DOI: 10.13382/j.jemi.B2104579

交流牵引电机转子齿部新型轴向通风槽结构*

郭宇轩[1,2] 张小平[1,2] 傅 搏[1,2] 张 铸[2] 朱广辉[3]

(1 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201;3. 湘潭电机股份有限公司 湘潭 411101)

摘 要:针对目前交流牵引电机转子轴向通风孔存在散热效果欠佳的问题,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构。通过建立交流牵引电机共轭传热分析求解域模型并对其开展传热分析,得到相应的流体场与温度场分布图,根据该分布图并针对其转子端环与齿部温度偏高的问题,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构;分析了该新型通风槽结构参数对电机转子散热效果及电机相关性能指标的影响,研究了通风槽最佳结构参数的优化设计方法,并对其效果进行了仿真验证,同时与传统轴向通风孔结构进行了对比分析,结果表明:所提出的新型转子齿部轴向通风槽结构相对于传统轴向通风孔结构,在保持电机相关性能指标基本不受影响的情况下,其转子齿部与端环的温度得以明显降低,从而显著提升了其通风散热效果,对于降低电机总体温升从而延长其使用寿命具有重要意义。

关键词: 交流牵引电机;转子齿部;新型通风槽结构

中图分类号: TM343+.2 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.4024

New axial ventilation slot structure in the rotor teeth of AC traction motor

Guo Yuxuan[1,2] Zhang Xiaoping[1,2] Fu Bo[1,2] Zhang Zhu[2] Zhu Guanghui[3]

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Xiangtan Electric Manufacturing Group Corporation Ltd., Xiangtan 411101, China)

Abstract: To address the problem of poor heat dissipation in the axial ventilation holes of the rotor of the current AC traction motor, a new axial ventilation slot structure is proposed for the teeth of the rotor. According to this distribution diagram, a new rotor teeth axial venting slot structure is proposed for the problem of high temperature of the rotor end rings and teeth; the influence of the new venting slot structure parameters on the motor rotor heat dissipation effect and the motor related performance indexes is analyzed, and a new rotor teeth axial venting slot structure is proposed. The results show that the proposed new rotor teeth axial venting slot structure significantly reduces the temperature of the rotor teeth and end rings compared to the traditional axial venting slot structure, while keeping the motor performance indexes basically unaffected, thus significantly reducing the temperature of the rotor teeth and end rings. It improves the ventilation and heat dissipation effect, which is important for reducing the total body temperature rise of the motor and thus extending its service life.

Keywords: AC traction motor; rotor teeth; new ventilation duct structure

收稿日期: 2021-07-29 Received Date: 2021-07-29

*基金项目:湖南省自然科学省市联合基金项目(2021JJ50123)资助

0　引　言

交流牵引电机因具有结构简单坚固、效率高、调速范围宽等系列优点而得到了广泛应用[1-4]。然而由于在其运行中会产生各种损耗而使其温度迅速上升[5-8],如果其温升过高,则会导致其绝缘老化加剧甚至迅速损坏[9-11],因此如何通过改进电机的通风散热结构以降低其温升,对于延长其使用寿命将具有重要意义。

目前在交流牵引电机通风散热结构方面已开展了大量研究,提出了多种形式的通风散热结构,其中尤以轴向通风散热结构具有风路简单、风压损失小等特点而得到了较广泛的应用[12-13]。而在轴向通风散热结构方面,目前也已提出了多种不同的结构形式[14-16],如文献[14]提出一种同时使用两种不同形状转子轴向通风孔的散热结构,并对比研究了不同通风孔形状、数量及布局对电机通风散热效果及其主要性能指标的影响;文献[15]提出一种在电机定子铁心背部增加导风管和挡风板的新型轴向通风散热结构,改善了电机的散热效果,但存在结构较复杂并提高了风阻等不足;文献[16]提出一种电机转轴开孔的轴向通风散热结构,该结构改善了电机的散热性能,有效降低了电机的温升,但对电机转子的机械强度会产生一定的影响。

