

多场耦合的电机暂态温度场计算^{*}吴尧辉^{1,2} 张建强^{1,2} 吴昊珍³

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000;

2. 直驱电梯-河南省工程技术研究中心 焦作 454000; 3. 郑州工商学院 郑州 451400)

摘要: 针对稳定负载下电机暂态温度场的计算问题,以小型封闭式结构的异步机为对象,建立电机热源计算的有限元电磁场模型,并依据散热结构特点建立相应的温度场模型,通过多场耦合的途径实现电磁场与温度场的联合,并附于电磁场、温度场相关的模型参数及联合计算参数,经电磁场适时地耦合温度场的联合计算,实现稳定负载下的温度场各暂态计算。通过搭建实验系统及测试,对电机额定负载下全域温度场实验结果和仿真对比得出,电机稳定负载下,多场耦合的联合计算能较好地计算电机全域暂态过程温度场。

关键词: 稳定负载; 多场耦合; 电机暂态温度场

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Calculation of motor transient temperature field of multi-field coupling

Wu Yaohui^{1,2} Zhang Jianqiang^{1,2} Wu Haozhen³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Direct Drive Elevator-Engineering Technology Research Center of Henan Province, Jiaozuo 454000, China;

3. Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 451400, China)

Abstract: To solve the problem of calculating the transient temperature field of motor under steady load, taking the small enclosed structure of the asynchronous motor as the research object, the calculation of heat source in the motor electromagnetic field model is established by finite element methods, the corresponding temperature field model is established according to the characteristics of enclosed structure, the combined calculation of electromagnetic field and temperature field is realized by means of multi-field coupling, attached to the model parameters related to the electromagnetic field and temperature field and the coupling parameters of the joint calculation, through doing combined calculation of electromagnetic field coupling temperature field properly, realizing the calculation of each transient temperature field under steady load. Through the actual system test, comparing between the global temperature field experiment of the motor under steady load and simulation results, multi-field coupling calculation method can realize the calculation of the motor whole transient temperature field under steady load reliably.

Keywords: stable load; multi-field coupling; transient temperature field of motor

0 引言

温度场计算是电机设计中的必要环节,是电机中各种材料的合理选择、使用的重要依据,关乎电机的使用寿命和运行可靠性^[1]。传统的温度场(或温升)计算方法有简易公式法、热路法、网络节点法等,计算的是电机的平均温升。文献[2-4]建立电机热网络模型,计算了电机内部主要位置的温度场分布。为了更全面真实的反映电机温度状况,产生了场化方法计算电机的发热,能更具体呈现全域内各点温度实际状况。随着快速计算及有限元软件技术的应用,全域内

场化计算电机温度场成为最为准确反映电机各部分温度分布的最好方法,常用的有二维和三维方法。文献[5-8]通过建立电机三维暂态温度场有限元模型,计算出电机各部分的损耗热源密度,分别将相应热源密度施加到电机的温度场模型进行仿真计算,得到电机的整体温度分布。

在电机稳定负载下,电机达到稳定温升之前,电机发热每一时刻都在变化,多场耦合的计算方法在电机各暂态温度场计算时,采用联合计算方法,实时调用该时刻的发热量,以达到稳定负载时电机暂态温度场的实时计算^[9-10]。

收稿日期:2017-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61340015)、河南省教育厅自然科学基金(2009B470003)、河南省教育厅自然科学基金(2010A470003)项目资助

1 多场耦合的暂态模型的建立

多场耦合的暂态温度场计算模型是电磁场与温度场耦合的联合计算模型,包括电机暂态电磁场计算热源模型、全域温度场计算模型以及电磁场和温度场联合计算电机暂态温度场的整体模型设计。

