

防空多传感器网络结构抗毁性优化设计

孙成雨¹, 申卯兴², 盛浩³, 肖金科¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051;

2. 西京学院应用统计与理学系, 陕西 西安 710123; 3.93861 部队, 陕西 咸阳 713800)

摘要: 为优化提高防空多传感器网络的抗毁性, 以网络遭受攻击过程中的总自然连通度为目标函数, 根据网络背景设计节点度和连通性约束, 建立网络拓扑结构抗毁性优化模型, 并设计利用改进人工免疫算法求解优化模型的步骤。为提高人工免疫算法种群中有效抗体数目进而提升搜索效率, 改进算法添加接种疫苗和抗体修复步骤。仿真实验表明优化模型的合理性和改进人工算法求解的快速有效性, 而采用按度攻击策略的总自然连通为指标进行优化可显著提高网络的抗毁性。

关键词: 多传感器网络; 自然连通度; 人工免疫算法; 网络抗毁性

中图分类号: TP393.02

文献标识码: A

Optimization design of structure invulnerability for air defense multiple sensor network

SUN Cheng-yu¹, SHEN Mao-xing², SHENG Hao³, XIAO Jin-ke¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Applied Statistics and Science Department, Xijing University, Xi'an 710123, China; 3. Troop 93861, Xianyang 713800, China)

Abstract: To improve the invulnerability of air defense multiple sensor network, its topological structure optimization model was established with the constraint of network node's degree and network connectivity, combined with the total sum of network's natural connectivity for attack strategy as object function. Then, solving steps of the model were designed based on improve artificial immune algorithm to solve the model. In order to improve the searching efficiency of the algorithm, new steps of immune review and antibody correction were designed to increase the number of effective antibodies in population. Simulation and results prove rationality of the model and feasibility of the modified artificial immune algorithm, optimization based on the index of total natural connectivity for attack strategy can improve the invulnerability of air defense multiple sensor network.

Key words: multiple sensor network, natural connectivity, artificial immune algorithm, network invulnerability

1 引言

防空多传感器网络是网络化防空作战体系的重要组成部分, 主要由网络中继器单元、传感器单元以及通信链路组成。该网络中各防空作战单元平台所属的传感器设备利用分布式信息融合、传感器管理等技术为作战体系中的各单元提供统一战场态势图, 有利于实现作战单元间的协同作战。防空多传感器网络的抗毁性受到如装备可靠性、装备备份数量、网络协议体系、网络管理技术策略、网络

设计和实际数据流量大小等因素的影响, 在众多因素中, 网络拓扑结构从根本上决定着网络的抗毁性, 直接影响网络能否满足其设计目标的能力。

防空多传感器网络的传统部署需要根据网络中传感器单元的位置和数量进行配置, 以降低信息传输时延和网络建设成本, 但未解决网络的抗毁性问题^[1]。网络拓扑结构抗毁性研究中, 抗毁性指标选取和抗毁性优化建模求解是其关键问题。在指标选取中, 自然连通度指标随网络边的添加或删除严格单调^[2,3], 可精确表现不同网络结构的抗毁性差别, 以该指标为

目标函数的优化模型得到大量研究^[4-7]。在优化模型求解中，传统人工免疫算法求解优化模型采用随机初始化方法获得抗体种群，通过免疫审查发现不可行解抗体，并利用可行解抗体替换^[6]。但是，防空多传感器网络拓扑结构的抗毁性优化具有更复杂的背景和约束条件，优化模型中存在局部和全局的连通性和节点度限制，这就使利用传统的算法进行求解模型时种群中容易产生大量不可行解抗体，而简单的抗体替换会降低算法效率。因此，本文考虑防空多传感器网络的特殊背景建立其网络结构的抗毁性优化模型，对人工免疫算法进行改进以提高算法的求解效率。

2 防空多传感器网络模型

2.1 网络及其相关定义

网络可表示为图 $G=(V,E)$ ，其中， $V=\{v_1,v_2,\dots,v_N\}$ 为网络节点集合， $N=|V|$ 为节点总数； $E=\{e_1,e_2,\dots,e_W\}$ 为网络边集合， $W=|E|$ 为网络边总数； $A(G)=(a_{ij})_{N\times N}$ 为网络 G 的邻接矩阵。

连通性作为图的重要性质，其连通性判定准则如下：对矩阵 $S_A=\sum_{p=1}^{N-1}A(G)^p$ ，若 S_A 中的元素均为非零元素，则 G 为连通图；若 S_A 中存在零元素，则为非连通图。

网络的同配性系数又称为网络度的 Pearson 相关系数，定义为

$$r = \frac{W^{-1} \sum_{e_w \in E} k_i k_j - \left[W^{-1} \sum_{e_w \in E} \frac{1}{2} (k_i + k_j) \right]^2}{W^{-1} \sum_{e_w \in E} \frac{1}{2} (k_i^2 + k_j^2) - \left[W^{-1} \sum_{e_w \in E} \frac{1}{2} (k_i + k_j) \right]^2} \quad (1)$$

