

高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧可靠性分析

舒服华

(武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

Closing Switch Spring Reliability Analysis & Improvement of High Voltage
Circuit Breaker Operating Mechanisms

SHU Fu-hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 针对高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧失效问题, 运用可靠性设计理论对其进行分析研究, 找出了弹簧因疲劳可靠度不足而失效的原因, 并提出了解决问题的措施。常规设计是将弹簧外载荷、几何尺寸、材料强度性能等参数是看作确定量, 实际上由于受材质、制造、测量等条件的影响, 这些参数是不确定的, 所以往往导致零件因不可靠而失效。可靠性设计将这些参数视为随机变量, 运用概率统计的方法分析弹簧的强度, 定量回答了弹簧的失效概率问题, 使人对弹簧的质量有了更加准确的把握。提高弹簧的疲劳可靠度可从改进弹簧尺寸参数、材料、制造工艺、受力状况等多方面入手, 但对于旧设备, 应该根据实际情况从经济性、工艺性、可行性方面考虑。通过比较选择了弹簧表面喷丸处理的最佳改进方法。

关键词: 断路器; 合闸弹簧; 可靠性分析; 改进

中图分类号: TM56

文献标志码: A

Abstract: Considering closing spring failure of operating mechanisms in high voltage circuit breaker, reliability design theory was applied to analyze it, and found reason of spring failure because of lacking fatigue reliability, and offered some measures to solve the problem. In convention design theory, spring parameters such as outer load, geometry, and material strength properties are regarded as certainty. In fact, affected by material, manufacture, and measurement, they are uncertain so as to cause spring failure because of lacking reliability usually. In reliability design theory, these parameters were taken as random variables and used probability statistics method to study spring intensity. It offered a quantitative answer to the probability problem of spring failure, and people can assure the quality of spring. Solution of the problems includes improvement of spring geometric size, material, manufacturing technology, and bearing condition, but for the old equipment, some actual conditions such as economization, technology, feasibility should be considered. By comparison, shot-peening to deal with spring surface was chosen as the

best way finally. Improvement result showed spring fatigue reliability was sufficient.

Key words: circuit breaker; closing spring;
reliability analysis; improvement

0 引言

高压断路器是电力系统中重要的开关设备, 担负着控制和保护电路的双重任务^[1]。而在高压断路器中, 弹簧操动机构使用较为普遍, 并且其涉及的弹簧数量和类型较多, 因而它们的可靠性对设备及电力系统的安全运行具有重要影响。据调查, 某变电企业 126 kV 高压断路器弹簧操动机构中的合闸弹簧时有断裂情况发生, 除了使用和维护不当, 设计方法是否存在问题也值得探讨。常规的设计是将条件参数当作固定不变的值来考虑和处理, 既与实际情况不吻合, 也不能回答机械零部件在运行过程中的失效概率问题。笔者利用可靠性设计理论研究高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧强度问题, 解答了弹簧失效的原因, 并提出了相应的改进措施。

1 弹簧可靠性设计模型

1.1 可靠性设计基本原理

传统的强度计算是将外载荷、零件的几何尺寸、材料的强度性能等量当作固定不变的值来考虑和处理。事实上, 很多零部件由于受材质、制造加工、测量、试验等诸多因素的影响, 其参数是不确定的, 而可靠性设计弥补了这一不足, 它将这些参数作为属于某种分布的随机变量来处理, 在应用概率统计及强度计算的理论进行分析计算后, 给出机械零件在一定的设计条件下的失效概率, 从而得到产品的可靠度^[1], 使得人们对产品质量的把握更加准确^[2]。

收稿日期: 2007-02-13; 修回日期: 2007-05-16

作者简介: 舒服华(1964-), 男, 湖北省武汉市人, 博士研究生, 主要从事优化设计和可靠性设计研究。

弹簧可靠度可表示为

$$R(t) = \int_0^t P(t) dt$$

式中 $R(t)$ 为弹簧的可靠度; t 为弹簧的工作状态变量, $t = s - p$, 其中 s 为弹簧极限应力, p 为弹簧工作应力; $P(t)$ 为弹簧工作状态变量的概率密度。

