

硕士学位论文

学术学位

基于复杂网络的电力信息物理节点重要性评估  
方法研究

**RESEARCH ON IMPORTANCE  
EVALUATION METHOD OF POWER CYBER  
PHYSICAL NODES BASED  
ON INFORMATION BASED ON COMPLEX  
NETWORK**

2023 年 6 月

## 摘 要

随着经济的快速发展，电力系统的规模一直在扩大，电力系统已经发展成为一个跨区域的大规模网络，成为了最复杂的人工网络之一。互联网的发展有助于高效的输电和优化电力分配，这使得信息物理系统更加容易控制日益复杂的电力系统，信息物理系统具有更加准确高效的监控系统。但电力 CPS 的规模等级也是日益庞大，架构复杂程度日益增大，高复杂性的电力 CPS 虽然具有一定的鲁棒性，但是电力 CPS 的不稳定性也更容易被触发，不稳定性一旦被触发，就会威胁整个电力 CPS 的运行，即当电力系统的一个元件遭到破坏会传播到电力系统的其他元件中，会导致级联故障，加重电网规模故障，造成巨大的社会经济损失。同时随着经济的不断发展，新能源发电的兴起，虽然带来了绿色环保等优势，但可再生能源的不断并网增大了电力 CPS 的不确定性，使得电力 CPS 安全稳定运行的压力增大。因此，考虑新能源并网对电力 CPS 关键节点评估准确度的影响成为一个需要付出努力研究的方面。本文主要对以上问题进行了研究分析。

本文先提出了一种电力系统连锁故障模型。建立此模型的目的是，模拟电力系统节点遭受攻击之后，电力系统可能发生的状态，并计算电力系统由此改变之后可能造成的负荷损失以及节点减少的数量等。此模型可以对电力 CPS 的连锁故障过程进行仿真分析。由此电力 CPS 连锁故障仿真分析计算得到的电力 CPS 的节点在退出运行之后的电力 CPS 的负荷损失以及节点损失等是本文开展研究工作的基础。

之后，本文提出了 TrendRank 算法，用于评估电力系统节点重要性。TrendRank 算法并没有考虑新能源并网对整个电力系统造成的不确定性，TrendRank 算法适用于没有新能源并网的电力系统关键节点的评估。TrendRank 算法不仅考虑电力 CPS 节点退出运行之后的负荷损失以及节点损失，而且还考虑了电力 CPS 运行时的线路潮流的方向和大小。在系统仿真验证时，将 TrendRank 算法与其他文献的算法进行对比，证明 TrendRank 算法的有效性。

最后，在 TrendRank 算法的基础上考虑了新能源并网的前提下，根据 GA-ELM 预测出新能源发电功率，然后提出了区间 TrendRank 算法。区间 TrendRank 算法在评估电力系统关键节点时考虑了新能源发电功率的不确定性，针对线路潮流的不确定性，对算法进行了改进。

本文的仿真验证结果表明了区间 TrendRank 算法在评估电力系统关键节点比大部分算法有着更高的准确度，区间 TrendRank 算法在继承 TrendRank 算法的准确度的同时，增加了电力系统节点在包含新能源并网时的情况。

**关键词：** TrendRank；关键节点； 新能源； GA-ELM

## Abstract

As the economy continues to grow, the size of the power system has been expanding, and the power system has developed into a large-scale network across regions, becoming one of the most complex man-made networks. The development of the Internet has facilitated efficient transmission and optimized power distribution, which has made it easier for information-physical systems to control the increasingly complex power system, and for Cyber-physical systems (CPS) to have more accurate and efficient monitoring systems. However, Power systems are growing in size and architectural complexity. Although the high-complexity power system has certain robustness, it is also easier to stimulate the vulnerability of the system, and once the vulnerability is stimulated, it will be manifested to threaten the operation of the whole system, that is, when one component of the power system is damaged will spread to other components of the power system, which will lead to cascading failures and aggravate the grid scale failure This will cause huge social and economic losses. Meanwhile, as the economy continues to develop, the rise of new energy generation, although it brings green and environmental protection and other advantages, but, the continuous grid connection of renewable energy sources has greatly increased the uncertainty of the power system, and the pressure on the safe and stable operation of the grid is increasing. Therefore, it becomes an urgent problem to consider the impact of new energy sources' grid connection on the accuracy of power system critical node assessment. In this paper, the above problem is studied.

This paper first proposes a medium power system chain failure model. The purpose of this model is to simulate the possible states of the power system after an attack on the nodes of the power system, and to calculate the possible load loss and the number of node reductions after the resulting changes in the power system. This model can simulate the chain failure process of the power system. The load loss and node reduction of the power system nodes after an attack are the basis for the next step of this paper.

After that, the TrendRank algorithm is proposed to evaluate the importance of power system nodes. The TrendRank algorithm not only considers the load loss and node loss of the power system nodes after the attack, but also considers the direction and size of the line currents during the power system operation. In the system simulation verification, the TrendRank algorithm is compared with PageRank algorithm and LeaderRank algorithm, and it is proved that the accuracy of the critical nodes of power system evaluated by TrendRank algorithm is higher than other algorithms.

Finally, on the basis of TrendRank algorithm, considering the premise of new energy grid connection, the new energy generation power is predicted according to GA-ELM, and then the interval TrendRank algorithm is proposed. The interval TrendRank algorithm considers the uncertainty of new energy generation power when evaluating the key nodes of power system. Aiming at the uncertainty of line power flow, the algorithm is improved.

The simulation validation results in this paper show that the interval TrendRank algorithm has higher accuracy than most algorithms in evaluating power system critical nodes. The interval TrendRank algorithm inherits the accuracy of the TrendRank algorithm while adding the power system nodes when new energy sources are included in the grid connection.

**Keywords: TrendRank; critical node; New energy; GA-ELM**

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 课题的国内外发展现状与趋势.....	2
1.2.1 电力系统节点评估现状.....	2
1.2.2 新能源发电功率预测现状.....	4
1.3 预备知识.....	5
1.3.1 图论.....	5
1.3.2 线性代数.....	6
1.3.3 电力系统基础知识.....	7
1.4 本文主要工作.....	8
第 2 章 电力信息物理系统建模 .....	10
2.1 引言.....	10
2.2 电力信息物理系统框架设计.....	10
2.3 电力系统模型.....	12
2.4 信息网模型.....	14
2.5 电力网和信息网的交互.....	15
2.6 仿真分析.....	16
2.7 本章小结.....	18
第 3 章 TrendRank 算法及应用 .....	20
3.1 引言.....	20
3.2 LEADERRANK 算法 .....	20
3.3 考虑电气特性的 TRENDRANK 算法模型 .....	23
3.3.1 潮流介数.....	23
3.3.2 TrendRank 算法 .....	24
3.4 电力系统重要性评估.....	26
3.5 仿真分析.....	28
3.6 本章小结.....	32
第 4 章 区间 TrendRank 算法及应用 .....	33
4.1 引言.....	33
4.2 GA-ELM 算法 .....	33
4.3 TRENDRANK 算法改进 .....	36

---

4.4 改进 K 均值算法.....	39
4.5 仿真分析.....	40
4.6 本章小结.....	47
结 论 .....	49
参考文献 .....	51
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	57
东北电力大学学位论文原创性声明和使用权限 .....	58
《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和《中国学位论文全文数据库》投稿声明 .....	59
致 谢 .....	60

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景和意义

随着现代电力系统的发展，电力系统的规模已经在不断的扩大，电力系统已经发展成为一个跨区域的大规模网络，成为了最复杂的人工网络之一<sup>[1]</sup>。信息网对电力系统状态的监测和控制需要进行及时数据交流，这对电力系统和信息网之间的配合提出了更高的要求，互联网的发展有助于高效的输电和优化电力分配，这使得信息物理系统更加容易控制日益复杂的电力系统，信息物理系统具有更加准确高效的监控系统<sup>[2]</sup>。电力信息物理系统作为下一代电力系统架构，实现通信、计算、控制与电力系统的密切结合<sup>[3]</sup>。

煤炭等传统能源在过去的几百年一直是满足地球能源需求的主要能源<sup>[4]</sup>。传统能源在使用时会产生的污染气体，造成环境破坏和全球气温变暖<sup>[5]</sup>。而电能是当前人类社会中最方便且环保的能源，是推动社会发展的最重要的能源之一。电能可以非常轻松的转化为其他形式的能量，且具有方便输送，安全等优点被广泛应用在生活的各个方面。但是电力系统的发电，输电和用电是同时的，电能并不像其他化石能源一样可以大量存储，电力系统的电能需要供需平衡，使电压等需要保持稳定，若无法达到平衡，便有可能致使电力系统中的设备退出运行甚至损坏，从而有可能会造成大停电事故。大规模停电会对整个社会系统的交通，经济以及国防等造成严重的破坏。我国的发电样式虽然多样，但是燃煤发电仍是我国发电的主要部分，占据了发电总量的百分之七十左右，但新能源发电等取得一定成果，加上对于低碳绿色生活的追求，新能源发电在世界电力生产中的比例逐年提升<sup>[6]</sup>。然而，新能源发电存在着断断续续、难以预测和不稳定的特点，比起传统能源在控制和调度方面的难度也增加不少<sup>[7-9]</sup>。新能源发电的不断并网将给整个电力 CPS 的安全稳定运行等一系列问题造成不小的挑战。

