

本文全文线上首发由  
上海电机系统节能工程技术  
研究中心有限公司

支持

朱一乔,王文庆.  
牵引电机整机气动噪声特性的数值  
模拟研究.  
电机与控制应用,2022,49(1):56.

## MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐压测试仪



SEARI  
上电科



上科电机

地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063 邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 [www.seari.com.cn](http://www.seari.com.cn)

# 牵引电机整机气动噪声特性的数值模拟研究\*

朱一乔, 王文庆

(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 一般牵引电机噪声由冷却风扇噪声、电磁振动噪声和机械噪声组成, 其中冷却风扇引起的气动噪声是重要构成部分。建立牵引电机整机计算流体动力学(CFD)计算模型, 利用 DES-SST 湍流模型计算牵引电机内流场, 通过回转面、子午面上流线和旋涡强度分布发现风扇流道内流动分离现象十分显著, 风扇进风口及叶尖处存在高强度的旋涡运动。建立牵引电机整机气动噪声有限元计算模型, 以非定常流场计算结果为声源预测牵引电机辐射噪声。计算结果表明, 噪声监测点上仿真计算值与试验值的总声压级最小相差 0.1 dB(A), 多点平均声压级相差 1.8 dB(A), 计算结果较准确。牵引电机气动噪声由离散噪声和宽频噪声组成, 其中离散噪声的最高峰值来自于冷却风扇的偶极子噪声, 且风扇叶片不等间距排列导致叶片通过频率的基频由 369 Hz 偏移至 221 Hz。同时该频率下噪声的辐射指向性呈现典型的偶极子特征, 并主要从牵引电机进出风口向外传播。试验结果可为牵引电机降噪优化工作提供参考。

**关键词:** 牵引电机; 气动噪声; 数值模拟

中图分类号: TM343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)01-0056-06

doi: 10.12177/emca.2021.159

## Numerical Simulation Research on Aerodynamic Noise Characteristics of Traction Motor\*

ZHU Yiqiao, WANG Wenqing

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The noise of traction motor is composed of cooling fan noise, electromagnetic vibration noise and mechanical noise, in which the aerodynamic noise caused by cooling fan is an important part. The computational fluid dynamics(CFD) calculation model of the traction motor is established, and the DES-SST turbulence model is used to calculate the flow field in the traction motor. Through the streamline and vortex intensity distribution on the rotating surface and meridional surface, it is found that the flow separation phenomenon in the fan channel is very significant, and there is high-strength vortex motion at the fan air inlet and blade tip. The finite element calculation model for the aerodynamic noise of the traction motor is established, and the calculation result of the unsteady flow field is used as the sound source to predict the radiated noise of the traction motor. The calculation results show that the minimum difference of total sound pressure level at the noise monitoring points between the simulation calculated value and the test value is 0.1 dB(A), and the difference of average sound pressure level at multiple points between simulation and test is 1.8 dB(A). The calculation results are accurate. The aerodynamic noise of traction motor consists of discrete noise and broadband noise. The highest peak of discrete noise comes from the dipole noise of cooling fan, and the unequal spacing arrangement of fan blades causes the fundamental frequency of blade passing frequency to shift from 369 Hz to 221 Hz. At the same time, the radiation directivity of noise at this frequency presents a typical dipole characteristic and mainly propagates outward from the air inlet and outlet of traction motor. The research can provide

收稿日期: 2021-10-08; 收到修改稿日期: 2021-12-09

\* 基金项目: 中国中车电机基础研究科研项目(YJXM2017-022)

作者简介: 朱一乔(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机噪声仿真分析及噪声测试。

reference for the noise reduction optimization of traction motor.

