

基于 fluent 箱式电抗器热流仿真

袁数数¹ 郑高凯²

1. 许继变压器有限公司, 河南 许昌 461000

2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000

[摘要]箱式电抗器是铁路电力系统中不可缺少的电力设备, 主要用来补偿电容电流, 抑制轻载时端电压的升高。通过走访正在运行的箱式电抗器, 发现箱体内温度偏高, 在夏季箱体内温度高达 70 至 80 摄氏度, 严重影响箱式电抗器的使用寿命, 文中以某型号箱式电抗器为研究对象, 通过试验和仿真的研究方式, 对箱式电抗器的结构进行优化设计, 结果显示优化后箱体内最高温度降低 4 摄氏度平均温度降低温度场和流场有明显改善。

[关键词]箱式电抗器; 仿真; 温度场; 流场

DOI: 10.33142/hst.v7i6.12490

中图分类号: TM912.9

文献标识码: A

Simulation of Heat Flow in Box Reactor Based on Fluent

YUAN Shushu¹, ZHENG Gaokai²

1 Xuji Transformer Co., Ltd., Xuchang, He'nan, 461000, China

2 XJ Group Co., Ltd., Xuchang, He'nan, 461000, China

Abstract: Box type reactors are indispensable power equipment in railway power systems, mainly used to compensate for capacitive current and suppress the rise of terminal voltage during light load. By visiting the operating box type reactor, it was found that the temperature inside the box is relatively high. In summer, the temperature inside the box can reach as high as 70 to 80 degrees Celsius, seriously affecting the service life of the box type reactor. In this article, a certain model of box type reactor is taken as the research object. Through experimental and simulation research methods, the structure of the box type reactor is optimized and designed. The results show that after optimization, the maximum temperature inside the box is reduced by 4 degrees Celsius, and the average temperature is reduced. The temperature field and flow field are significantly improved.

Keywords: box type reactor; simulation; temperature field; flow field

引言

随着我国铁路事业的高速发展, 箱式电抗器在铁路电力系统中的应用越来越广泛。箱式电抗器具有集成化程度高、体积小、结构简单、安装方便等优点, 箱式电抗器主要是由外壳和电抗器本体组成, 在布置时又可分为两种方式, 即一台外壳放一个本体和一台外壳放两台本体。在现场环境和条件使用条件的双重限制下, 箱式电抗器大多用于户外, 通常需要有较高的防护等级, 目前铁路上招标方要求的防护等级普遍为 IP54, 因而电抗器外壳结构上多采用厚度在 1.5mm 以上的双层钢板焊接而成, 如图 1 所示, 其散热形式为强制式通风。

箱式电抗器配置标准应与箱变一致, 应有通风、烟雾传感器、防凝露、门禁、温度控制、柜体照明等装置, 并经远动上传供电调度。箱式电抗器室一级贯通与综合贯通电抗器应相互隔离。设备的门被非正常开启时通过装在相邻的箱式变电站内的 SCADA 系统向主站报警。温度传感器实时检测箱体内温度。同时具有数据存储功能, 在装置故障或失电时所有数据不会丢失。有液晶显示屏、LED 显示灯和操作键盘, 能实时显示温度信息和故障信息, 并可通过操作键盘设置和修改各种定值和参数。报警温度和跳闸温度定值可根据变压器的实际情况和用户的需要设

置。应具有远程通信功能, 通信接口采用标准接口(如 RS485 标准口)。通信协议应采用对用户完全开放的国际标准规约, 如 Profibus、IEC60870-5-103 等。所有上送信息应带时标, 时标精确到毫秒级, 并能接收变电所综合自动化系统的系统对时信息进行系统对时, 实现与系统时钟同步。

