

# 基于线圈电流曲线与行程曲线的断路器 操作机构故障诊断的对比研究

栾乐, 刘俊翔, 王红斌, 莫文雄, 彭和平, 王海靖  
(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510000)

**摘要:**为研究线圈电流曲线与行程-时间曲线在断路器操作机构故障诊断上的区别,在分析了断路器操作机构线圈电流特性和触头行程-时间特性的理论上,通过对断路器操作机构的机械特性的测试,对比研究了断路器操作机构故障对线圈电流与行程-时间特性的影响。通过对比研究发现,线圈电流曲线在铁芯卡涩、线圈电压电阻变化、辅助触点灭弧困难、弹簧疲软故障方面比行程-时间曲线更灵敏、更准确。研究结果对断路器操作机构状态评估方法的选择具有一定的参考意义。

**关键词:**断路器操作机构;线圈电流特性;行程-时间特性;故障诊断

中图分类号:TM561 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2019)06-0009-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.003

## Comparative Research on Fault Diagnosis of Circuit-breaker Operating Mechanism Based on Coil Current Curve and Stroke Curve

Luan Le, Liu Junxiang, Wang Hongbin, Mo Wenxiong, Peng Heping, Wang Haijing  
(Electric Power Test Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd.,  
Guangzhou 510000, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to study the differences between coil current curve and stroke-time curve in fault diagnosis of circuit-breaker operating mechanism, based on the analysis of coil current characteristics of circuit-breaker operating mechanism and stroke-time characteristics of contacts, the influence of circuit-breaker operating mechanism failure on coil current and stroke-time characteristics is compared through testing the mechanical characteristics of circuit-breaker operating mechanism. Through comparative researches, it is found that the coil current curve is more sensitive and accurate than the stroke-time curve in terms of core pin, coil voltage resistance change, auxiliary contact arc extinguishing and spring fatigue failure. The research results have a certain reference significance in the selection of state evaluation method for circuit-breaker operating mechanism.

**Key words:** circuit-breaker operating mechanism; coil current characteristics; stroke-time characteristics; fault diagnosis

## 0 引言

断路器在电力系统中起到控制电网运行和保护电力设备双重作用,其可靠性直接影响着电力系统的安全经济运行。有关统计表明,断路器操作机构机械故障占43.5%,因此断路器操作机构的安全性直接影响着断路器的安全可靠<sup>[1-5]</sup>。

国内外专家学者对断路器操作机构状态评估方法做了大量研究,如线圈电流曲线<sup>[6-9]</sup>、触头行程-  
科技项目:中国南方电网有限公司(GZHKJXM20170105/080037KK52170050)

时间曲线<sup>[10-12]</sup>、振动信号<sup>[13-14]</sup>、辅助触头转换时间<sup>[15]</sup>等,其中研究较多的是线圈电流与触头行程。文献[6-9]研究了基于线圈电流曲线对断路器操作机构的状态评估。文献[10-11]研究了基于触头行程-时间曲线对断路器操作机构故障的诊断,但都未对线圈电流曲线与触头行程-时间曲线这两种断路器操作机构状态评估方法进行对比研究。

下面对断路器操作机构的线圈电流特性与触头行程-时间特性进行了分析,对断路器操作机构同一缺陷在线圈电流曲线与行程-时间曲线上的反映进行了对比研究。对比实验研究表明,针对铁芯卡

涩、线圈电压电阻变化、辅助触头灭弧困难、弹簧疲软等故障,线圈电流曲线相比于行程-时间曲线能更灵敏、更准确地反映故障。为断路器操作机构状态评估方法的选择提供了参考。

## 1 操作机构机械特性

### 1.1 分合闸线圈电流特性

高压断路器操作机构动作是通过线圈通电产生电磁力带动铁芯撞杆撞击触发器来释放储能,从而带动传动机构动作。由于直流电磁铁的可靠性更高,且易于频繁动作,因此在高压断路器操作机构中得到广泛应用,其等效电路如图1所示。

