

矿用集中绕组永磁电机新型冷却方式设计研究^{*}

胡朝阳¹, 安跃军¹, 安辉¹, 陆艳君², 薛丽萍¹, 韩颖¹, 杨霞¹

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110807;

2. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为了进一步提升矿用集中绕组永磁电机的功率密度和散热能力, 提出一种冷却水管与绕组并绕的新型绕组冷却结构。以一台 315 kW 集中绕组永磁电机为例, 首先, 通过合理的等效与假设, 建立了电机的三维模型, 基于计算流体力学 (CFD) 方法对电机进行温度场分析。其次, 分析了不同的并绕方式以及相同并绕方式下不同的进水口进水速度对电机散热的影响, 确定了最优散热方式。仿真分析表明冷却水管与绕组并绕的方式有效提高了散热能力。

关键词: 永磁电机; 冷却方式; 集中绕组; 电机热分析; 矿用电机

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0071-06

doi: 10.12177/emca.2021.220

A New Cooling Method of Mine-Used Concentrated Winding Permanent Magnet Motor^{*}

HU Chaoyang¹, AN Yuejun¹, AN Hui¹, LU Yanjun², XUE Liping¹, HAN Ying¹, YANG Xia¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110807, China;

2. Shenyang KINGSEM Co., Ltd., Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to further improve the power density and heat dissipation capacity of the mine-used concentrated winding permanent magnet motor, a new winding cooling structure with cooling water pipe and winding wound parallelly is proposed. Taking a 315 kW concentrated winding permanent magnet motor as an example, a three-dimensional model of the motor is established through reasonable equivalence and assumptions, and the temperature field of the motor is analyzed based on computational fluid dynamics (CFD) method. The effects of different parallel winding methods and different inlet speeds under the same parallel winding method on the heat dissipation of the motor are analyzed, and the optimal heat dissipation method is determined. The simulation analysis shows that the parallel winding of cooling water pipe and winding effectively improves the heat dissipation capacity.

Key words: permanent magnet motor; cooling method; concentrated winding; motor thermal analysis; mine-used motor

0 引言

目前, 永磁电机广泛应用于煤矿开采, 但是矿井下空间有限, 而采煤机、刮板输送机、皮带运输机、掘进机等设备又需要电机提供较大的扭矩, 因

此煤矿运输设备用的低速大转矩电机需不断提高转矩密度。提高电机的转矩密度会使电机运行时的生热率增加, 从而增加电机的发热量。电机稳态温升能严重影响电机使用寿命和运行可靠性^[1-3], 所以电机的冷却至关重要。

收稿日期: 2021-12-30; 收到修改稿日期: 2022-03-19

^{*} 基金项目: 沈阳市重点技术攻关“揭榜挂帅”项目(22-101-0-04)

作者简介: 胡朝阳(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

安跃军(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制研究与新产品开发。

电机的冷却方式主要分为四类:空冷、氢冷、水冷及蒸发冷却。空冷的特点是结构简单、成本低,但是针对单机容量较大的电机,通风量的增大将使风摩损耗显著增加,从而降低电磁性能^[4];相比于空冷,氢冷风摩损耗大大降低,冷却效果明显提高,但氢气易爆、易泄漏;随着永磁同步电机的功率密度逐渐增大,空冷已不能满足电机散热需求,液体冷却凭借散热效率高的优点,成为永磁电机主要冷却方式。由于水的比热容大,液体冷却大多数采用水作为冷却介质;蒸发冷却通过在发电机导体内的空心区域通入冷却水,冷却水吸收热量后由液态变为气态,吸收大量的热,主要用于大型发电机,不适用于高功率密度永磁同步电机^[5]。

电机水冷方式包括机壳内水套冷却、槽内水冷等。机壳水套冷却对电机的散热可以起到一定作用,但随着功率密度的提高,水套冷却就难以保证电机的散热性能,而且需在机壳内开槽,增加了工艺^[6-8]。针对这种情况,梁艳萍等^[9]发明了永磁电机的变截面低损耗自冷却跑道式绕组,其包括由一根连续平直线棒沿跑道形状绕制而成的 N 匝线圈,连续平直线棒包括一根空心扁股线和偶数根实心扁股线,空心扁股线内通入冷却介质,可以直接带走绕组产生的热量,大大提高了电机的散热效率。但是由于空心扁股线需要同时通水通电,增加了工艺难度和安全隐患。

综上,为矿用电机设计一种简单有效的冷却方式非常必要。本文提出一种新型的矿用电机冷却结构,即冷却水管和绕组并绕,一起下到槽内,水管内通入冷却介质,可直接带走绕组所产生的热量,达到直接散热的目的。

