

面向系统健康度的网络节点重要度评估

刘剑慰, 姜斌, 杨蒲

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对网络系统中关键节点确认问题, 提出了一种基于健康度的节点重要度评估方法。首先, 分析系统健康度定义, 然后根据网络节点间的连接关系, 建立邻接矩阵, 计算节点在正常情况和故障降级情况下的网络容量变化, 建立系统健康度和节点重要度的关系模型。最后, 将该方法应用于一个运输网络系统。仿真案例表明, 该方法能够有效确定系统中的关键节点, 有助于提高系统可靠性。

关键词: 健康评估; 节点重要度; 网络拓扑; 邻接矩阵

中图分类号: TP18

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00238

Health-based network node importance assessment

LIU Jianwei, JIANG Bin, YANG Pu

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: For the identification of key nodes in network systems, a node importance assessment method based on the system health state was proposed. Firstly, the definition of the system health degree was analyzed. Then, according to the connection relationship between network nodes, the adjacency matrix was established to calculate the network capacity change under normal conditions and fault degradation conditions. And the relationship model between the system health degree and the node importance degree was established. Finally, simulations of network systems showed that this method could effectively identify the key nodes in the system and improve the reliability of the network.

Key words: health assessment, node importance, network topology, adjacency matrix

1 引言

物联网是现代工业生产生活的常见组织方式。在物联网中, 各设备和生产环节被紧密联系起来, 相互依赖、相互协作, 组成一个复杂而强大的系统, 完成单个节点难以完成的任务。但另一方面, 单个节点可能会由于内部故障或外部干扰而性能降级乃至功能失效。一个节点发生故障, 可能会通过连接通路而影响其他节点的工作状态, 进而对整个网

络系统造成更严重的影响, 甚至引发灾难性事故^[1]。网络节点之间相互连接耦合特性, 增加了抗干扰规划的复杂性。因此, 对节点进行重要度分析, 定位最关键又最易受故障影响的节点, 找到系统安全的瓶颈, 为提高网络系统整体可靠性提供依据, 是物联网网络系统设计中的重要一环。

节点重要度评估是复杂网络分析的一个重要方面, 有许多学者对此开展了相关研究。节点重要度指标主要可分为效益型和毁伤型两类。效益型是

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-15

通信作者: 刘剑慰, ljw301@nuaa.edu.cn

基金项目: 江苏省物联网与控制技术重点实验室基金资助项目 (No.NS2017017); 国防科技重点实验室基金资助项目 (No.6142605200402); 国家重点研发计划 (No.2020AAA0109305); 民航飞机健康监测与智能维护重点实验室开放基金资助项目 (No.NJ2018012)

Foundation Items: The Fund of Jiangsu Key Laboratory Internet of Things and Control Technologies (No.NS2017017), The Fund of Key Laboratory of Defense Science and Technology (No. 6142605200402), The National Key Research and Development Program of China (No.2020AAA0109305), The Open Funds for Key Laboratory of Civil Aircraft Health Monitoring and Intelligent Maintenance (No.NJ2018012)

指节点对其他节点产生功能和影响增强的作用,目前发展出中心性指标度量方法,包括度中心性^[2-3]、介数中心性^[4]、特征向量中心性^[5]等方法,典型应用包括对社交、病毒感染、科研合作等传播网络^[6]的节点分析。毁伤型是指节点受到毁伤或发生故障导致网络功能损失,系统剩余功能或性能越低,则节点越重要,常用于工业生产过程的物理网络,如电网^[7]、运输网^[8]等。毁伤型指标度量方法越来越受到关注,文献[9]连续删除节点的连边,分析剩余子图数量与节点数量的比值和最大子图规模,以评价网络节点重要度;文献[10]采用去毁度指标计算系统节点重要性;文献[11]采用图论的割点失效算法进行节点故障情况下的网络可控性分析;文献[12-13]设定节点发生故障导致性能降级,分析系统弹性变化得到节点重要度排序。

节点故障必然会对网络系统整体产生影响。系统健康度是网络系统整体可靠性的重要指标之一。本文分析网络节点故障性能降级与系统健康度的关系,采用邻接矩阵表征网络拓扑结构,计算网络容量,提出一种基于系统健康度的节点重要度评估方法,最后通过仿真验证方法的有效性。

2 系统健康度

目前,对于系统健康度还没有形成统一的定义,本文从系统结构出发对系统健康度进行分析。

2.1 简单系统的健康度

简单系统一般有单一任务参数,所以可以采用工作参数与标称参数的比值作为系统健康度。蓄电池以电荷容量作为其主要工作能力指标,则可用实际电荷容量与标称电荷容量之比作为其健康度^[14];运输通路和通信链路等则用链路流量与标称容量之比表示其健康度。本文将研究单一参数的系统,在此给出单参数系统的健康度定义。

