

引用格式: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. LI F, ZHANG J Y. On resilience of network structure of command information system[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):49-54.

指挥信息系统网络结构的韧性问题研究

李凡, 张杰勇

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 对指挥信息系统网络结构的韧性问题进行研究, 给出了指挥信息系统网络结构韧性的定义, 分析其韧性的整体过程, 给出了指挥信息系统网络结构韧性问题研究需要关注的研究点——韧性性能的度量、优化和管理, 并详细给出了这3个研究点的研究对象和初步的研究思路, 以为指挥信息系统网络结构韧性问题的研究提供参考。

关键词: 指挥信息系统; 网络结构; 韧性

中图分类号: E917 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.010

On Resilience of Network Structure of Command Information System

LI Fan, ZHANG Jieyong

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The resilience of network structure of the command information system is studied in this paper. Firstly, the definition of resilience of network structure of the command information system is proposed, and the whole process of resilience is analyzed. Then, the research points of the resilience of network structure of the command information system is given, which include resilience measurement, resilience optimization and resilience management. Finally, the research objects and preliminary research ideas of these three research points are presented in detail. The research provides a reference for the study of resilience of network structure of the command information system.

Key words: command information system; network structure; resilience

0 引言

指挥信息系统作为当前战争作战要素的“黏合剂”、作战效能的“倍增器”和作战指挥的“神经中枢”, 承担着态势观察、信息处理、决策制定以及指挥行动等关键任务^[1]。其网络结构是指令信息系统各种功能性能发挥的重要支撑, 面对日益严峻的“软”“硬”攻击和复杂动态不确定性战场环境, 为确保各类作战要素有效链接、作战信息高效流转, 整个指挥信息系统网络结构迫切需要具备主动防护、快速重构、动态适应等能力。而韧性包含了系统的预测、吸收、抵抗和适应等特点, 是一个能够表征指挥信息系统网络结构的上述能力的重要系统属性。

因此, 本文旨在对指挥信息系统网络结构的韧性问题进行研究, 给出了指挥信息系统网络结构韧性的

定义, 分析其韧性过程, 最后给出了指挥信息系统网络结构韧性问题应该重点关注的研究点, 并详细给出了这些研究点的初步研究思路。

1 指挥信息系统网络结构韧性的定义

韧性也称为弹性, 其英文为“resilience”, 其来源于拉丁语“resiliere”, 是恢复和复原的意思, 多用于表示实体或系统在发生扰动后能够恢复到常态的能力。韧性的概念自从被 HOLLING^[2]引入以来, 一直是复杂系统的一个关键特征。在民用领域中, 韧性的研究受到了广泛的关注, 生态学^[3-4]、经济学^[5]、管理学^[6-7]、工程学^[8]、计算机学科^[9]等不同领域学科都从不同的角度对其理论探索和实践应用进行了研究。近年来, 随着网络技术的快速发展, 针对认知网络、智能网络的韧性研究也逐渐受到了广大专家学者的重视。文献[10]针对认知网络高度动态性带来的服务随机失效问题, 提出了一种服务迁移方法以提高网络的韧性。文献[11]为了解决网络路由层快速重路由技术存在的重

收稿日期: 2018-11-30

修回日期: 2019-05-28

作者简介: 李凡(1983—), 男, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 研究方向为宽带网络技术。

路由路径偏长的问题,建立了弹性路由层生成数学规划模型,并设计了相应的弹性路由拓扑子层生成算法,从而得到了最佳的弹性路由层拓扑结构。文献[12]则考虑了由随机故障和恶意攻击引起的网络节点或者链路故障的问题,提出了一种基于迭代计算的启发式算法优化网络拓扑,以充分提高整个网络的弹性。