其中， k_i 、 k_j 分别为边 e_w 两端节点 v_i 、 v_j 的度值。

同配性系数可以表征网络的相关性，在网络结构演化过程中可描述网络节点度的变化趋势。当 $r < 0$ 时，网络是负相关，即异配；当 $r > 0$ 时，网络是正相关的，即同配；当 $r = 0$ 时，网络是不相关的。

2.2 防空多传感器网络建模

防空多传感器网络的典型栅格状拓扑结构如图 1 所示，该网络由 N_H 个中继器单元节点 $H_i (i=1,2,\dots,N_H)$ 和 N_S 个传感器单元节点 $S_j (j=1,2,\dots,N_S)$ 及网络边组成，在实际中除栅格状结构外，多是网络状结构。

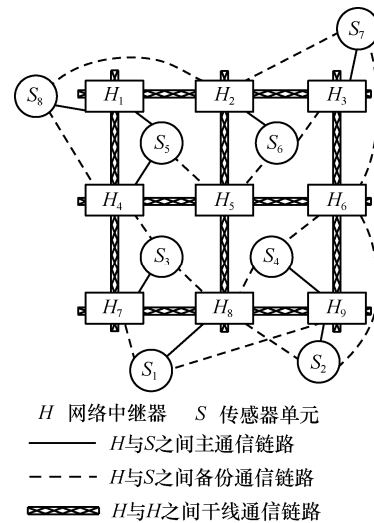


图1 防空多传感器网络的典型栅格状拓扑结构

在防空多传感器网络中，中继器单元具备信息中继和滤波、设备接入网关等功能，主要由专用通信中继车构成，车内装备多种不同通信方式的接口，负责中继器单元之间、中继器单元与传感器单元之间的各类通信任务。在网络结构模型中， N_H 个中继器单元对应网络中继器节点集合 $H=\{H_i|i=1,2,\dots,N_H\}$ 。

传感器单元是由本地信息处理中心和本地传感器设备集合而成的单元平台。防空多传感器网络中的传感器单元类型众多，如某型雷达、防空火力单元、预警飞机等。在网络结构模型中， N_S 个传感器单元对应为网络传感器节点集合 $S=\{S_j|j=1,2,\dots,N_S\}$ 。

防空多传感器网络的通信链路多样，网络中继器单元间的通信方式包括卫星通信、散射通信、微波中继通信、有线网接入等，形成主干通信链路。传感器单元间通过网络中继器单元实现信息交换，传感器单元与网络中继器单元间采用视距微波通信、超短波通信、有线通信等方式，二者之间存在主通信链路和备用通信链路。在网络结构模型中，防空多传感器网络的 W 条通信链路对应为网络的边集合 $E=\{e_w|w=1,2,\dots,W\}$ ， W_H 条主干通信链路对应骨干边集合 $E_H=\{e_w|w=1,2,\dots,W_H\}$ 。

综上，可获得防空多传感器网络结构的数学模型。

定义 1 防空多传感器网络结构的数学模型为

$$G_q = \{H, S, E\} \quad (2)$$

其中， H 为网络中继器节点集合； S 为传感器节点集合。网络节点总数 $N=N_S+N_H$ ，网络边集合为 E 。

防空多传感器网络的中继器单元相互连接形成骨干网络, 其骨干网络结构模型为

$$G_H = \{H, E_H\} \quad (3)$$

其中, H 为中继器节点集合, E_H 为中继器节点间边的集合, 总边数为 W_H 。

防空多传感器网络的组网设计有其特殊的应用背景和要求: 1) 网络的组网设计受其应用环境的限制; 2) 网络的组网设计受其组成装备性能的限制, 表现为网络结构模型中节点度存在约束; 3) 网络的组网设计需要考虑对抗条件空袭体系对网络的破坏, 网络结构应具备抗毁性。

3 防空多传感器网络抗毁性

3.1 防空多传感器网络抗毁性定义

网络的抗毁性定义有多种。广义的抗毁性是指当网络中的节点或边发生故障或遭受攻击时, 网络维持其功能的能力。狭义的抗毁性是指当网络中的节点或边发生故障或遭受攻击时, 网络拓扑结构保持连通的能力。

防空多传感器网络的抗毁性是指网络的中继器单元、传感器单元、通信链路发生故障或遭受故意攻击的条件下, 网络维持其功能的能力。从拓扑结构的角度考虑, 防空多传感器网络的抗毁性是指网络在发生故障或遭受故意攻击的条件下, 网络拓扑结构保持连通的能力。本文从网络拓扑结构保持连通能力的角度出发研究网络的抗毁性优化问题。

在空防体系对抗时, 网络中既存在随机故障也会遭受攻击破坏, 攻击破坏主要指防空袭体系的多种软、硬杀伤。无论是随机故障还是攻击破坏, 网络损伤均可描述为网络的边失效或节点失效。边失效是指网络中的边产生随机故障或受到攻击而失效, 节点失效是指网络节点产生随机故障或受到攻击失去正常工作能力而失效。因此, 防空多传感器网络结构抗毁性的研究目的是建立一种对网络边和节点失效不敏感的网络。

