

地铁永磁牵引电机冷却风扇性能与气动噪声研究^{*}

李 奎, 罗英露, 彭 俊

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 根据自扇风冷型地铁永磁牵引电机对冷却效果和气动噪声抑制的平衡设计要求, 对分别采用两款冷却风扇的某一地铁永磁牵引电机的冷却效果和气动噪声进行数值分析和试验研究。两款风扇的主要差别在风扇外径, 风扇 B 的外径比风扇 A 小约 23%。研究结果表明, 与风扇 A 相比, 风扇 B 在电机风道内引起的风量、静压和消耗功率分别降低 29%、47.4% 和 53%。在电机额定运行工况下, 流量降低使电机温升增加约 9 K, 其满足电机温升设计要求, 而相应的气动噪声降低 3.3 dB(A), 具有良好的降噪效果。

关键词: 永磁电机; 冷却风扇; 气动噪声; 温度场; 噪声特性

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)02-0013-07

doi: 10.12177/emca.2022.169

Research on Cooling Fans Performance and Aerodynamic Noise of Metro Permanent Magnet Traction Motor^{*}

LI Kui, LUO Yinglu, PENG Jun

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: According to the balance design requirements of self-fan air-cooling metro permanent magnet traction motor for cooling effect and aerodynamic noise suppression, the cooling effect and aerodynamic noise of a metro permanent magnet traction motor with two cooling fans are numerically analyzed and experimentally studied. The main difference between the two fans is the outer diameter of the fan. The outer diameter of fan B is about 23% smaller than that of fan A. The research results show that compared with fan A, the ventilation quantity, static pressure and power consumption caused by fan B in the motor air duct are reduced by 29%, 47.4% and 53% respectively. Under the rated operating condition of the motor, the temperature rise of the motor caused by the flow reduction increases by about 9 K, which meets the design requirements of the motor temperature rise, and the corresponding aerodynamic noise is reduced by 3.3 dB(A), which has a good noise reduction effect.

Key words: permanent magnet motor; cooling fans; aerodynamic noise; temperature field; noise characteristics

0 引 言

随着国家“双碳”战略目标的实施, 永磁同步电机因其高效节能的特点在轨道交通领域获得了广泛的应用^[1-2]。为防止铁屑等异物侵入电机, 破坏永磁体, 地铁永磁牵引电机普遍采用全封闭结构, 具有转矩密度高、转速低、铜耗大、铁耗相对

较小和损耗主要集中在定子上的特点, 其普遍采用自带同轴风扇和外气道的自扇冷却形式。

自扇风冷型永磁牵引电机的结构如图 1 所示。离心风扇与电机转子设置为同轴, 由电机转子带动其旋转。随着风扇的旋转, 外部空气依次经过电机进风孔板、叶片区域、定子通风道, 由通风道出口排出。已知电机的散热过程与气动噪声

收稿日期: 2022-09-02; 收到修改稿日期: 2022-12-06

^{*} 基金项目: 湖南省创新型省份建设专项科研项目(2022GK2062)

作者简介: 李 奎(1983—)男, 博士, 高级工程师, 研究方向为牵引电机热管理技术研究。

的产生和辐射过程相伴而生,优秀的设计应在电机冷却和气动噪声控制上取得平衡。

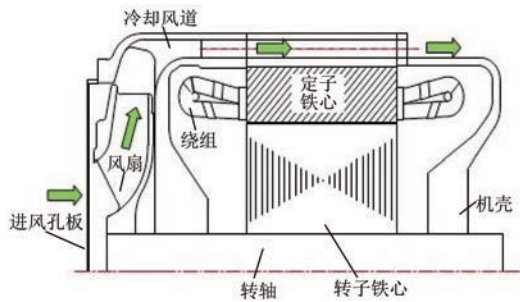


图1 自扇风冷型永磁牵引电机结构

国内外针对自扇风冷型永磁牵引电机的风冷性能和气动噪声的研究主要基于数值仿真和试验研究。由于样机价格较贵,数值分析在设计阶段起到非常重要的作用。文献[3]建立了异步牵引电机的3D模型,基于CFX气动噪声计算模块分析风冷结构的气动噪声。文献[4]研究了一种全封闭结构自扇风冷型异步电机,并对电机的温升和噪声进行仿真分析和研究,对采用不等距叶片风扇的降噪效果进行分析。文献[5]基于格子玻尔兹曼方法研究了7种不同结构方案下自扇风冷型异步电机的流动性能和气动噪声,并采用无量纲的评估参数进行量化对比,揭示了叶片数、叶型、切角、通风孔倒角等因素的影响效果。文献[6]对牵引电机气动噪声的流场和声场进行了联合仿真,对气动噪声的分布、产生机理和频谱特征进行分析,并通过试验进行验证。

