

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.09.028

耦合磁吹和触头运动的直流接触器电弧特性研究

武稼祥¹, 于丽琴², 常东旭¹, 张艺博¹, 朱博¹, 秦聪³, 葛国伟³

(1. 国网河南省电力公司直流中心, 郑州 450052; 2. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001;

3. 郑州大学电气与信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 磁吹结构和运动机构特性是影响直流接触器电弧开断性能的重要因素。文中引入灭弧室中非均匀磁场分布与动触头运动特性的耦合影响, 构建了电、磁、气流、温度等多场耦合的二维电弧磁流体动力学仿真模型, 分析了不同磁吹结构、反力弹簧刚度系数、触头超程等参数对直流电弧特性的影响。搭建了直流接触器电弧特性实验平台, 开展了对比实验验证仿真结果。研究表明: 提出在静触头之间增加中间永磁体的两种新型磁吹结构, 较原结构燃弧时间分别缩短20.2%与14.7%, 在电极下方磁吹结构增加中间永磁体的提升效果更好; 反力弹簧刚度系数的最优选择为1.0 N/mm, 最佳触头超程为1.5 mm, 实验与仿真结果相符, 为提升陶瓷密封直流接触器分断能力的优化设计提供参考依据。

关键词: 直流接触器; 磁流体动力学; 磁场; 触头运动; 电弧特性

Study on DC Contactor Arc Characteristics Coupled with Magnetic Field and Contact Motion

WU Jiexiang¹, YU Liqin², CHANG Dongxu¹, ZHANG Yibo¹, ZHU Bo¹, QIN Cong³, GE Guowei³

(1. State Grid Henan Electric Power Company DC Center, Zhengzhou 450052, China; 2. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The characteristics of magnetic blowing structure and motion mechanism are important factors affecting the arc breaking performance of DC contactor. In this paper, the coupling effect of non-uniform magnetic field distribution and moving contact motion characteristics in the arc extinguishing chamber is introduced. A two-dimensional arc magnetohydrodynamic simulation model with multi-field coupling of electricity, magnetism, airflow and temperature is constructed. The effects of different magnetic blowing structures, reaction spring stiffness coefficients, contact over-range and other parameters on DC arc characteristics are analyzed. An experimental platform for DC contactor arc characteristics was built, and comparative experiments were carried out to verify the simulation results. The results show that the arcing time of the two new magnetic blowing structures with intermediate permanent magnets between the static contacts is shortened by 20.2% and 14.7% respectively compared with the original structure, and the effect of increasing the intermediate permanent magnets under the electrode is better. The optimal choice of the stiffness coefficient of the reaction spring is 1.0 N/mm, and the optimal contact over-range is 1.5 mm. The experimental results are consistent with the simulation results, which provides a reference for the optimal design of improving the breaking capacity of the ceramic seal DC contactor.

Key words: DC contactor; magnetohydrodynamic; magnetic field; contact motion; arc characteristics

收稿日期:2024-03-08; 修回日期:2024-06-22

基金项目:中国博士后科学基金项目(2023M741847)。

Project Supported by China Postdoctoral Science Foundation(2023M741847).

0 引言

陶瓷密封直流接触器在中压直流配网、直流充电桩和储能直流系统取得广泛应用。高可靠性、大容量、长寿命直流接触器是未来发展趋势和方向^[1-4]。

国内外在直流接触器直流电弧和机构运动特性方面展开研究的较多。在电弧仿真方面,基于磁流体动力学的磁流体仿真已经成为电弧研究的重要手段^[5-12]。Lindmayer等建立低压电器空气电弧模型,通过边界层设置电导率与电流密度来近似电弧鞘层,研究电弧运动、分割过程中电弧弧根的变化^[13]。钱宇建立二维磁吹直流空气电弧模型,对开断过程中电弧温度场、气流场及弧根跃迁现象进行分析^[14]。Bo Kai针对电弧停滞行为,建立二维氮气电弧模型并将仿真结果与实验测量得到的电弧电压相对照,证明其有效性^[15]。史岩建立直流接触器的二维电弧仿真模型,分析不同条件下电弧的运动特性,得到合理的结构设计参数^[16]。赵杰等提出一种磁流体仿真与正交实验融合设计的新方法,研究多种因素等对灭弧性能的影响,得出优化因素组合及变量范围^[17]。Gieizes等通过建立三维MHD模型研究了电弧在不同气体情况下的运动速度特性^[18]。Huang仿真计算灭弧室中加装金属栅片时的电弧特性以及电弧弧根在磁场中的运动特性,证明栅片与磁场均有利于电弧熄灭^[19]。Liu利用电弧模型模拟氮、氢和氮氢混合物中的电弧特性以及磁场中电弧根部运动的特性^[20]。Jiang建立了气体机械开关电弧模型,对不同工况下的电弧运动过程进行了仿真计算^[21]。

上述国内外的动态电弧仿真模型,通常会采取以下两种措施来简化计算:一是在面对复杂的机械运动时,忽略触头的运动或将触头的运动视为匀速运动;二是不考虑灭弧室中磁场分布,将其视为恒定磁场^[22-26]。采取上述措施后,电弧仿真计算效率高,收敛性较好,但是由于触头运动特性和磁场分布均与实际有较大差别,导致仿真结果存在误差,且无法深入研究灭弧室中的磁吹结构和电磁机构对于分断电弧的影响与电弧的作用机理。

文中以直流接触器作为研究对象,提出建立耦合吹弧磁场与动作特性的电弧仿真模型的多物理场仿真方案,将非均匀磁场分布与动触头非匀速运动特性引入到电弧仿真中,对多种影响因素下的电弧特性进行研究,并利用实验平台开展实验进行验证。该研究不仅可为直流接触器的优化设计提供参考依据,同时对其他类型的开关电器的电弧仿真具有一定指导意义。

