

# 体系生命力理论框架

张宏军<sup>1,2</sup>, 黄百乔<sup>1,2</sup>, 鞠鸿彬<sup>1,2</sup>, 邱伯华<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1,2</sup>

1. 国防科技工业海洋安全体系创新中心, 北京 100094

2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

**摘要** 通过分析自然界有机体系的有机特性集, 将有机特性统一到体系生命力概念之下, 提出了体系生命力理论, 并结合人工智能及其相关的信息技术, 提出了在工程技术体系中导向涌现出有机特性集的技术框架。体系生命力理论框架为提高体系的稳定性和可用性, 提高体系的优化和选择进化能力提供了理论指导。

**关键词** 体系; 活系统模型; 信息物理系统; 体系生命力

系统论和系统工程理论在现代复杂的大型工程技术领域发挥了重要作用, 但随着人们研究的对象越来越复杂, 出现了超级系统, 它们由能够独立运行的系统组成, 没有明确的需求边界, 能够动态演化, 甚至它们不在同一地理位置上, 彼此间通过网络联接, 且只进行信息的交换, 没有物质与能量的交换。这类超级系统, 人们称之为体系。体系定义为相互交联的能够完成单独系统不能达成的特定功能的系统集成。概念上体系仍属于一种复杂的系统, 但不是所有复杂系统都可称为体系, Maier研究了体系与复杂系统之间的区分原则, 并提出了体系的5个重要属性, 包括成员系统运行的自主性、成员系统管理的自主性、体系发展的演化性、行为的涌现性及地域的分布性<sup>[1-2]</sup>。

体系是自然界中普遍存在的一种形态, 例如自然界中由动物、植物和环境构成的生态体系。自然界中的体系是一种“自组织”体系, 它是体系内部的系统在成千上万年自然规律作用下自我组织形成的结果, 这种体系具有对外界异常干扰的自恢复能力(或者称为弹性), 保持体系自身的稳定性。这种体系也能够自我

进化, 从低级进化到高级, 从简单进化到复杂。总之, 自然体系是一种“自组织”的有机体系, 与之对应的是“他组织”体系, 这种体系是在人为的干预下组成的有序结构, 例如工程技术体系<sup>[3-4]</sup>。

工程技术体系的组织与管理是人为设计的, 无论是体系的能力要求、成员系统的选择、体系的架构, 还是体系动态演化的影响, 都是按照人的设计要求来的。体系的能力也正是由上述设计因素涌现出来的。工程技术体系缺少有机体系的自恢复能力和进化能力。人们尝试在管理和工程技术领域部分引入“自组织”的有机特性来指导管理和设计, 其中包括活系统理论模型、弹性理论和工程弹性系统理论、健康管理技术和信息物理系统技术。

20世纪60—70年代, 英国的管理大师 Stafford Beer<sup>[5-6]</sup>创建了一种将控制论法则应用到各类企业(enterprise)的管理模型上的理论, 称作活系统模型理论(viable system model, VSM)。该模型以人脑对人体肌肉和器官运动的控制机制作为类比, 来研究企业的管理问题。该模型既强调系统内部的协调, 也强调系统

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-02-20

作者简介: 张宏军, 研究员, 研究方向为舰载航空、体系工程, 电子邮箱: zhanghj@cssc.net.cn; 黄百乔(通信作者), 高级工程师, 研究方向为系统工程、体系工程, 电子邮箱: seafury@buaa.edu.cn

引用格式: 张宏军, 黄百乔, 鞠鸿彬, 等. 体系生命力理论框架[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 20-26. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.20.003

对外部环境的适应。弹性理论是一种关注系统在遭受外界干扰时保持系统功能和结构稳定性能力的理论<sup>[7-9]</sup>,在多个领域都提出了相关的弹性设计理论,例如在装备制造领域,美国国防部提出了工程弹性系统(engineering resilience system, ERS)理论,它也是一种强调系统抵御外部干扰和自恢复能力的理论。健康管理(prognostics and health management, PHM)技术通过数据采集、故障诊断、状态监测、健康评估与故障预测决策来及时获取系统的状态,并提前对系统可能的故障采取措施来降低风险,它是一种增强系统的感知能力和恢复能力的技术<sup>[10-11]</sup>。信息物理系统(Cyber physical system, CPS)理论提出在物理系统之外构建一个虚拟的信息系统映射,来仿真物理系统的运行规律,并通过虚拟数字化系统的仿真运行和大数据分析,揭示物理实体系统的运行参数之间的相关性规律,为系统的优化控制提供参考依据。CPS理论为系统的自优化提供了技术途径<sup>[12-17]</sup>。

