

真空断路器弹簧操动机构中连杆机构的容差优化

陈刚^{1,2}, 孙波^{1,2}, 王尔智¹

(1. 沈阳工业大学电机工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 沈阳理工大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110068)

Tolerances Optimization for Linking Member of Spring Mechanism in Vacuum Circuit Breaker

CHEN Gang^{1,2}, SUN Bo^{1,2}, WANG Er-zhi¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 2. Faculty of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110068, China)

摘要: 在对弹簧操动机构运动学、动力学分析的基础上,以真空断路器的分断、合闸速度特性等技术指标为约束条件,以弹簧操动机构的杆件尺寸及其容差为变量,以相对容差大、成本低为目标,将离散随机方向搜索与复合型算法相结合对系统实施了容差优化。同时给出了能够满足弹簧操动机构分、合闸特性的杆件尺寸及最大容差,为真空断路器弹簧操动机构的设计提供一种新的优化设计方法。

关键词: 弹簧操动机构; 容差; 优化设计

中图分类号: TM561.3

文献标志码: A

Abstract: In this paper, based on the kinematics and dynamic analysis of a spring actuator, the specifications of the breaking and closing velocity characteristic of vacuum circuit breaker are taken as constraints, the lengths of the linkages of the spring actuator and its tolerances are chosen as the optimization variables, and the materials costs of those linkages and its relative tolerances compose the multiple objection function. The optimization strategy integrated discredited random direction searching with complex algorithm is adopted for solving the optimal tolerance design problem. As the optimization results, the optimized nominal parameters of the components and their largest tolerances of the actuator are given automatically. When the component tolerances are within the optimum tolerance region, the breaking and closing characteristics are all satisfied. It proves to be a new optimization design strategy.

Key words: the spring mechanism; tolerances; optimization

0 引言

目前,优化技术已被广泛应用在各种工程技术领域中,但传统的机械优化设计仅能给出参数空间中的一个优化参数点,且这个优化点有时位于参数值可接受区域的边界上。随着工作时间的延长元件

疲劳、老化,随着工作环境的变化参数值波动等,都将导致元件参数值发生变化,且有可能导致系统的工作状态偏离原设计的理想状态而不是工作在最优状态,甚至可能使一个或几个指标要求不满足而导致系统失效,也就是参数点移动到参数值可接受区域的边界以外。总是希望,当存在加工误差或环境等其他因素变化时,机构中各杆件尺寸 X 发生变化而偏离设计值 X^* 时,系统仍能正常工作。显然,系统的允许偏差 $|X^* - X|$ 越大,被加工误差或环境等其他因素破坏的可能性越小,工作可靠性也就越高。若能使设计点位于可行域中心附近,从而拥有最大的允许偏差 $|X^* - X|$,即最大的容差,就能降低机构加工的精度要求,进而降低生产成本,同时能够改善产品的可靠性^[1-3]。

断路器是电力系统中重要的保护和控制元件,其动作的可靠性极为重要。而弹簧操动机构的运动特性及其可靠性,直接影响着真空断路器的操作性能及其可靠性,因此为提高真空断路器的稳定可靠性,笔者提出了考虑弹簧操动机构杆件长度容差的容差优化设计技术。在容差优化中,使设计点在可行域内连续地移动而使杆件长度具有尽可能大的容差范围。这样设计出的系统不仅在设计点处而且当设计点在较大的范围内波动时均能满足设计要求,同时使系统分合闸速度的变化不大,是成本较低的最可靠系统。

1 真空断路器弹簧操动机构

弹簧操动机构是一种以弹簧作为储能元件、与凸轮-连杆一起构成的机械式操动机构。由于它不需要大功率直流电源,电动机功率小,适宜交流操作或交直流两用,因此真空断路器常用其作为操动机

