低压故障电弧检测与周期辨识

目前低压故障电弧的检测方法主要以检测电弧电流为主，但是很多检测方法都存在局限性，所以引用入口端电压检测方法。入口端电压检测方法是在家庭进线口安装TV，对端电压进行巴特沃斯滤波、周期变换，得到的结果与正常情况比较，得出是否有故障的结论。经过多次实验验证与大量数据分析，证明此种方法有效可行。

张冠英　曹旺林　李长伟　刘伯颖／河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建国家重点实验室培育基地

张冠英／副教授

关键词／Keywords
串联电弧·
巴特沃斯滤波·
故障辨识·
周期·

0　引言

随着社会经济的发展程度不断加深，人们对生活质量的要求也越来越高，但是目前国内的电弧检测技术尚不完全成熟。

电弧检测方法多种多样，主要以检测电流为主，诸如研究电流的“零休区间”[1]、对电流进行小波分析[2]、比较电流变化率、进行傅里叶变换[3-4]及差值－均方根方法[5]，利用高次谐波含有率[6]，还有利用电流、电压及电磁信号等多特征融合检测[7]的方法。但是各种方法都需要检测大量的数据，同时更需要面对增卸负载、电磁干扰、负载多样性和运算速度等问题，诸多问题导致电流检测方法差强人意。入口端电压[8]检测方法，能够检测出电弧信号，不受支路负载类型、负载起动卸载、增加或减少负载的干扰，而且还使用了巴特沃斯高次滤波，避免了高次谐波干扰，大大增强了电弧检测的可靠性。

入口端电压检测方法数据采集简单、后期处理速度快、检测结果准确及采集过程干扰小等都是电压检测的极大优势。

河北省科技支撑计划项目（15212117），河北省高等学校科学技术研究青年基金（QN2015102）。

1　交流电压串弧检测的原理和优势

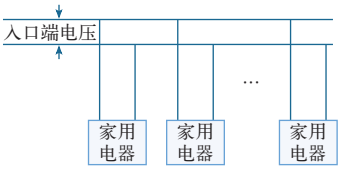
1.1　交流电压串弧检测的原理

入口端电压检测方法主要检测一般家用电器和线路电弧故障。实验原理图如图1a所示。设入口端电压U_s、电弧电压U_h与家用电器电压U_1，经过分析得出，三者满足式（1）的串联电弧公式

$$U_s = U_1 + U_h \quad (1)$$

家用电器或线路发生电弧故障时，电弧电压发生位置的不确定性导致电弧电压很难检测到，由式（1）得知，一旦电弧电压出现，入口处电压即会发生畸变，通过检测入口处电压的畸变程度，即可判断是否有电弧发生。

实验室实际的电弧发生器如图1b所示，本实验台是AFD100点接触电弧实验



（a）串弧电压故障检测原理

（b）电弧发生器实验台

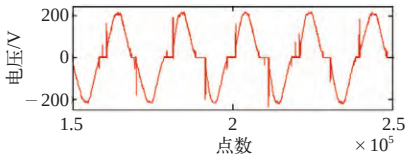
图1　电弧检测原理图和实验台

中国知网　https://www.cnki.net

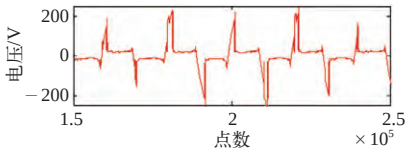
台，并且符合UL 1699标准。

1.2 入口端电压检测的可行性分析和优势

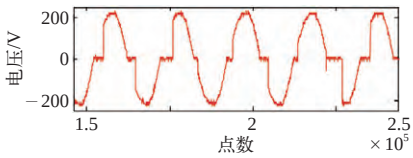
根据图2b、c的比较可以看出，电流的零休、变化率、幅值波动及其尖峰特征都反映在入口端电压上，因此检测入口端电压是可行的。另外，根据式（1）可以看出，在不发生电弧的时候，入口端电压等于负载电压（因为在家庭线路中，线路分压极小，忽略不计），发生电弧时，入口端电压等于电弧电压与负载电压之和，所以电弧故障电压清晰地反映在入口端电压上。



