

电网连锁跳闸事件中的关键节点研究

方卫东, 邓慧琼

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 对电网连锁跳闸事件中的关键节点进行研究, 提出一种分析关键节点的算法。结合连锁跳闸事件中继电保护的動作行为, 给出一种连续型的用以衡量连锁跳闸严重度的表达形式及评价参量, 并根据直流潮流法, 利用支路电流和节点注入功率之间关系, 进一步明确连锁跳闸严重度评价参量与节点注入功率之间的关系, 以及连锁跳闸严重度评价参量对节点注入功率的灵敏度, 在此基础上, 形成了一套完整的算法, 用以分析可引发连锁跳闸的初始故障, 被初始故障波及的连锁跳闸支路, 并最终用以分析对连锁跳闸支路起关键作用的节点。最后, 在 IEEE39 节点系统上通过算例对该算法的有效性和合理性进行进一步说明。

关键词: 电力系统; 连锁跳闸; 连锁故障; 潮流转移; 停电事故

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)06-0578-06

Analysis of key nodes in the cascading tripping event in power network

Fang Weidong, Deng Huiqiong

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The key nodes in power network at cascading tripping events were researched, and an algorithm for analysing the key nodes was proposed. Firstly, a continuous type of expression and an evaluation variable for measuring the severity of cascading tripping were proposed, which was based on the actions of relay protection in the cascading tripping event. And the relationship between the severity of cascading tripping and the node injection power was confirmed, which was based on the relationship between the branch currents and the node injection power according to direct current flow method. The sensitivity of the severity evaluation variable for the node injection power of the cascading tripping was determined. The algorithm can select the key nodes that may result in cascading tripping. Some examples in IEEE39 system prove the rationality and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: power system; cascade tripping; cascading failure; power flow transfer; blackout

电网的连锁跳闸以及与连锁跳闸相关的连锁故障问题是近些年来受到较多关注的一类问题。研究工作者们从连锁跳闸的表现行为, 连锁故障产生的原因, 连锁故障事件的模拟以及连锁故障产生的风险后果等多种角度对这类问题进行了较为深入的研究^[1-3]。其中, 文献[4]从理论的高

度论述了电网连锁跳闸的深层原因, 并提出了基于本地信息的用于避免连锁跳闸的保护方法; 文献[5]以潮流熵为测度并从连锁故障的角度研究了电网脆弱线路的辨识方法; 文献[6-7]从连锁故障深度发展的角度研究了连锁事件序列的搜索方法; 文献[8]从多级连锁故障的脆弱性的角度研

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01630); 福建工程学院科研项目(GY-Z13104, GY-Z13102)

第一作者简介: 方卫东(1969-), 男, 安徽黄山人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 电动汽车融入现代电网。

究了影响电网脆弱性的关键线路模型的构建方法;文献[9]研究了基于概率的连锁故障的风险统计方法;等等。这些研究得出了很多有益的成果和结论,给进一步的研究提供了良好的借鉴。

连锁跳闸事件一般与电网初始故障发生后电网的重新调整以及线路的后备保护动作行为有密切的关系^[4],从最近十几年来世界范围内发生的大停电事故来看,这是一种比较普遍的现象。而当电网的某一线路发生初始故障停运后,电网潮流的重新调整主要受制于电网的节点注入功率^[10]。考虑到预防和阻断连锁跳闸的主要手段是削减节点的注入功率,文献[10]根据电网重新调整潮流后节点注入功率对其余支路的影响,并结合线路后备保护的動作行为研究了节点注入功率对连锁跳闸的影响,为进一步研究电网节点注入功率和连锁跳闸的影响提供了一种思路,但该文献没有给出节点注入功率和连锁跳闸严重度之间关系的直接表达形式,未能对二者之间的关系给出更为详尽的刻画。

本文在文献[10]的基础上,针对电流型的保护,对反映连锁受扰支路的连锁跳闸严重度的表达形式进行了进一步的细化,使其成为连续型的表达形式,并根据直流潮流法给出的节点注入功率与支路电流的关系,进一步明确了连锁跳闸严重度参量与节点注入功率之间的关系,并给出了连锁跳闸严重度与节点注入功率之间的灵敏关系。在此基础上,本文按照先筛选初始故障支路,再筛选与初始故障对应的连锁受扰支路,最后再筛选与连锁受扰支路对应的关键节点的思路,提出了完整的分析算法,并进行了算例演示,以期为进一步的研究提供一些思路。

