

灵境卫士：基于 ACP 的网络安全平行监管研究

陈晓光 韩金朋 杨满智 王晓 刘昕 王震 王飞跃

ParaDefender: the parallel supervision for cybersecurity based on ACP

CHEN Xiaoguang, HAN Jinpeng, YANG Manzhi, WANG Xiao, LIU Xin, WANG Zhen, WANG Fei-Yue

引用本文：

陈晓光, 韩金朋, 杨满智, 等. 灵境卫士：基于 ACP 的网络安全平行监管研究[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 247-253.

Xiaoguang CHEN, Jinpeng HAN, Manzhi YANG, et al. ParaDefender: the parallel supervision for cybersecurity based on ACP[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 247-253.

您可能感兴趣的其他文章

平行设计：面向平行制造体系的非标机械方案设计流程

Parallel design: non-standard mechanical scheme design procedure in parallel manufacturing
智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 274-284

平行电池：智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程

Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services
智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 521-531

平行智能风沙防护治理决策支持系统——塔克拉玛干沙漠公路及其防沙体系

Windblown sand control decision-making support system based on parallel intelligence: Taklimakan desert highway and its sand-breaking system
智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 499-506

平行哲学与智能技术：平行产业与智慧社会的对偶方程与测试基础

Parallel philosophy and intelligent technology: dual equations and testing systems for parallel industries and smart societies
智能科学与技术学报. 2021. 3(3): 245-255

面向城市复杂系统的社会计算关键技术研究

Research on key technologies of social computing for urban complex system
智能科学与技术学报. 2021. 3(2): 228-233

平行医学：从医学的温度到智慧的医学

Parallel medicine: from warmth of medicare to medicine of smartness
智能科学与技术学报. 2021. 3(1): 1-9

灵境卫士：基于ACP的网络安全平行监管研究

陈晓光¹, 韩金朋², 杨满智¹, 王晓³, 刘昕⁴, 王震⁵, 王飞跃^{1,6,7,8}

(1. 澳门科技大学澳门系统工程研究所, 澳门 999078;

2. 西安交通大学软件学院, 陕西 西安 710049;

3. 安徽大学人工智能学院, 安徽 合肥 230031;

4. 中国石油大学(华东)计算机科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

5. 杭州电子科技大学网络空间安全学院, 浙江 杭州 310018;

6. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;

7. 北京怀柔平行传感智能研究院, 北京 101407;

8. 中国科学院自动化研究所北京市智能化技术与系统工程技术研究中心, 北京 100190)

摘要: 网络安全起源于计算机网络的理论测试, 而随着信息与通信技术的发展, 网络安全风险呈现出来源广(volume)、方式多(variety)、过程隐(visibility)与损失高(value)的“4V”特性, 与之相伴的是网络空间形态与复杂度的双重变化。近期兴起的元宇宙风潮, 使以人为中心构建出的网络空间拥有映射出真实世界的能力, 也将真实世界暴露在网络安全风险之下。然而, 网络安全监管没有跟上网络空间的变化, 仍然在网络空间中寻求解决之道。介绍了一种网络安全平行监管系统——灵境卫士, 它基于人工系统、计算实验与平行执行的ACP方法搭建, 从信息-物理-社会系统(cyber-physical-social systems, CPSS)的视角改善当前网络安全监管的窘境。展示了灵境卫士在电信反诈骗与工业物联网场景下的应用方案, 为其在不同领域的网络安全监管工作提供启发与借鉴。

关键词: 网络安全; 信息-物理-社会系统; 知识自动化; 平行智能; 平行安全

中图分类号: TP181

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202320

ParaDefender: the parallel supervision for cybersecurity based on ACP

CHEN Xiaoguang¹, HAN Jinpeng², YANG Manzhi¹, WANG Xiao³, LIU Xin⁴, WANG Zhen⁵, WANG Fei-Yue^{1,6,7,8}