目前对地铁永磁牵引电机冷却风扇性能和气动噪声平衡设计相关的研究工作还比较少。本文以地铁永磁牵引电机作为研究载体,建立分析模型,对采用两种冷却风扇后的电机冷却流动性能和气动噪声性能进行对比分析,并通过样机试验进行验证。

1 冷却风扇方案

在外径和转速变化不大时,离心风扇流量 Q 和风压 P 近似满足相似性原理,具有如下的规律:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{2}$$

式中: N_1 和 N_2 分别为两个相似风扇的转速; D_1 和 D_2 分别为两个相似风扇的外径。

声压级变化值 ΔL_p 具有如下经验关系^[7]:

$$\Delta L_p = 10 \lg \frac{Q_2}{Q_1} + 20 \frac{P_2}{P_1} \tag{3}$$

由上述原理可知,减小风扇外径,离心风扇的流量、风压均降低。噪声声压级随流量及风压降低而降低,因此在满足散热要求的条件下,外径更小的风扇具有更低的噪声。

其他可以调节流量和气动噪声的主要因素包括叶型、叶片数、叶片夹角、叶片布置等。其中牵引电机因为要正反转,其基本风扇叶型须为径向直叶片,而不能采用其他具有更优异气动性能的叶型,如前掠型叶片。在叶片数小于5时,风量随叶片数的增多而急剧增大;而当叶片数大于5时,风量随叶片数增大的增幅逐渐减小,而噪声随叶片数的增加几乎呈线性增加。扇叶的布置主要是指是否采用不对称、不等距扇叶分布,例如采用扇叶不等距布置降低叶片通过的频率噪声。

图2(a)为已用于地铁永磁牵引电机的一款风扇A,图2(b)为缩小风扇外径的另一款风扇B。两款风扇的主要设计参数如表1所示。

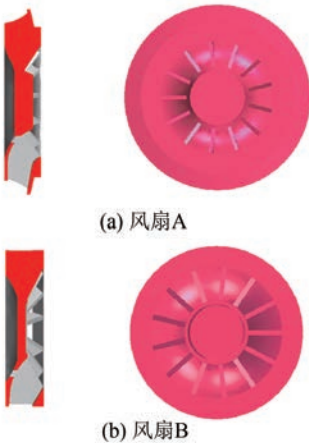


图2 两款牵引电机冷却风扇

表1 风扇主要设计参数

参数名称	风扇 A	风扇 B
风扇外径/mm	375	290
轮毂直径/mm	110	100
叶片数	13	13
叶片布置	等距	等距
叶片形状	等厚	等厚
叶片材料	铝合金	铝合金

2 流动仿真分析

基于 NS 方程^[8],即流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,分别对两款风扇流场进行分析。流体计算域分为入口域、旋转域、气道区域和出口域,如图 3 所示。基于有限容积法对风扇流动性进行稳态流场分析,采用二阶迎风格式对其对流项进行离散,采用 SIMPLE 算法对所得离散代数方程组进行计算^[9]。

地铁永磁牵引电机的额定转速是根据使用城市确定的技术速度、动轮直径、齿轮箱的传动比来确定的。国内城市地铁电机额定转速通常为 1 800、1 900、2 000 r/min 等。本文所研究的地铁永磁牵引电机额定转速为 1 900 r/min,后续分析基于该额定转速展开。

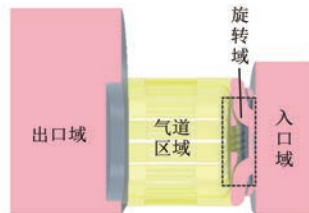


图 3 流体计算域

两款风扇计算域内风速场分别如图 4(a)和 4(b)所示。由内流场速度分布图可知,高风速分布在风扇区域和冷却管道内,这里也是流线紊乱分离最为严重的区域。由于柯恩达效应的影响,在出口域出口流体向壁面方向偏转。

