

自通风型牵引电机气动噪声特征分析与控制研究

黄鹏程^{1,2}, 马吉恩^{1,3*}, 郑国丽², 方攸同^{1,3}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

3. 流体动力基础件与机电系统全国重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Characteristic Analysis and Control Study of Aerodynamic Noise in Self-Ventilated Traction Motors

HUANG Pengcheng^{1,2}, MA Ji'en^{1,3*}, ZHENG Guoli², FANG Youtong^{1,3}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

3. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Taking self-ventilated traction motor as the research object, the characteristics of aerodynamic noise were analyzed in this paper, including the physical measurement of noise, identification and classification of aerodynamic noise. Through no-load noise test, the noise components of the prototype machine were analyzed and the main noise sources were identified. Based on CFD theory, the steady flow field of the whole motor was calculated to obtain parameters such as system wind resistance and velocity distribution. The motor aerodynamic noise was then predicted and evaluated according to flow characteristics. Noise reduction was achieved at the source by optimizing the design of the air inlet and outlet structures and the power fan. Meanwhile, an acoustic enclosure was used to control noise along the transmission path. The test results showed that the aerodynamic noise of the motor was significantly improved by adopting ventilation optimization design and acoustic measures at high rotational speeds. The conclusion provides a theoretical reference for noise reduction design in self-ventilated traction motors.

Key words: traction motor; aerodynamic noise; ventilation design; noise reduction

摘 要: 本文以自通风型牵引电机为研究对象, 对气动噪声特征进行了分析, 包括噪声的物理度量、气动噪声的鉴

别以及气动噪声的分类。通过空载噪声试验, 分析原型机的噪声成分, 确定主要噪声源。基于 CFD 理论计算电机整机稳态流场, 获取系统风阻、速度分布等参数, 根据流动特性预测评估电机气动噪声。通过进出风结构与动力风扇的优化设计, 从声源上降噪, 并采用隔声罩从噪声传播路径上控制噪声。经试验验证, 在高转速段, 采用通风优化设计与声学措施使电机气动噪声得到明显改善, 结论可为自通风型牵引电机的降噪设计提供理论参考。

关键词: 牵引电机; 气动噪声; 通风设计; 降噪

0 引言

作为轨道车辆的主要动力部件, 牵引电机的噪声是轨道车辆噪声的主要来源, 是衡量牵引电机工作性能优劣的标准之一。近年来对于轨道交通装备的噪声要求越来越严苛, 尤其是出口电机。因此为了提高电机的工作性能, 使噪声性能满足国内外市场需求, 如何有效降低电机噪声成为牵引电机研发设计的关键难题。

电机中产生的噪声包括电磁噪声^[1-2]、机械噪声^[3]和气动噪声^[4-6]。电磁噪声是由气隙中各谐波磁场引起的交变电磁力作用在铁心及与其相联的机械构件上产生的振动、共振引起的噪声。机械噪声是轴承等装置承受周期或非周期机械冲击或振动引起的噪声。气动噪声是由气体中涡流使气体受扰动以及气体压力周期性波动引起的噪声。气动噪声是自通风型牵引电机主要噪声源之一, 其产生机理^[7]是由转动的转子及随轴一起旋

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4301102); 流体动力基础件与机电系统全国重点实验室自主课题(SKLoFP_ZZ_2302)

Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB4301102) and (SKLoFP_ZZ_2302)

转的冷却风扇导致内部冷却空气的流动所产生的。电机转速愈快,冷却空气与电机内部结构的碰撞愈剧烈,产生的气动噪声则越大。因此,电机气动噪声大小主要与电机转速、冷却风扇结构、气流风道截面的变化以及电机风道形状有关。

降低空气动力噪声^[8-11]有两种途径,一是从声源上控制,二是安装隔声罩和消声器,从噪声的传播方面来控制。经调研目前可应用在降低自通风型牵引电机气动噪声的措施有三大类,分别为:风扇的合理选型和设计;合理设计风路系统;消声器与隔声罩。

本文将通过研究电机的通风结构以及风扇优化设计并结合声学措施控制电机在高转速下的气动噪声,同时通过试验数据分析适用于工程化的气动噪声预测方法,为电机的噪声分析与控制提供有力的技术支持。

