

集装箱发电机组迷宫降噪箱 CFD 性能仿真研究

甘 宁

(扬州亚星客车股份有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.008

摘 要: 针对集装箱式发电机组在高功率运行状态下噪声超标的问题, 设计一种迷宫式降噪箱结构, 并基于计算流体力学方法对其内部流场进行数值仿真。通过建立迷宫降噪箱的三维几何模型, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Steady 算法求解箱内速度场、压力场分布, 引入静压与动压比值作为流场诊断的无量纲参数, 系统分析了倾角变化对气流阻力的影响规律。仿真结果表明: 迷宫降噪片倾角是降噪箱压力系数的关键因素, 降噪片倾角由 30° 增大至 45° 时, 静动压比值由 8.2 增至 12.1, 倾角增大至 60° 后, 静动压比值增至 14.9; 倾角增大, 通道有效流通面积减少导致风阻增大, 易形成大范围涡流。研究结论为集装箱发电机组降噪箱体的工程设计与参数优化提供了数值依据。

关键词: 静动压比值; 迷宫降噪; 降噪片倾角; 流场仿真; 集装箱发电机组

CFD Performance Simulation Study on Labyrinth Noise Reduction Box of Container Generator Set

Ning Gan

Yangzhou Yaxing Bus Co., Ltd.

Abstract: Aiming at the problem of excessive noise of container generator sets under high-power operating conditions, a labyrinth noise reduction box structure is designed, and numerical simulation of its internal flow field is carried out based on computational fluid dynamics (CFD) method. A three-dimensional geometric model of the labyrinth noise reduction box is established, and the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and steady algorithm are adopted to solve the internal velocity field and pressure field distribution. The ratio of static pressure to dynamic pressure is introduced as a dimensionless parameter for flow field diagnosis, and the influence law of inclination angle on airflow resistance is systematically analyzed. The simulation results show that the inclination angle of labyrinth noise reduction plates is the key factor affecting the pressure coefficient of the noise reduction box. When the inclination angle increases from 30° to 45° , the static-dynamic pressure ratio increases from 8.2 to 12.1, and reaches 14.9 at 60° . The increase of inclination angle reduces the effective flow area of the channel, increases wind resistance, and easily induces large-scale vortexes. The research conclusions can provide numerical basis for the engineering design and parameter optimization of noise reduction boxes for container generator sets.

Keywords: static-dynamic pressure ratio; labyrinth noise reduction; noise reduction plate inclination angle; flow field simulation; container generator set

引言

近年来, 集装箱式柴油发电机组行业保持稳健增长态势, 主要应用于电力基础设施薄弱地区的应急与备用电源、“一带一路”沿线项目配套设备、数据中心快速扩容、算力中心等场景。极端天气频发背景下对高可靠性移动电源系统配置需求越来越高, 低噪声需求达到 1m75dBA。但发动机的本体噪声 (105-115dBA), 对目前降噪设计造成极大阻碍。进排风口是集装箱泄露噪声最大的部位, 也是集装箱降噪最难处理的部分。一般会在进排风口设置降噪箱体来消除噪声的泄露。为了满足环保噪声排放标准, 机组通常配备隔声罩, 并在进风口和排风口处安装降噪结构组件。现有技术中, 进排气降噪组件在低频段降噪效果很差。

集装箱式发电机组的迷宫降噪箱依靠交错布置的降噪片形成曲折气流通道, 通过声波在通道内的多次反射与干涉实现噪声衰减。降噪片的几何参数, 特别是其相对于气

流方向的倾角直接决定了通道截面积变化规律和气流转向剧烈程度, 进而影响流动阻力和散热性能。但迷宫式结构在实现声波多次反射衰减的同时, 不可避免地增大了气流流动阻力。对于集装箱发电机组而言, 散热风扇的驱动压头有限, 过大的进排气阻力将直接导致冷却风量不足、舱内温度升高, 进而引发发动机功率下降甚至高温停机。因此, 迷宫降噪箱的设计必须兼顾声学性能与气动性能, 在降噪量与通风散热之间寻求平衡。

传统对流场的分析多集中于速度云图和压力云图的定性观察, 缺乏统一的无量纲判据来量化评价不同方案的流动品质。静压与动压的比值 (ps/pd) 作为反映压力能与动能相对关系的无量纲参数, 能够有效揭示降噪结构对实际进风阻力的影响, 为迷宫结构的参数优化提供定量诊断手段。