而在军事领域,针对军事系统中的弹性研究也正受到世界军事强国军队的重点关注。以美军为例,2013年美国国防科学委员会发布了《弹性军事体系与高端赛博威胁》,指出弹性是“无论遭受自然或人为、无意或故意的破坏,系统仍能正常运转、任务仍可顺利完成的能力”^[13]。同年,美国空军颁布了《网络构想 2025》,其中重点阐述了弹性对于网络体系的重要性,并概述了未来在各领域实现弹性的方案及手段。除此之外,美军还发布了一系列有关提高系统弹性的计划和方案,以此提升其应对变化的能力^[14]。

当前第四代指挥信息系统是基于军事信息基础设施来进行系统构建的,即通过军事信息基础设施使得指挥信息系统组成要素与指挥对象,如传感器、指挥控制系统和武器平台等成为一个有机整体,其网络结构能通过动态重组其组成要素的关系和功能来适应任务及环境的变化需求,从而具备应对多种安全威胁、完成多样化作战任务的能力^[15-16]。第四代指挥信息系统网络结构如图 1 所示。



图 1 第四代指挥信息系统网络结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the network structure of the fourth generation command information system

这种指挥信息系统的构建方式使其自身内部网络结构具备了韧性的属性,而指挥信息系统服务于作战指挥的属性,使其韧性又与指挥信息系统所处的外部战场环境和作战任务紧密相关。

结合上述分析,指挥信息系统网络结构韧性是指:指挥信息系统在复杂多变的对抗环境下(内部要素的随机故障、外部环境和任务的变化、敌方的攻击等),其网络结构通过主动预防、动态适应等方法,来提供持续服务和保障任务完成的功能和性能。

从以上指挥信息系统网络结构韧性的定义可以看出以下两方面内容。1) 其比指挥信息系统网络结构

的鲁棒性、脆弱性和抗毁性的定义都更为丰富。一般来说,系统网络结构遭受随机故障时所体现的网络性质称为鲁棒性;遭受恶意攻击时所体现的网络性质称为脆弱性;遭受相继故障时所体现的网络性质称为抗毁性。而指挥信息系统网络结构韧性除了包括鲁棒性、脆弱性和抗毁性的内涵,还包含了能够动态适应外部环境和作战任务的变化,即适应性。2) 形成和维持整个指挥信息系统网络结构功能和性能主要通过两种手段,即主动防御和动态适应。主动防御的手段主要针对指挥信息系统网络结构的某些特定风险,表现为风险发生时能够减少会导致指挥信息系统损伤的风险或降低系统降级程度,尽量避免级联失效等系统故障的发生,主动防御的手段具体包括关键节点或者链路的备份以及关键节点或者链路的接替等。而动态适应的手段主要针对指挥信息系统网络结构应对任务和环境的变化,表现为随着作战任务和战场环境的变化,指挥信息系统网络结构势必进行适时动态调整,来始终维持其执行作战任务的效能和性能,动态适应的手段具体包括柔性重组、节点的加入和退出等。

2 指挥信息系统网络结构的韧性过程分析

指挥信息系统网络结构在经历一次随机故障、恶意攻击或者外部环境和任务发生变化后,通过一次韧性过程进入一个暂时不变的“稳态”。指挥信息系统网络结构的一次韧性过程如图 2 所示。

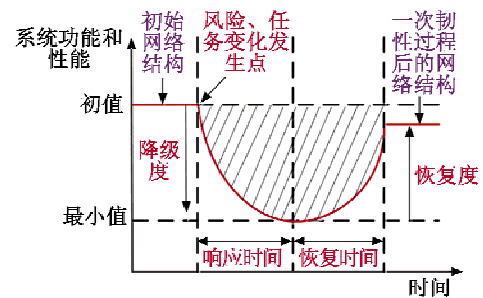


图 2 指挥信息系统网络结构的一次韧性过程

Fig.2 The resilience process of the command information system network structure

指挥信息系统网络结构一次韧性过程的输入是指指挥信息系统初始的网络结构,当然也包含初始网络结构应对外部环境或者任务所体现出来的系统功能和性能;一次韧性过程的输出是指指挥信息系统经过韧性过程后的网络结构,当然也包含该网络结构应对外部环境或者任务所体现出来的系统功能和性能;而整体韧性过程所包括的属性参数有风险或者任务变化的发生点、降级度、响应时间、恢复时间和恢复度,其具体含义如下所述。

