

# 考虑需求变化的指挥信息系统韧性优化研究

岳地久<sup>1,2</sup>, 李建华<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 王哲<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 94755 部队, 福建漳州, 363000;  
3. 国防科技大学信息与通信学院, 武汉, 430010)

**摘要** 现有指挥信息系统韧性研究忽略了需求变化对其韧性过程的影响, 无法反映系统遭受攻击后的韧性能力与任务需求的关系。引入正常功能水平、最低功能水平和预期功能水平 3 个变量, 提出需求显著上升、需求基本持平和需求显著下降 3 种韧性模式; 针对韧性过程中功能水平下降和自适应恢复 2 个阶段, 提出抵抗力增强和冗余度提升策略, 定义措施效果函数, 建立韧性优化模型, 运用分组背包问题的近似动态规划算法求解; 以某区域联合防空指挥信息系统为例, 进行仿真实验, 验证需求变化对指挥信息系统韧性优化的影响。结果表明, 为适应复杂恶劣战场环境下不同场景作战需求, 指挥信息系统应选用合理的韧性模式, 并统筹考虑敌方攻击强度、经费预算和应对策略等相关因素。

**关键词** 韧性优化; 指挥信息系统; 背包问题

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.04.014

**中图分类号** TP273 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)04-0092-10

## Research on Resilience Optimization in Command Information System in Consideration of Requirement Change

YUE Diju<sup>1,2</sup>, LI Jianhua<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>3</sup>

(1. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Unit 94755, Zhangzhou 363000, Fujian, China; 3. Information and Communication School,  
National University of Defense Technology, Wuhan 430010, China)

**Abstract** Now available research on the resilience in Command Information System is in ignorance of the impact of demand changes on its resilience process, and is unable to reflect the relationship between the resilience ability of the system after being attacked and task requirements. Three variables of normal performance, lowest performance and expected performance are introduced, and three resilience models of significantly increased demand, basically flat demand and significantly decreased demand are proposed. In view of the two stages of functional level decline and adaptive recovery in the process of resilience, a strategy of resistance enhancement and redundancy enhancement strategies is proposed, the measure effect function is defined, a resilience optimization model is established, and the approximate dynamic programming algorithm of the group knapsack problem is used to solve the problem. Taking a certain of Regional Joint Air Defense Command Information System as an example, a simulation experiment is conducted, and the

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(62271500); 陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0728)

作者简介: 岳地久(1986-), 男, 陕西镇安人, 博士生, 研究方向为信息通信组织与运用。E-mail: yuedijiu@163.com

**引用格式:** 岳地久, 李建华, 王刚, 等. 考虑需求变化的指挥信息系统韧性优化研究[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(4): 92-101. YUE Diju, LI Jianhua, WANG Gang, et al. Research on Resilience Optimization in Command Information System in Consideration of Requirement Change [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(4): 92-101.

impact of demand changes on the resilience optimization of the Command Information System is verified. The results show that in order to adapt to the operational requirements of different scenarios in complex and harsh battlefield environment, the Command Information System should select a reasonable resilience mode, and the comprehensive relevant factors, such as enemy's attack intensity, funding budget, coping strategies, and so on, should be taken into account.

**Key words** resilience optimization; command information system; knapsack problem

基于网络信息体系的联合作战中,指挥信息系统起着聚合战场空间各类传感器、指控系统、武器平台等要素的重要作用<sup>[1]</sup>,一旦遭敌攻击导致节点失效、链路损毁、结构碎裂,将对整个作战体系带来致命伤害。指挥信息系统韧性是指系统面对攻击破坏,具有的维持一定功能水平以持续完成作战任务的能力<sup>[2]</sup>。由于指挥信息系统在军事对抗中容易成为敌方攻击目标,因此如何优化其韧性是指挥信息系统规划设计、运维管理和应急抢修中必须考虑的问题。

文献[3]提出韧性指挥信息系统的概念、构建机理与实现方法;文献[4~7]研究了指挥信息系统韧性的量化评估方法;文献[8~10]从不同角度建立了指挥信息系统韧性分析模型。总的来看,对指挥信息系统韧性优化的研究还较为滞后,缺乏适用于指挥信息系统韧性优化的方法与思路。此外现有研究大多借助“韧性曲线”,采用“评估指标+计算模型”的方法定量评估指挥信息系统韧性,这些为深入理解指挥信息系统韧性过程提供了理论基础,并能够在一定程度上衡量指挥信息系统韧性能力的高低,但是却忽视了一个迫切的问题:指挥信息系统能否在遭受攻击后继续支撑作战任务完成。

正常情况下,指挥信息系统和作战任务之间维持着一种动态平衡的关系:指挥信息系统向作战任务提供支撑,而作战任务向指挥信息系统提出需求,牵引指挥信息系统结构、功能不断优化调整<sup>[11]</sup>。指挥信息系统遭受攻击后,作战任务很有可能发生变化,将对系统提出新的需求,而且任务变化引起的需求变化通常是非常显著且不可忽略的。因此,不能仅仅从指挥信息系统这一个角度出发来分析系统受攻击后的功能水平变化情况,而忽略了由攻击导致的作战任务变化对系统提出的新需求。

本文改进以往研究中对需求变化的忽略,着重考虑需求变化对指挥信息系统韧性过程带来的影响,通过引入正常功能水平、最低功能水平、预期功能水平3个变量,把指挥信息系统韧性分为需求显著上升、需求基本持平和需求显著下降3种模式,并分别建立指挥信息系统韧性优化模型。

