# 风机在不同流量下的气动噪声测试及分析

## 郭少贤

大连交通大学詹天佑学院(中车学院), 辽宁 大连

收稿日期: 2025年6月2日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年7月3日

# 摘要

本研究针对轨道交通牵引风机在动态流量工况下的气动噪声特性展开实验研究,基于GB/T 1236-2017 与GB/T 2888-2008标准搭建半消声实验室测试平台,系统分析了离心风机在五种流量工况 (0.938~1.875 m<sup>3</sup>/s)下的进出口声压级、频谱分布及1/3倍频带特性。实验结果表明:进口噪声在额定流 量(1.25 m<sup>3</sup>/s)下达到最低值92.3 dB(A),偏离额定工况时噪声显著升高,其中小流量(0.938 m<sup>3</sup>/s)进口 噪声较出口高4.9 dB(A),而大流量(1.875 m<sup>3</sup>/s)下进出口噪声差值趋近于零。频谱分析揭示了第一、二 阶旋转频率(785 Hz、1570 Hz)对主频带的主导作用,非额定工况下低频宽频噪声与高频能量扩散特征 显著。研究结果为牵引风机的低噪声设计与运行优化提供了数据支撑。

## 关键词

离心风机,气动噪声,流量工况,频谱特性

# Aerodynamic Noise Testing and Analysis of Fans at Different Flow Rates

#### **Shaoxian Guo**

Zhan Tianyou College (CRRC College), Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2025

## Abstract

This study conducts experimental research on the aerodynamic noise characteristics of rail transit traction fans under dynamic flow conditions, and builds a semi-anechoic laboratory test platform based on the standards of GB/T 1236-2017 and GB/T 2888-2008. The inlet and outlet sound pressure levels, spectral distribution and 1/3 octave band characteristics of the centrifugal fan under five flow conditions (0.938~1.875 m<sup>3</sup>/s) were systematically analyzed. The experimental results show that: The inlet noise reaches the minimum value of 92.3 dB(A) at the rated flow rate (1.25 m<sup>3</sup>/s). When

deviating from the rated working condition, the noise increases significantly. Among them, the inlet noise at A small flow rate (0.938 m<sup>3</sup>/s) is 4.9 dB(A) higher than the outlet noise, while at a large flow rate (1.875 m<sup>3</sup>/s), the noise difference between the inlet and outlet approaches zero. Spectral analysis reveals the dominant role of the first and second rotational frequencies (785 Hz, 1570 Hz) on the main frequency band. Under non-rated conditions, the characteristics of low-frequency wideband noise and high-frequency energy diffusion are significant. The research results provide data support for the low-noise design and operation optimization of the traction fan.

## **Keywords**

**Centrifugal Fan, Pneumatic Noise, Flow Condition, Spectral Characteristics** 

Copyright © 2025 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. 引言

随着我国轨道交通网络的高速发展,列车运行速度与发车密度的持续提升对牵引风机的噪声控制提 出了更高要求。牵引风机作为列车空调通风与制动散热系统的核心部件,其气动噪声占车厢内部噪声的 35%以上,且呈现出复杂的动态频谱特性[1]。然而,现有研究多聚焦于额定工况下的噪声预测,对非稳 态流量变化(如频繁启停、变转速)的声学响应缺乏系统性分析[2],导致降噪措施在工程实践中针对性不 足。此外,传统工业风机噪声测试标准[3]基于稳态流场假设,难以准确表征动态工况下的声压级波动与 频谱偏移。因此,探究流量变化对牵引风机气动噪声的影响机理,已成为提升轨道交通声环境质量的关 键课题。

在理论层面,气动噪声的产生机制与流场特性密切相关。离心风机的旋转噪声主要由叶片通过频率 及其谐波构成,而宽频噪声则源于湍流边界层分离与涡脱落[4]。研究表明,非设计流量工况下,气流分 离加剧会导致低频噪声能量显著升高[5]。然而,现有仿真模型因忽略瞬态流声耦合效应,在高频段(>1000 Hz)预测误差超过 40% [6]。在工程实践中,传统隔声材料受车体轻量化限制,难以有效抑制宽频噪声, 亟需通过精准的噪声源特性分析指导低噪声设计。