1 研究对象

自通风型牵引电机通风系统如图 1 所示,电机内置同轴离心风扇,在风扇的驱动下,冷却介质从周围环境进入电机进风口,流经定转子、气隙风道后经风扇从电机出风口流出。由于电机采用开启式冷却结构,声音通过冷却介质使声能向外传播,气动噪声占比较大,因此控制气动噪声是电机降噪的关键。对于自通风型牵引电机而言,旋转机械是主要的气动噪声源,但由于牵引电机的特殊性,风扇需满足双向运转下具有相同的冷却性能,限制电机必须采用低效的径向离心风扇,导致风扇的优化空间小,提高了电机的降噪难度。因此本文从通风设计和声学措施两个方面实施降噪。在确保满足电机冷却风量要求的前提下,对 1 款以上广泛应用的城轨牵引电机完成优化设计,实现降噪 3 dB 以上。

2 噪声源诊断

为了识别噪声源,针对某自通风型牵引电机进行了空载噪声试验,空载噪声试验平台在半消声室内搭建,噪声测定按 IEC60349-2:2010 附录 C 进行,试验采用 B&K 设备进行测量,设备布置如图 2 所示。空间布置 5 个噪声测量点,测点 1 为电机轴伸侧也是电机进风侧,逆时针依次为测点 2~测点 4,顶部为测点 5。

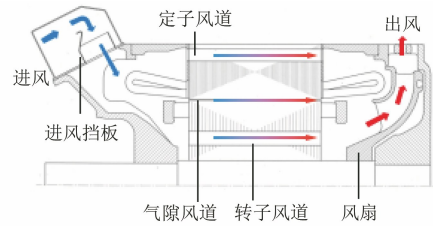


图 1 自通风型牵引电机通风示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ventilation in self-ventilated traction motor



图 2 测试环境与测量设备

Fig. 2 Test environment and measurement equipment

表 1 为不同转速不同电压下测量的噪声数据对比。由测量数据可知,在低转速 2 100 rpm 下,低压 180 V 的噪声比额定电压 2 340 V 的噪声低 15.9 dB(A)。在最高使用转速 4 700 rpm 下,低压 180 V 的噪声与额定电压 2 340 V 的噪声基本相当。

表 1 不同转速不同电压的噪声对比

Tab. 1 Comparison of noise at different speeds and voltages

转速/(r·min ⁻¹)	2 100		4 700	
电压/V	2 340	180	2 340	532
声功率级/dB(A)	108.1	92.2	112.5	112.9

电磁噪声由电机的定子径向振动所产生,当电压降低时,电磁噪声随之降低。自通风型牵引电机在低转速下受电压影响显著,以电磁噪声为主,而在高转速段,噪声主要成分为气动噪声,因此高转速下噪声受电压影响较小。突然断电,电磁振动和噪声消失后,因转子有惯性,转速逐渐下降,通风噪声仍保留,可以分离出气动噪声。因此采用自由停机测量高转速的气动噪声。

各测点的噪声值如表 2 所示。试验数据表明在最高使用转速 4 700 rpm 下,噪声最大值出现在电机气流进风侧,其次为气流出风侧,电机顶部噪声最低,空气动力噪声产生的根本原因是电机通

风系统中气流压力的局部迅速变化和随时间的剧烈脉动以及气体与电机风路管道的摩擦。这种噪声通常直接从气流中辐射出来。

表 2 各测点噪声

Tab. 2 Noise at each measurement point					
转速/(r·min ⁻¹)	4 700				
测点	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5
	进风		出风		顶部
总声压级/dB(A)	101.0	99.1	100.4	98.9	97.5

一般通风噪声有明显的方向性,顺气流方向很强,因此通风噪声在电机两端进、出口处较高,尤其进风处最高。试验表明噪声具有一定的指向性特点。这些现象进一步说明电机在高转速运转时气动噪声为主要成分。

