

6-25-2020

CAE Modeling and Fault Simulation for Instantaneous Action Mechanism with High Power and Heavy Load

Teng Lin

1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;;2. SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China;;

Tang Tang

1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;;

Qiaojie Li

3. Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650200, China;

Chen Ming

1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

CAE Modeling and Fault Simulation for Instantaneous Action Mechanism with High Power and Heavy Load

Abstract

Abstract: A FEM simulation of a high voltage circuit breaker under actual conditions is proposed to solve the high-frequency vibration and mechanical failure problems caused by the realistic factors such as the clearance and structural elasticity of the breaker. Its operating characteristic under the high power pulse load is analyzed and the influence of the spring stiffness and dimension error on the breaker's motion characteristics was predicted. On the basis of the dependency of the breaker's mechanical characteristics on potential faults, critical parameters and design defects are established. The new FEM of the a high-voltage circuit breaker will replace the traditional high-cost, large-work-load, and inefficient experimental diagnostic method. It also eliminates the obstacles of the systematic analysis on the fault generation mechanisms, such as the lack of fault samples of traditional experimental methods, and thus significantly improves the fault diagnosis for the high-voltage circuit breakers.

Keywords

High-voltage circuit breaker, Operating mechanism, FEA model, Fault simulation

Recommended Citation

Teng Lin, Tang Tang, Li Qiaojie, Chen Ming. CAE Modeling and Fault Simulation for Instantaneous Action Mechanism with High Power and Heavy Load[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(6): 1136-1144.

大功率重载荷瞬间动作机构 CAE 建模与故障仿真

滕琳^{1,2}, 唐堂¹, 李翹婕³, 陈明^{1*}

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海汽车乘用车技术中心, 上海 201804; 3. 昆明云内动力股份有限公司, 昆明 650200)

摘要: 针对断路器这类瞬间动作机构铰链间隙、结构弹性等真实因素诱发机械故障问题, 建立了一种考虑实际工况的高压断路器有限元模型, 分析大功率脉冲载荷作用下断路器工作特性, 预测弹簧刚度、尺寸偏差对其运动特性的影响, 揭示极限参数、设计缺陷等潜在故障导致断路器机械特性变化规律。该方法克服了试验成本高、工作量大、分析效率低的缺点; 弥补了传统断路器故障样本参数单一, 难以系统分析故障产生原因的缺陷; 对提高断路器故障诊断水平有重要意义。

关键词: 高压断路器; 操动机构; 有限元模型; 故障仿真

中图分类号: TP182

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 06-1136-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0679

CAE Modeling and Fault Simulation for Instantaneous Action Mechanism with High Power and Heavy Load

Teng Lin^{1,2}, Tang Tang¹, Li Qiaojie³, Chen Ming^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China; 3. Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: A FEM simulation of a high voltage circuit breaker under actual conditions is proposed to solve the high-frequency vibration and mechanical failure problems caused by the realistic factors such as the clearance and structural elasticity of the breaker. Its operating characteristic under the high power pulse load is analyzed and the influence of the spring stiffness and dimension error on the breaker's motion characteristics was predicted. On the basis of the dependency of the breaker's mechanical characteristics on potential faults, critical parameters and design defects are established. The new FEM of the a high-voltage circuit breaker will replace the traditional high-cost, large-work-load, and inefficient experimental diagnostic method. It also eliminates the obstacles of the systematic analysis on the fault generation mechanisms, such as the lack of fault samples of traditional experimental methods, and thus significantly improves the fault diagnosis for the high-voltage circuit breakers.

Keywords: High-voltage circuit breaker; Operating mechanism; FEA model; Fault simulation

引言

瞬间动作机构具有动作时间短, 响应效率高, 传动速度快, 承受载荷大的特点; 广泛应用

于类似负荷、流体等切断设备; 如高压断路器、Gas Insulated Switchgear(GIS)、快速阀门、快速启闭机等。他们都是由储能系统、连杆操动系统以及安全保护系统所组成。工作时, 由大功率脉冲诱发, 储能系统释放能量, 驱动连杆操动机构工作。传统的研究方法是把这些机构简化成由多个运动副和力元组合的系统, 在忽略摩擦并不计构件弹性变形条件下, 利用拉格朗日方法、Kane 方



收稿日期: 2018-10-08 修回日期: 2019-02-25;
作者简介: 滕琳(1993-), 女, 满族, 辽宁锦州, 硕士, 研究方向为设备故障仿真与诊断; 唐堂(1981-), 男, 上海普陀, 博士, 研究方向为智能制造与故障诊断; 李翹婕(1990-), 女, 云南昆明, 硕士生, 研究方向为数字建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1136 •