构。笔者以自行设计的 10 kV、12.5 kA 真空断路器配用的弹簧操动机构为研究对象，其三相共用一个操动机构，具有动作同步性高的优点，所配用的弹簧操动机构示意图见图 1。图中 O_1 、 O_2 、 O_3 为固定轴，A、B、C、D、E 为活动轴销， L_1 、 L_7 、 L_x 为主转臂， L_0 、 L_3 为转臂， L_4 、 L_5 为转臂， L_6 、 L_2 为连杆。当合闸弹簧收缩而释放能量，凸轮顺时针方向转动，推动转臂 L_4 、 L_5 顺时针方向转动，使主转臂 L_1 、 L_7 、 L_x 逆时针方向转动，压缩分闸弹簧使其储能，同时使转臂 L_0 、 L_3 逆时针方向转动，带动导电杆上移而使触头接触，实现合闸；当分闸命令到来时，分闸弹簧释放能量，主转臂 L_1 、 L_7 、 L_x 顺时针方向转动，转臂 L_4 、 L_5 复位，同时推动转臂 L_0 、 L_3 顺时针方向转动，带动导电杆下移而使触头分离，实现分闸。

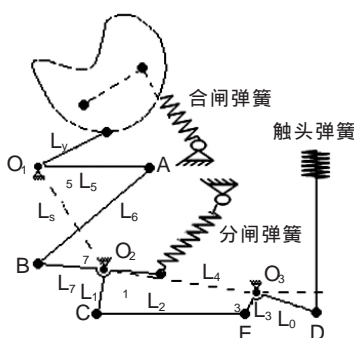


图 1 操动机构原理示意图

2 弹簧操动机构的容差优化

弹簧操动机构中各弹簧的刚度系数、连杆机构的运动特性决定了系统的力矩输出特性、速度比传动特性及触头间的分、合闸弹跳程度，对提高真空断路器的操作性能及可靠性都具有直接的影响。要真正改善操动机构的传动性能，对操动机构的弹簧有一个最经济的设计，并具有较高的工作可靠性、稳定性，应以弹簧操动机构的杆件尺寸及其容差为变量，建立弹簧操动机构的最佳容差优化的数学模型，对系统进行优化。

2.1 弹簧操动机构容差优化设计变量

选择连杆机构的杆件长度 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_5 、 L_6 、 L_7 以及它们的容差作为本次容差优化设计的优化变量。

令设计点为 $X^0 = [L_1, L_2, L_3, L_5, L_6, L_7]$ ，此设计点处的容差为 $X^0 = [L_1, L_2, L_3, L_5, L_6, L_7]$ ，当参数值 X 在 $[X^0 - X^0, X^0 + X^0]$ 范围内变化时，若系统均能满足设计指标的要求，说明 X^0 是系统在设计点 X^0 处的一个可行容差。该容差优化设计的目的是要寻找一个恰当的设计点 X^0 ，使系统在此处具有尽可能大的容差 X^0 ，且当参数值 X 在 $[X^0 - X^0, X^0 + X^0]$ 范围内变化时，既能满足机构的操作功能，又能

保证动作的可靠性。

2.2 弹簧操动机构容差优化的目标函数

实际上，元件参数值越大，材料费越高；容差越小即相对容差越小，则加工技术要求越高，成本也就越高，系统工作的稳定性也就越低。因此应使杆件中的最小相对容差最大化，同时使总的容差最大化、总材料最小化，以提高系统工作的稳定性、可靠性，同时降低成本。故本次容差优化的目标函数取为

$$\text{Max}\{f(X^0, X^0) = \min\left[\frac{X_i^0}{X_i^0}, i=1, \dots, 6\right] + \frac{\sum_{i=1}^6 X_i^0}{6 \cdot \sum_{i=1}^6 X_i^0}\}$$

2.3 弹簧操动机构容差优化的约束条件

真空断路器是通过对接式触头进行关合操作的，触头的合、分闸运动特性是满足灭弧室内电气性能的保证。研究发现，触头刚分速度对触头烧损和灭弧室开断性能有很大的影响，刚合速度对触头表面电磨损、预击穿等有很大的影响。在不考虑缓冲装置时，分闸到底时的速度越大，对缓冲装置的要求越高；在一定的缓冲能力下，分闸末速度越大，引起的分闸弹跳、冲击力越大，对系统的不良影响也越大。为保证动、静触头的可靠接触，合闸末速度不能太小^[4]。因此，在该次容差优化设计中，把动触头的分、合闸末速度 (v_{mb} 、 v_{mc}) 及刚分、刚合速度 (v_{fb} 、 v_{fc}) 指标作为主要的约束条件^[5,6]。原设计尺寸下，不考虑缓冲元件时，速度见表 1。

| 速度 | v_{fb} | v_{fc} | v_{mb} | v_{mc} |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 数值 | 1.202 1 | 0.996 6 | 1.579 8 | 0.850 0 |