3.2 网络抗毁性指标

网络自然连通度指标不仅能够精确描述网络宏观和微观上的抗毁性差别, 也可刻画网络抗毁性的演变。但是, 单纯基于自然连通度指标的抗毁性优化只提高了网络结构的初始抗毁性, 在网络中节点或边发生故障或者遭受攻击时, 网络结构及其自然

连通度都发生改变, 不同的攻击策略下网络结构的演化特性不同, 其抗毁性也不相同。因此, 对网络抗毁性的优化, 需要结合不同攻击策略下网络结构及其抗毁性指标的演化特征进行动态的全局优化。

将网络 G 邻接矩阵 $A(G)$ 的特征根降序排列, 记为 $\lambda_{A_1} \geq \lambda_{A_2} \geq \dots \geq \lambda_{A_N}$, 则网络 G 的自然连通度 $\lambda^{[2]}$ 为

$$\lambda = \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{\lambda_{A_n}} \right) \quad (4)$$

网络 G 的初始自然连通度为 $\lambda = \lambda_0$, 按照某一攻击策略破坏其节点 v_n (边 e_w) 后, 其自然连通度记为 λ_n (λ_w), 在该攻击策略下持续对网络进行攻击后网络的自然连通度不断下降。如对网络 G 的节点按其度大小进行排序获得节点编号, 按度攻击节点时自然连通度 λ 的变化曲线如图 2 所示, 当横坐标为 0 时, 所对应网络未遭受打击, 其自然连通度为 λ_0 。

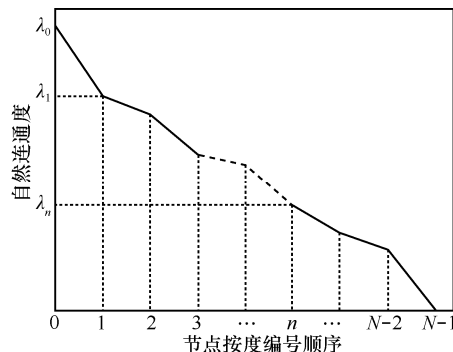


图 2 按度攻击节点时网络自然连通度的变化曲线

由图 2 可知, 在某一攻击策略下对网络进行攻击, 其拓扑结构和自然连通度不断变化, 自然连通度变化曲线所形成的面积则代表网络整体演化全局的抗毁性。因此, 按度攻击策略下网络总自然连通度为

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{1}{2} [(\lambda_0 + \lambda_1) + (\lambda_1 + \lambda_2) + \dots + (\lambda_{N-2} + \lambda_{N-1})] \\ &= \frac{(\lambda_0 + \lambda_{N-1})}{2} + \sum_{n=1}^{N-2} \lambda_n \end{aligned} \quad (5)$$

当网络节点总数 N 较大时, 总自然连通度可近似为

$$\lambda_d \approx \sum_{n=0}^{N-1} \lambda_n \quad (6)$$

同理, 按边介数大小对网络进行攻击时, 网络

的总自然连通度为

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \frac{1}{2}[(\lambda_0 + \lambda_1) + (\lambda_1 + \lambda_2) + \dots + (\lambda_{W-2} + \lambda_{W-1})] \\ &= \frac{(\lambda_0 + \lambda_{W-1})}{2} + \sum_{w=1}^{W-2} \lambda_w \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 抗毁性组合优化模型

1) 目标函数

针对按度攻击策略，网络 G_q 演化过程中的总自然连通度为 λ_d 。针对按边介数攻击策略，网络演化过程中的总自然连通度为 λ_c 。因此，针对不同优化目标可以分别选取 λ 、 λ_d 、 λ_c 作为优化问题的目标函数。

2) 网络连通性约束

网络的抗毁性优化受网络连通性的约束。在防空多传感器网络的构建和结构优化过程中，应保证网络是连通的，主要有：① 网络整体连通，即网络全局不存在孤立节点，采用图的连通性判定准则可知，对于网络 G_q ，若 S_{A_q} 中不存在零元素，则网络连通；②

网络局部连通性要求网络局部中各节点存在最小度约束，任一中继器节点应至少与 $L_{HH\min} \geq 2$ 个中继器节点相连，即满足 $\sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \geq L_{HH\min}$ ， $i=1,2,\dots,N_H$ 。传

感器单元与中继器单元之间存在备份链路，因此任意传感器节点应至少与 $L_{SH\min} \geq 2$ 个中继器节点相连，

即满足 $\sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \geq L_{SH\min}$ ， $i=1,2,\dots,N_S$ 。

3) 网络节点度约束

完全连通的网络具有最优的结构抗毁性，但是网络建设成本和装备性能约束使节点度值有限。① 受网络建设成本及性能约束，网络总边数有限，即网络 G_q 应满足 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} = 2W$ ；② 各中继

器单元受装备性能约束而与相邻中继器单元间的链路数存在上限 $L_{H\max}$ ，即存在 $\sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \leq L_{H\max}$ ，