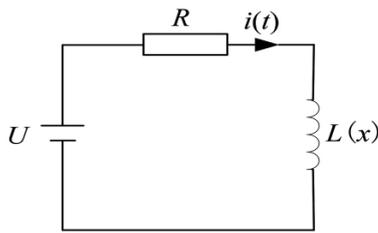


图1 直流电磁铁等效电路

图1中  $R$ 、 $L(x)$ 、 $x$ 、 $i(t)$  和  $U$  分别为线圈回路总电阻、线圈等效电感、铁芯位移、线圈电流和控制回路电压。由于线圈等效电感与线圈匝数、总磁阻有关,总磁阻随着铁芯位移变化,所以线圈等效电感随着铁芯位移的变化而变化。根据图1所示电路,线圈电压回路可以用式(1)表示。

$$U = Ri(t) + \frac{d[i(t) \times L(x)]}{dt} \quad (1)$$

对式(1)中的电流、电感求偏导得

$$U = Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} v \quad (2)$$

式中  $v$  为铁芯运动速度。

操作机构的线圈电流随着铁芯运动状态的变化而变化,故铁芯运动过程的异常状态在线圈电流上会有所反映,线圈电流可评估操作机构的机械状态。这里以合闸操作为例,对电磁铁动铁芯运动过程进行分析,图2为典型合闸线圈电流曲线。

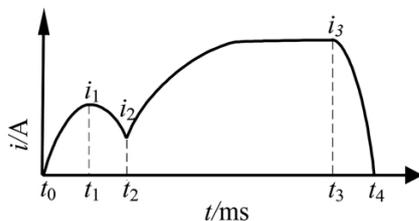


图2 典型合闸线圈电流曲线

合闸线圈电流曲线可分为4个阶段。

阶段1( $t_0 - t_1$ ):  $t_0$ 时刻,线圈通电;但由于开始时线圈的电流太小,电磁铁产生的电磁力小于静摩擦力,铁芯静止在原处,电感为定值,所以线圈电流呈指数规律增加。此阶段电流可表示为式(3),电流上升速度可表示为式(4)。

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (3)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,当线圈电压增大时,线圈电流最大值增大,线圈电流上升速度增大,阶段1的持续时间减少。当线圈电阻增大时,线圈电流最大值减小,线圈电流上升速度减小,阶段1的持续时间增长。当铁芯初始气隙增大时,初始电感减小,电流上升速度增大,且需更大的电流产生电磁力。当铁芯动作前存在卡涩故障时,静摩擦力增大时,需要更大的电磁力才能使铁芯运动,使阶段1的持续时间增长。所以阶段1的电流曲线能够反映线圈回路电压、电阻、铁芯初始气隙、铁芯动作前卡涩的问题。

阶段2( $t_1 - t_2$ ):  $t_1$ 时刻,线圈电流产生的电磁力大于静态阻力,铁芯开始运动,铁芯的运动速度开始增大,同时随着铁芯位移,线圈电感增大,线圈电流下降。 $t_2$ 时刻,铁芯运动到位,产生的碰撞反作用力使铁芯停下来,电磁铁的电磁力使铁芯保持在终点处。当铁芯在运动过程中存在卡涩时,铁芯的阻力增大,铁芯加速度发生变化,线圈电感增长率变化,阶段2的线圈电流曲线会发生畸变。所以根据阶段2的线圈电流曲线可以反映铁芯是否卡涩。

阶段3( $t_2 - t_3$ ):  $t_2$ 时刻,铁芯运动到位,动铁芯静止,气隙变化,磁阻不变,电感达到最大值,线圈电流按指数规律上升。阶段3电流可表示为式(5)。

$$i(t) = (i_2 - \frac{U}{R}) \cdot e^{\frac{R(t_2-t)}{L}} + \frac{U}{R} \quad (5)$$

