

# 网络化作战装备体系脆性控制模型与策略



李 慧 周良平 羊 军 赵书平

中国人民解放军 95899 部队 北京 100085

**摘 要** 网络化作战装备体系是具有要素多元、关联紧密、动态演化等特点的典型复杂系统,脆性是其固有属性,直接影响着网络化作战装备体系的安全性和运行稳定性。针对网络化作战装备体系的脆性控制问题,首先,界定装备节点、关联关系、网络化作战装备体系等概念,抽象网络化作战装备体系结构,分析装备体系脆性传播机理,设计脆性控制因果回路图,建立脆性控制微分动力学模型;其次,提出免疫控制、隔离控制和综合控制 3 种策略,给出脆性控制效果的度量方法;最后,以网络化防空作战装备体系为例,仿真分析了脆性风险调控阈值、脉冲控制覆盖数量、综合控制策略参数对高脆性风险的持续时间和脆性风险程度的影响。实验结果表明,当脆性风险调控阈值提高 25% 时,免疫控制、隔离控制和综合控制策略对应的高脆性风险的持续时间分别缩短了 53.2%,44.9%,42.2%,脆性风险程度提高了 24.5%,1.5%,20.4%;在脉冲控制覆盖数量提高 1 倍的情况下,高脆性风险持续时间差异不显著,脆性风险程度降低了 9.3%,1.5%,10%;在综合控制策略参数比值提高约 1.3 倍的情况下,高脆性风险持续时间和脆性风险程度分别降低了 5.9%,8.3%。研究结果验证了模型与策略的可行性和有效性,为探索网络化作战装备体系脆性控制过程与规律提供了新的思路和方法。

**关键词:** 网络化作战;装备体系;脆性控制模型;综合控制策略

**中图分类号** E917;TP393

## Brittleness Control Model and Strategy for Networked Operational Equipment System

LI Hui, ZHOU Liang-ping, YANG Jun and ZHAO Shu-ping

The Unit 95899 of PLA, Beijing 100085, China

**Abstract** Networked operational equipment system is a typical complex system with multiple elements, close correlation and dynamic evolution, and brittleness is an inherent property that directly affects its safety and operational stability. Aiming at networked operational equipment system's characteristic of multiple constitution and complex correlation, firstly, concepts of equipment nodes, correlation relationships and networked operational equipment system are defined, and networked operational equipment system structure is abstracted. Brittleness transmission mechanism is analyzed and brittleness control causal circuit diagram is designed. And then, differential dynamic model of brittleness control is built. Secondly, immune control strategy, isolation control strategy and integrated control strategy are put forward separately, and the measurement method of brittleness control effect is given. Finally, taking networked air defense operational equipment system as example, dynamic effect of brittleness risk control threshold, pulse control coverage number and composite control strategy parameters to overall brittleness risk degree are simulated and analyzed. According to the simulation results, when brittleness risk control threshold is improved 25%, the brittle risk durations of immune control strategy, isolation control strategy and integrated control strategy are reduced respectively 53.2%, 44.9% and 42.2%, and the brittleness risks are improved 24.5%, 1.5% and 20.4%. When pulse control coverage number is doubled, there is no significant difference in the duration of high brittleness risk, and the brittleness risks are reduced 9.3%, 1.5% and 10%. When the ratio of parameters of integrated control strategy is increased about 1.3 times, the duration of high brittleness risk and the brittleness risk are reduced 5.9% and 8.3% respectively. The research results verify the feasibility and effectiveness of the model and strategies, which provide a new idea and method for exploring the brittleness control process and low of networked combat equipment system.

**Keywords** Networked operations, Equipment system, Brittleness control model, Integrated control strategy

网络化作战装备体系(Networked Operational Equipment System, NOES)是由分散配置、数量众多的武器装备及其耦合交织的业务关系所组成的复杂系统,除具有开放性、巨量

性、进化与涌现性等特征,还具有脆性特征。在实际作战中,由于随机故障、战斗毁伤等原因,NOES脆性会被激发,并通过装备之间的关联关系传播扩散,引起其他装备级联失效,甚

至导致 NOES 全面崩溃<sup>[1]</sup>。脆性风险控制是提高装备体系安全性的重要保障,在当前 NOES 的构成装备、关联关系日益复杂,遭敌破击毁伤威胁日趋严重的情况下,通过量化建模手段,研究 NOES 脆性风险控制模型与策略,对有效遏止脆性风险扩散、控制失效破坏规模具有重要意义。

近年来,国内外学者关于脆性风险扩散、控制等问题进行了较为深入的研究。例如,文献[2]采用社会脆性指数方法分析了尼泊尔的典型脆性因素,并研究了脆性因素对灾害风险、灾后恢复能力等的影响<sup>[2]</sup>。文献[3]从脆性源、脆性传播路径、系统崩溃标准等特征出发,分析了高铁列车运行控制过程的结构脆性<sup>[3]</sup>。文献[4]分析了电力系统各支路的潮流脆性关联度和网络结构脆性关联度,提出了基于复合脆性关联度与改进 Floyd 算法的连锁故障预测方法<sup>[4]</sup>。文献[5]分析了闭环供应链系统的脆性结构和特征,建立了脆性传播模型和系统分层脆性结构<sup>[5]</sup>。

已有研究虽然深化了脆性传播建模问题的理论认知,但多数仍存在两方面不足:1)脆性风险控制问题研究偏重定性描述,缺乏建模、仿真等定量方法的运用;2)与实际作战过程结合不紧密,从网络结构和作战任务角度,提出风险控制策略,并对比分析控制效果的成果相对较少。为此,本文选取 NOES 为研究对象,在抽象 NOES 结构、分析其脆性传播机理的基础上,建立脆性风险控制动力学模型,提出脆性风险管控策略,并以网络化防空作战为例进行仿真分析。