1. Macao Institute of Systems Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao, 999078, China

2. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

3. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 230031, China

4. College of Computer Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao, 266580, China

5. School of Cyberspace Security, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang, 310018, China

6. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

7. Beijing Huairou Academy of Parallel Sensing, Beijing, 101407

8. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

Abstract: Cybersecurity originated from the theoretical testing of computer networks. With the development of informa-

收稿日期: 2023-03-18; 修回日期: 2023-04-13

通信作者: 王飞跃, fei-yue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018AAA0101502); 国家电网有限公司总部“人在回路的大电网调控混合增强智能基础理论”配套项目

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018AAA0101502), The Joint Science and Technology Project of SGCC (State Grid Corporation of China): The Fundamental Theory of Human-in-the-Loop Hybrid-Augmented Intelligence for Power Grid Dispatch and Control

tion and communication technology (ICT), cybersecurity threats present the "4V" characteristics of high source volume, many varieties, process not visibility, and high-value losses. This is accompanied by a double change in the formation and complexity of cyberspace. With the recent rising of metaverse, the human-centered cyberspace has the ability to map the real world and exposes the real world to cybersecurity threats. However, cybersecurity supervision does not keep up with the changes in cyberspace and still seeks solutions in cyberspace. A parallel supervision system for cybersecurity, ParaDefender was introduced, which was constructed based on artificial systems, computational experiments and parallel execution of ACP method to improve the current dilemma of cybersecurity supervision from the perspective of cyber-physical-social systems (CPSS). We demonstrated provided the application solutions of ParaDefender in telecom anti-fraud and industrial IoT scenarios and inspiration and reference for cybersecurity supervision in different fields.

Key words: cybersecurity, cyber-physical-social systems, knowledge automation, parallel intelligence, parallel security

0 引言

计算机网络实现了数据的高效传输,也为网络攻击提供了可靠的链路与平台^[1-2]。早在1971年,来自BBN (Bolt Beranek and Newman Inc.)的研究者鲍勃·托马斯,在互联网的前身阿帕网 (ARPA network) 上部署了目前已知的第一个计算机病毒 Creeper^[3]。由此,拉开了网络安全空间监管的序幕。19世纪80年代,科幻小说中孵化出了能广泛互联互通的数字技术网络空间 (cyberspace, 也被称作赛博空间) 的文学概念。这一代表“新疆域”的概念一经出现,就引发了学术界与国防安全领域从业人员的高度关注。威廉·吉布森在发表于1984年的科幻小说《神经漫游者》中,畅想了当人类能够穿越网络空间后的景象,用图灵警察描绘了监督管理网络空间并围绕网络安全执法的警察形象^[4]。在网络安全早期,不论是入侵检测,还是计算机病毒与蠕虫防护都需要大量的人工分析与干预才能维持住薄弱的网络空间。伴随着虚拟现实、数字孪生和人工智能等技术^[5-6]的进一步发展,沉浸式交互的元宇宙将有可能改变网络空间的形态,网络安全监管也将面临新的挑战。

网络作为数据传输的手段,在不同时期扮演着不同的角色。早期的网络是为了连接计算机,来增强计算机群组的计算能力;随着大数据技术的发展,网络破除数据孤岛,连接万物,探索数据背后的底层逻辑与优化方案^[7];而进入元宇宙时,网络虽是数据传输的主要工具,但这些数据来自人的感知,甚至是人的意识。元宇宙的顺畅运行,将对网络提出远超当前的性能要求。伴随着网络性能的提升,网络的组织形态与原则也将演化更迭。此外,接入到网络空间的终端粒度将进一步下降,以此来

提升元宇宙对于真实世界感知与影响的能力,使得虚实交互界线越发淡化。终端的种类、数量与功能将随着元宇宙的发展,将越来越多,这也使得网络空间的复杂度骤然成长^[8]。面对网络空间形态与复杂度的双重变化,网络安全监管技术也亟待新的思维与技术指导。