（a）负载电压



（b）电弧电压



（c）入口端电压

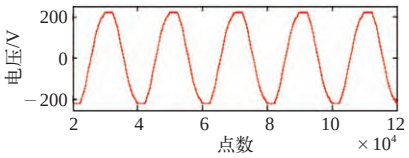
图2 负载为吸尘器产生电弧时的电压波形

当前的电弧故障检测方法，检测电弧电流仍是主流，对电流进行傅里叶分析、小波变换和周期差值等。但是由于感性或非线性负载会使正常电流畸变非常严重，同时由于负载起动停止、增加减少负载等问题经常导致误判。但是，这些问题在入口端电压检测时很少出现。图3为电热水壶的起动波形与正常运行波形，可以表明入口端电压不受起动影响。其他问题也以证明，由于篇幅有限不再赘述。

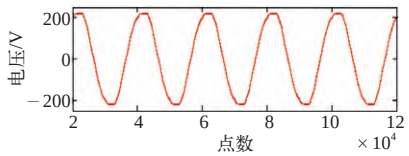
2 巴特沃斯滤波应用及周期变换原理

2.1 巴特沃斯滤波原理

巴特沃斯（Butterworth）滤波器[9]是一款功能



（a）起动时入口端电压



（b）正常运行时入口端电压

图3 电热水壶起动正常运行电压波形

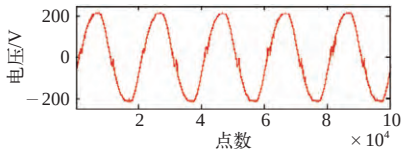
极其强大的滤波器，已经广泛应用于通信、机械和电气等领域。本文就是将巴特沃斯滤波器应用于电气的典型做法。同时，周期变换在现在的信号波形分析领域也已经比较成熟。

巴特沃斯低通滤波器可以用下面的公式表示

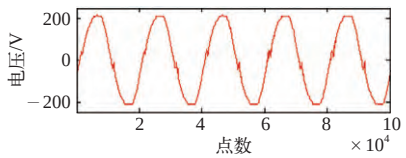
$$\left|H(\omega)\right|^2=\frac{1}{1+\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}=\frac{1}{1+\varepsilon^2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}} \qquad (2)$$

式中，n＝滤波器的阶数；ω_c＝截止频率＝振幅下降为－3 dB时的频率；ω_p＝通频带边缘频率；$1/(1+\varepsilon^2)=|H(\omega)|^2$为在通频带边缘的数值。

