

# 工程弹性系统——Engineered Resilient Systems(ERS)

---

作者 何强

本文根据国外文献资料编写整理而成。由于内容较多，将分为几期发送，第 1 期将介绍国外对“弹性”的定义与理解；第 2 期从国防装备的视角去理解“弹性”，以及国防弹性系统所面临的挑战；第 3 期将重点介绍美国国防部最近 5 年来在 ERS 方面的研究成果，以及发展规划。

前言

Engineered Resilient Systems (ERS)——工程弹性系统，是美国国防部七个科技优先课题之一。ERS 是一个不断发展的框架，是支持采办和运营分析所有阶段的集成的可信计算环境。ERS 使数据驱动、丰富的明智决策成为必要。

## 1. 背景

美国国防部 (DoD) 的使命是装备和部署需要的军事力量阻止战争和确保国家安全。为此，美国国防部需要维护力量就绪状态，并能迅速将所需的人员和装备投入战场以完成任务目标。今天已经部署的系统，在可预见的未来将不断地由简单到复杂。复杂系统的例子有 Cyber 基础设施系统，后勤数据和信息系统和大型固定翼飞机和舰艇等装备解决方案。在本文中提到的复杂系统是指第三类(装备)，通过对其中术语的理解进而推广打其他系统。这一推论是基于以下事实得出的，所有系统将被预期在更广泛的作战环境可信和有效，具备通过新的策略、适当重配置和及时更换去响应新的需求的能力。

由于国家和武装力量所面临威胁的性质，在可预见的未来国防部将继续在世界各地部署装备。这使得美国国防部不同于一般的商业企业，其使命任务在未来几十年将相对不会改变，一代又一代面对意外和紧急情况。这一认识为本文提供了动力。

此前,Neches 等定义的弹性系统描述如下：

“弹性系统是可信的和有效的，在广泛的环境中开箱即用，通过重新配置或更换很容易适应更多其他环境，能够缓解和检测功能退化”。

这个定义归因于这样的事实：军事任务从非战争行动（如人道主义援助和救灾）向高强度作战和军事冲突延伸。今天的任务和任务需求快速变化，以及新出现的非对称威胁作战环境，任务产生的不确定性，必须要有临近的备用装备即时处理。此外，全球化商业技术的进入造成国防军事系统和体系的风险并降低了其可信度。



近年来在美国国防部内出现了一种声音并引起广泛的兴趣——设计一个系统在面对意想不到的和未知的情况时表现出弹性。这种兴趣激增起到了推波助澜的作用，人们认识到系统规模和复杂性的持续增加，传统的故障保护方法从成本和覆盖的角度将不足以应对这一情况。

## 2. 弹性 (Resilience), 一个不断发展的概念

**弹性**是指系统在变化和干扰之前、期间或之后可以调整系统功能，甚至在重大事故或持续压力之下，系统仍旧可以维持所需运行的一种能力。

(Nemeth et al, 2009)

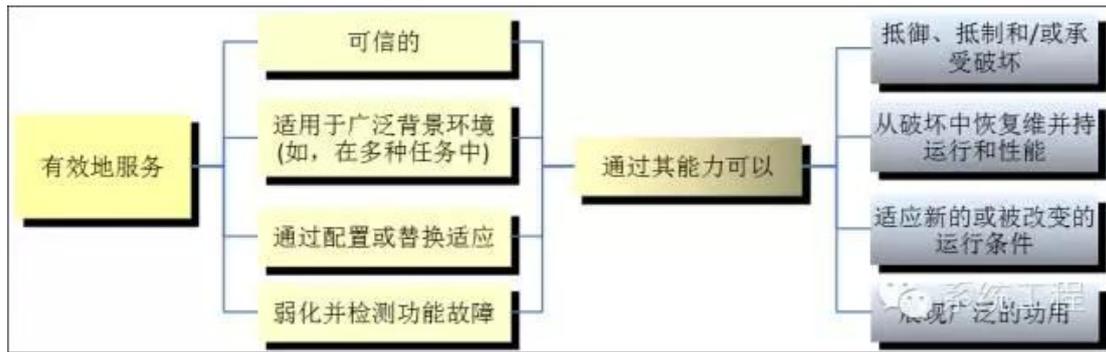
**弹性**是指系统在各种不同运营情况下，能够提供广泛的功用 (Broad Utility)，尽管存在突发情况，都可以跨过多种潜在可能的未知情况的一种能力。

(Neches & Madni, 2012)

