

前缘锯齿结构对弯管气动噪声的影响*

叶栗栗¹, 王献忠¹, 吴卫国², 冯伟佳¹

(1. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院 武汉, 430063)

(2. 武汉理工大学绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心 武汉, 430063)

摘要 为了研究前缘锯齿结构对弯管气动噪声的影响,采用大涡模拟与声类比的混合计算方法,揭示了前缘锯齿结构对弯管流场和声场的影响机理。基于通气管路实验平台,对含有导流叶片的弯管进行数值计算和实验研究,验证了数值计算方法的可靠性。结果表明:前缘锯齿结构能够降低管路的压力损失,提高弯管的气动性能,使管内气流更加稳定;能够有效减少层流分离泡的产生,降低了叶片表面的压力脉动强度和非正常载荷;综合作用下降低了弯管的气动噪声。

关键词 气动噪声;压力损失;前缘锯齿;导流叶片;声类比

中图分类号 U664.84;TU112.3

引言

随着船舶制造业的发展和科学技术的进步,船舶的性能有了巨大的提高,其噪声问题已得到高度重视。对于船舶的上层建筑,分布广泛的通风机、空调器及管路系统^[1]往往成为上层建筑舱室的主要噪声源。弯管是空调管路系统中最为常见的一种管路附件,当气流通过弯管时,由于管壁的阻碍产生涡流和湍流,从而形成气动噪声。为了抑制弯管处的噪声,有效的方法就是安装导流叶片以改善气体的流动,避免涡流的产生。Zhang等^[2]使用混合计算方法对含有导流叶片的弯管进行研究,计算结果表明,导流叶片可以有效减小气流对管壁的脉动压力,雷诺数越大降噪效果越好。伍宗效等^[3]针对普通导流片功能单一的问题,设计了新型气动声学导流片,结果显示,压力损失降低了68%,噪声吸收量可以达到13 dB。Wang等^[4]使用大涡模拟和边界元相结合的方法,研究了导流叶片对通液管道的声学特性的影响,指出导流叶片能显著降低通液弯管的流噪声。

目前,通过锯齿尾缘和前缘结构降低叶片气动噪声的方法得到广泛研究,前缘锯齿仿生学降噪的启发主要来自于能寂静飞行的猫头鹰翅膀和座头鲸鳍肢前缘结构。Hersh等^[5]对猫头鹰的翅膀结构进行了研究,所设计的锯齿形前缘结构可降低噪声4~5 dB。Hansen等^[6]对座头鲸的鳍肢波浪前缘结构进

行了研究,发现波浪前缘结构不仅可以降低水流冲击翼型结构产生的单音噪声,还可以降低宽频噪声。全帆^[7]采用流场/声场混合计算方法研究了波浪前缘结构对轴流风扇的降噪效果和该结构的降噪机理,指出波浪前缘结构可以有效降低风扇噪声。陈伟杰^[8]对波浪前缘降低湍流-叶片干涉噪声的物理机制进行了数值研究,结果表明,波浪前缘锯齿可以有效降低叶片层流边界层的不稳定噪声。王献忠等^[9]对通液管路导流叶片进行仿生设计,揭示了仿生结构对管路流场及声场的影响,仿生设计后的导流叶片可以有效抑制尾部及壁面涡的产生。

目前,前缘锯齿结构主要应用在开场区域的部件,如机翼、叶片等^[10-12],而将前缘锯齿结构应用在管路系统内流场的研究并不多。笔者以含有导流叶片的弯管为研究对象,采用大涡模拟的方法研究了前缘锯齿结构对弯管流场的影响,采用声类比的计算方法研究了前缘锯齿结构对弯管气动噪声的影响,揭示了前缘锯齿结构的降噪机理,并通过实验测试的方法验证了计算方法的准确性。

1 研究对象与数值计算方法

1.1 研究对象

含有导流叶片的弯管与前缘锯齿结构如图1所示。笔者以含有导流叶片的弯管为研究对象,其计

* 国家自然科学基金资助项目(51779201);教育部联合基金资助项目(6141A02022139)

