

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.004

基于 PCNC 的航路网络拓扑结构鲁棒性优化

王世锦 苏思雨 李海云 王艳军

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

摘要: 空中交通量的持续增长,使得航路网络拓扑结构的脆弱性日益凸显,其鲁棒性优化愈发重要。本文运用复杂网络理论,分析航路网络拓扑结构,提出了优先配置关键节点保护连边(Prefrential configuration node-protecting cycle, PCNC)的方法,该方法基于度值适应度技术,探测出自身及邻居节点度值都大的关键节点,增加连边,配置节点保护环,优化航路网络拓扑结构鲁棒性。以中国大陆地区的航路网络为例,选取其中 1 017 个航路点和 1 568 条航段,探测得到 101 个关键节点,共配置 56 条新增连边。结合随机攻击和基于节点度的蓄意攻击,验证得到优化后航路网络拓扑结构对于两种攻击方式的鲁棒性都得到明显增强,且在蓄意攻击下的网络鲁棒性改善效果更好。

关键词: 航路网络;拓扑结构;鲁棒性;关键节点探测;节点保护环

中图分类号: V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0756-07

Robustness Optimization of Air Route Network Topology Based on PCNC

WANG Shijin, SU Siyu, LI Haiyun, WANG Yanjun

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: With the continuous increase of air traffic volume, the vulnerability of the air route network topology has become increasingly prominent, and its robustness optimization has become increasingly important. This paper proposes a method called preferential configuration node-protecting cycle (PCNC) that uses complex network theory to analyze the topology structure of air route network. Based on degree fitness technology, it detects key nodes with large degree values of itself and neighbor nodes, increases links, configures node protection rings, and optimizes air route network topology robustness. Taking the air route network in the mainland of China as an example, 1 017 waypoints and 1 568 segments were selected; 101 key nodes were detected; and 56 new edges were configured. Combined with random attacks and attempted attacks based on node degrees, robustness of the air route network topology for both attack modes is significantly enhanced after optimized, and the robustness of the ARN topology under deliberate attacks is better.

Key words: air route network; topology structure; robustness; key node detection; node protection cycle

民航空中交通量持续增长,使得承载交通流的航路网络(Air route network, ARN)拓扑结构缺陷日益凸显,航路拥堵、飞机延误、旅客大面积滞留等一系列问题频繁发生,尤其是对恶劣天气、军事演习等不可预见的突发情况更是缺乏“抵抗力”。针

对上述问题,本文从 ARN 拓扑结构角度出发,优化 ARN 的鲁棒性,以构建健壮的 ARN,保障空中交通的顺畅运行^[1]。

目前,国内外学者对于 ARN 的研究主要集中在两个方面:ARN 拓扑结构和 ARN 优化。关于

收稿日期: 2018-05-18; **修订日期:** 2019-04-02

通信作者: 王世锦,女,讲师,硕士生导师, E-mail: shijin_wang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 王世锦,苏思雨,李海云,等. 基于 PCNC 的航路网络拓扑结构鲁棒性优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 756-762. WANG Shijin, SU Siyu, LI Haiyun, et al. Robustness Optimization of Air Route Network Topology Based on PCNC[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 756-762.

ARN 拓扑结构的研究,2012 年,Cai 等^[2]在复杂网络的框架下研究了中国 ARN 的拓扑结构,发现中国 ARN 是一个具有指数度分布,低聚类系数,较大最短路径长度的地理网络,且拓扑结构是均质的。2014 年,Sun^[3]提出了一种评估 58 个国家 ARN 拓扑结构相似性的新方法,通过回归分析确定网络指标之间的功能依赖性,得出了各个国家 ARN 拓扑结构之间的相似性;2018 年,王莉莉等^[4]基于复杂非线性网络对中国 ARN 结构进行了分析,包含节点承载性、紧密性、闭合性和连通性 4 个方面,直观反映了 ARN 结构的整体特性。在 ARN 优化方面,2011 年,Zhou 等^[5]建立多目标优化模型改变航路网络中的交叉节点的布局,并提出一个综合学习多目标粒子群优化器,减少了航路运行成本和航空器飞行冲突。2014 年,戴福青等^[6]针对民航运输的特点,应用改进的引力模型构建国内主干 ARN 系统,并根据国内的城市地理分布对 ARN 结构进行优化调整。2017 年,Wang 等^[7]考虑空域限制条件,通过栅格法规划空间建模,结合元胞自动机理论求解,实现了空域限制条件下“三区”规避的 ARN 优化。

