

# DC Contactor Contact with Soft Connection\*

Yundong Cao, Heran Zhao<sup>#</sup>

School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang  
Email: <sup>#</sup>zhaoheran1986@msn.cn

Received: Jan. 8<sup>th</sup>, 2013; revised: Jan. 12<sup>th</sup>, 2013; accepted: Feb. 16<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** In the DC contactor breaking process, the arc ablation of the contact is more intense, resulting in increased contact resistance between the contacts, which seriously affect the life of the contacts. On the basis of the traditional contactor, this paper presents a new double break point contact structure of DC contactor with soft connection and leaf springs. This new contact structure will produce a relative sliding movement with contact pressure during use, can clear the contact surface oxides and reduce the contact resistance, in order to achieve the contacts self-cleaning function, improve service life. The moving contact and the static contact of this new structure will produce a relative sliding movement with a contact pressure during use, which clearing the oxide on the contact surface, reducing contact resistance, that achieve the contact self-cleaning function, improve service life. This article makes the analysis from the perspective of structural deformation and electrical-thermal coupling. The simulation results show that this new type of contact structure contacts can effectively achieve the self-cleaning function, and the temperature rise is reasonable. The program has the advantages of small size, low cost, breaking high-voltage level.

**Keywords:** DC Contactors; Contact; Soft Connection; Leaf Springs; Structural Analysis; Electrical Thermal Coupling; Temperature Field; Finite Element

## 直流接触器软连接触头\*

曹云东, 赵鹤然<sup>#</sup>

沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳  
Email: <sup>#</sup>zhaoheran1986@msn.cn

收稿日期: 2013年1月8日; 修回日期: 2013年1月12日; 录用日期: 2013年2月16日

**摘要:** 直流接触器分断过程中, 电弧对触头的烧蚀作用较为强烈, 导致触点间接触电阻增加, 严重影响触头的使用寿命。本文在传统低压直流接触器基础上提出一种带有软连接装置和片弹簧的新型双断点触头结构。这种新型触头结构在使用过程中动、静触点间会产生带有接触压力的相对滑动, 可以清除触点表面氧化物, 减小接触电阻, 从而实现触头自清洁功能, 提高使用寿命。本文从结构形变和电-热耦合的角度分别进行了仿真分析, 仿真结果体现出触头动、静触点相对滑动的过程, 新触头结构可以实现自清洁功能, 且温升情况合理。该方案具有体积小, 成本低, 开断电压等级高的优点。

**关键词:** 直流接触器; 触头; 软连接; 片弹簧; 结构分析; 电热耦合; 温度场; 有限元

### 1. 引言

直流接触器在开断电路时, 触头瞬间产生电弧, 释放电路中的能量, 导致切断电路时间延长。直流电

流与交流电流相比不存在过零点, 产生电弧较为强烈, 对触头的烧蚀程度相对较大。触头表面烧损使接触电阻增大, 工作时温升提高, 这又进一步损伤触点, 严重时造成触头熔焊。通常情况, 触头系统的使用寿命决定了接触器的使用寿命。有的接触器触头结构利

\*基金项目: 辽宁省特聘教授专项资助。

<sup>#</sup>通讯作者。

用闭合过程中触头表面的研磨作用擦去部分接触电阻, 这种研磨作用受触头材料硬度的影响和触头结构的限制<sup>[1-5]</sup>。

针对上述问题, 在保留了传统直流接触器优点的基础上, 本文提出一种新型触头结构: 使用软连接装置和片状弹簧相配合, 在开断、导通电路时, 可良好实现动、静触头表面滑动功能, 完成触头自清洁过程, 达到了降低接触电阻、提高使用寿命的目的; 同时平衡双断点触点接触压力, 保证两侧触点均紧密有效接触。这种新型触头结构满足元器件的散热要求。本文通过对新型触头结构三维模型形变和温度场的仿真计算, 从结构形变和电-热耦合角度验证该方案合理性。