由式(5)可知,阶段3的线圈电流与线圈电压与电阻有关,且当铁芯顶杆连接的阀门或锁扣机构存在缺陷,使铁芯发生抖动,将会使电感不断变化,使线圈电流曲线产生波动。

阶段4( $t_3 - t_4$ ): 阶段4为电流切断阶段。 $t_3$ 时刻,辅助触头转换,断开线圈电源,电流下降。当辅助触头存在故障时,灭弧时间拉长,甚至无法切断电流。

### 1.2 触头行程-时间特性

图3为操作机构分合闸触头典型的行程-时间

曲线。

阶段1( $t_a - t_b$ ):  $t_a$ 时刻发出分合闸命令,电磁系统动作,  $t_b$ 时刻撞杆撞击触发器,动触头动作,这一阶段为动触头的固有动作时间,分合闸线圈电压、回路电阻及铁芯卡涩故障将反映在固有动作时间上。

阶段2( $t_b - t_c$ ):  $t_c$ 时刻,断路器刚分或刚合。此阶段为动触头的运动过程,通过动触头的速度情况反映储能机构情况与传动机构卡涩情况。

阶段3( $t_c - t_d$ ):  $t_d$ 时刻,动触头分闸或合闸完成,停止运动。此阶段反映了动触头的弹跳情况。

行程-时间曲线中固有动作时间  $t_a - t_b$  与阶段2的平均速度  $v$  是反映断路器操作机构状态的2个重要特征参数,可用来判断电磁系统、传动机构故障情况。

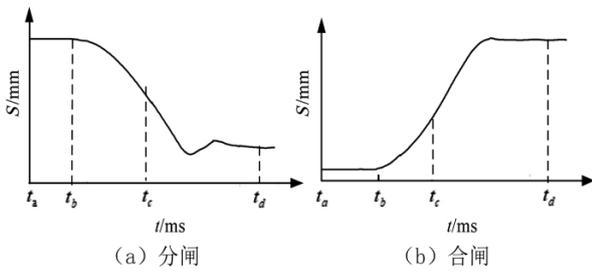


图3 典型的分合闸触头行程-时间曲线

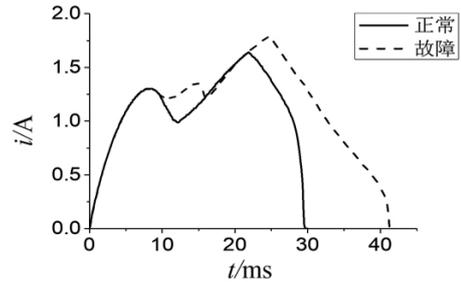
## 2 线圈电流曲线与行程-时间曲线对比

将正常机构、故障机构的线圈电流曲线与行程-时间曲线进行对比分析。图4为正常机构与卡涩故障机构的线圈电流曲线与行程-时间曲线。

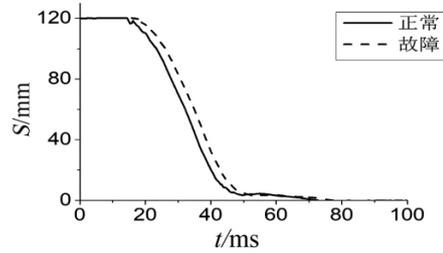
从图4(a)可明显看出,故障机构的线圈电流曲线在阶段2产生了畸变,可知铁芯运动过程中存在卡涩。从图4(b)可知正常机构的固有动作时间14.8 ms,平均速度4.8 m/s,刚分时刻34.6 ms,刚分速度5.67 m/s。故障机构固有动作时间17.6 ms,平均速度4.8 m/s,刚分时刻37.3 ms,刚分速度5.76 m/s,可以看出故障机构行程曲线右移,固有动作时间增长,刚分时刻延后。所以,铁芯卡涩导致线圈电流在阶段2发生畸变,导致固有动作时间增长,刚分时刻延后。