然而,目前针对 ARN 拓扑结构鲁棒性优化问题的研究却较少,仅有 2016 年康金霞等^[8]将复杂网络理论与交通动力学相结合,验证了不同攻击策略下 ARN 拓扑结构的抗毁性。但该研究并没有给出有效增强 ARN 拓扑结构鲁棒性的方法。鲁棒性优化问题本质上是连边添加问题,其增加连边的方法主要有随机选择节点连接(Rand)^[9]、优先连接度值最低节点(LDP)^[10]、随机选择与优先度值最低节点连接(RLP)^[11]以及随机选择与优先度值最大节点连接(RHP)^[12],但这 4 种方法并不适合直接应用于航路拓扑结构鲁棒性的优化。

因此,本文在综合分析 ARN 拓扑结构和 ARN 优化的研究后,比较上述 4 种增强网络鲁棒性方法的优劣,并且考虑网络拓扑结构的鲁棒性和传输效率,提出了一种优先配置关键节点保护连边的方法(Preferential configuration node-protecting cycle, PCNC)以同时增强 ARN 对随机攻击和蓄意攻击的鲁棒性。并选取中国大陆地区的 ARN 为实例,对比优化前后的 ARN 拓扑结构数据和鲁棒性,验证该方法的可行性。

1 ARN 拓扑结构优化

ARN 属于复杂网络^[13-14]。不同构型的复杂网络有着不同的网络鲁棒性和网络效率。星状结构的复杂网络平均最短路径小,网络效率高,但当中心节点受到蓄意攻击时,网络呈现碎片化,鲁棒性

极差,然而除中心节点外的其他节点随机失效时,网络具有较好的鲁棒性。相反,环形结构的复杂网络对移除任意单一节点表现出很强的鲁棒性,但网络效率却比较低。

本文融合星状网络结构和环形网络结构,提出基于关键节点的 PCNC 连边增加方法,平衡网络效率与网络鲁棒性。

1.1 基于度值适应度的关键节点探测方法

基于图论,将 ARN 抽象为图 $G=(V, E, W)$,其中 V 是 ARN 中航路点的集合,共有 n 个航路点, $V_i \in V (i \leq n)$; E 是 ARN 中航段的集合, $E_{ij} \in E (i, j \leq n, \text{且 } i \neq j)$; W 是航段权重的集合, $W_{ij} \in W (i, j \leq n, \text{且 } i \neq j)$ 。文中 $E = E_1 \cup E_2$; E_1 为现有航段的集合, E_2 为新增航段的备选集合,节点 i 的适应度值 F_i 表达式为

$$F_i = \sum_{j \in \Gamma_i} k_j \times \frac{k_i}{\langle k \rangle} \quad (1)$$

式中: Γ_i 为节点 i 的邻居节点集合, k_i 为节点 i 的度值, $\langle k \rangle$ 是网络中所有节点的度的平均值。从定义可以看出, F_i 反映节点的重要程度,其值较大的节点不仅本身 k_i 较大,邻居节点的 k_j 也较大。尽管此类航路点的 k_i 并非是最大的,但重要性不亚于 k_i 最大的航路点。如图 1 所示,其中有 12 个节点以及节点之间相连的边,根据式 (1) 计算 F_i , F_i 与 k_i 对比如表 1 所示。

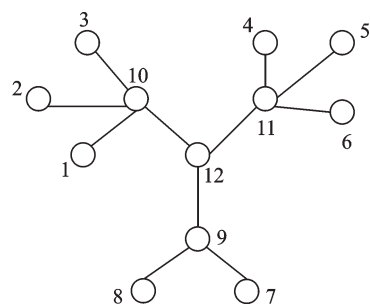


图 1 网络图示意

Fig.1 Network schematic diagram

表 1 F_i 与 k_i 对比

Tab.1 Comparison of F_i and node k_i

节点编号	F_i	k_i
1, 2, 3	2.181 8	1
4, 5, 6	2.181 8	1
7, 8	1.636 4	1
9	8.181 8	3
10, 11	13.090 9	4
12	18	3

