

文章编号:1674-8190(2020)01-085-07

# 考虑机场位置与航线流量影响的航空网络 防御资源优化策略

黄海清<sup>1</sup>,甘旭升<sup>2</sup>,蒋旭瑞<sup>2</sup>,吴奇科<sup>3</sup>,孙静娟<sup>2</sup>

(1. 西京学院 理学院,西安 710123)

(2. 空军工程大学 空管领航学院,西安 710051)

(3. 解放军 93801 部队 飞行管制室,西安 712200)

**摘要:** 传统复杂网络领域对网络防御问题的研究未考虑影响航空网络防御资源配置的主要因素,为此提出一种考虑机场位置、航线流量等因素的基于航空网络实际的防御策略,来降低网络风险。首先,利用节点脆弱性减少模型确定不同类型防御资源防御量与节点防御能力的函数关系;然后,对传统的重要度评价矩阵做出改进,考虑航线流量、机场位置等影响航空网络防御资源配置的因素对节点进行重要度排序,并分析节点与整个航空网络风险的关系;最后,在总防御资源量一定的情况下,利用模拟退火算法对各个节点配置的防御资源量进行求解,使得网络总风险最小。通过对随机生成网络与中国航空网络的实验发现,该优化策略在分配防御资源时,能够区分机场节点位置和流量的差异,相比于传统方法能够有效降低网络总风险。

**关键词:** 航空网络;复杂网络;防御资源优化;模拟退火算法

中图分类号: V351

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Defense Resource Optimization Strategy of Aviation Networks Considering the Impact of Airport Location and Route Traffic Flow

HUANG Haiqing<sup>1</sup>, GAN Xusheng<sup>2</sup>, JIANG Xurui<sup>2</sup>, WU Qike<sup>3</sup>, SUN Jingjuan<sup>2</sup>

(1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China)

(2. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(3. Air Traffic Control Room, Troop No. 93801 of PLA, Xi'an 712200, China)

**Abstract:** In view of a deficiency that in the field of complex network, the traditional network defense strategies did not consider the main factors which will affect the aviation network defense resource optimization. Therefore, an aviation network strategy considering airport location and traffic flow based on the reality of aviation system is proposed to reduce the total risk of network. The relationship between different types of defense resource and node defense capability is determined based on the node vulnerability reduction model. By making some adjustments in importance evaluation matrix method, the traffic flow, airport location and some other factors are considered to rank the nodes, and the relationship between nodes and the aviation network total risk is analyzed. In the end, under the circumstance that the defense resource is limited, the problem is solved by simulated annealing algorithm to reduce the total risk of network. Through the tests on randomly generated network and Chinese aviation network, it shows that this optimization algorithm is capable of telling the difference between node location and traffic flow when allocating defense resources, and more efficient in lowering the risk of network compared with traditional methods.

**Key words:** aviation network; complex network; defense resource optimization; simulated annealing algorithm

收稿日期:2018-11-25; 修回日期:2019-01-31

基金项目:西京学院校级教改项目(ZDKC201915)

通信作者:甘旭升,gxsh15934896556@qq.com

引用格式:黄海清,甘旭升,蒋旭瑞,等. 考虑机场位置与航线流量影响的航空网络防御资源优化策略[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 85-91.  
HUANG Haiqing, GAN Xusheng, JIANG Xurui, et al. Defense resource optimization strategy of aviation networks considering the impact of airport location and route traffic flow[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 85-91. (in Chinese)

## 0 引言

随着航空运输业的快速发展,我国的航空网络已逐渐形成并不断扩张。航空网络与国家政治、经济、科技的发展有着紧密联系,因此,对航空网络的防御和保障显得尤为重要。然而现实中的防御资源是有限的,如何利用有限的防御资源使网络风险最小成为一个重要的研究课题。