根据 10 kV、12.5 kA 真空断路器的技术指标^[7]，结合表 1 的数据，给出该次容差优化的分、合速度的技术指标为(单位均为 m/s)

(1) v_{mc} 0.8, 即约束条件为

$$g_1(X) = 0.8 - v_{mc} \leq 0 \quad (1)$$

(2) v_{mb} 1.65 $g_2(X) = v_{mb} - 1.65 \leq 0$

(3) 1.1 v_{fb} 1.25

$$g_3(X) = v_{fb} - 1.25 \leq 0 \quad g_4(X) = 1.1 - v_{fb} \leq 0$$

(4) 0.95 v_{fc} 1.05

$$g_5(X) = v_{fc} - 1.05 \leq 0 \quad g_6(X) = 0.95 - v_{fc} \leq 0$$

此外，还要考虑弹簧操动机构的几何约束、运动学约束、动力学的约束等^[7]。

目标函数式、几何约束、运动学约束、动力学及分、合速度等各约束条件 $g(X) \leq 0$ 构成了容差优化的数学模型。

2.4 弹簧操动机构容差优化的实现

为求解此问题，将离散随机方向搜索算法与复合型算法相结合，从而避免建立复杂的等式约束关系式，使优化程序得以简化的同时又能达到很好的结果。设计程序流程见图2，在MATLAB环境下，编程并运行^[8]。

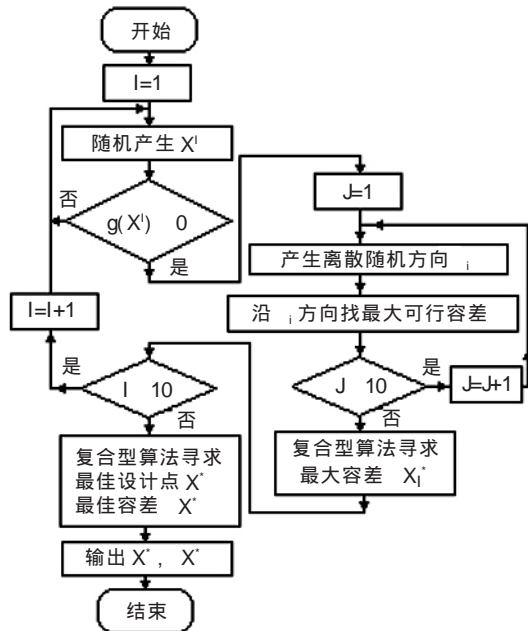


图2 容差优化设计程序流程图

在每一个可行设计点 X^l 处，随机产生一个容差方向 i ，沿该方向使容差 X 逐渐增大到至少有一个容差区顶点落在可接收区的边界上，从而获得在该点处沿该方向的最大容差 X_{i_j} ；再利用复合形的优化算法找出使目标函数最大的最佳容差 $X_{i_j}^*$ ，即此处最大的容差。然后令设计点 X^l 在可行域内连续移动，找出使目标函数最大的最佳设计点 X^* 及其最佳容差 X^* 。

由于待优化的杆件有6个，因此容差区总的顶点数为 $2^6=64$ 。在设计点 X^l 处，每一个可能的容差区域中只要有一个顶点落在可行域外，则放弃。

由于杆件 L_1, L_2, L_3, L_4 与杆件 L_5, L_6, L_7, L_8 各构成四连杆机构，故在寻优过程中，为简化搜索程序，降低程序复杂度，将搜索空间分为杆件 L_1, L_2, L_3 和杆件 L_5, L_6, L_7 2个子空间。

3 优化结果

按图2所示的程序流程图编程并运行，得到的优化结果列于表2中。作为对比，同时计算了原始设计方案在满足式(1)的条件下的容差，所得的结果也列在表2中。图3是优化设计方案与原始设计方案在相同容差范围内的分闸速度的动态范围。