在表 1 中,节点 12 的 k_i 不是很大,但却有最大的 F_i ,说明它的重要程度明显大于有相同 k_i 的节点

(如节点9)以及 k_i 大于它的节点(如节点10, 11)。

1.2 PCNC 连边保护方法

PCNC实质就是保护关键节点,为其构建保护环,优化关键节点对于蓄意攻击的鲁棒性,并保持航路网络对随机故障的鲁棒性。

1.2.1 相关定义

定义1 节点保护环(Node protection cycle, np-cycle) 将 x_i 这个环定义为节点 i 的np-cycle必须满足以下条件:(1) x_i 环包含节点 i ;(2)对于任意节点 i 的邻居节点对 (a, b) ,必须在节点对 (a, b) 之间至少存在一条不经过节点 i 的路径。

定义2 连边贡献度 此指标 C 是用来衡量np-cycle l 的保护能力,且 C 值越大连边 l 的利用率越高。给定的图 $G(V, E_1)$, E_1 为现有连边的集合, E_2 为待添加连边的集合, I_i 表示节点 i 的重要程度, $C(e)$ 定义为连边 e 的贡献指标,即连边 e 对于包含边 e 的np-cycle l 的贡献值

$$C(e) = \sum_{i \in V} I_i \cdot W(L_i^e) \quad (2)$$

式中: L_i^e 为节点 i 的np-cycle l 的集合, $W(L_i^e)$ 为节点 i 的np-cycle并且包含连边 e 的总权重和, $W(L_i^e)$ 可以表述为

$$W(L_i^e) = \sum_{l \in L_i^e} \sum_{e \in l} w_e \quad (3)$$

式中: w_e 是连边 e 的权重, $e \in l \in (E_1 \cup E_2)$ 。

1.2.2 算法设计

建立基于连边贡献度的PCNC启发式算法,其流程如图2所示。

Step 1 根据度值适应度计算网络中节点的 F_i ,判断是否遍历所有节点,若所有节点均已被遍历进入Step 2,否则继续计算节点的 F_i ,直至所有节点计算完毕。

Step 2 将 F_i 降序排序,选取 F_i 排名靠前的 V_i 作为被保护关键节点,形成关键节点集合 V' 。其中关键节点选取越多,保护连边数增加则越多,网络的鲁棒性越好,但是过多的保护连边会增加网络成本;若关键节点选取较少,得不到显著的网络鲁棒性优化效果。同时在目标节点中删去不能形成节点保护环的 k_i 为1的节点。

Step 3 搜索节点 v_i 的np-cycle集 L_i^e ,形成新增备选航段集合 E_2 。首先确定一个目标节点以及和它相连的节点,然后在目标节点的任意两个邻居节点中按照最小权重路径搜索的方法,在路径中加入目标节点和两个邻居的连边便形成np-cycle。权重计算公式如下

$$w_e = \begin{cases} 0 & e \in E_1 \\ \text{weight}(e) & e \in E_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{weight}(e)$ 表示边 e 的权重,它是边 e 的两个节

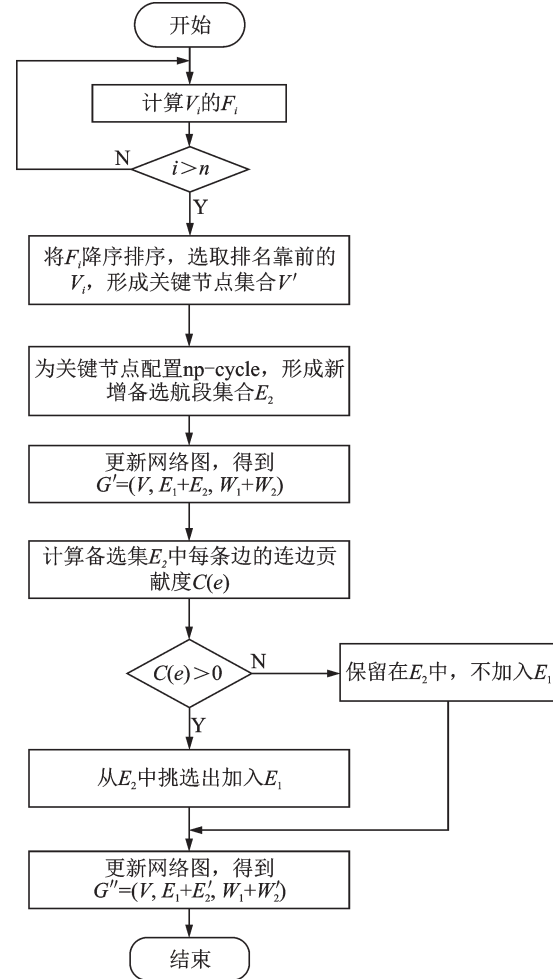


图2 PCNC算法流程图

Fig.2 PCNC algorithm flow chart

点平均度值的倒数。 $w_e(e \in E_1)$ 的值为0,这是为了在构成np-cycle时,按照最小权重路径搜索路径,这样已有连边能被优先选中从而提高已有连边的利用率。

