

# 基于 Ansys 的电磁系统温度场仿真技术研究

黄世泽<sup>1</sup>, 郭其一<sup>2</sup>, 李凡璋<sup>2</sup>, 屠旭慰<sup>3</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

3. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江 温州 325604)



黄世泽(1983—), 男, 博士后, 研究方向为智能配电虚拟样机技术在低压电器中的应用。

**摘要:** 电磁系统的发热是带来控制与保护开关电器温升的主要因素, 对其电磁系统进行了温度场仿真。对电磁系统各部分的发热做了分析计算, 同时试验测量了在主回路不通电情况下电磁系统各部分的温度, 与仿真结果进行比较, 验证理论和仿真分析的正确性。

**关键词:** 控制与保护开关电器; 电磁系统; 温度场; 有限元分析

**中图分类号:** TM 564.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8188(2015)02-0032-06

## Simulation of Thermal Field of Electromagnetic System Based on Ansys

HUANG Shize<sup>1</sup>, GUO Qiyi<sup>2</sup>, LI Fanzhang<sup>2</sup>, TU Xuwei<sup>3</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Zhejiang Jonk Technology Co., Ltd., Wenzhou 325604, China)

**Abstract:** Heat generated from electromagnetic system is an important factor of temperature rise of control and protection switch (CPS). In this paper, simulation of thermal fields of electromagnetic system as well as heat calculation of each part was analyzed. And the thermal test of electromagnetic system was performed with the main circuit off, which was compared to the result of simulation to verify the correctness of the theory and simulation discussed in this paper.

**Key words:** control and protection switch (CPS); electromagnetic system; thermal field; finite element analysis

## 0 引言

对控制与保护开关电器 (Control and Protection Switch, CPS) 来说, 电磁系统部分的发热是带来温升的一个重要原因。CPS 的电磁系统主要由线圈、磁铁构成。在正常工作情况下, 除了电流流过导体产生的能量损耗之外, 由于受到交变磁场的作用, 还会在铁磁体内部产生涡流和磁滞损耗。线圈电阻在吸合状态下由于通过电流也会产生功率损耗。对于电磁系统来说, 铁心和线

圈是其发热的主要热源<sup>[1]</sup>。

所有这些损耗几乎全部转变成热能, 一部分散失到周围介质中, 一部分加热电器, 使其温度升高。CPS 中使用的金属材料和绝缘材料在温度超过一定的范围后, 其机械强度和绝缘强度会明显下降, 造成 CPS 使用寿命降低, 甚至损坏。

通过改变电磁系统中磁铁硅钢片的材料, 进而减小其在工作中产生的铁磁损耗、涡流损耗, 以达到减小电磁系统功耗和温升的目的是目前较为普遍的优化电磁系统的方法。本文将已经投入实

郭其一(1961—), 男, 教授, 博士, 研究方向为控制理论与方法及其在电力系统中的应用。

李凡璋(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为低压电器数字仿真技术。

际应用的 C 框架 KBO CPS 产品作为研究对象,基于 Ansys 仿真平台对模型进行优化,着重研究其电磁系统中线圈和磁铁对电磁系统温升的影响。

## 1 温度场仿真方法

传统的电器热分析采用牛顿热力学计算公式,计算的误差比较大,而且不能计算场域的温度分布。20 世纪 90 年代后期,国际上开始采用场的数值方法来分析电器的发热问题。2000 年, M. Lindmayer 建立了低压断路器的简化模型,并基于热电耦合对低压断路器的温度场进行了仿真,不仅考虑了传导散热,还通过气流场和温度场的耦合分析了其中的对流过程。近几年,罗克韦尔实验室在低压开关电器热分析方面做了不少研究工作,主要有:基于机械、电和热耦合分析,研究了导体接触处的发热和散热过程;在 M. Lindmayer 断路器简化模型的基础上,进一步细化了模型,不仅分析导体部分,还分析了非导体部分,为非导体材料的设计提供了依据。国内低压电器数值热分析方面的文献很少,主要是针对电磁系统的分析。

目前,开关电器常用的热分析方法有两种:有限元法和热网络法。

采用有限元方法计算低压电器温度场分布能充分考虑各种因素,计算准确性较高。但有的低压电器,如低压断路器,结构复杂、建模较难,计算工作量大,且在工程应用中开关电器往往不是独立工作的,一个配电柜中安装了多台各种类型的开关电器,它们之间发热和散热相互影响,这种情况下采用有限元方法会更复杂。