表2 优化结果

| | 优化 | | | 原始 | | |
|-------|-----|------|--------|-----|------|--------|
| | 杆长 | 容差 | 相对容差/% | 杆长 | 容差 | 相对容差/% |
| L_1 | 49 | 3.2 | 6.5 | 50 | 4.6 | 9.30 |
| L_2 | 311 | 14.0 | 4.5 | 320 | 4.9 | 1.56 |
| L_3 | 87 | 4.0 | 4.6 | 80 | 3.5 | 4.30 |
| L_5 | 112 | 6.0 | 5.4 | 109 | 3.0 | 2.70 |
| L_6 | 208 | 9.4 | 4.5 | 215 | 4.3 | 2.10 |
| L_7 | 61 | 3.2 | 5.2 | 60 | 3.8 | 6.30 |
| | 828 | 39.8 | | 834 | 24.1 | |

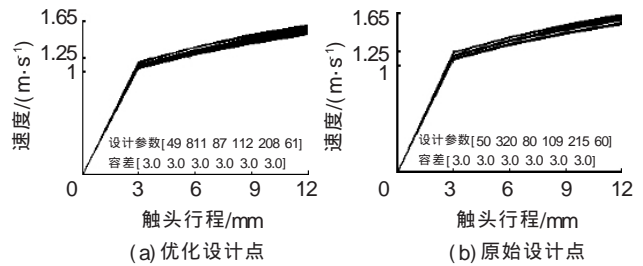


图3 优化设计点与原始设计点在容差为[3.0 3.0 3.0 3.0 3.0 3.0]时分闸速度的动态范围

4 结语

由表2可看出，在具有相同的速度动态范围时，优化后系统的总杆长由834减小到828，材料费可降低进而使成本降低；最小相对容差由原始的1.56%提高到4.5%（同时最小容差由3mm提高到3.2mm），且相对容差的离散性减小，使得材料的加工精度要求降低、产品合格率提高从而使成本降低，同时在一定程度上使系统的可靠性得到提高，降低对工作环境的要求。

分析图3可知，在相同的容差范围内，优化设计方案的分闸末速度比较低，分闸速度的分散性略小，因而对分闸缓冲装置的要求可降低，分闸时动触头对系统的冲击力小且变化不大，从而在一定程度上使系统的工作稳定性提高。分析计算证明，合闸过程也具有相同的结论。

机构杆件有较大的容差范围，与机构能否有效扣接并无直接的联系。影响机构工作可靠性的因素有很多，机构杆件的实际尺寸偏离设计尺寸而使传动效果不理想只是诸多因素中的一个，即使传动效果理想，也可能由于其他原因如弹簧疲劳、脱扣器故障等而使机构失效。

总之，通过综合考虑操动机构杆件的成本及杆件的相对容差而进行的优化设计，成功地使系统的成本降低，杆件相对容差增大，在一定程度上减小了速度的分散性，提高了系统的工作稳定性，改善了系统的性能，所做工作具有重要的理论指导意义和实践意义。
(下转第247页)