Step 4 当所有被保护节点的保护环搜索完毕后,将保护环加入到网络中,更新网络图,得到 $G'=(V, E_1+E_2, W_1+W_2)$ 。

Step 5 计算 E_2 中每个备选连边 e 的 $C(e)$,因为在Step 3中每个目标节点的邻居节点众多,np-cycle不是唯一的,需要根据连边贡献指标对这些连边在备选集 E_2 中进行排序筛选。

Step 6 优先选择 $C(e)$ 大的连边加入到网络中来改善网络鲁棒性,本文中采用 $C(e) > 0$ 的筛选条件。 $C(e) > 0$ 的连边,从 E_2 中挑选出来加入 E_1 ; $C(e) \leq 0$ 的连边则保留在 E_2 中,不加入 E_1 ,最终挑选出所有符合条件的边集为 E_2' 。

Step 7 将筛选出的保护环集合 E_2' 加入网络中,并更新网络,得到最终优化后的网络图 $G''=(V, E_1+E_2', W_1+W_2')$ 。

2 案例仿真及分析

本文选取中国大陆地区的ARN为例。首先应用复杂网络理论对其拓扑结构进行分析,然后运用上述方法建立ARN关键节点的保护环,增强关键节点对于蓄意攻击的抵抗力,优化ARN拓扑结构的鲁棒性。其中ARN数据来源于《中国民用航空航行资料汇编》(NAIP),飞行流量取自2015年1月19日至2015年2月17日飞行计划数据。对ARN数据进行初步处理,去除无效信息,保留1 017个航路点,1 568条航段。图3给出了中国ARN拓扑结构图,表2给出了中国ARN的复杂网络基本参数。

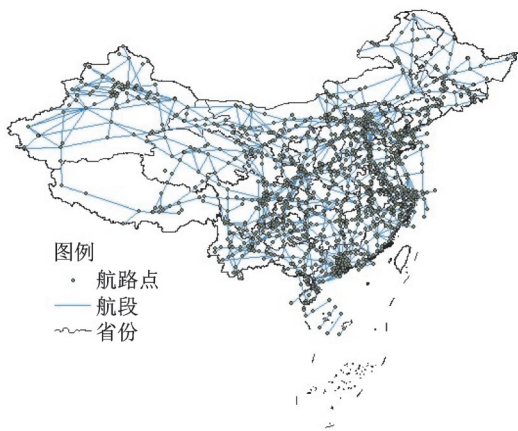


图3 中国大陆ARN拓扑结构图
Fig.3 Chinese mainland ARN topology diagram

表2 2015年中国ARN拓扑结构参数

Tab.2 Chinese ARN topology parameters in 2015

参数	数值
航路点个数	1 017
航段边数	1 568
平均度	3.09
平均路径长度	15.49
聚类系数	0.084
最长边/km	638.06
最短边/km	1.94

从表2中可以看出,2015年中国ARN的平均度值为3.09,相较单个最大度值而言,其平均度值很小;平均聚类系数等于0.084,考虑到本文使用的数据是经过处理与删减的,平均聚类系数的实际值会比0.084更高,这是符合网络演化机制的;平均路径长度是15.49,这表明平均需要经过15.49个航路点便可以任意从一个机场到达另一个机场,因此ARN拓扑结构在传输效率方面有很大的提升空间;从边的角度来看,最长的航段距离为638.06 km,最短的航段距离为1.94 km。

采用DF的方法计算所有节点的适应度值 F_i ,

$|V|=1 017$ 。基于ARN实际拓扑结构,考虑其鲁棒性优化效果及航路运行成本,取 F_i 排名前10%的 V_i ,即 $|F|=10\%|V|=101$ 。ARN中关键节点分布情况如图4所示。关键节点具体数据如表3所示,包括关键节点名称、节点适应度值 F_i 以及节点度值 k_i ,并按照 F_i 降序排序。