## 2. 触头结构设计

在传统低压双断口直流接触器的基础上, 本文提出的带有软连接装置的新型直流接触器。图 1 为触头结构示意图, 由静触头、动触头、软连接构成导电回路; 片状弹簧、联动装置以及下端连接电磁铁的绝缘支架控制触头的分断、闭合。其中, 软连接装置作为触头闭合时导电回路的一部分, 不起支撑结构和承受压力的作用。动触头卡槽嵌在绝缘支架的凸起上, 使动触头与绝缘支架卡接固定。动触头和软连接之间用螺栓固定。

这种新结构的主要有三个特点:

第一, 与传统接触器触头始终平行接触不同, 这种新结构中的动、静触头在分断位置仰角有角度差,

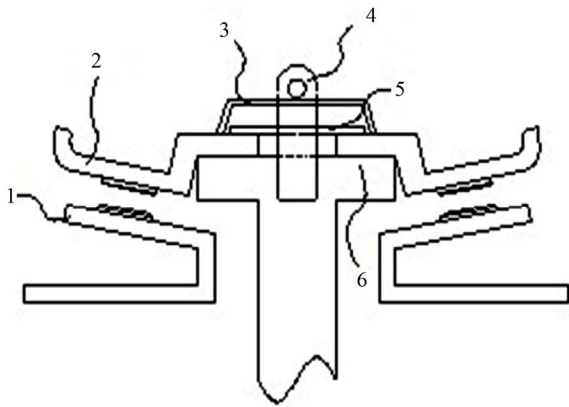


Figure 1. The soft-connection contact structure diagram: 1: static contact; 2: moving contact; 3: leaf spring; 4: linkage; 5: soft connection; 6: insulating bracket  
图 1. 软连接触头结构图: 1: 静触头; 2: 动触头; 3: 片状弹簧; 4: 联动装置; 5: 软连接; 6: 绝缘支架

在闭合位置紧密平行接触。在闭合过程中动、静触点产生相对滑动, 这种带有接触压力的滑动摩擦有助于清洁触头表面产生的氧化物, 减小接触电阻, 从而达到提高触头使用寿命的目的。

第二, 新结构的触头弹簧没有使用传统的压簧, 而是采用片弹簧。在闭合过程中, 由于片弹簧压力, 动触头仰角产生变化, 外侧两端向上翘起一个角度, 普通的压簧只能配合竖直方向的压缩和拉伸, 不能良好完成这种形变。同时, 本结构采用的片弹簧, 可以有效平衡两侧接触压力, 保证触头双断点之间都能有效紧密接触。即使长时间使用后, 触头两侧磨损程度不均, 也不会产生触点一侧闭合另一侧虚连的情况。

第三, 双断口之间采用软连接装置连接两侧动触头。在这种结构中, 触头部分的支撑和运动分别由绝缘支架和联动装置完成, 软连接装置只起到导电作用, 不会因过大力度的拉伸或挤压而变形折断。在接触器完全闭合之后, 电流从一端静触头流入, 依次通过动触头、软连接、动触头, 最后从另一端静触头流出, 实现回路的导通。

第四, 与传统触头结构相比, 这种新型触头结构不改变导电回路和电弧开断机理, 原 220 V、380 V 等工作环境同样适用。同时, 触头结构设计中, 开距和超程的不发生变化, 不影响开断时间。

## 3. 结构分析

为了清晰的阐述本文提出的这种新型触头结构的工作过程, 对其结构特性进行建模分析, 其线性方程的等效方程为:

$$[K] \times \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

$$[K] \times \{u\} = \{F^r\} + \{F^a\} \quad (2)$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = [B] \times \{u\} - \{\varepsilon^{th}\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D] \times \{\varepsilon^{el}\} \quad (4)$$

式中:  $[K]$  为总刚度矩阵;  $\{u\}$  为节点位移矢量;  $\{F^r\}$  为支反载荷矢量;  $\{F^a\}$  为所受的总外载荷;  $\{\varepsilon^{el}\}$  为由应力引起的应变;  $\{\varepsilon^{th}\}$  为节点上的应变—位移矩阵;  $\{u\}$  为节点的位移矢量;  $\{\varepsilon^{th}\}$  为热应变矢量;  $\{\sigma\}$  为应力矢量;  $[D]$  为弹性矩阵系数<sup>[6-9]</sup>。

