2021年9月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)

Sep. 2021

## 车用永磁同步电机磁热耦合分析

权晨龙1, 冯国胜1, 郝长生1, 张 伟2, 张艳明2

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043;2. 河北电机股份有限公司,河北 石家庄 050000)

摘要:随着电动汽车对永磁同步电机性能的要求越来越高,进行该类电机的磁热耦合分析尤为必要。以一台 40 kW 物流车用永磁同步电机为研究对象,根据电机的结构参数在RMxprt 中建立了电机的分析模型,利用有限元方法(FEM)分析电机的磁场,并计算电机的损耗。采用磁热耦合分析方法分析电机的温度场。将电机的损耗等效为电机温度场的热源,流固耦合仿真了该电机在额定工况下电机的温度场分布情况,为电机设计提供了重要的理论依据。

关键词:永磁同步电机;磁热耦合分析;电机损耗;流固耦合 中图分类号:TM341 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2021)03-0094-06

#### 0 引言

传统的汽车产业在向绿色环保方面转变,电动汽车成为汽车工业的研发焦点,现在全世界大部分的汽车生产厂家都在研究新能源汽车。与此同时,国内对电动汽车的需求与日俱增,相关产业呈现快速发展的趋势。研究和开发高性能永磁电机对我国电动汽车产业化非常有益,事实上永磁同步电机已成为新一代电动汽车的最佳选择[1]。电动汽车对永磁同步电机的外形尺寸、功率、振动噪声等有特殊的要求,车用电机工作环境恶劣,当温升严重时会导致线圈绝缘层损坏使其失去绝缘的作用,导致永磁体磁通密度的降低,甚至出现永久性退磁现象;定转子受热膨胀,电机结构尺寸发生改变,电机运行精度下降,这些不良的后果都会影响电机的性能,降低电机的可靠性[2]。因而对电机进行磁热耦合分析很有必要,在电机制造前能够帮助设计人员评估电机设计的合理性,避免不必要的损失。

文献[2]以表贴式外转子为研究对象,采用稳态温度场和空气对流散热,研究了永磁同步电机温度场。文献[3]以高速爪极式电机为研究对象,根据有限元分析对其进行电机的热分析。文献[4]提出一种热网络法研究电机温度场的方法,对轮毂电机样机进行了分析。上述研究方法中,没考虑到当下永磁同步电机采用最多的水冷的冷却方式。采用双向耦合计算结果精确,但计算量成倍增长,计算效率低,研发周期长,在实际应用中有很多的局限。

研究的电机采用水冷的冷却方式,首先在电磁仿真软件 Maxwell 2D 中建立了电机的电磁有限元模型<sup>[5-6]</sup>,并对电机进行电磁场的分析,仿真计算得到电机的损耗,将损耗以热源的方式耦合到 Fluent 软件三维模型的相应位置,采用三维模型能够得到更真实的电机温度场分布,单向耦合能更有效地得到电机的温度场分布情况,节省计算机资源。

#### 1 电机热性能参数的确定

#### 1.1 电机基本参数

以一台 40 kW 永磁同步电机为研究对象,该电机的基本参数如表 1 所示。

基金项目:石家庄市科研计划项目(201080191A);河北省省级科技计划项目(20312203D)

作者简介:权晨龙(1995—),硕士研究生,研究方向为车辆现代设计方法。 $E\text{-mail}:1245569432@\,\mathrm{qq.\,com}$ 

权晨龙,冯国胜,郝长生,等. 车用永磁同步电机磁热耦合分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(3):94-99.

表 1 电机的基本参数

额定	额定	额定转矩/	额定转速/	磁极	永磁体	定子	定子厚	转子外	定子内	气隙长	绝缘材料
功率/kW	电压/V	$(N \cdot m)$	$(r \cdot min^{-1})$	数	材料	槽数	度/mm	径/mm	径/mm	度/mm	温度等级
40	220	109	3 500	8	N38UH	48	110	153.5	155	1.5	Н

