

CRH380A高速动车牵引变压器磁场、涡流及损耗的有限元分析

为研究CRH380A高速动车壳式牵引变压器磁场、涡流及损耗的大小,提出了采用ANSYS有限元分析的方法。结合多绕组变压器的磁动势方程,建立了涡流场分析计算的数学模型,详细介绍了有限元分析的流程。同时建立了该壳式牵引变压器的三维有限元模型,分析了变压器铁心主磁通、铁心夹板和油箱壁的漏磁及涡流,计算了变压器主要部件的损耗。仿真结果表明:变压器额定运行条件下铁心主磁通为1.5 T,钢夹板上的漏磁和涡流具有上下对称的规律,油箱漏磁和涡流最大的地方位于与绕组端部对应的区域。该研究工作弥补了传统工程设计方法中无法计算漏磁与涡流损耗的缺陷,同时也为变压器的优化设计提供了参考依据。

李高龙 龙谷宗 胡 贵 吴 勇/南车株洲电机有限公司
许加柱/湖南大学电气与信息工程学院



李高龙/助理工程师

关键词/Keywords

高速动车·
壳式牵引变压器·
磁场·
涡流及损耗·
有限元分析·

牵引变压器是高速动车组的关键设备之一,随着轨道交通在我国的大范围建设和日益普及,针对牵引变压器的研究也在不断深入^[1-5]。牵引变压器的磁场、涡流及其损耗是牵引变压器设计和研制过程中必须认真分析和计算的关键数据。目前国内的车载牵引变压器主要有心式和壳式两种结构:心式牵引变压器具有容量大、阻抗高的优点;壳式牵引变压器具有重量轻、结构紧凑的优点。心式牵引变压器进入我国轨道交通行业时间较早,相应的研究与有限元分析工作也开展的较多。文献[6-7]在忽视主磁通的情况下,采用有限元方法对心式牵引变压器铁心夹板及油箱的漏磁进行了仿真和分析,导致漏磁计算误差较大,同时也影响了其涡流损耗计算的准确度。文献[8-10]对电力变压器的漏磁场

及其金属件涡流损耗进行了分析和计算,却没有找出漏磁场与涡流的分布规律。近年来,我国轨道交通领域引入了壳式牵引变压器,但针对壳式牵引变压器有限元仿真与计算的相关文献却很鲜见。

针对CRH380A高速动车组采用壳式牵引变压器这一现状,本文在建立其涡流场计算数学模型的基础上,给出了涡流损耗和绕组损耗的计算解析表达式;并采用ANSYS有限元仿真软件建立了该壳式牵引变压器的三维有限元模型,通过仿真求得变压器铁心中主磁通、铁心钢夹板和油箱壁上的漏磁与涡流,同时也计算了各部件损耗值。通过对比理论与实测数据,可知本文的计算结果具有较好的准确度,能弥补壳式牵引变压器传统设计方法中无法计算漏磁、涡流及损耗的缺陷,对后续变压器温度场的分析计算及其结构优化设计提供了可靠数据。

变压器磁场、涡流及损耗的数理解析

1. 变压器磁场方程及其磁场理论

高速动车组壳式牵引变压器是多绕组变压器,按照洛果夫斯基的定义,多绕组变压器磁动势方程^[11]为

$$\sum_{j=1}^n I_j N_j = I_M N_1 \quad (1)$$

由式(1)可得

$$I_1 = I_M + \frac{\sum_{j=2}^n I_j N_j}{N_1} = I_M + I_{1H} \quad (2)$$

变压器的全部磁场分为主磁通和

国家科技支撑计划子课题(2009BAG12A05-4号)。

漏磁通两部分。主磁通由励磁磁动势 $F_M = I_M N_1$ 建立,其流通路径为铁心;漏磁通由和等于0的两个磁动势建立,即由一次电流负载分量和二次电流的磁动势所建立,表达式为

$$F_{1H} + \sum_{j=2}^n F_j = I_{1H} N_1 + \sum_{j=2}^n N_j I_j = 0 \quad (3)$$

由合成磁动势建立的磁场,按照全电流定律,不可能包含与变压器所有绕组都交链的磁通,仅可能包含与一部分变压器绕组逐次或完全交链的磁通,这个磁通即为变压器的漏磁通。漏磁通的流通路径较为复杂,有的通过绕组空道及绕组所占的部分空间闭合,有的通过绕组端部闭合,有的进入夹板,还有的通过油箱后再闭合。