本研究以某型轨道交通牵引离心风机为对象,搭建符合 GB/T 2888-2008 标准的半消声实验平台,结 合静压差法流量测量、高精度传声器阵列(GRAS 46AE)及 HEAD Squadriga III 数据采集系统,系统测试 五种流量工况下的声学特性。通过对比进出口声压级、频谱峰值及1/3倍频带分布,揭示流量变化对旋转 噪声主频、宽频能量迁移规律的影响。实验设计涵盖额定流量(1.25 m³/s)及四种非额定工况(0.938~1.875 m<sup>3</sup>/s),重点解析小流量与大流量下的噪声差异机制。研究旨在填补动态工况噪声特性研究的空白,提供 数据支持。

# 2. 测试原理

# 2.1. 流量测试

通风机的流量一般是指单位时间内流过通风机入口截面的气体体积,又叫体积流量。有3种常用的 测量方法,分别是风速法、静压差法和动压法。本文采用的是静压差法。

具体测量时,在输入端提供电源,将被测风机调到额定转速,调节节流装置,测得出口下的前后压 力,则风机流量为:

#### $Q_v = 301.0659 \times (\Delta P \times 1000 \times P/(273.15 + t))^{\text{0.5}}$

式中,Q<sub>v</sub>为风机流量,Nm<sup>3</sup>/h;ΔP为喷嘴前后静压差,kPa;P为工作绝压,kPa;t为工作温度,C。

#### 2.2. 压力测试

通风机的工作绝压用于描述风机出口的实际压力状态,是评估风机性能的关键参数。工作绝压是当 地大气压与表压之和,本文采用U型管测压装置,安装在出气口检测管道上,一端连接管组的压力接头, 另一端敞开与外部环境的大气压力相通。

## 2.3. 转速测试

通风机轴转速测试不得使用会显著影响风机转速或通风机性能的测量装置。本文风机测试台采用 ABB 专利的 DTC 技术,无需编码器即可实时精确计算电机转速和转矩。通过监测电机电流、电压等参数,结合电机数学模型动态调整输出,直接读取,实现实时监测。

#### 2.4. 噪声测试

离心风机的噪声主要来自气动噪声,还有部分来自机械噪声和电机定子与转子磁场相互作用产生的 电磁噪声,通常用 A 声级来评定,单位为 dB(A)。传声器按照标准对风机进出口进行噪声测试。

## 3. 测试平台搭建

离心风机测试平台需实现流量、压力、转速、噪声的动态测量,满足《工业通风机用标准化风道性能试验》(GB/T 1236-2017)的标准要求。

系统采用"动力驱动-测试风道-数据采集"三单元架构。动力单元配备 ABB ACS510 变频器(50 kW)和 LEGO 多速三相异步电动机,测试段采用法兰连接标准风道,数据采集系统集成 HEAD Squadriga III 数据采集前端配合 HEAD ArtemiS 开发平台。

风道分为 5 段,过渡段、整流管道、测管内静压的管道、文丘里管、调流管道及锥形调节阀。实体 见图 1。



Figure 1. Solid diagram of air duct 图 1. 风道实体图

过渡段采用"天圆地方"结构,实现气流从方形截面到圆形截面的平缓过渡,减少气流分离和局部 阻力;整流器置于整流管道下游,采用格栅式整流器,以消除气流湍流,均匀流速分布,降低噪声;静压 测量管道中,沿管道周向均匀开设4个测压孔,用U形管压力计测量风道内气流的静压值;通过测量文 丘里管前后压差计算流量,实现非侵入式流量监测;锥形调节阀通过改变阀芯位置调整风道截面积,从 而控制通过风机的气流量。五个部分通过法兰连接,法兰间加橡胶垫片进行密封处理,这五个部分构成 了完整的风道系统,各部分功能明确,相互配合以实现稳定的气流输送、精确的测量和灵活的流量调节。