本文以一种排气降噪箱为对象, 利用 Catia 软件建立完

整的三维模型。对降噪片倾角分别为 30° 、 45° 和 60° 的三种方案进行流场仿真,重点引入静动压比值分析不同倾角下的流场特征变化规律,为降噪片倾角的优化选择提供工程依据。

一、基本数值方法

(一) 物理模型

研究对象为某集装箱发电机组,柴油发电机组纵向布置于箱体中部,发动机前端通过联轴器驱动散热风扇,冷却空气由箱体前端进气口进入,流经发电机组后从箱体尾端排出。排风口处设置迷宫式降噪箱,其基本结构由5列交错布置的竖直降噪片构成S形曲折气流通道。

降噪片倾角 θ 定义为降噪片平面与水平方向的夹角, $\theta=0^\circ$ 表示降噪片水平于气流主方向,增大表示降噪片向气流上游方向倾斜。各方案保持降噪片数量、厚度和通道总长度不变,仅改变倾角。倾角变化范围取 30° 、 45° 和 60° ,共3个计算工况。迷宫降噪箱三维模型如图1所示,图中有1个进风口和1个出风口。

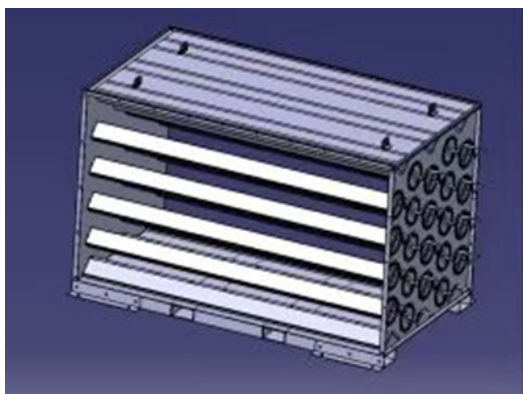


图1 迷宫降噪箱结构示意图

(二) 网格划分

采用CFD分析软件STAR-CCM+进行网格划分,流体域选择正六面体网格作为网格划分手段,其网格初步设置为:流体域最大面尺寸为100 mm,体网格使用全局方式,最小单元长度为3 mm,边界层使用平滑过渡方法,初始设置为3层,增长比为1.3。初步划分得到网格约292W,满足初步计算流场的要求,且捕捉流场的精度也能够满足工程要求。降噪片设置倾角 30° 、 45° 和 60° ,三种降噪箱内部固体壁面的网格以及整个通流结构示意图如图2所示。

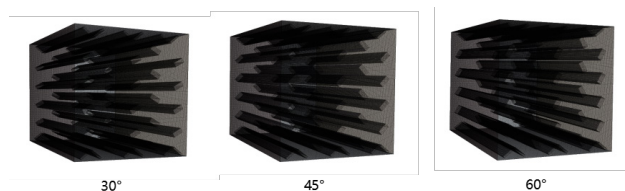


图2 三种角度降噪箱网格示意图

(三) 数学模型

本文采用STAR-CCM+中Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行整机流场数值模拟分析研究。模拟过程只分析流场,不考虑温度场,因此仅求解流体连续性方程和动量方程。

STAR-CCM+模拟分析就是求解相应的控制方程,计算完成即可获得相应的流场模拟信息。箱内空气流动视为不可压缩定常湍流流动,湍流模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,该模型对具有回流、分离特征的内流问题具有较好的数值稳定性和工程精度。近壁区域采用标准壁面函数处理。流体流动通用控制方程一般表示为:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \vec{u}) = \text{div}(\Gamma_\phi \cdot \text{grad} \phi + S_\phi) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; $\vec{u}$ 为流体速度, m/s , t 为时间, s ; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; ϕ 为某个变量。当 ϕ 取不同变量时即可获得连续性方程、N-S方程。

(四) 边界条件

根据文献和实际工程经验,在不可压缩流体流动中使用速度入口作为气流入口边界条件。采用入口条件为速度入口,速度为8 m/s;出口边界条件可设为压力出口,设定为标准大气压;其余壁面设置为无滑移壁面条件。