## 1 NOES 脆性风险控制建模

### 1.1 相关概念界定

**定义 1** 装备节点是构成 NOES 的各类装备,彼此之间能够交互一定的作战类业务,记为  $E$ 。按照功能属性,装备节点可划分为情报类装备节点  $E^I$ 、指控类装备节点  $E^C$ 、打击类装备节点  $E^S$ ,记为  $E = E^I \cup E^C \cup E^S$ 。

**定义 2** 脆性风险因子是度量脆性风险在装备节点累积程度的参数,可用节点负荷与节点容量的比值来表示。对于装备节点  $E_i$ ,在  $t$  时刻承担负荷量为  $L_i(t)$ ,设其负荷容量为  $\Omega_i$ ,则  $t$  时刻该节点的脆性风险因子  $FBR_i(t)$  可表示为:

$$FBR_i(t) = \frac{L_i(t)}{\Omega_i} \quad (1)$$

其中,当  $0 \leq FBR_i(t) < 1$  时,装备节点  $E_i$  可正常运行;当  $FBR_i(t) \geq 1$  时,装备节点  $E_i$  因超负荷运行而判定为失效状态。

从装备节点负荷角度看,脆性风险在装备节点之间的传播过程可看作已失效节点的负荷(包括网络负荷和任务负荷)向其他节点的重分配过程。根据脆性风险因子的取值情况,可将装备节点划分为脆性源型装备节点  $E^Y$ 、易感型装备节点  $E^G$ 、失效型装备节点  $E^F$  和免疫型装备节点  $E^M$ ,记为  $E = E^Y \cup E^G \cup E^F \cup E^M$ 。其中, $E^Y$  是指灵敏响应环境变化,自身负荷容量较小,受内外扰动或破坏后易失效并诱发装备体系崩溃的节点,是导致装备体系不稳定的关键,满足  $\tau \leq FBR(t) < 1$  ( $\tau$  为阈值常数); $E^G$  是指虽暂时处于稳定状态,但与  $E^Y$  具有直接或间接脆性联系,易受脆性风险传播影响而成为

新脆性源的装备节点,满足  $0 \leq FBR(t) < \tau$ ;  $E^F$  是指因某时刻所承担负荷超过自身容量而导致功能丧失的装备节点,满足  $FBR(t) \geq 1$ ;  $E^M$  是指因采取有效控制措施而使装备节点能在一定范围内具备较强抗干扰能力,通常从易感型装备节点演变而来,当负荷量继续增加时,仍会有部分  $E^M$  发展成为  $E^Y$ 。需要说明的是,失效型装备节点是装备节点脆性风险累积到一定程度后发生的不可逆损伤特殊状态,不会再向易感型和脆性源型装备节点演变。

按照不同划分方法得到的两组装备节点集合存在不同程度的交集,例如脆性源型装备节点集合  $E^Y$  可能同时包含情报类、指控类和打击类装备节点,指控类装备节点也可能同时包含脆性源型、易感型和免疫型装备节点。

**定义 3** 关联关系是装备节点之间相连接的边,是脆性传播的媒介,按照功能属性可划分为情报保障关系  $R^I$ 、指挥控制关系  $R^C$ 、协同打击关系  $R^S$ ,记为  $R = R^I \cup R^C \cup R^S$ 。

**定义 4** 网络化作战装备体系是面向特定作战任务,由结构相互连接、功能相互作用的多个装备系统组成的更高层次的有机整体,可表示为装备节点  $E$ 、关联关系  $R$  的集合,记为  $NOES = E \cup R$ 。

**定义 5** 脆性风险程度是指脆性风险在装备体系内部的积累情况。风险在脆性源型节点所组成的网络内具有较强的扩散能力,且  $E^Y$  规模越大,风险扩散的能力就越强。 $t$  时刻装备体系的脆性风险程度  $BRD(t)$  可表示为:

$$BRD(t) = \frac{|E^Y|(t)}{|E|} \quad (2)$$

### 1.2 NOES 结构抽象

随着战争形态由机械化战争向信息化战争快速演变,装备体系结构由“树状垂直、链式交互”向“网状分布、自适协同”方向发展。当 NOES 面对内、外部干扰破坏时,往往因结构特性而产生多种脆性风险特征,可能加剧风险扩散的范围和速度。

**定义 6** 网络化作战装备体系结构(Networked Operational Equipment System Structure, NOESS)是装备节点及其关联关系按照特定交互方式所组成的网络化结构,记为  $NOESS = \Theta(E, R)$ 。

当装备节点数量众多、关联交互密切时,NOESS 呈现典型的复杂网络特性,装备节点通过动态关联关系相互影响、相互作用。在复杂多变的战场态势中,NOESS 通常保持相对稳定,当平衡状态被打破后,其能快速重构,以积极应对各类作战变化。

### 1.3 NOES 节点负荷的计算方法

在 NOES 稳定运行的过程中,装备节点在  $t$  时刻承担的负荷量  $L_i(t)$  由网络负荷  $L_i^N(t)$  和任务负荷  $L_i^T(t)$  组成,即:

$$L_i(t) = L_i^N(t) + L_i^T(t) \quad (3)$$

装备节点  $E_i$  的网络负荷  $L_i^N(t)$  与其在 NOES 结构中的网络拓扑位置有关,位置越核心负荷量就越大。设在  $t$  时刻,  $E_i$  度值为  $d_i(t)$ ,  $E_i$  邻接节点集合为  $\Gamma_i(t)$ ,邻接节点  $E_j$  的介数为  $B_j(t)$ ,  $\alpha$  为可调参数,则网络负荷  $L_i^N(t)$  可表示为:

$$L_i^N = \alpha d_i(t) \sum_{j \in \Gamma_i(t)} B_j(t) \quad (4)$$

在某个作战时刻,装备节点  $E_i$  的任务负荷  $L_i^T(t)$  与当前参与的任务数量  $T_i$  和任务持续时间  $W_i^T$  有关。当作战任务发生转换时,已失效装备节点直接退出装备体系,剩余的装备节点重新分配任务负荷,并对应更新整体工作负荷量。当全部作战任务完成后,装备节点的任务负荷全部清零。设  $\beta$  为可调参数,则装备节点  $E_i$  的任务负荷  $L_i^T(t)$  可表示为:

$$L_i^T(t) = \beta \sum_{i=1}^{T_i(t)} W_i^T \quad (5)$$

其中,持续时间  $W_i^T$  为作战进程时间  $O(t)$  与任务开始时间  $S_i^T$  的差值,即:

$$W_i^T = O(t) - S_i^T \quad (6)$$

将式(4)一式(6)代入式(3),可得装备节点  $E_i$  的总工作负荷  $L_i(t)$  为:

$$L_i(t) = \alpha d_i(t) \sum_{j \in r_i(t)} B_j(t) + \beta \sum_{i=1}^{T_i(t)} (O(t) - S_i^T) \quad (7)$$