## 1 指挥信息系统韧性过程的理论分析

### 1.1 传统的指挥信息系统韧性曲线

韧性泛指系统能够预测、抵制、吸收、适应扰动,并从扰动中迅速恢复的能力<sup>[12-13]</sup>。指挥信息系统韧性体现为:系统尽管不是坚不可摧不会被破坏,而是在遭受攻击后能够快速适应与恢复,持续保障作战任务完成。指挥信息系统韧性曲线描述了其功能水平在攻击前后的变化过程,如图1所示。据此曲线,部分学者把指挥信息系统韧性划分为攻击预防、破坏扩散和响应恢复3个阶段<sup>[14-15]</sup>;也有学者指出,对应上述3个阶段,指挥信息系统韧性主要包含3种能力:抵抗能力、吸收能力和恢复能力<sup>[16]</sup>。但传统韧性曲线未反映出需求变化和恢复能力之间的关系。

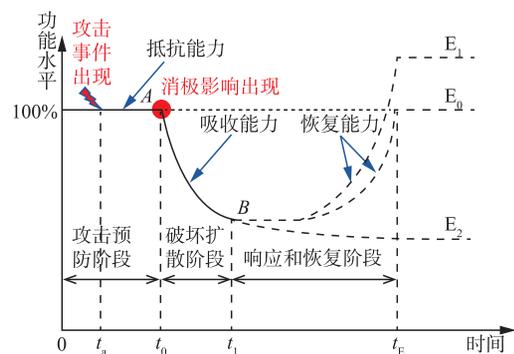


图1 考虑需求变化的指挥信息系统韧性曲线

首先,没有体现出指挥信息系统遭受攻击后短时间内自适应恢复能力。指挥信息系统具有复杂网络结构,自适应恢复能力是其典型属性,源于系统结构对环境变化的一种“弹性”。遭受攻击后,指挥信息系统自适应恢复和长期恢复是截然不同的2个阶段,自适应恢复是系统借助其已有的冗余机制,进行备份接替、任务调整等,不需要额外投入外部资源;而长期恢复需要依靠外部力量和资源进行恢复。图1中系统功能水平从B点恢复至原水平,多指投入外部资源的长期恢复。

其次,没有体现出指挥信息系统对于需求变化所采取的相应功能水平的调整。指挥信息系统遭受攻击后作战任务可能发生变化,为保障作战任务继续完成,不同的需求下系统应当恢复至不同的功能

水平,真正体现出“韧性”的含义。系统遭受攻击后需求功能水平可大致分为 3 种情况,初始水平( $E_0$ )、高于初始水平( $E_1$ )、低于初始水平( $E_2$ )。由于需求不同,指挥信息系统自适应恢复的要求也存在差异,传统的韧性曲线没有涵盖自适应恢复阶段,更不能反映自适应恢复水平及其和需求的平衡关系。考虑需求变化的韧性曲线如图 1 所示,系统有时候要自适应恢复到一个很高的水平,有时可能不需要不高,或者有时完全不需要。

### 1.2 指挥信息系统韧性过程中 3 个功能水平变量

为了弥补传统的指挥信息系统韧性曲线不足,这里引入如下 3 个功能水平变量:

**正常功能水平(normal performance, NP):**指挥信息系统正常情况下的功能水平,也就是攻击发生以前各个时刻功能水平。对指挥信息系统而言,遭受攻击是低概率事件,NP 可用指挥信息系统现有功能水平表示,可通过一段时间的实测数据得到。

**最低功能水平(lowest performance, LP):**指挥信息系统遭攻击后短时间内功能水平下降至的最低值。指挥信息系统是网络化结构,系统功能具有涌现性,这个最低功能水平应充分考虑级联失效的影响。可以通过作战仿真、兵棋推演等获得。

**预期功能水平(expected performance, EP):**指挥信息系统在遭受攻击后短时间内的预期功能水平,是指挥信息系统自适应需要达到的目标。攻击发生后,指挥信息系统作战任务可能发生变化,需求也会跟着变化。EP 通常无法直接测量,由需求预测或者目标设定得到。

### 1.3 指挥信息系统遭攻击后短时间内的韧性过程

如图 2(a)所示,当攻击发生时,指挥信息系统由于本身的脆弱性,其功能水平在极短时间内由 NP 下降至 LP。攻击造成功能水平下降瞬时完成,由于指挥决策、命令传递等,作战任务调整具有一定的时延,因此需求的变化会晚于指挥信息系统功能水平的下降。为适应需求变化,指挥信息系统需要在攻击后的短时间内,迅速自适应恢复至 EP,以支撑作战任务完成。其中从 NP 到 LP 的直线下降是指挥信息系统内部对攻击的反应,而 LP 到 EP 的反弹回升是指挥信息系统对作战任务变化的适应。LP 和 NP 的差距单纯描述了指挥信息系统本身的脆弱性,LP 和 NP 的差距越大,指挥信息系统应对攻击的抵抗能力越差。如果指挥信息系统能够尽量抵抗攻击,使 LP 不要远离 NP,并且短时间内自适应得尽量多以达到 EP,那么其在攻击后短时间内的韧性就比较强。

指挥信息系统向作战任务提供所需的信息功能

支撑,然而由于攻击后作战任务变动的复杂性,有些功能属于完成任务急需的核心功能,需求会显著上升;有些功能属于完成任务所需的一般功能,保持原有水平即可保障任务完成,需求可能基本持平;而有些功能可能与作战任务关系不大,需求会有所下降。下文从需求与功能水平之间关系进行分析。