然而上述轴向通风散热结构虽然都取得了较好的散热效果,但由于其轴向通风孔均开在其转子轭部,离转子齿部与端环等主要发热部位的距离比较远,因而导致上述部位的温升仍然偏高,对电机的长期安全稳定运行将造成不利影响。为此,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构,文中介绍了该通风槽结构的基本特点,分析了其结构参数对转子散热效果及电机相关性能指标的影响,研究了其最佳结构参数的优化设计方法,并对其效果进行了仿真验证,同时与传统轴向通风孔结构进行了对比分析,结果证明了该新型结构的有效性。

1　交流牵引电机求解域模型

为实现交流牵引电机通风散热结构的优化设计,有必要首先对其开展共轭传热分析。为此,必须建立相应的求解域模型,包括数学模型与有限元模型。

1.1　数学模型

1)流体场基本方程

交流牵引电机内部空气为定常流动流体,满足能量守恒、质量守恒与动量守恒方程。其中:

能量守恒方程为[17]:

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vT)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wT)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda_x}{C_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda_y}{C_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda_z}{C_p}\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{1}$$

式中:T 为空气温度,C_p 为空气比热容,λ_x、λ_y、λ_z 分别为空气在 x、y、z 方向上的导热系数。

质量守恒方程为[18]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \tag{2}$$

式中:u、v、w 分别为风速在 x、y、z 方向上的分量,ρ 为空气密度。

动量守恒方程为[19]:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho u)}{\partial t}+div(\rho u\boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)-\dfrac{\partial p}{\partial x}+F_x\\ \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial t}+div(\rho v\boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)-\dfrac{\partial p}{\partial y}+F_y\\ \dfrac{\partial(\rho w)}{\partial t}+div(\rho w\boldsymbol{u})=\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\mu\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)-\dfrac{\partial p}{\partial z}+F_z\end{cases} \tag{3}$$

式中:t 为时间,$\boldsymbol{u}$ 为风速矢量,μ 为空气粘度系数,p 为空气压力,F_x、F_y、F_z 分别为微元体的体力。

2)温度场基本方程

三维温度场基本方程为[20]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T'}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T'}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T'}{\partial z}\right) \tag{4}$$

式中:T' 为电机温度,q 为热源密度。

1.2　有限元模型

由于交流牵引电机结构对称,为简化分析,取其轴向一半建立其三维有限元模型。以某型号交流牵引电机为例,其主要参数如表 1 所示,得到其三维有限元模型如图 1 所示。其中转子轴向通风孔采用目前常用的转子轭部轴向通风孔结构。

表 1　某交流牵引电机主要参数

Table 1　Main parameters of an AC traction motor

名称	参数	名称	参数
定子外径/mm	498	定子内径/mm	321
转子外径/mm	318	转子内径/mm	90
定子槽数	36	转子槽数	46
额定功率/kW	230		

2　电机流体场分析

根据图 1 所建立的交流牵引电机三维有限元模型,采用 CFX 软件进行共轭传热分析,相关参数设置为:进

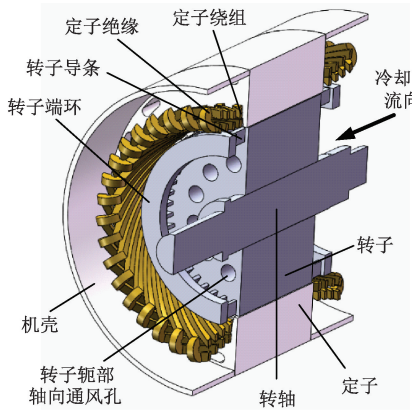

图1　某交流牵引电机三维有限元模型

Fig. 1　3D finite element model of an AC traction motor

风口为压力型边界,其压力为1 atm;出风口为质量型边界,质量流率为2.173 kg/s,则得到该电机的流体分布图如图2所示。可见,电机不同部位其风速存在较大差异,如其进风侧风速约为15 m/s,定转子通风道及气隙内风速则明显加快,达30 m/s以上,风速最高的位置为转子通风道中心,约为64.587 m/s;当冷却风流出通风道后风速迅速降低,约为25~40 m/s;而转子端环表面风速则更低,仅为18 m/s,其主要原因应该在于转子端环距离其转子轭部轴向通风孔的径向距离较远所致。

