

C⁴ISR 体系演化过程中可靠性分析与评估

张婷婷¹ 王智学¹

摘要 对于 C⁴ISR 系统的规划与演化, 以目前的体系建设策略缺乏对成员系统失效时对体系 (System of Systems, SoS) 全局能力的影响进行建模的方法, 从而很难实现复杂系统设计的可靠性度量. 采用插入冗余的方法, 弥补失效系统的功能, 尽量使体系的能力损失最小. 提出 SoS 能力层次模型, 抽象描述体系能力与成员系统功能之间的映射关系, 基于花费、周期等多种因素评估冗余结构的性能水平和可靠性水平, 以备决策者识别最优的重新配置的 SoS 体系结构.

关键词 C⁴ISR 体系, 演化, 可靠性, 冗余

引用格式 张婷婷, 王智学. C⁴ISR 体系演化过程中可靠性分析与评估 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(4): 439–443

ID JCC.CN.2015.00439

Reliability of System of Systems Evolution Processes Analysis and Valuation

ZHANG Ting-Ting¹ WANG Zhi-Xue¹

Abstract On planning and evolution of C⁴ISR, a systematic approach of optimizing the SoS design is currently lacking. This approach should have the ability of evaluating the impact that the presence and absence of a set of individual systems has on the overall SoS (System of Systems) capability. The paper is insert redundancy in order to making up functional failure of the system. The paper proposed SoS capability levels model to description relations which is between SoS capability and system function. The paper assesses the level of performance and reliability for decision makers to identify best SoS architecture configuration.

Key words C⁴ISR, evolution, reliability, redundancy

Citation Zhang Ting-Ting, Wang Zhi-Xue. Reliability of system of systems evolution processes analysis and valuation [J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(4): 439–443

体系 (System-of-systems, SoS) 也称为系统的系统^[1-2], 是一个分布式计算机集成系统组合, 其特征是组成体系的单独系统操作和管理上是独立的, 同时系统之间也是互相依赖的, 成员系统的功能以及系统间相互依赖的关系形成体系层的能力. C⁴ISR 系统^[3-4], 我军称为指挥信息系统, 是一类由一组大规模、并发、分布式系统组成的复杂信息系统, 其特征构成军事信息系统体系, 从技术角度看就是以软件为核心的信息处理系统, 是各类军事指挥机构实施指挥决策和作战部署的核心技术工具. 这类系统的研制受自身结构以及生产、维修能力、经费预算等到多种因素的制约, 在建设过程中呈现出渐进式发展的特点, 系统内各组成元素存在着从无

到有的形成, 从不完整到完整的进化, 以及从有到无的退化等一系列现象, 建成以后以面临着由于技术的更新以及系统需要升级满足新版本的需求. 因此, 期望能够监控成员系统运行发展情况对整个体系能力的影响.

在体系演化过程中体系内部实体或节点可能发生性能下降或失败的情况, 需要考虑更新、维修或通过选择其他体系结构来弥补整个 SoS 性能, 体系的恢复力是应对失败情况的快速应对能力, 是体系应对扰动使其产生最小影响的反应和恢复能力, 使体系具有动态的稳定性. 这需要考虑费用、时间周期以及最终能达到的性能水平等多种因素. 对于体系的恢复力依赖于体系成员系统的可靠性, 但是传统的可靠性分析并不能充分地量化 C⁴ISR 体系的可靠性. 因为 C⁴ISR 通常是由不同类别的系统构成, 比较分散, 且地域分布广, 如果设计传统的冗余系统不仅花费巨大而且不切实际. 针对体系内某一系统失败, 通过对其他的成员系统重新配置来弥补丢失的功能, 定量评估这种新的结构对失败系统弥补达到的性能效果, 从而使决策者从开发成本和风险出发找出最优的恢复力 C⁴ISR 体系结构, 使 C⁴ISR 体系发展演化过程中具备应对失败的能力.

