

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.015

弹簧操动机构飞轮接头表面粗糙度对合闸稳定性影响研究

张亚辉¹, 张帆¹, 袁端鹏¹, 朱晔², 何洲¹, 芦珂¹,
李良权¹, 刘煦¹

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 450046; 2. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对弹簧操动机构合闸时间分散性大、波动显著的问题对系统保护与设备寿命造成的危害,以飞轮接头为关键研究对象,系统分析其不同表面粗糙度对合闸时间的影响机制。首先,通过静力学数值计算获得飞轮接头摩擦面的应力分布;其次,基于应力结果,运用赫兹接触理论确定摩擦磨损试验的载荷条件,并通过试验构建真实受力条件下表面粗糙度与摩擦系数之间的映射关系;最后,建立弹簧操动机构的运动学模型,利用摩擦系数的变化进行仿真分析,间接揭示飞轮接头表面粗糙度对合闸时间稳定性的影响规律。结果表明:在稳定磨损阶段,表面粗糙度对合闸时间影响较小;而在跑合阶段,合闸时间呈递增趋势,且较高的表面粗糙度会延长跑合过程,进而加剧合闸时间的不稳定性。研究结果对提升弹簧操动机构合闸时间稳定性具有一定指导意义。

关键词: 弹簧操动机构; 飞轮接头; 粗糙度; 摩擦系数; 合闸时间

Study on the Influence of Surface Roughness of the Flywheel Joint in Spring Operating Mechanism on Closing Stability

ZHANG Yahui¹, ZHANG Fan¹, YUAN Duanpeng¹, ZHU Ye², HE Zhou¹, LU Ke¹,
LI Liangquan¹, LIU Xu¹

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 450046, China; 2. Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

Abstract: In view of the risks that excessiv dispersion and pronounced fluctuationin the closing time of spring operating mechanisms pose to system protection and equipment service life, the flywheel joint is taken as the research object and the influence mechanism of its different surface roughness levels on the closing time is systematically analyzed. First, the stress distribution on the friction surface of the flywheel joint is obtained through static numerical calculations. Then, based on the stress results, the Hertz contact theory is used to determine the load conditions for friction and wear tests, and a mapping relationship between surface roughness and friction coefficient under real force conditions is constrctued through testing. Finally, the kinematic model of the spring operating mechanism is set up and the simulation analysis is performed by the use of friction coefficient variation, indirectly revealing the influence of surface roughness of the flywheel joint on the stability of closing time. The results show that in the stable wear stage, the influence of surface roughness on the closing time is small. However, during the running-in stage, the closing time exhibits an increasing trend, and higher surface roughness prolongs the running-in process, thereby exacerbating the instability of the closing time. The study results provide valuable certain guidance for improving theclosing time stability in spring operating mechanism.

Key words: spring operating mechanism; flywheel joint; roughness; friction coefficient; closing time

收稿日期:2026-05-16; 修回日期:2026-08-12

0 引言

弹簧操动机构作为高压断路器的核心驱动部件,其合闸时间稳定性直接影响断路器的分合闸同步性、电气寿命及系统保护性能。在实际运行过程中,弹簧操动机构合闸时间分散性较大,标准差较高,同一机构多次操作合闸时间波动范围可达数毫秒,导致断路器动作特性不一致,进而可能引发保护配合失误与设备机械应力异常等问题^[1-9]。合闸过程中,飞轮接头是实现能量传递的关键部件,其表面粗糙度直接影响接触面间的摩擦系数与运动配合特性。弹簧操动机构结构原理图见图1。为此,文中通过理论分析与试验研究,探讨飞轮接头表面粗糙度对弹簧操动机构合闸时间的影响规律,揭示其背后的运动学机制,以期为优化机构设计、改进制造工艺以及提升合闸稳定性提供参考。

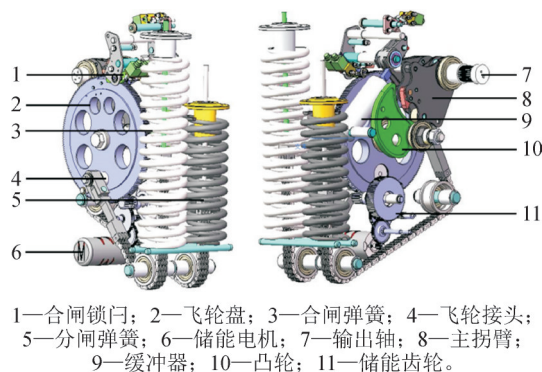


图1 弹簧操动机构结构原理图

Fig. 1 Spring operating mechanism structure diagram

近年来,表面粗糙度的摩擦磨损机制已得到了广泛研究。郑张利等^[10]采用旋转钢圆环—固定石墨圆环式端面摩擦副结构,对不同表面粗糙度的SA508 Gr.3 Cl.1钢进行干摩擦磨损试验,发现随着试验钢表面粗糙度增加,摩擦因数先减小后增大。马彪等^[11]利用UMT多功能摩擦磨损试验机对GCr15高碳轴承钢和G20CrNi2Mo渗碳轴承钢进行了销—盘旋转式干摩擦磨损试验,分析了不同载荷和摩擦速度下两种轴承钢的摩擦系数与磨损率变化规律,结果表明两种轴承钢的摩擦系数均随载荷增大而降低、随摩擦速度增大而增大,且磨损机制均为粘着磨损和磨粒磨损。陈爽等^[12]采用磁控溅射法在不同表面粗糙度的轴承钢基体上沉积MoS₂/Ti薄膜,通过球—盘摩擦磨损试验发现,干摩擦条件下随基体粗糙度增加,薄膜的平均摩擦因数和磨损率均呈先增大后减小趋势。刘月明等^[13]通过仿真与干摩擦往复滑动试验发现,钢轨磨削表面纹理的间距、方向