**Key words:** traction motor; aerodynamic noise; numerical simulation

## 0 引言

随着技术的不断进步,高铁等地面交通工具的运行速度逐年提升,随之而来的噪声问题也逐渐受到人们的关注<sup>[1]</sup>。牵引电机(TM)作为高铁、地铁等地面交通工具核心动力部件,其工作时产生的噪声主要由三部分组成:通风噪声、电磁振动噪声、机械噪声<sup>[2]</sup>,其中通风噪声主要由冷却风扇产生。根据以往在高转速下的牵引电机噪声测试经验,冷却风扇噪声通常是牵引电机噪声的主要成分。因此,非常有必要研究一种适用于牵引电机冷却风扇气动噪声预测的方法,获取其噪声幅值和频谱特性,并将预测结果应用到电机的设计阶段中。

近年来,国内外许多研究人员对风扇等旋转机械的噪声产生机理和控制方法开展了大量的研究。康强等<sup>[3]</sup>对比了积分法和有限元法在Lighthill声波动方程求解离心风机气动噪声中的应用,发现有限元方法能克服积分方法不能求解复杂边界格林函数的缺点,且噪声预测结果较好,并指出离心风机主要噪声源为叶片压力面与蜗舌前后部。Wang等<sup>[4]</sup>针对汽车交流发电机冷却风扇旋转噪声预测及优化问题,运用矢量合成方法,计算得到相对声压和相对声级变化量,并用相对声压预测旋转噪声过大的阶次和改变叶片分布角度前后各阶次旋转噪声的变化,然后以相对声压级变化量为参数,优化风扇噪声。左曙光等<sup>[5]</sup>对一燃料电池汽车内的离心风机进行了噪声测试分析,测试结果表明离心风机的噪声主要由风机叶轮产生的离散噪声和进气湍流、电机电磁激励产生的宽频噪声组成。何源<sup>[6]</sup>以9-19No.4A风机为研究对象,在详述风机气动噪声源的基础上,利用边界元法求解风机气动噪声,计算结果表明蜗舌上产生的离散噪声远大于叶片上产生的离散噪声。邹春一等<sup>[7]</sup>通过仿真和试验测试手段,研究了汽车空调系统在不同转速和循环工况下的气动噪声特性,结果表明空调系统产生的气动噪声呈宽频噪声特性,且整车环境下空调系统辐射出来的噪声量级远高于自由场环境。关于牵引电机风扇噪声的研究较少,Noda等<sup>[8]</sup>通过设计风扇叶片

不等间距排布等措施,降低牵引电机风扇噪声。申政等<sup>[9]</sup>使用混合方法计算了某牵引电机冷却风扇噪声,计算结果发现风扇内噪声最大位置发生在风扇叶轮流道内强流动分离处,但该研究中未考虑牵引电机整机模型,仅截取了冷却风扇部分进行仿真计算。

因此,有必要对牵引电机整机气动噪声特性展开研究。以某牵引电机整机模型为研究对象,提取牵引电机内部非定常流场计算结果,并建立有限元声学计算模型,利用声类比方法仿真分析了该电机在额定转速下的气动噪声,获取了由冷却风扇产生的气动噪声频谱、指向性等声学特性,并与试验测试结果进行对比,为牵引电机冷却风扇噪声优化工作提供依据。

## 1 牵引电机气动噪声计算流程

牵引电机冷却风扇气动噪声的计算流程如图1所示。对于工程中的气动噪声问题,常采用混合方法,混合方法忽略了声场对流场的影响,将气动噪声的计算分为声源的产生和声传播两个步骤。首先建立牵引电机整机内流场的计算模型,完成定常流场和非定常流场计算,对时域上的流场噪声源数据进行采样;然后建立牵引电机气动噪声有限元计算模型,将流场计算结果插值转换到声学模型上,完成噪声源数据时频域的转换;最后利用声类比方法计算牵引电机冷却风扇的气动噪声。