1) 风险或者任务变化的发生点是指指挥信息系

统网络结构中风险发生的时间点或者外部使命任务发生重大变化的时间点,该时间点也是韧性过程的起点。

2) 降级度是指风险或者任务变化所导致指挥信息系统网络结构功能或者性能下降的程度,这是衡量指挥信息系统网络结构韧性性能大小的重要指标。

3) 响应时间是指从风险或者任务变化发生的时间点到其发生所导致指挥信息系统网络结构功能或者性能下降到最低点所需要的时间,这是衡量指挥信息系统网络结构韧性性能大小的重要指标。一般情况下,对于内部的风险,指挥信息系统网络结构的响应时间较短,对于外部环境或任务的变化,指挥信息系统网络结构的响应时间稍长。

4) 恢复时间是指从风险或者任务变化发生所导致指挥信息系统网络结构功能或者性能下降到最低点到其功能或者性能恢复到下一个暂时不变的“稳态”所需要的时间,这是衡量指挥信息系统网络结构韧性性能大小的重要指标。

5) 恢复度是指从风险或者任务变化发生所导致指挥信息系统网络结构功能或者性能下降到最低点到其功能或者性能恢复到下一个暂时不变的“稳态”,系统功能或者性能所恢复的程度,一般情况下,恢复度会小于降级度,也就是说一次韧性过程之后指挥信息系统网络结构的功能或者性能一般要低于初始结构下在风险或者任务变化的发生点前所具备的功能或者性能。

3 指挥信息系统网络结构韧性问题需要关注的研究点

指挥信息系统网络结构的韧性问题的研究对于实现其功能、发挥其作战效能和提高其安全防护能力都至关重要,其具体需要重点关注的研究点包括指挥信息系统网络结构韧性性能的度量^[17-18]、优化^[19]和管理3个方面,以下内容简要描述这3个方面的研究对象和初步思路。

3.1 指挥信息系统网络结构韧性性能度量研究

指挥信息系统网络结构韧性性能的度量主要解决的是其韧性性能“怎么样”以及如何进行不同指挥信息系统网络结构之间韧性性能的比较问题。

该研究点的基本研究思路为:第一步是分析影响韧性性能的因素,合理选择韧性性能度量的指标,构建韧性度量的指标体系;第二步是对韧性度量指标体系中各个指标的量化分析,构建各个韧性度量指标的量化模型;第三步是按照一定的规则,将所有的韧性度量指标进行聚合,构建量化韧性指标的聚合模型。指挥信息系统网络结构韧性度量的研究思路如图3所示。

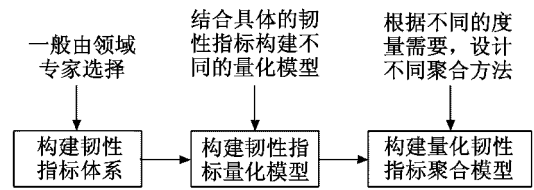


图3 指挥信息系统网络结构韧性度量的研究思路
Fig. 3 Research ideas on resilience measurement of the command network system network structure

在指挥信息系统网络结构韧性度量的研究中,首先,选取系统响应时间、系统恢复时间、系统执行任务能力的恢复度、系统执行任务能力的降级度4个指标来构建指挥信息系统网络结构韧性度量的指标体系;然后,构建这4个指标的量化模型,其中,系统响应时间、系统恢复时间可以用时间的度量单位来进行量化,而系统执行任务能力的恢复度、系统执行任务能力的降级度可以通过能力的分类分析来进行,比如系统执行任务能力可以分解为系统感知能力、决策能力和打击能力等,通过这些能力对应指标的恢复或者下降的量化程度来表示;最后,进行这4个量化指标的聚合,最简单的方法就是数据归一化之后的加权求和,也可以通过设计非线性或者线性的方法来进行指挥信息系统网络结构韧性性能的聚合。