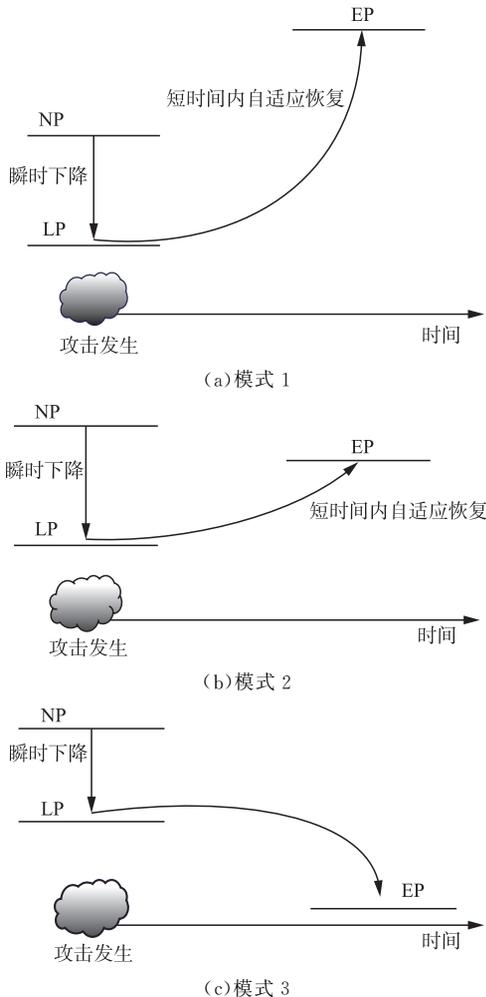


图 2 指挥信息系统受攻击后短时内韧性过程

### 1.4 基于需求变化的指挥信息系统韧性分类

$NP \geq LP$ , 根据 EP 对于 NP、LP 的相对大小关系,如图 2 所示,区分以下 3 种模式。

**模式 1:**需求显著上升, $EP > NP > LP$ 。

如图 2(a)所示,系统提供的功能对于作战任务来说是关键核心功能,攻击后短时间内功能需求迅速上涨,然而系统本身具有一定的脆弱性。这是指挥信息系统最具挑战的模式,攻击发生后,即便指挥信息系统完全回弹至攻击前功能水平,也不能适应攻击后迅猛增长的需求。

**模式 2:**需求基本持平, $NP \geq EP > LP$ 。

如图 2(b)所示,尽管系统提供的功能很重要,但攻击后短时间内的需求变化不大,造成系统韧性无法满足需求的原因是抵抗能力不足。这种模式,意味着指挥信息系统如果尽量抵抗攻击,保证 LP

接近 NP,那么攻击后指挥信息系统功能水平就能满足需求,也就不需要额外关注自适应过程;反之如果指挥信息系统无法有效抵抗攻击,导致 LP 远离 NP,那么自适应也一样必不可少。

模式 3:需求显著下降,  $NP > LP > EP$ 。

如图 2(c)所示,系统提供的功能并不紧急,即使攻击导致功能水平有所降级,但依然能够保障任务完成,符合需求。该模式存在的原因是因为指挥信息系统功能水平的过度冗余。

## 2 指挥信息系统韧性优化模型

### 2.1 指挥信息系统韧性增强措施

Bruneau 等<sup>[17]</sup>在基础设施系统韧性研究中,提出了韧性的 4 个维度:鲁棒性(robustness)、冗余性(redundancy)、资源充足性(resourcefulness)和快速性(rapidity)。该韧性 4R 框架获得了各领域学者们的广泛认可<sup>[18]</sup>,本文主要从这 4 个维度分析指挥信息系统韧性增强措施。定义韧性增强措施的效果为,采取措施前后系统韧性水平的变化情况。定义措施水平为措施的实施程度。建立措施效果函数—措施水平函数,大致可以划分为凹函数、线性函数和凸函数 3 类<sup>[19]</sup>。针对不同的韧性提升措施,选用不同的措施效果函数。

瞬时下降与自适应恢复是指挥信息系统韧性过程中的 2 个不同阶段。前者体现了指挥信息系统本身的脆弱性。换言之,遭受攻击后,指挥信息系统功能水平会下降到什么程度,这种下降的程度取决于系统本身的“抗打击”能力。为减小下降程度,韧性增强措施必须是针对指挥信息系统自身抵抗能力的。在韧性 4R 框架下,增强指挥信息系统抵抗力的措施。

对于抵抗力提升措施来说,无论优化到何种程度,直观看,面对攻击,系统功能水平还是会下降,特别是遭受高强度攻击时,系统加强的再坚固也无法保证功能水平完全不下降。优化后 LP 越是接近 NP,每单位措施水平提升效果也就越低,直至趋近于零。根据这样的趋势,抵抗力提升措施效果函数选择凹函数的形式:

$$v_s = f(l_s) \quad (1)$$

式中: $v_s$  为抵抗力提升措施的效果; $l_s$  为措施水平; $f$  是关于  $l_s$  的凹函数,满足  $l_s = 0$  (初始状态)时  $v_s = f(l_s) = LP$ ,当  $l_s \rightarrow \infty$  时  $v_s = f(l_s) \rightarrow NP$ 。

自适应恢复阶段针对的是指挥信息系统适应需求变化的能力。换言之,攻击致使系统功能水平下降时,指挥信息系统为适应需求,运用自身应变机制快速恢复功能水平。提升系统自适应恢复能力的方

法主要是提高系统的冗余度,当需求增长时,指挥信息系统能够运用储备、备份等,以迅速适应增长的需求。在韧性 4R 框架下,这类措施对应于冗余性、资源充足性和快速性的一部分措施。最为常用的就是提升指挥信息系统的冗余度,常见的措施有节点备份、链路冗余、物资储备等。

对于冗余度提升措施来说,直观看,措施水平每提升一个层次,备用手段就会多一点,则会起到额外的措施效果。因此,冗余度提升措施效果函数选择线性函数的形式:

$$v_t = g(l_t) \quad (2)$$

式中: $v_t$  表示冗余度提升措施效果; $l_t$  表示措施水平; $g$  是关于  $l_t$  的某个线性函数,满足当  $l_t = 0$  时  $v_t = g(l_t) = 0$ 。

### 2.2 指挥信息系统韧性优化模型构建

对指挥信息系统韧性进行优化分析,就是通过定量优化模型的方法在备选措施中进行选择,使韧性增强效果最好。韧性优化的目标函数为最大化韧性增强效果,即:

$$\max \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \quad (3)$$

式中: $x_s, x_t$  是布尔变量,表示韧性增强措施  $s$  (或  $t$ ) 是否被最优措施组合选中;若措施  $s$  被选中,  $x_s = 1$ , 反之,  $x_s = 0$ ;  $n_s, n_t$  分别是抵抗力提升措施和冗余度提升措施的个数,  $v_s, v_t$  分别是措施  $s, t$  的效果。

