

[MCB]

MCB电气间隙和爬电距离的理论分析与设计运用

文/浙江天正电气股份有限公司 李子琦
温州艾科电器科技有限公司 张森林

电气间隙和爬电距离是电器学理论中至关重要的两个概念，也是电器产品安全测试时的最基本项目，深入领会掌握这两个理论基础对于电器产品的研发设计具有积极作用。从电气间隙和爬电距离的定义入手，结合实例讲解，分析两个概念之间的异同和进行具体测试时的注意事项、影响因素。最后结合自己的设计经验探讨理论分析对于设计运用的重要意义。

随着科学和生活的快速发展，特别是电力系统的不断完善，各种形式的电器产品越来越多，实际生活中发生过多起因电器产品电气间隙和爬电距离不合理引发的设备故障和电击事故。因此，安全性设计是电器产品整个设计过程中一个重要的环节，其中爬电距离和电气间隙是安全性设计的主要内容。作为一种终端保护电器，MCB的安全性设计尤其对使用者的人身安全影响最大。

电气间隙和爬电距离的定义

电气间隙是指两个导电零部件在空气中的最短距离，它防范的是跨接于绝缘体上的瞬态过电压或重复峰值电压可能造成的瞬态击穿。

爬电距离是指两个导电零部件沿绝缘材料表面的最短距离，考核的是绝缘在给定的工作电压和污染等级下的耐受起痕能力。

从定义可以看出，两者的区别在于沿介质的不同，电气间隙是沿着空气，爬电距离是沿绝缘体表面；这两个概念之间也有一定的联系，在遇到拐角、凹槽时，空气中距离一定小于等于沿绝缘体表面路径，也就是说爬电距离不能小于相关的电气间隙，这种关系可以用来判断测量值的正确性。

影响电气间隙和爬电距离的因素

1. 与电气间隙有关的因素

电气间隙除了与绝缘类型（基本绝缘、双重绝缘和加强绝缘3种）有关外，还与电场条件、污染等级、过电压类别、冲击耐受电压和海拔因素等有关。

(1) 电场条件

电场通常分为均匀电场和非均匀电场，均匀电场仅在理论上存在，用于理论计算和模型简化时使用，实际中只存在非均匀电场。导电部件的外形设计与结构布局会对电场的均匀性产生较大的影响，进而影响到电气间隙。

(2) 污染等级

污染等级是指用数字表示微观环境的污染程度，等级越高污染程度越大，一般包括非导电性污染、短暂的导电性污染以及持久的导电性污染等。污染是由外来物质，包括固体、液体和气体组成，其结果是桥接小的电气间隙，降低绝缘材料表面电阻，使产品承受不了可能出现的最大瞬态过电压。污染等级会影响电气间隙测量的准确性（如表1所示）。

(3) 过电压类别（也称安装类别）

过电压是指峰值超过正常情况下最大稳态电

表1 污染等级分类

污染等级	等级含义
1	无污染或仅有干燥的非导电性污染
2	仅有非导电性污染，需考虑偶然因凝露而造成短暂的导电性
3	有导电性污染或由于预期的凝露，使干燥的非导电性污染变为导电性污染
4	造成持久的导电性污染，如因导电尘埃或雨雪造成的污染

压的任何电压。过电压类别分为4类，代表4个级别。在进行电器产品的电气间隙测量时首先要对其过电压类别进行归类，过电压类别不同同样会影响到测量的结果（如表2所示）。

表2 电器的过电压类别

安装类别	类别含义
I	信号级水平，在系统末端的特殊设备、部件中，遥控、效功率信号电路中，或抵押逻辑系统等
II	负载级水平，如电动机的控制、通断电器，照明、电加热，主令、控制电路电器等
III	配电级水平，如直接接至配电干线的电器、配电箱中的电器
IV	电源级水平，如安装在电源进线处的电器