热网络法是利用热路和电路的相似性提出来的。应用热网络法,首先应根据开关电器的物理模型建立等效的热路网络,求解热路网络可采用求解电网络的计算方法;也可根据建立的热路网络模型,利用能量平衡转换成有限差分方程,用有限差分方法进行求解。后者称为热网络有限差分法,是一种近年来国际上刚提出来的崭新方法。热网络法较简单,计算工作量小,因而更适用于工程应用,其准确度决定于建立的热网络模型是否合理,热网络中的阻容元件参数的确定是否切合实际。

### 1.1 有限元法计算低压电器的温度场

低压开关电器,如低压断路器在长期闭合工

作时,电流通过载流部分,包括接线端、主触头、汇流排、热磁脱扣器、外接导线等,都会产生热损耗,使断路器温度升高,然后通过外壳、接线端和连接导线表面把热量散发出去。为了便于进行热计算,可做以下简化:

(1) 开关电器安置于无限大空间,无临近热源。

(2) 材料各向同性。

(3) 外壳表面散热,透过对流层辐射,其中,对流为自然对流。

(4) 由于开关电器内部空气流动缓慢,因而内部热的传递只考虑传导散热。对大规格断路器才需考虑对流散热<sup>[2]</sup>。

根据传热学理论,在直角坐标系下,低压开关电器内部三维热传导方程为

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1)$$

式中:  $\rho$ ——材料密度;

$C$ ——材料比热容;

$T$ ——物体的温度;

$t$ ——时间;

$\lambda$ ——导热系数;

$x, y, z$ ——三维坐标;

$q_v$ ——单位体积内产生的热量。

若考虑稳态发热,则方程变为

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = 0 \quad (2)$$

热分析的边界条件有 3 种,分别为

(1) 第 1 类边界条件:

$$T|_{\tau} = T_f \quad (3)$$

式中:  $T_f$ ——已知表面温度。

(2) 第 2 类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_s \quad (4)$$

式中:  $q_s$ ——已知热流密度。

(3) 第 3 类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) \quad (5)$$

式中:  $\alpha$ ——表面散热系数;

$T$ ——发热体表面温度;

$T_0$ ——环境温度。

考虑到表面热传递是通过对流和辐射,因而

综合起来可得

$$\alpha = \alpha_{\text{conv}} + \alpha_{\text{rad}} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_{\text{conv}}$  —— 对流散热系数;

$\alpha_{\text{rad}}$  —— 辐射散热系数。

对大型低压电器,如万能式断路器来说,壳体内部空间较大,考虑到内部热传递有传导和对流两种方式,需求解由质量守恒、动量守恒所列出的偏微分方程<sup>[3]</sup>。

### 1.2 热网络法

自然界有电磁场,也有热场。同为场,它们就有一定的相似性。电磁场中有电路和磁路的概念,热场中也有热路的概念。从传热的机理上,热路、电路与磁路是有差别的,因为在实际应用上没有什么材料能很好地约束热流在一条“路”中运动,而导体和铁磁材料却能把绝大部分电流和磁通约束在其中。从这点上讲,把热场简化为热路,其精度比电磁场简化为电路和磁路的要低,但通过适当处理也可满足工程计算要求。

对于电路与类比的热路,它们稳态和瞬态的对应方程如下。

电路欧姆定律:

$$R = U/I \quad (7)$$

热路欧姆定律:

$$R_T = t/P_T \quad (8)$$

电路瞬态:

$$i = u/R + Cdu/dt \quad (9)$$

热路瞬态:

$$P_T = \tau/R_T + C_T d\tau/dt \quad (10)$$

利用以上热路和电路相似原理可对一具体开关电器建立其热路网络模型,求解热网络问题可采用电网络方法求解,如用电网络的软件 PSpice 来计算。

### 1.3 Ansys 的热力学有限元分析方法

Ansys 是一个功能丰富、界面友好、使用效率高的有限元软件系统,它在热-电耦合分析方面具有强大的功能。在实际应用中,能够方便地改变设计参数和设计条件,可直观得到不同运行环境和运行条件下的仿真结果,尤其在温度场分析方面是传统的分析方法无法比拟的。

Ansys 单元库中有 150 余种单元类型,其中许多单元具有好几种可选择特性来胜任不同的功能。在能够获得预期结果的前提下,单元的选择

应该是尽量选择维数低的单元。本文仿真所用到的实体单元为 Solid70 单元。

在 Ansys 热分析中,可以直接在实体模型或单元模型上施加的载荷(边界条件)共有 5 种。

(1) 恒定温度边界。温度载荷通常作为自由度约束,将已知的温度施加于模型特定的区域。

(2) 热流率。热流率作为节点集中载荷,主要用于线单元模型中(通常线单元模型不能施加对流或热流密度载荷)。如果键入的值为正,代表热流流入节点,即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上,那么温度约束条件优先。