1 节点注入功率对连锁受扰支路的影响

当电网的某一条支路 L_{ij} (节点 i 与节点 j 之间的支路,以下其余支路的表示与此相同)发生初始故障停运后,则电网潮流重新分布后,对于电网中其余的任一支路 L_{mk} ,衡量其是否发生连锁跳闸可采用式(1)给出的形式^[10]。

$$\omega_{mk \cdot \text{dist}} = |\omega_{mk \cdot \text{lim}}| - |\omega_{mk}| \quad (1)$$

式中, ω_{mk} 和 $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 是支路 L_{mk} 中与具体的后备保护配置有关的量,其具体形式可根据后备保护的動作方程来设定^[10]。如果支路 L_{mk} 所配置的后备

保护是电流保护的话,则 $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 可根据其具体的整定情况取为支路 L_{mk} 的电流定值,而 ω_{mk} 为保护测量到的电流值。式(1)中的 $\omega_{mk \cdot \text{dist}}$ 反映的是 $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 和 ω_{mk} 二者之间的距离。显然 $\omega_{mk \cdot \text{dist}} < 0$ 时支路 L_{mk} 将发生连锁跳闸; $\omega_{mk \cdot \text{dist}} = 0$ 时支路 L_{mk} 将处于发生连锁跳闸的边界;而当 $\omega_{mk \cdot \text{dist}} > 0$ 时,支路 L_{mk} 不会因连锁跳闸被切除。

下面将主要针对电流保护的情况加以讨论。当支路 L_{ij} 发生初始故障停运且电网潮流重新分布后,在考虑支路 L_{mk} 是否发生连锁跳闸时,实际上主要通过计算支路 L_{mk} 的电流 I_{mk} 并与其电流定值相比较来分析,这实际上已经考虑了保护的方向性,因此可用式(2)来衡量连锁受扰支路 L_{mk} 发生连锁跳闸的严重性。

$$\sigma_{mk} = I_{mk} - I_{mk \cdot \text{lim}} \quad (2)$$

式中, I_{mk} 按照通常的情况理解为支路 L_{mk} 在电网潮流重新分配后的电流,若计算时出现负值可直接令其乘以 -1 使其变为正值; $I_{mk \cdot \text{lim}}$ 为保护的定值; σ 为连锁受扰支路发生连锁跳闸的严重性评价参量,其值随 I_{mk} 单调增加,当 $\sigma = 0$ 时,支路 L_{mk} 刚好处于连锁跳闸的临界状态。由式(2)可见该式给出了一种连续型的表达形式,对于进一步分析 I_{mk} 中的各元素的影响以及 σ 对 I_{mk} 中各元素的灵敏度将是非常方便的。

依据直流潮流法,当支路 L_{ij} 发生初始故障停运且电网潮流重新分布后,可推出电网支路电流向量 \mathbf{I} 和节点注入功率向量 \mathbf{P}_n 之间的关系^[10]为:

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}_p \mathbf{P}_n \quad (3)$$

式中,向量 \mathbf{I} 中的元素为包括初始支路 L_{ij} 电流在内的电网全部支路的电流,且 L_{ij} 中电流值取为零;向量 \mathbf{P}_n 中的元素为包括参据节点在内的电网全部节点的注入功率。式(3)中的 \mathbf{R}_p 为^[10]:

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{S} \mathbf{B}_0 + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{I} \mathbf{S} \mathbf{B}_0 \quad (4)$$

式中, \mathbf{S} 为支路-节点关联矩阵; \mathbf{I}_l 为 $l \times l$ 阶单位阵的第 l 行;矩阵 \mathbf{B}_0 是由支路 L_{ij} 开断前的不包含参据节点的节点电纳矩阵 \mathbf{B}_0' 的逆矩阵扩展而来,其扩展的形式是在 \mathbf{B}_0' 的逆矩阵上增加一行和一列零元素,所增加的行号和列号与参据节点的编号相对应; $\boldsymbol{\lambda}$ 是由支路 L_{ij} 开断后各支路的功率增量系数构成的向量,其计算方式可参见文献[11-12]。设电网在 L_{ij} 开断前共有 l 条支路, n 个节点,则矩阵 \mathbf{R}_p 的规模为 $l \times n$,其第 u 行第 v 列的元素记为 r_{uv} 。