收稿日期:2022-05-01;修回日期:2022-07-05

算模型见图1(a),弯管直径 $D=100$ mm,入口段长度 $L_1=5D=500$ mm,出口段长度 $L_2=5D=500$ mm,曲率半径 $R=1.5D=150$ mm,根据文献[13]将测量点设置为弯管出口处的中间点。根据文献[14]关于锯齿结构降低叶栅噪声的研究,笔者基于仿生学原理,根据猫头鹰翅膀的特殊结构以及座头鲸鳍肢前缘结构,设计了如图1(b)所示的前缘锯齿结构,锯齿的尺寸与锯齿幅值 h 和锯齿间距 λ 有关。设计的3种锯齿间距 λ 均为3 mm,厚度 a 均为4 mm,锯齿幅值 h 分别为8,10和12 mm。将普通导流叶片弯管定义为工况1,将锯齿幅值为8,10和12 mm的叶片定义为工况2,工况3和工况4。

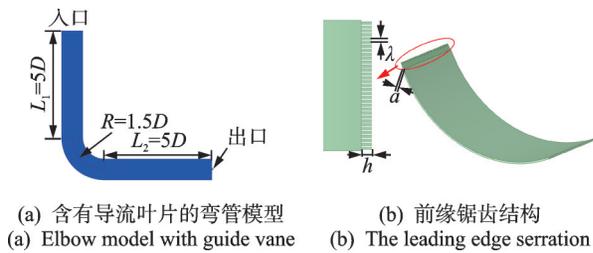


图1 含有导流叶片的弯管与前缘锯齿结构

Fig.1 The elbow model with guide vane and the leading edge serration

1.2 流场数值计算方法

在本研究中,由于直接数值模拟(direct numerical simulation,简称DNS)方法需要大量的计算时间,而大涡模拟(large eddy simulation,简称LES)方法可以准确地计算对噪声影响明显的大尺度涡^[15],因此笔者采用LES模型对瞬态流场进行分析。为加快计算的收敛,使用 $k-\epsilon$ 对模型进行稳态计算。本研究采用的流体计算软件为ANSYS Fluent。

要获得LES控制方程,首先要对N-S方程进行空间滤波,根据涡的尺度分别将流动分为大尺度和小尺度的流动。连续方程和动量方程分别为

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中: x_i, x_j 为观察点位置; \bar{u}_i, \bar{u}_j 为观察点速度; \bar{p} 为静压; t 为时间; ρ 为流体密度; ν 为流体运动黏度; $\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j}$,为亚格子应力。

亚格子应力是由于滤波引起的新的未知量,因此有必要引入一个合适的亚格子模型来求解。亚格子应力的表达式为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

其中: μ_t 为涡黏度系数; \bar{S}_{ij} 为大尺度应变率张量。

$$\mu_t = \rho C_d \Delta^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (4)$$

其中: C_d 为模型系数; Δ 为网格尺度。

前缘锯齿处的网格及流体计算的收敛性如图2所示。导流叶片的网格见图2(a),采用非结构网格对模型进行划分。为了保证边界层计算的准确性,流域网格第1层中心到壁面的距离小于 1.7×10^{-5} m,网格增长率为1.2。网格的基础尺寸设置为10 mm,锯齿结构附近的网格大小设置为0.5 mm。模型表面网格保证 $y^+ \leq 1$,最终Case1~Case4的网格数量分别为 $3.13 \times 10^5, 4.22 \times 10^5, 4.14 \times 10^5$ 和 4.05×10^5 。

计算域的设置如图1(a)所示,进口设定为速度进口,出口设定为压力出口,壁面设为无滑移壁面边界。流场计算的时间步长根据库朗数 C 进行计算,通常库朗数 C 的值取0.5~1.0,其计算公式为

$$C = v \Delta t / \Delta x \quad (5)$$

其中: v 为气体流速; Δt 为时间步长; Δx 为网格尺寸。

根据式(5),本研究设置的时间步长 $\Delta t=0.0001$ s,等流场计算收敛后,计算5000步,得到流场计算结果,将结果导出作为声场计算的非定常载荷。在模型的出口处设置流量监测点,由图2(b)可以看出,普通导流叶片和前缘锯齿结构的导流叶片弯管出口处的流量几乎没有波动,可以判断流体计算已达到收敛,说明网格的质量满足计算的需要。

