

# 基于 ADAMS 的塑壳式断路器操作机构可靠性探析

余永辉

杭州瑞盛电气有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8134

**[摘要]** 利用 Pro/E 软件进行建模, 得到塑壳式断路器的立体模型, 然后利用接口软件将其导入 ADAMS 中进行分析处理, 在实际参数的支持下对前面构建的模型进行优化完善。在断路器操作机构可靠性研究中, 基于 ADAMS 的柔性体建模技术构建刚柔结合仿真模型, 通过仿真分析提取关键部件应力分布特征, 结合机械可靠性理论建立应力-强度概率模型与疲劳损伤评估体系, 深入分析连杆静强度及疲劳强度的可靠性。

**[关键词]** 塑壳式断路器; ADAMS; 操作机构; 可靠性

## Reliability analysis of plastic shell circuit breaker operating mechanism based on ADAMS

Yu Yonghui

Hangzhou Ruisheng Electric Co., LTD.

**[Abstract]** Using Pro/E software for modeling, a three-dimensional model of the plastic shell circuit breaker was obtained. Then, using interface software, it was imported into ADAMS for analysis and processing. Based on actual parameters, the previously constructed model was optimized and refined. In the study of the reliability of circuit breaker operating mechanisms, a flexible body modeling technique based on ADAMS was used to construct a combined rigid-flexible simulation model. Through simulation analysis, key component stress distribution characteristics were extracted. Combining mechanical reliability theory, a stress-strength probabilistic model and fatigue damage assessment system were established, delving into the reliability of the static strength and fatigue strength of the connecting rods.

**[Key words]** plastic shell circuit breaker; ADAMS; operating mechanism; reliability

在产品可靠性研究方面, 有关设计者一般利用样机、试品试验制定设计方案, 但是这种设计方案投入的成本高, 且开发时间长, 新产品推出时间慢。虚拟样机技术的出现为设计人员提供了新的设计途径, 其可以在虚拟环境中进行模拟分析, 明确产品整机的运动、受力信息, 同时这种技术还可以弥补物理样机的不足, 丰富设计研发数据。为了探究塑壳式断路器操作机构的可靠性, 本文利用 Pro/E 软件进行了建模, 然后基于 ADAMS 进行了仿真分析, 由此得到了操作机构的动态特点, 针对操作机构核心部件开展结构迭代与力学特性分析, 结合强度计算结果构建可靠性评估模型, 完成机构承载量验证。

### 一、塑壳式断路器操作机构概述

在电网安全防护体系中, 塑壳式断路器作为中低压配电网网的关键控制元件, 通过电磁-机械维持系统能量分配稳定性。

当分闸响应时间参数匹配时, 弹簧储能驱动模块较电磁/液压驱动方案实现合闸瞬时响应, 在抑制电弧预燃扩散及提升短路工况触头热稳定性方面具有显著优势。塑壳式断路器采用弹簧储能式操作机构, 可通过手动或电动装置完成能量储存, 储能完成后触发合闸动作, 驱动主触头从断开状态切换至闭合状态, 实现电路导通。当机构处于闭合状态时, 通过解除操作机构的机械锁定可执行脱扣操作, 此时储能弹簧释放能量, 带动传动组件反向运动, 使主触头由闭合位置复位至断开状态, 完成电路分断。一旦塑壳断路器电流过载时, 机构会快速变换主触头的位置, 使其从接头位置推移至断开位置, 期间用时不超过 5 毫秒。经过这一操作, 电弧会在短时间内进入灭弧室, 从而可以起到保护用电设备、配电线路的作用。

### 二、建模及仿真分析

### (一) 建模

ADANMS 是机械动力学领域应用较多的仿真软件,且具有较高的权威性。在使用 ADAMS 软件时,要以计算机设备为载体,在其中创建虚拟样机模型,并输入合适的约束、载荷力。如此一来,即可从运动学、动力学的角度分析复杂类型的机械模型,并基于模型的支持明确模型中相关部件的受力情况、速度数据以及加速度数据等,降低产品研发开支,加快研发速度。

