

研究与试制

低压断路器脱扣性能的有限元仿真

杜凤山, 郭振宇, 李亮

(燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了得到准确的设计参数, 笔者采用有限元软件 ANSYS 电磁-热-结构耦合场分析方法, 对热双金属片的热弹性变形进行仿真, 通过建立有限元模型, 模拟脱扣器驱动部件在各种要求工况下的热-结构特性, 分别得到电流为: 100 A, 120 A, 150 A, 720 A 时, 热双金属片温度、位移随通电时间的瞬态关系, 避免了数值计算时热双金属片温度偏差引入的误差。

关键词: 电子技术; 热双金属; 断路器; 有限元; 仿真

中图分类号: TM561

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2004) 08-0030-03

FEM Simulation of the Interruption of Low Voltage Circuit Breaker

DU Feng-shan, GUO Zhen-yu, LI Liang

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to get the accurate parameters, electromagnetic-thermal-structure FEM was used to simulate the interruption characteristics of the thermal-bimetal in the breaker. The finite element model is built to simulate the driving part in all specified conditions. The thermal-bimetal's temperature and displacement is investigated under electric current 100 A, 120 A, 150 A, 720 A. The temperature error is avoided.

Key words: electronic technology; thermal-bimetal; circuit breaker; finite element; simulation

断路器具有过载、短路、接地、欠压等保护功能, 过电流脱扣器有 A 类与 B 类保护型。脱扣器的设计主要是根据断路器工作电流-脱扣时间关系, 选定驱动机构热双金属片材质、几何形状等参数。热磁式脱扣器的驱动部分为一间接受热的单支点直条形热双金属片, 当断路器工作电流超过约定不脱扣电流时, 铜合金焦耳热大于其向周围环境传递的热量时, 就通过热传导等方式向热双金属片传递热量, 热双金属片温度开始升高, 由于主动层与被动层热膨胀系数相差近 10 倍, 热双金属片将发生弯曲。当达到一定的弯曲变形时, 热双金属片自由端触头触动脱扣器, 脱扣断开电流。电流断开后热双金属片的温度降低, 弯曲减小, 又可以接通电流。

典型的脱扣器驱动部分几何模型采用 PR/E 建模, 如图 1 所示。热双金属片与铜电阻丝底部焊接为一体, 其主动层与被动层厚度相等, 双金属片受热的主要方式是从底部的热传导以及对流换热。由于热双金属片的工作温度较低, 一般低于 200℃, 所以对流传热系

数波动较小, 可认为是一常值, 在低于 200℃时, 忽略热辐射的影响。由于热双金属片工作过程涉及的因素较多, 故要精确建模计算比较复杂。采用有限元软件 ANSYS 电磁-热-结构耦合场分析方法对其进行仿真, 通过建立有限元模型模拟脱扣器驱动部件在各种要求工况下的热-结构特性, 总结出断路器脱扣器驱动部件的温度分布规律, 自由端部偏转位移规律, 以及温度、位移的瞬态变化过程。使得断路器脱扣器驱动部件的设计参数的选定精确。

1 数学模型的建立

驱动部件热双金属片为单支点直条形, 其热变形示意图如图 2 所示。



图1 驱动部分模型
Fig.1 The model of driving part

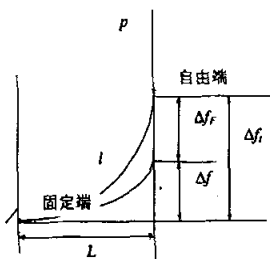


图2 热双金属片变形示意图
Fig.2 The sketch map of thermal-bimetal distortion

当断路器脱扣器上的热双金属片温度由 t_0 变化到 t 时，热双金属片将发生弯曲，热双金属片热弹性弯曲的基本特性量为：

热双金属片自由端由温度变化产生的位移量：

$$\Delta f = \frac{k(t-t_0)L^2}{\delta} \quad (1)$$

由温度变化产生的推力为：

$$P_t = \frac{K(t-t_0)b\delta^2 E}{4L} \quad (2)$$

最大的机械应力为：

$$\sigma = \frac{6pL}{b\delta^2} \quad (3)$$

式中： K 为比弯曲率/ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； t 为初始温度/ $^\circ\text{C}$ ； t_0 为终了温度/ $^\circ\text{C}$ ； E 为弹性模量/ MPa ； L 为热双金属片长/ mm ； b 为元件宽/ mm ； δ 为元件厚度/ mm ； p 为元件的负载/ N 。

