1. 实验一（网络结构熵）









实验二（网络平均效率）

本节采用IEEE118标准算例进行仿真实验。首先，对IEEE118节点进行简单介绍。参照论文《含风电电力系统的脆弱性分析与量化评估研究》5.2节进行介绍。

结合matpower6.0-case118.m文件。

基于上一章提出的电气介数和PageRank的指标模型，对其进行编程实现。指标参数见附录。

根据计算可以得到系统各节点的电气介数指标如下图所示。有图可知，该系统的拓扑结构中重要程度最高的节点是100，有IEEE118的标准数据可以得到，该节点位于拓扑的中心位置，且与该节点相连的支路有6条，这些支路承担了较多的能量输送，负责把位于拓扑边缘的发电节点产生的电能输送至各负荷节点，所以该节点对拓扑的重要性大。其次重要的节点分别是65、80、49、103、94、8、5，这些节点在电网拓扑中都处于能量枢纽的地位，对电网而言，这些节点的重要性比较大。



根据计算可以得到系统各节点的PageRank指标如下图所示。有图可知，该系统的拓扑结构中重要程度最高的节点是100，PageRank的基本思想是一个网页的重要性依赖于所有链接向它的其他网页。电网中，每条支路上的潮流是有确定的方向的，所以可以被视为一个有向图。其中，每个母线节点被视为一个网页，母线节点之间的电气连接被视为网页中的超链接，根据电流的方向决定超链接的方向。所以PageRank算法跟多关注的是有向的连接关系对拓扑重要性的影响。即节点的入链数越多，该节点就相对重要。所以100节点在IEEE118算例中重要程度最高，其次分别是100、65、80、49、103、94、8、5。



按电气介数指标对IEEE118标准测试系统进行攻击，首先按电气介数指标重要度进行排序，然后逐个移除重要程度最高的节点，移除比例为30%，即39个节点，得到移除比例与电网传输效率的变化趋势图，如下图所示。可以看出，当节点移除前5%时，网络传输效率下降最为明显，下降了约75%，说明电气介数重要度前5%的节点对于IEEE118标准算例系统的重要性，按电力系统的电气介数指标制定的攻击策略，对电力系统破坏性较为乐观的。因为节点的电气介数综和考虑了所连支路对其的影响。而支路的电气介数则衡量了所有发电-负荷节点对支路潮流的影响，从而在分析时，不仅考虑了拓扑的影响而且增加了能量变化的考虑，使得结构的衡量更完善。电气介数不局限于能量、信息沿着网络的最短路径传播，更体现了电能在整个网络支路的分布情况。移除前5%的节点，就能使电力系统的传输效率下降至25%。从中可以看出，其脆弱的节点分别为55、19、56、59、112、110、15。



按PageRank指标对IEEE118标准测试系统进行攻击，首先按PageRank指标重要度进行排序，然后逐个移除重要程度最高的节点，移除比例为30%，即39个节点，得到移除比例与电网传输效率的变化趋势图，如下图所示。可以看出，当节点移除前5%时，网络传输效率下降最为明显，下降了约80%，说明PageRank重要度前5%的节点对于IEEE118标准算例系统的重要性。在PageRank算法中，考虑更多的是节点的重要性在拓扑中的流向。按PageRank指标制定的攻击策略，对电力系统破坏性是比较大的。移除前5%的节点，就能使电力系统的传输效率下降至20%。从中可以看出，其脆弱的节点分别为55、19、56、59、112、110、15。



随机攻击、电气介数、PR值比较

随机攻击：在118节点中，随机选取39个节点，约占总节点的30%，重复试验500次，取平均值。

从下图可以看出，IEEE118对随机攻击有较强的抗干扰能力，系统呈鲁棒性。在随机攻击下，IEEE118电力系统的网络传输效率下降较为平稳，在移除30%节点后，电网传输效率下降59.4%；在电气介数攻击策略下。电网传输效率下降86.6%；在PageRank攻击策略下，电网传输效率下降92.9%；在这三种攻击策略中，在移除30%节点后，PageRank攻击策略对电网影响最大，电网传输效率仅为7.1%，电力系统崩溃；在电气介数攻击策略对电网的影响次之，电网传输效率为去13.4%；在随机攻击下，对电网的影响最小，电网传输效率40.6%。可以得到结论，与随机攻击策略相比，电气介数和PageRank这类蓄意攻击策略对电网运行状态影响较大，从侧面验证说明具有无标度性。运行指标急剧下降，电力系统表现出强烈的脆弱性。

在后期移除30%节点后，基于PageRank制定的攻击策略，相比于基于电气介数制定的策略攻击效果更加有效，因为，pagerank计算过程中，突出的是网络拓扑的出入链的重要性，即电网潮流流向的重要性，对于该模型，其迭代过程在能量转移矩阵的作用下完成，而入链累计度越高的点的*Pan*g*Rank* 越高。*Pan*g*Rank* 衡量了拓扑节点在能量转移中所起的作用，在节点被破坏后，潮流进行重分配，重新计算得到剩余节点的潮流累计度，重新对入链度高的节点进行移除，使能量分布高的节点被破坏，进而使得最终的电网传输效率相比于其他攻击策略要低。

从图中可以看出，在前期移除节点的过程中，基于电气介数制定的攻击策略比基于PageRank制定的攻击策略的攻击效果要好，电网传输效率运行指标下降的更快，说明节点的电气介数综合考虑了所连支路对其的影响。致使该策略在开始破坏网络重要程度高的节点，对于电网的影响程度较大。因此，电气介数不仅考虑了拓扑的影响而且增加了能量变化的考虑，使得结构的衡量更完善。电气介数不局限于能量、信息沿着网络的最短路径传播，更体现了电能在整个网络支路的分布情况。

