指挥控制系统自主适变解决方案研究

赵鑫*, 郭成昊, 黄强, 张煜, 于靖

中国电子科技集团公司第二十八研究所信息系统工程重点实验室, 南京 210007

* 通信作者. E-mail: xinzhaocet@126.com

收稿日期: 2020-05-05; 修回日期: 2020-07-15; 接受日期: 2020-10-17; 网络出版日期: 2020-11-09

国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB1001800) 资助项目

摘要 围绕如何构建能够在高动态战场环境下持续保障多样化任务完成的指挥控制系统, 依据可成长软件理论、方法, 提出了一套指挥控制系统的自主适变解决方案; 首先建立了具备自主适变能力的指挥控制系统总体架构模型, 并构建了面向深度软件定义的核心任务保障框架; 在此基础上, 给出了基于“环境认知环–决策执行环”的“双环”自主适变机制, 以实现面向任务保障的主动感知、适变控制和重构演化; 最后基于所构建的技术验证原型系统进行了运行等级转进、资源受损下的业务持续运行等典型场景下的仿真试验验证.

关键词 指挥控制系统, 可成长软件, 自主适变, 核心任务保障

1 引言

未来战场环境快速多变、作战任务复杂多样, 呈现高动态及不确定等典型特征, 且作战过程中时敏任务增多, 跨域协同成为常态^[1~6]. 指挥控制系统 (简称指控系统) 作为信息化作战条件下的重要基础^[7,8], 一方面其必将成为强敌攻击的重点, 面临精准物理毁伤或赛博攻击导致系统主干节点无法正常工作的威胁, 特别是非预期的毁损 (如半数以上节点失效等) 可致使整个体系失能, 另一方面高动态、不确定的任务带来业务流程临机调整、突发性高负载等应用需求日益频繁. 然而, 目前指挥控制系统规模大、部署相对集中, 功能间耦合度较高且流程固化、预设为主, 系统快速响应、优化调整等支撑能力不足, 对于复杂的、超预期的调整需要人工介入、周期长, 难以满足高动态、强对抗的作战应用需求. 因此亟需发展具备自主适变能力的指挥控制系统, 能够适应未来多样化作战任务需求以及高动态强对抗的战场环境变化, 持续保障作战任务遂行.

随着云计算、大数据、物联网、人工智能等技术的快速发展, 在具备自主适变能力指控系统构建方法与技术方面, 以美国国防高级研究计划局 (DARPA) 为代表, 开展了诸如构建资源自适应的软件系统

引用格式: 赵鑫, 郭成昊, 黄强, 等. 指挥控制系统自主适变解决方案研究. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1665–1679, doi: 10.1360/SSI-2020-0119
Zhao X, Guo C H, Huang Q, et al. Solution study for building autonomous adaptive command and control systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1665–1679, doi: 10.1360/SSI-2020-0119

(BRASS)、韧性自主系统 (RAS)、意向定义自适应软件 (IDAS) 等大量预先研究工作。其中, BRASS^[9] 主要是寻求使用期限长、存活性高、扩展性强的自适应软件系统新的研究方法、编译程序设计、执行操作和虚拟计算机技术等, 形成能动态适应资源和操作环境变化的, 可“生存 100 年”的长寿命软件系统设计和应用的基础性理论; RAS^[10] 则重点发展能够在对抗环境中的实现人机互信、互补的有机协作系统, 提供应对威胁时的评估和恢复等能力, 以降低对任务目标达成的影响; IDAS 项目^[11] 是 DARPA 于 2019 年新近启动的, 旨在面向日益复杂的大型软件系统, 研究能够捕获程序员意图的软件开发新技术, 使系统能够根据新要求和操作环境的变化来快速生成和调整软件, 其最终目标是要大幅减少手动软件修改的需要, 将开发维护成本和工作量降低至少一个数量级。