无论是VSM理论、ERS理论、PHM技术,还是CPS理论,都是用部分的有机特性来改进系统的管理和控制的一种尝试。而工程技术体系是一种松散耦合的系统集合,体系中的管理和控制问题更为突出,且还面临着动态演化发展和非预期涌现行为的新问题。为了维持工程技术体系的稳定性,持续保持体系的活力,我们在系统地分析了有机体系的有机特征集的基础上,提出了体系生命力的概念,采用控制理论的部分准则和一定的技术框架,使工程技术体系涌现出有机特性集中的各项特性,并统一到体系生命力的概念下,将体系生命力分为生存力、恢复力和进化力3个层次。具有生命力的体系能够应对外界的干扰,保持自身的稳定性,具有自恢复和自优化的能力,并为自身的进化提供可选择的方向。

## 1 相关研究工作

### 1.1 活系统模型

活系统模型是由英国Stafford Beer在20世纪60—70年代创立的,它将对组织的管理过程类比为人的大脑对身体的控制过程,运用控制论的法则来维持组织的稳定,使组织能够应对外部环境的变化而保持活力。活系统模型由环境、执行系统和管理系统3部分组成,而执行系统与管理系统又细分为6个分系统,分别

是负责操作的系统 $S_1$ 、负责协调的系统 $S_2$ ,负责内部总体优化控制的系统 $S_3$ ,负责监视审计的系统 $S_3^*$ 、负责外部信息与未来环境状况情报获取和开发的系统 $S_4$ 和负责顶层政策的系统 $S_5$ 。 $S_1 \sim S_3^*$ 构成了组织的自主管理机构,以保证系统内部能够稳定运行。 $S_4$ 分析环境,预测未来可能到来的挑战,来保证组织能够在变化的环境中继续保持活力,并将结果传给 $S_3$ 以便采取对策。 $S_5$ 则根据 $S_4$ 的分析,制定相应的政策和战略规划,如图1所示。活系统模型体现了对当前系统的优化和对未来变化的适应,以时刻保持组织的活力,这种理念是非常值得借鉴的。但受限于当时的信息技术条件,该理论只是在概念层面提出了系统组成架构,缺乏相应的信息技术来支撑该理论的实现。

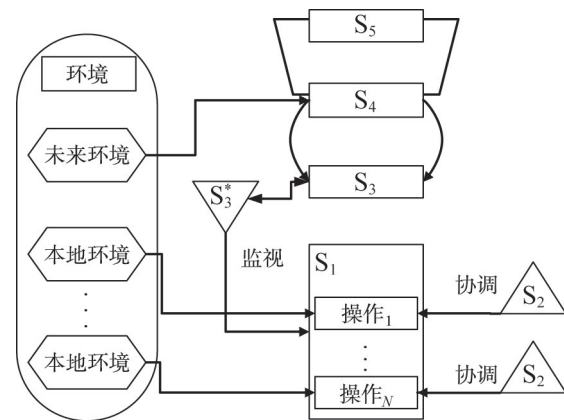


图1 活系统模型

### 1.2 弹性理论与健康管理

弹性观点(resilience)起源于20世纪60—70年代的生态学。1973年,Holling发表了题为《生态系统的弹性和稳定性》(Resilience and stability of ecological systems)的开创性论文<sup>[7]</sup>,为生态弹性以及各种其他领域的弹性理论研究提供了基础。Holling将弹性定义为在维持系统结构、功能和反馈等不变的前提下,通过调整系统状态变量和驱动变量等参数,系统能吸收的扰动<sup>[7]</sup>。系统受到干扰后的动态变化(弹性能力)主要依赖于复杂适应系统的自组织能力和自组织过程,这是自然界自组织系统多年累积的内在规律所起的作用。类比到“他组织”的工程技术系统,能否通过人为的设计使系统具有对抗干扰的自组织能力是人们关心的重点。

在工程技术领域,美国国防部提出了工程弹性系统理论,并提出了工程弹性系统的4个关键特性,包括:1) 击退/抵御/吸收;2) 恢复能力;3) 适应能力;4) 广泛

的效用。目前该理论更多的是一种设计理念与设计指导原则,还需要开发相应的设计方法和设计工具做支持。以提高系统抗干扰能力为目标的技术还有健康管理技术,它是一种把被动维修变为主动预测、主动预防的系统方法。健康管理技术通过增强系统自身的感知能力和预测能力,给出故障发生前的预防性维修策略来提高系统的可用性,能够把部分干扰的影响消除在产生严重后果之前。健康管理技术重点在于系统故障前的维护保养。