3.2 指挥信息系统网络结构韧性性能优化研究

指挥信息系统网络结构韧性性能的优化主要解决的问题是通过什么策略可以提升网络结构的韧性性能,以及如何统筹协调和运用这些韧性策略,使指挥信息系统网络结构具备与具体环境和任务相适应的韧性性能。

从以上指挥信息系统网络结构韧性性能优化所解决的问题可知,该研究点的基本研究思路分为两步:第一步是从不同的视角、不同的阶段和不同的粒度来分析能够提升指挥信息系统网络结构韧性性能的策略方案,构建韧性性能优化的策略方案库;第二步,针对具体的指挥信息系统网络结构韧性优化场景,组合优化运用好不同的指挥信息系统网络结构韧性性能优化策略方案。整个指挥信息系统网络结构韧性优化的研究思路如图4所示。

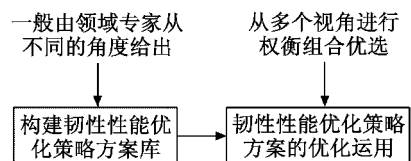


图4 指挥信息系统网络结构韧性优化的研究思路
Fig. 4 Research ideas on the resilience optimization of the command information system network structure

通常情况下,指挥信息系统韧性性能优化策略主

要包括以下 5 个方面:1) 网络结构的拓扑设计,不同的拓扑结构设计具有不同的韧性性能;2) 网络节点或者连边的故障修复,如节点或者连边的可逆性设计、节点或者连边的动态扩容、节点或者连边的故障保护功能等;3) 冗余备份策略,冗余备份策略能够在系统受到攻击时,通过可替代的方式抵御攻击和恢复系统,这是一种简单有效的方法,也是在指挥信息系统的工程实践中使用最为频繁的,其不足之处就是韧性性能优化的代价太大;4) 接替策略,在韧性性能优化的实现过程上与冗余备份策略比较相似,就是在系统网络结构中,当节点受到攻击而失效时,通过其他运行中节点接替失效节点的功能,并使得系统能够快速恢复正常运转;5) 适应性重构,当存在风险或者任务发生变化导致系统功能或者性能降级后,系统网络结构通过适应性重构调整来恢复或维持系统执行任务的功能或性能。

从优化机理上看,现有的许多研究或是采用离线全局优化的方法,在开始前完成一次优化后不再进行优化,或是在需要结构调整时考虑从该时刻到结束时刻进行优化。对于网络结构的拓扑设计和冗余备份策略设计而言,离线全局优化的方法比较适用;而对于网络节点或者连边的故障修复、接替策略设计和适应性重构而言,另一种优化方法则更加适合。然而,在实际的问题中风险或是任务环境的变化往往是连续而不确定的,很难通过一次调整直接使得网络结构达到最优。因此,可以考虑引入滚动时域方法(Rolling Horizon Procedure, RHP)对网络结构进行一系列小规模或是有限时域的局部优化,代替大规模或无限时域的单次全局优化,以保证系统完成任务的能力始终处于可接受的范围之内。在众多基于 RHP 的研究中,文献[20]提出了滚动时域方法的 3 项基本原理,包括场景预测、滚动窗口优化和反馈初始化。其中,场景预测为搜索最优解的策略提供了目标;滚动窗口优化降低待求解问题的规模;反馈初始化则是将环境的不确定性及时反映到下次的优化中,从而使优化问题能够建立在实时信息的基础之上。