在正式创建模型时,需要用到 Pro/E 软件,这是一种专业化的建模软件,在利用这一软件完成建模后,可以利用 MECH/Pro 模块将构建的立体模型导入 ADAMS 中。

在将构建的立体模型导入 ADAMS 软件中后,首先要修改构件信息,输入名称、颜色、质量等信息,并结合现实要求加入合适的约束条件。前两项工作旨在更好地服务于后续工作;后两项工作是实现仿真分析,获取计算结果的关键。在 ADAMS 成功导入立体模型以后,需隐藏非必要部件以清晰展示操作机构内部构造。

完成立体模型搭建后,需综合模型结构特征与力学需求确定约束条件,并施加相应载荷。本文创建的模型中,支架、静触头以及动触头等部件的转动轴均以固定约束副加以约束,固定位置均为地面,其目的是为定位、限制等提供便利,除了以上几种构件外,其余构件均可以移动,碰撞约束副、固定约束副、转动约束副的个数分别为 14、1、12。

结合对本次仿真分析的模型分析可知,其中所有的重要的约束部位均伴随摩擦,此效应对仿真结果产生干扰。为提升仿真精度,需在各关键约束处合理设定摩擦参数,且以对应孔/轴半径作为旋转约束摩擦半径基准。

试验测得塑壳断路器手柄分闸操作力达 26N,后续仿真以此为自变量参数开展分析,因变量分别为时间、力,利用下述函数可以进行模拟,得到开闸的过程:

$$IF((time - 0): 0, 0, 26) + IF((time - 0.02): 0, 0, -26)$$

利用专业设备进行测试,由此得到关键弹簧的刚度系数与初载荷。对于分断弹簧而言,刚度系数、初载荷分别为 12.3N/mm、98N;对于主转轴扭簧而言,刚度系数、初载荷为 2.2N/mm、180N。

### (二) 初步仿真分析

本研究构建的操作机构仿真模型,严格参照实际产品的结构特征进行搭建,其几何形态与真实产品高度契合。模型中各部件以转动副实现轴向联结,并赋予合理摩擦参数;针对接触区域设置接触副并优化参数,同时将部分构件简化为刚体。在保证模型与原型等效性的前提下,进行初步仿真。

当初步仿真结果和实际情况存在非正常差距时,需要调整摩擦力矩预载荷等参数,缩小二者之间的差距,当二者的吻合度达到要求后再利用模型进行数据仿真。

## 三、塑壳式断路器操作机构关键部件的应力分析

塑壳式断路器操作机构在分断期间会产生高速运动、碰撞,这一现象的出现会导致构件应力在短时间内发生明显变

化,借助 ADAMS 软件柔性体处理模块,对关键部件实施柔性化转换,以精准捕捉应力演变规律。具体操作中,采用 ADAMS/AutoFlex 模块在 View 环境下生成柔性体 MNF 文件,并完成对原刚性部件的替代。

### (一) 上连杆应力特性分析

针对上连杆展开分析,其运动过程中存在两处转动约束机制:该构件通过上下端孔分别与跳扣轴及连杆轴形成转动副连接,于上下端孔轴心位置分别创建外部节点,并采用刚性单元与孔壁内表面节点建立连接关系,从而实现外部载荷通过约束节点向结构内部的准确传递。基于操作机构动态仿真分析框架,重点考察上连杆在分断操作全周期内的应力响应特征,通过时域分析方法获取关键节点 Von Mises 应力随时间演变的时程曲线,为结构强度评估提供量化依据。

借 Durability 模块内 Hot Spots Table 功能,可输出节点应力值并定位最大值,如 439 号节点应力达 487.27 兆帕。

### (二) 下连杆与跳扣的应力解析

采用一致建模手段,分别构建下连杆及跳扣的仿真模型,并针对性开展应力分析。结果表明,下连杆于分闸操作时,所承受的应力峰值达 439 兆帕;跳扣在相同工况下,应力最大值则为 423 兆帕。综合考量上下连杆及跳扣的应力分布特征,判定操作机构应力集中区域为上连杆,后续将据此展开可靠性评估。