定义 1 单参数系统的健康度表示为

$$\alpha = \frac{C_a}{C_n} \quad (1)$$

其中, C_a 为系统工作实际参数, C_n 为标称参数。

2.2 复合系统的健康度

复合系统由多个节点组成,节点与系统整体的健康状态密切相关,所以可由各节点的健康度状况建立系统的健康度指标。根据节点组成系统的结构方式不同,节点健康度和系统健康度之间呈现乘性或加性关系^[15]。

2.2.1 乘性关系

设系统由 n 个相互独立的节点串联组成,节点健康度与系统健康度的关系表示为乘性关系

$$R = \prod_{i=1}^n \alpha_i \quad (2)$$

其中, α_i 为节点 i 的健康度,各节点的健康度可用式(1)表示。

2.2.2 加性关系

在节点呈并联连接关系的系统中,一般认为节点健康度与系统健康度为加性关系,即表示为

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i \alpha_i \quad (3)$$

其中, ω_i 为节点的权重,且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。对 ω_i 作出进

一步设定需考虑节点自身特点,如节点的工作状态、复杂度或器件个数、工作时长等影响因素,常由专家打分的方式设定。

2.3 网络系统的健康度

假设复杂网络的各节点是单一参数的简单系统,网络的生产任务是将物资从源节点 1,通过节点间的链路,逐步传递到目的节点 n 。目的节点收到的物资越多,说明任务完成得越好,网络系统健康度越高。因此,定义系统的健康度为能够传递到目的节点的实际流量与正常情况下的标称总容量之比。

由于网络不是简单的节点串并联,所以节点健康度和网络健康度之间的关系,不是简单的乘性或加性关系式。网络系统拓扑结构可用有向图 $G = \langle V, E \rangle$ 表示,其中, V 表示节点集合, E 表示节点的有向链路(有向边)的集合,可得网络邻接矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, a_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的连接关系。 $a_{ij} = l$ 表示节点 i 与节点 j 之间有边相连,且容量为 l ; 而 $a_{ij} = 0$ 表示节点 i 与节点 j 之间没有相连。并设 $a_{nn} = 1$, 表示在目的节点 n 的物资会保留在该节点。

从源节点通过网络传输到目的节点的实际总流量按如下方法计算。

步骤 1 对邻接矩阵 A 进行归一化。对 A 的各

行求和，得数组 S ；然后将 A 的各元素 a_{ij} 除以对应行的和 s_i ，得到归一化矩阵 $A1$ 。

步骤 2 源节点正常的情况下，设置一个首元素为 1、其他元素为 0 的 n 维初始数组 $T0=[1,0,\dots,0]$ 。

步骤 3 $T1=T0 \times A$ 表示物资从源节点传递到其相邻节点。

步骤 4 计算节点冗余量 $E=S-T1$ 。数组 E 的第 i 个元素 e_i 为节点 i 的剩余容量， $e_i \geq 0$ 表示该节点可以完全接收上一个节点的物资并传递到下一个节点，则进行步骤 5； $e_i < 0$ 表示超过节点 i 的接收能力，需减少链路的流量，即 $a_{1i}=a_{1i}+e_i$ ，返回步骤 3 重新计算。

步骤 5 $T2=T1 \times A1$ 表示再传递到下一组相邻节点。

步骤 6 计算节点冗余量 $E=S-T2$ 。如果数组元素 $e_i \geq 0$ ，则 $T1=T2$ ；如果 $e_i < 0$ ，则将 e_i 按冗余量比例分配到其他链路。设源节点与目的节点最远的间隔数为 m ，则物资传递 m 次后结束，此时数组 $T1$ 最后一个元素即为传递到目的节点的总流量，否则返回步骤 5。

3 节点重要度

当节点发生同样程度故障时，如果节点重要度高，则系统可能处于健康度较低的运行状态，反之如果节点重要度较低，则系统的健康度受影响程度较低，运行状态相对安全。所以，节点重要度可以作为影响系统健康度的重要指标。

如果节点 i 发生故障降级，则节点的输出链路流量减少，进而影响网络系统的总容量。因此，可以用定义 2 计算各节点对网络的影响能力。

定义 2 网络节点 i 的重要度表示为

$$S_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{R(u=1) - R(u_i = \mu_j)}{R(u=1)} \quad (5)$$