**弹性**是指系统在被干扰后能够回到初始状态或迁移到一个新的、更理想的状态的能力。(Christopher & Peck, 2004)

**弹性**是指系统能够实现预期(科学)目标的能力，即便系统(飞船)性能、健康状况和/或环境并不像预期的那样 (Murray, Ingham, Day, & Williams, 2012)

**弹性**是指系统能够规避，生存，从失效中恢复，并最终实现任务目标的能力。弹性系统能够在环境不确定性的情况下推论系统的/环境的状态。



虽然弹性正迅速地在不同的领域成为一个共同的主题,定义和衡量它在很大程度上依赖于问题域。2013年10月,由联合军事行动研究协会(MORS)和阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)联合举办的研讨会上,参与者一致将弹性定义为“一个实体(如资产、组织、社区、地区)的能力——预测、抵制、吸收、应对、适应和从自然或人为干扰活动中恢复”。这个定义更广义,它包含狭义弹性定义的特征。具体来说,这次研讨会上给出的定义包括以下关键属性:

### ■ 击退/抵抗/吸收破坏的能力(自然或人为破坏)

- 系统在被干扰后能够回到初始状态或迁移到一个新的、更理想的状态的能力
- 在生态系统中的弹性是衡量系统的持久性以及吸收变化和干扰仍然保持相同总体关系或状态变量关系能力的指标
- 系统实现预期(科学)目标的能力,即使系统(飞船)性能,健康和/或环境并不像预想的那样
- 系统规避,生存,从失败中恢复,并最终实现任务目标的能力。弹性系统能够思考自己的/环境状态的环境不确定性。

### ■ 从破坏中恢复的能力(灾难或灾难性事件)

- 系统在变化和干扰之前、期间或之后可以调整系统功能,甚至在重大事故或持续压力之下,系统仍旧可以维持所需运行的一种能力。
- 弹性在社会生态系统中是指一个系统在经历改变时通过吸收干扰和重组来保持基本相同的功能、结构、特性和反馈的能力。
- 感兴趣的焦点:工程中的弹性框架——在考虑“破坏、系统属性、方法和指标”的权衡空间进行决策管理。

### ■ 从破坏中恢复的能力(灾难或灾难性事件)-

“文化领域的弹性是指一种文化保持和发展文化认同以及重要的文化知识和实践的能力。尽管面临挑战和困难，弹性文化是保持和发展自我的能力”。虽然这些定义都专注于有机和生态系统，但这些特点也同样适用于军事系统。事实上，美国国防部已经将这一定义应用到改进军职和文职人员弹性的需要上。因此，上述关于弹性的观点为讨论国防军事系统的弹性提供了一个良好的基础。

对系统弹性的判断，不在于系统能够满足多少种不同的需求，而是需要对几方面进行综合判断，适应性强吗？能负担得起吗？有效吗？是考虑了合理变更的设计吗？

<p>每个工具单独都能最大化地有效，组合起来不方便或者负担不起</p>	<p>相当灵活的系统，在很多情况下都有效，负担得起</p>	<p>适应性强，负担不起，不是很有效，不能组合重构</p>
 <p><b>工具包</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 高度可重构</li> <li>- 外形7"×12"</li> <li>- 3磅,8盎司袋</li> <li>- 53美元的包,工具另外付费</li> </ul>	 <p><b>规格</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 高度可重构</li> <li>- 外形&lt;1"×4.85"</li> <li>- 8盎司</li> <li>- 109美元</li> </ul>	 <p><b>瑞士军刀</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 85种工具</li> <li>- 外形7.25"×2.75"</li> <li>- 2磅,8mm</li> <li>- 1300美元</li> </ul>

一个系统，即便满足成千上万的规格但也不一定是弹性系统。从上图可以看出，即便每个工具单独都能最大限度地有效，但组合不方便或者负担不起，那么这个系统不是一个弹性系统。同样，适应性很强，但是一般人负担得起的，也不是弹性系统。

### 3、美国国防部 ( DoD ) 的弹性观点

国防部关于弹性的观点包含了早期的几个定义。然而，美国国防部现在需要设计一个系统表现出特定的弹性属性：击退/抵抗/吸收的能力；恢复能力和适应能力。

虽然这些特性对于国防来说是必要的，但是并不足够。除了这些特性，国防部系统预计将在一个广泛的行动范围跨过多种潜在的可能的未知情况有效执行，尽管经历破坏。这种能力或性质被称为广泛的功用（Broad Utility）。

如上所述，弹性国防部系统的四个关键属性是：

击退/抵抗/吸收；

恢复；

适应；

广泛的功用(图 1)。

在这个图中，圆圈边缘代表了比中心的各个弹性属性更广的能力；两个或两个以上的交叉区域可以视为提供一个合理有效的弹性解决方案。四个属性的交叉区域定义了弹性解决方案集空间，空间中的每一个解决方案接近一个特定属性的最优解。