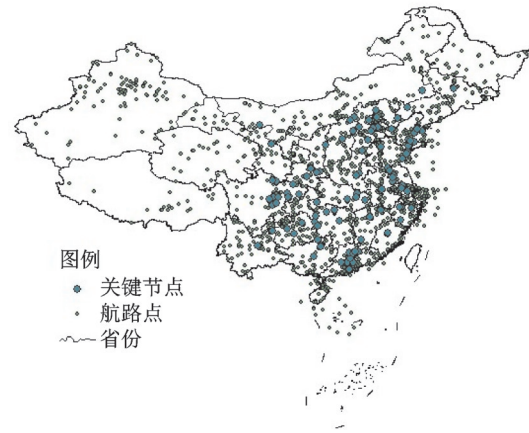


图4 关键节点分布
Fig.4 Distribution of key nodes

使用PCNC连边保护方法搜索保护环路径,遍历需要保护的关键节点,更新网络 $N(V, E_1 + E_2)$, E_1 为现有航段集合,计算航段备选集 E_2 中的每个连边的贡献度 C ,用来衡量连边对于保护环的贡献程度。对于 $C > 0$ 的连边,从 E_2 备选集中剔除,加入到ARN中,即加入到 E_1 集合中。由仿真结果得出的56条新增连边分布如图5所示,具体数据见表4,包含航段起始点名称,航段长度。

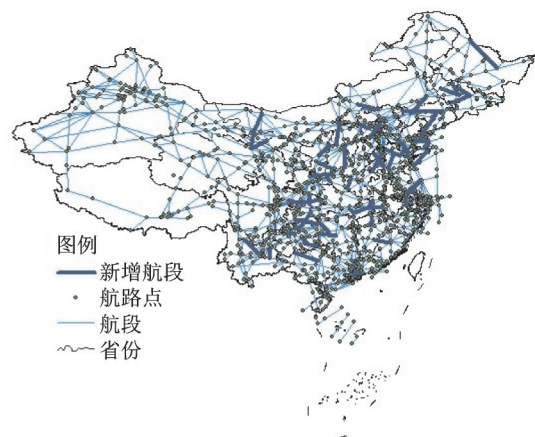


图5 56条新增航段分布
Fig.5 Distribution of 56 newly added segments

将仿真得到的56条新增航段加入现有网络,对优化前后网络进行评价,网络评价包括结构数据统计分析以及鲁棒性评价。结构数据统计使用了ARN的部分数据,统计特征包括航路点个数、航段边数、平均度值、平均路径长度、聚类系数、最长边、

表3 关键节点数据
Tab.3 Data of key nodes

编号	航路点名称	F_i	k_i	编号	航路点名称	F_i	k_i	编号	航路点名称	F_i	k_i
1	TAO	445.564 4	13	35	LADIX	62.126 63	6	69	FJC	45.300 67	5
2	HCH	378.584 2	13	36	CHG	62.126 63	8	70	P77	45.300 67	5
3	MAKNO	213.560 3	12	37	TOREG	62.126 63	6	71	P184	45.300 67	4
4	OF	171.495 4	10	38	JW	61.155 9	7	72	ZUH	44.653 52	6
5	P06	137.196 3	8	39	JTA	61.155 9	7	73	TEKAM	44.006 36	4
6	VYK	128.136 2	9	40	DAX	61.155 9	7	74	ZHJ	43.035 63	7
7	HG	116.487 4	9	41	KR	60.185 17	6	75	YQG	42.712 06	6
8	POU	111.310 2	8	42	P303	59.861 6	5	76	PLT	42.712 06	6
9	CD	110.663 1	9	43	GAO	59.538 02	8	77	NOLON	42.064 91	5
10	FZ	108.721 6	8	44	ZHO	58.890 87	7	78	ZS	42.064 91	5
11	DO	106.780 1	11	45	HFE	58.243 72	9	79	BJZ	42.064 91	5
12	TYN	104.838 7	9	46	KALBA	58.243 72	6	80	AVNIX	42.064 91	5
13	XDX	104.838 7	6	47	LIN	56.302 26	6	81	TGO	40.770 6	7
14	WFX	95.778 56	8	48	LJB	56.302 26	6	82	WHA	40.447 03	5
15	SHL	93.189 95	8	49	YIN	56.302 26	6	83	PIX	40.447 03	5
16	SHX	90.277 76	9	50	SGM	54.360 8	8	84	HUY	40.447 03	5
17	JTG	88.012 73	8	51	TRN	54.360 8	6	85	CTU	40.447 03	5
18	FD	85.424 12	8	52	QNX	54.360 8	6	86	MAPMU	38.829 14	5
19	UDETI	81.541 2	6	53	BOBAK	53.390 07	5	87	ZYG	38.829 14	5
20	SUBUL	79.276 17	7	54	GUSNA	52.419 34	6	88	HX	38.829 14	6
21	BIKOB	79.276 17	5	55	GYA	52.095 77	7	89	OMUDI	38.829 14	5
22	P44	77.658 29	6	56	DOGAR	50.154 31	5	90	KHN	38.829 14	6
23	CON	77.011 14	7	57	NONIT	48.536 43	6	91	SHZ	38.829 14	6
24	PIMOL	75.069 68	8	58	TOL	48.536 43	6	92	P143	38.829 14	5
25	MABAG	74.746 1	7	59	DBL	48.536 43	5	93	OGOMO	38.829 14	4
26	ZJ	72.481 07	7	60	HUR	48.536 43	5	94	XSH	38.829 14	6
27	JDZ	69.892 46	8	61	WXI	47.565 7	7	95	WYN	37.211 26	5
28	KWE	66.980 27	9	62	NSH	47.565 7	7	96	UGAGO	37.211 26	5
29	HOK	65.685 97	7	63	NOMUK	46.918 55	5	97	ELNEX	37.211 26	5
30	LLC	65.685 97	7	64	JB	46.594 97	6	98	YBL	36.887 69	6
31	PIDOX	64.715 24	8	65	KAMDA	46.594 97	6	99	BZ	36.887 69	6
32	WTM	64.068 09	6	66	UGSUT	46.594 97	6	100	ENH	36.887 69	6
33	VMB	63.420 94	7	67	TAXOR	46.594 97	6	101	SJG	36.887 69	6
34	TZH	62.126 63	6	68	LBN	45.300 67	7				

