

华北电力大学

硕士学位论文

大型油浸式变压器温度场计算与失效模型研究

**Research on the Calculation of Temperature Field
and It's Proportional Hazards Model of Large
Oil-immersed Transformer**

梁敏

2013 年 12 月

国内图书分类号：TM412
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

工学硕士学位论文

大型油浸式变压器温度场计算与失效模型研究

硕 士 研 究 生：梁敏
导 师：王永强教授
申 请 学 位：工学硕士
学 科：电气工程
专 业：高电压与绝缘技术
所 在 学 院：电气与电子工程学院
答 辩 日 期：2014 年 3 月
授 予 学 位 单 位：华北电力大学

Classified Index: TM412

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on the Calculation of Temperature Field
and It's Proportional Hazards Model of Large
Oil-immersed Transformer**

Candidate:	Liang Min
Supervisor:	Prof. Wang Yong-qiang
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2014
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《大型油浸式变压器温度场计算与失效模型研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《大型油浸式变压器温度场计算与失效模型研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版本，同意学校将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

变压器作为保证电网正常运行的核心设备，其安全、可靠、经济运行与社会经济、居民生活密切相关。大型油浸式风冷变压器因其散热条件好，过负载能力强，在电力系统中发挥着重要的作用。与强油循环变压器相比，自然油循环变压器内的换热和油流动的情况更为复杂，虽然有散热器跟风机，但油的流速仍不高，所以散热效果较差。为了能更深入的探究自然油循环变压器的温度场分布情况，需要对影响变压器热点温度的因素进行研究，主要包括负载、环境温度、风机开停等。

本文运用有限体积法对一款保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 自然油循环大型油浸式变压器（冷却方式：ONAF）三维温度场及热点温度分布进行仿真分析研究；仿真计算中充分考虑散热片及风机开停对温度场及热点分布的影响，按真实比例建立变压器（包含散热片）模型。对其三维温度场仿真计算，分析了其不同负载下的温度场分布及最热点温度和位置，并将仿真结果与计算结果进行了对比，这些研究对变压器的结构优化有一定的指导意义，也为光纤测量自然油风冷式变压器绕组热点温度时的定位提供依据。

大型油浸式变压器的传统维修方式为定期维修，此种方式存在维修不足以及维修过度方面的缺陷，本文以监测到的 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器顶层油温升及绕组热点温升为基本特征量，利用 Weibull 比例失效模型建立了大型油浸式变压器运行状态与故障率之间的关系，以最小维修成本为决策目标，确定基于 PHM 的维修策略，在 VC++ 中编程实现 PHM 维修策略，针对 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器开发出一套基于顶层油温与绕组热点温度的失效模型诊断软件，此软件所用诊断方法能有效解决传统检修方式存在的问题，即维修过度或维修不足，实现大型油浸式变压器“按需维修”的目的。

关键词：大型油浸式变压器；三维温度场；散热片；负荷；失效模型；维修策略；VC++

Abstract

Power transformer is the core equipment of the power system , its operation relate to the security and reliability of electricity supplying to millions of households . Transformer temperature rise is directly related to the transformer insulation life and safety of operation , so the transformer winding hot spot temperature is an important indicator to the measure of the merits of the transformer design. Compared to the transformer with forced oil circulation , the natural circulation in the transformer oil and the oil flow of heat transfer situation is more complex, and although with the radiator and fans, but the flow rate of oil is still high , so the cooling effect is poor. To further explore the temperature distribution of natural oil circulation transformer , the research of factors affect transformer's hot spot temperature is needed, including the load , ambient temperature , fan controlling and so on.

In this paper, we use finite volume method to Simulate and Analyse the three-dimensional temperature field and temperature distribution of hot spots of SFSZ10-M-31500/110 large naturally oil circulation transformer (cooling method : ONAF) . Simulation calculations fully account of the heat sink and fan controlling's affect to the distribution of the temperature field and hot spot . Establish transformers model(including heat sink) according to its true proportion . By simulating its three-dimensional temperature field, we have analysed its temperature distribution and the hottest temperature position under different load, and the simulation results were compared with the calculation result. These studies has some significance to the structural optimization of the transformer, and it also provides a basis for positioning winding hot spot temperature of the natural oil-cooled transformer measured by fiber-optic..

Large oil-immersed transformers' traditional repair methods is regular maintenance, it exists insufficient maintenance and repairs over deficiencies. In this paper, we use the monitored top oil temperature and winding hot spot temperature as the basic characteristic quantity of the SFSZ10-M-31500/110 large oil-immersed transformer, using Weibull failure model to establish a relationship between running state and the the failure rate of large oil-immersed transformer , aiming at minimize maintenance costs , identificate maintenance strategy based on PHM, programming in VC++ to achieve PHM maintenance strategy. Develop a PHM-based diagnostic software for SFSZ10-M-31500/110 large oil-immersed transformer based on its top oil temperature and winding hot spot temperature, this software is used for diagnosis

method can effectively solve the problems of traditional repair methods, namely maintenance of excessive or insufficient maintenance, to achieve large-scale oil-immersed transformers' purpose of "demanding maintenance".

Keywords: Large Oil-immersed Transformer; 3-D Temperature Field; Heat Sink; Load; Proportional Hazards Model; Maintenance Strategy; VC++

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	IV
第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 国内外研究概况	2
1.3 本课题研究的创新点及主要内容	4
1.3.1 本课题的创新点	4
1.3.2 本课题的主要内容	5
第 2 章 温度场基本理论及有限体积法研究	6
2.1 温度场的基本理论	6
2.1.1 温度场及传热原理	6
2.1.2 传热的三种基本方式	6
2.2 FVM 法基本原理	8
2.3 流-固-热耦合分析	9
2.4 FVM 法求解流-固-热耦合场	9
2.5 FLUENT 软件简介	11
2.6 本章小结	12
第 3 章 基于 FVM 法的大型油浸式变压器三维温度场分析	13
3.1 大型油浸式变压器温度场与流场数学模型	13
3.2 大型油浸式变压器生热及散热计算	14
3.2.1 油浸式变压器内热源	14
3.2.2 油浸式变压器散热计算	15
3.3 大型油浸式变压器三维温度场分析	16
3.3.1 大型油浸式变压器温度场物理模型	17
3.3.2 大型油浸式变压器网格划分	17
3.3.3 大型油浸式变压器边界条件、初始条件与物性参数设置	19
3.3.4 大型油浸式变压器温度场载荷施加	21

3.3.5 大型油浸式变压器三维温度场结果分析.....	22
3.3.6 不同负载下的温度场分布.....	27
3.3.7 FLUENT 计算结果与理论计算结果对比	31
3.4 本章小结	33
第 4 章 基于顶层油温与绕组热点温度的油浸式变压器失效模型研究	35
4.1 比例失效模型及其建模.....	35
4.1.1 比例失效模型.....	36
4.1.2 PHM 的参数估计	36
4.2 大型油浸式变压器最优维修策略	37
4.2.1 故障阈值的确定.....	37
4.2.2 维修决策模型.....	38
4.3 基于顶层油温及绕组热点温度的失效模型诊断软件.....	39
4.3.1 数据收集.....	39
4.3.2 参数估计与决策模型.....	41
4.3.3 VC++失效模型诊断软件	42
4.4 本章小结.....	45
第 5 章 结论与展望	46
参考文献	48
攻读硕士学位期间发表的论文	52
攻读硕士学位期间参加的科研工作	53
致 谢	54
作者简介	55

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景及研究意义

大型油浸式风冷变压器由于具有可承受负载大散热性能良好等优点，在电力系统中被广泛的应用，油浸风冷这种冷却方式的特点是依靠油箱的辐射和变压器周围空气的对流把热量从油箱的冷却表面带走，因此在仿真大型油浸式变压器温度场时，建模中考虑散热器和风机对变压器温度分布的影响，得到的仿真结果才能更接近实际。目前国内对大型油浸式变压器温度场建模仿真中，鲜有考虑到散热器及风机对温度场及热点温度分布的影响，其建立的模型与真实的变压器模型相差很大，致使仿真结果与实际值偏差较大。

长期以来，大型油浸式变压器一直沿用定期维修和预防性试验制度，试验和检修周期是这两种检修方式的重要依据。对运行状态不佳的变压器来说，这两种检修方式能起到比较好的预试检修，但因其遵循严格的定期维修及预防实验，需耗费大量的物力及人力，且对于运行状态良好的变压器，若采用这两种方法定期对其进行拆卸维修，则有可能使这些变压器原有的良好状态遭到破坏，造成不必要的损伤与隐患，此外，这也会造成不少的费用浪费，得不偿失。因此，随着电网系统的不断发展，这两种极具盲目性的检修方式很难再保证电网的安全、经济、可靠运行^[1-5]。

状态检修通过传感信号采集与处理后，综合分析实时监测到的数据与历史故障数据有目的性的对变压器进行检修，具备很强的针对性，与计划检修相比，其不仅能有效克服盲目性检修的缺点，而且能提高设备运行的经济性，具备很好的应用前景。因此，为大型油浸式变压器提供一种能准确、有效对变压器做出合理维修决策方案的状态检修方法成为必要^[6-7]。

针对以上问题，本课题运用有限体积法对一款保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 自然油循环大型油浸式变压器（冷却方式：ONAF）三维温度场及热点温度分布进行仿真分析研究；仿真计算中充分考虑散热片对温度场

及热点分布的影响，按真实比例建立变压器（包含散热片）模型。对其三维温度场仿真计算，分析了其在不同负载下的温度场分布及最热点温度和位置，并将仿真结果与计算结果进行了对比，这些研究对变压器的结构优化有一定的指导意义，也为光纤测量自然油风冷式变压器绕组热点温度时的定位提供依据。

针对大型油浸式变压器所采取的传统检修方式存在的缺点，本课题以监测到的变压器顶层油温和绕组热点温度为基本特征量，利用 Weibull 比例失效模型建立了大型油浸式变压器运行状态与故障率之间的关系，以最小维修成本为决策目标，确定基于 PHM 的维修策略，在 VC++ 中编程实现 PHM 维修策略，针对保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 型油浸式变压器开发出一套基于顶层油温与绕组热点温度的失效模型诊断软件，能有效解决现有检修方式存在的缺陷问题，实现“按需维修”的目的。

1.2 国内外研究概况

目前获得变压器热点的方法主要有两种，一种是间接计算，另一种是直接测量。

直接测量法是通过埋设温度传感器于绕组中的方法获取绕组组热点温度，但此方法的难度是热点温度位置很难确定，虽然此方法精度很高，但其前提是要精确的定位绕组热点位置，若传感器埋设的位置偏离热点位置过远，则直接测量法带来的误差将会给变压器带来比较大的安全隐患。直接测量法目前应用较多的是光纤传感技术，如魏玉宾、王哲等介绍了一种新型光纤光栅温度检测仪用于变压器热点温度的监测，这种监测仪能较好的解决传统变压器测温设备测温不准的缺陷。

间接算法中，最早用到的模型是 IEEE Std C57.91 和 IEC354 标准中推荐的热点温度计算模型。很多绕组热点温度动态预测模型的建立，都是基于这一 IEEE 标准，如陈伟根、周渠等基于此标准，引入变压器油粘性系数随温度变化的修正因子，采用 Leveberg-Maquardt 算法对模型参数进行估算，提出了一种新的绕组热点温度动态模型，能很好的计算绕组暂态温度分布。

研究表明,传统的由变压器油温推断出的变压器热点温度,与实际所测得的变压器热点温度存在着几个小时的滞后,导致其误差很大,不能及时准确地得出热点温度。

下面针对国内外对变压器温度场间接测量法的研究状况,分别详叙之。

从上世纪 70 年代开始,国外研究学者展开了变压器温度场计算与仿真领域的研究。97 年 Z.Radakovic 建立了油浸式变压器的热路模型,通过此模型分析了变压器负载系数、环境温度等因素对油纸绝缘热点温度的影响;02 年 Simon A.Ryder 利用热点类比法建立了绝缘区域,强油循环和自然油循环变压器的油流边界层的热阻表达式,此方法能够有效计算绕组的温度变化;06 年 Kurt Preis 等建立了电力变压器电磁热耦合方程,应用有限元方法仿真得到了变压器温度场分布;08 年 Jacek Smolka 等人建立了环氧树脂干式变压器的 CFD 模型,并将其与电磁场进行耦合,应用数值计算方法准确实现了干变的热点温度预测;09 年 DejanSuas 等人在热点与环境温度梯度基础上建立了变压器热点温度模型,此模型能将温度对变压器油的粘性系数、绕组损耗的影响考虑在内;此外,OliverA 利用热网络法计算了变压器绕组的稳态温升以及冷却液的流动^[8-10]。

国内对变压器温度场研究开始于上世纪 90 年代,很多专家对此问题进行了比较深入的研究。其中,

王秀莲分析了强油变压器绕组的温度分布,论述了导向区内线饼数对热点温升的影响,经过多次试验测试,提出了强油导向冷却变压器的油流量分配计算方法,该方法能用于强油变压器各绕组间流量分配的计算;王晓远、李宝林等利用有限元求解方法建立了干式变压器三维温度场方程,成功获取稳定温度场数值结果;张福成等通过有限元法计算绕组热点温度,提出一种油浸式变压器风机智能控制方法;钱苏翔、海瑛等根据传热学原理对变压器实际参数进行细化,推导出了新的热点温度模型,为变压器绕组热点温度预测提供了一种精确的计算方法;井永腾以传热学以及流体力学为基础,应用有限元法,分析了大型油浸式变压器在不同冷却方式和不同冷却介质下顶层油温升以及热点温度,能很好的模拟变压器现场运行情况;崔国民、李瑜等采用 FLUENT 软件数

值模拟了油浸式变压器内部传热与流动情况，获取其内部速度场与温度场；陈伟根、孙才新等采用控制体积法（FVM），通过求解一组代表流-固-热耦合的微分方程，结合变压器的边界条件与初始条件，计算获取绕组的二维温度分布，此方法相对误差能保证在 5% 以内^[11-15]；

以上是国内外对变压器温度场的实验、数值研究概述。从以上综述可以看出国内外专家学者对变压器的温度场进行了细致的研究，但大部分涉及到的是中小型变压器的二维温度场分析，且仿真模型中鲜有考虑到散热片对变压器温度场的影响，而忽略这些因素会对仿真计算结果造成比较大的误差。

1.3 本课题研究的创新点及主要内容

1.3.1 本课题的创新点

本课题的创新点有以下几点：

1、以往油浸式变压器的温度场计算绝大部分是针对中小型油浸式变压器的二维计算，本课题针对大型油浸式变压器的三维模型进行仿真计算。

2、以往油浸式变压器的温度场计算模型中鲜有将散热片考虑进去，模型中含散热片的也只是在二维计算中涉及到散热片，而大型油浸式变压器温度场三维计算分析中鲜有将散热片考虑进来的，而本课题针对大型油浸式变压器的三维模型进行仿真计算中，模型基本按真实变压器的 1:1 比例建立(包含散热片)，保证了模型建立的客观真实性，为温度场计算结果的准确性提供了前提保障。

3、以往大型油浸式变压器所采取的传统定期维修方式存在维修不足或维修过度方面的缺陷问题，本课题以监测到的变压器顶层油温和绕组热点温度为基本特征量，应用 VC++，针对保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 型油浸式变压器开发出一套基于顶层油温与绕组热点温度的综合管理与诊断软件，能有效解决现有检修方式存在维修过度或维修不足的缺陷问题，实现“按需维修”的目的。

1.3.2 本课题的主要内容

本课题针对一款保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 自然油循环大型油浸式变压器（冷却方式：ONAF）进行了三维温度场计算，主要工作内容如下：