(4) 冲击耐受电压

冲击耐受电压，是指在规定条件下不会使绝缘击穿的、规定了波形与极性的脉冲电压最大峰值。那么如何确定冲击耐受电压呢？GB/T 16935.1—2008中指出，只要知道电器产品的过电压类别，再根据供电电源等级，就可以确定冲击耐受电压值。详见GB/T 16935.1—2008中表F.1。

2. 与爬电距离有关的因素

爬电距离主要与额定绝缘电压、污染等级和材料组别等密切相关，确定允许的爬电距离需要结合这些概念的参数。

(1) 电压

爬电距离以作用在跨接爬电距离两端的长期电压有效值为基础。该电压为实际工作电压、额定绝缘电压或电源系统额定电压。

(2) 污染等级

污染等级（如表1所示）不但影响电气间隙的测量，同样对爬电距离也有决定性影响。详见GB/T 16935.1—2008中表F.4。

(3) 材料组别

绝缘材料因污染、泄漏电流和闪烁放电的综合作用，其表面受到损伤，并逐步形成导电通

道，即所谓的“漏电起痕”。通常根据电痕化指数值的不同把绝缘材料划分为4组（如表3所示），不同性能的绝缘体对爬电距离的影响程度也不同。

表3 绝缘材料的材料组别

材料组别	相比电痕化指数CTI
I	CTI ≥ 600
II	600 > CTI ≥ 400
III a	400 > CTI ≥ 175
III b	175 > CTI ≥ 100

电气间隙和爬电距离的测量

MCB一般适用于污染等级为2的环境类别中，为提高爬电距离，通常会在可能形成导电通路的绝缘体表面设置横向的“筋”或“槽”，用来阻断连续性的漏电路径。

根据国标GB 10963.1—2005，在确定电气间隙和爬电距离时，如果电气间隙和爬电距离受到一个或几个金属部件的影响，则各部分的总和至少应为规定的最小值；当几个单独部分的长度小于1 mm时，在计算电气间隙和爬电距离的总长度长时，不应计算这些部分的长度。

在确定爬电距离时，有如下几种情况。

1) 槽的宽度和深度均大于等于1 mm时，应沿着槽的轮廓线测量。

2) 槽的任何尺寸小于上述尺寸时，应忽略不计。

3) 筋高度大于等于1 mm时，如果筋和绝缘材料部件是一体的（例如，用模压、焊接或胶合方式制成的），则沿着筋的轮廓线测量；如果筋和绝缘材料部件不是一体的，则沿着筋的连接线或剖面的两条轮廓线中较短的路径测量。

以图1～图6为例，进行讲解。

图1所测量的路径包含一条任意深度、宽度小于 X （ X 取1，下同），槽壁平行或收敛的沟槽。电气间隙 $d_i = AB + BC + CD$ 和爬电距离 $d_r = AB + BC + CD$ 。

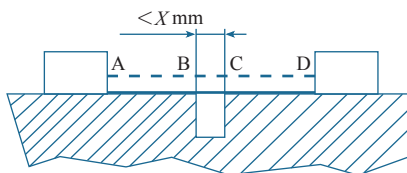


图 1

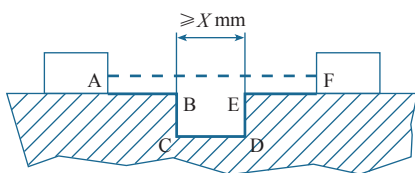


图 2

图2中, 电气间隙 $d_1 = AB + BE + EF$, 爬电距离 $d_r = AB + BC + CD + DE + EF$ 。

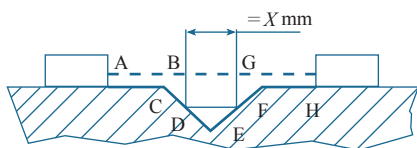


图 3

图3中, 电气间隙 $d_1 = AB + BG + GH$, 爬电距离 $d_r = AC + CD + DE + EF + FH$ (其中 $DE = 1 \text{ mm}$)。