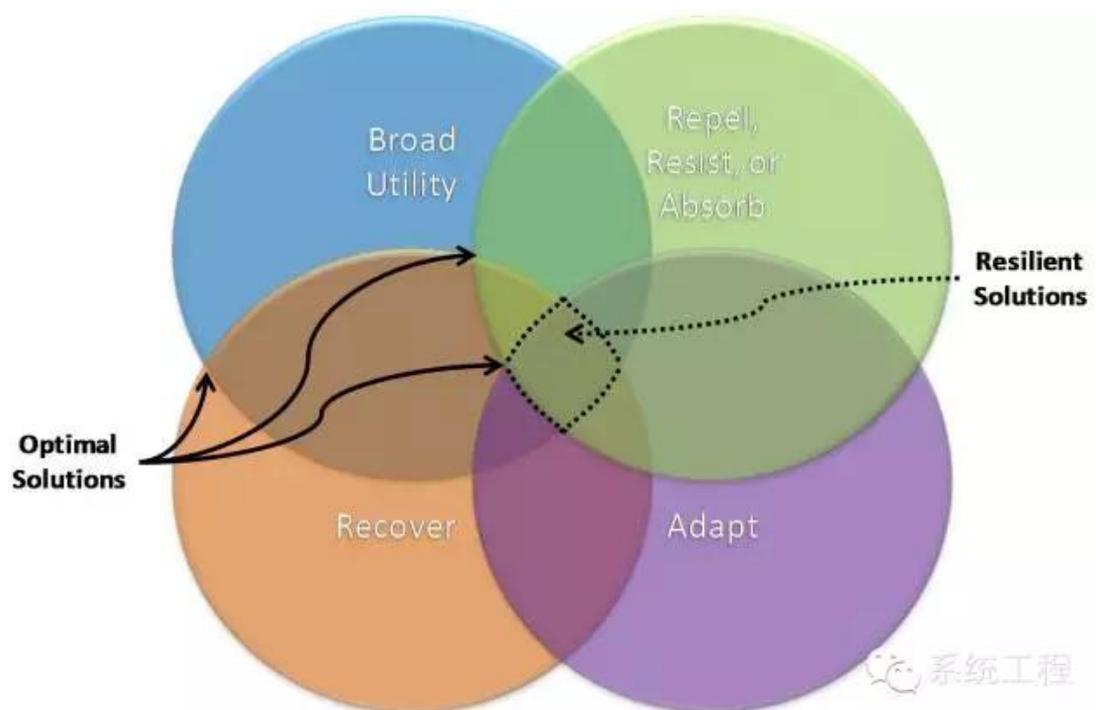


图 1 国防部系统和 SoS 的弹性属性

设计一个弹性系统是一项非常艰巨的任务，因为系统需要解决一系列的问题，例如，需要提前了解设计包线，当一个系统故障，它必须做到可预测、可检测、以一种从容的方式来提高整个系统的生存能力（包括使用者和其他子系统的生存能力）。

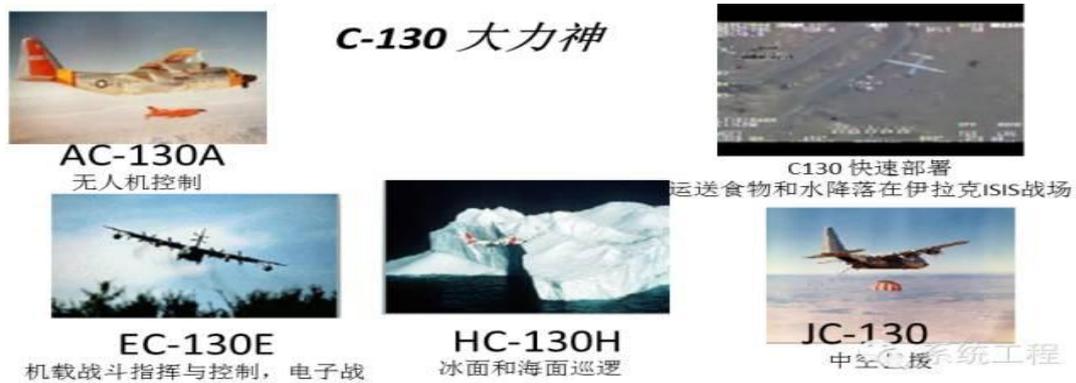
在国防部内，系统或组件没有弹性经常会被贴上“一次性用品”或“消耗品”的标签。所以多数国防系统都会表现出如图 1 所示两个或更多属性，使其适用于多个作战环境。