收稿日期 2015-10-15

Manuscript received October 15, 2015

“十二五”装备预研重点基金 (9140A06010115DZ38016), 全军军事类研究生资助课题 (2014JY182), 复杂电子系统仿真重点实验室基础研究项目 (DXZT-JC-ZZ-2014-015) 资助

Supported by the Twelfth Five-year Equipment Pre-research Fund of China (9140A06010115DZ38016), the Army Military Graduate Funded of China (2014JY182), Laboratory Simulation of Complex Electronic Systems Basic Research Project (DXZT-JC-ZZ-2014-015)

1. 解放军理工大学指挥信息系统学院 江苏 南京 210017

1. Institute of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China

在选择再分配方案时需要考虑几个问题: 1) 成员系统失效, 如何选择最优的方案弥补损失? 2) 更新后的系统结构如何恢复 SoS 的性能水平? 3) 方案的开发成本和风险评估. 因此, 需要在 SoS 性能水平和可靠性水平之间找出平衡点, 从而帮助决策者识别最优恢复力的 SoS 体系结构.

为了实现上述目标需要做以下几方面的研究:

- 1) 构建具有恢复力的使命体系能够快速升级和较低花费.
- 2) 基于恢复力分析的系统描述.
- 3) 分析系统间的相互依赖关系.
- 4) 度量体系的恢复力.

1 C⁴ISR体系层次划分

构建体系的目的是完成使命任务, 成员系统的故障不一定会造成整个体系的失败, 而成员系统没有发生故障也不一定能够保证使命任务良好地完成. 这说明, 成员系统故障与体系功能的实现没有绝对的必然一一对应关系. 判断 SoS 是否可靠, 往往是据其功能实现情况来判断.

一个 SoS 是由 n 个系统构成, 为了清晰描述 SoS 的构架, 以 SoS 能力为视角, 将 SoS 划分为 3 个层次, 最低层是系统功能层, 第 2 层是能力需求层, 最高层为 SoS 能力层. 在 SoS 能力层根据任务需求要求收集可以提供这些能力的系统集, 而每个系统性能都来源于系统功能的聚集, 最低层是每个系统能够实现的功能. 总的来说, 底层为上层提供聚合的能力. 这种层次结构可以用复杂网络模型来进行表示, 节点表示体系中的成员系统, 节点之间的边表示节点之间的相互依赖关系, 通过网络节点的聚合最终形成 SoS 层的能力. 如图 1 所示.

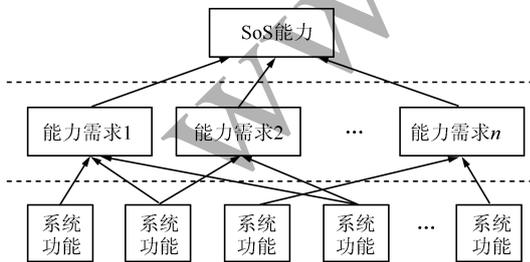


图 1 SoS 的功能描述

例如为了实现目标识别使命, 构建的 SoS 体系由人造卫星和无人驾驶飞机组成, 地球同步人造卫星的功能是面积长时间对地球拍照, 无人驾驶飞机功能为观测敌方环境. 多架无人驾驶飞机与人造卫星连接构成系统网络提供 SoS 层面的能力, 使得

SoS 体系不仅能提供大区域监视功能, 而且提供高清晰成像能力, 是单一系统无法实现的.

2 C⁴ISR体系演化过程

由于 SoS 的发展通常不遵循 DoDI 5000.02 中的一般项目获取过程^[5-6], 随着环境和需求的不断变化, 体系结构在不断地发展演化. 为了描述体系的演化过程, 本文采用 Dahmann 和 Rebovich^[5] 提出的波模型作为基础, 将 C⁴ISR 体系演化过程划分为 6 个阶段, 图 2 描述 SoS 体系演化过程模型.