法、笛卡尔积方法或自然坐标法^[1]建立机构运动学、动力学方程, 研究机构刚体的运动、动力学规律^[2]。然而现实大多数的机械产品, 各构件的弹性形变是客观存在的, 铰链摩擦及弹性间隙、运动中构件的冗余约束与预加载荷等真实工况对机构运动和动力的传递都起到了不可忽略的影响, 可能会带来严重的冲击噪声和部件损坏等^[3-4]。目前, 已有一些理论和方法被用于处理这类问题, 如运动-弹性动力学方法、浮动坐标法、增量有限元法、大转动矢量法、绝对节点坐标法等^[5-6]。这些方法已被一些商业软件运用, 并在理论推导、仿真分析、结构优化等方面得到了广泛应用^[7-9]。值得注意的是, 这些应用基本以四连杆或曲柄滑块机构为研究对象^[10], 揭示低速、小载荷作用下机构运动学、动力学规律。

类似于高压断路器这种传递大功率, 重载荷的瞬间动作机构, 因冲击载荷诱发的机械故障与系统动力学之间内在机理一直未取得突破性进展; 加之断路器在工作过程中较少动作, 难以获取大量故障样本。工程试验获取的故障样本大多为极限故障, 效率低, 成本高, 且故障参数单一; 定期检修和事后维修不仅消耗人力、财力, 而且缺乏明确的针对性, 甚至有可能在断路器重

新装配后影响其原有的稳定性。据统计, 近 10% 的断路器故障是由于检修引起的^[11]。因此, 如何及时准确地发现高压断路器潜在缺陷和故障, 建立故障表象和内在机理之间的联系, 成为断路器设计的一大难题。本文以某高压断路器弹簧操动机构为研究对象, 从力学特性、机构特性、交互特性出发, 建立综合考虑结构弹性、铰链摩擦、装配间隙等实际因素作用下的操动机构有限元模型, 研究大功率脉冲载荷诱发的动触头运动特性; 基于该模型对操动机构潜在故障运动特性进行系统仿真分析。该方法克服了断路器试验成本高, 分析效率低的缺点, 缩短了断路器设计周期, 提高了断路器故障诊断水平。

1 高压断路器操动机构

图 1 所示为本文研究的某型真空高压弹簧断路器结构示意图, 具有结构复杂、空间布局紧凑、传递功率大的特点, 是未来高压断路器发展的主流。整个工作周期通过弹簧储能, 动触头运动实现分、合闸动作, 包括合闸蓄能—蓄能保持状态—合闸运动—合闸保持状态—分闸运动—分闸状态如图 2 所示, 其机械参数指标如表 1 所示。

