

应用正交灰关联分析于真空开关触头可靠性优化设计

以真空开关触头可靠性为研究对象，立足于开关设备由于各种原因引起的老化试验及实际运行数据，并考虑到统计分析和可靠性理论，旨在确立开关触头可靠性的评价标准以此建立模型。及时了解触头的工作状态对提高供电可靠性有重要的现实意义，并可以大大减少盲目定期检修所带来的资金浪费。作为高压开关设备设计、生产、运行及维修策略制定等各个环节的量化参考指标，使开关电力设备能够达到全寿命周期管理模式标准。

陆 政 马振国/国网江苏省电力公司常州供电公司 王 睿/哈尔滨移动分公司无线中心 张 宏/江苏理工学院电气信息工程学院



陆 政/工程师

0 引言

随着科技的进步，电力设备对用电品质的要求日益严格，传统变电所中的开放式电力开关由于体积大、可靠性及安全性差，并不符合现代化电力开关设备需求。因此诸多厂商所开发的真空开关逐步取代传统开放式开关设备，成为先进国家变电所开关设备的主流。真空开关的心脏，其触头结构形式主要有横向磁场触头和纵向磁场触头两大类。其具有体积小、安全、可靠性高和维护成本少等优点，符合用电的经济效益。

提升供电品质的有效方法为合理监测电力设备中由温度引起真空开关的绝缘情况，提供实时的精确数值，供用户使用。开关监测可靠性评价和寿命预测的目的在于及时发现早期故障的征兆，以便运行维护人员在事故处于萌芽状态时，就能够通过检测手段及早消灭隐患，从而避免恶性事故的发生。对开关进行监测和评价，是实现开关预知性维修的前提，是保证开关安全可靠运行

的关键，也是对传统离线预防性实验的大补充和新的发展。因此，及时了解开关的工作状态对提高供电可靠性有重要的现实意义，并可以大大减少盲目定期检修所带来的资金浪费。本文主要目的是结合正交实验设计、灰关联分析法应用于真空开关触头结构设计，合理选择一组参数以使真空开关触头温度有效降低，使得开关可靠性性能更加优异。

1 算法分析

正交方法是为了改进传统实验设计的成本效益问题，所发展出的实验设计方法。其主要是利用直交表设计实验及信号噪声比（S/N）的特性以找到变异数小，且品质特性平均的最佳设计。而灰色关联理论主要应用在研究系统的不确定性条件下，对系统进行预测分析。结合以上两个方法所发展出的正交灰关联分析已应用在不少领域，其主要目的是在多品质特性下找出最佳设计的解决方案。本文主要针对真空开关触头温度和磁感应强度两个特性进行最佳化结构设计，在设计过程中结合正交灰关联分析方法，以提升真空开关性能。利用正交法与灰关联分析法从真空开关触头直径、触头片厚、触头指环、杯壁厚和电弧直径5个设计参数中找出最重要的设计参数，得到温度和磁感应强度符合要求的最优设计结果。

一般正交方法参数设计是通过信号噪声比评价产品性能的一种大数据综合预处理和归一化方案。该方法将品质特性转换

关键词/Keywords

优化·
可靠性·
开关·
触头·

成信号噪声比,能够表示产品水准及其误差因素影响的程度。信号噪声比(S/N)为评价品质的量化指标,能够找到变异数小,且品质特性平均的最优设计。当S/N比高时,表示噪声少,品质较为稳定。表征S/N比特性分为以下两种。

1) 望小特性:品质特性越小越好。

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n f_i^2 \right] \quad (1)$$

2) 望大特性:品质特性越大越好。

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n f_i^2}{n} \quad (2)$$

这里对真空开关触头直径、触头片厚、触头指环、杯壁厚和电弧直径5个设计参数使用正交方法的L16(4⁵)正交表,进行16次实验,将此16次实验中找出磁感应强度望大及温度望小的S/N比,为主成分分析提供必要的数据分析。

通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量,转换后的这组变量叫主成分。主成分分析的是得出每组参数值 x_i 的线性组合,将含有该线性组合的各目标函数求解到的S/N比转换成主成分得点数,从而作为灰关联分析各因数及各序列间在16次实验中4个目标所构成的序列相差最大最小值。在进行主成分分析前,由于各函数的单位不同,分析前需要数据统一化,则数据正规化为0~1。主成分分析方法计算公式为

$$x_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(l)] \quad i = 0, 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min [x_i^0(k)]}{\max [x_i^0(k)] - \min [x_i^0(k)]} \quad (4)$$

式中, m 为设计变量;1为品质目标。

这里有两个品质目标, $x_i^*(k)$ 为正规化后的0~1的数值, $\max [x_i^0(k)]$ 和 $\min [x_i^0(k)]$ 分别为 $x_i^*(k)$ 序列中的最大值与最小值。通过正规化后的数据,进行主成分分析, $x_i(j)$ 为各目标函数对其设计变量的观测值,可表示为

$$x = \begin{pmatrix} x_1(1) & \cdots & x_1(l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & \cdots & x_m(l) \end{pmatrix} \quad (5)$$