设 I_{mk} 位于向量 I 的第 u 行, 则 I_{mk} 可表示为:

$$I_{mk} = \sum_{v=1}^n r_{uv} P_v \quad (5)$$

式中, P_v 为节点 v 的注入功率。在式(5) 最后的计算结果中, 如果 I_{mk} 为负值, 可将其乘以 -1 使其变为正值, 这里, 本文将处理过后的支路 L_{mk} 的电流仍记作 I_{mk} 。

这样, 将式(2) 和(5) 结合起来就可以将节点注入功率和连锁受扰支路的连锁跳闸的严重性直接联系起来。由式(2) 和(5) 可知, σ_{mk} 对 P_v 的灵敏度为:

$$\frac{\partial \sigma_{mk}}{\partial P_v} = \frac{\partial (I_{mk} - I_{mk \cdot \lim})}{\partial P_v} = \pm r_{uv} \quad (6)$$

式中, r_{uv} 前的正负号由 I_{mk} 的最终结果确定。这样, 有式(2)、(5) 和(6) 可以看出, 初始故障停运且潮流重新分配后, 任一节点 v 对连锁受扰支路 I_{mk} 的作用可以用 $r_{uv} P_v$ 和 r_{uv} 来表征, 前者代表的是节点 v 对支路 I_{mk} 的连锁跳闸严重性的实际影响, 后者代表的是支路 I_{mk} 的连锁跳闸严重性随着 P_v 的变化所形成的灵敏性。

2 关键节点的确定算法

通过前述的分析, 若电网的结构和参数一定, 当初始故障停运且电网的潮流重新分配后, 除初始故障支路外的其余连锁受扰支路是否发生连锁跳闸主要由电网的节点注入功率来决定。而从式(2)、(5) 和(6) 来看, 不同的节点其作用不同, 也就是说存在起关键作用的节点。找出这些关键节点对于电网运行人员掌握电网的运行情况以及采取预防措施是有利的。由此, 针对连锁跳闸以及寻找关键节点可按如下的思路形成算法: 先通过计算并结合式(2) 找出连锁跳闸可能性较大的支路, 然后结合式(2)、(5) 和(6), 利用 $r_{uv} P_v$ 和 r_{uv} 的值找出关键节点, 按照这一思路, 并参考文献[10], 具体算法如下。

1) 对给出的初始故障预想集合, 先根据式(3) 和式(2) 计算其连锁跳闸的严重度, 对于任一初始故障, 只要其余的任一支路满足 $\sigma_{mk} > -\varepsilon$ 的条件, 就将该预想初始故障送入到初始故障集 S_1 中。上述条件中的 ε 是一个小的正数, 可根据实际需要确定。在用式(3) 计算各支路的电气量时考虑到该方法所带来的误差^[10], 可将计算所得的电流值除以 0.9, 再用式(2) 去计算。

2) 根据已经得到的 S_1 , 再进一步利用详细的潮流算法去计算初始故障停运后的潮流分配, 得到各条剩余支路的详细电气量, 按照式(2) 去计算其连锁跳闸的严重程度, 再按照满足 $\sigma_{mk} > -\varepsilon$ 的条件去筛选初始故障, 凡满足该条件的初始故障就将其选入到集合 S_2 中。在形成 S_2 集合的时候, 对该集合的每一个初始故障, 按照 $\sigma_{mk} > -\varepsilon$ 的条件记录其相应的严重连锁受扰支路, 并形成集合, 这样的集合表为 $S_{\text{sub}}(h)$, 其中 h 表示对应于第 h 条初始故障支路。