为了增强指挥信息系统韧性,保证指挥信息系统遭受攻击后至少能满足需求,3 种模式下韧性优化约束条件是不同的。第 1、2 种模式,系统都需要做到功能水平瞬时损失尽量小,而且短时间内回弹尽量大,区别在于,第 1 种模式这 2 种效果叠加在一起要大于 EP 且越大越好,而第 2 种模式这 2 种效果叠加在一起要大于 EP 但不超过 NP。第 3 种模式已经满足需求,暂不需要优化。因此前 2 种模式下,约束条件分别为:

$$\sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \geq EP - LP \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \geq EP - LP \\ \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \leq NP \end{cases} \quad (5)$$

各类措施均需要消耗人力、物力和财力,本文统一转化为需要花费资金。采取各类措施的总花费不能超过预算,增加关于预算的约束条件:

$$\sum_{s=1}^{n_s} x_s c_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t c_t \leq C \quad (6)$$

式中： $c_s, c_t$  分别是措施  $s, t$  的成本。

至此，指挥信息系统韧性优化问题可以归结为，针对系统面临的攻击，在一定经费预算约束下，借由韧性增强措施，改善指挥信息系统瞬时下降和短时间内自适应 2 个阶段，使指挥信息系统韧性符合需求。

指挥信息系统韧性优化步骤为：

- 1) 建立指挥信息系统模型，选定合适的功能水平度量指标，确定指挥信息系统的 NP；
- 2) 分析攻击的特点，比如强度、作用方式等，建立攻击模型；
- 3) 在指挥信息系统模型中模拟攻击的发生和蔓延，充分考虑级联失效，确定指挥信息系统的 LP；
- 4) 通过需求分析或者目标设定的方法，确定指挥信息系统的 EP；
- 5) 设定总预算约束  $C$ ；
- 6) 分别收集抵抗力提升措施  $s$  和措施水平  $l_s$ ，冗余度提升措施  $t$  和措施水平  $l_t$ ，要求各项措施相互独立；分别运用措施效果函数估计措施的效果  $v_s, v_t$ ；分别估算措施成本  $c_s, c_t$ ；
- 7) 根据指挥信息系统韧性的不同模式建立如下韧性优化模型：

第 1 种：

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \\
 \text{s. t. } & \sum_{s=1}^{n_s} x_s c_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t c_t \leq C \\
 & \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \geq \text{EP} - \text{LP} \\
 & x_s \in \{0, 1\}, \quad x_t \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

第 2 种：

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \\
 \text{s. t. } & \sum_{s=1}^{n_s} x_s c_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t c_t \leq C \\
 & \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \geq \text{EP} - \text{LP} \\
 & \sum_{s=1}^{n_s} x_s v_s + \sum_{t=1}^{n_t} x_t v_t \leq \text{NP} \\
 & x_s \in \{0, 1\}, \quad x_t \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

### 2.3 指挥信息系统韧性优化模型求解

背包问题(knapsack problem)<sup>[20-21]</sup>是运筹学中典型的 NP-hard 问题，广泛应用在资源分配、货物装载和投资管理等方面。本文运用背包问题算法对上述优化模型进行求解，即：现有一个确定容量 capacity(对应预算)的背包；把不同类型不同水平的

韧性增强措施看作一系列给定的项目(item)，每个项目都有着自身的重量 weight(措施的成本)和价值 value(措施的效果)；把同一类型不同水平的措施分为一组(group)，组内项目相互冲突，至多能入选一项；在不超背包容量情况下，如何选定项目装入背包，使项目组合价值最大。

运用近似动态规划算法<sup>[22]</sup>来求解该分组背包问题。假设背包容量  $C$ ，分组数量  $K$ ， $w(k, i), v(k, i)$  分别表示组合  $k$  中项目  $i$  的重量和价值， $A \in R^{C+1}$ ，初始为零向量，用  $j = 1, 2, \dots, C$  进行编号。通过如下 3 个 FOR 循环，得到  $A(C+1)$  为问题最优值，即项目组合的最大价值。通过回溯算法，即可确定问题最优解。

```

for k=1,2,...,K
  for j=C+1,C,C-1,...,1
    for i=1,2,...,N
      if j>w(k,i)
        if A(j-w(k,i))+v(k,i)>A(v)
          A(v)=A(j-w(k,i))+v(k,i)
        end if
      end if
    end for
  end for
end for
end for
    
```

## 3 仿真实验

### 3.1 指挥信息系统实例

以红方某战役方向区域联合防空指挥信息系统为例。系统结构如图 3 所示，包含 9 个指挥节点，4 个情报处理节点，12 个感知节点以及 8 个执行节点。各节点明细如表 1 所示。