在最高使用转速 4 700 rpm 下进风侧噪声测点的频谱如图 3 所示,噪声峰值点出现在频率 1 332 Hz,其次 260 Hz 噪声较高。

电机高速旋转时,空气质点受到风扇叶片周期性力的作用,产生压力脉动,就产生了旋转噪声,其频率是叶片每秒打击空气质点的次数。频率表达式为

$$f_b = \frac{kZn}{60} \quad (1)$$

式中: k 为 1,2,3,⋯; Z 为风扇叶片数或导条数; n 为转速。

电机径向离心风扇叶片数为 17,计算出风扇的叶片通过频率为 1 332 Hz,说明噪声峰值点的声源为旋转风扇的离散噪声。

由于粘滞力的作用,涡流会分裂成一系列的小涡流,这种涡流和涡流的分裂使空气扰动,形成压缩和稀疏过程,从而产生噪声,其频率为

$$f_v = 0.195 \, 1 \left(1 - \frac{0.20}{Re} \right) \frac{U}{D} i \quad (2)$$

式中: $i=1,2,3,⋯$; Re 为雷诺数; U 为气体与物体的相对速度; D 为物体的正表面宽度在垂直于速度平面的投影。

在电机冷却气流的入口区和出口区,气流与风道壁的摩擦以及气流间流速不一致相互粘滞作用引起涡流将部分动能变成声能。当风路的截面剧变或风流方向突变时都会引起较大的涡流噪声。试验过程中将进风罩的进风挡板取消后,低频 260 Hz 的噪声明显降低,说明低频处的噪声源

为进气流噪声,因此需要优化进风结构进行降噪。

通过对噪声源进行测试、分析及诊断确定了主要噪声源为进风结构与离心风扇,因此高转速段的降噪将基于自通风型牵引电机的气体流动特性和噪声特性对进风结构与离心风扇进行优化。

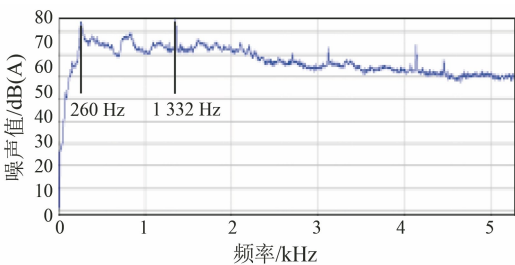


图 3 进风测点频谱图 (4 700 rpm)

Fig. 3 Spectrogram of the inlet measurement point (4 700 rpm)

3 优化设计

3.1 进风结构优化

原始方案为径向进风,进口安装过滤板和进风挡板进行双重防护,冷却介质进入电机后,增加了局部阻力。冷却通道突缩,冷却介质速度提高,进而导致进气噪声提高。

通过对系统风阻进行分析,得出径向进风风阻占比为 64%,定转子风道的进出风阻力占比为 21%,风扇出风阻力占比为 15%,进风风阻占比较大,因此优化进风结构,降低系统风阻。

图 4 为进风过滤器截面示意图。进风结构由径向进风优化为轴向进风,增加进风面积,同时为了不降低电机的防护性能,进风为过滤网孔板与交错 U 型板的双重防护。

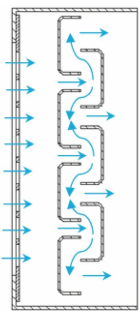


图 4 轴向进风过滤器示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the axial air inlet filter

图 5 为径向进风结构与轴向进风结构的速度

流线图,从图中可以看到径向进风的风速高于轴向进风,定转子风道的风速不均。而轴向进风风速低,均匀性提高,对降低进气噪声和冷却的均匀性均有改善。

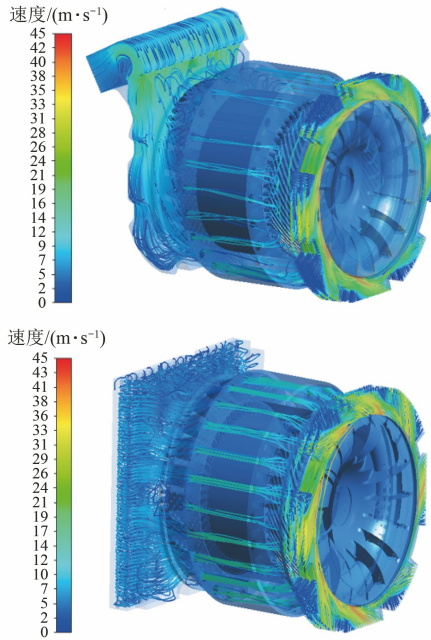


图5 优化前后速度流线图

Fig. 5 Velocity streamlines before and after optimization

3.2 风扇优化设计

由于牵引电机的风扇需要满足双向旋转具有相同的冷却性能,因此限制离心风扇只能采用径向风扇,通过优化风扇叶片数、叶型以及叶片间距提升风扇性能。

采用计算流体动力学方法模拟了原风扇的气动特性。气流进入叶片间急剧转弯后,气流与前盘分离,形成涡流区,增加了通风系统的损失。受涡流影响,有效通风面积减小,截面速度不均。