最短边,航路运行成本。

优化后的 ARN 航路点个数保持不变,航段数增加 101 条,随着航段数的增加,网络平均度值、平均聚类系数有所提高,但平均路径长度减少,网络传输性得到改善,如表 5 所示。

采用网络效率 (E) 与可达性 (R) 评价网络的鲁棒性。网络效率为节点之间最短距离倒数和的平均数,它反映了网络上交通的通行能力以及连通性,计算公式如式 (5) 所示

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

式中: N 表示网络中节点的个数, d_{ij} 表示节点*i*与节

点*j*之间的距离。

节点间的可达性表示网络中两个节点之间是否存在路径,此处定义为网络中节点*k*被移除时的可能性,计算公式如式 (6) 所示

$$R_k = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}}{N(N-1)} \quad (6)$$

式中: $r_{ij}=1$,表示节点*i*与节点*j*之间存在路径; $r_{ij}=0$ 表示节点*i*与节点*j*之间不存在路径。

网络的可达性为所有节点的可达性与其被移除的可能性的乘积的和,计算公式如式 (7) 所示

$$R = \sum_{k \in G} p_k \cdot R_k \quad (7)$$

表 4 56条新增航段数据

Tab.4 Data of 56 newly added segments

编号	航段名称	长度/km	编号	航段名称	长度/km	编号	航段名称	长度/km
1	BEGRI RENOB	89.704 76	20	QJG HUY	276.366 8	39	LEMOT BUTID	191.774 8
2	DOTOS P284	299.151	21	PA XSH	164.285 3	40	BUTID ISBOP	139.280 6
3	VANVO P201	204.058 4	22	P60 P291	190.14	41	P92 ELBAD	195.029
4	TGO CHG	267.032 9	23	P223 P353	192.238 2	42	ESBAG NIVIK	98.049 5
5	ENGIL HUR	205.482 9	24	PIMOL GORPI	220.213 8	43	REPOL NOKAK	113.314 5
6	P130 P279	260.103 3	25	UNTAN GORPI	193.473 5	44	P229 P187	252.825 7
7	YCE NUGLA	166.956 1	26	WFG NOBUP	170.559 6	45	XSH MIDOX	114.487 5
8	P347 ZHJ	188.131 2	27	WFG REPOL	116.192 9	46	P308 P65	90.936 03
9	GUGAM LKO	59.374 39	28	WEH LATUX	229.040 6	47	P89 P278	142.891 6
10	LKO XSH	162.553 9	29	REMAX PEXEK	108.658 2	48	LXI DJT	110.879 3
11	LIU P108	290.717 5	30	NIKUN OTLEK	74.056 71	49	VIPAP SHL	78.834 67
12	NLG IDUMA	56.914 31	31	AGTIS P253	93.885 73	50	P176 P120	184.391 7
13	PU DBL	318.239 7	32	SAKPU OTLEK	236.280 6	51	P168 AKNAV	55.642 51
14	P99 GOBIN	231.575 4	33	P266 P373	204.974 8	52	P159 P281	147.357 9
15	P99 ELBAD	240.447 6	34	WZH P124	141.047 1	53	P173 ELKAL	105.880 9
16	YAV APOGO	165.398 2	35	EKVOK UPNAT	387.791 3	54	P63 P62	51.471 85
17	CEH SGM	251.749 4	36	LJB OTABO	171.978 3	55	SANKO KAGIP	76.020 52
18	ZS P134	201.195 9	37	LJB EKADO	156.821 5	56	SANKO P306	151.547
19	P374 TOREG	117.872	38	JMU HEK	436.506 5			