### 1.4 NOES 脆性风险传播机理

在激烈的网络化作战对抗过程中,NOES 面临着大量来自体系内部和外部的不确定性因素的影响,固有风险与随机风险始终并存。NOES 内的部分装备会承受较大的负荷量,使工作参数接近极限值,整个装备体系也越来越趋于自组织临界状态,脆性处于易激发状态,装备之间的关联性显著增强<sup>[6]</sup>。

每个参战装备都具有一定的任务能力上限,随机故障、战斗毁伤、病毒入侵等脆性事件,会导致 1 个或少数装备局部功能丧失,负荷量陡增,任务处理能力下降。当总负荷量超出装备处理极限后,会造成装备功能失效,无法完成作战任务。失效装备节点的负荷分配到其他节点后,会与该节点已有的负荷进行叠加,可能超出装备自身的承受和处理极限,引起这些装备相继失效,使装备体系脆性被传播<sup>[7]</sup>,失效装备节点的负荷重分配过程如图 1 所示。新失效节点的负荷会在装备体系内部再次重新分配,产生更大规模的失效,并形成连锁效应,使 NOES 逐渐由原来的有序状态向无序状态演变,最终导致局部失效甚至全面崩溃。

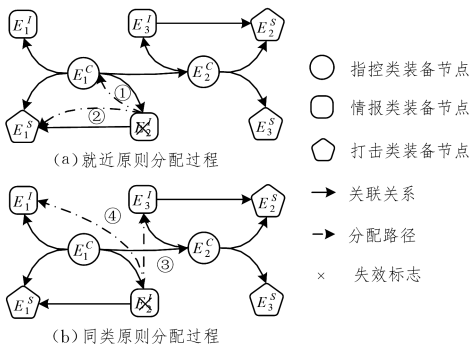


图 1 失效装备节点的负荷重分配过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load redistribution process of failure equipment node

### 1.5 NOES 脆性控制动力学模型

脆性风险在 NOES 内的传播是动态扩散的过程,装备节点经历正常状态、脆性风险累积状态直至触发阈值而进入失效状态,下文主要从动力学视角建立 NOES 脆性控制动力学模型。

#### 1.5.1 因果回路图设计

**定义 7** 因果链是指在  $t$  时刻,系统某个变量  $E_i(t)$  对另外变量  $E_j(t)$  的影响作用,可表示为  $E_i(t) \rightarrow E_j(t), t \in T$ 。在  $t$  时刻,当变量  $E_i(t)$  产生增量  $\Delta E_i(t) > 0$  时,如果变量  $E_j(t)$  的对应增量  $\Delta E_j(t) > 0$ ,则说明二者之间的因果链为正,表示为  $E_i(t) \xrightarrow{+} E_j(t)$ ;反之,则说明二者之间的因果链为负,表示为  $E_i(t) \xrightarrow{-} E_j(t)$ 。

**定义 8** 因果关系图是在  $t$  时刻,由系统所有变量及其相互之间的因果链共同组成的有向图,可表示为  $D(t) = (E(t), X(t))$ ,其中  $E(t)$  表示系统变量集合, $X(t)$  表示变量之间的因果链集合。

在系统动力学研究的过程中,通常采用因果关系图来刻画各变量之间的关系,以及某些变量变化后与其存在关联关系的其他变量的变化情况<sup>[8]</sup>。在作战过程中,NOES 内部各装备节点的状态会在易感型、脆性源型、免疫型、失效型等状态之间动态切换。本文在分析上述装备节点脆性状态变迁过程的基础上,设计脆性控制因果关系图,如图 2 所示。

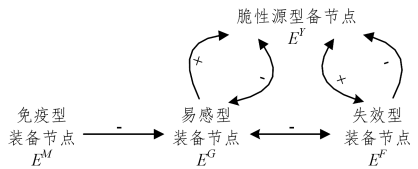


图 2 NOES 脆性控制因果关系图

Fig. 2 Brittleness control causality diagram for NOES

当网络化防空作战过程对抗激烈、任务量较大时,会导致  $E^G$  脆性风险迅速累积,部分装备节点逐渐发展成为  $E^Y$ ,有的甚至直接失效而成为  $E^F$ ;当作战任务密集程度下降时,部分  $E^Y$  脆性风险下降,演变成为  $E^G$ ,导致  $E^G$  数量增加;装备体系为避免  $E^G$  脆性风险激增,采用一定的措施办法,将部分  $E^G$  改造成为  $E^M$ ,导致  $E^M$  的数量增加。