## 四、上连杆可靠性评估

上连杆选用冷轧 45 钢板,板材厚 1.25mm、宽≤125mm,加工精度符合通用工业标准,厚度公差严格控制在±0.015mm 范围内,宽度公差±0.5mm。材料弹性模量 E 呈 (210±5%) GPa 正态分布,经调质热处理后,其洛氏硬度介于 30~40 之间,1500N 为上连杆在合闸状态下的受力大小。可靠性评估聚焦连杆应力与强度分布规律,后续将基于静力学承载特性及交变载荷耐久性开展可靠性分析。

### (一) 连杆应力离散特性解析

变异系数 (Coefficient of Variation) 亦称离散化指数,为概率分布离散特性的标准化表征量,其本质是标准差与均值之比。

变异系数实际上是离散系数,它是标准差和平均值的比值。用  $\sigma$  表示连杆的受力, F 表示载荷, H 表示连杆材料的厚度, B 表示连杆材料的宽度,则  $\sigma$  与 F、H、B 之间均有一定的关联性。将标准离差视作  $3\sigma$ ,当确定 F、H 及 B 的均值和上下偏差时,  $\sigma$  的离散系数表示如下:

$$C_{\sigma} = \sqrt{C_F^2 + C_H^2 + C_B^2}$$

将  $C_F$ 、 $C_H$ 、 $C_B$  的值 0.0333、0.004、0.025 依次代入上式中,由此可以得到  $\sigma$  的离散系数为 0.041。

根据上述仿真分析可知,上连杆的最大应力均值  $\bar{\sigma} = \sigma = 487MPa$ ,而

$$C_{\sigma} = S_{\sigma} / \bar{\sigma}$$

其中  $C_\sigma$  值已经求出, 为 0.041,  $\bar{\sigma}$  也已确定, 为 487MPa, 则可以求得  $S_\sigma$  为 19.97MPa。

### (二) 连杆静强度可靠性分析

基于工程材料数据库分析可知, 材料静力学承载特性涵盖屈服阈值与极限强度等力学参数, 其分布形态符合正态分布规律。设计阶段需针对目标材质开展多批次重复性试验, 通过样本数据拟合获取力学特性均值、离散度标准差及变异系数等统计量。若试验条件受限, 可参照《机械设计手册》中典型材料力学参数表选取经验值。

若 45 钢连杆强度特征呈正态分布, 热处理洛氏硬度介于 30~40 之间, 则可以在手册中查找到强度值, 当洛氏硬度为 30 时, 对应强度为 1009 兆帕; 当洛氏硬度为 31 时, 对应的强度为 1034 兆帕... 当洛氏硬度为 36 时, 对应的强度为 1170 兆帕; 当洛氏硬度为 37 时, 对应的强度为 1200 兆帕...

结合上述数据计算平均强度:

$$\bar{\sigma}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{bi} = 1145.7 \text{ MPa}$$

$\sigma_b$  样本的标准差计算如下:

$$S_{\sigma_b} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{bi} - \bar{\sigma}_b)^2} = 95 \text{ MPa}$$

将上述数据代入以下公式:

$$u_{R_1} = \frac{\bar{\sigma}_b - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_{\sigma_b}^2 + S_\sigma^2}}$$

则可以得到  $u_{R_1}$  值为 6.7854。

基于正态分布参数拟合分析, 45 钢连杆静力学承载可靠度  $R_1$  可稳定达 99.999% 以上阈值。

### (三) 连杆疲劳强度可靠性评估分析

基于材料试验的结果数据发现, 工程中大部分材料疲劳强度多呈正态或对数正态分布特征, 还有一些特殊材料可能服从 Weibull 分布。此类分布参数是连杆可靠性设计的核心输入量, 需通过多次试验获取统计样本。若试验数据不足, 可依据《机械设计手册》提取同类材料 S-N 曲线基准值, 结合有限元仿真结果进行参数校准, 采用线性回归法构建疲劳寿命预测模型, 最终通过模型外推确定连杆疲劳极限安全阈值。