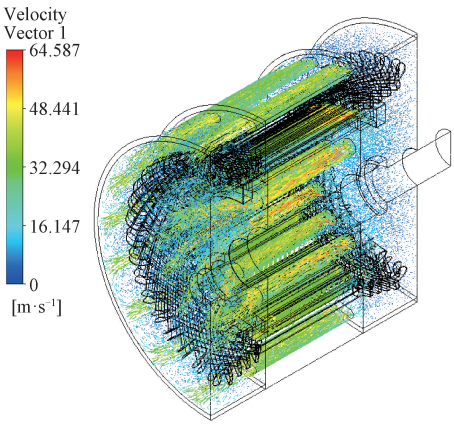

图2　交流牵引电机流体分布图

Fig. 2　Fluid distribution diagram of AC traction motor

3　电机温度场分析

同样,采用CFX软件对图1所示交流牵引电机三维有限元模型进行共轭传热分析,得到其温度分布图如图3所示。可见:电机转子端环为其温度最高点,达107.254 ℃;其次是定子绕组与转子导条,其温度均处在81.279 ℃~98.596 ℃之间;接下来是定转子间气隙两侧的温度,且离气隙越远,则其温度越低,温度最低部位为其机壳与转轴。其原因在于:转子导条、端环与定子绕组为电机主要热源,热源温度显然会高于其他部位温度,且离热源越远,其温度将越低;另外,根据上述流体场分析可知,电机不同部位的风速不同,风速越高,则越有利于散热,因而越有利于降温;由于转子端环为主要热源,且其表面冷却风速较低,故其温度达到最高。

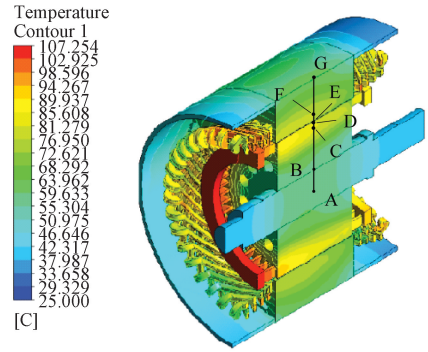

图3　交流牵引电机温度分布图

Fig. 3　Temperature distribution diagram of AC traction motor

为便于对电机内部温度场分布规律作进一步的分析,根据上述共轭传热分析得到其轴心至机壳的径向温度变化曲线,如图4所示。其中:A点为轴心,B点对应于转子内径,C点为转子齿部中心点,D处为转子外径,E点为定子内径,F点为定子齿部中心点,G处为机壳外径。下面结合图4所示曲线进行具体分析。

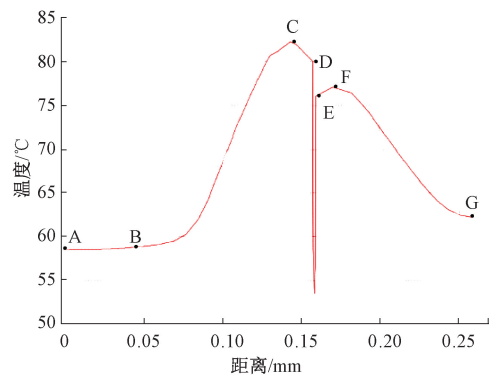

图4　电机轴心至机壳径向温度曲线

Fig. 4　Radial temperature curve from motor shaft to casing

其中:AB段为转轴径向温度分布曲线,由于转轴离主要热源较远,且其导热系数较高,故其整体温度较低且温度分布均匀。

BD段为转子径向温度分布曲线:其中,C点为转子齿部中心,距离主要热源转子导条最近,因而此处温度最高,达到82.213 ℃;D点处因有气隙冷却风流过,有利于散热,因而从C点至D点的温度逐步降低;同样,从C点至B点,随着离转子导条距离的增大,其温度迅速降低,至B点达到温度的最低点。