从以上分析可知, 计算弹簧的可靠度, 必须知道弹簧的状态变量 t 的联合分布概率密度 $P(t)$ 。研究表明, 弹簧极限应力和工作应力大致为正态分布, 因此可按正态分布模型计算可靠度^[2], 其计算公式为

$$Z_R = (s - p) / \sqrt{S_s^2 + S_p^2}$$

式中 Z_R 为可靠度系数; s 为弹簧的极限应力均值; p 为弹簧的工作应力均值; S_s 为弹簧的极限应力标准差; S_p 为弹簧的工作应力标准差。

可靠度系数 Z_R 求出后, 按标准正态分布函数表就可查得弹簧的可靠度 $R(t)$ 。

1.2 弹簧静强度可靠度计算

弹簧的剪应力均值为 $\tau = 8KFD / (\pi d^3)$ 。式中 d 为弹簧丝直径均值, mm; D 为弹簧中径均值, mm; K 为弹簧的曲度系数均值, $K = (4C - 1) / (4C - 4) + 0.615 / C$, 其中 $C = D/d$ 为缠绕比; F 为作用在弹簧上的最大载荷均值, N。

弹簧剪应力的标准差为 $S = C$ 。式中 C 为剪应力变差系数, $C = \sqrt{C_F^2 + C_K^2 + C_D^2 + 9C_d^2}$; C_F 为最大工作载荷变差系数; C_K 为曲度系数变差系数; C_D 为弹簧中径变差系数; C_d 为弹簧丝直径变差系数。各变量的均值、标准差和变差系数确定为: ①曲度系数 K 。均值 K 按定义式计算, 标准差可根据弹簧钢丝直径 d 和弹簧中径 D 的公差估算, 平均为 $S_K = 0.045$, 变差系数 $C_K = S_K / K$; ②轴向载荷 F 。均值 F 可按名义工作载荷取值, 标准差 S_F 及变差系数 C_F 可按载荷的允许偏差 $\pm F$ 确定, 即 $S_F = F/3$, $C_F = F/(3F)$; ③弹簧中径 D 。均值 D 可按名义尺寸取值, 标准差的估计值 S_D 见表 1, 变差系数 $C_D = S_D/D$; ④弹簧钢丝直径 d 。均值 d 可按名义尺寸取值, 标准差 S_d 变差系数 C_d 见表 2。

弹簧材料的剪切疲劳强度均值为 $\tau_s = 0.4535 \tau_b$,

表 1 弹簧中径的标准差

精度等级	1	2	3
4~8D	0.0033	0.0050	0.0066
8~16D	0.0050	0.0066	0.0100

表 2 弹簧丝直径的标准差和变差系数

弹簧丝直径	标准差	变差系数
0.7~1.0	0.0100	0.0140~0.0100
1.2~3.0	0.0110	0.0080~0.0033
3.5~6.0	0.0130	0.0037~0.0020
8.0~12.0	0.1280	0.0130~0.0011

式中 τ_b 为材料抗拉强度的均值, $\tau_b = (\tau_{bmax} - \tau_{bmin})/2$ 。弹簧材料的剪切疲劳强度的标准差为 $S_{\tau_s} = C_s \tau_s$ 。式中 C_s 为材料的剪切疲劳强度变差系数, $C_s = C_b$, C_b 为材料抗拉强度的变差系数, $C_b = (\tau_{bmax} - \tau_{bmin}) / (6 \tau_b)$ 。

弹簧静强度的联结系数及可靠度为

$$Z_1 = \frac{\tau_s - \tau_p}{\sqrt{S_{\tau_s}^2 + S^2}}; R_1 = (Z_1) = \int_0^{Z_1} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-t^2/2} dt$$