## 2 牵引电机内流场仿真计算

### 2.1 计算模型

参考牵引电机原始装配体的模型,建立满足计算流体力学(CFD)计算需求的电机简化模型。将电机结构分为定子、传动端端盖、非传动端端盖、滤尘器、转子、风扇和线圈等,依次建立相应的简化模型。在牵引电机气动噪声计算中风扇是核心部件,因此对于风扇结构仅在原始零部件模型基础上去除风扇上的装配孔,其他结构特征保持不变。电机中风扇和转子均为旋转部件,根据这一特点,可将该电机流体域分为5个区域:进口延长段、定子流体域、转子流体域、风扇旋转域和出

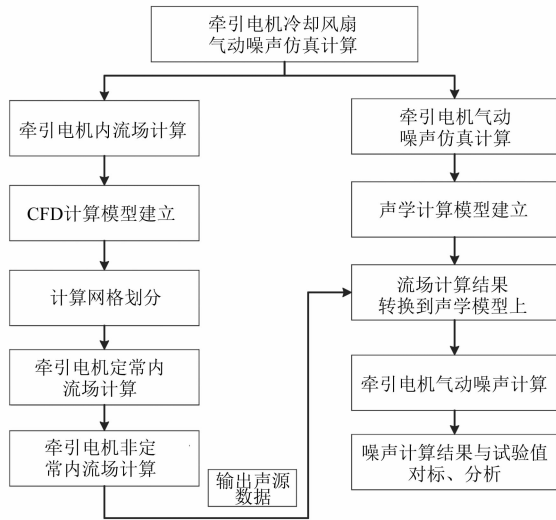


图1 牵引电机冷却风扇气动噪声计算流程图

口延长段。其中进口延长段长度为 200 mm,出口延长段参考出口附近结构向外延长的圆柱直径为 780 mm。

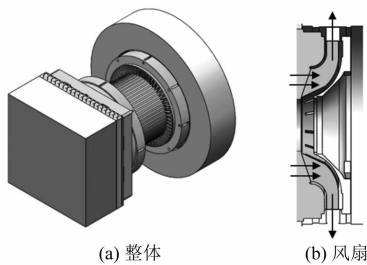


图2 某牵引电机流体域模型

### 2.2 计算网格及边界条件

为适应牵引电机内部结构的复杂性,在进行网格划分时将流体域分为三部分:风扇区域、进出口延长区域和其他区域,不同区域之间使用 interface 边界条件进行连接。牵引电机气动噪声计算中核心部件是冷却风扇,对风扇区域进行网格加密,面网格最小尺寸为 1 mm,且同时划分边界层网格,边界层网格尺寸应满足非定常计算中采用的高精度湍流模型的壁面函数要求 ( $Y_{plus} = 1$ )。对于其他区域,网格划分时兼顾计算精度与网格数量,将面网格尺寸设置为 2~10 mm。最终所有区域生成的体网格总数量约为 1 300 万。

使用 Ansys Fluent 进行定常和非定常流场计算。为加快非定常计算的收敛速度,先进行定常流场计算,计算中湍流模型选择 Realizable  $k-e$  湍

流模型,风扇和转子区域选择多参考系模型,给定额定转速,进口设为压力进口,出口设为压力出口。计算中通过监测进、出口处的流量和压力判断计算结果是否收敛,待定常计算收敛后,以定常结果为初始值进行非定常流场计算。湍流模型选择 DES-SST 湍流模型,风扇和转子区域使用滑移网格,时间步长设为  $8.275 \times 10^{-5}$  s,对应风扇旋转  $1^\circ$  所需的时间。在非定常计算中通过监测每一个时间步内残差的收敛性和风扇出口处压力波动的周期性来判断计算的稳定性和收敛性,待非定常计算收敛后进行流场噪声源数据的采样。

### 2.3 计算结果

流场计算完成后,提取电机内部流场中子午面和回转面上速度及旋涡强度分布图,分析电机内部流动现象。

根据图 3 中牵引电机内流场速度流线分布图可知,子午面上从电机进风口到风扇出口均存在分离,且风扇区域内流线紊乱分离最为严重。在风扇回转面上,流道中气流的分离现象更加明显,过多的流动分离会引起风扇气动性能的损失,引起涡流噪声。