借鉴上述思想,基于 RHP 的系统网络结构调整框架如图 5 所示。

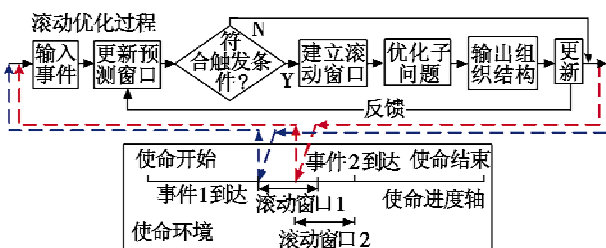


图 5 基于 RHP 的系统网络结构调整框架

Fig.5 RHP-based system network structure adjustment framework

在完成任务期间,风险或者任务发生变化都会引起预测窗口的更新。当滚动触发条件满足时,滚动窗口自动建立并求解优化子问题,对网络结构进行调整。最后将环境变化信息和调整效果反馈到滚动窗口中,为下次的优化打下基础。

上述策略实施过程中:1) 需要权衡考虑适应性重构调整的代价和系统恢复的效益之间的关系,采用尽可能小的代价恢复系统最大的功能或性能;2) 需要考虑控制网络节点之间的依赖关系防止故障传播,产生级联失效。

指挥信息系统网络结构韧性性能优化的策略方案如图 6 所示。

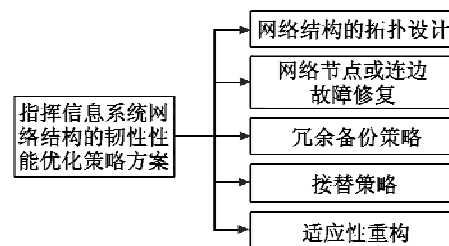


图 6 指挥信息系统网络结构韧性性能优化的策略方案

Fig.6 Strategic plan for resilience optimization of the command information system network structure

实质上,图 6 中的指挥信息系统韧性性能优化策略是对图 2 中韧性过程的整体考虑。其中:网络结构的拓扑设计主要是为了减少系统在面对风险和任务变化时能力的降级度;网络节点或者连边的故障修复主要需要考虑系统对风险的响应时间并提高系统能力的恢复度;冗余备份策略和接替策略的设计主要是为了缩短系统能力的恢复时间;适应性重构则是在上述措施的基础上,通过对系统的快速有效重构进一步缩短恢复时间并提升恢复效果。由于各个策略之间是相互补充、相互促进的关系,在实际运用过程中,上述 5 种策略可以进行组合使用以达到更好的效果。

在指挥信息系统网络结构韧性性能优化策略的组合优化运用过程中,需要重点处理以下 3 个方面的复杂关系。

1) 韧性性能优化代价和优化效益的权衡关系。韧性性能的优化代价是韧性性能优化问题必须考虑的因素,对于很多韧性性能的优化策略如适应性重构、冗余备份策略等,韧性性能优化的代价直接影响其方案的设计。从整体效益上看,优化过程中的各项措施越完善,需要的防护和恢复代价也越高。

2) 系统全局网络结构韧性性能优化和局部网络结构韧性性能优化的权衡关系。处理这种权衡关系是为了防止出现系统的局部韧性性能都良好而系统整体韧性性能很差,比如:构成指挥信息系统网络结构的各

个节点因为韧性性能优化策略对于某特定风险(如蓄意攻击)具有很好的韧性性能,但由于网络结构节点之间的连边存在漏洞,攻击方通过渗透破坏使指挥信息系统工作失效,造成整体韧性丧失。总体来说,系统局部网络结构韧性性能优化的策略方案要服从于系统整体网络结构韧性性能优化策略方案。

3) 系统网络结构全程韧性性能优化和阶段韧性性能优化的权衡关系。在指挥信息系统执行任务的过程中,其网络结构的韧性性能优化过程并不是只有一个阶段,而是贯穿于整个任务执行过程的始终,在每个阶段都需要考虑本阶段优化的代价,需要考虑对后续时间阶段韧性性能优化的影响,合理分配每个阶段韧性性能在整个任务执行过程的韧性性能中所占的比重,权衡优选出最合适的指挥信息系统网络结构各个阶段韧性优化策略方案组合,总体来说,阶段韧性性能优化的策略方案要服从于全程韧性性能优化。