DE段为气隙径向温度分布曲线:由于气隙中有高速

冷却风流过,因而其温度急速下降;同时因转子导条能量密度高于定子绕组,故转子侧温度高于定子侧温度。

EG 段为定子径向温度分布曲线:其中,F 点为定子齿部中心,距离热源定子绕组最近,因此其温度在定子中处于最高,达 77.157 ℃;E 点靠近定转子间气隙,有利于散热,故从 F 至 E 点的温度逐步降低;同理,随着离热源距离的增加,FG 段的温度也逐步下降。

4　转子齿部新型轴向通风槽结构及其参数优化

4.1　转子齿部新型轴向通风槽结构

根据上述针对交流牵引电机流体场与温度场的分析可知,电机转子采用目前常用的转子轭部轴向通风孔结构,其转子齿部与端环的温度明显偏高,因而不利于电机的长期稳定可靠运行。为此,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构,其截面示意图如图 5 所示。

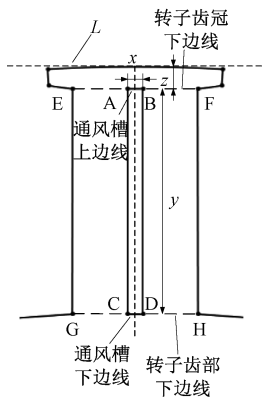

图 5　转子齿部轴向通风槽结构示意图

Fig. 5　Structure diagram of axial ventilation slot for rotor teeth

图 5 中:竖直虚线为转子齿部中心线,L 为垂直于转子齿部中心线的转子外圆切线;该通风槽截面采用矩形结构,其中心位于转子齿部中心线上;该矩形截面的长边(AC 和 BD)平行于转子齿部中心线,而短边 AB 和 CD 则分别与转子齿冠下边线 EF 和转子齿部下边线 GH 平行;图中,x 为矩形截面的宽度,y 为矩形截面的长度,z 为 AB 边至切线 L 的距离。

4.2　转子齿部轴向通风槽结构参数对电机性能的影响

由于转子齿部磁通密度较大,在此处开通风槽有可能会对电机性能产生影响。为此,有必要对通风槽各结构参数与电机性能的影响进行研究。下面结合图 5,针对通风槽的 3 个结构参数,即 x、y 和 z 对电机主要性能参数如定、转子铜耗、铁耗及转矩等的影响进行分析。

1)通风槽长度对电机性能的影响

首先研究转子齿部轴向通风槽长度对电机性能的影响。保持通风槽宽度 x 和位置参数 z 不变,并任取其值分别为:x = 1 mm,z = 5.5 mm,再选取不同的长度值 y 对电机进行磁分析,如任取长度值分别为 20、23、26 及 29 mm,得到相应的电机相关性能指标如表 2 所示。

表 2　通风槽不同长度参数对应的电机性能指标

Table 2　Motor performance indicators for different length parameters of ventilation slots

组别	通风槽长度参数	定子铜耗/W	转子铜耗/W	铁耗/W	转矩/(N·m)
第 1 组	y=20 mm	8 549.49	9 708.94	1 302.57	1 130.25
第 2 组	y=23 mm	8 552.73	9 709.59	1 302.84	1 130.73
第 3 组	y=26 mm	8 570.29	9 710.31	1 301.73	1 130.63
第 4 组	y=29 mm	8 592.05	9 711.63	1 303.57	1 131.26

根据表 2 可见,改变电机转子齿部轴向通风槽的长度值,对其定转子铜耗、铁耗及转矩等性能指标的影响都很小,几乎可以忽略。

2)通风槽宽度对电机性能的影响

保持通风槽长度 y 和位置参数 z 不变,并任取其值分别为:y = 23 mm,z = 5.5 mm,再选取不同的宽度参数 x 对电机进行磁分析,得到电机相关性能指标,如表 3 所示。

表 3　通风槽不同宽度参数对应的电机性能指标

Table 3　Motor performance indicators for different width parameters of ventilation slots

组别	通风槽宽度参数	定子铜耗/W	转子铜耗/W	铁耗/W	转矩/(N·m)
第 1 组	x=1 mm	8 552.73	9 709.59	1 302.84	1 130.73
第 2 组	x=1.5 mm	8 641.72	9 709.84	1 302.49	1 130.89
第 3 组	x=2 mm	8 774.84	9 710.15	1 302.58	1 131.15
第 4 组	x=2.5 mm	8 979.52	9 710.97	1 303.17	1 131.35