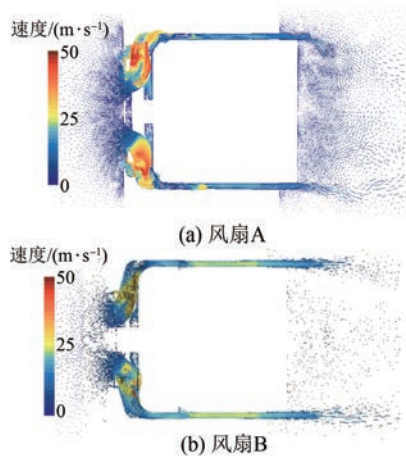


图 4 计算域内流线(速度场着色)

计算得到的冷却风质量流量、风扇出口静压、轴功率和风扇动压效率如表 2 所示。其中风扇全

压效率计算公式如下:

$$\eta = \frac{P_v \times Q_v}{M \times \omega} \tag{4}$$

式中: P_v 为风扇出口全压; Q_v 为体积流量; M 为风扇扭矩; ω 为风扇转速。

表 2 风扇性能参数(1 900 r/min)

参数名称	风扇 A	风扇 B
质量流量/(kg·s ⁻¹)	0.45	0.32
静压/Pa	336	178
动压/Pa	297.0	154.7
全压/Pa	633.0	332.7
轴功率/W	497	233
风扇全压效率/%	46.0	35.5

由计算可知,相同转速下风扇 B 的全压和流量分别是风扇 A 的 52.6% 和 71%,以风扇 B 替代风扇 A 后,流动性能将下降。

3 冷却性能对比分析

3.1 地铁永磁牵引电机

以一款 72 槽 8 极 48 通风孔 190 kW 的地铁永磁牵引电机为研究对象,该电机有效铁心长度为 250 mm,定子铁心内径为 310 mm,外径为 480 mm。通过电磁分析得到 1 900 r/min 时电机的各部分损耗如表 3 所示。电机损耗作为热源用于电机温度场仿真。

表 3 电机各部分损耗

参数名称	参数值/W
定子铜损	3 400
定子铁损	1 593
杂散损耗	907

3.2 热仿真建模

根据工程经验,地铁永磁牵引电机转子温度通常略高于定子铁心温度且低于端部绕组温度,因此可以不对转子部分进行细致建模而使用推测温度。

基本假设如下:

(1) 相对于定子损耗,永磁电机转子损耗很小,因此忽略转子涡流损耗和摩擦损耗对定子温升的影响;

(2) 将槽内绕组中的导体等效成长方体,将绝缘材料和浸渍材料等效成均质薄层分布在槽内导体外围;

(3) 电机稳定运行时,冷却风流动处于稳定状态,选择定常模型;

(4) 冷却风速远低于声速,因此将冷却流体视为不可压缩流体;

(5) 忽略辐射传热,将机壳与外界环境假设为对流换热,其对流换热系数与电机表面温度、周围流体相关。

机壳与外界环境之间的散热系数指定为机壳温度的函数^[10]:

$$\alpha = 14(1 + 0.5\sqrt{v})^3 \sqrt{\frac{t_{sur}}{25}}$$

(5)

式中: v 为电机表面风速,计算时电机表面风速取值为 0; t_{sur} 为机壳温度。

转子转动引起的内部流动,加速了端部绕组与机壳之间的换热。定子端部绕组换热系数按照经验公式计算^[11]:

$$h_{et} = \frac{Nu_t \lambda_{air}}{r_1 + r_2}$$

(6)

$$Nu_t = 0.456 Re_t^{0.6}$$

(7)

$$Re_t = \frac{r_1 + r_2}{\nu_a} \cdot \frac{2\pi r_3 n}{60}$$

(8)

式中: Nu_t 为端部绕组区域努塞尔数; Re_t 为端部绕组区域雷诺数; r_1 为定子外半径; r_2 为定子内半径; r_3 为转子半径; λ_{air} 为空气导热系数; ν_a 为空气运动黏度。

将端部空气视为静止域,取较大的导热系数,使空气域接近等温体,采用界面热阻等效对流换热效果,单位面积界面热阻表达式为

$$R_{et} = \frac{1}{h_{et}}$$

(9)

3.3 热仿真结果

外冷却气道进风温度为 40 ℃,依据表 2 和表 3 分别设置进风质量流量和损耗数据,机壳表面换热系数和端部绕组等效导热热阻按照 3.2 节公式计算并代入热仿真模型。采用两种风扇后,电机定子温升分布如图 5 所示。为了便于对比分析,统计电机铁心平均温升、线圈平均温升和线圈最高温度,结果如表 4 所示。地铁永磁牵引电机设计允许最高温度为 200 ℃,短期运行允许最高