### 1.3 信息物理系统理论

CPS理论是信息技术发展和信息空间扩张的必然产物。2006年,美国国家科学基金会(NSF)举办了第一届CPS研讨会,将CPS定义为通过计算核心(嵌入式系统)实现感知、控制、集成的物理、生物和工程系统。因此,它是一种信息空间与物理空间相互融合,实现对物理空间优化控制的理论。数字化双胞胎系统概念的提出,进一步明确了CPS的目标图像。Jay Lee<sup>[13-15]</sup>结合大数据技术与人工智能技术,提出了CPS是以多源数据建

模为基础,以智能连接(connection)、智能分析(conversion)、智能网络(cyber)、智能认知(cognition)和智能配置与执行(configuration)的5C体系为构架,建立虚拟与实体系统关系性、因果性和风险性的对称管理,持续优化决策系统的可追踪性、预测性、准确性和强弹性(resilience),实现对实体系统活动的全局协同优化。CPS技术与工业生产系统相结合,最终实现无忧生产(worry free productivity)的目标。

CPS的本质就是构建一套信息空间与物理空间之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系,解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题,提高资源配置效率,实现资源优化<sup>[16]</sup>。并通过学习提升,不断总结系统的运行规律,将系统中的显性数据与隐性数据转化为优化知识,实现系统的螺旋上升。

CPS物理实体与信息虚体之间的交互与协作的技术框架为实现系统的自学习和自优化提供了理论支持,如图2所示。

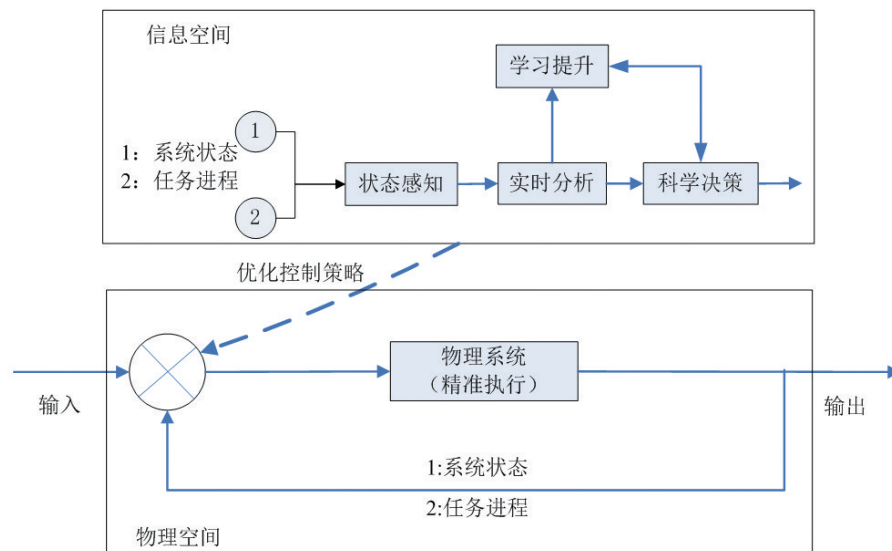


图2 CPS技术框架

## 2 体系生命力理论框架

### 2.1 “自组织”有机体系的属性特征

自然界“自组织”的有机体系能够对外界刺激做出恰当的反应,维持自身的平衡与稳定,能够在遭破坏后自我恢复到另一稳定的状态,长期变化的累积能够实现体系的进化。这些属性对于“他组织”的工程技术体

系来说,都是渴望得到的良好属性。对“自组织”有机体系的有机特性进行系统性分析,得出有机体系的特征集如下。

1) 生存性:在设定条件下,有机体系能够维持自身的正常运转。

2) 感知性:能够感知外界的状态和自身的状态,对自身状态的感知又称为自省性。

3) 自适应性:对外界异常的干扰能够采取适应性手段来维持自身的平衡和稳定。

4) 自恢复性:在外界干扰打破现有平衡后,能够重新组织以达到新的平衡与稳定。

5) 自学习性:将运行过程中有利的决策/运行模式累积下来,用于指导后续运行。

6) 自优化性:自我调节运行参数,并评估输出结果,以实现控制的优化。

7) 进化性:长期累积有利量变后,体系进入新的质变状态。

## 2.2 体系生命力概述

对比“自组织”有机体系的有机特征,通过使用一定的控制机制、技术框架与技术手段,使工程技术体系导向涌现(directed emergency)出有机特性来,形成一种有机的工程技术体系,该体系的有机特性具有如下技术特点。

