

高压限流型熔断器热电耦合瞬态温度场的计算

王子建^{1,2}, 何俊佳¹, 尹小根¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

Calculation on Thermo-electricity Coupled Transient Temperature
Field of High Voltage Current Limiting Fuse

WANG Zi-jian^{1,2}, HE Jun-jia¹, YIN Xiao-gen¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘要: 在对某高压限流型熔断器的结构进行合理简化, 并针对实际情况提出相关假设的基础上, 利用有限元分析软件 ANSYS, 建立了用于熔断器热电耦合瞬态温度场计算的三维有限元模型。该模型中考虑了材料物理性能参数以及熔断器表面对流换热系数随温度的变化, 并利用 ANSYS 有限元分析软件对该熔断器在正常工作以及故障情况下的瞬态温度场变化过程进行了数值模拟, 最后就不同结构参数对熔断器温升特性的影响进行了研究, 为该型熔断器的设计制造以及工程分析提供了理论依据。

关键词: 有限元法; ANSYS; 熔断器; 热电耦合;
瞬态过程; 温度场

中图分类号: TM563.1 文献标识码: A

Abstract: A three dimensional (3D) thermoelectricity coupled finite element model to analyze the transient thermal behavior of the high voltage current limiting fuse is established by using ANSYS program. In this model, the simplification of fuse's structure and some reasonable suppositions are presented to simplify the calculation. In order to obtain the exact transient temperature distribution of the fuse, the temperature dependent on material properties and heat transfer coefficients are taken into account. The variety process of the temperature distribution in the case of normal working and fault are obtained through the analysis. Finally, the effect of structure parameter to the thermal characteristics of the fuse is studied, and the result provides a theoretical basis for the design and engineering analysis.

Key words: FEM; ANSYS; fuse; thermoelectricity coupling; transient process; temperature field

0 引言

随着现代电气设备容量的不断增大, 短路电流

的不断提高, 人们对于熔断器在故障情况下能否快速、可靠地切断故障电流提出了更高的要求, 熔断器产品也面临着加速更新换代的局面。而要设计出性能更加优异的熔断器, 就必须对熔断器在正常工作以及故障情况下温度场分布的变化过程进行准确的计算, 以便能与触发爆炸装置密切配合, 从而达到较好的时延特性。由于熔断器的结构以及边界条件比较复杂, 并且整个温升过程是瞬时和非线性的, 因此, 采用解析方法一般很难得到其准确的温度分布。传统的方法主要是依靠估算和经验公式, 由于计算结果不准确, 所以通常需要经过反复的样机试制和试验, 既浪费人力、物力, 又延长了开发周期。

随着计算机技术以及数值计算技术的发展, 有限元方法由于能够模拟几何形状复杂的结构, 并且可以方便地处理各种边界条件, 因此已经成为解决复杂物理场问题的有效方法。本文应用有限元分析软件 ANSYS 建立了熔断器热电耦合的三维有限元模型, 对正常工作以及故障情况下的瞬态温度场分布进行了数值模拟, 在计算的过程中考虑了材料物理性能参数以及对流换热系数随温度的变化, 得到了瞬态温度场的有限元模拟结果。

1 热电耦合有限元分析

ANSYS 作为有限元领域的大型通用软件, 它具有结构、流体、电磁场、热场、声场以及多物理场耦合分析的功能, 可以进行稳态和瞬态、线性和非线性分析, 可以模拟材料固化和熔解过程的相变分析, 因此在实际应用中受到了国际工程界和学术界的普遍欢迎, 并被广泛应用于机械制造、航空航天、石油化工、交通运输、土木工程、水利、医学、教学科研等诸多领域^[1]。

收稿日期: 2006-03-28; 修回日期: 2006-05-09

作者简介: 王子建(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁场有限元分析方面的研究。

1.1 问题提出及基本假设

某高压限流型熔断器的立体结构见图1,所用材料为紫铜,该熔断器两端分别与10 mm×100 mm足够长紫铜汇流排连接,周围环境温度为0~40,图中虚线以内部分用隔热材料密封。在正常情况下,流过该熔断器的电流为3 kA的直流电流;在短路的情况下,熔断器中的电流将从3 kA开始,以 24.5×10^6 A/s的速率迅速上升至20 kA,整个上升过程大概持续694 μs,负载变化曲线见图2,要求计算出熔断器在正常情况下的稳态温升,以及在故障情况下的瞬态温度场变化过程。为改善熔断器的散热条件,在熔断器两端进行强制空气对流换热,近似认为熔断器两端温度维持在50。

