

电机定子绕组端部建模方法对热流场仿真结果影响分析*

王永青¹, 余中军¹, 姜亚鹏¹, 高 强²

(1. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;

2. 海军驻武汉 712 所军事代表室, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 电机温升是影响电机性能和运行可靠性的主要元素之一, 温度校核已成为电机设计过程中的重要环节。目前大多采用电机三维温度场仿真方法, 但是因电机端部绕组结构复杂, 热流场耦合性强, 对计算结果准确性影响较大。建立 3 种定子绕组端部建模简化方式, 使用 Fluent 仿真软件平台对某感应电动机热流场进行了仿真计算及分析。结果表明, 建模时可以将定子端部绕组简化为拉直向上弯折的二维结构, 这种简化方式兼具建模时间短、仿真精度高等优点。所得结论对快速进行电机热流场仿真、缩短电机设计周期有一定的参考作用。

关键词: 感应电动机; 温度场; 端部绕组; 简化模型

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0067-05

Analysis of Influence of Simplified Model of Stator End Winding on Motor Thermal Field and Velocity Field Calculation *

WANG Yongqing¹, YU Zhongjun¹, JIANG Yapeng¹, GAO Qiang²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. PLAN Representative Office in 712th Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: The temperature rise of the motor was one of the main factors that affected the performance and reliability of the motor. At present, the three dimensional temperature field simulation method was adopted, but because of the complex structure of winding and the strong coupling of heat flux field, which affecting the accuracy of the calculation results largely. The simplified modeling method of 3 kinds of stator end winding was established, and the simulation and analysis of the heat flux field of the induction motor was carried out by using the Fluent simulation software platform. The results showed that the model could be simplified as a two-dimensional stator end winding structure of straightening bent upward, the simplified method had both advantages of short modeling time and high simulation precision. The conclusions could be used as a reference for the simulation of the heat flux field and shorting the design period of the motor.

Key words: induction motor; temperature field; end winding; simplified model

0 引 言

电机设计的基本规律说明, 单机容量越大, 其经济性能越好。电机功率越大, 电机的发热将愈

发严重, 温升成为限制容量增长的主要障碍^[1]。随着电机容量、功率密度的不断提高, 冷却系统的优化设计越来越受到人们的重视。

电机温度场计算结果的准确性是电机冷却系

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB035601); 国家自然科学基金项目(51690181)

作者简介: 王永青(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机冷却技术。

统优化设计的前提。目前主要有两种计算方法:等效热网络法和数值算法。等效热网络法用集中热源和等值热阻代替真实热源和热阻,模仿电路理论建立等效热路法,其工作量小,计算速度快,但是只能得到电机某个部分的平均温度,无法获取最高温度点。数值算法依据热交换定律,用微分方程将电机内的热交换现象表示出来,采用数值方法求解微分方程组。该方法可以考虑复杂的电机结构,计算精度高,并且可以计算出电机中的温度分布,找出局部过热点,有利于合理布置冷却系统和故障点的精确定位^[2]。数值算法主要分为几何建模、网格剖分、求解器计算和后处理四个步骤。随着计算机性能的提高,求解器计算时间已经大大减少,但是进行几何建模和网格剖分仍需花费大量时间,并且需要一定的经验和技巧。电机设计初始阶段,设计方案改动较多,每次精确建模花费大量时间和精力,影响电机的研制进度,因此建模时需要对电机部分复杂结构进行合理简化。端部绕组结构复杂,按照实际绕组结构进行建模比较困难,并且划分网格数量比较大,影响电机设计效率。

本文以一台大容量感应电动机为对象,建立此电机的三维计算模型。使用 Fluent 仿真软件平台计算其热流场分布,分析端部绕组建模的不同简化方式对电机热流场的影响,为今后电机热流场计算时模型的合理简化提供依据。

1 建立模型

1.1 冷却系统结构

该电机定转子铁心设有径向通风沟,采用两边对称径向通风。冷却空气进入电机后,气流分为三路:一路经定子端部绕组直接进入定子铁心背部;一路直接进入气隙;另一路经定子端部绕组向下从转子端环下进入转子支架,经过转子铁心径向通风沟,与进入气隙的气流汇合进入定子径向通风沟。三路气流在定子背部汇合,从背部出风区排向换热器^[3]。

为节省计算资源,根据电机本身所具有的对称特性,对电机模型进行简化处理:轴向对称取半,圆周方向的简化根据定转子槽数之比确定了最小周期性单元、取整个圆周的 1/42,取半后的仿真模型共有 11 个通风沟。电机实际模型如