在国内, 北京大学、南京大学、中国科学院软件研究所等开展了网构软件^[12~16] 的研究, 国防科技大学、电子科技集团等开展了软件自适应演化^[17~19]、韧性系统构建^[20~23] 等相关研究。2017 年以来, 由南京大学吕建院士牵头的“可持续演化软件理论、方法和技术”项目, 针对“人-机-物”三元融合应用模式下软件基础设施面临环境资源不断变迁的挑战, 创新地提出了“可成长软件”构想: 在其所处软硬件环境、所依赖外部资源, 以及所服务的用户目标不断变化条件下, 能通过主动的感知、智能的适应和持续的重构演化, 实现长期生存并不断优化。可成长软件的提出, 为发展具备自主应变能力的新一代指控系统提供了新的有力理论和方法指导。

因此, 以构建能够在高动态战场环境下持续保障多样化任务完成的指挥控制系统为需求牵引, 基于可成长软件范型和方法论, 提出了一套指挥控制系统自主应变解决方案。其中, 在第 2 节分析凝练了涵盖元素聚合解聚、任务动态组织、系统持续成长的指挥控制系统自主应变能力需求, 建立了具备自主应变能力的指控系统总体架构模型和面向深度软件定义的核心任务保障框架, 并提出了基于“环境认知环-决策执行环”的“双环”自主应变机制; 在此基础上, 第 3 节中给出了指挥控制系统自主应变解决方案的技术验证原型系统的组成结构, 并结合运行等级转进、基础资源受损下的业务持续运行两类典型场景对指挥控制系统自主应变解决方案的可行性进行验证; 最后, 第 4 节对本文进行了总结。

2 解决方案

2.1 总体架构模型

构建能够在高动态战场环境下持续保障多样化任务的“可成长”指挥控制系统, 主要根据元级化、定义化的软件可成长性方法, 即在传统软件基础上新增感知、适应、演化等可成长能力, 并通过“软件定义软件”的方式来应对环境和需求的变化。因此, 指挥控制系统自主应变解决方案设计, 核心是将指控系统的运行实体与自主应变控制解耦。一方面构造封装出松耦合、功能单一、内嵌可成长属性的系统实体元素, 另一方面通过环境认知与决策执行实现对环境 and 需求变化的主动感知和应变控制, 从而解决现有系统因耦合依赖紧、服务粒度大、配置预设多等带来的业务流程僵化、环境变化敏感等问题。概括来说, 指挥控制系统自主应变解决方案, 将体现出元素聚合解聚、任务动态组织、系统持续成长 3 个方面的能力特征。

(1) 元素聚合解聚。即将传统的综合集成多任务、多功能, 自给自足式的大型中心式系统进行解聚, 分割成大量功能相对较弱但可标准化封装、分散化部署、动态化组配的元素, 同时将元级化、定义化的“可成长”属性内嵌至各元素, 从而赋予系统更高的可见性和可控性, 有效支持高动态、强对抗环境下的指控系统敏捷构建和抗毁重组。

(2) 任务动态组织。即打破当前企业级信息系统 (含指控系统) 与其组织架构强相关、紧耦合的模

图 1 具备自主适应能力的指控系统总体架构模型

Figure 1 Architecture model of autonomous adaptive command and control systems

式, 实现系统构建由部署型向任务型转变. 将以任务场景的能力需求、系统运行环境为输入, 根据任务主体 (指挥官、任务部队编组等) 的角色和权限, 在线匹配其“可见、可控”范围内的作战应用功能服务、及其运行依赖的分布式计算、存储、网络等基础资源, 然后按照任务场景最优化配置信息流、控制流, 形成围绕不同任务场景需求组织的动态化系统.

(3) 系统持续成长. 即转变系统配置相对僵化、牵一发而动全身, 难以快速调整更新以应对环境和需求频繁变化的现状, 关键是基于上述两方面能力, 随着应用场景的丰富、系统使用的反馈评估, 不断增强、扩展元级化、可定义的元素, 并更新适用于不同任务场景、用户偏好、资源约束等的“最佳实践”, 从而达到变不确定为确定、不断优化效果.

接下来, 以“元素聚合解聚、任务动态组织、系统持续成长”为指导原则, 建立了具备自主适应能力的指控系统总体架构模型, 如图 1 所示.

首先, 位于中间由环境认知与决策执行组成的自主适应控制层是持续保障任务所需能力的核心, 针对任务变化带来的系统能力需求调整、以及指控系统运行过程中的扰动等, 通过任务需求、运行环境变化的感知分析、适应控制, 实现以下能力: (1) 任务适应. 需求变化时快速构建满足任务所需能力的系统; (2) 环境适应. 外部攻击或内部扰动下快速响应、持续保障任务完成; (3) 持续成长. 实现系统在长期运用过程中的不断优化.