对于某一型号的热双金属片，应用式(1)~(3)，可以计算出位移、推力、机械应力，提供设计参数。对于主动受热式的脱扣器驱动部件，由于其热双金属片的温度各处几乎相等，上式计算的结果较准确。但是对于被动受热式的脱扣器驱动部件，由于间接受热式的热双金属片上的温度分布是不均匀的，与铜电阻焊接的部位温度高、自由端温度低。所以，上面的公式只能提供近似值。热双金属片上的温度分布梯度愈大，计算结果偏差愈大。

2 有限元仿真

采用非线性有限元法对热双金属片的热弹性变形进行仿真，可以得到热双金属片的准确的稳态温度场、位移场分布，以及温度、位移随通电时间的瞬态关系。

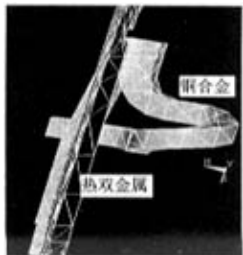


图3 有限元模型
Fig.3 The model of FEM

热双金属片的热弹性变形是一个非线性的电-热-结构场耦合问题，需要进行稳态、瞬态分析。选用能够用于电-热-结构场耦合求解的 Scalar Tet 98(solid 98) 单元进行计算。以某一采用热磁式脱扣器的断路器作为算例进行分析，脱扣器有

限元模型如图3所示。其性能指标如下：

断路器额定电流： $I_{cl} = 100 \text{ A}$

周围环境温度： $t = 30^\circ\text{C}$

断路器反时限断开特性如表1所示。

表1 断路器反时限断开特性
Tab.1 Characteristic of inverse time log disconnection

I/I_{cl}	约定时间(或脱扣时间 t_{op})	起始状态
1.0	$>2 \text{ h}$	冷态
1.2	$\leq 2 \text{ h}$	热态
1.5	$\leq 4 \text{ min}$	热态
7.2	$2 \text{ s} < t_{op} < 10 \text{ s}$	冷态

选用 5J1220 材料进行计算，其物性参数如表2所示。

表2 双金属片 5J1220 材料物性参数
Tab.2 Material parameter of 5J1220

热双金属片	比弯曲率 K $^\circ\text{C}^{-1}$	电阻率 ρ $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	弹性模量 E GPa	密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
5J1220	20.5×10^{-6}	110	115~145	7.7

根据断路器反时限断开特性，对其典型工况进行仿真。选定热双金属片的几何尺寸为：长 $L=53 \text{ mm}$ ，厚 $\delta=1 \text{ mm}$ ，自由端宽度 $b_1=6 \text{ mm}$ ，固定端宽 $b_2=7.2 \text{ mm}$ 。

3 结果分析

(1) 当电流 $I=100 \text{ A}$ 时，脱扣器驱动部分的温度、自由端偏转位移随时间的变化规律如图4、图5所示。

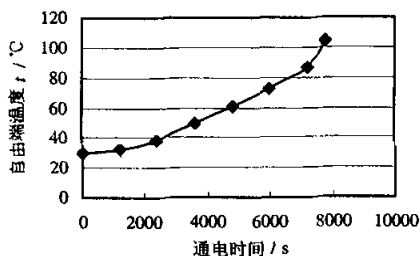


图4 自由端温度-时间关系曲线
Fig.4 The relation between freedom part temperature and time

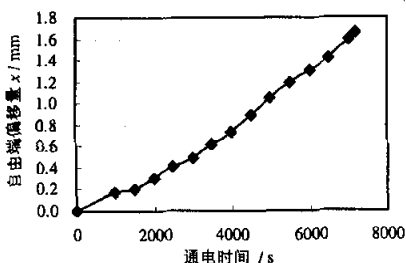


图5 自由端偏转位移-通电时间关系曲线
Fig.5 The relation between freedom part deflexion and time

从图4、5分析中，可得出以下结论：

当断路器工作电流 $I=100 \text{ A}$ 时，工作2 h以上，其稳态工作温度在 50°C 左右；热双金属片自由端的最大位移 $x_{\max}=1.7 \text{ mm}$ 。当自由端施加有脱扣阻力时，则 $x_{\max}<1.7 \text{ mm}$ 。