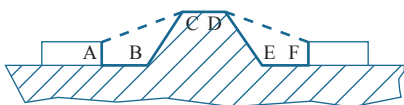


图 4

图4中, 电气间隙 $d_1 = AC + CD + DF$, 爬电距离 $d_r = AB + BC + CD + DE + EF$ 。

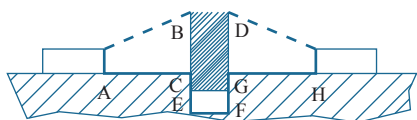


图 5

图5中, 电气间隙 $d_1 = AB + BD + DH$, 爬电距离 $d_r = AC + CE + EF + FG + GH$ 。

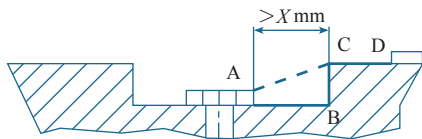


图 6

图6中, 电气间隙 $d_1 = AC + CD$, 爬电距离 $d_r = AB + BC + CD$ 。

电气间隙和爬电距离设计改进

图7为一款以L7机构为平台开发的一款MCB产品, 介电性能和隔离能力试验时在6 kV的冲击耐受电压下, 断开的触头之间发生击穿放电。

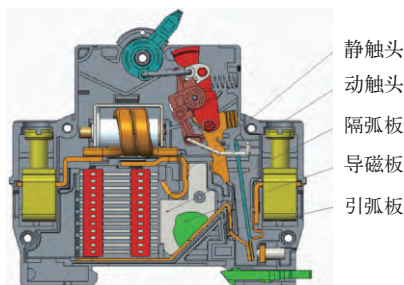


图 7

1. 击穿放电原因分析

分析测试产品导电部分电气间隙和爬电距离, 造成击穿原因是导磁板和静触头, 以及导磁板和引弧板之间爬电距离偏小。导磁板和引弧板的A处和B处两面近似对齐 (如图8所示), 引弧板和静触头之间爬电距离 $d = d_1 + d_2 = 2 + 1.2 = 3.2 \text{ mm}$ (d_1 为导磁板和静触头之间爬电距离, d_2 为导磁板和引弧板之间爬电距离, 如图9所示)。

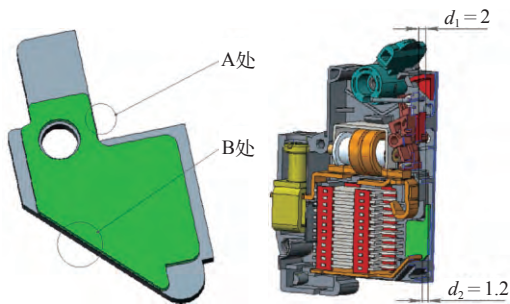


图 8

图 9

2. 改进方案

调整隔弧壁外形尺寸, 使隔弧壁对导磁板的“包裹性”更好 (如图10、图11所示), 此时爬电距离 $d = (d_1 + 1.1 + 1) + (d_2 + 1.1 + 1) = 7.6 \text{ mm}$ (1.1为“筋”的宽度, 1为“筋”的高度)。

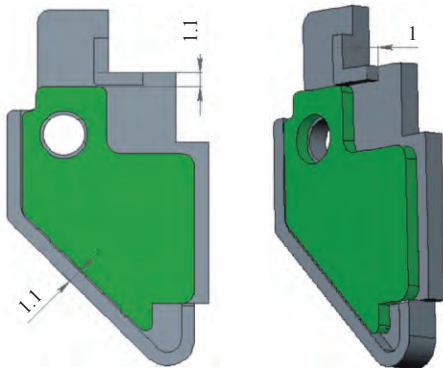


图 10

图 11

对改进方案进行试验验证, 6 kV冲击耐受电压下, 介电性能和隔离能力合格。

(下转第102页)