1、运用 SOLIDWORK 专业建模软件建立 31.5MVA/110KV 大型油浸风冷变压器的物理模型，运用 ANSYS14.0 Workbench 中的 Geometry 模块对导入进来的变压器模型进行切割处理，并用 Mesh 模块对变压器模型划分出高质量的网格；最后运用 ANSYS14.0 Workbench 中的 FLUENT14.0 软件计算变压器温度场及速度场，并分析温度场及速度场的分布规律，确定绕组热点位置。

2、分析不同负荷下的变压器温度场及绕组热点分布情况。

3、比较热点温度理论计算值与 FLUENT 计算结果，分析误差原因。

4、以监测到的变压器顶层油温和绕组热点温度为基本特征量，利用 Weibull 比例失效模型建立了大型油浸式变压器运行状态与故障率之间的关系，以最小维修成本为决策目标，确定基于 PHM 的维修策略，在 VC++中编程实现 PHM 维修策略，针对保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 型油浸式变压器开发出一套基于顶层油温与绕组热点温度的综合管理与诊断软件，有效解决现有检修方式存在维修过度或维修不足的缺陷问题，实现“按需维修”的目的。

第 2 章 温度场基本理论及有限体积法研究

本章首先介绍了温度场的基本理论，然后对有限体积法（FVM）的原理以及应用 FVM 对大型油浸式变压器流-固-热耦合的求解过程做了详细叙述，最后对 FLUENT 软件的特点以及优点进行了简要说明。

2.1 温度场的基本理论

2.1.1 温度场及传热原理

温度场是指物体内部各个点的温度分布状况，一般来说物体内部的温度为空间坐标与时间坐标的函数，其一般表达式如式 2-1 所示^[16]。

$$T=T(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

本文研究的大型油浸式变压器的温度场，铁芯与绕组的产热率一定，经过一定时间的迭代求解后，产热与散热达成动态平衡，即本文研究的大型油浸式变压器的温度场为稳态温度场^[17]。

日常生活和生产实践中，会遇到大量传热的现象。传热不仅是常见的自然现象，而且广泛存在于工程技术领域，例如，提高锅炉的蒸汽产量，防止燃气轮机燃烧室过热、确定换热器的传热面积、大型油浸式变压器风机控制散热片的散热，防止绕组温度过高造成油纸绝缘老化损坏等，都是典型的传热学问题。

2.1.2 传热的三种基本方式

传热学传热的基本方式有热传导、热辐射和热对流三种^[18-25]。

1) 导热基本定律是由法国物理学家傅里叶于 1822 年通过实验经验的提炼、运用数学方法演绎得出，也称傅里叶定律：

$$\phi = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2-2)$$

式中： ϕ —导热热流量 (W)，单位时间内通过某一给定面积的热量；

λ —比例系数，大小反映了物体导热能力的强弱；

A —与热流方向垂直的面积 (m^2)；

dT/dx —该截面上沿热流方向的温度增量，简称为温度梯度 (K/m)；

导热的基本定律表示，在单位时间内，热传导的方式所传递的热量与垂直于热流的截面积及温度梯度均成正比。

2) 热对流换热的基本定律是英国科学家牛顿 (Newton) 于 1701 年提出的牛顿冷却定律，其分为两种情况，一种是流体被加热时，另一种是流体被冷却时：

1、流体被加热时：

$$\phi = hA(T_w - T_f) \quad (2-3)$$

2、流体被冷却时：

$$\phi = hA(T_f - T_w) \quad (2-4)$$

式中 ϕ —对流换热热流量 (W)；

A —固体壁面对流换热表面积 (m^2)；

T_f —流体温度；

T_w —壁面温度；

h —对流换热系数，也称表面传热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]。 h 不是物性参数，其值反映了对流换热能力的大小，与换热过程中的许多因素有关。

3) 计算黑体表面单位时间内所发出的热辐射能量，可以按照斯特藩-波尔兹曼定律：

$$J_u = \sigma T^4 \quad (2-5)$$

式中 J_u —辐射通量密度，即单位时间内通过单位面积向一侧辐射的总辐射能量 (W/m^2)；

T —热力学温度 (K)。

σ —斯特藩-波尔兹曼常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下得黑体。实际物体辐射热流量的计算可以采用斯特藩-波尔兹曼定律的修正形式：

$$\phi = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (2-6)$$

式中： A 为辐射表面积 (m^2)； ε 称为该物体的辐射率，也称黑度。其值恒小于 1，与物体的种类及表面状态有关。

2.2 FVM 法基本原理

有限体积法(FVM)因其高精度、多种数值算法、多网格支持等优点，使其成为目前计算流-固-热耦合场的最热门方法之一。

控制体积法 (FVM) 的原理为：对计算域进行计算网格划分后，将流动传热的非线性偏微分方程转变为网格单元上积分形式的守恒方程，对积分形式的守恒方程应用高斯散度公式得到控制体边界形式的积分守恒方程，通过应用 SIMPLER、PISO 等算法分离求解出温度场、流场、浓度场等各场在计算域内的分布。守恒形式微分方程用以表示流场和温度场地通用控制方程如式(2-7)所示^[26]。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \rho\phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S(\phi) \quad (2-7)$$

式中 u_i 为流速分量， ρ 为密度， ϕ 为因变量， α 为扩散系数， x_i 为坐标分量， $S(\phi)$ 为源项。

对上式利用高斯散度公式转化为式(2-8)所示形式方程：

$$\iint_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \iint_V \frac{\partial(u_i \rho\phi)}{\partial x_i} dV = \iint_V \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dV + \iint_V S(\phi) dV \quad (2-8)$$

将对流项和扩散项的积分过渡为控制体边界的积分，得到连续性守恒方程，如式(2-9)所示。

$$\left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \right)_p \Delta V + \oint_{\Gamma} \rho \phi u_i n_i d\Gamma = \oint_{\Gamma} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) d\Gamma + S_p \Delta V \quad (2-9)$$

式中， n_i 为计算域边界法线分量， ΔV 为计算域中微元体的体积， Γ 为计算域边界。

2.3 流-固-热耦合分析

三场耦合理论是由流-固两场耦合理论发展而来的,在流-固耦合理论中,有的假设温度是恒定的。但是,自然界中实际存在的流-固耦合系统的温度场一般都是变化的,尤其是大量存在着一些温度变化比较剧烈的流-固耦合系统。对于这一类问题,若用流-固耦合模型来模拟其中的渗流、变形、变温规律就不准确了,而应该考虑热-流-固耦合模型。

所谓热-流-固耦合,是指在由流体、固体和变化温度场组成的系统中三者之间的相互影响,相互作用含物理作用和化学作用,热-流-固耦合问题是渗流、应力、温度三场同时存在时的基本问题。热-流-固耦合问题不仅仅是在流固耦合问题上附加一个体现温度变化的条件,而是将体现流体流动、固体变形、温度场变化的量如流体压力、固相质点位移、绝对温度同时视为基本变量,基本变量处于平等地位。

耦合场分析的过程取决于所需解决的问题是由哪些场的耦合作用,但是,耦合场的分析最终可归结为两种不同的方法:序贯耦合方法和直接耦合方法。

序贯耦合解法是按照顺序进行两次或更多次的相关场分析。它是通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现两种场的耦合的。例如序贯热-应力耦合分析是将热分析得到的节点温度作为“体力”载荷施加在后序的应力分析中来实现耦合的。

直接耦合解法利用包含所有必须自由度的耦合单元类型,仅仅通过一次求解就能得出耦合场分析结果。在这种情形下,耦合是通过计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的。直接耦合法适合求解高度非线性的耦合场。本文所研究的油浸式变压器温度场为流-固-热耦合分析,其耦合场具有高度非线性,因此采用直接耦合的方法对其进行分析。

2.4 FVM 法求解流-固-热耦合场

流-固-热耦合场涉及到流体域与固体域的温度场以及流体域的速度场场共两个场的相互耦合,应用 FVM 进行求解,将计算域分解成微小控制体积后,每个控制体积中需求解的因变量 ϕ 有俩,一是温度 T ,二是三维速度场 (u,v,w) 。因此,需将(2-7)所示的一般形式的控制微分方程具体化为能量方程与动量方程来求解耦合的温度场和速度场。

FVM 求解的能量方程形式如下:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(\rho E + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{eff} + S_h \quad (2-10)$$

式中, S_h ---内热源;

m_j ---组分 j' 的质量分数;

$J_{j'}$ ---组分 j' 的扩散通量;

$k_{eff} = k_t + k$ ---有效导热系数;

$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$, 对于不可压缩流体, $h = \sum_{j'} m_j h_j + \frac{p}{\rho}$ 。组分 j' 的焓定义

为 $h_{j'} = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j'} dT$, 其中, $T_{ref} = 298.15K$ 。

上式转化为 i 方向上的守恒形式如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \rho u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + p g_i + F_i \quad (2-11)$$

式中, F_i ----其它的模型相关源项;

g_i ----重力加速度,

τ_{ij} ----应力张量, $\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$;

p ----静压。

从式 (2-10)、(2-11) 中可看出, 能量方程中包含速度场因子 u_i , 动量方程中亦包含能量源项 F_i , 即流-固-热耦合场中温度场与流场之间的耦合过程即相对应于能量方程与动量方程中速度场因子 u_i 与能量源项 F_i 的相互耦合过程, 在对公式 (2-10)、(2-11) 的求解过程即相当于对流-固-热耦合场的求解过程。

针对变压器油粘性不可压缩的特性, 本文采用 FVM 中基于算子分裂的压力隐式算法 (PISO) 分离求解通过对式 (2-10)、(2-11) 应用积分与高斯散度公式获得的积分形式的连续性守恒方程: 通过预测-修正-再修正的负反馈机制, 依据初始条件所设置的收敛因子, 获取速度场与温度场的收敛解。

压力隐式算法 (PISO) 对压力修正方程的推导是从动量方程开始的, 具体推导思想如下^[27]:

- 1) 给出试探的压力场 p^* 。把它代入动量方程就可以得到一个速度场 (u^*, v^*, w^*) (u, v, w 分别代表动量方程中的三维速度分量 u_x, u_y, u_z), 一般来说, 这个速度场不能满足连续性方程。
- 2) 通过定义 $u = u^* + u'$, $v = v^* + v'$, $w = w^* + w'$, $p = p^* + p'$, 然后结合 u, v, w , 以及 u^*, v^*, w^* 各自对应的动量方程做差值得出的表达式, 得到 u', v', w' 与 p'

的关系。进而 u' , v' , w' 可以用 p' 来表达。

3) $u=u^*+u'$, $v=v^*+v'$, $w=w^*+w'$ 转换为 $u=f(u^*, p')$, $v=f(v^*, p')$, $w=f(w^*, p')$ 形式。把这一个新的表达式代入到连续性方程中就可以得到 p' 与 u^* , v^* , w^* 的关系, 由于 u^* , v^* , w^* 是上一个迭代步的, 因此 p' 可以表达出来, 从而就构造了压力修正方程, 利用速度校正公式, 得到校正后的速度 u , v , w 。

4) 结合校正速度求解湍流场、温度场以及浓度场, 本文所研究的流-固-热耦合场中速度场与温度场耦合紧密, 因此需应用校正速度求解温度场, 即将此步所得到的 u_i 代入能量方程进行求解。

而本文应用算法计算的具体步骤为:

- 1) 给出试探的压力场 p^* 。
- 2) 求解动量方程, 得到 u^* , v^* , w^* 。
- 3) 求解 p' 方程。
- 4) p' 与 p^* 计算得到 P 。
- 5) 利用速度校正公式, 得到校正后的速度 u, v, w 。
- 6) 结合能量方程与校正后速度求解温度场。
- 7) 判断是否收敛。
- 8) 如果收敛, 可以结束求解; 否则返回 2) 继续迭代, 直至收敛。

2.5 FLUENT 软件简介

FLUENT 是基于 FVM 算法的大型流体仿真软件, 因其内部算法 FVM 具备高精度、多种数值算法、多网格支持等诸多优点, 使其成为目前计算流-固-热耦合场的最热门软件。广泛应用于燃料电池、材料加工、化学反应与燃烧、传热与相变、航空航天、电机流热耦合场等工业生活的方方面面。

FLUENT 软件拥有模拟流动、湍流、热传递和反应等广泛物理现象的能力, 在工业上的应用包括从流动飞机机翼的气流到炉膛内的燃烧, 从鼓泡塔到钻进平台, 从血液流动到半导体生产, 以及从无尘室设计到污水处理装置等。软件中的专用模型可以用于开展缸内燃烧、空气声学、涡轮机械和多相流系统的模拟工作。

现今, 全世界范围内数以千计的公司将 FLUENT 与产品研发过程中设计和优化阶段相整合, 并从中获益。先进的求解技术可提供快速、准确的 CFD 结果、

灵活的移动和变形网格，以及出众的并行可扩展能力。用户自定义函数可实现全新的用户模型和扩展现有模型。

FLUENT 中的交互式的求解器设置、求解和后处理能力可轻易暂停计算过程，利用集成和后处理检查结果，改变设置，并随后用简单的操作继续执行计算。

FLUENT 的主要特点及优点是：

- 1) 多种数值算法。有 PISO、SIMPLEC、SIMPLE 等三种算法可供选择；
- 2) 丰富先进的物理模型。FLUENT 可以精确地模拟无粘流、层流、湍流。有 V2F、大涡模拟、K-模型组等各种湍流模型可供选择；
- 3) 先进的动/变形网格技术。有局部网格重划、动态铺层、弹簧压缩等三种网格变形方法可供选择；
- 4) 定常/非定常流动模拟。可以模拟定常与非定常流动；
- 5) 多网格支持功能。支持网格自适应、滑移网格、混合网格等各种网格功能；
- 6) 完全非结构化网。支持三菱柱、四锥柱、六面体、四面体等三维网格类型，以及四边形与三角形的二维网格类型^[28]。

2.6 本章小结

1. 对有关温度场的传热学基础理论知识包括传热方式、导热基本定律、导热微分方程及其推导过程进行了详细的介绍；
2. 对有限体积法原理以及应用有限体积法求解流-固-热耦合场的基本过程进行了研究介绍。
3. 对仿真软件 FLUENT 的特点及其优点进行了介绍。

第3章 基于 FVM 法的大型油浸式变压器三维温度场分析

油浸式变压器运行时，绕组与铁芯产生的热量与变压器油的经过热传递，使变压器油温不断上升，变压器油经过加热温度升高，密度升高，较热的油便向变压器顶部流动，然后这部分油经过散热片和油箱壁的冷却，向下流动形成循环。变压器油经过散热片与油箱内部的循环流动，热量经散热片已经油箱表面不断传递到周围空气中。热量经外表面的散热使其温度场最终达到热平衡状态。

本章以一款保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 自然油循环大型油浸式变压器(冷却方式: ONAF)为研究对象,应用大型专业建模软件 SOLIDWORK 建立物理模型,运用有限体积数值计算方法计算其三维温度场及油流场,分析其不同负载下的三维温度场及热点温度分布情况,并与理论计算结果进行比较分析,为大型油浸式变压器的结构优化、光纤测量热点温度时的定位提供依据。

3.1 大型油浸式变压器温度场与流场数学模型

分析大型油浸式风冷变压器的流-固-热耦合问题,其流-固-热耦合场受能量、动量和质量传递的交叉影响,其满足三维 Navier Stokes 方程:

质量微分方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3-1)$$

其中, u, v, w --- x, y, z 方向的变压器油速度分量;

ρ ---变压器油密度。

动量方程在 X, Y, Z 方向的微分表达式分别为:

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = \mu \nabla^2 u - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (3-2)$$

$$\rho(u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z}) = \mu \nabla^2 v - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (3-3)$$

$$\rho(u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z}) = \mu \nabla^2 w - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (3-4)$$

S_x, S_y, S_z ----源项;

T ---变压器油温度;