其中， u_i 是节点 i 的工作状态，节点 i 的降级状态有 m_i 种，取值 μ_j ，范围 $0 \sim 1$ ， $u_i=1$ 表示节点正常， $u_i=0$ 表示节点性能完全损失。 $R(u=1)$ 是各节点正常工作时系统的健康度。类似地， $R(u_i=0.1)$ 表示节点 i 性能损失 90% 时系统的健康度。由式(5)计算得 S_i ，值大代表重要度高。

假设节点 i 受扰动或发生故障，用定义 2 按如下步骤计算网络各节点重要度 S_i 。

步骤 1 初始化载入网络系统节点的标称数

据，计算各节点正常情况下系统健康度 $R(u=1)$ ，令 $i=1$ 。

步骤 2 令 $j=1$ ，设节点 i 发生故障后的性能降级参数，计算系统健康度。

a. 根据故障造成的节点性能降级分布，确定本次故障造成的节点性能降级。

b. 计算本次扰动造成的系统健康度 $R(u_i = \mu_j)$ 。

c. $j=j+1$ ，返回步骤 a，直到 $j=m_j$ 。

步骤 3 根据式(4)计算节点 i 对应的节点重要度值 S_i ， $i=i+1$ ，返回步骤 2，直到 $i=n$ 。

采用步骤 1 至步骤 3 得到 S_i ，进行降序排序， S_i 值大的节点，表明该节点性能降级对系统健康度影响大，以此可以确定关键节点。

4 仿真案例

本仿真案例采用文献[12]构建的网络，仿真网络结构如图 1 所示。该网络有 20 个节点，30 条链路。其中，节点 1 为源节点，节点 20 为目的节点。各链路标注的括号内为链路的序号和正常时最大容量 C_{ni} 。

采用数值仿真方式，仿真不考虑人工维修恢复场景，只考虑节点故障时系统健康度的固定变化。节点的健康度采用单一参数的简单系统定义，用输出链路的容量作为节点的容量参数。由此得到各节点正常情况下的设计容量，如表 1 所示。

假设节点故障下性能降级的概率服从区间(0,1)上的均匀分布，在第 2 节网络容量算法中，由故障造成的节点性能降级分布反映在该节点的输出链路上。对该网络中的每个节点逐级下降，采用第 3 节所述算法步骤求取每个节点的系统健康度的平均值。节点在不同故障降级时网络健康度变化如图 2 所示。

图 2(a)表示节点 i 发生不同等级故障时网络容量比正常情况降低值。图 2(b)表示节点 i 受到不同等级故障情况下的网络健康度值。节点按同等比例降级时，对系统影响大的节点为节点 19 和节点 17。而节点 8、节点 10、节点 12 和节点 15，即使 100% 损伤，也不影响系统总容量，可知其冗余度较高。

计算各节点重要度，并对结果进行排序，节点仿真情况如表 2 所示。

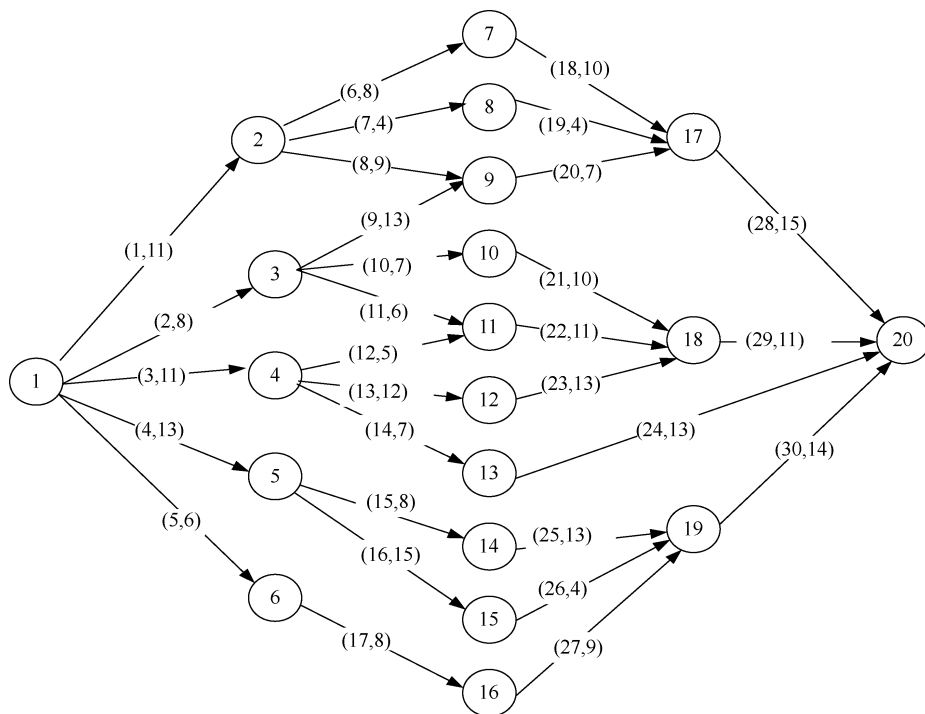


图1 仿真网络结构

表1 中间节点的容量参数

节点	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
容量	11	8	11	13	11	8	4	22	7	11	12	7	8	15	8	21	34	26