航空网络是典型的复杂网络,目前,国内外对复杂网络的抗毁能力、防御能力已经开展了较为深入的研究。防御策略主要包括三类,第一类是通过优化网络的构成来提高网络的防御性能,例如 A. Beygelzimer 等<sup>[1]</sup>通过加边的方式来优化网络结构,并且得出其中四种方式的优劣顺序,这种方法以解析推导和计算机仿真结合的方式进行,准确性高、实践性较强;Wang W X 等<sup>[2]</sup>研究了复杂网络防御性能的熵优化问题,把网络面对故障的防御性能优化转化为度分布熵的优化,优化网络的度分布指数,增加网络的异质性,达到提高网络防御性能的目的。这类方法可以有效增强蓄意攻击下、尤其是在仅有少量节点被攻击的情况下的网络抗毁性,但对于航空网络来说,其网络结构基本已经固定,很难对其进行改变,因此不适用于航空网络。第二类是对网络进行修复来提高网络的抗毁性,例如 Chi L P 等<sup>[3]</sup>通过对基于度大小攻击后的网络以一定概率将节点重连的方式修复网络,来提高随机网络稳定性;程杰等<sup>[4]</sup>考虑了级联失效效应影响下的网络边失效后的修复模型,以此改善地面交通网络的鲁棒性;A. Kvalbein 等<sup>[5]</sup>针对链路故障,基于计算全连通拓扑子图,提出利用弹性路由层(Resilient Routing Layers)来快速中转受影响的流量,实现网络修复。这类方法对于短期内可以快速完成修复的网络具有一定价值,但是由于环境和条件限制,航空网络难以实施迅速的调整恢复,因此此类方法也缺乏针对性。最后一类是通过分配一定的防御资源到网络中来降低网络的风险,例如杨红娃等<sup>[6]</sup>从主动防御角度出发,提出了基于介数加权模型的网络防御资源优化分配方法,显著降低了网络的总风险。这类方法主要应用于无权网络,在分配资源时没有考虑边权对关键节点确定、资源分配等的影响。但在航空网络中,航线流量反映机场与航线在网络中的重要程度,是必须要考虑的因素。

目前,国内外对航空网络防御问题的研究较少,可以直接借鉴的成果不多,本文借鉴其他领域的成果,对航空网络的防御策略进行研究。考虑航空网络自身的特点,提出一种改进的关键节点防御资源优化策略,针对蓄意攻击,从主动防御的角度出发,将航空网络防御资源进行细化,并考虑流量、机场位置对资源配置的影响,最后通过模拟退火算法进行求解。

## 1 防御资源优化分配模型

航空网络防御资源优化分配的目的是使网络总风险  $R$  最小。

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

式中: $\omega_i$  为节点  $v_i$  对网络风险的影响程度; $r_i$  为节点  $v_i$  失效后的网络风险值。

有目的破坏一些高链接或高负载的关键机场节点对航空网络来说是致命的。如果关键节点比其他次关键节点分配更多的资源,航空网络的防御性能会更好。但是由于现实条件的限制,防御资源总和  $B$  是有限的:

$$B = \sum_{j=1}^3 B_j \quad (j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: $j$  为防御资源类型。

如果只将防御资源分配给关键节点,其他大量的次关键节点的防御性能就会较差。此时对这些节点进行袭击,容易导致关键节点的孤立,也会造成整个网络的崩溃。如何确定最佳优化分配方案  $DA_j (j = 1, 2, 3)$  使网络总风险  $R$  最小具有重要的意义。

但是在分配的过程中,如何才能准确反映防御资源量与节点脆弱性的关系,如何结合航线流量、机场位置等因素进行资源分配,如何进行优化分配求解? 针对上述问题,以下进行具体分析。

### 1.1 防御资源与节点脆弱性关系

本文研究的航空网络防御资源主要针对机场节点。如果将防御资源种类全部列出,必然会降低计算效率。故建立机场节点防御资源体系,即人、设备和管理<sup>[7-8]</sup>。每种防御资源对节点脆弱性的影响都有所差异,因此要针对不同防御资源研究其与节点脆弱性的关系。

通常,对航空网络节点配置越多的防御资源,节点的防御性能越好。为了表示防御资源量与节点防御性能的关系,W. Al-Mannai 等<sup>[9]</sup>提出了基于线性模型:

$$h_i = \left(1 - \frac{DA_i}{\max DA_i}\right) \quad (0 \leq DA_i \leq \max DA_i; i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中: $h_i$  为节点  $v_i$  的脆弱性; $DA_i$  为分配到节点  $v_i$  的防御资源; $\max DA_i (i=1,2,\dots,n)$  为使节点  $v_i$  达到最高安全性能的防御资源。