第 1 阶段, 初始的 SoS 阶段. 理解体系建设目标需求, 构建 SoS 可以使用的资源以及受到的约束. 此外, 收集核心系统的信息用于支持 SoS 想得到的能力. 第 2 阶段, 引导 SoS 分析阶段. 根据 SoS 的需求、工作指标、工作计划为 SoS 开发建立一个初始 SoS 基线结构. 第 3 阶段, SoS 体系结构发展和演化阶段. 演化初始 SoS 基线, 发展 SoS 体系结构. SoS 体系结构包括单独的系统、SoS 关键功能、互相依赖的系统. 为了实现目标 SoS 体系结构, 这个模型必须识别关键系统需要的接口和功能改变. 第 4 阶段, 计划 SoS 更新阶段. 由于外部环境的改变, 计划下一个 SoS 提升周期. SoS 根据优先权、选择项和备用进行选择. 第 5 阶段, 实现 SoS 更新. 根据现有 SoS 能力水平和系统的执行能力, 建立一个新的 SoS 基线. 这一步是一个阶段 SoS 更新结束, 完成单独的系统更新与体系连接. 第 6 阶段, 下一波 SoS 演化分析. 开始下阶段演化循环, 为将来的 SoS 演化继续分析当前 SoS 结构.

3 C⁴ISR体系可靠性分析模型

传统的系统工程通过传统的可靠性模型应对系统的^[7-9], 比如在组件层加入冗余, 在系统层定期维护设备. 可靠性分析技术在系统设计时加入故障树和事件树用于判定冗余的层次和类型, 发展技术维护计划用于减少系统层失败的可能性^[9-10]. 但这些方法都不能满足演化发展的 SoS 体系的可靠性需求. 除了体系固有的特性外, 体系成员系统具有较高的相互依赖性会增加失败的风险, 并通过体系的层次结构层层传播. 所以, 在设计体系结构时需要 SoS 具备恢复能力以应付 SoS 发展中的风险. 但是我们发现对于上述例子, 使命任务的关键需求是监视. 在实际运行过程中, 在人造卫星无法正常工作的情况下, 人造卫星的维修期长, 花费巨大. 反应最快且花费最小的方案是使用无人驾驶飞机, 无人驾驶飞机可以完成适当的监视功能, 无需外援帮助使体系仍然具备完成使命任务的能力.