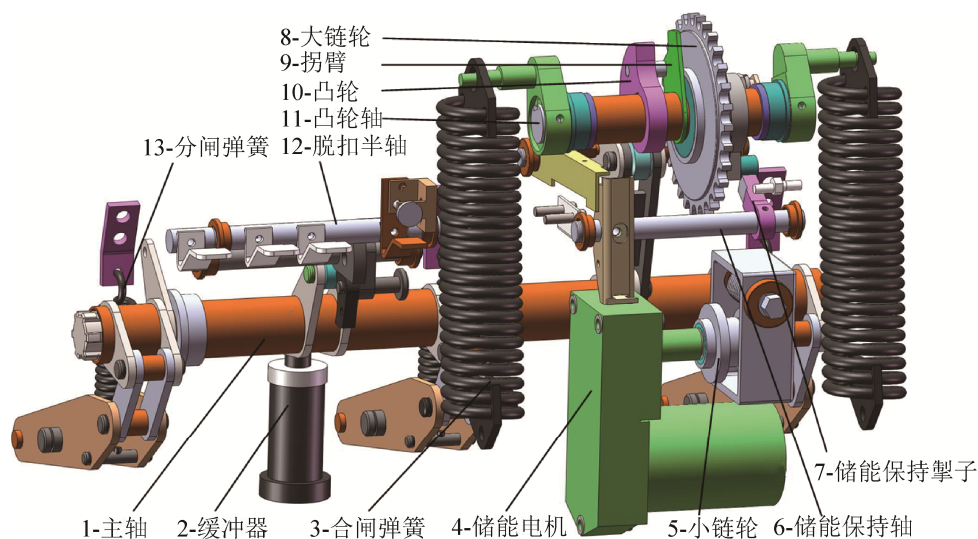


图 1 弹簧操动机构结构图

Fig. 1 Structure diagram of spring operating mechanism

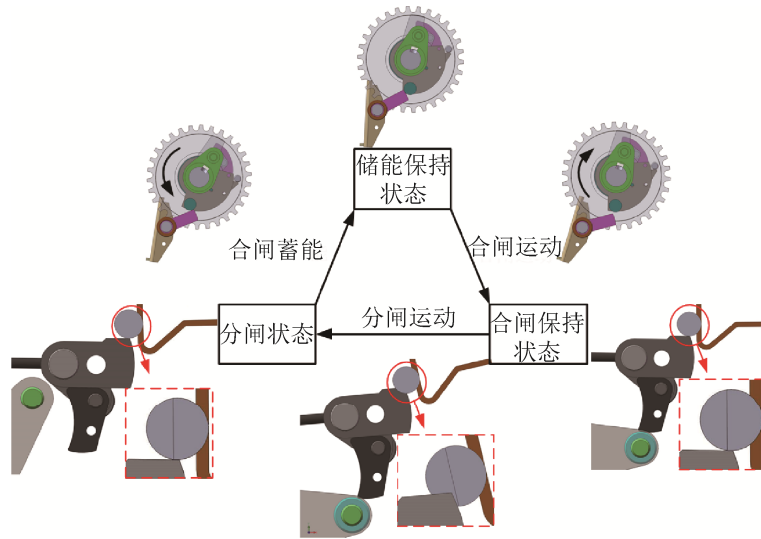


图 2 弹簧操动机构完整运动周期

Fig. 2 Motion cycle of spring operating mechanism

表 1 断路器主要机械技术参数
Tab. 1 Technical parameters of circuit breakers

参数	参考值
触头开距/mm	9±1
超行程/mm	3.5±0.5
平均分闸速度/(m/s)	1.1±0.2
平均合闸速度/(m/s)	0.7±0.2
合闸时间/ms	33±3.3
分闸时间/ms	23±2.3

合闸蓄能：储能电机输出扭矩驱动小链轮，并带动大链轮、离合掣带动棘轮、凸轮轴一起转动，合闸弹簧被拉伸，蓄能完成。

储能保持状态：合闸弹簧储能完成后，储能保持掣子限制凸轮轴运动，断路器进入储能保持状态。

合闸运动：断路器接收到合闸信号后，合闸电磁铁驱动储能保持掣子转动，松开滚轮，合闸弹簧释放能量，带动凸轮轴及凸轮转动；一方面通过连杆传动机构驱动动触头运动，实现合闸，另一方面拉伸分闸弹簧，为分闸储能。

合闸保持状态：机构实现合闸后，脱扣半轴闭锁，限制掣子滚子运动，断路器进入合闸保持状态。

分闸运动：断路器接到分闸信号后，分闸电磁铁驱动脱扣半轴转动，锁扣限位块滑出，分闸掣子约束解除，分闸弹簧释放能量，驱动

主轴，并带动连杆传动机构驱动动触头运动，实现分闸。

分闸状态：分闸后，机构中弹簧松弛，动触头与静触头分离，此时机构所处状态为分闸状态。储能电机再次给机构储能，机构进入下一循环周期。

2 操动机构有限元建模及仿真

2.1 操动机构有限元建模

传统以几何造型为核心的 CAD 技术和以有限元为代表 CAE 技术在断路器机构设计中有着广泛应用^[12]。本文利用 HYPERWORKS 对断路器操动机构进行建模，在保证仿真模型与物理样机弹性和惯性等效的前提下，忽略轴承、套筒、弹簧、轴销等辅助零件，利用铰链单元、弹簧单元模拟；在保证几何特征与物理样机一致的前提下，凸轮、拐臂、主轴等关键零部件，采用六面体单元进行网格划分。

将所建立的网格模型通过中间文件(*.inp 文件)导入 ABAQUS，根据表 2 数据赋予零件材料属性，定义单元类型，并结合实际工作方式装配，定义边界条件。采用 Connector 中的 Axial 模拟机构中的拉簧/压簧；采用 Connector 中的 Hinge 连接

单元来模拟机构中的铰链, 如图 3 所示。将公差等级高于 IT6 的铰链简化成理想铰, 而将公差等级低于 IT6 的铰链定义成间隙链, 结合机构中销轴直径(50 mm), 取间隙值为 0.016 mm, 根据表 3 参数设置间隙铰接触碰撞参数。约束凸轮、上连杆、主轴、拐臂 X、Y、Z 移动自由度以及 X、Y 转动自由度, 同时约束绝缘拉杆 Z 方向移动自由度和 X、Y、Z 转动自由度, 最后设定求解时间(40 ms), 利用显式最小稳定步长计算, 考虑模型几何非线性及大变形情况, 仿真时打开求解器中 NLGEOM 大变形选项, 并通过 2 个分析步模拟断路器分、合闸过程。

表 2 操动机构主要部件材料参数表

Tab. 2 Material parameters for operating mechanism

部件	材料	弹性模量/GPa	泊松比
凸轮\滚子\上拐臂\下拐臂	40Cr	211	0.277
上连杆\中连杆\下连杆	30CrNi3	211	0.25
绝缘拉杆	QA15	103	0.3
动触头\静触头	35CrMo	213	0.286