图 1 所示。

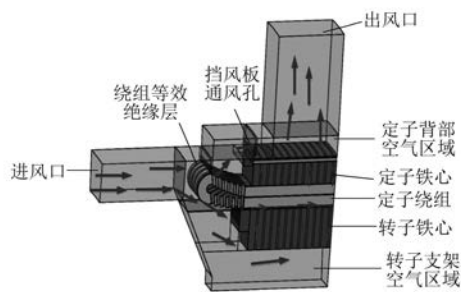


图 1 电机的物理模型

1.2 端部绕组简化

定子端部绕组空间结构较为复杂,本文选取三种简化方式,分别给定相同的条件进行计算,如图 2 所示。方案 1 将定子绕组拉长成直线段,这种方案建模时间短、网格质量高,缺点是建模轴向长度过长,与实际情况相差较大。方案 2 将槽内直线段拉伸一小段后向上弯曲成矩形框,但是仍然保证上下层线圈在一个平面。这种方案将端部绕组简化成二维结构,保证端部绕组轴向长度与实际电机相等。方案 3 对绕组三维结构精确建模,槽内的上下层线圈分别与不同槽内的上下层线圈连接。这种方案建模时间长,网格划分需要一定的经验和技巧,网格数量多、计算时间长。

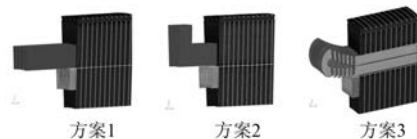


图 2 端部绕组三种简化方案

1.3 端部绕组建模

端部绕组的建模需要注意绝缘层的处理,绝缘材料一般为绝热材料,导热系数为 $0.1 \sim 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,对其合理的等效是准确计算电机温度场的关键^[4]。该电机定子绕组采用双层整距集中绕组形式,绕组内部的铜心多为多层铜线叠加而成,且每层线圈均包裹有绝缘材料。建模时将绕组简化成其最外缘包裹一层绝缘层,并使散热面积相同,如图 3 所示。

槽绝缘中含有绝缘漆、浸渍漆、绝缘纸等多种绝缘材料,很难直接准确地计算绕组等效绝缘层的导热系数^[5]。等效导热系数 λ_{ev} 的计算方法为

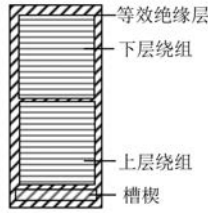


图3 定子绕组等效绝缘层

$$\lambda_{ev} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1)$$

式中: δ_i ——各绝缘材料的等效厚度;

λ_i ——各绝缘材料的等效导热系数。

通过式(1)的计算,并结合计算经验,定子绕组等效绝缘层等效导热系数 λ_{ev} 为 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2 热流场的数值计算

2.1 温度场计算基础

对于各项异性介质,直角坐标系下三维导热偏微分方程为^[6]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: T ——物体的温度;

t ——时间;

k_x, k_y, k_z —— x, y, z 方向的导热系数;

ρ ——材料的密度;

c ——材料的比热;

q_v ——热源的发热密度。

对于稳态温度场,温度不随时间变化,即 $\partial T / \partial t = 0$,考虑到边界条件,对导热微分方程的求解可以归为一个边值问题:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v \\ T|_{S_1} = T_0 \\ -k_2 \frac{\partial T}{\partial n} |_{S_2} = q \\ -k_3 \frac{\partial T}{\partial n} |_{S_3} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_1 ——物体边界;

T_0 ——已知边界面的温度;

k_2 ——垂直于界面 S_2 的热传导率;

q ——通过界面的热流密度;

k_3 ——垂直于界面 S_3 的热传导率;

T_f ——冷却介质的温度;

α ——发生在界面 S_3 上物体与冷却介质的对流换热系数。

2.2 流场计算基础

根据流体动力学的基本原理,在直角坐标系中可以写出相应的流体通用控制方程^[7]:

$$\text{div}(\rho \mathbf{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}$ ——速度矢量;

ρ ——流体密度;

Φ ——通用变量,对于不同的控制方程,可以分别代表脉动动能、能量耗散率等求解变量;

Γ ——广义扩展系数;

S ——广义源项。

2.3 计算假设与设置

为简化计算过程,本文作如下假设:(1)忽略机壳与空气的自然对流换热以及机壳的辐射散热。(2)电机内部流道的空气流速远小于声速,即马赫数 Ma 很小,将空气作为不可压缩流体来处理。(3)定子铁耗在定子齿部和轭部平均分布。(4)各组件接触良好,接触热阻为零。(5)定子铜损耗在上下层线棒平均分布^[8]。

计算时选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,所有网格节点的离散方程组采用分离、隐式求解,其中,压力与速度耦合方程采用 SIMPLE 算法,方程均采用二阶迎风格式离散^[9]。