1.1 电磁场计算热源模型的建立

通过将电机绕组端部电阻参数场化、电感参数路化修正建立电机二维暂态仿真模型,有效体现电机端部特征,弥补了三维方法计算量大、时间过长的不足。根据异步电机的参数如表 1 所示,建立电机实体模型,在实体模型中附于材料属性建立 MagNet 电磁场计算热源模型如图 1(a)所示^[11]。电机的电磁场计算热源模型的建立,使电机的工况能影响到电机每个时刻产生的各种损耗(即电机热源),其数据和驱动电源及温度场能进行交换,并能实现可靠联合仿真计算。电磁场模型计算精度与网格剖分相关,应根据结构不同设置合适的网格剖分精度如图 1(b)所示。

表 1 电机的主要参数

额定功率/W	100	额定电压/V	220
额定电流/A	0.5	转速/(r·min ⁻¹)	1 420
定子槽数	24	转子槽数	30
极对数	2	相数	3
铁心长度/mm	50	气隙长度/mm	0.18

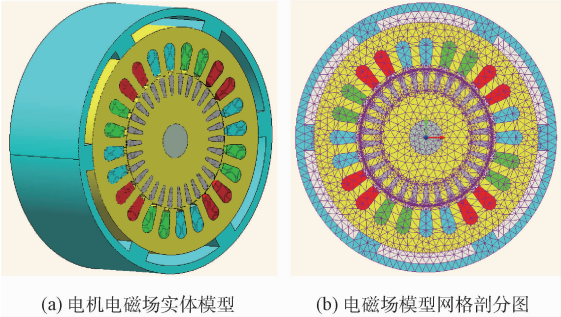


图 1 电机电磁场计算热源模型

1.2 温度场计算模型的建立

电机温度场的模型是温度场求解的直接模型,与计算结果直接相关,温度场模型的建立应根据实际电机结构、所处工况条件等综合考虑。

二维模型建立简单、计算工作量大、时间短,可优先选择考虑,其次可选择三维温度场模型。为了实现与计算热源的电磁场模型可靠联合仿真,首先应选择维数相同的物理模型,准确地附于电机材料的热特性参数及模型的边界条件,以实现可靠的数据交换。在 ThemNet 建立的电机模型如图 2(a)所示,温度场模型网格局部剖分图如图 2(b)所示。

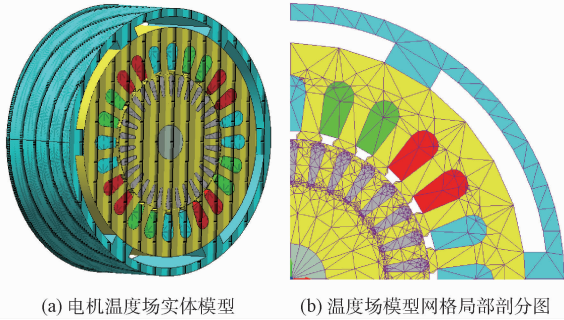


图 2 电机温度场计算模型

1.3 电磁场-温度场联合模型设计

电机动态温度场计算不仅需要建立电磁场、温度场计算模型,而且需要考虑两场联合仿真。其中电磁场模型的建立还应考虑驱动电源和负载的变化对电机发热的影响规律,建立可描述模型,并且能与计算热源损耗的电磁场仿真计算模型对接,联合仿真电机各状况下的热源及分布状况,随时与温度场模型联合仿真计算。

2 模型参数计算与设置

影响电机的温度大小及分布的因素有发热量、散热量、环境温度及电机的结构和材料热特性,因此在确定模型物理结构的基础上,准确地附于电机各材料的热特性参数及模型的边界条件是准确计算温度场的关键因素。

2.1 电磁场模型热参数的计算与设置

温度场仿真需要的热源主要是定转子铜耗和铁耗,通过电磁场仿真得到,建立电机实体模型时应附于材料相关属性,如导电材料电阻热特性、导磁材料的损耗非线性等。

因联合仿真时电机温度场的变化将导致导电材料的电阻发生变化,电阻的变化又引起电磁场计算结果的变化,直接影响电机损耗热源发生变化,因此应计算并附与电机铜、铝导电材料全域温度范围的电阻热特性参数。

