

定子轴向通风孔对永磁同步牵引电机绕组温升的影响

张维伟, 丰帆, 郑国丽, 王国辉, 罗定辉
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了降低牵引电机绕组温升及改进电机外风路的流动效率, 以 1 台机车用永磁同步牵引电机为例, 根据电机实际尺寸, 建立了电机外风路及定子铁心及绕组模型。基于计算流体力学(CFD)原理, 数值模拟了电机外风路流场, 计算出电机外风路在不同定子通风孔下的流动情况, 并对定子铁心及绕组进行流热耦合计算分析, 计算并分析得到了定子通风孔的最佳设计方案, 为该型电机定子通风孔的设计提供了参考。

关键词: 永磁同步牵引电机; 定子轴向通风孔; 绕组温升; 数值模拟

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0051-05

doi: 10.12177/emca.2020.135

Influence of Stator Axial Vents on Temperature Rise of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor Windings

ZHANG Weiwei, FENG Fan, ZHENG Guoli, WANG Guohui, LUO Dinghui
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In order to reduce the temperature rise of the traction motor windings and improve the flow efficiency of the external flow field of the motor, a permanent magnet synchronous traction motor for locomotives is taken as the research example. According to the actual size of the motor, models of the motor's external air flow field, stator core and windings are established. Based on the principle of computational fluid dynamics (CFD), the flow field of the external air path of the motor is numerically simulated, the flow of the external air path of the motor is calculated for different stator vents, and the coupled turbulent flow and temperature fields of the stator core and windings are calculated and analyzed. Through calculation and analysis, the best design scheme of stator vents is obtained, which provides reference for the design of stator vents of this type of motor.

Key words: permanent magnet synchronous traction motor; stator axial vents; temperature rise of windings; numerical simulation

0 引言

随着牵引电机的性能要求日益增长及运行环境越来越复杂, 电机逐渐向高效率、高功率密度方向发展。永磁同步电机(PMSM)具有高功率密度、高效率和低噪声等显著优势, 作为轨道车辆的

动力核心, 可以提升轨道车辆的运输品质。温升高是限制电机发展的重要因素之一, 过高的温度会导致绕组绝缘层被破坏而直接影响电机的安全性和使用寿命^[1]。因此, 对电机通风散热结构进行优化, 使电机维持在较低的温升水平, 从而减小热变形, 提高其绝缘寿命^[2]。良好的通风冷却

收稿日期: 2020-07-10; 收到修改稿日期: 2020-08-26

作者简介: 张维伟(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电机冷却设计。

丰帆(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机冷却设计。

郑国丽(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机冷却设计与气动噪声分析。

系统,还具有风损耗小,噪声低等特点^[3]。因此,对电机流场及温度场计算研究具有重要的意义。

在大功率机车用牵引电机中,对于轴向通风的电机,由于通风散热的需要,会在定子铁心开轴向通风孔,通风孔的开孔个数及大小对电机散热具有很大影响。

目前电机温度场的计算方法主要有:简单路法、等效热网络法^[4]和数值模拟法。

本文以 1 台机车用 PMSM 为例,基于计算流体力学(CFD)原理,计算出电机外风路在不同定子通风孔下的流动情况,并对定子铁心及绕组进行流热固耦合分析,得到了电机绕组及铁心的温度分布情况,从数值仿真的角度研究了定子通风孔结构对电机温度场的影响。

1 计算模型及计算方法

1.1 计算域模型

电机采用全封闭、自通风结构,通风结构如图 1 所示。电机一端装有离心风扇,利用风扇旋转产生的强大风压,驱使电机冷却流体沿定子通风孔流动。由于该型电机内部是全封闭的,只有定子通风孔与外界相通,电机的主要换热面为铁心段的通风孔,定子绕组通过定子铁心导热。为了简化仿真模型,缩短计算周期,只对电机绕组直线段及定子铁心进行流体场与温度场耦合计算,三维计算模型如图 2 所示。计算域主要包括外风扇、上下压圈通风孔、定子通风孔、定子铁心及绕组直线部分。