然而，随着硬件和软件技术的发展足以支持更高级的(如，复杂的)防御系统，这就直接导致了系统的复杂化。随着系统复杂性的增加，那么这些系统的成本也将增加。但是，科学家和采办专家被要求在有限资源条件下开发出拥有至少三项属性的能力——这将是一项艰巨的任务。

美军通常将一些已有的军事系统通过更新来满足美国国防部对弹性的定义。这方面有很多的实际应用，包括：洛克希德马丁 c - 130 大力神运输机，波音公司 B - 52 同温层堡垒轰炸机，M113 装甲运兵车，布拉德利战车

(BFV), 高机动多用途轮式战车(HMMWV)等等。虽然这些系统感觉上都不具有图 1 中所说的弹性, 但是他们的功能范围加上他们的变异/衍生品的数量和他们的长寿命, 佐证了这一说法, 他们表现出相当程度的弹性。

此外, 上述这些系统在满足最初的作战需求的前提下, 已经存在于美国国防目录清单中超过 30 年, 都有超过五个基本变型, 有能力执行多个任务。



应该注意的是, 近年来的高机动多用途轮式战车 (HMMWV) 被批评为其无法抵御敌人的弹药。然而, 对于其基本目的四轮驱动运输载具, 自 1984 年以来美国军队所遇到的几乎每一个作战环境和天气条件下, 在执行其基本任务时都表现出相当的通用性。它至少有 17 个变异型号服务在美国军队和其他七十个国家。其变异型号承担了众多的角色, 包括货物/运兵载具、自动武器平台、救护车、导弹载体、榴弹炮/迫击炮动力车、防空平台、和通信掩体。

今天, 美国国防部必须使用这些系统作为关于弹性的事实标准和出发点来提高未来系统的弹性, 使其符合如图 1 所示的弹性属性。所以, 如何完成符合如图 1 的弹性系统的工程这是美国国防部今天面临的挑战。幸运的是, 上面所述的装备系统可以作为一个基线, 国防部可以此开始预测和计划采办弹性系统的途径。然而, 在列举的工程挑战和所需的技术转换成当前的采办过程之前, 军事系统有四个关键的弹性属性需要详细阐述, 举例说, 这些术语: “终身”、“环境”、“干扰”、“压力”和“任务”等, 在国防部系统具有更多的特殊含义。

表 1. 国防部系统的弹性基本原理

终身运行

在原始计划/设计基础上实际扩展使用数十年

定期的计划内和计划外大修

周期性重新设计以扩展使用寿命

变化的运营和监管环境

设计用于特定的地形和天气（如，沙漠），可以被用于另外的地形和天气(如，潮湿环境)

在极端气候的执行能力

适应新的构建架构技术和材料

轻型战术车辆适用于重型装甲

浅水船用于深海

由于使用军事系统进行什么样形式的作战极少能准确预测，特别是对军事系统的使用水平与规模很难不可预测。随着美国减少在中东的作战行动和削减其军事力量，需要从数量有限的军事基地向目标区域投放武装力量，这就要求有一支具有弹性的远征军能够快速部署和投入使用，并在目标区域保持军事系统的完整功能。设计和开发一个在战斗行动或远征行动中运作的国防部系统有很多影响因素，其中一些关键问题包括但不限于：

- 未知和不确定的环境
- 机动和有限的支持结构
- 极端条件
- 敏捷和自适应对手
- 不断变化的自然和人为环境

此外，这些系统很多都会受到当前国防部后勤系统的补给频率和方法限制。例如，使用机动加油平台在现有的可用性或有限的燃料品种情况下去最大化地支持新的或不稳定的燃料形式或维持在严酷环境中的加油操作。

因为国防部系统一般都会沿用几十年，因此，它们在设计和建造时都必须考虑在进行扩展使用后或者在严酷环境使用后可以进行翻新与维修。例如，轮式战车总是在从战场返回后进行重大维修更换磨损的密封圈和部件以延长它们的寿命。

为了实现长寿，一个平台必须可修改、可升级，在其服役期间利用技术的进步，改正系统缺陷，并替换组件。这样可以通过提供一系列的适应不同任务要求和不同的战场条件的可行系统来减少风险、形成能力组合或平台组合。

弹性也可以通过利用基本系统之间以松耦合方式相互作用形成一个复杂的宏能力以满足任务目标。例如，多个自配置、协作的传感器可以通过“群集”方式有效地提供一个弹性的网络数据收集器。通常情况下，产生的巨系统（SoS）基于基础系统在一个更高层的指挥和控制实体的观察、沟通和控制下来适应不断变化的环境和大气条件。