2.2 温度场模型参数

电机的实体模型在直角坐标系下的三维暂态热传导方程及其边界条件为^[12-13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = -\alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为电机温度, T_e 为周围介质的温度, λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为物体在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数, q 为热源密度, ρ 为物质密度, c 为物质比热容, t 为时间, S_1 为电机绝热边界面, S_2 为电机散热边界面, n 为边界法向量, α 为 S_2 面的散热系数, K 为 S_1 和 S_2 面法向热传导系数。

在建立电机全域温度场模型的时候,为了简化计算难度及节省计算时间,在满足工程实际要求的基础上,可以将三维的温度场问题简化为二维的温度场问题来求解。建模之前需要做合理的假设,二维暂态热传导方程以及边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = -\alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (2)$$

- 1) 电机的热源在定子和转子两部分;
- 2) 建立二维温度场模型,不考虑 z 轴方向的传热;
- 3) 环境温度一定。

2.2.1 定子绕组槽部导热系数

在定子槽中分布有绕组、空气、浸渍漆和对地绝缘等 layers,各种材料的导热距离难于计算,导线和绝缘介质各占有一定的比例,由于铜导线导热系数 λ_{cu} 很高(与槽内绝缘相比),在建立温度场模型的时候可以忽略不计热阻,而对于绝缘部分由于绝缘漆和槽绝缘的导热系数很小(槽绝缘导热系数为 $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,浸渍漆的导热系数为有溶剂漆取 $0.185 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,无溶剂漆取 $0.17 \sim 0.18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)且近似相等,可以取为中间值 λ_{js} ,因此槽部可等效为一种材料的导热模型^[14-15],槽部模型的导热系数称为槽部等效导热系数,导热系数与槽满率相关,计算公式为:

$$\lambda_{re} = \sqrt{k_{ek} k_{jq} \lambda_{js}} \quad (3)$$

式中:槽空率 $k_{ek} = 1 - k_{cm}$, k_{cm} 为槽满率; k_{jq} 为浸漆系数(有溶剂漆时浸一次取 0.5 ,浸两次取 0.65 ;无溶剂漆时取 0.85)。

2.2.2 定转子热对流系数

模型中用定转子对流传热系数 α_{eff} 来等效表示,其中定转子之间的对流由气隙传热和端部传热两部分组成。

1) 气隙传热

(1) 当 $R_e < R_{\text{cer}}$ 时,气隙中的空气流动属于层流,其等效导热系数为 $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{air}}$ 。

(2) 当 $R_e > R_{\text{cer}}$ 时,气隙中的空气流动属于紊流,其等效导热系数为:

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.0019 \cdot \eta^{-2.9084} \cdot R_e^{0.4614 \ln(3.33361 \cdot \eta)} \quad (4)$$

式中: $\eta = \frac{R_0}{R_i}$, R_0 是转子的外径, R_i 是定子的内径, R_e 是气隙的雷诺数, R_{cer} 是临界雷诺数。

2) 端部传热

端部绕组及端部铁芯的散热系数为:

$$\alpha = \alpha_0(1 + k\sqrt{v}) \quad (5)$$

式中: α_0 为端部绕组及铁芯与空气的接触面在平静空气中的表面换热系数,取 $14.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k 为考虑吹拂效率的系数,取值为 1.3 ; v 是空气吹拂端部绕组及铁心与空气的接触面的速度。

定转子对流传热系数为:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_\delta + \alpha \quad (6)$$

2.2.3 电机表面散热系数

对于封闭式异步电机来说,机壳是电机向外散热的主要路径,机壳表面的散热系数与电机的冷却散热条件相关,如介质的流速,散热面结构等,可按如下公式计算:

$$\alpha = 14(1 + 0.5\sqrt{\omega_i}) \sqrt[3]{\left(\frac{\theta}{25}\right)} \quad (7)$$