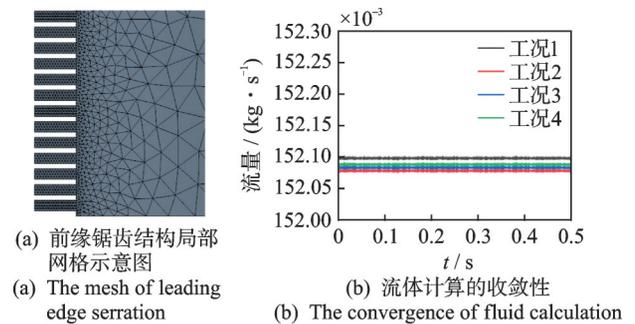


图2 前缘锯齿处的网格及流体计算的收敛性

Fig.2 The mesh of leading edge serration and the convergence of fluid calculation

1.3 声学计算方法

为了计算弯管产生的气动噪声,采用基于Lighthill声类比理论的混合计算方法^[16],考虑到固体边界以及运动介质的影响,声场的控制方程为

$$c_0^2 \rho(x, t) = \int_{-T}^T \int_{s(\tau)} \rho_0 V_N' \frac{DG}{D\tau} dS(y) d\tau + \int_{-T}^T \int_{s(\tau)} f_i \frac{DG}{Dy_i} dS(y) d\tau + \int_{-T}^T \int_{s(\tau)} T'_{ij} \frac{\partial^2 G}{\partial y_i \partial y_j} dy d\tau \quad (6)$$

其中: c_0 为声速; ρ_0 为环境介质密度; ρ' 为声导致的密

度扰动; $x=[x_1, x_2, x_3]$ 为观察点位置; $y=[y_1, y_2, y_3]$ 为声源位置; τ 为声源处发射声的时刻; t 为观察点接收到声的时刻; T 为时间积分限; S 为面积积分区域; V_N' 为固体垂直于其物体表面相对于流体的运动速度; G 为格林函数; f_i 为固体边界作用在流体上 i 方向上的力; T_{ij}' 为Lighthill应力张量。

在进行声学计算时,声学计算的网格尺寸^[17]一般要小于计算频率对应波长的1/6。由于本研究的计算频段为1~1 000 Hz,因此声学网格的尺寸选择为0.01 m。使用声学有限元方法对弯管的气动噪声进行计算。

1.4 数值计算方法的实验验证

为了验证上述LES/Lighthill混合计算方法的可行性和准确性,笔者基于图3所示的通气管路系统噪声测试实验平台,设计了含有导流叶片弯管的气动噪声实验测试,并将实验结果与数值仿真结果进行了对比。



图4 管路实验平台实物图

Fig.4 The picture of pipeline platform

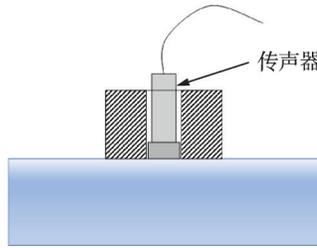


图5 传声器固定装置

Fig.5 The fixing device of microphone

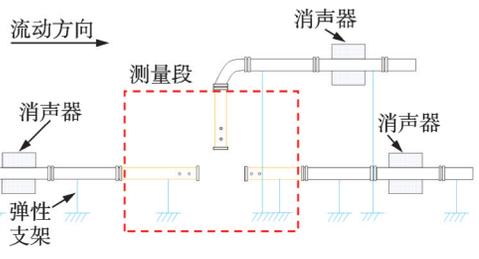


图3 通气管路系统噪声测试实验平台

Fig.3 The noise test platform of pipeline system

1.4.1 测试系统

管路实验平台实物图如图4所示。本次实验采用AWA14423传声器进行声学测量,为了减少气体冲击传声器产生的气流噪声以及外界环境噪声的影响,设计了如图5所示的传声器固定装置。固定装置采用隔声性能良好的橡胶制成,并采用铝箔纸将传声器包裹在固定装置中,将固定装置固定在管壁。实验采用如图6所示的含有导流叶片的弯管,导流叶片的材质与管路的材质一致,其厚度为2 mm,导流叶片弯管的尺寸与工况1的尺寸相同。

