

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.020

矿用皮带机用直驱永磁电机冷却系统研究

韦 强,冯桂宏,张炳义

(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对矿用皮带机直驱永磁电机温升高和散热困难的问题,对轴向三角钢型水道、轴向直槽型水道和径向螺旋形水道的冷却效果进行了对比分析。首先给出了电机电磁设计的基本方案和3种水路结构的物理模型;采用场路结合的计算方法,对电机的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗、杂散损耗及风磨耗进行了计算;建立了3种水道结构的三维仿真模型,得到了电机在不同冷却水道下的温度分布;进行了样机温升实验,采集了电机额定负载下温升实验数据,并与仿真结果进行了对比。研究表明:实验数据与仿真数据吻合良好,验证了仿真的正确性;三角钢型冷却水道冷却效果最佳,直槽型冷却水道冷却效果较差。

关键词:永磁直驱;冷却水道;温升

中图分类号:TM3;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0873-06

Cooling system of direct drive PMSM for mining belt conveyor

WEI Qiang, FENG Gui-hong, ZHANG Bing-yi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problem of high temperature rise and difficult cooling of direct drive permanent magnet motor for mining belt conveyor, the cooling effect of axial triangular steel channel, axial straight channel type and radial spiral channel was compared and analyzed. Firstly, the basic scheme of the electromagnetic design of the motor and the physical model of the three waterway structures were given. The calculation method of field and circuit was used to calculate the copper loss, iron loss, permanent magnet eddy current loss, stray loss and wind wear of the motor. Three-dimensional simulation models of waterway structures were established. The temperature distribution of the motor under different cooling channels was obtained. The temperature rise test was performed, the temperature rise experimental data under the rated load of the motor was collected and compared with the simulation results. The research results show that the experimental data is in good agreement with the simulation data, which verifies the correctness of the simulation. The cooling effect of the triangular steel cooling channel is the best, and the cooling effect of the straight cooling channel is poor.

Key words: direct drive permanent magnet motor; cooling channel; temperature rise

0 引 言

矿用皮带机低速大转矩永磁电机具有功率密度高、效率高、可直接与负载或原动机相连接的优点,广泛应用于煤矿行业。但由于其功率密度高,单位体积损耗大,加之全天候运行且矿下环境温度高,电机散热困难,容易造成电机温升过高,严重时将会导致永磁体发生不可逆退磁,严重影响电机的安全运行。因此对

电机冷却水路的合理设计和有效分析,对矿用皮带机安全运行具有十分重要的意义。

目前已经有很多专家学者对永磁电机冷却水路及其流体特性进行了研究。文献[1]基于流体力学和传热学的相关知识,对轴向水路和螺旋型水路冷却结构进行了对比,综合考虑了散热和流体流阻对电机冷却系统的影响;文献[2]对电机的冷却系统采用了“V”型水路结构,解决了流体在冷却管道内分布不均问题,

使电机温升分布均匀;文献[3]将有限公式法应用到电机温升计算中,并研究了冷却介质流量与冷却介质温度对电机温升的影响;文献[4]对一台低速永磁电机的冷却系统进行了设计,采用了轴向螺旋形水路结构,有效地降低了电机的温升;文献[5]针对一台兆瓦级别高速永磁电机采用了风冷与定子外水冷相结合的冷却系统,其中风冷系统采用了轴向径向相结合的混合通风方式,并采用了 Fluent 软件计算了通风系统内的流体分布。鲜有关于矿用低速大转矩永磁电机的温度场研究。

当前矿用皮带机的机壳冷却水道主要有直槽水道和径向螺旋型水道两种结构,但是这两种结构的散热性能并不能满足矿用电机工作时间长、环境温度高的要求。径向螺旋型水道平滑,水流阻力损失小,但由于进出水口温度的差异,会使电机两端产生温度梯度。轴向水道可以很方便地把进出水口设计在电机的同一端,避免了由于进出水口温差而产生的电机两端的温度梯度,散热比较均匀,但是轴向 Z 字型水道的水流阻力偏大。本研究将结合实际要求,设计满足电机散热需求和水阻损失的三角钢型水道,对这 3 种结构的水道进行仿真对比。