式中: α 为实体电机表面散热系数, ω_i 为吹拂机座内壁的风速, θ 为机座壁外表面的温度。

因二维仿真计算模型与实际三维实体的差别,须等效处理散热系数,等效原则是总散热量不变,散热系数等效处理方法为:

$$\sum \alpha_1 S_1 = \alpha_2 S_2 \quad (8)$$

式中: α_1 为实体电机表面各部分表面散热系数, S_1 实体电机各部分表面的面积, α_2 为电机二维模型的等效对流散热系数, S_2 为二维模型的电机定子外表面面积。

2.2.4 辐射散热系数

电机表面主要的散热方式包括对流散热和辐射散热,辐射散热占较少一部分,特别是当采用强制冷却方式时,辐射散热常常可以忽略不计,但在自然空气冷却条件下,辐射散热不能忽略,特别是在高温时辐射散热量会明显加大,可按下列公式计算:

$$\alpha_r = \epsilon_{\text{thr}} \sigma_{\text{SB}} \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \quad (9)$$

式中: α_r 为实体电机表面热辐射散热系数, ϵ_{thr} 为电机与周围环境的相对辐射率, σ_{SB} 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)。

该电机为封闭自然空气冷外壳散热条件,转子无风扇冷却结构,二维温度场模型参数计算如表 2、3 所示。

表 2 额定负载时温度场模型参数设置

工况	定子槽部导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	电机表面散热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	辐射散热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1})$
额定负载	0.3	42.6	1.7×10^{-7}

表 3 额定负载时定转子对流连接系数设置

温度/ $^\circ\text{C}$	0	20	100	200
额定负载对流连接系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	270	285.6	348.9	428.9

2.3 联合仿真计算模型参数设置

联合仿真计算的关键是建立合理的仿真计算模型,以及正确设立联合仿真时各模型的结构及参数,包括正确选择联合仿真时的各种模型计算步长、耦合计算时各模型之

间的仿真计算次序、仿真计算耦合的频率大小等。

3 联合计算的设计

多场联合计算模型采用 MagNet 电磁场和 ThermNet 温度场的联合仿真模型, MagNet 电磁场模型将计算的损耗作为热源, 通过电磁场-温度场耦合将数据传递给 ThermNet 温度场模型, 进行各发热暂态时的时变温度场计算, 从而计算出稳定负载下电机全过程动态温度场。

3.1 联合计算的方案设计

多场耦合的联合计算方案设计, 应根据仿真电机的具体工况进行, 从电磁场和温度场两方面综合考虑, 稳定发热的工况下热源变化小, 主要是导体电阻受温度影响, 当电磁场计算热源的频度较低, 可采用较小的耦合频率。当不稳定发热工况下, 热源及其变化较小时, 电磁场计算热源的频度也较低, 也可采用同样较小的耦合频率计算, 温度场热源采用一次性电磁场计算热源或重复利用原有热源近似计

算。在不稳定和极端不稳定工况下, 热源及其变化较大, 温度场计算需采用较大计算频度调用电磁场计算热源, 以满足相应的暂态温度场计算, 可每步温度场步长计算一次电磁场, 也可多步温度场步长计算一次电磁场, 具体应根据热源及其变化特点综合考虑。

3.2 联合计算的方法设计

温度场与电磁场的联合多场耦合求解, 将产生大量的数据交换, 为了不使计量容量、计算时间过于庞大, 在保证需求精度的需求下, 合理的选择联合仿真的计算步长非常重要。同时在保证动态温度场变化精度的要求基础上, 应选择合适的两场耦合频率。耦合计算时, 耦合暂态场求解器须设定电磁场的求解次数, 经电磁场计算热源后, 求解温度场。温度场计算后产生的温升又导致导电材料电阻参数变化, 影响电磁场的计算, 因此多场耦合的暂态温度场计算, 是电磁场和温度场的联合反复调用计算, 多场耦合联合求解过程如图 3 所示。