2. 涡流场的数学模型及其损耗计算

变压器中的磁场为交变磁场,当变压器的漏磁场通过变压器内部金属结构件时,会在金属结构件中产生涡流,并最终产生涡流损耗^[12-13]。由矢量磁动势 A 描述的涡流场计算数学模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_z} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -J_s + j\omega\sigma A \in \Omega \quad (4)$$

$$A = A_0 \quad (x, y, z) \in S_1 \quad (5)$$

式中,矢量磁动势满足 $B = \nabla \times A$; μ_x 、 μ_y 和 μ_z 分别为求解域 Ω 内 x 、 y 和 z 方向的磁导率; σ 为金属件或涡流区域的电导率; S_1 为模拟无穷远边界; $A_0 = 0$ 。

根据式(4)和式(5)得出涡流密度,即

$$J_e = -\sigma(j\omega A + \text{grad} \Phi) \quad (6)$$

涡流损耗表达式为

$$P_{\text{rms}} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \frac{\omega}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \frac{J_e J_e^*}{\sigma} dt \right) dv \quad (7)$$

式中, Ω 为涡流损耗计算区域; t 为时间周期。

3. 绕组损耗计算

除金属结构件中产生的涡流损耗外,由于绕组本身电阻的存在,通流绕组也会产生一定的损耗。绕组损耗包括两部分^[14]:一是绕组基本铜耗;一是绕组涡流损耗。其计算公式为

$$P = I^2 R_0 (1 + K_w) \quad (8)$$

式中, I 为绕组中流过的电流; R_0 为相应温度时绕

组的电阻值; K_w 为绕组涡流损耗百分比,对于牵引变压器,其值约为4%,准确计算则与导线截面积、导线线规、电抗高度和频率等有关。

有限元法的分析流程

有限元法是一种常用且高效能的工程计算方法,是用有限个单元将连续体离散化,通过对有限个单元进行分片插值,并基于物理计算理论求解各种物理问题的一种数值计算方法。有限元法在电磁分析方面具有较高的计算准确度,结合计算机辅助设计技术,有限元方法可以方便准确地对电磁器件进行仿真分析^[15-16]。

典型的有限元仿真分析流程如图1所示,完成可靠的有限元仿真分析往往需要进行多次仿真分析^[17-18]。

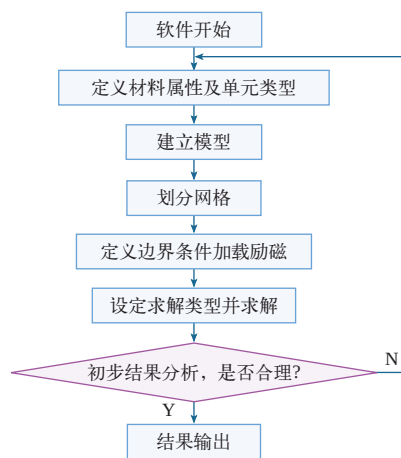


图1 有限元分析流程

牵引变压器参数及其有限元模型

1. 变压器结构及其参数

本文研究的CRH380A壳式牵引变压器由一次高压绕组、二次两个牵引绕组和一个辅助绕组组成。该变压器的主要电气参数如表1所示。

表1 牵引变压器主要电气参数

	高压绕组	牵引绕组	辅助绕组
容量/kV·A	3 855	1 667.5 × 2	520
电压/V	25 000	1 658 × 2	400
电流/A	154	1 006 × 2	1 300

2. 变压器三维有限元模型

牵引变压器实物的结构复杂,附属部件较

多,但在有限元分析模型中,需要根据实物尺寸和结构做出合理的简化,只保留铁心、绕组、油箱、油和需要重点关注的铁心钢夹板。对于变压器油,可以划分为自由网格;对于其他部件,则应划分为六面体网格,以提高计算准确度。划分好网格后的有限元模型如图2和图3所示。

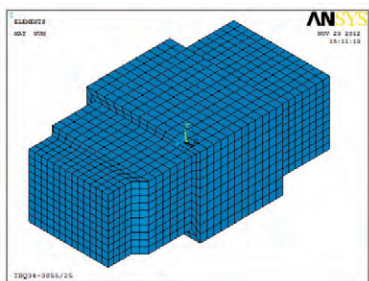


图2 变压器油箱的有限元模型

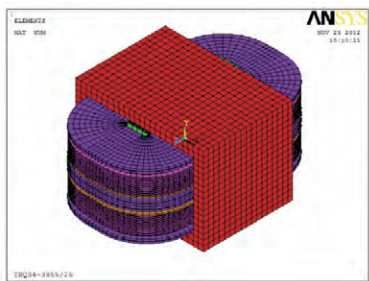


图3 铁心、绕组和钢夹板有限元模型

仿真结果分析

1. 磁场分布

变压器的磁场分析重点关注铁心中的主磁通及金属结构件中的漏磁通两个部分。图4为变压器铁心中的主磁通矢量分布,图5为主磁通在铁心柱正中央的截面剖视图。由图5可知,该变压器在额定运行条件下,其铁心中的平均磁密约为1.5 T。