电力 CPS 的不断扩大给社会生产带来了较多益处，但同时也给电力 CPS 的安全稳定的运行带来了巨大的挑战<sup>[10-11]</sup>。电力 CPS 成为最复杂的人工网络之一。社会的稳定发展的正常运行都靠着电力 CPS 的安全稳定运行。但电力系统规模的逐渐增长，其内部结构等长时间工作，必然导致器件的老化和损坏。如果电力系统中的某些原件遭到破坏便有可能导致连锁反应，加大电力系统的故障规模，造成大停电事故，对地区经济造成非常大的损失<sup>[12-14]</sup>。2003 年的“美加大停电”的原因便是电力系统中的一条线路发生故障，致使了大停电事故<sup>[15]</sup>。随着社会经济的发展，我国的电力系统得到了巨大的发展，建立了各种电力工程，例如三峡发电站等。电力系统规模的不断扩大使得运行变得十分复杂，新能源发电的不断并网使得电力 CPS 的不确定

性增大，电力 CPS 稳定运行的压力不断增加。随着电力系统复杂性的增加，各种电力系统事故也频频发生，这使得电力系统工作者都意识到电力系统的稳定运行在社会中的重要性。

电力系统大规模停电发生的过程一般分为两种：一种是电力系统器件的自然损坏，由电力网络中某些器件的突发损坏的导致输电线路断路，进而致使发生了大规模停电事故；一种是由于极端天气或者人为破坏导致电力系统大面积遭到破坏<sup>[16]</sup>。但是无论是哪种过程，究其原因都是因为电力 CPS 中的某个器件退出运行所造成的。研究表明，电力 CPS 中有着某些关键器件对电力 CPS 的安全稳定运行有着十分重要的作用，这些元件被破坏时将会引发电力系统的连锁故障，称为关键节点<sup>[17-18]</sup>。尤其在新能源发电的不断并网的情况下，电力系统运行调度越来越复杂，电力系统一旦发生连锁故障，将会给社会造成巨大的损失。因此，如何找出电力系统中的关键节点，对于防止发生电力系统连锁故障具有重要意义<sup>[19-20]</sup>。

## 1.2 课题的国内外发展现状与趋势

### 1.2.1 电力系统节点评估现状

目前，电力系统网络已经成为世界上最庞大、最复杂的人工网络之一，自电力系统网络建立以来，发生多次大规模停电事故，所以，研究者将研究的主要方向放在了电力系统网络复杂性和连锁故障，电力系统关键节点的评估是研究整个电力系统脆弱性的一个方向。目前，众多学者围绕快速有效地辨识电力系统中关键节点展开研究，可主要分为两个方面：一方面是从电网的物理属性出发，另一方面是从复杂网络角度出发。

电力系统的物理属性分析是通过研究电力系统的电压、电流或者潮流等特点对整个电力系统进行分析。通过电力系统物理属性进行分析的方法比较多；比如电力 CPS 中的某个节点退出运行之后，整个电力系统的参数(电压、电流和潮流等信息)的变化来评估该电力系统节点的重要性，这类方法是将节点遭受破坏后电力 CPS 的损失和该节点的重要性联系在一起，节点受到攻击之后，电力系统的损失越大，该节点越重要<sup>[21-22]</sup>。

在电力系统节点重要性评估中，文献[23]提出基于电力系统当时运作方式和电力系统的潮流分布指标进行电力系统脆弱性的评估。文献[24]通过带有权值的网络模型，考虑电力系统拓扑结构和电力系统的潮流分布的特点，提出了电网潮流转移下的线路的辨识方法。文献[25]提出基于合作博弈的电网线路脆弱性评估方法。文献[26]提出基于效用风险熵权模糊和复杂网络综合评判的电网节点脆弱性评估方法。文献[27]提出基于加权潮流裕度介数和动态潮流转移综合熵的关键薄弱线路识

别方法。文献[28]通过判断电力系统遭受攻击之后，电力系统的连通水平与负荷损失来评估电力系统节点的重要性。文献[29]通过判断电力系统节点受到攻击后，影响的用户数来判断该电力系统节点的重要性。在文献[30]中，基于动态判定准则和状态概率对系统的关键节点进行评估。

从复杂网络角度出发，上世纪开始，众多学者便开始研究对网络中的节点的重要度进行评价，大部分方法都是将节点的重要性与该网络中的剩余节点相关联<sup>[31]</sup>。这类节点重要性的评估方法，不会破坏原网络，主要依靠网络中的一些信息来判断节点的重要性，例如节点的度、特征向量等。这些特征信息可以反映节点在网络与剩余节点的关系。

复杂网络的相关理论给评估电力系统节点的重要性提供了思路。在现有的节点重要性评价方法中，基于复杂网络和社会网络分析的度方法得到了广泛的应用。电网的概念可以用网络来描述，Watts 和 Strogats 首次指出了美国西部电网的小世界特征<sup>[32]</sup>，同样的结果也出现在巴西电网和中国的几个互联电网中<sup>[33]</sup>。Barabasi 和 Albert 发现美国西部电网节点度的累积分布服从幂律，这表明美国西部电网是一个无标度网络<sup>[34]</sup>。只考虑电力系统的拓扑结构，忽略其他电力系统特性。以无标度网络模型等为代表，基于图论思想评估电力系统中的关键节点。因此，复杂的网络知识可以用来研究电力系统中的关键节点。

文献[35]通过量化节点度量指标，如节点介数、效率系数等，来搜寻关键节点。文献[36]基于有向加权复杂网络模型和 PageRank 算法，结合复杂网络节点重要性评估特点和电网的潮流特性，提出了一种电力系统节点评估方法。文献[37]提出了一种基于电力系统的电压-无功灵敏度矩阵和相角-有功灵敏度矩阵的方法，用于识别关键节点。文献[38]基于邻域连接的概念提出并研究了一种复杂网络的邻域演化模型。文献[39]结合实际情况建立加权网络，通过改进的权值降低法辨识关键节点的方法。

在复杂网络中，节点的度数指与该节点直接相连的输电线数量，节点的度数越高，表示该节点直接连接的输电线数量越多，对电网的影响越大。从整个电力系统来看，介度代表了电力系统节点的主导水平<sup>[40]</sup>。在复杂网络中，节点的紧密程度也体现了节点对其他节点的中心性和间接影响<sup>[41-43]</sup>。文献[44]根据熵的自适应节点来评估节点的重要性。节点之间的距离越近，表示节点相对于其他节点的中心性和重要性。为了更好地定义电气距离来表示电力系统脆弱性，在文献[45]中，采用接近度来识别电力系统中的重要节点。此外，在文献[46]中提出了一种参数可调的多准则评价方法，该方法考虑了节点度和中间度来估计网络节点的重要性。文献[47-48]考虑了网络拓扑结构对识别关键节点的重要性。在文献[49-50]中，从动力学的角度识别电力系统的关键节点。在文献[51]中使用接近度来识别电力系统中的重要节点。此外，在文献[52]中提出了一种参数可调的多准则评价方法，该方法考虑节点度和间度来估计网络节点的重要性。在[53]中，基于马尔可夫和图论对系统的可靠性进

行了评估。文献[54]利用复杂网络理论结构、电力系统级联故障结果以及 LeaderRank(LR)算法相结合的方法，提出了一种快速辨识关键线路的方法。此外，PageRank 算法也被广泛用于识别关键节点，在文献[55-59]中已有 PageRank 的应用。2011 年，Lü 等提出了一种叫做 LeaderRank 的方法，这是 PR 算法的一种变体<sup>[60]</sup>。它引入一个接地节点，通过双向边连接原有网络的所有其他节点。文献[61-62]证明 LR 优于 PR 方法。与 PR 方法相比，LR 方法具有更快的收敛速度和精度，并且 LR 算法的应用场景更广泛，具有更高的鲁棒性。

### 1.2.2 新能源发电功率预测现状

进入二十一世纪以来，全球气温逐渐提高，绿色可持续发展受到日益加剧的环境问题和能源安全等问题的不断困扰和阻碍。全球各国为了实现绿色可持续发展，都把光伏发电等新能源发电作为主要途径。2020 年，欧洲国家丹麦的新能源发电占比突破了 62%。新能源发电技术的逐渐成熟和有效利用是实现我国 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的最有效技术。截止到二十一世纪二十年代，我国新能源发电的装机总量突破 24%，新能源发电量占全国用电量的比例也接近 10%左右。新能源发电比例的逐渐增大已经成为中国电力系统的一个特征。新能源发电的日益普及。光伏发电效率受多种条件影响，与其他新能源发电方式类似。大规模并网会影响电力系统的稳定性，但可信的发电功率预测能提前了解新能源电力系统的变化趋势，保障电力系统的稳定运行至关重要。准确可靠地预测新能源发电功率，可以提前了解新能源电力系统的变化趋势，使得在新能源并网时，电力系统能够稳定运行，这是电力 CPS 能够稳定、可靠运行的关键技术。因此，为了使新能源并网时，电力系统仍能稳定运行，众多学者开始对新能源的发电功率进行预测，长期以来，众多学者已经提出了不少的方法，如神经网络法、支持向量机法等<sup>[63]</sup>。