综上所述, 用有限元分析法求出结构的节点位移, 得到结构静态特性分析结果。为了分析接触器在

闭合过程中，整个触头系统位移和形变过程，首先建立形变过程初始位置，即动、静触点刚接触时触头系统模型剖分图，如图2。

为了更加简捷、直观的展示触头闭合的过程，在分析过程中，本文使动触头静止，静触头向上移动，推动动触头-软连接系统弯折，压缩片状弹簧。本文暂不考虑闭合回路通电后电流发热对形变的影响，只对其进行结构分析。

对片弹簧顶部和动触头内侧施加自由度为0的边界条件约束，对静触头施加了沿Y轴向上的2mm位移载荷，使其推动动触头压缩片状弹簧，得到触头-弹簧系统的结构形变，如下图3所示。

从图中观察触头形变量的仿真结果，动触头受向上压缩片装弹簧弯折，两侧翘起，带动软连接弯折。动触头在静触头和片装弹簧压力的共同作用下，不仅具有沿Y方向的位移，沿X方向也有位移。而静触头沿X方向是静止的，这说明动、静触头接触表面产生了相对滑动。接着，我们在闭合过程中，超程每增加0.5mm，分别进行一次仿真，得到超程为0.5mm、1mm、1.5mm和2mm时的各个节点沿X方向位移，如图4所示。

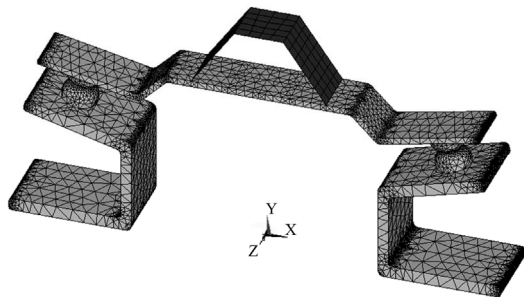


Figure 2. The split model of structure analysis  
图2. 结构分析剖分模型

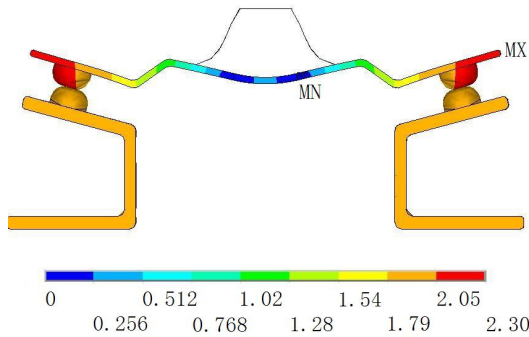
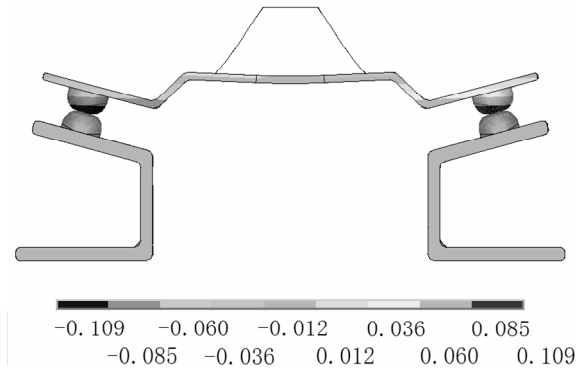
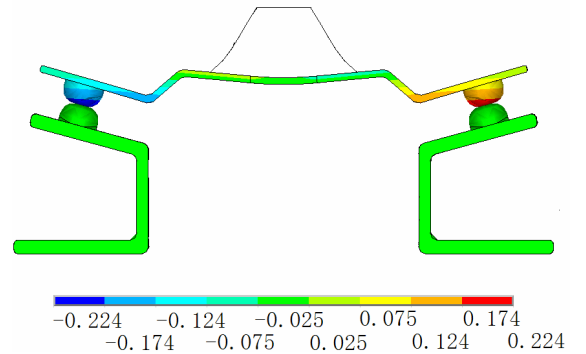