电抗器运行过程中会产生一定热量, 如果不能及时散热, 会造成结构变形, 绝缘迅速老化, 线圈开裂等不良后果, 危及电抗器使用寿命^[1]。本文以某型号一台外壳放一个本体的电抗器为例, 采用试验和仿真相结合的研究方式, 对现有电抗器的流场和温度场进行仿真, 得出外壳内的流速和温度分布, 并在此基础上对外壳结构进行优化, 优化后的箱体温度降低 5~8℃, 对电抗器的安全运行有重要意义。



图 1 箱式电抗器

1 箱式电抗器结构

现有的箱式电抗器主要是由底座、柜体、电抗器本体组成。底座在满足受力的条件下由槽钢和钢板焊接而成，柜体由钢板焊接而成并喷涂防锈漆，电抗器本体多采用干式铁芯，一般居中布置，也可根据用户要求进行一定的修改，柜体下部四周设置进气格栅，与底座采用螺栓连接，其内部填充防尘网和防火岩棉，上部设置排风扇，与下部构成下进上出的强制通风系统。由于上述结构在实际运行过程中温升较高，对风道结构进行改进，在保证防护等级的前提下，将风道结构进行优化设计。

2 原有结构的温升试验和仿真

2.1 温升试验

选取目前正在使用的某型号一台外壳放一台本体的箱式电抗器，箱体外壳上方两两相对设置 4 台风量为 140/168CFM 的风机，铁芯电抗器本体的损耗为 3200W，在试验站内进行温升试验，环境温度：20~23℃，相对湿度：60%~62%，压强：102.1~102.50Pa，采用模拟负载法，在空载条件下施加额定电压 5773V，在负载条件下加实际电流 4.4A，箱体的风机在电抗器室达到 55℃时启动，待本体工作至稳定状态，采用红外测温仪测量结果显示，箱体内的最高温度为 90℃，平均温度为 76℃，

2.2 热流场仿真

2.2.1 热仿真基础

流体流动和传热要受到物理守恒定律的支配，即流动和传热要满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。导热是指流体本身或者流体与相关介质存在温度差值时，温度由高至低发生传递的现象。热量传递有导热、对流和热辐射 3 种方式^[2]。流体流过壁面时，紧贴壁面的位置会形成层流底层，流体在该处流速很低，几乎可看作为零，故此处流体与壁面进行的是导热过程；层流之外的区域热传递方式主要是对流传热过程。箱式电抗器内的空气流体为质量流，对于箱式电抗器模型的主要传热方式为热传导、热对流和热辐射。其所遵守的方程如下：

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\rho}{t} + \frac{\rho}{y} + \frac{\rho}{z} = 0 \quad (1)$$

μ 、 ν 、 ω 分别为速度沿 x 、 y 、 z 方向的速度矢量。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\rho}{t} + m \frac{\rho}{x} + n \frac{\rho}{y} + w \frac{\rho}{z} = F_x - \frac{\rho}{r^2 x} \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho}{t} + m \frac{\rho}{x} + n \frac{\rho}{y} + w \frac{\rho}{z} = F_y - \frac{\rho}{r^2 y} \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\rho}{t} + m \frac{\rho}{x} + n \frac{\rho}{y} + w \frac{\rho}{z} = F_x - \frac{\rho}{r^2 z} \quad (4)$$

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\rho}{t} + m \frac{t}{t} + n \frac{t}{y} + w \frac{t}{z} = a \frac{\rho t}{t^2} + \frac{2t}{y^2} + \frac{2t}{z^2} \quad (5)$$

2.2.2 模型建立及网格划分

利用 Creo 软件完成三维模型的绘制，并对其进行一定的简化，将铁芯电抗器本体中的细节(包括引线、垫块、螺丝等)忽略，箱体简化为 1.6m×1.4m×2.1m 的房间形式的长方体，电抗器本体简化为 0.88m×0.12m×0.95m，如图二所示。将该模型导入到 Ansys 中的 SpaceClaim 模块中，对模型进行预处理并抽取流道，对相关模块进行命名，并共享拓扑数据，利用 Ansys workbench meshing 进行网格划分，得出网格数量为 92458 个，网格平均质量 0.68，并对网格质量进行无关验证^[3]，结果显示满足使用需求。