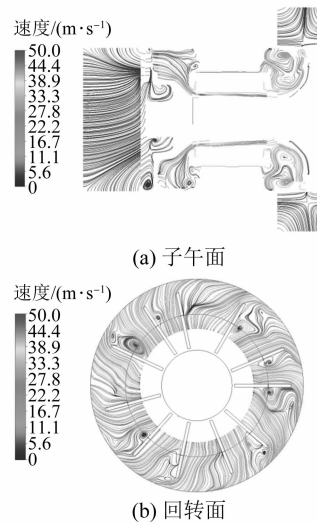


图3 牵引电机内流场速度流线图

旋涡强度是流场内速度梯度张量复特征值的虚部,其值代表围绕当地中心旋转运动的强度。牵引电机内流场旋涡强度分布图如图 4 所示,在风扇进风口、风扇叶尖处存在明显的高强度旋涡运动。根据 Powell 的涡声理论可知,在低马赫数下,流场内涡是产生气动噪声的主要原因,旋涡强

度越高转化产生的气动噪声幅值越高。通过改善风扇上游进风口处流动状态,减小风扇叶尖处的流动分离可改善牵引电机气动噪声性能。

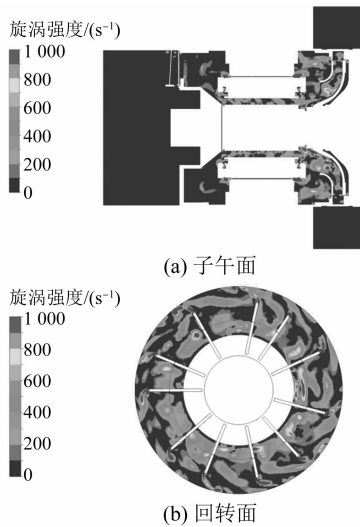


图4 牵引电机内流场旋涡强度分布图

### 3 牵引电机气动噪声仿真计算

#### 3.1 气动噪声计算模型

牵引电机非定常流场计算完成了噪声源数据的采样,建立声学计算模型。如图5所示,声学计算模型由声源区和声传播区组成。为了提取流场中的所有声源信息,将CFD计算中的流体域作为声源区。在声源区模型中,提取冷却风扇产生的偶极子噪声面声源和电机流道内产生的四极子噪声体声源作为边界条件。声传播区参考声源区形状,在电机外部创建了矩形区域。电机在噪声测试时是直接放置在地面的,因此矩形体底面设置为全反射刚性壁面,其他外表面为无反射边界。同时依据噪声测试时测点分布位置,在水平和垂直方向上共设置15个噪声监测点,获取监测点处的噪声声压级和频谱特性。

#### 3.2 试验测试

参考噪声测量标准对目标电机水平方向和垂直方向上的噪声声压级和频谱进行测试。根据电机声压级测试数据,计算声功率级。为保证测试结果的准确性,特增加补充测试点,位置如图6所示。在垂直平面上,靠近电机传动端和非传动端各增加2个测点;在水平平面上,增加8个测点,每个测点距离规定测点0.5 m。