$i=1,2,\dots,N_H$ 。由于网络传感器装备性能制约，其最大链路数存在上限 $L_{S\max}$ ，传感器节点与中继器节

点间的边数应满足 $\sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \leq L_{S\max}$ ， $i=1,2,\dots,N_S$ 。

4) 优化问题模型

在防空多传感器网络的实际部署和使用中，传感器单元、中继器单元的位置和数量根据作战经

验、战场条件确定^[1]。文献[1]指出已知网络中各装备单元的部署位置，传感器单元存在主用和备用链路数目为 3，即 $L_{S\max} = L_{SH\min} = 3$ 。因此，可将网络 G_q 的抗毁性优化问题转化为骨干网络 G_H 的抗毁性优化问题，对应的约束条件从 G_H 及其相应约束中获得。

采用按度攻击策略下的网络 G_H 总自然连通度作为目标函数，结合网络 G_H 的节点度约束和连通性约束，建立网络结构抗毁性组合优化模型如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \max \lambda_d &= \frac{\lambda_0 + \lambda_{N-1}}{2} + \sum_{n=1}^{N-2} \lambda_n \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \leq 2W_H \\ \sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \geq L_{HH\min}, i=1,2,\dots,N_H \\ \sum_{j=1}^{N_H} a_{ij} \leq L_{H\max}, i=1,2,\dots,N_H \\ \sum_{p=1}^{N_H-1} A(G_H)^p \text{中不存在零元素} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中，对中继器单元节点一般取 $L_{HH\min} = 2$ ；而 $L_{H\max}$ 的取值在不同的作战环境条件下具有不同的要求，需要根据实际情况进行设置，各中继器单元节点的取值可能相同，也可能不同。

显然，式(8)中采用不同的目标函数，可以获得不同的优化模型：采用自然连通度 λ 为目标函数的抗毁性优化模型，本文称之为优化模型 1；采用按度攻击策略的网络总自然连通度 λ_d 为目标函数的优化模型，本文称之为优化模型 2；采用按边介数攻击策略的网络总自然连通 λ_c 为目标函数的优化模型，本文称之为优化模型 3。

4 组合优化模型求解

在抗毁性组合优化模型的求解中，解的规模随着网络中节点和边数目的增加而迅速增加，难以对模型直接求解。因此，本文设计利用改进的人工免疫算法进行求解。

4.1 人工免疫算法基本原理

人工免疫算法采用群体搜索策略，种群中个体间进行信息交换，求解问题可实现全局最优，主要包括以下步骤^[8-10]：1) 构造抗原、进行抗体编码；2) 产生初始抗体种群；3) 计算亲和度；4) 进行免

疫基因操作；5) 更新抗体种群；6) 判断算法终止条件。

4.2 算法相关关键步骤设计

综合人工免疫算法基本原理，为求解抗毁性组合优化模型，对以下关键步骤进行设计。

1) 抗体编码

利用人工免疫算法求解优化函数，将目标函数定义为抗原，将候选解（网络邻接矩阵的候选解集合）定义为抗体。因此，采用以下抗体编码方法：

将邻接矩阵 $A(G_H)$ 中对角线以上 $K = \frac{N_H(N_H-1)}{2}$

个元素逐行排列获得 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ ，其中， $x_i = 0$ 或 1 ， X 称为抗体编码。反之，从抗体编码 X 可获得矩阵 $A(G_H)$ 。可见，每一个抗体表示问题空间中一种可能解，对应一种网络结构。

2) 免疫审查

由于防空多传感器网络的特殊应用背景，网络结构中存在全局和局部节点度以及连通性约束，使抗体编码中 0、1 元素在位置和数量上存在一定的约束。在人工免疫算法中，免疫基因操作的过程中会产生多样性的抗体，其中必然存在对应优化问题为不可行解的抗体，即某一抗体对应的网络中存在孤立节点、多个连通分支、节点度数不满足限制要求。因此，在人工免疫算法中加入免疫审查，判断抗体对应的网络结构在全局和局部是否满足连通性和节点度约束。经过免疫审查，可对抗体进行分类，对不满足约束条件的抗体进行修复。

3) 抗体基因变异

对抗体中的基因位进行变异，需要保持抗体对应网络连边总数不变。变异策略如下：对抗体 X ，以一定的变异概率 p 随机选择一个值为 1 的基因位赋值为 0，同时再随机选择一个值为 0 的基因位赋值为 1。

4) 终止准则

传统的智能优化算法的终止准则多采用设置最大迭代次数为某一固定值，该方法一般根据经验设置最大迭代次数，若求解问题规模较大而最大迭代次数设置较小，算法寻优过程中容易出现过早退出，若求解问题的规模一般而最大迭代次数设置较大，则算法已经到最优但仍不停止计算。本文设置的终止准则为：在寻优过程中，如果最优解连续保持不变的次数超过 n_{\max} ，则停止迭代。