∇ ---调和算子;

P ---变压器油压力;

μ ---变压器油运动粘性系数;

能量微分方程:

$$\rho c(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = k \nabla^2 T + Q \quad (3-5)$$

k ---导热系数;

Q ---微元生热量;

c ---比热容;

高低压绕组及铁心温度场满足导热微分方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (3-6)$$

q_v ---铁芯或绕组生热率;

λ ---铁芯或绕组导热率。

3.2 大型油浸式变压器生热及散热计算

3.2.1 油浸式变压器内热源

油浸式变压器的热源包括绕组与铁芯, 绕组与铁芯内部热为热传导过程,

热传导的微分方程遵循能量守恒定律

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \dot{\Phi}_v \quad (3-7)$$

假设不考虑质量传递, 且温度为稳态时, 式(3-7)可简化为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -\dot{\phi}_v \quad (3-8)$$

式中， λ 为沿着各坐标的导热系数。 $\dot{\phi}_v$ 为单位体积的生热率。

大型油浸式变压器铁芯与绕组的体积热率计算公式如下：

$$q_v = P/V \quad (3-9)$$

式中：p—铁芯或绕组的总损耗；

V—铁芯或绕组的体积。

3.2.2 油浸式变压器散热计算

油浸式变压器油箱与散热片外表面的对流散热量以及辐射散热量计算公式如下：

$$Q_1 = hA\Delta T \quad (3-10)$$

$$Q_2 = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3-11)$$

式中：A—辐射表面面积。

ΔT —油箱与散热片外表面与空气的温差；

h—对流换热系数；

Q1—对流换热量；

ε —物体辐射率；

T—物体表面热力学温度；

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，黑体辐射常数；

Q2—辐射散热量。

3.3 大型油浸式变压器三维温度场分析

本文通过应用大型专业建模软件 SOLIDWORK 建立保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器（冷却方式：ONAF）的三维仿真模型，运用有限体积数值计算方法计算其三维温度场及油流场，分析其在不同负载下的三维温度场及热点温度分布情况。为变压器的结构优化、光纤测量热点温度时的定位提供依据。

表 3-1、3-2 给出了 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器各部件的尺寸参数。

表 3-1 铁芯及油箱参数

Table.3-1 Parameters of Core and Tank

电压等级组合（kV）		110±8×1.25%/38.5±2×2.5%/10.5		
连接组别	YNyn0d11	频率	Hz	50
铁芯直径 mm	560	铁芯窗高 mm		1360
旁轭长度 mm	无	旁轭宽度 mm		无
旁轭高度 mm	无	上轭长度 mm		3240
上轭宽度 mm	640	上轭高度 mm		640
油箱长度 mm	4570	油箱宽度 mm		1630
油箱高度 mm	2725	拉板高度 mm		1985
拉板宽度 mm	135	拉板厚度 mm		12
夹件长度 mm	3680	夹件厚度 mm		25
夹件高度 mm	490			

表 3-2 绕组参数

Table.3-2 Parameters of Windings

绕组参数	内径 mm	外径 mm	高度 mm	匝数
低压绕组	596	703	1195	122
高压绕组	933	1073	1175	737
中压绕组	757	849	1175	258

3.3.1 大型油浸式变压器温度场物理模型

本课题根据 31.5MVA/110KV 大型油浸风冷变压器的实际尺寸建立其三相的三维模型，此变压器含 8 组散热片，前后两侧各 4 组，相邻两组散热片配一个风机，本课题建立的三维模型根据散热片实际尺寸建立 8 组散热片，散热片通过油管与油箱相连，变压器箱体中的变压器油和散热片中的变压器油能畅通对流，能完全模拟现场运行变压器的真实情况，模型如图 3-1 所示：

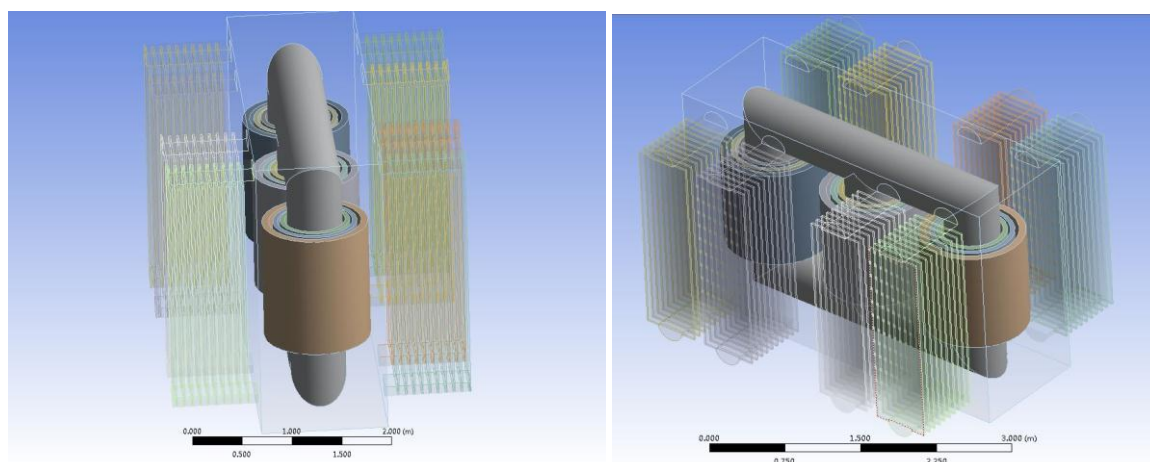


图 3-1 油浸式变压器三维结构模型

Fig.3-1 3-D Structure Model of Oil-immersed Transformer

3.3.2 大型油浸式变压器网格划分

划分网格是温度场仿真模拟中的关键，网格质量的好坏直接关系到模拟能否进行及能否得到正确的结果。本课题的三相变压器结构尺寸较大，因此，一定要控制好网格划分，太粗会导致误差很大，太细就对计算机内存要求过高。本课题采用顶尖的网格划分软件 Mesh 进行网格划分变压器模型。对于主要的发热体——高低压绕组，其与周围油的温度梯度较大，为了保证准确的传热，且因为绕组部分是相对规则的结构，故采用的是“sweep”方式将其划分成高质量的六面体网格，并设置网格尺寸小于 15mm，以保证网格质量。对于变压器油流部分的网格划分，采用的是边界层划分方式，即油流与绕组铁心的接触部分为传

热的重点区域，网格划分的致密，与金属接触面较远的地方网格相对稀疏，这样便既保证了网格划分的质量，且不至于网格划分过密造成计算成本过高。本文将网格增长因子设置为 1.1。所有部件的网格数量为 4312980 个。高低压绕组与铁心部分的网格及整体网格切面效果如图 3-2：

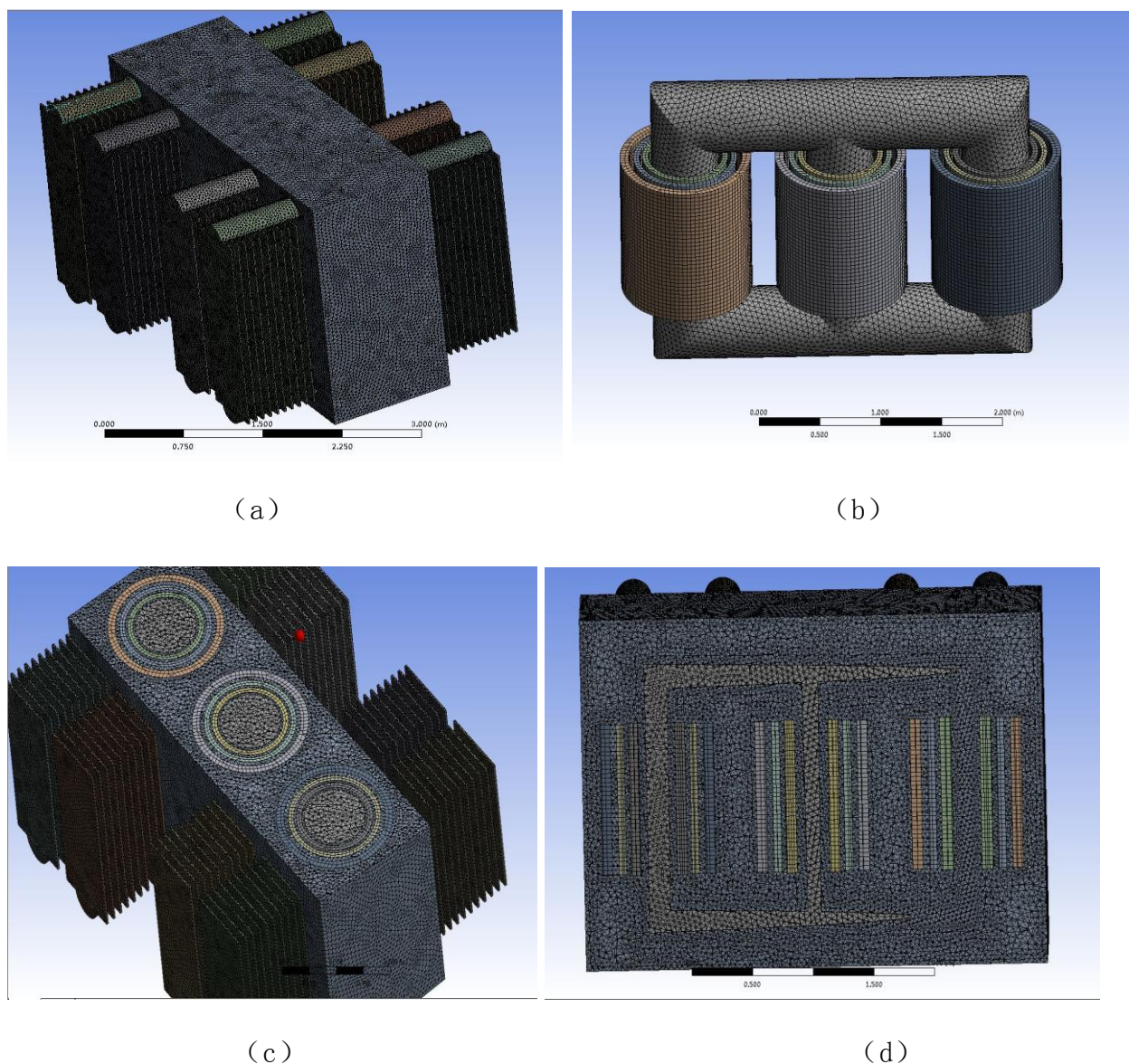


图 3-2 网格划分效果图

Fig.3-2 Meshing Effect Diagram

图中可以看出，铁芯为四面体网格，三绕组为高质量的六面体网格；图 b 为整体网格划分图；图 c 和图 d 分别为变压器横截面和纵截面的网格划分效果图，从图中可看出，靠近发热体铁芯和绕组处的网格要相对密一些，越往外边

网格越稀疏；由于散热片体特别薄，因此散热片上单个单元的大小设置得尽量设置小一点，从而划分散热片所需的网格比较多，约占有所有网格的三分之一；综上所述，无论是整体网格划分还是局部网格划分效果，都与预期的效果吻合，为后期仿真计算结果精确性提供了很好的保障。

3.3.3 大型油浸式变压器边界条件、初始条件与物性参数设置

求解大型油浸式变压器的流-固-热耦合场，需先输入计算域的初始条件以及边界条件。边界条件就是在计算域边界上控制方程应该满足的条件，一般会对数值计算产生重要的影响。大型油浸式变压器的边界为固体壁面，即油箱表面与散热片表面，其属于第三类边界条件，满足第三类边界条件公式：

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (3-12)$$

式中 T_w 为油箱与散热片温度（℃或 K）， $\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w$ 为油箱与散热片表面的温度梯度， h 为油箱表面或散热器表面与空气的对流换热系数[W/(m²•K)]， T_f 为变压器外表面空气的温度（℃或 K）。

由于 T_w 为待求解变量，因此本文需指定的边界条件为油箱表面与散热器表面的对流换热系数以及环境温度，本文边界条件中的环境温度设置成 32℃，同时，从厂家获得变压器表面以及散热片表面的散热系数：油箱底面：8.3；油箱顶面：10.1；油箱侧面：12.3；散热片表面：23.9(风机开启)。

本文所研究的大型油浸式变压器的流-固-热耦合场，初始条件包括变压器整体的初始温度以及变压器油的初始速度，显然，本文所研究的变压器的初始温度即环境温度，即 $T_0 = 32^\circ\text{C}$ ；初始速度即静态速度 0，即 $u_{x_0} = u_{y_0} = u_{z_0} = 0(\text{m/s})$ 。

在油箱及散热片表面会伴有辐射散热问题，本文将油箱外表面以及散热片表面的辐射率设为 0.9，黑体辐射常数设为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；因变压器油的受热流动受重力影响，因此，设置重力加速度为 9.8m/s²，方向指向 Y 轴的负方向；

需要特别注意的是对于自然油循环油浸式风冷变压器来说，油循环的动力

来源于油的热浮升力，因此在设置油的不同属性时考虑其随温度的变化情况，即采用分段线性的方式来设置油的属性随温度变化的关系，变压器油及变压器各部件的物理特性如表 3-3、3-4 所示。

表 3-3 材料物理参数
Table.3-3 Data of Materials

材料	导热系数 (W/m K)	比热容(J/kg K)	密度 (kg/m ³)
绕组	385	390	8900
铁芯	45	460	7650
油箱	50	485	7850

表 3-4 变压器油物理参数
Table.3-4 Data of Oil

温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$	密 度 ρ /kg/dm ³	热导率 γ /W/(m • $^{\circ}\text{C}$)	比热 $C_p/\text{J}/$ (kg• $^{\circ}\text{C}$)	热体积膨胀系 数 β /1/ $^{\circ}\text{C}$	运动粘度 μ /(kg/m)
0	893	0.1330	1764	6.55×10^{-4}	0.1072
10	887	0.1322	1805	6.80×10^{-4}	0.0550
20	882	0.1314	1848	7.00×10^{-4}	0.0301
30	876	0.1306	1890	7.25×10^{-4}	0.0184
40	870	0.1299	1930	7.50×10^{-4}	0.0121
50	864	0.1291	1975	7.75×10^{-4}	0.0084
60	858	0.1283	2015	7.90×10^{-4}	0.0060
70	852	0.1276	2060	7.95×10^{-4}	0.0046
80	847	0.1268	2100	7.95×10^{-4}	0.0036
90	841	0.1260	2140	8.00×10^{-4}	0.0029
100	835	0.1251	2200	8.00×10^{-4}	0.0021

3.3.4 大型油浸式变压器温度场载荷施加

本文所研究的油浸式变压器内部的热源包括由铁芯中的磁滞损耗与涡流损耗,以及绕组中的电阻损耗,铁芯中的磁滞损耗与涡流损耗可以通过变压器出厂温升试验报告中的空载损耗与铁芯的尺寸数据算取,绕组中的电阻损耗可有出厂温升试验报告中的负载损耗与各绕组的尺寸算取,通过变压器出厂温升试验报告中的短路损耗 $P_{K(1-2)}$ 、 $P_{K(1-3)}$ 、 $P_{K(2-3)}$ 按公式 (3-13) 计算高、中、低压绕组的短路损耗:

$$\begin{cases} P_{K1} = \frac{1}{2}(P_{K(1-2)} + P_{K(3-1)} - P_{K(2-3)}) \\ P_{K2} = \frac{1}{2}(P_{K(1-2)} + P_{K(2-3)} - P_{K(3-1)}) \\ P_{K3} = \frac{1}{2}(P_{K(2-3)} + P_{K(3-1)} - P_{K(1-2)}) \end{cases} \quad (3-13)$$