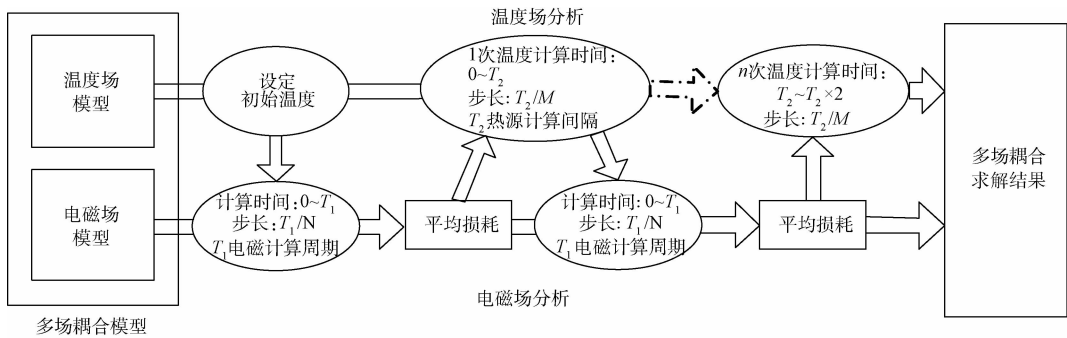


图 3 多场耦合联合求解过程

3.3 联合计算参数设置

参数的计算与设置应根据热源及其变化特点、发热时间长短、发热时间常数大小、温度高低、电磁场频率大小等, 确定联合计算的具体参数和仿真步长, 针对不同工况的特点, 参数设置如表 4 所示。

表 4 额定工况下联合计算参数设置

工况		时间	步长	求解器
额定	电磁场	200 ms	2 ms	2D 瞬态运动
负载	温度场	12 000 s	600 s	2D 瞬态

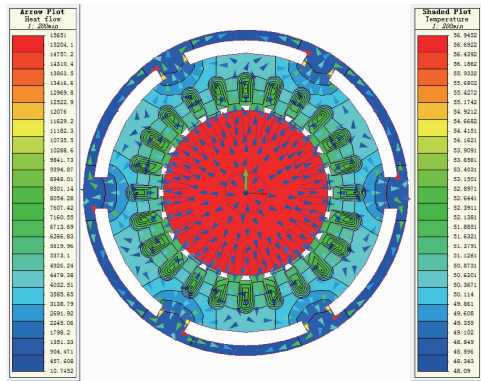
4 仿真计算结果及分析

4.1 稳定负载时稳态温升仿真计算

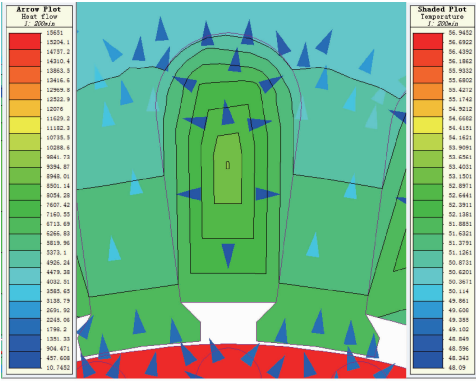
电机额定运行, 设置环境温度为 26 ℃, 观察到电机运行 200 min 达到稳定温升, 电机稳定温升时的温度场分布图, 如图 4 所示。

由图 4(a)可知, 电机额定运行至稳定温升时, 转子铁芯的温度最高, 其值为 56.9 ℃, 定子槽内绕组温度达到

53.4 ℃, 外壳的温度最低, 达到了 48.1 ℃, 由图 4(b)可知定子槽部中心的温度较高, 这是因为电机额定运行时热源主要来自定子绕组, 其散热一方面通过绕组端面向外散热, 一方面经过定子铁芯再到机壳外表面向外散热, 由于定子绕组的导热系数相对于定子铁芯较小, 不利于热量向外传递, 因此定子绕组的温度要高于定子铁芯, 达到稳定温升时绕组槽中最高温度为 53.4 ℃。