温度为 220 ℃。因此,采用风扇 A 温度余量为 39 K,采用风扇 B 温度余量为 28 K,采用风扇 B 后电机温度余量有所降低但仍满足要求。

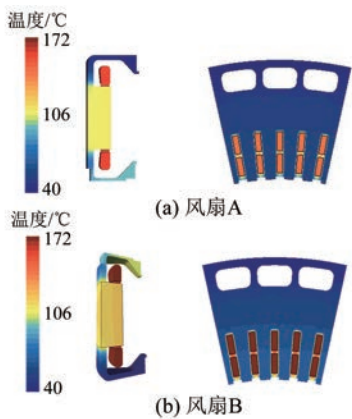


图 5 电机定子温度场分布

表 4 电机温升计算结果

参数名称	风扇 A	风扇 B
铁心平均温升/K	83	95
线圈平均温升/K	115	127
线圈最高温度/℃	161	172

4 气动噪声对比分析

4.1 气动噪声仿真建模

声场的本质是非定常的压力脉动,理论上可以通过直接求解非定常的可压缩流场获得声源和噪声在流场中的传播规律。但相对于流体压力场,声场压力是其中占比极小的一部分,一般 CFD 计算的误差也可能大于声压,而采用直接求解法解决工程噪声问题计算代价极高。

在商业 CFD 计算软件中通常采用间接方法进行声场求解,即基于 Lighthill 的声比拟方法或者 FW-H 方法求解近场和远场噪声。首先使用非稳态的雷诺平均方程,例如 DES 和 LES 方程,求解近场流场,将瞬态压力场计算结果作为噪声源,代入波动方程求解声场^[12]。声类比方法在 1 000 Hz 低频段具有较高的精度,在 2 000 Hz 以上精度较低。

本文采用 STARCCM 与气动噪声 FW-H 模型对两款风扇的气动噪声进行对比分析,研究二者的声学性能差异。

4.2 气动噪声仿真结果

从声产生机理来说,电机冷却风道的气动噪

声主要由扇叶旋转产生的压力周期波动和湍流中涡的产生、破碎和分离导致。其中前者为偶极子面声源,而后者为四极子体声源。

采用 Q 准则涡识别方法 (Q-Criterion), 取值为 $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, 重点捕捉叶轮附近的涡, 得到两款风扇涡云图如图 6 所示。

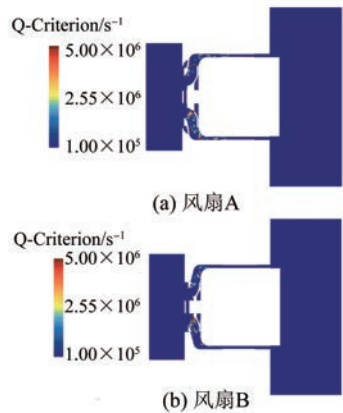


图 6 Q-Criterion = $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 时的涡云图

从图 6 中可以看出 $Q\text{-Criterion} = 1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 时, 主要涡脱落区为叶轮进出口、中部管道进出口, 以上二者为主要声产生区域。

风扇表面的偶极子面声源声压级分布如图 7 所示, 流体域内涡导致的四极子体声源如图 8 所示。由于风扇尺寸的缩小, 叶轮表面产生的声压级由 110 dB(A) 降低到 104 dB(A); 而流道内的涡流声压级由 95.9 dB(A) 降低到 83.8 dB(A)。两款风扇面声源声压级均显著高于体声源, 表明扇叶表面的压力波动是主要噪声源。