(3) 对流边界。对流边界作为面载荷施加于实体模型的外表面,计算模型与其周围流体的热交换,它仅可施加于实体模型和壳状模型上。

(4) 热流密度。热流密度是一种面载荷。当通过单位面积的热流率已知或通过 Flotran CFD 计算得到时,可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果键入的值为正,代表热流流入单元;反之,代表热流流出单元。热流密度也仅适用于实体单元和壳单元。

(5) 生热率。生热率是单位体积的热流率,它作为体载荷施加于单元上,可以模拟化学反应或导体通过电流时的生热过程。

## 2 CPS 电磁系统的发热分析

### 2.1 CPS 内部发热和散热的真实分布情况

#### 2.1.1 发热热源分布

热源的计算是准确进行热分析的基础,低压断路器的热源主要是导电线圈路的母排、软连接、双金属热脱扣器、瞬时脱扣器,主触头和接线端及温升试验时的连接导线,特别是触头和接线端的接触电阻计算影响较大,对 CPS 来说,还需考虑操作电磁铁的铁心和线圈的发热<sup>[4]</sup>。

CPS 达到热稳态以后的热源发热功率计算比较复杂,可以通过计算线圈和分磁环中通过的电流,进而计算得到线圈和分磁环的发热功率;铁心的损耗可通过材料的铁损乘以铁心体积来确定。在进行热分析时,将系统达到热稳态时的线圈发热、分磁环发热和动静铁心发热的生热率作为体载荷施加于单元上。交流 CPS 外表面主要考虑自然对流散热,故在进行热分析时,CPS 外壳外表

面施加第3类边界条件: 对流边界条件<sup>[5]</sup>。

### 2.1.2 热量传递分布

交流 CPS 磁系统达到稳定温升时,其热量的传递可从以下几个方面考虑: 磁系统各部件之间的导热; 壳体内空气间与磁系统及 CPS 外壳之间的导热; CPS 外壳的对流散热和辐射散热。铁心、线圈及分磁环的导热系数远大于空气及 CPS 外壳,磁系统各部件内的温度梯度必然很小,在不影响部件温升分析精度的基础上,可将壳体内空气和外壳进行等效化处理,简化问题<sup>[6]</sup>。

在全载荷加载条件下,电磁系统温度明显升高,这是因为主回路上电后,接触电阻产生的热量一方面通过内部各部件间热传导,另一方面通过内部空气的热对流传递到线圈和铁心处,使其温度升高。

## 2.2 各部分的发热分析

CPS 工作时的热源包括电磁系统和主回路两部分,本文只考虑电磁系统的发热。

### 2.2.1 线圈的功率损耗

一般来说,线圈是由外包绝缘的导线绕制而成,可以看作一个含有复杂绝缘层的组合型发热部件。线圈回路上电后因为线圈电阻产生焦耳热,线圈温度升高,并通过热传导使整个电磁系统的温度升高。线圈的上、下表面和外侧面都可以通过空气直接散热,因此线圈温度的最高点一定是在线圈内部的某一处。本文分析的电磁系统的线圈参数如表1所示。

表1 C 框架 CPS 电磁系统线圈参数

参数	线圈电压/V	线径/mm	线圈匝数
绕组1	220	0.19	3 220 ± 10
绕组2	380	0.15	6 000 ± 54

对正常工作的 220 V 电磁系统线圈进行电流测量,测得线圈电流  $I=0.05$  A。故线圈的发热功率为

$$P_{\text{coil}} = I^2 R_{\text{coil}} \quad (11)$$

式中:  $R_{\text{coil}}$ ——线圈电阻。

线圈所用材料是铜漆包线,在分析中要考虑电阻率随温度的变化。当温度为  $0 \sim 180$  °C 时,电阻率的取值范围为  $1.62e^{-8} \sim 2.87e^{-8} \Omega \cdot m$ 。

在 Ansys 中,发热功率是通过单位体积的热生成进行加载的。热生成载荷的计算公式为

$$Q_{\text{coil}} = \frac{P_{\text{coil}}}{V_{\text{coil}}} \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{coil}}$ ——线圈发热功率;

$V_{\text{coil}}$ ——线圈体积。

### 2.2.2 E 型电磁铁的铁损

本文分析的电磁系统中 E 型电磁铁的材料是整体结构的 W-470 硅钢片,具有导磁性和导电性。实际应用中一般采用 Bertotti 提出的铁损计算模型。该模型为了简化计算,根据各种损耗的原理不同将铁损分为磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗三部分。由于附加损耗非常小,一般将其忽略<sup>[7]</sup>。