为了降低系统损失,扩大风扇进口面积,减小风扇外径,增加风扇叶片数,叶型尽量平缓,空气流通面积逐渐缩小,空气加速流通,减少气体分离。

优化前后风扇流道的速度流线如图6所示,优化后降低了涡流损失,流速均匀性显著提高。

表3为额定转速2 100 rpm时优化前后的参数对比。通过表3可知,优化进风结构,将风扇外径由405 mm减少为340 mm后,风阻减少55%,风量增加6.6%,且电机冷却性能有所改善。

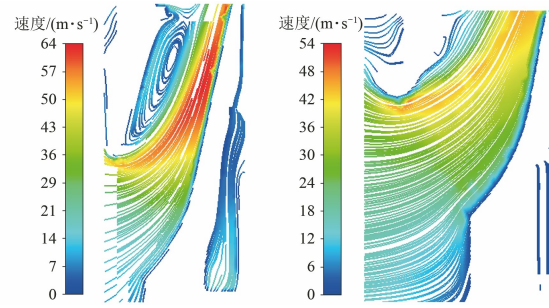


图6 风扇叶片间流体域的截面流线对比

Fig. 6 Cross-sectional streamline comparison of fluid domains between fan blades

表3 优化前后参数对比

Tab. 3 Comparison of parameters before and after optimization

参数名称	优化前	优化后
进风结构	径向进风	轴向进风
风扇外径/mm	405	340
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	2 100	2 100
流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.242	0.258
绕组平均温升/K	108	106
风阻/($kg \cdot m^{-7}$)	10 977	4 950

3.3 出风结构优化

由表2可知,电机在进气方位和出气方位噪声最大,进风结构优化后,电机的冷却风量增加,电机温升降低。为了进一步降噪,在保证电机冷却风量、温升不高于原方案的情况下,在出风侧采用隔声罩将部分噪声源与周围环境隔开进行降噪,如图7所示。

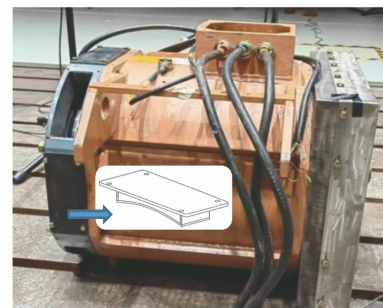


图7 出口隔声装置

Fig. 7 Outlet sound insulation device

在距离风扇外缘最近的4个出口处设置隔声罩,隔声罩采用中空结构,声波穿透介质层必须通过两个界面,一个是从空气到固体的界面,另一个是从固体到空气的界面,透射过介质的声波被减弱。同时隔声装置底部设置流线结构用于降低气流不稳定产生的湍流。

4 噪声预测

目前气动噪声的数值方法^[12-19]有计算声学方法、莱特希尔声类比方法以及混合计算方法。数值求解需要耗费大量的时间和成本,所以在工程中很少应用。为此根据工程需要,建立和采用经验公式快速预测电机噪声,为降噪提供理论依据十分必要。

根据流体力学理论^[20-21],风压正比于流阻与流量平方的乘积,而噪声功率正比于流量与风压平方的乘积,由此相同冷却方式电机气动噪声可依据风量与风阻进行评估。电机在高速运转时,其内部复杂的流动状态很难用解析法获得准确的参数,因此流量和流阻计算基于流体仿真技术,采用 CFD 软件进行计算,噪声采用经验公式进行评估。