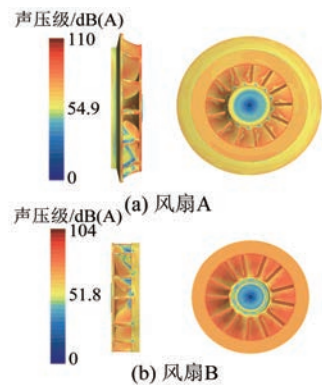


图 7 风扇表面偶极子面声源声压级分布

基于 GB/T2888—2008 方法设置检测点求取平均声压级。共 4 个水平监测点 $H1 \sim H4$, 1 个垂

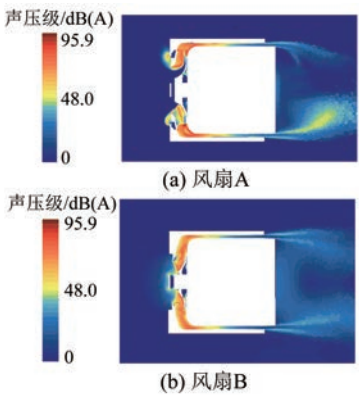


图 8 流体域内四极子体声源声压级分布

直监测点 V , 与电机本体相距 1 m 布置, 如图 9 所示。

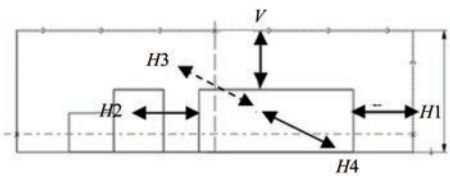


图 9 声压级监测点

统计 5 个噪声监测点的平均声压级, 并根据下式进行加权平均:

$$\overline{L_p} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \left(\sum 10^{0.1 L_{pi}} \right) \right] \quad (10)$$

式中: L_{pi} 为单个测点处的声压级。

两款风扇平均声压级计算结果如表 5 所示。

表 5 监测点声压级计算结果			dB(A)
监测点	风扇 A	风扇 B	
$H1$	81.6	78.4	
$H2$	78.9	75.8	
$H3$	79.9	76.8	
$H4$	80.5	77.3	
V	78.5	75.4	
平均声压级	80.0	76.8	

由表 5 可知, 风扇 B 的气动噪声比风扇 A 低 3.2 dB(A), 风扇 B 平均声压级更低。

5 试验研究

更换同一永磁牵引电机的进风侧端盖和风扇进行对比试验研究。针对电机的温升和噪声指标进行测试。

5.1 电机温升试验

温升试验台如图 10 所示。在试验电机端部绕组埋置 PT100 温度传感器测试端部绕组温度,在定子铁心开孔埋置 PT100 传感器测试铁心温度,通过电阻法测量定子绕组平均温度。



图 10 电机温升试验台

其中电阻法测温原理依据如下关系式：

θ = ((R2 - R1) / R1) * (K + t1) + t1 - t2 (11)

式中:θ 为绕组平均温升;K 为常数,对于铜导线有 K=234.5;R1 为环境温度下绕组电阻;R2 为绕组稳态运行后停机半分钟内测出的绕组电阻;t1 为环境温度;t2 为试验完毕时的电机环境温度。

电机温升如图 11 所示。环境温度约为 36 ℃,将稳态温度减去环境温度得到温升数据,结果如表 6 所示。与仿真相比,线圈的平均温升不大于 5 K。端部测量点的最高温度比仿真计算的值略低,这是由于传感器位置在线圈表面。试验结果表明采用风扇 B 的绕组温升比采用风扇 A 高 9 K,采用风扇 B 后电机温度余量有所降低但仍满足要求。