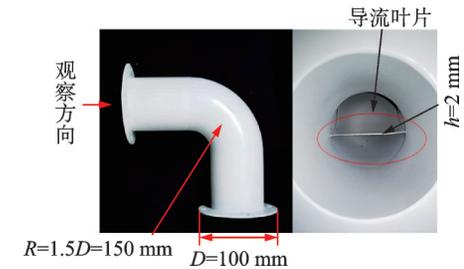


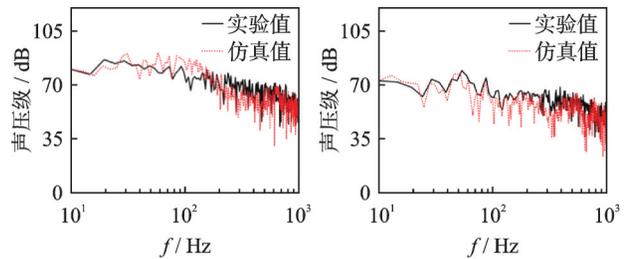
图6 含有导流叶片的弯管

Fig.6 The elbow with guide line

为了减少离心风机产生的噪声对实验测试的影响,将离心风机通过隔振基座放置在消声静压箱内,同时在风机的出风口处设有消声器。

1.4.2 结果对比

通过调整光圈式调风门及变频器,使弯管入口处的气体流速保持在20 m/s,进行实验测试,测量点在弯管出口中间处。使用混合计算方法计算含有导流叶片弯管的气动噪声,将计算结果与实验结果进行对比。实验与仿真结果对比如图7所示。可以看出,普通弯管和含有导流叶片弯管的实验结果与仿真结果基本一致,但是实验结果略大于仿真结果。这是由于离心风机等背景噪声的影响,以及导流叶片加工焊接工艺的问题,使得导流叶片的安装位置没有达到理想状态而存在间隙和焊接口,影响了流场的分布。普通弯管和含导叶弯管的总声压级如表1所示,参考声压为 2×10^{-5} Pa。可以看出,导叶显著降低了弯管的噪声。



(a) 普通弯管 (b) 含有导流叶片弯管
(a) The elbow without guide vane (b) The elbow with guide vane

图7 实验与仿真结果对比

Fig.7 The comparison of experiment and simulation

表1 普通弯管和含导叶弯管的总声压级

Tab.1 The overall sound pressure levels of elbow with guide vane and without guide vane

弯管	总声压级/dB	降噪量/dB	降噪量百分比/%
普通弯管	113.2	—	—
含导叶弯管	111.1	2.1	1.8

2 前缘锯齿对弯管气动性能的影响

表 2 为不同工况下的压力损失。可以看出,前缘锯齿结构能够降低弯管的压力损失,锯齿长度越小效果越好。

表 2 不同工况下的压力损失

Tab.2 The pressure loss in different conditions

工况	压力损失/Pa	压力损失降低百分比/%
1	37.86	—
2	32.04	15.3
3	32.83	13.3
4	32.93	13.1

本研究对比了普通导流叶片和含有前缘锯齿结构导流叶片的气动性能。普通导流叶片与前缘锯齿结构速度云图如图 8 所示。导流叶片将弯头入口段处的气体分为靠近内壁面和靠近外壁面两部分,避免了气流直接冲击管壁而形成较大的压力脉动。但是,在导流叶片的顶部,由于结构的突变使得气流直接冲击叶片的顶端,在叶片顶端形成一定的高速低速区,在叶片两侧出现了一定区域的高速低压及低速高压区。这些区域导致气流产生较大的脉动,这种脉动会在管路内部形成涡。另外,在导流叶片的尾部会产生一定的低速区,并一直延续到管路的出口处。在加入前缘锯齿结构后,导流叶片顶端的高速低压区域面积减小,且导流叶片两侧气体的流动更加稳定,高速低压区和低速高压区的面积减小,导流叶片尾部的低速区面积减少且更快地达到稳定。由图可以看出,不管是普通导流叶片还是前缘锯齿导流叶片,在叶片的顶端都存在明显的层流分离泡,这些分离泡将发展为分离涡并从叶片脱落至管路中,因此前缘锯齿结构能有效减少层流分离泡的产生。