及深度显著影响其摩擦系数与磨损率,优化磨削参数可有效提升钢轨摩擦学性能。

Wan等^[14]发现碳质合金表面微坑深度增加时,摩擦系数先减小后增大;微坑纹理间距增大时,摩擦系数先减小后增大。Spijker等^[15]研究发现了分形粗糙表面的摩擦过程中,表面粗糙度随滑动距离呈指数递减,平均摩擦因数与粗糙度正相关。Gheisari等^[16]应用接触力学理论分析表面粗糙度对粒子动力学行为的影响,研究发现磨粒与微观纹理中波谷的瞬时接触可在一定程度上使粗糙基体表面变得平滑,提高接触副间抗磨损性能。Liu等^[17]通过摩擦试验研究了玻璃纤维增强铝层压板在金属/预浸料界面处的摩擦行为,分析了速率、法向力、纤维方向等参数对静/动摩擦系数的影响。顾绳初等^[18]采用Bruker UMT-3型高温摩擦磨损试验机研究了不同表面粗糙度的大截面M2高速钢在200、400、600℃下的摩擦磨损性能,发现表面粗糙度为0.19 μm的试样在200℃时以磨粒磨损为主、摩擦系数较大,而表面粗糙度为0.05 μm的试样以粘着磨损为主、磨损率更高,表明表面粗糙度对高温摩擦磨损机制及性能具有显著影响。

针对断路器操动机构动作稳定性的问题,相关领域的研究人员开展了大量工作。金永辉等^[19]通过动力学仿真与物理样机试验,对弹簧操动式断路器合闸过程进行分析,发现超程弹簧压缩长度直接影响合闸弹跳时间,通过调节其预紧力可将弹跳时间控制在2 ms以内,有效提高了合闸稳定性。刘晓明等^[20]采用响应面法对真空断路器弹簧操动机构凸轮结构进行参数化优化,以刚合速度最小为目标,调整凸轮轮廓半径、圆心位置及合闸弹簧预紧力。优化后机构合闸时间由32.5 ms缩短至约29 ms,刚合速度由1.224 m/s降至0.857 m/s,有效减小了合闸动态冲击,提高了合闸运动可靠性。汤凯航等^[21]针对126 kV真空断路器弹簧操动机构合闸不到位问题,采用粒子群算法对凸轮轮廓进行优化设计。优化后机构合闸时间为58.1 ms,平均合闸速度提升至1.42 m/s,超行程由4.1 mm恢复至13.7 mm,实现了可靠合闸。宋广民等^[22]通过动力学仿真与样机试验,研究了弹簧操动机构分闸锁扣系统转动惯量对分闸时间的影响,发现增加分闸一级锁门转动惯量可在不改变分闸速度的前提下将分闸时间由22.7 ms调整至26.8 ms,为断路器分合闸时间的精确调控提供了新思路。

目前,国内外针对弹簧操动机构核心零部件表面粗糙度对合闸时间的影响研究较少,现有研究多从机械动力学优化、电气控制特性等方面对合闸运动进行宏观分析与整体提升,未能从微观表面状态演变的视角揭示其对运动稳定性的影响机制。因此,为解决弹簧操动机构合闸时间不稳定问题,文中以 CT601-8 型高压断路器弹簧操动机构为研究对象,提出一种使用摩擦系数间接表征飞轮接头表面粗糙度随运动时间变化的方法,通过运动学仿真得到飞轮接头表面粗糙度对合闸稳定性的影响规律。文中的研究路线见图 2。

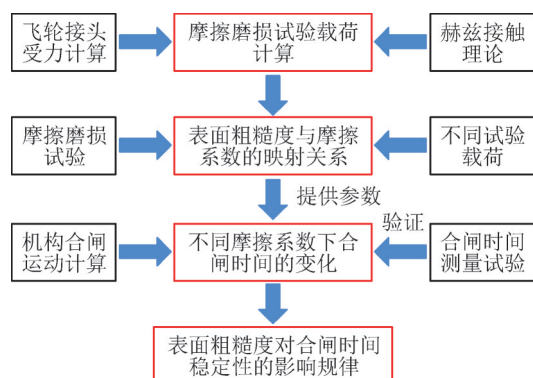


图2 文中研究路线

Fig. 2 Research route of this paper

1 摩擦磨损试验载荷计算

为确保试验测得的摩擦系数能有效表征真实粗糙度的影响,文中以赫兹接触理论为指导,通过计算飞轮接头的真实工作面受力,并将其等效转换为试验条件下的施加载荷,从而实现接触状态的准确模拟。

1.1 弹簧操动机构飞轮接头受力分析

1.1.1 弹簧操动机构模型处理

弹簧操动机构零部件繁多,机构复杂,如果全部进行有限元计算势必会降低计算效率以及精度,因此,在机构受力分析之前,需要对计算结果几乎没有影响的零部件进行剔除替换,如铆钉、螺栓螺母等。

为了获得更好的仿真结果,对关键部位零件如飞轮接头、合闸锁闭、碾子等进行六面体单元的网格处理。处理后的弹簧操动机构有限元模型见图 3。

1.1.2 弹簧操动机构飞轮接头受力计算

计算飞轮接头在储能状态下的受力情况,具体设置的零件参数见表 1。在接触设置过程中,需将与定滑轮相连的接触全部设为无分离接触,减少弹簧力通过定滑轮传递过程中的能量损失。分析结

