omega)]^2} \cdot [A_{mn}(\omega) \cdot (A_{mn}(\omega))^*] \quad (6)$$

式中符号“-”表示上游方向，“+”代表下游方向， c_0 表示声速。将频率 ω 下所有模态的声功率求和就可以得到总声功率。

$$\delta(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_{mn}(\omega) \quad (7)$$

对于单音噪声而言，噪声频率位于叶片通过频率及其高次谐波上。

$$\omega = sB\Omega \quad (s=1,2,3,\dots) \quad (8)$$

式中， B 为转子叶片数。

3.3. 噪声预测方法的验证

Tong等[12]在半消声室中测量了NPU-fan管道声场的声功率。NPU-fan设计参数如表2所示。NPU-fan的设计转速为3000 rpm，与本文中的双级风扇都是低转速。如图3所示，噪声预测结果与实验结果做了对比。结果表明，1BPF和2BPF下的单音噪声预测误差小于1 dB，3BPF下的单音噪声预测误差约为2.1 dB。这说明URANS/Goldstein混合模型能够准确预测风扇单音噪声。

Table 2. Key design parameter of NPU-fan
表 2. NPU-fan 的关键设计参数

Parameter	Value
Number of rotor blades	19
Number of stator blades	18
Design speed(rpm)	3000
Massflow (kg/s)	6.1
Total pressure rate	1.02
Shroud diameter (m)	0.5
Hub diameter (m)	0.285

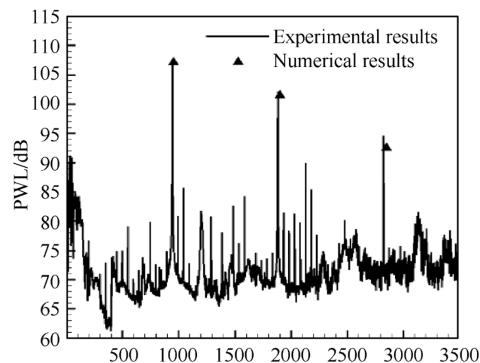


Figure 3. Comparison of the experimental and numerical results for the NPU-fan [12]

图 3. NPU-fan 的实验和数值结果对比[12]

3.4. 计算域与网格划分

如图 4 所示为双级风扇 *URANS* 计算域，为了使转-静交界面的两侧保持一致，多通道的计算域被采用。在设计工况下，对两级风扇的气动和声学性能进行数值计算。边界条件设置如下：入口工况采用总压和总温，出口工况设置质量流量。利用旋转周期性边界条件实现数据的传输。计算域由旋转域和静止域组成，因此需要考虑两个域之间的交界面。在本文的研究工作中，采用文献[8]中的“transient rotor-stator”方法，可以模拟了交界面两侧叶片间的瞬态相对运动。此方法需要转子出口和静子出口的面积一致。本文中双级风扇的叶片数分别为 18、20、22、24。因此，在 *URANS* 的计算中，计算设置的叶片数分别为 9、10、11、12。

双级风扇的网格划分如图 5 所示，网格数量为 3680 万。采用结构化网格，叶片壁面网格的第一层高度为 $1\ \mu\text{m}$ ，边界层网格的 y^+ 值小于等于 1。