由于前缘锯齿改变了叶片的前端结构,因此会对叶片周围的流场特征产生影响。吸力面叶片时均压力分布如图 9 所示。可以看出,采用前缘锯齿结

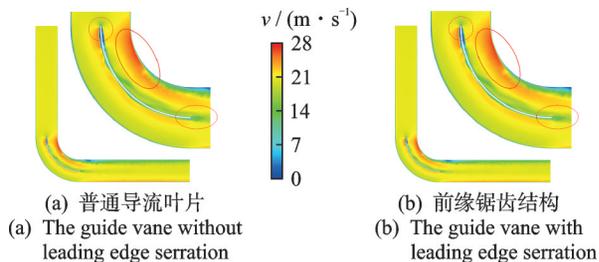


图 8 普通导流叶片与前缘锯齿结构速度云图

Fig.8 The velocity cloud chart of the guide vane with and without leading edge serration

构后,导流叶片上的时均压力分布更加均匀。锯齿结构的展向压力变化如图 10 所示。可以看出,时均压力在展向呈现出周期变化,在锯齿之间的间隙处有明显的高压区。

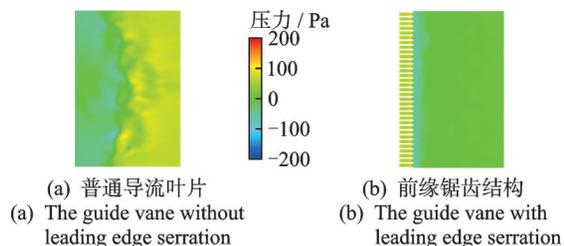


图 9 吸力面叶片时均压力分布

Fig.9 Average pressure of blade suction surface

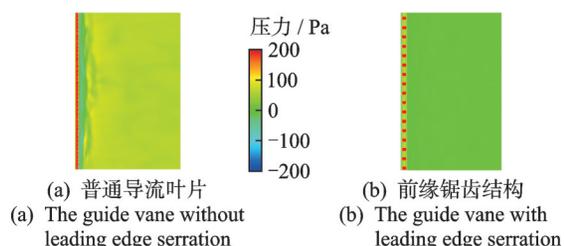


图 10 锯齿结构的展向压力变化

Fig.10 The pressure of the leading edge serration

为了进一步分析弯管内流场的情况,对弯管中的涡量进行表征,涡量^[18]的计算公式为

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \\ \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)得到普通导流叶片弯管和含有前缘锯齿结构导流叶片弯管纵向截面的涡量云图,如图 11 所示。气流流经导流叶片时,由于导流叶片的前端压力面和吸力面之间压差的作用,在叶片的两端形成了复杂的涡系结构,并继续向下游发展。当气体流过弯管时,在导流叶片的前缘、尾部和管壁的内侧形成一定强度的涡。当采用前缘锯齿结构后,

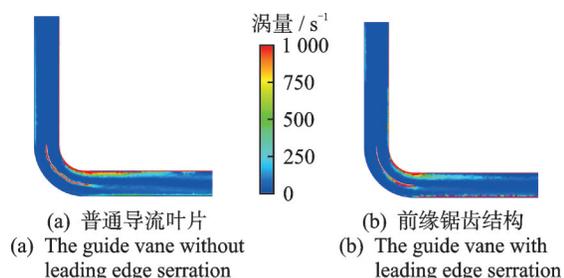


图 11 涡量云图

Fig.11 Vorticity contours

导流叶片前缘、尾部和管壁内侧的涡强度及范围都明显降低,说明前缘锯齿结构可以有效抑制涡的产生。根据涡声理论^[19],在低马赫数下,产生辐射声场的基本且唯一的源是涡,因此在涡得到抑制后,弯管的气动噪声将得到有效控制。

3 前缘锯齿对弯管声学性能的影响

不同长度的锯齿在场点处声压级对比如图12所示,参考声压为 2×10^{-5} Pa。由图可以看出,含有导流叶片弯管的噪声频谱呈现明显的宽频噪声,没有较为突出的单音噪声,其噪声能量集中在低频,即弯管气动噪声的声压级随着频率的增加而降低,3种形式的锯齿结构在0~150 Hz以及300~1 000 Hz范围内都有较好的降噪效果。不同工况下场点处的总声压级如表3所示。可以看出,3种形式的前缘锯齿对导流叶片都有很好的降噪效果,且降噪效果随着锯齿长度的增加而增加。