其次, 系统运行实体是基于能力解聚的标准化封装元素集合, 包括计算、存储、网络、安防等资源型元素, 服务目录、消息队列、通用功能等服务型元素, 以及面向联合作战、特种分队作战等任务的套装式应用型元素等, 能够支持面向全网的分散化部署, 提升了系统生存性; 同时, 通过“元级化、定义化”而非硬编码的方式实现自主适应行为和策略刻画, 将业务逻辑与自主适应逻辑的关注点分离, 提升了系统灵活性.

同时, 围绕任务场景动态形成的任务群组, 根据其作战应用需求生成并提交系统能力需求描述, 包括系统功能集合、信息保障范围和时延要求等功能/非功能性约束, 为调度、组织相关功能服务、基础资源等提供依据; 系统在运行过程中, 作战用户可以基于自主适变控制层所提供的任务影响估计等功能获取任务完成度、任务完成时间等信息, 支持用户根据实际情况进行临机调整, 以达到软件优化调整下的作战效能提升。

下面结合业务流程变更和物理节点毁伤两个典型示例, 对指控系统自主适变解决方案的运作过程进行简要说明。其中, 业务流程变更是任务适变的典型示例, 当任务场景发生变化 (如突发事件带来的新的作战需求), “环境认知与决策执行” 首先根据作战群组下发的系统能力需求, 以及当前系统的运行实体的状态信息, 决策生成新的业务流程和部署方案, 然后下发给指控系统运行实体, 通过跨层联动完成从基础资源分配到服务创建部署及交互关系贯通的整个过程, 实现系统的按需重构, 满足作战任务需求。物理节点毁伤是环境适变的典型示例, 当系统所在的物理节点遭受攻击导致毁伤, 由“环境认知与决策执行” 针对节点损毁情况, 决策功能服务的重建或迁移方案, 特别是大规模节点毁伤导致的全局资源紧张条件下, 需要更进一步地对业务流程进行精简; 决策生成的流程简化、服务重建等策略下发至存活的系统运行实体进行执行, 实现核心业务功能的快速恢复, 以确保业务的持续运行。

2.2 技术架构 (保障框架)

在技术实现层面, 围绕“应用 – 服务 – 资源” 3 个层次、“环境认知 – 决策执行” 两个阶段, 以“可成长软件” 的架构模型为指导, 设计形成面向深度软件定义的核心任务保障框架, 实现对应用需求、运行环境等变化“可见”, 对业务流程、服务交互、资源配置等“可控”, 以形成对联合作战、军事维权等任务的持续保障能力。

如图 2 所示, 该框架将软件定义应用于指控系统的应用层、服务层、资源层 3 个层次, 以深度软件定义的方式支撑环境认知、决策执行两大核心功能, 一方面使得系统中各个层次的所有扰动、变化对控制面变得可见, 另一方面控制面可从任务保障视角进行跨层次地全局调控。

首先, 由环境认知和决策执行构成的控制面是保障框架的核心。利用基础资源监测、容器状态监测、服务状态监测、业务关键指标监测、异常分析预测等环境认知类功能和接口, 实时获取包括计算、存储、网络、信息和服务等对象的状态信息并进行智能化分析预测, 形成实时反映系统运行实体对任务保障情况的任务 – 资源态势, 在此基础上评估各类异常 (含预测出的) 对任务的影响; 利用资源弹性伸缩、服务部署调整、业务流程编排、系统快速重构等决策执行类功能和接口, 对资源层、服务层、应用层的各类异常, 及用户触发的运行等级转进等需求, 自适应地匹配或生成最优策略并下发至资源面, 驱动完成涵盖业务流程、服务交互、环境配置等调整策略的自动化执行。