同一机构不同电压下的线圈电流曲线与行程-时间曲线如图5所示。

从图5(a)可明显看出,电压降低导致线圈电流幅值降低,阶段1时间增长。从图5(b)可知额定电压情

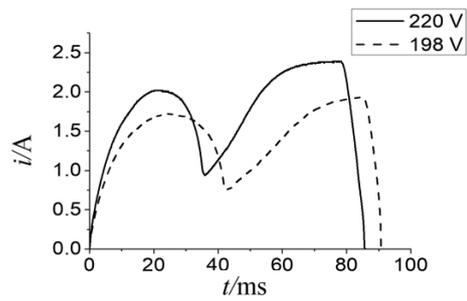


(a) 线圈电流曲线

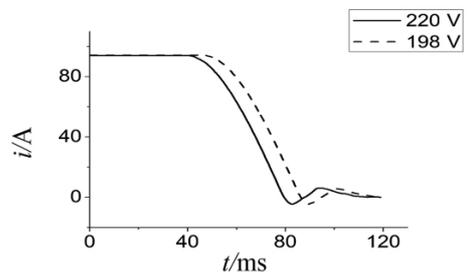


(b) 行程-时间曲线

图4 正常与卡涩故障情况下电流与行程曲线



(a) 线圈电流曲线



(b) 行程-时间曲线

况下的机构固有动作时间41.6 ms,平均速度2.90 m/s,刚分时刻80.0 ms,刚分速度3.62 m/s。电压降低情况下机构固有动作时间42.7 ms,平均速度2.88 m/s,刚分时刻83.8 ms,刚分速度3.66 m/s。可以看出电压降低的行程-时间曲线右移,固有动作时间增长,刚分时刻延后。所以,电压降低导致线圈电流幅值降低,阶段1时间增长,固有动作时间增长,刚分时刻延后。