果见图 4。

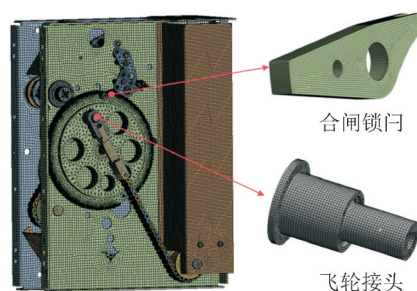


图3 弹簧操动机构有限元模型

Fig. 3 Finite element model of spring operating mechanism

表1 部分材料参数

Table 1 Constraints of main components

零件	材料	弹性模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比
飞轮接头	42CrMo	212	7.85	0.280
合闸锁闭	20CrMnMo	207	7.87	0.254
碾子	20CrMnMo	207	7.87	0.254
飞轮齿轮	40Cr	211	7.87	0.277
凸轮轴	35CrMo	213	7.87	0.286

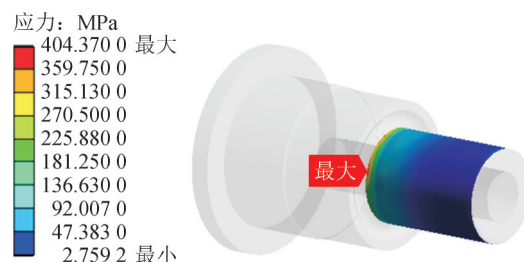


图4 飞轮接头摩擦面应力分布图

Fig. 4 Flywheel joint friction surface stress distribution diagram

静力学分析表明,飞轮接头在储能状态下摩擦面的最大接触应力为 404.37 MPa,该最大应力位于接头根部。产生这种情况的原因是弹簧通过链条施加的力垂直于接头轴线,这一横向力使接头根部承受最大的弯曲力矩,从而在该位置产生显著的应力集中。

1.2 摩擦磨损试验载荷计算

本次摩擦系数测试试验采用圆柱标准件与销对磨的形式,因此需要借助赫兹接触理论将机构零件实际受力转换为试验载荷^[23-24]。

最大接触应力表达式为

$$P_0 = \frac{2F}{\pi bL} \quad (1)$$

接触半宽表达式为

$$b = \sqrt{\frac{4FR}{\pi LE^*}} \quad (2)$$

式(2)中

$$\begin{cases} 1/R = 1/R_1 + 1/R_2 \\ 1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)-(3)中: F 为法向力; L 为接触长度; R 和 E^* 分别为等效曲率半径和等效弹性模量; R_1 和 R_2 、 ν_1 和 ν_2 、 E_1 和 E_2 分别为标准件和对磨销的半径、泊松比和弹性模量。

将式(2)代入式(1),反推可得

$$F = \frac{\pi R L P_0^2}{E^*} \quad (4)$$

基于飞轮接头摩擦面实际工况下配合零件的材料属性,本试验选用 GCr15 钢销作为标准件的对磨副。经计算,摩擦磨损试验中的试验载荷 F 为 1.46 N。

2 摩擦磨损测试试验

2.1 试验目的

为构建不同粗糙度分布规律在真实受力运动过程中与不同摩擦系数的表征关系及映射规律,采用摩擦学性能试验设备,开展不同表面粗糙度下飞轮接头标准件摩擦磨损测试试验^[25-26]。

2.2 试验设备与试件

开展摩擦磨损试验,需要测量标准件不同表面粗糙度下的摩擦系数,主要使用的试验设备为 Bruker(CETR) UMT-2 摩擦磨损试验机,见图 5。

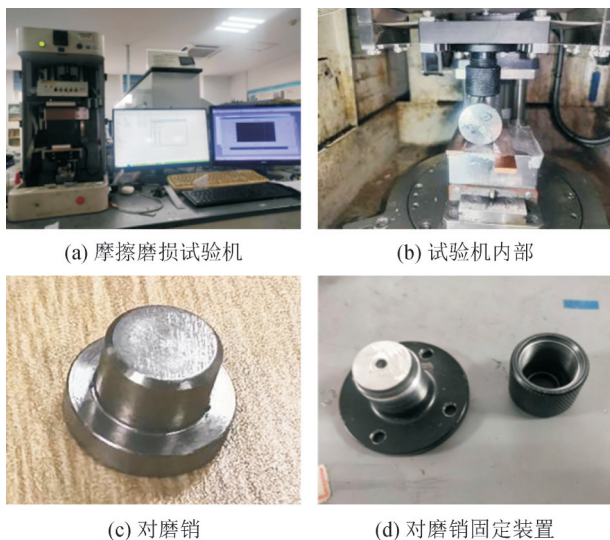


图5 摩擦磨损试验机

Fig. 5 Friction and wear testing machine

鉴于飞轮接头的特征尺寸及测试试验的标准要求,加工 5 个直径为 30 mm、高度为 40 mm 的圆柱体标准件。标准件材料选用与飞轮接头相同的 42CrMo 钢,并采用相同的热处理工艺,以排除材料及热处理差异对摩擦系数的影响。通过不同加工方式使其外圆柱面分别达到 Ra0.4、Ra0.8、Ra1.6、Ra3.2、Ra6.3 μm 的表面粗糙度等级,试验样块见图 6。