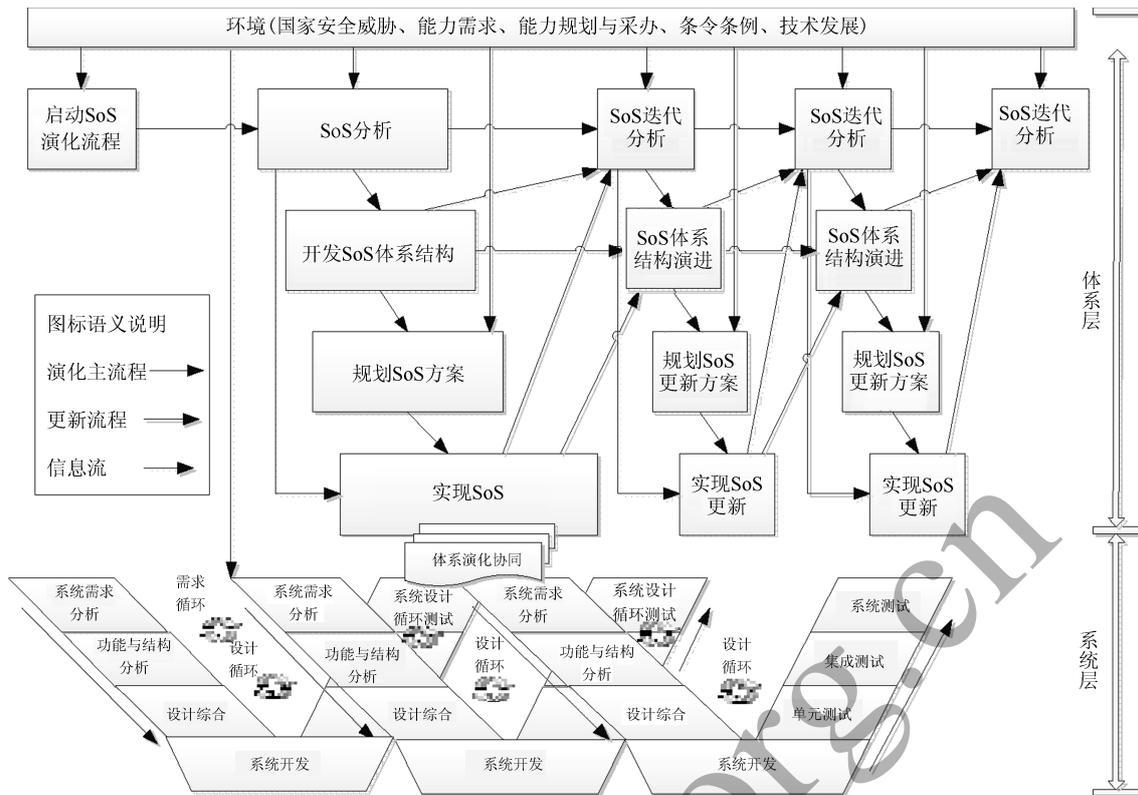


图 2 SoS 体系演化过程模型

另外, 给定一个 SoS 架构, 一个简单系统功能失效并不能导致一个大的 SoS 体系完全失效, 整个性能水平归零. 然而, 选择重新配置可以使最小化相关性能的丢失, 这样在特定外部环境下, 不用维修或更新这些失效的系统. 失效系统的功能, 通过选择其他系统重新配置也能完成同样的功能, 即对这些系统组合重新分配任务或升级改造来实现失效的功能. 因此, 需要提前分析重新配置后 SoS 能力层的可靠性和性能水平, 对两者进行有效的平衡, 从而选择最优的新体系结构. 本文通过插入冗余来改进体系可靠性, 设体系层性能水平为 LoP , 可靠性水平为 LoR , 在花费和时间周期最小的情况下选择 SoS 重新配置的性能与可靠性最优, 目标函数如下:

Minimize:
 SoS Reconfigure Cost
 SoS Reconfigure Time
Subject to:
 $LoP \geq LoP^T$
 $LoR \geq LoR^T$

其中, SoS 花费根据 SoS 演化发展过程面临的状况, 分为 3 种情况:

1) 完全的功能情况: 初始阶段 SoS 架构系统正常运行, 其成员系统的功能完全实现. SoS 花费包括

成员系统的运行成本.

2) 系统损失情况: SoS 成员系统一个或多个失效导致性能水平下降, SoS 花费包括其他系统的运行成本和修补失效系统的费用.

3) 重新分配任务状况: 通过重新配置其他系统实现失效的功能, SoS 的花费包括其他系统的运行成本和增加重新配置功能的系统运行成本.

体系的性能由多种要素决定, 包括成员系统所构成的体系结构、系统的有效性、每个系统的性能以及每个系统能完成的功能等等. 对体系每个能力进行可靠性分析, 对于函数目标值需要定义取值范围.

期望值: SoS 实现全部的能力, 系统组合可以提供每个能力的最高的目标值.

可接受目标值: 用于描述系统可提供的可接受的最小的性能水平.

4 实例论证

4.1 构建分层的 C⁴ISR 体系

为了完成使命任务“对敌方区域进行大面积侦查并消除敌方特定目标”, 由 4 个系统构成 1 个 C⁴ISR 体系: 地球同步人造卫星、3 个 UAV. 地球同步人造卫星监视敌方区域, UAV-1 是一个不携带

武器的监视器, 同步人造卫星与 UAV-1 实现目标识别. UAV-2 和 UAV-3 携带基础照像机用于目标确认, 并配备武器实现目标打击. 地球同步人造卫星联合 UAV-1、UAV-2 和 UAV-3 的功能为 C⁴ISR 体系提供 3 个主要能力: 1) 区域监视; 2) 目标识别; 3) 目标打击, 从而完成使命任务. 由此看来 SoS 的能力是由系统提供的功能聚合而成.