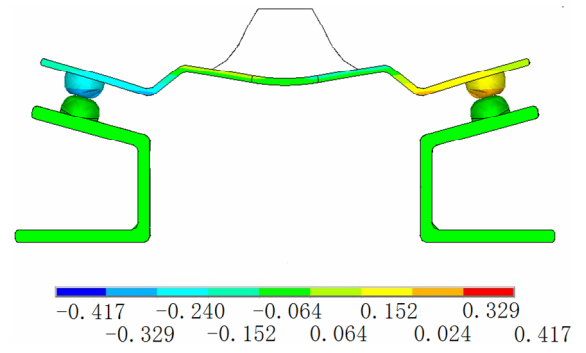
Figure 3. The total displacement results at UY = 2  
图3. 触头总位移



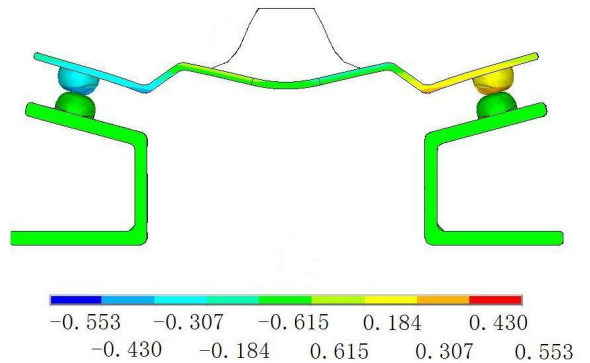
(a) 超程 0.5 mm



(b) 超程 1 mm



(c) 超程 1.5 mm



(d) 超程 2 mm

Figure 4. The X direction displacement of the nodes in different contact overtravel conditions  
图4. 不同触头超程下各节点X方向位移

从上述仿真结果可以看出，随着超行程的增加，动触点沿 X 方向的位移也不断增大，且最大值始终出现在于动、静触点相接触的部分。在 100%超程即 2 mm 的行程最终位置，动、静触点表面相对滑动的最大距离为 0.487 mm。分析动触头上关键节点的在 X 方向的位移变化，列表 1，将其绘成曲线，如图 5 所示。

分析结果可见，这种带有软连接装置的触头结构，在闭合过程中，触头间确实存在带有接触压力的相对滑动，可以实现触头自身的自清洁，达到提高触头寿命的目的。同时我们注意到，这个相对滑动的距离，必须控制在合理的范围内，以保证动、静触头表面不会因过大的相对滑动导致接触不良。

#### 4. 电 - 热耦合分析

为了验证这种新型接触器触头结构在正常工作中是否满足散热要求，我们通过有限元的方法，进行了电 - 热耦合分析。建立分析模型的过程中，首先利用结构分析的结果，将触头形变后各节点 X、Y、Z 坐标提取出来，输入到电 - 热耦合分析三维模型中，用作有限元分析模型，其剖分结果如图 6 所示。

Table 1. The X direction displacement of the key nodes on the moving contact  
表 1. 动触头各关键节点沿 X 方向位移

触头 UX 方向位移(mm)			
超程	动触头触点	动触头内端	引弧角
0.5	0.109	-1.87E-4	0.0062
1.0	0.224	-5.39E-4	0.0247
1.5	0.397	-2.81E-3	0.0837
2.0	0.487	-2.17E-3	0.103

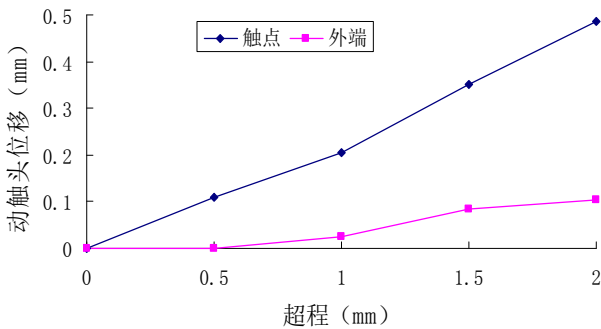


Figure 5. The sliding distance of the moving contact and the static contact  
图 5. 动触头与静触头相对滑动距离

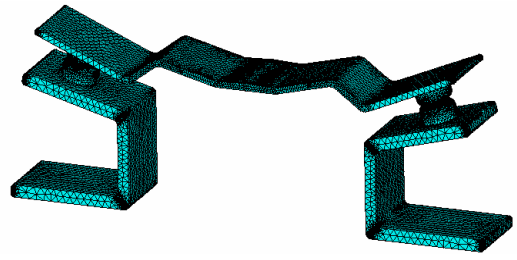


Figure 6. The electro-thermal coupling finite element model  
图 6. 电 - 热耦合分析模型

其中，电流为 40 A，铜的热导率为 400 W/(m·°C)，电阻率为  $1.67 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，触头表面一部分裸露在空气中一部分与绝缘材料接触，散热系数为 3~13 W/(m·°C)，模型温度场计算公式：

$$\{q\} = -[K] \times \{\nabla T\} \quad (5)$$

$$\{J\} = -[\sigma] \times \{E\} \quad (6)$$

$$Q = -\nabla \cdot \{q\} + \{J\}^T \{E\} + \rho C (\partial T / \partial t) \quad (7)$$

式中： $\{q\}$  为热流密度； $[K]$  为热导率矩阵； $T$  为温度； $\{J\}$  为密度； $[\sigma]$  为电导率矩阵； $\{E\}$  为电压矢量； $Q$  为总热量； $\rho$  为密度； $C$  为定体积比热容； $t$  为时间。

触点温升主要有两个来源：一个是触头材料本身存在电阻，在工作状态下产生焦耳热；另一个是触点间接触电阻通电发热。接触电阻计算公式为：

$$R_j = \frac{K_j}{(0.102F)^m} \quad (8)$$

电流通过接触区域时，由于温度升高，电阻温度系数对收缩电阻会有影响。如果考虑温度的影响，接触电阻的计算公式可以写成：

$$R_j = \frac{K_j \left(1 + \frac{2}{3} a \theta_j\right)}{(0.102F)^m} \quad (9)$$

式中： $F$  为触头接触压力(N)； $R_j$  为接触电阻,单位  $\mu\Omega$ ； $m$  为触头接触系数，面接触  $m=1$ ； $K_j$  为触头材料表面状态系数，铜表面为 80~140； $a$  为电阻温度系数单位  $1/^\circ\text{C}$ ，铜为 0.004； $\theta_j$  为接触点加热温度( $^\circ\text{C}$ ) [10-12]。

综上所述，可以计算出稳定工作中接触电阻  $R_j$  为  $40.8 \mu\Omega$ ，如果考虑温度对电阻系数的影响，在极限工作温度允许内，接触电阻  $R_j$  最大值为  $48.2 \mu\Omega$ 。进而得出接触电阻模型的等效电阻率为  $1.785 \times 10^{-7}$

$\Omega \cdot m$ 。接触器触头系统在稳定工作状态下温度场分布如图 7 所示。

由仿真结果可以看出，温升最大值出现在触点部分，该值在一般长期工作制温升允许的  $45^{\circ}C$  内，符合发热要求，不存在温升过高烧毁器件的问题。触点相互接触的部分，由于存在较大的接触电阻，是整个触头系统发热的主要来源；同时，在稳定工作时，构成整个触头结构的铜材料本身存在一定的电阻率，会在工作电流的作用下产生焦耳热使触头温度提高，也是主要热源之一；静触头下端与绝缘外壳相连的部分，是整个触头系统温度的最低值。

为了全面认识这种新型接触器的利弊，并在今后的工作中加以改进，本文将之与传统接触器在相同接触电阻情况下温度场分析结果进行对比。传统接触器和新型接触器触头结构接触电阻模型形状不同，在分析中，等效电阻率为  $2.346 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ，以保证接触电阻相同。

图 8 为传统类型的接触器稳定工作状态下触头温度场分布。通过对比可知，在相同接触电阻情况下，新型的接触器触头结构比传统面对面平行接触的触头结构理论温升值高出  $2.4^{\circ}C$ ，这主要是因为触头间相对滑动略微减小了有效接触面积，局部电流密度增大，导致温升略有增加。这种新型结构温升在允许范围内。从长期的角度讲，新型触头结构的自清洁功能，会延缓接触电阻的增加，温升将小于传统接触器。表 2 为两种类型触头结构在相同接触电阻下温升情况。

### 5. 结论

1) 由结构分析的结果可见，这种带有软连接装置的触头结构，在闭合过程中，触头间确实存在带有接触压力的相对滑动，可以实现触头自身的自清洁，达到提高触头寿命的目的。

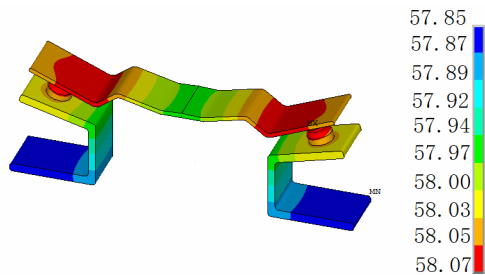


Figure 7. The temperature field distribution of new contact  
图 7. 新型触头温度场分布

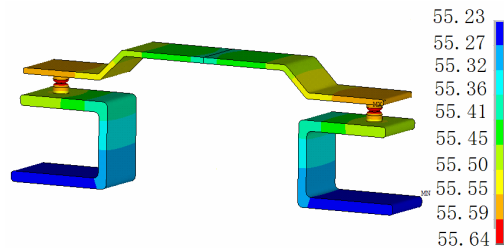


Figure 8. The temperature field distribution of traditional contact  
图 8. 传统触头温度场分布

Table 2. Contact temperature rise of the two contactor types  
表 2. 两种类型触头结构温升情况

类型	最高温度	温升	工作状态
传统结构	$55.6^{\circ}C$	$35.6^{\circ}C$	正常
新型结构	$58^{\circ}C$	$38^{\circ}C$	正常

2) 从触头电 - 热耦合有限元分析的结果来看，接触电阻对整个触头系统温升影响明显。这种新型触头结构温升在允许范围内，接触器处于正常工作状态，该产品散热性能合理。

3) 这种新型触头结构，不需改动开距、超程，开断时间不受影响；不改变导电回路和电弧开断机理，传统结构适用的工作环境新结构同样适用。

### 参考文献 (References)

- [1] 黎斌. SF6 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 刘晓明, 闻福岳, 曹云东. 基于多物理场耦合的 SF6 断路器介质恢复特性数值模拟[A]. 第一届电器装备及其智能化学术会议论文集[C]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- [3] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 戴瑞成. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 71-77.
- [4] S.-J. Wang, Y.-T. Sha, H. Zhang and G.-F. Zhai. Method of reliability tolerance design based on EDA technology and its application on DC hybrid contactor. Journal of Zhejiang University, 2007, 8(3): 426-433.
- [5] 周学, 崔行磊, 翟筱羿. 考虑 Ag 触头蒸发烧蚀条件下的航天继电器分断电弧特性的研究[J]. 低压电器, 2011, 15: 6-11.
- [6] 李德元, 刘勇, 董晓强等. 电弧喷涂涂层温度场及应力应变分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(3): 258-262.
- [7] 李晨希, 徐娜, 曹亮等. 涂层高炉风口的温度场和应力场有限元分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(2): 178-182.
- [8] 赵雨旸. 基于 ANSYS 的变速器齿轮有限元静力学分析[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2009, 23(3): 1-3.
- [9] Z. J. Guo, D. L. Fan, R. L. Xu, et al. Modal design optimization of an articulated frame. SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants, Shanghai, 23 June 2008.
- [10] 胡方, 杨文英, 赵瑞平等. 大功率直流接触器温度场仿真及影响因素分析[J]. 低压电器, 2011, 23: 1-6.
- [11] 周月英. 接触器触头温升及其计算[J]. 电气制造, 2010, 11(3): 58-60.
- [12] 李岩, 额尔和木巴亚尔, 李霄霆等. 变压器磁 - 热耦合计算与局部过热屏蔽措施[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(4): 366-371.