本研究分别建立三角钢型水道、直槽型水道、螺旋型水道结构的物理模型,采用场路结合的计算方法,对额定工况下的铜耗、铁耗以及永磁体涡流损耗进行计算,应用 Fluent 软件对 3 种水路结构进行详细的分析,通过样机实验以验证仿真结果的正确性。

1 冷却水道的物理模型

本研究矿用皮带机为全封闭的水冷电机,电机主要依靠定子与机壳换热进行散热,机壳内装有冷却水道。

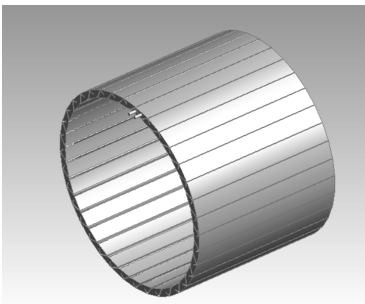
通过 Matlab 永磁电机电磁计算程序,得到电机主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

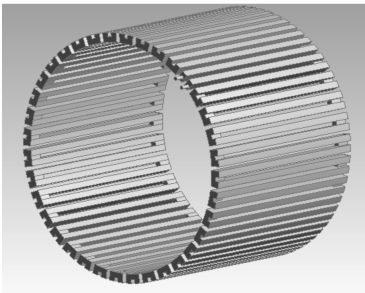
参数	数值
额定功率/kW	200
额定转速/(r·min ⁻¹)	60
槽/极数配合	72/60
定子铁心外径/mm	1 220
铁心计算长度/mm	700
气隙长度/mm	2
效率/(%)	96.1
功率因数	0.97

根据冷却水道的不同,把冷却水路分为:三角钢型水道结构、直槽水道结构、螺旋水道结构。

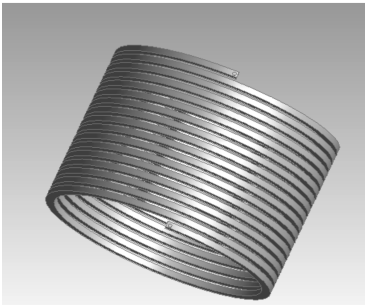
冷却水道物理模型如图 1 所示。



(a) 三角钢型水道结构



(b) 直槽水道结构



(c) 螺旋水道结构

图 1 冷却水道物理模型

三角钢型水道用 36 个三角钢均匀分布焊接在机座套筒上共形成 72 个串联水道,其中入水口和出水口之间的角钢侧面不开口,入水口和出水口在端板上。

直槽水路结构与三角钢型水道相比,三角钢结构改成矩形钢结构,水道数量相同,矩形钢的宽度为 12 mm,入水口和出水口在端板上,在入水口和出水口之间的矩形钢侧面不开口。

螺旋型水道结构的当量直径和三角钢型水道相同。螺旋型水路中冷却水进入水道后沿着平行分布的隔板在电机的轴向流动,进、出水口一般设计在同侧。径向水路中冷却水进入水道后沿着机壳的圆周方向螺旋前进。

2 电机热源计算及仿真

2.1 铁耗计算

永磁同步电动机的铁耗主要分为磁滞损耗和涡流损耗,计算模型通常采用磁密波形为正弦的三项式。

但是电机内部波形非正弦波,由逆变器产生的电流时间谐波不可忽略。因此,考虑谐波磁场影响的铁耗计算模型为^[6]:

$$P_{\text{fe}} = \sum_{k=1}^{\infty} [k_h(k_f)B_k^\alpha + k_e(k_f)^2B_k^2 + k_\alpha(k_f)^{1.5}B_k^{1.5}]$$

(1)

式中: α —磁滞损耗计算参数(与磁密有关),一般取 2(范围 1.6 ~ 2.2); B_k —第 k 次谐波幅值; k_h —磁滞损耗系数; k_α —附加损耗系数; f —基波频率。

2.2 铜耗计算

对于永磁电机,铜耗一般由 3 部分组成:基本铜耗,由并联股线引起的环流铜耗和集肤效应^[7],即:

$$P_{\text{cu}} = \left(1 + (k_r + k_s) \left(\frac{nb}{b_s} \frac{f_n}{50}\right)\right) I_\varphi^2 R_s$$

