

基于磁热耦合法的电机模型参数计算*

吴尧辉^{1,2}, 方鑫^{1,2}, 付豪^{1,2}

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;

2. 直驱电梯-河南省工程技术研究中心, 河南 焦作 454000)

摘要: 基于有限元法与集总热网络法建立电机温升模型, 仿真计算电机瞬态温升。针对电机温升模型参数繁多且计算复杂的问题, 从损耗分布和热量传递的角度, 系统研究了电机的电磁参数和热参数。根据电机的结构参数建立物理模型, 通过电磁仿真结合解析计算修正漏感参数, 计算配置端部及外壳换热系数, 等效处理定转子气隙对流系数, 采用磁热耦合法计算温升。通过试验与仿真对比电机主要部位温升, 验证了电机参数计算的准确性。

关键词: 电机; 温度场; 磁热耦合; 电磁参数; 热参数

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0022-05

doi: 10.12177/emca.2020.030

Calculation of Motor Model Parameters Based on Magneto-Thermal Coupling Method*

WU Yaohui^{1,2}, FANG Xin^{1,2}, FU Hao^{1,2}

(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)

Abstract: Based on the finite element method and the lumped heat network method, the temperature rise model of the motor is established, and the transient temperature rise of the motor is simulated. In view of the variety and complexity of the model parameters of motor temperature rise, the electromagnetic parameters and thermal parameters of motor are systematically studied from the perspective of loss distribution and heat transfer. According to the structural parameters of the motor, the physical model is established. The leakage inductance parameters are modified by electromagnetic simulation and analytical calculation. The heat transfer coefficients of the end and the shell are calculated. The air gap convection coefficients of the stator and rotor are treated equivalently. The temperature rise is calculated by the magneto-thermal coupling method. By comparing the temperature rise of the main parts of the motor through experiment and simulation, the accuracy of motor parameters calculation is verified.

Key words: motors; temperature field; magneto-thermal coupling; electromagnetic parameter; thermal parameter

收稿日期: 2020-03-05; 收到修改稿日期: 2020-04-09

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61340015); 教育部协同育人项目(201701056027, 201702064052); 教育部创新创业联合基金项目(201802060039); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010A470003, 2009B470003)

作者简介: 吴尧辉(1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机与电器、电力系统继电保护等。

方鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

付豪(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

0 引言

电机的温升计算涉及到电磁场、流体场、温度场等多物理场,计算复杂且难度较大。常用的计算方法有热网络法和有限元法。热网络法类似电路拓扑结构将电机各部分等效为热阻连接成热网络计算温度场^[1]。有限元法则将电机的各个区域划分为一定数量的网格,在网格内用现代数值求解方法构建方程计算温度场^[2]。本文基于有限元法与集总热网络法计算电机温升,通过有限元法计算电机电磁损耗加载到热网络模型中进行温升计算^[3]。

电机温度场计算的关键点和难点在于电机的损耗和热交互边界条件。在损耗计算方面,常用 Bertotti 三项式法和 Steinmetz 两项式法计算电机铁耗^[4],对于复杂的杂散损耗以及机械损耗常以功率的百分比估算。在热交互边界条件计算方面,目前有大量文献^[5-6]研究了电机散热边界条件。文献[7]从傅里叶导热定律和牛顿放热定律出发,以端部温度与散热系数的非线性关系为前提,提出了一种计算端部散热系数新方法。文献[8]对电机槽部进行等效处理,将多种绝缘材料以及定子绕组等效为同一种材料计算电机温度场。考虑到以上因素,本文以1台小型三相异步电机为研究对象,分别从损耗分布和热量传递的角度系统的计算了电机的电磁参数和热参数。

1 电机基本参数

1.1 结构参数

本文以1台小型三相异步电机为研究对象,根据电机的结构参数在 Motor-CAD 中建立模型。电机结构参数如表1所示。

表1 电机结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	100	额定电压/V	220
定子槽数	24	转子槽数	30
铁心长度/mm	50	气隙长度/mm	0.18
定子外径/mm	120	转子外径/mm	71.6

1.2 材料属性

手动添加材料库中没有的材料,所用到的材料属性主要包括电阻率及温升系数、磁化及损耗

曲线、比热容、导热系数、密度等。主要材料属性(20℃)如表2所示。

表2 电机材料属性(20℃)

电机部件	材料	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
硅钢铁心	DR510-50	450	42.5
转子导条	铝	896	204
转轴	A3 钢	480	80
定子绕组	铜	385	401