4.2 C⁴ISR体系能力与系统功能映射

根据实际情况分析出地球同步人造卫星不易损坏或不轻易升级改造, 而 UAV 可以为了提升其性能而进行升级改造, 但出现问题的概率比人造卫星大, 比如通信装配出现问题, 成像像素过低需要升级等等. 通过列表将各系统能提供的功能一一列出, 并指出哪些系统可能会升级或是容易出现哪些问题, 应对功能的影响度是多少. 如表 1 所示.

4.3 C⁴ISR体系性能水平与可靠性水平度量

确定每个能力的性能水平和可靠性水平. 根据 SoS 的需求, 给系统分配任务, 由系统提供功能, 系统之间的相互连接为系统提供能力. 设一个体系的能力为 C_i , C_i 由一组系统提供的功能实现, 设功能组为 S_{fn} , 设 S 为可能的 S_{fn} 组合. 为了简化问题这里将每个系统的功能实现分为两种情况, 一种为全功能实现, 另一种为 0 功能实现. 体系能力的实现概率取决于系统的状况以及系统所能提供的功能决定, 评估每个能力的性能水平 $Lop(C_i)$ 公式如下:

$$Lop(C_i) = \sum_s pr(C_i - 1 | S_{fn} - S) pr(S_{fn} - S) \quad (1)$$

体系的可靠性依赖于系统的可靠性. 由于实际情况的多样化, 可靠性更为复杂. 比如运行系统的数目, 系统之间合作度, 系统内子系统的有效性等等. 每一个系统的可靠性要参考以往运行情况的失败率信息, 评估每个能力的可靠性水平 $Lop(C_i)$ 式如下:

$$Lop(C_i) = pr(\text{all constituent systems are operational at times } t) = \prod_{j=1}^{nc} R_j(t) \quad (2)$$

在系统运行过程中如果没有失效就选择初始的

基于使命任务的 SoS 体系结构设计. 当一个系统失效, 其他一个或多个系统重新分配任务以实现缺失系统的功能.

4.4 系统失效的影响和插入冗余

分析结果如图 3 所示, 横坐标为失效的系统, 纵坐标为性能水平. 首先体系初始阶段系统的性能水平最高, 体系演化过程中, 系统出现失效导致体系整体性能下降, 通过对其他系统的重新配置使体系达到能接受的最低性能水平. 比如, 为了实现监视能力, 在体系设计之初由人造卫星实现这个功能并能实现 100% 的监视功能, 随着 C⁴ISR 发展, 如果人造卫星失效了, UAV-1 带有高清晰成像能力, 能够提供 55% 的监视能力. 如果系统升级改造 UAV-1 安装高像素照像装置, 通过改进程序增加 UAV-2 的访问率, UAV-1 和 UAV-2 联合代替人造卫星功能, 从而为体系提供 72.5% 的监视能力, 已达到预期效果, 这种方案比修理人造卫星周期短并且花费降低很多, 能够快速应对人造卫星的失效, 依然能完成使命任务. 图 3 仅给出人造卫星失效的分析, 同样对每一个系统如果出现失效提出应冗余结构并分析该结构能达到的某一能力的水平. 然后结合花费和改造时间进行综合比对, 以花费最小周期最短性能和可靠性最优为选择依据, 找出最优的冗余结构.