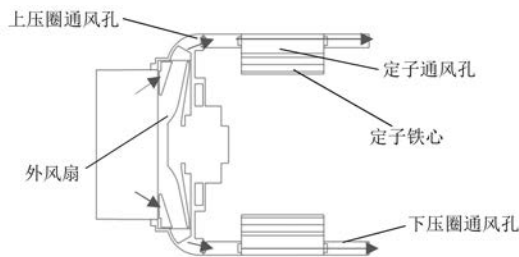


图 1 电机通风结构示意图

1.2 数值模拟方法

1.2.1 控制方程

由于电机内流动的复杂性,为了简化分析过程,作以下假设^[2-5]:

(1) 本计算中的流体为不可压缩的牛顿流体。

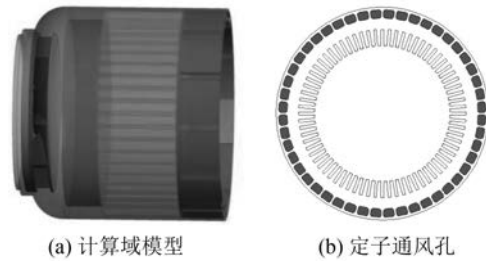


图 2 三维计算模型

(2) 流场内由于风扇转速较高,电机内流动为湍流。

(3) 散热过程中,忽略了辐射散热的作用。

基于以上假设,电机内流体流动满足质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律。当流体为不可压缩且处于稳态流动时,三维流体通用控制方程展开式可表示为^[6]

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + S \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u, v, w 分别为速度在 x, y, z 方向上的分量; ϕ 为通量变量; Γ 为展开系数; S 为源项。

由传热学基本原理可知,三维稳态含热源、各项异性介质传热控制方程可表示为^[7]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q \\ \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为计算域中各材料在 x, y, z 方向上的导热系数; T 为固体待求的温度; S_1, S_2 分别为计算域中的绝热面、散热面; q 为计算域内各热流密度之和; α 为对流散热系数; T_f 为环境流体温度。

1.2.2 边界条件

采用六面体结构化网格结合非结构四面体网格形式对整体计算域进行网格化分。整体网格质量均大于 0.2,满足工程计算的要求。流体介质设定为 40 ℃ 理想气体。外风扇转速为

1 900 r/min;电机的机座外表面设为对流散热面,对流换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;进出口条件均设为 1 个标准大气压,方向垂直进口方向,温度为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

电机铁心材料为各向异性,径向导热系数为 $44.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,轴向导热系数为 $1.192 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。电机定子铁心和线圈损耗通过电机计算程序^[8]求得,损耗分布如表 1 所示。

表 1 损耗分布

部件	损耗
定子线圈	3 728
定子铁心	2 341

2 计算结果与分析

2.1 原始电机的流场分析

对原始定子通风孔的电机计算模型进行数值计算分析,风扇流场结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看到,由于受到风扇离心力的作用,风扇最大风速在叶片压力侧出口处。

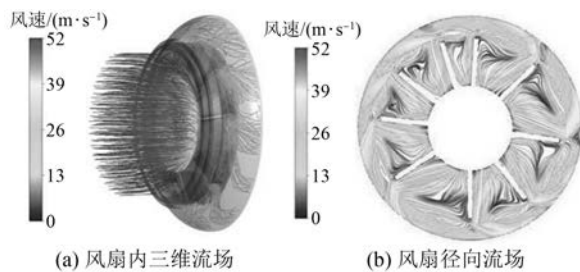


图 3 三维计算模型内风扇流线图

根据 Powell 涡声方程可以认为,在低马赫数下,涡是产生流动噪声的主要原因^[9]。从图 3(b)可以看出,在风机进口处及出口存在流动分离,这是由于在进口处,风机上冠和机壳之间存在一定间隙,造成的泄露流量与垂直进入叶片的主流发生干扰,降低了流体动能。流速最大的位置在风扇叶片出口处,在叶片吸力面和压力面之间存在大量涡流,这些涡流使流体动能损失加大,同时也说明风机叶片处产生的气动噪声较大。