经过巴特沃斯滤波以后的波形如图4所示，可以看出本次滤波所设置的系数效果比较明显，并且满足实验要求。



（a）电磁炉高档产生电弧滤波前



（b）电磁炉高档产生电弧滤波后

图4 电磁炉高档产生电弧波形滤波前后对比

由图4可以看出，经过滤波以后，滤除了大部分的高次谐波并且依然保留了电弧特征，波形明显变细，逐点对照两个波形，可以看出前后波形的清晰度有很大差距。

中国知网 https://www.cnki.net

2.2 周期变换的原理

本文利用周期积分变换程序对原有数据进行自动分析，经多次反复验证，程序计算结果可行，省去人工分组计算烦琐的过程。

由于数据是以数字的方式存储，并且采集f_s=2 000，因此公式为

$$F(t_i)=\sum_{i=0}^{n} f(t_i) \quad i=0,1,2,\cdots,n$$
$$t=i\%40 \tag{3}$$

$$D(t)=F(t+1)/F(t) \tag{4}$$

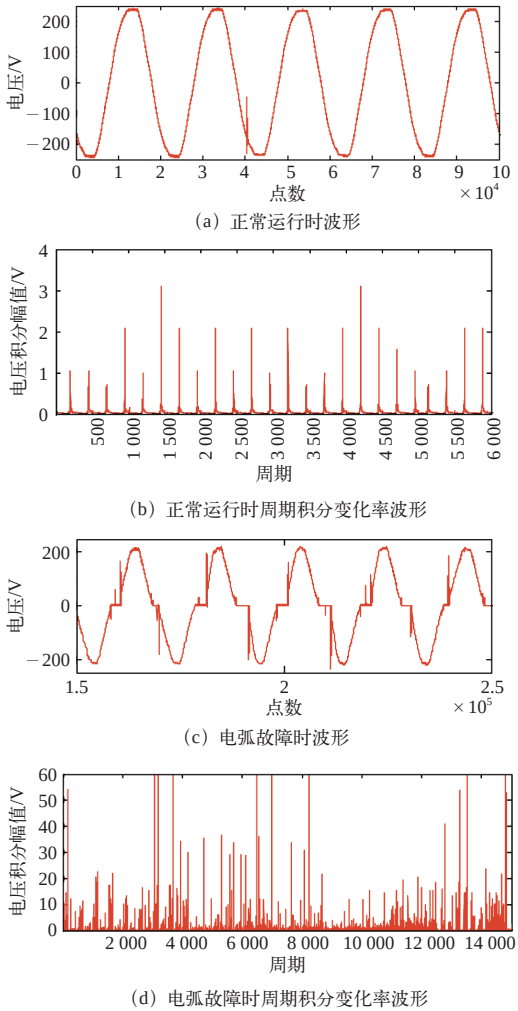
式（4）即为计算周期积分变换率公式。其思想主要是：将采集到的信号每20 ms做为一个区间，然后对每个区间进行积分，相邻区间得到的积分值做商即为周期积分变换值。

如图5所示，可以看出吸尘器正常运行时与故障运行时，其周期积分变化率幅值相差很大，相差将近30倍，因此可以明确判定有无故障电弧的发生。

3 周期积分变换应用于入口端电压方法的判据研究

普通的低压用电器因为其功率、阻性的不同，致使其产生的故障信号大不相同，所以本文选取了生活中常用的四种负载，并且经过多次实验，选取了比较普遍的一种波形作为周期积分变换[10-11]分析研究的对象。