其次, 由应用、服务、资源 3 个层级的元素所组成的资源面, 作为核心任务保障的监测和控制对象, 通过可成长改造或增强即对各元素内嵌元级化、定义化的“可成长” 属性, 并基于自身具备的实时性、可靠性、可用性、安全性等能力特性有效支持对控制面下发策略的执行。如在基础资源层, 交换机、路由器、卫通等网络资源能通过改变数据包转发策略实现链路更新和备份, 物理服务器能在虚拟化为资源池之后支持计算和存储资源的按需弹性扩展和负载均衡; 服务层中情报类、辅助决策类、行动控制类等不同服务, 具备请求重定向、服务迁移、快速部署等能力; 应用层, 面向联合作战、特种作战、维权/维稳等不同任务所“组装” 出的系统, 提供了业务流程切换、系统能力接替、访问权限控制等能力。

图 2 (网络版彩图) 面向深度软件定义的核心任务保障框架

Figure 2 (Color online) Core-mission assurance framework towards deep software definition

2.3 运行机制

针对面向深度软件定义的核心任务保障框架,以可成长软件运行机理为指导,建立基于“环境认知环—决策执行环”的“双环”自主适变机制,如图 3 所示,通过面向任务保障的主动感知和适变控制,使系统具备可应对应用需求、运行环境变化的能力。

其中,环境认知环具备面向资源层、服务层、应用层的分布式、体系化监测,以及智能化异常分析预测等能力,并能够动态生成面向任务保障的任务—资源态势,为决策执行环提供输入;决策执行环在应用需求变化或运行环境改变时,具备任务—资源自主规划、在线动态调整等能力,同时在系统构建或调整过程中不断积累自主适变相关的方案库、策略库等经验知识,持续提升系统成长能力。

(1) 任务和环境感知网络. 任务和环境感知网络覆盖从基础资源到服务到应用多层次,以及运行状态、业务日志、能力需求变化等多维度的立体化监测,是异常分析预测、适变调整优化等功能的基础. 任务和环境感知网络基本流程如图 4 所示. 采用被动监测(如代理采集内存、CPU 资源使用情况)与主动监测(如模拟用户请求获得服务响应时间)结合的模式,获取资源层、服务层、应用层多维度的监测数据,包括: (i) 资源层面包括 CPU 利用率、内存利用率、磁盘使用率、磁盘读写速率、在线虚拟节点数、网络吞吐量、网络传输时延等; (ii) 服务层面包括服务每秒请求数、服务响应时间、服务出错率、服务进程 CPU 占用率/内存占用率等; (iii) 应用层面包括任务完成率、任务完成时间、当前任务保障等级等. 汇集的监测数据经过抽取、转换等处理,为后续的分析预测以及可视化展示提供输入。

(2) 智能异常分析预测. 当系统运行过程中遭遇外部攻击或者发生内部扰动时,将会出现过载异

图 3 (网络版彩图) 基于“环境认知环 – 决策执行环”的自主适变机制

Figure 3 (Color online) Autonomous adaptive mechanism with situation awareness loop and decision making & executing loop

图 4 (网络版彩图) 任务和环境感知网络基本流程

Figure 4 (Color online) Mission & environment awareness networking process

常、失效异常等各类异常情况,影响任务的顺利开展.智能异常分析预测主要根据任务和环境感知网络提供的监测数据,利用统计分析、数据挖掘等算法对系统中发生异常事件进行检测,并分析得出异常事件发生的原因;根据历史监测数据,采用时间序列数据分析方法对各类关键性指标进行趋势预测,实现异常提前预警,规避故障风险.智能异常分析预测框架如图 5 所示.

(3) 任务 – 资源态势. 围绕任务持续保障,首先面向联合作战、军事维权等任务构建跨应用层、服

图 5 (网络版彩图) 智能异常分析预测框架

Figure 5 (Color online) Intelligent anomaly detection & prediction framework

图 6 (网络版彩图) 任务 - 资源关联

Figure 6 (Color online) Mission-resource correlation

务层和资源层的任务 - 资源动态关联模型, 实时反映系统运行实体对任务的保障情况. 然后, 通过对任务相关的多维监测数据的关联分析, 获得任务完成时间、任务完成率估计值和偏差情况 (与系统能力需求相比). 如图 6, 以任务 - 资源动态关联模型、任务影响估计为基础, 生成涵盖应用层、服务层、资源层的任务 - 资源态势, 为面向任务持续保障的监测分析与决策执行提供依据.