(五) 静动压比值的定义与计算

在流体力学中,流体的总压(滞止压力) p_0 可表示为静压 p_s 与动压 p_d 之和:

$$p_0 = p_s + p_d \quad (2)$$

其中,动压 p_d 定义为:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度 (kg/m^3), v 为流速 (m/s)。

参考压力取为零(表压),静压动压比值定义为:

$$C_p = \frac{|p_s|}{p_d} = \frac{|p_s|}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (4)$$

式中, p_s 取相对于环境参考压力的绝对值,以避免负压导致的比值符号混乱。 C_p 值越大,表示该区域静压效应主导、流速相对较低; C_p 值越小且趋近于1,表示动能效应显著、流动加速特征明显。这一无量纲参数反映了流场中压力能量与动能之间的相对大小关系。

二、结果分析与讨论

(一) 倾角对速度场的影响

图3示出了降噪片倾角 30° 、 45° 和 60° 时迷宫降噪箱内速度分布云图。当倾角越小,气流受结构遮挡越少,气流平顺性更好,叶片尾部涡流范围更小、流动阻力更低;随倾角增大,气流折转加剧、阻碍增强,涡流区域明显扩大,流动损失持续升高。其中 60° 工况遮挡效应最强、涡流最显著, 45° 工况各项流场特征介于两者之间。末列降噪片对出口流场分布影响最为关键,叶片投影遮挡区域流速偏低,导流通道流速偏高,使出口截面呈现高速交替分布特征。三种角度因投影面积不同,高速、低速区域占比存在明显差异。

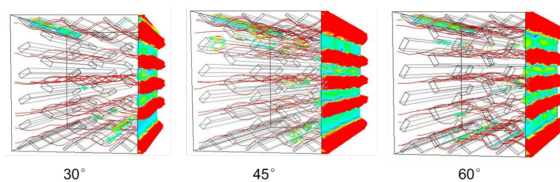


图3 倾角 30° 、 45° 和 60° 降噪箱内速度分布云图

(二) 倾角对湍流的影响

图4示出了降噪片倾角 30° 、 45° 和 60° 时迷宫降噪箱湍流耗散率。湍流耗散率数值越大,气动再生噪声风险越高。 30° 降噪片倾角小、气流平顺,尾迹涡流弱,湍流耗散率最低; 45° 工况水平居中; 60° 倾角大,降噪片对气流遮挡阻碍更强,气流折转剧烈,叶片下游形成大范围涡流,涡流能量耗散显著,因此湍流耗散率最高。

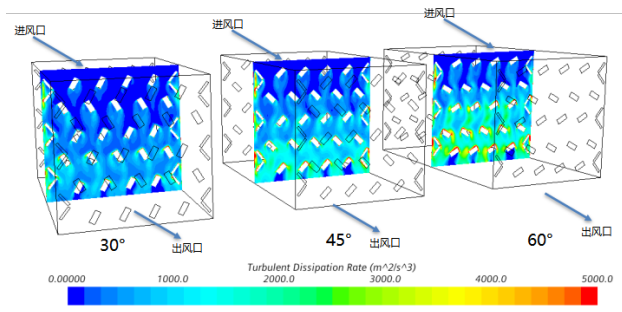


图4 倾角 30° 、 45° 和 60° 迷宫降噪箱湍流耗散率示意图

(三) 倾角对压力场的影响

图5示出了降噪片倾角 30° 、 45° 和 60° 时迷宫降噪箱总压降。迷宫箱进出口总压降随降噪片倾角增大呈单调上升趋势。降噪片倾角 $\theta=30^\circ$ 时总压降为352 Pa;降噪片倾角 $\theta=45^\circ$ 时总压降升至500 Pa,增幅约42%;降噪片倾角 $\theta=60^\circ$ 时总压降升至605 Pa,增幅约71.8%。总压降上升的物理机制在于:倾角增大后,气流转向角度增大,局部加速的剧烈程度增加,由急转弯引起的局部损失显著增大。降噪箱压降随倾角增大持续上升,阻力与结构遮挡面积、涡流强度呈正相关。