极限学习机(ELM)是一种前馈神经网络算法，它包含三层网络结构，分别是输入层、隐含层和输出层。极限学习机不像其他传统学习算法似的需要多次迭代调整权值，且克服了传统梯度算法常有的陷入局部最优的可能性、过拟合和学习率值的选择不合适等一系列问题，ELM 在回归分析、分类以及预测等领域都有着极快的学习速度，ELM 还具有结构简单、学习效率高等特点，且在多数情况下，ELM 算法的泛化能力高于基于梯度的学习算法。文献[64]结合 ELM 与第一步中选取的搜索关键词对居民用电量进行预测。文献[65]采用 ELM-HTM 进行预测，使平均准确率提高了 15%。文献[66]首先使用灰色关联系数对数据进行处理，然后使用 GA-ELM 对光伏发电量进行预测。文献[67]基于完全集成经验模态分解，使用了连续小波变换、自适应噪声、特征提取网络、RReliefF 特征选择和 ELM 进行预测，取得了较好的效果。因为单一模型预测可能存在泛化能力不强的缺点，文献[68]通过增加正则化项来提高极限学习机的泛化能

力，减少过拟合现象并提高算法预测精度。同样因为单一模型泛化能力不强和预测性能不稳定的情况，文献[69]首先根据皮尔逊相关系数找出相似的天气，然后根据相似天气对 GA-ELM 进行训练，根据天气因素对光伏发电功率模型的建立，这一改进，降低了光伏发电功率预测的误差。

### 1.3 预备知识

复杂网络理论是用于探索复杂系统行为的物理学方法，被广泛应用于生物、社会、计算机等领域，用于研究各种复杂系统中的信息传输、动态过程和结构多样性。在复杂网络理论中，网络是由点和线构成的。复杂网络是指由大量节点(或元素)以及它们之间错综复杂的相互作用关系所构成的网络的系统的数学工具。这些节点可以代表各种不同的实体，如人、物体等元素。节点之间的联系可以是相互作用、通信、合作、竞争等。

要理解复杂网络，需要掌握以下预备知识。

#### 1.3.1 图论

图论是研究图和网络的学科。一个图是由一组节点和连接这些节点的边组成的， $G = (V, E)$ ，式中  $V, E$  分别表示点集合和边集合。在复杂网络中，节点和边的概念也同样适用于图论。在图论中，常用的图包括无向图和有向图。无向图的边没有方向，可以表示节点之间的无向关系；有向图的边有方向，可以表示节点之间的有向关系。此外，还有加权图，其中每个边都带有一个权值，表示边的强度或距离等。

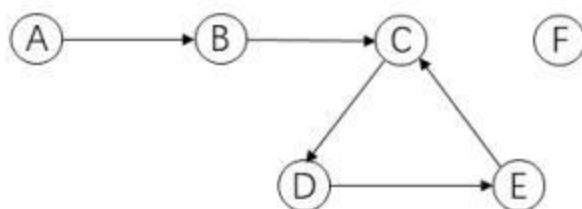


图 1-1 有向图论结构图

图论中的一些重要概念包括：

(1) 路径：指图中连接两个节点的边的序列，可以是简单路径（不重复经过节点）或循环路径（起点和终点相同）。

在图 1-1 中，因为  $C \rightarrow D \rightarrow E$  构成循环，所有可能有无数个路径，其中  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$  表示一个路径。

(2) 连通性：指图中任意两个节点之间是否存在至少一条路径，如果存在至少一条路径，则这两个节点是连通的。

在图 1-1 中，因为是个有向图，所以节点  $E$  和节点  $F$  不存在连通性。节点  $E$  和节点  $D$  存在连通性。

(3) 度数：指节点连接的边数，对于无向图，节点的度数为连接该节点的边的数量；对于有向图，节点的度数包括入度（连接该节点的入边的数量）和出度（连接该节点的出边的数量）。

(4) 图的连通分量：指一个无向图中的最大连通子图。

(5) 图的生成树：指一个连通图中，包含所有节点的子图，且只包含  $n-1$  条边。

### 1.3.2 线性代数

在复杂网络中，向量空间可以表示节点的属性或特征，并且线性代数可以用于分析节点之间的关系。

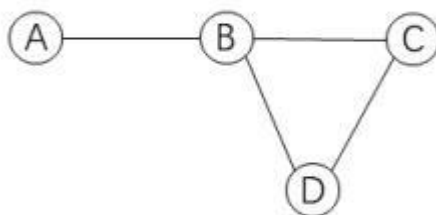


图 1-2 无向图论结构图

下面介绍一些跟复杂网络有关的线性代数概念和方法：

(1) 矩阵：在复杂网络中，节点之间的连接关系可以用矩阵来表示，例如邻接矩阵和拉普拉斯矩阵等。邻接矩阵表示了节点之间是否相连，而拉普拉斯矩阵则包含了更多的信息，包括节点的度数、边的权重等。

(2) 特征向量和特征值：在复杂网络的研究中，经常需要寻找一些重要的节点或子图，例如网络的中心节点或社区结构等。特征向量和特征值是一种常用的方法，可以用来计算网络的重要性和结构。特征向量是非零向量，在矩阵作用下仅改变向量的缩放比例，特征值则是对应的缩放因子。通过计算网络的拉普拉斯矩阵的特征向量和特征值，可以得到网络的谱分解，进而分析网络的结构和特征。

(3) 矩阵分解：矩阵分解是将一个矩阵分解成若干个特定形式的矩阵之积的过程，例如奇异值分解和特征分解等。在复杂网络的研究中，矩阵分解可以用来提取网络的重要信息和结构，例如社区结构、网络嵌入等。

(4) 矩阵求逆：矩阵求逆是线性代数中常用的方法，可以用来解决方程组和求解矩阵的逆矩阵。在复杂网络的研究中，矩阵求逆可以用来计算网络的可控性和可观测性，进而设计网络的控制策略和观测器。若一个矩阵  $A$ ，则其逆矩阵为，

$$A^{-1} = \frac{1}{A} A^* \quad (1-1)$$

(5) 矩阵计算：线性代数中的矩阵计算方法，如矩阵乘法等，在复杂网络的研究中也有着广泛的应用，例如计算网络的节点中心性、网络的距离矩阵等。

(6) 拉普拉斯矩阵：一种表示无向图或有向图拓扑结构的矩阵，它反映了图的局部和全局性质。邻接矩阵  $A \in R^{n \times n}$  可以表示复杂网络中节点的链接关系，复杂网络的节点数便是矩阵  $A$  的阶数，无向图的邻接矩阵  $A$  为，

$$A(i,j) = \begin{cases} 1 & i-j \in E \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1-2)$$

无向图的度矩阵  $D \in R^{n \times n}$  代表复杂网络每个节点的度数。无向图的度矩阵为，

$$D(i,i) = \sum_{j=1}^n A(i,j) \quad (1-3)$$

那定义无向图的拉普拉斯矩阵  $L$  为，

$$L = D - A \quad (1-4)$$

如图 1-2，该图的三种矩阵分别为，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

### 1.3.3 电力系统基础知识

基尔霍夫定律：电路分析中非常重要的定律之一，用于分析电路中的电流和电压关系。基尔霍夫定律分为两个部分：

基尔霍夫第一定律(KCL)：在任何一个节点处，电流的总和等于零。这意味着，如果在一个节点上有多个电流进入或离开该节点，则它们的代数和应该为零。

数学表达式为，

$$\sum_{n=1}^I I_n = 0 \quad (1-5)$$

其中， $I_n$  表示第  $n$  个电流。

基尔霍夫第二定律(KVL)：在任何一个闭合电路中，电压的总和等于零。这意味着，如果在一个闭合电路中有多个电压源，则它们的代数和应该为零。数学表达式为，

$$\sum_{n=1}^V V_n = 0 \quad (1-6)$$

其中， $V_n$  表示第  $n$  个电压源。

节点电压方程：用于解决电路中节点电压的方程。在电路中，节点是指连接两个或多个元件的交叉点。节点电压是指在这个交叉点上的电压值。

假设一个电路有  $n$  个节点，每个节点  $i$  的电压为  $V_i$ 。根据基尔霍夫定律，每个节点的电流总和为 0。因此，可以写出每个节点的电压方程，

$$\sum (V_i - V_j) / Z_{ij} = 0 \quad (1-7)$$

其中， $i$  表示节点的编号， $j$  表示与节点  $i$  相连的节点编号， $Z_{ij}$  表示连接节点  $i$  和节点  $j$  的电阻、电感或电容等元件的阻抗值。

这个方程表示的是在一个节点上所有电流的代数和等于 0。根据这个方程，可以计算出每个节点的电压。同时，如果电路中有  $m$  个电阻、电感或电容等元件，则可以写出  $m$  个方程。通过求解这些方程，可以得到电路中各个节点的电压值。

## 1.4 本文主要工作

以电力信息物理系统建模为基础，以更加准确地评估电力系统的关键节点为主要目的。本文首先根据电力 CPS 的特征、功能以及结构建立模型，然后根据潮流介数改进 LeaderRank 算法，得到了 TrendRank 算法，最后考虑新能源发电的并网给电力系统造成的不确定性和不稳定性，在其基础上改进 TrendRank 算法，得到了区间 TrendRank 算法。