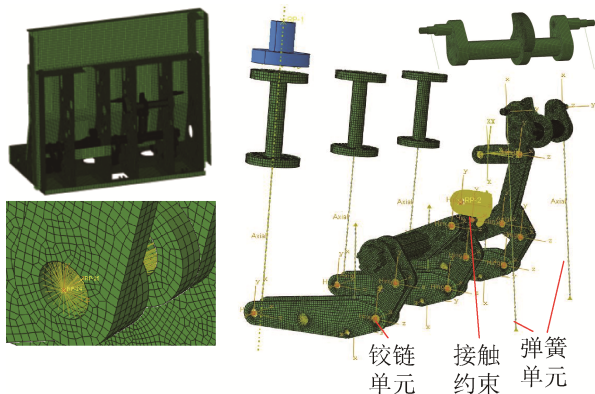


图 3 弹簧断路器有限元模型

Fig. 3 FEA model of spring circuit breaker

表 3 操动机构仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters for operating mechanism

参数	数值
接触刚度系数 $K_{\max}/(\text{N/m})$	1.2×10^{10}
阻尼系数 $D_{\max}/(\text{N.s/m})$	3.71×10^5
碰撞系数/n	1.5
法向接触深度 $\delta_{\max}/\text{m}$	1.0×10^{-5}
名义静摩擦系数 ^[13] μ_s	0.2
名义滑动摩擦系数 ^[13] μ_d	0.16
最大静摩擦速度 $v_c/(\text{m/s})$	1.0×10^{-2}

2.2 操动机构有限元仿真

主轴是弹簧断路器关键零部件, 在工作过程中受冲击载荷, 容易发生断裂。如图 4 所示为主轴在整个分合闸过程中应力曲线图, 图 4 中所示主轴最大应力发生在合闸 5.8 ms 时刻, 其值为 167.8 MPa。最大应力位置出现在中连杆与主轴铰接附近; 该位置是由凸轮工作时撞击滚子产生的冲击载荷引起的; 应力值小于主轴材料许用应力, 满足设计使用需求。

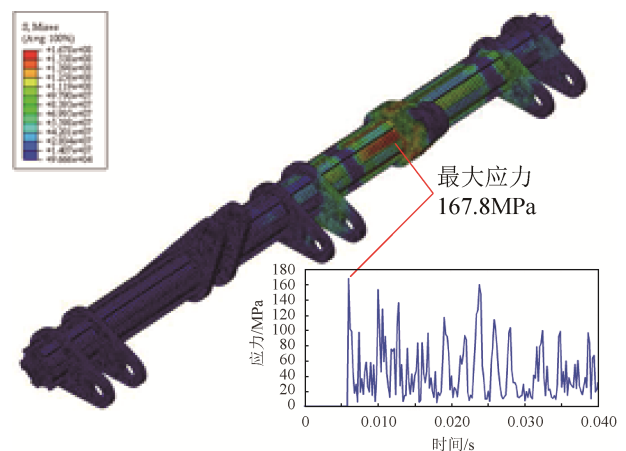


图 4 主轴应力云图

Fig. 4 Maximum stress for main axle

调整网格大小, 计算相同边界条件下的应力, 可用来验证模型的精度^[14]。如图 5 所示, 设置模型单元大小分别为: 2 mm, 1.5 mm, 1 mm, 0.5 mm 时, 主轴在同一位置处的应力值。随着单元尺寸的降低, 模型中的应力值会趋近于稳定。兼顾计算效率, 采用单元大小为 1 mm 的模型进行分析计算。

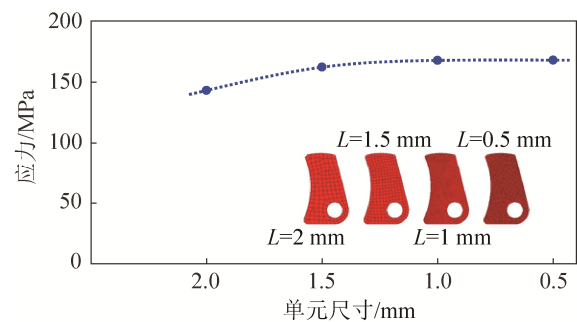


图 5 网格大小对应力结果的影响

Fig. 5 Effect of mesh size on stress results

断路器动触头分合闸位移、速度是确定断路器开断、关合能力的重要参数。如图 6 所示为断路器动触头位移、速度特性曲线。根据国际电工委员会(IEC)标准规定^[15],从图 6 中可知,该断路器分、合闸动触头行程为 9 mm,合闸时间与分闸时间分别为 35 ms、22 ms;合闸平均速度与分闸平均速度分别为 0.5 m/s、1.2 m/s。与表 1 参数相比,满足断路器设计要求。

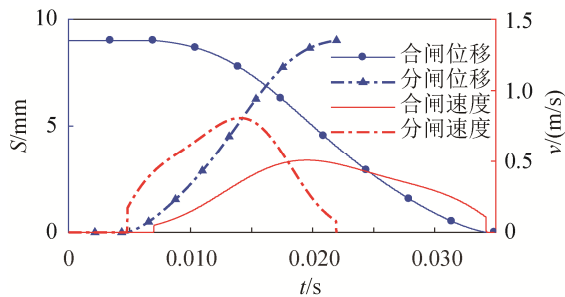


图 6 动触头速度特性曲线

Fig. 6 Velocity characteristic curves for moving contact

3 操动机构典型故障仿真分析

3.1 断路器操动机构典型故障介绍

高压断路器要在极短的时间内完成加速启动和减速骤停的动作。这一过程使断路器操动机构承受极大的惯性冲击,产生剧烈振动,严重时会造成损坏零部件,发生机械故障^[16]。断路器工作中典