本仿真中的额定负载的热生成率为:

$$G = \frac{P_{K1}}{3V_1} \quad (3-14)$$

其中 V_1 为单相绕组的体积, P_{K1} 是实验测得的三相变压器的损耗。

对于本课题所研究的 31.5MVA/110KV 的变压器的参数及由上述公式(3-13)、(3-14)求得的热生成率如下表:

额定容量:	31500/31500/31500 kVA
额定频率:	50 Hz
额定电压:	110000±8×1.25%/38500±2×2.5%/10500 V
额定电流:	165.3/472.4/1732.1 A

表 3-5 各绕组损耗
Table.3-5 Winding Losses

绕组	HV-MV	MV-LV	LV-HV
负载损耗	$P_{K(1-2)}$	$P_{K(2-3)}$	$P_{K(3-1)}$
实验测得值 (KW)	166.9	149.7	164.4

计算出各绕组损耗 (KW)	PK1=90.8	PK2=76.1	PK3=73.6
---------------	----------	----------	----------

表 3-6 绕组参数及热生成率

Table.3-6 Winding Parameters and Heat Generation Rate

绕组参数	内 径 mm	外 径 mm	高 度 mm	体 积 (m ³)	负载损耗 KW	热 生 成 率 KW/m ³
高压绕组	933	1073	1175	0.2591712	90.8	116.782
中压绕组	757	849	1175	0.1363518	76.1	186.038
低压绕组	596	703	1195	0.1304520	73.6	188.064

表 3-7 铁芯参数及热生成率

Table.3-7 Core Parameters and Heat Generation Rate

直 径 (mm)	高 度	上轭长度	上轭高度	上轭宽度	总 体 积 (m ³)	空 载 损 耗 KW	热 生 成 率 KW/m ³
560	1360	3240	640	640	2.3315	24.7	10.594

表 3-6、表 3-7 中算出的绕组及铁芯的热生成率即为此油浸式变压器额定负载下的热生成率，在 FLUENT 中分别对铁芯和各绕组加载此热生成率。

3.3.5 大型油浸式变压器三维温度场结果分析

应用 FLUENT 有限体积法 (FVM) 对 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器三维温度场进行计算，经过 10000 步迭代后，温度场趋于稳态，变压器整体温度分布云图如图 3-3 所示。

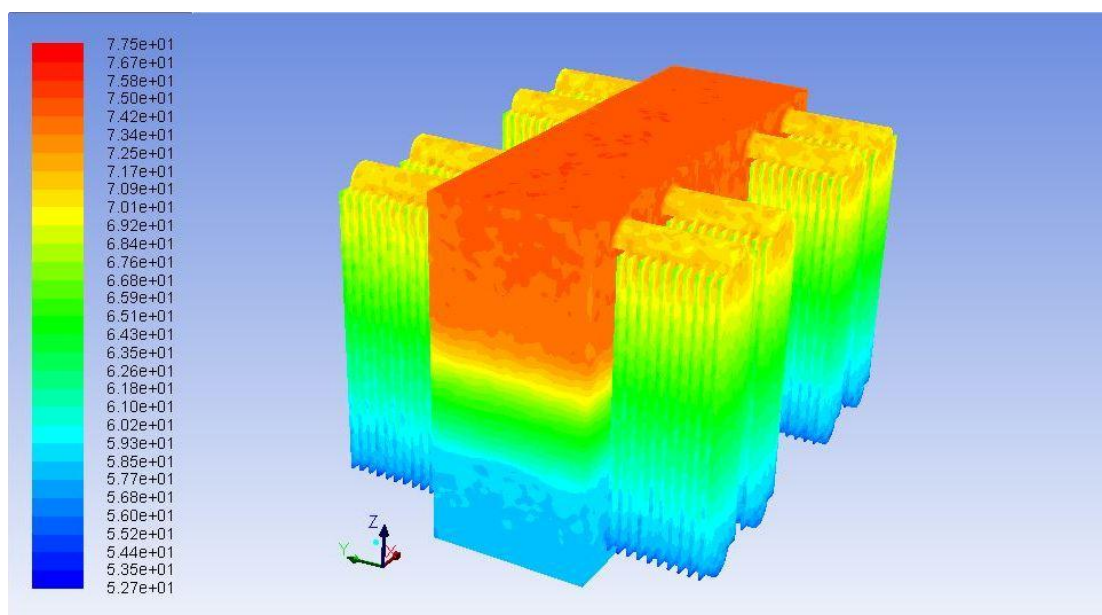


图 3-3 箱体表面温度分布云图

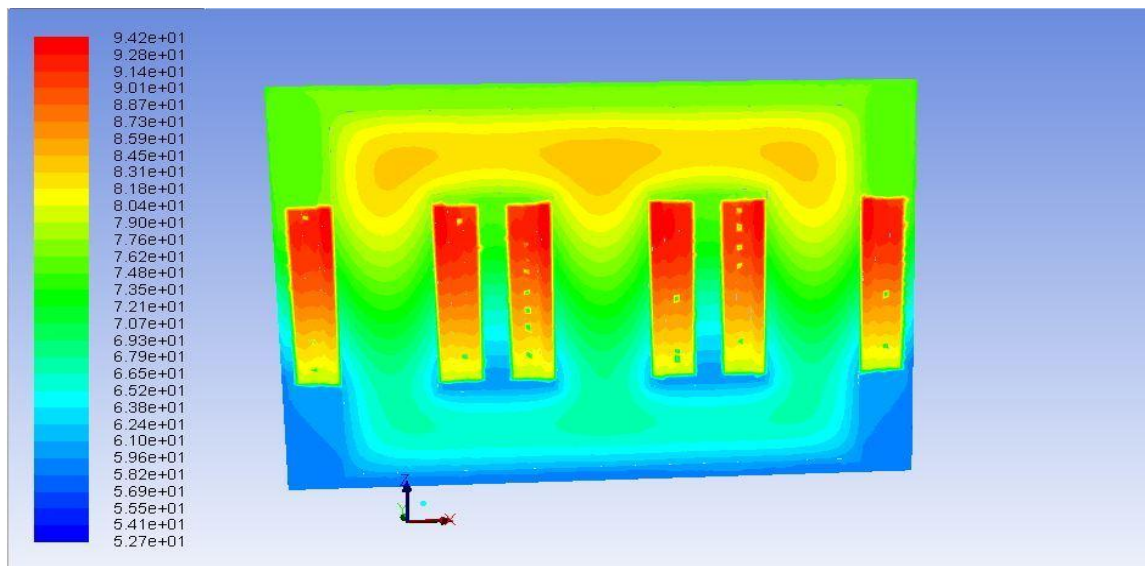
Fig.3-3 Body Surface Temperature Contours

由上图可看出，在散热片的作用下，温升趋于稳定，温度分布呈现明显梯度。可以看出，同一水平线上变压器内部油温高于散热片内部油温，顶层油温最热点出现在油箱顶面中部位置，约为 77.5°C ；这主要是由于风机全开，在风机作用下，散热片表面空气的流速远远大于箱体表面空气的流速，从而使散热片表面的散热速率要远大于箱体表面的散热速率，又加之散热片表面积较大的缘故，从而使散热片内变压器油与散热片的换热速率要远高于变压器箱体内变压器油与箱体的换热速率，即散热片内油温要明显低于同一水平线上变压器内部油温。

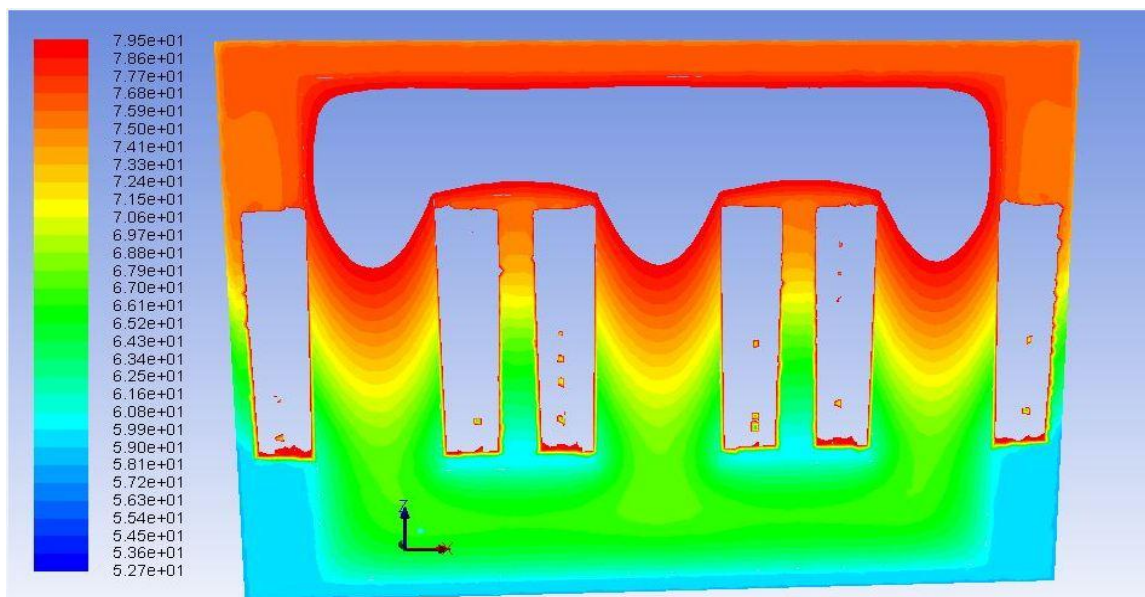
又由于变压器热源为铁芯与绕组，而铁芯与绕组紧密想绕，且铁芯与绕组都置于变压器中心位置，铁芯与绕组间、绕组与绕组间的油道空间相对于绕组与变压器箱体间的油道空间要小很多，从而导致变压器中部的油的散热环境要相对较差因此顶部油温的最热点出现在油箱顶中部位置称为必然。

图 3-4 为 $Y=0$ 平面变压器温度场分布云图。从图 3-4 (a) 中可以看出：绕

组温度高于铁芯温度；铁芯同一水平面上温度高于变压器油温度；绕组、铁芯、变压器油由下至上大体呈上升趋势；极易看出铁芯最热点出现在上轭中部位置；由图图 3-4 (b) 可看出变压器油温由下至上呈递增趋势，由里至外呈递减趋势，最热点出现在油箱顶中部，仿真计算结果与理论分析基本吻合。



(a)



(b)

图 3-4 Y=0 平面温度场分布

Fig.3-4 Temperature Field Distribution at Y=0 Plan

图 3-5 为 Y=0 平面变压器油速度矢量分布图。从图中可以看出绕组与铁芯

间、绕组与绕组间油道中的油速要大于其它部位的油速，这是由于绕组与铁芯间、绕组与绕组间油道相对比较细小的缘故；又由图可看出绕组竖直油道中的油速最大值为 0.04m/s，低于规定的 0.5m/s，满足实际工程要求。

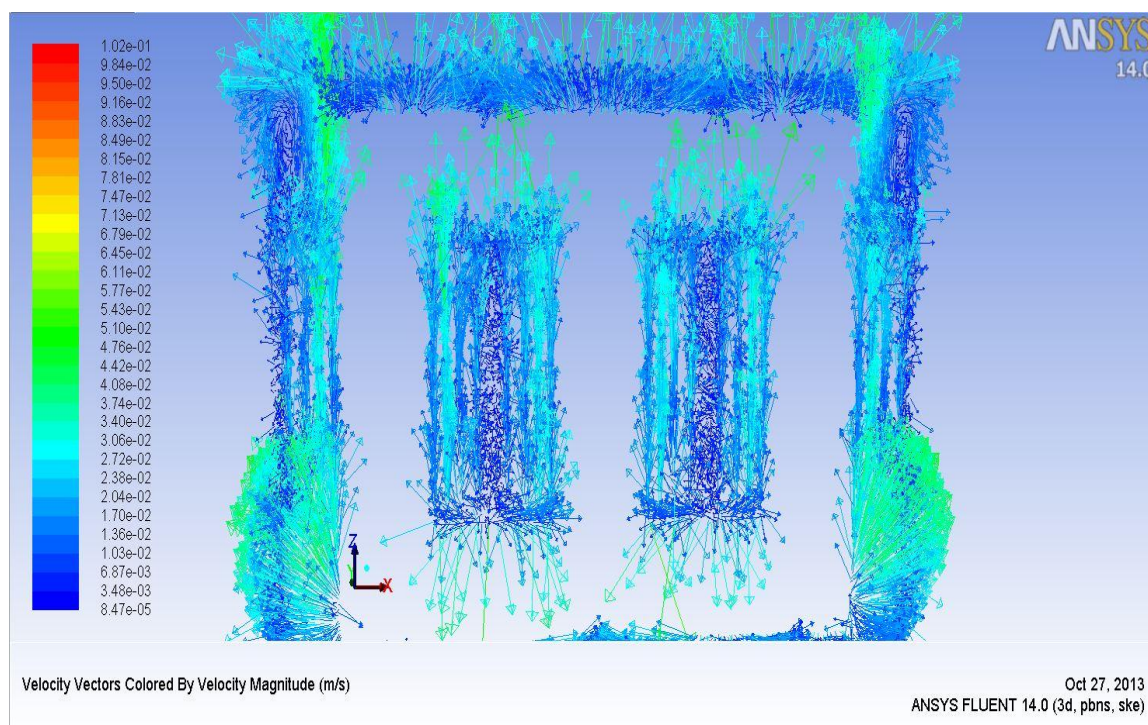
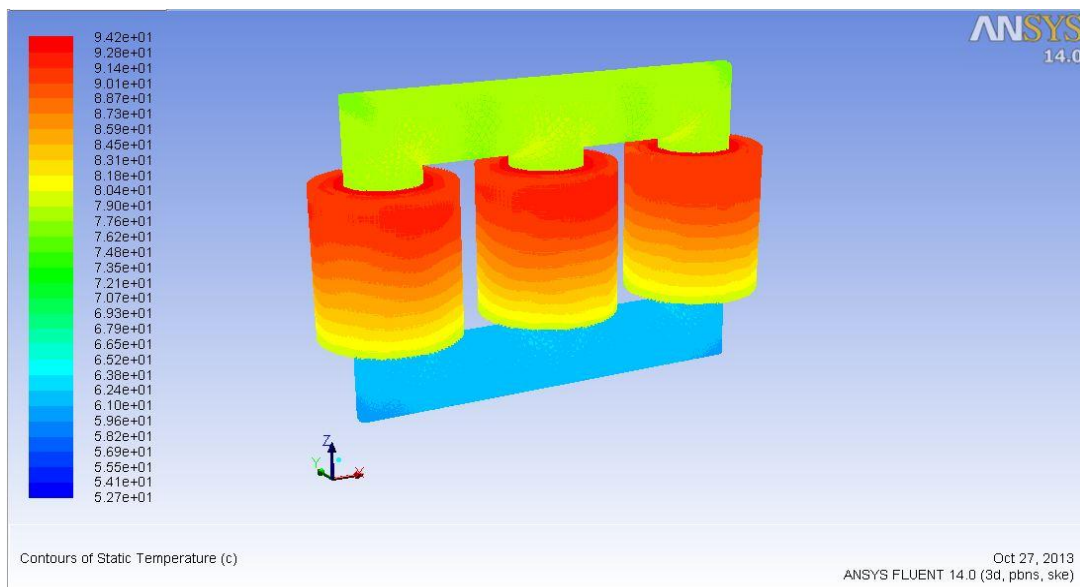