第 1 章 主要介绍了关于电力系统关键节点评估的研究背景、意义以及本文所用基础知识，叙述了本文的主要内容和思路。

第 2 章 介绍电力信息物理系统的建模。其中，物理层的建模主要依据 matpower 工具箱，主要计算电力系统中的潮流分布，结合电力系统的结构特征建立物理层。信息层，主要根据最优经济调度调节电力系统中除新能源发电之外的发电机的发电功率，根据各条输电线路的功率来决定输电线路的开合。最后根据多特征关联的电力信息物理系统，来建立电力系统跟信息网的关联关系。

第 3 章 本文根据第 2 章建立的电力信息物理系统模型，依据复杂网络知识评估电力系统关键节点。首先，计算得到电力系统的潮流参数，然后由此计算出电力系统各个节点的潮流介数，将得到的潮流介数用于改进 LeaderRank 算法，建立 TrendRank 算法。并对提出的 TrendRank 算法在电力系统仿真上进行比较，TrendRank 算法通过连锁故障推演验证了基于复杂网络知识的关键节点评估的准确性，在最大负载容量、电力系统传输效率以及系统连通性等指标上的表现比最近流行的 PageRank 算法，LeaderRank 算法以及其他文献提出的方法都更为优秀。

第 4 章 考虑了随着新能源发电在电力系统中所占比例的增加，新能源并网所引发的不稳定性问题。这种不稳定性问题随着新能源的不断发展可能会愈加突出，使得电力系统中关键节点的评估变得更为复杂，现有的评估电力系统中关键节点的算法中，没有考虑到新能源并网的，使得现有的评估算法大多数与实际情况不符。为了解决这个问题，本文先对新能源发电功率进行预测，根据 GA-ELM 算法和区间值

来预测和模拟新能源发电的不稳定性，最后，结合第三章提出的 TrendRank 算法的基础上上考虑新能源并网带来的不确定性导致的各种问题，提出区间 TrendRank 算法，用于评估包含新能源并网的电力系统关键节点。并在电力系统仿真上进行了验证，验证结果表明了本文所提出区间 TrendRank 算法的准确性和优势。

第 5 章 总结了本文的主要研究工作和成果，并提出了未来研究的建议。

## 第 2 章 电力信息物理系统建模

### 2.1 引言

电力 CPS 是当今最复杂，最大规模的系统之一。根据电力 CPS 的建模，最主要的是用来反应电力 CPS 的运作状态和信息交流，以及电力系统和信息网是如何相互作用的，可以通过节点采集的信息来辅助控制策略，提升电力信息物理系统的性能，提高整个电力信息物理系统电能的利用率和系统的安全性。建立适宜的电力 CPS 仿真模型是之后研究工作开展的基石，通过仿真可以对电力信息物理系统的性能进行分析和评估，评估不同的控制策略和算法对系统的影响。同时，仿真还可以帮助设计和优化电力信息物理系统的参数和结构，以满足电力系统的性能需求。因此，建立适宜的仿真模型是电力 CPS 研究的重要一环，可以提高研究的可靠性和有效性。

电力 CPS 的电气特征以及运行状态等，众多学者提出的电力 CPS 模型主要有复杂网络、暂态和稳态模型。但传统的基于复杂网络建模只关注了电力系统的拓扑结构，将电力系统以及信息网的一些传感器等抽象为节点和线路，忽略了电力系统的电气特性等物理意义，这与实际系统存在一些偏差，为了解决这一问题，本文采用基于潮流计算和电力系统稳态模型的研究方法，对电力信息物理系统进行建模，对研究电力系统关键节点评估具有十分重要意义。

首先，计算出电力系统的潮流分布，通过考虑电力系统的拓扑结构和电气特性，建立了电力系统的物理层，然后，信息网的建立，主要依据最优控制算法，作为信息层的主要算法，用来调度物理层的各个发电机的发电功率以及电能调度等问题。最后根据信息网对电力系统的控制关系和电力系统对信息层的反馈信息来建立电力系统跟信息网的关联关系。最后采用 IEEE14 节点系统来验证模型的有效性。

### 2.2 电力信息物理系统框架设计

电力信息物理系统中信息网大多依据电力系统一次设备的地理位置进行设置。电力系统一次设备上一般都有传感器等可以收集并传输数据与信息网进行通信。电力信息物理系统的运行过程大致为：电力系统中一次设备配有的传感器等采集电力系统的运行状态，然后与信息网进行通讯，信息网生成相应的控制指令，然后传回到电力系统的一次设备，并执行控制指令。因此，提出了电力 CPS 的物理结构图，如图 2-1 所示。电力系统层主要有电力系统的一次设备以及一些传感器等组成，主要负责发电以及电能的传输和分配等。信息网是电力信息物理系统的核心，主要负责对电能生产的

控制以及调度，还有电力系统的信息检测，状态以及调度等。中间的传输层主要负责电力系统运行状态数据以及信息网决策和调度指令的传输等。

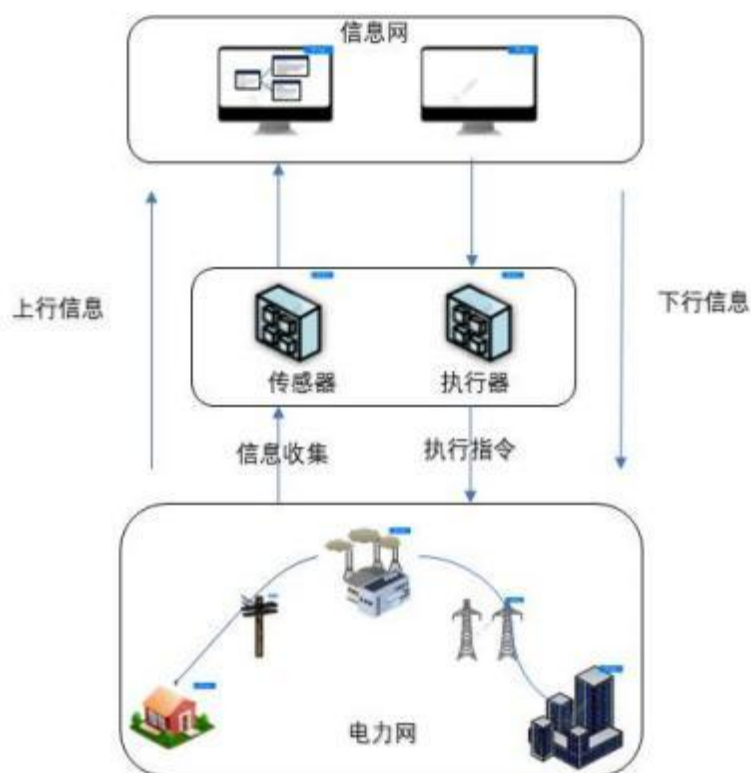


图 2-1 电力信息物理系统结构图

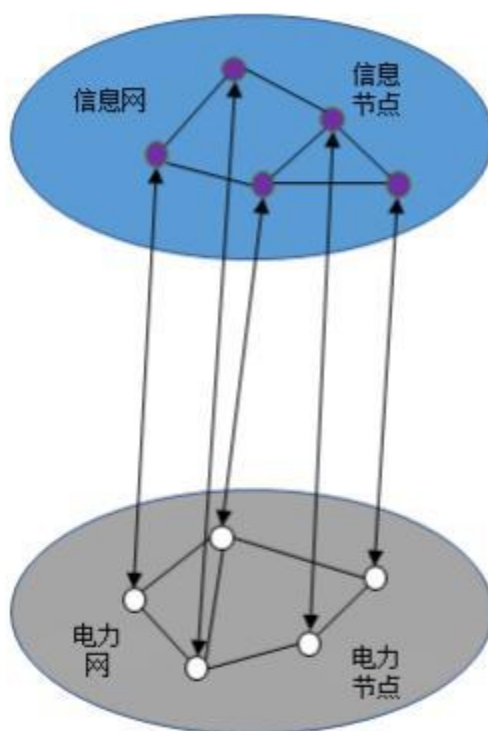


图 2-2 电力信息物理系统模型

根据图论思想，本文提出的电力 CPS 如图 2-2 所示，主要表达了电力 CPS 的主要设备及其链接关系，上层为信息网拓扑结构下层为电力系统拓扑结构，然后根据对应关系，确定电力网节点和信息网节点的互联关系。

基于信息物理系统的三层结构，电力系统主要有电力一次设备组成，用来表征发电以及电能的传输和使用的过程。信息网主要有调度中心等组成，主要是收集和交换电力信息物理系统的运行数据和运行状态等，为了调度中心可以更好的对电力系统进行控制。

## 2.3 电力系统模型

在电力 CPS 中，电力系统主要是由发电站、分布式电源以及用电住户等<sup>[70-74]</sup>，通过输电线路组成电力网，电力系统主要完成电能的产生、输送和使用。电力系统的大部分信息，包括有功和无功功率以及电压等由电力系统的各种信息。而信息网主要通过电力系统上的各类传感器获取电力系统的运行状态和运行信息，跟着各类信息完成对电力系统的监测及调度<sup>[75-77]</sup>。本节将建立电力网模型。

电力系统的运行状态可以用节点或回路房产进行表述，可以用式(2-1)表述。

$$\begin{cases} Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2 + \dots + Y_{1n} \dot{U}_n = \dot{I}_1 \\ Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2 + \dots + Y_{2n} \dot{U}_n = \dot{I}_2 \\ \vdots \\ Y_{m1} \dot{U}_1 + Y_{m2} \dot{U}_2 + \dots + Y_{mn} \dot{U}_n = \dot{I}_n \end{cases} \quad (2-1)$$

