

[断路器]

1 800 V 直流断路器温升仿真与试验

文/ 平高集团有限公司 朱奇葵 郭忠贺

对 1 800 V 直流断路器导电主回路温升影响因素进行分析, 确定接触电阻和散热是影响温升的主要因素, 并对接触电阻和散热进行计算分析。通过建立三维仿真模型开展温升计算, 计算结果和制造样机温升试验数据对比, 验证仿真计算的正确性, 为开关电器导电回路温升设计提供计算依据。

直流断路器作为地铁供电系统的核心设备, 目前主要依靠进口, 国产化率极低。公司研制的 1 800 V 直流断路器, 掌握了核心技术, 打破了国外技术垄断, 能够有力支撑国内轨道交通直流牵引供电设备国产化。

1 800 V 直流断路器不断向小型化发展, 以适应狭小空间的安装, 节约经济成本。在额定电流大, 小型化要求的前提下, 温升设计是其中的一个难点问题。本文对直流断路器的导电回路触头部分以及散热装置, 通过仿真计算与试验相结合的方法设计, 基于已有的断路器温升试验数据进行热计算参数的校核, 利用校核的参数计算断路器温升, 保证了计算的准确度。

温升仿真

1. 主要技术参数

根据目前国内轨道交通用直流配电系统的要求, 本文所涉及的直流断路器的主要技术参数见表 1。

表 1 1 800 V 直流断路器技术参数表

序号	名称	数值
1	额定电压/V	1 800
2	额定电流/A	4 000
5	额定短路分断电流/kA	80

2. 数学模型

合理的热分析方法才能保证产品设计的合理性, 正确指导产品研发和设计质量。直流断路器的发热过程涉

及多个物理场的耦合, 是一个比较复杂的过程, 对其发热过程进行分析的方法在不断改进。工程设计上常采用牛顿热计算公式法、等效热路法和数值分析法等对开关电器进行热分析。

牛顿热计算公式法计算误差大, 只能进行简单的估算, 无法得到场域的温度分布情况, 无法判断过热点的位置。等效热路法对结构复杂的产品的热场、等效热路难以精确做出, 所以目前该方法还无法获得很高的计算精度。数值分析法能够全面精确计算有关电器工作时其内部的温度场分布情况、过热点的位置及温度。进行数值计算是将求解域内在时空坐标下连续的温度场分布函数进行离散, 成为该域内多个离散点上的自由度的集合。再求解按一定方式建立起来的代数方程组, 得到各个离散点的温度值。采用目前成熟计算软件计算, 计算流程如图 1 所示。

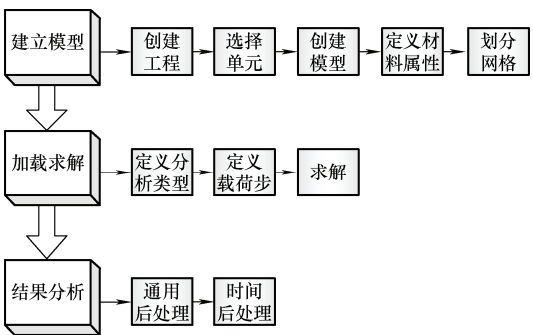


图 1 热分析流程图

3. 温升关键影响因素

影响断路器主回路温升的两个因素是接触电阻和散热系数。动静触头接触采用线接触结构，静触点的接触面为平面，动触点的接触面为半径很大的弧面。触点压力对接触电阻经验计算式为

$$R = \frac{K}{(0.102 \times F)^m} \quad (1)$$

式中， R 是接触电阻阻值， Ω ； F 是触头压力，N； m 是接触形式参数，面接触 $m=1$ ，线接触 $m=0.7$ ，点接触 $m=0.5$ ； K 是与接触材料的电阻率和硬度相关的参数， $\Omega \cdot N^m$ ，银 $K=0.06 \times 10^{-3}$ 。

热量交换规律有三种基本方式，热传导、热对流和热辐射。综合分析，直流断路器最高温升不超过 100 K，热传导和热对流对散热起主要作用，散热采用综合散热系数 α 描述散热总体强度。在实际计算中，常采用牛顿散热公式

$$\Phi = \alpha A (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中， Φ 是总散热功率，W； α 是综合散热系数， $W/m^2 \cdot K$ ； T_1 、 T_2 分别为高温物体表面温度和低温环境温度，K； A 是有效散热面积， m^2 。

4. 仿真模型

本文利用导电桥模型模拟动静触点间的接触电阻，直流断路器电接触形式为弧面与平面的线接触。为方便仿真计算，在保证计算准确度的前提下，将原本球体与平面的接触形式替换为平面间通过导电圆柱接触的模式。导电回路模型如图 2 所示。

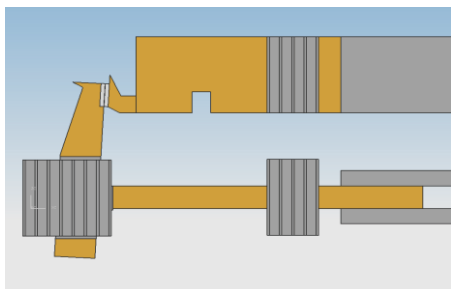


图2 导电回路模型

直流断路器的稳态发热是热场和电场的耦合问题。要分析断路器的稳态温升，需要先计算主电路各个导电部件的电流密度分布，进而计算焦耳热分布，最终得到

温度场的分布。

在计算时，作如下基本假设：

- 1) 直流断路器处于无限大空间。
- 2) 由于结构对称，认为对称面绝热。
- 3) 导电回路中各个材料各向同性。
- 4) 导体表面的对流散热方式为自然对流散热。
- 5) 环境温度恒定。

