

触头间电动斥力的三维有限元分析

李兴文, 陈德桂, 刘洪武, 李志鹏, 向洪岗

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

3-D Finite Element Analysis of Electro-dynamic Repulsion Forces Acting on Contacts

LI Xing-wen, CHEN De-gui, LIU Hong-wu, LI Zhi-peng, XIANG Hong-gang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 触头间电动斥力的大小对于开关电器的设计是很重要的。基于电流-磁场-电动斥力之间关系的方程,应用三维有限元分析,引入圆柱导电桥模型作为接触点模拟触头间的电流收缩,从而计算出作用在触头上的电动斥力。结果表明,电动斥力与导电斑点情况和触头形状有很大关系,同时,利用这种方法计算电动斥力是有效的。

关键词: 电流收缩; 有限元分析; 电动斥力

中图分类号: TM561 **文献标识码:** A

Abstract: For the optimization design of electric apparatus, it is necessary and important to calculate the electro-dynamic repulsion force acting on the movable contact. With 3-D finite element analysis, according to the equations among current-magnetic field-repulsion force, the contact bridge model is introduced to simulate the current distribution between contacts, so the repulsion force can be calculated. It demonstrates that the number and the distribution of contact bridges, together with the shape of contact have remarkable effect on the repulsion force. Furthermore, the proposed method is effective to calculate the repulsion force.

Key words: current distribution; finite element analysis; repulsion force

1 引言

当电流流过触头,由于电流线在接触面附近发生收缩,因而在触头间会产生电动斥力,即 Holm 力。这是一种电流自身磁场作用下的电动力,对开关的电动稳定性有重要影响。因而作为电接触研究领域的一个问题,力的计算对于设计开关电器具有重要的意义。一般来说,它与电流瞬时数值 i ,触头间的预压力 F_k ,触头材料的布氏硬度 H ,触头形状及表面的导电斑点分布情况等有关,可以用式(1)所示的 Holm 公式来描述。其中: r 为导电斑点的半径, R 为触头的等效半径, ξ 用来表征触头的表面接触情况,其取值范围为 0.3~0.6,一般取 0.45^[1]。

$$F_H = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{R}{r}\right); r = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \cdot \xi \cdot H}} \quad (1)$$

对于 Holm 公式的一般工程应用来说,假定接触面中心只有一个导电斑点,或者认为全部的导电斑点集中在中心形成一个大的导电斑点。针对圆形,不同长宽比的矩形触头,采用三维有限元分析的方法,考虑不同数目的导电斑点及其分布情况下,对触头间的电动斥力进行了定量的计算。与 Holm 公式的计算结果进行了分析比较,为采用较为简单的计算方法得到更为有效的结果提供理论上的依据。

2 计算方法及模型

2.1 计算方法

应用三维有限元计算软件 ANSYS^[2]分 3 步对触头间的电动斥力进行了静态计算,具体流程见图 1。首先根据给定的触头形状尺寸和导电斑点情况进行三维电流密度分布仿真,此时仅需对导电部分进行剖分;接着,对同一个模型,将电流线分布当作激励,对整个模型区域进行剖分,计算其产生的三维磁场;最后,根据式(2)计算出电动斥力,即垂直于接触表面方向上的分力。

$$F_L = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV = \int_V f dV \quad (2)$$

其中: \mathbf{J} 为每个单元的电流体密度, \mathbf{B} 为单元磁感应

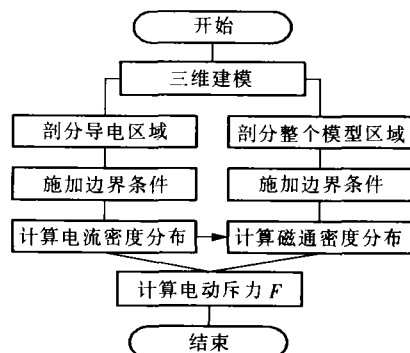


图1 计算流程

强度, f 为力密度, dV 为单元体积。这样通过对触头区域做体积积分就可以得到触头间的电动斥力。

2.2 计算模型

图 2 为单点接触模型。图中圆形和矩形等面积, 也就是说 $\pi R^2 = WH$, 导电桥可为圆柱体和长方体两种等截面面积、等长度模型, 分析两种模型对于计算结果的影响。对于矩形触头, 可以改变 W, H , 导电桥的数目、位置、半径 r 和长度 d (触头间距) 来研究对电动斥力的影响。