此外,近年来,认知网络等新兴技术的出现也为网络结构的韧性性能优化提供了新的思路和技术支撑。认知网络能够感知当前自身的情况,以进行计划、判决和采取相应的自适应行动,并能将从这些自适应行动中学习到的知识应用于未来的判决。显然,认知网络的上述能力对于指挥信息系统网络结构的韧性提升具有重要的作用。具体可以体现在以下两个方面。

1) 在网络状态的感知方面,认知网络能够自动感知环境或是任务变化给其带来的影响,从而为后续的调整提供思路。例如文献[21-22]都是基于网络感知技术对服务 QoS 进行实时感知,并设计了相应的虚拟机调度算法,从而保证了系统的运行效能。而在指挥信息系统中,网络状态的感知技术能够极大缩短系统的响应时间,为后续调整方案的制定与部署争取更多的时间。

2) 在自适应的学习机制方面,该能力有助于网络在不断的调整过程中有效积累经验,从而在后续的调整过程中执行更为有效的方案。例如文献[23]就是在网络容错策略模型的基础上利用机器学习方法对网络弹性进行预测,为容错设计提供支撑。而在指挥信息系统实际运行中,必然会伴随着演化调整,这些调整方案与调整后系统的效能实质上可认为是一种非常宝贵的经验数据。上述学习方法可以将这些经验数据进行充分的利用,为后续方案的制定与系统效能的预测提供强有力的技术支持,从而有助于系统韧性的提升。

可以看到,如果能将认知网络的特点真正发挥出来并运用于指挥信息系统,系统网络结构的韧性将会有质的飞越。尽管针对这方面的研究还处于起步阶段,但其前景是十分值得期待的。

3.3 指挥信息系统网络结构韧性性能管理研究

指挥信息系统网络结构的韧性管理是一项综合性的系统工程,其涉及的环节、领域和要素很多、很广,具体涉及工程技术、运行维护、人员培训和过程管理等诸多方面和环节;其含义具体是指实现和提升指挥信息系统网络结构执行任务中的韧性性能,针对系统用户需要或作战任务保障的具体需求,对与指挥信息系统网络结构的韧性相关的各类要素进行综合管控;其核心要素是指指挥信息系统网络结构韧性性能管理的对象和过程。

指挥信息系统网络结构韧性性能管理的对象包括韧性维护人员的管理、韧性相关信息的管理、韧性技术的管理以及韧性相关制度、标准和规范的管理。其中,韧性维护人员的管理主要需要明确维护人员的角色和职责、提高维护人员的能力水平以及加强对维护人员的组织领导;韧性相关信息的管理主要包括韧性相关信息的需求管理、服务管理、防护管理、数据管理等;韧性技术的管理需要明确指挥信息系统韧性的技术手段的需求分析、定义配置、方案规划、开发部署等;韧性相关制度、标准和规范的管理需要明确指挥信息网络结构韧性性能等级的判断准则、韧性过程设置、韧性模型规范等。

指挥信息系统网络结构韧性性能管理的过程可以初步划分为4大环节。第1环节是韧性环境的评估,该环节包括对指挥信息系统执行任务的分析以及对整个外部环境的攻击事件和指挥信息系统内部要素的风险故障的评估;第2环节是韧性目标的分析,该环节根据指挥信息系统具体的实际情况和执行任务需要,得出其对韧性目标的设定;第3环节是韧性性能的测度,该环节根据韧性目标,构建韧性测度指标体系,设计韧性测度方法并度量系统网络结构的韧性;第4环节是韧性性能的优化,该环节分析韧性性能优化策略,包括防御性优化策略和修复性优化策略,以最小的优化成本,考虑在最坏情况下实现韧性目标的最大化。

4 结束语

指挥信息系统网络结构韧性已经成为指挥信息系统具备主动防护、快速重构和动态适应能力的重要属性,现有研究成果不多,能够指导工程实践的实用性成果非常有限。下一步应该在本文提出的指挥信息系统网络结构韧性概念和初步研究思路的启发下,重点开展对韧性性能度量、优化、管理方面的研究,抢占现代指挥信息系统网络结构韧性领域的制高点。