故从图4(b)与图5(b)可以看出铁芯卡涩和线

圈电压降低都会导致行程-时间曲线右移,固有动作时间增长,刚分时刻延后。故从行程-时间曲线上无法分辨这两种故障。但在线圈电流曲线上,这两种故障有明显的差别。

正常机构与灭弧困难故障机构的线圈电流曲线与行程曲线如图6所示。

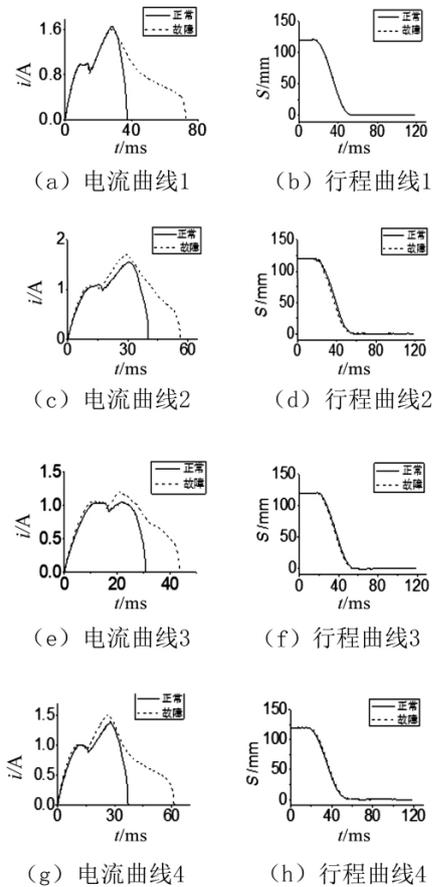


图6 正常与故障情况下电流与行程曲线

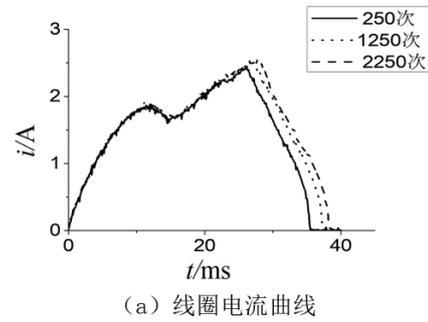
从图6(a)、(c)、(e)、(g)电流曲线可以明显看出在电流切断阶段,灭弧困难故障机构的电流无法快速被切断,灭弧时间过长。但从图6(b)、(d)、(f)、(h)对应的行程曲线上来看,正常曲线与故障曲线基本重合,无明显变化,其行程-时间曲线特征量如表1所示。 $t_b$ 为固有动作时间, $t_c$ 为刚分时刻, $v_1$ 为平均速度, $v_2$ 为刚分速度。从表1中特征量可明显看出正常与故障机构的行程-时间特征量都没明显差异。故线圈电流曲线相较于行程曲线判断机构灭弧困难更明显,更准确。

提取同一机构分合闸不同动作次数情况下的机械特性曲线,研究不同弹簧疲软程度在线圈电流曲线和行程时间曲线上的反映,如图7、图8所示。

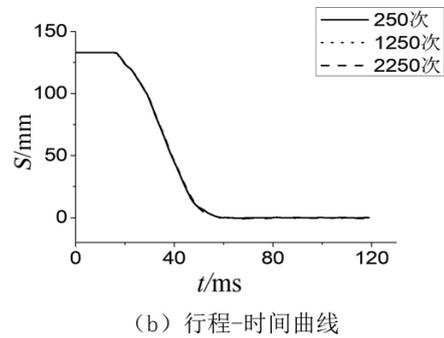
表1 行程-时间特征量

单位: ms

状态	$t_b$	$v_1$	$t_c$	$v_2$
正常1	16.8	4.82	34.4	5.66
故障1	16.8	4.84	34.4	5.58
正常2	19.8	4.82	37.2	5.57
故障2	19.8	4.85	36.9	5.43
正常3	20.4	4.82	36	6.26
故障3	20.0	4.81	35.6	6.02
正常4	18.2	4.89	39.5	6.29
故障4	18.0	4.83	38.9	6.37

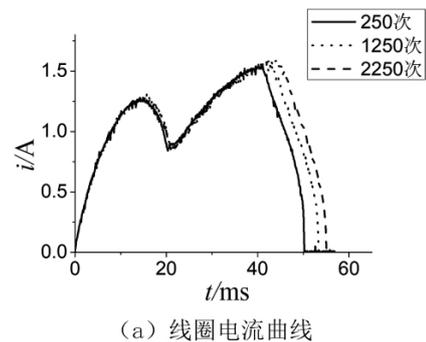


(a) 线圈电流曲线

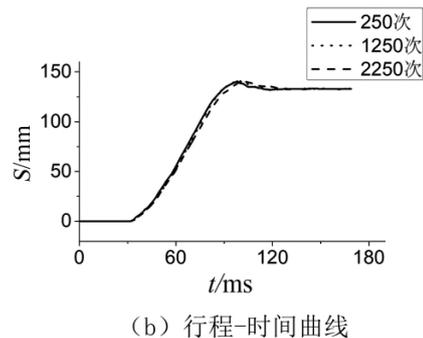


(b) 行程-时间曲线

图7 不同弹簧疲软程度下的分闸电流与行程曲线



(a) 线圈电流曲线



(b) 行程-时间曲线

图8 不同弹簧疲软程度下的合闸电流与行程曲线

从图7(a)、图8(a)电流曲线可明显看出来,动作次数越多,弹簧疲软程度越大导致线圈通电时间越长。但从图7(b)、图8(b)上来看,动作次数增多,弹簧疲软程度的增大在行程-时间曲线上却基本没反映,不同动作次数的曲线基本重合。其行程-时间曲线特征量如表2、表3所示,从表中特征量也可明显看出,不同弹簧疲软程度下的行程-时间特征量都基本无差异。故线圈电流曲线相较于行程-时间曲线判断弹簧疲软程度方面更简单更明显。