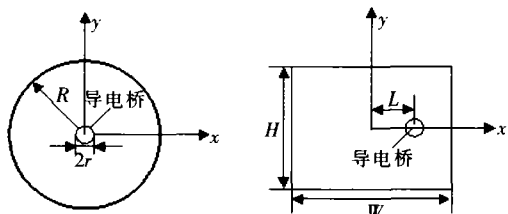


图 2 单点接触模型

由于开关操作引起触头的烧蚀, 导电桥往往不是 1 个而是几个。图 3 所示为矩形触头截面时 2 个和 3 个导电桥的计算模型, 可以认为导电桥面积之和相等。而且对于 2 个导电桥时的情况, 假设对称于 y 轴分布; 3 个导电桥时, 假设以矩形中心点为中心呈正三角形分布。

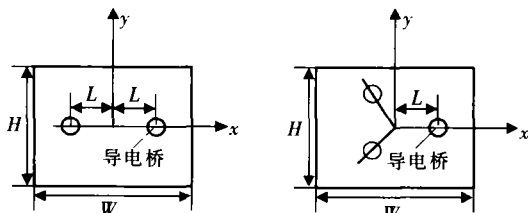


图 3 多点接触模型

3 结果及分析

3.1 计算结果及对比

图 4 为圆形和长方形触头单个触点的剖分图。触点为圆柱形且均在中心。由于模型具有对称性, 因而在分析时均采用一半方式进行。

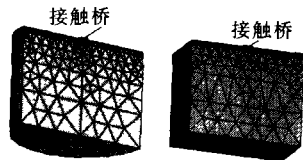


图 4 模型剖分图

表 1 所示为计算的基本条件, 其中触头截面半径是针对圆柱体触头, 长、宽是针对长方体触头而言, 而且圆柱体和长方体导电桥的截面积和长度均相等。下面的计算均是在这个基础上改变其中的一个参数进行的。

对等截面方体和圆柱触头情况下, 并为圆柱体

表 1 计算基本条件

电流/kA	触头截面半径/mm	触头截面长、宽/mm	导电桥半径/mm	导电桥长度/mm	导电桥数目
10	6.77	12	0.5	0.125	1

导电桥时, 电动斥力的计算结果分别为 22.9 N 和 22.8 N; 而正方体触头, 导电桥的形状为长方体时电动斥力为 23.8 N。应用式(1), 求得电动斥力为 26.1 N。可以看出, 有限元计算和 Holm 公式的结果比较吻合, 也表明, 等面积的正方形和圆截面对于 Holm 力来说是等效的。同时 Holm 力仅与导电斑点面积有关, 与其形状无关。

图 5 所示为长方体触头改变电流大小时的计算结果。可以看出, 两种计算方法的结果比较相近。

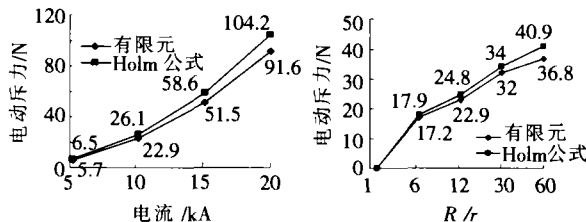


图 5 不同电流的计算结果

可以在一定的合理范围内改变导电桥的长度, 研究其对电动斥力的影响。针对长方体触头, 表 2 为计算结果。可以看出, 导电桥长度在 0.1~0.25 mm 范围内变化时, 触头间的电动斥力变化很小, 可以认为没有影响。

表 2 导电桥长度与力的关系

长度/mm	0.100	0.125	0.150	0.200	0.250
电动斥力/N	22.8	22.9	23.0	23.4	23.3

由式(1)可以看出, 触头预压力、材料和表面情况会对导电桥半径产生影响, 进而影响电动斥力。图 6 为两种方法的计算结果, 其中横坐标中 R 为与长方形等面积的圆的半径; r 为导电斑点半径。

从以上的分析计算可以看出, 在 Holm 公式适用的条件下, 有限元方法和 Holm 公式的计算结果比较吻合。

3.2 导电桥和截面参数影响

在正方形截面情况下改变 L 的数值, 得到如表 3 所示的结果。可以看出, 对于单点接触, 电动斥力随着 L 的增大而增大, 在 $L/W < 0.7$ 时, 力的数值变化不大。但是在 $L/W > 0.7$ 时, 力增大较为明显。

表 3 L 对电动斥力的影响

L/W	0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9
电动斥力/N	22.8	23.0	23.2	23.3	23.4	24.0	25.2

对于长方体触头, 等面积不同的截面 W/H 对于电动斥力也有较大的影响。表 4 给出了 3 种不同比例时的电动斥力数值。可以看出, 增大 W/H 可以提高电动斥力的数值。

以上均是对单个接触点情况进行分析, 事实上,

表 4 W/H 对力的影响

W/H	电动斥力/N
1	22.9
2	23.2
4	24.2

表 5 导电桥数目对力的影响

导电桥数目	电动斥力/N
1	22.9
2	14.8
3	12.2

线接触或面接触在实际中大量存在。因而对2个和3个接触点的情况也进行了计算,结果见表5。可以明显地看到,随着接触点的增加,电动斥力急剧减小。

4 应用

通过对有限元和 Holm 公式计算结果的对比可以看出,导电桥的位置和数目对于触头间的电动斥力有较大的影响。在只有一个导电桥的情况下,可以得到触头间电动斥力的最大值。