2 电机损耗分析

在环境温度变化较小的情况下,电机温升主要由电机在机电能量转换过程中产生的损耗导致。根据损耗产生的部位可以划分为铁心损耗、绕组损耗、机械损耗。

2.1 铁心损耗

铁心损耗由基本铁耗和铁心附加损耗组成,附加损耗是由于铁心开槽引起的气隙磁导谐波场在对方铁心中所产生的损耗。因为小型异步电机的附加损耗较小可以忽略,所以采用修正的 Steinmetz 计算铁耗^[5],计算式为

$$P = K_h f \cdot B^{(\alpha+\beta \cdot B)} + 2 \cdot \pi^2 \cdot K_{\text{eddy}} f^2 B^2 \quad (1)$$

式中: K_h 为磁滞损耗系数; f 为基波频率; B 为磁密; α 、 β 为磁滞损耗经验系数; K_{eddy} 为涡流损耗系数。

2.2 绕组损耗

绕组损耗包括定转子铜耗以及绕组附加损耗,定子铜耗根据 $P_{\text{Cu1}} = 3I_1^2 R_1$ 计算,其中 I_1 为定子相电流有效值, R_1 为定子相电阻。转子铜耗计算式为

$$P_{\text{Al}} = \frac{l_b s}{\sigma'} \sum_{e=1}^{E_2} J_{ze}^2 \Delta_e \quad (2)$$

式中: l_b 为导条长度; s 为转差率; σ' 为转子导体电阻率; E_2 为转子槽内的总单元数; J_{ze} 为转子槽内各单元的感应电密; Δ_e 为转子槽内各单元的面积。

集肤效应、漏电流以及谐波磁场等均会产生附加损耗,附加损耗计算复杂且所占比例较小,通常用输出功率乘以百分比估算。

2.3 机械损耗

异步电机的机械损耗包括轴承摩擦损耗、转子风摩擦损耗以及通风摩擦损耗。这些损耗在一般情况下均难以计算,大部分均是根据经验数据

以及现有电机试验数据估算。

2.4 电磁计算对比分析

通过建立的模型计算电机损耗,结合电机空载、短路以及堵转试验数据计算电机“T”型等效电路参数,按式(3)修正定转子漏感系数及激磁参数:

$$X_1 = \alpha \cdot X_2 \quad (3)$$

式中: X_1 为试验测得的漏电感值; α 为漏电感系数; X_2 为软件等效值。

修正后参数损耗计算结果如表3所示。

表3 损耗计算结果

损耗	计算值/W
定子铜耗	12.07
转子铜耗	6.29
铁心损耗	4.51
机械损耗	4.63
杂散损耗	2.22
总损耗	29.76

3 传热系数计算

热传递在自然界中普遍存在,只要物体之间或物体内部存在温差,就会发生热传递现象。热传递有3种基本方式:热传导、热对流、热辐射。

3.1 热传导

热传导通常发生在相接触的物体之间,物体之间没有相对位移,热能依靠微观粒子传递的热运动^[9]。电机各部件的材料如表2所示。以傅里叶定律式计算单位时间内通过单位面积的导热热量 ϕ :

$$\phi = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

式中: λ 为导热系数; $\frac{dt}{dx}$ 为温度的变化率。

由于物体之间的接触程度不同,例如转子铁心与转子导条、端环、转轴之间的接触,定子铁心与电机外壳之间接触紧密程度各有不同,不能单以材料的导热系数计算导热热量。根据接触紧密程度,对物体之间的热传导,通常以材料的导热系数乘以一定的比例系数计算。

3.2 对流传热

电机中发生的流体与固体之间的传热区别于一般意义的热对流,被称为对流传热^[9]。基本计算公式是牛顿冷却公式:

$$\phi = hA\Delta t \quad (5)$$

式中: A 为对流面; h 为对流换热系数; Δt 为两对流面的温度差。

3.2.1 端部对流系数

由于电机端部空间的空气流动通常比其外表面的流动复杂,流体的流动取决于许多因素,包括端部绕组的形状和长度、转子端部的表面光洁度和湍流、海拔对散热的影响等,因此电机端部这一区域的冷却计算是整个电机最难的部分。通过与端部空间流体接触的表面的对流换热系数与局部流体速度进行曲线拟合^[10-12]:

$$h_{me} = k_1 \left(\frac{P_z}{P_0} \right) \cdot \left[1 + k_2 \left(\frac{P_z}{P_0} \right)^{(k_3-0.5)} \cdot v_{el}^{k_3} \right] \quad (6)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为曲线拟合系数; $\frac{P_z}{P_0}$ 为气压比; v_{el} 为参考速度。

当参考速度为零时, $k_1 \left(\frac{P_z}{P_0} \right)$ 解释了自然对

流;不为零时, $k_1 \left(\frac{P_z}{P_0} \right) \cdot \left[1 + k_2 \left(\frac{P_z}{P_0} \right)^{(k_3-0.5)} \cdot v_{el}^{k_3} \right]$ 解释了因旋转而增加的强迫对流。

