

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

郑国丽,申政,崔可,何维林.
自扇冷式牵引电机风扇性能优化.
电机与控制应用,2021,48(8):63.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

自扇冷式牵引电机风扇性能优化

郑国丽, 申 政, 崔 可, 何维林
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 以某自扇冷式牵引电机为例, 采用计算流体力学的方法分析了通风系统的风阻、风量、流速、风扇机械损耗以及气动噪声, 并进行了试验验证。结果表明, 提高风扇内气流的均匀性和稳定性, 减少风扇涡流, 可以明显改善风扇性能、降低风扇损耗, 明显降低电机气动噪声, 显著提高电机效率, 提高电机的性能。采用的计算分析方法和所得结论对风扇性能改进具有一定的参考意义。

关键词: 牵引电机; 自扇冷; 风扇优化; 气动噪声

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)08-0063-04

doi: 10.12177/emca.2021.069

Performance Optimization of Self-Fan-Cooling Traction Motor Fan

ZHENG Guoli, SHEN Zheng, CUI Ke, HE Weilin
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Taking a self-fan-cooling traction motor as an example, the wind resistance, air volume, flow rate, mechanical loss and aerodynamic noise of the motor ventilation system are analyzed by using computational fluid dynamics (CFD) method, and the experimental verification is carried out. The results show that improving the uniformity and stability of the air flow in the fan and reducing the fan vortex can significantly improve the fan performance and reduce the fan loss. After optimization, the aerodynamic noise of the motor is obviously reduced and the efficiency of the motor is significantly improved, improving the performance of the motor. The calculation and analysis method and the conclusion have certain reference significance for the improvement of motor fan performance.

Key words: traction motor; self-fan-cooling; fan optimization; aerodynamic noise

0 引 言

自扇冷式牵引电机不需要额外的动力装置, 将定子、转子所处的内部空间作为封闭结构, 使用电机直驱的外部风扇提供冷却介质对电机进行冷却。电机内部全封闭可避免外界环境(包括灰尘、空气中的污染物以及雨水等)的影响, 降低电机维护频率和维护成本。该冷却方式常用于对防护等级要求较高的永磁电机^[1-3]。全封闭自扇冷式牵引电机风扇性能直接影响电机的冷却效果、噪声以及效率等技术指标。因此, 风扇性能优化设计对提升此类电机的性能尤为关键。

国内外很多学者对风扇的流动特性和气动噪

声进行了较为全面和深入的研究。Ramakrishna等^[4]采用数值模拟与试验方法分别研究了前向、径向与后向叶轮的性能与噪声。汤黎明^[5]对工程机械冷却风扇的流动特性与气动噪声进行了研究, 结果表明针对风扇装置整体进行结构改动有较好的降噪效果。Sorguven等^[6]采用神经网络方法, 以在满足额定压升的条件下风扇噪声最小为目标, 对风扇叶片进行了优化, 并通过试验验证了优化的有效性。周洪发^[7]通过对系列电机风扇特性的分析, 设计了超高效率三相异步电动机专用风扇。朱传敏等^[8]基于计算流体力学(CFD)方法, 对风扇进行了流场分析, 研究了风扇结构对风扇性能的影响。综观上述研究可知, 风扇优化可

收稿日期: 2021-05-20; 收到修改稿日期: 2021-07-02

作者简介: 郑国丽(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机冷却设计。

提高电机效率、降低电机噪声。

本文以某自扇冷式牵引电机风扇为例,对风扇的风量、效率以及气动噪声等性能参数进行分析,通过改进风扇结构提高风扇性能,为风扇的优化设计提供理论参考。

1 优化前风扇参数

全封闭自扇冷式牵引电机风扇的设计需求包括:提供电机冷却所需的风量;通风损耗小,效率高;气动噪声低;成本低,工艺性好。

在电机冷却系统设计过程中,设计人员倾向于补偿设计中的不确定性,实现方式是增加风扇的容量。为了满足大风量,往往风扇尺寸设计偏大,忽略了通风系统与风扇的优化,风扇不在最佳效率点运行,容易导致风扇噪声大、成本高等。为此,本文以某自扇冷式牵引电机为例,对电机的外流场进行数值模拟,分析电机外风扇的冷却风量、通风损耗、气动噪声等参数。