#### 1.5.2 脆性控制过程

脆性传播过程是从微观层面,对脆性作用机理和交互进行分解与剖析,NOES 脆性控制动力学模型着眼于装备体系的整体状态,探讨不同脆性风险类型装备节点数量在整个控制过程的变化情况,是人为调控与脆性风险自主传播的有机统一。在 NOES 中,脆性风险控制具有典型的状态依赖性。只有装备体系的脆性风险程度达到特定调控阈值  $V_a$  ( $0 \leq V_a \leq 1$ ) 时,调控方或者外部力量才会通过脉冲控制方法干预装备体系正常运行,以遏止  $E^Y$  数量持续增长。需要说明的是,由于脉冲控制作用有限,可能不会立刻将脆性风险程度降至阈值  $V_a$  以下,而要经过多次效果累积来逐渐释放控制策略潜能。如果  $BRD(t) < V_a$ ,则表明当前的 NOES 脆性风险程度仍在可承受范围内,不需要针对性的调整控制。此外,如果 NOES 失效型装备节点所占比例超出阈值  $V_f$ ,即  $|E^F|(t)/|E| \geq V_f$ ,虽然  $BRD(t) < V_a$ ,也应立刻对 NOES 进行脉冲控制,以避免更大规模的失效行为发生,影响装备体系的效能发挥。

### 1.5.3 模型构建

考虑到管控措施软硬件设备有限, 单次脉冲控制覆盖的装备节点数为相对固定的常数, 设为  $m$  ( $m$  为正整数), 因此会有部分节点因未能进行脆性控制而失效。在单位时间内, 设 1 个脆性源型装备节点数量变化对易感型装备节点数量的影响比例为  $\alpha$ , 对失效型装备节点数量的影响比例为  $\beta$ , 1 个易感型装备节点数量变化对失效型装备节点数量的影响比例为  $\gamma$ 。在 NOES 脆性风险传播与控制过程中, 4 种类型的装备节点数量是随时间演化而动态调整的<sup>[9]</sup>, 下文将借鉴系统动力学方法, 来建立 NOES 脆性风险控制模型, 即:

$$\left. \begin{cases} \frac{d|E^G|(t)}{dt} = -\alpha|E^Y|(t) - \gamma|E^G|(t) \\ \frac{d|E^Y|(t)}{dt} = (\alpha - \beta)|E^Y|(t) \\ \frac{d|E^F|(t)}{dt} = \beta|E^Y|(t) + \gamma|E^G|(t) \end{cases} \right\} BRD(t) < V_a$$

$$\left. \begin{cases} \Delta|E^G|(t) = m(q - p) \\ \Delta|E^Y|(t) = -qm \\ \Delta|E^M|(t) = pm \\ p + q = 1 \end{cases} \right\} BRD(t) \geq V_a \quad (8)$$

$$\begin{cases} |E^G|(0^+) = |E^G|_0, |E^Y|(0^+) = |E^Y|_0 \\ |E^M|(0^+) = |E^M|_0 \\ BRD(0^+) < V_a, \alpha, \beta, \gamma, p, q, m \geq 0 \end{cases}$$

其中,  $p, q$  ( $0 \leq p, q < 1$ ) 分别表示脉冲控制方法对  $|E^G|(t)$ ,  $|E^Y|(t)$  的分配比例;  $\alpha, \beta, \gamma$  与具体的 NOES 脆性风险传播过程有关。

设在作战时刻  $t$ , 脆性源型、易感型、失效型、免疫型装备节点数量分别为  $|E^Y|(t)$ ,  $|E^G|(t)$ ,  $|E^F|(t)$  和  $|E^M|(t)$ , 满足  $|E^Y|(t) + |E^G|(t) + |E^F|(t) + |E^M|(t) = |E|$ 。故有:

$$\frac{d|E^Y|(t)}{dt} + \frac{d|E^G|(t)}{dt} + \frac{d|E^F|(t)}{dt} + \frac{d|E^M|(t)}{dt} = 0 \quad (9)$$

## 2 NOES 脆性控制策略

考虑 NOES 的现有参战装备和脆性风险状态, 当脆性源型装备节点占比达到调控阈值  $V_a$  时, 可对易感型装备节点实施免疫, 对脆性源型装备节点进行隔离, 或综合运用以上两种策略。由此, 本文提出 3 种 NOES 脆性控制策略, 即免疫控制策略、隔离控制策略和综合控制策略。

### 2.1 免疫控制策略

该策略是针对易感型装备节点  $E^G$  进行的脉冲控制策略, 适用于装备体系运行平稳阶段, 有目的地调整脆性风险, 避免脆性风险累积<sup>[10]</sup>。对于具体装备  $E_i^G$  而言, 实际开展的工作主要是装备  $E_i^G$  功能性能的改进升级 (软件升级、硬件扩充等), 提升该装备的工作负荷极限  $\Omega_i^G$ , 设提升比例为  $\varphi$ 。被实施免疫控制策略的装备节点的选择规则为, 按照当前时刻脆性风险因子由高到低的顺序, 选择排名前  $m$  个节点。装备  $E_i^G$  被实施免疫控制策略后, 仍会被安排具体的作战任务, 但由于自身工作负荷极限  $\Omega_i^G$  的提升, 根据式 (1), 在所承担任务量不变的情况下, 其脆性风险因子  $FBR_i(t)$  可能出现一定程度的下降。在实施控制的时刻  $t$ , 该策略对应的脆性控制模型可简化为:

$$\begin{cases} \Delta|E^G|(t) = -m \\ \Delta|E^M|(t) = m \\ \Delta\Omega_i^G = \varphi\Omega_i^G, 1 \leq i \leq m, i \in N^+ \\ p = 1, q = 0 \end{cases} \quad (10)$$

### 2.2 隔离控制策略

该策略是针对脆性源型装备节点  $E^Y$  进行的脉冲控制策略, 适用于装备体系脆性风险急剧增加的场景。对于具体装备节点  $E_i^Y$  而言, 实际开展的工作主要是优化作战任务调度, 不再给受隔离的装备节点  $E_i^Y$  部署任务, 切断脆性风险的传播路径<sup>[11]</sup>。一旦有需要重分配的失效负荷出现, 就会跳过该装备节点直接向下一层级进行负荷分配。被实施隔离控制策略的装备节点的选择规则为, 按照当前时刻脆性风险因子由高到低的顺序, 选择排名前  $m$  个节点。随着作战激烈程度逐渐降低, 部分脆性源型装备节点承担的任务负荷量会随作战任务的减少而减少, 在某时刻会有部分装备节点的脆性风险因子降至  $\tau$  以下, 这部分节点就演变为易感型装备节点, 此后可以继续给这些装备节点部署作战任务。在实施控制的时刻  $t$ , 该策略对应的脆性控制模型可简化为:

$$\begin{cases} \Delta|E^G|(t) = m \\ \Delta|E^Y|(t) = -m \\ p = 0, q = 1 \end{cases} \quad (11)$$