图 3-5 Y=0 平面油流速度矢量分布

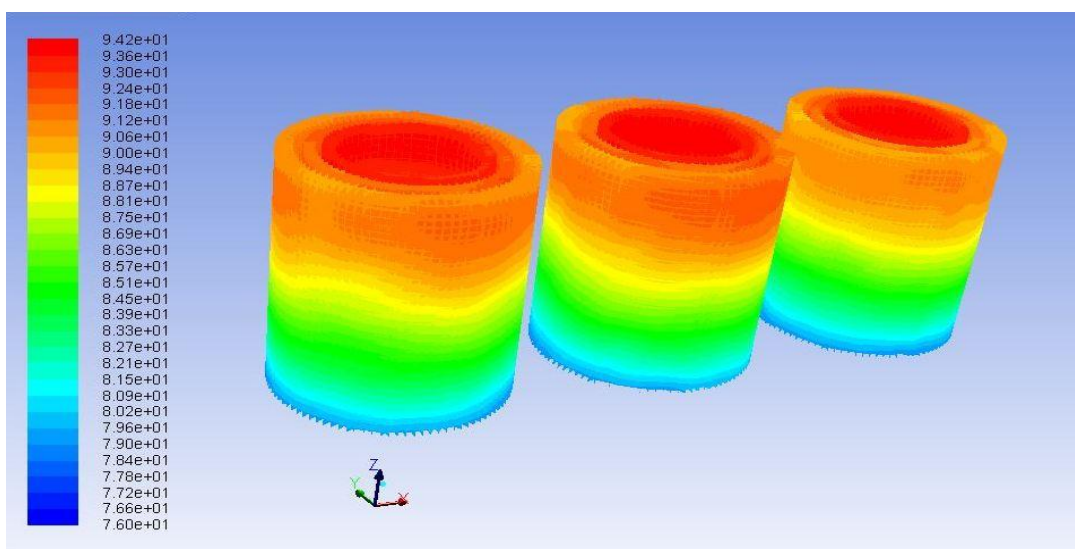
Fig.3-5 Velocity Vector Distribution of Oil Flow at Y=0 Plan

图 3-6 为变压器绕组和铁芯温度场分布云图。从分布图（a）中可以看出，铁芯的上下温差（24° C）要大于绕组的上下温差（16° C），这是因为绕组的导热系数要高于铁心的导热系数，从而绕组上下间导热快，温差较小；从图（b）中可看出，变压器绕组温度沿轴向随高度的增加而升高，但各线圈最热点不是出现在最顶端，而是在顶端偏下的位置，这是由于油从底部向上流动的过程中将热量带走，温度逐渐升高，而绕组顶端的上方无发热体，且绕组顶端散热条件比较好，因此绕组顶端温度不是最热点，最热点出现在顶端偏下的位置。由图（b）还可看出高、中、低压绕组中，低压绕组温度高于中压绕组温度，中压

绕组温度高于高压绕组温度，这是由于生热率低、中、高压绕组依次降低（计算结果见 3.4.4）且靠近铁芯部分散热条件差综合作用的结果。



(a)



(b)

图 3-6 绕组及铁芯温度场分布

Fig.3-6 Temperature Field Distribution of Core and Windings

为进一步确定高、中、低压绕组轴向温度分布情况及最热点位置确定，现在在 B 相高、中、低压绕组的中心处分别沿轴向做了一条直线，从 FLUENT 中调

取出位于这三条直线上各节点的温度分布曲线图，如图 3-7 所示。

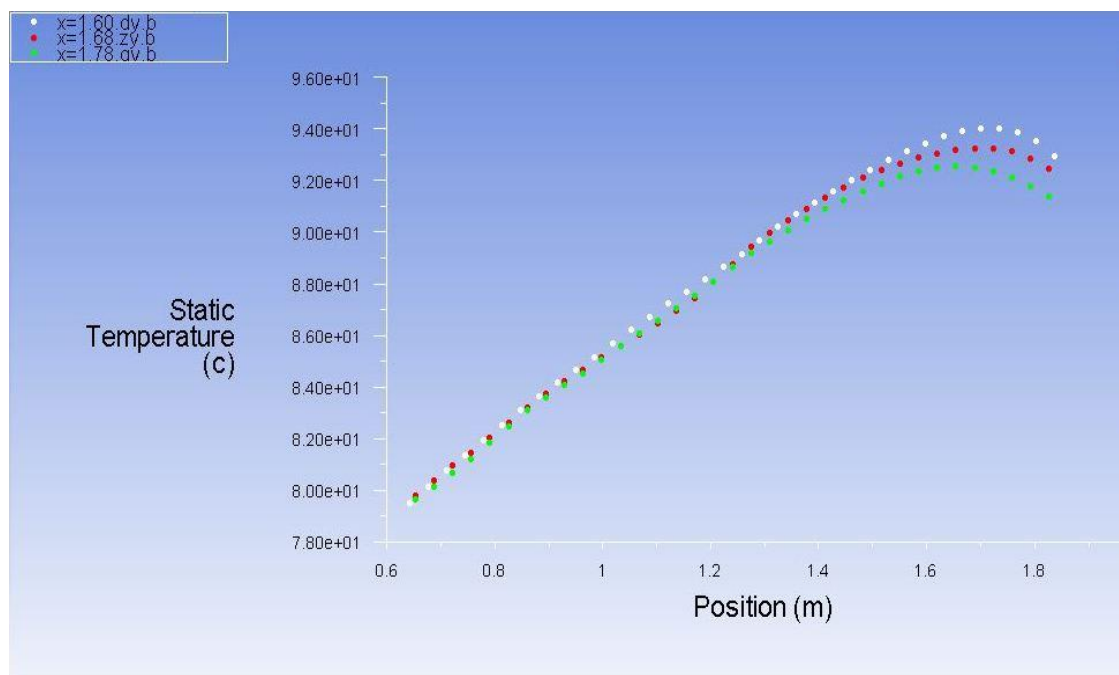


图 3-7 三绕组沿轴向高度温度场分布

Fig.3-7 Temperature Distribution of the three Windings along the axial height

图中白、红、蓝线分别代表低压、中压以及高压的轴向热点温度分布。从图中可以看到，三绕组中，其温度都是不均匀分布的，而且都是底部温度较低，顶端的温度相对较高，低压绕组温度最高，中压绕组次之，高压绕组温度相对为最小。变压器的最热点温度为 94.2°C ，其位于低压绕组，最热点位置距离低压绕组底部约 88.5% 处。主要原因有二，一是高压绕组生热率最低，低压绕组的生热率要稍高于中压绕组；二是低压绕组的位置分布，由于位于中压绕组和铁心之间，其散热方式为和变压器油的对流散热，但由于油道较窄，变压器油散热量低，所以相对于中压绕组与高压绕组来说其温度较高。

3.3.6 不同负载下的温度场分布

为了更好的了解大型油浸式变压器在不同负荷下的温度场分布情况，本文分别对变压器在固定环境温度 32°C ，负载分别为 0.7、0.85、1.0、1.15 时的温度场进行了仿真计算，仿真得到的结果如下。

1. 不同负荷下的整体温度分布云图如图 3-8 所示。

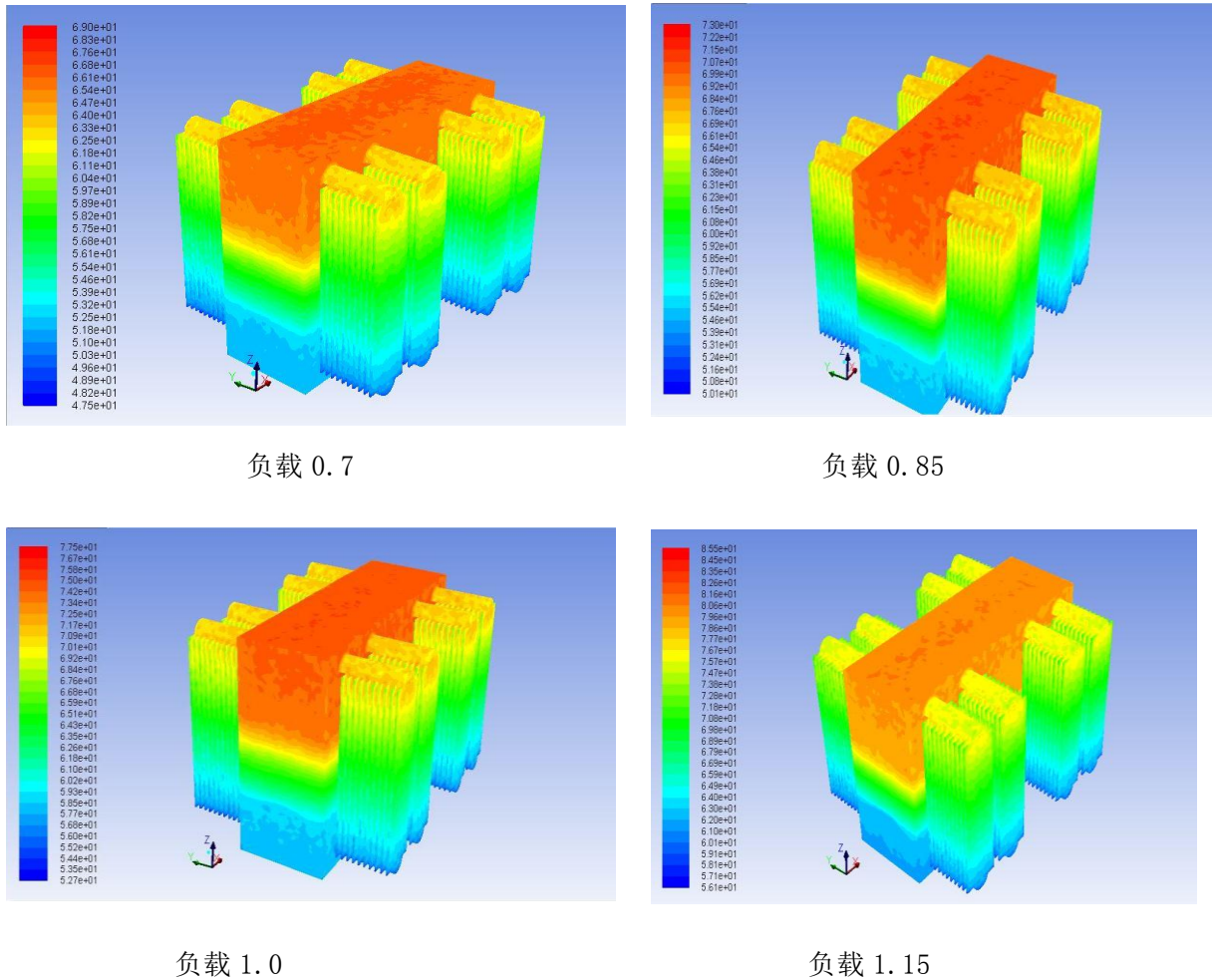


图 3-8 不同负荷下的整体温度分布云图

Fig.3-8 Overall Temperature Contours under different Loads

图中明显可以看出，油箱表面温度随负载依次升高（分别为 69、73、77.5、85° C）

2. 不同负荷下铁心与绕组温度分布云图如图 3-9 所示。

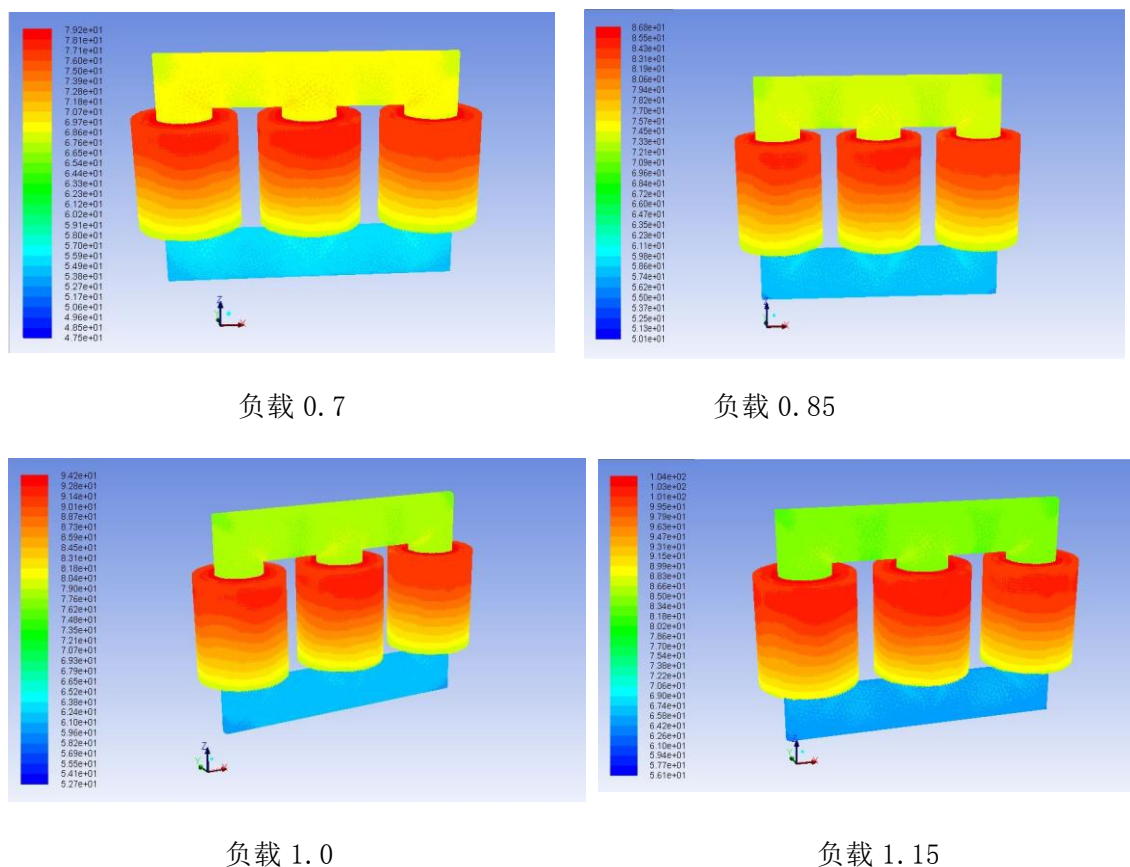


图 3-9 不同负荷下铁芯与绕组温度分布云图

Fig.3-9 Temperature Contours of Core and Windings under different Loads

图中可以看出，绕组热点温度随负载依次升高（分别为 79.5、86.5、94.2、104.3 °C）

为更深入地研究高、中、低压绕组最热点温度与位置关系，现在在 B 相高、中、低压绕组的中心处分别沿轴向做了一条直线，从 FLUENT 中调取出位于这三条直线上各节点的温度曲线图，如图 3-10 所示。