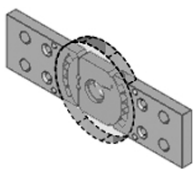


图1 熔断器立体结构图

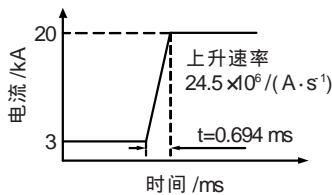


图2 负载电流变化曲线

根据热电耦合的实际情况,在不影响计算精度的前提下,提出以下假设:①忽略熔断器密封部分与外界的热交换,近似认为该部分与外界空气是绝热的;②只考虑熔断器的热传导以及空气对流换热,不考虑辐射散热;③熔断器材料各物理性能参数各向同性;④熔断器表面的空气对流换热为无限空间自然对流换热,且空气参数为国际标准空气参数。

1.2 创建模型及网格划分

根据熔断器的结构特点,在计算误差允许的前提下,对熔断器的局部结构进行合理简化,并通过ANSYS参数化程序设计语言APDL,采用自底向上(即按关键点-线-面-体的创建顺序)的建模方法建立熔断器的三维有限元模型。为了减少计算量,缩短计算时间,根据对称性,只取1/2模型进行有限元分析。

在创建模型完成之后,就要对模型进行网格划分,网格划分在整个有限元分析中占有非常重要的地位,划分网格的好坏将直接影响计算结果的准确程度,在划分过程中,可经过多次试验的方法得到较为理想的网格划分。应用扫掠的方式对整个模型进行网格划分,由于ANSYS软件无法根据温度场的分布对网格的疏密程度进行自动调整,因此需要在划分网格结束后,对温度梯度较大地方进行局部网格加密。最后得到熔断器的有限元模型,见图3,其中节点个数为16 809,单元个数为12 875。

1.3 定义单元类型及材料属性

ANSYS软件中用于热电耦合分析的单元主要有7种^[2]。本文根据所分析问题的性质以及单元特征,选择SOLID69热电耦合单元,单元形状为八节

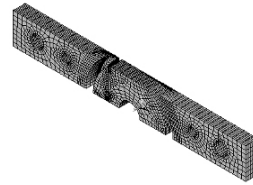


图3 熔断器有限元模型

点六面体,自由度为:温度(TEMP)、电位(VOLT)。

除了单元类型之外,还必须给定熔断器材料的各物理性能参数,如:电阻率、热传导率等。由于熔断器的温度变化范围较大,因此不能忽略各物理性能参数随温度的变化。从文[3]得到紫铜各特性参数随温度的变化规律,见表1。

表1 紫铜物理性能参数随温度的变化规律

温度 t / °C	密度 k / (kg·m ⁻³)	电阻率 / (10 ⁻⁸ Ω·m)	热传导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容 c _p / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
0	8 930	1.694	401	386
200	8 930	2.930	389	402
400	8 930	4.030	379	418
600	8 930	5.300	366	436
800	8 930	6.700	352	454
1 000	8 930	8.100	338	473

在ANSYS中以表格的方式定义各特性参数随温度的变化规律,ANSYS在迭代计算的过程中会自动通过线性插值及外推的方法得到任意温度下的材料属性。

1.4 定义边界条件

ANSYS热分析的边界条件可分为7种:温度、热流率、热通量、对流、辐射、绝热和热源。根据熔断器的实际工作情况给定如下边界条件:

(1)温度。熔断器两端通过强制空气对流进行换热,因此,近似认为熔断器两端温度维持在50;

(2)自然对流。认为熔断器表面与周围空气的对流换热为无限空间自然对流换热。假设周围环境温度为20,根据文[4]中的准则关联式进行计算,得到熔断器各表面对流换热系数随温度的变化曲线,见图4。

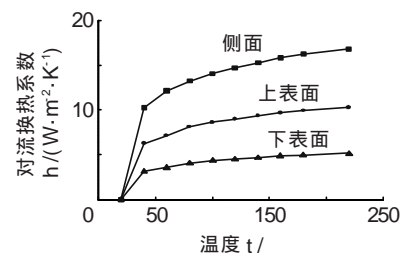


图4 对流换热系数随温度变化曲线

1.5 定义载荷步并求解

在ANSYS中,耦合场分析的实现方法有两种:一种是直接耦合方法,另一种是顺序弱耦合方法。在本文中,由于电场与温度场之间相互影响,不能单独

对某一个场进行求解,因此必须采用直接耦合的方法进行求解。在求解之前,首先要定义载荷步,针对正常工作以及故障两种情况分别定义载荷步。

(1) 正常工作。该情况下只需定义一个载荷步。首先指定分析类型为瞬态分析,打开时间积分效应;其次根据熔断器达到稳定工作所需的时间,定义载荷步结束的时间,本文取载荷步结束的时间为600 s;然后定义负载电流为3 kA,载荷变化方式为阶跃载荷,打开自动时间步长功能,设置起始时间步长,最小、最大时间步长以及最大平衡迭代次数。