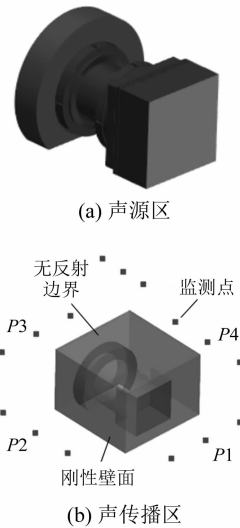


图5 牵引电机声学计算模型

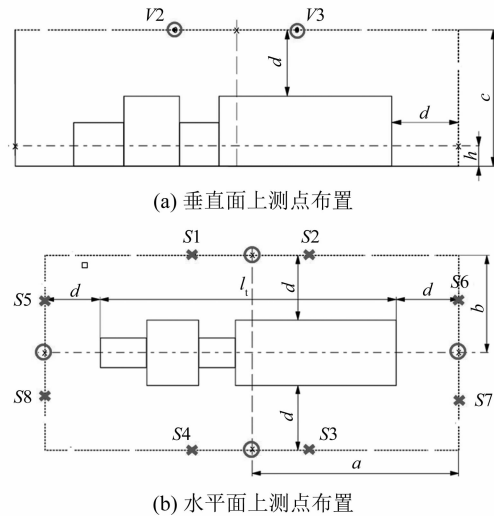


图6 电机噪声测点位置示意图

噪声试验测试现场图如图7所示。在测试电机噪声之前,应对环境噪声进行测量,避免环境噪声过大对电机噪声测试带来误差。在正式开始测试之前,应使被测电机保持低转速运转10 min以上,进行电机预热,避免机械噪声过大对测试结果带来误差。完成以上准备工作,即可开始电机噪声测试。测试中应保证无其他噪声源干扰,每次噪声数据采样时间建议在10~15 s。

#### 3.3 计算结果与分析

计算完成后,提取所有噪声监测点处总声压级与试验测试值进行对比。对比表1结果可看出,单个测点上仿真与试验声压级最小相差



图7 电机噪声试验测试图

0.1 dB(A), 多点平均声压级相差 1.8 dB(A)。其中, P1、P3 点是水平方向上正对电机进出风口的测点, 电机内气动噪声主要从进出风口向外传播, 因此这两个测点的误差较小; P2、P4 点是水平方向上电机两侧的测点, 此位置处噪声主要来源于电机电磁激励振动, 因此这两个测点的误差较大。考虑到实际电机噪声测试中除了风扇噪声还包括电磁振动噪声和机械噪声, 因此仿真结果误差满足工程计算的要求。

表1 牵引电机气动噪声仿真值与试验值误差

测点	$\Delta/\text{dB(A)}$	测点	$\Delta/\text{dB(A)}$
P1	0.1	P9	-1.5
P2	-5.4	P10	0
P3	0.5	P11	0.3
P4	-4.7	P12	0.1
P5	-2	P13	-2.7
P6	-1.9	P14	-5.5
P7	-4.1	P15	-4.5
P8	-2.9	多点平均值	-1.8

牵引电机正常工作时, 气动噪声主要包括由旋转风扇产生的偶极子声源及电机通风流道内涡流产生的四极子声源。在计算中通过设置面声源和体声源边界条件来提取不同类型的声源, 同时可以采用定义载荷工况评估不同噪声源对总噪声的贡献量。从图8可以看出, 对于测点 P1, 其噪声频谱中有两个明显的离散噪声峰值, 221 Hz 和 413 Hz。通过对比不同声源与总噪声的频谱发现, 221 Hz 处峰值来自于面声源即冷却风扇噪声, 而 413 Hz 处峰值来自于体声

源即流道涡流噪声, 且体声源对中高频噪声的贡献量较高。

一般风扇气动噪声中包含的离散噪声是由旋转的叶轮周期性击打空气或邻近的固壁面造成的, 其频率为

$$f = \frac{z \cdot n}{60} i \quad (1)$$

式中:  $z$  为风扇叶片数;  $n$  为叶轮转速;  $i$  为谐波数,  $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

依据牵引电机额定转速 2 014 r/min 和风扇叶片数 11 个, 由式(1)计算得到叶片通过频率的基频为 369 Hz。但由于本文中牵引电机的冷却风扇叶片为不等间距排布, 叶片通过频率偏移。从监测点处的噪声频谱曲线可以看出, P1 点处叶片通过频率的基频偏移至 221 Hz。