转换为矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

上式中， $Y_{ij} = R^{n \times n}$  代表电力系统的节点导纳矩阵，其中对角线上的元素代表节点*i*的自导纳； $U_j$  代表第*j*个电力系统节点电压的列向量； $I_i$  代表电力系统节点*i*注入电流的列向量。

当电力系统的拓扑结构发生改变时，节点导纳矩阵也会变，所有节点导纳矩阵的求解是计算潮流的关键。

本文采用为直角坐标下的潮流分布，因此，节点电压为，

$$\dot{U} = e_i + jf_i \quad (2-3)$$

导纳矩阵元素为,

$$\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2-4)$$

节点  $i$  注入电流为,

$$\dot{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^*} \quad (2-5)$$

其中,  $P_i$  代表有功功率;  $Q_i$  代表无功功率。联立式(2-1)和式(2-5)得节点  $i$  的功率平衡方程,

$$P_i - jQ_i = U_i^* \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} U_j \quad (2-6)$$

式(2-6)转化为直角坐标形式, 联立式(2-3)、式(2-4)及式(2-6)得到,

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= (e_i - jf_i) \sum_{j=1}^n [(G_{ij} + jB_{ij})(e_j + jf_j)] \\ &= (ea_i + fb_i) - j(fa_i - eb_i) \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中,  $a_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j)$ ,  $b_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)$ 。采用牛顿-拉夫逊法来解出上述式子, 可以得到电力系统所有节点的潮流分布。根据式(2-8)和式(2-9)得到电力系统各条输电线路的潮流分布,

$$S_{ij} = \dot{U}_i^* [U_i y_{ii} + (U_i^* - U_j^*) y_{ij}] = P_{ij} + jQ_{ij} \quad (2-8)$$

$$S_{ji} = \dot{U}_j^* [U_j y_{jj} + (U_j^* - U_i^*) y_{ji}] = P_{ji} + jQ_{ji} \quad (2-9)$$

式中,  $y_{ii}$  和  $y_{jj}$  代表电力系统节点自导;  $y_{ij}$  代表电力系统节点间导纳;  $\dot{U}_i$  为迭代之后得到的电力系统节点电压。

求解上式之后可以得到电力系统各节点的电压、功率以及线路的传输功率等。在电力 CPS 中, 节点都配有传感器、控制器和通信节点。此外, 在复杂网络中的图论概念中, 网络都是由节点和边相互连接构成的, 为  $G = (V, E)$ , 其中  $V, E$  分别表示点和边。如果  $G$  的边都是有方向的, 那么  $G$  便是有向图; 如果是无方向的, 那么  $G$  便是无向图。因此, 定义电力系统为  $G = (V_p, E_p)$ , 式中  $V_p$  表示电力系统的节点集合,  $E_p$  表示电力系统中的输电线路集合。定义邻接矩阵  $W \in R^{n \times n}$  表征电力系统的网络架构,  $n$  表示电力系统的节点数。其中邻接矩阵中的元素  $w_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的连接关系,

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \psi_1 \\ 0 & \psi_2 \end{cases} \quad (2-10)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

上式， $\Psi_2$ 表示潮流方向是由节点*i*流向节点*j*， $\Psi_1$ 表示潮流方向是没有由节点*i*流向节点*j*。

线路*i-j*复功率为，

$$P_{ij} + jQ_{ij} = U_i^2 g_{ij} - U_i U_j (g_{ij} \cos\theta_{ij} + b_{ij} \sin\theta_{ij}) - j [U_i^2 (b_{ij} + b_0) + U_i U_j (-b_{ij} \cos\theta_{ij} + g_{ij} \sin\theta_{ij})] \quad (2-12)$$

在直流潮流中，电力CPS的电阻值要比电抗值小得多，因此可以忽略电力系统中的电路电阻和对地电导，考虑线路两端相位差不大，因此对三角函数做出简化，进行线性化，且电压偏移小，不应该有功功率，设定电压值是一个定值。可得线路*i-j*的直流潮流式为，

$$P_{ij} = -b_{ij}(\theta_i - \theta_j) = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \quad (2-13)$$

其中， $x_{ij}$ 表示节点*i*和节点*j*之间的电抗。

在 $G = (V_p, E_p)$ 中， $PeR^{|V_p|}$ 表示电力系统有功功率向量， $\theta$ 表示电力系统电压相角向量， $F$ 表示电力系统支路潮流矩阵， $B_0$ 表示电力系统电纳矩阵， $N_i$ 表示与节点*i*直接相连的节点。节点*i*的注入功率与节点*i*相连的所有支路之和，式(2-13)写成，

$$P_i = -(B_0 \theta_i + \sum_{j \in N_i} B_{0ij} \theta_j) \quad (2-14)$$

用式(2-15)表征电力系统节点和支路的功率特性，来完成对电力网模型的建立。

$$P^{physical} = F + diag(P) \quad (2-15)$$

式中， $P^{physical}$ 的对角元素表示节点的注入功率， $diag(P)$ 表示一个以向量*P*中的元素 $P_i$ 为对角元素的对角阵。

## 2.4 信息网模型

电力系统是由各种发电站、变电站和众多用电住户构成，虽然构成部分在地理位置上距离大都较远，但因为信息网的存在，使得彼此关联密切。信息网实现了电力系统较为完善的控制，通过一次设备上的传感器获取电力系统的实时信息，监视电力系统的运行信息，并发布指令。对于信息网的建模，本节基于信息网的通信和调度功能来建立模型。

信息网的拓扑结构一般和电力系统一次设备的位置大体相同，定义邻接矩阵

$QeR^{n \times n}$  来表示信息网的拓扑关系， $n$  表示与电力网对应的信息网节点。根据电力网的检测功能，定义  $U^{receive} = \{U_{flow}^{receive} U_{branch}^{receive}\} eR^{n \times n}$  为信息网的数据接收矩阵，其中  $U_{flow}^{receive}$  表示储存电力网功率潮流信息  $P^{physical}$ ， $U_{branch}^{receive}$  代表储存接收到的电力网网架构信息  $W$ 。对于信息网的控制功能，定义  $U^{send} = \{U_{flow}^{send} U_{branch}^{send}\} eR^{n \times n}$  为信息网控制指令发送矩阵， $U_{flow}^{send}$  为对角阵，对角元素表示对电力网节点的功率控制指令， $u_{ii} > 0$  表示发电机节点增加发电效率命令。 $U_{branch}^{send}$  为信息网对电力网支路开断的控制指令矩阵， $u_{ij} = 1$  表示电力系统线路连通， $u_{ij} = 0$  则表示电力系统线路断开。

信息网通过传感器等设备采集电力系统的各类电力信息，同时监测和调度电力系统的运行情况，并依据工作人员设置的阈值等相关信息来生成各种对电力系统的控制信息，进而对电力系统进行调度。考虑电力系统的供需平衡和经济运行，选用最优经济调度为信息网的控制模型，式(2-16)是最优经济调度的目标函数，式(2-17)是最优经济调度的约束函数。

$$\min E = \sum_{i=1}^M E_i(P_{Gi}) \quad (2-16)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N P_{Dj} - \sum_{i=1}^N P_{Gi} = 0 \\ P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (2-17)$$

式中： $M$  表示电力网的节点数， $N$  表示发电机节点的数量，其中  $N < M$ 。 $P_{Dj}$  表示第  $j$  个节点的负荷需求。 $P_{Gi}$  表示第  $i$  个发电机的发电功率。 $P_{Gi}^{\min}$  和  $P_{Gi}^{\max}$  分别表示发电机发电功率的上下限， $E_i(P_{Gi})$  表示第  $i$  个发电机的发电成本函数。

$$E_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (2-18)$$

式中， $a_i$ ， $b_i$ ， $c_i$  均大于 0，表示第  $i$  个发电机的运行成本参数。

## 2.5 电力网和信息网的交互

电力系统通过传感器等设备完成信息的获取和输送。信息网采集电力系统的运行状态，电力 CPS 所有节点分享信息完成信息一致，根据优化调度算法生成优化调度指令经下行通道传给电力系统，电力系统调整进入新的运行状态，具体过程如下：

(1) 电力网将运行状态信息以及拓扑关系经上行通道传给信息网：

$$U_{flow}^{receive} = P^{physical} \quad (2-19)$$

$$U_{branch}^{receive} = W \quad (2-20)$$

(2) 信息网节点共享与其相邻的节点信息，使得信息同步。根据算法判断是否对电力系统进行优化调度，如果电力系统需要调度，则基于最优经济调度模型生成调度信息，经下行通道传给电力网：

$$U_{flow}^{send} = EDP(U_{flow}^{receive} U_{branch}^{receive}) \quad (2-21)$$

上式，EDP 表示经济调度算法

(3) 电力系统执行调度信息，调整电力系统各个发电机的输出功率，更新电力系统的导纳矩阵，更新电力系统的运行状态：

$$P^{physical} = P' + diag(L') \quad (2-22)$$

$$W = W' \quad (2-23)$$

## 2.6 仿真分析

本节选用 IEEE14 节点电力系统模型构建电力 CPS 来进行仿真验证，图 2-3 所示为 IEEE14 节点电力系统的拓扑图。该仿真对象含有 5 台发电机组和 20 条线路。根据 2.4 节介绍的最优经济调度，计算出发电机的最优发电功率，对电力信息物理系统初始化，基于 2.3 节介绍的牛顿-拉夫逊法计算 IEEE14 节点电力系统的潮流分布。