型机械故障有:误动故障、拒动故障以及滞后故障,如图 7 所示。

基于断路器有限元模型,设置相关仿真参数及边界条件,研究断路器在潜在故障参数下的故障表象特征,通过对比断路器主要机械技术参数表,如表 1 所示,可确定关键参数诱发相应故障的临界阈值。

3.2 弹簧刚度影响

弹簧作为操动机构唯一动力源元件,直接关系到断路器分合闸运动稳定性与可靠性。然而实际工作中,弹簧长期处于高应力状态,会发生一定程度的蠕变、应力松弛,改变原本弹簧所储存的弹性势能,影响断路器分合闸运动特性,导致断路器工作故障发生。

(1) 合闸弹簧刚度变化

合闸弹簧所储存的能量一部分被用来合闸,另一部分被分闸弹簧储存,用于分闸。为了研究合闸弹簧刚度变化对断路器合闸工作特性的影响,在分闸弹簧刚度保持不变的前提下,利用所建立的有限元模型分别仿真合闸弹簧刚度变化 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 时,断路器动触头合闸运动特性变化。

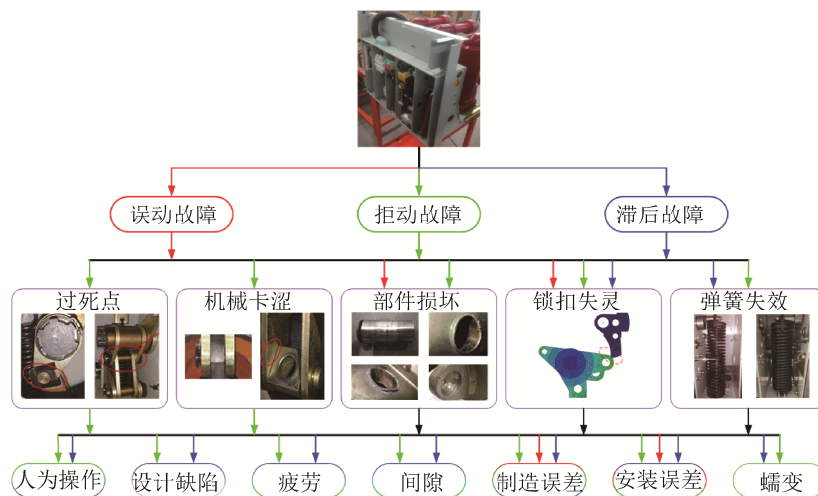


图 7 断路器故障分析

Fig. 7 Fault analysis of circuit breaker

结果表明, 当分闸弹簧刚度保持不变, 合闸弹簧刚度增加时, 断路器动触头合闸速度增加, 合闸时间减小, 如表 4 所示。

表 4 合闸弹簧刚度变化对动触头合闸运动特性变化
Tab. 4 Motion characteristics of moving contact vs spring stiffness at closing

变化率/%	速度/(m/s)	时间/s	变化率/%	速度/(m/s)	时间/s
-15	0.753 2	故障	3	0.776 5	0.031 9
-10	0.761 1	0.033 5	5	0.777 0	0.031 9
-5	0.769 9	0.033 1	10	0.787 6	0.031 5
-3	0.773 2	0.032 9	15	0.796 5	0.031 1
0	0.775 2	0.032 0			

这是因为随着合闸弹簧刚度增加, 弹簧所储存的弹性势能增大, 在分闸弹簧存储能量保持不变的情况下, 系统合闸操作功增大, 使断路器合闸运动速度增加、运动时间减少。当合闸弹簧刚度减少 15% 时, 断路器出现“合后即分”故障。该故障是由于合闸弹簧储存的能量难以克服分闸弹簧阻力做功, 当合闸动作至 37 ms 时, 机构中的凸轮无法继续滚动, 掣子滚子难以进入锁止点, 机构在分闸弹簧阻力作用下出现反向运动, 如图 8 所示, 即出现“合后即分”故障。

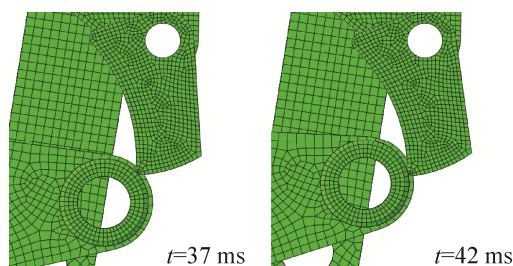


图 8 合闸弹簧刚度减少 15% 掣子运动状态
Fig. 8 Pawl's Motion State at 15% Decrease of Spring Stiffness at Closing