如图6～图9所示，通过四种电器的的波形可以看出正常与故障周期积分变换率差距很大，然后在程序中量化，进一步确定出阈值，以及是否有故障电弧发生。



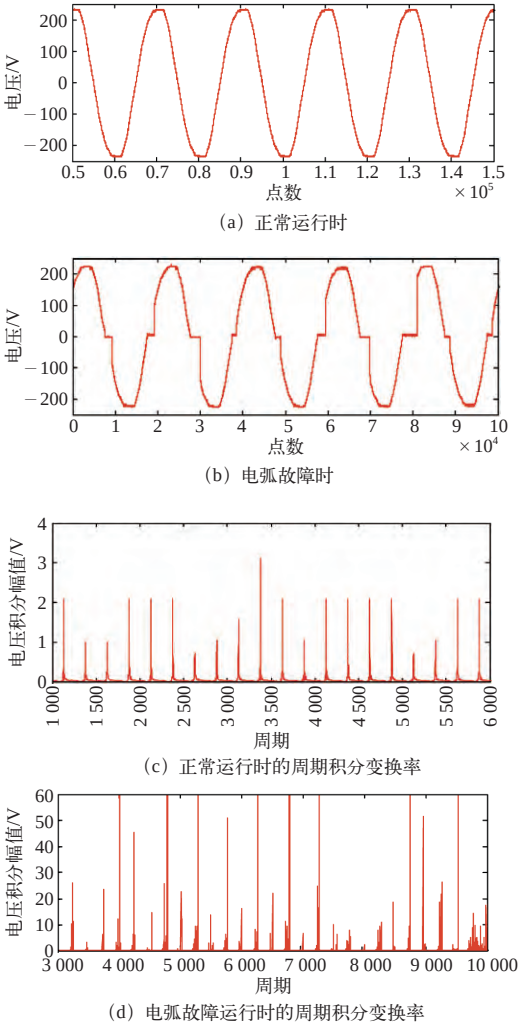
（a）正常运行时波形

（b）正常运行时周期积分变化率波形

（c）电弧故障时波形

（d）电弧故障时周期积分变化率波形

图5　吸尘器运行时波形



（a）正常运行时

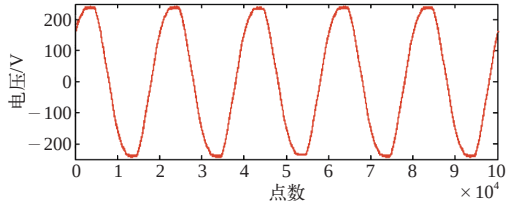
（b）电弧故障时

（c）正常运行时的周期积分变换率

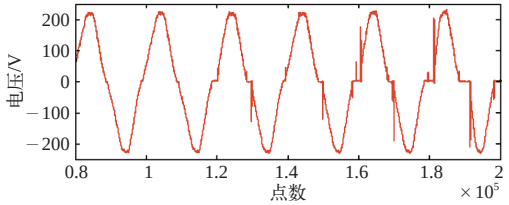
（d）电弧故障运行时的周期积分变换率

图6　电阻入口端电压正常、故障波形及周期积分变换率

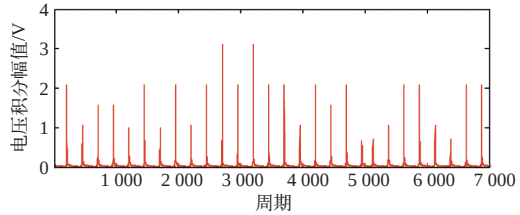
中国知网　https://www.cnki.net



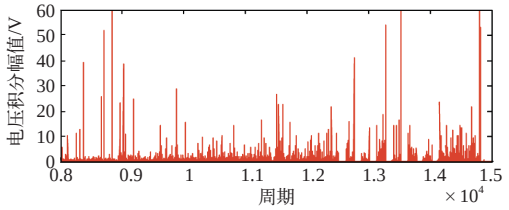
（a）正常运行时



（b）电弧故障时



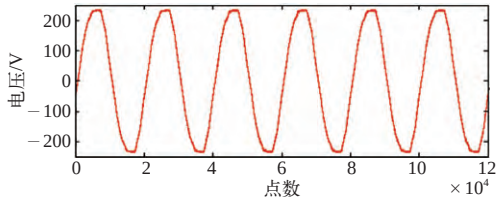
（c）正常运行时的周期积分变换率



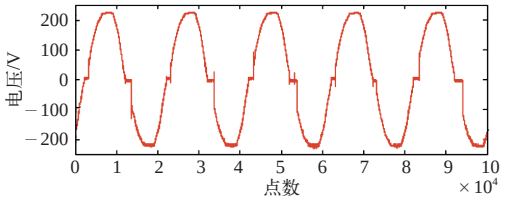
（d）电弧故障运行时的周期积分变换率

图7 手电钻入口端电压正常、故障波形及周期积分变换率

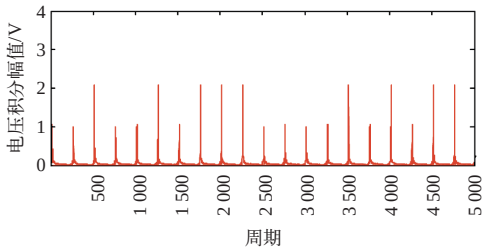
设其正常状态下周期积分变换率的尖峰平均值为JFA，并设其电弧故障状态下周期积分变换率的尖峰平均值为JFB，得出如下表所示结果。