式中 R_1 为静强度的可靠度; (\cdot) 为静强度的分布函数。

1.3 弹簧疲劳强度可靠度计算

对于变载荷作用次数 $N > 10^3$ 的弹簧, 除了进行静强度及变形设计外, 还必须进行疲劳强度可靠度计算, 以预防可能出现的疲劳断裂。由于真空断路器弹簧操动机构频繁动作, 合闸弹簧受力从小到大交替循环, 所以必须进行疲劳可靠性计算^[3]。

弹簧的最大剪应力均值为 $\tau_{max} = 8KF_{max}D / (\pi d^3)$ 。式中 F_{max} 为作用在弹簧上的最大载荷值, N。弹簧的最大剪应力标准差为 $S_{\tau_{max}} = C_{\tau_{max}} \tau_{max}$ 。式中 $C_{\tau_{max}}$ 为最大剪应力变差系数, $C_{\tau_{max}} = \sqrt{C_{F_{max}}^2 + C_K^2 + C_D^2 + 9C_d^2}$, $C_{F_{max}}$ 为最大工作载荷变差系数, 其值的确定同上。

弹簧极限剪应力均值为 $\tau_{lim} = \tau_0 + 0.75 \tau_{min}$ 。式中 τ_0 为脉动疲劳强度的均值, 可取 $\tau_0 = 0.3 \tau_{bmin}$, τ_{min} 为最小剪应力的均值, $\tau_{min} = 8KF_{min}D / (\pi d^3)$, 其中 F_{min} 为最小工作载荷均值。

弹簧极限剪应力标准差为

$$S_{\tau_{lim}} = \sqrt{S_{\tau_0}^2 + (0.75S_{\tau_{min}})^2}$$

式中 S_{τ_0} 为脉动疲劳强度标准差, $S_{\tau_0} = C_{\tau_0} \tau_0$, 其中 C_{τ_0} 为脉动疲劳强度变差系数, 如果弹簧表面经过喷丸处理, 通常取 $C_{\tau_0} = 0.075$, 如果弹簧表面未经喷丸处理, $C_{\tau_0} = 0.096$; $S_{\tau_{min}}$ 为最小剪应力的标准差, $S_{\tau_{min}} = C_{\tau_{min}} \tau_{min}$, 其中 $C_{\tau_{min}}$ 为最小剪应力变差系数, $C_{\tau_{min}} = \sqrt{C_{F_{min}}^2 + C_K^2 + C_D^2 + 9C_d^2}$, $C_{F_{min}}$ 为最小工作载荷变差系数, 其值的确定同上。

弹簧疲劳强度的联结系数可靠度及可靠度为

$$Z_2 = \frac{\tau_{lim} - \tau_{max}}{\sqrt{S_{\tau_{lim}}^2 + S_{\tau_{max}}^2}}; R_2 = (Z_2) = \int_0^{Z_2} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-t^2/2} dt$$

式中 R_2 为疲劳强度的可靠度; (\cdot) 为疲劳强度的分布函数。

2 实例分析

以 CT27 型 126 kV 高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧为研究对象, 基本结构见图 1。弹簧的参数为: 弹簧丝直径 $d=12$ mm, 弹簧中径 $D=120$ mm, 总圈数 $n=11$, 安装高度 $H_1=210$ mm, 自由高 $H_0=450$ mm, 工作行程 $H=120$ mm, 最小工作负荷 $F_{min}=1100$ N, 最大工

作负荷 $F_{max}=2\ 500\text{ N}$; 工作载荷变动范围 $\pm 5\%$; 弹簧材料选 65Mn, $\sigma_b=1\ 500\text{ MPa}$, $C_s=0.05$, 弹簧精度等级 2 级, 压缩弹簧, 要求弹簧设计的可靠度 $[R] = 0.97$ 。