网络空间的变化将带来新的网络安全监管环境。元宇宙的出现相较于物联网,增加了人与虚拟空间的交互。引入人的因素,将物理硬件为基础设施、虚拟软件为服务载体的网络安全监管系统演进为信息-物理-社会系统 (cyber-physical-social systems, CPSS)^[9-11]。这一新视角将网络安全监管问题带向需要系统性解决方案的道路,不再走“头痛医头,脚痛医脚”的老路。中科院自动化研究所王飞跃研究员提出了人工系统-计算实验-平行执行 (artificial systems-computational experiments-parallel execution, ACP) 方法,来解决复杂的CPSS问题^[12]。人与社会存在着难以建模的问题,使得现有基于网络模型的网络监管方案缺乏支撑。人工系统利用场景工程多元映射出真实系统的多种可能,从传统的模型求解转化为场景实验的新视角,使得CPSS的复杂问题有了立足之地;再者,计算实验基于人工系统探索网络监管可行方案;最终,平行执行评估验证可行方案,并部署最优方案到真实场景中。从而形成真实场景到ACP,再到真实场景的大闭环^[13-15]。本文的主要贡献有以下3点:

(1) 提出网络安全平行监管系统——灵境卫士,该系统基于ACP方法构建应对复杂网络安全形势的主动防御机制;

(2) 总结灵境卫士的理论与框架基础,包括社会计算、知识自动化与基于多智能体控制等;

(3) 给出灵境卫士对现实网络安全问题的应用

可能,如电信诈骗治理与工业物联网防护。

本文的组织结构为:第1节介绍灵境卫士借助ACP方法,对网络安全问题进行解构与分析,通过多次重复的方式评估与改进网络安全监管策略,并依据灵境卫士积累的深知识引导真实网络安全监管,最终形成一个闭环稳健的监管体系;第2节系统概述灵境卫士的基础理论与框架,包括社会计算、平行网络、知识自动化与基于多智能体的网络代理控制等;第3节与第4节分别介绍了典型应用与面临的挑战;第5节总结了本文的主要内容,并展望了未来的工作方向。

1 灵境卫士

在20世纪90年代,著名科学家钱学森建议使用“灵境”作为visual reality (VR)的中文翻译,以虚拟方式体验身临其境。我们提出基于ACP方法的灵境卫士来保护虚实交互的网络安全,本节将从现实案例出发,探索网络安全新思维,再展示平行系统的架构。

1.1 融合信息-物理-社会因素的网络安全案例

(1) 网络谣言

2013年4月23日,叙利亚黑客组织侵入了美联社推特账号,并以美联社名义发布了时任美国总统奥巴马在白宫遇袭受伤的虚假消息,直接导致标准普尔500指数在3分钟内蒸发1365亿美元市值。黑客利用网络攻击技术盗取权威媒体账户来发布虚假信息,影响舆情发展,引起社会动荡。接收这些虚假信息的人发生了认知变化,产生了有损自身的行为,造成经济损失。这一案例说明虚拟世界的攻击能够影响真实世界中人的认知变化,从而产生一系列真实世界中的决策。

(2) 疫情防控

自2019年新冠疫情暴发以来,信息通信技术为有效落实疫情防控政策提供了有力支持。而在信息层面,个别APT(advanced persistent threat)组织冒充疫情防控相关部门向部分单位投放钓鱼邮件;在物理层面,居家办公与疫情相关应用面对骤然增长服务请求,致使网络服务中断或降速;在社会层面,与疫情相关的网络谣言四起,不断挑动着社会敏感话题来激化社会矛盾。虽然,这些层面各自都造成了严重影响,但3个层面融合的趋势也在显现。信息-物理-社会融合的网络安全场景亟需新的网络安全监管方式来统筹监管资源,全面保障网

络空间的平稳安全运行。

1.2 从现实世界形态看网络安全监管新思维

受卡尔·波普尔关于现实由物理世界、心理世界与人工世界组成的哲学思想^[16]启发,我们提出了3个世界与3类监管者就是我们对网络安全智慧监管的基本假设,如图1所示。对应于不同世界的开发技术分别是工业技术(industry technology)、信息技术(internet technology)与智能技术(intelligence technology);从历史发展的角度,分别经历了工业时代、信息时代与智能时代;从全球化竞争的角度,分别是负和、零和与正和的博弈形式。我们相信,未来网络安全监管组织的成员将由3类监管者组成:

- (1) 机器监管者主导体力工作,即智能机器,约占15%;
- (2) 生物监管者负责领导组织,即人类本身,约占5%;
- (3) 数字监管者承载计算服务,即智能程序与信息机器,约占80%。



图1 网络安全监管的新境界:3个世界、3类监管者

在网络安全监管过程中,生物监管者设定网络安全指标与监管边界,并负责维护数字与机器监管者的运行状态;数字监管者依照生物监管者的设定,搭建网络空间的安全风险场景,并分析与优化基于场景的监管方案,来为机器监管者提供可行的指令方案;最终,机器监管者按照指令实施监管行动,并为生物监管者提供现场感知能力。

1.3 平行系统的基础架构

平行系统是求解CPSS复杂问题的一种可行方案。ACP方法是平行系统架构的核心，主要由人工系统（artificial systems）、计算实验（computational experiments）与平行执行（parallel execution）组成，基于ACP方法的平行系统基础架构如图2所示。人工系统是真实系统的多元映射，其基于真实系统的特征搭建，满足计算实验的技术需求，并受到平行执行的现实调整^[17]。计算实验的目的是分析真实系统的复杂问题，通过人工系统的实验平台反复多次进行方案评估与调整来获得有效的解决方案^[18]。最终，平行执行将基于人工系统获得的可行方案，针对真实系统的实施环境进行调整，以实现系统管理与控制目标^[19]。从数据与策略的角度可以看出，人工系统的构建是真实系统的小数据到人工系统的大数据的增长过程，计算实验是大数据向深知识的提炼过程，平行执行是深知识到小智能的应用过程^[20]。

1.4 平行系统的基础架构

网络安全监管的对象从信息-物理系统（cyber-physical system, CPS）演进到CPSS^[21]，监管范围与

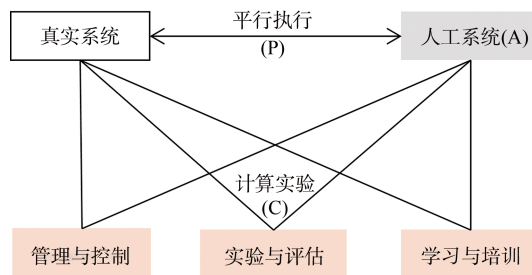


图2 基于ACP方法的平行系统基础架构

复杂度都陡然升高。网络空间的安全风险也呈现出物理、网络与社会3个空间的融合趋势。如图3所示，除了传统的网络攻击与社会工程网络风险，CPSS将加大网络安全问题导致的财产损失与人身损害等物理风险，并引发群体事件与组织动荡等社会风险。现有的网络安全监管体系难以应对元宇宙等CPSS所带来的网络安全问题。笔者提出以ACP方法为基础的平行监管新范式——灵境卫士。本节将进一步介绍ACP方法的人工系统、计算实验与平行执行在平行监管体系中的作用与流程。