1 动态电弧仿真模型

1.1 仿真原理

针对现有电弧仿真中只考虑均匀磁场与动触头匀速运动问题,建立耦合电、磁、流体、温度等多物理场的二维MHD电弧模型,在模型中引入灭弧室非均匀磁场分布与动触头动态位移特性,能够更真实地反映电弧在灭弧室内的运动规律,提高了仿真的准确性。电弧仿真的具体流程见图1。首先建立永磁体三维磁场仿真模型、电磁机构的二维动态仿真模型和二维稳态电弧模型。其次提取截面磁场分布与动触头时间位移曲线以及稳态电弧模型中的温度场分布。再次,建立动态电弧模型,此模型中磁场的边界条件为永磁体仿真得到的截面磁场,动触头的网格位移为电磁机构动态特性中的时间—位移曲线,温度场的初始值为稳态电弧的仿真结果,最后得到耦合非均匀磁场与动触头位移特性的动态电弧仿真结果。由于仿真模型中磁场强度与动触头的运动速度不再是恒定值,收敛性会下降。采取以下举措提高模型的收敛性:①将稳态电弧的仿真结果作为动态电弧的初始值;②在施加电路激励时,不是直接使用恒定电源,而是利用斜坡函数的方式进行施加;③在计算过程中,使用自动重新剖分网格的方式进行网格更新。

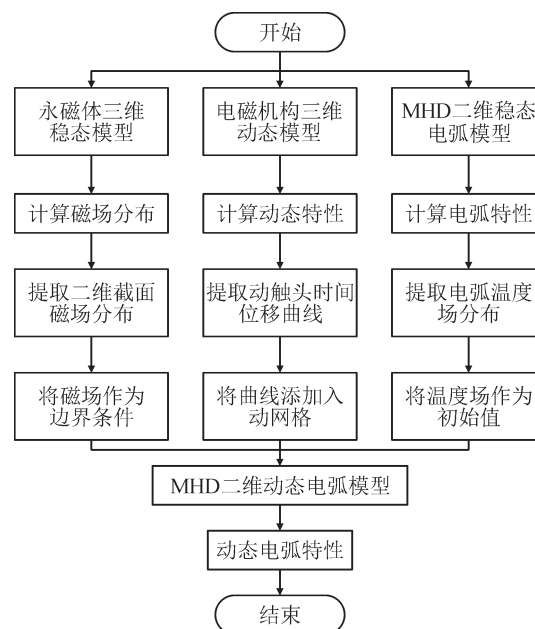


图1 电弧仿真流程

Fig. 1 Flow chart of arc simulation

电弧过程包括多个物理场的耦合,涉及到热场、电磁场与流体场,电弧的物性参数主要有密度、恒压热容、热导率、电导率、动力粘度等,这些参数的值与气压和温度有关。电弧中的耦合关系见

图2。4个物理场中通过气压与温度这两个因素来影响物性参数,而物性参数又会反向影响物理场的特性。

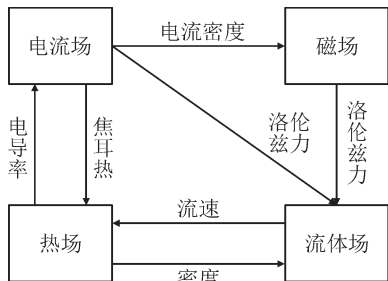


图2 电弧的多场耦合关系

Fig. 2 Multi-field coupling relationship of arc

电流场与热场的相互影响体现在焦耳热与电导率,电磁场通过洛伦兹力来影响流体场,电流场中的电流密度代入安培定律计算磁场特性,热场与流体场通过流速与密度相互作用,最终完成4个物理场之间的耦合。

1.2 几何模型

文中所研究的直流接触器结构见图3。其整体由灭弧室与电磁机构两部分构成。灭弧室中包含有触头与磁吹结构。触头系统包括静触头与动触头,用于主回路的接通与分断。磁吹结构为永磁体,根据不同的设计要求,安装在触头周围。电磁机构主要包括线圈、线圈骨架、反力弹簧、超程弹簧、导杆、轭铁板、动铁心、轭铁桶与导磁轴衬等部件。接触器样机实物图见图4,样机的尺寸及主要参数见表1,其动静触头均为无氧铜材质。

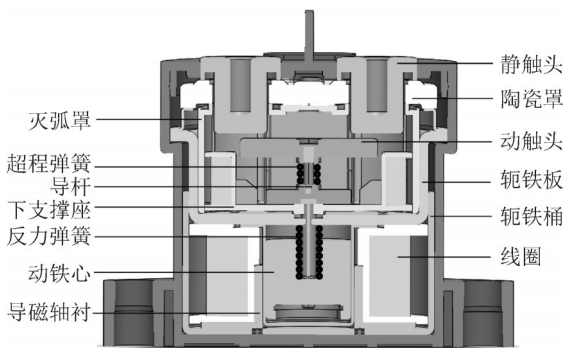


图3 直流接触器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of DC contactor

触头结构见图5,其为桥式双断口半接触型触头。电弧仿真主要关注图5中的(点划线部分)截面。仿真区域为长30 mm,宽15 mm的矩形,动静触头之间的初始间距为0.2 mm,与稳态电弧模型中的间距保持一致。

1.3 假设条件

由于动态电弧涉及到多个物理场的耦合,为降低模型的复杂程度,采用假设条件有:电弧为热等离子体,其宏观状态为局部热力学平衡态;不计及



图4 直直接触器实物图

Fig. 4 DC contactor physical diagram

表1 直流接触器样机参数

Table1 DC contactor prototype parameters

参数	数值
额定电压/V	750
额定电流/A	250
整体尺寸/mm	80×60×75
重量/kg	0.4
静触头半径/mm	5
动触头尺寸/mm	27×10×3