但实际情况不是这样,因为随着分配的防御资源增多,每单位防御资源对节点脆弱性的影响会不断减小。因此,采用如式(4)所示的脆弱性减少幂函数模型来替代线性模型。

$$h_i = \sum_{j=1}^f \left(1 - \frac{DA_{ij}}{\max DA_{ij}}\right)^{a_j} \quad (i=1,2,\dots,n; a_j \geq 1) \quad (4)$$

式中: $DA_{ij}$  为在  $j$  类防御资源下节点  $v_i$  所分到的防御资源; $\max DA_{ij}$  为使  $v_i$  节点达到最高级别安全需要的防御资源; $a_j (j=1,2,3)$  为  $h_i$  对不同防御资源对应的幂指数,每种防御资源的幂指数  $a_j$

都有所差异。

根据机场节点防御资源体系,由于每种防御资源分配的多少对节点防御能力的影响都不同,例如随着人力保障资源和设备保障资源的增加,节点脆弱性的变化速度在每个阶段都不同。通过咨询专家与统计数据资料,对三项防御资源量与节点脆弱性指数进行曲线拟合,得到参数  $a_1 = 2.1, a_2 = 2.5, a_3 = 1.8$ 。

## 1.2 节点与航空网络风险关系

机场节点在航空网络中越重要,它对网络风险的影响就越大。因此要分析节点与网络风险的关系,首先要对节点进行排序。目前节点重要度排序方法主要有基于度、介数、中心度、重要度评价矩阵等。本文考虑利用重要度评价矩阵进行排序,它是一种考虑全局和局部重要性的排序方法,对于大型网络具有理想的计算能力,但它没有考虑航线流量。为了体现机场位置、航线流量的影响,提出改进后的重要度评价矩阵:

$$\mathbf{H}_E = \begin{bmatrix} P_1^c S_1 & P_2^c \delta_{12} S_2 D_2 / k^2 & \cdots & P_n^c \delta_{1n} S_n D_n / k^2 \\ P_1^c \delta_{21} S_1 D_1 / k^2 & P_2^c S_2 & \cdots & P_n^c \delta_{2n} S_n D_n / k^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_1^c \delta_{n1} S_1 D_1 / k^2 & P_1^c \delta_{n2} S_2 D_2 / k^2 & \cdots & P_n^c S_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $P_i^c$  为节点  $v_i$  的接近度值(节点接近度是指节点  $v_i$  对局部社区  $C$  的接近程度,机场节点接近度反映了机场在某一区域航空网络中的相对位置,以及机场对整个航空网络的影响); $\delta_{ij}$  为航空网络邻接矩阵元素,即贡献分配参数; $D_i / k^2$  为贡献分配比例,即  $v_i$  对邻居节点输出重要度的比例; $D_i$  为节点度; $k$  为节点平均度。

为了能够体现机场节点在航线网络运输过程中所起的作用,结合航班流量,引入点强

$$S_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \quad (6)$$

式中: $N_i$  为节点  $v_i$  的邻居节点集; $w_{ij}$  为与节点  $v_i$  直接相连边的权重,权值越大,说明该机场与周围机场联系越紧密,重要性越高。

根据重要度评价矩阵,对所有与机场  $v_i$  相邻的机场的重要度贡献求和,可以得到

$$c_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n P_j^c \delta_{ij} S_j D_j / k^2 \quad (7)$$

$c_i$  反映了节点  $v_i$  在网络中本身的价值。重要度评价矩阵充分考虑了节点的位置以及航线流量,比较全面地反映了节点的重要性。

基于风险分析模型<sup>[10]</sup>,将节点  $v_i$  失效后的网络风险定义为  $r_i$ ,即

$$r_i = t_i h_i c_i \quad (8)$$

$$t_i = \frac{c_i}{d_{ik}} \quad (9)$$

式中: $t_i$  为节点  $v_i$  受到攻击的概率; $h_i$  为节点  $v_i$  受到攻击时性能下降率,配给节点  $v_i$  较多的防御资源时, $h_i$  值相对较小; $c_i$  为节点  $v_i$  受到攻击后造成的损失; $d_{ik}$  为攻击者到目标机场节点  $v_i$  的距离。可见攻击概率与距离成反比,与攻击效益成正比。