(2)

式中: P_{cu} —铜耗; k_r —并联股线间换流系数; k_s —涡流损耗系数; I_φ —相电流。

2.3 永磁体涡流损耗计算

永磁体涡流损耗计算可以通过涡流密度计算,即:

$$P_{\text{pm}} = \sum_v \int \frac{|J_v|^2}{2\sigma} dV$$

(3)

式中: P_{pm} —永磁体涡流损耗; J_v —第 v 次谐波涡流幅值; V —永磁体的体积。

2.4 杂散损耗和风磨耗计算

杂散损耗包括表面损耗和脉振损耗,前者是由气息谐波磁通相对于齿或者磁极铁芯表面移动而在其表面产生的涡流损耗;后者是该谐波磁通相对于齿移动,使进入齿中的谐波磁通脉振,因而在齿中产生的涡流和磁滞损耗。杂散损耗大致与引起损耗的磁动势谐波磁通密度的平方成正比。而磁动势与电流成正比。永磁电机内部磁场分布较为复杂,杂散损耗计算难度大,因此可粗略计算杂散损耗:

$$P_s = \left(\frac{I_1}{I_N}\right)^2 p_{sN}^* P_N$$

(4)

$$I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

(5)

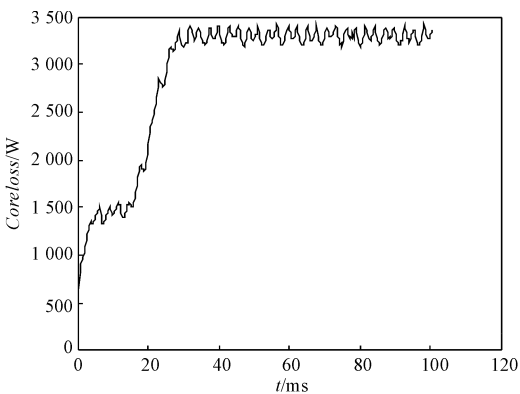
式中: P_s —杂散损耗; I_1 —定子电流; I_N —额定电流; p_{sN}^* —可参考实验数值或根据经验给定,这里取 0.8%。

风磨耗包括风扇及通风系统的损耗,往往根据同结构同转速系列电机来给定。参考同类型同批次电机的实验结果,给出电机风磨耗为电机额定功率的 0.4%。

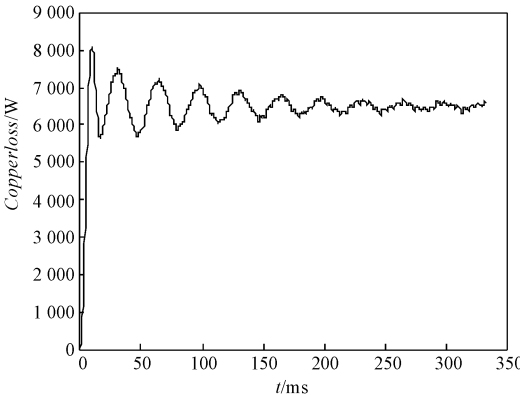
2.5 损耗仿真

本研究在 Maxwell 中搭建电机二维模型,采用场

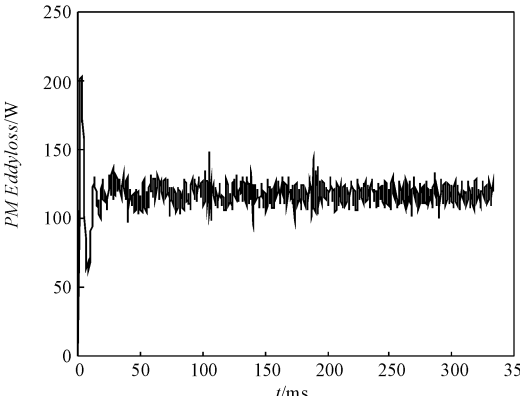
路结合的方法,得到了电机额定负载情况下的电机铁耗曲线(图 2(a))、铜耗曲线(图 2(b))和永磁体涡流损耗曲线(图 2(c)),损耗曲线图如图 2 所示。