### 2.3 综合控制策略

该策略是同时针对易感型装备节点  $E^G$ 、脆性源型装备节点  $E^Y$  进行的脉冲控制策略, 体现出了对 NOES 脆性风险的综合同体管控<sup>[12]</sup>。两类装备节点数量按照  $p:q$  的比例确定, 具体装备节点的选择, 仍按照脆性风险因子由高到低的顺序, 分别选择前  $pm$  个和前  $qm$  个。在实施控制的时刻  $t$ , 该策略对应的脆性控制模型可简化为:

$$\begin{cases} \Delta|E^G|(t) = m(q - p) \\ \Delta|E^Y|(t) = -qm \\ \Delta|E^M|(t) = pm \\ \Delta\Omega_i^G = \varphi\Omega_i^G, 1 \leq i \leq pm, i \in N^+ \\ p + q = 1 \end{cases} \quad (12)$$

### 2.4 控制效果度量

当选定某种控制策略后, 会在 NOES 脆性控制过程中反复运用这一策略, 直至装备体系达到相对稳定的状态, 即不再有装备节点因脆性风险传播而失效<sup>[13]</sup>。NOES 脆性控制效果度量可通过脆性风险程度  $BRD$  和高脆性风险 (超出调控阈值) 持续时间  $HBRDT$  来衡量。其中,  $HBRDT$  通过脆性风险进入、退出调控阈值的时间差来度量, 表示为:

$$HBRDT = t_{out} - t_{in} \quad (13)$$

其中,  $t_{in}$  和  $t_{out}$  分别为 NOES 脆性风险进入和退出调控阈值的时刻, 由于控制策略的作用原理和时机存在差异,  $t_{in}$  和  $t_{out}$  会随着控制策略的不同而发生变化。

## 3 仿真分析

以网络化防空作战 (Networked Air Defense Operations, NADO) 为例, 对其装备体系脆性进行建模分析。假设红方的 NADO 作战力量由地面防空力量、空中力量和航天力量组成, 装备体系由 1 个防空作战指挥所 ( $E_1^C$ )、2 个地导部队指控

中心( $E_2^C - E_3^C$ )、1架空中预警指挥机( $E_4^C$ )、3个空防情报中心( $E_5^C - E_7^C$ )、2颗侦察卫星( $E_8^C - E_9^C$ )、6个对空警戒雷达( $E_{10}^C - E_{15}^C$ )、2架无人侦察机( $E_{16}^C - E_{17}^C$ )、8套地空导弹武器系统( $E_{18}^C - E_{20}^C$ )、8架歼击机( $E_{21}^C - E_{26}^C$ )、2架轰炸机( $E_{27}^C - E_{28}^C$ )、2架电子战飞机( $E_{29}^C - E_{30}^C$ )构成。当蓝方从空中或海上对红方

重要目标进行突袭时,红方拟利用上述力量进行有效抗击和反击作战,以消灭蓝方的突袭兵力,确保重要目标安全。

### 3.1 作战任务分解

根据网络化防空作战的一般流程,结合参战装备类型与数量,对作战任务进行分解,具体如表1所列。

表1 网络化防空作战任务清单

Table 1 List of tasks in networked air defense operations

子任务	元任务	开始时刻	结束时刻	参与节点
$T_1$ 空天预警	$T_{11}$ 天基预警	$t:00$	$t+1:30$	$E_5^C/E_1^I - E_2^I$
	$T_{12}$ 空基预警	$t:20$	$t+1:10$	$E_6^C - E_3^C/E_9^I - E_{10}^I$
	$T_{13}$ 陆基预警	$t:30$	$t+1:00$	$E_7^C - E_7^C/E_3^I - E_8^I$
$T_2$ 信息作战	$T_{21}$ 电子对抗	$t:00$	$t+1:30$	$E_1^C - E_3^C/E_5^C - E_7^C/E_3^I - E_8^I/E_1^I - E_8^S - E_8^S$
	$T_{22}$ 网络攻防	$t:00$	$t+1:10$	$E_1^C - E_3^C/E_5^C - E_7^C/E_3^I - E_8^I/E_1^I - E_8^S - E_8^S$
	$T_{23}$ 信息安防	$t:00$	$t+1:30$	$E_1^C - E_3^C/E_5^C - E_7^C$
$T_3$ 火力抗击	$T_{31}$ 空中截击	$t:25$	$t:40$	$E_4^C/E_4^C/E_9^S - E_{12}^S/E_{19}^S - E_{20}^S$
	$T_{32}$ 地面拦截	$t:35$	$t+1:00$	$E_1^C - E_3^C/E_1^I - E_8^S$
$T_4$ 火力反击	$T_{41}$ 空中突击	$t:50$	$t+1:30$	$E_1^C/E_4^C - E_5^C/E_1^I - E_2^I/E_9^I - E_{10}^I/E_9^S - E_{20}^S$
	$T_{42}$ 导弹反击	$t:40$	$t+1:10$	$E_1^C - E_3^C/E_5^C/E_1^I - E_2^I/E_9^I - E_{10}^I/E_1^I - E_8^S$

### 3.2 仿真参数设置

#### 3.2.1 基本参数设置

根据仿真案例,计算各类装备节点和全部装备节点的数量。结合相关文献资料和各装备节点的主要功能性能情况,设置脆性控制相关参数及负荷容量限制,如表2所列。

表2 基本参数设置表

Table 2 Basic parameter setting table

$ E $	$ E^I $	$ E^C $	$ E^S $	$\Omega_{1-2}^I$	$\Omega_{3-8}^I$	$\Omega_{9-10}^I$	$\Omega_1^C$
37	10	7	20	1	1.5	1	3
$\Omega_{2-3}^C$	$\Omega_4^C$	$\Omega_{5-7}^C$	$\Omega_{8-8}^C$	$\Omega_{9-16}^C$	$\Omega_{17-20}^C$	$\tau$	
2	2	2	1	1	1	0.6	