根据表 3 可见,改变转子齿部轴向通风槽宽度,对转子铜耗、铁耗及转矩的影响极小,几乎可以忽略,但对电机定子铜耗的影响较大,且随宽度的增加,其定子铜耗也随之增大。

3)通风槽位置对电机性能的影响

同样,保持通风槽宽度 x 和长度 y 不变,并任取其值分别为:x = 1 mm,y = 23 mm,再选取不同的位置参数 z 对电机进行磁分析,得到电机相关性能指标,如表 4 所示。

表 4　通风槽不同位置参数对应的电机性能指标

Table 4　Motor performance indicators for different position parameters of ventilation slots

组别	通风槽位置参数	定子铜耗/W	转子铜耗/W	铁耗/W	转矩/(N·m)
第 1 组	z=3.5 mm	8 557.81	9 707.48	1 302.48	1 130.54
第 2 组	z=4.5 mm	8 558.84	9 708.49	1 303.81	1 130.67
第 3 组	z=5.5 mm	8 552.73	9 709.59	1 302.84	1 130.73
第 4 组	z=6.5 mm	8 550.56	9 709.98	1 303.69	1 130.57

根据表 4 可见,改变转子齿部轴向通风槽的位置参数,对电机定转子铜耗、铁耗及转矩的影响都很小,几乎可以忽略。

根据上述分析可见:除转子齿部轴向通风槽宽度对电机定子铜耗有较大影响外,通风槽各结构参数对电机其余性能指标的影响都很小,几乎可以忽略;然而增加通风槽宽度尺寸虽然会增大定子铜耗,但显然又有利于降低转子齿部的温升,因而如何确定其宽度尺寸的最佳取值以尽量降低其对定子铜耗的影响并有效提高对转子齿部的降温效果将具有重要意义。

4.3　转子齿部轴向通风槽最佳宽度确定方法

根据上述分析,转子齿部轴向通风槽长度和位置参数对电机相关性能指标的影响很小,同时考虑到转子齿部两侧边 EG 和 FH(见图 5)直接与转子导条接触,该部位温度较高,为提高其通风散热效果,设转子齿部轴向通风槽的长度与 EG 或 FH 边相等,且设通风槽上边线 AB 与转子齿冠的下边线 EF 重合,下边线 CD 与转子齿部的下边线 GH 重合。

下面介绍转子齿部轴向通风槽最佳宽度尺寸的确定方法,其流程图如图 6 所示。具体步骤为:

1)在矩形截面宽度取值范围内任取若干个宽度值,并根据电机其他相关参数建立其分析模型。

2)根据步骤 1)所得分析模型进行共轭传热分析,得到相应的转子齿部、转子端环及定子绕组的平均温度。

3)根据上述所得若干组截面宽度与相应的温度数据,采用数值拟合方法进行拟合,分别得到转子齿部平均温度、转子端环平均温度及定子绕组平均温度与转子齿部轴向通风槽宽度间的函数关系式。

其中,转子齿部平均温度与轴向通风槽宽度间的函数关系式为:

$$u(x) = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4 \tag{5}$$

式中:$a_1 \sim a_4$ 为系数。

转子端环平均温度与轴向通风槽宽度间的函数关系式为:

$$v(x) = b_1x^3 + b_2x^2 + b_3x + b_4 \tag{6}$$

式中:$b_1 \sim b_4$ 为系数。

定子绕组平均温度与轴向通风槽宽度间的函数关系式为:

$$w(x) = c_1x^3 + c_2x^2 + c_3x + c_4 \tag{7}$$

式中:$c_1 \sim c_4$ 为系数。

4)根据步骤 3)所得各项函数关系式,构建相应的散热效果评价函数,具体为:

$$\begin{cases} F(x) = du(x) + ev(x) + fw(x) \\ v(x) \leqslant u(x) \end{cases} \tag{8}$$