(a) 电机铁耗曲线



(b) 电机铜耗曲线



(c) 永磁体涡流损耗曲线

图 2 损耗曲线图

综上所述,电机各部分损耗如表 2 所示。

表 2 电机各部分损耗

参数	数值
铜耗 /W	6 497.79
铁耗 /W	3 420.21
杂散损耗 /W	2 213.84
风摩耗 /W	800.00
永磁体涡流损耗 /W	121.32

3 三维温度场数值计算

3.1 温度场计算的约束条件

本研究重点研究不同水路结构下永磁电机的传热特性,为了简化求解过程,基本的约束条件如下:

(1) 假设水冷系统内部介质的物理特性不随温度的变化而变化;

(2) 电机各部分损耗值按照额定工况下二维仿真结果为准,并且全部损耗作为热源施加于机壳内表面,全部损耗均转化为热量,被冷却水强迫对流带走;

(3) 冷却水入口边界条件选择速度入口,入口速度为 $2.8 \text{ m}^3/\text{h}$,出口压力为 1 个标准大气压,初始的环境温度和水文均设置为 300 K 。

电机部分求解域模型如图 3 所示。

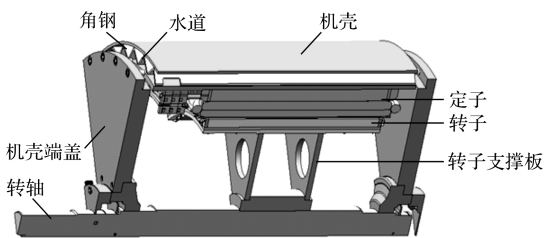


图 3 电机部分求解域模型

3.2 温度场计算的边界条件

(1) 对于各向同性介质,导热系数为常数。由传热学基本理论,在直角坐标系下解决发电机稳态温度场可归结为以下边界值问题^[8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) = -q_v \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — x, y, z 方向上的导热系数; q_v —热源密度,是电机各部件单位体积产生的损耗; α —对流散热系数; T_f —周围流体温度。

(2) 气隙的处理与各部分散热系数的确定。电动机空气流动,流体场与固体场耦合会增加温度场的计算难度,本研究将气隙中流动的空气等效成静止的流体,按以下公式计算等效导热系数^[9]:

$$R_e = \frac{v_r \delta}{\gamma} \quad (7)$$

式中: v_r —转子外径线速度; δ —气隙厚度; R_e —雷诺数; γ —空气运动粘度系数。

临界雷诺系数为:

$$R_{ecr} = 41.2 \sqrt{\frac{D_{il}}{2\delta}} \quad (8)$$

式中: D_{il} —定子铁心内径。

当 $R_e < R_{ecr}$ 时,气隙中空气的流动为层流,等效导热系数近似为空气的导热系数,当 $R_e > R_{ecr}$ 时,气隙中的空气流动为湍流,等效导热系数为:

$$\begin{cases} \lambda_{eff} = 0.069 \eta^{-2.9084} \cdot R_e^{0.4614 \ln(3.33361\eta)} \\ \eta = \frac{D_2}{D_{il}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_2 —转子铁心外径。

(3) 与流体性质、流动模式和传热表面条件相关的对流传热系数 α 为^[10]:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{Nuk}{D} \\ Pr_x = \frac{\eta c_p}{k} \\ R_e = \rho u \frac{d}{\eta} \end{cases} \quad (10)$$

式中: k —流体的导热系数,本研究选 0.58 ; N_u —湍流模型中的努谢尔特数。

$$d_e = \frac{4S}{L} \quad (11)$$

$$Nu = 0.012(R_e^{0.87} - 280)Pr_x^{0.4} \cdot$$

$$\left[1 + \left(\frac{d_e}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \left(\frac{Pr_x}{Pr_w}\right)^{0.11} \quad (12)$$

式中: L —润湿周长; l —管道长度; Pr_w —由水温确定的流体普朗特数。

将等式(9,10)代入式(8),可得 α 的表达式为:

$$\alpha = \frac{0.012kL}{4S} \left[\left(\frac{\rho u d}{\eta} \right)^{0.87} - 280 \right] Pr_x^{0.4} \cdot \left[1 + \left(\frac{4S}{lL} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left(\frac{Pr_x}{Pr_w} \right)^{0.11} \quad (13)$$