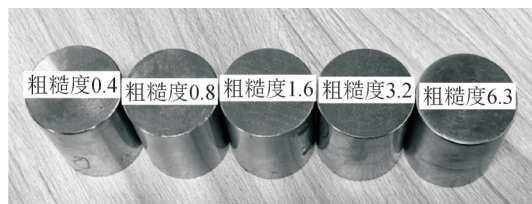


图6 试验样块

Fig. 6 Test specimen

2.3 试验步骤

采用圆柱标准件与销的配合形式进行摩擦磨损试验,不仅能精确模拟实际工况中的接触状态,而且能实现连续、稳定的滑动摩擦过程,避免接触状态突变,从而获得重复性良好的测试数据。

1)清洗与干燥。将标准件及对磨销依次置于丙酮、酒精等有机溶剂中进行超声波清洗,去除表面油污及附着杂质,清洗后取出并充分干燥。

2)装夹与校准。将标准件稳固安装于试验机的固定夹具上,并使用水平仪对其工作面进行水平校准。将对磨销及其固定装置装夹于加载臂上,按试验要求调整接触压力及初始位置,并对测量传感器进行调零与校准。

3)参数设定与测试。设定摩擦速度、加载压力、试验时间等运行参数。启动试验机,使对磨销在标准件平面上按设定参数进行往复摩擦运动,试验过程中实时采集并记录摩擦系数数据。

2.4 试验结果

不同粗糙度下的摩擦系数随时间变化曲线见图 7,摩擦系数的测量值在跑合阶段不稳定,取稳定磨损阶段测量数据平均值,见表 2。不同粗糙度下标准件跑合时间见表 3。

2.5 试验结论

试验结果表明,稳定磨损阶段摩擦系数随飞轮接头表面粗糙度的增加呈现先减小后增加的变化趋势;同时,表面粗糙度的增加会导致摩擦系数跑合阶段时间逐渐延长。

造成这种现象的原因是在干摩擦条件下,当样件表面粗糙度较低时,较大的真实接触面积导致强烈的粘着作用,摩擦系数较高;随着粗糙度适度增加,真实接触面积减小,且粗糙谷底有助于容纳磨屑并促进稳定界面摩擦层的形成,粘着分量显著降低,而犁削分量增加有限,故摩擦系数下降至最低点;当粗糙度继续增大时,尖锐的表面微凸体产生显著的犁削与塑性变形作用,犁削分量急剧上升并主导摩擦过程,导致摩擦系数转而升高。

同时,样件表面粗糙度增大,表面的微观凸起越高,致使对磨销初始接触仅发生在少数微凸体峰

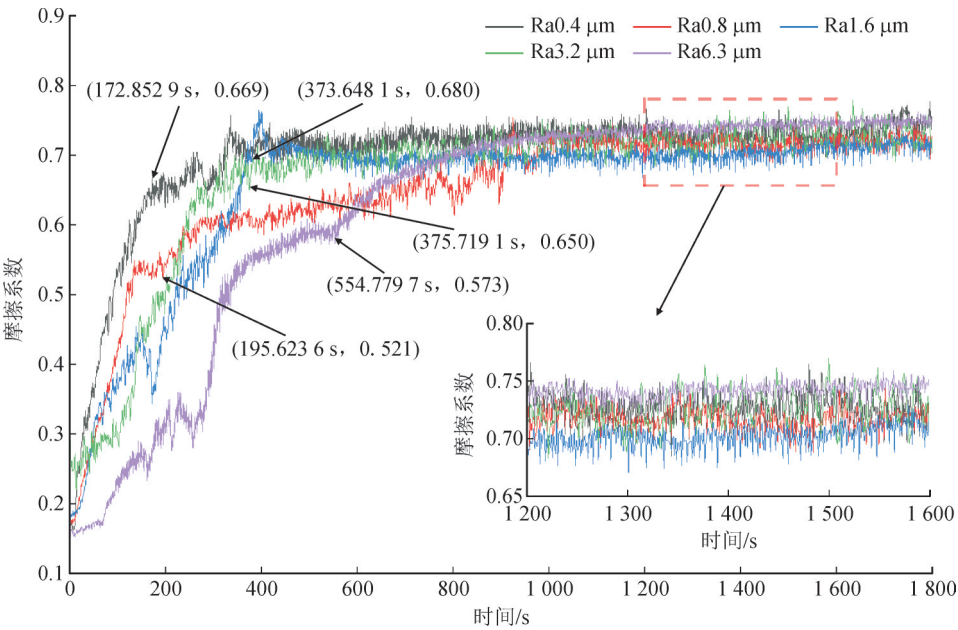


图7 不同粗糙度下摩擦系数变化曲线

Fig. 7 Friction coefficient variation curves at different roughness levels

表2 稳定磨损阶段摩擦系数

Table 2 Friction coefficient during the steady wear stage

粗糙度/ μm	摩擦系数
Ra0.4	0.714 0
Ra0.8	0.702 0
Ra1.6	0.695 6
Ra3.2	0.720 5
Ra6.3	0.724 7

表3 跑合阶段时长

Table 3 Break-in period duration

粗糙度/ μm	跑合时间/s
Ra0.4	172.852 9
Ra0.8	195.623 6
Ra1.6	373.648 1
Ra3.2	375.719 1
Ra6.3	554.779 7

值上,真实接触面积小且局部应力集中显著,因此需要更长的磨损时间才能使微凸体逐渐磨平、接触面积充分扩展并形成稳定的表面形貌与应力分布,因而跑合时间延长。

2.6 接触载荷对摩擦系数的影响分析

为了探究接触载荷变化对摩擦系数—粗糙度映射关系的影响,本研究在理论计算载荷的基础上,依据参数化仿真结果并经相同赫兹接触公式换算,据此设定了0.94、2.10 N两种补充载荷条件,对以上所有5种粗糙度下的标准件进行了补充摩擦磨损试验。不同载荷下,稳定磨损阶段的摩擦系数和跑合时间见表4。