4.3 算法改进步骤设计

人工免疫算法求解约束条件较少的网络抗毁

性组合优化模型时，可采用随机初始化方法获得抗体种群，通过免疫审查剔除不可行解抗体并利用可行解抗体进行替换^[6]。但是，防空多传感器网络结构抗毁性组合优化模型中的节点度、连通性约束对算法种群中可行解抗体的要求更高，使人工免疫算法存在 2 个主要局限：1) 随机初始化方法获得的抗体种群中会包含大量的不可行解抗体，即大量抗体对应的网络不满足节点度和连通性约束；2) 单纯通过利用可行解抗体替换不可行解抗体的方法会耗费大量的可行解抗体生成和搜索时间，降低算法效率。

针对以上 2 个主要局限，本文分别采用疫苗接种步骤提高种群中可行解抗体数目，采用抗体修复步骤提高种群不可行解抗体的处理速度，最终提高算法在可行解抗体中进行搜索的效率。

1) 接种疫苗

防空多传感器网络的骨干网络中，网络边总数 W_H 在抗毁性优化前后保持不变。因此，在抗体种群初始化时，先将抗体编码 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ 各基因位全部设为 0，然后随机将 X 中 W_H 个基因位赋值为 1。对抗体进行接种疫苗获得初始抗体种群中可行解的比例较随机化初始方法显著提高。

2) 抗体修复

经过免疫审查获得抗体种群中的不可行解需要进行抗体修复。不可行解抗体的修复，是指将不可行解抗体对应的网络进行修复，使网络结构满足连通性和节点度要求，其对应的抗体变为种群中的可行解抗体。

不可行解抗体的修复步骤是首先将不可行解抗体转化为网络，修复不满足连通性约束的网络从而获得整体连通网络，再对连通网络修复使其满足节点度约束，最后将网络转换为对应抗体。

① 不满足连通性约束的网络存在以下 4 种情况：a) 只存在孤立节点的不连通网络；b) 只存在多个连通分支的不连通网络；c) 同时存在孤立节点和多个连通分支的不连通网络；d) 网络整体连通，但网络局部存在度小于 $L_{HH\min}$ 的节点，即不满足局部的连通性要求。

针对以上 4 种情况网络的对应抗体，分 2 步进行修复：先修复前三类网络，获得整体连通网络；再修复整体连通网络中不满足局部连通性的网络。以只存在孤立节点的网络为例，对应不可行解抗体的修复如下。

步骤 1 不连通网络中存在孤立节点 v_g ，选择网络中度最大的节点 v_i 及其相邻节点中度最大节点 v_j ，断开节点 v_i 和 v_j 的边，在节点 v_g 和 v_j 间添加边。

步骤 2 整体连通而局部不满足连通性的网络，是指整体连通同时存在度为 1 的节点的网络。针对度为 1 的节点 v_x ，需新增至少一条边，对应网络中某节点 v_i 需要减少一条边，因此，从网络中度大于或等于 3 的节点集合中按照度值大小顺序选择节点 v_i ，再从 v_i 的邻居节点集合中选择度最大的邻居节点 v_j ，断开 v_i 和 v_j 间的边，并在节点 v_j 和 v_x 之间添加边。

同理，在步骤 1 中可对存在多个连通分支的网络、同时存在孤立节点和连通分支的网络进行修复获得连通网络。由于网络规模限制和疫苗接种的设置，这 2 类网络对应的抗体数目较少，本文采用抗体替代的方法替换对应的不可行解抗体，即利用满足连通约束的抗体替换存在多个分支、同时存在孤立节点和多个连通分支的不连通网络对应的抗体。

不连通网络在修复后，网络满足连通性约束，若节点度不满足约束，则进行节点度约束修复。

② 在连通网络的对应抗体中，由于采用接种疫苗的抗体生成方式和网络不满足连通性约束而进行抗体修复，使不满足节点度约束的连通网络只存在节点度大于 $L_{H\max}$ 的情况。因此，在连通网络中，若节点 v_y 的度值大于 $L_{H\max}$ ，则从节点 v_y 的相邻节点中选择一个度值最大的节点 v_i ，另选择一个与 v_y 、 v_i 均不相连的 v_j ，断开 v_y 和 v_i 的边，在节点 v_i 和 v_j 之间添加边。

经过抗体修复对应的网络，满足连通性和节点度的约束，则可将网络邻接矩阵逆转为可行解抗体输出。

4.4 求解算法步骤

根据人工免疫算法设计及改进，获得改进人工免疫算法求解抗毁性优化模型的步骤如下。

1) 初始化参数设置。确定抗体编码长度 K ，种群规模 N_0 ，克隆选择细胞数量 N_s ，克隆倍数 N_t 。

2) 生成初始抗体种群。通过对抗体进行接种疫苗，获得初始抗体种群 X_0 。

3) 免疫审查及抗体修复。对抗体种群进行免疫审查，获得可行解抗体和不可行解抗体，并对不可行解抗体进行修复。

4) 进化开始。载入抗原，根据目标函数计算每

个抗体的亲和度，并按照升序排列。

5) 克隆选择。选取种群中亲和度最大的前 N_s 个抗体，形成种群 X_s ，用于克隆扩增。

6) 克隆扩增。种群 X_s 中每个抗体按照 N_t 倍进行克隆扩增，得到种群 X_c 。

7) 抗体基因变异。对种群 X_c 进行变异，得到新的种群 X_m ，并转步骤 3)。

8) 再次选择。 X_s 和 X_m 组成新种群，按照亲和度进行降序排列，选取前 N_0 个抗体形成子代种群 X_0 。

9) 终止条件判断。判断进化代数是否满足终止准则 n_{\max} ，若满足则输出种群 X_0 中亲和度最大的抗体及对应的亲和度；若不满足，则进行步骤 10)。

10) 免疫补充。采用步骤 2) 和步骤 3) 的方法获得规模为 N_r 的替代种群 X_r ，利用 X_r 中的抗体替换子代种群 X_0 中 N_r 个亲和度最差的抗体，并转步骤 4)。