### 4. 测试方案

牵引离心风机的噪声测试在半消声实验室内完成,该实验室地面采用抛光混凝土材质,另三侧墙体 设置梯度楔形吸声结构以构建自由声场环境,实验对象为与数值模型保持几何一致的风机。风机安装在 一台可升降的小平车上,空气首先经过进口过滤器进入风机内部,然后由风机出口引入由五段组成的风 道系统。图 2(a)展示了牵引离心风机的实物外观,而图 2(b)则说明了通过调节风道出口与节流装置之间 的间距来改变内部流动阻力,从而实现对风机流量的精确调控。基于额定工况及四种非额定工况,共计 五种不同流量条件下,进行了噪声测量,以探讨风机在不同流量状态下的噪声特性。

参考国标《风机和罗茨鼓风机噪声测量方法》(GB/T 2888-2008)规定[7],在距离进风口几何中心1m 且距离地面高1m处布置一个监测点,出口测点则在出口轴线斜45°方向,距出口1m,距地面高1m。



(a)

(b)

**Figure 2.** Experimental environment diagram of centrifugal fan. (a) Drawing of the centrifugal fan; (b) Throttling device 图 2. 离心风机实验环境。(a) 牵引离心风机实物; (b) 节流装置



(b)



**Figure 3.** Main equipment for experimental measurement. (a) HEAD Squadriga III data acquisition front end; (b) GRAS microphone; (c) Calibrator; (d) U-shaped tubes 图 3. 实验测量主要设备。(a) HEAD Squadriga III 数据采集前端; (b) GRAS 传声器; (c) 校准器; (d) U 型管

实验测量过程中需要 HEAD Squadriga III 数据采集前端、1/2 英寸自由场 GRAS 传声器(Type: 46AE)、

校准器(Type: 42AB)、U型管、温湿度仪、气压计、防风罩、线缆和支架等,其中主要设备如图 3 所示。 测试时环境温度为 10℃,大气压为 779 mmHg,测点参照文献进行布置。采样频率为 24 kHz,单次 采样时长为 25 s。

# 5. 实验结果分析

## 5.1. 进、出口总声压级

不同流量下进出口测点的声压级,见表1。

流量(m <sup>3</sup> /s)	0.938	1.063	1.25 (额定)	1.375	1.875
进口	96.5	94.8	92.3	92.8	95.2
出口	91.6	92.1	92.6	93.1	94.5
差值	4.9	2.7	-0.3	-0.3	0.7

Table 1. Inlet and outlet sound pressure level/dB(A) 表 1. 进出口测点声压级/dB(A)

从表 1 中可以看出,不同流量工况下风机的进出口噪声水平存在一定差异,且随着流量的变化,进 出口噪声的相对大小也会发生转变。将表 1 中数据绘制成图 4。

在不同流量工况下,管道内进出口声压级的变化揭示了气动噪声源随流速和涡流结构演变的规律。 低流量阶段(0.938~1.063 m<sup>3</sup>/s)由于气流速度偏低,剪切层与湍流强度较弱,涡流主要在进口附近初生并 局限发展,造成进口声压级显著高于出口(差值 4.9 dB(A)、2.7 dB(A)),出口区域流动平稳,噪声能量 尚未充分传递。当流量达到额定值(1.25 m<sup>3</sup>/s)时,流场接近设计状态,涡流生成和耗散达到相对平衡, 中低频和高频涡结构在管道中段均匀分布,进口与出口处声压级趋于一致(差值约-0.3 dB(A)),表明涡 流在管道内充分发展后崩解,高低频噪声相互补偿。高流量阶段(1.375~1.875 m<sup>3</sup>/s)下,气流速度显著提升,下游涡流剧烈度和小尺度湍流结构增多,剪切噪声和压力脉动增强。1.375 m<sup>3</sup>/s 时进口稍低(-0.3 dB(A)),至 1.875 m<sup>3</sup>/s 进口反超(0.7 dB(A)),说明小尺度涡流在出口处崩解后产生大量高频噪声并向外辐射,使出口声压级上升。