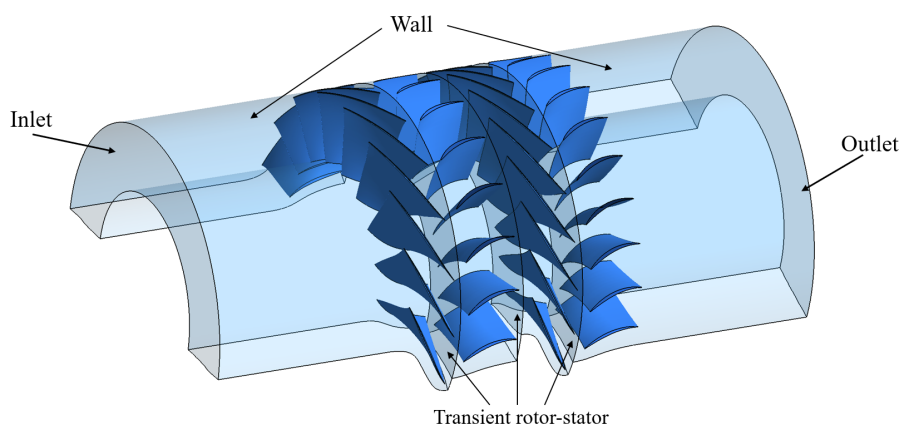


Figure 4. Computational domain

图 4. 计算域

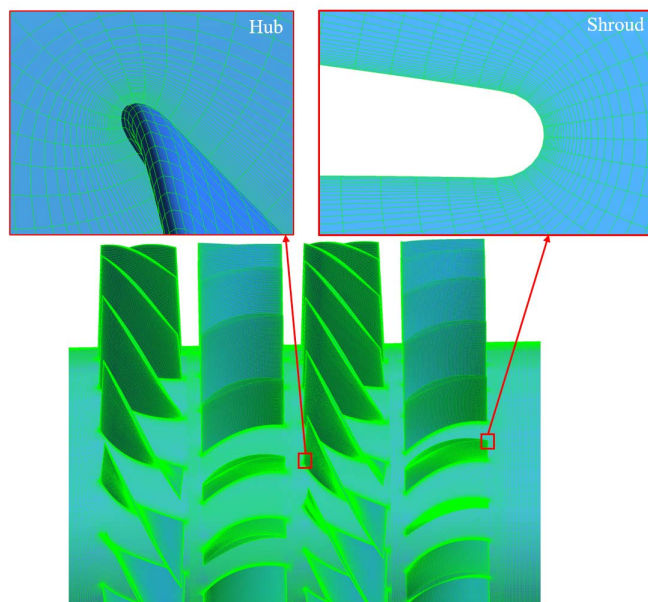


Figure 5. Mesh of the fan

图 5. 风扇的网格划分

4. 单音结果分析

采用上述 *URANS/Goldstein* 混合方法计算叶片上传播的声功率级。图 6 给出了双级风扇静子叶片前传单音噪声声功率级结果。双级风扇第 1 级(R1-S1)对应的 1BPF (Blade Passing Frequency)为 1500 Hz, 2BPF 为 3000 Hz, 3BPF 为 4500 Hz; 第 2 级(R2-S2)对应的 1BPF 为 1833 Hz, 2BPF 为 2667 Hz, 3BPF 为 5500 Hz。由图 6 可以发现 1BPF 的声功率级最大, 3BPF 的声功率级最小。对比双级风扇第 1 级和第 2 级静子叶片的声功率级, S2 的单音声功率级都高于 S1, S2 与 S1 单音声功率级之间的差值逐渐减小。S1 静子叶片在 1BPF 时的功率级比 S2 高了 13.09 dB, S2 的声功率级仅仅比 S1 高了 0.34 dB 在 3BPF。

通过模态分析来说明双级风扇第 2 级静子叶片的单音声功率高于第 1 级。由表 3 可以看出, 对于 1BPF 和 2BPF 而言, 第 1 级和第 2 级的周向模态相同, 分别为 $m = -2$ 和 -4 ; 但是第 1 级只有 $n = 0$ 的径向模态, 第 2 级包括 $n = 0$ 和 $n = 1$ 两个径向模态。在 3BPF, 第 2 级处于“截通”状态的模态数量高于第 1 级。表中 s 为谐波次数, $k = 0, 1, 2 \dots$ 。处于“截通”状态的模态数量不同, 导致了第 1 级和第 2 级静子叶片之间产生声功率的差异。

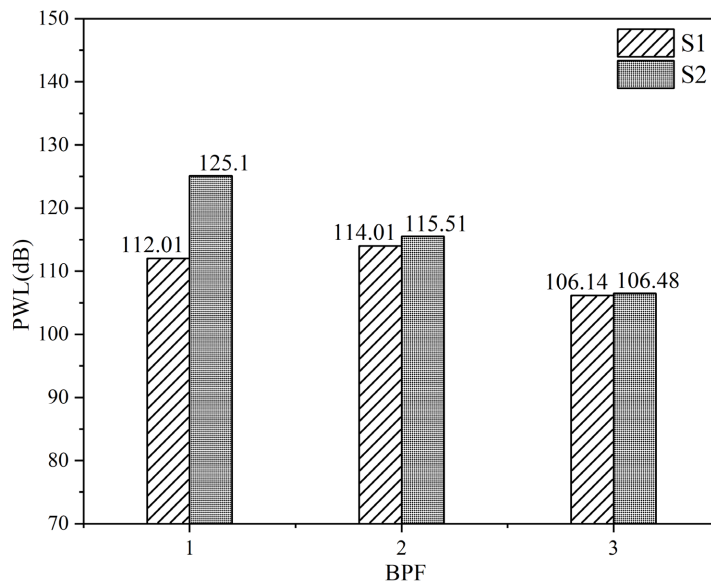


Figure 6. PWL of tonal noise
图 6. 单音噪声的声功率级

Table 3. Mode analysis of two-stage fan
表 3. 双级风扇的声模态分析

	BPF	$M = sB \pm kV$	n
Firststage ($B = 18, V = 20$)	1	-2	0
	2	-4	0, 1
	3	-6 14	0, 1, 2 0, 1
Secondstage ($B = 22, V = 24$)	1	-2	0, 1
	2	-4	0, 1, 2
	3	-6 18	0, 1, 2, 3 0, 1