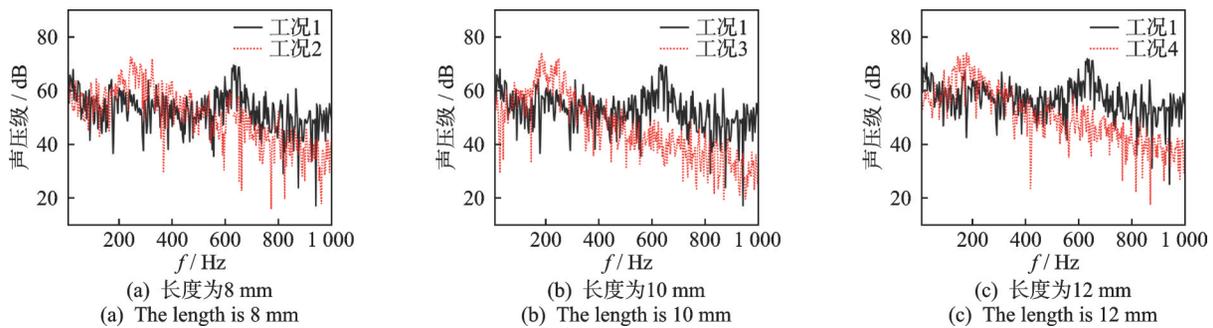


图12 不同长度的锯齿在场点处声压级对比

Fig.12 Comparison of sound pressure level at field point with different serration lengths

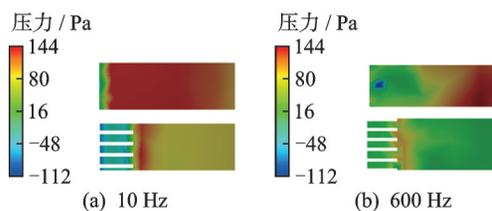


图13 叶片压力脉动幅值分布

Fig.13 Pressure fluctuation amplitude of blade

4 结论

1) 前缘锯齿结构能有效降低含有导流叶片弯管的压力损失,锯齿长度越小则效果越好。

2) 前缘锯齿结构是降低导流叶片弯管的有效手段。在本研究计算的频率范围1~1 000 Hz内,不同尺寸的前缘锯齿均可以有效降低含有导流叶片弯管的气动噪声,总声压级最高可降低5 dB。

表3 不同工况下场点处的总声压级

Tab.3 The overall sound pressure level at the field point under different working conditions

工况	总声压级/dB	降噪量/dB	降噪百分比/%
1	111.1	—	—
2	108.1	3.0	2.7
3	107.3	3.8	3.4
4	106.6	4.5	4.1

为了进一步研究导流叶片前缘锯齿的降噪机理,图13给出了叶片压力脉动幅值分布。可以看出,在叶片的前端有一段较低的压力脉动,之后会有一段压力脉动强度较大的区域。这是因为气流冲击导流叶片的前端,与叶片的前缘发生强烈的干涉,叶片结构的阻碍导致气流向叶片两端分流,使得在叶片的前端形成小段的高速低压区。相比于普通叶片,前缘锯齿结构可以显著降低叶片表面的压力脉动和叶片上的非定常载荷。根据LES/Lighthill声类比的混合气动声学计算方法,压力脉动的降低可以有效降低含有导流叶片弯管的气动噪声。

3) 前缘锯齿结构可以减少导流叶片顶端的高速高压区域,使叶片两侧的气流更加稳定,能够有效减少层流分离泡的产生,降低导流叶片表面的压力脉动幅值、压力脉动强度及叶片上的非定常载荷,从而降低含有导流叶片弯管的气动噪声。

4) 前缘锯齿结构的降噪效果与锯齿幅值有关,锯齿幅值越大则降噪效果越好。

参 考 文 献

- [1] 黄伟稀,朱连海,梁贇,等.船用低噪声布风器设计与声学性能分析[J].噪声与振动控制,2021,41(1):127-132.
HUANG Weixi, ZHU Lianhai, LIANG Yun, et al. Design and simulation analysis of acoustic performance of marine low noise air distributors[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 127-132.(in Chinese)