总体而言,气动噪声可分为三个演化阶段:近进口处初生涡流主导低频噪声;管道中段涡流发展带 来宽频带噪声;近出口处涡流崩解强化高频噪声。低频成分因波长较长易于管道传输,高频成分则多在 出口附近辐射,造成测点声压级差异。



**Figure 4.** Variation of sound pressure level with flow at inlet and outlet measuring points 图 4. 进出口测点声压级随流量变化图

由图 4 可知,进口噪声随着流量增加先降低后升高,在额定流量 1.25 m<sup>3</sup>/s 时达到最低值 92.3 dB(A)。 出口噪声随流量增加缓慢持续上升。流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 时进口噪声显著高于出口,流量为 1.063 m<sup>3</sup>/s 时噪 声差值变小;额定流量附近差值趋近于零,出口噪声略高,噪声分布趋于平衡;流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 时二者 噪声值同步上涨,相差较小。

## 5.2. 进、出口噪声频谱特性

查看不同流量下的进、出口噪声频谱特性,见图5与图6。

由图 5 可知,五种流量下均在 785 Hz 处存在明显峰值,为风机第一阶旋转噪声频率,均在 1570 Hz 处存在小峰值,为风机第二阶旋转噪声频率。图 5(a)中,两种小流量的宽频噪声与额定流量几乎吻合,但在第一、二阶旋转频率中,流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 时的进口噪声略高于流量为 1.063 m<sup>3</sup>/s,二者皆高于额定流量下的进口噪声,所以,小流量的情况下,随着流量的增加,进口噪声逐渐减小,在额定时进口噪声达到最小值。图 5(b)中,流量为 1.375 m<sup>3</sup>/s 的频谱图与额定流量高度重合,流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 的频谱图与额 定流量趋势重合,整体升高,所以,大流量的情况下,随着流量的增加,进口噪声逐渐增大。综上,进口 噪声值在额定流量时达到最小,体现了风机结构设计的合理性。



**Figure 5.** Spectrum diagram of inlet measuring points at different flow rates. (a) Inlet noise spectrum diagram of small flow rate compared with rated flow rate; (b) Import noise spectrum diagram of large flow rate compared with rated flow rate **图 5.** 不同流量下进口测点频谱图。(a) 小流量与额定流量对比进口噪声频谱图; (b) 大流量与额定流量对比进口噪声频谱图



**Figure 6.** Spectrum diagram of outlet measuring points at different flow rates. (a) Outlet noise spectrum diagram of small flow rate compared with rated flow rate; (b) Outlet noise spectrum diagram of large flow rate compared with rated flow rate **图 6.** 不同流量下出口测点频谱图。(a) 小流量与额定流量对比出口噪声频谱图; (b) 大流量与额定流量对比出口噪声频谱图

由图 6 可知,流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 时在 791 Hz 处存在明显峰值,其余四种流量下均在 785 Hz 处存在明显峰值,为风机第一阶旋转噪声频率;流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 时在 1564 Hz 处存在小峰值,其余四种流量下均在 1570 z 处存在小峰值,为风机第二阶旋转噪声频率。图 6(a)中,流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 的宽频噪声在低频时较高,中高频较低,流量为 1.063 m<sup>3</sup>/s 的出口噪声频谱图与额定流量趋于一致。图 6(b)中,流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 的频谱图在低频时的宽频噪声浮动较大,升高明显,第一、二阶旋转频率对应的出口噪声值随着流量的增加逐渐增大。综上,五种流量随着流量的增加出口噪声值逐渐增大。

# 5.3. 进、出口噪声主频带



查看不同流量下的进、出口噪声 1/3 倍频带,见图 7 和图 8。

**Figure 7.** 1/3 octave band diagram of inlet measuring points under different flow rates; (a) Small flow compared with rated flow inlet noise 1/3 octave band; (b) Large flow compared with rated flow inlet noise 1/3 octave band 图 7. 不同流量下进口测点 1/3 倍频带图。(a) 小流量与额定流量对比进口噪声 1/3 倍频带; (b) 大流量与额定流量对比进口噪声 1/3 倍频带