(2) 故障情况。为了计算故障情况下熔断器温度分布的变化过程,必须首先计算正常情况下熔断器通入3kA直流电流时的稳态温度分布,并以此作为初始温度分布,进行瞬态过程的计算。因此,在计算过程中需要定义两个载荷步。对于第1个载荷步,首先指定分析类型为瞬态分析,关闭时间积分效应;其次定义载荷步结束的时间,第1个载荷步的时间可以任意取一个很小的值,如 10^{-6} s;然后定义负载电流为3 kA,载荷变化方式为阶跃载荷,设置最大平衡迭代次数。对于第2个载荷步,首先打开时间积分效应;其次定义载荷步结束的时间为694 μ s,负载电流为20 kA,载荷变化方式为渐变载荷,打开自动时间步长功能,设置起始时间步长,最小、最大时间步长。

时间步长的确定通常会对计算精度产生很大的影响,步长越短则计算精度越高,但过小的时间步长需要很大的计算机容量和很长的计算时间,因此必须权衡考虑计算效率与精度,选择合适的时间步长。在定义完载荷步以后,就可以选择求解器对问题进行求解,求解器有很多,针对不同的问题可以选择不同的求解器,本文选择波前求解器进行求解。

1.6 后处理与结果分析

(1) 熔断器在正常工作情况下,通入3kA直流电流,历时600 s之后的温度分布云图、温度分布局部视图和电流密度分布云图见图5。从图中可以看出熔断器在正常工作时,温度分布出现中间高两端低的现象,最高温度点温度达到了266.486 $^{\circ}$ C。这主要是由于熔断器中间部分最窄,电流密度 J 最大,由电流引起的热功率密度 $P=J^2$ (ρ 为电阻率)较大且散热条件较差的缘故。另外从电流密度分布云图中可以看出,温度最高点的电流密度也是最大的。计算结果表明,中间最窄部分的温度是最高的,因此可以通过控制中间部分的温度来实现与触发装置的配合。

(2) 熔断器在故障情况下,负载电流上升至20 kA时的温度分布云图、温度分布局部视图和电流密度分布云图见图6。从图中可以看出熔断器在故障情况下中间部分的温度有了明显的提高,而两端的温度

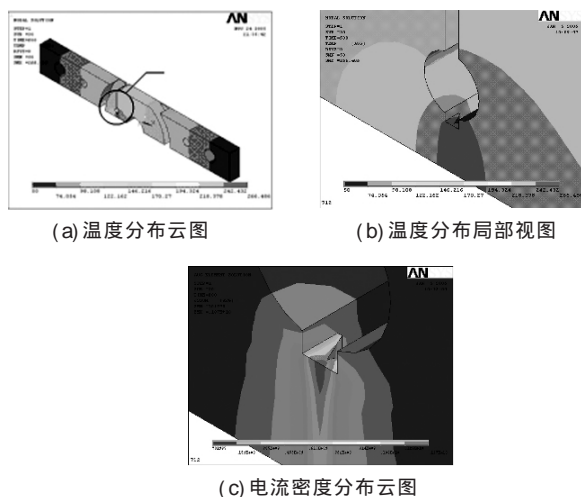


图5 正常工作情况下分布云图

则没有明显的变化。这是因为在故障情况下,中间部分最窄处的电流密度最大、体积又最小,所以该处的温度迅速升高,加之熔断器被密封,该部分能量无法散发到空气当中,只有在温差的作用下,迅速向周边扩散,但由于该瞬态过程的时间较短,所以该过程所波及的范围也较小,熔断器两端的温度并没有明显的变化。也就是说,在瞬态过程中,由于电流突然升高所导致的热量收支的不平衡,绝大部分将用来加热熔断器本身,只有很少一部分通过热传导的方式传递到熔断器两端并通过对流换热散发到空气当中。

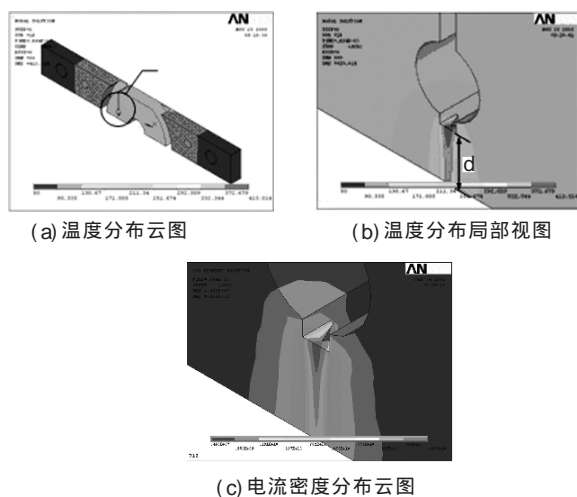


图6 故障情况下分布云图

2 结构参数对温升特性的影响

熔断器的局部视图见图6(b),图中标注的 d 为熔断器最窄处的宽度。通过改变熔断器的结构参数 d ,可以得到熔断器在不同结构下的温升特性。

(1) 熔断器在正常工作情况下最高温度点温度随时间的变化曲线见图7。从图中可以看出,在通电初期熔断器温度迅速升高,随着时间的推移,温度变化曲线逐渐趋于平稳,这主要是由于在通电初期熔