3.3 温度场计算结果

根据理论计算,得到三角钢型水道理论计算参数如表 3 所示。

表 3 三角钢型水道理论计算参数

名称	数值	名称	数值
水道筋厚度/m	0.02	进出水温差/($^{\circ}\text{C}$)	2.5
水道筋高度/m	0.04	水带走能量/kW	23.65
水道筋数量	36	壁与水温差/($^{\circ}\text{C}$)	1.85
进水口压强/MPa	0.339	冷却水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	8.18

根据上述假设与边界条件,求解电机整机的温服分布和永磁体的温度分布(三角钢型水道为例)。

三角钢型水道电机整机温度云图如图 4 所示。

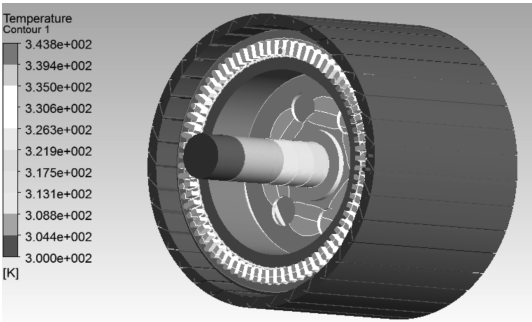


图 4 三角钢型水道电机整机温度云图

从图 4 中可以看出:电机温度最高的部位是转子部分,绕组是次热部位。主要是因为虽然绕组的损耗较大,但由于定子靠近水冷系统,通过水冷系统带走了定子铁心和绕组的大部分热量,定子达到了很好的散热效果。而转子散热主要是通过与定子换热,散热效果差,所以温升较高。电机的整体温度分布符合水冷电机散热规律。电机的最高温度为 343.8 K,位于电机转子端部位置,最低温度为 300 K,位于电机机壳部分。

三角钢型水道电机永磁体温度云图如图 5 所示。

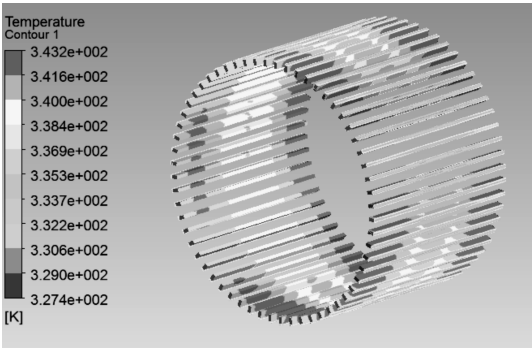


图 5 三角钢型水道电机永磁体温度云图

从图 5 中可以看出:永磁体的温度分布与转子的温度分布相类似,主要表现在端部的温度较中间部位的温度高,永磁体的最大温升出现在内层端部位,其值为 43.2 K。

在保证其他条件不变的情况下,只改变水道结构,对另外两种水路进行温度场仿真得出仿真结果。

3 种水道结构冷却效果对比如表 4 所示。

表 4 3 种水道结构冷却效果对比

	冷却水出口温度/K	绕组最高温度/K	定子绕组平均温升/K	转子表面平均温升/K
三角钢型	303.96	335.41	29.85	37.57
直槽型	304.33	337.08	33.23	38.96
螺旋型	303.96	336.41	31.08	38.35

从表 4 中可以看出:3 种方案的转子表面的平均

温升相差不是很大,定子的温升相差较大,这是由于定子比转子更靠近冷却水路,冷却水路主要带走的是定子的损耗。三角钢型水道的定子绕组的平均温升比直槽水道的定子绕组的平均温升小 3.38 K,比螺旋水道的定子绕组的平均温升小 1.23 K,由此可知三角钢型水道冷却效果是最好的。方案 2 的冷却效果是最差的,主要是因为直槽水道中,水流在电机轴向方向上沿平行分布隔板流动,在水路中直角弯比较多,水流中阻力较大。三角结构相对于矩形结构有利于增大冷却水流和水道的接触面面积,因此三角钢型水道的冷却效果更佳。