观察矩阵式(5)将用于计算目标函数的灰关联系数,从而得到目标在多次实验中的每一次实验的平均灰关联度,最终能够分析出对真空开关触头结构具有重要影响程度较大的数值。

灰色系统理论提出了对各因素进行灰色关联度分析的概念,寻求系统中各因素之间的数值关系。灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合动态历程分析。灰关联分析能在一群序列数据中,找出参考序列对其他序列的整体相关性,或各序列因子变化的相关程度。本研究以灰关联演算进行研究分析,以找出真空开关触头各设计参数与目标值之间相关程度,而计算灰关联度首先须求灰关联系数。灰关联系数计算公式为

$$r[x_i(k), x_j(k)] = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (6)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$; $k = 1, 2, 3, \dots, n$; $x_i(k)$ 为参考序列; $x_j(k)$ 为特定的比较数列; ξ 为辨识系数,且 $\xi \in [0, 1]$,这里 $\xi = 0.5$; $\Delta_{ij}(k) = |x_i(k) - x_j(k)|$ 为两者之间差的绝对值; $\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} |x_i(k) - x_j(k)|$; $\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} |x_i(k) - x_j(k)|$ 。

灰关联系数由上述公式求得后,令灰关联系数平均值为灰关联度,计算公式为

$$r(x_i, x_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r[x_i(k), x_j(k)] \quad (7)$$

由灰关联分析找出真空开关触头各个参数之间的灰关联度,分析出多次实验平均灰关联度,从而得出主成分。最后以大于90%信赖度为标准,以方差分析针对灰关联找出设计参数的个别贡献率与信赖度,找出效果明显的设计参数。

2 真空开关触头结构设计

触头形状和尺寸对于真空开关性能的提升极为重要,这里针对性能极佳之真空开关提出设计与分析。使用L16(4⁵)的直交表,选择触头在正交方法的原始设计参数与基准值,其中设计参数包含了真空开关触头直径、触头片厚、触头指环、杯壁厚和电弧直径。表1为各参数值以及对应的水

平值。

表1 设计参数与基准值

参数	水平1	水平2	水平3	水平4
A 触头直径/mm	56	58	60	62
B 触头片厚/mm	3.0	3.2	3.4	3.6
C 触头指环/个	15	16	17	18
D 杯壁厚/mm	12.0	12.2	12.4	12.6
E 电弧直径/mm	6	8	10	12

本研究为多目标最佳化，分别为磁感应强度望大特性及温度望小特性，采用有限元分析方法模拟正交表的16组参数组合。由于各目标实验数据单位与品质特性皆不相同，而实验数据之间的关系比较须在同一基准点上，因此需要计算各目标的S/N比进行正规化处理，使其数据介于0~1。表2为L16（4⁵）正交表与各实验数据的S/N规范化比值。

表2 正交表以及S/N规范化比值

NO	A	B	C	D	E	Y_T	Y_M
1	1	1	1	1	1	0.543	0.278
2	1	2	2	2	2	0.028	0.968
3	1	3	3	3	3	0.982	0.789
4	1	4	4	4	4	0.982	0.741
5	2	1	2	3	4	0.449	0.287
6	2	2	1	4	3	0.589	0.874
7	2	3	4	1	2	0.259	0.985
8	2	4	3	2	1	0.264	0.475
9	3	1	3	4	2	0.879	0.654
10	3	2	1	3	1	0.258	0.986
11	3	3	4	2	4	0	0.547
12	3	4	2	1	3	0.241	0.987
13	4	1	4	2	3	0.254	0.658
14	4	2	3	1	4	0.329	0.945
15	4	3	2	4	1	0.287	0.541
16	4	4	1	3	2	0.987	0.547

进行主成分分析前，须先求得实验数据间的特征值与特征向量，因此需要计算正规化后的S/N比，进行主成分分析与灰色关联度分析。以主成分分析法将多个有相关性的目标转换成独立

的线性组合，即为主成分得点，再利用灰色关联分析，把多个独立的主成分得点转换成单一的性能指标，进而决定最佳化的参数水准，如表3所示。

表3 主成分、灰关联系数与灰关联度

NO	Y_T	Y_M	$\Gamma_i(1)$	$\Gamma_i(2)$	Γ_i
1	0.254	0.587	-0.657	0.368	0.258
2	0.369	0.578	0.214	0.698	0.584
3	0.269	0.645	-0.415	0.254	0.854
4	0.874	0.577	0.541	-0.458	0.874
5	0.298	0.458	0.254	0.987	0.654
6	-0.298	-0.398	0.548	0.417	0.258
7	0.987	-0.687	-0.174	-0.254	0.654
8	0.287	0.254	0.258	0.874	0.574
9	0.874	0.987	0.984	0.874	0.847
10	0.398	0.547	0.654	0.587	0.652
11	0.241	0.987	-0.398	-0.954	0.352
12	-0.654	0.651	-0.547	0.542	0.365
13	0.354	0.874	0.458	0.874	0.341
14	0.214	0.985	-0.852	0.654	0.366
15	-0.541	-0.985	0.845	-0.652	0.841
16	-0.587	0.962	0.687	0.985	0.954

以灰关联度作参数效果分析反应表，为求得各参数的影响大小，通过方差分析辨识出各参数的显著性与贡献度，确认对实验具有较大影响性的显著因子，为触头直径和电弧直径，因此可判定这2个因子对整个实验是具有较大的影响性。

3 结束语

本文研究以正交灰关联主成分分析的最优设计，设计了一组以触头为基础的真空开关。正交灰关联实验结果表明，触头直径、电弧直径对所设计的真空开关触头的温度和磁感应强度具有较大影响。通过本项目研究，可以实现开关可靠性评估和寿命预测，支撑电网安全优质运行，可促进开关设备在线监测和安全评估。

（收稿日期：2016-11-01） EA