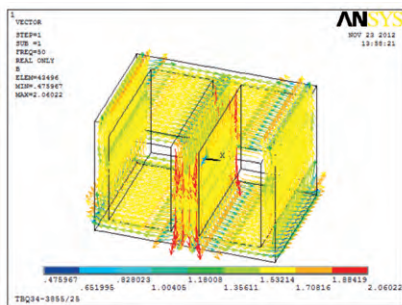


图4 铁心中的主磁通矢量分布

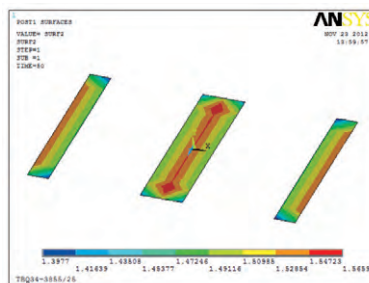


图5 铁心柱主磁通截面

图6为铁心钢夹板的漏磁场分布。由图6可知,由于铁心钢夹板紧贴铁心,其相应的漏磁通也较大,局部漏磁通最大值已达到0.22 T,且具有上下对称分布的特点;在漏磁通集中位置会产生较大涡流和涡流损耗,因此必须给予重视,避免形成局部过热。

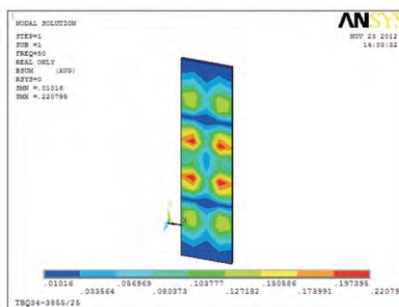


图6 铁心钢夹板的漏磁分布

该壳式牵引变压器油箱采用Q345导磁钢板,根据交错式绕组变压器漏磁场分布规律可知,在高压绕组和低压绕组之间的漏磁较大,必然会在油箱壁的相应位置体现出来。图7为油箱壁上的漏磁密的分布。由图7可知,局部漏磁密集中位置与铁心钢夹板中漏磁密集中位置相对应,且油箱壁中的局部漏磁密高达0.62 T。

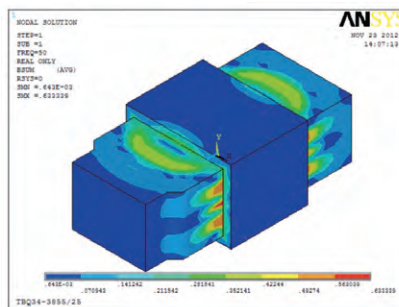


图7 油箱的漏磁分布

2. 涡流分布

根据前面的电磁理论分析可知：交变的磁场会在导电的金属材料上感应出涡流，涡流的大小与磁场强弱及金属结构件的电阻率有关。漏磁密度越大，则涡流越大；金属结构件的电阻率越大，则涡流越小。

图8为铁心钢夹板的涡流密度分布矢量图，涡流密度最大值位于钢夹板的中间位置，且具有上下对称的分布规律。

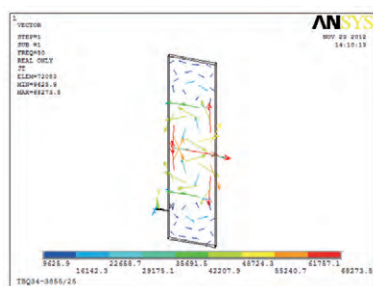


图8 钢夹板上的涡流分布

图9为油箱壁的涡流密度分布矢量图，涡流密度集中区域与漏磁场集中区域是相对应的，直观反映出漏磁场与涡流分布的关系。

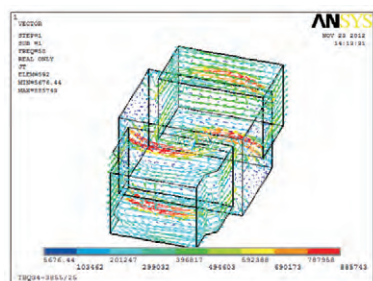


图9 油箱上的涡流分布

3. 损耗计算

在ANSYS软件中，完成该变压器的谐场仿真分析计算后，进入软件的后处理器，根据式(7)即可完成对变压器内部各金属结构件涡流损耗的提取。仿真计算结果与理论设计值对比结果如表2所示。

表2 各部分损耗仿真计算值与理论计算值的对比

(单位: kW)