(1) 人工系统

灵境卫士的人工系统是对真实网络空间的多元

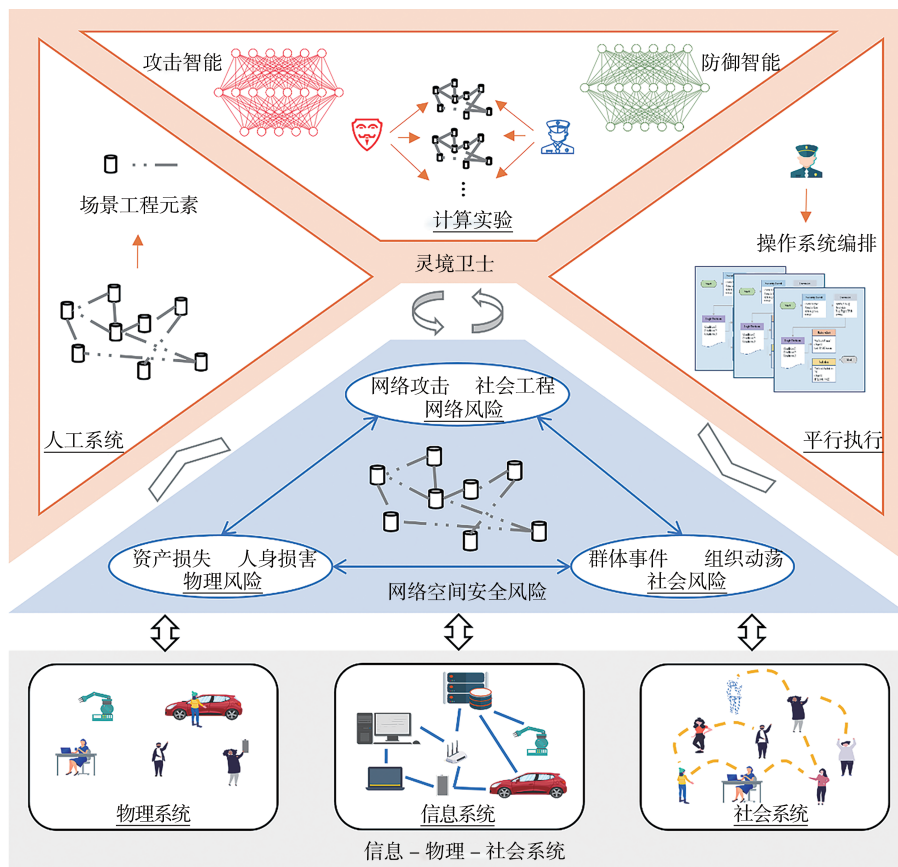


图3 灵境卫士的系统框架

映射, 是对网络空间的结构与活动的软件定义。依托于场景工程, 将人工系统分为场景控制层与场景元素层, 实现前所未有的可编程、自动化的网络空间搭建。场景控制层拥有逻辑与可编程控制器, 掌控全局网络空间信息。

场景元素层负责场景的解构、存储与构建, 能快速处理匹配的场景元素, 适应不断变化的服务请求。人工系统的目标是搭建源于真实网络空间、服务于计算实验的场景。人工系统不仅有真实网络空间的结构与活动, 还能演化与回放网络空间的变化, 这使得网络空间监管能更精准地分析网络安全问题的形成与诱因。

(2) 计算实验

人工系统是对复杂的真实网络空间进行建模, 而计算实验是对网络安全解决方案进行优化计算。由于 CPSS 网络空间监管问题的复杂多变, 基于单一场景分析优化的解决方案与真实场景存在巨大偏差。在不同人工系统构建的场景中, 反复多次地计算优化监管方案。促使用于计算的机器学习等方法能从海量实验大数据中, 凝练出监管 CPSS 网络空间的深知识。在攻防对抗的场景中, 攻防智能算法将给出该场景中网络空间智能体的行动策略, 并经过不断实验优化智能算法。训练出的防御智能算法将被评估分析后存储到深知识的防御策略库中。

(3) 平行执行

由于人工系统与真实网络空间的鸿沟, 计算实验获得的防御策略不能直接应用于真实问题。本质上, 计算实验的结论仅是对人工网络空间中安全问题的分析, 并没有对真实的运营场景进行优化。平行执行的一个作用便是将人工网络空间与真实网络空间的数据、模型与操作自由交互。平行执行优化后的可行方案应用于真实网络空间, 真实网络空间的变化将映射到人工系统中形成大闭环。灵境卫士通过平行执行实现控制与管理人工与真实网络空间。在线与离线的评估与分析汇集在平行执行环节, 来支撑其决策。

2 理论与框架基础

2.1 社会计算

社会计算的概念最早出现在 1994 年, 主要从软件应用角度服务于社会关系, 而没有关注基于社会关系的计算分析^[22]。随着信息技术的不断发展, 虚拟网络社会对于现实世界的影响也在不断显现。例如, 恐怖主义组织借由互联网宣传与组织恐怖主