3) 对 S_2 集合中每一初始故障支路所对应的 $S_{\text{sub}}(h)$ 中的连锁受扰支路按其 σ_{mk} 值的大小进行排序。通过排序, 可以考察任一初始故障发生后, 剩余支路的连锁受扰的不同情况, 这对分析和考察连锁跳闸是有利的。

4) 对 S_2 集合中每一初始故障支路所对应的 $S_{\text{sub}}(h)$ 中的部分或全部连锁受扰支路, 根据需要, 针对每一条连锁受扰支路, 提取之前计算时得到的 R_p 矩阵中的 r_{uv} ($v = 1, 2, \dots, n$) 和 $r_{uv} P_v$ ($v = 1, 2, \dots, n$) 数据, 然后以 r_{uv} 和 $r_{uv} P_v$ 作为特征输入量, 进行聚类划分, 划分后可将该连锁受扰支路具有不同影响和灵敏作用的支路分开, 进而可筛选出其中具有关键作用的节点。

上述算法可用图 1 所示的流程图来表示。

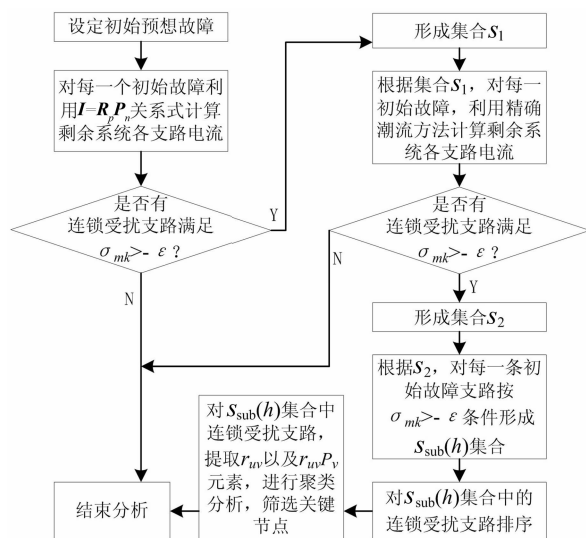


图 1 算法的流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart for analysing key nodes in cascading tripping

在上述算法的第二步采用了精确潮流计算方法, 主要是因为考虑到式(3) 的计算有一定的误

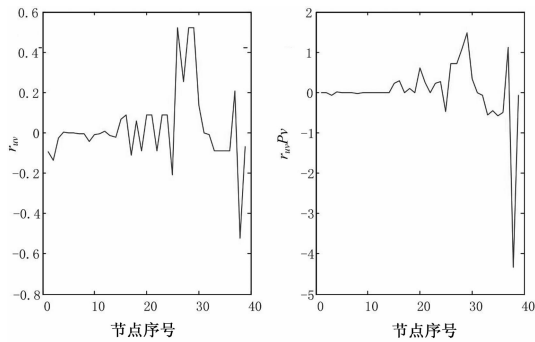


图 3 支路 L_{16-24} , L_{17-27} 的 r_{uv} 和 $r_{uv}P_v$ 数据
Fig. 3 The data of variable r_{uv} and $r_{uv}P_v$ of branches L_{16-24} , L_{17-27}

指标的影响。

接下来分析对各个连锁支路起关键作用的节点。这里取 r_{uv} 和 $r_{uv}P_v$ 为特征输入量进行聚类划分,特征输入量的输入格式为 $[r_{uv}, r_{uv}P_v]$ 。仍以与初始故障支路 L_{26-27} 对应的连锁受扰支路 L_{25-26} 为例,经过聚类划分后,一共将其相关节点划分为 5 类。在这 5 类数据中,第一类的聚类中心数据为 $[0.4137, 1.0941]$,所划分出来的节点数有 5 个,包括节点 26~29,节点 37,结合图 2 和图 3 可见,这几个节点围绕在支路 L_{25-26} 的周围,对支路 L_{25-26} 的传输功率影响较大,而节点 27 在支路 L_{26-27} 断开后对支路 L_{25-26} 的影响主要是因为经支路 L_{25-26} 送达节点 27 的功率在支路 L_{26-27} 断开后产生变化所致。第二类的聚类中心数据为 $[-0.5217, -4.3301]$,所包含的节点只有一个,即节点 38,从系统的接线图和图 3 可见,这个节点对支路 L_{25-26} 的影响比较大,不过这个影响是反方向的,其对支路 L_{25-26} 电流的影响实际上是从节点 26 到节点 25 的方向,这刚好和前面的分析一致,这个节点也是需要关注的节点。第三类节点聚类中心数据为 $[0.1004, 0.3003]$,共包括节点 15,节点 16,节点 20~24,节点 30,共 7 个节点,这几个节点较为远离支路 L_{25-26} ,对支路 L_{25-26} 有一定的影响,但影响不大。第四类节点的聚类中心为 $[-0.1104, -0.5115]$,共包括节点 25,节点 33~36,这几个节点主要是在电流的反方向上对支路 L_{25-26} 产生影响,不过影响相对于节点 38 要小得多。第五类节点数的聚类中心为 $[-0.0307, -0.0072]$,包含其余的 21 个节点,这些节点的影响几乎可以忽略。由此通过划分,就可以将对 L_{25-26} 具有关键影响的第一和第二类