1) 体系生存性。通过成员系统的可靠性设计和保障性设计,提高体系在设定条件下的生存能力。

2) 体系感知性。通过传感器技术与物联网技术,采集外界环境信息、输入信息、内部状态信息和输出信息。实现对外界环境的感知、输入输出的感知和自身运行状态的感知。

3) 体系自省性。体系的自省性是感知性的更高层次的应用。通过建立的状态模型和健康预测模型,将感知到的原始数据转化为评估的状态量与预测结论,并通过大数据分析技术,分析出体系衰退过程中尚未达到显性故障的体系的“不可见问题”状态,及时采取措施。

4) 体系自适应性/自恢复性。对于工程技术体系来说,适应性是对设定条件内的外部改变做出恰当的应对,恢复性是对设定条件外的外部改变或内部故障做出恰当的应对,以维持体系的平衡与稳定,因此重点在自恢复性。体系的自恢复性是通过对其功能或结构的动态调整来实现的。

5) 体系自学习性/自优化性。体系的自优化过程包含了自学习过程。通过大数据分析人工智能算法,自动获取体系运行参数之间的相关性规律,将数据转化为领域知识,实现自学习过程,并将其用于调整控制参数,优化后续运行。

6) 体系选择进化性。体系通过赛博(Cyber)附能结构中的赛博空间虚拟体系的仿真运行,揭示体系的

效能瓶颈,为物理空间体系的演进选择进化与改进的方向。

本研究组将体系的有机特性统一在同一个概念下,提出了体系生命力概念。将体系的生命力分为3个层次,分别是生存力、恢复力和进化力。每个层次包含的有机特性如图3所示。

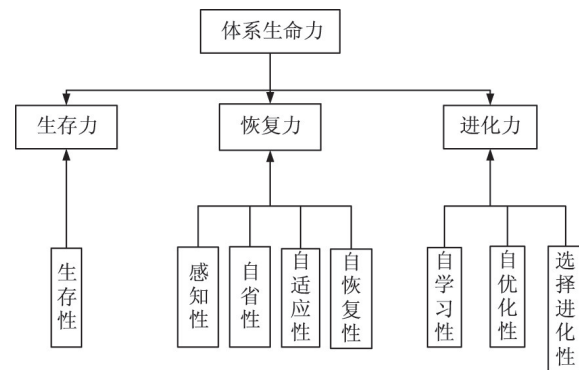


图3 体系生命力层次模型

体系生存力是指成员系统通过传统的可靠性、维修性和保障性设计来提高自身的可靠性和保障性水平,从而提高体系在设定条件下的生存能力。体系恢复力是指体系在受到外界干扰或内部部分故障时,通过自感知和自省能力,实时获取体系内外部状态,包括故障状态,并执行设计的动态调整策略来应对不利因素,恢复体系完成使命任务的能力,表现出自适应性、自恢复性。体系进化力是指体系通过大数据分析人工智能技术,总结体系运行的相关性规律,用于优化控制,并通过CPS赛博附能结构中的虚拟空间模型的仿真运行,揭示体系的效能瓶颈,为体系的进化提供选择的方向。

综上,将工程技术体系的生命力定义为体系就像有机生命体一样具有生存力、恢复力和进化力,并具有一组有机特征集,包括生存性、感知性、自省性、自适应性、自恢复性、自优化性、自学习性和方向进化性。

## 2.3 体系生命力技术框架

为使工程技术体系导向涌现出有机特性,成为具有生命力的有机体系,需要采用控制理论的相关控制机制,并采用一定的技术手段。可总结为一个框架、两种机制和五大技术(图4)。它们共同作用,涌现出了体系的有机特性。