义活动; 政治团体在社交软件的推波助澜下, 影响投票结果, 甚至推翻政权。20 世纪 90 年代初, 兰德公司受信息技术在东欧剧变中发挥的作用的启发, 提出了人工社会的构想^[23]。结合人工生命的观点, 王飞跃研究员将人工社会从追求真实的仿真拓展到可替代现实社会的多重社会^[17]。进一步提出以 ACP 方法为核心的社会计算方法, 来处理动态网民群体构成的复杂虚拟网络社会问题^[24]。

2.2 知识自动化

知识自动化是一种以自动化的方式改变知识生命周期中每个环节及其自身的方法。知识自动化的发展历史可以追溯到描述性知识与形式逻辑^[25]。随着人工智能技术的不断探索, 知识自动化在知识表示、专家系统、知识工程与智能系统等领域取得了众多成果。在此过程中, 脱胎于自然语言方法的大模型正在成为知识自动化的一份基石。大模型已然涵盖了除知识生产以外的所有知识自动化过程^[26]。从此处眺望, 以智能算法与软件机器人为基础, 构建于网络空间中的数字人将拥有完整的知识自动化能力。

2.3 基于多智能体的控制

智能体 (agent) 即代理, 通常是指具有感知、决策与执行能力的软件或硬件实体。两个及以上智能体构成的系统, 被称作多智能体系统 (multi-agent systems, MAS)^[27-29]。以智能体为模型 (agent-based model, ABM), 模拟实体的行为与交互, 分析由智能体构成的系统行为以及施加控制后的效果。ABM 拥有如元胞自动机、基于行为的有限状态机等坚实的理论基础, 也在深度学习、强化学习与遗传算法等算法的探索中焕发生机。ACP 方法生根于社会计算, 其中人工社会与人工生命的探讨都离不开 ABM。在 ACP 方法中, 智能体不再是实体的复制品, 而是实体的多元映射。

3 典型应用领域

3.1 反电信诈骗

电信诈骗的低投入高回报的特性, 促成国际诈骗集团的出现。集团化的组织管理提升了电信诈骗的效率, 也使得社会中的个体难以承受不断升级的诈骗话术与圈套。此外, 信息通信技术的发展, 增加了电信诈骗的实施途径, 犯罪分子开发出 GoIP 虚拟拨号设备、手机仿真池 (养马场沙盒) 以及伪基站等诈骗工具。这些工具的出现, 一方面催生了新的诈骗方法, 监管者难以拦截反制; 另一方面犯

罪分子与诈骗设备的分离,使监管者信号溯源与追捕犯罪分子难度增大。传统电信诈骗监管方法被限制在CPS的框架内,无法对人与其行为进行描述与建模,从而造成反电信诈骗的窘境。而灵境卫士能够借助人工系统构建出电信诈骗的流程与人员活动,再经过计算实验对电信诈骗与反诈骗方法进行实验与优化,最终经过平行执行的优化寻找出可行的反电信诈骗行动方案。灵境卫士不仅能提供可行的反电信诈骗方案,也能利用人工系统对电信诈骗与反诈骗进行全流程演示,从而培养个人的反诈骗意识,围堵犯罪分子开发诈骗方法的想法,遏制电信诈骗活动。

3.2 工业物联网防护

工业生产的需求来源于社会,工业所需的劳动力来自社会,在工业4.0基础上加入虚实交互的社会因素,也就进入了工业5.0。工业物联网作为工业5.0的技术基础,所面临的网络安全风险也将危及工业平稳发展。由于工业物联网相对于互联网的网络安全监管是落后的,因此弱密码与漏洞得不到修复等问题成为常态。灵境卫士提供的工业物联网的孪生网络也是人工系统的一部分。在人工系统上构建不同的安全风险场景,从中收集关键安全因素(例如:网络协议、网络流量与人员操作等)进行分析理解,并据此提出相应场景的可行防护方案。针对不同场景要素对可行方案进行性能排序,便于网络安全运维人员搜寻与操作。此外,灵境卫士从历史现场方案部署效果评估可行方案,并为网络安全运维人员提供手动选择外的自动编排网络安全修复操作。