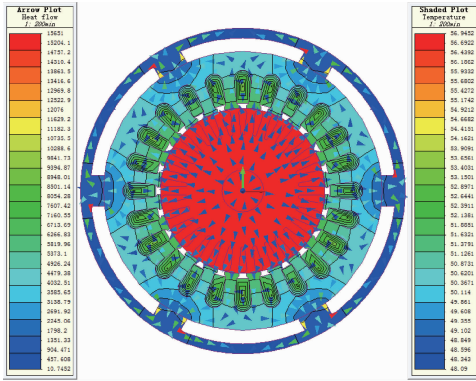


(a) 稳定温升时整体温度分布



(b) 稳定温升时槽部温度分布

图 4 稳定温升时温度分布



(c) 200 min时刻整体温度分布

图 5 电机额定负载时暂态过程温度分布

4.2 稳定负载时暂态温升仿真计算

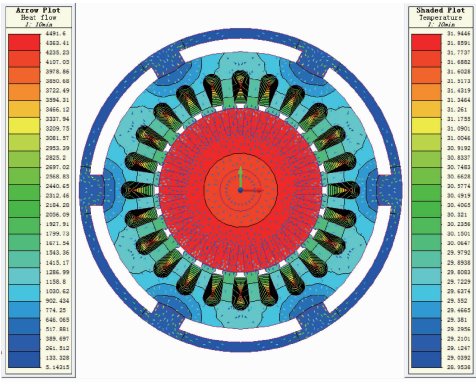
电机额定负载运行时暂态过程温度场分布如图 5 所示。

从表 5 可以看出,随着运行时间的增加,电机各部分的温升按照指数曲线规律上升。随着温度的升高,电机与周围空气介质之间的温度差逐渐增大,散失到周围空气介质中的热量逐渐增多,电机本身温升升高的速度逐渐变慢。运行至 200 min 时,电机与周围空气介质的热交换达到平衡状态,电机各部分暂态温度由高到低依次为转子部分、槽内中部分、轭外中部、外壳。电机额定工况下整体温

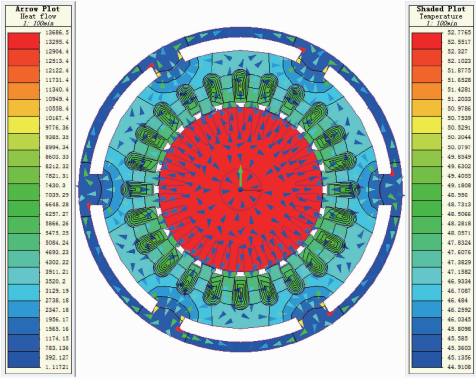
升如图 6 所示。

表 5 额定工况下电机整体温升仿真数据

时间/ min	转子/ ℃	槽内中/ ℃	轭外中部/ ℃	外壳/ ℃
10	31.9	31.9	29.8	28.9
50	45.3	43.2	40.9	39.2
100	52.7	49.7	47.1	44.9
150	55.7	52.4	49.6	47.2
200	57.2	53.4	50.6	48.1



(a) 10 min时刻整体温度分布



(b) 100 min时刻整体温度分布

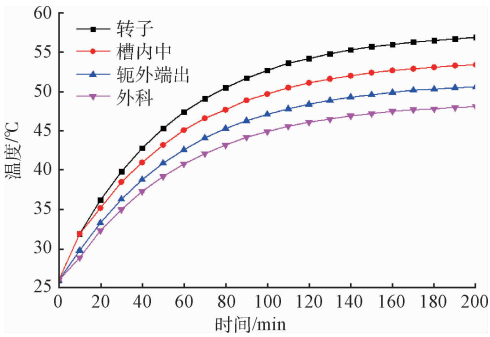


图 6 电机额定工况下整体温升图

5 全域暂态温度场测试研究

电机稳定负载下的稳态及暂态温度场实验设备如图 7 所示。实验测量采用 K 型热电偶、数字温度计、激光测温枪。温度传感器分别埋设在电机三维全域的定子槽外底、槽内下、槽内中、槽中顶、槽外顶、端齿顶、端部轭外、轭外中部、轭外端出、电机外壳等,电机内部传感器埋设位置如图 8 所示。