## 4、国防部的弹性工程面临的挑战

根据前面的描述，美国国防部提出工程弹性系统的必要性有以下几方面：

首先，国防部系统应对各种各样的任务具有较高度度的不确定性和风险。这些任务的范围包括了从非军事行动，如人道主义援助和救灾(HA / DR)到激烈的军事冲突。

快速变化的任务、威胁和作战环境导致军事需求的不确定性。

更为严重的是，商业技术的全球化应用，依赖全球科技会给国防部带来可信赖方面的风险。

在国防部系统里弹性是一个产品族的能力，这种能力是在不确定性前提下，通过快速重配置或及时更换单个组件，能够使用多种选项有效服务于各种各样的任务的能力。因此，作为弹性系统(ERS)的特点，国防部的弹性系统要求：

在各种任务的环境中是可信的和有效的；

通过重新配置和/或更换很容易适应其他任务环境；

可预测的，缓解功能故障。

在美国国防部研究 ERS 的一个关键挑战是开发和部署“经济实惠的、适应性强的以及有效的系统”通过“任务波动性和不确定的未来”来检验。通过表 2 所示的技术结合来实现这样的能力。

表 2。国防部系统的 ERS 策略

计算先行指标

——评估技术/程序性决策结果和控制风险

执行及时正确的权衡

——维持安全边际量和控制/避免漂移

开发一个精确的漂移模型

——了解风险因素进行有效的风险管理

开发适用的、可实现的弹性启发方法

——指导弹性系统设计

开发适当的弹性指标

——评估候选的弹性策略

此外，这种系统的分析需要同系统运行的过程以及正在开发的产品相适应。这意味着需要一种自适应的基于能力目的和任务的权衡空间分析能力。任务上下文，系统如何帮助满足一次运行或者一系列运行的理想的最终状

态，并保留下来供日后运行利用，必须在设计弹性平台是作为预期的功能进行说明。

为特定的运行定制系统是可行的，但是，这种定制系统往往成本高昂，或者一些复杂系统本身供应有限并不总是能够获得。因此对任何系统都必须评估其经济负担能力，究竟使用一次性系统还是弹性系统，需要进行方案比较。这种方法在资源受限的环境尤其需要谨慎。

最后，在进行成本分析的时候，需要同任务上下文以及能落地的物理现实和物理实体进行耦合分析。环境的复杂性、成本和现代防御系统的巨大影响限制了进行大量的真实世界物理试验的可能，这种情况会限制准确的数据收集，因此需要使用验证模型来预测系统可能的性能，使用建模和仿真来充实巨大的权衡空间（可能用途和复杂的系统交互的权衡空间），这是评估的这一系统潜在价值的必要因素。

今天,工业和政府部门使用高性能计算资源,用验证模型和仿真复制(复现)基于物理的交互并预测系统功能,从而预测可能影响任务执行各种任务的上下文。这些模型和仿真生成的数据可以进行评估,其评估结果可以用于国防部内进行基于权衡的讨论指南。这些权衡用来确定一个系统提供所需能力的风险,以及确定系统是否可以保留并表现出足够的弹性来保证系统的采办和部署。

## 5、美国国防部 ERS 研究进展

工程弹性系统(ERS)是国防部(DoD)的一个科技优先项目,主要关注能够有效和高效地设计开发复杂工程系统。ERS 一个重要的关注领域就是在早期阶段根据模型化的使用特性和特征来评估设计备选方案。这项工作的努力,通过模块化开发、可组合的、可扩展的分析构造和流程,为弹性分析背景下的系统工程奠定了基础。分析方法是来源于现有的本体论基础,并寻求促进一致性和可比性分析。具体来说,在 ERS 系统中分析方法的重点就是评估“所装备系统的鲁棒性能力”和“应对作战需求的能力”,以及“一个设计系统面对工程变更的灵活性”。其开发理念就是力求使弹性分析的设计开发工作是透明的、直观的、理性的、可量化的、可追踪的。