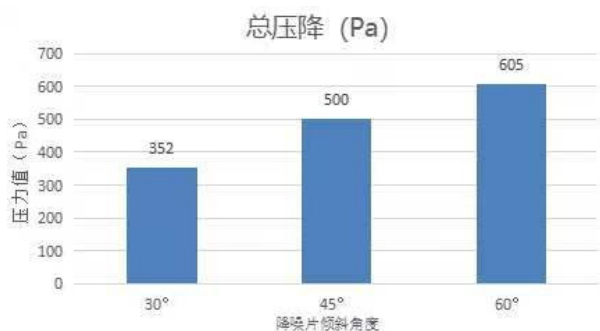


图5 倾角 30° 、 45° 和 60° 迷宫降噪箱总压降示意图

(四) 倾角对静动压比值分布的影响

图6示出降噪片倾角 30° 、 45° 和 60° 时迷宫降噪箱静压动压比值。随降噪片倾角增大,静动压比值CP均呈上升趋势。降噪片倾角 $\theta=30^\circ$ 时静动压比值CP为8.2;降噪片倾角 $\theta=45^\circ$ 时静动压比值CP为12.1,增幅约47%;降噪片倾角 $\theta=60^\circ$ 时静动压比值CP为14.9,增幅约81.7%。这表明倾角增大导致降噪片端部的剧烈加速,使该区域的压力能与动能存在明显差异,说明静压占主导,压差仍然存在,是流动损失和声能耗散的主要区域。此时流

动接近不可压缩低速流动状态,压力梯度是驱动流动的主要因素。风扇风量由静压决定,数据结果可以直接评估风扇工况,风扇的静压效率与其工作点的静动压比值直接相关。迷宫降噪箱阻力过大时,风扇不得不在高静压、低流量工况下运行,偏离高效区。合理控制迷宫降噪箱进出口的静压差与动压的匹配关系,有助于使风扇工作在其特性曲线的高效段。

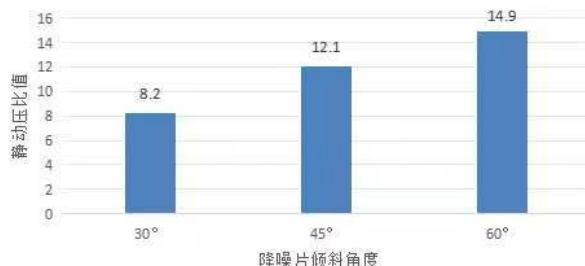


图6 倾角 30° 、 45° 和 60° 迷宫降噪箱静压动压比值
结语:

将静压与动压的比值引入迷宫降噪箱流场分析,能够有效量化迷宫降噪箱结构性能。静动压比值能够比单独的速度或压力参数更综合地反映流动状态。在集装箱发电机组迷宫降噪箱的流场分析中,该比值的空间分布能够直观反映流动加速区、回流区和均匀流动区的划分,帮助设计者识别阻力集中部位、评估风扇工况匹配性,并为降噪与散热的协同优化提供定量依据。从流场品质角度,倾角越小,静动压比值越趋于合理范围,流动阻力越低,但降噪片的降噪性能与通道的有效曲折度密切相关,倾角过小时,降噪片对声波的遮挡和反射作用减弱,部分声波可能沿倾斜表面直接透过,导致插入损失下降。倾角过大时,又会产生大范围涡流,湍流耗散率增大,同时易产生气动再生噪声。静动压比值可作为迷宫降噪结构优化设计中简便有效的流场诊断指标。

参考文献:

- [1] 赵睿,孟浩.2800kW箱式柴油发电机组集装箱设计[J].内燃机与动力装置,2013,30(1):11-14,18.
- [2] 张振海.6135发电机组低噪音方舱电站设计研究[J].通信电源技术,2011,28(2):23-26.
- [3] 卢天兵.数据中心用静音集装箱式高压柴油发电机组的设计[J].通信电源技术,2021,38(1):37-41.
- [4] 谭礼斌,袁越锦,黄灿,等.基于STAR-CCM+的发电机组流场对比分析及结构优化[J].西华大学学报(自然科学版),2019,38(4):77-82,99.
- [5] 谭礼斌,黄灿,余千英,等.基于STARCCM+的通机整机流场特性分析[J].装备制造技术,2018(4):1-7.

作者简介:甘宁(1998年-)、男、汉族、河南信阳人、硕士、研究方向:发电机组的研究与设计、通风散热、多频段降噪等。