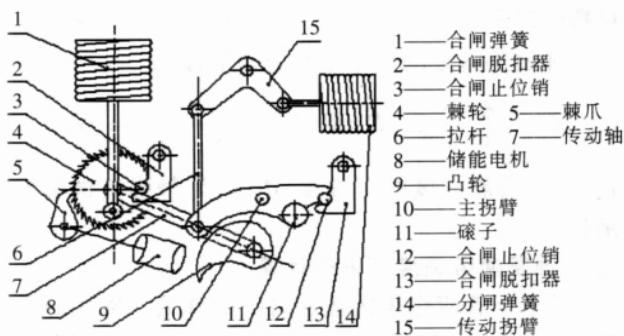


图1 弹簧操动机构简图

2.1 弹簧强度可靠性校核

弹簧指数 $C=120/12=10$, 弹簧曲度系数 $K=(4 \times 10 - 1)/(4 \times 10 - 4) + 0.615/10 = 1.145$ 。根据弹簧的参数确定和计算的均值与变差系数见表 3。

表3 弹簧参数的均值及变差系数

	F	F_{min}	K	D	d
均值	2 500	1 100	1.145	120	12
变差系数	0.033	0.033	0.039	0.006	0.013

(1) 静强度可靠度计算

$$= \frac{8 \times 1.145 \times 2\ 500 \times 120}{3.14 \times 12^3} = 506.45\text{ MPa}$$

$$C = \sqrt{0.033^2 + 0.039^2 + 0.006^2 + 9 \times 0.013^2} = 0.064\ 5$$

$$S = 506.45 \times 0.064\ 5 = 32.54$$

$$\sigma_s = 0.453\ 5 \times 1\ 500 = 680.25\text{ MPa}$$

$$S_s = 0.05 \times 1\ 500 = 75\text{ MPa}$$

$$Z_1 = \frac{680.25 - 506.45}{\sqrt{75^2 + 32.54^2}} = 2.129$$

$$R_1 = (2.129) = 0.982\ 53 > [R]$$

静强度可靠度满足设计要求。

(2) 按疲劳强度可靠度计算

$$\sigma_{max} = 506.45\text{ MPa}$$

$$C_{max} = C = 0.064\ 5, S_{max} = S = 32.54$$

$$\sigma_{min} = 0.3 \times 1\ 500 = 450\text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \frac{8 \times 1.145 \times 1\ 100 \times 120}{3.14 \times 12^3} = 222.84\text{ MPa}$$

$$\sigma_{lim} = 450 + 0.75 \times 222.84 = 617.13\text{ MPa}$$

因弹簧表面未经喷丸处理, $C_0 = 0.096$;

$$S_0 = 0.096 \times 450 = 43.2; C_{min} = C = 0.064\ 5;$$

$$S_{min} = 0.064\ 5 \times 617.13 = 39.80;$$

$$S_{lim} = \sqrt{43.2^2 + (0.75 \times 89.80)^2} = 52.50;$$

$$Z_2 = \frac{617.13 - 506.45}{\sqrt{32.54^2 + 52.50^2}} = 1.791;$$

$$R_1 = (1.791) = 0.963\ 32 < [R].$$

疲劳强度可靠度不满足设计要求。由此可见, 弹

簧发生失效并非偶然, 主要原因是疲劳破坏。

2.2 提高弹簧疲劳可靠度的措施

弹簧操动机构合闸弹簧的可靠度涉及的因素渐多, 如弹簧的尺寸、材料、制造工艺、载荷性质等。提高弹簧疲劳可靠度主要有以下措施。

(1) 调整弹簧的几何尺寸。弹簧的可靠度主要取决于其剪应力的大小, 由 $\tau = 8KFD/(d^3)$ 知, 增大弹簧丝直径、减小弹簧中径则剪应力下降, 弹簧的可靠度提高。但必须注意, 弹簧操动机构弹簧的刚度对其动力性能具有较大的影响。一般来说, 断路器弹簧操动机构的弹簧刚度是根据使用要求优化过的^[4, 5], 所以在调整弹簧几何尺寸时应保持弹簧的刚度不变。由刚度 $k_p = Gd^4/(8D^3n)$ 知, 只有进行组合调整, 才能使弹簧刚度 k_p 不变。如增大弹簧丝直径 d 同时增大弹簧的有效圈数 n ; 减小弹簧中径 D 同时增大弹簧的有效圈数 n 。