Maxwell 2D 计算得到的额定工况下永磁同步电机的磁密云图和磁感线分布图如图 1 和图 2 所示。

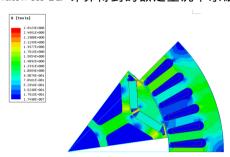


图 1 电机的磁密云图

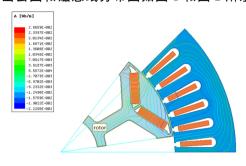


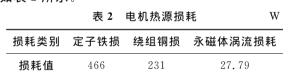
图 2 电机的磁感线分布图

#### 1.2 热源计算

永磁同步电机的电磁损耗主要包括定转子铁芯损耗、铜耗和永磁体涡流损耗,电磁损耗是轮毂电机的主要热源,其中永磁同步电机永磁体中的涡流损耗相对于定子中的铜耗和定转子铁芯中的铁芯损耗而言较小,一般在多数情况下可以忽略它对电机温升的影响。但当电机高速运转时,永磁体感应产生涡流

损耗,造成永磁体温升,影响永磁体的性能,严重会引起退磁和去磁的现象。通过电磁分析软件,额定工况下得电机定子铁损的损耗分布,能够得出定子铁芯的损耗在齿顶位置最高,如图 3 所示。

通过电磁分析软件得电机定子铁损、绕组铜损和永磁体涡流损耗,绕组损耗所占的比例为 31.9%,数值如表 2 所示。



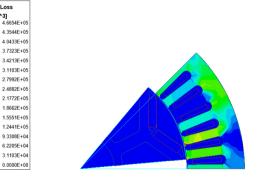


图 3 额定工况下定子损耗分布云图

#### 2 电机模型简化

#### 2.1 定子绕组简化

在永磁同步电机热分析中,绕组和绕组表面绝缘层很难建立精确的有限元模型,故而将绕组等效为一整块导体,将绝缘层按体积等效为包裹在导体外侧的包围层,并和导体、定子槽紧密配合。如图 4 所示。

根据传热学定理[7],由以下公式计算等效导体和绝缘层的物性参数。

$$\lambda = (d_1 + d_2 + d_3) \left( \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right)^{-1}$$
 (1)

$$d_s = d_1 + d_2 + d_3 \tag{2}$$

$$\rho = \frac{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + \rho_3 v_3}{v} \tag{3}$$

$$C = \frac{c_1 \rho_1 v_1 + c_2 \rho_2 v_2 + c_3 \rho_3 v_3}{\rho v}$$
 (4)

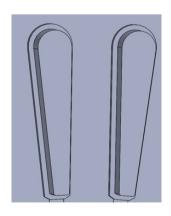


图 4 定子绕组简化模型

式中 $,d_1$  为定子槽绝缘材料的厚度 $;d_2$  为定子与定子绝缘材料之间的气隙厚度 $;d_3$  为定子绕组的绝缘漆厚度 $;\rho_1,\rho_2,\rho_3$  分别为对应的绝缘体密度 $;c_1,c_2,c_3$  分别为相应的绝缘体比热容 $;v_1,v_2,v_3$  分别为相应的绝缘体体积。计算得等效绝缘层的厚度和物性参数如表 3 所示。

表 3 定子绕组等效物性参数

物性参数	厚度 $d_s/\mathrm{mm}$	导热系数 λ/((W(m•K) <sup>-1</sup> )	密度 ρ/(kg • m <sup>-3</sup> )	比热容 C/(J (kg • K) <sup>-1</sup> )
等效绝缘层属性	0.76	0.25	1 200	1 800
等效导体属性	_	386	8 954	383.3

#### 2.2 定子铁芯的简化

定子铁芯是由多层硅钢片经过叠压而成,结构比较复杂。可以将铁芯叠片等效成具有轴向、径向和切向不同导热性能的结合体<sup>[8]</sup>,简化模型如图 5 所示。

定子铁芯各方向的导热系数可由下列公式得到

$$\lambda_{1} = (\delta_{Fe} + \delta_{in}) \left( \frac{\delta_{Fe}}{\lambda_{Fe}} + \frac{\delta_{in}}{\lambda_{in}} \right)^{-1} = \left( \frac{K_{Fe}}{\lambda_{Fe}} + \frac{1 - K_{Fe}}{\lambda_{in}} \right)^{-1}$$
 (5)