式中:$F(x)$ 为散热效果评价函数,d、e、f 分别为转子齿部、转子端环及定子绕组平均温度的权重系数,可根据需求进行设定,且 $d+e+f=1$。

5)计算步骤 4)所得散热效果评价函数的最小值,得到对应的转子齿部轴向通风槽宽度值,该宽度值即为转子齿部轴向通风槽的最佳宽度尺寸。

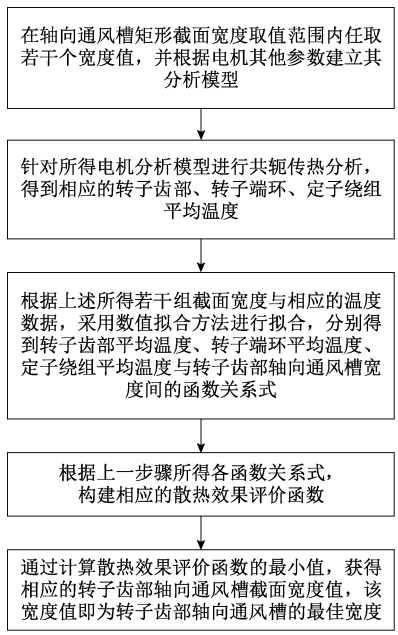

图 6　转子齿部轴向通风槽最佳宽度确定方法流程

Fig. 6　Flow of determination method for optimum width of axial ventilation slot of rotor teeth

下面根据上述方法及表 1 所示电机参数,具体说明转子齿部轴向通风槽最佳宽度尺寸的确定方法。根据电机结构参数,取转子齿部轴向通风槽长度 y 为 22.96 mm,位置参数 z 为 5.27 mm,根据图 6 所示步骤,计算转子齿部轴向通风槽最佳宽度尺寸的具体过程如下:

1)设转子齿部轴向通风槽初始宽度值为 0,即先计算转子齿部未开轴向通风槽的情况,之后按 0.5 mm 的间距依次取 7 组宽度值,并根据电机其他相关参数,采用 Solidworks 软件建立其分析模型;

2)针对步骤 1)所得分析模型,采用 CFX 软件进行共轭传热分析,得到相应的转子齿部、转子端环及定子绕组平均温度,如表 5 所示。

表 5　通风槽不同宽度尺寸对应的温度数据

Table 5　Temperature values corresponding to different width dimensions of ventilation slot

组别	转子齿部轴向通风槽宽度/mm	转子齿部平均温度/℃	转子端环平均温度/℃	定子绕组平均温度/℃
第 1 组	0	89.55	104.1	94.11
第 2 组	0.5	88.34	101.05	93.89
第 3 组	1.0	86.44	99.29	93.58
第 4 组	1.5	82.03	95.58	93.76
第 5 组	2.0	79.56	93.12	94.34
第 6 组	2.5	78.94	92.83	95.97
第 7 组	3.0	79.47	92.25	98.37

3)根据表 5 所得各宽度尺寸与相应的温度数据,采用数值拟合方法分别得到转子齿部、转子端环及定子绕组平均温度与转子齿部轴向通风槽宽度间的函数关系式,分别如式(9)~(11)所示。

$$u(x) = 1.378x^3 - 5.296x^2 + 0.183\,2x + 89.55 \quad (9)$$

$$v(x) = 0.564\,4x^3 - 1.483x^2 - 4.503x + 104.1 \quad (10)$$

$$w(x) = 0.315\,6x^3 - 0.296x^2 - 0.529x + 94.11 \quad (11)$$

4)根据式(9)~(11),并取权重系数分别为:$d = 0.06$,$e = 0.08$,$f = 0.86$,得到相应的散热效果评价函数为:

$$\begin{cases} F(x) = 0.399\,2x^3 - 0.691x^2 - 0.804x + 94.636 \\ -0.248\,8x^3 + 1.186\,8x^2 + 3.973\,6x - 9.99 \leqslant 0 \end{cases} \quad (12)$$