4 结束语

网络安全监管的工作,自计算机网络出现以来一直在被探索与发展。随着信息通信技术的发展,网络空间已经进入元宇宙的新时代,虚拟化身在元宇宙中构建出的虚拟社会也能作用于传统网络空间与物理空间^[30]。这使得缓慢融合信息-物理-社会的CPSS系统,加速进入专家与学者的视野。以CPSS为对象的网络安全监管体系面临着严峻挑战。本文介绍了网络安全监管的新范式——灵境卫士,其基于ACP方法构建。ACP方法能将CPSS所带来的不确定性、多样性与复杂性特征转化为灵敏、聚焦与收敛特性,从而将“无解”问题变为“有解”问题。本文的重点是介绍灵境卫士发展情况,并为网络安全监管的研究者提供思路。

参考文献:

- [1] 李强,阳东升,孙江生,等. "社会认知战": 时代背景、概念机理及引领性技术[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(2): 97-106.
LI Q, YANG D S, SUN J S, et al. Social cognition operations: backgrounds, concepts, mechanisms and leading technologies[J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(2): 97-106.
- [2] 郑文博,李强,刘文礼,等. 数据知识驱动的城市作战元宇宙建模框架[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(1): 23-32.
ZHENG W B, LI Q, LIU W L, et al. Data-knowledge-driven metaverse modeling framework for urban warfare[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(1): 23-32.
- [3] SCHANTZ R E. BBN's network computing software infrastructure and distributed applications (1970-1990)[J]. IEEE Annals of the History of Computing, 2006, 28(1): 72-88.
- [4] GIBSON W. Neuromancer[M]. New York: Ace Books, 1984
- [5] WANG F Y, QIN R, LI J J, et al. Federated management: toward federated services and federated security in federated ecology[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2021, 8(6): 1283-1290.
- [6] WANG F Y, ZHU J, QIN R, et al. Federated control: toward information security and rights protection[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2021, 8(4): 793-798.
- [7] 贾凡,熊刚,朱凤华,等. 基于MQTT的工业物联网通信系统研究与实现[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 249-259.
JIA F, XIONG G, ZHU F H, et al. Research and implementation of industrial internet of things communication system based on MQTT[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 249-259.
- [8] 韩金朋,刘忠民,吕秋云,等. 元安全: 基于平行安全的元宇宙安全框架[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 249-259.
HAN J P, LIU Z M, LYU Q Y, et al. MetaSecurity: a framework for metaverse security based on parallel security[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(3): 249-259.
- [9] HAN J P, YANG M Z, CHEN X G, et al. ParaDefender: a scenario-driven parallel system for defending metaverses[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 53(4): 2118-2127.
- [10] 李滢东,张俊,陶耀东,等. 平行安全: 基于CPSS的生成式对抗安全智能系统[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(2): 194-202.
LI Y D, ZHANG J, TAO Y D, et al. Parallel security: generative adversarial systems for intelligent security in CPSS[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(2): 194-202.
- [11] 王飞跃. 平行世界的平行安全: 基于CPSS的生成式对抗安全智慧系统[J]. 信息安全与通信保密, 2018, 16(10): 21-22.
WANG F Y. Parallel security in parallel worlds—a generative countermeasure security intelligent system based on CPSS[J]. Information Security and Communications Privacy, 2018, 16(10): 21-22.
- [12] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [13] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [14] 李小双,王晓,杨林瑶,等. 元电网MetaGrid: 基于平行电网的新一代智能电网的体系与架构[J]. 智能科学与技术学报, 2021(4): 387-398.
LI X S, WANG X, YANG L Y, et al. MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021(4): 387-398.
- [15] WANG J G, SHEN T Y, TIAN Y L, et al. A parallel teacher for