由于接线盒挡住了下压圈出口,造成下压圈通风孔数量与定子通风孔不匹配。图 4 为外风路流线图。从图 4 可以看到,定子通风孔被堵住



图 4 外风路流线图

2.2 通风孔数对绕组温升的影响分析

保证通定子通风孔筋的宽度及高度不变,改变通风孔的数量,分别对定子通风孔为 24 孔、36 孔、48 孔、60 孔和 72 孔下的模型进行流场及温升计算,结果如表 2 所示。分析表 2 数据可知,随着通风孔数的增加,流速明显增加,流量减小。72 孔比 24 孔,流量减少了 7.9%,流速增加了 11.5%。随着孔数的增加,流量虽然减少,但风速明显提高了。

表 2 不同通风孔数计算结果

通风孔数	质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	体积流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	定子孔内断面 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
24	0.43	0.38	14.8
36	0.42	0.38	15.3
48	0.41	0.37	15.8
60	0.40	0.36	16.1
72	0.39	0.35	16.5

定子铁心及绕组径向温度分布云图如图 5 所示。由于定子通风孔出口端与下压圈通风孔不匹配,造成定子温度径向分布不均匀,在流道受阻位置存在明显的高温集中区,这点在设计的时候应当引起重视。计算得知,定子通风孔数从 24 增加到 72,绕组热点温度降低了 22.8 K ,平均温度降低了 26.3 K ;与原通风孔数 48 相对,72 孔下的绕组热点温度降低了 9.2 K ,平均温度降低了 10.3 K 。从图 5 可以看到,随着孔数增多,定子铁心齿部及绕组温度明显降低了,而且温度分布更加均匀,72 孔下改善效果最佳。这是因为定子绕组通过铁心导热,定子铁心主要通过通风孔内与冷却流体的对流换热,随着定子通风孔数的增加也不可少地增加了孔筋的数量,通风孔筋增加不仅可以提高结构强度,保证电机安全稳定运行,同时也

起到了提高散热的效果。因此随着孔筋的增加, 定子绕组及定子铁心齿部散热效果得到了改善。

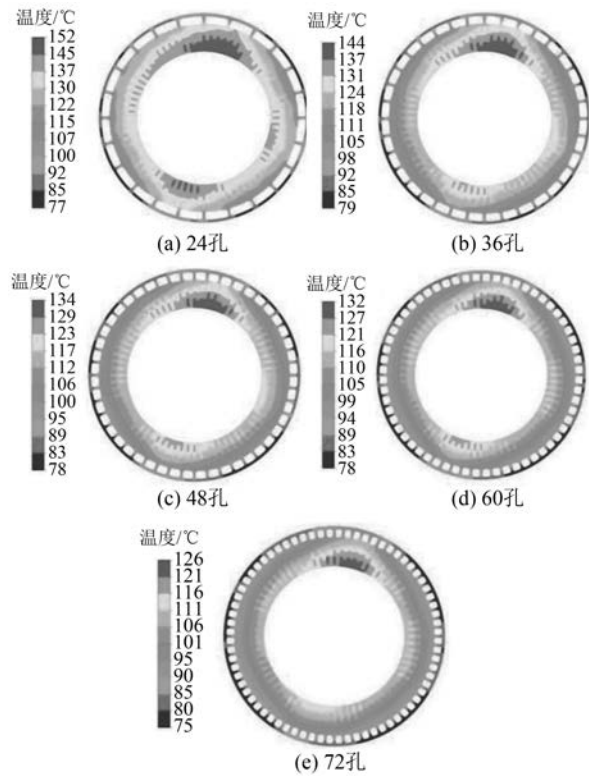


图5 不同孔数径向温度云图

2.3 通风孔高度对绕组温升的影响分析

在通风孔数量为 48 的情况下, 通过改变通风孔内径得到不同定子通风孔高度, 如图 6 所示。



图6 定子通风孔示意图

不同通风孔高度下的计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看到, 高度从 22 mm 至 10 mm, 随着高度的增加, 流量明显减小, 通风孔内风速提高。高度为 22 mm 时, 体积流量 $0.369 \text{ m}^3/\text{s}$, 高度 10 mm, 体积流量 $0.244 \text{ m}^3/\text{s}$, 流量减少了 33.9%, 风速提高了 29.9%; 从高度 10 mm 降低至 2 mm, 可以看到流量急剧减少, 流速明显也降低了。