5. 总结

本文基于流场(*URANS*) / 声场(*Goldstein* 方程)混合预测方法, 分析了双级风扇中转-静干涉产生的单音噪声。首先, 分析了风扇单音噪声的声功率级, *S2* 的单音噪声声功率级都高于 *S1*。从 1BPF 到 3BPF, *S2* 与 *S1* 单音噪声声功率级之间的差值逐渐减小。*S2* 在 1BPF 的声功率级比 *S1* 高了 13.09 dB。*S2* 在 3BPF 的声功率级仅仅比 *S1* 高了 0.34 dB。然后, 通过模态分析说明双级风扇第 2 级静子叶片的单音声功率高于第 1 级, 第 2 级“截通”的模态比第 1 级多。

基金项目

国家自然科学基金资助面上项目(No.52276038), 国家自然科学基金资助重点项目(No.51936010), 国家自然科学基金(52106056), 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-A-II-003-001, P2022-B-II-011-001)。

参考文献

- [1] Qiao, W.Y. and Wang, L.F. (2016) *Aero-Engine Aeroacoustics*. Northwestern Polytechnical University Press, Xi'an. 1-10.
- [2] Qiao, W.Y., Wang, L.F., Duan, W.H., *et al.* (2021) Theory, Model and Method of Aero-Engine Aeroacoustic Design. *Journal of Propulsion Technology*, **42**, 10-38.
- [3] Envia, E. (2002) Fan Noise Reduction: An Overview. *Aeroacoustics*, **1**, 43-64. <https://doi.org/10.1260/1475472021502668>
- [4] Zhao, X., Yang, M., Zhou, J., *et al.* (2019) An Algorithm to Separate Wind Tunnel Background Noise from Turbulent Boundary Layer Excitation. *Chin J Aeronaut*, **32**, 2059-2067. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.03.035>
- [5] Morin, B.L. (1999) Broadband Fan Noise Prediction System for Gas Turbine Engines. Report No. AIAA-1999-1889, AIAA, Reston. <https://doi.org/10.2514/6.1999-1889>
- [6] Tyler, J.M. and Sofrin, T.G. (1962) Axial Flow Compressor Noise Studies. *SAE Trans*, **70**, 309-332. <https://doi.org/10.4271/620532>
- [7] Goldstein (1976) *Aeroacoustics*. McGraw Hill, New York..
- [8] Morse, P.M. and Ingard, U.K. (1968) *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press.
- [9] Goldstein, M.E. (1976) *Aeroacoustics*. McGRAW-HILL International Book Company.
- [10] Munjal, M.L. (1987) *Acoustics of Ducts and Mufflers*. John Wiley and Sons.
- [11] 王良锋, 乔渭阳, 纪良, 等. 基于流场/声场混合模型的叶轮机械单音噪声研究[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2481-2490.
- [12] Tong, F., Qiao, W.Y., Xu, K.B., Wang, L.F., Chen, W.J. and Wang, X.N. (2018) On the Study of Wavy Leading-Edge Vanes to Achieve Low Fan Interaction Noise. *Journal of Sound and Vibration*, **419**, 200-226. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.01.017>
- [13] Tong, H., Xiang, K.S., Zhang, L.J., Li, L., Chen, W.J. and Qiao, W.Y. (2021) A Study on the Fan Tone Noise Reduction with Wavy Leading-Edge OGV. *AIAA AVIATION Forum*, 2-6August 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-2258>
- [14] 程颢颐, 乔渭阳, 王良锋, 等. 倾斜/后掠叶片对风扇单音噪声的控制研究[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 295-306.
- [15] 王良锋, 乔渭阳, 纪良, 等. 基于流场/声场混合模型的叶轮机械单音噪声研究[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2481-2490.
- [16] 同航, 丁松, 向康深, 等. 分布式波浪前缘静子叶片对单级轴流风扇单音噪声影响的数值研究[J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2237-2248.
- [17] (2011) ANSYS CFX Reference Guide, Release 14.0, ANSYS Inc.