#### 3.2.2 初始网络负荷参数

根据网络化防空作战任务的规划情况,建立初始的装备体系结构图,如图3所示。

表3 初始网络负荷参数表

Table 3 Initial network load parameters table

$d_{I(1-10)}^N$	$d_{C(4)}^N$	$d_{S(1-8)}^N$	$d_{S(14-16)}^N$	$d_{C(1)}^N$	$d_{C(5)}^N$	$d_{S(9 13)}^N$	$d_{S(17 19)}^N$	$d_{C(2-3)}^N$	$d_{C(6-7)}^N$	$d_{S(10-12)}^N$	$L_{S(18 20)}^N$	$B_{I(1-2)}^T$	$B_{C(1)}^T$
1	5	1	1	4	7	4	2	5	4	1	1	0.08	0.21
$B_{C(6-7)}^T$	$B_{S(10-12)}^T$	$B_{I(3-5)}^T$	$B_{C(2-3)}^T$	$B_{S(1-4)}^T$	$B_{S(14-16)}^T$	$B_{I(6-8)}^T$	$B_{C(4)}^T$	$B_{S(5-8)}^T$	$B_{S(17 19)}^T$	$B_{I(9-10)}^T$	$B_{C(5)}^T$	$B_{S(9 13)}^T$	$B_{S(18 20)}^T$
0.09	0.09	0.09	0.11	0.08	0.09	0.09	0.12	0.08	0.16	0.08	0.11	0.10	0.11

#### 3.2.3 初始任务负荷

为不失一般性,假设表1中所有元任务的总任务量都是1,根据式(5)、式(6)和表1,计算各装备节点在初始时刻“ $t:00$ ”的任务负荷量,如表4所列。

表4 初始任务负荷表

Table 4 Initial task load table

$L_{I(1-2)}^T$	$L_{C(1)}^T$	$L_{C(6-7)}^T$	$L_{S(10-12)}^T$	$L_{I(3-5)}^T$	$L_{C(2-3)}^T$	$L_{S(1-4)}^T$	$L_{S(14-16)}^T$
0.33	0.27	0.27	0	0.10	0.27	0.10	0
$L_{I(6-8)}^T$	$L_{C(4)}^T$	$L_{S(5-8)}^T$	$L_{S(17 19)}^T$	$L_{I(9-10)}^T$	$L_{C(5)}^T$	$L_{S(9 13)}^T$	$L_{S(18 20)}^T$
0.10	0	0.10	0	0	0.60	0	0

### 3.3 仿真结果分析

假设“策略A”表示“免疫控制策略”,“策略B”表示“隔离控制策略”,“策略C”表示“综合控制策略”,以“不实施脉冲控制”的情况为基础参考,对比分析策略A、策略B、策略C对

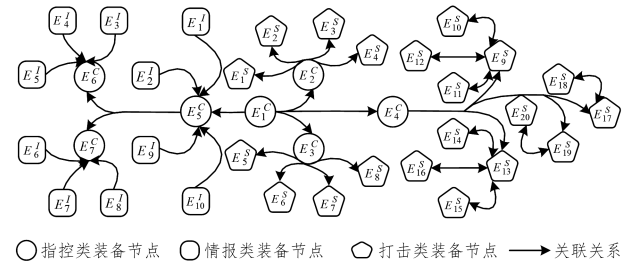


图3 网络化防空作战装备体系结构图

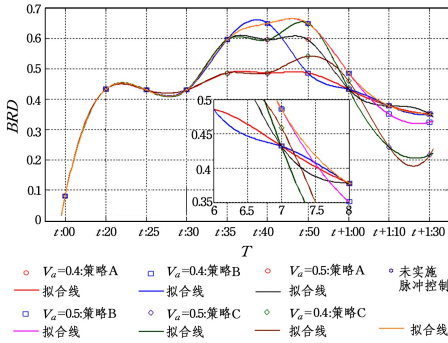
Fig. 3 Architecture diagram of networked air defense warfare equipment

根据图3,利用复杂网络理论中关于度值和介数的计算方法<sup>[1,3-4]</sup>,可以得到每个装备节点的度值和介数,如表3所列。

NOES脆性风险的控制效果。由于 $V_a, m, p, q, \varphi$ 等参数的取值,与参战装备的功能性能、装备体系运用策略、脆性风险控制能力等多种因素紧密相关,需要在查阅相关文献资料并结合具体场景进行研判后才能准确给出。结合本文研究的重心,为简要对比上述不同因素对脆性控制效果的影响,在后续的仿真分析过程中仅给出不同参数的经验参考值组合,用于刻画一般性的特点和规律。

#### 3.3.1 脆性风险调控阈值 $V_a$ 的影响

NOES脆性风险调控阈值是装备体系脆性风险预警监测能力的重要体现,阈值越高表明装备体系的抗脆性风险能力越强,实施脉冲控制的时机就相对滞后于脆性风险激发生行为。设 $V_a^1=0.4, V_a^2=0.5, m=4, p=q=0.5, \varphi=0.2$ ,当NOES在“ $t:00$ ”开始执行作战任务后,脆性风险程度BRD随作战任务演进的变化情况如图4所示。

