

基于复杂网络视角的导航台设备网络鲁棒性分析

李朋¹, 韩松臣¹, 余丽莎¹, 朱新平^{1,2}, 全嘉钰¹

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065;

2. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:针对导航台设备网络频繁遭受突发事件影响的情况,构建以空管技术保障系统中导航设备覆盖的航路结构为基础的网络模型,提出一套完备的鲁棒性研究指标集,包括设备网络的节点保障效率、网络效率、最大连通子集规模、单一节点鲁棒性评估值等,从网络功能和结构两个角度对导航台设备网络进行鲁棒性分析。选取中国航空发展典型地区-西南地区为论证对象,得到:飞行流量的控制可以保障导航台节点的负载控制在极限负载内,提高导航台设备网络的鲁棒性;导航台设备网络对随机攻击鲁棒性最高,网络是无标度网络;攻击数目在5~13个导航台节点时,节点介数攻击导致网络效率降低最快,对网络连通性破坏最大。融合相邻导航台节点贡献作用的导航台节点鲁棒性评估值近似服从幂律分布。

关键词:复杂网络;导航台设备网络;鲁棒性;贡献矩阵;负载

中图分类号:N949

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)12-0127-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.12.027

Robustness Analysis of Navigation Station Equipment Network Based on Complex Network

LI Peng¹, HAN Song-chen¹, YU Li-sha¹, ZHU Xin-ping^{1,2}, QUAN Jia-yu¹

(1. School of Space Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: For navigation station equipment network frequently suffered the impact of emergency, we construct a network model based on air route structure of navigation equipment coverage in the technical support system, and put forward a set of complete indexes including equipment network node guarantee efficiency, network efficiency, the maximum connected subset scale, single node robustness evaluation value. The robustness of the network is analyzed from network function and structure. The Southwest of China, the typical area of Chinese aviation development, is taken as the object of demonstration. The results show that the control of flight flow can ensure the control of the working load of nodes in the limit load and improve the robustness of the navigation station equipment. The network of navigation station equipment is the most robust to random attack. When the number of attacks is between 5 to 13 navigation station nodes, the nodal number attack leads to the fastest reduction of network efficiency and the greatest damage to network connectivity. The estimated values of the robustness of the adjacent navigators are approximately subject to the power-law distribution.

Key words: complex network; navigation station equipment; robustness; contribution matrix; load

0 引言

民航导航设备主要用于引导航空器的起飞、巡航、着陆,并为飞机提供航向距离等定位信息,是支撑国内空中交通管理的重要设施。近年来,随着飞行流量以及导航设备网络化程度的提高,同时导航设备遭受着不同程度的自然灾害、人为破坏,导航设备服务连续性严重受阻,鲁棒性也经受考验。

当前研究复杂网络鲁棒性^[1]多侧重于电力系

统^[2-3]、交通运输^[4-5]、计算机^[6-7]等领域,复杂网络理论是分析空管设备鲁棒性、使其保障航路持续运行的有效方法,但这一领域相关研究甚少。其中,武喜萍等^[8]采用度优先的攻击策略分析了空管技术保障系统的抗毁性。此外一些关于机场网络和航空网络的鲁棒性和业务持续性研究可供借鉴。在航空运输网络中, Lordan 等^[9]提出了一种基于介数的关键机场的自适应检测方法。张超等^[10]引入了一种不完全信息条件

收稿日期:2018-01-14

修回日期:2018-05-24

网络出版时间:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金(71573184)

作者简介:李朋(1993-),男,硕士研究生,研究方向为复杂网络;韩松臣,教授,研究方向为空中交通管理、复杂网络。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180703.1511.040.html>

下的复杂网络攻击模型,分析了航空通信网络的鲁棒性。Li 等^[11]通过模糊重要性评价方法对美国和中国重要机场网络的脆弱性做了详尽的对比分析。Jarrah 等^[12]对航空公司在应急状态并暂时短缺飞机的情形,对实施机队扰动的管理进行研究,以提高公司业务鲁棒性。Arguello 等^[13]针对飞机短缺情况下的航班计划恢复进行研究,并针对飞机路径重构问题提出一种贪婪随机自适应算法。

在上述研究基础上,文中构建了以空管技术保障系统中导航设备覆盖的航路结构为基础的网络模型,从网络功能和结构两个角度对导航台设备网络进行鲁棒性分析。

1 导航台设备网络模型

导航台设备网络用 $G = (F, E, A)$ 表示,其中 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示节点集合, n 为导航台节点数; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示边集合, m 为导航台节点之间的航路数; $A_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \delta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$ 为邻接矩阵,表示节点之间关系。 $\delta_{ij} = 1$ 或 0 分别表示节点间有无存在航路。