5. 仿真计算

本文选择进线端、上母排、静触头、动触头、软连接、下母排和出线端等点作为测温点。仿真计算结果如图 3 所示，从图 3 中可以看出，动静触头的温升最高，达到了 80 °C，其次是与动静触头相接的动静触头座，温升范围为 45~80 °C，软连接的温升在 38~45 °C 之间，上母排的温升在 38~66 °C 之间，下母排的温升为 25~38 °C，上进线端温升为 38 °C，下进线端温升为 24 °C。可以明确看出回路的主要热源是接触电阻，温升以触头为最高点向外逐步降低。仿真结果显示触头的温升最高达到了 80 °C，满足直流断路器温升不超过 100 °C 的要求。导电回路温度分布图如图 3 所示。

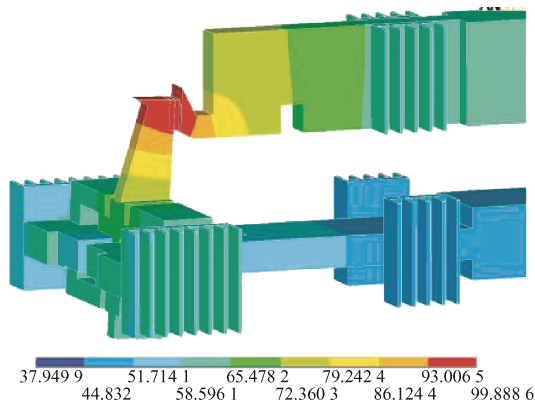


图3 导电回路温度分布图

温升试验

温升试验额定电流为直流 4 000 A，在实验室中，通过大电流发生器输出交流电流，再通过大功率三相整流器整流得到直流电。对断路器测温点的温升测量，采用热电偶配合无纸记录仪的方式：将热电偶通过热电偶胶水粘贴在各个测温点上，利用无纸记录仪实时记录各个测温点温度的变化，测量频率为 2 s 采样一次，如图 4 所示。在实验中，对温升稳定的判定标准为 1 h 内，温

升变化不超过 1℃。试验测得各个测温点的稳定温升如图 5 所示。



图 4 温升试验

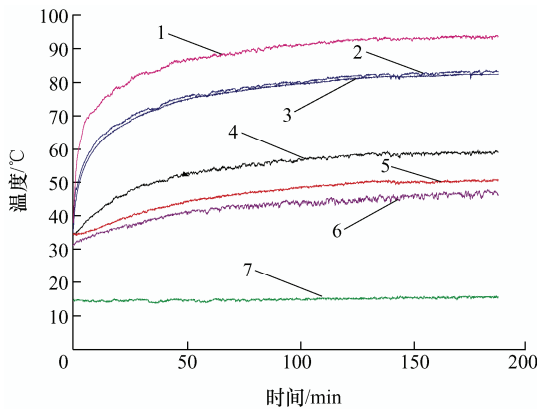


图 5 试验测试温升曲线

1—触点面 2—动触头座 3—静触头座 4—软连接
5—上进线端 6—下进线端 7—环境温度

从图 5 中可以看出，各测温点温度在通电后均开始上升，但是由于各点发热功率不同，散热功率也不同，所以温升上升速度不同，其中以触头接触面上升速度最快。在通电后 180 min，认定温升达到稳定值。结果显示，触头接触面的温升最高，动静触头座的温升次之，两者基本一致。

试验数据与计算数据对比见表 2，仿真与试验结果基本吻合，最高温度区域仿真计算准确度达 97.5%，试验结果说明本文对直流断路器的热分析是正确的，具有指导意义的。

表 2 温升仿真与试验数据 (单位:℃)

项目	触头	动触头座	静触头座	软连接	上进线端	下进线端
仿真	80	73	73	45	38	24
试验	78	70	71	50	34	30

结束语

通过对直流断路器温升影响因素的发热和散热因素分析和计算方法研究，进行了断路器温升仿真计算。根据仿真计算指导结构设计，制造样机通过试验验证，仿真计算准确度 97.5%，验证了仿真计算的正确性，为开展开关电器温升设计提供了理论依据和参考。EA

(收稿日期: 2021.03.04)

(上接第 38 页)

2) 净化中心或移动式净化车每年可净化提纯 SF₆ 气体 50 t 以上，年经济效益为
年节约气体购置费=气体售价×年净化处理气体量=
4×50=200 (万元)

2. 环境效益

SF₆ 气体对环境的影响主要有两方面：一是温室效应，SF₆ 气体的温室效应是 CO₂ 的 23 900 倍左右，是禁止向大气排放的六种温室气体之一；二是分解物毒性，部分分解产物有毒、有腐蚀性，对电气设备有腐蚀作用，对操作人员有人身危害，可能会导致设备或者人身伤害事故。

SF₆ 气体的循环利用技术的应用，极大地提高了 SF₆

气体的资源再利用率，减排了大量温室效应气体，同时对放电 SF₆ 气体分解产物进行吸附、中和，避免有毒有害气体的排放，对保护环境，维持生态平衡具有重要意义。

结束语

1) SF₆ 气体循环利用技术已经比较成熟，且已经在 SF₆ 气体绝缘开关的生产制造、现场安装和运维检修等不同阶段得到应用。

2) SF₆ 气体循环利用技术的推广应用，可以产生巨大的经济效益和环境效益，节约成本的同时保护了生态环境。EA

(收稿日期: 2020.11.03)