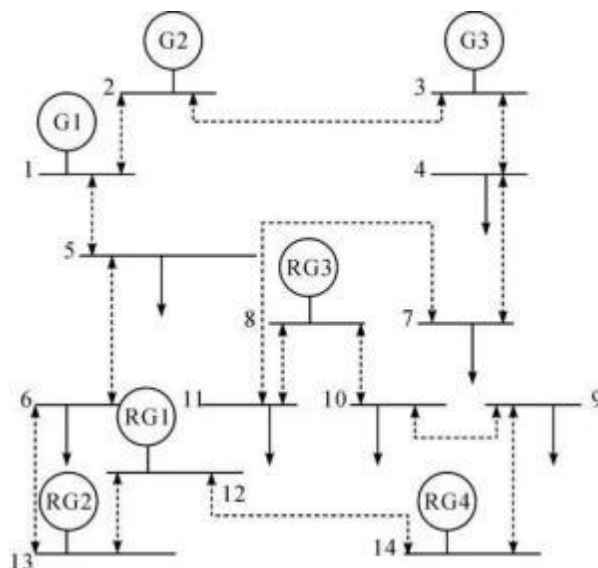


图 2-3 IEEE14 节点电力系统拓扑图

通过图 2-4，可以得知，在电力系统的迭代过程中，随着迭代次数的增加，所有的节点不匹配量逐渐减小，直至大约迭代 2500 次左右，所有节点的不匹配量基本上降到了 0，符合我们的要求。因此，可以得出结论，在电力系统迭代 2500 次左右后，我们已经成功地将不匹配量控制在了所要求的范围内。

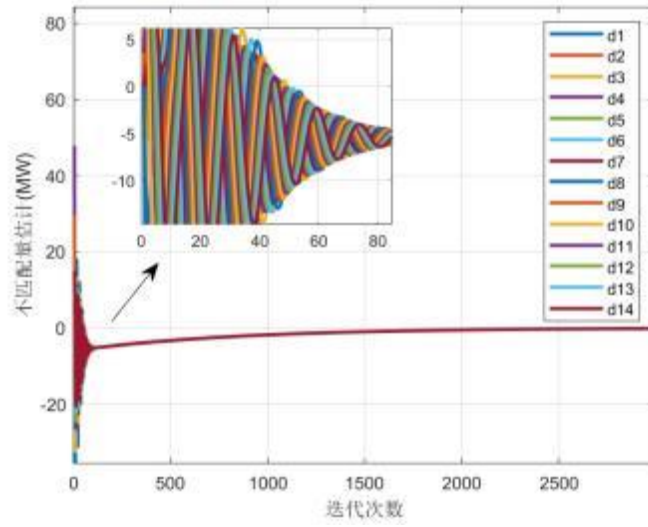


图 2-4 不匹配量估计

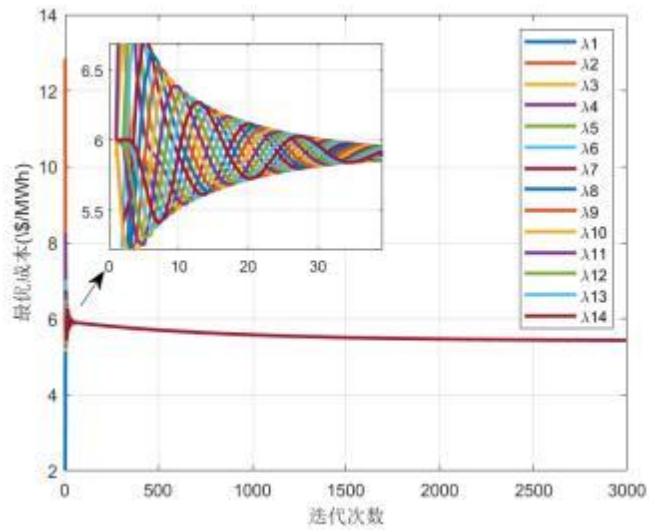


图 2-5 最优边际成本

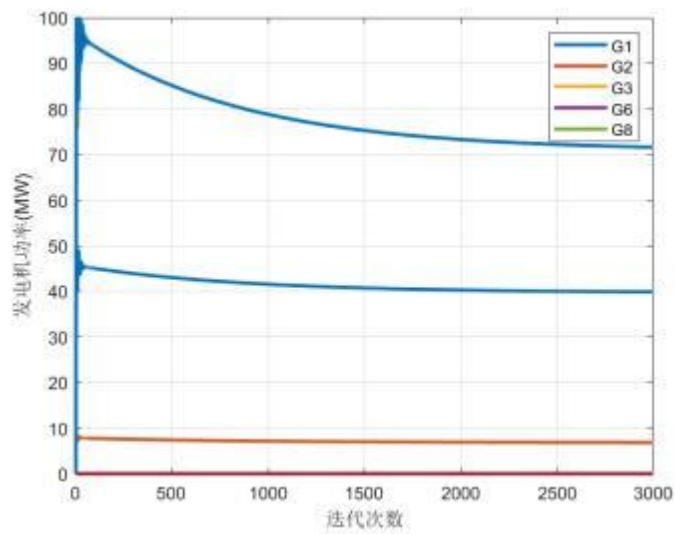


图 2-6 发电机有功输出

观察图 2-5 可发现，当成本逐渐收敛到最优解时，也就是随着迭代次数的增加，整个电力系统的成本开始下降，同时发电机的成本也开始逐渐降低，并在成本收敛到最优时达到最低值。因此，我们可以得出结论，当成本函数达到最优解时，此时发电机的成本达到最低点，也就是整个电力系统的成本最低。这意味着，通过对电力系统的迭代优化，可以找到发电机成本的最优解，以及整个电力系统的最低成本点，为电力系统的运行和维护提供了重要参考<sup>[78]</sup>。

由图 2-6 可知，五台发电机出力分别为  $P_{G1} = 39.88MW$ ， $P_{G2} = 6.86MW$ ， $P_{G3} = 71.62MW$ ， $P_{G6} = 71.62MW$  和  $P_{G8} = 71.62MW$ 。因此，可以得出结论，由图 2-6 可知，在该时刻，五台发电机的出力分别为  $P_{G1} = 39.88MW$ ， $P_{G2} = 6.86MW$ ， $P_{G3} = 71.62MW$ ， $P_{G6} = 71.62MW$  和  $P_{G8} = 71.62MW$ ，它们的出力值保持在这个状态，为电力系统的运行提供了重要的支持。

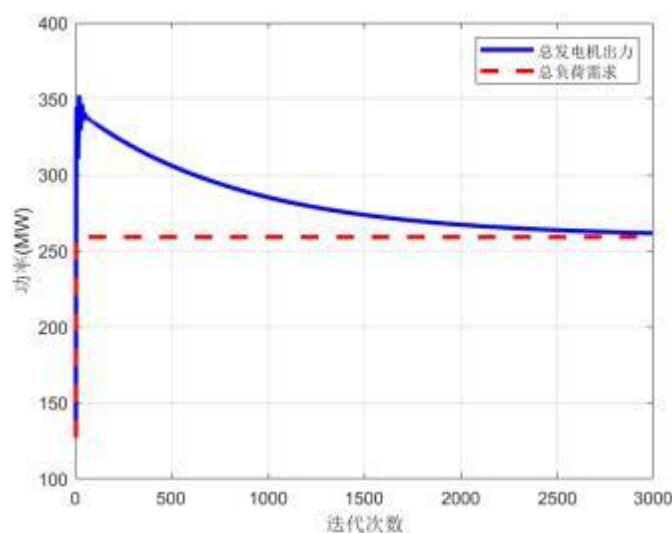


图 2-7 供需平衡

观察图 2-7 可知，在该时刻，电力系统的供需得到了平衡，系统的总负荷等于总发电量，整个系统的电力质量得到了有效的保障。此外，通过经济调度算法的优化，系统的总成本也得到了有效的控制，实现了最优经济调度，为电力系统的高效运行提供了有力保障。因此，可以得出结论，由图 2-7 可知，整个系统得到供需平衡，同时满足了最优经济调度，为电力系统的稳定运行和经济发展提供了有力支持。

## 2.7 本章小结

本章基于电力系统的潮流方程，考虑信息网控制的电力系统，将电力信息物理系统建模分为电力系统建模，信息网建模以及两者的交互作用。电力网根据系统潮流和电力网拓扑来表征。对于信息网，主要依据信息网对电力系统的控制和调度功能，采用最优经济调度作为控制算法来构建。本章提出的电力系统基于直流潮流方程建立和

信息网根据传感器数据来调度控制电力系统，形成一个闭环，且电力 CPS 的建模充分考虑了电力系统拓扑结构和物理参数特征，满足潮流分布关系，符合电力系统的特征。本章对电力信息物理系统进行了详细的构建和阐述，并通过在 IEEE14 节点的电力信息物理系统为例，对整个模型进行了仿真分析，证明了本章所建设的电力 CPS 模型的有效性。通过本章所建立的电力信息物理系统模型，我们可以更加深入地了解电力系统和信息系统的相互关联，同时也可以更好地对电力系统进行控制和调度。在仿真分析中，本章对电力信息物理系统进行了各种情况下的模拟，如传感器故障、控制器失效等，证明了该模型的有效性和鲁棒性。因此，本章的研究成果对于实现电力系统的智能化和自主化控制具有重要的理论和实际意义。