表2 不同弹簧疲软程度下的分闸行程时间特征量

动作次数/次	$t_b$ /ms	$v_1$ /ms	$t_c$ /ms	$v_2$ /ms
250	14.6	4.62	31.5	5.34
1250	14.7	4.59	31.9	5.35
2250	14.6	4.60	31.5	5.39

表3 不同弹簧疲软程度下的合闸行程时间特征量

动作次数/次	$t_b$ /ms	$v_1$ /ms	$t_c$ /ms	$v_2$ /ms
250	21.4	2.78	64.2	3.42
1250	20.9	2.63	64.0	3.26
2250	21.3	2.64	64.5	3.24

### 3 结 语

从理论上分析了断路器线圈电流曲线与行程-时间曲线的各阶段影响因素。通过将故障机构与正常机构在电流曲线和行程曲线上进行对比可知:

1) 铁芯卡涩、线圈电压降低、线圈电阻增大、空行程增大在行程曲线上都反映为曲线右移,固有动作时间延长,刚刚分闸时刻延后。行程曲线无法区分故障类型,但在电流曲线上,故障表现明显且易于区分。

2) 灭弧困难在电流曲线上反映为电流切断阶段时间延长,但在行程曲线却基本无任何反映。

3) 弹簧疲软程度的增加,在电流曲线上反映为线圈通电时间增加,但在行程曲线上也基本无任何反映。

综上所述,线圈电流曲线比行程-时间曲线能更灵敏更准确地反映铁芯卡涩、线圈电压电阻变化、辅助触头灭弧困难、弹簧疲软故障。为之后的断路器操作机构状态评估方法的选择上提供了参考方向。

### 参考文献

[1] 白志艳. 高压断路器故障诊断与状态监测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[2] 赵莉华, 荣强, 景伟, 等. 基于 LabVIEW 的高压断路器操作机构状态评估[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 54-59.

[3] 董镛, 李恒真, 易林. 基于形态小波和支持向量机的高压断路器状态监测和故障诊断[J]. 电测与仪表, 2015, 54(4): 92-99.

[4] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 108-113.

[5] 闫海宁. 基于在线监测的开关特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 119-123.

[6] 张永奎, 赵智忠, 冯旭, 等. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 37-41.

[7] 赵莉华, 付荣荣, 荣强, 等. 高压断路器操作机构机械特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 56-62.

[8] 李大卫, 徐党国, 孙云生, 等. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及实验方法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 114-118.

[9] 陈辰, 厉小润. 基于线圈电流分析的操动机构故障诊断方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3): 527-535.

[10] 李德阁, 武建文, 马速良, 等. 基于行程信息的断路器弹簧故障程度诊断[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 20-27.

[11] 李琦. 高压断路器机械特性在线监测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

[12] Ali Forootani, Ali Akbar Afzaljan, Ali Nanian Ghomsh-eh. Model-based Fault Analysis of A High-voltage Circuit breaker Operating Mechanism[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017(25): 2349-2362.

[13] 刘宇, 赵宇明, 卫世平, 等. CT20 弹簧操动机构的合闸振动研究[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 233-239.

[14] 周明平. 基于振动信号的弹操式高压真空断路器机载状态监测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.

[15] Razi Kazemi A. Applicability of Auxiliary Contacts in Circuit Breaker Online Condition[J]. Electric Power Systems Research, 2015(128): 53-59.