为了深入研究网络风险,设网络中有  $n$  个关键

节点,不考虑连边的风险,得到网络总风险  $R$  为

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i r_i = \sum_{i=1}^n \omega_i h_i c_i t_i \quad (10)$$

式中: $\omega_i$  为节点  $v_i$  对整个网络风险的影响值。

本文选择用节点效率  $E_i$  作为航空网络风险影响值,令  $\omega_i = E_i$ 。

本文研究的是航空网络中关键节点受到攻击时,比如“节点失效”时,对整个网络风险的影响,以便就此优化分配防御资源,对攻击者的位置和方向并不关心,仅需设置统一常数值即可。

### 1.3 防御资源优化分配

设分配给所有机场节点的防御资源总量为

$$B = \sum_{j=1}^3 B_j (B_j < \sum_{i=1}^n \max DA_{ij}; j=1,2,3) \quad (11)$$

式中: $B_j$  为  $j$  类防御资源,表示  $B_j$  不能让所有节点的防御性能都最高。

要想使所有节点的网络风险总和最小,就要寻求一种对  $B$  的最优分配方案  $DA_j = \{DA_{1j}, DA_{2j}, \dots, DA_{nj}\} (j=1,2,3)$ ,从而达到对网络最好的防御和保护效果<sup>[11]</sup>。

由式(7)~式(10)式可得网络的总风险:

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i h_i c_i t_i = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \frac{E_i c_i^2}{d_{ik}} \left(1 - \frac{DA_{ij}}{\max DA_{ij}}\right)^{a_j} \quad (12)$$

防御资源的优化分配,其目的是使网络的总风险值最小,故将优化的目标函数设为

$$\min R = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \frac{E_i c_i^2}{d_{ik}} \left(1 - \frac{DA_{ij}}{\max DA_{ij}}\right)^{a_j} \quad (13)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^n DA_{ij} \leq B_j$$

$$(0 \leq DA_{ij} \leq \max DA_{ij}; j=1,2,3) \quad (14)$$

约束条件表示所有节点分配得到的防御资源总和不大总防御资源,每个节点分配到的防御资源不大于其自身最高级别的安全所需的防御资源。

需要说明的是,在航空网络构建中,机场位置、航线流量不仅影响主干网络,也影响着区域网络。主干网络具有优化航线结构、合理配置资源、增强关键节点防御能力等多重功效;区域网络具有明显的区域特性,提供一定区域内各机场之间以及和主

要机场的连接任务,可以看作是主干网络的补充。

在航空网络防御资源优化过程中,主干网络与区域网络分别单独生成,最终将两者合并,从而确定最终的航空网络,进而统一按照优化策略去配置防御资源。

## 2 模拟退火算法求解

模拟退火算法是一种通用随机搜索算法,源于对固体退火过程的直接简单模拟<sup>[12-13]</sup>。为了找出满足目标函数(式(13))和约束条件(式(14))的最优分配解方案,可考虑航空网络中防御资源实际,利用模拟退火算法的优势在可行解空间中随机搜索。

为了便于模拟退火算法求解,先对  $n$  个节点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  按照重要度进行排序,记为  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  顺序。则模拟退火算法的具体实现步骤如下:

**输入:**关键节点组成的航空网络带权邻接矩阵,  $\max DA_{ij}$ , 总防御资源  $B_j (j=1,2,3)$ 。

**输出:**防御资源分配方案  $DA_{ij}$ , 网络总风险  $R$ 。

**Step 1:** for  $j=1$  to 3, 从防御资源  $B_j$  中,先取出对  $v_1$  最高级别安全需要的防御资源  $\max DA_1$  给节点  $v_1$ ,再从  $B_j - \max DA_1$  中取出对  $v_2$  最高级别安全需要的防御资源  $\max DA_2$  分配给  $v_2$ ,以此类推,从  $B_j - \sum_{i=1}^{m-1} \max DA_i$  中取出对  $v_m$  最高级别安全需要的防御资源  $\max DA_m$  分配给  $v_m$ ,作为分配的初始解。