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{\delta_{Fe} \lambda_{Fe} + \delta_{in} \lambda_{in}}{\delta_{Fe} + \delta_{in}} = K_{Fe} \lambda_{Fe} + (1 - K_{Fe}) \lambda_{in}$$
 (6)

$$K_{Fe} = \frac{\delta_{Fe}}{\delta_{Fe} + \delta_{in}} \tag{7}$$

式中 $,\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$  分别为电机铁芯叠片在轴向、径向和切向上的导热系数 $,\delta_E,\delta_B$  分别为硅钢片和绝缘层的厚度 $,\lambda_E,\lambda_B$  分

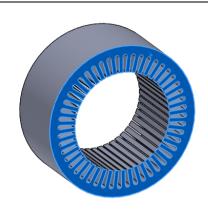


图 5 定子铁芯简化模型

别为硅钢片和绝缘介质的导热系数, $K_{Fe}$ 为硅钢片的叠压系数,其值为 0.97。计算得到的定子铁芯简化模型参数如表 4 所示。

表 4 定子铁芯等效模型参数

类别	等效导热系数 $\lambda/((W(m \cdot K)^{-1})$	等效密度 $ ho/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3})$	等效比热容 C/(J (kg • K) <sup>-1</sup> )
绝缘介质	0.27	1 314	1 324
硅钢叠片	40	427	7 721
等效值	λ <sub>1</sub> 5. 27		
	$\lambda_2$ 39.02	7 447	520
	$\lambda_3$ 39.02		

在温度场中将不必要的部件进行了省略简化,假设各部件之间紧密接触,简化后的模型如图 6 所示。

#### 3 电机流场仿真

电机的磁热耦合有 2 种,单向耦合和双向耦合。所谓单向耦合是指数据从第一个求解器传递到第二个求解器,不会逆向传递,优点是节省计算机资源,计算速度快,效率高。双向耦合是指数据会双向传递,第一个求解器的数据传递到第二个求解器,同时第二个求解器的数据也会反过来影响第一个求解器,这样相互影响直到最后满足收敛条件。双向耦合的计算结果精确,但计算量成倍增长,计算效率低。因此,本设计采用单向耦合。

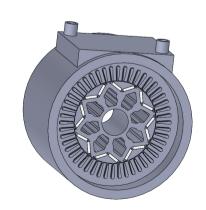


图 6 简化模型图

#### 3.1 电机热源的添加

电机的热源有3种,定子绕组的铜耗、定子的铁芯损耗和永磁体的损耗,通过体热源的方式添加,将

绕组的铜损、定子铁芯和永磁体的损耗添加到相应的三维体模型上,公式如下

$$Q = \frac{W_q}{V} \tag{8}$$

式中,Q 为生热率; $W_a$  为电机的损耗;V 为电机各部分的体积。

由 Maxwell 2D 电磁仿真分析,得到电机定子绕组的损耗、定子铁芯的损耗和永磁体的损耗,通过Fluent 计算等效绕组和定子的体积,所得定子绕组的生 表 5 电机定子绕组、定子铁芯和永磁体生热率

热率、定子铁芯的生热率和永磁体的生热率如表 5 所示。

定子绕组	定子铁芯	永磁体
407 129.8	781 821.2	102 476.2

#### 3.2 电机机壳表面散热

根据传热学,导热的微分方程为[9]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v$$
(9)

式中, $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$  分别为 x、y、z 方向上的导热系数; $q_v$  为热源体密度值; $\rho$  为材料密度; $c_p$  为材料比热容。

常用的 3 种热边界条件为

$$T|_{S_1} = T_c(x, y, z)$$
 (10)

$$-\lambda_b \frac{\partial_T}{\partial_n} |_{S_2} = q_0(x, y, z) \tag{11}$$

$$-\lambda_b \frac{\partial_T}{\partial_a} |_{S_3} = \alpha_3 (T - T_{f_3}) \tag{12}$$

式中, $T_c(x,y,z)$ 为边界  $S_1$  的温度; $q_0(x,y,z)$ 为边界  $S_2$  的热流密度; $\alpha_3$  为边界  $S_3$  的散热系数; $T_{f_3}$  为  $S_3$  周围的流体温度。

电机机壳表面的散热系数为[10]

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 + k \sqrt{v} \right) \tag{13}$$