表4 不同载荷下的摩擦学参数

Table 4 Frictional parameters under different loads

粗糙度/ μm	载荷0.94 N		载荷2.10 N	
	摩擦系数	跑合时间/s	摩擦系数	跑合时间/s
Ra0.4	0.728 2	199.763 7	0.696 3	129.381 5
Ra0.8	0.715 3	252.550 3	0.695 8	157.327 4
Ra1.6	0.704 7	400.559 9	0.687 5	303.266 9
Ra3.2	0.725 4	447.136 4	0.710 5	322.932 5
Ra6.3	0.733 9	636.547 2	0.721 8	471.977 1

试验结果表明,尽管载荷增大导致同一样本的稳定磨损阶段摩擦系数有略微下降,跑合时间缩短,但两条关键规律在不同载荷下均保持一致。

3 飞轮接头表面粗糙度对合闸时间稳定性的影响分析

鉴于表面粗糙度作为一种微观形貌参数难以在运动学仿真中直接参数化,文中提出以摩擦系数作为其动态变化的间接表征,进而探究飞轮接头表面粗糙度对合闸时间稳定性的影响规律。

3.1 弹簧操动机构运动学模型建立

文中应用多体动力学软件Adams计算不同摩擦系数下合闸时间的变化,具体约束见表5。

在正常工况下,为满足标准要求的操作功,实际工况中需对分合闸弹簧进行一定程度的压缩,因此须额外添加两个弹簧的预紧载荷,具体数值见表6。

机构在合闸运动过程中还会受到缓冲器油液压力与灭弧室负载反力的作用。在仿真软件中,采用spline函数将传感器实测的缓冲器油液压力曲线

表5 主要零部件约束情况

Table 5 Constraints on major components

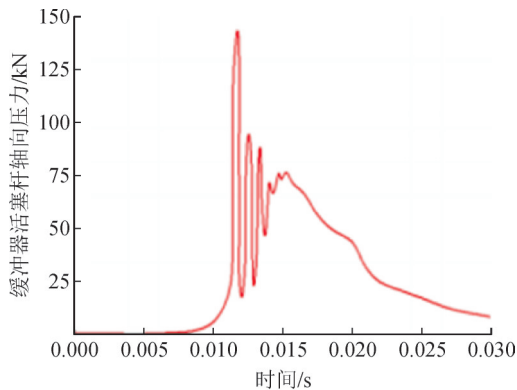
零件名称	约束类型
飞轮接头—轴承	旋转副
合闸锁门—合闸锁门支撑轴	固定副
碾子销轴—飞轮盘	固定副
缓冲器活塞杆—缓冲器缸体	移动副
凸轮轴—飞轮盘	万向副
输出轴—主拐臂	球铰副
母链节—公链节	旋转副

表6 弹簧力值设置

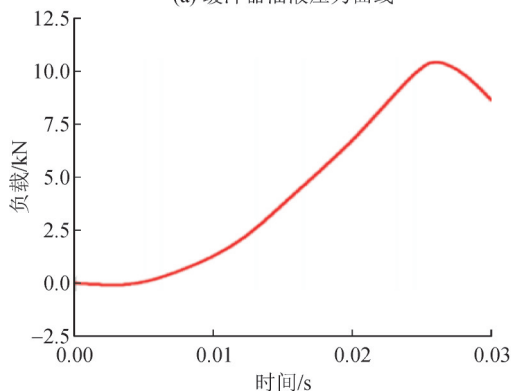
Table 6 Spring force settings

设置参数	预载荷力值/N	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)
合闸弹簧1	32 491	113.83
合闸弹簧2	13 900	47.27
分闸弹簧1	7 538	117.97
分闸弹簧2	3 328	51.78

与灭弧室负载反力曲线数据,分别设置为施加于缓冲器拉杆处和灭弧室凸台处的轴向力,曲线见图8。此外,在合闸小锁门的旋转副上采用step函数表征合闸电磁铁力,从而保证整个模型按预定顺序完成动作。



(a) 缓冲器油液压力曲线



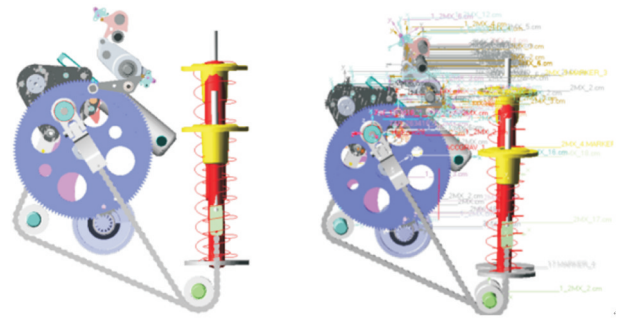
(b) 灭弧室负载反力曲线

图8 合闸轴向力曲线

Fig. 8 Closing axial force curve

弹簧操动机构的分合闸锁扣系统中设有多个扭簧,用以保证脱扣零部件能够可靠复位。在Adams仿真软件中,将这些扭簧设置为柔性连接的

扭转弹簧单元,只需要输入关键参数初始扭矩 T 、扭簧刚度 K ,添加到弹簧实际安装位置即可^[27]。弹簧操动机构运动学模型见图9。



(a) 机构简化模型

(b) 机构运动学模型

图9 弹簧操动机构运动学模型

Fig. 9 Kinematic model of spring operating mechanism

3.2 运动学计算结果分析

机构输出轴顺时针转动46°标志着合闸完成,改变飞轮接头与轴承的接触摩擦系数,在Adams中选中输出轴旋转副并提取输出角度曲线见图10。飞轮接头在稳定磨损阶段的合闸时间见表7。