(2) 改进材料和制造工艺。弹簧的可靠度与材料的强度和制造水平密切相关, 材料强度越高, 弹簧的可靠度越高, 弹簧的制造精度和工艺水平越高, 弹簧的可靠度也越高。因此, 可通过提高弹簧材料的强度和制造工艺水平来达到目的。如将弹簧材料从 65Mn 变更为 60Si₂MnA, 把弹簧的制造精度从 2 级提高到 3 级, 对弹簧表面进行镀锌、喷丸等强化和防脱碳工艺处理都可以有效提高弹簧的可靠度。

(3) 改善受力状况。弹簧的疲劳可靠度与其承受载荷的大小、性质、形式密切相关, 尤其是最大、最小应力差。应力差幅度越大, 弹簧可靠度越低。所以, 减小弹簧工作应力差, 有利于提高弹簧的疲劳可靠度。由 $\sigma_{lim} = \sigma + 0.75 \sigma_{min}$ 知, 适当增大弹簧最小工作应力, 弹簧的极限应力提高, 从而使弹簧的疲劳可靠度提高。增大弹簧最小工作应力的简单途径是增加弹簧的预压力, 可通过降低弹簧的安装高度实现, 并且它对弹簧的动力特性和使用性能影响较小。

虽然上述改进方法都能达到提高弹簧疲劳可靠度的目的, 但其中有些改动工作量大, 操作手段复杂, 成本代价高。对旧设备改造, 由于受工艺、结构、安装等条件的限制, 应以对原设计修改最小取得的效果最大为原则^[6]。综合考虑, 对弹簧进行表面处理不失为一种行之有效的方法。如采取喷丸处理, 方法简单易行。改进后的可靠度参数及可靠度计算如下

$$C_0 = 0.075, S_0 = 0.075 \times 450 = 33.75$$

$$S_{lim} = \sqrt{33.75^2 + (0.75 \times 89.80)^2} = 45.06$$

$$Z_2 = \frac{617.13 - 506.45}{\sqrt{32.54^2 + 45.06^2}} = 1.991$$

$$R_2 = (1.991) = 0.978\ 12 > [R]$$

疲劳强度可靠度满足设计要求。可见, 只需喷丸处理, 弹簧参数按原设计方案就能满足工作时所需的静强度和疲劳强度可靠度要求。(下转第 373 页)

表 1 含双极性脉冲噪声时滤波前后计算所得介损的误差

算法	误差绝对值的最大值	误差的标准差	误差绝对值的均值	误差的均值
未滤波	1.461 1	0.454 0	0.371 0	0.011 3
算法 1	0.472 5	0.075 9	0.056 3	0.001 8
算法 2	0.472 5	0.076 0	0.056 3	0.001 8

表 2 含单极性脉冲噪声时滤波前后计算所得介损的误差

算法	误差绝对值的最大值	误差的标准差	误差绝对值的均值	误差的均值
未滤波	1.693 5	0.444 0	0.353 5	-0.004 9
算法 1	0.694 2	0.107 9	0.073 7	0.000 5
算法 2	0.695 6	0.107 9	0.073 7	0.000 6