电机外风路结构如图 1 所示。冷却介质在外风扇的驱动下,流经电机冷却风道对电机进行冷却。

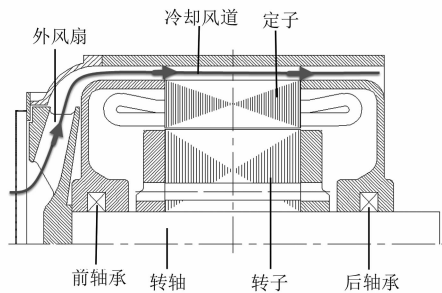


图 1 外风路结构示意图

表 1 列出了优化前风扇结构参数。风扇需要满足双向旋转的要求,因此采用径向离心风扇。表 2 列出了不同转速运行时优化前风扇产生的流量、机械损耗与气动噪声的试验值。由表 2 数据可以得出,随着转速的增加,流量与转速成正比增加,损耗与转速的立方成正比增加,转速越高,噪声值越大。当转速达到 4 000 r/min 时,机械损耗 4 637 W,A 计权声功率级 109.3 dB。高转速下风扇的性能直接影响了电机的效率和噪声水平。因此,本文将通过改进风扇结构来提升高转速下风扇效率,降低风扇产生的气动噪声。

表 1 优化前风扇结构参数

参数名称	参数值
外径/mm	360
内径平均值/mm	190
风扇前盘倾斜角/(°)	18
叶片数	9
叶片出口宽度/mm	35
叶片进口宽度/mm	55

表 2 优化前风扇性能参数

转速/(r·min ⁻¹)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	机械损耗/W	A 计权声功率级/dB
2 000	0.40	576	91.8
3 000	0.60	1 956	100.9
4 000	0.80	4 637	109.3

2 优化前风扇流场分析

风扇选型要兼顾流量、气流速度、压力、气流特性和系统布局等,系统的阻力特性是风扇选型的关键^[9-10]。冷却介质通过冷却系统时,压力损失包括沿程损失和局部损失。为了分析外风路通风系统的阻力,本文基于计算流体力学原理,对电机外流场进行数值模拟,分析外风扇流道的压力损失与速度流线。

图 2 为优化前风扇叶片间流体域的压力分布,图 3 为优化前风扇叶片间流体域的截面流线图。通过计算结果可以得出,优化前风扇采用锥形前盘,气流进入叶片急剧转弯后与前盘分离,形成涡流区,增加了通风系统损失。图 4 为优化前风扇速度矢量图。从图 4 可以看出,气流出口面积大,出口平均速度低,受旋转方向影响,高速区集中在叶片一侧,截面速度不均匀程度高。

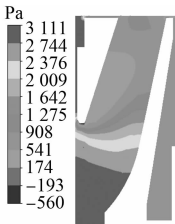


图 2 优化前风扇叶片间流体域的压力分布

3 风扇结构优化

牵引电机的运行特点要求风扇正反转冷却效果一致,因此风扇只能采用径向离心直叶片风扇,

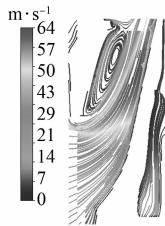


图3 优化前风扇叶片间流体域的截面流线图

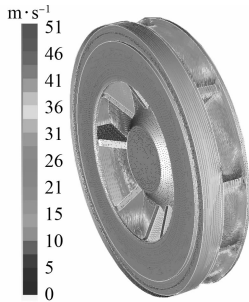


图4 优化前风扇速度矢量图(2 000 r/min)

风扇叶片出口角为 90°。径向离心风扇结构的优化方向有以下 3 个方面。

(1) 风扇叶片内外径与宽度。根据电机所需的冷却风量确定叶片内外径、叶片宽度。

冷却风量可根据风扇的外特性和通风系统的风阻特性采用求解法获得。

对于径向叶片的离心式风扇, 风扇特性曲线可用下列简化式表达^[11]:

$$\frac{P}{P_0} = 1 - \left(\frac{q_v}{q_{vm}} \right)^2 \tag{1}$$

式中: P 为压力; P_0 为离心式风扇在空载运行时所产生的静压力; q_v 为体积流量; q_{vm} 为无外部风阻时经过风扇的最大风量。

通风系统的阻力特性可表示为

$$\Delta P = Zq_v^2 \tag{2}$$

式中: Z 为系统风阻。

(2) 叶片数目。叶片数过少, 流道面积增加, 容易引起气流分离。叶片数过多, 将增加风道的摩擦损失, 这种损失不但会降低风扇的实际压力, 而且会增加能耗。因此, 离心式风扇叶片数目的选择一般考虑叶片间流道的长度和宽度具有适当的比例, 以减少损耗。为了保证风扇有足够的刚度, 在平均直径处叶片之间的距离应小于或等于叶片的高度, 即叶片数:

$$N \geq \frac{\pi(D_1 + D_2)}{D_2 - D_1} \tag{3}$$

式中: N 为叶片数目; D_1 为风扇内径; D_2 为风扇外径。

(3) 叶片形状。从机械损耗角度考虑, 风扇工作时流体和流道壁面发生摩擦、流道几何形状改变使流速变化而产生涡流, 偏离设计工况时产生的冲击等, 是风扇机械损耗的来源。减少回流区, 可以降低涡流产生的摩擦损耗。

从气动噪声考虑, 风扇高速旋转时, 空气质点受到叶片周期力的作用, 产生压力脉动, 就产生了旋转噪声^[12-14]。对于全封闭自扇冷式牵引电机而言, 电机噪声源的主要成分来自外风扇的气动噪声。将通道尽量做成流线形, 避免急剧转向和截面突变, 降低风阻, 是降低气动噪声的一种有效措施。

因此, 为了避免风扇入口出现急变流场, 减少气流的转弯损失, 优化后风扇前盘倾角增大, 风扇后盘的弧线尽量平缓, 空气流通面积逐渐缩小, 空气加速流通, 减少气体分离。

由于靠近叶片前盘的气流速度大于后盘, 为了减少气流的冲击损失, 叶片采用斜切结构。

优化后风扇的结构参数如表 3 所示。优化后风扇结构示意图如图 5 所示。

表3 优化后风扇结构参数

参数名称	参数值
外径/mm	300
内径平均值/mm	160
风扇前盘倾斜角/(°)	30
叶片数	13
叶片出口宽度/mm	40
叶片进口宽度/mm	60

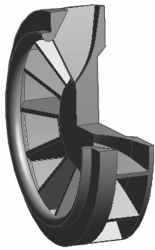


图5 优化后风扇结构示意图

4 优化后风扇性能分析

图 6 为优化后风扇所在旋转域的压力分布,

图 7 为优化后风扇叶片间流体域的截面流线图, 图 8 为优化后风扇速度矢量图。

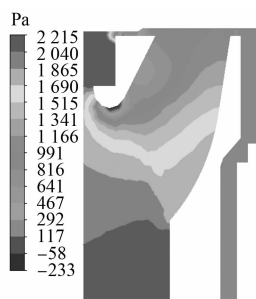


图 6 优化后风扇叶片间流体域的压力分布

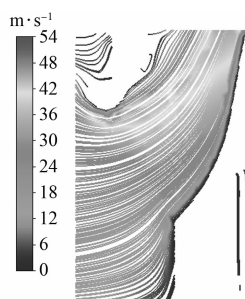


图 7 优化后风扇叶片间流体域的截面流线图

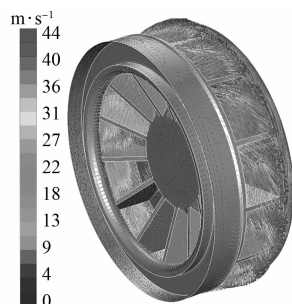


图 8 优化后风扇速度矢量图(2 000 r/min)

风扇优化前后对比, 优化前外风路风阻为 $2\,932\text{ kg/m}^7$, 优化后外风路风阻降低为 $1\,988\text{ kg/m}^7$ 。优化后气流进入叶片平稳过渡, 使流动均匀性升高, 风阻降低。可见为了避免风扇内的二次回流, 风扇进出口的流道应尽可能避免急剧转弯, 否则系统的非均匀流动将导致系统阻力高于预期。优化后叶片数增加, 叶片间高速气流的填充率增加, 速度分布均匀性升高。

表 4 为优化风扇后电机在不同转速下运行时试验测量的风扇性能参数。对比优化前数据, 可见损耗和噪声均明显降低。

表 4 优化后风扇性能参数

转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	机械 损耗/W	A 计权声 功率级/dB
2 000	0.42	425	87.1
3 000	0.63	1 433	96.5
4 000	0.84	3 396	104.2