图4 调控阈值  $V_a$  变化的影响Fig. 4 Effect of regulation threshold  $V_a$  change

从整体情况看,随着作战任务的推进,NOES 脆性风险程度急剧上升,其后根据调控策略的差异经历了不同程度的连续波动变化,在作战任务趋近结束时,脆性风险程度逐步下降至调控阈值以下。所有的调控策略都在“ $t:50$ ”时刻出现脆性风险程度峰值,原因在于该时刻并行执行 9 个作战任务,参战装备的任务负荷量较大,在前期脆性风险积累的基础上,多数节点都处于脆性源型状态。在“ $t:50$ ”时刻后,NOES 脆性风险程度出现快速下降,这一方面是由于脆性管控策略的持续作用,另一方面是因为作战任务逐渐结束,并行执行的任务数量出现下降,有效缓解了参战装备所承担的任务负荷量,部分节点由脆性源型转变为易感型。

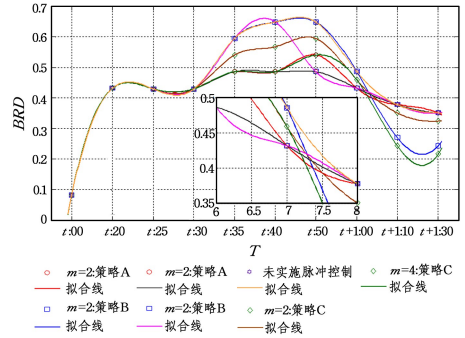
从不同阈值的管控效果看,除个别时刻外,“ $V_a^1 = 0.4$ ”对应的 3 条脆性风险程度曲线总体位于“ $V_a^2 = 0.5$ ”所对应的曲线以下,表明较低脆性风险管控阈值能够有效降低 NOES 脆性风险程度。其原因在于,较低的调控阈值能够多次触发管控策略实施脉冲控制,有效控制整体的脆性风险程度。就高脆性风险持续时间而言,“ $V_a^1 = 0.4$ ”对应的曲线普遍位于“ $t:18$ ”和“ $t+1:05$ ”之间,持续时间约为 47 min;“ $V_a^2 = 0.5$ ”对应曲线普遍位于“ $t:32$ ”和“ $t:57$ ”之间,持续时间约为 25 min。这是由于较高调控阈值对应的装备体系脆性风险承受程度较高,更能够通过自身容抗性能抵消部分作战任务负荷的影响<sup>[14]</sup>。

此外,与“不实施脉冲控制”的情况相比,3 种脉冲控制策略在最高脆性风险程度、高脆性风险持续时间方面都有着比较明显的改善,证明了脉冲控制策略的可行性和有效性。

### 3.3.2 脉冲控制覆盖数量 $m$ 的影响

脉冲控制覆盖数量表示单次干预控制所能影响的装备节点规模, $m$  数值越大,NOES 脆性风险控制的效果就越明显,但也会不可避免地增加调控难度和成本。设  $m_1 = 2, m_2 = 4, V_a = 0.4, p = q = 0.5, \varphi = 0.2$ ,当 NOES 在“ $t:00$ ”开始执行作战任务后,脆性风险程度随作战任务演进的变化情况如图 5 所示。从不同脉冲控制覆盖数量来看,在相同控制策略的情况下,“ $m_2 = 4$ ”对应的脆性风险程度曲线总体位于“ $m_1 = 2$ ”所对应的曲线以下,表明较大的脉冲控制覆盖数量能够有效降低 NOES 脆性风险程度,这是因为较大的脉冲控制覆盖数量所作用的装备节点较多,能从更大范围调控装备节点。就高脆性风险持续时间而言,虽然脉冲控制覆盖数量存在明显差异,但对应曲线进入调控阈值的时刻都在“ $t:18$ ”,退出调控阈

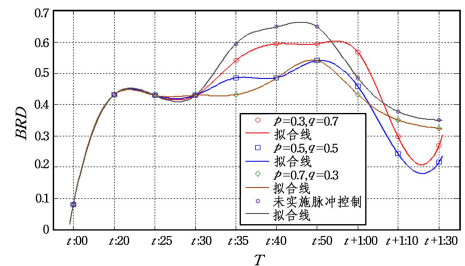
值的时刻位于“ $t+1:02$ ”和“ $t+1:08$ ”之间,持续时间约为 44~50 min,并没有明显差异,表明脉冲控制覆盖数量与高脆性风险持续时间之间并没有直接的关联关系,这是因为高脆性风险持续时间与调控阈值设置密切相关<sup>[15]</sup>。

图5 覆盖数量  $m$  对脆性风险程度的影响Fig. 5 Effect of coverage number  $m$  on brittleness risk

在保证脉冲控制覆盖数量相同的前提下,从不同控制策略来看,策略 A 的控制效果最好,其次是策略 C,最差是策略 B,表明对易感型装备节点进行控制能够最有效地实现脆性风险控制目标。其原因在于,策略 A 通过改善易感型装备节点功能性能、增加容量,直接提高装备节点的脆性风险承受能力,有效延迟易感型发展成为脆性源型的时间,而策略 C 采取隔离脆性源型装备节点的方法,仅能降低脆性源型装备节点崩溃失效风险,但由于作战任务需要,新增任务的负荷会由其他装备节点承担,不仅加速了易感型装备节点向脆性源型装备节点发展,也增加了其他未被隔离的脆性源型装备节点的负荷量,在提高 NOES 脆性风险程度的同时,还可能使部分脆性源型装备节点失效,激发整个装备体系的脆性传播和级联失效,对 NOES 的结构和功能产生不可逆转的破坏<sup>[16-17]</sup>。

### 3.3.3 综合控制策略参数 $p$ 和 $q$ 的影响

综合控制策略兼具了免疫控制策略和隔离控制策略的优点,能够对 NOES 实施一体化的脆性风险控制, $p$  和  $q$  的取值不同,代表了综合控制策略实施的侧重点差异。设  $p_1 = 0.3, q_1 = 0.7, p_2 = 0.5, q_2 = 0.5, p_3 = 0.7, q_3 = 0.3, m = 4, V_a = 0.4, \varphi = 0.2$ ,当 NOES 在“ $t:00$ ”开始执行作战任务后,脆性风险程度随作战任务演进的变化情况如图 6 所示。