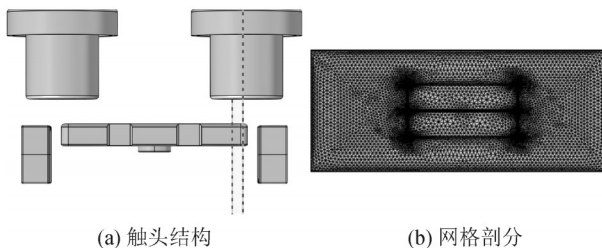


图5 触头结构和网格剖分示意图

Fig. 5 Diagram of contact structure and mesh dissection

从触头间蒸发的铜蒸汽,不考虑电弧对于灭弧室内壁烧蚀;电弧为可压缩牛顿流体,流动方式为层流;不考虑近极鞘层对电弧特性的影响^[27-29]。

1.4 控制方程

计算动态电弧特性的关键在于电磁场与流体场,其中电磁场利用麦克斯韦方程组求解,流体场中要用到质量守恒方程、能量守恒方程与动量守恒方程,具体方程如下^[30-32]。

1)质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为电弧等离子体的密度; t 为时间; $\mathbf{v}$ 为电弧的运动速度。

2)动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \left\{ -p \mathbf{I} + \mu [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] \right\} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: p 为电弧流体压力; μ 为动力粘度;

I 为单位矩阵; F 为洛伦兹力; J 为电流密度; B 为磁感应强度。

电弧的运动在微观角度实际是带电粒子在磁场中的运动, 运动过程会受到洛伦兹力的作用, 此处的磁场包括两部分, 一是电弧本身的自感磁场, 而是在灭弧室中的永磁磁吹结构在电弧燃烧区域的横向磁场, 一般外加磁场要大于自感磁场。

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho H v) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla H \right) + S_H \quad (4)$$

$$S_H = \frac{1}{\sigma} J^2 - S_{\text{rad}} + S_\phi \quad (5)$$

$$S_\phi = \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{k_B T}{2e} \left(\frac{\lambda}{c_p} + 5 \right) \right] (\nabla T \cdot J) \quad (6)$$

式(4)~(6)中: H 为焓; λ 为热导率; c_p 为恒压热容; T 为绝对温度; S_H 为电弧中的热量, 其由3部分构成: ①为焦耳热; ② S_{rad} 为体积净辐射损失; ③为 S_ϕ 焓传递。 k_B 为 Boltzmann 常数; e 为单位电荷量。

4) 电磁场控制方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi) = 0 \\ E = -\nabla \varphi - \frac{\partial A}{\partial t} \\ J = \sigma E \\ \nabla \times A = B \\ H = -\nabla \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: φ 为标量电位; σ 为电导率; E 为电场强度; A 为矢量磁位; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为钕铁硼材料的相对磁导率; H 为磁场强度。

1.5 边界条件

电弧仿真模型物理场的边界条件是由各个物理场的相关基本理论决定的。

其中电流场中电流从动触头流入静触头流出, 动触头设置为终端与电路模块进行耦合, 静触头设置为接地, 仿真区域的内壁设定为电绝缘, 电流不会由此通过。在磁场中, 仿真模型外边界为磁绝缘, 背景磁通为永磁体仿真得到的截面磁场分布。

在层流场中, 动静触头的边界设定为壁, 其条件为无滑移, 仿真模型中气体域的压强与接触器灭弧室中的压强相同。在热场中, 仿真模型外边界为热绝缘, 内部的初始温度为稳态电弧的温度分布。根据电流流向, 在多物理场接口平衡放电边界热源的电极属性中, 将静触头设置为阴极, 动触头为阳极。

2 电弧仿真分析

2.1 磁吹结构对电弧特性的影响

在磁吹结构中, 永磁体产生的磁场大小直接影

响灭弧效果, 磁场越强, 灭弧效果越好。永磁体产生的磁感应强度足够, 并且结构合理, 可以快速拉长电弧, 极大地缩短电弧熄灭的时间, 减少对触点表面的烧灼, 提高接触器的使用寿命。

目前市场上应用的无极性磁吹结构见图6。两种结构包括两块尺寸与磁场强度相同永磁体。由于两种结构中的永磁体之间的距离较大, 磁效应会被削弱, 因此灭弧效果一般。

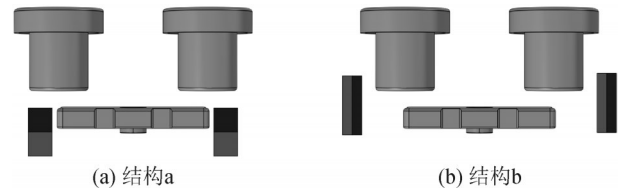


图6 两种现有磁吹结构示意图

Fig. 6 Two magnetic blowing structures

为进一步增强电弧燃烧区域的磁场强度, 提高接触器的灭弧能力, 提出两种新型磁吹结构, 见图7。两种磁吹结构在原有结构中静触头之间增加一块永磁体, 其中心位于静触头中心连线的中点。

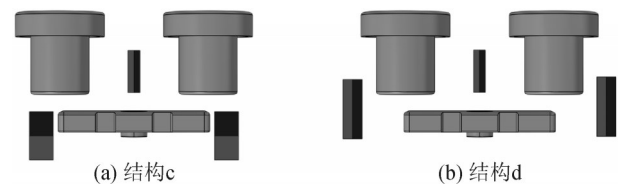


图7 两种新型磁吹灭弧结构示意图

Fig. 7 Two new magnetic blowing structures

4种结构的截面磁场分布见图8。图8(a)中的结构a、c截面磁场分布近似椭圆形, 但由于中间永磁体, 使得图8(c)中的结构c的磁场在 y 方向上的磁场更强, 在触头之间的等值线更为稀疏、磁场较大的区域略有上移。图8中的结构b、d的截面磁场分布近似正圆形, 同样因为中间永磁体, 结构d的磁场强度更大, 磁场较大的区域有明显上移。4种结构中磁感应强度按照由大到小排序依次为结构c、d、a、b, 中间永磁体增强了燃弧区域的磁场, 有利于灭弧。