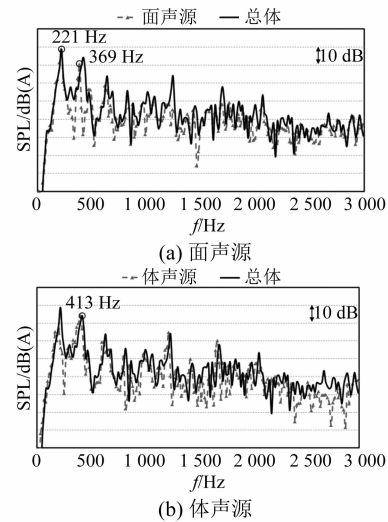


图8 不同声源的噪声贡献量对比

在牵引电机声学模型中的水平面上均布一圈噪声监测点, 即可获得每一个监测点的噪声特性, 将同一频率下不同测点的噪声幅值绘制在极坐标图中即可得到该频率下噪声传播指向特性, 如图9所示。221 Hz 下噪声指向性呈现典型的偶极子噪声辐射特性, 说明 221 Hz 下噪声来自于风扇的偶极子噪声, 且该频率噪声主要沿牵引电机进出风口方向向外传播, 出风口方向噪声幅值明显大于进风口。通过获取电机主要峰值处的噪声辐射指向性, 可在噪声主要传播途径和方向上设置吸声隔声装置, 采用被动降噪的方式降低牵引电机辐射噪声。

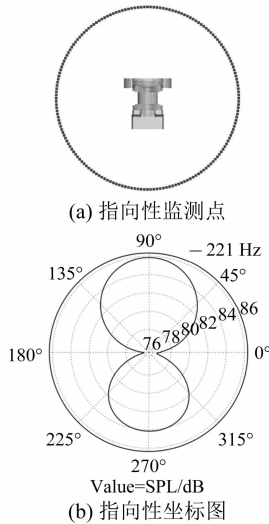


图9 221 Hz-噪声辐射指向性图

## 4 结 语

本文通过建立牵引电机内流场仿真计算模型,以电机非定常内流场计算结果为声源,计算并分析了牵引电机气动噪声特性,结论如下:

(1) 牵引电机内流场中流动分离现象非常明显,风扇区域分离现象最为严重,且在风扇进风口、风扇叶尖处存在明显的高强度旋涡运动;

(2) 分析噪声监测点处的频谱曲线发现,噪声频谱中存在明显的离散噪声峰值,其中最高峰值来自于冷却风扇的偶极子噪声,而第二高峰值则来自于通风流道内的四极子噪声,在牵引电机气动噪声的优化中应综合考虑风扇噪声和通风流道噪声;

(3) 采用不等间距排列的风扇叶片会导致叶片通过频率偏移,对于电机进风口处的监测点该频率由 369 Hz 偏移至 221 Hz;

(4) 最高峰值频率下的噪声辐射指向性呈现典型的偶极子特征,且主要从牵引电机进风口向外传播。

## 【参考文献】

- [ 1 ] 蒋伟康,张海滨,严莉. 高架轨道交通噪声的分析与控制技术研究[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 138.
- [ 2 ] 李帅. 牵引电机传动系统噪声与振动特性分析[D]. 大连:大连交通大学, 2011.
- [ 3 ] 康强,左曙光,韩惠君. 汽车空调系统离心风机气动噪声数值计算[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 1.
- [ 4 ] WANG Y, DONG D, XIE X, et al. Spectral optimization of fan rotation noise based on vector composition method[J]. Key Engineering Materials, 2014, 584: 131.
- [ 5 ] 左曙光,范珈璐,韦开君,等. 燃料电池车用离心风机噪声特性试验分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 181.
- [ 6 ] 何源. 离心式通风机离散噪声数值模拟与降噪研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [ 7 ] 邹春一,杨志刚,李启良,等. 整车环境下汽车空调系统气动噪声分析[J]. 声学技术, 2018, 37(1): 71.
- [ 8 ] NODA S, MIZUNO S, KOYAMA T, et al. Development of a totally enclosed fan cooled traction motor[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010.
- [ 9 ] 申政,王彤. 基于混合方法的轨道交通牵引电机离心风机的气动及噪声性能计算[J]. 风机技术, 2017, 59(4): 13.

## [ 主要栏目 ]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果