### ERS 发展历程

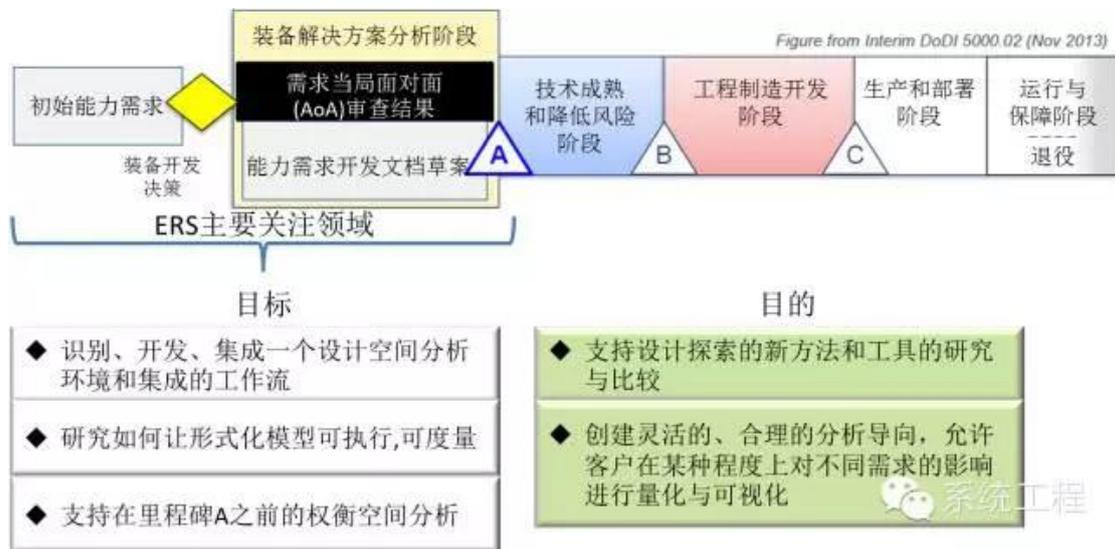
ERS 项目从 2010 年开始立项启动,当前阶段主要的工作都集中在开发决策支持方法,开发权衡空间工具集的框架,其中包括备选方案分析(AoA)相关方法的研究与开发,以便从不同维度去评估这些国防系统的弹性。经过 5 年多时间的研究发展,目前美国国防部已经发布了 ERS 的第一个版本。

## ERS发展历程

- 2010-2011 理论基础
- 2012-2013 概念验证演示
- 2014 架构、工具和基础设施建设
- 2015 ERS V.1发布



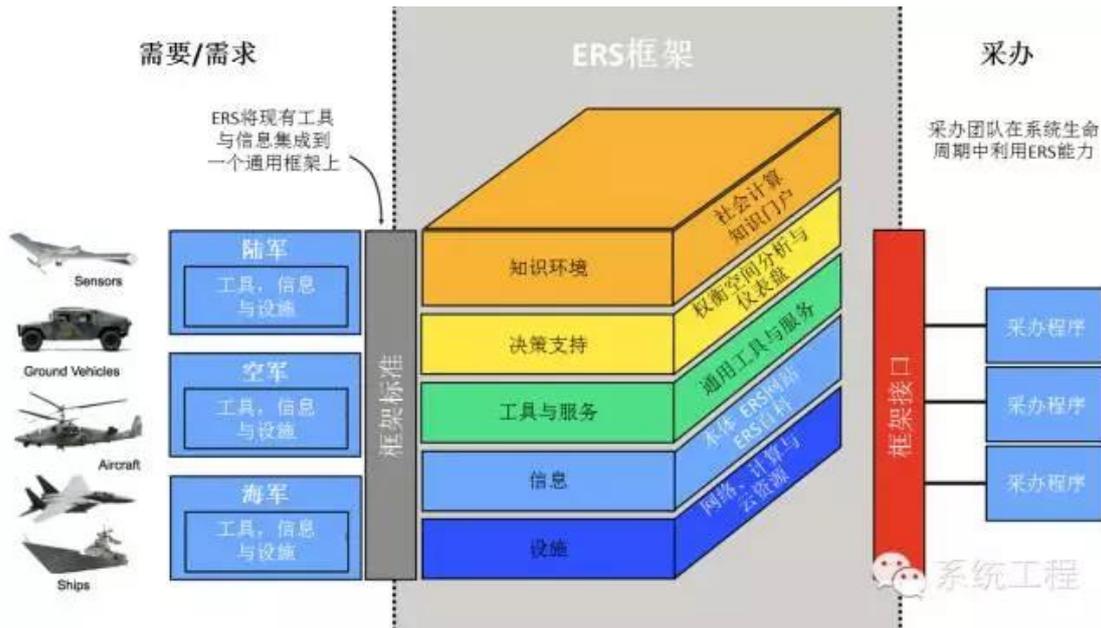
ERS 项目中所描述的分析方法特指在工程弹性系统（ERS）环境中以及在里程碑 A 之前的，跟战场使用性能模型化相关的一些开发与工程化方法。