电机原有噪声级为 L_{w0} ,其风阻为 Z_0 ,风量为 Q_0 ,现设新的风量为 Q ,风阻为 Z ,则噪声级 L_w 应为

$$L_w = L_{w0} + 50\lg \frac{Q}{Q_0} + 20\lg \frac{Z}{Z_0} \quad (3)$$

基于流量和风阻预测优化后电机在最高使用转速 4 700 rpm 时的气动噪声,相比于优化前可以降低 3 dB,预测结果如表 4 所示。

表 4 噪声预测

Tab. 4 Noise prediction		
参数名称	参考电机	预测电机
转速/(r min ⁻¹)	4 700	4 700
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0.627	0.577
风阻/(kg·m ⁻⁷)	5 450	4 950
声功率级/dB(A)	112.5(试验值)	109.5(预测值)

5 试验验证

为了验证降噪效果,采用自由停机测量不同转速下的噪声。优化前后声学时频图如 8 所示,进风测点的噪声频谱如图 9 所示。声学时频图阶次噪声主要体现在 17 阶和 52 阶,17 阶为风扇噪声,52 阶为转子导条端部与定子绕组干扰引起的噪声。相比总噪声,52 阶噪声贡献率较低。优化后低频 260 Hz 和 17 阶的风扇旋转噪声显著降低。

表 5 为 4 000 rpm 以上高转速段优化前后噪声对比。由对比结果可知,优化后电机最高运行

转速点 4 700 rpm 的噪声功率为 109.1 dB,与预测值相差 0.4 dB,相对误差 0.37%,误差在工程允许范围内。说明基于稳态下的流动参数与相同形式的电机噪声试验值相差不大,采用类比法预测评估噪声的方法在工程上可行。在 4 000 rpm~4 700 rpm 高转速段,相比优化前,优化后噪声降低了 3.6 dB~4.4 dB,降噪效果明显,电机性能显著提升。

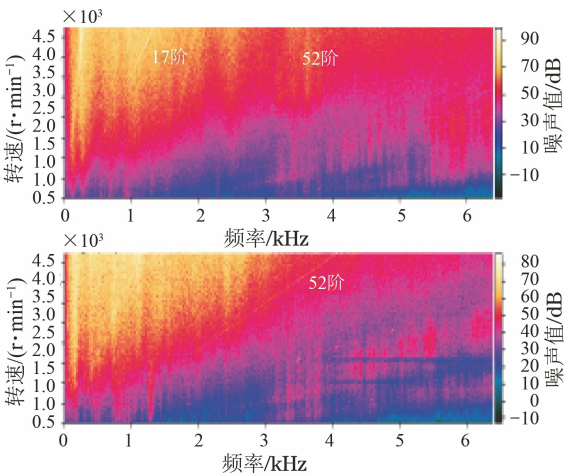


图 8 优化前后声学时频图对比

Fig. 8 Comparison of acoustic time-frequency maps before and after optimization

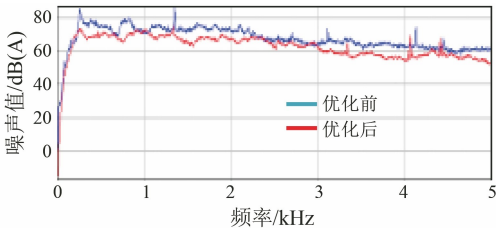


图 9 优化前后进风测点频谱图

Fig. 9 Spectrogram of air inlet measurement points before and after optimization

表 5 噪声试验值对比

Tab. 5 Comparison of noise test values			
转速/(r·min ⁻¹)	声功率级/dB(A)		
	优化前	优化后	降噪效果
4 000	109.2	105.6	-3.6
4 100	109.7	106.1	-3.6
4 200	110.7	106.8	-3.9
4 300	111.5	107.1	-4.4
4 400	111.9	107.8	-4.1
4 500	112.1	108.3	-3.8
4 600	112.4	108.5	-3.9
4 700	112.5	109.1	-3.4

6 结语

基于自通风型牵引电机的气动噪声特征与声学试验分析,确定了旋转风扇与进风结构是主要噪声源,通过优化实现降噪目的。一方面,采用低流阻过滤器、高效能风扇的降噪方案从声源降噪;另一方面,在出风口安装隔声罩,从声传播途径上控制噪声。结合流场与声场特性,采用类比法预测了高转速下优化后电机的气动噪声,预测值与试验值偏差在工程可接受范围内,预测方法对噪声的快速评估有一定的参考价值。同时经试验验证在高转速范围内,降噪措施有效,降噪效果明显。