## 第 3 章 TrendRank 算法及应用

### 3.1 引言

从电力 CPS 建设至今，已发生了多次大规模停电事故，经调查，这些大停电事故中的部分是由电力系统中的某个关键元件被破坏所导致，美国东北部大停电事故造成数以千万的用电居民受到影响，事故造成的损失达到了高达 1 亿美元左右，这次电力系统故障的原因是电力系统中的继电器故障，从而引发的电力系统的连锁故障；2005 年俄罗斯电力系统中的 321 座变电站停电，经济损失达到 10 亿美元左右，其原因是设备老化断裂，从而引发的电力系统连锁故障；2012 年印度三大电网故障，印度一半人口用电受到影响，原因是印度电力系统中的一个变电站损坏，致使电力系统的部分线路和变电站过负荷，从而引发了电力系统的连锁故障。由此可见，信息网虽然有助于高效的输电和优化电力分配，这使得信息物理系统更加容易控制日益复杂的电力系统，信息物理系统具有更加准确高效的监控系统，但电力 CPS 的规模等级也是日益庞大，架构复杂程度日益增大，高复杂性的电力 CPS 虽然具有一定的鲁棒性，但是电力 CPS 的不稳定性也更容易被触发，不稳定性一旦被触发，就会威胁整个电力 CPS 的运行，即当电力系统的一个元件遭到破坏会传播到电力系统的其他元件中，会导致级联故障，加重电网规模故障，造成巨大的社会经济损失。因此，辨识出电力系统中的关键节点对于防止电力系统发生连锁故障和电力系统的稳定运行具有重要意义。

本章基于本文第二章建立的信息物理系统模型进行 LeaderRank 算法的改进。首先基于复杂网络理论中的介数，计算出介数改进之后的潮流介数，潮流介数考虑电力系统的拓扑结构和电气特性，然后用潮流介数对 LeaderRank 算法进行了改进，称为 TrendRank 算法。TrendRank 算法可以辨识出电力系统中的关键节点，从而可以有效避免电力 CPS 级联故障的发生。最后，在 IEEE39 节点电力系统进行了仿真验证，证明了 TrendRank 算法在辨识电力系统关键节点的有效性。

### 3.2 LeaderRank 算法

LeaderRank 算法是改进版的 PageRank 算法，它引入了一个背景节点并与所有节点进行双向链接。为了更加方便的理解 LeaderRank 算法，本节先介绍 PageRank 算法的概念。

PageRank 算法是一种基于随机游走的评价网址估值的算法。上世纪九十年代由

Page 和 Brin 提出，之后该算法被用于谷歌搜索引擎的网页排序，成为了谷歌的搜索引擎的重要算法，并应用到社会影响力分析、文本摘要等众多领域。该算法的核心思想为：在有向图上定义一个随机游走模型，沿着有向图随机访问系统中的节点，每个节点都有一个 PageRank 值，来表示这个节点的重要度，每个节点的 PageRank 值是有走向它的节点的 PageRank 值决定的，PageRank 算法是递归定义，其值是通过迭代进行计算的，假如节点  $A$  走向节点  $B$ ，那么节点  $A$  的 PageRank 值，在迭代过程中也会分配一部分给节点  $B$ 。

定义图 3-1 为有向图记作  $G = (V, E)$ ，其中  $V, E$  分别表示点和边， $V$  分别为节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$ ， $E$  为节点间为有向边，有向边上的权值表示节点之间的跳向的概率。比如现在在节点  $A$ ，那么下一步将有  $1/2$  的概率去节点  $C$  或节点  $B$ 。如果在节点  $D$ ，那么之后将有  $1/3$  的概率前往节点  $A$ 、节点  $B$  或节点  $C$ 。

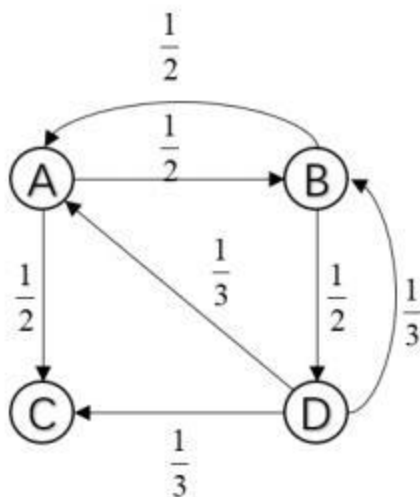


图 3-1 PageRank 算法网页图

从图 3-1 可以看出，一个节点，如果指向该节点的节点越多，则随机跳向到该节点的概率就越大，该节点的 PageRank 值便越大，该节点便越重要。

PageRank 的数学公式如下：

$$PR(x) = \frac{1-\delta}{n} + \delta \sum_{i=1}^n \frac{PR(G_i)}{L_{out}(G_i)} \quad (3-1)$$

式中， $PR(x)$  为网页  $x$  的 PageRank 值， $PR(G_i)$  为网页  $G_i$  的 PageRank 值，其中网页  $G_i$  连接到网页  $L_{out}(G_i)$  是网页  $G_i$  的指向网页数量， $\delta$  为 PageRank 算法的阻尼系数，若阻尼系数越大，则网页级别越高， $PR(G_i)$  为可以指向网页  $x$  的网页。依据 PageRank 公式可以知道，如果  $PR(G_i)$  的值越大，则网页  $x$  就越关键，网页  $x$  的 PageRank 值越大。

PageRank 算法简单，收敛速度快且鲁棒性好，可以快速准确的识别有影响力的网页，但是相比于互联网，电力系统有自己独特的特性，将 PageRank 算法直接用到电网中容易造成问题：PageRank 算法在迭代计算的过程中，网络中所有节点的 PageRank

值会均匀的分给该节点所指向的所有节点。但在现实生活中，PageRank 值的分配需要根据实际情况进行分配，而不是平均分配。

阻尼系数  $\delta$  代表的是当前节点指向其他节点的概率，阻尼系数的存在可以使 PageRank 算法在迭代过程中收敛，可以避免随着迭代次数的增加，致使部分节点的 PageRank 值很大，部分节点的 PageRank 值为 0。阻尼系数的值一般通过实验和经验获取，一般选取  $\delta = 0.85$ ，但在不同的应用背景下，阻尼系数的选取不具备普适性。

LeaderRank 算法很好的处理了 PageRank 算法解决不了的众多问题。LeaderRank 算法是在有向网络中，增加了一个与原网络中所有节点都双向链接的背景节点来替代 PageRank 算法中的阻尼系数，这使得 LeaderRank 算法比起 PageRank 算法更为简单，因为没有参数。LeaderRank 算法用 LeaderRank 值(LR 值)来代表网络节点的重要性。LeaderRank 算法在某一个节点跳转下一个节点的概率相当于从当前节点跳转到背景节点的概率。背景节点的增加，保证了网络内部之间的联系。相比 PageRank 算法，LeaderRank 算法不仅可以更快的收敛，而且还具有更强的抗干扰能力。

LeaderRank 算法的式子如下：

$$\begin{cases} LR_i(t) = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{\tilde{w}_{ji}}{k_j^{out}} LR_j(t-1) \\ LR_i = LR_i(t_c) + \frac{LR_g(t_c)}{n} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， $k_j^{out}$ 代表节点 $j$ 的指向节点数； $\tilde{w}_{ji}$ 代表邻接矩阵 $W$ 中的元素，只有节点 $i$ 链接指向节点 $j$ 的时候 $\tilde{w}_{ji} = 1$ ，且与背景节点相关的邻接矩阵元素都为 1； $n$ 代表网络节点数，不包括背景节点； $LR_i(t)$ 代表节点 $j$ 经过 $t$ 轮迭代之后的 LR 值，在稳定状态下，背景节点的 LR 值被平均分配给其他节点。在 0 时刻，网络中的背景节点的 LR 值为 0，除去背景节点之外的所有节点的 LR 值为 1。LeaderRank 算法中的邻接矩阵为  $n+1$ 阶，包含背景节点。

LeaderRank 算法和 PageRank 算法这两种算法都是将因特网中的网页等转为图的节点，将网页之间的链接关系转为图的边，方便进行研究。经过大量的研究发现，电力系统的平均路径比较小但聚类系数相对较大，这是明显的小世界网络特点，因此，电力系统也属于复杂网络的一种。可以将电力系统转为图的方式进行研究。在电力系统中，将发电厂和变电站电力等系统一次设备转化为网络的节点，将输电线路转化为网络的边。由于电力系统是有方向的，所以输电线路形成的边也是有方向的，方向可以由最优潮流计算得到。若节点 $i$ 向其他节点发电，则节点 $i$ 向外发电的节点的数量称为指向节点数；若节点作为被供电的一方，则向该节点供电的节点数目称为被指向数。