5 仿真分析

为验证抗毁性组合优化模型以及改进人工免疫算法求解的有效性，利用改进人工免疫算法和文献[6]中的传统人工免疫算法求解 3 类抗毁性组合优化模型并进行仿真，对算法性能和 3 类组合优化模型对应网络的性能进行对比分析。仿真中将文献[6]中的人工免疫算法称为算法 1，将本文改进的人工免疫算法称为算法 2。

5.1 基本参数设定

根据防空多传感器网络的规模结构，设置骨干网络及算法相关参数如表 1 所示。

表 1 骨干网络及算法的仿真参数

参数	符号	取值
骨干网络节点数	N_H	18
骨干网络总边数	W_H	34
骨干节点最小度	$L_{H\min}$	2
骨干节点最大度	$L_{H\max}$	5
抗体编码长度	K	$\frac{N_H(N_H-1)}{2}$
种群规模	N_0	100
克隆数量	N_c	30
克隆倍数	N_t	5
抗体变异概率	P	0.1
免疫补充数量	N_r	20
算法 2 终止准则	n_{\max}	100
算法 1 终止准则	N_{\max}	300

5.2 算法分析

5.2.1 算法对比分析

利用算法 1 和算法 2 分别对优化模型 1 进行求解，结果随进化代数的变化情况如图 3 所示。算法 2 求得优化模型 1 的最优结果为 2.098 0，算法 1 获得优化模型 1 的结果为 2.050 4。

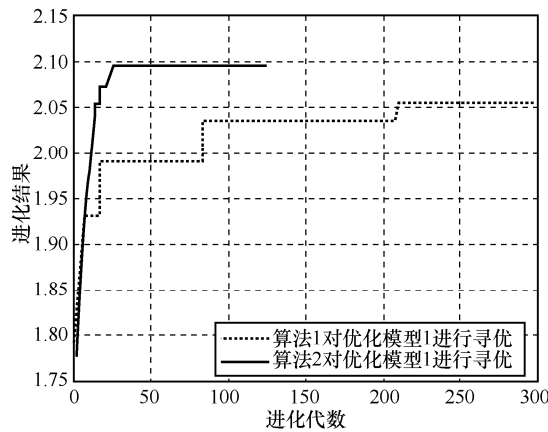


图 3 算法求解优化模型 1 的进化过程对比

利用算法 1 和算法 2 分别对优化模型 3 进行求解，进化结果随进化代数的变化情况如图 4 所示。算法 2 求得优化模型 3 的最优结果为 43.321 6，算法 1 求解优化模型 3 的结果为 42.037 2。

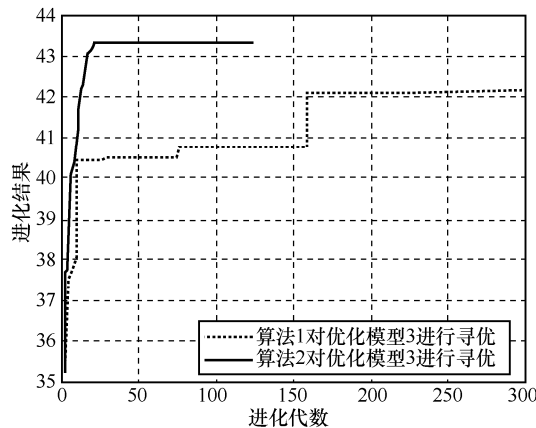


图 4 算法求解优化模型 3 的进化过程对比

从图 3 和图 4 的对比分析可知，人工免疫算法 1 在求解模型 1 和模型 3 时收敛速度慢且容易陷入局部最优值，算法 2 在求解模型 1 和模型 3 时则可以更快速地求解并收敛至最优解。

通过对算法 1 和算法 2 求解优化模型过程的对比分析可知，算法 2 具有更快的求解速度。在算法 1 中，随机生成初始种群抗体、对不可行解抗体进

行替代的步骤增加了算法的运算时间。算法 2 采用疫苗接种提高种群中可行解抗体的数目，通过抗体修复可修复不可行解抗体，确保种群中可行解抗体的多样性，显著提高算法搜索效率及收敛速度。