3. 不同负荷下绕组沿轴向高度温度场分布云图如图 3-10 所示。

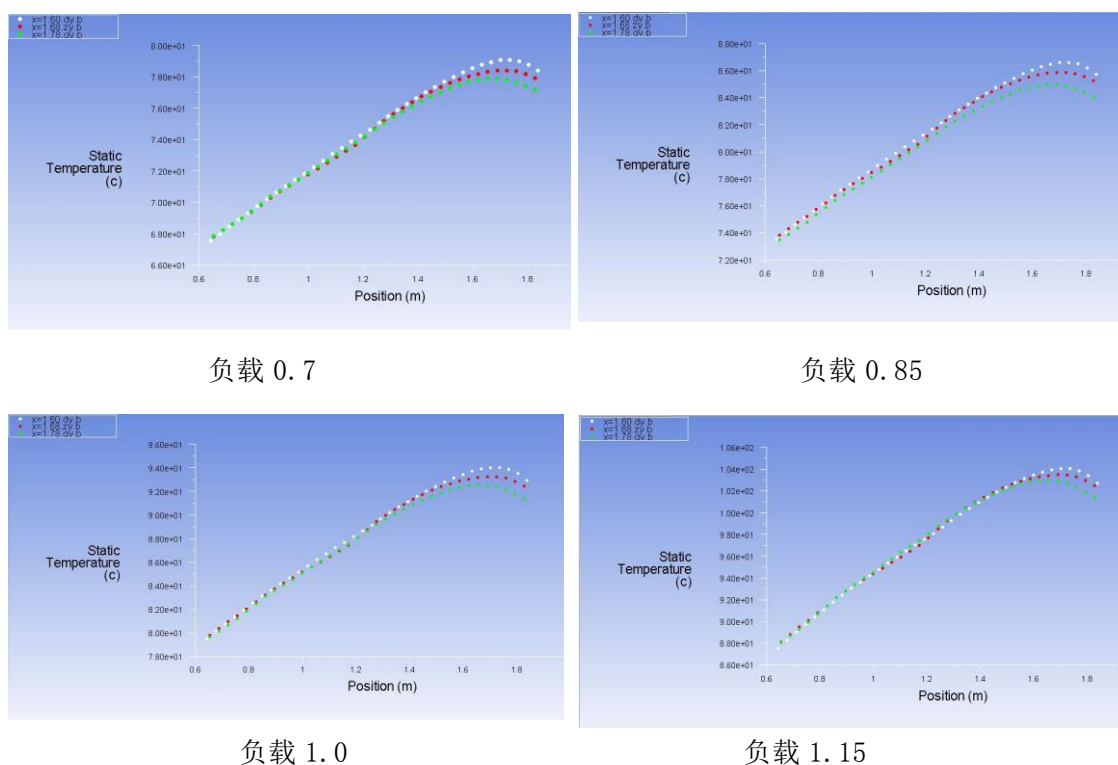


图 3-10 不同负荷下绕组沿轴向高度温度场分布图

Fig.3-10 Temperature Diagram of Windings along axial Height under different Loads

由图可以看出，当负荷由 0.7—1.15 逐步上升时，绕组热点温度及顶层油温也相应升高，且三绕组的热点温度沿轴向都是先逐步上升，在接近顶端时有一个小幅度的下降，最热点都出现在低压绕组顶端偏下位置，大概距绕组底端 85%---90%处。

表 3-8 负荷与最热点温度、顶层油温关系

Table 3-8 Relationship of load with top Oil and the hottest Temperature

负载系数	0.7	0.85	1.0	1.15
顶层油温	69	73	77.5	85
绕组热点温度	79.5	86.5	94.2	104.3

为了看的更加直观，现将不同负荷及与其对应的最热点温度、顶层油温的关系以平面坐标图的形式给出，如图 3-11 所示，其中横轴为负荷，纵轴为温度(℃)。

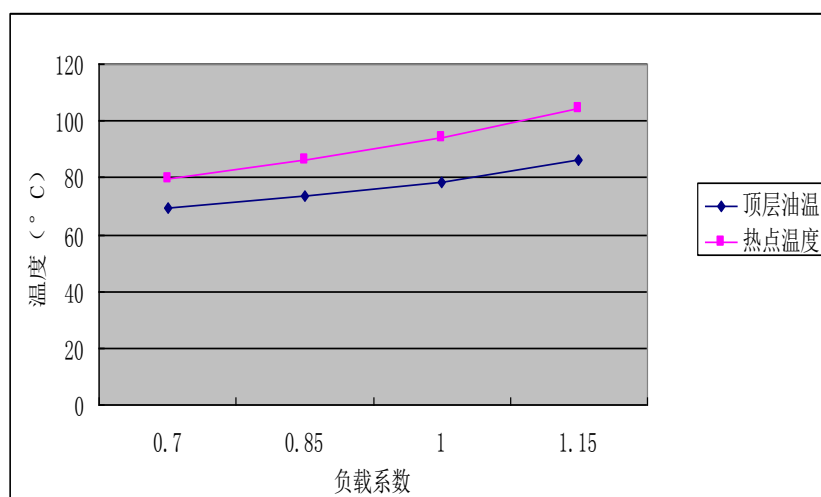


图 3-11 负荷与最热点温度、顶层油温关系图

Fig.3-11 Diagram of Relationship between Load and the hottest Temperature and top oil Temperature

比较曲线可知热点温度和顶层油温都随负载的增大而升高，且负载系数小于 1 时，热点及顶层油温升的变化曲线较平缓；负载系数大于 1 时，热点温升的变化曲线较陡，曲线的斜率随着负载增大而变大，可见超载时绕组温度升高更快。所以现场变压器应尽量避免超载运行。

3.3.7 FLUENT 计算结果与理论计算结果对比

1、负载导则计算公式的引用

《油浸式电力变压器负载导则》根据变压器的不同类型及其热特性.提出一些数学模型,对在不同冷却介质温度下各种瞬变负载或按时间呈周期性变化的负载,计算变压器内部的运行温度,特别是计算绕组的最热点温度,

根据 GB/T 15164-1994《油浸式电力变压器负载导则》，通常在稳态情况下，ONAF 冷却方式的大型油变,热点温度的计算公式为：

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + HgK^y \quad (3-15)$$

其中，y---绕组指数；

x---油的指数；

K---负载系数；

R---1.0 负荷下的负载损耗与空载损耗比值；

Hg_r---1.0 负荷下绕组热点与顶部温温差；

$\Delta\theta_{br}$ ---1.0 负荷下顶层油温升；

θ_a ---环境温度；

θ_h ---热点温度。

OF AF 冷却方式的大型油变,热点温度的计算公式为：

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2(\Delta\theta_{mr} - \Delta\theta_{br})K^y + Hg_r K^y \quad (3-16)$$

其中， $\Delta\theta_{br}$ 为额定电流下的底部油温升； $\Delta\theta_{mr}$ 为油平均温升。

显然，本课题采用的公式为 3-15；

2、计算结果对比

由《油浸式电力变压器负载导则》计算得到的负载分别为 0.7、0.85、1.0 和 1.15 时的绕组热点温度值与仿真得到的热点温度值比较如表 3-9 所示。

表 3-9 仿真值与理论计算值对比

Table 3-9 Simulation Value compared with the theoretical Value

负载系数	0.85	1.0	1.15
计算值	83.4	90.1	100.3
仿真值	86.5	94.2	104.3

为了看的更加直观，现将不同负荷下其对应的仿真值、计算值的关系以平面坐标图的形式给出，如图 3-12 所示，其中横轴为负荷，纵轴为温度(℃)。

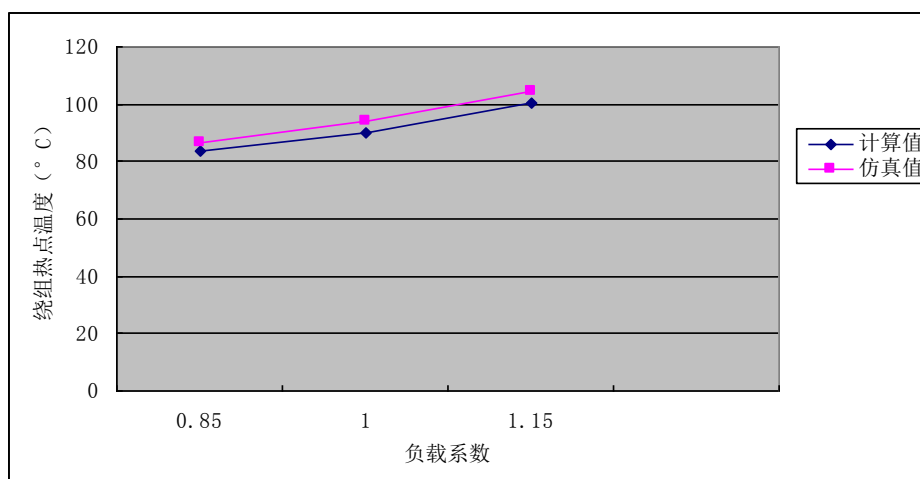


图 3-12 不同负载下仿真值、计算值对比图

Fig.3-12 Chart of Simulation Value compared with caculated Value under different Load

比较曲线可知仿真温度与计算温度有小的偏差，这是因为计算公式具有普遍性，计算结果会有一定误差，而仿真中加入了散热器及风机，使变压器仿真环境更接近实际，即仿真结果更接近实际值。

3.4 本章小结

本文通过建立了比例为 1:1 的含散热片的大型油浸式自然风冷变压器三维数学物理模型，应用高级网格划分工具 **Meshing** 对此款变压器进行网格划分，通过运用有限体积法计算了其三维温度场与油流场。分析了不同负载下各部件的流场与温度场分布，并比较分析了理论结果与 **FVM** 计算结果。

FVM 计算结果表明，三绕组中，其温度都是不均匀分布的，而且都是底部温度较低，顶端的温度相对较高，低压绕组温度最高，中压绕组次之，高压绕组温度相对为最小；当负载逐步上升时，绕组热点温升与顶层油温升也相应升高，且三绕组的热点温度沿轴向都是先逐步上升，在接近顶端时有一个小幅度的下降，最热点都出现在低压绕组顶端偏下位置，大概距绕组底端 85%—90%处；且负载系数小于 1 时，绕组热点温升与顶层油温升的变化曲线较平缓；负载系

数大于 1 时，绕组热点温升的变化曲线较陡，曲线的斜率随着负载增大而变大，可见超载时绕组温度升高更快，所以现场变压器应尽量避免超载运行；通过比较理论计算结果和及基于有限体积法（FVM）的计算结果，验证了本文所述仿真计算方法的准确性与可靠性；

第4章 基于顶层油温与绕组热点温度的油浸式变压器失效模型研究

本章以大型油浸式变压器的绕组热点温升与顶层油温升为基本特征量，应用 VC++6.0 软件开发出一套大型油浸式变压器失效模型诊断软件，此套失效模型诊断软件，能有效解决现有检修方式存在维修不足或维修过度或缺陷问题，实现大型油浸式变压器“按需维修”的目的。

4.1 比例失效模型及其建模

变压器作为保证电网正常运行的核心设备，其安全、可靠、经济运行与社会经济、居民生活密切相关。大型油浸式风冷变压器因其散热条件好，过负载能力强，在电力系统中发挥着重要的作用。目前，大型油浸式变压器传统的定期检修方式存在着维修不足或过度的问题，容易造成浪费或安全隐患，为了实现油浸式变压器科学严谨的维修决策，应该采用基于状态的维修(Condition based maintenance, CBM)方式，这种维修方式主要是根据获取的设备状态信息，运用数据分析和决策技术预测设备的故障率(或剩余寿命)，以一定的优化准则为目标，从而对设备做出维修决策，实现“按需维修”的维修策略，避免维修过度或维修不足所带来的严重后果^[29-33]。

CBM的关键是需将系统运行过程参数与系统本身的健康程度建立起较为精确的联系，比例失效模型(Proportional Hazards Model, PHM)的优点是能够将检测设备的故障率与其使用年限和相应的状态变量联系起来^[34-36]。本章基于监测到的绕组热点温升与顶层油温升，通过Weibull比例失效方法构建了大型油浸式变压器状态监测特征量与故障率的关系模型，并通过建立的基于最小维修成本决策模型确定了其维修策略。最后应用VC++编程开发出一套基于PHM的大型油浸式变压器失效模型诊断软件，并针对保定天威集团生产的

SFSZ10-M-31500/110型油浸式变压器的状态监测数据进行了仿真计算，仿真结果验证了本文所提出的比例失效模型维修策略的有效性。

4.1.1 比例失效模型

PHM能兼顾考虑状态信息与寿命来计算设备故障率，做出最优维修决策，与其它诊断模型相比其优势明显。针对大型油浸式变压器故障诊断，考虑运行时间与性能参数间的相互关系，能更好地反映油浸式变压器性能衰退，尤其是油纸绝缘性能降低的特性。而这正好与PHM的特点相吻合，因此，PHM适用于油浸式变压器失效模型的建模研究。对于油浸式变压器而言，其寿命数据服从Weibull分布。同时再考虑个协变量的影响，可得到威布尔比例失效模型表达式，即：

$$h(t|Z(t)) = \frac{\delta}{\partial} \left(\frac{t}{\partial}\right)^{\delta-1} \cdot e^{\gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_p z_p(t)} \quad (4-1)$$

式（1）中， $h(t|Z(t))$ 是给定时间 t 在已知 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$... $z_p(t)$ 情况下设备的故障率； ∂ 和 δ 分别为威布尔分布中的尺寸参数和形状参数； $\gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_p z_p(t)$ 是 p 维回归变量，反应设备的状态信息，每一个 $z_i(t)$ 指的是一个协变量，表示在某一时刻 t 第 i 个监测量的状态值，系数 γ_i 刻画了与之对应的协变量 $z_i(t)$ 对设备故障率的影响程度，若 γ_i 为0，则表示第 i 个状态监测量对设备的故障诊断不产生作用

[37-39]。

4.1.2 PHM 的参数估计

由于极大似然估计具有优良的统计特性和较好的近似分布，而比例失效模型比较适合于样本量比较大的情况，因此，本文中通过对比例失效模型构造极大似然函数的方法来估计模型中各相关参数，即估计出式（4-1）中的参数 ∂ 、 δ 和 γ_i ，对威布尔PHM 构造极大似然函数可得到：

$$L(\delta, \partial, \gamma) = \left\{ \prod_{i=1}^q \frac{\delta}{\partial} \left(\frac{t_i}{\partial}\right)^{\delta-1} \cdot \exp \left[\sum_{k=1}^p \gamma_k Z_k(t_i) \right] \right\} \cdot \left\{ \prod_{j=1}^n \exp \left[- \int_0^{t_j} \frac{\delta}{\partial} \left(\frac{s}{\partial}\right)^{\delta-1} ds \right] \right\} \quad (4-2)$$

式(4-2)中, n 为数据总数; q 代表 n 个数据中故障数据占有 q 个; $z_k(t_i)$ 为 t_i 时刻的数据监测值。对上式取对数化简, 得到对数似然函数为:

$$\ln L(\delta, \vartheta, \gamma) = q \ln\left(\frac{\delta}{\vartheta}\right) + (\delta - 1) \sum_{i=1}^q \ln\left(\frac{t_i}{\vartheta}\right) + \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^p \gamma_k Z_k(t_i) - \sum_{j=1}^n \int_0^{t_j} \frac{\delta}{\vartheta} \left(\frac{s}{\vartheta}\right)^{\delta-1} \exp\left[\sum_{k=1}^p \gamma_k Z_k(s)\right] ds \quad (4-3)$$

使得式(4-3)取得最大值的 ϑ 、 δ 和 γ_i 即为所求估计值。当估计参数较多时, 比例失效模型采用极大似然估计方法难以得到解析解, 为此需要利用Newton-Raphson迭代算法求解对数似然函数方程来得到各参数的估计值。因此分别对式(4-3)求 ϑ 、 δ 和 γ_i 的偏导数, 令偏导数为零可以得到 $p+2$ 维的非线性方程组, 代入状态数据 $z_k(t_i)$ 及寿命数据 t , 利用牛顿拉夫逊迭代法求解得到 ϑ 、 δ 、 γ_i 的估计值, 从而可以得到失效率函数 $h(t)$ 的具体表达式^[40]。

4.2 大型油浸式变压器最优维修策略

建立 Weibull 比例失效模型并估计出其中的参数后, 通常以一定时间内维修成本最小或任务可用度最大作为决策策略。本文采用最小维修成本法制定相应维修策略。

4.2.1 故障阈值的确定

油浸式变压器的最优维修策略会因决策目标的不同而不同, 本文采用维修决策中的经典方法-最小维修成本法, 即以单位时间内维修成本最小为目标制定其最优维修策略。

单位时间平均维修成本为:

$$C(t) = \frac{C_2[(C_1/C_2) + E(N(t|Z))]}{t} \quad (4-4)$$

式中, $C(t)$ 为总成本; C_1 、 C_2 分别为事前平均维修成本和事后平均维修成本; $E(N(t|Z))$ 为检查间隔期内预期的故障数, 且有:

$$E(N(t|Z)) = H(t|Z(t)) = \int_0^t \exp(\gamma \cdot Z(u)) d\left(\frac{u}{\eta}\right)^\beta \quad (4-5)$$

