

基于接触器触头弹跳振动特性分析*

黄克鹏¹, 王发展¹, 赵明基¹, 郭宝良¹, 区达铨²

(1.西安建筑科技大学机电工程学院 西安,710055)

(2.ABB新会低压开关有限公司 江门,529000)

摘要 针对电气开关器件在合闸过程中动静触头碰撞接触产生的振动弹跳问题,在综合考虑非线性电磁力和碰撞接触力的基础上,建立了接触器触头系统的2自由度振动方程并进行求解,通过高速摄影实验揭示了触头弹跳偏转规律。结果表明:理论与实验结果高度一致;触头在碰撞后尚未分离,铁芯就发生了碰撞,进一步加剧了触头弹跳;铁芯发生第2次弹跳时,不影响触头的弹跳;动触头移动轨迹在发生第1次碰撞后,产生第1次偏转,发生第2次碰撞后,偏转位移和角度相反且均小于第1次偏转。研究结果为进一步控制和减小触头弹跳提供了理论依据。

关键词 电气开关;交流接触器;触头弹跳;2自由度振动方程;高速摄影

中图分类号 TH825;TM572

引言

触头系统是一种广泛用于电气开关器件的重要组件。在合闸过程中会产生类似弹跳现象,这属于一种非线性的振动行为,其中动、静触头间的碰撞弹跳是影响其动态特性的重要因素^[1-3]。碰撞弹跳引起的接触部分小距离分离极易导致电弧产生,严重时会发生熔焊粘接,直接影响电接触性能和使用寿命^[4-5]。因此,准确分析其振动机理,掌握其动态特性变化规律,得到有效减少和抑制触头弹跳的理论方法,是提高电气元器件电寿命和可靠性的迫切需求。

关于触头弹跳模型的建立,金平等^[6]利用等效磁路模型求解永磁接触器中电磁和永磁共同产生的磁场和机械运动的耦合计算问题,推导了耦合电路模型和机械模型的运动方程。贺开华等^[7]对接触器接通时触头弹跳进行分析,得到了触头机械弹跳的物理过程模型,建立了触头碰撞前后的能量平衡方程。林抒毅等^[8-9]在考虑接触碰撞并产生形变过程中,应用柯西应力方程计算变形后的位移,并通过动量守恒定律得到了交流接触器吸合弹跳过程可动部件的控制方程。关于减少和抑制触头的弹跳,文献^[10-12]提出智能交流接触器不同步触头系统结构,并对零电流分断控制进行了研究。文献^[13-17]基于ANSYS有限元法,对合闸过程中的电磁力进行

了仿真分析,并考虑了分磁环和漏磁的影响。关于测量触头弹跳的方法,张登科等^[18]通过设计测量装置来记录弹跳时间。周亮等^[19]将动、静触头接入一个直流回路,通过测量回路中电阻两端的电压变化来反映接触器在合闸过程中的弹跳情况。陈德为等^[20]应用高速摄像技术,在动触头的侧面,设置首开相和非首开相标记点,通过拍摄观察标记点的位移得到触头弹跳规律。

国内外学者围绕触头弹跳特性的研究工作主要是通过简单的耦合运动方程、电路方程和磁路方程来分析电磁铁的动态特性,并未对触头弹跳做振动机理分析^[21]。因此,笔者以接触器为例,以触头系统的机械振动为切入点,基于振动特性建立了2自由度振动方程,并使用高速摄影技术进行实验验证和分析,为接触器的优化设计提供了理论参考。

1 交流接触器工作原理

交流接触器由触头系统、电磁系统和触头支架三部分组成,其结构如图1所示。

交流接触器工作时,先给电磁线圈通电,当电磁力大于反力弹簧作用力时,动铁芯通过触头支架使动触头向下运动,由于静触头固定(具有限位作用),使得动静触头间距小于动静铁芯间距,动触头先于动铁芯发生撞击和弹跳。此时动铁芯继续向下运

* 陕西省自然科学基金重点资助项目(2011J2009)

收稿日期:2020-07-26;修回日期:2020-10-20

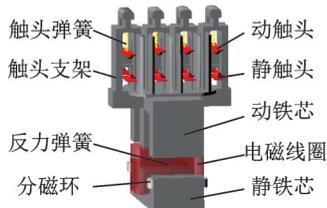


图 1 交流接触器结构图

Fig.1 AC contactor structure diagram

动,直至动静铁芯发生碰撞。动静铁芯碰撞使得本就处于弹跳的动触头的运动过程变得更加复杂。因此,如何准确得到动静触头和动静铁芯碰撞前、碰撞时、碰撞后的运动状态及弹跳情况是接触器动态特性研究的重点和难点。

2 2 自由度振动方程

2.1 2 自由度振动方程的建立

交流接触器在通断时的非线性和不连续性,使交流接触器工作系统本身的动力学特性出现突变现象。

笔者假定:①接触器运动部件只能沿着一个方向运动,在其他方向上不发生位移以及转动;②接触器部件间发生碰撞接触时的碰撞力由局部接触变形引起,并以物体的碰撞前后速度和碰撞接触时间作为计算参数。因此,可以运用分段模型来建立分段线性振动方程。

交流接触器在运行过程中,可等效为 2 自由度有阻尼受迫振动系统,其振动模型如图 2 所示。

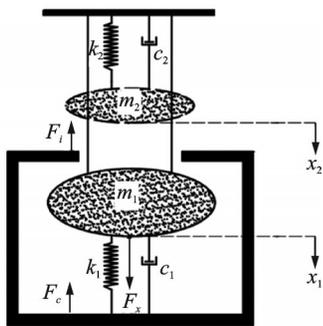


图 2 接触器振动模型

Fig.2 Vibration model of contactor

接触器合闸运动过程可分为以下 3 个阶段:①动静触头尚未发生碰撞接触;②动静触头发生初次碰撞接触,动静铁芯尚未发生碰撞接触,考虑动静触头碰撞接触力 F_i ;③动静铁芯发生初次碰撞,考虑动静铁芯碰撞接触力 F_c 。其振动方程分别为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 + k_2(x_1 - x_2) = F_x \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 + k_2(x_1 - x_2) = F_x \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = -F_i \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 + k_2(x_1 - x_2) = F_x - F_c \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: m_1, m_2 分别为动铁芯和动触头质量; x_1, x_2 分别为动铁芯和动触头位移; c_1, c_2 分别为电磁机构和触头系统等效阻尼; k_1, k_2 分别为反力弹簧和触头弹簧刚度系数; F_x 为电磁力; F_i, F_c 分别为触头以及铁芯碰撞时的接触力。

2.2 非线性电磁力

图 3 为接触器受力模型。交流接触器在合闸过程中,将系统作简化处理,其中 x_i 和 x_c 分别为动触头和动铁芯的总行程。

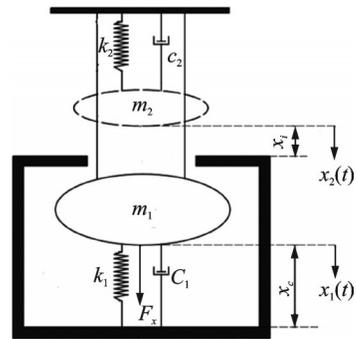


图 3 接触器受力模型

Fig.3 Force model of contactor

合闸受力过程可分为 2 个阶段:①当动静触头和动静铁芯均未发生接触时,由于动触头与动铁芯通过触头支架相连,所以共同向下运动;②当动静触头接触,动静铁芯未接触时,动触头和动铁芯分离,此时只有动铁芯向下运动。其方程分别为

$$(m_1 + m_2)a + (c_1 + c_2)v + k_1 x_1(t) = F_x \quad (4)$$

其中: $a = \frac{dv(t)}{dt}$; $v = \frac{dx_1(t)}{dt}$; $0 < x_1(t) < x_{i0}$

$$m_1 a + c_1 v + k_1 x_1(t) + k_2 x_2(t) = F_x \quad (5)$$

其中: $a = \frac{dv(t)}{dt}$; $v = \frac{dx_2(t)}{dt}$; $x_i < x_1(t) < x_c$; $0 < x_2(t) < x_c - x_{i0}$

综合式(4)和式(5),可以得出动铁芯所受电磁力 F_x ,但前提是需要测出动铁芯的运动曲线。因

此,通过采集动铁芯在电磁力的作用朝着静铁芯运动整个过程中的位移变化情况,通过后期数据处理就可分别求解式(4)和式(5)。

2.3 触头碰撞接触力

触头属于弹性体,因此在闭合过程中因碰撞会引起周期性弹跳,触头弹跳模型如图 4 所示。

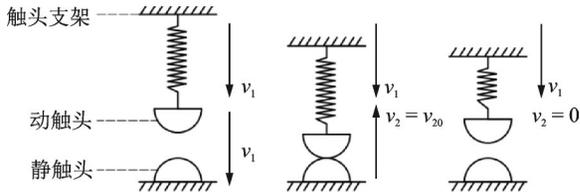


图 4 触头弹跳模型
Fig.4 Contact bounce model

忽略弹簧质量,设动触头质量为 m_2 。由图 4 可知,动触头以 v_1 的速度向静触头方向运动。如果忽略摩擦和介质阻力,则动触头和静触头碰撞前的动能为 $1/2m_2v_1^2$ 。触头碰撞后,动触头的动能转变为触头表面材料形变的位能(不计摩擦),当弹性形变恢复时触头发生反跳,令动触头的反跳初速度变为 v_{20} ,相应的动能为 $1/2m_2v_{20}^2$ 。触头碰撞前后的能量平衡方程为

$$\frac{1}{2} m_2 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 + K \frac{1}{2} m_2 v_1^2 \quad (6)$$

其中:K为触头材料的恢复系数。

由动量定理可知

$$F_c t_c = m_2 v_2 - m_2 v_1 \quad (7)$$

其中: t_c 为触头碰撞时间。

同理,铁芯碰撞前后的能量平衡方程为

$$\frac{1}{2} m_1 (v_1^*)^2 = \frac{1}{2} m_1 (v_{20}^*)^2 + K^* \frac{1}{2} m_1 (v_1^*)^2 \quad (8)$$

$$F_c t_c = m_1 v_2^* - m_1 v_1^* \quad (9)$$

其中: t_c 为铁芯碰撞时间; v_1^* 为动铁芯沿着静铁芯方向运动的速度; v_2^* 为动铁芯的反跳初速度; K^* 为铁芯材料的恢复系数。

2.4 方程求解与分析

笔者以 ABB 公司 A9-30-10 型电磁接触器为例,采用 100N 型弹簧拉压实验机对反力弹簧和触头弹簧刚度系数进行测量。利用示波器对接触器触头合闸时的电流信号进行监测,得到触头和铁芯接触时间。根据触头所用材料 AgNi15、铁芯所用材料 50W600,得到触头系统与电磁机构等效阻尼。通过测量与查询,得到各项参数具体数值如表 1 所示。

表 1 接触器结构参数表

Tab.1 Contactor structure parameter table

参数	数值
m_1/ g	200
m_2/ g	2
$c_1/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	30
$c_2/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	5
$k_1/(N \cdot mm^{-1})$	0.35
$k_2/(N \cdot mm^{-1})$	0.099
x_i/mm	4.5
x_c/mm	6
K	0.8
K^*	0.5

利用 Matlab 指令 ode45 函数对式(1)~(3)进行数值积分求解,运算与理论结果分别如图 5 和表 2 所示。其中:合闸时间是指从交流接触器开始闭合到触头第 1 次接触开始的时间;弹跳时间是指触头从第 1 次弹跳开始到最后 1 次弹跳结束的时间;接触稳定时间是指从接触器开始闭合到触头最后 1 次弹跳结束的时间,铁芯同理。

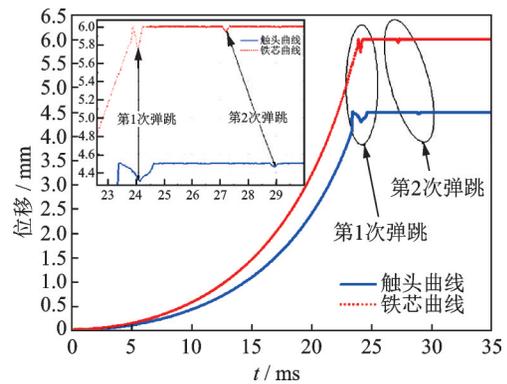


图 5 Matlab 运算结果曲线

Fig.5 Curve of Matlab operation result

由图 5 和表 2 可知:触头合闸时间为合闸运动第 1 阶段(0~23.37 ms);触头第 1 次弹跳开始时间到铁芯第 1 次弹跳开始时间为合闸运动第 2 阶段(23.37~23.90 ms);铁芯第 1 次弹跳开始时间到触头第 2 次弹跳结束时间为合闸运动第 3 阶段(23.90~29.08 ms)。

触头第 1 次弹跳开始时间为 23.37 ms,铁芯第 1 次弹跳开始时间为 23.90 ms;触头第 1 次弹跳结束时间为 24.65 ms,铁芯第 1 次弹跳结束时间为 24.25 ms;触头第 1 次弹跳最大幅值为 0.241 mm,铁芯第 1 次弹跳最大幅值为 0.195 mm。可知触头早于铁芯发生弹跳,但晚于铁芯结束弹跳,且触头弹跳

表 2 理论结果

Tab.2 Theoretical results

参数	动触头	动铁芯
合闸时间/ms	23.37	23.90
第 1 次弹跳开始时间/ms	23.37	23.90
第 1 次弹跳结束时间/ms	24.65	24.25
第 2 次弹跳开始时间/ms	28.81	27.07
第 2 次弹跳结束时间/ms	29.08	27.35
第 1 次弹跳总时间/ms	1.28	0.35
第 2 次弹跳总时间/ms	0.27	0.28
弹跳时间/ms	5.71	3.45
接触稳定时间/ms	29.08	27.35
第 1 次弹跳最大幅值/mm	0.241 0	0.195
第 2 次弹跳最大幅值/mm	0.049 0	0.032
最大弹跳幅值/mm	0.241 1	0.195

幅值大于铁芯。这是由于:①动静触头间距小于动静铁芯间距,且铁芯质量远大于触头质量,因此回落周期短;②触头在碰撞后尚未分离,铁芯就发生了碰撞,因此进一步加剧了触头弹跳,使得其弹跳位移增加。

触头第 2 次弹跳开始时间为 28.81 ms,铁芯第 2 次弹跳开始时间为 27.07 ms;触头第 2 次弹跳结束时间为 29.08 ms,铁芯第 2 次弹跳结束时间为 27.35 ms;触头第 2 次弹跳最大幅值为 0.049 mm,铁芯第 2 次弹跳最大幅值为 0.032 mm。可知铁芯第 2 次弹跳开始和结束时间都早于触头,从图 5 中可清晰观察到,铁芯第 2 次弹跳发生时,并未明显影响触头的弹跳。这是因为铁芯发生第 2 次弹跳幅值远小于第 1 次,被系统本身消耗,并未传递到触头。

触头的弹跳时间、接触稳定时间和最大弹跳幅值均大于铁芯,这是由于铁芯撞击时接触面积较大,在弹跳过程中一直受到电磁力作用,进一步阻止了铁芯的再次弹跳。

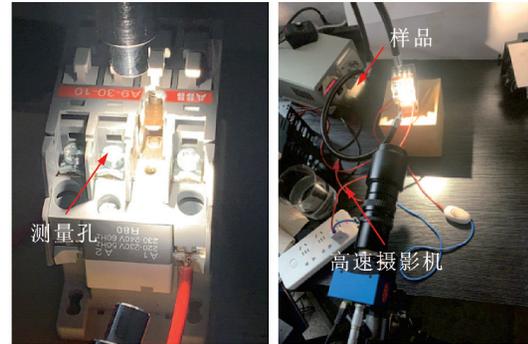
由此可见,铁芯对于触头的影响较大,增加动铁芯接触面积、增大动弹簧质量、减小动触头与动铁芯弹簧刚度系数均可有效减小动触头弹跳的发生。

3 实验分析与验证

3.1 实验方法

为了直观得到触头弹跳的动态全过程,笔者采用高速摄影技术(EoSens-mini2 系统)对 3 个 ABB 公司 A9-30-10 型电磁接触器的同一组触头进行拍摄影测量。

由于交流接触器合闸过程中触头弹跳时间非常短,一般只有 2~6 ms,为了确保相机可以准确捕捉到弹跳全过程,笔者选择了 128×128 的像素进行拍摄,拍摄速度为每秒 43 540 帧。拍摄布置如图 6 所示。



(a) 接触器样机 (b) 实验设备
 (a) Contactor prototype machine (b) Experimental equipment

图 6 拍摄布置

Fig.6 Shooting layout

具体步骤为:①在接触器的一侧正对着触头组位置开测量孔;②将高速摄像机对准触头部位并对焦;③在高速相机中对动触头部位标记并监测,同时调整相机的拍摄参数并启动相机进行拍摄。

3.2 实验结果与分析

图 7 为触头弹跳过程图,图 8 为动触头偏转图。由图可知:动触头在开始运动时,速度缓慢,随着动触头继续向下运动,触头合闸速度明显加快,最终发生猛烈撞击和弹跳;动静触头在碰撞后不仅会产生垂直方向的位移弹跳,而且会沿不同方向倾斜,这使得碰撞后的瞬间,触头会沿接触面产生左右滑移或摆动。

为了得到触头弹跳过程中的量化指标,将图片处理程序应用到 Matlab 软件中对上述所采集到的数据进行分析,首先,通过图片预处理、标定识别、标记中心直线拟合和物坐标系标定与位移曲线生成等步骤处理;其次,对圆(标记中心)的直径进行求解,利用求解结果得到原坐标系与新坐标系之间的线性关系;最后,将各个图片处理结果按照采集的时间序



图 7 触头弹跳过程图

Fig.7 Contact of bounce process

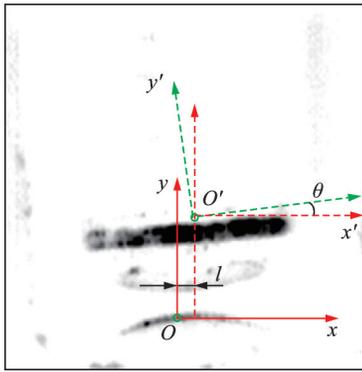


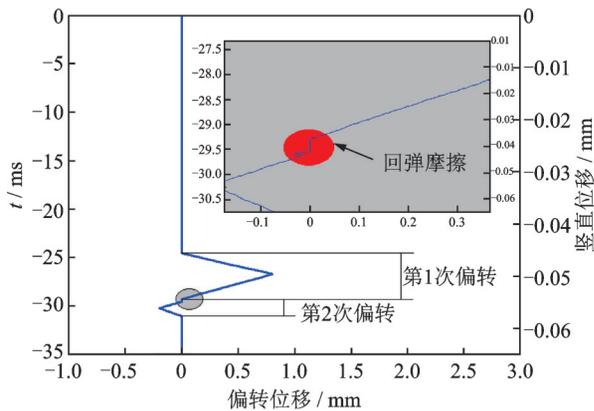
图 8 动触头偏转图

Fig.8 Moving contact deflection diagram

列排列即可得到标记点的位移实时数据。

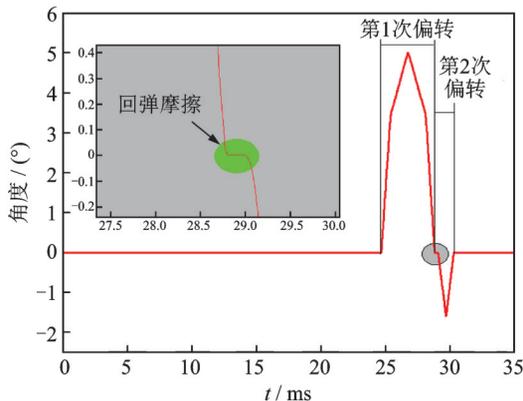
通过选取 1 组测量数据,将触头竖直方向的运动轨迹进行图像处理,得到如图 9 所示的轨迹偏转曲线。

由图 9(a)可知,动触头轨迹发生 2 次偏转,在 24.65 ms 时第 1 次偏转开始,27.33 ms 时位移方向回转,在 29.11 ms 时第 1 次偏转结束,最大偏转位移为 0.81 mm,同时触头发生第 2 次碰撞弹跳,动触头位



(a) 动触头偏转位移

(a) Deflection displacement of moving contact



(b) 动触头偏转角度

(b) Deflection angle of moving contact

图 9 轨迹偏转曲线

Fig.9 Trajectory deflection curve

移偏转反向进行,直至 32.02 ms 偏转结束。结合图 7 和图 8 可知,动触头发生第 1 次碰撞后,开始产生第 1 次偏转,发生第 2 次碰撞后,改变了偏转位移的方向。在 2 次偏转位移方向转化过程中,受碰撞后回弹摩擦的影响,位移会短暂保持竖直不偏转。

同理,由图 9(b)可知,动触头发生位移偏转的同时,还伴随着角度的偏转,其最大偏转角度为 5.03°,且第 1 次偏转位移和偏转角度都远大于第 2 次,这是由于碰撞接触对系统能量的消耗,以及第 2 次触头弹跳的作用远小于第 1 次的影响。

为了进一步分析造成触头产生偏转现象的主要原因,对触头系统的结构进行分析。触桥结构如图 10 所示。由图可知,动触头上与触桥之间通过触头弹簧悬支在触头支架上。接触器闭合时,触头弹簧在电磁力作用下压缩,带动触桥和触头运动。在运行过程中,触头弹簧作用力并不能准确可靠地作用于触桥质心位置,使得触桥两边总有一对触头先于另一对触头发生碰撞和弹跳,因此碰撞后触头在运动中发生倾斜和转动。

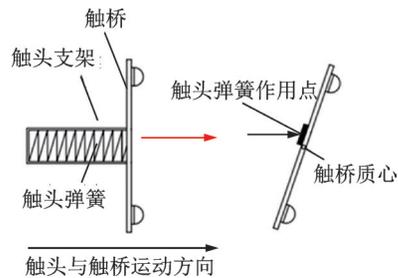


图 10 触桥结构

Fig.10 Contact bridge structure

由此可见,导致动静触头接触时偏转的主要原因是:①触头弹簧作用于触桥结构;②在触头接触瞬间,产生的电弧也会导致触头圆弧与圆弧接触时的侧向滑移。因此,需要提高各部件的加工精度和装配精度,以避免出现这种现象。

3.3 实验验证

将 3 个接触器同一组测量结果取平均值,实验结果如表 3 所示。

将触头的 Matlab 运算结果曲线与实验曲线进行对比,结果如图 11 所示。由图可知:实验曲线与理论曲线总体趋势相同,触头均出现了 2 次明显弹跳,但图中触头在第 1 阶段的实验曲线并不光滑,这是由于接触器在实际运行过程中,动铁芯的移动会造成接触器系统的微小抖动所引起;实验曲线与理论曲线在第

表3 实验结果
Tab.3 Experiment result

参数	样品1	样品2	样品3	平均值
第1次弹跳开始时间/ms	23.47	23.80	23.74	23.67
第1次弹跳结束时间/ms	24.65	24.27	24.64	24.52
第2次弹跳开始时间/ms	29.11	29.25	28.91	29.09
第2次弹跳结束时间/ms	29.28	29.37	29.37	29.34
合闸时间/ms	23.47	23.80	23.74	23.67
弹跳时间/ms	5.81	5.57	5.63	5.67
接触稳定时间/ms	29.28	29.37	29.37	29.34
最大弹跳幅值/mm	0.245	0.254	0.257	0.252

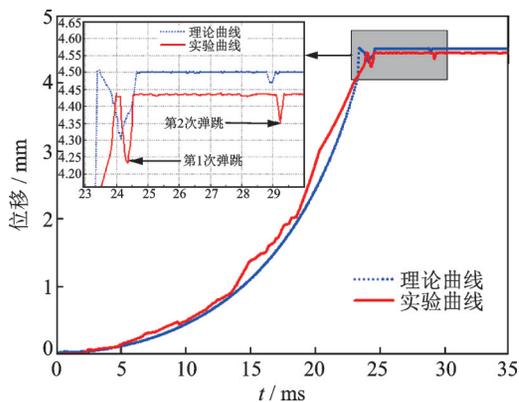


图11 理论与实验对比曲线

Fig.11 Experimental and theoretical comparison curves

2和第3阶段曲线并未完全贴合,产生的偏差是由于振动模型进行了简化,将触头和触桥作为整体质点处理,而未考虑触头系统的结构对动静触头接触时的偏转作用所导致。

实验与理论触头2次弹跳开始时间与结束时间、合闸时间、弹跳时间、接触稳定时间和最大弹跳幅值误差均在5%以内,表明实验与理论结果高度一致,验证了理论的准确性和可靠性。

4 结论

1) 触头第1次弹跳早于铁芯开始,晚于铁芯结束,弹跳幅值大于铁芯。触头在碰撞接触后尚未分离,铁芯就发生了碰撞,进一步加剧了触头弹跳。

2) 触头第2次弹跳开始和结束时间都晚于铁芯,铁芯第2次弹跳发生时,不影响触头的弹跳。触头的弹跳时间、接触稳定时间和最大弹跳幅值均大于铁芯。

3) 动触头轨迹发生2次偏转,发生第1次碰撞后,开始产生第1次偏转,发生第2次碰撞后,改变了偏转位移的方向。在2次偏转位移方向转化过程

中,由于碰撞后回弹摩擦的影响,位移会短暂保持竖直不偏转。

参 考 文 献

- [1] SHU L, WU L, WU G, et al. A fully coupled framework of predicting the dynamic characteristics of permanent magnet contactor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(8):1-7.
- [2] BIAGINI V, BOLOGNESI P, MECHLER G, et al. Multi-domain mechatronic approach for the design of a vacuum contactor actuation drive[C]//2016 International Conference on Electrical Machines (ICEM). [S.l.]: IEEE, 2016:1126-1131.
- [3] CHENG S, CAI Z. Design and optimization of energy-saving wind power grid-connected contactor based on nano two-phase composite magnetic materials[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology(ICEPE-ST). [S.l.]: IEEE, 2017:209-212.
- [4] REN W B, ZHAI G F, CUI L. Contact vibration characteristic of electromagnetic relay[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2006, 89(8):1177-1181.
- [5] KLYMENKO B V, PANTELYAT M G. Electromagnetic actuators for medium voltage vacuum switching devices: classification, design, controlling[C]//2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF). [S.l.]:IEEE, 2017: 1-2.
- [6] 金平,林鹤云,房淑华,等. 永磁接触器的快速磁场分析和动力学预测模型(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36):16-21.
JIN Ping, LIN Heyun, FANG Shuhua, et al. A rapid magnetic analysis and dynamic prediction model for permanent magnet contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36):16-21.(in Chinese)
- [7] 贺开华,荣命哲,吴翊,等. 三气隙永磁接触器电磁特性分析[J]. 低压电器, 2012(13):6-10.
HE Kaihua, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Analysis of electromagnetic characteristics for three gaps permanent magnet contactor [J]. Low Voltage Apparatus, 2012 (13):6-10.(in Chinese)
- [8] 林抒毅,许志红. 交流接触器三维动态过程数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2967-2975.
LIN Shuyi, XU Zhihong. Simulations and numerical analysis on 3D dynamic process of alternating current contactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2967-2975. (in Chinese)
- [9] 林抒毅,许志红. 晃电故障下交流接触器的工作特性

- 分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 131-137.
LIN Shuyi, XU Zhihong. Performance characteristics of AC contactor during voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 131-137. (in Chinese)
- [10] 王阳, 许志红. 智能电磁接触器吸合过程RBR控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4568-4578.
WANG Yang, XU Zhihong. RBR control strategy for the closing process of intelligent electromagnetic contactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4568-4578. (in Chinese)
- [11] 吴敬轩, 许志红. 电磁接触器吸合过程无模型自适应控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1663-1672.
WU Jingxuan, XU Zhihong. A model-free adaptive control strategy for actuation of electromagnetic contactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1663-1672. (in Chinese)
- [12] 何晓燕, 许志红. 交流接触器虚拟样机设计技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 148-155.
HE Xiaoyan, XU Zhihong. Virtual prototyping technology of AC contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 148-155. (in Chinese)
- [13] 刘兰香, 杨文英, 王茹, 等. 继电器触簧弹跳建模方法与试验研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2017(9): 1-8, 29.
LIU Lanxiang, YANG Wenying, WANG Ru, et al. Overview on modeling method and experimental research of contact spring bounce for electromagnetic relays[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(9): 1-8, 29. (in Chinese)
- [14] 杨文英, 刘兰香, 刘洋, 等. 考虑碰撞弹跳的接触器动力学模型建立及其弹跳特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1900-1911.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, LIU Yang, et al. Establishing of contactor dynamic model considering collision bounce and analysis of influencing factors of bounce characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1900-1911. (in Chinese)
- [15] 杨文英, 刘兰香, 贾楠, 等. 考虑弹跳的直流接触器动态特性计算方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16): 83-88.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, JIA Nan, et al. Investigation on the calculation method for dynamic characteristics of DC contactor considering bounce [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(16): 83-88. (in Chinese)
- [16] 杨文英, 邵帅, 周敬, 等. 基于Ansys大功率接触器振动特性仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(4): 25-28.
YANG Wenying, SHAO Shuai, ZHOU Jing, et al. Vibration characteristic simulation study of high power contactor based on Ansys [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(4): 25-28. (in Chinese)
- [17] 杨文英, 刘兰香, 翟国富. 热场影响下新能源用接触器弹跳特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4687-4698.
YANG Wenying, LIU Lanxiang, ZHAI Guofu. The bounce characteristics of contactors for new energy under the influence of thermal field [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4687-4698. (in Chinese)
- [18] 张登科, 徐达. 塑壳式断路器触头弹跳时间自动测试台[J]. 低压电器, 2010(17): 57-59.
ZHANG Dengke, XU Da. Automatic test equipment of moulded case circuit breaker contact stagger time [J]. Low Voltage Apparatus, 2010(17): 57-59. (in Chinese)
- [19] 周亮, 吴桂初, 谢文彬. 基于激光位移器的交流接触器动态测试与分析[J]. 温州大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 32-37.
ZHOU Liang, WU Guichu, XIE Wenbin. The dynamic testing and analysis on contactors based on laser probing displacement [J]. Journal of Wenzhou University (Natural Sciences), 2013, 34(3): 32-37. (in Chinese)
- [20] 陈德为, 张培铭. 基于高速摄像机的智能交流接触器动态测试与分析技术[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 878-884.
CHEN Dewei, ZHANG Peiming. High-speed camera-based intelligent AC contactor dynamic testing and analysis techniques [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 878-884. (in Chinese)
- [21] 李亚峰, 王发展, 王雁琨, 等. 接触器触头系统弹跳行为仿真及影响因素分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(1): 55-62.
LI Yafeng, WANG Fazhan, WANG Yankun, et al. Bumping behavior simulation and influencing factors analysis of contact system in AC contactor [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(1): 55-62. (in Chinese)



第一作者简介:黄克鹏,男,1995年1月生,硕士、助教。主要研究方向为电气开关、智能电气设备。曾发表《接触器触头弹跳行为规律分析及算法优化》(《重庆大学学报》2021年第44卷第8期)等论文。

E-mail: 15502937890@163.com