一个框架是指由体系的物理实体和信息虚体构成的交互与协作技术框架,即CPS技术框架。通过实时采集物理体系的输入输出与状态参数,经过虚拟空间体

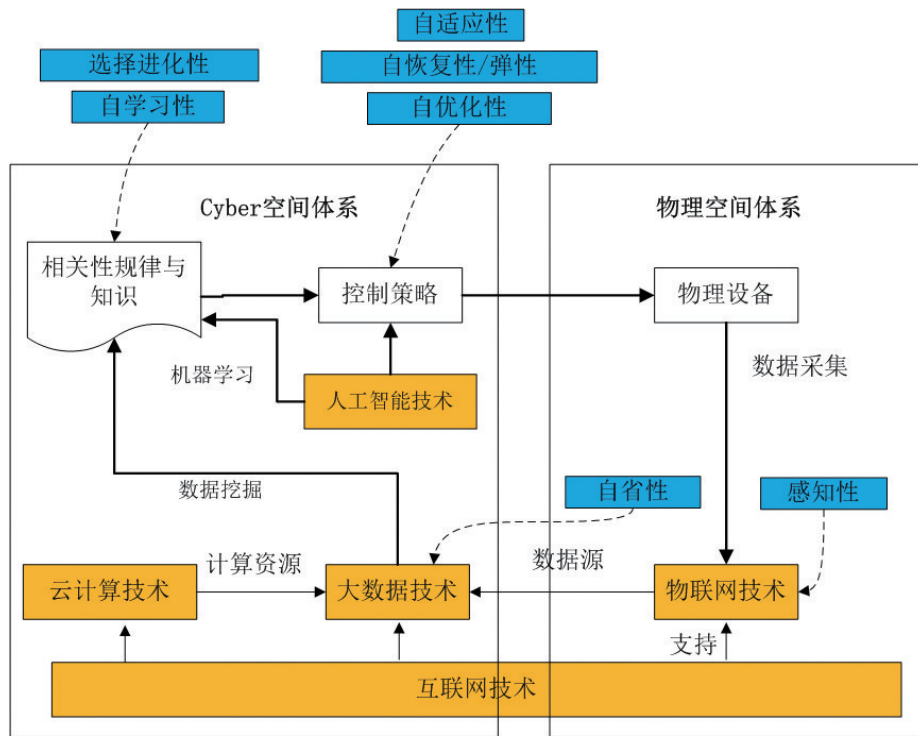


图4 体系生命力技术框架

系的实时分析并将优化后的控制参数输出给物理实体,用于指导物理实体的优化运行。

两种机制是指控制理论中的反馈机制和学习机制。参照图3可知,整个CPS框架便是一个大的反馈过程,是将物理体系的输出评估后用于体系后续运行的控制。学习机制是一种特殊的反馈机制,这种反馈不是短期内的实时反馈,而是经过一段时间的累积后,用提炼的经验或知识来指导后续的运行,是一种延迟的反馈。

五大技术包括物联网技术、互联网技术、云计算技术、大数据技术和人工智能技术。物联网技术实现了数据的采集和局部传输,互联网技术实现了数据的体系内传输,云计算技术提供了便捷而丰富的计算资源,使得大数据分析和人工智能算法的运算成为可能。大数据技术与人工智能技术实现了数据相关性规律的发现、数据模型的构建、数据向知识的转化以及控制参数的优化。

### 3 讨论

#### 3.1 体系生命体与其他理论的关系

将体系生命力理论与其他与有机特性相关的理论

进行比较分析(表1)。体系生命力理论是在对自然界有机体系的有机特性进行系统性分析的基础上提出来的,包含了生存力、恢复力和进化力3个层次8条属性的内容。较之其他理论来说,完整实现了有机体系的有机性特征,且提出了具体的技术实现途径,是对现有理论的完善与发展。

#### 3.2 体系生命力的意义

体系生命力理论为工程技术体系涌现出有机特性提供了理论指导。使得工程技术体系成为具有一定智能行为的智能体。能够通过物联网技术实时感知外界环境的状态(感知性)和评估自身的状态(自省性),能够对外界环境的变化给出恰当的反应,以保持自身的稳定(自适应性),在外界干扰超出界限或自身部分故障时能够采取适当的动态调整策略来恢复自身的功能(自恢复性),能够通过大数据分析和人工智能技术分析参数之间的相关性规律,将收集的数据转化为规律性知识(自学习性),能够通过自学习与反馈回路不断优化体系的控制(自优化性),最终通过虚拟空间模型的仿真运行,找出体系中的效能瓶颈,为物理体系的改进提供方向(方向进化性)。