(2) 分闸弹簧刚度变化

分闸弹簧能量来自于断路器合闸时, 合闸弹簧提供能量; 其弹簧刚度的变化, 不仅影响着合闸过程, 还决定着分闸过程可靠性。在合闸弹簧刚度保持不变的前提下, 利用所建立的有限元模型分别仿真分闸弹簧刚度变化 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$,

断路器动触头分、合闸过程运动特性变化。

结果表明, 当断路器合闸弹簧刚度保持不变, 分闸弹簧刚度增加时, 断路器动触头合闸速度减小, 合闸时间增长, 如表 5 所示。

表 5 分闸弹簧刚度变化对动触头运动特性变化
Tab. 5 Motion characteristics of moving contact vs spring stiffness at opening

变化率	合闸运动			变化率	分闸运动		
	/%	速度/(m/s)	时间/s		/%	速度/(m/s)	时间/s
-10	0.815 0	0.030 2	-10	1.233 6	0.022 9		
-5	0.800 7	0.031 7	-5	1.234 0	0.022 7		
-3	0.789 0	0.031 8	-3	1.234 1	0.022 7		
0	0.775 2	0.032 0	0	1.234 6	0.022 7		
3	0.757 3	0.032 4	3	1.235 4	0.021 9		
5	0.746 0	0.032 4	5	1.235 8	0.021 9		
10	0.709 1	故障	10	1.236 7	0.021 5		

这是因为合闸弹簧刚度不变, 弹簧所储存的弹性势能恒定, 随着分闸弹簧刚度增大, 系统合闸需要克服分闸弹簧阻力做功增加, 合闸操作功减少, 致使断路器动触头运动速度减小、运动时间增加。当分闸弹簧刚度增加 10% 时, 断路器在 37ms 难以克服分闸弹簧阻力做功, 出现了同样“合后即分”的拒合故障, 如图 9 所示。

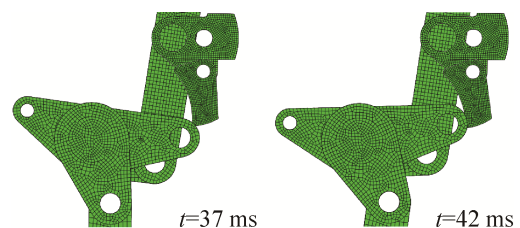


图 9 分闸弹簧刚度增加 10% 掣子运动状态
Fig. 9 Pawl's motion state at 10% increase of spring stiffness at opening

随着分闸弹簧刚度增加, 断路器动触头分闸速度也随之增加, 分闸时间则随之减小, 如表 5 所示。由于分闸过程中, 分闸弹簧无需克服系统阻力做功, 所以分闸过程不会出现合闸过程那种“合后即分”的故障; 但会因弹簧储存能量过大或过小, 导致断路器分闸速度过大或过小, 难以满足实际使用需求。

因此,合理的匹配分、合闸弹簧刚度,可以避免断路器在分、合闸过程中,因能量储备不足而出现拒合故障。

3.3 尺寸偏差影响

(1) 脱扣掣子安装误差

脱扣掣子是弹簧操动机构实现合闸,保持终止位置的关键零件。脱扣掣子尺寸偏差主要来自于两方面:一方面由于制造、安装误差导致脱扣掣子连接铰点存在一定尺寸偏差;另一方面,伴随着操动机构分、合闸过程中强烈冲击,脱扣掣子与掣子滚子因接触碰撞,导致接触位置出现一定尺寸偏离。利用建立的有限元模型研究合闸时,掣子横向误差,如图 10 所示,对动触头运动特性变化。

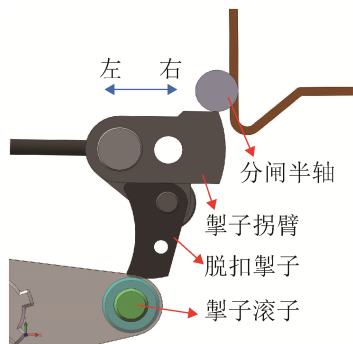


图 10 合闸保持状态下的掣子
Fig. 10 Pawl at closing state

由表 6 可知,当脱扣掣子偏移值达到 -2 mm 时,动触头合闸速度为 0.598 m/s 、合闸时间为 36.7 ms ,合闸速度与合闸时间均超出表 1 断路器临界阈值范围,出现“慢合”故障。

表 6 掣子安装误差对动触头合闸运动特性变化

Tab. 6 Motion characteristics of moving contact vs pawl's installation error at closing

偏移值 /mm	速度/(m/s)	时间/s	偏移值 /mm	速度/(m/s)	时间/s
-2.0	0.597 8	0.036 7	+1.1	0.720 4	1.2
-1.5	0.650 1	0.034 9	+1.2	故障	故障
-1.0	0.673 0	0.033 6	+1.5	故障	故障
0.0	0.708 3	0.032 5	+2.0	故障	故障
+0.4	0.718 4	0.032 1			