2 导航台设备网络统计特征指标集

(1) 节点度值 K : 节点 f_i 的度值 $K_i, i \in n$ 表示与该节点连接的边数,反映该导航台节点在网络中的地位。

(2) 节点介数 B : 两个不相邻节点 f_j, f_i 之间的最短路径,如果经过节点 f_i ,而节点 f_i 被很多最短路径经过,则节点 f_i 在网络中很重要,节点重要性由节点介数来表征,高介数的导航台节点说明该节点的网络地位突出。

$$B_i = \sum_{\substack{1 \leq j < l \leq n \\ j \neq i, l \neq i}} \frac{n_{jl}(i)}{n_{jl}} \quad (1)$$

其中, n_{jl} 为节点 f_j, f_i 之间的最短路径数目; $n_{jl}(i)$ 为节点 f_j, f_i 之间最短路径经过节点 f_i 的数目。

(3) 网络效率 E : 网络中所有节点对之间距离倒数之和的平均值。

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

其中, d_{ij} 为连接节点 f_j, f_i 的最短路径上的边数,表现网络所有节点对之间的平均接近程度。节点对之间越近、距离越短,网络效率越高。

(4) 节点效率 I_i : 描述为该节点与其他网络节点之间距离倒数之和的平均值,体现导航台节点对网络飞行流量的控制力,定义为:

$$I_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

节点的效率值越大,节点在网络流量传输过程中所处的位置越重要,且遭到不同攻击模式时导致网络鲁棒性降低的可能性也越大。

(5) 最大连通子集的规模 U 。

$$U = \frac{n'}{n} \quad (4)$$

其中, n' 和 n 分别表示最大连通分支节点数、网络总节点数; U 属于网络连通鲁棒性的度量指标。

3 从功能角度分析网络鲁棒性

在空管技术保障系统中,节点效率能够反映节点所承受的负载^[14]。导航台节点效率值越大,该节点到达其他节点的最短路径越小,该导航台节点网络介数值就越大,节点承受的负载也就越大。可用节点效率来表达节点负载:

$$L_i = e^{\tau I_i} \quad (5)$$

其中, τ 表示节点效率与节点负载之间的一个关系量,且 $\tau > 1$ 。

目前导航设备主要为甚高频全向信标台 (very high frequency OMNI-directional range, VOR)。由于导航台设备的工作频率、使用精度等因素的影响,为确保飞行安全,飞机之间需保持一定的飞行间隔,导航台节点的负载饱和度 C_0 的大小由飞机最小间隔决定:

$$C_0 = \eta \cdot \max(L_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中, $\eta \geq 1$ 为饱和参数,表示飞机最小间隔的量化值。

如果导航台节点导航的飞行架次超过了 C_0 ,多余的飞机机会被流量控制。假定每个节点的负载饱和度和值相同,随着现今飞行架次逐渐增加,导航台节点工作频率只有有限的信道数。为了最大化利用导航台节点,在设备可接受范围内加入一定量的流量控制,该上限负载定义为极限负载。

针对导航台节点的负载情况,可定义极限负载、可容忍负载、理想负载:

(1) 极限负载: $L_i \geq \alpha C_0$, 飞行流量超出导航台节点的可控范围;

(2) 可容忍负载: $C_0 \leq L_i \leq \alpha C_0$, 导航台节点负载已经饱和,濒临崩溃;

(3) 理想负载: $L_i \leq C_0$, 导航台节点正常且稳定运行。

其中, α 表示导航台节点的容忍度,依据导航台节点 f_i 的负载值,进行飞行流量控制。导航台节点 f_i 存在一定的保障概率 P_i , 定义如下:

$$P_i = \begin{cases} 0, L_i \geq \alpha C_0 \\ \frac{\alpha C_0 - e^{\tau I_i}}{C_0(\alpha - 1)}, C_0 \leq L_i \leq \alpha C_0 \\ 1, L_i \leq C_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $P_i = 0$ 表示导航台节点负载超过极限负载, 导航台彻底失效; $P_i = 1$ 表示导航台节点负载小于等于负载饱和度, 为理想负载, 导航台设备网络中不存在飞行流量控制。当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, 说明导航台节点负载量偏大, 极可能突破额定负载, 引起系统瘫痪; 当 $\eta \rightarrow \infty$ 时, 导航台节点具备足够资源维持航路流量; 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 说明过载导航台节点失效不完全依赖节点负载, 而是以服从某种概率分布维持正常航路流量保障。

4 从结构角度分析网络鲁棒性

导航台设备网络结构整体的鲁棒性, 主要考察导航台节点发生故障或受到攻击的情况。

4.1 不同攻击模式下的网络鲁棒性

静态分析法^[15]可用于研究空管技术保障系统中的设备攻击策略和设备移除比例对网络结构和功能的影响。采用以下3种攻击策略分析导航台设备网络。

(1) 随机节点攻击: 每次随机攻击一个导航台节点;