电机端部散热系数如表4所示。

表4 端部散热系数

端部部位	$v_{el}/(m \cdot s^{-1})$	$h_{me}/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
绕组端部内表面	2.632 0	29.340
绕组端部外表面	0.526 4	18.370
绕组端面	1.316 0	22.680
端环内外表面	5.264 0	41.750
端环端面	3.449 0	33.280

注: k_1, k_2, k_3 分别取15,0.4,0.9。

3.2.2 外壳散热系数

本文仿真的电机是封闭式自冷式,端部没有风扇,电机外壳与外界环境直接接触,而室内电机多处处在流动较缓的空气中,没有电机端部及定转子之间的对流复杂。外壳散热系数计算式为

$$h_h = h_0 (1 + 0.5 \sqrt{v_i})^3 \sqrt{\frac{T_0}{25}} \quad (7)$$

式中: h_0 为自然散热条件下的散热系数; v_i 为电机内部空气的流速; T_0 为机座壁外表面的温度。

3.2.3 定转子气隙换热系数处理

对流换热系数不仅与流速有关,还与物体表

面的摩擦程度及性质有关,当电机运动时,转子旋转,气隙空气受到转子切向运动影响,同时转子端环上的平衡块以及风叶会扰动气流,因此对转子表面换热会有较大影响。本文引入流体努塞尔准则来确定定转子气隙的换热系数^[8],利用静止流体的导热系数来描述气隙中流动空气的热交换能力 λ_{eff} ,可按下述方法得出。

当 $Re > Re_{\text{cr}}$ 时,采用式(8)计算:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{air}}}{D} \quad (8)$$

当 $Re < Re_{\text{cr}}$ 时采用式(9)计算:

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.0019 \cdot \eta^{-2.9084} \cdot Re_{\text{cr}}^{0.4611 \ln(3.33361 - \eta)} \quad (9)$$

式中: Nu 为努塞尔数; D 为气隙长度; $\eta = R_2/R_1$; R_2 为转子外径; R_1 为定子内径; Re 为雷诺数, $Re = \omega\delta/v_f$; Re_{cr} 为临界雷诺数, $Re_{\text{cr}} = 41.2\sqrt{r_1/\delta}$; ω 为中间位置处转速; δ 为气隙厚度; v_f 为空气的运动黏度。

3.3 辐射传热

热辐射是指物体通过电磁波的方式来传递能量^[9]。电机内的主要传热方式是热传导和热对流,辐射散热占一小部分,特别是当采用强制对流来冷却电机时,辐射传热常常可以忽略不计,本文按式(10)处理:

$$h_r = \frac{5.67e^{-8} E \cdot F_v [(T_{\text{node}} + 273)^4 - (T_A + 273)^4]}{T_{\text{node}} - T_A} \quad (10)$$

式中: E 为发射率; F_v 为视图因子; T_{node} 为节点温度; T_A 为辐射环境温度。

3.4 热网络模型建立

由于电机传热计算复杂,一般习惯于把温度场简化为有集中参数的热路计算。把电机各个部分划分为热阻与电路里面的电阻类似,根据基尔霍夫定律对每个回路建立热平衡方程:

$$\sum_j \frac{f(T_j^i) - f(T_n^i)}{R_{j,n}} + q_n V_n = C_n \frac{T_n^{i+1}}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: C_n 为第 n 个单元的热容; q_n 为第 n 个单元单位体积内的热源发射率; $f(T)$ 为温度 T 的函数; $R_{j,n}$ 为热阻,分为导热热阻 $R = L/(\lambda A)$ 、散热热阻 $R_a = 1/(h_c A)$ 以及辐射热阻 $R_r = 1/(h_r A)$; λ 为导热系数; A 为传热或散热面积; L 为传热路径; h_c 、 h_r 为散热系数。

为了方便计算温升,作出如下假设:(1)电机

周向温度分布对称且冷却条件相同,不考虑电机的底座、接线盒;(2)电机各部分初始计算温度相同,环境温度前后没有发生变化;(3)忽略转子集肤效应。

4 磁热耦合仿真对比试验测试

4.1 磁热耦合方式

电机磁热耦合分析一般分为双向耦合和单相耦合。考虑到双向耦合计算量大、对计算机要求高,而单相耦合求解快、仿真效率高,采用单向磁热耦合的方式计算电机温度场,同时采用有限元法计算电磁损耗加载到热网络模型中的温升。