5 结 语

本文以某自扇冷式牵引电机风扇为研究对象, 基于计算流体力学原理对电机外流场进行分析, 通过风扇结构优化, 风扇性能得以提高。

试验验证表明在 $4\,000\text{ r/min}$ 的高转速运行时, 与优化前相比, 优化后风扇机械损耗降低了 $1\,241\text{ W}$, 产生的气动噪声降低了 5.1 dB 。可见通过风扇的优化不仅可以提高电机的运行效率, 而且能够降低电机的气动噪声。

【参考文献】

- [1] 杨金霞, 李伟业, 邹煜林, 等. 自带风扇冷却的永磁电机热计算方法对比分析[J]. 大功率变流技术, 2016(6): 7.
- [2] 王森, 张豪. 永磁牵引电机在下一代地铁上的应用[J]. 机电工程技术, 2020, 49(4): 174.
- [3] 张道禄, 晏才松. 下一代地铁车辆 TQ-250 永磁同步牵引电机研制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 54.
- [4] RAMAKRISHNA S, KRISHNA V, RAMAKRISHNA A, et al. CFD and CAA analysis of centrifugal fan for noise reduction[J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 86(7): 10.
- [5] 汤黎明. 工程机械冷却风扇流场特性与气动噪声研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] SORGUVEN E, DOGAN Y. Acoustic optimization for centrifugal fans[J]. Noise Control Engineering Journal, 2012, 60(4): 379.
- [7] 周洪发. YE4 系列三相异步电动机专用风扇的研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 83.
- [8] 朱传敏, 吴秀丽. 基于 CFD 的发动机冷却风扇性能仿真分析[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(1): 18.
- [9] 续魁昌. 风机手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 29-37.
- [10] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 231-285.

(下转第 89 页)

- [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 叶满园, 肖云煌, 宋平岗, 等. 基于直流侧电压不平衡的 CHB 多电平逆变器 SHEPWM 控制技术[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(9): 64.
- [8] 吴瑕杰, 熊成林, 冯晓云. 一种适用于单相级联 H 桥型变换器的通用型多电平空间矢量 PWM 算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 127.
- [9] 宋文胜, 冯晓云, 蒋威. 一种单相三电平中点钳位整流器的 SVPWM 控制方法[J]. 电工技术学报, 2007(7): 69.
- [10] 秦春江, 葛宝明, 彭方正. 脉冲编码和旋转的级联中点箝位逆变器脉宽调制控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 34.
- [11] 林城美, 汪光森, 王公宝, 等. 二极管钳位型级联多电平逆变器新型 SPWM 研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 8.
- [12] 林城美, 王公宝, 汪光森, 等. 基于脉冲跳变的空间矢量脉冲宽度调制策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(1): 43.
- [13] 朱俊杰, 原景鑫, 王路, 等. 单相中点钳位型 H 桥级联逆变器电容电压不均建模研究[J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(2): 37.
- [14] 张兴, 邵章平, 王付胜, 等. 三相三电平模块化光伏并网系统的零序环流抑制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 17.
- [15] SHAO Z, ZHANG X, WANG F, et al. Modeling and elimination of zero-sequence circulating currents in parallel three-level T-type grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 1050.
- [16] 王付胜, 邵章平, 张兴, 等. 多机 T 型三电平光伏并网逆变器的环流抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 40.
- [17] 田金戈. UPS 中三相三电平逆变器并联零序环流及其损耗研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [18] 姚修远, 金新民, 杨捷, 等. 三电平逆变器并联系统的零序环流抑制技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增1): 192.
- [19] 邢相洋, 陈阿莲, 张子成, 等. 基于改进型零序环流抑制方法的 T 型三电平并联并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4165.
- [20] 李慧莹, 白乙拉, 李志军. 一类改进的 Logistic 模型参数估计方法及其应用[J]. 数学的实验与认识, 2017, 47(22): 183.

(上接第 66 页)

- [11] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 106-111.
- [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及仿真优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(1): 19.
- [13] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析与控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987: 213-239.
- [14] 申政, 何维林, 王韬, 等. 自通风型电机气动噪声计算方法的研究[J]. 风机技术, 2019, 61(5): 79.

(上接第 80 页)

- [13] 蔡英凤, 李健, 孙晓强, 等. 智能汽车路径跟踪混合控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(3): 289.
- [14] 潘世举, 李华, 苏致远, 等. 基于跟踪误差模型的智能车辆轨迹跟踪方法[J]. 汽车工程, 2019, 41(9): 1021.
- [15] 李健. 智能汽车路径跟踪混合控制方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.