图8(a)、(c)结构的电弧仿真结果见图9, 图8(b)、(d)结构的电弧仿真结果见图10。由图9(a)中可知, 结构a在0.34 ms时电弧开始运动, 而图9(b)中结构c在0.29 ms开始运动, 二者电弧到达灭弧室内壁的时间分别为1.55、1.46 ms, 熄弧时间分别为2.52、2.01 ms, 结构c比结构a缩短20.2%。由图10(a)中可知, 结构b在0.52 ms时电弧开始运动, 而图10(b)中结构d在0.48 ms开始运动, 二者电弧到达灭弧室内壁的时间分别为2.14、2.05 ms, 熄弧时间分别为3.96、3.34 ms, 图10(b)中结构d比图10(a)中结构b缩

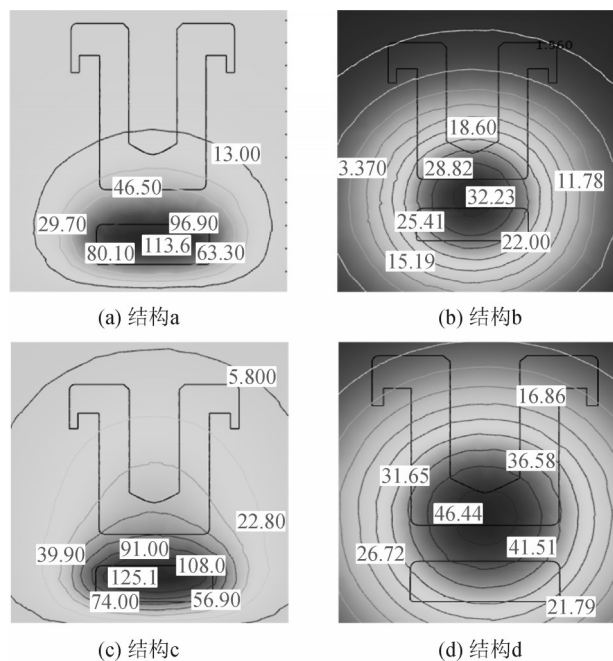


图8 4种磁吹结构截面磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution of four structures

短14.7%。由此可得,增强中间永磁体可缩短电弧开始运动时所用的时间、电弧吹弧时间以及总的燃弧时间,说明增强磁场对于拉弧和吹弧阶段都有一定效果,其中图9(b)中结构c相比于图10(b)中结构d的提升效果更强,中间永磁体的加入增强了接触器的灭弧能力。

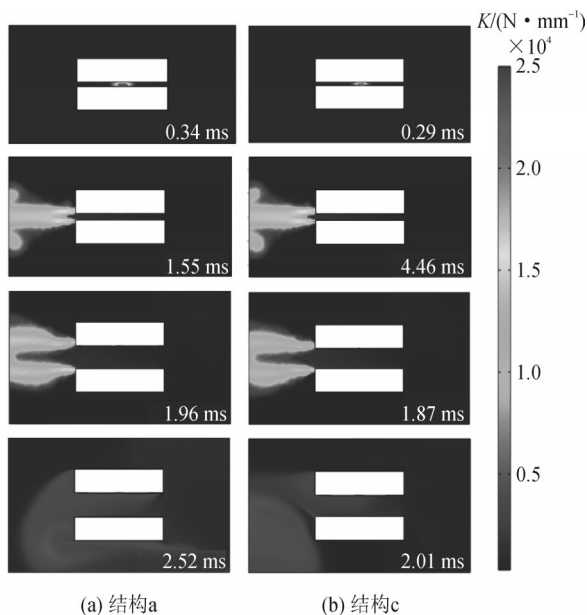


图9 电弧仿真结果

Fig. 9 Arc simulation results

2.2 反力弹簧刚度系数对电弧特性的影响

在实际产品优化中,为提升接触器的开断性能,要求动触头分断速度要高。随着分断速度的增加,燃弧时间呈现出减小趋势,但当速度增大到一定程度后,再增大速度对于灭弧能力的提升效果会下降。

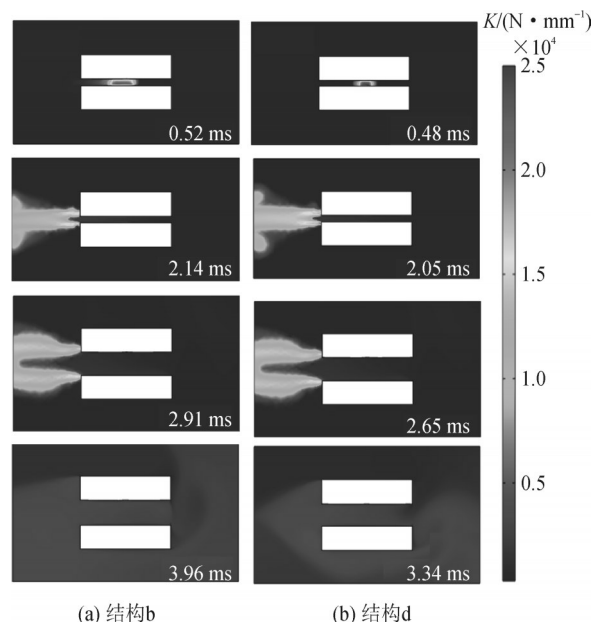


图10 电弧仿真结果

Fig. 10 Arc simulation result

不同反力弹簧刚度系数下动触头位移曲线见图11。在触头开距不变时,增大反力弹簧刚度系数会减小动触头的位移时间,从0.5 N/mm增加到1.0 N/mm时,运动时间下降较多,而当系数大于1.0 N/mm后,运动时间下降的速度会下降。