4.2 仿真分析

设置电机电磁参数和热交互边界条件后,开始瞬态温升计算,轴向和径向温度截图如图1、图2所示。

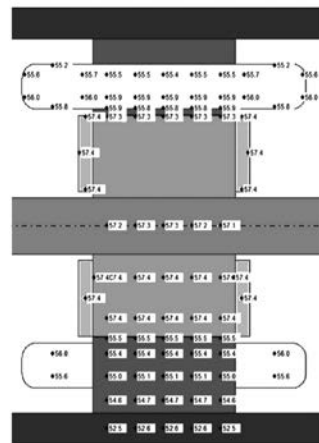


图1 轴向温度截图(单位:°C)

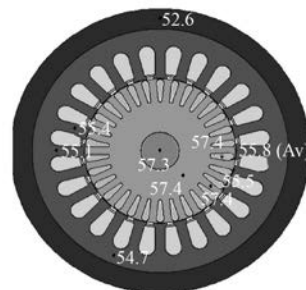


图2 径向温度截图(单位:°C)

从图1、图2可以看出,电机的主要温升发生在电机转子上,最高温度达 57.4 °C,由于是小型封闭式电机,转子散热面积小,电机铁耗通过热传

导和热辐射将热量传递到定子上,然后向外传递,在较长一段时间,转子热量传递较慢。绕组温升比转子低,一方面电机定子绕组伸出端部过长,散热面积较大;另一方面定子铁心可通过电机外壳向周围环境传热。

4.3 试验测试

为了验证仿真的结果,对电机进行 170 min 的温升试验,环境温度为 28 ℃。主要测量电机在额定电流下运行的温升,在电机定子槽内及绕组中埋置了 K 型热电偶,主要测取定子槽中部、绕组端部、定子铁心轭部、齿部、电机外壳中部等部位的温升。在电机旋转时,由于转子处于运动中,无法通过埋置热电偶的方法测取温升,因此采用红外激光测温仪测量转子端环的温度。试验装置如图 3 所示。

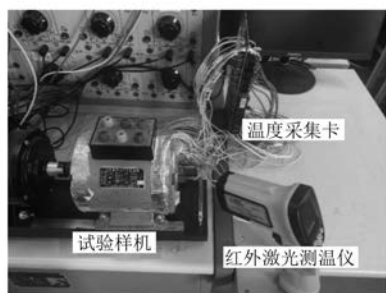


图 3 试验装置图

将电机主要部位的温升仿真和试验结果进行对比,如表 5 所示。

表 5 温升仿真和试验结果对比

主要部位	温度试验值/℃	温度仿真值/℃	误差/%
电机外壳	54.0	52.6	2.6
绕组端部	59.0	56.1	4.9
定子槽中部	58.7	55.9	4.9
转子端环	60.8	57.5	5.2
定子轭部	56.4	54.7	3.0
定子齿部	57.4	55.5	3.3

从表 5 可以看出,绕组的温升仿真存在较大误差,一方面是由于埋置热电偶时重新缠绕了定子绕组;另一方面考虑到采取的是单向耦合仿真,没有考虑温升对损耗的影响。但是,作为对电机快速温升计算的一种方式,误差在可以接受的范围。后续可进一步结合双向耦合仿真,研究电机的损耗和电机参数的计算。

5 结 语

电机的温升对绝缘材料的影响较大,温升过高会使绝缘老化,直接影响电机的使用寿命,因此对电机温升的研究至关重要。

本文基于磁热耦合法对电机的温升进行了仿真计算,对电机的电磁参数及热参数进行了系统的研究计算,通过仿真计算与试验对比,验证了模型参数计算具有一定的准确性。

【参考文献】

- [1] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 杜平安,于亚婷,刘建涛.有限元法——原理、建模及应用[M].2版.北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 张璐璐,闫业翠,马其华,等.电动汽车轮毂电机磁-热双向耦合研究[J].机电工程,2019,36(4): 407.
- [4] SEO J H, WOO D K, CHUNG T K, et al. A study on loss characteristics of IPMSM for FCEV considering the rotating field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 3213.
- [5] 刘阳,余中军,张贤彪.大容量高速永磁电机热流场仿真及参数敏感性分析[J].电机与控制应用, 2018, 45(3): 103.
- [6] 高尧,曹君,邹春花,等.高精度盘式永磁电机温度分析与研究[J].电机与控制应用, 2019, 46(7): 56.
- [7] 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.
- [8] 吴尧辉,董雪,吴昊珍.基于多场耦合的电机复杂工况暂态温度场研究[J].制造业自动化, 2019, 41(4): 85.
- [9] 张琦,李增亮,张乐,等.潜水电机温度场研究方法及其影响因素分析[J].微特电机, 2019, 47(6): 1.
- [10] 王艳武,杨立,陈翔,等.异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J].电机与控制学报, 2010, 14(6): 27.
- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [12] GILSON G, PICKERING S J, HANN D B, et al. Analysis of the end winding heat transfer variation with altitude in electric motors[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009.