通过线圈的交流电流产生的交变磁通在铁心内产生磁滞和涡流损耗,查阅电工手册,根据铁心材料的铁磁损耗曲线进行估算。

铁心的发热功率为

$$P_i = pm \quad (13)$$

式中:  $p$ ——单位体积铁损;

$m$ ——铁心质量。

则对铁心施加的载荷公式为

$$Q_i = \frac{P_i}{V_i} \quad (14)$$

式中:  $V_i$ ——铁心体积。

### 2.2.3 分磁环的功率损耗

分磁环作为只有一匝的线圈进行设置实常数,在利用 Ansys 电磁分析模块中同样可以计算出分磁环电流。

分磁环的发热功率为

$$P_f = I^2 R_f \quad (15)$$

式中:  $I$ ——分磁环电流;

$R_f$ ——分磁环电阻。

对分磁环施加的载荷公式为

$$Q_f = \frac{P_f}{V_f} \quad (16)$$

## 3 电磁系统的温度场仿真

### 3.1 建模并定义参数

用 Ansys 进行热分析和其他任何类型问题的分析过程基本一致,Ansys 实际操作的主要有 3 个步骤: 首先建立有限元分析的实体模型; 其次施加载荷并求解; 最后查看并分析所得结果。

(1) 选择热分析单元类型,定义单元选项。

稳态热分析采用 Solid70 实体单元建模。

(2) 定义实常数。

(3) 定义材料热性能参数。对于稳态传热分析只需要定义材料的导热系数。材料的导热系数可以是恒定的,也可以是随温度变化的。

(4) 创建实体模型。因热分析中对 Solid70 模型后期网格划分的要求较高,需对电磁铁模型进行优化,省略表面的不规则的凹凸及边角等,以免划分网格时出现单元退化,划分出错。从 C 框架 CPS 上量取各部分的尺寸进行建模,最终还应在整个模型周围包裹一层空气体模型。C 框架 CPS 产品的电磁系统仿真模型如图 1 所示。



图 1 电磁系统的仿真模型(内部视图)

(5) 划分网格,建立有限元分析模型。在网格剖分时,应当注意控制节点数量。一般来说,节点数越多,则解的精度越高,但同时所费的计算时间也越长,计算机的数据存储量也越大。另一方面,在同样节点数的条件下,网格单元在区域中的疏密配置的合理性对计算精度的影响也是相当大的。

### 3.2 施加热载荷并进行计算

根据传热学基本理论,热量的传递有热传导、热对流和热辐射 3 种基本形式。为了工程计算的方便,可以将这 3 种形式合并考虑,提出综合散热系数  $K_T$  的概念,这就是牛顿热计算公式。

由于综合散热系数  $K_T$  包含了 3 种散热形式,并尽可能地考虑了各种影响散热的因素,因而需要根据已有的试验数据慎重选择和设定。并且对于不同的分析对象,也需要特别进行有效散热面积  $S$  的计算。如对于电器中的线圈,当散热面积  $S$  在  $(1 \sim 100) \times 10^{-4} \text{ m}^2$  范围内时,可以计算线圈表面的综合散热系数  $K_T$ 。

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_0 = \frac{P_m}{K_T S} \\ P_m = I_m^2 R_m \\ K_T = 46(1 + 0.005\Delta T) / \sqrt[3]{S \times 10^4} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_m$ ——线圈发热功率;

$I_m$ ——线圈电流;

$R_m$ ——线圈电阻;

$S$ ——有效散热面积;

$\Delta T$ ——温升,  $T$  和  $T_0$  分别为热源和环境温度,  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

将线圈、电磁铁、分磁环 3 大部分的发热量经过计算之后以载荷的形式施加到相应的模型部件上,另外,线圈、磁铁都有不同的表面综合散热系数,还有环境温度都作为换热载荷施加到相应的表面。初步的仿真结果如图 2 所示。