**Step 2:** 赋值初始温度  $T_0 = T_{\max}$ 。

**Step 3:** 循环初值  $\text{num} = 1$ ; 用 floyd 算法<sup>[14]</sup> 求出  $d_{ik}$ 、 $E_i$ 、 $c_i$ , 并由初始解求出目标函数值  $R$ 。

**Step 4:** 对当前最优解进行交换操作,产生一个新的最优解,计算目标函数,得到两次目标函数的增量  $\Delta$ 。

**Step 5:** 确定是否接受新产生的最优解 (Metropolis 规则<sup>[15]</sup>)。如果  $\Delta < 0$ , 新的解为当前最优解,否则以概率  $P = \exp(-\Delta/T_0)$  接受新的解为当前最优解。

**Step 6:** 判断  $\text{num}$ , 当  $\text{num}$  小于终止步数时,  $\text{num} = \text{num} + 1$ , 回到第 **Step 3**, 否则进行降温,使

$T_0 = a \cdot T_0$ , 其中  $0 < a < 1$ 。

**Step 7:** 若  $m$  次降温后最优解未改善或降温到给定的阈值, 则转至 **Step 8**; 否则转至 **Step 3**。

**Step 8:** 若防御资源已分配完, 则输出当前最优解, 计算结束; 否则, 进行二次分配, 即再从剩余的防御资源中依次抽取防御资源随机分配给节点  $v_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

**Step 9:** 当剩余的防御资源分配完后, 转至 **Step 1** 重新执行新的模拟退火。但此时模拟退火只对第二次新分配的防御资源进行交换操作, 第一次模拟退火的分配结果只参与式(8)中的运算。

### 3 实验分析

#### 3.1 算例验证

为了验证算法的有效性, 本文采用随机生成网络, 并对边进行赋权, 以此作为关键节点防御资源优化算例, 网络拓扑图如图 1 所示(图中正体数字为节点编号, 斜体数字为边权值)。仿真时涉及的参数设定为: 初始温度  $T_0 = 100$ , 终止温度  $T_{\min} = 0.01$ , 温度下降系数  $a = 0.9$ , 循环次数  $\text{num} = 1\ 000$ 。

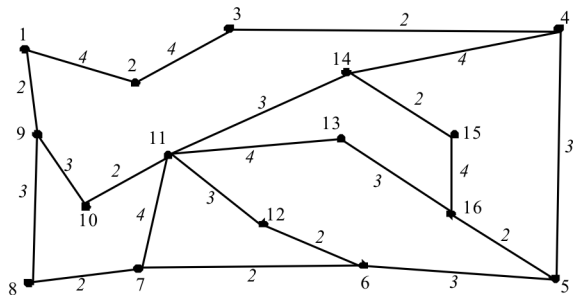


图 1 随机生成加权网络拓扑

Fig. 1 Topology graph of randomly generated weighted network

为了便于计算, 优化分配时, 只考虑一种防御资源, 且总量为 10 000,  $\max DA_{ij} (i=1, 2, \dots, 16; j=1)$  如表 1 所示。经实验仿真, 得到各节点的防御资源量如表 1 所示。 $R_1$  为在本文算法进行防御资源分配后的网络风险;  $R_2$  为在运用文献[6]方法分配下的网络风险。

从表 1 可以看出: 节点 4, 11, 14, 16 为主要关键节点, 它们分配的防御资源也相对较多; 通过对比 2, 3 号节点, 可以发现, 在其他条件同等水平

的情况下, 边权值较大的 2 号节点获得的防御资源相对更多; 对比 1, 12 号节点, 在其他条件同等水平情况下, 更接近网络中心的 12 号节点获得更多的资源。表明本文算法有效地考虑了网络边权和节点位置。同样分配 10 000 个单位的防御资源, 本文的分配算法使网络风险从不考虑边权、节点位置的 7 050 降低到 6 153<sup>[6]</sup>, 降低了 12.7%。

表 1 随机网络拓扑的各节点优化分配结果  
Table 1 Results of optimal allocation of nodes in random network topology

$V_i$	$DA_i$	$\max DA_{ij}$	$R_1$	$R_2$
1	208	710	365	305
2	312	1400	458	415
3	175	680	325	285
4	896	2 410	285	425
5	503	1 920	655	650
6	569	2 040	455	442
7	759	2 150	231	315
8	198	920	222	198
9	750	2 510	366	495
10	652	2 620	358	451
11	1 165	3 540	458	662
12	884	2 860	584	655
13	456	1 820	602	596
14	1 023	3 300	350	595
15	445	1 610	255	240
16	995	3 410	184	321