当塑壳断路器在  $10^3 \sim 10^5$  次循环内发生疲劳失效时, 其损伤模式可判定为低度疲劳。此类损伤伴随高应力幅值, 峰值应力集中于材料塑性形变区, 导致不可逆塑性应变累积显著, 故低度疲劳损伤亦称应变循环型或塑性主导型疲劳失效。

基于 P-S-N 曲线拟合分析, 钢铁材料疲劳寿命特征值可按  $(1 \sim 10) \times 10^6$  次循环区间取值, 工程中默认取  $10^7$  次; 若数据置信度不足, 建议保守取值  $10^6$  次。

在半对数坐标系中, 以  $\lg N$  为横轴时, 材料 S-N 曲线可线性化。基于疲劳试验数据, 在坐标纸上标定  $(10^3, \sigma_1)$ 、 $(10^7, \sigma_2)$  特征点, 通过线性回归拟合获得近似 S-N 关系曲线。

针对 45 钢淬火处理连杆构件, 若  $N_0$  为  $10^3$ , 则

$$\sigma_{-1N_0} = 0.65 \bar{\sigma}_b = 744.7 \text{ MPa}$$

若  $N_0$  为  $10^7$ , 则  $\sigma_{-1}/\sigma_b$  为 0.46, 由此可得,

$$\sigma_{-1} = 0.46 \bar{\sigma}_b = 527 \text{ MPa}$$

继而可以得到连杆零件材料的 S-N 曲线。

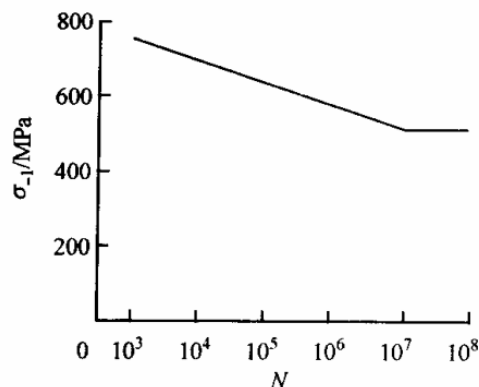


图1 连杆的 S-N 曲线

当操作循环次数为 3000 时, 对应的疲劳强度为:

$$\sigma_{-1L(3000)} = 527 + (744.7 - 527) \times \frac{7 - \lg 3000}{7 - 3} = 718.7$$

结合 S-N 曲线与相关资料进行分析可知,

$$\sigma_{0L} = 1.42 \sigma_{-1L}$$

将  $\sigma_{-1L(3000)}$  的值代入该式, 则可以求得  $\sigma_{0L}$  为 1020.554MPa。

查阅相关资料可知, 钢材的疲劳强度 C 为 0.08, 因而可以依次计算出  $S_{\sigma_0}$ 、 $u_{R_2}$ , 计算结果分别为 81.64MPa、6.36。

基于正态分布概率表校核, 45 钢淬火连杆疲劳强度可靠度  $R_2$  应满足  $R_2 \geq 0.99999$  的工程容错要求。

### 总结

综上所述, 本研究借助 ADAMS 仿真平台, 针对塑壳断路器操作机构运行可靠性展开系统性探究, 重点解析了核心构件的应力特征及其空间分布规律, 并基于可靠性设计准则, 从连杆静载强度与交变载荷疲劳特性双维度开展评估, 结果表明其性能稳定, 可靠性指标满足设计预期。

### [参考文献]

- [1] 惠勇锋, 段晓辉, 郭良超, 等. 弹簧机构分闸锁扣系统对高压断路器分闸时间影响研究[J]. 高压电器. 2024, 60(8).
  - [2] 马磊. 基于无刷直流电机高压断路器操动机构的特性研究[J]. 电工材料. 2023, (5).
  - [3] 林婧, 张佳灏, 黎旭, 等. ZN98 型真空断路器弹簧操动机构机械动力学特性仿真研究[J]. 高压电器. 2022, 58(11).
- 作者简介: 余永辉; 出生年月: 1978 年 10 月 27 日; 性别: 男; 民族: 汉族; 籍贯: 浙江杭州临安; 学历: 大专; 公司研究方向: 高低压电气成套及控制设备。