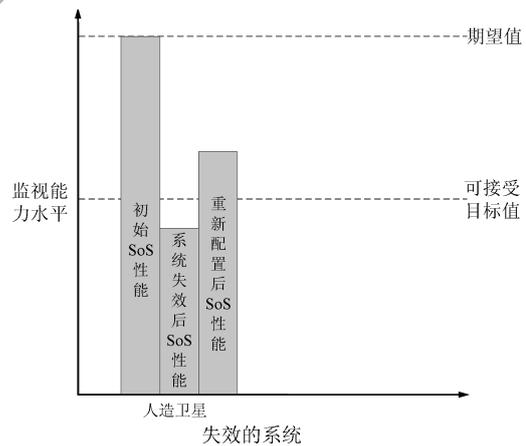


图 3 人造卫星系统失效的影响和插入冗余的性能分析

表 1 系统提供功能映射

System(x_i)	Functions(fn_i)			
	Fn_1	Fn_2	Fn_3	Fn_4
X_1	提供 100 %	提供 100 %	提供 100 %	
X_2	提供 30 % (可升级)	提供 20 % (可升级)	提供 30 % (可升级)	
X_3	提供 50 % (可升级)	提供 50 % (可升级)	提供 50 % (可升级)	提供 100 % (可升级)
X_4	提供 75 % (可升级)	提供 50 % (可升级)	提供 75 % (可升级)	提供 100 % (可升级)

5 结论

根据 SoS 不断发展演化的特征, 传统的体系结构设计已不能完全应对体系演化中的风险. 由于体系层的能力来源于系统的功能, 系统间的相互联系以及体系结构设计对体系层的能力会有影响, 因此, 体系内部某一系统失效插入冗余代替原有功能, 为了使重新配置结构性能能够达到可接受的目标性能水平, 这里包括升级改造现有系统, 通过重新给其他系统分配任务并重新配置 SoS 的体系结构, 通过性能水平恢复程度、资金花费以及改造时间等因素对插入冗余进行评估, 从而得到最优的弥补方案. 从而使体系在面临系统失败时, 损失降到最低, 使 SoS 可以应对体系发展带来的风险.

References

- 1 Director Systems and Software Engineering, O. 2008. Systems Engineering Guide for Systems of Systems[S/OL]. [2011-03-08]. <http://www.acq.osd.mil/se/docs/SE-Guide-for-SoS.pdf>.
- 2 Dahmann J, Rebovich G, Lane J A, et al. An implementers' view of systems engineering for systems of systems[C]// Proceedings of IEEE International Systems Conference, 2011: 345–354.
- 3 Reckmeyer W J. Systems of systems approaches in the U.S. department of defense[C]//1st Annual System of Systems Engineering Conference Proceedings, 2005: 278–284.
- 4 阳东升, 张维明, 张英朝. 体系工程原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 5 胡晓峰, 贺筱媛, 饶德虎, 等. 基于复杂网络的体系作战指挥与协同机理分析方法研究 [J] 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 5–13.
- 6 赵青松, 杨克巍. 体系工程与体系结构建模方法与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 7 董志鹏, 刘兴. 综合电子信息系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 8 蓝羽石, 赵克俭, 郭成昊, 等. 未来指挥控制系统暨信息处理系统架构 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 30–40.
- 9 C4ISR Architecture Working Group. C4ISR architecture framework version 2.0 [R]. U.S.: Department of Defense, 1997.
- 10 DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 1.0[R]. U.S.: Department of Defense, 2003.
- 11 DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 2.0 [R]. U.S.: Department of Defense, 2009.
- 12 Dahmann J, Rebovich G, Lane J A, et al. An implementers' view of systems engineering for systems of systems[C]// Proceedings of IEEE International Systems Conference, 2011: 345–354.
- 13 Madni A, Jackson S. Towards a conceptual framework for resilience engineering [J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 181–191.
- 14 Neches R, Madni A. Towards affordably adaptable and effective systems [J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 5(1): 129–141.
- 15 Sheard S, Mostashari A. A framework for system resilience discussions. [C]//Annual International Symposium of INCOSE, 2008: 295–299.

张婷婷 (1978–), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为军事通信、军事系统工程.

王智学 (1965–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向系统工程、需求工程.