3 计算结果

应用 Fluent 仿真软件平台,利用三种计算模型对电机温度场流体场进行仿真分析,多次迭代计算收敛后获得最终结果。电动机定转子各部分的温度、定子背部风量和电机风压仿真结果如表1所示,计算时假设电机运行处于稳态,单边进风量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,冷却空气进口温度 40°C 。

从表1可见,三种模型计算出的定转子和铁心的温度均满足电机 F 级考核要求。对于各部件最高温度值,方案2和方案3计算结果符合较好,差值在 3 K 以内。定子铁心冷却效果较好,最高温度为 $104 \sim 108^\circ\text{C}$,平均温度为 $71 \sim 73^\circ\text{C}$ 。转子

铁心和转子导条主要依靠风冷,转子铁心最高温度与平均温度相差 18 K 以内,转子导条最高温度与平均温度相差 8 K 以内。

表 1 三种建模方案温度场计算结果

方案	1	2	3
定子绕组最高/平均温度/℃	142.7/134.8	145.0/135.0	144.2/137.4
定子铁心最高/平均温度/℃	104.2/65.6	106.8/72.8	108.3/73.5
转子铁心最高/平均温度/℃	92.0/76.1	95.9/79.5	94.7/76.0
转子导条最高/平均温度/℃	92.0/86.8	98.3/90.6	95.0/87.1
定子背部风量/(m ³ ·s ⁻¹)	3.59	3.40	3.31
风压/Pa	506.71	574.69	592.88

假设并联的 3 条风路对应的风阻分别为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ,电机端部绕组对应的风阻为 Z_d ,则电机的总风阻 Z_t 可以由式(5)表示^[10]:

$$Z_t = Z_d + \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}\right)^2} \tag{5}$$

电机定转子尺寸固定,三种模型假设的背部通风面积也相同,因此 3 条风路对应的总风阻相同。不同的端部绕组建模方式导致气流经过端部绕组时的风阻 Z_d 略有不同,因此三种计算模型对应的总风阻 Z_t 略有不同。假设电机的风压为 p ,冷却空气单边进风量为 Q ,则二者与总风阻 Z_t 的关系由式(6)表示:

$$p = Z_t Q^2 \tag{6}$$

三种计算模型的冷却总风量 Q 相同,因此不同的总风阻 Z_t 对应着电机风压 p 略有不同。这与流体场仿真结果是相符的。

图 4 为计算模型中截面流体场分布图。电机内最高风速为 44~47 m/s。定子背部挡风板增设有通风孔,气流经过此处相当于进入“渐缩管”,速度增加^[11]。进入转子支架内空气流速较小,因此定转子各个径向通风沟内气体流速差别不大,散热效果相当,定子铁心温度分布较为均匀。端部绕组上方出现涡流,冷却风量有所损失,可以通过增设挡风板解决此问题。

图 5 为使用三种模型计算得到的定子铁心和定子绕组温度场分布图。该型感应电动机最高温升出现在端部绕组。方案 2 绕组最高温度出现在定子绕组下层,出现位置与方案 3 略有不同。这是因为方案 2 建模后下层绕组折角处形成气流