结合第二章的电力信息物理系统的建模，将电力系统用一个  $(n+1)$ 根  $(n+1)$  的有向邻接矩阵来表示电力系统的拓扑关系。有向邻接矩阵  $W$  的节点 $i$ 与节点 $j$ 直接相连，且节点 $i$ 向节点 $j$ 供电，则邻接矩阵  $w_{ij} = 1$ ，否则为 0。

### 3.3 考虑电气特性的 TrendRank 算法模型

通过 3.2 的介绍可知，PageRank 算法和 LeaderRank 算法可以很好的计算出网页或者人际关系所形成的复杂网络中的关键节点，但这只是在网页等复杂网络中应用，并不能直接在电力系统中直接使用。本节主要依据潮流介数对 LeaderRank 算法进行改进，使其可以适用于电力系统，改进之后的算法为 TrendRank 算法。

#### 3.3.1 潮流介数

电力系统是具有复杂网络特点，所以可以依据复杂网络的知识对电力系统进行研究。复杂网络中，也存在不少可以反映节点重要性的指标，例如度数，介数等等。一个节点的与之相连的节点数越多，则这个节点的度数越大，这个节点便越重要，度的优势在于计算简单，但是度数只表述了与该节点相连的节点数量，过于简单，没有考虑到与该节点相连的节点的重要性，这也是度的弊端之一。介数表示该节点在连通整个网络所起到的作用，通过最短路径经过该节点的次数来计算。相比于度可以较为全面的表示该节点在整个复杂网络中的重要性。其中介数的式子如下，

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (3-3)$$

式中， $\sigma_{st}(v)$  代表  $s \rightarrow t$  经过节点  $v$  的最短路径数， $\sigma_{st}$  代表  $s \rightarrow t$  的最短路径数。其中，若该节点的介数越大，说明通过该节点的最短路径越多，那么节点便越重要。但度数和介数不管是那个都不能直接应用在电力系统中，应该综合考虑电力系统的拓扑和物理特性。

潮流介数的出现解决了上述问题，潮流介数结合了电力系统的潮流分布、输电线路的功率以及节点的潮流信息等，考虑了潮流的方向性等。结合第二章建立的电力信 CPS 模型，电力系统的所有操作都是信息网基于电力系统的有功潮流来进行计算的，进而保证了这个电力信息物理系统的供需平衡。潮流介数的计算主要分为三步：

- (1) 确定电力系统的潮流分布。通过对电力系统各个节点的电压、相角、有功和无功功率等参数进行计算和分析，得到电力系统中各个节点的潮流分布情况，从而确定系统中各个节点之间的电力传输情况。
- (2) 计算电力系统中的输电路径中的有功功率。根据电力系统的拓扑结构和各个节点的潮流分布情况，计算出各个输电路径中的有功功率，从而了解电力系统中各个传输通道的能量流动情况。
- (3) 最后得到各个电力系统节点的潮流介数，其中  $i$  节点的潮流介数为，

$$\left\{ \begin{array}{l} B_f(i) = \sum_{y \in G, z \in L, m \in B} \sqrt{W_y W_z P_{m(i),y,z}} \\ T_i = \frac{B_f(i)}{\sum_{i=1}^n B_f(i)} \end{array} \right. \quad (3-4)$$

式中， $G$  表示电力系统发电机节点集合； $L$  表示电力系统负荷节点集合； $i$ 、 $z$  和  $y$  分别表示电力系统输电路径的节点、负荷节点和发电机节点； $W_y$  表示电力系统发电机节点  $y$  的权值； $W_z$  表示电力系统发电机节点  $z$  的权值； $P_{m(i),y,z}$  表示电力系统输电路径  $B_m$  经过节点  $i$  的有功功率。 $T_i$  表示归一化之后的潮流介数值。

### 3.3.2 TrendRank 算法

正如 3.2 节的介绍，LeaderRank 算法虽然可以评估部分复杂网络中的关键节点，但因为电力系统的特殊性，所以 LeaderRank 算法并不能直接电力系统中的关键节点评估。所以，需要对 LeaderRank 算法根据电力系统特性和 3.3.1 节介绍的潮流介数进行改进，称为 TrendRank 算法，计算出的电力系统所有节点的值称为 TR 值。LeaderRank 算法的值是均匀的分给所有其指向节点，改进之后的 TrendRank 算法主要依据各个指向节点的潮流介数值的大小进行一定比例的分配来代替平均分配。

电力系统节点的 TR 值的分配权重，需要考虑电力系统特性，本文主要考虑了电力系统节点之间线路的传输功率(有功功率)以及电力系统节点的负荷来进行设计，其分配权重式子如下，

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{(j,i)} = \frac{c_i^{in}}{\sum_{z \in Z} c_z^{in}} \frac{c_i^{out}}{\sum_{z \in Z} c_z^{out}} \tau \\ \tau = \frac{P_{ji}}{P_j} \end{array} \right. \quad (3-5)$$

式中， $c_i^{in}$  和  $c_i^{out}$  分别代表电力系统节点  $i$  的被指向数和指向数； $z$  代表电力系统节点  $j$  的指向数集合  $Z$  中的一个元素； $P_{ji}$  代表电力系统节点  $j$  向节点  $i$  的供电功率； $P_j$  代表电力系统节点  $j$  向其所有指向节点供电的总功率。其中，若节点  $j$  为背景节点，则  $\tau = \frac{1}{n}$ ，若节点  $j$  只有一个指向节点，且这个指向节点为背景节点，则  $\tau = 1$ 。

此外，背景节点的权值分配还考虑到了潮流介数，式子如下，

$$\beta_{(g,i)} = \frac{T_i \text{根}(c_i^{in} + c_i^{out})}{\sum_{j=1}^n (c_j^{in} + c_j^{out})} \quad (3-6)$$

最后，改进之后的 TrendRank 算法如下，

$$\begin{cases} TR_i(t) = \sum_{j=1}^{n+1} a_{(j,i)} TR_j(t-1) \\ TR_i = TR_i(t_c) + \beta_{(g,i)} TR_g \end{cases} \quad (3-7)$$

式中， $a_{(j,i)}$  代表电力系统节点  $j$  分配给节点  $i$  的权值； $TR_i(t)$  代表节点  $i$  经过  $t$  次迭代后的 TR 值； $\beta_{(g,i)}$  代表背景节点分配给电力系统网络节点的 TR 值的权值； $TR_g$  代表背景节点的 TR 值。背景节点的 TR 值的初始值为 0，电力系统其他节点的 TR 初始值为 1。

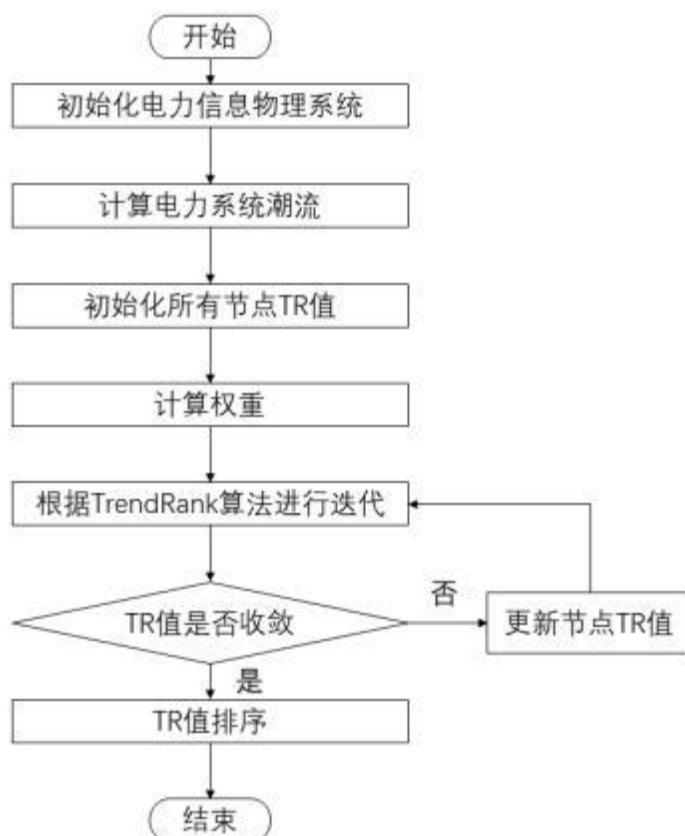


图 3-1 TrendRank 算法流程图

综上所述，通过式(3-5)至式(3-7)可以得到电力系统节点重要度排序。首先，先对整个电力信息物理系统进行初始化和电力系统所有节点包括背景节点的 TR 值进行初始化，由最优经济调度计算出各个发电机合适的发电功率，满足供需平衡，并计算电力系统潮流，并依据潮流方向等构建电力 CPS 的有向拓扑图，之后依据拓扑图计算电力 CPS 的邻接矩阵，最后根据邻接矩阵和系统潮流以及传输功率等由式(3-5)、式(3-6)和式(3-7)计算每个节点的 TR 值和分配权重，如果每个节点两次迭代之间的 TR 值小于 0.001，则认为 TR 值收敛，若 TR 值不收敛，再根据式(3-7)进行迭代直到 TR 值收敛，若 TR 值收敛，则对整个电力系统的所有节点进行排序，评估出电力系统的关键节点。其中，将背景节点作为附加节点，通过双向边与所有网格节点形成虚拟连接，并将背景节点的值，按照式(3-6)中的加权规则对所有电力系统节点进行划分。因此，

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/497011153005006032>