不同通风孔高度下的径向温度云如图 7 所示。从图 7 可以看出, 高度从 22 mm 降低至 10 mm, 高度变小之后, 定子通风孔流道急剧收缩,

在风扇功率一定的情况下, 使得流速增大, 由于风速的提高, 对流强度提高, 绕组及铁心温度随着高度的减小而降低。计算绕组温度得知, 高度为 22 mm 时, 绕组最热点温度比原来高度 (20 mm) 时升高了 1.9 K, 绕组平均温度升高了 1.8 K; 高度为 10 mm 时, 最热点温度比原来高度 (20 mm) 时降低了 8.9 K, 平均温度降低了 4 K。高度从 10 mm 降低至 2 mm, 由于孔内流量急剧减小, 散热效率降低, 绕组及铁心温度随高度减小而明显升高。

表 3 不同通风孔高度下的计算结果

高度/ mm	质量流量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	体积流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	定子孔内断面流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
2	0.05	0.05	17.4
5	0.15	0.14	22.1
10	0.28	0.24	20.5
14	0.35	0.31	18.7
18	0.40	0.35	18.5
20	0.42	0.36	16.8
22	0.41	0.37	15.8

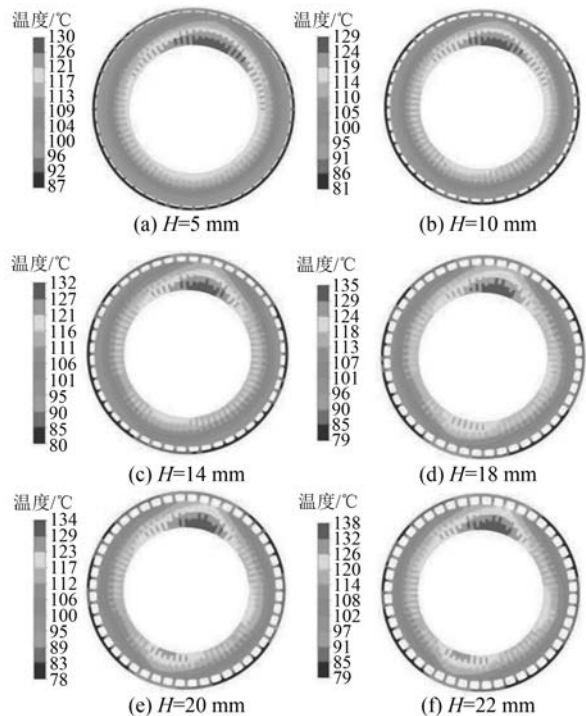


图7 不同通风孔高度下的径向温度云图

2.4 通风孔筋宽对绕组温升的影响分析

定子通风孔筋太小会影响结构强度, 太宽则

影响流道面积,不利于通风散热。因此,考虑到通风孔筋宽的影响,通过改变通风孔筋的宽度来研究其对绕组温升的影响。不同通风孔筋宽计算结果如表 4 所示。不同通风孔筋宽下的绕组温度云图和径向温度云图如图 8、图 9 所示。

从表 4 数据可得知,通风孔筋越宽,流量越小,流速越大。筋宽为 4~8 mm 时,从图 8 可以看出,绕组最高温度分别为 141、139、140 °C。对比图 9 径向温度分布云图发现,筋宽为 6 mm,绕组及铁心的温度散热效果更好。