1 电机物理模型

1.1 电机基本参数

本文设计电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数	
参数名称	参数值
额定功率 P_N/kW	315
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	80.5
额定电压 U_N/V	1 140
额定频率 f_N/Hz	20.125
定子槽数 S	36
极对数 n_p	15

电机的二维模型如图 1 所示。

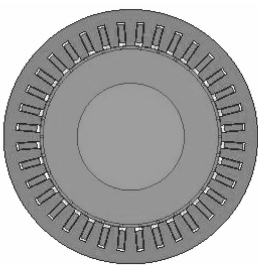


图 1 电机二维模型

为了便于仿真分析,作如下基本假设:

- (1) 定子绕组采用成型绕组线圈,端部不考虑实际连接,等效为线圈形式;
- (2) 各部分损耗保持不变;
- (3) 电流频率较低,忽略集肤效应影响。

1.2 热源计算

电机运行过程中,各部分产生的损耗作为热量的来源。电机损耗包括电机的绕组铜耗、铁耗、杂散损耗以及机械损耗^[10]:

$$P_l = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{me} + P_s \tag{1}$$

式中: P_l 为电机的总损耗; P_{Cu} 为电机的铜耗; P_{Fe} 为电机的铁耗; P_{me} 为电机机械损耗; P_s 为电机的杂散损耗。

绕组铜耗的计算中,忽略绕组中的涡流损耗的影响,其计算公式可表示为^[11]

$$P_{Cu} = 3I^2R \tag{2}$$

式中: I 为绕组中电流的有效值; R 为单相绕组的总电阻。

定子铁耗采用 Bertotti 分离计算模型^[12]:

$$P_{Fe} = K_h f B_m^2 + K_e f^2 B_m^2 + K_e f^{1.5} B_m^{1.5} \tag{3}$$

式中: f 为频率; B_m 为磁密幅值; K_h 、 K_e 、 K_e 分别为磁滞损耗系数、附加损耗系数、涡流损耗系数。

利用有限元方法得出电机损耗分布如表 2 所示。

表 2 电机损耗分布		W
参数名称	参数值	
铜耗	10 271	
铁耗	2 288	
杂散损耗	1 600	
机械损耗	1 575	

1.3 材料属性

电机各部分所采用的材料以及材料属性如表 3 所示。定子铁心所用材料是 DW465,材料的

传热系数具有各向异性的特点, z 轴方向热传导系数为 $4.33 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, x 、 y 轴方向热传导系数为 $39 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 。而绕组所采用的铜、永磁体所采用的 N35SH、冷却水管所采用的铝合金等材料的热传导属性都为各向同性。

表 3 电机各部分材料及属性

电机部分	材料	热传导系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$
定子铁心	DW465	39, 39, 4.33
转子铁心	DW465	39, 39, 4.33
绕组	铜	401
永磁体	N35SH	10
冷却介质	水	0.65
水冷管	铝合金	167

1.4 流体仿真控制方程

流体运动的控制方程包括质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律^[13-14]。

连续性方程反映流体运动过程中的质量守恒定律。对于水内冷永磁同步电机, 空气和冷却水在电机各种工况下均可视为不可压流体, 即流体的密度为常数, 则得到电机内部流体的质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为速度矢量 $\mathbf{u}$ 在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

Navier-Stokes 方程反映流体运动过程中的动量守恒定律。流体微元在 x 、 y 、 z 三个方向的动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (5)$$

式中: p 是微元体上的压力; ρ 为流体密度; τ_{xx} 、 τ_{yx} 和 τ_{zx} 是分子在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 对应微元体的体力, 如果体力只包含重力, 且 z 轴竖直向上, 则 $F_x = F_y = 0$, $F_z = -\rho g$ 。

以温度 T 为变量的能量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho c_s}{\partial t} + \frac{\partial (\rho c_s u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho c_s v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho c_s w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (6)$$

式中: c_s 为流体比热容; c_p 为定压比热容; k 为传热系数; S_T 为黏性耗散项。

2 水冷结构设计

2.1 冷却水道连接结构

本文主要研究的是针对电机绕组的冷却, 普通的周向或是轴向冷却方式主要是针对机壳散热, 而槽内水冷结构需要另外开槽, 增加了电机工艺步骤。本文提出一种新型的冷却结构, 冷却水管和绕组一起并绕, 直接与绕组一起下到槽内, 水管内通入冷却介质, 可直接带走绕组所产生的热量, 达到直接散热的目的。与普通的机壳水冷相比, 本文所提结构可以发挥更大的散热作用, 在很大程度上提高电机的散热能力, 也为之后系列化生产类似带有冷却结构的绕组提供参考。