工程弹性系统（ERS）关注敏捷的和具有成本效益的设计、开发、测试和生产，以及可信有保证的战场使用并容易修改的国防系统。工程弹性系统（ERS）的产品是工程概念、技术和设计工具。ERS 寻求国防采办的一种转变，迫切需要应对地缘政治环境下快速变化的威胁、战术、任务和技术。

## ERS 框架概念

在 ERS 项目中，美国国防部提出了一个可以促进政府、工业企业、学术团体之间协同交互的 ERS 功能框架，ERS 是一个开放的、不断发展的框架，是支持采办和运营分析所有阶段的一个通用环境，提供共享的能力，支持相互之间的协作。



ERS 框架概念

ERS 通过框架标准同军方现有的工具、信息与设施进行集成，获取军方对国防装备系统的使命任务定义、对国防装备系统的需要与需求，根据预算、使命任务与需求对备选装备方案在里程碑 A 之前进行评估并进行决策，然后通过框架接口与国防采办程序连接，让采办团队可以在整个系统的生命周期中可以利用 ERS 的能力。ERS 框架提供从使命任务、需求、规划、预算、概念、评估、决策与制造、采办整个过程的分析模型、知识与决策数据。

ERS 提供一个五层框架模型，包括：涵盖基础网络、高性能计算与云端资源的基础设施层；以本体、术语、网络信息、ERS 百科知识等基础信息为主的信息层；提供建模、计算、仿真、可视化、演示等通用工具与协同服务的工具与服务层；提供权衡空间分析，以及各种图表展示、对比分析的仪表盘以便数据驱动决策的决策支持层；提供社会计算与结构化知识的信息环境等。

ERS 框架提供四方面的模块，分别是：与任务相关的权衡空间分析，系统分析与决策，概念、计算和关于环境表达，能力继承与演示等模块。

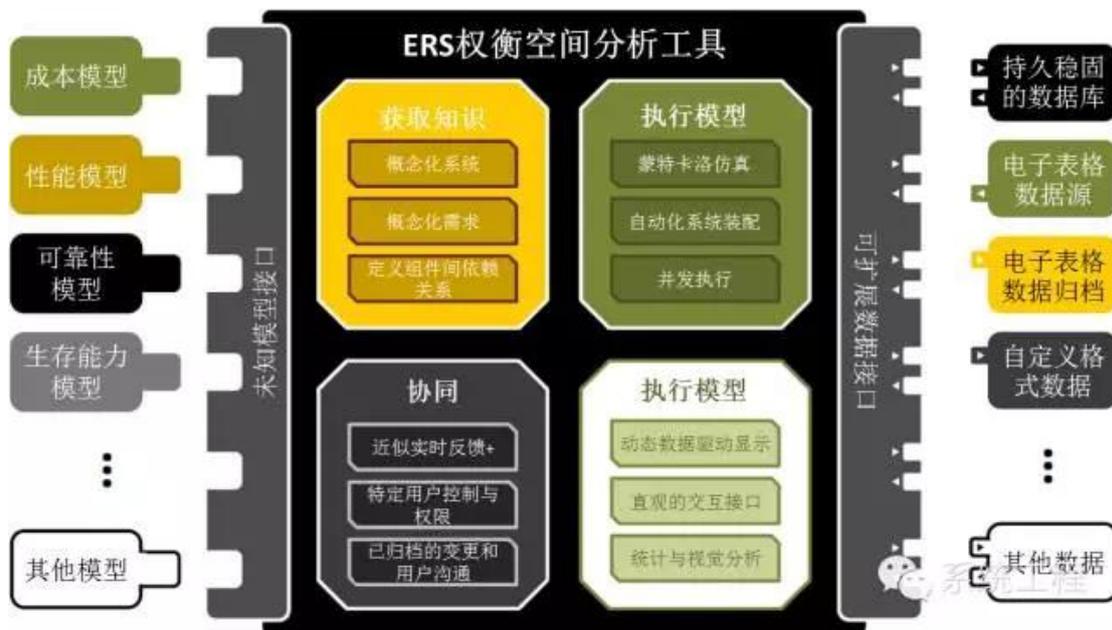


在 ERS 这个框架中目前已经有下列产品可供使用：

- 权衡空间分析工具；
- 大数据分析与可视化；
- 权衡空间分析与创建（TAC）；
- 环境模拟器；
- 概念建模器；
- 几何构建工具与几何网格工具；
- 软件超算设计过程；
- 知识地图；
- ERS 百科；
- ERS 集线器、ERS 转换；
- ERS 集成框架等