随着掣子横向位移从左向右逐渐偏移时,动触头速度呈现上升趋势;这是因为偏移值向右逐渐增大时,掣子轴承与脱扣掣子接触时间逐渐减少,断路器合闸阻力做功也随之减少,导致动触头速度增加。当偏移值 1.2 mm 时,脱扣掣子难以继续锁止掣子滚子,出现“合后即分”故障。

(2) 凸轮-滚子安装误差

断路器合闸时,由于凸轮撞击滚子的时间很短,在该瞬态冲击载荷作用下,滚子可能会发生损坏。尤其是因安装、制造误差导致碰撞过程产生附加力矩作用,加速滚子损坏。根据结构尺寸,利用有限元模型,研究合闸时滚子横向偏距误差,如图 11 所示,对动触头运动特性变化。

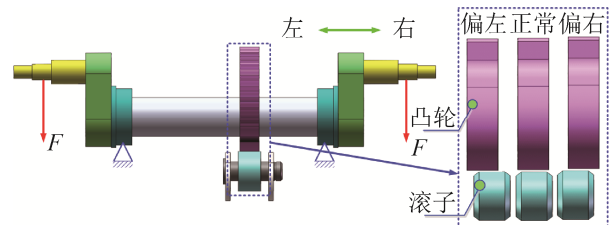


图 11 凸轮-滚子接触状态

Fig. 11 Contact state between cam and roller

从表 7 数据可知,不管凸轮左偏还是右偏,接触部位的应力都在不断增加,而接触力却在减小,且呈对称分布。因为当凸轮与滚子安装出现横向偏距时,安装在主轴端部合闸弹簧拉力会出现侧向偏移,使凸轮与滚子的碰撞力及碰撞区域的应力发生偏移。如果两者之间的横向偏距增至临界阈值,滚子应力集中增强,使用寿命减少,严重时会造成强度破坏。因此,凸轮在安装过程中,应尽可能对中安装。

表 7 滚子最大接触力、应力随偏距程度变化

Tab. 7 Maximum contact force and stress of roller vs offset

横向偏距 /mm	接触力/N	应力 /MPa	横向偏距 /mm	接触力/N	应力 /MPa
-2	17 450.3	798.6	0.5	18 198.7	580
-1.5	17 754.5	710	1	17 881.3	597.4
-1	17 906.8	593.1	1.5	17 762	718.2
-0.5	18 196.8	579.5	2	17 402.7	806.4
0	18 238.3	571.5			

3.4 零件损坏

冲击载荷会导致机械零件发生损坏, 如静触头限位块因冲击载荷而损坏。利用有限元模型, 通过释放静触头固定约束, 研究静触头限位块失效时, 引起的故障。

图 12 所示为限位块正常与失效状态对比结果, 从图 12 中可以看出, 当限位块失效后, 合闸时, 静触头在与动触头发生碰撞后, 连同动触头一起运动, 主轴越过死点, 继续转动; 正常状态下主轴角位移为 35° , 而当限位块失效后, 主轴角位移达到 71° , 且仿真与试验吻合良好。因此断路器在设计安装过程中静触头限位固定需要仔细检查, 避免在工作过程中因固定失效, 而导致机构出现过死点故障。

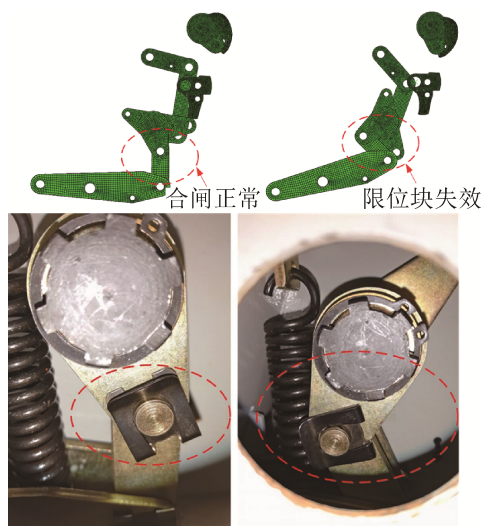


图 12 操动机构正常状态与过死点对比

Fig. 12 State of normal and over dead point for operating mechanism

4 结论

(1) 根据高压断路器实际工作情况, 结合 ABAQUS 建立了操动机构有限元模型, 系统的分析了弹簧刚度、凸轮偏距、掣子偏移及零件损坏等参数对高压断路器工作特性的影响, 弥补了试验成本高, 难以系统分析故障产生原因的缺陷;

(2) 合闸过程中, 随着合闸弹簧刚度增加, 动触头速度呈现增长趋势, 而在合闸弹簧刚度保

持不变的情况下, 分闸弹簧刚度变化, 可能会导致机构出现“合而即分”的故障; 分闸过程中, 分闸弹簧刚度变化只会影响动触头速度, 不会出现“合而即分”的故障。合理的匹配分、合闸弹簧刚度, 可以避免断路器因能量储备不足而导致故障发生。