电机模型槽内绕组线圈与冷却水管如图 2 所示, 由图 2 可知槽内有 5 根等效成型矩形线圈, 分别标号 I、II、III、IV、V。其中 4 根线圈通电为实心铜材质绕组线圈, 1 根线圈通水为铝合金材质空心冷却水管。针对不同应用场合可以采用不同的线圈作为冷却水管。

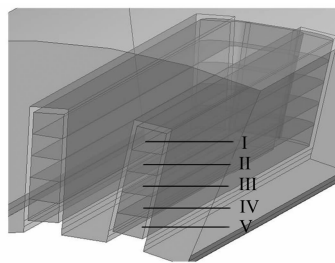


图 2 槽内绕组与冷却水管示意图

将电机的冷却水管首尾串联, 构成连通的冷却水管, 冷却管内通入冷却介质, 冷却介质由进水口流入, 再由出水口流出。结构如图 3 所示。

2.2 冷却水道模型结构

设计的三种水道结构分别如下所述。

第一种水道结构将 I 号线圈作为冷却水管, 将 II、III、IV、V 号作为绕组线圈, 如图 4 所示。

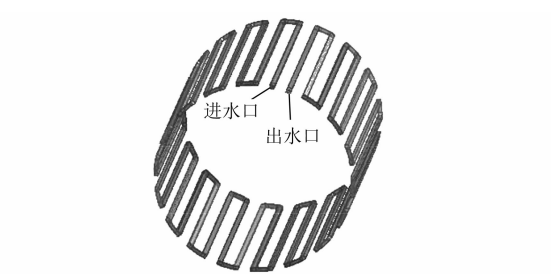


图3 串联式水道结构

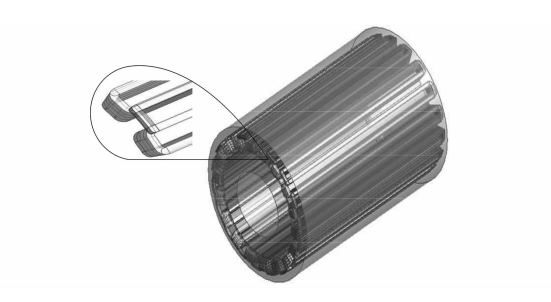


图4 第一种水道结构

第二种水道结构将Ⅲ号线圈作为冷却水管，将Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ号作为绕组线圈，如图5所示。

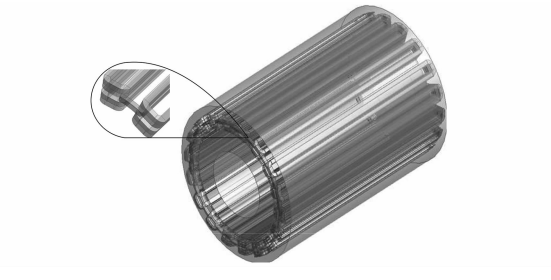


图5 第二种水道结构

第三种水道结构将Ⅴ号线圈作为冷却水管，将Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号作为绕组线圈，如图6所示。

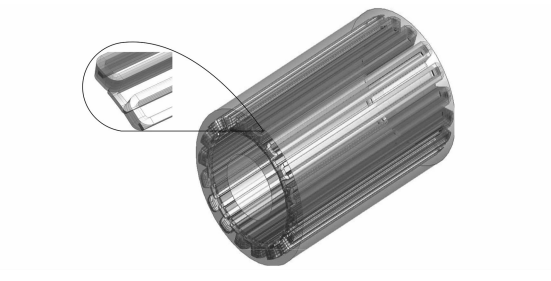


图6 第三种水道结构

2.3 不同冷却水道特点分析

上述提出的三种冷却结构的特点和其应用场合如表4所示。

表4 不同冷却结构形式的特点及应用场合

结构形式	特点	应用场合
第一种	兼顾绕组和定子机壳冷却	对机壳温升有要求的场合
第二种	绕组冷却效果好	绕组温升高的场合
第三种	兼顾转子永磁体冷却	永磁体容易高温失磁的场合

3 电机内场域仿真分析

3.1 各部分温度分析

根据上述分析，给出第一种水道结构在通入流速 2.0 m/s，初始温度为 26 ℃ 的水时电机各部分达到稳态时的温度分布。

定子铁心温度如图7所示，由图7可知定子圆周方向整体温度沿着冷却水的流向逐渐升高，最低温度在进水口附近，最低温度为 31.21 ℃，最高温度在出水口附近，最高温度为 50 ℃，整体趋势与理论分析吻合。