作者简介:

栾乐(1982), 硕士研究生, 从事电气设备技术监督与分析研究;

(下转第35页)

功地将层次 K - means 的算法优点移植到类属型数据中。并且所提出的动态层次 K - modes 算法还可以通过聚类系谱图确定 k 值,一定程度上解决了 k 值须初始给定的公开问题。算法也具有更强的适应性和异常点识别等优良性质,可以对真实数据给出有效聚类结果。

考虑到动态层次 K - modes 算法从结果上虽然明显优于传统 K - modes 算法,但在进行聚类时仍会出现一定的错分现象,在后续工作中考虑引入 robust 思想,无须将所有样本带入聚类迭代过程,而是仅选取一部分重要样本进行迭代,以此提高算法准确度。同时在特征提取方面,也希望引入更精细化的自适应阈值给定,从数据角度提高聚类质量。

参考文献

[1] 赵岩,李磊,刘俊勇等. 上海电网需求侧负荷模式的组合识别模型[J]. 电网技术 2010 34(1): 145 - 151.

[2] ZheXue Huang. Extensions to the k - Means Algorithm for Clustering Large Data Sets with Categorical Values [J]. Data Mining and Knowledge Discovery ,1998(2): 283 - 304.

[3] Kohei Arai ,Ali Ridho Barakbah. Hierarchical K - means: An Algorithm for Centroids Initialization for K - means [N]. Reports of the Faculty of Science and Engineering , Saga University 2007 36(1): 25 - 31.

[4] 金建国. 聚类方法综述[J]. 计算机科学,2014,41(11A): 288 - 293.

[5] Deng Hai ,Tan Hua ,Sun Xin. A K - Means Clustering Algorithm of Meliorated Initial Center [J]. Computer Technology and Development 2013 23(11): 42 - 45.

[6] 苏锦旗,薛惠锋,詹海亮. 基于划分的 K - 均值初始聚类中心优化算法[J]. 微电子学与计算机,2009,26(1): 8 - 11.

[7] Jinhua Li ,Shiji Song ,Yuli Zhang et al. Robust K - Median and K - Means Clustering Algorithms for Incomplete Data [J]. Mathematical Problems in Engineering 2016: 1 - 8.

[8] Muhammad Umer Munir , Muhammad Younus Javed , Shoaib Ahmad Khan. A Hierarchical k - Means Clustering Based Fingerprint Quality Classification [J]. Neurocomputing 2012 (85): 62 - 67.

[9] Caiming Zhong , Duoqian Miao , Pasi Frnti. Minimum Spanning Tree Based Split - and - merge: A Hierarchical Clustering Method [J]. Information Sciences 2011 ,16(181): 3397 - 3410.

[10] Preeti Aroraa , Deepali Dr. b , Shipra Varshneyc. Analysis of K - Means and K - Medoids Algorithm for Big Data [J]. Procedia Computer Science ,2016(78): 507 - 512.

[11] Kaiyang Liao , Guizhong Liu , Li Xiao , et al. A Sample - based Hierarchical Adaptive K - means Clustering Method for Large - scale Video Retrieval [J]. Knowledge - Based Systems 2013(49): 123 - 133.

[12] Liang Jiye , Bai Liang , Cao Fuyuan. K - Modes Clustering Algorithm Based on A New Distance Measure [J]. Journal of Computer Research and Development ,2010,47(10): 1749 - 1755.

[13] 李阳,刘友波,刘俊勇等. 基于形态距离的日负荷数据自适应稳健聚类算法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1 - 13 [2019 - 09 - 10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/1.2107.TM.20171130.1501.001.html>.

[14] 程明畅,刘友波,张程嘉等. 基于分位数半径的动态 K - means 算法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018 54(1): 48 - 55.

作者简介:

林红阳(1972) 高级工程师,主要从事电力市场及能源经济等方面的研究工作。

(收稿日期:2019 - 09 - 19)

(上接第13页)

刘俊翔(1986) 硕士研究生,从事电力设备状态评价研究;

王红斌(1972) 硕士研究生,从事电网设备运行研究;

莫文雄(1971) 硕士研究生,从事电网设备运行研究;

彭和平(1981) 硕士研究生,从事电力设备状态评价研究;

王海靖(1987) 硕士研究生,从事电力设备状态评价研究。

(收稿日期:2018 - 08 - 05)