5)求函数 $F(x)$ 的最小值:首先求解式(12)中的不等式,得到通风槽宽度 x 的取值范围为 $0<x\leqslant 1.876$;然后令 $F(x)$ 的导函数为 0,得到 $F(x)$ 极值点为:$x_1 = 1.59$,$x_2 = -0.42$;其中 $x_2 = -0.42$ 不满足要求,因此取 $x_1 = 1.59$ 为转子齿部轴向通风槽的最佳宽度尺寸,此时散热效果评价函数 $F(x)$ 取最小值。

4.4　对比分析

为进一步说明所提出的转子齿部新型轴向通风槽结构的效果,将该新型通风槽结构与传统转子轭部轴向通风孔结构进行对比分析。根据表 1 所示电机参数对两种通风结构进行共轭传热分析与磁分析,其中新型通风槽结构参数分别取:x = 1.59 mm,y = 22.96 mm,z = 5.27 mm,传统通风孔结构按照和新型通风槽截面积相等的原则确定其尺寸,由此得到相应的转子齿部、转子端环及定子绕组平均温度以及定子铜耗如表 6 所示。

表 6　新型结构与传统结构对应的温度值及定子铜耗

Table 6　Temperature values and stator copper consumption for new and conventional structures

对比项	转子齿部平均温度/℃	转子端环平均温度/℃	定子绕组平均温度/℃	定子铜耗/W
新型结构	84.17	97.64	96.57	8 661.12
传统结构	90.71	105.76	96.64	8 433.95

根据表 6 可知,相对于传统通风孔结构,文中提出的转子齿部新型通风槽结构在保持定子绕组平均温度基本不变、定子铜耗略有上升(约占总损耗的 0.91%)的情况下,其转子齿部与端环的平均温度分别下降了 6.54 ℃与 8.12 ℃,从而说明该结构有效提高了电机转子的通风散热效果。

5　结　论

针对目前交流牵引电机转子轴向通风孔存在通风散热效果欠佳的问题,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构。通过建立交流牵引电机共轭传热分析求解域模型并对其开展传热分析,得到相应的流体场与温度场分布图,根据该分布图并针对其转子端环与齿部温度偏高的问题,提出一种新型的转子齿部轴向通风槽结构;分析了该新型通风槽结构参数对电机转子散热效果及相关性能指标的影响,研究了其通风槽最佳结构尺寸的优化设计方法,并对其效果进行了验证,同时与传统轴向通风孔结构进行了对比分析,结果表明:所提出的新型转子齿部轴向通风槽结构相对于传统轴向通风孔结构,在保持电机相关性能指标基本不受影响的情况下,其转子齿部与端环的温度得以明显降低,从而显著提升了其通风散热效果,对于降低电机温升并因而延长其使用寿命具有重要意义。

参考文献

[1] SHAFIGHY M, KHOO S, KOUZANI A Z. Modelling and simulation of regeneration in AC traction propulsion system of electrified railway[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2015, 5(4): 145-155.

[2] 韩家德, 孙鹏, 朱凌波, 等. 立式鼠笼异步电动机三维 CFD 热计算[J]. 电机与控制学报, 24(12): 55-61.
HAN J D, SUN P, ZHU L B, et al. 3D CFD thermal calculation for a vertical asynchronous motor with a squirrel-cage rotor[J]. Electric Machines and Control, 24(12): 55-61.

[3] NATEGH S, ZHANG H, WALLAMRK O, et al. Transient thermal modeling and analysis of railway traction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 79-89.

[4] 杨泽斌, 王丁, 孙晓东, 等. 无轴承异步电机传感器故障容错控制[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 99-109.
YANG Z B, WANG D, SUN X D, et al. Fault tolerant control for sensor fault of a bearingless asynchronous motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 99-109.

[5] JURKOVIC S, RAHMAN K M, MORANTE J C, et al. Induction machine design and analysis for general motors e-assist electrification technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 631-639.

[6] ABRAMENKO V, PETROV I, NERG J, et al. Third-

order harmonics in synchronous reluctance motors with an axially laminated anisotropic rotor and their impact on the motor losses [J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 152870-152880.

[7] YANG C, ZHANG Y, QIU H. Influence of output voltage harmonic of inverter on loss and temperature field of permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-5.