5.2.2 改进人工免疫算法求解模型分析

利用算法 2 分别对 3 种优化模型进行求解，优化结果随进化代数的变化情况如图 5 所示。由于各优化模型的最优值结果不同，本文进行了归一化处理。

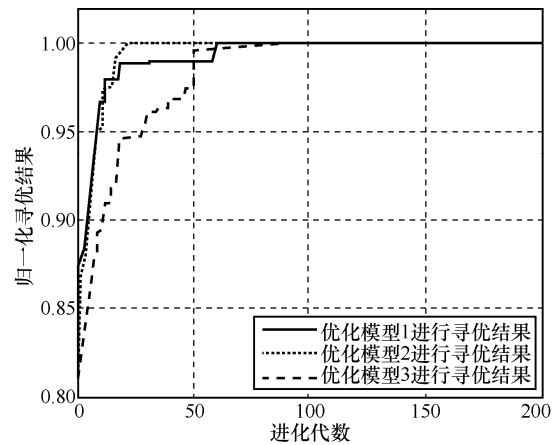


图 5 算法 2 对 3 种优化模型的求解进化过程

从图 5 可知，随着算法 2 的不断进化，可以获得不同目标函数下网络的抗毁性优化结果，表明了改进算法的有效性。在该算法中，对抗原亲和度较优的抗体经过克隆选择、克隆扩增、抗体基因变异后其亲和度逐步提高，优良的抗体得以保留。因此，本文改进算法是一种基于精英保留策略的进化算法。

5.3 拓扑结构分析

运用算法 2 对 3 种模型进行求解分别获得 3 个相应网络（网络 1、网络 2 和网络 3）的最优抗毁性指标值及相关统计特性，如表 2 所示。

表 2 不同优化模型对应网络的最优抗毁性指标值

参数	网络 1	网络 2	网络 3
最优指标值	2.098 0	12.737 4	43.321 6
平均度	3.777 8	3.777 8	3.777 8
同配性系数	0.201 9	-0.062 5	-0.117 4
平均距离	3.993 5	2.888 9	3.666 0
平均聚类系数	0.583 3	0.583 3	0.611 1

分析表 2 可知以下几点。

1) 3 种网络的节点平均度相同，这是由于网络中节点总数和边总数固定，算法 2 在变异和修复过程中保证了网络边数目的稳定。

2) 由网络的同配性系数可知，网络 1 是同配结构，而网络 2 和网络 3 是异配结构，表明基于攻击策略的抗毁性指标优化使网络节点间的连接更加均匀。

3) 基于不同抗毁性指标获得优化网络的统计特征不同，表明网络统计特征与网络结构抗毁性密切相关，考虑攻击策略的抗毁性优化对网络结构有较大影响。

5.4 抗毁性分析

利用算法 2 求得 3 种抗毁性指标对应的优化网络，分析其抗毁性如何体现指标的优劣，因此分析在破坏条件下网络的抗毁性过程如下：首先，采用按度攻击节点和按边介数攻击边 2 种攻击方式；其次，在攻击过程中采用剩余网络的自然连通度指标度量网络的抗毁性。

按度攻击优化网络 1 和优化网络 2，即按照节点度的大小顺序删除网络中节点，获得剩余网络自然连通度的变化情况，如图 6 所示。

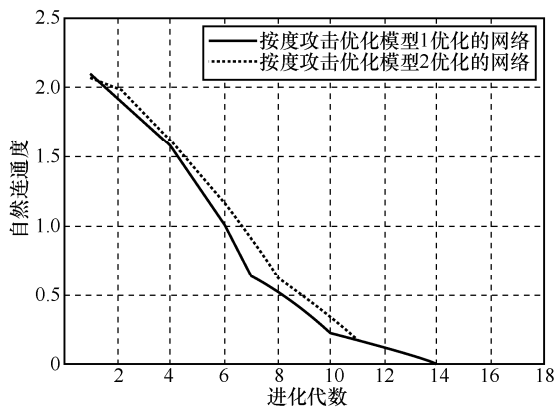


图 6 按度攻击后剩余网络的自然连通度

按边介数对优化网络 1 和优化网络 3 进行攻击，即按照边介数的大小顺序删除网络中边，获得剩余网络自然连通度变化情况如图 7 所示。

算法 2 在运行时对不同的优化模型均采用相同的终止准则 $n_{max} = 100$ ，但是由于求解网络中节点度和边介数算法的时间复杂度不同，算法在求解不同优化模型时的总运行时间也不同。在联想 M4500（4 核，4GB 内存）计算机上利用算法 2 求解 3 种模型，对 3 种模型分别求解 50 次获得的平均运算时间如表 3 所示。