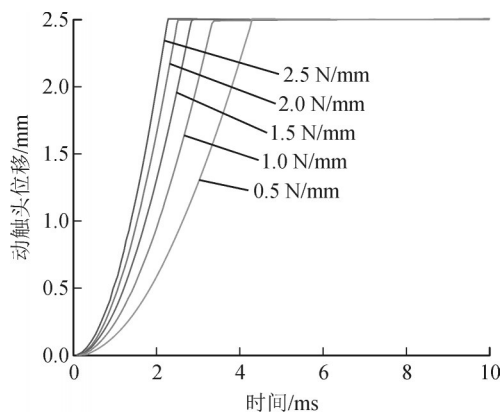


图11 不同反力弹簧刚度系数下动触头位移曲线

Fig. 11 Displacement curves of moving contacts with different stiffness coefficients of reaction springs

不同反力弹簧刚度系数下电弧电压波形见图12。从图12中可以看出,反力弹簧刚度系数越大,电弧的拉弧时间和整体燃烧时间越短。当弹簧刚度系数 $K=0.5$ N/mm时,电弧在2.7 ms左右熄灭,当刚度系数增加到 $K=2.5$ N/mm时,电弧在2.1 ms熄灭,燃弧时间缩短22.2%。但随着刚度系数的增大,燃弧时间的减小速度逐渐变慢。

由此可得增大反力弹簧刚度系数,可提高触头的分断速度,从而减小电弧燃弧时间,但存在饱和现象,因此反力弹簧系数不宜选择过大。此外,选择反力弹簧刚度系数时,不仅要考虑其对燃弧时间

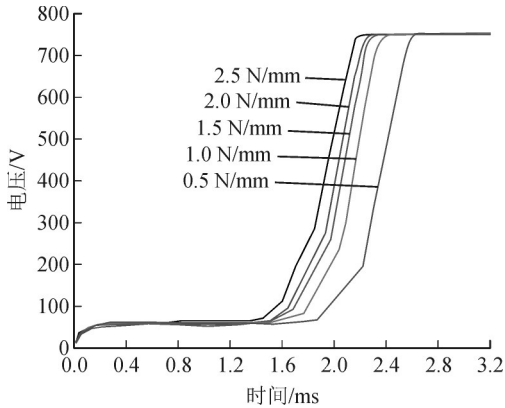


图 12 不同反力弹簧刚度系数下电弧电压波形

Fig. 12 Arc voltage waveforms with different reaction spring stiffness coefficients

的影响,还应考虑其对于闭合过程的影响,若系数过大,则会导致动铁心受到的反力过大,可能会影响接触器的正常闭合,反之过小时,会使得分断速度不足,影响正常分断。因此,综合多种因素考虑,反力弹簧刚度系数选择 1.0 N/mm 为最佳。

2.3 触头超程对电弧特性的影响

为更准确研究动触头的动作特性,文中采用平均分断速度、最大分断速度、刚分速度 3 个物理量来对分断速度进行表述,其中平均分断速度用以衡量电磁机构的整体性能,目前大部分动态电弧仿真中采用该速度作为动触头的运动速度,最大速度表明的是接触器的快速拉弧能力,而刚分速度反映的是接触器在电弧初始阶段增大电弧长度的能力。不同超程下动触头分断过程中的 3 种速度见图 13。

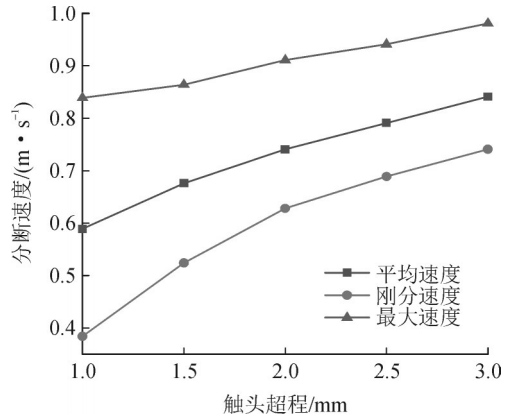


图 13 接触器的分断过程速度特性

Fig. 13 Breaking process speed characteristics

从图 13 可以看出,随着触头超程的增大,动触头的 3 种速度均呈现增大的趋势,其中刚分速度的增大趋势最为明显。在 1 mm 触头超程条件下刚分速度大小仅为 0.35 m/s,而在 3 mm 触头超程条件下,刚分速度大小达到 0.7 m/s,为前者的 2 倍;当触头超程从 1 mm 增大到 3 mm,平均分断速度大小从 0.58 m/s 增大到 0.81 m/s,增大 39.7%;与刚分速度和

平均分断速度相比,最大分断速度变化不大。

不同触头超程下的燃弧时间见图 14。随着触头超程的增加,燃弧时间逐渐增加,从 1 mm 到 2.5 mm 增加较为缓慢,而从 2.5 mm 到 3 mm 燃弧时间迅速增加。由于文中的动铁心的行程是固定的,增大触头超程意味着减小开距。一般直流感触器中的触头开距为 2~3 mm,结合燃弧时间分析,超程 1.5 mm,开距 2.5 mm 为直流感触器电磁机构的最优参数。