ERS 要求能适应多种系统模型的设计，这些系统模型必须可以很容易地修改和重用；要求具有快速迭代设计的能力，以及与任务需求的关联。

要达成上述目标，权衡空间分析就显得非常重要。权衡空间分析框架必须是可执行的、可扩展的，目前这种分析框架正在不断发展与成熟之中。这种可执行、可扩展的权衡空间分析工具必须在一个比较广泛的工作流程背景下协同地完成，从而去指导权衡空间探索和评估备选系统的弹性。



ERS 权衡空间分析工具的能力

## DOD 的 ERS 发展路标规划

作为美国国防部七个科技优先项目之一，DoD 对 ERS 做出了长期的发展规划，最新规划将延续到 2024 年，在概念与计算表达、权衡空间分析、协同分析与决策以及能力集成展示等四方面持续不断地发展。

	FY15	FY17	FY21	FY24
概念与计算表达	◆	◆	◆	◆
权衡空间分析	◆	◆	◆	◆
协同分析与决策	◆		◆	◆
能力集成于演示	◆	◆	◆	◆
版本	★ V1	★ V2	★ V3	★ V4
	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶初步权衡空间工具</li> <li>发射原型知识管理环境</li> <li>初步集成架构</li> <li>关联基于物理的模型和环境数据</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>第二代船舶、地面运输(GV)、空间运输(AV)权衡空间工具</li> <li>知识管理环境</li> <li>工业与架构关联环境</li> <li>风险表达与缓解</li> <li>环境模拟</li> <li>初步成本模型</li> <li>初步任务工具</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>用户配置分析</li> <li>地球环境模拟</li> <li>可制造性/可生产性工具</li> <li>生命周期成本工具</li> <li>海军武器系统建模</li> <li>任务上下文背景工具</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>整个采办周期建模</li> <li>经过验证的成本表达</li> <li>所有材料替代方案的虚拟样机</li> <li>渐增层级交易的投资组合分析</li> <li>认知计算</li> </ul>

在 2015 年所发布的第一个版本中，ERS V.1 已经完成了：

- 舰船行业的初步权衡空间分析工具；
- 宇航发射原型知识管理环境；
- 初步的集成框架；

完成了基于物理的模型和环境数据之间的关联。

计划中将在 2017 年发布 ERS V.2，在该版本中，将完成：

舰船、地面运输（GV）、空间运输（AV）行业的第二代权衡空间分析工具；  
知识管理环境；  
工业与架构关联环境；  
风险表示与缓解；  
战场环境模拟；  
初步成本模型；  
初步任务模型。

计划中在 2021 年发布 ERS V.3 版本中实现：

用户配置分析；  
地球环境模拟；  
可知造型/可生产性分析工具；  
生命周期成本分析工具；  
海军武器系统建模；  
任务背景分析工具等。

在 2024 年的 ERS V.3 版本中计划实现：

整个采办周期建模；  
经过验证的成本表达；  
所有装备替代方案的虚拟样机；  
投资组合分析；  
认知计算。

## 总结

**Resilience**（弹性）是美国国防部或者军方使用单位要求军事装备系统具有的一项特性，以应对军事需求与使命任务的不确定性的挑战，快速部署军事装备系统并投入使用。这就要求军事装系统能够具有多功能多用途属性可以适应不同军事需求和作战任务需要；通过模块化可配置、可更换适应不同的作战环境；在非预期的环境或受到干扰、破坏的情况下可以继续完成既定任务目标，也就是运行稳健。也就是说，弹性国防军事系统应该具有 4 个关键属性：

击退/抵抗/吸收破坏与干扰；

恢复；

适应；

广泛的功用

同时具有三项或四项属性，才能被称之为“弹性系统”。此外，拥有成本也是弹性系统需要考虑的一个因素。

**ERS**（工程弹性系统）是美国国防部（**DoD**）为了能够获得军事弹性系统而开发的一套框架系统，该 **ERS** 框架系统可以帮助在开发设计早期阶段（里程碑 **A** 之前）基于大数据分析 with 知识，利用各种不同的模型进行权衡空间分析，从而完成从任务、需求、预算、环境、概念、创新、成本、制造等不同维度对备选方案的评估与决策。

此前 **DoD** 已经完成了前期的理论与演示系统开发，并在 2015 年发布了 **ERS** 第一个版本，并计划在未来的 10 年内持续地改进与完善。

近年来，系统弹性受到越来越多的关注，除了 **DoD** 的研究之外，越来越多的学术机构、工业企业开展这方面的研究，国际系统工程协会（**INCOSE**）在最新版的系统工程手册（第 4 版）中也将“弹性工程（**Resilience Engineering**）”纳入到专业工程活动中。国内也有一些研究所、企业在进行相关的研究，在后面的文章中我们将简单介绍。