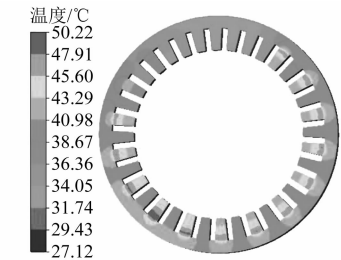


图7 定子铁心温度分布

绕组温度如图8所示。由图8可知绕组温度在圆周方向上沿逆时针逐渐升高，单个绕组竖直方向沿着槽底到槽口逐渐升高，最高温度为 65.10 ℃，最低温度为 28.20 ℃，绕组最外侧温度最高为 45.50 ℃。温度低的原因主要是与冷却管直接接触，带走了大部分热量。仿真分析验证了此种冷却方式的有效性。

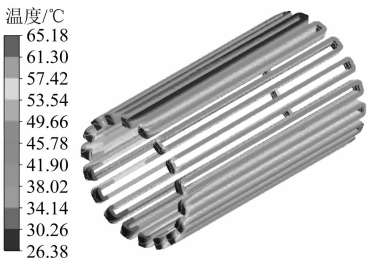


图8 绕组温度分布

冷却水管温度如图9所示。由图9可知冷却

水管的温度变化趋势与绕组相似,进水口附近温度低,最低温度为 $26.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,出水口附近温度高,最高温度为 $41.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

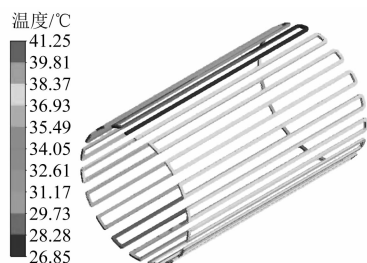


图9 冷却水管温度分布

冷却水温度如图 10 所示。由图 10 可知冷却水温度变化趋势沿水流方向逐渐升高,进水口温度最低为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,出水口温度最高为 $39.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

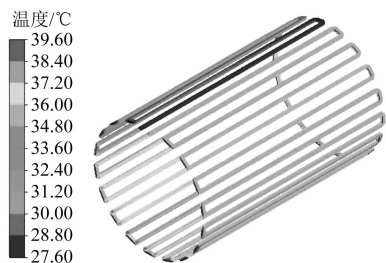


图10 冷却水温度分布

永磁体温度如图 11 所示。由图 11 可知永磁体温度呈现两头低中间高的趋势,这是因为永磁体端面与端腔内空气接触,能起到一定的散热作用。最高温度为 $57.50\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $50.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

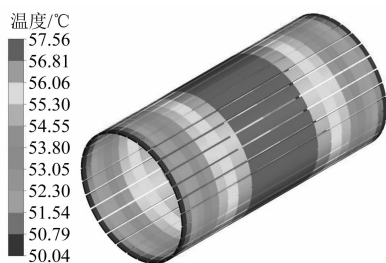


图11 永磁体温度分布

冷却水流速如图 12 所示。由图 12 可知水流速基本稳定在 2 m/s 左右,这是因为水道的沿程阻力较小。在水管转向处由于水道截面变化,速度有所增加,最高速度为 4.8 m/s 。

3.2 水流速对绕组温度影响分析

水流的速度会对电机的散热效果产生影响,

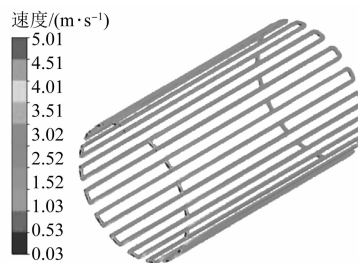


图12 冷却水水流分布

对于本文所提的 315 kW 电机而言,热量主要都是来源于绕组的铜耗,分析水流对绕组的温升影响即可反映对电机整体温升的影响。绕组的温度受水流速的影响如图 13 所示。由图 13 可知在不给水流速的情况下,电机的温升非常大,在 1.5 m/s 之前,水流速对温升的影响比较大,在 1.5 m/s 之后,水流速对电机温升影响趋于平稳。