表 5 优化前后中国 ARN 拓扑结构数据比较

Tab.5 Comparison of Chinese ARN topology data before and after optimization

参数	现有网络	优化后网络	变化/%
航路点个数	1 017	1 017	—
航段边数	1 568	1 624	3.57
平均度	3.09	3.28	6.148
平均路径长度	15.49	12.6	-18.65
聚类系数	0.084	0.092	9.5
最长边/km	638.06	638.06	—
最短边/km	1.94	1.94	—

式中: p_k 表示移除节点 k 的可能性, 由定义可知 $0 \leq R \leq 1$, 如果网络为全连通网络则可达性为 1, 这说明可达性的值越大, 网络的鲁棒性越强。

使用随机攻击与蓄意攻击两种攻击方式模拟恶劣天气以及军事演习等突发情况, 观察网络效率的变化情况。为了更准确地对比优化前后指标的变化, 本文将网络效率与网络可达性采用归一化方法 (Normalization) 处理, 即将网络效率与网络可达性的计算数值分别归到 0~1 之间并且叠加求和, 以下降幅度来衡量网络拓扑结构鲁棒性的变化。本文在进行蓄意攻击时采用基于度值攻击的方式对网络连续攻击并计算评价指标。

图 6(a) 采用随机攻击分别对现有 ARN 与优化后的 ARN 进行攻击, 图 6(b) 采用基于度值的蓄意攻击方式对两个网络进行攻击, 节点删除比例以 5% 的间隔逐渐增加。从图 6 可以看出: 优化后的 ARN 在面临两种攻击时, 网络效率均高于现有网

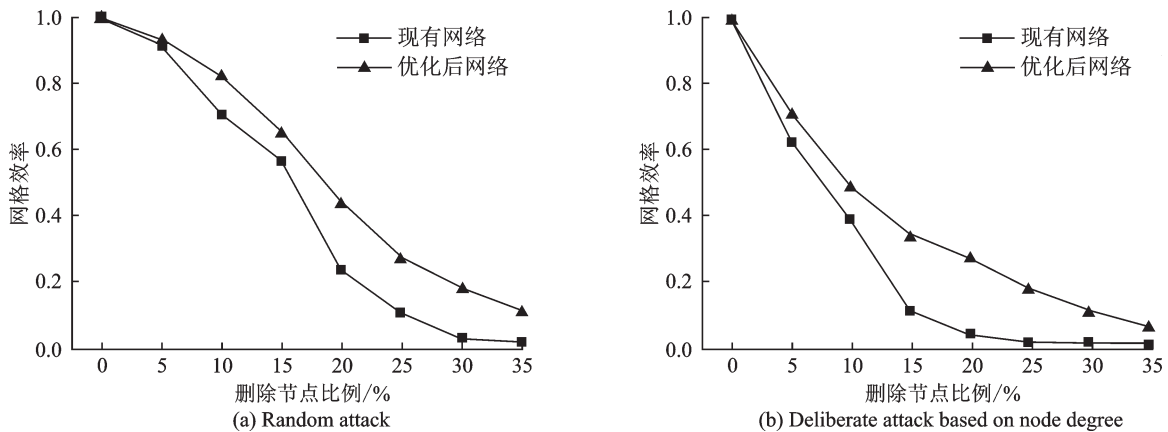


图 6 网络攻击后的网络效率变化趋势

Fig.6 Trend of network efficiency after network attack

络;当面临随机攻击时,随着节点删除比例的增加,现有ARN的网络效率呈现陡降的变化趋势,而优化后的ARN网络效率则保持着连续且缓慢的变化趋势;同样当面临蓄意攻击时,现有ARN的网络效率在最小节点删除比例时就呈现急剧下降的趋势并且随后一直保持,而优化后的ARN网络效率依然保持着连续且缓慢的变化趋势。此外,在基于节点度的蓄意攻击下,优化后的网络效率较现有网络的改善效果更好,这表明优化后的ARN拓扑结构对于两种攻击方式的鲁棒性都得到增强,且对于蓄意攻击的鲁棒性优化效果更显著。