5.1 额定负载下温度场实验测试

实验采用一台校正过的直流机作为实验电机的负载,

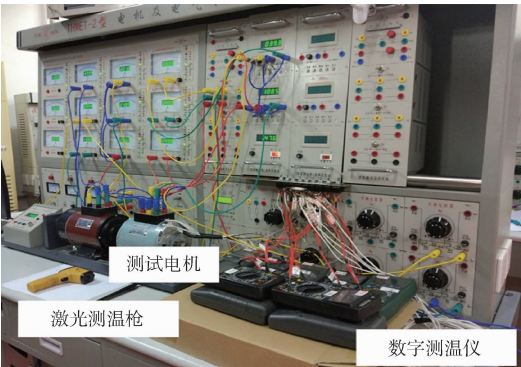


图 7 实验设备

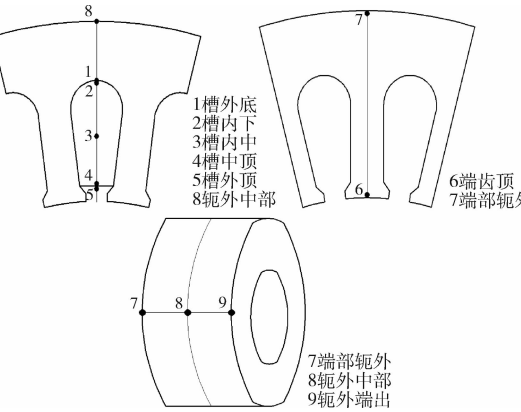


图 8 电机内部传感器埋设位置

在额定工况(电压 220 V, 电流 0.5 A)下运行测量各部分温度的各暂态值。环境温度为 26 ℃, 温度数据如表 6 所示, 额定工况下温度曲线如图 9 所示。

表 6 额定工况下温度实验数据

时间/min	10	50	100	150	200
转子/℃	30.5	40.6	50.9	54.8	56.9
槽外底/℃	27	39	45	50	52
槽内下/℃	27	39	47	50	52
槽内中/℃	28	40	49	52	53
槽中顶/℃	28	40	48	52	53
槽外顶/℃	29	40	48	52	53
端齿顶/℃	26	37	44	48	50
端部轭外/℃	29	40	46	51	53
轭外中部/℃	27	38	44	49	51
轭外端出/℃	27	38	45	49	51
外壳/℃	27	37.1	43.8	46.7	47.8

5.2 仿真与实验分析对比研究

电机达到稳态温升时, 外壳温度仿真和实验分别为 48.1 ℃和 47.8 ℃, 相差 0.3 ℃, 转子铁芯温度仿真和实验分别为 56.9 ℃和 57.2 ℃, 相差 0.3 ℃。电机实验温度的最高值和最低值及其位置分布和仿真计算基本吻合, 表明