(3) 系统中的一些因尺寸、安装误差带来的缺陷(如脱扣掣子安装误差、静触头固定不牢等), 对断路器动触头的速度有一定的影响, 严重时会发生“合而即分”或主轴过死点的故障。

参考文献:

- [1] 张可维, 张云清, 陈立平. 基于自然坐标系概念的自然坐标选择方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011(1): 90-93.
Zhang Kewei, Zhang Yunqing, Chen Liping. Natural-coordinate selection based on Natural-coordinate system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011(1): 90-93.
- [2] 董富祥, 洪嘉振. 多体系统动力学碰撞问题研究综述[J]. 力学进展, 2009, 39(3): 352-359.
Dong Fuxiang, Hong Jiazhen. Review of Impact Problem for Dynamics of Multibody System[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 352-359.
- [3] 巫世晶, 梁良. 特高压断路器机械传动机构动态特性优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 727-732.
Wu Shijing, Liang Liang. Dynamic Characteristic Optimization for Transmission Mechanism of UHV Circuit Breaker[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 727-732.
- [4] Wu J, Luo Z, Zhang N, et al. A New Interval Uncertain Optimization Method for Structures Using Chebyshev Surrogate Models[J]. Computers and Structures (S0045-7949), 2015, 146: 185-196.
- [5] Tian Q, Chen L, Zhang Y, et al. Simulation of Planar Flexible Multibody Systems With Clearance and Lubricated Revolute Joints[J]. Nonlinear Dynamics (S1573-269X), 2010, 60(4): 489-511.
- [6] Q Tian, P Flores, H Lankarani. A Comprehensive Survey of the Analytical, Numerical and Experimental Methodologies for Dynamics of Multibody Mechanical Systems With Clearance or Imperfect Joints[J]. Mechanism and Machine Theory (S0094-114X), 2018,

- 122: 1-57.
- [7] 齐朝晖, 罗晓明, 黄志浩. 含非理想空间棱柱铰的多体系统接触分析[J]. 力学学报, 2011, 43(3): 570-578.
Qi Zhaohui, Luo Xiaoming, Huang Zhihao. Frictional Contact Analysis of Spatial Prismatic Joints in Multibody Systems[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(3): 570-578.
- [8] 王琪, 庄方方, 郭易圆, 等. 非光滑多体系统动力学数值算法的研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(1): 101-111.
Wang Qi, Zhuang Fangfang, Guo Yiyuan, et al. Advances in the Research on Numerical Methods for Non-Smooth Dynamics of Multibody Systems[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 101-111.
- [9] 虞磊, 赵治华, 任启鸿, 等. 基于绝对节点坐标的柔性体碰撞仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010(7): 1135-1140.
Yu Lei, Zhao Zhihua, Ren Qihong, et al. Contact Simulations of Flexible Bodies Based on Absolute Nodal Coordinates[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010(7): 1135-1140.
- [10] 赵强强, 郭俊康, 洪军. 基于连杆机构旋转法则的平面单环闭链结构装配误差不确定性分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 29-38.
Zhao Qiangqiang, Guo Junkang, Hong Jun. Uncertainty Analysis of Assembly Error of Planar Single-loop Mechanisms Based on the Rotatability Laws of Linkages[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 29-38.
- [11] 苗红霞. 高压断路器故障诊断[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 15-19.
Miao Hongxia. Fault Diagnosis of High Voltage Circuit Breaker[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 15-19.
- [12] 乔延华, 苏秀苹, 董天颖. 油阻尼断路器触头系统电动斥力仿真及优化[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2175-2181.
Qiao Yanhua, Su Xiuping, Dong Tianying. Simulation and Optimization on Electrodynamic Repulsion Force of Contact System in Circuit Breaker with Oil Dashpot [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2175-2181.
- [13] 郝雪清, 陈江义. 不同运动副材料对间隙机构动力学特性的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 19-21.
Hao Xueqing, Chen Jiangyi. Effects of different materials in joints on dynamic characteristics of a mechanism with clearance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 19-21.
- [14] Li W, Shen S, Li H. Study and optimization of the filtration performance of multi-fiber filter[J]. Advanced Powder Technology (S0921-8831), 2016, 27(2): 638-645.
- [15] 范兴明, 邹积岩, 陈跃, 等. 高压断路器合成关合试验要求及其关合性能的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 81-85.
Fan Xingming, Zou Jiyan, Chen Yue, et al. Research on Requirements for Synthetic Making Test and Making Capability of High-Voltage Circuit-Breaker[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 81-85.
- [16] 牛为华, 梁贵书, 赵鹏. 基于稀疏表示和 M-ELM 的断路器故障诊断模型[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2828-2839.
Niu Weihua, Liang Guishu, Zhao Peng. Fault Diagnosis Model of Circuit Breaker Based on Sparse Representation and M-ELM [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2828-2839.