对于永磁机构操作的真空断路器来说,和弹簧操动机构不同,没有机械锁扣,由于电动斥力的存在,在关合过程中要保证触头不被斥开,甚至熔焊,并满足其动热稳定性的要求,就需要对触头弹簧以及永磁机构的合闸保持力进行很好的设计。真空断路器多为圆柱触头,可以采用上述的方法和模型对电动斥力进行计算。此外,对于依靠电动斥力作用使触头快速分开,从而限流开断的低压断路器来说,计算电动斥力不仅要考虑其动热稳定性,更重要的是要提高其限流开断性能。

下面对一复杂电器的触头导电回路的电动斥力进行分析,一半模型剖分见图7,其中存在非线性铁磁栅片,动导电杆为转动式且转轴位于O处。现用两种方法对作用在动触头上的等效电动斥力进行计算,分别为引入图中所示的导电桥模型和利用 Holm 公式考虑并计算触头间的电动斥力,称其为触头力;作用在动导电杆上的电动斥力均用三维有限元非线性分析进行,并将其等效归算到动触头上,称其为回路力。计算结果见表6。可以看出,两种算法对于作用在动导电杆上的电动斥力影响很小;总的电动斥力差别不大,相对误差在10%以内。然而,就计算的复杂程度来说,利用 Holm 公式计算触头间的电动斥力可以简化建模及剖分,从而大大缩短计算时间,降低了计算的复杂性。另一方面,引入导电桥模型考虑触头间的电流收缩,虽然计算过程比较复杂,但是在计算出比较准确的电动斥力数值的同时,还可以仿真出电流和磁场的比较实际的分布情况。此外,从

表中也可以看出,触头力的差异随着电流值的增大而增大,也即利用 Holm 公式和导电桥模型考虑触头间的电流收缩力而引起整个电动斥力的差异随着电流值的增大而变得明显起来。这样,当电流达到10 kA 以上时,引入导电桥模型进行电动斥力的数值计算就很有必要。

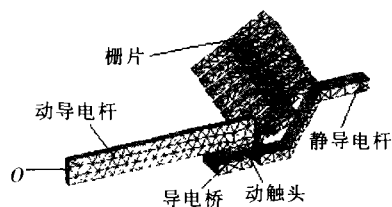


图7 模型部分图

表6 两种算法的比较

	电流 /kA	回路力 /N	触头力 /N	合计 /N		电流 /kA	回路力 /N	触头力 /N	合计 /N
导电桥算法	2.5	0.96	2.27	3.23	Holm公式	2.5	0.95	2.52	3.47
	5.0	3.35	9.03	12.38		5.0	3.38	10.08	13.46
	7.5	6.63	20.24	26.87		7.5	6.79	22.68	29.47
	10.0	10.71	35.88	46.59		10.0	11.11	40.32	51.43

5 结论

(1)对单点、中心接触的长方体和圆柱体触头,引入圆柱体和长方体导电桥模型,与 Holm 公式的计算结果进行了分析比较,验证了方法的正确性。

(2)导电桥的位置和数目以及长方形触头截面的 W/H 均对触头间的电动斥力有较大影响。

(3)可以将该方法和模型用于开关设备中由于电流收缩引起的电动斥力计算。

(4)可以用 Holm 公式考虑触头间的电流收缩力,从而简化复杂电器中电动斥力的计算。

参考文献:

- [1] R Holm. Electric Contacts (4th ed)[M]. Springer-Verlag, 1967.

作者简介:李兴文(1978-),男,在职博士生,助教,主要从事开关电弧现象、智能化电器的研究工作。

三峡工程今年将投资117亿 电力销售有望破百亿

简讯

今年,三峡工程将投资117亿元,金沙江开发投资23亿元;同时所拥有的投产机组计划发电463亿千瓦时,电力销售总额有望突破100亿元。

国务院三峡建委副主任、三峡总公司总经理李永安介绍,过去的一年三峡工程发电量达到了235亿千瓦时,占全国发电量的1%。根据施工进度安排,2004年三峡总公司投产发电机组的装机容量将超过1000万千瓦,其中三峡电厂计划发电309亿千瓦时,葛洲坝电厂154亿千瓦时。李永安说,463亿千瓦时三峡电相当于湖北省去年全年的用电量,一年达到100亿元的销售全省也只有武钢、二汽两家企业。根据《三峡三期工程施工计划》,2004年混凝土浇筑量为264万立方米,右岸大坝要全线达到或接近108m高程,9月份电源电站引水洞开挖结束,永久船闸北线将抽干检查。