(2) 节点度数攻击: 每次攻击网络中度值最大导航台节点;

(3) 节点介数攻击: 每次移除介数最大的导航台节点。

其中, 随机节点攻击属于随机攻击, 节点度数攻击和节点介数攻击属于蓄意攻击。

4.2 单一导航台节点鲁棒性

在导航台设备网络中, 某个导航台节点损坏, 则由该节点保障的飞机航线发生改变, 在整个导航台设备网络的负载也重新分配, 故障导航台节点的负载分配给临近的导航台节点。如果临近导航台节点可以承受所分配的负载, 导航台设备网络正常运行, 如果超过临近导航台节点的极限负载使临近节点出现进一步流量控制, 从而产生级联失效现象。因此节点的鲁棒性还与临近节点的贡献作用有关。

邻接矩阵 $A_{n \times n}$ 可以反映相邻导航台节点间的物理结构关系, 对于相邻导航台节点之间鲁棒性贡献关系, 文中建立了融合节点度值的邻接矩阵的映射矩阵。导航台节点间的鲁棒性贡献关系为:

$$Q_e = \begin{bmatrix} 1 & \delta_{12}K_2/(\bar{K})^2 & \cdots & \delta_{1n}K_n/(\bar{K})^2 \\ \delta_{21}K_1/(\bar{K})^2 & 1 & \cdots & \delta_{2n}K_n/(\bar{K})^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}K_1/(\bar{K})^2 & \delta_{n2}K_2/(\bar{K})^2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, n 为节点数目; K_i 为导航台节点 i 的度值 δ_{ij} 为邻接矩阵中两个导航台节点是否存在航路的关系

值, 存在取1 否则取0; \bar{K} 为网络的平均度值。 $K_i/(\bar{K})^2$ 表示由度值表征的导航台节点的度值平均贡献给相邻导航台节点。

在空管技术保障系统中, 某导航台节点损坏迫使航路上的飞机改航、备降, 在机型等客观限制因素下, 飞机需选择条件适宜的邻近节点继续保障飞行任务。用节点效率对式8进行优化。

优化1:

$$Q_r =$$

$$\begin{bmatrix} I_1 & \delta_{12}K_2I_2/(\bar{K})^2 & \cdots & \delta_{1n}K_nI_n/(\bar{K})^2 \\ \delta_{21}K_1I_1/(\bar{K})^2 & I_2 & \cdots & \delta_{2n}K_nI_n/(\bar{K})^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}K_1I_1/(\bar{K})^2 & \delta_{n2}K_2I_2/(\bar{K})^2 & \cdots & I_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

从式9 可看出, 导航台节点度值是平均贡献给临近导航台节点, 在空管技术保障系统中, 损坏导航台节点的相邻节点的节点效率不同, 在网络中的地位也存在差异。失效导航台节点将度表征的负载分配给邻近导航台节点时必然有一定的比例。相邻导航台节点的效率越高, 在网络中的连通性就越好, 相邻导航台节点到其他导航台节点的最短路径就越短。所以, 损坏导航台节点的贡献度值更可能分配给节点效率值较高的邻近导航台节点, 而度表征的负载分配的比例由临近节点的节点效率值决定。

优化2:

$$Q_r = \begin{bmatrix} I_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & I_n \end{bmatrix} \times Q_e \quad (10)$$

即:

$$Q_r =$$

$$\begin{bmatrix} I_1^2 & \delta_{12}K_2I_2I_1/(\bar{K})^2 & \cdots & \delta_{1n}K_nI_nI_1/(\bar{K})^2 \\ \delta_{21}K_1I_1I_2/(\bar{K})^2 & I_2^2 & \cdots & \delta_{2n}K_nI_nI_2/(\bar{K})^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}K_1I_1I_n/(\bar{K})^2 & \delta_{n2}K_2I_2I_n/(\bar{K})^2 & \cdots & I_n^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

所以导航台节点 f_i 的邻近导航台节点鲁棒性的贡献值为:

$$C_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \delta_{ij}K_jI_j \quad (12)$$

在导航台设备网络中, 导航台节点的鲁棒性包含: 导航台节点本身的全局重要性 I_i 和临近导航台节点鲁棒性的贡献值 C_i 。综合两者, 导航台节点 f_i 鲁棒性评估模型可定义为:

下降幅度超过68%,说明导航台网络对于随机攻击具有很好的鲁棒性,导航台网络是无标度网络。

(2)当攻击数目在5~13个导航台节点时,节点介数攻击导致 E 变化最为迅速。说明节点度数攻击的效果要介于节点介数攻击和随机攻击之间。

(3)在导航台节点移除过程中,蓄意度数攻击13~16个导航台节点, U 没有变化, E 却一直减少。说明导航台设备网络的鲁棒性不仅仅依赖于整体拓扑结构。

西南地区共56个导航台节点,任意选取2个导航台节点 $C_{i_0}^2$,进行节点距离计算。选取一个航段为2个单位距离进行统计,以此推出导航台设备网络中每对导航台的最短距离 d_{ij} 。将带 d_{ij} 入式3,并通过度值确定导航台节点的临近贡献值。