[8] 张超羽, 王立国. 基于双电阻辨识方法的感应电机暂态温度计算[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1865-1872.
ZHANG CH Y, WANG L G. An calculated method for transient temperature of induction motor based on double resistances identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1865-1872.

[9] 佟文明, 孙静阳, 舒圣浪. 不同数值方法在自扇冷永磁同步电机三维热分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 151-159.
TONG W M, SUN J Y, SHU SH L. Application of different numerical methods in three dimensional thermal analysis of self-fan-cooled permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 151-159.

[10] XIA Y, XU Y, AI M, et al. Temperature calculation of an induction motor in the starting process [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2):1-4.

[11] 刘苹, 张小平, 匡斯建, 等. 开关磁阻电机绕组气隙建模及最佳气隙宽度确定方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 232(4): 155-161.
LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. Air gap modeling of SRM winding and determination of optimal air gap width[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 232(4): 155-161.

[12] 侯健. YKK系列中型高压电机流体场与温度场的计算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
HOU J. Analysis and calculation of fluid field and temperature field for the medium-sized high-voltage motors in YKK series[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[13] 路义萍, 刘延浩, 韩家德, 等. 全轴向通风无刷励磁机三维温度场数值模拟[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 81-87.
LU Y P, LIU Y H, HAN J D, et al. Three-dimensional temperature field numerical simulation of full axial ventilation brushless exciter[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3): 81-87.

[14] 孟大伟, 李金箫, 于喜伟. 转子轴向通风孔对高压感应电机性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 38-44.
MENG D W, LI J X, YU X W. Effect of axial ventilation holes on performance of high voltage induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(1): 38-44.

[15] 韩力, 沈超凡, 蔡瑞环, 等. 兆瓦级实心转子高速感应电动机通风系统分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(7): 38-45.
HAN L, SHEN CH F, CAI R H, et al. Ventilation system analysis of megawatt solid rotor high-speed induction motor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(7): 38-45.

[16] 张宸蕨. 高速感应电机磁-热耦合研究及温度场计算[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
ZHANG CH X. The high-speed induction motor magentic-thermal couping and temperatrue field calculation[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.

[17] 丁树业, 仵程程. 具有径向通风结构的5兆瓦双馈风力发电机内流热特性[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10): 68-76.
DING SH Y, WU CH CH. Characteristics of fluid flow and heat transfer for a 5 megawatt wind generator with radial ventilation structure[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(10): 68-76.

[18] 蒋晓东, 张凤阁, 周党生,等. 双定子笼障转子无刷双馈发电机冷却空气流变特性数值分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 466-473.
JIANG X D, ZHANG F G, ZHOU D SH, et al. Numerical analysis of cooling air flow characteristic for double stator cage-barrier rotor brushless doubly-fed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 466-473.

[19] 贺景运, 边旭, 梁艳萍. 空冷水轮发电机定子冷却结构设计与分析[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 111-119.
HE J Y, BIAN X, LIANG Y P. Design and analysis for stator cooling structure of air-cooled hydrogenerator[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2019, 53(12): 111-119.

[20] 吴胜男, 李文杰, 安忠良, 等. 变速恒压混合励磁风力发电机的热分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1857-1864.
WU SH N, LI W J, AN ZH L, et al. Thermal analysis of variable-speed constant-voltage hybrid excited wind generators[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2019, 34(9): 1857-1864.

作者简介

郭宇轩,2016 年于湖南科技大学获得学士学位,现为湖南科技大学硕士研究生,主要研究方向电机与电器。

E-mail: 453877764@ qq. com

Guo Yuxuan received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2016. Now he is a M. Sc. candidate of Hunan University of Science and Technology. His main research interests include electrical machinery and electrical appliances.

张小平(通信作者),1987 年于西安交通大学获得学士学位,2009 年于中南大学获得博士学位,现为湖南科技大学教授,硕士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail:zxp836@ 163. com

Zhang Xiaoping(Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1987 from Xi′an Jiaotong University, received his Ph. D. degrees in 2009 from Central South University. Now he is a professor and M. Sc. supervisor in Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and electrical driver system, intelligent control.