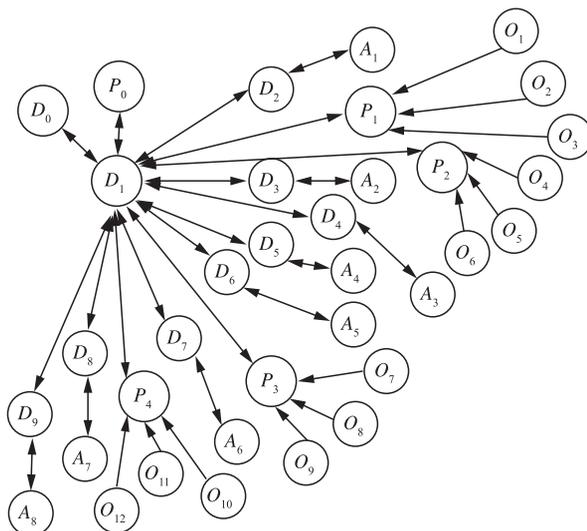


图 3 某区域联合防空指挥信息系统结构示意图

表1 红方区域联合防空指挥信息系统节点明细

指挥信息系统节点	节点类型	节点编号
上级指挥机构		$D_0$
区域控制中心	决策	$D_1$
航空 101,102,103,104	控制	$D_2, D_4, D_6, D_8$
旅指挥所	单元	
地导 201,202,203,204		$D_3, D_5, D_7, D_9$
旅指挥所		
战区情报中心	情报	$P_0$
雷达 301,302,303,304	处理	$P_1, P_2, P_3, P_4$
旅指挥所	单元	
	情报	$O_1, O_2, O_3, O_4, O_5$
各雷达站	获取	$O_6, O_7, O_8, O_9,$
	单元	$O_{10}, O_{11}, O_{12}$
111,112,113,114	响应	$A_1, A_3, A_5, A_7$
战机编队	执行	
211,212,213,214	单元	$A_2, A_4, A_6, A_8$
地导营		

该指挥信息系统存在的问题主要有:①面临蓝方多元化手段攻击威胁,如超高声速武器穿透性打击、强电磁干扰、赛博攻击等;②蓝方攻击的不确定性,如攻击强度、攻击目标、攻击时间尚不可知等;③系统内各节点紧密相关,存在级联效应,一个节点失效,可能导致整个系统功能受损;④系统抵抗能力还存在薄弱环节,如部分节点伪装防护效果不佳,部分装备抗电磁干扰能力不强,部分系统防护工事还不完善;⑤系统对攻击的应对准备还不充分,虽然部分节点、链路、装备和物资等预设有冗余备份,但是不成体系,缺乏优化。因此,亟需对该指挥信息系统韧性进行优化,以采取最有效的措施,增强指挥信息系统韧性,使其在面对攻击时能够持续保障作战任务完成。

此外,该指挥信息系统是红方最主要的作战指挥工具,专家做出如下评估:“由于指挥所受损以及缺乏有效的准备和反应,是面临攻击时造成指挥中断的两大主要因素”。其中,前一个因素“指挥所受损”对应了指挥信息系统对攻击的抵抗阶段,而后一个因素“有效的准备和反应”则对应了指挥信息系统的自适应恢复阶段。这也印证了前文提出的指挥信息系统受攻击后短时间内韧性过程包含2个阶段的合理性。

### 3.2 指挥信息系统3个功能水平变量计算

指挥信息系统对空指挥引导容量,是指在整个战斗过程中,在可用截击地段内经过多次引导,指挥信息系统最多能够引导的我机作战单元批数<sup>[23]</sup>。对空指挥引导容量,由区域情报探测质量、指控系统辅助决策能力、通信系统容量、战机出动数量等决定(这里假设指挥人员数量足够),可以综合反映出指挥信息系统的运行状态。本文用指挥信息系统的对空指挥引导容量来表征系统的功能水平。经统计, NP 为 150 批。

指挥信息系统遭受攻击的受损程度与蓝方攻击强度有关。根据蓝方攻击的精度、广度、烈度,把攻击强度由弱至强,依次划分为1~10个等级,其中10级为“一切精心构筑的防御设施被摧毁”。通过数据统计、案例分析和模拟仿真,调整并拟合出该指挥信息系统的脆弱性函数  $f(q)$ ,得到:

$$LP = NP \times f(q) = 150 \times \frac{1}{1 + (q/5)^5} \quad (9)$$

式中: $q$ 为攻击强度, $q \in \{1, 2, \dots, 10\}$ ;  $f(q)$ 为系统的脆弱性函数,反映了系统面对攻击时功能水平下降的趋势。

EP通常由需求预测或目标设定的方法得到。蓝方攻击强度越大,则红方反击的力度也越大,出动兵力规模也就越大。根据这样的趋势,结合专家对航空弹药和兵力出动数量的需求预测,本文采用指数型关系模拟攻击后对空指挥引导容量需求和攻击强度的大致关系,得到:

$$EP = NP \times \varphi(q) = 150 \times e^{q/12} \quad (10)$$

式中: $\varphi(q)$ 为需求预测函数,即攻击发生后,指挥信息系统对空指挥引导容量要达到正常状态下的  $e^{q/12}$  倍。

由式(10)可得,该指挥信息系统韧性过程呈现出模式一所描述的特点,即当攻击发生后,系统有  $EP > NP > LP$ ,这对韧性优化提出了很高的要求。

### 3.3 指挥信息系统韧性增强措施

该指挥信息系统韧性增强措施主要集中在设施设备加固、物资储备、应急预案这几方面,共收集到了如表2所示的韧性增强措施。

表2 指挥信息系统韧性增强措施

分类	措施名称	措施水平	措施成本 /百万元
抵抗	加固各个指挥机构 $s_1$	$l_1$ :防护能力提升20%	15.0
		$l_2$ :防护能力提升50%	30.0
		$l_3$ :防护能力提升60%	50.0
提升	换装抗干扰对空电台 $s_2$	$l_1$ :部分更换	3.0
		$l_2$ :更换半数以上	5.0
		$l_3$ :全部更换	10.0
提升	提高设备预防性保养频率 $s_3$	$l_1$ :提高至1年1次	6.0
		$l_2$ :提高至半年1次	9.8
		$l_3$ :提高至1季度1次	12.0
冗余度提升	重要节点冗余备份 $t_1$	$l_1$ :只备份区域控制中心	9.0
		$l_2$ :备份旅以上指挥机构	32.0
		$l_3$ :全部节点建立备份	50.0
提升	通信链路冗余 $t_2$	$l_1$ :现有冗余水平	11.0
		$l_2$ :现有水平增1倍	25.0
		$l_3$ :现有水平增2倍	60.0
提升	物资器材储备 $t_3$	$l_1$ :优化现有储备种类	4.0
		$l_2$ :现有储备水平加倍	8.0
		$l_3$ :现有储备水平3倍	14.0