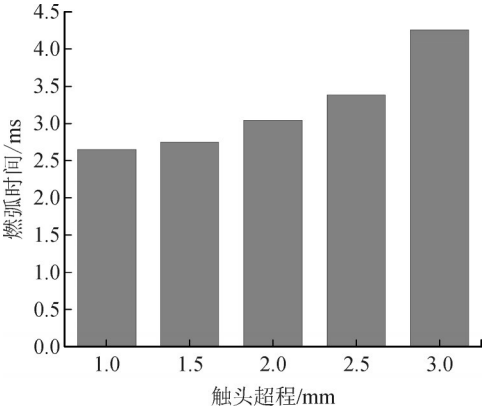


图 14 不同触头超程下的燃弧时间

Fig. 14 Arc burning time for different contact over-travels

3 分断电弧实验研究

直流电弧实验平台的总体示意图见图 15,实物图见图 16。其主要包括充电模块、电容器、电阻器、保护开关、晶闸管、实验样机、示波器与控制器等设备。其中,充电模块与电容器构成了直流电源,其核心原理为利用电容器充电后快速向实验电路放电提供实验电流。

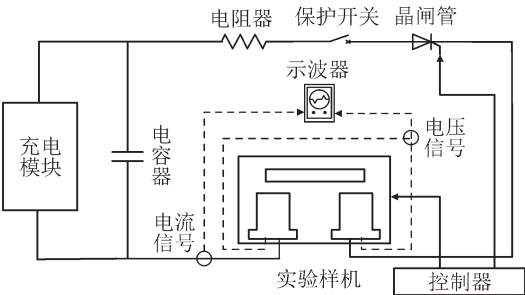


图 15 直流感触器电弧实验平台示意图

Fig. 15 DC contactor arc test platform diagram

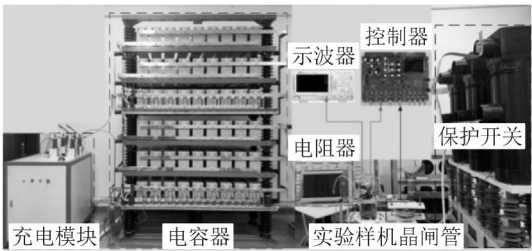


图 16 直流感触器电弧实验平台实物图

Fig. 16 DC contactor arc test platform picture

3.1 磁吹结构对电弧特性的影响

4种磁吹结构下的电弧电压见图17。燃弧时间按照由短到长排序依次为结构c、d、a、b,这个顺序与磁感应强度的大小排序一致,说明磁吹结构在灭弧室中产生的磁场越强,燃弧时间越短。结构c比结构a缩短21%,结构d比结构b缩短15.2%。结构c分断电弧的拉弧阶段与吹弧阶段均为最短,结构b的两个阶段均为最长。而拉弧阶段与吹弧阶段是燃弧时间的主要组成部分,拉弧阶段更是占据整个燃弧时间的60%~65%,磁吹结构c对燃弧时间的影响主要是缩短拉弧与吹弧两阶段。横向磁场对电弧的作用有:①通过安培力加速电弧在触头间隙的运动速度,减少电弧对于触头的烧蚀;②使得电弧受力变形,拉伸电弧长度,提升电弧电压,促进电弧熄灭。因此在实验中磁吹机构在灭弧室中的磁感应强度越大,燃弧时间越短。结构c与结构d对于磁场强度的提升是有益于灭弧的,添加中间永磁体可以作为提升直流接触器灭弧能力的手段之一。

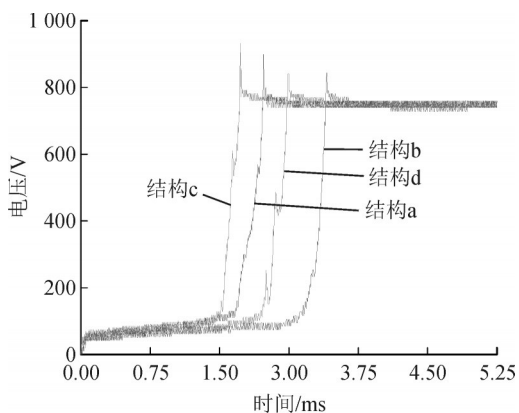


图17 不同磁吹结构下电弧波形

Fig. 17 Arc voltage waveforms with different magnetic blowing structures

3.2 触头超程对电弧特性的影响

不同超程下的燃弧时间见图18。随着触头超程的增加,燃弧时间逐渐增加。超程从1 mm增加到2 mm时燃弧时间增加较为缓慢,仅增加7%,而超程在1.5~3 mm时,燃弧时间迅速增加。

超程对于电弧特性的作用机理具有两个方面:一是超程增大时,动触头的平均分断速度增加,电弧拉长时间缩短,从而使得燃弧时间减小。二是超程增大时,由于动铁心行程不变,触头开距会减小,电弧弧柱长度减小,受到的安培力减小,使得燃弧时间增加。开距在0.5~3 mm范围内机理二对于电弧的影响明显强于机理一,因此随着触头超程的增大,燃弧时间逐渐增大。在选择超程时,同时要考虑开距的影响,开距过大时,接触器尺寸增加;而开距过小时,电弧的长度过短,不利于拉长电弧,燃弧

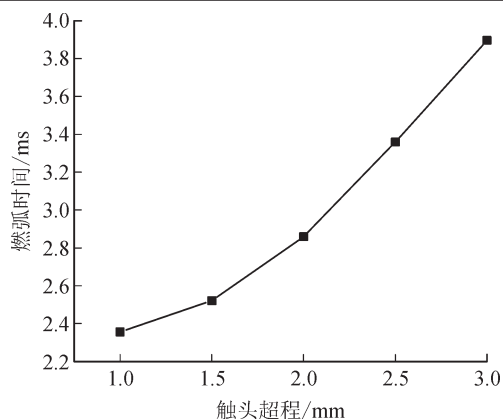


图18 不同触头超程下直流接触器燃弧时间

Fig. 18 Arcing time with different over-travels

时间较长。综合多种因素,开距2.5 mm、超程1.5 mm为最优选择,与前文仿真结果一致。

4 结论

1)建立了耦合动触头的运动特性与吹弧磁场的动态电弧模型,可更准确研究磁吹和运动特性耦合影响下的直流电弧开断特性。

2)提出在静触头之间增加中间永磁体的两种新型磁吹结构,较于原结构燃弧时间分别缩短21%和15.2%,电极下方磁吹结构增加中间永磁体的提升效果更好。

3)在1~3.5 mm范围内,增大触头超程会提高分断速度,超程最优选择为1.5 mm;增大反力弹簧刚度系数会提高分断速度,减小燃弧时间,反力弹簧刚度系数最优选择为1 N/mm。