- [2] ZHANG T, ZHANG Y O, OUYANG H. Structural vibration and fluid-borne noise induced by turbulent flow through a 90° piping elbow with/without a guide vane [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2015, 125: 66-77.
- [3] 伍宗效,李家春,杨涛,等.气动声学导流片数值计算与声学特性分析[J].*计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3511-3518.
WU Zongxiao, LI Jiachun, YANG Tao, et al. Numerical calculation and acoustic characteristics analysis of aeroacoustic guide vanes[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(12): 3511-3518.(in Chinese)
- [4] WANG X Z, LIN, YU M, et al. Research on acoustic behaviors of water pipelines with guide vanes [J]. *Journal of Vibration and Control*, 29 (9) : 107754632110623.
- [5] HERSH A S, SODERMAN P T, HAYDEN R E. Acoustic investigation of leading - edge serrations on lifting surfaces[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 50: 121.
- [6] HANSEN K, DOOLAN C, KELSO R. Reduction of flow induced airfoil tonal noise using leading edge sinusoidal modifications[J]. *Acoustics Australia*, 2012, 40(3): 1-6.
- [7] 全帆.航空叶轮机仿生学降噪的流动和声学机理研究[D].西安:西北工业大学, 2018.
- [8] 陈伟杰.基于仿生学原理的叶片气动噪声控制实验及数值研究[D].西安:西北工业大学, 2018.
- [9] 王献忠,林广宏,李宁,等.基于仿生学原理的水管路流噪声控制技术[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(11): 123-127.
WANG Xianzhong, LIN Guanghong, LI Ning, et al. Research on flow noise control technology for water pipeline based on bionic theory[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2021, 49(11): 123-127.(in Chinese)
- [10] 乔渭阳,全帆,陈伟杰,等.仿生学气动噪声控制研究的历史、现状和进展[J].*空气动力学学报*, 2018, 36(1): 98-121.
QIAO Weiyang, TONG Fan, CHEN Weijie, et al. Review on aerodynamic noise reduction with bionic configuration [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(1): 98-121.(in Chinese)
- [11] 王洋洋,周劲松,宫岛,等.高速列车受电弓气动噪声分布特性及仿生降噪研究[J].*噪声与振动控制*, 2018, 38(增刊1): 348-352.
WANG Yangyang, ZHOU Jinsong, GONG Dao, et al. Study on bionic noise reduction and aerodynamic noise distribution characteristics for high-speed train's pantographs [J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(supp1): 348-352.(in Chinese)
- [12] 黄珊.发动机舱风扇气动噪声特性的数值模拟研究[D].长春:吉林大学, 2019.
- [13] 黄伟稀,何涛,郝夏影,等.风机管道声学测试中的影响因素分析[J].*振动与冲击*, 2021, 40(12): 31-37.
HUANG Weixi, HE Tao, HAO Xiaying, et al. Analysis of the influencing factors in acoustic measurement in a pipe [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(12): 31-37.(in Chinese)
- [14] 全帆,乔渭阳,纪良,等.尾缘锯齿降低叶栅噪声的数值模拟[J].*航空动力学报*, 2016, 31(4): 894-902.
TONG Fan, QIAO Weiyang, JI Liang, et al. Numerical simulation on noise reduction for the cascade with trailing edge serrations [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(4): 894-902.(in Chinese)
- [15] TUCKER P G. Computation of unsteady turbomachinery flows: part 2—LES and hybrids [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2011, 47(7): 546-569.
- [16] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1952, 211(1107): 564-587.
- [17] 李增刚,詹福良. Virtual.Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M].北京:国防工业出版社, 2010: 15-45.
- [18] 周培源.涡量脉动的相似性结构与湍流理论[J].*力学学报*, 1959(4): 7-23.
ZHOU Peiyuan. Similarity structure of vorticity fluctuation and the theory of turbulence [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1959(4): 7-23.(in Chinese)
- [19] 张楠,李亚,王志鹏,等.基于LES与Powell涡声理论的孔腔流激噪声数值模拟研究[J].*船舶力学*, 2015, 19(11): 1393-1408.
ZHANG Nan, LI Ya, WANG Zhipeng, et al. Numerical simulation on the flow induced noise of cavity by LES and Powell vortex sound theory [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(11): 1393-1408.(in Chinese)



第一作者简介:叶栗栗,男,1993年4月生,博士生。主要研究方向为管路气动噪声的预报与控制。

E-mail: 18260633154@163.com

通信作者简介:王献忠,男,1986年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为振动与噪声控制。

E-mail: xianzhongwang00@gmail.com