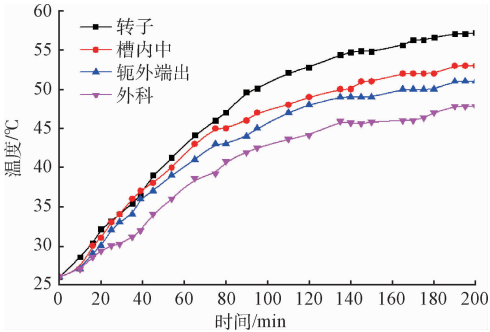


图 9 额定工况下电机局部温升图

电机温度场仿真模型中的机壳表面散热系数和定转子对流系数设置准确。

电机达到稳态温升以前, 处于暂态过程中, 各部分温度随时间按照指数规律上升, 在 200 min 之后温度基本不再变化, 电机温升达到稳态。实验测得电机各部分的暂态过程温度与仿真数据吻合, 在 100 min 时刻, 转子铁芯温度仿真和实验分别为 52.7 ℃和 50.9 ℃, 外壳温度仿真和实验分别为 43.8 ℃和 44.9 ℃。在 150 min 时刻, 转子铁芯温度仿真和实验分别为 54.8 ℃和 55.7 ℃, 外壳温度仿真和实验分别为 46.7 ℃和 47.2 ℃。各暂态点实验温度及变化趋势与仿真一致, 误差的主要原因是: 实验时为真实三维值, 轴向有温度差别, 而仿真时采用二维模型, 仿真值为电机轴向平均值; 另外各参数的等效处理时因二维与三维的结构差别, 两维计算会存在误差。

6 结 论

采用多场耦合的联合计算方法, 求解稳定负载下电机全域暂态过程温度场, 通过实验与仿真对比, 可得如下结论:

- 1) 联合电磁场和温度场两场耦合的方法, 可有效计算出稳定负载下电机全域暂态过程温度场, 能可靠考察电机各部分的极限工作温度。
- 2) 多场耦合的联合计算方法, 需采用合理的两场耦合频率, 需设置合理的计算步长, 以满足暂态过程温度场计算精度。
- 3) 二维温度场的仿真计算因模型特点会导致温度稍高于实际值, 三维场的模型可提高计算精度, 但计算量较大。

参考文献

[1] 李国洪, 陈华玉. 变频器控制的异步电机参数辨识研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(12): 66-69.
[2] 邱洪波, 王瑞阳, 魏云冰, 等. 等效热网络法在永磁伺服电动机温度场研究中的应用[J]. 微特电机, 2016, 44(3): 16-21.
[3] 王晓远, 高鹏. 等效热网络法和有限元法在轮毂电机

- 温度场计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 26-33.
- [4] 陈礼洋, 赵文祥, 吉敬华. 基于等效热网络法的容错永磁电机的温度分析和计算[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(4): 45-50.
- [5] 付兴贺, 林明耀, 徐姐, 等. 永磁-感应子式混合励磁发电机三维暂态温度场的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 107-113.
- [6] 胡田, 唐任远, 李岩, 等. 永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 122-126.
- [7] 孔晓光, 王凤翔, 邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 166-173.
- [8] 李明, 唐任远, 陈丽香. 螺杆泵永磁交流伺服电动机温升计算及分析[J]. 电气技术, 2012(9): 5-8.
- [9] 黄允凯, 胡虔生, 朱建国. 顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 54-60.
- [10] 谢颖, 王泽, 单雪婷, 等. 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.
- [11] 艾永乐, 许增渊. 电动汽车用高功永磁同步电机设计与特性分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 138-143.
- [12] 邵永, 刘赵森. 感应电机全域三维瞬态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 114-120.
- [13] 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.
- [14] 吴尧辉, 刘小梅. 小型电机绕组导热系数的研究[J]. 微电机, 2015, 48(4): 27-29.
- [15] 吴尧辉, 吉成芳, 刘小梅. 基于 ThermNet 直线电机的温度场研究[J]. 微电机, 2015, 48(5): 21-24.

作者简介

吴尧辉, 硕士研究生导师, 高级工程师, 主要研究方向为电机与电器、电力系统继电保护、电器智能化技术等。

E-mail: wyh@hpu.edu.cn

张建强, 硕士研究生, 主要研究生方向为电机温度场。

E-mail: 1241746457@qq.com

吴昊珍, 硕士研究生, 主要研究生方向为工业设计。

E-mail: 1357068058@qq.com