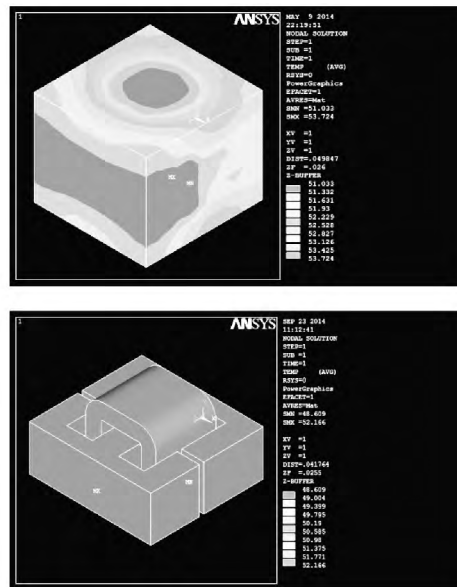


图 2 电磁系统的温度场初步仿真结果

## 4 验证和优化应用

### 4.1 验证

在室温条件下对 CPS 产品的实际温升测试,其中只对线圈进行通电,不给主回路通电,不考虑主回路造成的温升。试验条件:给线圈通三相交流电,电压  $U = 220 \text{ V}$ 。因热力学仿真中对模型的网格划分的要求较高,因此在仿真时对电磁系统的附件如安装盘、外壳、支架等部件进行优化,在导热换热条件上视作空气体。试验结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 C 框架 CPS 产品温度实测结果

测试部位	安装盘	外壳	铁心	线圈	支架	环境
温度/ $^\circ\text{C}$	$55 \pm 5$	$40 \pm 3$	$47 \pm 3$	$45 \pm 1$	$30 \pm 2$	17

表3 C 框架 CPS 产品温度仿真结果

仿真部位	铁心	线圈	其他
温度/℃	52.2	48.6	50 ± 5

分析测试结果可知,电磁系统结构紧凑、热量流动较小、温升分布相对较为均匀、E 型电磁铁与线圈温度相近。

对比仿真和试验结果,可以认为仿真具有一定的参考价值。由于发热计算的误差以及建模过程中的一些优化,并考虑到仿真的可行性将实际产品中其他的部件等效成为空气,造成了仿真结果相对于实际情况温度偏高的情况。

#### 4.2 优化应用

实际的优化设计中,由于产品的负载是确定的,通电电流的大小无法改变,同时由于产品应用环境的限制以及为了保证绝缘性能,触头的尺寸和间隙也无法改变,因此 CPS 的热特性的优化空间是十分有限的。

针对电磁系统的改进措施,可以尝试:铁心由电磁纯铁更换为硅钢片叠片式结构。

对电磁系统的热特性优化设计主要是对铁心的材料和几何尺寸进行重新选择和设计。更换铁心硅钢片,采用具有铁损更低、磁感应强度更高及叠装系数更高等优点的硅钢片,不仅可以降低涡流和磁滞损耗,而且可以减小铁心的重量,节约材料。

在频率和最大磁感应强度一定的情况下,硅钢片内的涡流损耗与硅钢片材料的电导率以及硅钢片厚度的平方成正比。因此,硅钢片的厚度越薄,电导率越低,涡流损耗越小。叠片式的结构不仅减小了单片硅钢的厚度,而且掺入的硅成分还改善了导电性和导磁性能。

(上接第 31 页)

#### 【参考文献】

- [1] 蔡卫龙. 汽车常用继电器介绍及应用[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011(6): 14-17.
- [2] 王保国. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 苏秀苹. 小型直流电磁继电器温度场仿真分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 158-169.

## 5 结 语

本文利用 Ansys 有限元分析平台,对 C 框架 CPS 的电磁系统单独进行了温度场的仿真分析,并以温升试验验证了本文仿真分析的正确性。本文的仿真思路和仿真方法可以为相关 CPS 的温度场分析提供参考。此外,可以在此基础上尝试改变电磁系统的结构尺寸或者相关电气参数进行二次仿真,对仿真结果进行分析,结合参数的变化考虑对电磁系统部分进行优化,降低温升,提高其工作特性。

#### 【参考文献】

- [1] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 等. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2007, 11(22): 71-77.
- [2] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 等. 计及主回路和电磁系统发热的交流接触器数值热分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 33(22): 53-58.
- [3] 胡方. 交流接触器热特性分析及优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] 王峰. 交流接触器磁系统的稳态热分析[J]. 低压电器, 2007(11): 10-12.
- [5] 陈立兴. 小容量接触器优化设计的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [6] 陈刚, 刘教民, 谭东杰. 低压断路器温度场分析[J]. 低压电器, 2007(21): 5-7.
- [7] 胡方, 杨文英, 赵瑞平, 等. 大功率直流接触器温度场仿真及影响因素分析[J]. 低压电器, 2011(23): 1-6.

收稿日期: 2014-09-25

- [4] 郑必成. 继电器瞬态温度场仿真计算及其试验[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [5] 李震彪. 反复短时工作制下密封电磁继电器瞬态热分析仿真[J]. 电工技术学报, 2011, 23(1): 58-62.

收稿日期: 2014-10-10