(4) 任务 - 资源规划. 在指控系统开设构建或在线重构等需求驱动下, 以任务需求描述文件 (含应用功能性/非功能性规约) 为输入, 利用分解规划引擎, 结合军事规则、专家知识及约束条件, 转化为具有相互约束关系的原子任务序列, 并在此基础上生成由原子任务构成的具有时序特性的业务流程描述

图 7 (网络版彩图) 任务—资源规划流程

Figure 7 (Color online) Mission-resource planning process

图 8 (网络版彩图) 适变调整优化流程

Figure 8 (Color online) Adaptive optimization & adjustment process

文件; 接下来利用资源匹配算法, 结合资源分配组合规则、约束策略, 以及资源冲突消解, 实现任务与资源的快速匹配与组合优化, 形成系统构建或重构的配置部署文件, 完成任务-资源的快速规划. 任务和资源规划流程如图 7 所示.

(5) 适变调整优化. 根据异常分析、趋势预测、任务影响估计的结果, 采用了基于任务保障等级和服务质量预估的响应策略优化等方法, 优化生成涵盖业务流程、服务交互、环境配置等方面的适变调整策略. 在此基础上, 以“核心任务不中断、响应恢复时间短、资源调整代价低”为目标, 通过对计算、存储、网络、信息、服务等进行协同调度与联合控制, 实现应对不同异常的快速响应、恢复. 同时, 通过适变调整策略执行的反馈评估, 增量式产生面向不同场景、用户偏好、资源约束等的“最佳实践”, 实现自主适变知识库的持续更新. 其主要流程如图 8 所示.

图 9 (网络版彩图) 技术验证原型系统组成结构图

Figure 9 (Color online) Prototype system structure

3 技术验证原型系统与典型场景试验

3.1 技术验证原型系统组成结构

根据所形成的指挥控制系统自主适变解决方案, 构建了指挥控制系统自主适变解决方案的技术验证原型系统, 其组成结构如图 9 所示, 包括环境认知与决策执行平台、应用系统原型和仿真环境 3 部分。

图 9 中位于左侧的环境认知和决策执行平台, 是基于所提出的面向深度软件定义的核心任务保障框架和“双环”运行机制进行构建, 提供对资源层、服务层和应用层的自主感知和适变控制。其中, 面向资源层主要实现对服务器节点存活、CPU/内存占用率、磁盘读写速率、网络吞吐量, 以及资源变化趋势等进行监测分析, 以及对服务器节点加入/退出、容器创建/启停和资源配置推送等进行决策与执行; 面向服务层主要实现服务存活、服务的计算资源占用、响应时间、每秒请求数等关键指标进行监测分析, 并实现服务负载均衡、服务熔断/降级、服务版本切换等决策与执行; 面向应用层主要实现对报文接入数量、信息处理时延、保障用户数等业务关键指标进行监测分析, 并针对应用层的业务需求变化以及运行环境变化进行业务流程重构、基于优先级的用户保障、处理容量伸缩等决策与执行。

应用系统原型主要是参考典型指控系统业务逻辑, 运用“可成长软件”技术、方法进行模拟构建, 涵盖接入、处理、保障 3 类功能, 包含 10 余种基本服务和增值服务。首先通过基本流程的细粒度剖分

图 10 (网络版彩图) “运行等级转进” 场景 (1)
Figure 10 (Color online) Scenario of run-level transition (1)

和服务化封装, 实现接入、处理、保障等基本功能; 在此基础上, 增加目标统计、查询、属性分析、行为分析等增值服务, 并能够与基本功能服务进行交互; 上述服务组件通过 KVM 虚拟机或 Docker 容器进行封装、承载. 此外, 仿真环境主要用于控制剧情想定设计与控制, 为应用系统运行提供所需的信息报文输入.

3.2 典型场景试验

基于所构建的技术验证原型系统, 开展了运行等级转进、基础资源受损下的业务持续运行两类典型场景下的仿真试验, 对指挥控制系统自主适变解决方案的可行性进行验证.

(1) “运行等级转进场景” 中, 其想定为: 雷达探测到防空区域内出现敌方目标, 系统运行等级由三级切换至一级. 此过程中, 根据系统运行等级转进需求, 并结合计算环境状态信息, 生成业务流程调整策略; 然后优选服务器节点, 创建部署目标属性分析与行为分析等服务, 并建立与基本服务间的信息交互, 实现功能正常运转, 完成系统 “按需重构”, 以满足作战需求.