式中, $\alpha$  为机壳表面的散热系数;k 为考虑气流吹拂效率的计算系数,本文取 0.477; $\alpha$ 0 为在平静环境中空气流动的散热系数,机壳表面材料为铝合金时,其值可取为  $14.2~W/(m^2 \cdot K)$ ; $\alpha$ 0 为发热体周围空气的流动速度,取值为 16~m/s。求得机壳表面散热系数为 41.4。

#### 3.3 定子绕组端部和转子端部散热系数

$$\alpha_w = \frac{N\mu_w\lambda_a}{d_{w}} \tag{14}$$

$$Re_w = \frac{\pi D_2 n d_w}{60\gamma} \tag{15}$$

$$Nu_w = 0.456Re_w^{0.6} \tag{16}$$

$$d_w = \frac{D_1 + D_{i1}}{2} \tag{17}$$

式中, $\alpha_w$  为定子绕组表面的散热系数; $Re_w$ 为端部气流雷诺数; $Nu_w$  为绕组端部努塞尔数; $d_w$  为端部等效直径;n 为电机转速; $\gamma$  为空气动力粘度系数; $\lambda_a$  为空气导热系数; $D_1$  为定子外径; $D_2$  为转子外径; $D_1$  为定子内径[11]。

转子端部散热系数的公式为[12]

$$\alpha_r = 28(1 + \sqrt{0.45v_t}) \tag{18}$$

式中 $,\alpha_r$  为转子端部散热系数 $,v_t$  为转子的周向旋转速度。求得转子端部的散热系数为 26。

#### 3.4 冷却水路对流传热系数

本设计建立的为螺旋水道,在机壳内部建立的螺旋水道,在机座的底部有2个对角的入水口和出水口,如图7所示。

在建立电机水冷模型时假设:

(1)水流从冷却口垂直进入管道,且均匀分布;

- (2)冷却管道内的水流为定常流;
- (3)认为冷却管道内的水流为不可压缩流体;
- (4)忽略管壁对水流摩擦造成的损失,认为水流在管道流动过程中 不再产生热量;
  - (5)忽略重力的影响。

对流传热系数[13]为

$$Nu = 0.116 \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr_{x}^{\frac{1}{3}} \times \left[ 1 + \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left( \frac{\mu_{r}}{\mu_{w}} \right)^{0.14}$$
 (20)

$$d = \frac{4s}{D} \tag{23}$$

(19)电机螺旋水道 (21) $Pr_x = \frac{\mu_r c_p}{\lambda}$ (22)

式中, $\alpha$  为水路的对流传热系数;Nu 为努塞尔数,为 95.81; $\rho$  为水的密度,为 1 000 kg/m³;v 为水的流速,为 1.25 m/s; Re 为雷诺数, 为 12 367.9;  $Pr_r$  为普朗特数, 为 5.521 67; d 为当量直径, 为 0.008 m;  $\lambda$  为水的导热系数, 为 0.62066;  $C_{p}$  为水的比热容,数值为  $4200 \mathrm{J/(kg} \cdot \mathrm{C})$ ; l 为水路的长度,为  $500 \mathrm{mm}$ ;  $\mu_{r}$  为水在平均温度时 的动力黏度,为 0.000~81; $\mu_w$  为水在 w 温度时的动力黏度,为 0.000~49。求得水路的对流传热系数为 7~433.18。

#### 流体场温度的仿真

将简化好的三维模型导入 Fluent,进行网格剖分并将电机的铁损和绕组的铜损等效为热源添加到模 型相应的位置,所得电机温度的整体分布如图 8 所示,机壳 Z 轴方向的剖面图如图 9 所示。

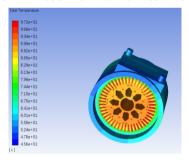


图 8 电机温度的整体分布图

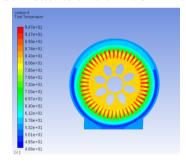


图 9 机壳 Z 轴方向剖面图

从图 8 可以看出,电机温度最高的部位是电机的绕组部分,最高温度为 97.2 °C,其次为定子,因为热 源来源于绕组和定子铁损,因而这2个位置的温度相对较高,从定子向外接触机壳,通过冷却水循环,将 热量带走,越靠近机壳温度越低,最低温度在机壳位置,为 45.6  $^{\circ}$   $^{\circ}$ 