- synthetic-to-real domain adaptation of traffic object detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 7(3): 441-455.
- [16] POPPER K R. Objective knowledge: an evolutionary approach[M]. New York: Oxford University Press, 1975.
- [17] 王飞跃, 史帝夫·兰森. 从人工生命到人工社会—复杂社会系统研究的现状和展望[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 33-41.
WANG F Y, LANSING J S. From artificial life to artificial societies - new methods for studies of complex social systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(1): 33-41.
- [18] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. 中国基础科学, 2004, 6(5): 5-12.
WANG F Y. Computational theory and methods for the study of complex systems[J]. China Basic Science, 2004, 6(5): 5-12.
- [19] 王飞跃, 王晓, 袁勇, 等. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然[J]. 科学通报, 2015, 60(5-6): 460-469.
WANG F Y, WANG X, YUAN Y, et al. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(5-6): 460-469.
- [20] 王飞跃. 平行管理: 复杂性管理智能的生态科技与智慧管理之DAO[J]. 自动化学报, 2022, 48(11): 2655-2669.
WANG F Y. Parallel management: the DAO to smart ecological technology for complexity management intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(11): 2655-2669.
- [21] WANG X, YANG J, HAN J P, et al. Metaverses and DeMetaverses: from digital twins in CPS to parallel intelligence in CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(4): 97-102.
- [22] SCHULER D. Social computing[J]. Communications of the ACM, 1994, 37(1): 28-29.
- [23] BUILDER C, BANKES S. Artificial societies: a concept for basic research on the societal impacts of information technology[R]. Santa Monica, CA, USA: RAND Report, 1991.
- [24] 王飞跃. 基于社会计算和平行系统的动态网民群体研究[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(1): 8-17.
WANG F Y. Study on cyber-enabled social movement organizations based on social computing and parallel systems[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(1): 8-17.
- [25] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 1-8.
WANG F Y. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 1-8.
- [26] LU J W, WANG X X, CHENG X, et al. Parallel factories for smart industrial operations: from big AI models to field foundational models and scenarios engineering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2079-2086.
- [27] 沈宇, 王晓, 韩双双, 等. 代理技术Agent在智能车辆与驾驶中的应用现状[J]. 指挥与控制学报, 2019, 5(2): 87-98.
SHEN Y, WANG X, HAN S S, et al. Agent-based technology in intelligent vehicles and driving: state-of-the-art and prospect[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(2): 87-98.
- [28] 沈宇, 韩金朋, 李灵犀, 等. 游戏智能中的AI——从多角色博弈到平行博弈[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 205-213.
SHEN Y, HAN J P, LI L X, et al. AI in game intelligence—from multi-role game to parallel game[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 205-213.
- [29] ZHU Z Q, WANG X, ZHAO Y, et al. Crowdsensing intelligence by decentralized autonomous vehicles organizations and operations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 7(4): 804-808.
- [30] WANG F Y, QIN R, WANG X, et al. MetaSocieties in metaverse: Me-

taEconomics and MetaManagement for MetaEnterprises and MetaCities[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2022, 9(1): 2-7.

[作者简介]



陈晓光 (1982-), 男, 澳门科技大学澳门系统工程研究所博士生, 主要研究方向为平行智能、平行安全和工业物联网安全。



韩金朋 (1994-), 男, 西安交通大学软件学院博士生, 主要研究方向为平行智能、平行安全、安全博弈和车联网安全。



杨满智 (1979-), 男, 澳门科技大学澳门系统工程研究所博士生, 主要研究方向为平行智能、平行安全和网络安全。



王晓 (1988-), 女, 博士, 安徽大学人工智能学院教授, 主要研究方向为社会计算、群体行为建模、认知自动驾驶和智能医疗。



刘昕 (1974-), 女, 博士, 中国石油大学(华东)计算机科学与技术学院副教授, 主要研究方向为复杂数据分析、数据挖掘、社会计算和网络空间安全。



王震 (1984-), 男, 博士, 杭州电子科技大学网络空间安全学院教授, 主要研究方向为网络安全、人工智能安全、复杂网络、强化学习和算法博弈理论。



王飞跃 (1961-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 主要研究方向为复杂系统、智能控制、平行智能、社会计算和知识自动化。