在运行等级转进需求下达后, 如图 10 和 11 所示的软件界面截图, 通过环境认知和决策执行平台的任务-资源关联图可以看到: 相比图 10, 图 11 服务层增加了 “MBSF-Service”, “MBXF-Service” 等服务实例, 且被创建部署到 node1, node5 等服务器节点; 在服务交互图中可以看到: 系统业务流程在 “三级” 基础上, 增加了 “目标属性分析服务” 与 “目标行为分析服务” 两类增值服务, 并建立了与基本

图 11 (网络版彩图) “运行等级转进” 场景 (2)
Figure 11 (Color online) Scenario of run-level transition (2)

服务间的信息交互; 此外, 在系统业务流程调整完成后用户可在应用席位界面看到新添的“目标属性分析”、“目标行为分析”等功能图标, 且通过界面弹出窗口可查看其执行结果。

(2) “基础资源受损下的业务持续运行” 场景中, 其想定为: 物理节点毁伤 (模拟) 导致部分服务无法完成既定的业务处理, 通过获取到节点损毁事件, 在资源受限条件下, 生成业务流程简化与服务重部署策略; 保留系统精简化的处理流程, 并将受损节点上的重要服务重部署到存活节点、快速恢复, 实现业务持续运行, 确保信息不间断处理以及对用户的透明化保障。

模拟基础资源受损事件, 如图 12 所示的软件界面截图中, 给出 node1, node2 毁伤, 触发系统的快速自适应响应恢复, 在任务 - 资源关联图中可以看到: 相比图 11, 服务层减少了“MBTJ-Service”, “MBXW-Service”, “MBXF-Service”等服务实例, “MBBZ-Service”, “ZHCL-Service”等受损服务被重部署到 node3, node6 等服务器节点; 在服务交互图中可以看到: 系统业务流程精简化为仅包含接收采集、综合处理、目标保障等 6 类服务。同时, 通过应用状态监测分析可查看到: 一方面“处理时延”指标, 在短暂的上升后迅速回落至正常水平, 其原因在于系统的动态在线调整时间在 10 s 内完成; 另一方面系统的“融合批数”指标, 即用于保障用户的信息产品数量基本维持稳定 (且用户在应用席位界面上所看到的目标航迹亦未出现断点、保持连续), 这是由于整个自适应调整过程所耗费时间小于报文的平均更新周期。

图 12 (网络版彩图) “基础资源受损下的业务持续运行” 场景
Figure 12 (Color online) Scenario of business continuity under resources damaged

此外, 通过决策执行日志, 分别记录并统计了 20 次“运行等级转进”和“基础资源受损下的业务持续运行”两种场景下的系统调整时间, 试验结果如图 13 所示, 可以看出: 每次调整时间均在 10 s 内完成, 且计算两种场景下的调整时间均值分别为 5.7 s 和 5.3 s, 表现出较高的时效性。

同时, 结合上述“处理时延”、“融合批数”两个典型应用状态指标的试验情况, 可以更全面地验证原型系统体现出“恢复快、波动小”的自主适应能力, 可为高动态战场环境下指控系统的信息不间断处理以及对用户的透明保障等应用需求提供支撑。

4 结束语

面向指挥控制系统体系化、敏捷化、智能化等新质能力建设需求, 针对如何在战场环境、作战任务复杂多变条件下持续保障任务完成的核心问题, 提出了一套指挥控制系统的自主适应解决方案。首

图 13 (网络版彩图) 两种场景下的系统调整时间

Figure 13 (Color online) Adjust time in the two scenarios. (a) Scenario of run-level transition; (b) scenario of business continuity under resources damaged

先, 聚焦“元素聚合解聚、任务动态组织、系统持续成长”, 建立了具备自主适应能力的指控系统总体架构模型; 在此基础上, 构建了面向深度软件定义的核心任务保障框架, 可实现对应用需求、运行环境等变化“可见”, 对业务流程、服务交互、环境配置等“可控”; 接着, 形成了基于“环境认知环-决策执行环”的“双环”自主适应机制, 通过面向任务保障的主动感知和适应控制, 使系统具备可应对应用需求、运行环境变化的能力。最后, 研制了由环境认知与决策执行平台、应用系统原型和仿真环境 3 部分组成的技术验证原型系统, 并结合运行等级转进、基础资源受损下的业务持续运行等典型场景下的仿真试验对解决方案的可行性进行了验证。