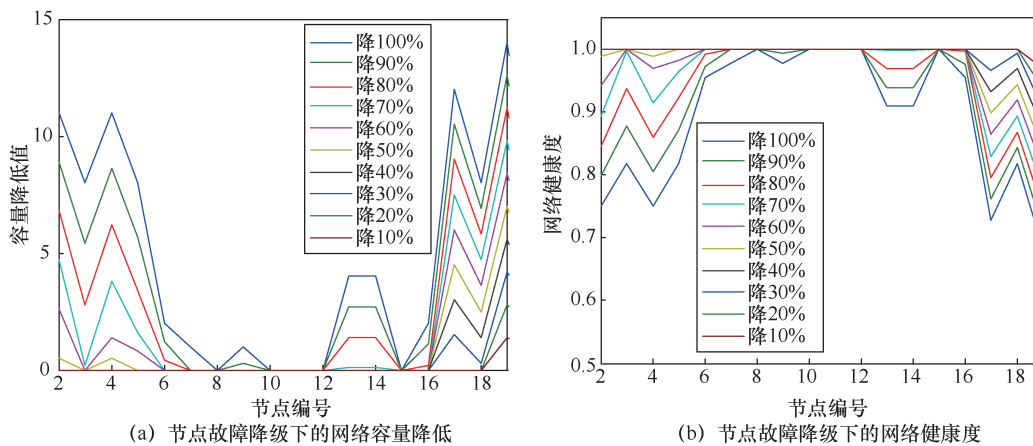


图2 节点不同故障降级时网络健康度变化

对比算法采用了文献[16]的算法，文献[16]基于系统弹性分析了链路的重要度。为了对比，将其改成对节点分析，即节点的所有输出链路降级。其次，该算法计算某一节点故障时，其他节点遭遇随机干扰发生不同程度性能降级，计算系统健康度下降，以蒙特卡洛法下的平均值作为节点的重要度。

由于本文算法只分析节点 i 自身故障降级情

况，不考虑同时发生其他节点故障，所以分析步骤更简洁，计算更快速。结果对比如表 2 所示，节点 19、节点 17、节点 2、节点 18 和节点 4 为重要度前 5 的节点，节点 8、节点 10、节点 11、节点 12 和节点 15 这 5 个节点重要度低，效果接近。

从图 2 和表 2 可见，重要度前 5 的节点对系统性能影响显著，如果需要提升系统抗故障和干扰能

力, 首先应该提高这些节点的输出链路容量。同时, 可以看出来, 重要度最低的 5 个节点, 甚至其中某个节点遭受 100% 的损伤也不影响网络容量。总之, 结果表明节点重要度与节点的容量以及与周边节点连接的关系相关, 节点重要度较全面地反映了节点的特性, 有利于找出维护和增强系统的关键节点。

表 2 节点仿真情况

序号	节点	节点重要度	100%损伤时节点排序	100%损伤时系统健康度	对比算法重要度排序*
1	19	0.175	19	0.682	17
2	17	0.123	17	0.727	4
3	2	0.078	2	0.75	19
4	18	0.075	4	0.75	2
5	4	0.072	18	0.818	18
6	5	0.044	5	0.818	5
7	3	0.037	3	0.818	13
8	13	0.019	13	0.909	3
9	14	0.019	14	0.909	7
10	6	0.008	6	0.955	14
11	16	0.007	16	0.955	9
12	9	0.003	9	0.977	6
13	7	0.002	7	0.977	16
14	12	0	12	1	12
15	11	0	11	1	11
16	10	0	10	1	10
17	8	0	8	1	8
18	15	0	15	1	15

5 结束语

现代工业系统的大型化、网络化对于系统的稳定性越来越重视, 而网络节点故障发生的常态化和扩散化, 对网络系统的平稳运行造成困扰。确定网络系统的关键节点, 对提高网络维护效果、增强系统可靠性具有重要意义。本文分析网络节点与系统健康度之间的关系, 采用邻接矩阵计算节点在正常和故障降级情况下的网络容量, 得到了节点重要度评估方法。案例仿真结果表明, 邻接矩阵方式能贴切地反映网络拓扑结构, 计算得到重要度排序。本文提出的方法不必进行蒙特卡洛法下的大量计算, 能够快速有效地确定系统中的关键节点, 以便后期通过强化关键节点提升系统整体可靠性。