部件名称	高压绕组	牵引绕组	辅助绕组	钢夹板	油箱
仿真值	92.4	45.0	6.5	0.36	1.08
设计值	94.8	50.6	6.8	无	无

对比仿真结果与变压器研制过程中的理论计算值可知：有限元仿真计算可较准确地计算变压器的绕组损耗值；同时又能弥补传统设计方法中无法计算钢夹板和油箱涡流损耗的不足。

结束语

本文针对CRH380A高速动车的壳式牵引变压器，采用有限元法对其进行磁场、涡流及损耗的仿真分析计算，并总结如下：

1) CRH380A壳式牵引变压器额定运行时，铁心主磁通密度为1.5 T；钢夹板及油箱壁上的漏磁场分布集中位置主要位于高、低压绕组之间，与理论分析一致，漏磁密的最大值分别达到0.22 T和0.62 T。

2) 铁心钢夹板和油箱上的涡流分布与漏磁分布具有相对应的规律，并且钢夹板上漏磁与涡流上下对称。油箱上的漏磁与涡流较大的地方主要位于与铁心柱两侧及绕组端部对应的区域。

3) 通过有限元仿真，准确计算出该壳式牵引变压器各绕组的损耗值，并求得铁心钢夹板和油箱的涡流损耗值，弥补了新产品研制设计过程中的不足。本文介绍的方法具有很好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 龙谷宗. 我国电力牵引变压器技术现状及展望 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29 (2): 4-6.
- [2] 黄登威, 钟福兵. 和谐HxDI型大功率交流电力机车主变压器 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30 (1): 21-25.
- [3] 胡贵, 龙谷宗, 吴勇. 200 km/h动车组牵引变压器的国产化设计 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31 (4): 16-18.
- [4] 钱立新. 速度350 km/h等级世界高速列车技术发展综述 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28 (4): 66-72.
- [5] 罗隆福, 张志文, 邓建国, 等. 多绕组变压器复合短路阻抗的求解方法 [J]. 电工技术学报, 2002, 17 (3): 146-152.
- [6] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 电力机车主变压器的三维漏磁场与夹板涡流损耗计算和优化 [J]. 变

(下转第97页)

- [2] 孙亦詮. 国外盘式电动机的进展 [J]. 电工电能新技术, 1983: 9-14.
- [3] Kohari Z, Nadudvari Z, Szlama L, et al. Test results of a compact disk-type motor/generator unit with superconducting bearings for flywheel energy storage systems with ultra-low idling losses [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21 (3): 1497-1501.
- [4] F Giulii Capponi, G De Donato, F Caricchi. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (6): 2190-2205.
- [5] 宫晓, 徐衍亮, 冯开杰. 新型盘式横向磁通永磁电动机及其空载电动势波形的解析计算 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (7): 77-82.
- [6] 王晓远, 李娟, 齐立晓, 等. 盘式永磁同步电动机永磁体内涡流的有限元分析 [J]. 微电机, 2007, 40 (1): 5-9.
- [7] 杜静娟. 基于 Halbach 阵列楔形气隙盘式无铁心永磁同步电动机的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [8] Guo-Jhih Yan, Liang-Yi Hsu, Jing-Hui Wang, et al. Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4732-4735.
- [9] 郭雨. 盘式无铁心永磁同步电动机负载情况下的磁场分析及计算 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [10] 王晓远, 宋鹏, 田亮, 等. 基于DSP的盘式无铁心永磁同步电动机调速系统 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (17): 138-142.
- [11] 朱熙, 范瑜, 吕刚, 等. 单边盘式感应电动机的数学模型与转矩分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (24): 69-74.
- [12] 白凤仙, 孙建中, 路秀芬, 等. 盘式无刷直流电动机动态性能仿真的场路耦合法 [J]. 太原理工大学学报, 1999, 30 (1): 50-53.
- (收稿日期: 2015-01-20) EA

(上接第87页)

- 压器, 2006, 43 (9): 66-72.
- [7] 梁湘湘, 许加柱, 姚新丽. 大功率牵引主变压器油箱壁的三维涡流场与温度场的分析与计算 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34 (6): 38-44.
- [8] 朱占新, 谢德馨, 张艳丽. 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (9): 156-160.
- [9] 李琳, 崔翔, 张元禄, 等. 电力变压器三维漏磁场及铁心拉板涡流损耗的计算 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (6): 33-36.
- [10] 李龙女, 李岩, 井永腾, 等. 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 122-127.
- [11] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [12] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 151-152.
- [13] 张俊杰, 李琳, 等. 进入硅钢叠片内的漏磁通和附加损耗的模拟实验与仿真 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 148-153.
- [14] 尹克宁. 变压器设计原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [15] 阎照文. ANSYS10.0工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [16] 博弈创作室. APDL参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [17] 张志文, 李高龙, 许加柱, 等. 特种电抗器磁场分布与电感的有限元分析计算 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (5): 307-310.
- [18] 李高龙. 10 kV配电网单相短路电流计算及跨步电压的有限元分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- (收稿日期: 2015-01-30) EA