进中值滤波算法滤波后信号的介损测量结果都较直接计算所得介损在精确度上有很大程度的提高,介损误差绝对值的最大值、介损误差的标准差、介损误差绝对值的均值和介损误差的均值均只有未滤波信号的 1/7 ~ 1/3; 原中值滤波算法和提出的改进中值滤波算法滤波后信号计算所得介损的精确度也非常接近。表 2 数据与表 1 有类似的规律,虽然误差稍有增加,但增加程度较小,表明不考虑非整周期采样时原中值滤波算法和改进中值滤波算法对含单极性脉冲噪声的信号仍然具有较好效果。

对于原中值滤波算法,滤波后信号长度变短且减少的项数与滤波窗长度有关,为了保证更加接近整周期采样以确保算法精度,需要采样更多的点和考虑滤波窗的长度,否则容易增加介损测量的误差。而提出的改进中值滤波算法滤波后的信号长度与原

信号相等,能很好地避免因为滤波长度改变可能给介损测量带来影响这个问题,增加了算法的实用性。

5 结语

提出了一种针对电压和电流信号存在脉冲噪声时的介损算法,该算法先用中值滤波对采集的电压和电流信号进行预处理,然后使用数字化算法计算介损。仿真分析表明:中值滤波算法能有效滤除信号中的脉冲噪声;提出的结合中值滤波的介损数字化算法能有效提高介损测量的准确性;改进了中值滤波算法,使滤波前后信号长度不变,避免了信号长度变化可能给介损测量带来的干扰,在保证提高介损测量精确度的同时提高了算法的实用性。

参考文献:

- [1] 曹宇亚, 申忠如, 任稳柱. 介质损耗带电检测数字化处理方法的研究[J]. 高压电器, 2000, 36(3): 17-19.
- [2] 王微乐, 李福祺, 谈克雄. 测量介质损耗角的高阶正弦拟合算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(9): 5-8.
- [3] 柴旭峰, 关根志, 文习山, 等. tan 高精度测量的加权插值 FFT 算法[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 32, 33, 37.
- [4] 冯小华, 吴正茂, 张承学. 介损在线监测的 3 种改进谐波分析法的分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 4, 5, 9.
- [5] 徐志钮, 律方成, 赵丽娟, 等. 结合频谱校正的修正理想采样频率方法用于介损角测量[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 365-367.
- [6] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(上接第 370 页)

3 结语

可靠性设计,由于考虑了载荷、零件尺寸和材料强度性能等数据的分散性,将它们看作具有某种概率分布的统计量,符合工程实际中发生的现象及表征参数的不确定性(随机性),因而更能揭示事物的本来面貌,比常规的强度设计方法更接近实际。利用可靠性设计理论对 126 kV 断路器弹簧操动机构合闸弹簧强度进行分析计算,定量回答了弹簧在运行中的安全性与可靠性的问题,找出了弹簧因疲劳可靠性不足而发生断裂的原因,并提出了相应的解决措施。分析表明,提高合闸弹簧的疲劳强度可靠度,不仅要从选材、钢丝直径的允差、弹簧中径、允差以及弹簧表面强化处理等多方面来控制才有效果,同时也应该根据实际情况,从经济性、适用性、可行性上综合考虑改良。在诸多改进方案中,笔者选择了弹簧表面喷丸处理的最佳措施,方法简便易行,改进

的效果显著。

参考文献:

- [1] 谭蓉, 姜琪. 高压真空断路器弹簧操动机构的设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2000, 26(1): 36-40.
- [2] 曾祥璞. 圆柱螺旋弹簧的可靠性优化设计 [J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(5): 12-15.
- [3] 王连鹏, 王尔智. 真空断路器弹簧操动机构优化设计与可靠性分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 166-167.
- [4] 闫静, 马志瀛, 金黎. 真空断路器弹簧操动机构中凸轮机构的优化设计[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 420-423.
- [5] PURKAIT P, CHAKRAVORTI S. Pattern Classification of Impulse Faults in Transformers by Wavelet Analysis [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(4): 555-561.
- [6] MA X, ZHOU C, KEMP I J. Interpretation of Wavelet Analysis and Its Application in Partial Discharge Detection[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 446-457.