当然,体系生命力理论在实际应用中一方面受业务领域需求的影响,另一方面也还受人工智能及其相

表1 体系生命力理论与其他关理论比较

其他理论	比较	
	相同点	不同点
活系统模型	将组织的管理与大脑控制人体相类比,实现组织管理的有机性	活系统理论缺少对有机性的系统性分析,缺少技术实现途径
弹性理论	强调对外界干扰的自恢复能力	弹性理论缺少对有机性的系统性分析,只强调了恢复力,不全面
健康管理	强调对系统状态的感知与预测,增强系统的恢复能力	健康管理主要通过预防性维修来达到恢复性,且缺少对其他有机特性的支持
信息物理系统理论	提供了实现感知性、自省性、自学习与自优化的技术框架,李杰提出的CPS概念中涵盖了生存力、恢复力与进化力中的自学习和自优化的内容	信息物理系统理论缺乏有机性的类比视角,将最终目标定为“worry-free”,而非进化性

关技术水平的限制,因此,未必一开始就一定要建造一个具有完整有机特征集的具有自我进化能力的体系,可以根据业务的需要和技术条件的限制,建造一个令人满意的体系。

## 4 结论

在分析总结将有机特性引入到管理与设计上的理论基础,通过系统性地分析“自组织”有机体系的有机属性特征,提出了在“他组织”的工程技术体系中导向涌现出有机属性的技术框架,即通过一个框架、两种机制和五大技术来实现体系的感知性、自省性、自适应性、自恢复性、自优化性、自学习性和选择进化性,并将上述有机属性统一到体系生命力的概念下,将体系生命力分为生存力、恢复力和进化力3个层次,最后分析了体系生命力理论与其他相关理论的关系和该理论的优势。体系生命力理论为提高体系的稳定性和可用性,提高体系的优化和选择进化能力提供了理论指导。

### 参考文献(References)

- [1] Maier M W. Architecting principles for systems-of-systems[J]. *Systems Engineering: The Journal of the International Council on Systems Engineering*, 1998, 1(4): 267-284.
- [2] Maier M W. Research challenges for systems-of-systems[C]// 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2005, 4: 3149-3154.
- [3] DoD. Systems engineering guide for systems of systems[M]. Washington DC: Department of Defense Office of the Deputy Under Secretary of Defense, 2008.
- [4] Haskins C, Forsberg K, Krueger M, et al. *Systems engineering handbook*[M]. San Diego, CA: INCOSE, 2006.
- [5] Beer S. The viable system model: Its provenance, development, methodology and pathology[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1984, 35(1): 7-25.
- [6] Beer S. *The heart of enterprise*[M]. London: English Universities Press, 1959.
- [7] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [8] Haimes Y Y. On the definition of resilience in systems[J]. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 2009, 29(4): 498-501.
- [9] Kahan J H, Allen A C, George J K. An operational framework for resilience[J]. *Journal of Homeland Security & Emergency Management*, 2009, 6(1): 83. Doi: <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1675>.
- [10] Pecht M. *Prognostics and health management of electronics* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [11] Hess A, Fila L. The Joint strike fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems[J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002(6): 3021-3026.
- [12] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems[J]. *The Impact of Control Technology*, 2011, 12(1): 161-166.
- [13] Lee J, Qiu B, Wei M H. *The New Generation Of Industrial Intelligence*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017.
- [14] Lee J, Bagheri B, Kao H A. Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics[C]. *Proceeding of Int Conference on Industrial Informatics*, 2014: 1-6.
- [15] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18-23.
- [16] Gill H. From vision to reality: Cyber-physical systems[Z]. HC-

SS National Workshop on New Research Directions for High Confidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail, 2008.

[17] 中国信息物理系统发展论坛. 信息物理系统白皮书(2017) [M]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2017.

## Theoretical framework of SoS vitality

ZHANG Hongjun<sup>1,2</sup>, HUANG Baiqiao<sup>1,2</sup>, JU Hongbin<sup>1,2</sup>, QIU Bohua<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>

1. Marine Safety System Innovation Center, Science and Technology for National Defense, Beijing 100094, China

2. Systems Engineering Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100094, China

**Abstract** In this Paper, after systematic analysis on set of organic characteristics of organic system in nature, organic characteristics are integrated into the concept of systems of system vitality, and after combining artificial intelligence and its relevant information technology, a technical framework which makes the set of organic characteristics directed emergency in engineering technology SoS is proposed. The theoretical framework of SoS vitality provides theoretical guidance in improving system stability and availability, and promoting system ability on optimization and selective evolvability.

**Keywords** systems of systems (SoS); viable system model; Cyber physical system (CPS); systems of systems vitality ●



(编辑 徐丽娇)