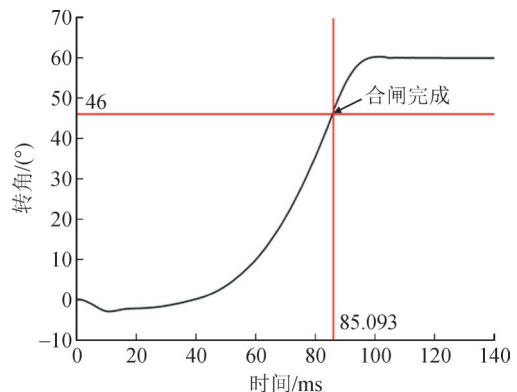


图10 输出轴输出角度曲线

Fig. 10 Output angle curve of output shaft

表7 稳定磨损阶段合闸时间

Table 7 Closing time during the stable wear stage

粗糙度/ μm	合闸时间/ms
Ra0.4	85.027
Ra0.8	84.969
Ra1.6	84.921
Ra3.2	85.021
Ra6.3	85.093

由于弹簧操动机构合闸时间仅为毫秒级,为准确模拟机构在跑合阶段的合闸时间,选取不同时间段的摩擦系数平均数来分析。跑合阶段的合闸时间见表8。

根据表7、8的仿真计算结果,可以定量分析飞轮接头表面粗糙度对合闸时间稳定性的影响。在稳定磨损阶段,随着表面粗糙度从Ra0.4 μm 增大至Ra6.3 μm ,合闸时间呈先减小后增大的趋势,最小

表8 跑合阶段合闸时间

Table 8 Closing time at break-in phase

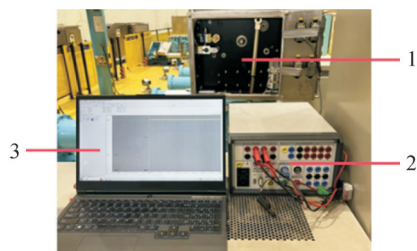
摩擦系数	合闸时间/ms
0.2	84.343
0.3	84.431
0.4	84.537
0.5	84.781
0.6	84.829

值出现在 $Ra1.6 \mu\text{m}$ (84.921 ms), 最大值出现在 $Ra6.3 \mu\text{m}$ (85.093 ms), 极差仅为 0.172 ms, 相对波动幅度约为 0.20%。这表明在稳定磨损阶段, 表面粗糙度的变化对合闸时间的影响非常有限, 合闸时间基本维持稳定。而在跑合阶段, 随着摩擦系数从 0.2 增大至 0.6, 合闸时间由 84.343 ms 单调延长至 84.829 ms, 极差为 0.486 ms, 相对波动幅度约为 0.58%, 两者均显著大于稳定磨损阶段。由此可见, 跑合阶段的合闸时间对摩擦系数的变化更为敏感, 且摩擦系数的升高会持续延长合闸时间。结合表 3 可知, 较高的初始表面粗糙度会显著延长跑合阶段的持续时间, 从而加剧合闸时间的波动。据此, 飞轮接头表面粗糙度对合闸时间稳定性的影响主要体现在跑合阶段, 而稳定磨损阶段的影响较小。

在高压交流系统中, 0.5 ms 左右的分散性可能导致合闸相角偏差增大, 进而增加合闸涌流峰值、加剧触头电弧烧蚀, 并对系统保护装置的配合特性产生不利影响。特别是对于要求同步合闸或选相合闸的应用场合, 合闸时间的不稳定会直接降低断路器的电气寿命, 并可能引发保护误动或拒动。此外, 合闸时间延长会使飞轮接头及相关传动部件承受更长的瞬态冲击载荷, 加速机械疲劳累积, 降低机构整体机械寿命。因此, 控制飞轮接头初始表面粗糙度以缩短跑合阶段, 对提升断路器合闸稳定性具有重要的实际工程价值。

3.3 仿真模型验证

为了验证文中研究内容的准确性, 利用 ACTAS P6 机械特性测试仪对弹簧操动机构输出轴进行合闸时间的测量, 试验设备见图 11。



1—弹簧操动机构; 2—ACTAS P6机械特性测试仪; 3—电脑。

图 11 合闸时间测试试验设备

Fig. 11 Test equipment for closing time

研究采用了 5 组不同表面粗糙度的飞轮接头进行对比测试, 分别对应 $Ra0.4$ 、 $Ra0.8$ 、 $Ra1.6$ 、 $Ra3.2$ 、 $Ra6.3 \mu\text{m}$, 根据 1.2 节中试验载荷为 1.46 N, 不同样件摩擦磨损跑合时间最大值为 554.779 s, 按照弹簧操动机构一次储能, 合闸总动作时间为 16 s 计算, 5 组飞轮接头在测试试验前均需累计完成 35 次完整摩擦磨损合分运动, 本次试验前五组不同表面粗糙度的合闸锁闭均完成了 50 次完整摩擦磨损合分运动, 确保表面粗糙度均已进入稳定磨损阶段。