以上抵抗力提升措施,如采用抗干扰电台,可降低地空通信被干扰的机率;提高装备预检维护的频率,能提升装备可用度。这些措施主要作用是提升LP。以上冗余度提升措施,如指挥节点备份,通信链路冗余和物资器材储备,主要是用来提升指挥信息系统自适应恢复能力。两类措施很大程度上也会

受到蓝方攻击强度的影响,采用类似脆弱性函数对其进行进一步修正。综合考虑历史数据、实际经验和建模仿真,本文对各措施效果函数参数进行了合理的估计,各措施效果曲面如图4所示,其中 $x$ 轴为措施水平, $y$ 轴为攻击强度, $z$ 轴为措施效果。对于各项措施成本,由相关领域专家进行估算,计入表2。

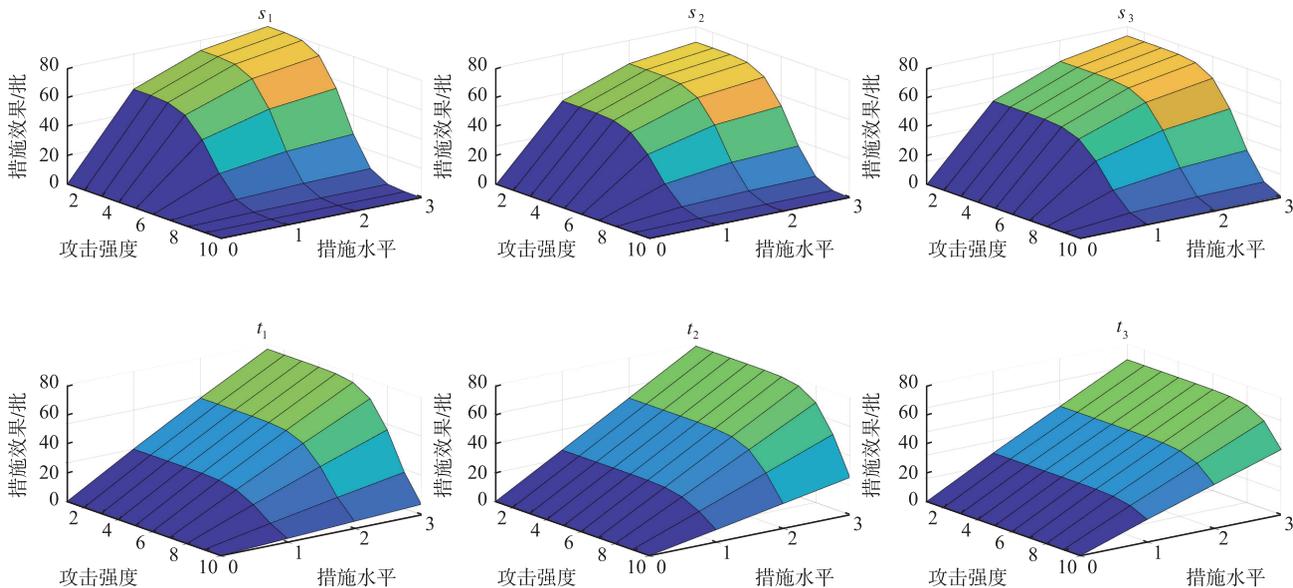


图4 指挥信息系统韧性增强措施效果示意图

### 3.4 韧性优化实验及结果分析

#### 1) 实验 1: 韧性优化效果验证。

根据红方指挥信息系统 3 个功能水平变量和蓝方攻击强度之间的函数关系,韧性优化目标如图 5 所示,其中红色区域为抵抗力提升措施的作用域,绿色区域为冗余度提升措施作用域。以中等攻击强度  $q=5$ ,总预算为 150 时,进行优化实验。模式 1 中,优化模型目标函数最大值 220,措施组合为  $\{2, 3, 3, 3, 2, 3\}$ ,即:①加固各个指挥机构,使其防护能力提升 50%;②全部换装抗干扰对空电台;③提高设备预防性保养频率至 1 季度 1 次;④全部节点建立备份;⑤通信链路冗余水平增加 1 倍;⑥现有物资储备水平增加 3 倍。模式 2 中,优化模型目标函数最大值 150,措施组合为  $\{3, 2, 3, 0, 0, 3\}$ 。模式 2 中,冗余度提升措施  $t_1, t_2$  未入选,入选措施为:①加固各个指挥机构,使其防护能力提升 60%;②换装一半抗干扰对空电台;③提高设备预防性保养频率至 1 季度 1 次;④现有物资储备水平增加 3 倍。

假设  $t=2$  时系统遭受攻击,根据该优化结果,蓝方攻击强度为 5 时,红方指挥信息系统遭受攻击

后 3 种模式下韧性过程如图 6 所示。模式 1:系统在韧性增强措施作用下,功能水平短暂下降后回弹至一个更高的水平,达到任务需求标准;模式 2:系统在韧性增强措施作用下,系统功能水平短暂下降后,虽然恢复到了初始水平,但是由于任务需求上涨,未能满足需求;模式 3,系统功能水平明显下降,不再恢复,无法保障任务完成。

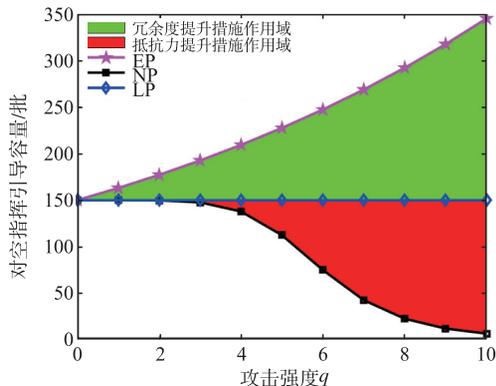


图5 指挥信息系统韧性增强措施作用域

由实验结果可得,如果不考虑需求变化,指挥信息系统遭受攻击后虽然功能水平也表现出“韧性曲线”特性,但是仍然无法满足任务需求,不能保障任务完成。因此在进行韧性优化时,应该综合考虑攻击带来的任务变化引起的需求变化,合理设定目标。