断器的发热功率是一个很大的值，而散热功率则等于零，因此，多余的热量将使得熔断器的温度迅速升高；而温度的升高又导致散热功率的增大，如此往复，直至最后熔断器的发热功率与散热功率达到平衡，熔断器的温度也趋于稳定。另外，从图中还可以

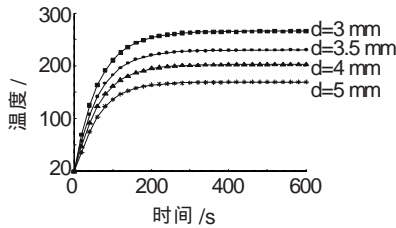


图7 正常情况下最高温度随时间变化曲线

看出，在正常工作情况下，熔断器的最高温度随着熔断器最窄处宽度 d 的增加是逐渐降低的。

(2) 熔断器在故障情况下最高温度点温度随时间的变化曲线见图 8。从图中可以看出，随着时间的推移，温度升高的速率逐渐增大。因为在故障情况下，负载电流是线性增长的，而发热功率与负载电流的平方是成正比的，因此熔断器的发热功率将迅速升高；而相对于熔断器的散热功率来讲，由于整个瞬态过程持续时间较短，温度变化所波及的范围也较小，所以熔断器两端的温度并没有太大的变化，因此可以近似认为在故障情况下熔断器的散热功率是一个恒定的值。正是由于发热功率与散热功率之间的这种不平衡，将使得熔断器的温度迅速升高，并且温度升高的速率逐渐增大。另外，从图中还可看出，在

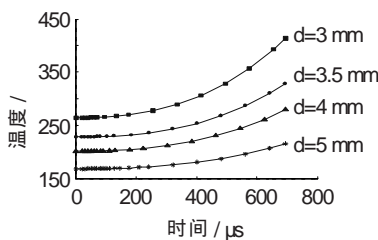


图8 故障情况下最高温度随时间变化曲线

故障情况下，熔断器最高温度随着宽度 d 的增加也是逐渐降低的。

(3) 不同情况下，熔断器的最高温度点温度随宽度 d 的变化曲线见图 9。

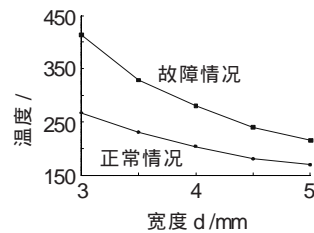


图9 最高温度随宽度 d 变化曲线

3 结语

利用有限元分析软件 ANSYS 建立了熔断器热电耦合温度场计算模型，并利用该软件对正常工作以及故障情况下的瞬态温度场变化过程进行了数值仿真。仿真中考虑了材料物理性能参数以及对流换热系数随温度的变化，仿真结果为熔断器的参数设计、制造以及改进提供了理论依据。由于目前该型熔断器尚处于设计阶段，没有相应的实验数据与仿真结果进行比较，因此，在以后的工作中还需要根据实验结果对仿真模型进行不断地修正和完善。另外在计算的过程中，由于计算机内存的限制，对实际模型做了一定程度地简化，并且有限元网格的划分还比较粗糙，在以后的工作中还需要进一步的改进。

参考文献:

- [1] 宋 勇, 艾宴清, 梁 波. 精通 ANSYS7.0 有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [3] 方昆凡. 工程材料手册 有色金属材料卷[M]. 北京: 北京出版社, 2002.
- [4] 陶文铨. 传热学基础[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

(上接第 437 页)

Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma [C]// 25th IEEE International Conference on Plasma Science, Raleigh, North Carolina: 1998.

- [4] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration Using Piezoelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma [J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(5): 2 117-2 126.
- [5] Enloe C L, McLaughlin T E, Vandyken R D, et al.

Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589-594.

- [6] Vandyken R D, McLaughlin T E, Enloe C L. Parametric Investigation of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator[R]. AIAA 2004: 846.
- [7] 张芝涛, 赵艳辉, 董克兵, 等. 介质阻挡放电系统中谐振问题的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 42-45.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!