3 结 论

文章基于复杂网络理论分析了2015年中国大陆地区ARN拓扑结构的参数;借助度值适应度方法计算出ARN中所有节点的适应度值,选取其排名前10%的节点作为关键节点,得到101个被保护节点;使用PCNC搜索保护环路径,遍历需要保护的关键节点,挑选出56条边;对现有ARN及优化后的ARN进行随机攻击与蓄意攻击,使用网络效率指标进行评价。优化后的网络效率均高于现有网络且呈现出缓慢下降的变化趋势,验证了该方法的有效性,并显示出蓄意攻击下的ARN鲁棒性优化效果更加明显。

本文的研究为未来ARN优化提供了一种新的思路,对改善ARN布局,提升ARN的利用效率具有重要的意义。今后在ARN拓扑结构鲁棒性优化研究方面可以结合实际的交通流,进一步提高ARN拓扑结构鲁棒性优化的实用性。

参考文献:

- [1] 韩云祥,汤新民,黄晓琼.基于鲁棒控制理论的轨迹规划方案[J].南京航空航天大学学报,2017,49(1): 125-131.
HAN Yunxiang, TANG Xinmin, HUANG Xiao-qiong. Trajectory planning using robust control theory [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017,49(1):125-131.
- [2] CAI Kaiquan, ZHANG Jun, DU Wenbo, et al. Analysis of the Chinese air route network as a complex network[J]. China Phys B, 2012, 21(2): 028093.
- [3] SUN Xiaoqian, SEBASTIAN W. Network similarity analysis of air navigation route systems[J]. Transportation Research Part E, 2014, 70: 416-434.
- [4] 王莉莉,蒋一森.基于复杂非线性网络的ARN结构分析[J].航空计算技术,2018,48(1): 1-8.
WANG Lili, JIANG Yisen. Analysis of route network structure based on complex nonlinear network [J]. Aeronautical Computing Techinque, 2018, 48 (1): 1-8.
- [5] ZHOU Chi, ZHANG Xuejun, CAI Kaiquan, et al. Comprehensive learning multi-objective particle swarm optimizer for crossing waypoints location in air route network [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(3): 533-538.
- [6] 戴福青,万小艳.主干航路网规划方法[J].科学技术与工程,2014,14(3): 271-275.
DAI Fuqing, WAN Xiaoyan. The planning method of backbone air route network [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(3): 271-275.
- [7] WANG Shijin, CAO Xi, LI Haiyun, et al. Air route network optimization in fragmented airspace based on cellular automata [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 1184-1195.
- [8] 隋东,康金霞.基于复杂网络理论的中国ARN抗毁性分析[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2016,32(3): 295-302.
SUI Dong, KANG Jinxia. Analysis of China air route networks invulnerability based on complex networks [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2016,32(3): 295-302.
- [9] BEYGELZIMER A, GRINSTEIN G, LINSKER R, et al. Improving network robustness by edge modification [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2005, 357: 593-612.
- [10] ZHAO Jinchang, XU Ke. Enhancing the robustness of scale-free networks [J]. Journal of Physics: A Mathematical and Theoretical, 2009, 42 (19) : 195003 - 195010.
- [11] WANG Huijuan, van MIEGHEM P. Algebraic connectivity optimization via link addition [C]//International Conference on Bio-Inspired Models of Network. [s.n.]: ICST, 2008.
- [12] MARTINEZ M C S. Robustness optimization via link additions [D]. Barcelona, Spain: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [13] 莫辉辉,王姣娥.复杂交通网络——结构过程与机理 [M].北京:经济管理出版社,2012.
MO Huihui, WANG Jiaoe. Complex transport network: Structure, process & mechanism [M]. Beijing: Economic Science Press, 2012.
- [14] ZHENG Yue, LI Wenquan, QIU Feng, et al. Laplacian energy maximization for multi-layer air transportation networks [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2017, 33(3): 341-347.