节点找出来,其中,节点 38 主要是一个反向的影响。

下面一例仍假定初始故障支路为支路 L_{26-27} 。按前面给出的数据,连锁受扰支路 L_{17-27} 是符合 $\sigma_{mk} > -\varepsilon$ 条件的支路之一,而且还是连锁受扰比较严重的支路。按照与前面的连锁受扰支路 L_{25-26} 相同的处理办法,根据该支路电流的正负取值结果,提取出其相应的 r_{uv} 和 $r_{uv}P_v$ 数据,然后进行划分分析,进而寻找其对应的关键节点。图 4 给出了对应于支路 L_{17-27} 的 r_{uv} 和 $r_{uv}P_v$ 数据。和图 3 类似,从该图中可以比较直观地看出,对于该连锁受扰支路,影响其连锁受扰的严重性的节点也是只有一小部分。这个特点对于把握连锁跳闸事件以及预防处理应该是有利的。

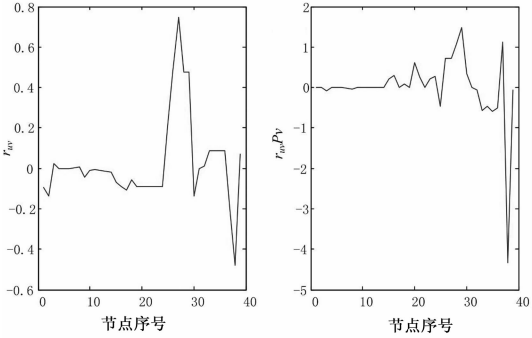


图 4 支路 L_{17-27} 的 r_{uv} 和 $r_{uv}P_v$ 数据
Fig. 4 The data of variable r_{uv} and $r_{uv}P_v$ of branch L_{17-27}

电网的全部节点一共被划分为 3 类。其中第一类的聚类中心数据为 $[0.3656, 0.9254]$,主要包括节点 25~29,节点 33~36。这些节点主要是围绕在支路 L_{17-27} 周围或是支路 L_{26-27} 断开后需要为节点 27 提供功率实现功率平衡的节点。其中节点 25~29 虽然是负荷节点,但按前述的约定,已经将其视为正值,即等效看作是具有正的注入功率的节点。这些节点在支路 L_{26-27} 断开后都和支路 L_{17-27} 产生正向的关联,其影响在所分的 3 类节点中是最大的。这些节点不仅对支路 L_{17-27} 的实际影响比较大,而且支路 L_{17-27} 的电流对这些节点的变化也比较灵敏,这些节点是比较关键的节点。第二类节点的聚类中心数据为 $[-0.4739, -3.9313]$,只包含一个节点,即节点 38,不过该节点主要起反向的作用,从网络的接线图上看,该节点在支路 L_{26-27} 断开后可理解为主要维持其附近的功率平衡,进而削弱其周围节点的作用。剩

下的第三类节点的聚类中心数据为 $[-0.040\ 2, -0.067\ 5]$,包含除以上节点以外的其余全部节点。这类节点的影响作用相对比较小,属于非关键节点。