若使总成本最小, 则方程中斜率应最小。按上式绘制出 $H(t)$ -- t 曲线, 过点(0,

- C_1/C_2) 作曲线的切线, 则切点所对应的时间即为成本最小的优化维修间隔时间 t_1 , 即预防维修的优化时间间隔值。如图1所示:

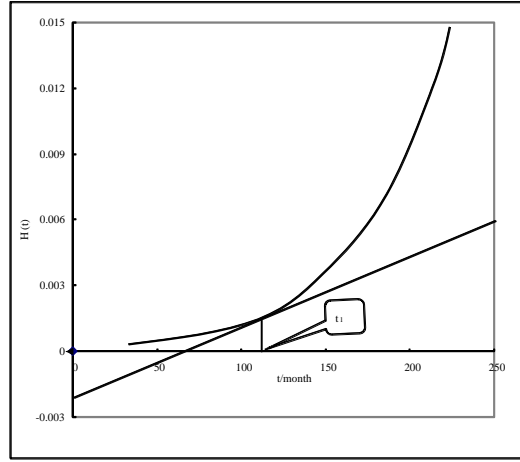


图4-1 最优维修时间间隔

Fig. 4-1 Optimal maintenance intervals diagram

在得到 t_1 后, 找出一组与 t_1 最相近的监测数据, 代入到式 (4-1) 中, 即得到 h^* 。对同类设备进行监测时, 将监测数据代入到建立好的 Weibull 比例失效模型当中, 得到相应的故障率, 与故障率阈值 h^* 比较即可得到基于状态数据的维修决策。

4.2.2 维修决策模型

在确定故障率阈值 h^* 后, 如果在任意时刻求出的设备的故障率 $h(t)$ 大于等于这一阈值则应该立即进行维修, 小于等于这一阈值则说明设备运行正常, 即维修原则为:

$$h(t) = \frac{\delta}{\sigma} \left(\frac{t}{\sigma} \right)^{\delta-1} \cdot e^{\gamma_1 z_1(t) + \dots + \gamma_p z_p(t)} \geq h^* \quad (4-6)$$

求对数, 获取最优维修规则:

$$\gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_p z_p(t) \geq \ln \left(\frac{\delta^{\delta} h^*}{\delta} \right) - (\delta-1) \ln t \quad (4-7)$$

令

$$f(t) = \ln \left(\frac{\delta^{\delta} h^*}{\delta} \right) - (\delta-1) \ln t \quad (4-8)$$

根据前文中参数估计得到的结果 σ 、 δ 、 γ_i 代入 (4-8) 式可以得到 $f(t)$ 的表达

式，以运行时间 t 为横轴，以 $\ln(\frac{\partial^\delta h^*}{\delta}) - (\delta-1)\ln t$ 为纵轴画曲线，即得到最优维修阈值曲线，曲线如图2所示。

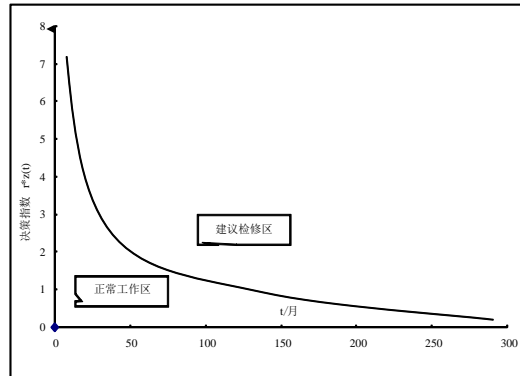


图4-2 最优维修阈值曲线

Fig. 4-2 Optimal maintenance threshold curve

设备在运行过程中，将某一个时刻的状态监测量代入到式（4-7）左端的 $z(t) = \gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_p z_p(t)$ 中，在图2中描出点 $(t, z(t))$ 。如果此点处于曲线上方则应立即采取维修措施，如果处在曲线下方则正常运行，如果落在曲线上或临界处，则在下一个监测周期需提高监测的频率，密切观察各项性能指标，并考虑下个周期进行预防维修。

4.3 基于顶层油温及绕组热点温度的失效模型诊断软件

本节通过调研收集到的以顶层油温升及绕组热点温升为主的监测数据估计出4.1.2小节所述中的各PHM参数；采用4.2.1中所述的最小维修成本法得到故障率阈值 h^* ，综合考虑监测数据，既而求解出大型油浸式变压器的最优维修决策模型；最后应用VC++编程实现此最优维修决策模型，开发出一套基于顶层油温升及绕组热点温升的大型油浸式变压器失效模型诊断系统，并针对SFSZ10-M-31500/110型油浸式变压器的实时顶层油温升及绕组热点温升监测数据进行仿真分析，验证失效模型维修策略的有效性。

4.3.1 数据收集

建立油浸式变压器的维修决策模型并估计其参数，需要用到油浸式变压器的

状态监测数据与故障数据。本文基于顶层油温升、绕组热点温升、变压器油中的糠醛含量、含水量等四个状态监测量建立相应比例失效模型，通过调研，收集到SFSZ10-M-31500/110型油浸式变压器的故障数据和状态监测数据，部分数据如表4-1和表4-2所示。

表 4-1 SFSZ10-M-31500/110 故障数据的部分样本

Tab. 4-1 portion of the sample fault data of transformer SFSZ10-M-31500/110

变压器编号	寿命/月
1	158
2	182
3	198
4	213
5	230
6	249
7	267
8	283
9	312

表 4-2 SFSZ10-M-31500/110 状态数据的部分样本

Tab. 4-2 portions of the sample status data of transformer SFSZ10-M-31500/110

样本	t/月	绕组热点温升 (° C)	糠醛含量 (mg/l)	顶层油温升 (° C)	含水量 (%)
1	26	62.5	0.008	46.9	0.0934
2	61	64.3	0.047	47.8	0.204
3	102	66.2	0.185	50.2	0.366
4	120	69.8	0.259	53.5	0.568
5	156	71.4	0.576	56.3	0.725
6	182	72.2	0.971	58.7	1.013
7	208	75.2	1.205	62.5	1.309
8	242	78.6	1.473	63.2	1.753
9	260	83.7	1.782	65.1	2.098
10	281	87.7	2.007	69.5	2.476
11	303	95.5	2.253	75.8	2.983

4.3.2 参数估计与决策模型

对表4-1中的寿命数据画威布尔分布检验图，如图3所示，可知油浸式变压器寿命符合威布尔分布，因此，对上述油浸式变压器进行维修决策时可用威布尔比例失效模型进行建模。由于该油浸式变压器有顶层油温升、绕组热点温升、变压器油中的糠醛含量、含水量四个状态监测量，因此，其对应的威布尔比例失效模型形式为：

$$h(t|Z(t)) = \frac{\delta}{\vartheta} \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^{\delta-1} \cdot e^{\gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \gamma_3 z_3(t) + \gamma_4 z_4(t)} \quad (4-9)$$

由式（4-9）可知此模型需要估计的参数有6个，分别为 ϑ 、 δ 、 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 ，利用表4-1、表4-2中的数据，结合1.2中所述的极大似然估计法和Newton-Raphson迭代算法,利用MATLAB编程算出各待估计参数值如表4-3所示

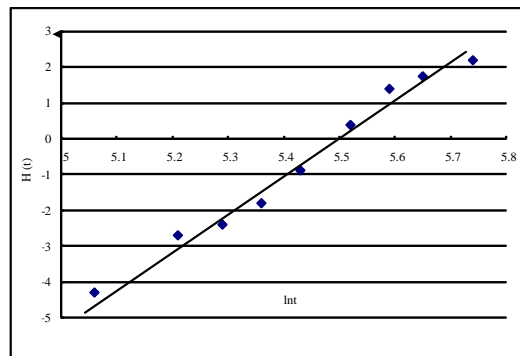


图4-3 Weibull分布检验图

Fig. 4-3 Weibull distribution test diagram

表4-3 威布尔比例失效模型参数

Tab. 4-3 Parameters of Weibull PHM

参数名称	参数值
δ	2.2183
ϑ	133.1217
γ_1	0.0049
γ_2	0.659
γ_3	0.0065
γ_4	0.0576

将上述参数代入至式（4-9）从而得到其威布尔比例失效模型为：

$$h(t|Z(t)) = \frac{2.2183}{133.1217} \left(\frac{t}{133.1217} \right)^{1.2183} \cdot e^{0.0014 \cdot z_1(t) + 0.4583 \cdot z_2(t) + 0.0452 \cdot z_3(t) + 0.0576 \cdot z_4(t)} \quad (4-10)$$

式中， $z_1(t)$ 为绕组热点温升； $z_2(t)$ 为糠醛含量； $z_3(t)$ 为顶层油温升； $z_4(t)$ 为含水量。采用 2.1 节介绍的最小维修成本法，根据工程实际经验，设定 $-C_1/C_2 = -0.023$ ，由图 4-1 可得最优预防维修间隔为 114 个月，既而得到故障率阈值 $h^* = 0.0216$ ，将求得的故障率阈值与各估计参数代入至式（4-8）中，可得代表维修决策阈值曲线的表达式为：

$$f(t) = \ln \left(\frac{133.1217^{2.2183} \cdot 0.0216}{2.2183} \right) - (2.2183 - 1) \ln t \quad (4-11)$$

基于此表达式可得到形如图 4-5 所示的维修决策阈值曲线。将实际监测数据代入式 $z(t) = \gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_p z_p(t)$ 中，得到点 $(t, z(t))$ ，描出此点，如果该点在曲线上方，则表明此变压器处于失效状态，需立即采取维修措施；如果落在曲线上或临界处，则需提高监测频率，建议在近期进行检修；如果该点在曲线下方，则说明此变压器运行状态良好。

4.3.3 VC++失效模型诊断软件

4.3.2 中求出各参数值及故障率阈值 h^* 后得到了 PHM 的具体表达式以及维修决策阈值曲线的数学表达式；基于获得的具体模型及具体数学表达式，应用 VC++6.0 与 SQL 数据库编程研发出一套基于 PHM，以顶层油温及绕组最热点温度为基本特征量的油浸式变压器失效模型诊断软件，此套软件实现了对顶层油温、绕组热点温度等各监测数据的存储、查询、显示、添加、删除、修改以及基于 PHM 的维修决策诊断等功能，其诊断管理界面如图 4-4 所示，左上角列表实时显示数据库中各变压器的监测数据及变压器的属性；中上方为经归一化处理后的四个检测量值的对比效果图；中下方柱状图为被诊断变压器油纸绝缘的老化速率与正常变压器老化速率对比图；右上角为 PHM 维修决策图；右下角图实现相应的文本诊断功能。

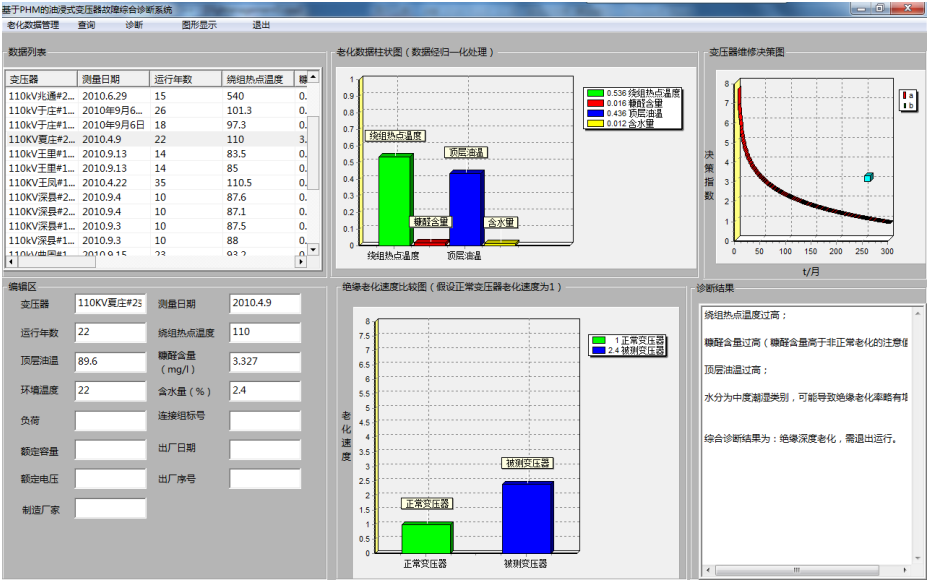


图4-4 系统主界面

Fig. 4-4 System main interface

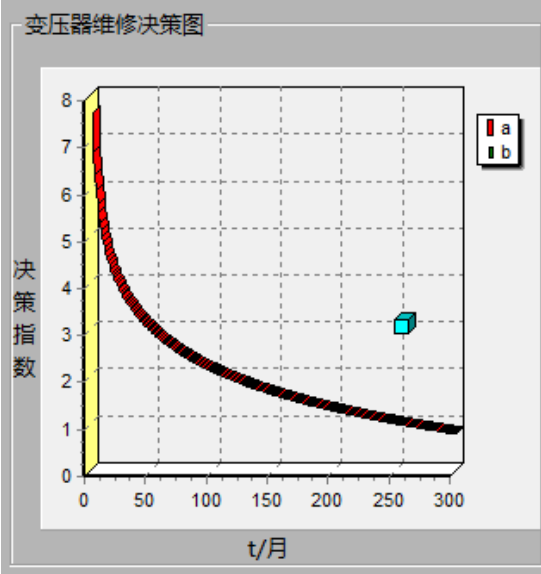


图4-5 变压器维修决策图

Fig. 4-5 Transformer maintenance decision diagram.