参考文献:

- [1] 黄一凡,王立军,王凯,等.不同磁场条件下直流接触器电弧开断特性的仿真研究[J].高压电器,2024,60(2):102-107.
HUANG Yifan, WANG Lijun, WANG Kai, et al. Simulation research on arc breaking characteristics of DC contactor under different magnetic field conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 102-107.
- [2] 胡国伟,张红伟,计新华,等.交流接触器灭弧结构对电寿命影响的实验研究[J].电器与能效管理技术,2022(6):20-23.
HU Guowei, ZHANG Hongwei, JI Xinhua, et al. Experimental study on influence of arc extinguishing structure of AC contactor on electrical endurance[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(6): 20-23.
- [3] 王海涛,杨博,郑淑晴,等.金属栅片作用下直流接触器电弧动态特性仿真研究[J].传感器与微系统,2024,43(4):12-16.
WANG Haitao, YANG Bo, ZHENG Shuqing, et al.

- Simulation study on arc dynamic characteristics of DC contactor under metallic grid sheet[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(4): 12-16.
- [4] 李 静, 刘 凯, 曹云东, 等. 直流接触器分断过程中弧根演变及对重燃的影响分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(4): 1241-1250.
- LI Jing, LIU Kai, CAO Yundong, et al. Arc root development and its influence on arc reigniting during the breaking process of the DC contactor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(4): 1241-1250.
- [5] SANCHEZ P, ITURREGI A, GONZALEZ D, et al. Hydrogen filled DC circuit breakers for electrical vehicles batteries[C]//27th International Conference on Electricity Distribution(CIRED 2023). Rome, Italy: IET, 2023: 12-15.
- [6] 谢锡汉, 陶祥海, 庞圣养, 等. 一种新型 35 kV 输电线路自脱离灭弧防雷装置[J]. *电瓷避雷器*, 2023(4): 96-103.
- XIE Xihan, TAO Xianghai, PANG Shengyang, et al. A new type of self-disengaging arc-extinguishing lightning protection device for 35 kV transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2023(4): 96-103.
- [7] 谭思源, 李籽剑, 王巨丰, 等. 固相气流防雷装置熄灭工频大电流的仿真分析和实验研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(2): 133-139.
- TAN Siyuan, LI Zijian, WANG Jufeng, et al. Simulation analysis and experimental research of power frequency high current arc extinguishing for solid-phase airflow lightning protection device[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(2): 133-139.
- [8] 毛成程, 王巨丰, 周勇军, 等. 10 kV 配电网压缩灭弧防雷装置工频续流遮断与雷电冲击实验研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(10): 38-44.
- MAO Chengcheng, WANG Jufeng, ZHOU Yongjun, et al. Research on power frequency follow current interruption and lightning impulse experiment of 10 kV distribution network compression arc extinguishing and lightning protection device[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(10): 38-44.
- [9] 孙珂珂, 卫亚博, 吴 翊. 低气压直流转换开关开断能力研究[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 528-536.
- SUN Keke, WEI Yabo, WU Yi. Research on the breaking ability of DC conversion switch under low air pressure[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 528-536.
- [10] 江永鑫, 陈丽安, 郭梦倩, 等. 基于改进 CEEMD 和 RF 的低压串联故障电弧识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 97-108.
- JIANG Yongxin, CHEN Li'an, GUO Mengqian, et al. Identification method of low voltage series fault arc based on improved CEEMD decomposition and RF[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 97-108.
- [11] 张海根, 程少勇, 付志超. 一种自动转换开关灭弧系统的优化设计[J]. *电器与能效管理技术*, 2022(1): 40-42.
- ZHANG Haigen, CHENG Shaoyong, FU Zhichao. Optimal design on arc-extinguishing system of automatic transfer switching equipment[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2022(1): 40-42.
- [12] 宋梦杰, 于晓英, 王 泽, 等. 基于 COMSOL 的城轨弓网电弧多物理场仿真研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(1): 46-51.
- SONG Mengjie, YU Xiaoying, WANG Ze, et al. Research on multiphysical field simulation of pantograph arc in urban rail transit based on COMSOL[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2024, 60(1): 46-51.
- [13] LINDMAYER M, MARZAHN E, MUTZKE A, et al. The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes[J]. *IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies*, 2006, 29(2): 310-317.
- [14] 李 静, 钱 宇, 王奥飞, 等. 磁吹直流空气断路器弧根跃迁及对开断特性的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(4): 1651-1660.
- LI Jing, QIAN Yu, WANG Aofei, et al. Research on arc root transition of magnetic DC air circuit breaker and its influence on breaking characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(4): 1651-1660.
- [15] BO Kai, ZHOU Xue, ZHAI Guofu. Simulation of arc dwelling behavior during bridge-type contacts opening process for high-power relay[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(6): 975-981.
- [16] 史 岩, 陈 平, 田 浩, 等. 基于 Comsol Multiphysics 的新型高压直流继电器电弧仿真分析[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(1): 90-97.
- SHI Yan, CHEN Ping, TIAN Hao, et al. Arc simulation analysis of a new high voltage DC relay based on Comsol Multiphysics[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 49(1): 90-97.
- [17] 赵 杰, 游颖敏, 舒 亮, 等. 磁流体仿真与正交实验融合设计的灭弧室性能优化方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(20): 5347-5358.
- ZHAO Jie, YOU Yingmin, SHU Liang, et al. The performance optimization of arc extinguishing chamber based on the Integration analysis magnetic fluid simulation and orthogonal test[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(20): 5347-5358.
- [18] GLEIZES A, GONZALEZ J J. Analyse and modelling of high-voltage and low-voltage circuit-breakers ARCS[J]. *High Temperature Material Processes*, 2004, 8(3): 461-473.
- [19] HUANG Keyao, SUN Hao, NIU Chunping, et al. Simulation of arcs for DC relay considering different impacts[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(2): 21-30.
- [20] LIU Xiangjun, HUANG Xin, CAO Qichun. Simulation and experimental analysis of DC arc characteristics in different gas conditions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(3): 1062-1071.
- [21] JIANG Cheng, QU Lu, YU Zhangqing, et al. Research of simulation and experiment on arc characteristics of gas mechanical switch[J]. *High Voltage*, 2024(3): 12394.
- [22] 李 静, 袁志曹, 曹云东, 等. 触头运动特性对直流感触器