测试结果行程达到 128 mm 时到达机构刚合点位置, 标志合闸动作完成, 测试结果见图 12、表 9。



图 12 合闸时间测试结果图

Fig. 12 Circuit closing time test result chart

表 9 合闸时间测试结果

Table 9 Test result of circuit closing time

粗糙度/ μm	合闸时间/ms
$Ra0.4$	86.12
$Ra0.8$	85.97
$Ra1.6$	85.83
$Ra3.2$	86.55
$Ra6.3$	86.90

测试结果显示, 随着飞轮接头表面粗糙度从 $Ra0.4 \mu\text{m}$ 增加到 $Ra6.3 \mu\text{m}$, 机构合闸时间先下降后上升, 与仿真结果变化趋势一致, 且最大误差仅为 2.12%, 表明仿真模型能较好地反映表面粗糙度对合闸时间的影响, 证明了文中研究内容的准确性。

4 结论

文中针对高压断路器弹簧操动机构合闸时间不稳定的问题, 提出一种以摩擦系数变化间接表征表面粗糙度变化的分析方法, 揭示了飞轮接头表面粗糙度对机构合闸时间的影响机制。得到以下结论:

1) 摩擦系数在真实受力情况下的演变可分为跑合与稳定磨损两个阶段。在跑合阶段, 摩擦系数随时间逐渐增大, 且初始粗糙度越高, 跑合过程越长。而在稳定磨损阶段, 摩擦系数基本保持恒定, 但其稳态值随表面粗糙度的增加呈现先降低后上升的趋势。

2) 飞轮接头表面粗糙度主要通过延长跑合阶段进而加剧合闸时间的不稳定性,而在稳定磨损阶段对合闸时间影响较小,故控制初始粗糙度以缩短跑合期是提升合闸时间稳定性的核心路径。

3) 结合文中的研究成果,建议将飞轮接头等关键传动部件的粗糙度控制在 $Ra0.8\ \mu\text{m}$ 左右,该粗糙度水平既能保证较低的摩擦系数与合理的跑合周期,又可避免过度加工带来的资源浪费,达到提高断路器弹簧操动机构合闸时间稳定性的目的。

文中通过结合理论分析、实验与仿真,揭示了表面粗糙度在跑合与稳定磨损两个阶段对合闸时间稳定性的不同影响规律,为合闸时间不稳定问题的分析与优化提供了可行路径,也为弹簧操动机构的设计改进与合闸稳定性的提升提供了理论依据与实践指导。

参考文献:

- [1] 王永兴,张一帆,倪辉,等.基于现场运行数据和L-M神经网络算法的滤波器断路器合闸动作时间预测方法[J].高电压技术,2025,51(11):5481-5491.
Wang Yongxing, Zhang Yifan, Ni Hui, et al. Prediction method of closing action time of filter field circuit breaker based on field operation data and L-M neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5481-5491.
- [2] Huang Jincai, Geng Yun, Jin Qingbin, et al. The influence of the dispersion in pre-arcing time of vacuum circuit breakers on the controlled switching of capacitor banks[C]//2022 6th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2022: 206-211.
- [3] 姚灿江,徐刚,孙龙勇,等.选相合闸断路器机械稳定性研究与设计[J].高压电器,2022,58(11):167-175.
Yao Canjiang, Xu Gang, Sun Longyong, et al. Research and design on mechanical stability of phase selective closing circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 167-175.
- [4] 赵陈琛,张国钢,刘洁,等.基于物理信息和迁移网络的高压断路器弹簧操动机构机械参数辨识及故障诊断[J].电工技术学报,2026,41(6):2073-2085.
Zhao Chenchen, Zhang Guogang, Liu Jie, et al. Mechanical parameter identification and fault diagnosis of spring operating mechanism of high-voltage circuit breaker based on physical information and transfer network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(6): 2073-2085.
- [5] 杨昊,雷鸣凯,王欣宇,等.典型故障工况下高压断路器弹簧操动机构运动学仿真[J].西安工程大学学报,2026,40(2):1-10.
Yang Hao, Lei Mingkai, Wang Xinyu, et al. Kinematic simulation of spring actuator mechanism of high-voltage circuit breaker under typical fault conditions[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2026, 40(2): 1-10.
- [6] 赵洪山,钱亚楠,李西备,等.基于振动信号特征预测与张量融合的真空断路器机械性能退化动态评估方法[J].电工技术学报,2026,41(6):2086-2100.
Zhao Hongshan, Qian Yanan, Li Xibei, et al. Dynamic evaluation method of mechanical performance degradation in vacuum circuit breakers via vibration signal feature prediction and tensor fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(6): 2086-2100.
- [7] 赵莹,贾晨曦,韩英爽.磁控真空断路器机械特性的影响因素研究[J].电器与能效管理技术,2025(1):33-38.
Zhao Ying, Jia Chenxi, Han Yingshuang. Study on factors influencing mechanical characteristics of magnetically controlled vacuum circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(1): 33-38.
- [8] 陈鹤冲,杨帆,杨志淳,等.有源配电路时限自适应重合闸实施方案[J].供用电,2025,42(11):88-94.
Chen Hechong, Yang Fan, Yang Zhichun, et al. Implementation scheme of time limit adaptive reclosing for active distribution lines[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(11): 88-94.
- [9] 戴志辉,张宇,吴桐,等.含高比例新能源配电网的改进重合闸方案[J].电力系统保护与控制,2025,53(15):103-112.
Dai Zhihui, Zhang Yu, Wu Tong, et al. An improved reclosing scheme for active distribution networks with high proportion of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 103-112.
- [10] 郑张利,王文东,王飞.表面粗糙度对SA508 Gr. 3 Cl. 1钢—石墨摩擦副摩擦磨损性能的影响[J].机械工程材料,2024,48(6):26-32.
Zheng Zhangli, Wang Wendong, Wang Fei. Effect of surface roughness on friction and wear properties of SA508 Gr. 3 Cl. 1 steel-graphite friction pairs[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(6): 26-32.
- [11] 马彪,傅丽华,上官宝,等.GCr15及G20CrNi2Mo轴承钢材料微观组织和摩擦磨损性能研究[J].材料导报,2021,35(16):16120-16125.
Ma Biao, Fu Lihua, Shangguan Bao, et al. Research on microstructure and friction wear performance of GCr15 and G20CrNi2Mo bearing steel[J]. Materials Review, 2021, 35(16): 16120-16125.
- [12] 陈爽,韩雪艳,安帅帅,等.基体表面粗糙度对MoS₂/Ti薄膜摩擦磨损性能的影响[J].材料工程,2022,50(8):169-177.
Chen Shuang, Han Xueyan, An Shuaishuai, et al. Effect of substrate surface roughness on friction and wear properties of MoS₂/Ti films[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(8): 169-177.
- [13] 刘月明,杨策,邓国念.磨削表面形貌特征对钢轨摩擦学性能的影响[J].中国铁道科学,2025,46(5):80-87.
Liu Yueming, Yang Ce, Deng Guonian. Effect of rail grinding surface morphology on tribological properties[J]. China Railway Science, 2025, 46(5): 80-87.
- [14] Wan Qun, Gao Pingyu, Zhang Zhiqiang. Friction and wear performance of lubricated micro-textured surface formed by laser processing[J]. Surface Engineering, 2021, 37(12): 1523-1531.
- [15] Spijker P, Anciaux G, Molinari J F. Dry sliding contact between rough surfaces at the atomistic scale[J]. Tribology Letters, 2011, 44(2): 279.