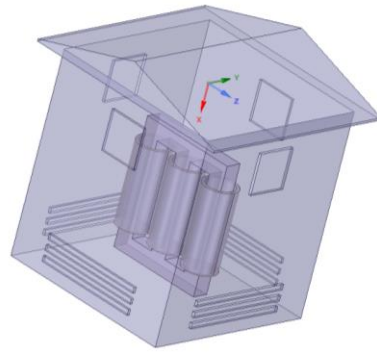


图 2 简化模型

2.2.3 边界条件设置

Fluent 中的边界条件包括有十余种，以方便用户根据不同的物理模型进行选择。这些边界条件类型包括以下方面。(1) axis: 轴边界，用在二维边界模型中，可不设置相关参数；(2) pressure far-field: 远场压力模型；(3) outflow: 流动自由条件；(4) exhaust fan: 排风扇，需要设置表压；(5) velocity inlet: 速度入口；(6) massflow inlet: 质量流量入口边界；(7) pressure inlet: 压力入口；(8) symmetry: 对称边界；(9) porous jump: 多孔模型；(10) wall: 壁面边界；(11) inlet vent: 通风口边界；(12) in-fan: 进风扇，需要设置压力系数；(13) outlet vent: 出风口设置。需提供压损和表压；(14) fan: 风扇边界；(15) interior: 内部面边界；(16) radiator: 散热器，需提供传热和散热系数。本文的入口设置为速度入口，出口设置为排气扇边界条件。

2.2.4 求解模型选取

流体模型的求解可以分为两大类：分别是压力和密度求解器，压力求解器在用途上又可以分成耦合与分离。密度求解器在选用上分为隐形和显形。分离和耦合算法通常是针对压力-速度耦合方程求解的，而显式与隐式则是针对时间项的离散而言的。动量和质量方程按照先后顺序进行求解，该方法针对于基于压力的分离求解器；而耦合求解则是将动量和质量方程耦合在一起进行解答。动量与质量方程与能量方程之间是相互独立进行解答的。而对于密度的质量、动量和能量方程是通过耦合解答。对于低速且不可压缩的流体选用压力求解器^[4]，反之则用密度求解器。

在模型内部相关参数不随时间变化则该模型就是稳态。反之模型则是瞬态。稳态是理想化的模型，在计算工程中通常是无限接近于该模型。瞬态同样是采用该近似方法，在对模型进行一定的简化并且忽略相关参数后通常可以用上述模型进行代替^[5]。本文选用压力基求解器和稳态。

2.3 结果分析

将仿真结果在 CFD-post 中进行后处理，得出风速的矢量图以，结果如图三所示，(1)现有风扇全部开启之后，风速最高达到 0.9m/s，与风机风量换算参数一致，且风速在四个出风口处中间风速高，两边风速低，符合真实风扇的出风规律；(2)箱体内部风速分布较为均匀，未在死角处进行堆积，且风速由底部到顶部分部为 0.4m/s~0.7m/s；(3)风量由进风口处进时未显示异常，但是由于四个进风口相对称，进风处会相互抵消，造成风速衰减过快，影响本体的散热；(4)箱体内部最高温度在 88 摄氏度，温度的最高值在线圈上部，符合散热规律，且与试验值相差不大，因此仿真结果真实有效。综上所述，需要对箱体结构进行进一步的优化改善箱体的散热条件。