参考文献

- [1] 蓝羽石. 对网络为中心指挥信息系统的认识[J]. 指挥

- 信息系统与技术,2010,1(1):1-4.
- [2] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4:1-23.
- [3] ROSE A, LIAO S Y. Modeling regional economic resilience to disasters;a computable general equilibrium analysis of water service disruptions [J]. Journal of Regional Science, 2005, 45(1):75-112.
- [4] PIMM S L. The complexity and stability of ecosystems [J]. Nature, 1984, 307:321-326.
- [5] REGGIANI A, DE GRAAFF T, NIJKAMP P, et al. Resilience:an evolutionary approach to spatial economic systems [J]. Networks and Spatial Economics, 2002, 2(2):211-229.
- [6] GILLY J P, KECHIDI M, TALBOT D. Resilience of organisations and territories;the role of pivot firms [J]. European Management Journal, 2014, 32(4):596-602.
- [7] LARKIN S, FOX-LENT C, EISENBERG D A, et al. Benchmarking agency and organizational practices in resilience decision making [J]. Environment Systems and Decisions, 2015, 35(2):185-195.
- [8] WOODS D D. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 141:5-9.
- [9] 刘晓,赵海,张君,等. 互联网拓扑结构中的弹性网络特征 [J]. 东北大学学报:自然科学版,2016,37(4):486-489,495.
- [10] 林俊宇,王慧强,马春光,等. 一种基于 DAG 动态重构的认知网络服务迁移方法 [J]. 软件学报,2014,25(10):2373-2384.
- [11] 伍文,孟相如,刘芸江,等. IP 网络弹性路由层拓扑生成优化算法 [J]. 电子科技大学学报,2014,43(5):769-774.
- [12] 齐小刚,张碧雯,刘立芳,等. 复杂信息网络的弹性评估和优化方法研究 [J]. 计算机科学与探索,2018,12(8):1252-1262.
- [13] Defense Science Board. Resilient military systems and the advanced cyber threat [R]. Washington DC:Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, 2013.
- [14] Office of the Chief Scientist of the U. S. Air Force. Technology horizons;a vision for air force science & technology during 2010-2030 [R]. Washington DC:U. S. Department of the Air Force, 2010.
- [15] 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.
- [16] 崔琼,李建华. 网络化指挥信息系统韧性问题探析 [J]. 空军工程大学学报:军事科学版,2016,16(2):40-43.
- [17] 石建伟,刘俊先,姜志平,等. 基于超网络的军事体系韧性评估 [J]. 指挥与控制学报,2017,3(3):213-217.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制 [J]. 控制理论与应用,2000,17(5):665-670.
- [21] 罗刚毅,钱柱中,陆桑璐. 一种基于网络感知的虚拟机再调度算法 [J]. 计算机学报,2015,38(5):932-943.
- [22] 陈磊,章兢,蔡立军,等. 基于网络感知的两阶段虚拟机分配算法 [J]. 湖南大学学报:自然科学版,2016,43(4):120-132.
- [23] 郑小禄,黄宁,徐侃. 基于超限学习机的通信网络弹性预测方法 [J]. 通信技术,2018,51(1):92-100.
- (上接第 25 页)
- [6] 赵弋峰. 激光运动目标空间定位与 KF 算法跟踪研究 [D]. 西安:西安电子科技大学,2016.
- [7] 吕昊,王兰. 激光雷达在运动目标定位中的应用 [J]. 激光杂志,2016,37(9):72-75.
- [8] 蔡明兵,刘晶红,徐芳. 无人机侦察多目标实时定位技术研究 [J]. 中国光学,2018,11(5):812-821.
- [9] 贺若飞,田雪涛,刘宏娟,等. 基于蒙特卡罗卡尔曼滤波的无人机目标定位方法 [J]. 西北工业大学学报,2017,35(3):435-441.
- [10] 邵慧. 无人机高精度目标定位技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2014.