工序, 举例如图3、图4和图5所示。

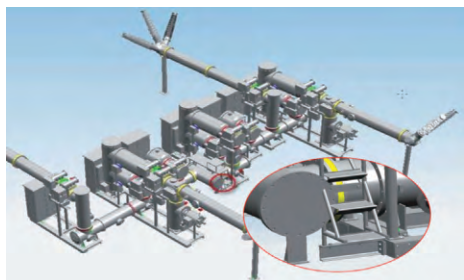
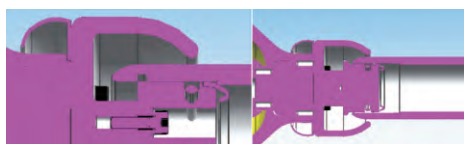


图3 平台结构干涉



(a) 导体长度错误 (b) 导体长度正确
图4 导体干涉

结束语

随着三维虚拟仿真技术的功能日益强大和广泛深入应用, 可有利于设计人员提高设计质量

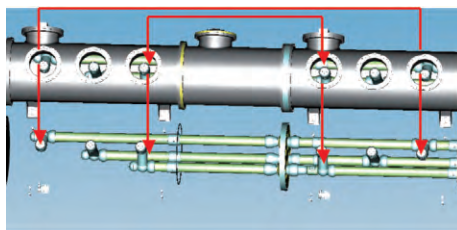


图5 母线换相序核查

和业务素质, 降低设计差错率, 提高产品设计质量; 实现企业内部多专业多部门协同设计, 数据库共享, 如装配工艺立体化作业指导文件, 零件三维模型下传专业加工车间, 自动生成数控机床加工程序。目前我国电力系统中有部分设计院引进了三维设计软件, 必须及时跟上实现与用户的良好沟通; 工程三维虚拟仿真设计可更好、更直观地令用户预先体验到项目落成后的效果, 为销售竞标提供有效支撑, 并有效提升企业品牌形象。EA

(收稿日期: 2017.07.12)

(编辑: 刘群焱)

(上接第98页)

MCB电气间隙和爬电距离设计时注意事项

表 4

污染等级	槽宽度的最小值/mm
1	0.25
2	1.0
3	1.5
4	2.5

1) 正确运用筋和槽的设计。由于筋受污染物的影响小, 并且筋的干透效果较好, 筋可以大大地减少泄漏电流的形成。通常情况下, 筋的最小高度为2 mm时, 爬电距离可以减少至规定值的0.8倍; 如果使用槽, 槽的宽度 X 基本上由污染等级决定(表4, MCB适用的环境污染等级一般为2, X 取1)。此外, X 值选择的附加规则是, 如果有关的电气间隙小于3 mm, 尺寸 X 的最小值可以减小至该电气间隙的三分之一。

2) 隔板的运用条件。图5中, 隔板与绝缘件之间未黏合。直观上电气间隙为“虚线”的距离, 由于接缝间未黏合, 爬电距离为通过隔板底部“粗实线”的距离。这种方式对槽宽尺寸没有要求, 可以增加爬电距离, 但在长期使用中可能会造成污染累积或积水, 实际运用中应慎用, 尽

量避免导电部件间插入槽和接缝。

结束语

低压断路器的发展趋势是小型化、智能化。随着产品体积的缩小, 电气间隙和爬电距离设计必然会有更大难度, 技术人员必须花更多心思在产品结构的优化布局上, 以保证产品安全性设计符合标准。在电气间隙和爬电距离的分析计算时, 应结合外部的使用环境、安装方式, 除了要考虑产品结构内部爬电路径, 还要涉及到极与极的导电部件之间、导电部件与安装导轨之间等。使用高性能工程塑料是提高爬电距离的一种重要途径, 合理设计“筋”和“槽”的形状尺寸也是一种较为经济有效的方式。同时, 在对设计方案进行试验验证时, 应留有一定的设计余量, 产品在使用寿命范围内, 塑料件不断老化变形, 金属件的逐渐锈蚀和金属带电离子的扩散等都会造成爬电距离减小。文中提到的改进方案对断路器设计人员有一定的借鉴意义, 设计人员只有熟练掌握电气间隙和爬电距离等相关理论和实际运用经验, 才能提升产品设计和制造水平。EA

(收稿日期: 2017.07.12)

(编辑: 刘群焱)