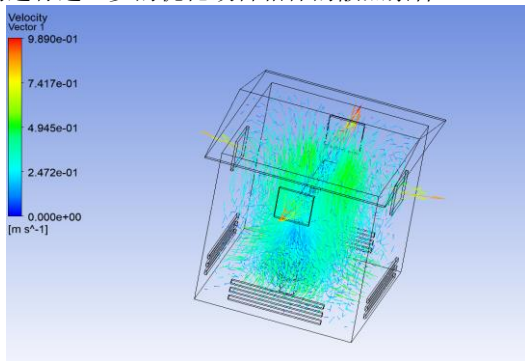


图 3 风速矢量图

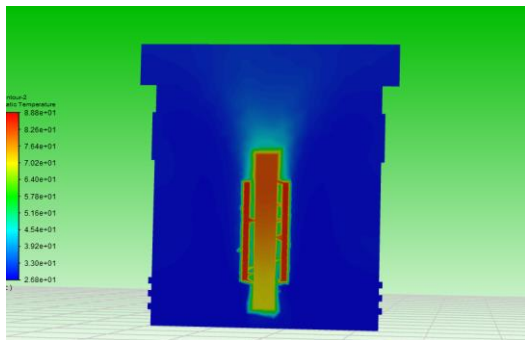


图 4 温度分布云图

3 箱体结构改进与分析

3.1 结构改进与试验

在保证成本不过量增加的基础之上，选用风量较大的风扇，且尺寸不能过大以免影响整个柜体上部的空间布局，同时风机上部风扇的位置不再对称布置，采用错开分布的形式，下进风口尺寸也适当加大，并对其位置也进行修改，与其对侧上部的风扇对中布置，使得两边的流道互不干涉，

并增加外壳整体的散热能力，在原有布置的试验条件下，采用新的箱体布置样式，本体位置不变进行试验，将电流和电压加载至稳定状态，用红外测温仪进行测量，并记录相关数据，经过计算和对数据整理可知，箱体温度最高为 87℃，平均温度 75℃，散热较原有结构有显著提升。

3.2 仿真实验

建立改进后的三维模型导入到 Ansys 中，经过模型处理、网格划分、边界条件设置和求解等步骤之后完成仿真，可知有如下结果：

(1) 箱体出风口的风速分布规律未发生变化，最大风速为 1.2m/s，相应的风量较原有结构提升了 33%，风道分布合理，互不抵消，风速自进风口至出风口呈现进由低到高的阶梯式分布，使得线圈的表面散热效率大幅提升。

(2) 箱体内部最高温度为 80℃，平均温度为 70℃，与前文中试验结果一致，最高温度点距离箱体进风口的垂直距离 0.2m，就水平距离为 0.15m，符合热量上升的规律，空气未能在电抗器上部长时间聚集，没有形成热量旋涡，散热性能良好。

4 结论

本文以模型号的箱式电抗器为研究对象，对其原有结构和改进后结构进行了试验和仿真研究，分析了其流场和温度场分布图，得出如下结论：

(1) 电抗器上部的风扇在保持成本和尺寸的情况下，尽可能选择风量大风速高的类型，同时要保证耐高温。

(2) 为保证风道畅通，箱体上部的所有出风口之间和进风口之间不应两两相对，宜错开，同一个方向进风口和出风口应正对。

(3) 采用 Ansys 进行热流仿真与试验结果对比显示仿真结果真实可靠，可采用此方法进行箱式电抗器的热流仿真研究。

[参考文献]

- [1]王宁,井永腾,郭昊,等.热-流耦合的箱式变电站温度及流体场计算分析[J].变压器,2019,56(8):40-45.
 - [2]赵博文.组合式变电站损耗及温升问题研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
 - [3]高春艳,梁坤峰,李军号,等.变压器室3种通风散热方案模拟研究[J].河南科技大学学报(自然科学版),2013,34(3):63-67.
 - [4]李春生,佟宝全,宋延东,等.箱变温升问题的解决[J].电气制造,2006(1):30-32.
 - [5]王建民,景崇友,韩冬杰,等.干式变压器箔绕导体三维涡流场与附加损耗的数值仿真研究[J].电力科学与工程,2012,28(3):45-50.
- 作者简介:袁数数(1993.3—),毕业院校:长安大学,所学专业:机械工程,单位:许继变压器有限公司,职务:设计师,级别:工程师。