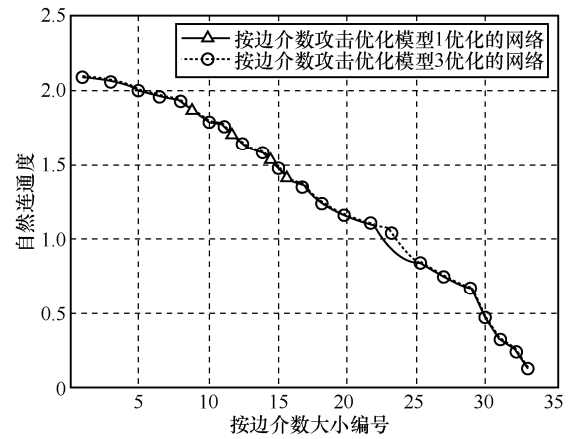


图 7 按边介数攻击后剩余网络的自然连通度

表 3 算法 2 对 3 种优化模型求解运算时间

模型	时间/s
优化模型 1	453
优化模型 2	584
优化模型 3	4 615

综合分析图 6、图 7 及表 3 可知以下 2 点。

1) 由图 6 可知，按度攻击网络节点时，虽然网络 1 的初始自然连通度大于网络 2，但在网络在被删除 2 个以上节点后，网络 2 对应各剩余网络的抗毁性明显优于网络 1 对应的剩余网络；同时网络在遭受攻击直至抗毁性为 0 的过程中，网络 2 的总自然连通度也明显优于网络 1。由以上分析可知，采用 λ_d 优化的网络比单纯采用 λ 优化的网络具有更高的抗毁性。

2) 由图 7 和表 3 可知，按边介数攻击网络边，优化网络 1 和优化网络 3 的自然连通度变化基本相同，这与文献[5]中的结果相同，但优化模型 1 的求解运算时间上更高效，具有更少的迭代寻优时间。因此，针对网络遭受边攻击情况下的抗毁性研究，采用指标 λ 、 λ_d 为目标函数的优化网络的抗毁性相同，但前者求解的时间更高效。

6 结束语

本文针对防空多传感器网络拓扑结构的抗毁性优化，综合考虑攻击策略、网络连通性、网络节点度约束，建立网络抗毁性优化模型。为提高人工免疫算法求解模型的速度，在算法中添加接种疫苗、免疫抗体修复步骤。仿真分析表明优化模型和算法的有效性，同时获得基于按度攻击策略的网络抗毁性优化可以显著提高网络面对度攻击时的抗

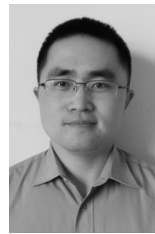
毁性。

在考虑攻击策略及抗毁性指标时,本文着重研究的是完全信息条件下的攻击策略,而不完全信息条件下的攻击是一种更接近空防体系对抗实际的情形,因此下一步需要从攻和防这 2 个角度,深入研究不完全信息条件下防空多传感器网络的抗毁性优化。

参考文献:

- [1] 张文, 任全. 防空多传感器网络的拓扑优化模型[J]. 现代防御技术, 2006, 34(6):74-78.
ZHANG W, REN Q. Topological optimization model of air defense multisensor network[J]. Modern Defense Technology, 2006, 34(6):74-78.
- [2] WU J, BARAHONA M, TAN Y, et al. Natural connectivity of complex networks[J]. China Physical Letters, 2010, 27(7): 078902.
- [3] WU J, BARAHONA M, TAN Y, et al. Spectral measures of structural robustness in complex networks[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A, 2011, 41(6):1244-1252.
- [4] 黄仁全, 李为民, 董雯, 等. 基于复杂网络抗毁性与 ADMPDE 算法的网络拓扑结构优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(5): 60-65.
HUANG R Q, LI W M, DONG W, et al. Research on the topology structure optimization of network based on the invulnerability of complex network and the ADMPDE algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(5): 60-65.
- [5] 吴俊. 复杂网络拓扑结构抗毁性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
WU J. Research on invulnerability of complex network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [6] 董飞鸿, 吕晶, 巩向武, 等. 空间信息网络结构抗毁性优化设计[J]. 通信学报, 2014, 35(10): 51-58.
DONG F H, LYU J, GONG X W, et al. Optimization design of structure invulnerability in space information network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(10): 51-58.
- [7] 贺筱军, 李为民, 黄仁全. 基于攻击策略的复杂网络拓扑结构优化模型[J]. 电讯技术, 2014, 54(9): 1286-1291.
HE X J, LI W M, HUANG R Q. An optimization topological structure model for complex network based on attack strategy[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9): 1286-1291.
- [8] ZHENG Q J, JONATHAN Q M W. An improved artificial immune algorithm with application to multiple sensor systems[J]. Information Fusion, 2010, 11(2): 174-182.
- [9] ALIREZA A. An innovative artificial immune optimization algorithm for solving complex optimization problems[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2014, 6(6): 409-415.
- [10] 朱思峰, 刘芳, 柴争义. 基于免疫计算的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 106-110.
ZHU S F, LIU F, CHAI Z Y. Immune computing-based base station location planning in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 106-110.

作者简介:



孙成雨(1989-), 男, 山东临沂人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为防空反导网络优化、网络抗毁性等。

申卯兴(1956-), 男, 陕西合阳人, 博士, 西京学院教授, 主要研究方向为网络优化、应用统计等。

盛浩(1984-), 男, 湖北天门人, 93861 部队工程师, 主要研究方向为网络协同、协同作战检验。

肖金科(1990-), 男, 河南永成人, 空军工程大学博士生, 主要研究方向为导弹防御系统建设。