在所述解决方案基础上, 后续的研究工作中, 一方面进一步加强“可成长”软件的理论、方法在新一代指挥控制系统设计和构建方面的指导和引领作用; 另一方面将深入探索实现“可成长”软件技术、支撑平台在复杂关键应用场景下的承载和赋能作用。

参考文献

- 1 Zhang W M, Huang S P, Huang J C, et al. Analysis on multi-domain operation and its command and control problems. *Command Inform Syst Technol*, 2020, 11: 1-6 [张维明, 黄松平, 黄金才, 等. 多域作战及其指挥控制问题探析. *指挥信息系统与技术*, 2020, 11: 1-6]
- 2 Jiang X Y, Deng K B. Command information system requirements for future informatization operation. *Command*

- Inform Syst Technol, 2016, 7: 1–5 [蒋晓原, 邓克波. 面向未来信息化作战的指挥信息系统需求. 指挥信息系统与技术, 2016, 7: 1–5]
- 3 Fan J X, Chen J H. New concepts of future air warfare and the challenges for its realization. Aero Weaponry, 2020, 27: 15–24 [范晋祥, 陈晶华. 未来空战新概念及其实现挑战. 航空兵器, 2020, 27: 15–24]
- 4 Li L, Jiang Q, Wang T. Analysis of mosaic warfare in the United States. Tactical Missile Technol, 2019, 6: 108–114 [李磊, 蒋琪, 王彤. 美国马赛克战分析. 战术导弹技术, 2019, 6: 108–114]
- 5 Shi D F, Cai J, Huang S H, et al. Operational concept and enlightenment of United States Air Force “Combat Cloud”. Command Inform Syst Technol, 2017, 8: 27–32 [时东飞, 蔡疆, 黄松华, 等. 美国空军“战斗云”作战理念及启示. 指挥信息系统与技术, 2017, 8: 27–32]
- 6 Clark B, Patt D, Schramm H. Mosaic Warfare: Exploiting Artificial Intelligence and Autonomous Systems to Implement Decision-Centric Operations. Washington: CSBA, 2020
- 7 Alberts D S, Garstka J J, Hayes R E, et al. Understanding Information Age Warfare. Washington: CCRP, 2001
- 8 Lan Y S. Understanding the network-centered command information system. Command Inform Syst Technol, 2010, 1: 1–4 [蓝羽石. 对网络为中心指挥信息系统的认识. 指挥信息系统与技术, 2010, 1: 1–4]
- 9 Neema S, Parikh R, Jagannathan S. Building resource adaptive software systems. IEEE Softw, 2019, 36: 103–109
- 10 Matthews G, Reinerman-Jones L E, Barber D J, et al. Resilient autonomous systems: challenges and solutions. In: Proceedings of Resilience Week (RWS), Chicago, 2016. 208–213
- 11 DARPA. Intent-defined adaptive software (IDAS). <https://www.darpa.mil/program/intent-defined-adaptive-software>
- 12 Yang F Q, Lv J, Mei H. Technical framework for Internetwork: an architecture centric approach. Sci China Ser F-Inf Sci, 2008, 51: 610–622 [杨芙清, 吕建, 梅宏. 网构软件技术体系: 一种以体系结构为中心的途径. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2008, 51: 610–622]
- 13 Lv J, Ma X X, Tao X P, et al. A survey of internetwork: research and progress. Sci China Ser E, 2006, 36: 1037–1080 [吕建, 马晓星, 陶先平, 等. 网构软件的研究与进展. 中国科学 E 辑, 2006, 36: 1037–1080]
- 14 Mei H, Lv J. Internetwork: A New Software Paradigm for Internet Computing. Berlin: Springer, 2016
- 15 Wu G Q, Wei J, Huang T. A dynamic QoS assessment approach for internetwork with uncertainty reasoning. J Softw, 2008, 19: 1173–1185 [吴国全, 魏峻, 黄涛. 基于非确定性推理的网构软件服务质量动态评估方法. 软件学报, 2008, 19: 1173–1185]
- 16 Ma X X, Liu X Z, Xie B, et al. Software development methods: review and outlook. J Softw, 2019, 30: 3–21 [马晓星, 刘贇哲, 谢冰, 等. 软件开发方法发展回顾与展望. 软件学报, 2019, 30: 3–21]
- 17 Wang H M, Wu W J, Mao X J, et al. Growing construction and adaptive evolution of complex software systems. Sci Sin Inform, 2014, 44: 743–761 [王怀民, 吴文峻, 毛新军, 等. 复杂软件系统的成长性构造与适应性演化. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 743–761]
- 18 Wang H M, Yin G, Xie B, et al. Research on network-based large-scale collaborative development and evolution of trustworthy software. Sci Sin Inform, 2014, 44: 1–19 [王怀民, 尹刚, 谢冰, 等. 基于网络的可信软件大规模协同开发与演化. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 1–19]
- 19 Wang H M, Shi P C, Ding B, et al. Online evolution of software services. Chin J Comput, 2011, 34: 318–328 [王怀民, 史佩昌, 丁博, 等. 软件服务的在线演化. 计算机学报, 2011, 34: 318–328]
- 20 Lan Y S, Zhou G X, W H, et al. Construction mechanism and implementation of resilient command information systems. J Command Control, 2015, 1: 284–286 [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. 指挥与控制学报, 2015, 1: 284–286]
- 21 Fei A G. Analysis on related issues about resilient command and control system design. Command Inform Syst Technol, 2017, 8: 1–4 [费爱国. 韧性指挥与控制系统设计相关问题探析. 指挥信息系统与技术, 2017, 8: 1–4]
- 22 Zhao X, Yu J, Liu X, et al. Core-mission supported architecture for resilient information service cloud environment. Command Inform Syst Technol, 2018, 9: 19–24 [赵鑫, 于靖, 刘祥, 等. 韧性信息服务云环境核心任务保障架构. 指挥信息系统与技术, 2018, 9: 19–24]
- 23 Ding F, Zhou F, Zhao X, et al. Evaluating the capability for resilient information service cloud environment under cyber attack condition. Syst Eng Electron, 2018, 40: 2722–2728 [丁峰, 周芳, 赵鑫, 等. Cyber 攻击下韧性信息服务云环境能力评估. 系统工程与电子技术, 2018, 40: 2722–2728]