图 4-5 为图 4-4 所示系统界面中的变压器维修决策图，红色曲线为维修决策阈值曲线，蓝色方块为由实际监测数据仿真得到的决策点 $(t, z(t))$ 。从图 4-4 和图 4-5 中可以看出，在工作时刻 $t=264$ 我们测得变压器 1 各状态数据为 $z_1=110.5-22=89.5$ ， $z_2=3.327$ ， $z_3=89.6-22=67.6$ ， $z_4=2.4$ ，得到的蓝点 $(264, z(264))$ 位于红色曲线上方，且离红色曲线较远，即位于建议检修区，因此诊断结果表明此台变压器应该立即停产并进行检修。

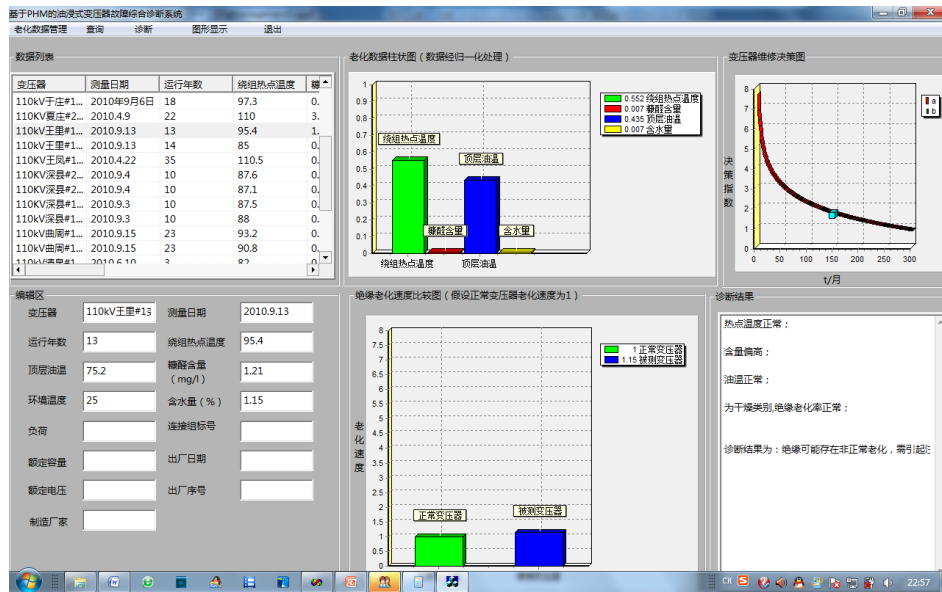


图4-6 变压器2诊断结果

Fig. 4-6 Transformers 2 diagnostic results

从图 4-6 中可以看出, 在工作时刻 $t=149$ 我们测得变压器 2 各状态数据为 $z_1=95.4-25=70.4$, $z_2=1.21$, $z_3=75.2-25=70.2$, $z_4=1.15$, 仿真得到的蓝点 (149, $z(149)$) 落在红色曲线上, 说明此变压器可能处于失效状态, 应加强监控, 密切观察各项性能指标, 并考虑近期进行维修。

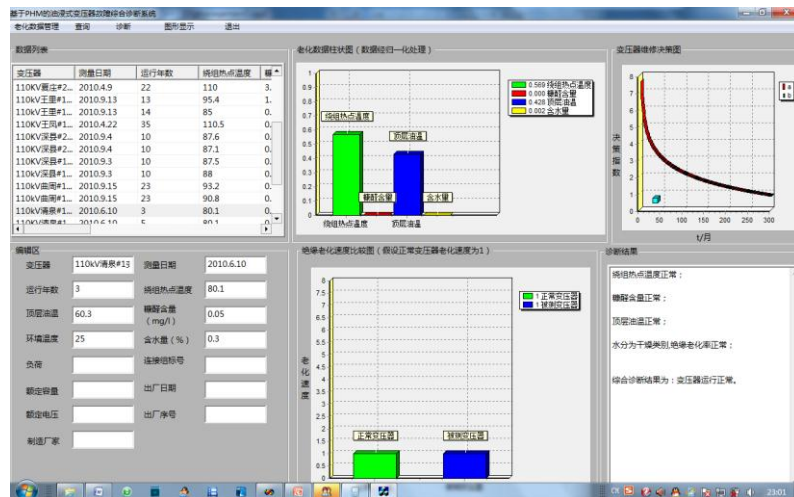


图4-7 变压器3诊断结果

Fig. 4-7 Transformers 3 diagnostic results

从图 4-7 中可以看出, 在工作时刻 $t=40$ 我们测得变压器 3 各状态数据为 $z_1=80.1-25=55.1$, $z_2=0.02$, $z_3=60.3-25=35.3$, $z_4=0.3$, 仿真得到的蓝点 (40, $z(40)$) 落在红色曲线上, 说明此变压器可能处于失效状态, 应加强监控, 密切观察各项性能指标, 并考虑近期进行维修。

z (40)) 位于红色曲线下方, 且距红色曲线较远, 说明此变压器状态良好, 可继续运行。

通过上述仿真结果可知, 此套基于 PHM 的诊断系统能依据变压器的实时监测数据, 准确诊断出变压器的运行状态; 对大型油浸式风冷变压器的实时运行状态做出准确诊断, 通过 PHM 失效模型算法的应用, 实现“按需维修”的维修策略。

4.4 本章小结

本章主要基于监测到的以变压器顶层油温及绕组热点温度为主的特征量, 运用 VC++ 开发出一套失效模型诊断软件, 有效解决现有检修方式存在维修过度或维修不足的缺陷问题。

首先通过 Weibull 比例失效模型构建了油浸式变压器状态监测特征量与故障率的关系模型, 其次通过建立的基于最小维修成本决策模型确定了油浸式变压器的维修策略。最后基于收集到的以热点温度为主的监测数据, 应用 VC++ 编程开发出一套基于 PHM 的油浸式变压器综合诊断系统, 并针对 SFP-720000/500 型油浸式变压器的状态监测数据进行了仿真计算, 仿真结果验证了本文所提出的维修策略的有效性。

第 5 章 结论与展望

本文对一款保定天威集团生产的 SFSZ10-M-31500/110 自然油循环大型油浸式变压器（冷却方式：ONAF）三维温度场及热点温度分布进行仿真分析研究，并开发出一套基于顶层油温与绕组热点温度的大型油浸式变压器失效模型诊断软件，主要工作和结论如下：

1、运用 FLUENT14.0 有限体积法计算了其三维温度场与油流场。分析了不同负载下各部件的温度场分布与油流分布，仿真结果表明，三绕组中，其温度都是不均匀分布的，而且都是底部温度较低，顶端的温度相对较高，低压绕组温度最高，中压绕组次之，高压绕组温度相对为最小；当负载逐步上升时，绕组热点温度及顶层油温也相应升高，且三绕组的热点温度沿轴向都是先逐步上升，在接近顶端时有一个小幅度的下降，最热点都出现在低压绕组顶端偏下位置，大概距绕组底端 85%---90% 处；且前负荷状态下，顶层油温与绕组热点温度曲线斜率较平缓；过负荷状态下，绕组热点温升的变化曲线较陡，曲线的斜率随着负载增大而变大，可见超载时绕组温度升高更快，所以现场变压器应尽量避免超载运行；通过比较理论计算结果和及基于 FVM 的计算结果，验证了 FVM 计算方法的准确性与可靠性；

2、针对大型油浸式变压器所采取的传统定期维修方式存在维修不足或维修过度方面的缺陷问题，以监测到的 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器顶层油温及绕组热点温度为基本特征量，利用 Weibull 比例失效模型建立了大型油浸式变压器运行状态与故障率之间的关系，以最小维修成本为决策目标，确定基于 PHM 的维修策略，在 VC++ 中编程实现 PHM 维修策略，针对 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器开发出一套基于顶层油温与绕组热点

温度的失效模型诊断软件，此软件能有效解决现有检修方式存在维修过度或维修不足的缺陷问题，实现大型油浸式变压器“按需维修”的目的。

为了对课题做进一步深入研究，有如下工作需要进行：

1. FLUENT 三维温度场分析对变压器模型进行了一定的简化，今后的模型可以考虑夹件、垫块及撑条的影响，使计算结果更接近实际。

2. 由于时间关系，本文只对 SFSZ10-M-31500/110 大型油浸式变压器不同负载环境温度为 32° C 下的温度场进行了研究，在以后的研究中可对不同负载、不同环境温度下温度场进行更深一步的研究。

参考文献

- [1] 刘建瑞, 李昌, 刘亮亮, 向宏杰, 何小可. 高温高压核电闸阀流固热耦合分析[J]. 流体机械. 2012, 40 (3): 16-20.
- [2] WANG J W, LIU R X. A comparative study of finite volume methods on unstructured meshes for simulation of 2D shallow water wave problems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 53 (6): 171-184.
- [3] Pierce, W.L,etc.An Investigation of temperature distribution in cast-resin transformer windings[J].IEEE Transformer on Power Delivery,1992,7(2):920-926.
- [4] 李桃. 涡流、温度耦合场的建模及有限元的数值分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2006
- [5] TENG J G, CHEN S F, HU J L. A finite-volume method for deformation analysis of woven fabrics[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 46(3): 2061-2098.
- [6] 张靖周,常海萍.传热学[M].北京:科学出版社,2009.
- [7] 陈伟根, 赵涛, 江淘莎, 等. 改进的变压器绕组热点温度估算方法[J]. 高压电器, 2009, 45 (2): 53-56.
- [8] GB/T 15164-1994 油浸式电力变压器负载导则 1994
- [9] Pradhan M K:Ramn T S Estimation of the hottest spot temperature (HST) in power transformers considering thermal inhomogeneity of the windings[J]2004 19(4)
- [10]傅晨钊, 汲胜昌, 王世山 变压器绕组温度场的二维数值计算[J].高电压技术 2005 28(5)
- [11]Tang P H Coupled thermal and flow analysis for oil-immersed transformers in electromagnetic field computation 2006
- [12]丛龙飞, 冯恩民, 郭振岩, 董振华, 赵良云 油浸风冷变压器温度场的数值模拟[J].变压器 2003 40(5)
- [13]王秀春, 陶军普 大型自然油循环导向冷却变压器温度场研究[J].变压器 2008 45(7)
- [14]温波.刘爽.冯加奇.陈玉红 油浸式电力变压器绕组温度场的二维仿真分析[J] 变压器 2009 46(9)
- [15]邓世杰 大型变压器风冷却系统的自动控制 [J]变压器 2003,40(10)

- [16]李晓刚 变压器冷却系统的分析、改造 [J]变压器 2006,43(12)
- [17]陈伟根, 赵涛, 江淘莎, 孙才新 改进的变压器绕组热点温度估算方法 [J] 变压器 2009,45(1)
- [18]王秀春, 俞昌铭 强油导向冷却结构变压器中导向油流量和油温升计算 [J] 中国电机工程学报 1991, 11(3)
- [19]李英, 王寿民, 张爱军 强油导向边变压器的流体的传热分析 [J]变压器 2004,41(6)
- [20]IEEE Standard C57.91-1995. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers
- [21]Lesientre B C;Hagman W H;Kirtlev J L An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system[J]1997 (01)
- [22]Swift G;Mlinski T S;Lehn W A Fundamental approach to transformer thermal modeling-part I:Theory and equivalent circuit[J]2001(02)
- [23]Swift G;Mlinski T S;Brav R A Fundamental approach to transformer thermal modeling-Part II:Field verification[J]2001(02)
- [24]李鹏飞, 李国祥, 胡玉平 大型油浸式子冷变压器冷却系统 CFD 分析[J]。 变压器 2008 45(4)
- [25]刘永志. 油浸式变压器温度场的数值计算和分析[D] . 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [26]李军, 董立文, 赵红.油浸式变压器的老化和寿命评估[J].高电压技术, 2007, 33 (3): 186-189.
- [27]尚勇, 钱政, 杨敏中, 严璋.高电压设备绝缘老化及状态维修的实现[J].高电压技术,1999, 25 (3): 40-44.
- [28]许渊, 刘有为, 王文焕, 等.大型电力变压器油纸绝缘含水量的介质相应诊断技术[J].中国电机工程学报, 2012,33 (5) :133-140.
- [29]Sofiane Gasmi,C Ernie Love,Waltrad Kahle.A general repair proportional hazards framework to model complex repairable systems[J].IEEE Transacationson Reliability,2003,52(1):26-31.
- [30]Tsai Youtern,Wang kuoshong,Tsai Linchang.A study of availability centred preventive maintenance for multi-component systems.Reliability EGINEERING and System Safety[J].2004,84:261-270.

- [31]ELSAYED E A,CHAN C K.Estimation of thin-oxide reliability using proportional hazards models[J].IEEE Transactions on Reliability, 1990,39 (3) :329-335.
- [32]DHANANJAY K,ULF W.Proportional hazards modeling of time dependent covariates using linear regression:A case study[J].IEEE Transactions on Reliability,1996,45(3):386-392.
- [33]魏勇, 徐廷学, 张瑾.基于可靠度的状态维修决策模型[J].火力与指挥控制,2010,24 (1) :716-723.
- [34]满强, 陈丽, 夏良华.基于比例风险模型的状态维修决策研究[J].装备指挥技术学院学报, 2008, 19(6): 36-37.
- [35]高萍.基于可靠性分析的复杂设备预防性维修决策研究[D].北京: 清华大学,2008.
- [36]TENG J G, CHEN S F, HU J L. A finite-volume method for deformation analysis of woven fabrics[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 46(3): 2061-2098.
- [37]张植保.变压器原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [38]苏小平. 油浸式变压器绕组热点温度计算模型及预测法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [39]苏丽娜. 大型自然油循环导向结构变压器自然风冷却和强风冷却温升计算研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.
- [40]韩燕国. 环境温度对变压器温升影响分析[J]. 2012 全国发电企业设备优化检修技术交流研讨会, 2012, 44-45.
- [41]单东雷. 大型变压器绕组温度场研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2012.
- [42]李英, 王寿民, 张爱军 强油导向边变压器的流体的传热分析 [J]变压器 2004,41(6)
- [43]IEEE Standard C57.91-1995. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers
- [44]Lesientre B C;Hagman W H;Kirtlev J L An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system[J]1997 (01)
- [45]Swift G;Mlinski T S;Lehn W A Fundamental approach to transformer thermal modeling-part I:Theory and equivalent circuit[J]2001(02)

- [46]Swift G;Mlinski T S;Brav R A Fundamental approach to transformer thermal modeling-Part II:Field verification[J]2001(02)
- [47]李鹏飞, 李国祥, 胡玉平 大型油浸式子冷变压器冷却系统 CFD 分析[J]。变压器 2008 45(4)
- [48]熊浩,陈伟根,孙才新等.基于 T-S 模型的电力变压器顶层油温预测研究[J].中国电机工程学报, 2007, 27 (30): 15-18.
- [49]RADAKOVIC Z, FESER K. A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling[J]IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(4):1284-1292.
- [50]Swift G,Molinski T S,lehn W. A fundamental approach to transformer thermal modeling—Part I: theory and equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2) :171-175.
- [51]GaldiV,IppolitoL,PiccoloA,et al. Neural diagnostic system for transformer thermal overload protection[J] . Proc. Inst. Elect. Eng, Elect . Power Applicatong,200,147(5):415-421.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 《Research of Environment Temperature Impact on the Hot-spot of Oil-immersed Power Transformer》 第二作者
- [2] 《基于 PHM 的油浸式变压器维修决策研究》 第二作者
- [4] 《A Study of the Composite Insulators Hydrophobicity Based on the Infrared Spectroscopy》 第三作者
- [5] 发明型专利：《一种基于混合模型的变压器维修决策方法》（受理中）

攻读硕士学位期间参加的科研工作

[1] 参与完成中海油天津分公司项目：海上钻井平台主变压器综合在线监测系统的研发。开发出一套海上平台主变压器局放综合在线监测系统及其基于 LabVIEW 的配套软件，实现了对海上平台主变压器局放、震动、电压电流、温湿度的综合在线监测，本系统目前已在中海油渤海湾多个海上钻井平台得到推广应用，获得一致好评；

[2] 作为主研人，完成河北省电力研究院项目——基于 VC++ 的“变压器油纸绝缘老化诊断系统”软件的研发；

[3] 作为主研人，完成河北省电力研究院项目——大型油浸式变压器风机控制策略研究。基于 ANSYS14.0，仿真获得了多款大型油浸式变压器在不同负载及不同环境温度下的温度分布，为多款大型油浸式变压器在不同负载、不同环境温度下的风机控制策略提供了可靠的参考。

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，两年半的研究生生活即将结束。两年的求学历程，忙碌而又充实，有过挫折，有过失败，但更多的是收获，感谢求学期间所有关心和帮助过我的人。

首先，衷心的感谢我的导师王永强教授对我学习工作和生活上的精心指导。王老师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。不仅使我树立了远大的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。在此，谨向王老师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

同时感谢高压实验室其它各位老师的大力帮助！

感谢一直关心与支持我的同学和朋友们！

最后感谢评阅本论文的各位专家和老师！

作者简介

1988 年 11 月 19 日出生于湖南省娄底市。

2007 年 9 月考入华北电力大学（保定），2011 年 6 月毕业并获工学学士学位。

2011 年 9 月至今攻读华北电力大学高电压与绝缘技术硕士学位。

获奖情况：

2012~2013 学年	华北电力大学“研究生一等奖学金”；
2011~2012 学年	华北电力大学“研究生二等奖学金”；
2010~2011 学年	华北电力大学“科技积极分子”；
2009~2010 学年	华北电力大学第四届电子设计大赛二等奖；
2008~2009 学年	华北电力大学“校三好学生”；
2008~2009 学年	全国英语竞赛校三等奖；
2008~2009 学年	华北电力大学“系三好学生”。