在定子与转子之间的气隙存在有空气,在转子以 3 500 r/min 的转速转动时,热会从定子传递到气 隙,进而传递到转子和永磁体,温度有 80 ℃左右,不会造成钕铁硼材料永磁体的失磁。因为转子内部是 个相对密封的空间,容易造成温度聚集,但因为发热源主要集中在定子和绕组部分,故转子部分温度相对 定子部分较低,和绕组部分温度相差  $10 \, ^{\circ}$ C左右,在  $3 \, 500 \, r/min$  额定工况下电机温度满足正常使用。

#### 5 结论

通过磁热耦合的分析方法,对一台物流车用永磁同步电机的电磁损耗和流体温度进行了研究得到以 下结论:

(1)该永磁同步电机的主要热源是定子铁芯损耗和定子绕组铜损,绕组损耗所占比例为 31.9%,定子

铁芯的损耗最高的位置在齿顶。

- (2)在流体温度场仿真时能够将定子绕组等效为导体加绝缘层的方式,硅钢叠片也能够等效成一个整体,提高等效模型计算的关键是提高模型尺寸简化和导热系数的确定。
- (3)从流体温度场分析可知,该电机定子绕组部分温度最高,采用水冷却方式使得电机整体温度大大降低,完全适应该工况下电机运行的温度环境。该仿真为永磁同步电机设计提供了重要依据,节省了电机开发的周期。

### 参考文献

- [1]王建设. 电动汽车驱动用永磁同步电机设计与分析[D]. 上海: 上海电机学院, 2017.
- [2]张勇. 永磁同步轮毂电机损耗与磁热耦合仿真分析[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [3]黄允凯,胡虔生. 顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析[]]. 电工技术学报,2010,25(5):54-60.
- [4]陈涛,闫业翠,马其华,等. 永磁轮毂电机的磁热双向耦合方法研究[J]. 轻工机械,2018,36(5):57-62.
- [5] Chen Y, Zhu X, Quan L, et al. Performance analysis of a double-salient permanent-magnet double-rotor motor using electromagnetic-thermal coupling method [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [6]陈轶,卢琴芬,沈燚明.双边水冷永磁直线电机的磁热耦合分析[J].中国电机工程学报,2019,39(7):1852-1862.
- [7]杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [8]张琪,雷良育,靳家宝,等. 电动汽车用轮毂电机磁热耦合仿真分析[J]. 车辆与动力技术,2019(4),49-54.
- [9]谢颖,王泽,单雪婷.基于多场量的笼型感应电机三维瞬态磁热固耦合计算分析[J].中国电机工程学报,2016,36 (11):3076-3084.
- [10] 郝叶. 100 kW、50 000 r/min 高速永磁同步电机的设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2017.
- [11]孙荻. 橡胶精炼机外转子永磁直驱电动辊的设计与研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2014.
- [12]王明权,孔德生. 划片机气静压电主轴的冷却与热传递研究[J]. 电子工业专用设备,2006(19):13-17.
- [13]宋姝临. 兆瓦级高速永磁电机冷却系统设计与传热特性分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2014.

# **Analysis of Magneto-thermal Coupling of Automotive Permanent Magnet Synchronous Motor**

Quan Chenlong<sup>1</sup>, Feng Guosheng<sup>1</sup>, Hao Changsheng<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>, Zhang Yanming<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
  - 2. Hebei Electric Motor Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: As electric vehicles have ever higher requirements for the performance of permanent magnet synchronous motors, it is particularly necessary to conduct a magnetic-thermal coupling analysis of this type of motor. This paper took a 40 kW permanent magnet synchronous motor for logistics vehicles as the research object. First, an analysis model of the motor was established in RMxprt according to the structural parameters of the motor, and the finite element method (FEM) was used to analyze the magnetic field of the motor and calculate the loss of the motor. The temperature field of the motor was analyzed by the method of magnetic-thermal coupling analysis. The loss of the motor was equivalent to the heat source of the temperature field of the motor, and the fluid-structure coupling simulated the temperature field distribution of the motor under rated conditions, which provided an important theoretical basis for the motor design.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; magneto-thermal coupling; motor loss; fluid structure coupling