- 开断性能影响[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(11): 79-89.
LI Jing, YUAN Zhicao, CAO Yundong, et al. Influence of contact motion characteristics on breaking performance of DC contactor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 79-89.
- [23] 彭世东, 李 静, 曹云东, 等. 耦合磁场直流空气断路器栅片特性对灭弧性能的影响研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5587-5597.
PENG Shidong, LI Jing, CAO Yundong, et al. Research on the effect of splitter plate material and structure on arc extinguishing performance with coupling magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5587-5597.
- [24] 付 思, 陈文清, 曹云东. 小电流下弧根运动对空气直流电弧的影响[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 224-230.
FU Si, CHEN Wenqing, CAO Yundong. Influence of arc root motion on air DC arc under small current[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 224-230.
- [25] 吴 东, 陈文贵. 冲击电弧作用下 C_4F_7N/CO_2 气体灭弧性能仿真分析[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 179-188.
WU Dong, CHEN Wengui. Simulation analysis of arc extinguishing performance of C_4F_7N/CO_2 gas with under impulse arc[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 179-188.
- [26] 陈 默, 陆宁懿, 翟国富. 基于电弧磁流体仿真的 DC 1 500 V 两极塑壳断路器气道优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2222-2232.
CHEN Mo, LU Ningyi, ZHAI Guofu. Arc chamber optimization of DC 1 500 V two-pole circuit breakers based on arc magneto hydro dynamics simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2222-2232.
- [27] 李 静, 易晨曦, 彭世东, 等. 高海拔环境下大容量直流空气断路器灭弧性能研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 863-874.
LI Jing, YI Chenxi, PENG Shidong, et al. Study on interrupting characteristics of large capacity DC air circuit breaker at high altitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 863-874.
- [28] 宋 宇, 林 莘, 周 涛, 等. 550 kV 快速断路器气流量仿真与开断性能[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2432-2441.
SONG Yu, LIN Xin, ZHOU Tao, et al. Simulation of airflow field and breaking capacity of 550 kV fast circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2432-2441.
- [29] 王永兴, 曲学彬, 王 雯, 等. 旋弧式 SF_6/N_2 混合气体触发间隙开关电弧仿真与实验研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2111-2120.
WANG Yongxing, QU Xuebin, WANG Wen, et al. Simulation and experimental research on rotating arc of triggering gap switch in SF_6/N_2 mixed gas[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2111-2120.
- [30] 王 凯, 周 然, 张博雅, 等. 环境友好型 HFO-1336mzz (E) 混合气体在负荷开关中的灭弧性能仿真研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1038-1045.
WANG Kai, ZHOU Ran, ZHANG Boya, et al. Simulation study on the arc extinguishing performance of eco-friendly HFO - 1336mzz(E) mixture gas in a load switch[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1038-1045.
- [31] 刘益岑, 吴广宁, 郭裕钧, 等. 招弧角电极直流电弧运动特性分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 40-47.
LIU Yicen, WU Guangning, GUO Yujun, et al. Motion characteristics analysis of DC arc on arcing horn[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 40-47.
- [32] 王海涛, 梁雨欣, 郑淑晴. 磁场作用下直流电弧分断特性及触头侵蚀的研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(4): 10-18.
WANG Haitao, LIANG Yuxin, ZHENG Shuqing. Study on DC arc breaking characteristics and contact erosion under magnetic field[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(4): 10-18.

武稼祥(1992—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为换流阀及阀控、继电保护、直流控制保护(E-mail: 496768638@qq.com)。

(上接第 211 页)

- 21(5): 474-477.
- [16] SCHELLEKENS H, SHANG W, LENSTRA K. Vacuum interrupter design based on arc magnetic field interaction for horseshoe electrode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1993, 21(5): 469-473.
- [17] LI Haomin, WANG Zihan, GENG Yingsan, et al. High-current vacuum arc mode transition of a horseshoe-type axial magnetic field contact with long contact gap[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2164-2171.
- [18] LI Haomin, WANG Zihan, GENG Yingsan, et al. Dynamic arc current distribution of parallel vacuum arcs subjected to bipolar axial magnetic field[J]. IEEE Access, 2020(8): 58290-58299.
- [19] LI Haomin, WANG Zihan, GENG Yingsan, et al. Design parameter optimization of a 126 kV horseshoe type axial magnetic field vacuum interrupter[C]//International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum (IS-DEIV). Suzhou, China: IEEE, 2016: 170-174.
- [20] 中国电子科技集团公司第二十一研究所. 微特电机设计手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016.
The 21st Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation. Micro motor design manual[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2016.
- 王 军(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事高压电气设备技术管理工作(E-mail: wang_jun1@cypc.com.cn)。