参考文献

- [1] 蔡勤磊, 鲍晓华, 胡薇. 基于混合谐波注入的潜水感应电机电磁噪声削弱[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 39-40.
CAI Q L, BAO X H, HU W. Electromagnetic noise reduction of submersible induction machine based on hybrid harmonic injection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 39-40.
- [2] 刘方韬, 张成新, 庞悦. 永磁同步电机噪声抑制方法综述[J]. 微特电机, 2024, 52(3): 78-80.
LIU F T, ZHANG C X, PANG Y. A review on electromagnetic noise suppression method for permanent magnet synchronous motors [J]. Small and Special Electrical Machines, 2024, 52(3): 78-80.
- [3] 赵哲, 林浩然, 熊端锋, 等. 气隙偏心对车用永磁同步电机噪声特性的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 33-36.
ZHAO Z, LIN H R, XIONG D F, et al. Analysis of the influence of air gap eccentricity on the noise characteristics of permanent magnet synchronous motors for vehicles [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 33-36.
- [4] 丁杰. 不等距叶轮的永磁电机噪声测试及特性分析[J]. 微电机, 2022, 55(7): 31-35.
DING J. Noise test and characteristic analysis of permanent magnet motor with unequal impeller [J]. Micromotors, 2022, 55(7): 31-35.
- [5] 李伟业, 郝玉涛, 陈瑞峰, 等. 牵引电机气动噪声仿真与试验验证[J]. 微电机, 2022, 55(1): 31-33.

- LI W Y, HAO Y T, CHEN R F, et al. Simulation and experimental verification of aerodynamic noise of traction motor [J]. Micromotors, 2022, 55(1): 31-33.
- [6] 张伟, 康伟, 庞聪, 等. 自通风牵引电机离心风扇气动噪声的快速预测[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 174-177.
ZHANG W, KANG W, PANG C, et al. Fast prediction of aerodynamic noise of a centrifugal fan with self-ventilated traction motor [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(6): 174-177.
- [7] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
MA D Y. Fundamentals of Modern Acoustics [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [8] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
MA D Y. Noise and Vibration Control Engineering Manuals [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [9] 杨荣江, 戴志立, 吴林泉, 等. 风冷低噪大功率永磁同步电机设计与仿真[J]. 微特电机, 2022, 50(10): 15-23.
YANG Y J, DAI Z L, WU L Q, et al. Design and simulation of air-cooled low noise high-power permanent magnet synchronous motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(10): 15-23.
- [10] 陈致初, 吴江权, 陈瑞峰, 等. 城轨牵引电机气动噪声模拟及机理研究[J]. 电机技术, 2020, 3: 8-13.
CHEN Z C, WU J Q, CHEN R F, et al. Aerodynamic noise simulation and mechanical analysis on traction motors used in urban transit [J]. Electrical Machinery Technology, 2020, 3: 8-13.
- [11] SORGUVEN E, DOGAN Y. Acoustic optimization for centrifugal fans [J]. Noise Control Engineering Journal, 2012, 60(4): 379-391.
- [12] 朱宇龙, 尹爱平, 李振鹏, 等. 某型永磁牵引电机噪声试验分析与仿真优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(1): 17-20.
ZHU Y L, YIN A P, LI Z P, et al. Noise test analysis and simulation optimization of a permanent magnet traction motor [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(1): 17-20.
- [13] JEON W H. A numerical study on the effects of design parameters on the performance and noise of a centrifugal fan [J]. Journal of Sound and Vibration,