参考文献:

- [1] 姜斌, 冒泽慧, 杨浩, 等. 控制系统的故障诊断与故障调节[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
JIANG B, MAO Z H, YANG H, et al. Fault diagnosis and fault accommodation for control systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [2] 谭琪, 张凤荔, 王婷, 等. 融入结构度中心性的社交网络用户影响力评估算法[J]. 计算机科学, 2021, 48(7): 124-129.
TAN Q, ZHANG F L, WANG T, et al. Social network user influence evaluation algorithm integrating structure centrality[J]. Computer Science, 2021, 48(7): 124-129.
- [3] 罗浩, 闫光辉, 张萌, 等. 融合多元信息的多关系社交网络节点重要性研究[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(5): 954-970.
LUO H, YAN G H, ZHANG M, et al. Research on node importance fused multi-information for multi-relational social networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(5): 954-970.
- [4] KUMAR R S, BALAKRISHNAN K. Betweenness centrality in Cartesian product of graphs[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2017, 63: 287-294.
- [5] 卢鹏丽, 于洲. 基于度与 H 指数扩展的复杂网络节点排序方法[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(5): 100-106.
LU P L, YU Z. A method for sorting nodes in complex networks based on degree and H index expansion[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(5): 100-106.
- [6] 谭阳红, 张婧, 李肖. 基于复杂网络理论的电网节点重要度评估[J]. 计算机工程, 2019, 45(11): 281-286, 297.
TAN Y H, ZHANG J, LI X. Importance evaluation of power grid nodes based on complex network theory[J]. Computer Engineering, 2019, 45(11): 281-286, 297.
- [7] 王梓行, 姜大立. 基于可靠性的军事供应链网络节点重要度评估研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(2): 59-65.
WANG Z H, JIANG D L. Research on reliability evaluation of military supply chain network nodes[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2020, 34(2): 59-65.
- [8] 梁耀洲, 郭强, 殷冉冉, 等. 基于排名聚合的时序网络节点重要性研究[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(4): 519-523.
LIANG Y Z, GUO Q, YIN R R, et al. Node importance identification for temporal network based on ranking aggregation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(4): 519-523.
- [9] 胡钢, 高浩, 徐翔, 等. 基于重要度传输矩阵的复杂网络节点重要性辨识方法[J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2402-2408.
HU G, GAO H, XU X, et al. Importance identification method of complex network nodes based on importance transfer matrix[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(12): 2402-2408.
- [10] 张如佩, 姜斌, 刘剑慰. 基于符号有向图的故障样本选取方法[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 57-61.
ZHANG R P, JIANG B, LIU J W. A fault sample selection method based on signed directed graphs[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(1): 57-61.

- [11] 王立夫, 赵云康, 段乐, 等. 割点失效对复杂网络可控性的影响[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2310-2316.
WANG L F, ZHAO Y K, DUAN L, et al. Effect of cut vertex-removal on controllability of complex networks[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2310-2316.
- [12] BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E, ROCCO C M. Resilience-based network component importance measures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117: 89-97.
- [13] XU Z P, RAMIREZ-MARQUEZ J E, LIU Y, et al. A new resilience-based component importance measure for multi-state networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106591.
- [14] 缪巍巍, 吴海洋, 施健, 等. 通信蓄电池健康度综合评价方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(4): 980-985.
MIAO W W, WU H Y, SHI J, et al. Research on comprehensive evaluation method of communication battery health[J]. Computer & Digital Engineering, 2020, 48(4): 980-985.
- [15] 朱昶文, 党建成, 张明良, 等. 基于逻辑框图的卫星健康评估方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 267-273.
ZHU C W, DANG J C, ZHANG M L, et al. Satellite health assessment method based on logic block diagram[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(2): 267-273.
- [16] 李瑞莹, 杜时佳, 康锐. 复杂系统弹性建模与评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
LI RUI Y, DU S J, KANG R. Flexible modeling and evaluation of complex systems[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

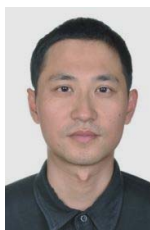
[作者简介]



刘剑慰 (1977-), 男, 南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为网络控制系统故障检测与容错控制。



姜斌 (1966-), 男, 南京航空航天大学教授, 主要研究方向为控制系统故障诊断与容错控制及其飞控和高铁应用。



杨蒲 (1977-), 男, 南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为多机编队故障检测与容错控制。