由图 7 可知,五种流量下的 1/3 倍频带的主频带中心频率皆为 800 Hz,这是由于一阶旋转频率包含 在 800 Hz 的频带里,对该频带做出较大贡献。图 7(a)中,流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 的 1/3 倍频带噪声值最高,且随着流量的增加各个频带的噪声值减小。图 7(b)中,流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 的 1/3 倍频带噪声值升高明显,随着流量的增加各个频带呈现阶梯式增长。



**Figure 8.** 1/3 octave band diagram of outlet measuring points under different flow rates. (a) Small flow compared with rated flow outlet noise 1/3 octave band; (b) Large flow compared with rated flow outlet noise 1/3 octave band 图 8. 不同流量下出口测点 1/3 倍频带图。(a) 小流量与额定流量对比出口噪声 1/3 倍频带; (b) 大流量与额定流量对比出口噪声 1/3 倍频带

由图 8 可知,不同流量下的出口测点 1/3 倍频带图的主频带中心频率依旧集中在 800 Hz,一阶旋转频率对出口噪声的作用显著。图 8(a)中,噪声值总体皆呈现先上升后下降的趋势,在 800 Hz 的频带处达 到最高。流量为 0.938 m<sup>3</sup>/s 的 1/3 倍频带在低频时对应的噪声值较高,中高频时较流量为 1.063 m<sup>3</sup>/s 和流量为 1.25 m<sup>3</sup>/s 的噪声值偏低。由图 8(b)可知,流量为 1.375 m<sup>3</sup>/s 时,低频的值较为突出,流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 时,中心频率为 250 Hz 的频带较其他流量时的贡献显著。

#### 6. 结论

本研究通过系统性实验揭示了离心风机气动噪声随流量变化的动态特性,主要结论如下:

(1) 声压级变化规律:进口噪声在额定流量下达到最低值(92.3 dB(A)),小流量(0.938 m<sup>3</sup>/s)时进口噪声显著高于出口(差值 4.9 dB(A)),而大流量(1.875 m<sup>3</sup>/s)下进出口噪声趋于平衡,表明偏离设计工况会加剧进口区域的气流扰动。

(2) 频谱特性分析:第一、二阶旋转频率(785 Hz、1570 Hz)对主频带贡献显著,其中小流量工况下低频宽频噪声占比升高,而大流量时高频能量扩散加剧,可能与气流分离涡脱落频率偏移相关。

(3) 1/3 倍频带特性: 800 Hz 频段受一阶旋转频率主导,其幅值随流量呈现非线性波动;流量为 1.875 m<sup>3</sup>/s 时,250 Hz 频带噪声异常突显,提示大流量下低频涡脱落效应增强。

# 参考文献

- [1] 崔玉龙,杨慕晨,张晓宁,等. 高速动车组车载故障预测与健康管理平台研究[J]. 数字化转型, 2025, 2(4): 110-121.
- [2] 李赫飞. 船用燃机轴流压气机非定常流动失稳机理研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [3] International Organization for Standardization (2004) Industrial Fans—Determination of Fan Sound Power under Standardized Laboratory Conditions: ISO 13347. ISO.
- [4] 闫莹. 离心风机气动噪声预报及降噪优化研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [5] Smith, J. (2022) Aeroacoustic Characteristics of Centrifugal Fans under Off-Design Conditions. *Journal of Sound and Vibration*, **512**, Article 116385.
- [6] ISO (2010) ISO 3744, Acoustics—Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources Using Sound Pressure.
- [7] 沈阳鼓风机(集团)有限公司,北京世纪静业噪声振动控制技术有限公司,长沙鼓风机厂有限责任公司.GB/T 2888-2008 风机和罗茨风机噪声测量方法[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2008.