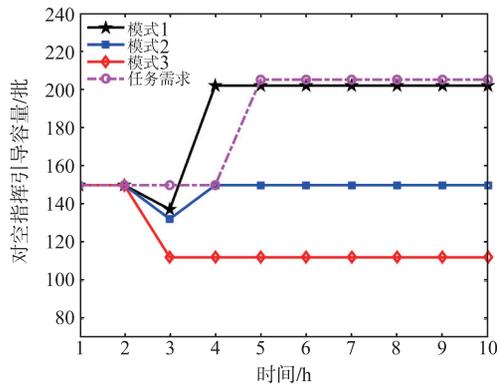


图 6 指挥信息系统韧性优化效果

2)实验 2: 检验攻击强度对指挥信息系统韧性优化的影响。

假设预算充足,所有备选措施都不会受到预算的约束,攻击强度逐渐增加,韧性优化结果如图 7 所示。可以看出,随着攻击强度提高,同样预算下,韧性增强措施效果逐渐降低,直至为 0。2 种模式下曲线走势一致,但由于模式 2 中需求要低于模式 1,其韧性优化效果也要低一些。模式 1 中,当攻击强度达到 7 时,优化效果为 0,问题无解,意味着即使采用现有韧性增强措施的最高措施水平,也无法弥补 LP 和 EP 之间的鸿沟,因此必须挖掘更多新的韧性增强措施,来应对蓝方高强度的攻击。模式 2 中,攻击强度达到 9 时,优化效果为 0。

由实验可得,为应对高强度攻击,现有韧性增强措施还不能完全达到任务需求,还需挖掘更多韧性增强措施,综合施策。

3)实验 3: 检验预算对指挥信息系统韧性优化的影响。

设定攻击强度分别为 2(低强度),5(中等强度),7(高强度),预算从 0 开始,以 10 为步长逐次增加到 250,韧性优化结果如图 8 所示。可以看出,预算对优化效果有明显影响,当预算逐渐提高时,同样攻击强度下的韧性提升措施效果单调上升,尤其是在预算增加的初期,优化效果提高非常迅速;而当预算增加到一定程度时,优化效果已满足需求,优化效果不再上升,不同攻击强度下几条曲线均存在“拐点”。而同样的预算,攻击强度越高,则优化效果越差,尤其是在高强度攻击下,韧性优化问题始终无解。

由实验结果可得,无论面对何种攻击强度,显著提升系统韧性优化效果的阶段都是初期投入阶段。此外,不同韧性模式下,系统韧性优化效果不同,应该准确区分系统韧性的不同模式,选择正确的韧性

优化模型,避免无法满足需求或者资源过度浪费。

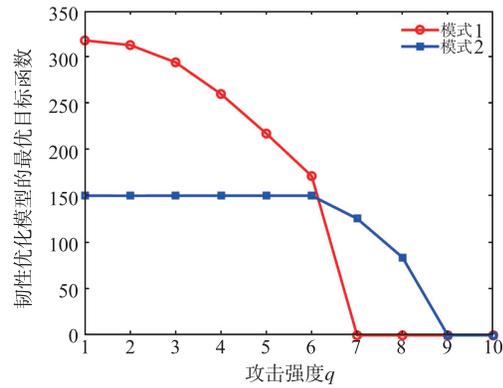


图 7 不同攻击强度下指挥信息系统韧性优化结果

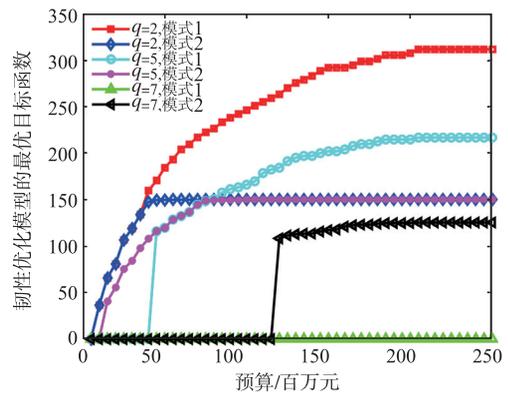


图 8 预算对指挥信息系统韧性优化的影响

4)实验 4: 检验指挥信息系统韧性提升措施的作用区别和费效比。

为探究这一问题,假设预算充足,比较不同攻击强度下 2 类韧性提升措施的效果和费效比,实验结果如图 9 所示。刚开始攻击强度较小时,抵抗力措施占的比重较大,此时,指挥信息系统满足需求,大部分得益于功能水平瞬时下降这个阶段的改善;而当攻击强度持续增大时,抵抗力措施占的比重逐渐减小,指挥信息系统满足需求主要归功于短时间内自适应这个水平的改善。而从整体情况看,冗余度提升措施占的比重大部分超过 50%,这说明冗余度措施占据着主导地位。而从措施的费效比来看,攻击强度较低时,措施 2 费效比最高,但随着攻击强度增加,抵抗力措施的费效比下降程度明显要快于冗余度提升措施,这说明抵抗力提升措施受攻击强度影响更大。

也就是说,2 类韧性提升措施在不同攻击强度下的作用不同,攻击强度较低时,不会引起需求大幅上涨,指挥信息系统的节点防护能力等抵抗力提升措施需要重点关注;而攻击强度较高时,加强加固设施设备已难以抵抗攻击的破坏作用,且需求也大幅上涨,此时还必须加强备份储备,做好应急接替准备。