图6 综合控制策略参数  $p$  和  $q$  对脆性风险程度的影响Fig. 6 Effect of comprehensive control strategy parameters  $p$  and  $q$  on brittleness risk

从综合控制策略参数  $p$  和  $q$  来看,“ $p_3 = 0.7, q_3 = 0.3$ ”对应策略的脆性风险控制效果最好,其次是“ $p_2 = 0.5, q_2 = 0.5$ ”对应策略,最差是“ $p_1 = 0.3, q_1 = 0.7$ ”对应策略。其原因在

于,参数  $p$  的数值越大,被实施免疫控制的装备节点数量就越多,能够通过提高单一装备节点抗脆性风险能力的方法,降低脆性源型装备节点数量和产生速度,有效抑制脆性风险的积累。就高脆性风险持续时间而言,“ $p_3=0.7, q_3=0.3$ ”对应策略时间最短,约为 44 min,其次是“ $p_2=0.5, q_2=0.5$ ”对应策略,约为 45 min,“ $p_1=0.3, q_1=0.7$ ”对应策略时间最长,达到了 49 min。这表明,“ $p_3=0.7, q_3=0.3$ ”对应策略最为有效。

需要指出的是,“ $p_1=0.3, q_1=0.7$ ”对应曲线在“ $t+1:00$ ”时刻的脆性风险程度超出了“未实施脉冲控制”的曲线,这是因为该策略主要通过隔离脆性源型装备节点的方法进行调控,由于被隔离装备节点不再承担作战任务,新增任务负荷会分派到其他装备节点,在经历多个时刻作战任务后,与“未实施脉冲控制”的情况相比,NOES 中不仅脆性源型装备节点数量较多,而且每个节点的脆性风险因子也都很高,即便在“ $t+1:00$ ”时刻减少了作战任务,也未能使这些装备节点由脆性源型降至易感型,整个装备体系的脆性源型装备节点数量多于“未实施脉冲控制”的情况,由此导致该时刻的脆性风险程度会显著偏高<sup>[18]</sup>。

**结束语** 本文针对网络化作战装备体系脆性控制问题,抽象了装备体系结构,建立了基于系统动力学的脆性控制模型,提出了免疫控制、隔离控制和综合控制策略,并仿真分析了部分参数变化对脆性风险控制效果的影响,为研究 NOES 脆性风险控制问题提供了一种新的思路与方法。其不足之处在于,在研究过程中未对脆性风险传播参数进行赋值,网络化防空作战案例中的装备节点数量偏少,对作战任务临机转换、装备失效后负荷暂不分配等情况未进行深入探讨,后续将针对以上问题,在更大的作战场景下深入探究 NOES 脆性风险控制模型和控制策略的作用效果。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG H, HU C Z, WANG X. Brittleness analysis and important nodes discovery in large time-evolving complex networks [J]. Journal of Shanghai jiaotong university (English Version), 2017, 22(1): 50-54.
- [2] AKSHA S K, LUKE J, RESLER L L M, et al. An analysis of social vulnerability to natural hazards in nepal using a modified social vulnerability index [J]. International Scientific Journal of Disaster Risk (English edition), 2019(5): 51-59.
- [3] PENG Q Y, FENG L P, W C, et al. Structural brittleness analysis of information transfer process of high-speed railway train control [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 1-6.
- [4] ZHU T T, DING J Y, TIAN S M, et al. Cascading failure forecast based on compound vulnerability relevance and improved Floyd algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 58-65.
- [5] SHAO R R, FANG Z G, XU X W, et al. Research on improving closed-loop supply chain system based on brittleness theory [J]. Journal of China University of Science and Technology, 2018, 48(11): 68-77.
- [6] MA J, JU Z. Cascading failure model of scale-free networks for avoiding edge failure [J]. Peer to Peer Networking & Applications, 2019(13): 1-12.
- [7] MAVHURA E. Systems analysis of vulnerability to hydrometeorological threats: an exploratory study of vulnerability drivers in Northern Zimbabwe [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2019, 10(2): 204-219.
- [8] XING B, CAO J H, SONG T L, et al. Research on cooperation support model of equipment support system of systems based on complex network [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 374-382.
- [9] ZHANG H, HU C, WANG X. Application of complexity and brittleness on software architecture [C] // IEEE International Conference on Communication Software & Networks, 2016: 570-573.
- [10] WANG X L, LIU M X, PAN W H. Analysis of the vulnerability of air traffic information physical systems [J]. China science paper, 2019, 14(2): 47-51.
- [11] ELLINAS C. The domino effect: an empirical exposition of systemic risk across project networks [J]. Production and Operations Management, 2019, 28(1): 63-81.
- [12] EKOMWENRENREN E, ALHARBI H, ELGORASHI T, et al. A stabilising control strategy for cyber-physical power systems [J]. Iet control Theory & Applications, 2019(5): 1-8.
- [13] LI M C, MEI W M, LIU Y Q, et al. Accurate identification method of brittle branches in power grid based on improved load flow entropy indexes [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1026-1033.
- [14] LIU W Q, XU L Y, CHEN Y P. Brittleness measurement and evaluation analysis of manufacturing equipment based on brittle risk entropy [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(11): 2820-2830.
- [15] MOHAPATRA A G, LENKA S K, KESWANI B. Neural network and fuzzy logic based smart DSS model for irrigation notification and control in precision agriculture [J]. Proceeding of the National Academy of Sciences India, 2018, 89(5): 1-10.
- [16] OKAMOTO K, LTTI L, TSIOTRAS P. Vision-based autonomous path following using a human driver control model with reliable input-feature value estimation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(3): 497-506.
- [17] AADALEESAN P, SAHA P. A nash game approach to mixed H2/H $\infty$  model predictive control: part 3-output feedback case [J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(5): 12-18.
- [18] An extended linear quadratic model predictive control approach for multi-destination urban traffic networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, PP (99): 1-14.



**LI Hui**, born in 1982, Ph.D, lab master. Her main research interests include equipment system planning and development demonstration.