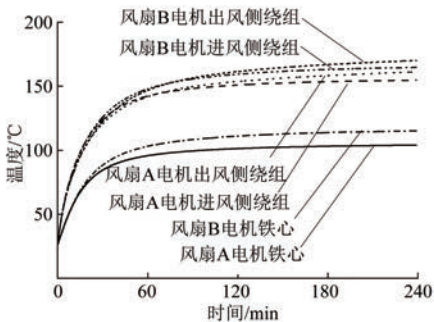


图 11 电机稳态温升曲线

5.2 电机噪声试验

基于 GB/T2888—2008 方法进行气动噪声测量,气动噪声试验在株洲所电机中试基地半消音室进行,测试截止频率为 100 Hz,背景噪声为

20 dB,电机噪声测试试验台如图 12 所示。

表 6 电机温升试验结果 K

测试项目	风扇 A	风扇 B
绕组平均温升	111	122
绕组测点温升	126	135
铁心测点温升	64	75

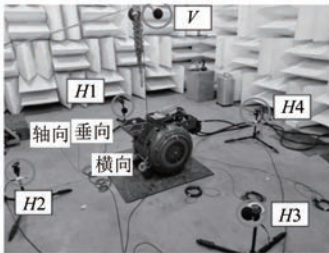


图 12 电机噪声测试台

图 13 为采用两款风扇后,不同转速下的各个监测点的 A 计权声压级随转速变化的曲线。可以看出噪声水平随转速快速增加。对于采用风扇 A 的电机,在 200~1 000 r/min 时,平均噪声在 59~72 dB(A)量级;在 1 100~2 000 r/min 时,平均噪声在 75~86 dB(A)量级;而对于采用风扇 B 的电机,在 200~1 000 r/min 时,平均噪声在 53~68 dB(A)量级,在 1 100~2 000 r/min 时,平均噪声在 74~82 dB(A)量级。在 1 000 r/min 以下时,噪声随转速增加出现波动,在 2 000 r/min 以上时,电机侧面监测点 H4 和监测点 H2 噪声最高,顶部监测点 V 和进风口监测点 H3 噪声相等,出风口监测点 H1 噪声最小,这与噪声指向性有关。

表 7 为平均声压级的试验结果,对比表 5 和表 7 可知,相比于试验结果,仿真计算结果精度偏低。这是由于 CFD 软件一般只能达到二阶精度,且为了保证计算的稳定性需添加的人工耗散项和数值计算误差本身,会对近场声源数据造成误差。研究表明,通过 STARCCM 计算的声场数据在 1 000 Hz 以下的低频段精度较高,而在高频段精度偏低。但计算结果很好地预测了两款风扇的相对噪声指标,因此可以将其作为方案筛选的依据。

表 7 平均声压级试验结果

测试项目	风扇 A	风扇 B
平均声压级/dB(A)	84.5	81.2

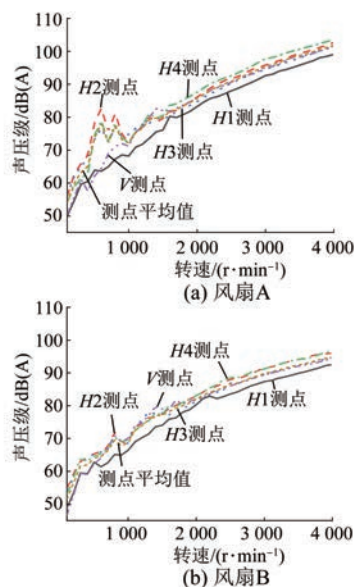


图 13 各个监测点声压级随转速的变化曲线

6 结 语

通过对两款地铁永磁牵引电机自扇风冷的电机风扇及冷却通道进行数值分析和试验研究得到如下结论。

(1) 风扇外径减小 23%, 风冷流量大约降低 28.9%, 气道内平均流速由 21.6 m/s 降低到 15.4 m/s, 对流换热系数有所降低, 相同电机同等功率及转速下, 电机温升升高约 9 K, 但仍在可接受范围内。

(2) 叶轮出口区和冷却风道是涡集中区, 风扇外径减小使该区域涡强度减弱, 从而降低了气动噪声, 本文中风扇外径减小使气动噪声由 84.5 dB(A) 降低到 81.2 dB(A), 降低了 3.3 dB(A), 具有明显的降噪效果。

(3) 通过优化电机的冷却效果降低了通风流量。采用更小尺寸的风扇是降低电机气动噪声的有效手段。

【参考文献】

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J]. 机车电传动, 2018(6): 9.
- [2] 朱高嘉, 朱英浩, 朱建国, 等. 基于有限公式法和流固耦合的永磁牵引电动机冷却系统设计与分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 70.
- [3] 屈晓云, 田杰, 王彤. 牵引电机冷却风扇气动性能和气动噪声数值与试验研究(英文)[J]. 风机技术, 2019, 61(3): 53.
- [4] MIZUNO S, NODA S, MATSUSHITA M, et al. Development of a totally enclosed fan-cooled traction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1508.
- [5] KIM J H, KIM H C, BYUN S J. Improving the design of the traction motor of trains to reduce the aerodynamic noise[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 234(1): 3.
- [6] 陈致初, 吴江权, 陈瑞锋, 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.
- [7] 苏晓芳, 杨林强, 陈圆明, 等. 发动机冷却风扇的降噪研究与优化[J]. 汽车技术, 2011(9): 24.
- [8] 傅德薰. 流体力学数值模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [9] 曹君慈, 闫华, 李栋, 等. 不同通风结构下高铁异步牵引电机温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 72.
- [10] 张河山, 徐进, 邓兆祥, 等. 多物理域耦合求解的轮毂电机温度场[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 76.
- [11] 张江鹏. 高空飞行器用高效率高功率密度永磁同步电机研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] 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[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 56.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部