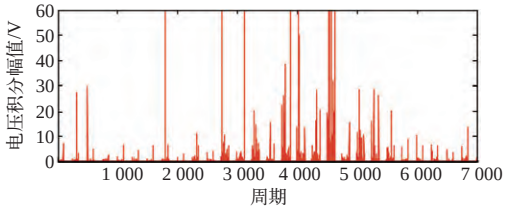
（a）正常运行时



（b）电弧故障时

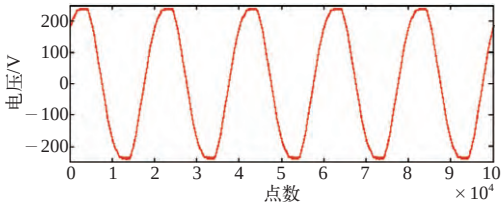


（c）正常运行时的周期积分变换率

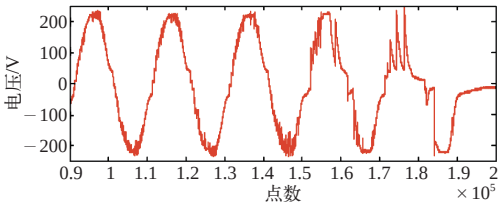


（d）电弧故障运行时的周期积分变换率

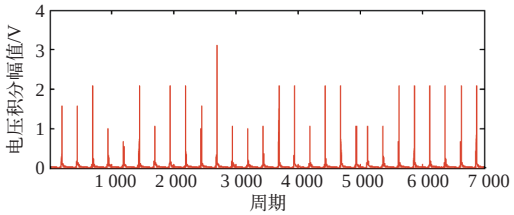
图8 电热水壶入口端电压正常、故障波形及周期积分变换率



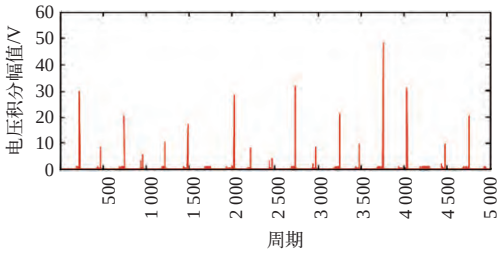
（a）正常运行时



（b）电弧故障时



（c）正常运行时的周期积分变换率



（d）电弧故障运行时的周期积分变换率

图9 计算机入口端电压正常、故障波形及周期积分变换率

中国知网 https://www.cnki.net

表　入口端电压正常与故障时变换率幅值

负载类型	负载名称	JFA（正常状态）	JFB（故障状态）
阻性	电阻	1.5	60
感性	手电钻	1.8	55
阻性	电热水壶	2.1	50
容性	计算机	1.9	40

通过上表可以看出故障与非故障时周期积分变化率有很大不同，所以依据此指标可以判定有无电弧发生。鉴于各种负载入口端电压故障与正常状态比值至少相差20倍，且四种电器的JFA均不大于3。因此确定判据为：在0.5 s内，检测到连续8.5周期内，周期积分变换率的尖峰平均值大于3，则认为发生了电弧故障。

4　结束语

经过大量的实验研究和数据分析，验证了入口端电压方法确实可行，并且得出如下结论。

1）生活中的电器，大多是阻性、感性或非线性负载，在家庭的进线入口处装置一个电压互感器，家用电器或者家庭里不长的线路里发生电弧故障，周期积分变换率算法均能计算出来。

2）入口端电压信号不受起动、增卸负载及电流波动等影响，并且电流波形特殊性造成的误判问题在入口端电压检测时也很少出现。

3）经过家庭常用负载和电阻实验验证可知，周期变换应用于检测故障电弧确实可行。论文最后给出了阈值判定判据，使得该算法具有较强说服力。

限于本人水平及实验条件，本论文还有以下几个方面可以完善。

1）还有一些家用电器未在此论文中进行验证，如果有更多的电器数据加入进来，可以使算法更具说服力。

2）实验台的电弧产生时间、触头材料、触头间距及实验环境都不一定能保证每次完全一样，难免对实验造成细微误差。

参考文献

[1] 王晓远，高淼，赵玉双．阻性负载下低压故障电弧特征分析 [J]．电力自动化设备，2015，35 (5)：106-110．

[2] 刘晓明，赵洋，曹云东，等．基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断 [J]．电工技术学报，2014，29 (1)：10-17．

[3] 施惠东，付华，潘东强．应用短时傅里叶变换识别串联电弧故障特征的研究 [J]．电器与能效管理技术，2014，24 (6)：24-29．

[4] 杨晟健，钟清华．基于FFT和电磁辐射的低压电弧故障检测 [J]．现代电子技术，2012，15 (9)：73-86．

[5] 卢其威，巫海东，王肃柯，等．基于差值－均方根法的故障电弧检测的研究 [J]．低压电器，2013，6 (5)：6-13．

[6] 廖水容，张认成，李夏河，等．低压串联电弧故障电流高次谐波含有率试验 [J]．河南理工大学学报，2013，32 (2)：179-182．

[7] 刘晓明，赵洋，曹云东，等．基于多特征融合的交流系统串联电弧故障诊断 [J]．电网技术，2014，38 (3)：795-801．

[8] 缪希仁，郭银婷，唐金城，等．负载端电弧故障电压检测与形态小波辨识 [J]．电工技术学报，2014，29 (3)：237-244．

[9] 王大伟，贾荣丛，王划一．基于Matlab的巴特沃斯滤波器设计 [J]．现代电子技术，2012，35 (21)：71-75．

[10] 吴崇试．涉及周期函数积分的变换公式 [J]．大学物理，2012，31 (12)：1-4．

[11] 周钢，江琳．周期时变线性系统的周期精细积分算法 [J]．上海交通大学学报，2005，39 (6)：1016-1019．

（收稿日期：2016－01－11）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net