表 4 不同通风孔筋宽计算结果

筋宽/ mm	质量流量/ (kg·s ⁻¹)	体积流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	定子断面流速/ (m·s ⁻¹)
4	0.416 5	0.369 2	15.19
6	0.408 8	0.362 4	16.03
8	0.399 7	0.354 3	16.99

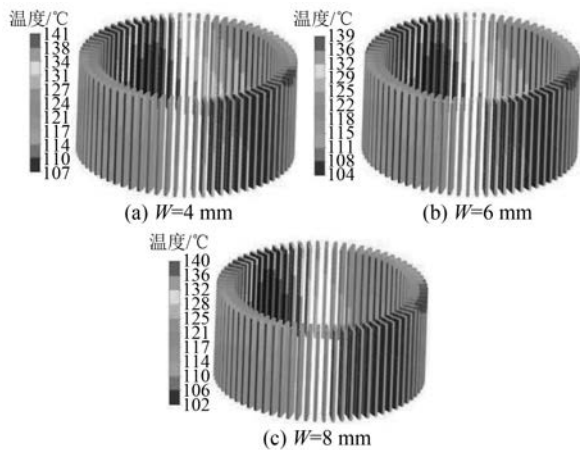


图 8 不同通风孔筋宽下绕组温度云图

3 结 语

本文通过研究定子不同通风孔数量、高度及孔筋宽度对绕组温度的影响,得出以下结论:

(1) 通风孔的数量、孔的径向高度及通风孔筋宽直接影响外风路换热面积和孔内的风速,进而影响换热效果。

(2) 随着通风孔孔数增加,主要体现在散热面积的增加,定子铁心及绕组散热效率提高。通风孔高度不仅影响散热面积同时影响流速及风

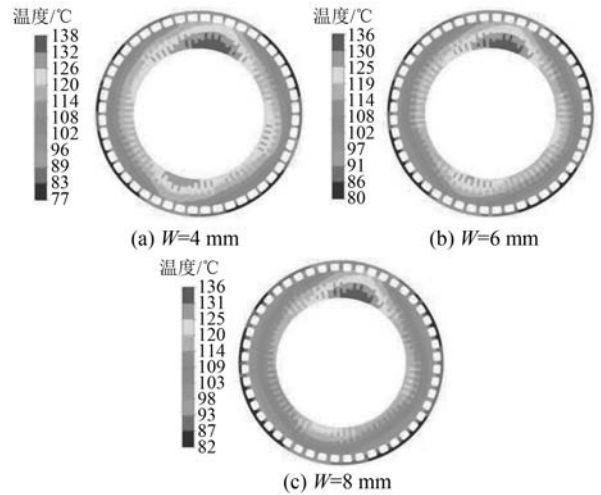


图 9 不同通风孔筋宽下径向温度云图

量,在满足电磁性能要求和结构强度许可的条件下,可以通过适当减小通风孔高度和增加通风孔筋宽度达到减小绕组温升的目的。

【参 考 文 献】

- [1] 李翠萍,管正伟,丁秀翠,等. 电动汽车用冷却系统设计及发展综述[J]. 微特电机,2019,47(1):82.
- [2] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [3] 丰帆,郑国丽,黄鹏程,等. 异步牵引电机冷却设计的分析与验证[J]. 电机与控制应用,2017,44(6):63.
- [4] 吴江权,梁进学,杨金霞,等. 基于热网络的全峰不风冷永磁电机温升分析[J]. 机车电传动,2016(5):8.
- [5] LIU Y, LEE Y, JUNG H K, et al. 3D thermal stress analysis of the rotor of an introduction motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4):1394.
- [6] 王福军. 计算流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004:7-11.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:347-353.
- [8] 周黎明. 鼠笼式变频调速异步牵引电机的计算程序[J]. 电力机车与城轨车辆,2006,29(3):20.
- [9] 马晓阳,黄兴安,武传宇,等. 吸油烟机用多叶离心通风机的数值模拟[J]. 风机技术,2017,59(4):32.