(2) 当电流 $I=120 \text{ A}$ 时，脱扣器驱动部分的温度、自由端偏转位移随时间的变化规律如图6、图7所示。

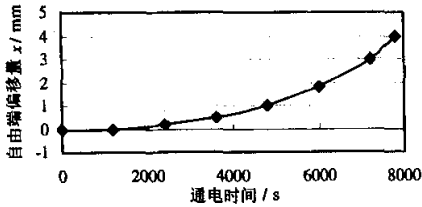


图6 自由端偏移量-时间关系曲线

Fig.6 The relation between freedom part deflexion and time

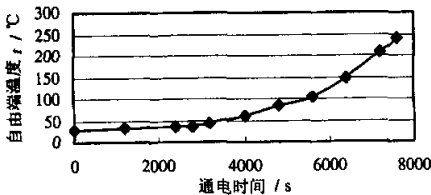


图7 自由端温度-通电时间关系曲线

Fig.7 The relation between freedom part temperature and time

从图6、7分析中,可得出以下结论:由于本断路器所选用的热双金属片 5J1220 的线性温度范围为: $-20\sim 150^{\circ}\text{C}$, 允许使用温度范围为: $-20\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。在电流 $I=120\text{ A}$ 时,构建尚未达到稳定前,热双金属片的温度已经超过了允许使用温度范围。所以,在达到稳定之前,断路器壁必须发生热脱扣,断开电路,起到保护作用。根据表1的性能参数要求,根据图4~图7的仿真结果,可以确定热双金属片偏移量 $x=3.0\text{ mm}$ 时脱扣。

(3)工作电流 $I=150\text{ A}$ 时,脱扣器驱动部分的温度、自由端偏转位移随时间的变化规律如图8、图9所示。

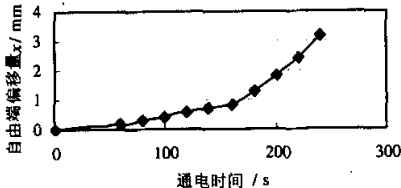


图8 自由端偏移量-时间关系曲线

Fig.8 The relation between freedom part deflexion and time

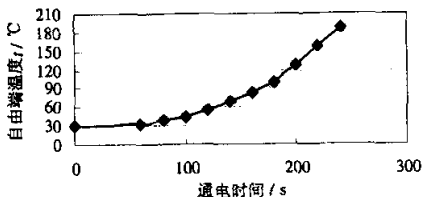


图9 自由端温度-时间关系曲线

Fig.9 The relation between freedom part temperature and time

从图8、图9可以看出:当热双金属片的脱扣位移设为 $x=3.0\text{ mm}$ 及电流 $I=150\text{ A}$ 时,在尚未达到稳定前,脱扣器将发生脱扣,断路,起到保护作用。脱扣前持续工作时间 $\leq 4\text{ min}$ 。

(4)当工作电流 $I=720\text{ A}$ 时,双金属片温度、自由端偏转位移随时间的变化规律通过有限元分析可知:当工作电流为 720 A 时,热双金属片在 10 s 时,自由端偏移 $x=0.5\text{ mm} \ll 3\text{ mm}$,温度 $t=60^{\circ}\text{C}$,故不可能发生热脱扣,此时是由于电磁作用产生磁力脱扣,属于冷态脱扣。

4 结论

(1)通过对断路器脱扣器的电磁-热-结构的有限元仿真,得到了断路器脱扣器驱动部件单支点直条形热双金属片的温度分布规律,自由端偏移量分布规律,以及温度、位移的瞬态变化过程。

(2)通过对照国标对断路器的反时限断开特性,结合有限元模拟的结果,就可选择热双金属片的几何参数,进而确定驱动部件的脱扣偏移量,为断路器的设计提供了精确的虚拟结果,也为进一步的设计提供指导。

(3)应用电磁-热-结构耦合场分析方法,可以确定热脱扣的稳态、瞬态过程,也可以虚拟电磁脱扣的问题。对于被动受热式的热双金属片温度在各处的值差别较大,有限元分析避免了数值计算时热双金属片温度偏差所引入的误差。实验表明,仿真结果与实测值相符。

(4)有限元仿真还可模拟断路器的各种设定的极限工作状态。通过以上的的工作,为进一步的优化断路器的设计提供了精确的数据。

参考文献:

- [1] 《电工材料应用手册》编委会. 电工材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 陈旭, 陈德贵. 低压断路器开断特性的仿真研究 [J]. 电工技术学报, 2001, 16(5): 46-50.
- [3] 连理枝. 过电流脱扣器用双金属元件的选择和设计 [J]. 电器开关, 2000, 16(5): 20-24.
- [4] 文会军. 双金属片热后屈曲特性分析 [J]. 机械科学与工程, 1998, 17(2): 197-199.

(编辑: 朱盈权)

招 聘 启 事

《电子元件与材料》编辑部特聘网站主管一名。要求如下:

- ◆ 电子元件和电子材料专业, 专科以上学历;
- ◆ 熟悉网站操作及管理;
- ◆ 踏实、敬业、善沟通, 30~45岁。有经验者优先, 待遇面议。

请将本人简历、学历、身份证、职称及英语水平等证书复印件、联系电话等有关资料寄本部。

本部地址: 成都市一环东路二段8号702室(610051) 电话: 028-84391569

EC&M编辑部