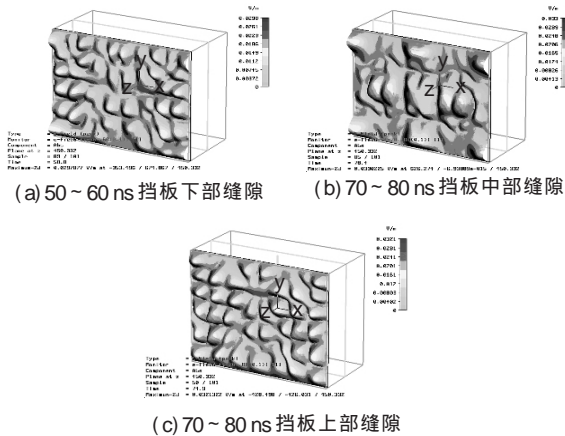


图8 挡板缝隙透过的电磁波最大幅值

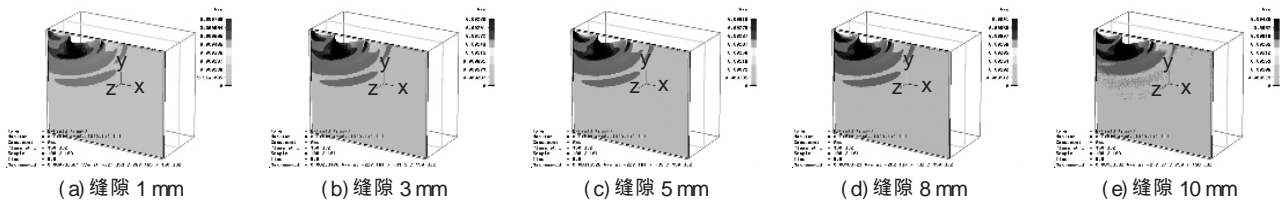


图9 10 ns时不同大小缝隙透过的电磁波

的电磁波强度又基本上是一样的。此结果表明了缝隙的大小对电磁波的传播存在着一个临界值：当宽度大于一定值的时候，将不对透出的电磁波大小产生明显的影响。

3 结论

(1) 箱体内部角处是折反射和叠加最强烈的地方，也是电磁波强度最大地方，这些位置是最适合于安装超高频天线的；

(2) 铁心对电磁波的辐射有衰减作用；

(3) 透过缝隙的电磁波幅值衰减严重，在一定范围内，缝隙越宽，透过的电磁波越强，超过范围后，不对透出的电磁波大小产生明显的影响；

(4) 由于仿真模型对实际的变压器作了较大程度的简化，将实际变压器中测得的信号与仿真结果对比，以上3点结论仍然成立。

(上接第243页)

参考文献：

[1] 王尔智, 杨理践. 最佳电路设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[2] TIAN M W, SHI C J R. Worst Case Tolerance Analysis of Linear Analog Circuits Using Sensitivity Bands [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2000(5): 1 138-1 145.

[3] WANG Shu-juan, ZHAI Guo-fu, CHEN Bo, et al. The Research of Tolerance Analysis and Its Application of Reliability in Electronic Circuit [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2002, 25(3): 296-300.

[4] 苑 舜. 高压断路器弹簧操动机构 [M]. 北京: 机械工业出版

2.6 缝隙大小对电磁波传播的影响

仍以图1模型为基础，在箱体中间加上一块金属挡板，在挡板顶部和箱体之间留一条缝隙，调整缝隙大小分别为：1、3、5、8、10 mm。在箱体内部电源挡板的另一面的箱壁50 mm处设置观察面，以模拟天线的安装位置，在经过10 ns后可得到图9的结果。

从图9可以看出，不同缝宽的缝隙透过的UHF信号大小是不同的，总体上来讲，缝隙越宽，透过的电磁波越强。缝宽1 mm时透过的电磁波只有万分位上的强度，缝宽3 mm和5 mm时透过的电磁波则已经达到千分位的强度了，但3 mm时仅有缝宽8 mm或10 mm时的1/2。而缝宽8 mm和10 mm时，透过

参考文献：

[1] 王国利, 袁 鹏, 单 平, 等. 变压器典型局放模型超高频放电信号分析[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 28-31.

[2] 王国利, 单 平, 袁 鹏, 等. 变压器局部放电超高频电磁波的传播特性[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 26-28.

[3] 王国利, 郝艳捧, 刘味果, 等. 电力变压器超高频局部放电测量系统[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 23-25.

[4] 陈庆国, 龚细秀, 李福祺, 等. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 23-25.

[5] YANG L, JUDD M D. Recognising Multiple Partial Discharge Sources in Power Transformers by Wavelet Analysis of UHF Signals [J]. IEE Proc-sci. Meas. Technol. May 2003, 150(3): 119-126.

[6] CHANG C, CHANG C S, JIN J. Analysis of UHF Signal Using Prediction Model [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, October 2004, 19(4): 1 579-1 586.

[7] 金亚秋. 复杂系统中的电磁波 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995.

[8] CST Microwave Studio Tutorial[CD]. CST, 2003.

社, 2001.

[5] 楼家法. 从速度特性寻求断路器设计的准则 [J]. 高压电器, 1989, 25(2): 10-13.

[6] 宋士通. 浅谈真空断路器机械参数的选择 [J]. 电器开关, 2003, 41(4): 39-40.

[7] CHEN Gang, WANG Er-zhi, SUN Bo. Optimization Design for Actuator of Vacuum Circuit Breaker[J]. XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2004(2): 640-643.

[8] 郭仁生, 苏 君, 卢洪胜. 优化设计应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.