由图1得到网络节点度的平均值 $\bar{K}=3.71$,综合求得各导航台节点鲁棒性评估值 W_i ,以 I_i 为 x 坐标值、 C_i 为 y 坐标值、 W_i 为 z 坐标值,绘制三维散点图,并将离散点拟合成连续三维曲面,如图5所示。

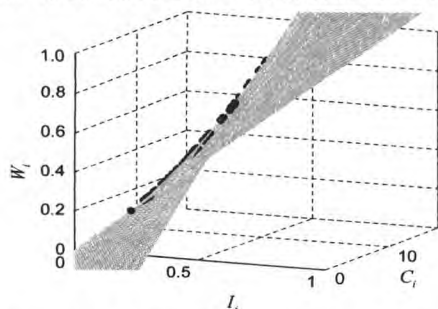


图5 基于网络结构的导航台节点鲁棒性

从图5可看出,评估值 W_i 近似满足幂律分布,极少导航台节点处于模型顶端,导航台节点 f_1 的 W_i 值最大为0.853,导航台节点 f_4, f_{42} 为0.82,这些导航台节点维系着导航台网络的命脉;大部分导航台节点评估值分布在0.1~0.4之间,连通性很差,导航台节点冗余,需要新增航路来最大化利用导航台设备。

6 结束语

通过复杂网络理论,构建了导航台设备网络模型,对设备网络的鲁棒性进行评估。从拓扑网络功能角度看,当导航台设备网络结构确定,飞行流量的控制可以保障导航台节点的工作负荷控制在极限负载内,从而提高导航台设备网络鲁棒性。从拓扑网络整体结构角度看,导航台设备网络对随机攻击鲁棒性最强,网络是无标度网络;攻击数目在5~13个导航台节点时,节点介数攻击导致网络效率指标变化最为迅速,同时对网络连通性破坏最大,目标地区网络不够发达。从拓扑网络局部结构角度看,利用节点效率概念,加入临近导航台节点贡献度指标,构建的单一导航台节点鲁棒性

评估值近似服从幂律分布,大部分导航台节点值在0.1~0.4之间,分布不合理导致设备存在冗余。通过评估值适当削弱关键导航台节点的主导作用、均衡网络航路负载的分布,以提高整个导航台设备网络的可靠性和业务可持续性。

参考文献:

- [1] 毛 凯. 复杂网络结构的稳定性与鲁棒性研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 85-88.
- [2] DU W, WANG H F, CAO J, et al. Robustness of an energy storage system-based stabiliser to suppress inter-area oscillations in a multi-machine power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(4): 339-351.
- [3] WANG Zhuoyang, CHEN Guo, HILL D J, et al. A power flow based model for the analysis of vulnerability in power networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 460: 105-115.
- [4] 惠 伟, 王 红. 复杂网络在城市公交网络中的实证分析[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(11): 217-219.
- [5] KIM S, YEO H. A flow-based vulnerability measure for the resilience of urban road network[J]. Social and Behavioral Sciences, 2016, 218: 13-23.
- [6] 乔少杰, 郭 俊, 韩 楠, 等. 大规模复杂网络社区并行发现算法[J]. 计算机学报, 2017, 40(3): 687-700.
- [7] PIEN K, HAN Ke, SHANG Wenlong, et al. Robustness analysis of the European air traffic network[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(9): 772-792.
- [8] 武喜萍, 杨红雨, 韩松臣. 基于复杂网络理论的多元混合空管技术保障系统网络特征分析[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 140203.
- [9] LORDAN O, SALLAN J M, SIMO P, et al. Robustness of the air transport network[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 68: 155-163.
- [10] 张 超, 张凤鸣, 王 瑛, 等. 基于复杂网络视角的航空通信网络鲁棒性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(1): 180-184.
- [11] LI Shanmei, XU Xiaohao. Vulnerability analysis for airport networks based on fuzzy soft set: from the structural and functional perspective[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3): 780-788.
- [12] JARRAH A I Z, YU Gang, RISHNAMURTHY N K, et al. A decision support framework for airline flight cancellation and delays[J]. Transportation Science, 1993, 27(3): 266-280.
- [13] ARGUELLO M, BARD J, YU Gang. A GRASP for aircraft routing in response to grounding and delays[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 1997, 1(3): 211-228.
- [14] 周 璇, 张凤鸣, 周卫平, 等. 利用节点效率评估复杂网络功能鲁棒性[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 1-7.
- [15] 王 凯. 基于复杂网络理论的电网结构复杂性和脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.