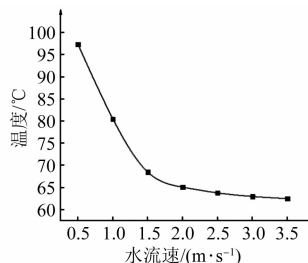


图13 水流速对绕组温度的影响

3.3 三种冷却结构对电机散热的影响

三种冷却结构对电机各部分温升的影响如图 14 所示,由图 14 可知第一种结构定子铁心温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,绕组温度为 $65.10\text{ }^{\circ}\text{C}$,永磁体温度为 $57.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;第二种结构定子铁心温度为 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$,绕组温度为 $64.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,永磁体温度为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$;第三种结构定子铁心温度为 $54\text{ }^{\circ}\text{C}$,绕组温度为 $67\text{ }^{\circ}\text{C}$,永磁体温度为 $51.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可知冷却绕组越靠近槽底,对定子机壳的散热效果越好;越靠近槽口,对永磁体的散热效果越好;第二种结构对绕组的冷却效果比其他两种结构好。

3.4 绕组并绕水冷与机壳水冷对比分析

绕组并绕冷却结构和机壳内螺旋水套冷却结构的冷却效果对比如图 15 所示。由图 15 可知绕组并绕冷却结构稳态时定子铁心最高温度为 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$,绕组最高温度为 $64.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,永磁体最高温度为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。机壳内螺旋水套冷却结构稳态时定子

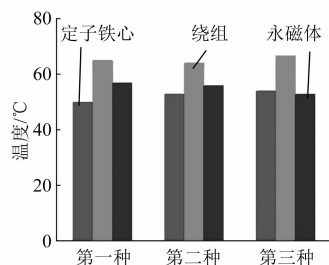


图 14 不同冷却结构对各部分温度的影响

铁心最高温度为 60 °C, 绕组最高温度为 72.3 °C, 永磁体最高温度为 64 °C。

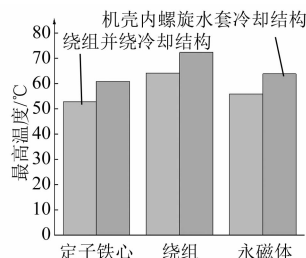


图 15 两种冷却结构各部分最高温度对比图

4 结 语

本文提出了一种冷却水管与绕组并绕的新型冷却结构,以一台 315 kW 集中绕组永磁电机为例,建立了电机的三维模型,并基于 CFD 方法对电机进行温度场分析。得出如下结论:

(1) 提出一种新的冷却思路,可以为大型集中绕组电机提供较好的冷却效果,使电机整体的温升减小,为之后高功率密度电机提升散热能力提供方法参考。

(2) 电机绕组的温度随着水流速的升高而逐渐降低,达到 2 m/s 的时候继续加大水流速对电机的温升影响趋于稳定。

(3) 对比三种冷却方式,第二种水道结构可以兼顾到绕组以及永磁体的冷却,对电机的散热效果更好。

【参 考 文 献】

[1] 杨萌. 起重用低速大扭矩永磁同步电动机研究与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
[2] 和伟超. 电动汽车用永磁同步电机水冷系统设计与温升分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[3] 孙立柱. 低速大转矩永磁电动机电磁场与温度场数值分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
[4] 王雪斌. 矿用永磁直驱电机及其冷却系统设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
[5] TANG W, WU S, AN Z, et al. Cooling system design and thermal analysis of multibrid permanent magnet wind generator[C]//International Conference on Electric and Control Engineering, 2010: 3499.
[6] ISHAK D. Low-speed high-torque permanent magnet brushless machines having fractional number of slots per pole[D]. Sheffield: The University of Sheffield, 2005.
[7] YANG K, FENG Y. Design or novel spiral magnetic poles and axial-cooling structure of outer-rotor PM torque motor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 838.
[8] ZARKO D, BAN D, LIPO T A. Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1828.
[9] 梁艳萍, 刘佳. 永磁电机的变截面低损耗自冷却跑道式绕组: CN113595288A[P]. 2021-11-02.
[10] DUBAS F, ESPANET C. Analytical solution of the magnetic field in permanent-magnet motors taking into account slotting effect: no-load vector potential and flux density calculation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(5): 2097.
[11] ZHU Z Q, WU L J, XIA Z P. An accurate subdomain model for magnetic field computation in slotted surface-mounted permanent-magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(4): 1100.
[12] FAN J X, ZHANG C N, WANG Z F. Thermal Analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle[C]//International Conference on Electrical Machine and Systems, 2010: 1024.
[13] 丁树业, 郭保成, 冯海军, 等. 变频控制下永磁同步电机温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1368.
[14] 郭伟, 张承宁. 车用永磁同步电机的铁耗与瞬态温升分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 83.