#### 3.2 算例分析

实验中, 对 2016 年 5 月全国 199 个彼此开通航线的机场(一个城市多个机场合并)一周内飞行班次进行统计, 实验数据从 <http://www.qunar.com> 网站获取。得到关于机场与机场之间航班数矩阵  $\mathbf{M} = (a_{ij})_{199 \times 199}$ , 这里将航班数作为航线流量, 即边权, 从而得到关于中国航空网络的一个邻接矩阵  $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$ 。假设三项防御资源中每项防御资源量为 2 000, 根据本文优化算法, 得到各个机场节点的防御资源量, 如表 2 所示(取前 12 个机场节点)。模拟退火仿真时涉及的参数设定为: 初始温度  $T_0 = 100$ , 终止温度  $T_{\min} = 0.01$ , 温度下降系数  $a = 0.9$ , 循环次数  $\text{num} = 1\ 200$ 。  $\max DA_{ij} (i=$

1, 2, \dots, 12; j=1, 2, 3) 在表 2 中给出。

表 2 12 个机场节点防御资源分配结果  
Table 2 Defense resource allocation  
results of 12 airport nodes

机场 节点	人		设备		管理	
	$DA_{ij}$	$\max DA_{ij}$	$DA_{ij}$	$\max DA_{ij}$	$DA_{ij}$	$\max DA_{ij}$
北京	333	1 100	278	980	304	900
重庆	138	450	110	420	90	320
成都	252	910	221	750	208	610
广州	217	870	262	920	246	810
杭州	69	340	57	190	70	230
哈尔滨	76	260	58	260	89	280
昆明	144	490	152	490	139	460
上海	249	980	290	960	294	910
深圳	133	610	125	430	140	420
天津	62	210	77	230	39	160
厦门	43	220	58	230	47	160
西安	224	780	252	810	275	840

从表 2 可以看出:运用本文提出的航空网络防御资源优化策略进行资源分配,从防御资源量分布的情况来看,北、上、广三个城市分配所得防御资源量相对于其他城市较多,而它们的航线流量也是最大的;西安地处航空网络中心,分配到的防御资源量也较多。显然,航线流量和机场位置是防御资源配置时需要考虑的重要因素,本文算法能够很好地结合这些因素。

航空网络防御资源平均分配方法,文献[6]所提分配方法以及本文方法的对比如图 2 所示。

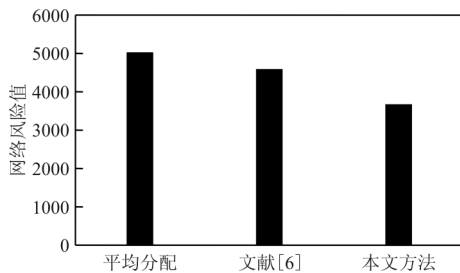


图 2 三种方法效果对比

Fig. 2 Comparison chart of three methods

从图 2 可以看出:文献[6]方法在对资源进行优化分配后网络风险从平均分配的 5 012 降到了 4 583,降低了 8.6%;而运用本文算法得出的网络总风险为  $R_1 = 3 662$ ,相比于不考虑航线流量和机

场位置的文献[6],显著降低了网络风险值,较平均分配下降 26.9%,表明本文提出的防御资源优化分配模型具有明显的优越性,在航空网络应用方面具有较高价值;此外,不同防御资源的优化分配方案都有所差异,这是每种防御资源与网络脆弱性的关系决定的,但总体来说,分配方案具有很大的相似性。

## 4 结 论

(1) 本文对三种防御资源进行了区分,并提出利用边权、重要度评价矩阵、接近度等指标评价节点的重要性,考虑了以往航空网络防御资源优化研究中忽略的影响因素,从而更全面、更科学地排序节点的重要性,是对航空网络节点评价指标的一种新的尝试和补充。

(2) 在对网络节点的重要度进行正确排序的基础上,分析了节点脆弱性与网络风险之间的关系,并采用模拟退火算法求解风险最小前提下各节点配置的防御资源量,实验验证了本文方法的可行性和可靠性,可为网络防御资源优化分配提供科学的技术支撑,也为下一步研究航空网络防御策略奠定了基础。