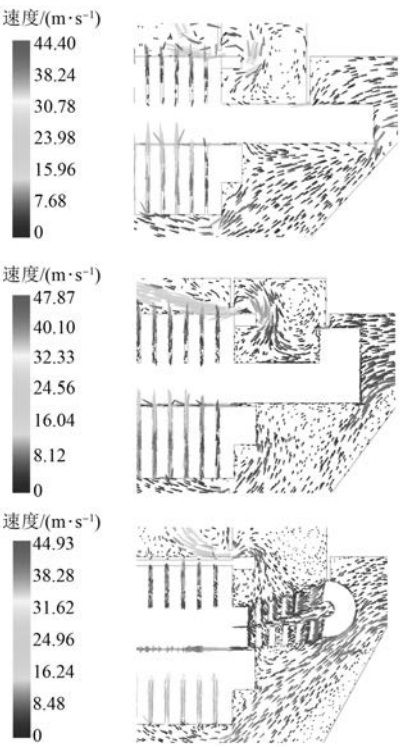


图 4 三种端部绕组简化模型流体场分布

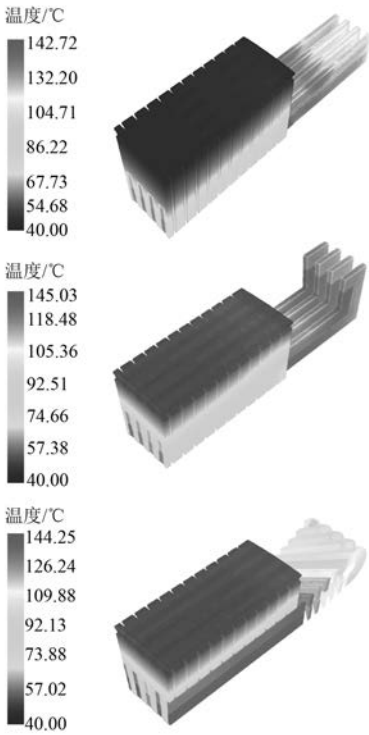


图 5 三种端部绕组简化模型温度场分布

“死区”,导致下层绕组与冷却介质对流换热变差,因而出现局部温度较高。从电机最高温度值

的计算结果来看,方案2和方案3相差较小。从温度场云图来看,方案1定子铁心温度计算值偏低,与方案2和方案3相差较大。这是因为将端部绕组拉直后,端部绕组的风阻变小,使得进入定子铁心背部的风量增加,定子铁心轭部冷却效果得到加强。

从三种方案的计算结果来看,电机内部热流场的耦合比较强。端部绕组建模时的不同简化方式,直接影响电机内部流场的分布,进而影响着各部件与冷却空气的对流换热效果,因此会对电机温度场计算的准确性造成一定的影响。从电机各部件具体的温度计算结果来看,结合电机三维热流场分布云图,方案2和方案3计算结果吻合较好,可以选用方案2作为定子绕组端部建模简化方案。

4 结 语

本文针对一台感应电动机使用3种模型对其定转子的三维温度场流体场进行了仿真分析,比较了不同端部绕组建模简化方案对电机热流场仿真的影响。计算结果表明,将定子端部绕组简化为拉直向上弯折的二维结构对计算结果影响较小。这种简化方式对于快速进行电机热流场仿真、缩短电机设计周期是有益的。

【参考文献】

- [1] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992.

(上接第60页)

性,且在电机运行中极易受负载扰动影响等问题,本文将传统PID控制与FNN控制有机结合起来,设计一种FNN PID控制器作为PMLSM控制系统的速度控制器,并且将FOA和FLA两种群体智能算法融合形成FOA-FLA,以FOA-FLA在线优化FNN的结构参数,输出PID控制器最优参数 k_p 、 k_i 、 k_d ,从而提高PMLSM控制系统的动、静态性能。仿真与试验取得良好的优化效果,对于PMLSM的工程应用有一定的指导意义。

【参考文献】

- [1] 胡江.永磁同步直线电机智能化PID速度控制研

- [2] 刘秀杰,杨平,陈岩.发电机定子绕组温度的计算方法及评价[J].电机与控制应用,2014,41(1): 19-22.
- [3] 余中军,王东,郭云珺.汽轮发电机定转子三维温度场仿真计算[J].电机与控制应用,2013,40(11): 8-11.
- [4] JANNE N, MARKO R, JUHA P. Thermal analysis of radial-flux electrical machines with a high power density [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3543-3554.
- [5] 王淑旺,江曼,朱标龙,等.车用变频调速水冷永磁同步电机三维温度场分析[J].电机与控制应用, 2016, 43(2): 55-59.
- [6] 杨明发,张培铭.异步电动机定子全域三维温度场物理模型简化研究[J].中国电机工程学报, 2010, 30(S): 203-208.
- [7] 张桢海,迟长春,练正兵,等.高功率密度笼型异步风力发电机通风结构优化分析[J].电机与控制应用, 2015, 42(4): 53-57.
- [8] 霍菲阳,李勇,李伟力,等.大型空冷汽轮发电机定子通风结构优化方案的计算与分析[J].中国电机工程学报, 2010, 30(6): 69-75.
- [9] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [10] [苏]鲍里先科,丹科,亚科夫列夫.电机中的空气动力学与热传递[M].魏书慈,邱建甫,译.北京:机械工业出版社, 1985.
- [11] 郭荣良,郭清南,祝世兴.流体力学及应用[M].北京:机械工业出版社, 1996.

收稿日期: 2017-04-05

究[J].信息技术, 2015(8): 96-99.

- [2] 武琳,王丽梅,左涛.基于神经网络的永磁直线同步电机位置控制[J].电气技术, 2009(3): 17-20.
- [3] 乔维德.遗传算法优化的开关磁阻电动机RFNN位置控制器设计[J].微特电机, 2016, 44(2): 75-77.
- [4] 刘成忠,黄高宝,张仁陟,等.局部深度搜索的混合果蝇优化算法[J].计算机应用, 2014, 34(4): 1060-1064.
- [5] 党明辉,郭亮.基于模糊神经网络PID的永磁同步直线电机控制算法研究[J].浙江理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 52-57.

收稿日期: 2016-12-19