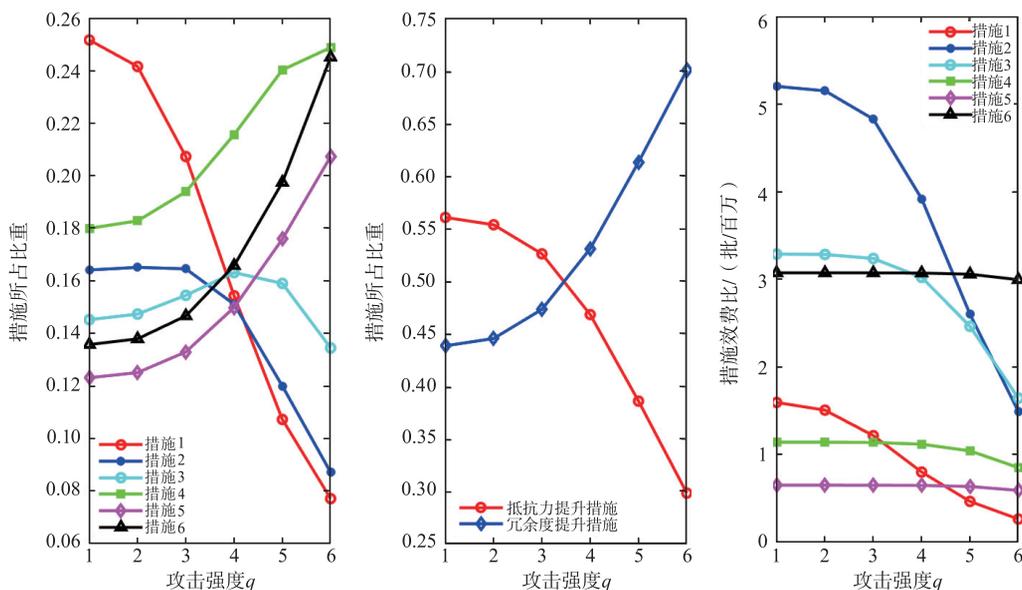


图9 不同韧性增强措施比重与效费比

## 4 结语

本文结合指挥信息系统本身和需求变化2个方面研究指挥信息系统的韧性过程,运用新引入的“NP、LP、EP”3个变量,改进对指挥信息系统韧性过程的传统理解,弥补以往研究中对需求变化的忽视,建立韧性定量优化模型,提出决策建议,为指挥信息系统韧性优化提供科学工具和参考借鉴。需要注意的是,韧性的概念涵盖了系统抵抗、吸收攻击直至恢复的整个过程,本文仅关注了攻击后短时间内的韧性过程,长时间的恢复过程还需要进一步研究。此外,需求变化极大受到战场态势,也就是敌方攻击强度的影响,不同的攻击会带来不同的需求变化,因此,指挥信息系统韧性过程3种模式的划分不是一成不变的,需要综合多种相关因素。

## 参考文献

- [1] 张刚宁, 易侃, 孙勇成, 等. 空军网络化指挥信息系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [2] 寇雨筱. 指挥信息系统韧性评估与设计方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [3] 蓝羽石, 周光霞, 王珩, 等. 韧性指挥信息系统构建机理及实现研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(3): 284-291.
- [4] 崔琼, 李建华. 网络化指挥信息系统弹性度量方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(4): 18-24, 48.
- [5] 丁峰, 周芳, 程文迪, 等. 面向任务保障的指挥信息系统韧性能力量化评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(6): 13-18.
- [6] 焦天赐, 罗爱民, 李佳. 基于分层表示的指挥信息系统韧性评估方法[C]//第四届体系工程学术会议论文集, 长沙: 国防科技大学系统工程学院, 2022: 330-336.
- [7] 蔡英浩, 张英朝, 孙沁, 等. 指挥信息系统韧性评估方法综述[J]. 系统仿真技术, 2021, 17(1): 22-27.
- [8] 崔琼, 李建华, 王宏, 等. 基于节点修复的网络化指挥信息系统弹性分析模型[J]. 计算机科学, 2018, 45(4): 117-121, 136.
- [9] 李凡, 张杰勇. 指挥信息系统网络结构的韧性问题研究[J]. 电光与控制, 2020, 27(4): 49-54.
- [10] 康东, 李建华, 王哲, 等. 指挥信息系统相依网络模型弹性策略研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(12): 22-26.
- [11] 崔琼, 李建华, 冉湔丹, 等. 任务流驱动的指挥信息系统动态超网络模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(3): 58-67.
- [12] 潘星, 张国忠, 张跃东, 等. 工程弹性系统与系统弹性理论研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2006-2015.
- [13] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREMARQUEZ J E, et al. A Review of Definitions and Measures of System Resilience[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 145: 47-61.
- [14] 周芳, 丁峰, 丁冉, 等. 威胁驱动的指挥信息系统韧性评估试验方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(3): 18-24.
- [15] 陶婵娟. 考虑应急资源配置的地铁网络韧性评估与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [16] PATRICK G, PETER L, MARCO C, et al. A Review on Resilience Assessment of Energy Systems

- [J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2021, 6 (5): 273-299.
- [17] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Science the Seismic Resilience of Communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [18] LIU W, SHAN M, ZHANG S, et al. Resilience in Infrastructure Systems: A Comprehensive Review [J]. Buildings, 2022, 12(6): 2-17.
- [19] 赵辰. 城市关联基础设施系统网络建模及韧性优化 [D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [20] 丁海婷, 周琳, 刁伟峰. 基于背包问题的多相控阵雷达多目标跟踪时间资源管理算法 [J]. 兵工学报, 2021, 42(5): 997-1003.
- [21] 王熙照, 贺毅朝. 求解背包问题的演化算法 [J]. 软件学报, 2017, 28(1): 1-16.
- [22] 曹迎槐, 尹健, 梁春美. 军事运筹学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [23] 董鑫, 崔浩林, 李昉, 等. 基于引导员负荷的指挥引导容量评估 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 58-61.
- (编辑: 刘勇)