(3) 以机场或者导航点为节点,以航线航路作为边的网络,尚无法准确描述实际的航空网络。后续工作还需深入探究机场网络、航路网络和管制网络等不同层次网络的防御资源优化分配问题。

## 参考文献

- [1] BEYGELZIMER A, GRINSTEIN G, LINSKER R. Improving network robustness by edge modification[J]. *Physica A*, 2005, 97(3): 593-612.
- [2] WANG W X, CHEN G R. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(2): 026101.
- [3] CHI L P, YANG C B, CAI X. Stability of random networks under evolution of attack and repair[J]. *Chinese Physical Letters*, 2006, 23(1): 263-266.
- [4] 程杰, 刘杰, 唐智慧. 城市道路网络修复策略研究[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(9): 114-120.  
CHENG Jie, LIU Jie, TANG Zhihui. Research on repair strategies of urban road network[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(9): 114-120. (in Chinese)
- [5] KVALBEIN A, HANSEN A F, CICIC T, et al. Fast recovery from link failures using resilient routing layers[C]//

- Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005). Cartagena, Spain: IEEE Press, 2006: 554-560.
- [6] 杨红娃, 王敏, 潘高峰. 基于介数加权模型的网络防御资源优化分配方法[J]. 微波学报, 2010, 25(8): 738-742.  
YANG Hongwa, WANG Min, PAN Gaofeng. An optimal method for network defense resource allocation based on betweenness-weighted model [J]. Journal of Microwaves, 2010, 25(8): 738-742. (in Chinese)
- [7] 张晓全, 燕春光. 民用机场空防安全的风险管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9): 126-130.  
ZHANG Xiaoquan, YAN Chunguang. Risk management of air defense security in civil aviation airports[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(9): 126-130. (in Chinese)
- [8] 庄刘, 魏中许. 基于情报信息的空防安全威胁评估回归模型研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 460-465.  
ZHUANG Liu, WEI Zhongxu. Research on the regression model of civil aviation security threats based on intelligence information[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2015, 38(3): 460-465. (in Chinese)
- [9] AL-MANNAI W, LEWIS T. Minimizing network risk with application to critical infrastructure protection[J]. Information Warfare, 2007, 6(2): 52-68.
- [10] TED G L. Network science: theory and applications[M]. American: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [11] BOCCALCTTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics [J]. Physics Reports, 2006, 424(45): 175-308.
- [12] 邓南明, 唐世轩, 张迪. 基于模拟退火算法的岛礁补给路径规划[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 30-32.  
DENG Nanming, TANG Shixuan, ZHANG Di. Reefs supply path planning based on simulated annealing algorithm [J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(5): 30-32. (in Chinese)
- [13] 强生杰, 贾斌一, 黄青霞. 基于模拟退火算法的快速登机序列特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 216-223.  
QIANG Shengjie, JIA Binyi, HUANG Qingxia. The study of fast boarding sequence characteristics based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 216-223. (in Chinese)
- [14] 唐克生, 钱民, 段丽梅, 等. 基于 Floyd 算法的城市配送最快路径选择[J]. 物流技术, 2017, 36(9): 101-104.  
TANG Kesheng, QIAN Min, DUAN Limei, et al. Selection of fastest route in urban distribution based on Floyd algorithm[J]. Logistics Technology, 2017, 36(9): 101-104. (in Chinese)
- [15] 沈龙泽, 刘衍聪, 王文超, 等. 海洋石油平台自动化管路布局优化算法设计[J]. 石油机械, 2014, 42(2): 34-39.  
SHEN Longze, LIU Yancong, WANG Wenchao, et al. Algorithm optimization for automated pipeline layout of offshore platform[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(2): 34-39. (in Chinese)

#### 作者简介:

黄海清(1960—),女,学士,副教授。主要研究方向:非线性建模,计算物理。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:非线性系统建模,空域管理。

蒋旭瑞(1993—),男,硕士,讲师。主要研究方向:无人机防撞,空管安全。

吴奇科(1991—),男,硕士,讲师。主要研究方向:无人机防撞,空管安全。

孙静娟(1981—),女,博士,讲师。主要研究方向:空中管制,空管法规。

(编辑:马文静)