当初始故障支路停运后,电网要实现潮流的重新调整。在其调整的过程中,一些受初始故障支路影响的连锁受扰支路的电气量以及该支路的连锁受扰的严重程度一般由部分关键节点所决定。这种现象非常普遍,除了以上所列出来的例子,不仅初始故障支路 L_{26-27} 所对应的其他连锁受扰支路也是如此,其他的初始故障支路,包括 $L_{1-2}, L_{2-3}, L_{5-8}, L_{21-22}$ 等初始故障支路,其所对应的连锁受扰支路的情况也是如此。针对这种情况,通过一定的算法找出这些关键节点对把握和预防连锁跳闸是有益的。上述算例中按照先筛选初始故障再分析连锁受扰支路,然后再找寻关键节点,是一套比较完整的算法,整个思路是清晰的。从算例的计算结果并结合系统的电网接线图可见,所提出的算法可比较有效地筛选出初始故障及其对应的连锁受扰支路,并可比较有效地分析出相关的关键节点。与文献[10]类似,该算法在考虑连锁受扰支路的受扰严重性时也同样考虑了保护的动作行为,这是比较接近实际的。该算

法将连锁受扰支路的受扰严重性直接和节点注入功率结合起来,不仅可比较直观地分析节点注入功率对连锁受扰支路的实际影响,还可以分析相关节点与连锁受扰支路之间的灵敏关系,这从上面的算例中可比较清楚地得到验证。

4 结论

电网发生连锁跳闸事件时,一般至少要涉及到两类重要的因素:连锁受扰支路的后备保护的動作行为;初始故障后电网潮流的重新分配。而电网潮流的分配与电网节点的注入功率是密切相关的,把握这些关键节点对进一步防止连锁跳闸非常重要。在相关研究的基础上结合连锁受扰支路的继电保护動作行为,给出了一种连续型的用于衡量连锁跳闸可能性的表达形式,同时将电网的节点注入功率与该表达形式结合起来,既可以比较真实地反映实际的连锁跳闸行为,又可以直接利用该表达形式去分析节点注入功率对连锁跳闸事件的影响和灵敏度。所提出的搜寻关键节点的算法符合先筛选初始故障,再筛选连锁受扰支路,直至探寻关键节点的一般逻辑思路。所给出的算法通过算例分析表明是有效的,可为电网运行和相关的研究与探讨提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 石立宝,史中英,姚良忠,等.现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J].电网技术,2010,34(3):48-54.
- [2] 刘友波,胡斌,刘俊勇,等.电力系统连锁故障分析理论与应用(一)——相关理论方法与应用[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):148-155.
- [3] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等.关于电力系统相继故障研究的评述[J].电力系统自动化,2013,37(19):1-9,40.
- [4] 董新洲,丁磊,刘琨,等.基于本地信息的系统保护[J].中国电机工程学报,2010,30(22):7-13.
- [5] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等.基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J].电力自动化设备,2013,33(10):40-46.
- [6] 王安斯,罗毅,涂光瑜,等.用于预防控制的电力系统连锁故障事故链在线生成方法[J].高电压技术,2009,35(10):2446-2551.
- [7] 王涛,王兴武,顾雪平,等.基于概率及结构重要度的电力系统事故链模型与仿真[J].电力自动化设备,2013,33(7):51-56.
- [8] 李杨,苏慧玲.N-K故障下影响电力系统脆弱性的关键线路研究[J].电力自动化设备,2015,35(3):60-67.
- [9] 宋毅,王成山.一种电力系统连锁故障的概率风险评估方法[J].中国电机工程学报,2009,29(4):27-33.
- [10] 邓慧琼,李培强,郑荣进.电网连锁故障中的受扰支路及其关联节点分析[J].福建工程学院学报,2015,13(3):223-228.
- [11] 邓慧琼,李争,杨国福,等.电网连锁故障激发因素研究[J].河北科技大学学报,2010,31(3):222-226.
- [12] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985.
- [13] 边肇祺,张学工.模式识别[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [14] 范九伦,吴成茂.划分系数和总变差相结合的聚类有效性函数[J].电子学报,2001,29(11):1561-1563.
- [15] 叶海军.模糊聚类技术及其应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2006.

(责任编辑:肖锡湘)