4 实验及结果分析

本文采用冷却效果最好的三角钢型水路 of 的机壳制作样机,进行实验。

4.1 温升实验

将样机与扭矩传感器连接,再通过齿轮箱与异步电机连接,异步电机作为负载。

三角钢型水道电机绕组温度实验数据如表 5 所示。

表 5 三角钢型水道电机绕组温度实验数据

时间	温度/(℃)				
	绕组 U	绕组 V	绕组 W	进水口	出水口
8:40	27.0	27.4	27.3	25.5	25.7
9:40	46.8	47.8	46.2	26.1	27.1
10:40	47.8	50.4	47.1	26.4	27.9
11:40	53.3	55.6	52.0	26.8	28.51
12:40	59.1	61.6	57.4	27.32	29.38
13:40	59.2	61.4	58.2	27.35	29.56

从表中可以看出,绕组最终稳定温度为 U 为 59.2℃、V 为 61.4℃、W 为 58.2℃,均在合理范围内。

三角钢型水道电机转子温度实验数据如表 6 所示。

表 6 三角钢型水道电机转子温度实验数据

位置	平均温度/(℃)
轴伸端	65
中间	62.5
非轴伸端	65
永磁体温度	69

从表 6 中可知:永磁体在 30℃ 环境温度下的温升为 39 K,与仿真温升 37.57 K 相差不大,仿真结果在合理误差范围内。

4.2 负载实验

三角钢型水道电机负载实验数据如表 7 所示。

表 7 三角钢型水道电机负载实验数据

负载率/%	电压/V	电流/A	效率/(%)	功率因数
100	1 140	112.4	96.8	97.1
80	1 141	85.6	96.5	96.9
60	1 139	62.2	96.1	96.1
40	1 142	41.9	95.7	95.6
20	1 143	21.1	95.4	95.2

由表 7 可以看出;当负载率变化时,电机效率和功率因数都大于 0.95,与理论设计值比较接近,证明了场路结合计算方法的准确性。

5 结束语

针对矿用皮带机散热困难的问题,本研究建立了 3 种水路结构的物理模型,采用场路结合的方法对电机内部损耗进行了计算,并以此为热源对在额定运行时电机的温度场进行了仿真计算,得到了不同冷却水道条件下矿用皮带机的温度分布规律,与实验数据进行对比,得出以下结论:

- (1)通过对三角钢型水道、直槽水道、螺旋水道 3 种冷却方式的温度场计算,在冷却水流速、流量相同的条件下,三角钢型水道的冷却效果最佳,直槽水道冷却效果最差;通过温升实验验证了温度场理论计算和仿真的准确性。
- (2)理论研究结果和样机试验结果对比表明:该永磁电机的效率、功率因数高,冷却效果好,可以广泛应用到矿用皮带机及其它低速大转矩系统中。

参考文献 (References):

[1] 梁培鑫,柴 凤,李翠萍. 水冷电机水路设计的研究[J].

微电机,2013,46(5):1-4.

[2] 和伟超. 电动汽车用永磁同步电机水冷却系统设计及温升研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2013.

[3] 佟文明,舒圣浪,朱高嘉,等. 基于有限公式法的水冷永磁同步电机三维温度场分析[J]. 电工电能新技术,2016,35(7):36-41.

[4] TONG W M, TANG R Y, AN Z L. Water cooling system design and thermal analysis for low speed permanent magnet machines[C]. 2011 International Conference on, Electrical Machines and Systems, Beijing:IEEE,2011.

[5] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 兆瓦级高速永磁电机通风系统设计与转子表面风摩耗[J]. 电机与控制学报,2014,18(2):50-55.

[6] CHEN P, TANG R, TONG W, et al. Analysis of losses of permanent magnet synchronous motor with PWM supply [C]. Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou:IEEE,2014.

[7] 王海荣,吴建华. 基于场路耦合的变频感应电机铁耗计算[J]. 机电工程,2014,31(2):203-207.

[8] 李伟力,陈婷婷,曲凤波,等. 高压永磁同步电动机实心转子三维温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(18):55-60.

[9] 谢 颖,辜承林. 笼型感应电动机三维全域温度场计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(36):96-101.

[10] 程树康,李翠萍,柴 凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):82-90.

[编辑:程 浩]

本文引用格式: