

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.022

# 并联双线圈式直流接触器电磁机构合闸动作特性

鄢呈阳, 王立军, 张闻哲, 黄一凡, 王凯

(西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

**摘要:** 直流接触器是新能源系统以及电动汽车中配置最为广泛的开关电器之一。而直流接触器的动态特性是衡量直流接触器性能的重要指标之一。文中以并联双线圈式直流接触器为研究对象, 建立了直流接触器电磁机构的动力学模型, 利用基于 Adams 与 Maxwell 软件的联合仿真研究方法对直流接触器的电磁机构进行合闸过程的仿真分析, 研究表明, 机构合闸动作的仿真合闸时间与试验合闸时间相吻合, 验证了该仿真方法的正确性。同时研究了弹簧参数和线圈参数等因素对机构合闸运动特性的影响, 发现在一定范围内弹簧预压力变化对合闸时间影响不大, 线圈匝数增大会导致合闸时间变小, 线圈内阻增大会导致合闸时间变大且动触头弹跳更剧烈。文中的仿真方法与结果能为直流接触器电磁机构的改进设计与优化提供一定参考。

**关键词:** 直流接触器; 并联双线圈式; 电磁机构; 合闸动作; 动力学仿真; 电磁耦合

**中图分类号:** TM572

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)01-0201-11

## 0 引言

随着时代的发展, 我国逐渐开始重视能源问题, 如今正大力推行新能源电网的建设, 而新能源电网的布局设计必然离不开电力系统的保护器件, 如直流接触器<sup>[1-6]</sup>。新能源类型的设备和装置需要很多直流接触器进行电路控制。以电化学能源动力为主的新能源汽车及其充电装置都离不开直流接触器的控制, 直流接触器作为安全控制类型的器件, 在工作过程中必须做到能够以很短的时间可靠地断开很高的电流, 在危险的情况下能够可靠快速地断开很高的电压<sup>[7-11]</sup>。

电磁系统是直流接触器完成开断的重要组成部分, 通过一定的电压和电流产生激励磁场进一步产生电磁吸力, 然后通过动铁心和导杆带动触头运动。电磁系统作为接触器的重要组成部分, 其可靠性直接影响着整个接触器系统的性能<sup>[12-15]</sup>。为了能够使电磁系统正常工作, 要求吸力特性和反力特性之间必须配合良好, 这是实现电磁系统可靠吸合、提高电磁系统工作稳定性和电气寿命的基本要求<sup>[16-17]</sup>。电磁系统的相关参数对于直流接触器的灭弧性能也有重要影响。文献[18]根据直流接触器的特点以及工作特性设计了电磁线圈参数; 文献[19]建立了基于串联双线圈驱动结构的三维有限元模型, 在考虑了自感和互感的基础上对电磁特性进行研究, 并且得出了电磁吸力与负载反力随时间

变化的曲线; 文献[20]针对串联双线圈结构的直流接触器, 采用实验和仿真的方法, 对电磁系统的相关特性进行研究, 通过建立三维有限元模型, 并结合电压平衡方程以及达朗贝尔机械运动方程对动铁心的动态特性进行了 MATLAB 仿真, 仿真结果和实验结果相吻合; 文献[21]研究了一种双线圈的等效算法, 将直流接触器的双线圈结构驱动系统, 结合基尔霍夫定律并经过等效电流计算后, 转化为单线圈的电磁模型, 降低了模型的复杂性; 文献[22]采用 ANSYS 的二次开发方程针对直流接触器的温度以及动态特性与静态特性进行计算, 该开发成果能够让使用者只需要提交产品参数就能够自动得出接触器的温度场特性及动静特性曲线, 避免了 ANSYS 的复杂计算设置。

近年来, 直流接触器内部的触头弹跳现象也越来越被国内外的专家学者重视并展开研究, 在接触器工作的时候由于动触头弹跳会引起电弧对触头材料的烧蚀, 不仅影响触头的使用寿命, 还影响电弧的开断性能。因此, 应尽量减少直流接触器开断过程中伴随出现的触头弹跳现象。文献[23]对触头系统微分方程进行求解, 发现无论是弹跳次数还是最大运动位移的角度, 动触头对应的数值都大于动铁心; 文献[24]从振动的角度出发, 推出触头弹跳方程, 另外, 还通过设计多种形状的动静触头进行组合仿真, 发现圆弧与平面组合类型的触头系统能够大大减少触头的弹跳时间; 文献[25]利用接触器的斜率闭环控制原理, 提出利用斜率控制器减少触头弹跳对灭弧系统的消极影响, 整定后的仿真结果显示触头的弹跳能够有所降低。

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377157); 四川省科技支撑计划资助项目(2023YFSY0013)

由于目前国内外对直流接触器的仿真方法大多局限于单个软件,很难兼顾到接触器合闸过程中所需考虑的电、磁、动力学等多因素<sup>[26-28]</sup>,因此文中提出了一种 Adams 与 Maxwell 联合仿真的直流接触器操动机构动作特性的仿真方法,能有效提高直流接触器机构动作特性的仿真准确性。

文中以并联双线圈式直流接触器的电磁机构为研究对象,采用多体动力学仿真软件 Adams 建立直流接触器的电磁机构动力学模型,采用电磁场分析软件 Maxwell 对直流接触器的电磁吸力进行计算;将 Maxwell 中电磁吸力的计算结果作为 Adams 电磁机构动力学模型合闸动作的激励来源,在 Adams 中进行合闸动作的仿真,并将合闸仿真结果与试验结果相对比,验证了仿真的正确性;同时考虑了弹簧参数和线圈参数的改变对合闸动作与动触头弹跳的影响。

## 1 直流接触器合闸动作的原理及仿真方法

### 1.1 直流接触器合闸原理

直流接触器的合闸过程涉及到的部件有动触头、静触头、导杆组以及动铁心和静铁心。合闸过程的原理主要是先依靠直流接触器的电磁系统外电路导通获得电能,从而导致动静铁心之间产生电磁吸力;接着由于动静铁心与动静触头之间安装的触头弹簧以及反力弹簧产生的反力的共同作用,整个系统初始的平衡状态不能够继续维持;再加上重力的作用,一定时间后直流接触器的运动部件便开始向合闸位置运动,从而产生了动触头的合闸运动过程。

电磁操动机构主要由五部分构成,分别是静铁心、动铁心、内线圈、外线圈以及磁轭,如图 1 所示。

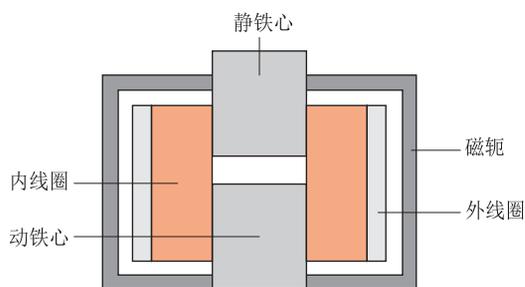


图 1 电磁机构示意

Fig.1 Schematic of electromagnetic mechanism

直流接触器电磁机构的内线圈为保持线圈,电磁机构的外线圈为起动线圈。当直流接触器电磁驱动系统外电路的内外线圈通电的时候,整个电磁系统通过磁轭部分建立起磁场,使得动铁心带动导杆组运动,动铁心和动触头分别受到力的作用运动

到合闸位置,完成直流接触器的整个合闸过程。

直流接触器的部分技术参数<sup>[29]</sup>如表 1 所示,其中触头材料为无氧铜;磁钢材料为 N42SH 钕铁硼。

表 1 直流接触器的部分技术参数

Table 1 Main technical parameters of DC contactor

参数	数值	参数	数值
总行程/mm	3	超行程/mm	1
开距/mm	2	线圈控制电压/V	12

### 1.2 直流接触器合闸过程的仿真方法

#### 1.2.1 电磁驱动系统的 Maxwell 仿真

直流接触器并联双线圈电磁机构的仿真几何模型如图 2 所示,该结构中励磁线圈采用的是双绕组并联的方式连接,双绕组线圈包含 2 个线圈,分别为起动线圈和保持线圈。

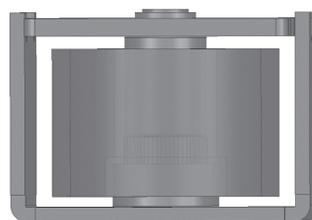


图 2 电磁机构仿真模型

Fig.2 Simulation model of electromagnetic mechanism

通过建立场路耦合的方式实现励磁绕组的特殊激励<sup>[30]</sup>,实现直流接触器电磁驱动系统的仿真须设置外电路,如图 3 所示。图 3(a)控制电路断开的时刻,电压源提供直流电压。保持线圈匝数为 1 870;起动线圈匝数为 287。保持线圈的导线截面积小、匝数多、电阻大;起动线圈的导线截面积大、匝数少、电阻小。

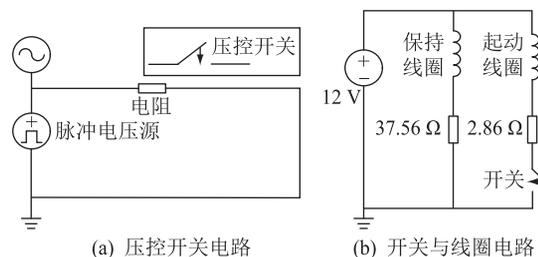


图 3 电磁驱动系统外电路

Fig.3 External circuit of electromagnetic drive system

并联双线圈式直流接触器在衔铁吸合过程中,2 个线圈并联运行作为激励源,当衔铁运动至相应位置时,断开起动线圈,由保持线圈单独工作。并联双线圈较传统单线圈有很大优势,能够减少电能消耗,减少碰撞惯量,有效提高电器的使用寿命。

#### 1.2.2 合闸过程中电磁机构的 Adams 仿真

通过利用 Maxwell 与 Adams 相结合进行仿真,

首先将 1.2.1 节中 Maxwell 计算得到的电磁力作为 Adams 建模仿真的数据输入;接着将此电磁力作为 Adams 模型中驱动力的数值来源,驱动动铁心及导杆进行合闸动作;最后通过相关设置进行仿真计算得到触头的弹跳曲线。整个合闸系统模型复杂精细,为了减少仿真研究的运算量,避免过多不必要的组件对 Adams 仿真造成过约束,有必要将原有模型进行精简,此过程在 Solidworks 中完成,检查无误后将文件导入到 Adams 中。图 4 为 Adams 输入的几何模型。由图 4 可以看出,模型结构包含静触头、动触头、导杆组、动铁心、静铁心。其中动铁心是动力元件,动铁心受到电磁吸力的作用后推动导杆组运动,并带动触头运动到合闸位置。

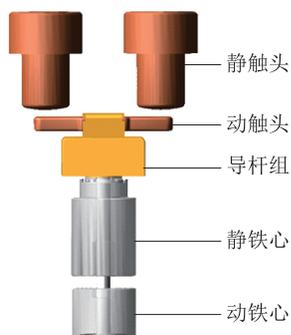


图 4 仿真几何模型

Fig.4 Simulation geometric model

对于此模型,先设置材料,动静触头为铜,动静铁心为纯铁,导杆设置为不锈钢。设置完材料之后 Adams 软件会自动为各个部件生成相应的质量、质心、转动惯量等其他的相关参数。然后根据运动机理设置运动副,2 个静触头设置为固定副,动静铁心与动静触头设置为滑动副,在导杆组与动静触头之间以及动静铁心之间添加弹簧力。添加动铁心所受到的电磁吸力作为驱动,其通过从 Maxwell 导出的电磁力数据来定义。整体设置完毕之后,将仿真时间定为 40 ms,步数设置为 500,观察机构的运行情况。电磁驱动系统运动特性求解流程如图 5 所示。

## 2 直流接触器合闸过程的仿真结果及参数分析

### 2.1 直流接触器合闸过程的仿真结果及其与试验结果对比

图 6 为不同时刻外电路线圈电流随时间变化图,  $i_{bc}$ 、 $i_{qd}$  分别为保持电流和起动电流。根据线圈电流可以看出,在动铁心被吸合的过程中,电流出现减小的现象,这是由于整个磁路受到动铁心运动

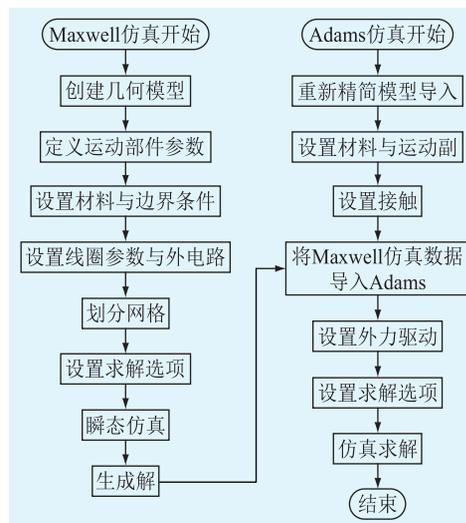


图 5 电磁驱动系统运动特性求解流程

Fig.5 Flow chart of solving motion characteristics of electromagnetic drive system

的影响,电感发生了较大的变化,此段时间内电感变化速率不断上升;在动铁心被吸合的瞬间,线圈电流达到最小值。因此可根据电流波形的变化特点判断动铁心是否运动到了合闸的位置。

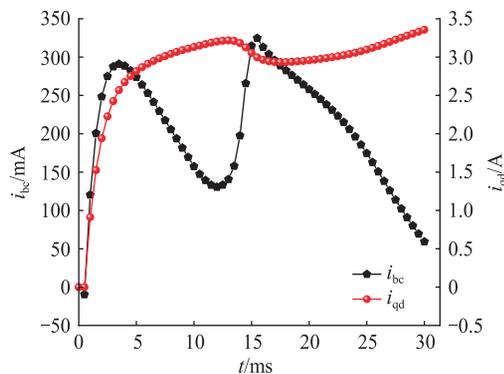


图 6 不同时刻外电路线圈电流

Fig.6 Coil currents of external circuit at different times

动触头与动铁心的位移曲线如图 7 所示,  $D_{det}$ 、 $D$  分别为动触头和动铁心的所处位置。从图 7 可以看出,动触头合闸时间约为 15.8 ms,整个合闸过程的位移为 2.6 mm,且动触头开始弹跳的时间相比动铁心略早,这是由于动静触头间距小于动静铁心间距,动铁心要多走一个超程的距离即 1 mm,导致动触头比动铁心先发生弹跳。图 7 中动铁心弹跳次数和最大位移均小于动触头,这是由于动铁心撞击时的接触面积较大,在弹跳过程中要一直受到电磁吸力的作用,而且动铁心质量较大,进一步阻止了动铁心的再次弹跳,使得其弹跳次数和时间都小于动触头。当动触头位移曲线不再波动达到平稳时,合闸过程便稳定下来了。图 8 为 20 ms 内整个接触器的运动过程,由图 8 可见,整个运动系统在 20 ms 内

完成了合闸过程,动铁心与静铁心距离逐渐减小至 0 mm。

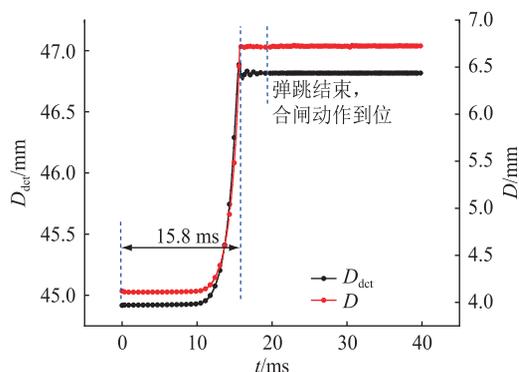


图7 不同时刻动触头与动铁心位移  
Fig.7 Moving contact and moving iron core at different times

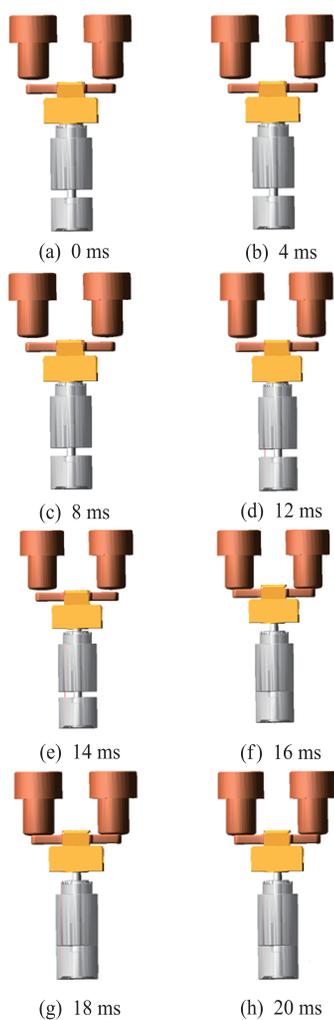
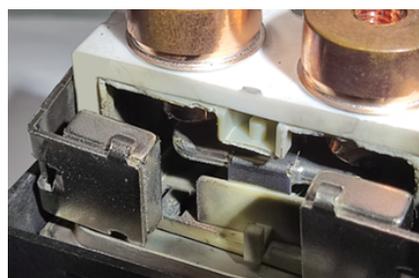
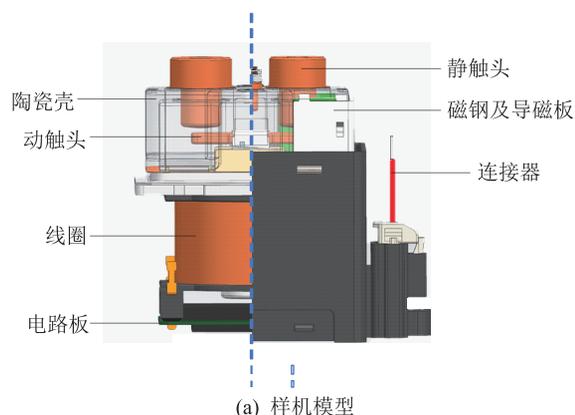


图8 电磁吸力系统运动过程

Fig.8 Motion process of electromagnetic suction system

为验证合闸动作仿真的正确性,对直流接触器进行小电流负载下的开断试验,并对触头电压及线圈电流进行记录,试验模型如图9所示。文中试验所用的直流接触器样机为典型双断点桥式直流接

触器,静触头通过螺栓可串联接入外电路中。连接器接通 12 V 直流电压时,线圈得电,动触头向上运动与静触头闭合;连接器失电时,动铁心受到的电磁吸力消失,动触头向下运动到合闸初始位置,样机完成一次合分。



(a) 样机模型  
(b) 试验样机解剖图

图9 直流接触器试验模型

Fig.9 Test model of DC contactor

直流接触器合闸动作时间测定如图10所示,合闸动作时间约为 15.6 ms。对比图7可知,合闸的仿真结果时间约为 15.8 ms,两者结果较为吻合。

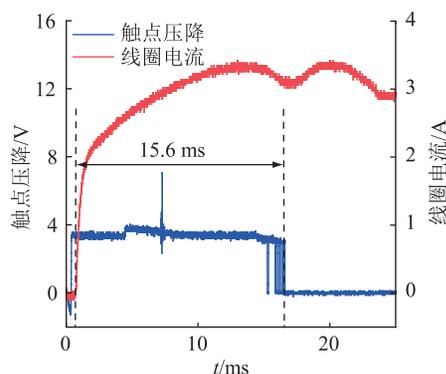


图10 直流接触器合闸动作时间测定

Fig.10 Closing action time measurement of DC contactor

## 2.2 预压力对直流接触器电磁机构合闸运动特性的影响

为了研究弹簧预压力对直流接触器驱动系统动铁心的运动影响情况,对反力弹簧分别设置不同的预压力大小,通过仿真研究对应条件下的动铁心位移变化情况。仿真结果如图11、图12所示。预

压力从 1.1 N 变化至 3.1 N 的过程中, 动铁心的运动过程为先向上运动, 接着回落, 最终又向上运动。回落的原因是电磁吸力上升的速度小于后续弹簧反力的增速; 最终向上运动是因为电磁力最终会大于反力, 使动铁心再次向上运动。在 1.1 N 与 3.1 N 预压力下的动铁心运动过程中, 由于前面的受力影响, 最终合闸时间小于 5.1 N 和 7.1 N 的合闸时间, 之后当弹簧的预压力增大到 9.1 N 时, 反力增大, 导致动铁心到达合闸位置的时间更长, 该结果反应在电流曲线上, 可以看出 5.1 N 情况下线圈的电流相对更大, 所以动铁心也更容易到达合闸位置。

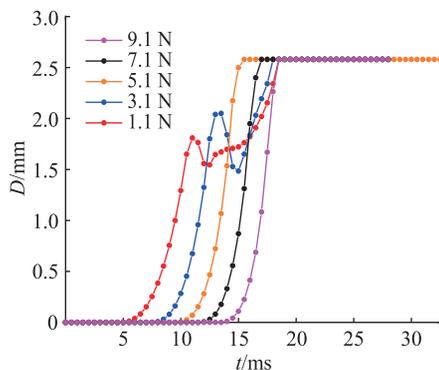


图 11 不同反力弹簧预压力下的动铁心位移变化  
Fig.11 The change of moving iron core displacement under different reaction spring pre-pressure

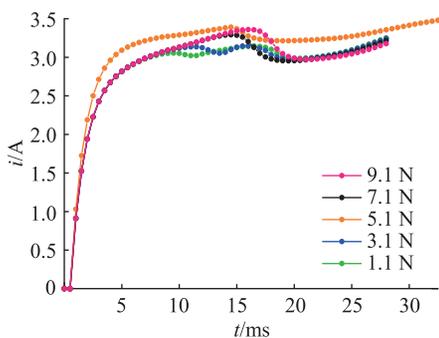


图 12 不同反力弹簧预压力下的线圈电流变化  
Fig.12 The change of coil current under different reaction spring pre-pressure

图 13、图 14 分别为不同触头弹簧预压力下的动铁心位移变化以及线圈电流变化, 在触头弹簧的预压力从 2.7 N 变化至 16.7 N 的过程中, 动铁心的位移变化不大, 但是当触头弹簧的压力达到 19.7 N 甚至 22.7 N 时, 动铁心的位移发生了先下落后上升到合闸位置的现象, 该现象导致合闸时间变长。由图 14 的电流曲线可以看出, 在预压力为 22.7 N 和 19.7 N 所对应的线圈电流波动明显, 这是由于动铁心先下落后上升运动导致磁通量变化, 从而影响线圈电流的变化, 当触头弹簧预压力明显变大时, 其线圈电流会有明显的降低。

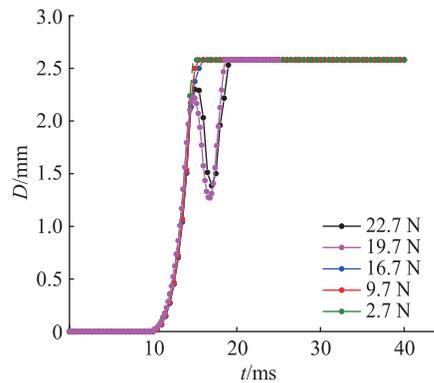


图 13 不同触头弹簧预压力下的动铁心位移变化  
Fig.13 The change of moving iron core displacement under different spring pre-pressure

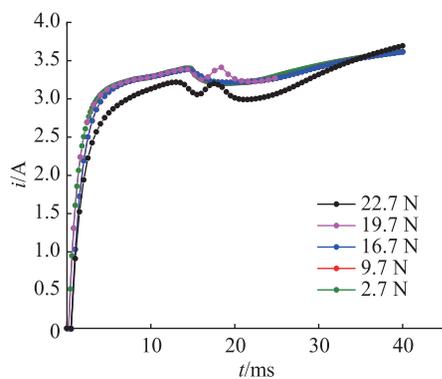


图 14 不同触头弹簧预压力下的线圈电流变化  
Fig.14 The change of coil current under different spring pre-pressure

### 2.3 起动线圈参数对直流接触器电磁机构合闸运动特性的影响

为了研究起动线圈参数对直流接触器电磁机构动铁心的运动特性影响, 对起动线圈分别设置不同的匝数以及内阻, 仿真研究对应条件下的动铁心位移变化情况, 当设置不同匝数时, 保持内阻不变, 仿真结果如图 15、图 16 所示。由图 15 可以看出, 对于起动线圈, 其匝数越多, 越有利于动铁心运动到合闸位置。由图 16 可以看出起动线圈的匝数越大, 电磁力越大。为了分析上述现象, 结合磁场强度和安匝数成正相关的理论, 计算出不同保持线圈匝数下的安匝数曲线结果如图 17 所示。即:

$$H = NI/S \quad (1)$$

式中:  $H$  为磁场强度;  $N$  为匝数;  $I$  为线圈电流;  $S$  为磁链长度。

即根据磁场强度和安匝数成正相关可以解释图 15 的现象。匝数越小, 安匝数越小, 不利于到达合闸位置。但是匝数从 288 变化至 438 的过程中电磁力和位移变化不明显, 因此选择起动线圈匝数为 288 较为合理。

不同起动线圈内阻下的动铁心位移如图 18 所

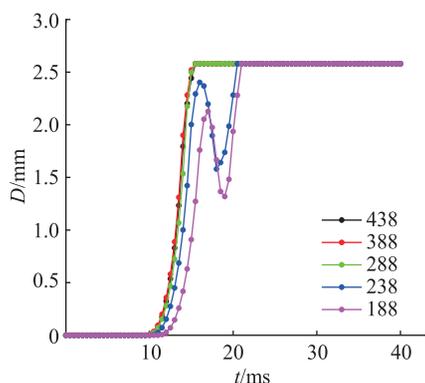


图 15 不同起动线圈匝数下的动铁心位移变化

Fig.15 The change of moving iron core displacement under different starting coil turns

此电流将趋于相同,电磁力也趋向一致。

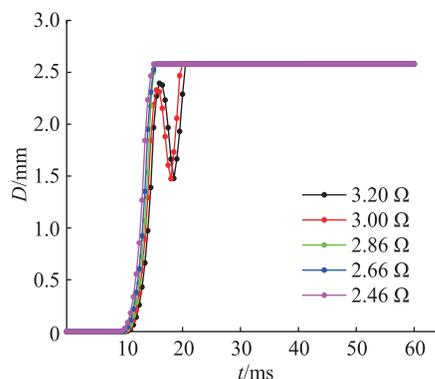


图 18 不同起动线圈内阻下的动铁心位移变化

Fig.18 The change of moving iron core displacement under different starting coil internal resistances

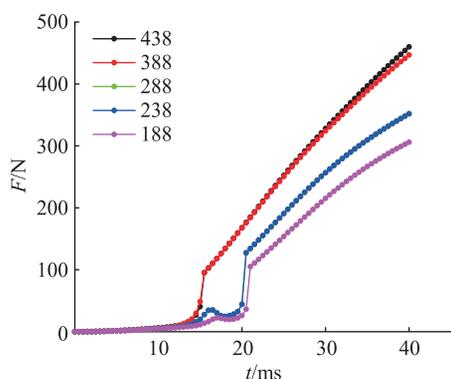


图 16 不同起动线圈匝数下的电磁力变化

Fig.16 The change of electromagnetic force under different starting coil turns

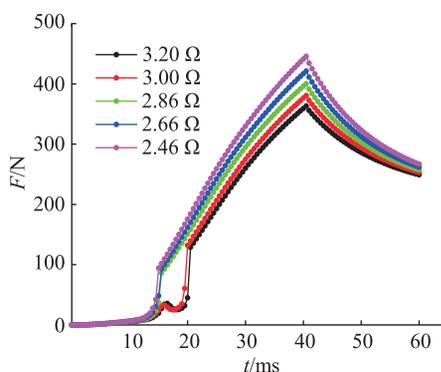


图 19 不同起动线圈内阻下的电磁力变化

Fig.19 The change of electromagnetic force under different starting coil internal resistances

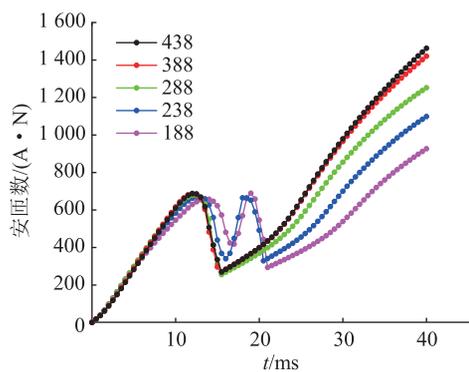


图 17 不同起动线圈匝数下的安匝数变化

Fig.17 The change of ampere turns under different starting coil turns

示。由图 18 可以看出随着起动线圈内阻的增大,由于此接触器为并联双线圈式,线圈内阻的回路为并联电路,总电阻也越大,使得驱动电流减小,合闸时间变长。不同起动线圈内阻下动铁心所受电磁力如图 19 所示。由图 19 可以看出随着线圈内阻的增大,电磁力变小,40 ms 之后起动线圈断开电路,图 19 中任一曲线的电流逐渐变小,同一曲线的电磁力也变小,但是由于保持线圈内阻始终在电路中,因

## 2.4 不同保持线圈参数对直流接触器电磁机构合闸运动特性的影响

为了研究直流接触器电磁机构内部的保持线圈参数对直流接触器电磁机构动铁心的运动特性影响,对直流接触器的外电路保持线圈分别设置不同的匝数以及内阻,仿真研究对应条件下的动铁心位移变化情况。当设置不同匝数时,线圈的内阻保持不变,仿真结果如图 20、图 21 所示。

由图 20、图 21 可以看出随着保持线圈的匝数减小,电磁吸力逐渐增大,到达合闸位置所用时间越短。

不同保持线圈匝数下的电流曲线如图 22 所示。在到达合闸位置之前,匝数越大时线圈电流越大,但是受到的电磁力却越小,不同保持线圈匝数下的安匝数曲线如图 23 所示,可以看出如果从安匝数即匝数和励磁电流乘积的角度进行分析,在 10 ms 以前,匝数 1 300 时的安匝数最大,而磁场强度和安匝数成正比,因此使得匝数 1 300 时动铁心能够更快到达合闸位置。

不同保持线圈内阻下的动铁心位移变化曲线

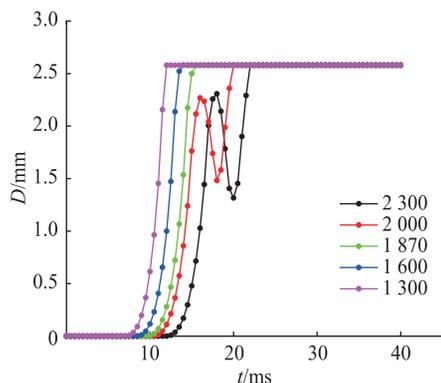


图 20 不同保持线圈匝数下的动铁心位移变化

Fig.20 The change of moving iron core displacement under different holding coil turns

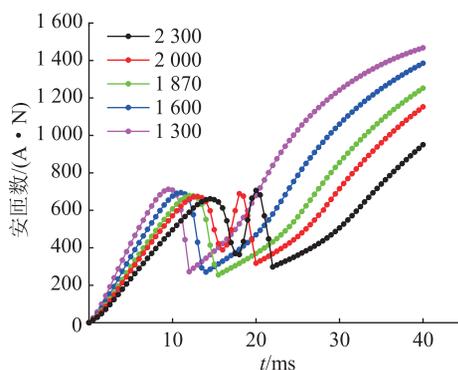


图 23 不同保持线圈匝数下的安匝数变化

Fig.23 The change of ampere turns under different holding coil turns

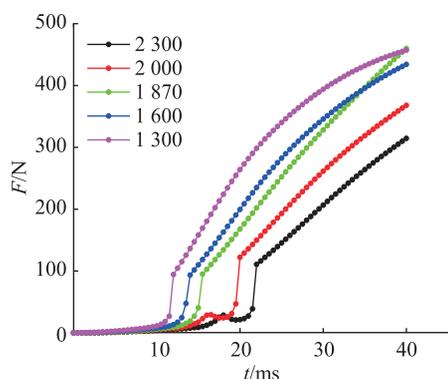


图 21 不同保持线圈匝数下的电磁力变化

Fig.21 The change of electromagnetic force under different holding coil turns

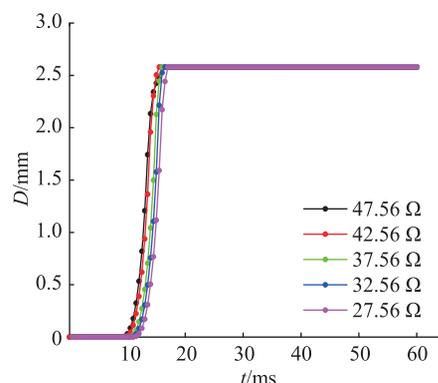


图 24 不同保持线圈内阻下的动铁心位移变化

Fig.24 The change of moving iron core displacement under different holding coil internal resistances

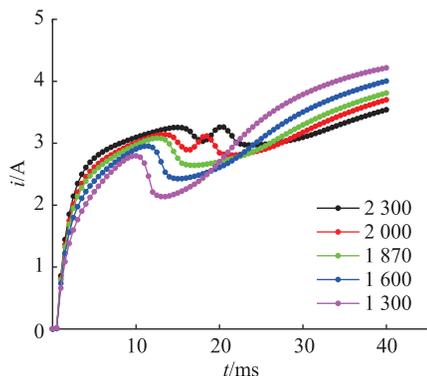


图 22 不同保持线圈匝数下的电流变化

Fig.22 The change of current under different holding coil turns

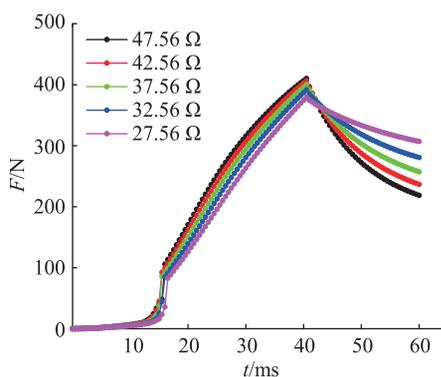


图 25 不同保持线圈内阻下的电磁力变化

Fig.25 The change of electromagnetic force under different holding coil internal resistances

如图 24 所示,随着保持线圈内阻的增大,总电阻也越大,使得驱动电流减小,合闸时间变长。

不同保持线圈内阻下的电磁力变化曲线如图 25 所示,随着线圈内阻的增大,电磁力也逐渐减小,但是 40 ms 之后启动线圈断开电路,只有保持线圈在电路中单独串联,而由于保持线圈的内阻不同,因此电流随着内阻的增大而越来越小,导致电磁力也越来越小。

## 2.5 启动和保持线圈参数对直流接触器机构合闸过程的动触头位移曲线的影响

为了研究线圈参数对直流接触器机构运动特性的影响情况,通过改变启动线圈的内阻,得到合闸过程中动触头位移随时间变化的曲线如图 26 所示。从图 26 中可以看出当阻值在 2.46~2.88 Ω 之间时,动触头的弹跳波动差异不大,但是当启动线圈的内阻增大使启动电流过低时,随着动铁心向下

运动,其到达合闸位置时动触头也会产生较大弹跳,因此起动线圈内阻不仅对动铁心到达合闸位置的时间有影响,而且对动触头的弹跳情况以及动触头最终到达合闸位置的时间也会产生影响。

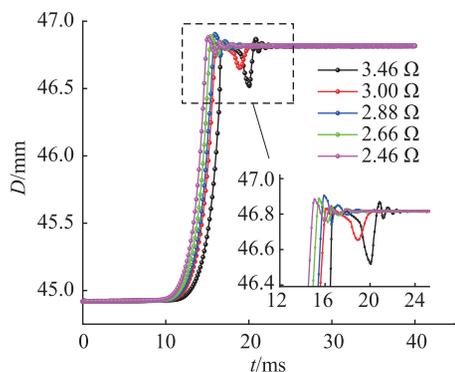


图 26 不同起动线圈内阻下的动触头位移变化

Fig.26 The change of moving contact displacement under different starting coil internal resistances

不同保持线圈匝数下的动触头位移曲线如图 27 所示,匝数越大动触头的弹跳幅度越小,由于匝数为 1 300 时产生的电磁力与其他匝数情况下的电磁力相比最大,导致系统能量最大,所以动触头为了达到稳定所需消耗的能量越多,随着匝数变大与能量减小,动触头的弹跳也越来越小,但是匝数过大时会出现动铁心降落的现象不利于合闸,因此,结合动铁心的运动时间与弹跳幅度,选择 1 870 作为实际的保持线圈匝数较合理。

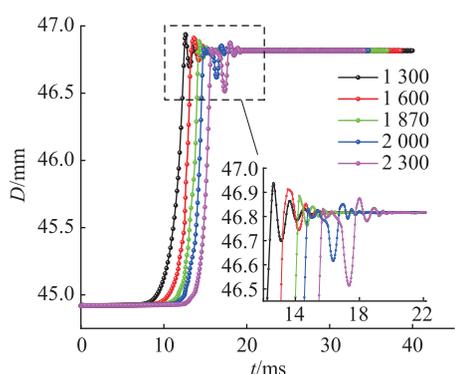


图 27 不同保持线圈匝数下的动触头位移变化

Fig.27 The change of moving contact displacement under different holding coil turns

### 2.6 触头和反力弹簧预压力对直流接触器机构合闸过程中触头弹跳变化曲线的影响

不同触头弹簧预压力下的触头弹跳变化曲线如图 28 所示,在合闸位置附近动触头会发生弹跳而且预压力为 2.7 N 时动触头的弹跳最大,随着预压力的增大动触头的弹跳幅度减小,当预压力增大到 19.7 N 时由于反力过大不利于动触头到达合闸位置,因为根据图 7 可以看出反力过大触头会先掉落

一段距离然后才能够到达合闸位置。

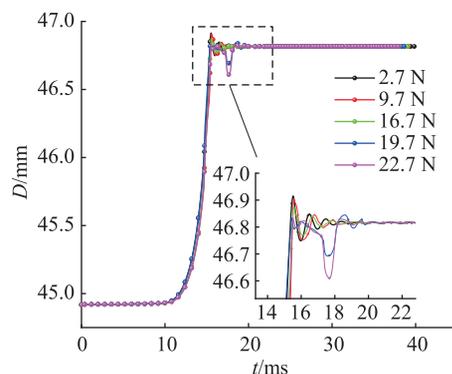


图 28 不同触头弹簧预压力下的触头弹跳变化

Fig.28 The change of contact bounce under different spring pre-pressures

不同反力弹簧预压力下的触头弹跳变化曲线如图 29 所示,结合图 7,在 1.1~3.1 N 的时候动铁心先下落小部分,导致动触头虽然弹跳幅度小,但是持续时间和反力弹簧预压力在 5.1~9.1 N 范围内的弹跳时间接近,从 5.1~9.1 N 的位移曲线可以看出随着反力弹簧预压力增大,触头弹跳幅度减小,反力弹簧预压力选择应为动铁心的合闸时间尽量小以及保证动触头弹跳在可接受范围内,因此选择 5.1 N 作为反力簧预压力较为合理。

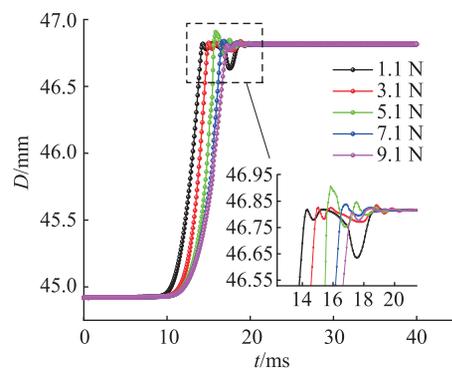


图 29 不同反力弹簧预压力下的触头弹跳变化

Fig.29 The change of contact bounce under different reaction spring pre-pressures

## 3 结论

文中建立直流接触器的电磁机构有限元仿真模型,结合运动学理论,仿真分析了电磁机构的电磁场分布规律以及合闸运动特性,并研究弹簧预压力、线圈匝数等参数对直流接触器电磁机构合闸运动特性的影响,得到以下结论:

(1) 通过对直流接触器电磁机构动作特性的电磁仿真,得到动铁心的运动曲线,仿真结果表明,在仿真各参数为直流接触器的额定参数的情况下,电磁机构在 15.8 ms 左右向合闸方向运动 2.6 mm 到

达合闸位置,完成合闸过程。

(2) 弹簧预压力对合闸过程影响的仿真结果表明,反力弹簧预压力在 5.1 N 左右的动铁心能更快地更稳定地到达合闸位置,线圈电流相对更大;触头弹簧的预压力从 2.7 N 变化至 16.7 N 时动铁心的位移变化不大,但是在触头弹簧的压力到达 19.7 ~ 22.7 N 的过程中,动铁心的位移发生了先下落后上升到合闸位置的现象,导致合闸时间变长。对于并联双线圈式直流接触器而言,在一定范围内的触头弹簧预压力变化对动铁心的位移变化影响不大;当触头弹簧过大,达到某临界时,动铁心的位移会产生先下落后上升的现象,从而增大了合闸时间,因此在选择触头弹簧预压力时不能过大。

(3) 线圈参数对合闸过程影响的仿真结果表明,起动线圈匝数在 188 ~ 438 的变化过程中,匝数越大,合闸越快,但匝数在 288 ~ 438 的变化过程中合闸速度变化不明显,因此实际起动线圈参数匝数选择 288,保持线圈匝数为 1 300 时,其安匝数最大,动铁心到达合闸位置的时间越短,但考虑到动触头弹跳问题,安匝数过大时动触头达到稳定所需要的能量也增大,导致动触头弹跳过大,结合动铁心运动时间及弹跳幅度,保持线圈匝数选择 1 870 更合适。对于线圈匝数的变化,安匝数越大,磁场越强,动铁心越容易到达合闸位置,但是匝数增大到某个范围动铁心的合闸时间减小的不明显,因此需要合理选用线圈的匝数。

(4) 线圈内阻对合闸过程影响的仿真结果表明,起动线圈与保持线圈内阻增大都会导致驱动电流减小,合闸时间变长。起动线圈内阻在 2.46 ~ 2.88  $\Omega$  变化时动触头弹跳变化不大,但内阻增大导致起动电流数值过小时,随着动铁心向下运动,其到达合闸位置时动触头也会产生较大弹跳。线圈内阻不仅对动铁心到达合闸位置时间有影响,而且对动触头弹跳以及最终到达合闸位置的时间也会有影响。

#### 参考文献:

- [1] 辜飞,胡凤生,李杰. 一种高压直流接触器的设计[J]. 时代汽车,2019(19):63-67.  
GU Fei, HU Fengsheng, LI Jie. Design of a high voltage DC contactor[J]. Auto Time, 2019(19):63-67.
- [2] 陈伟刚. 直流接触器灭弧时间试验分析[J]. 低压电器,2014(5):12-14.  
CHEN Weigang. Test analysis of DC contactor quenching time [J]. Low Voltage Apparatus, 2014(5):12-14.
- [3] 谭辉,孔祥福,曾凡涛. 新能源发电技术研究综述[J]. 山东工业技术,2014(23):173-174.  
TAN Hui, KONG Xiangfu, ZENG Fantao. Review on new energy power generation technology[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(23):173-174.
- [4] 郑立新. 低压直流电器产品国内外发展动态分析[J]. 福建轻纺,2012(12):27-31.  
ZHENG Lixin. Dynamic analysis of low-voltage DC electrical products at home and abroad[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2012(12):27-31.
- [5] 钟成元,桂前进,江千军,等. 数据驱动的高比例新能源发电集群分布式电压控制[J]. 全球能源互联网,2022,5(3):251-260.  
ZHONG Chengyuan, GUI Qianjin, JIANG Qianjun, et al. Data-driven distributed voltage control for high-penetration renewable power clusters without complete model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3):251-260.
- [6] 温佳鑫,卜思齐,陈麒宇,等. 基于数据学习的新能源高渗透电网频率风险评估[J]. 发电技术,2021,42(1):40-47.  
WEN Jiaxin, BU Siqi, CHEN Qiyu, et al. Data learning-based frequency risk assessment in a high-penetrated renewable power system[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):40-47.
- [7] MECKLER P, GERDINAND F, WEISS R, et al. Hybrid switches in protective devices for low-voltage DC grids at commercial used buildings[C]//ICEC 2014; The 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden, Germany. VDE, 2014:1-6.
- [8] LINDMAYER M. Simulation of switching arcs under transverse magnetic fields for DC interruption[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(2):187-194.
- [9] 王海涛,杨博. 直流接触器触头电弧侵蚀特性[J]. 电力工程技术,2023,42(3):53-60.  
WANG Haitao, YANG Bo. Arc erosion characteristics of DC contactor contacts[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3):53-60.
- [10] 李思泓. 高压直流接触器电弧分断关键技术研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(6):15-19.  
LI Sihong. Research on key technology of HVDC contactor arc breaking[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(6):15-19.
- [11] 贾博文,武建文,夏尚文,等. 直流自然换流式接触器设计与均压开断研究[J]. 电工技术学报,2021,36(20):4371-4378.  
JIA Bowen, WU Jianwen, XIA Shangwen, et al. Design and uniform voltage breaking research of a DC natural current commutation contactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20):4371-4378.
- [12] MASUGATA K, MAEKAWA H, YOSHIDA M, et al. Characteristics of high-current pulsed arc discharge [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(10R):5487.
- [13] CHEN Y, DICKENS J, MANKOWSKI J, et al. Optimization of a low jitter, 50 kV, 100 Hz triggered spark gap with high pressure gas mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4):971-978.
- [14] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京:机械工业出版社,1991.  
WANG Qiping. Electric arc theory [M]. Beijing: China Ma-

- chine Press, 1991.
- [15] 郑殿春. 气体放电数值仿真方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
ZHENG Dianchun. Numerical simulation methods for gas discharge[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] 陈德桂. 低压电器仿真与数字化设计技术的进展[J]. 电器与能效管理技术, 2014(15): 1-6.  
CHEN Degui. The progress of simulation and digital design technology for low voltage apparatus[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(15): 1-6.
- [17] 孙鹏, 马少华. 电器学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
SUN Peng, MA Shaohua. Electrics [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [18] 蒋培基. 机车用直流接触器电磁线圈参数的快速设计[J]. 现代制造技术与装备, 2020(5): 27-29.  
JIANG Peiji. Quick design of electromagnetic coil parameters of DC contactor for locomotive [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(5): 27-29.
- [19] 孔凡良, 马子文, 肖文华, 等. 基于 Maxwell 的串联双线圈电磁机构动态仿真[J]. 船电技术, 2020, 40(4): 39-43.  
KONG Fanliang, MA Ziwen, XIAO Wenhua, et al. Dynamic simulation of electromagnetic mechanism with double coil in series based on Maxwell[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(4): 39-43.
- [20] 倪素娟, 苏秀苹, 李洪涛, 等. 串联双线圈直流接触器电磁机构动态特性仿真与试验研究[J]. 低压电器, 2011(15): 5-9.  
NI Sujuan, SU Xiuping, LI Hongtao, et al. Simulation and experimental research on dynamic characteristic of DC contactor with series double coils [J]. Low Voltage Apparatus, 2011(15): 5-9.
- [21] 赵晓东, 杨文英, 雒锋锋, 等. 串联双绕组式大功率直流接触器动态特性仿真研究[J]. 低压电器, 2011(11): 1-5, 13.  
ZHAO Xiaodong, YANG Wenying, LUO Fengfeng, et al. Simulation research on dynamic characteristics of high-power DC contactor with double windings in series[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(11): 1-5, 13.
- [22] 唐武进, 耿英三, 陈德桂, 等. 基于三维有限元的直流接触器电磁系统特性计算[J]. 机床电器, 2004, 31(4): 9-12.  
TANG Wujin, GENG Yingsan, CHEN Degui, et al. Calculation of DC contactor's electromagnetic system property based on 3D finite element [J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2004, 31(4): 9-12.
- [23] 黄克鹏, 王发展, 赵明基, 等. 接触器触头弹跳行为规律分析及算法优化[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(8): 103-113.  
HUANG Kepeng, WANG Fazhan, ZHAO Mingji, et al. Analysis and algorithm optimization of contact bounce behavior of contactors [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 103-113.
- [24] 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.
- [25] 汤龙飞, 许志红. 接触器斜率控制器的类 PID 整定[J]. 南昌大学学报(工科版), 2017, 39(4): 404-408.  
TANG Longfei, XU Zhihong. Similar-PID tuning of the contactor slope controller [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2017, 39(4): 404-408.
- [26] 辛超, 么梅枝, 张革, 等. 基于 Maxwell 3D/ADAMS 的交流电磁接触器仿真分析[J]. 低压电器, 2010(11): 14-16, 28.  
XIN Chao, YAO Meizhi, ZHANG Ge, et al. Simulation of AC electromagnetic contactor based on Maxwell 3D/ADAMS [J]. Low Voltage Apparatus, 2010(11): 14-16, 28.
- [27] 杜太行, 崔景瑞, 孙曙光, 等. 基于混合式仿真模型的交流接触器动态特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 187-194.  
DU Taihang, CUI Jingrui, SUN Shuguang, et al. Study on dynamic characteristics of AC contactor based on hybrid simulation model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 187-194.
- [28] 黄仁灿. 基于 Maxwell 的交流接触器电磁系统优化仿真[J]. 电气开关, 2018, 56(5): 48-52.  
HUANG Rencan. Option of AC contactor's electronic-magnetic system based on Maxwell [J]. Electric Switchgear, 2018, 56(5): 48-52.
- [29] 周茂祥. 低压电器设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.  
ZHOU Maoxiang. Low-voltage electrical apparatus design manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992.
- [30] 林梓圻, 周贺, 牛林华, 等. 隧道敷设条件下超高压电力电缆热-流场耦合分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 216-223.  
LIN Ziqi, ZHOU He, NIU Linhua, et al. Thermal-fluid coupling analysis of ultra-high voltage cables laid in tunnel [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 216-223.

作者简介:



鄢呈昀

鄢呈昀(1999),男,硕士在读,研究方向为电力开关设备操动机构优化设计(E-mail: 2293843272@qq.com);

王立军(1975),男,博士,教授,研究方向为开关电器电弧理论及其应用、电力设备数字化设计及智能运维、放电等离子体技术及其应用;

张闻哲(1998),男,硕士在读,研究方向为断路器机构优化设计、试验电源的优化设计。

## Closing action characteristics of the electromagnetic mechanism of the parallel double coil type DC contactor

YAN Chengyang, WANG Lijun, ZHANG Wenzhe, HUANG Yifan, WANG Kai

(Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

**Abstract:** DC contactor is one of the most widely configured switching appliances in new energy systems and electric vehicles. The dynamic characteristic of DC contactor is one of the important indexes to measure the performance of DC contactor. A dynamic model of the electromagnetic mechanism of DC contactor with parallel double coil type is established in this paper. Dynamical model of the electromagnetic mechanism of DC contactor is simulated. The closing process simulation analyzed of the electromagnetic mechanism of DC contactor by using the co-simulation research method based on Adams and Maxwell. The research results show that the simulation closing time of the closing action the mechanism is consistent with the test closing time. The correctness of the simulation method is verified. At the same time, the influence of spring parameters, coil parameters and other factors on the closing motion characteristics of the mechanism is studied. The change of spring pre-pressure has little influence on the closing time within a certain range. The increase of coil ampere turns will lead to the decrease of closing time, the increase of coil internal resistance will lead to the increase of closing time and the more severe bouncing of moving contact. The simulation method and results can provide some reference for the improvement design and optimization of DC contactor electromagnetic mechanism.

**Keywords:** DC contactor; parallel double coil type; electromagnetic mechanism; closing action; dynamic simulation; electromagnetic coupling

(编辑 吴昊)

(上接第 173 页)

## Resident non-invasive load identification algorithm based on prior statistical model

ZHAO Cheng<sup>1</sup>, SONG Yanxin<sup>1</sup>, ZHOU Gan<sup>2</sup>, FENG Yanjun<sup>2</sup>, GUO Shuai<sup>1</sup>, LI Jiwei<sup>1</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Beijing 100080, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In this paper, a non-intrusive load identification algorithm for residents based on prior knowledge and statistical learning model is proposed to solve the problem of insufficient electric heating subdivision capability in traditional identification technology. In this paper, the electric heating subdivision research is carried out for the auxiliary heating equipment of washing machine, electric kettle, electric rice cooker, electric water heater. The subdivision of auxiliary heating equipment is realized through the equipment operation association algorithm, and the model training of non-auxiliary heating equipment classification is realized based on the limited feedback information of users and expert annotation. The experimental results show that the technical framework proposed in this paper realizes the subdivision of electric heating equipment on the basis of the event detection load identification algorithm and F1 score above 0.9 is achieved in the decomposition of operation state.

**Keywords:** non-intrusive load monitoring (NILM); event detection; subdivision of electric heating equipment; statistical analysis; Gaussian mixture model (GMM); support vector machine (SVM)

(编辑 李栋)