- 2003, 265: 221-230.
- [14] 李奎, 罗英露, 彭俊. 地铁永磁牵引电机冷却风扇性能与气动噪声研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 13-19.
LI K, LUO Y L, PENG J. Research on cooling fans performance and aerodynamic noise of metro permanent magnet traction motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 13-19.
- [15] 刘军, 苏醒, 马家义, 等. 发动机进风噪声气动声源特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(1): 1-6.
LIU J, SU X, MA J Y, et al. Analysis of aerodynamic sound source characteristics of engine intake noise [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(1): 1-6.
- [16] 闫莹, 肖友洪, 卢华兵, 等. 基于有限元法离心风机气动噪声预报研究[J]. 流体机械, 2022, 50(11): 61-68.
YAN Y, XIAO Y H, LU H B, et al. Research on aerodynamic noise prediction of centrifugal fan based on finite element method [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(11): 61-68.
- [17] 王文庆, 朱一乔, 惠新伟, 等. 地铁牵引电机气动噪声仿真关键因素研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 61-67.
WANG W Q, ZHU Y Q, HUI X W, et al. Research on key factors of aerodynamic noise simulation of metro traction motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 61-67.
- [18] SABIN S, AYDIN U, BELAHCEEN A. Acoustic noise computation of electrical motors using the boundary element method [J]. Energies, 2020, 13(1): 245.
- [19] SUN Y, QIU Y, LIU L, et al. Three-dimensional acoustic analysis of a rectangular duct with gradient cross-sections in high-speed trains: A theoretical derivation [J]. Applied Sciences. 2022, 12(11): 5307.
- [20] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
CHEN Y X, ZHU Z Q, YING S C. Analysis and Control of Motor Noises [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987.
- [21] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG F J. Computational Fluid Dynamic Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
-
- 收稿日期: 2024-05-16
收到修改稿日期: 2024-06-25
作者简介:
黄鹏程(1981-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 研究方向为电机设计, 011600001459@crrecg.cc;
* 通信作者: 马吉恩(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向为多物理场耦合分析, majien@zju.edu.cn.

Characteristic Analysis and Control Study of Aerodynamic Noise in Self-Ventilated Traction Motors

HUANG Pengcheng^{1,2}, MA Ji'en^{1,3*}, ZHENG Guoli², FANG Youtong^{1,3}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

3. State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Hangzhou 310027, China)

Key words: traction motor; aerodynamic noise; ventilation design; noise reduction

As a primary power component of rail vehicles, the noise from traction motors is a major source of overall rail vehicle noise and one of the key indicators of motor performance. Effectively reducing motor noise has become a critical challenge in the development and design of traction motors.

This paper focused on the aerodynamic noise characteristics of self-ventilated traction motors, including the physical measurement of noise, identification and classification of aerodynamic noise. Through no-load noise experiments, the noise components of the prototype machine were analyzed, and the main noise sources were identified. Based on CFD theory, the steady flow field of the entire motor was calculated to obtain system air resistance, velocity distribution, and other parameters. These parameters were used to predict and evaluate the motor's aerodynamic noise based on flow characteristics. Noise reduction was achieved by optimizing the air inlet and outlet structures and the power fan design to reduce noise at the source. Additionally, an acoustic enclosure was employed to control noise along the transmission path. The test results, shown in Tab. 1, indicated that at high rotational speeds of 4 000 rpm ~ 4 700 rpm, aerodynamic noise was reduced by 3.6 dB ~ 4.4 dB through the use of optimized ventilation design and acoustic measures, significantly improving motor performance.

Based on the analysis of aerodynamic noise characteristics and acoustic tests of self-ventilated traction motors, the study identified the rotating fan and air inlet structure as the main noise sources, achieving noise reduction through optimization. On one hand, the adoption of low-resistance filters and high-efficiency fans reduced noise at the source. On the other hand, the installation of acoustic enclosure at the outlet controlled noise transmission. By combining flow field and sound field characteristics, an analogous method was used to predict the motor's aerodynamic noise at high rotational speeds. The predicted values were within the acceptable engineering range compared to the test values, demonstrating that this prediction method offered reference value for rapid noise assessment. The test results further confirmed that noise reduction measures were effective at high rotational speeds, with significant noise reduction achieved.

Tab. 1 Comparison of noise test values

Rotational speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Sound power level/dB(A)		
	Before optimization	After optimization	Noise reduction effect
4 000	109.2	105.6	-3.6
4 100	109.7	106.1	-3.6
4 200	110.7	106.8	-3.9
4 300	111.5	107.1	-4.4
4 400	111.9	107.8	-4.1
4 500	112.1	108.3	-3.8
4 600	112.4	108.5	-3.9
4 700	112.5	109.1	-3.4