- [16] Gheisari R, Polycarpou A A. Three-body abrasive wear of hard coatings: effects of hardness and roughness[J]. *Thin Solid Films*, 2018(666):66-75.
- [17] Liu Shichen, Sinke J, Dransfeld C. An inter-ply friction model for thermoset based fibre metal laminate in a hot-pressing process[J]. *Composites Part B Engineering*, 2021 (227):109400.
- [18] 顾绳初, 朱丽慧, 段元满, 等. 表面粗糙度对大截面M2高速钢高温摩擦磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(2):127-132.
Gu Shengchu, Zhu Lihui, Duan Yuanman, et al. Effect of surface roughness on high temperature friction and wear properties of large-diameter M2 high speed steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(2): 127-132.
- [19] 金永辉, 侯文, 侯东波, 等. ZW32-12型弹簧操动式断路器运动特性分析及零件优化[J]. *电工技术*, 2024(2):154-158.
Jin Yonghui, Hou Wen, Hou Dongbo, et al. Motion characteristics analysis and parts optimization of ZW32 - 12 spring operating circuit breaker[J]. *Electric Engineering*, 2024(2):154-158.
- [20] 刘晓明, 梁澳, 陈海, 等. 真空断路器弹簧机构凸轮优化与虚拟样机验证分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2024, 44(10):878-884.
Liu Xiaoming, Liang Ao, Chen Hai, et al. Optimization of cam structure of vacuum circuit breaker spring actuator and virtual prototyping validation analysis[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2024, 44(10):878-884.
- [21] 汤凯航, 顾乐, 苏海博, 等. 真空断路器弹簧操动机构的凸轮优化设计[J]. *高压电器*, 2025, 61(7):73-81.
Tang Kaihang, Gu Le, Su Haibo, et al. Optimized design on cam of spring operation mechanism for vacuum circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(7):73-81.
- [22] 宋广民, 段晓辉, 惠勇锋, 等. 一种断路器分闸时间调整优化分析方法[J]. *高压电器*, 2024, 60(10):206-211.
Song Guangmin, Duan Xiaohui, Hui Yongfeng, et al. Adjustment and optimization analysis method of opening time for circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(10):206-211.
- [23] 王伟瀚, 朱晓峰, 宋现春. 基于运动流畅性的滚柱导轨副返回器结构优化设计[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2026(4):56-60.
Wang Weihuan, Zhu Xiaofeng, Song Xianchun. Structure optimization design of roller guide pair return device based on motion smoothness[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2026(4):56-60.
- [24] Javanmardi D, Rezvani M A. Rail vehicle axlebox roller bearing life and failure analysis based on the Hertz contact theory, finite element modeling, and field observations[J]. *World Journal of Engineering*, 2024, 21(6):1183-1192.
- [25] 陈平, 王朋飞, 乔小溪. 45钢/PA66配副干滑动摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(1):26-34.
Chen Ping, Wang Pengfei, Qiao Xiaoxi. Study on the sliding friction and wear properties of 45 steel/PA66 pair[J]. *Tribology*, 2019, 39(1):26-34.
- [26] Liu Pengtao, Pan Changyong, Zhi Chenchen, et al. Tribological effects of dry friction and aqueous solutions on medium manganese steel BTW₁[J]. *Physics of Metals and Metallography*, 2025, 126(11):1402-1414.
- [27] 张亚辉, 裴沛, 刘力, 等. CT601型弹簧操动机构机械运动学特性研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(3):214-221.
Zhang Yahui, Pei Pei, Liu Li, et al. Study on mechanical kinematics characteristics of type CT601 spring operating mechanism[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(3):214-221.

张亚辉(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压输变电设备产品研发、工程设计和 技术管理(通信作者)(E-mail:112512373@qq.com)。