Solution study for building autonomous adaptive command and control systems

Xin ZHAO*, Chenghao GUO, Qiang HUANG, Yu ZHANG & Jing YU

Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China

* Corresponding author. E-mail: xinzhao_cetc@126.com

Abstract Command and control systems used in highly dynamic battlefield environments must be built to continuously guarantee the completion of diverse missions. This paper presents a novel solution for building autonomous adaptive command and control systems, based on the theories, and methods of growing software systems. First, it establishes an architecture model for autonomous adaptive command and control systems. Next, it proposes a core-mission assurance framework towards deep software definition. The framework's autonomous, adaptive "dual-loop" mechanism includes a situation awareness loop as well as a decision making and executing loop. These are used to implement mission assurance-oriented active awareness, adaptive control, and rebuildable evolution. Finally, experiments are carried out on the built prototype system, simulating typical scenarios such as run-level transition, business continuity under resources damaged.

Keywords command and control systems, growing software systems, autonomous adaptability, core-mission assurance

Xin ZHAO received his Ph.D. in communication and information system from the Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China, in 2011. He is currently a senior engineer, and his general research interests include the construction and evaluation of resilient information systems, and adaptive software.

Chenghao GUO received his Ph.D. in computer application technology from Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, in 2007. He is currently a researcher level senior engineer, and his general research interests include resource collaboration technology and service architecture.

Qiang HUANG received his M.S. in automatic control and theory from Southeast University, Nanjing, China, in 1989. He is currently a researcher level senior engineer, and his research interests include the general technology of integrated electronic information systems.

Yu ZHANG received his M.S. in computer application technology from Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, in 2009. He is currently a senior engineer, and his general research interests include cloud computing and microservice systems.