

复杂体系的结构分析和建模研究*

张送保 张维明 刘 忠 黄金才

(国防科技大学 C⁴ISR 重点实验室 湖南 长沙 410073)

摘要 根据复杂体系的概念及其所呈现出的多种特性,利用复杂体系的使命分解和复杂体系的元素组成对复杂体系进行综合的结构分析,描述了目标分解、功能分解和行为分解的复杂体系使命目标三阶段分解过程以及系统单元、复合元和体系外部环境的复杂体系三元素结构框架。在此基础上,提出了采用一种“两层四级”的设计思想对复杂体系进行有效的结构建模设计,并针对复杂体系内部的相互位置层次及其功能关联定义了度量实体、层级映射、系统关联性和软构层等相关概念,清晰地阐释了复杂体系结构分析和建模时体系层次映射的实质,从而为复杂体系的效能评估以及体系改进和优化提供一定的理论指导。

关键词 复杂体系 结构分析 使命分解 涌现行为 层次映射

中图分类号 :N94 ;TP18 **文献标识码** :A

Research of Structure Analyzing and Modeling for Complex System of Systems

ZHANG Song-bao, ZHANG Wei-ming, LIU Zhong, HUANG Jin-cai

(Key Laboratory of C⁴ISR, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :According to the concept and the features of complex system of systems, its structure was synthetically analyzed with its mission and elements composing. Both the three-phase mission decomposing process, which consists of goal decomposing, function decomposing and action decomposing, and the three-element structure framework, which includes system unit, system compound and its environment, were described for complex system of systems. On this basis, a new design method which utilizes the “two-level, four-grade” framework to effectively model the structure for complex system of systems was presented. At the same time, aimed at the location level and function interrelation existing in complex system of systems, such terms as measuring entity, level mapping, relationship between systems and soft structure level were defined. This clarifies the essence of level mapping in the structure analyzing and modeling of system of systems. Therefore, some theoretic guidance for the effectiveness evaluation and the upgrading and optimization of complex system of systems is revealed through this kind of analyzing and modeling methodology.

Key words :complex system of systems; structure analyzing; mission decomposing; emerging behavior; level mapping

近来,人们对复杂体系(Complex System of Systems, SoS)工程的关注日益增加。复杂体系通过将时空上分布但能力和资源互补的组成系统高效地组合起来,提高解决问题的能力,并增强对挑战性机遇的快速应变能力,而不必改变组成系统原有的工作环境,对于动态变化的、不确定的外部环境具有良好的适应性。从影响国家经济的工业体系、影响市场运作的商业联盟体系,到国防体系、战场 C⁴ISR 体系等,复杂体系作为一个宏观高层概念在不同的领域有不同的表现形式,是不同领域的高层决策者所面临的普遍问题。

复杂体系所展现的问题空间通常都极其复杂且动态变化,不确定性很强^[1]。如何将复杂体系中的决策资源进行有效的管理,建立体系组成子系统间的位置层次和功能映射关联模型,进而进行体系的总体效能评估,并依此不断优化改进现有体系的结构及性能,从而灵活、快速地适应复杂多变的决策环境,已经成为复杂体系问题研究的关键内容之一^[2]。但是目前关于复杂体系结构分析和建模的研究,往往

* 收稿日期:2005-08-31
基金项目:国家自然科学基金资助项目(70271004)
作者简介:张送保(1978—),男,博士生。

局限于某一个具体的领域甚至于某一个具体的体系^[3];本文在阐述复杂体系概念及其特点的基础上,进行复杂体系的结构组成分析,并提出复杂体系的“两层四级”建模框架及其相应的关联模型设计,从而为具体复杂体系的建模实现提供适当的指导,具有一定的普遍意义。

1 复杂体系的概念与特点

复杂体系至今还没有一个为公众所接受的明确定义,但这一问题的现象存在却得到众多从事复杂系统、系统集成以及管理决策研究学者的普遍认可。

SoS这一概念最初由Eisner在多系统集成的认识上提出^[4];此后,有关学者把这一概念关联到传统的系统工程技术,认为传统系统工程方法如果不能明确建立问题的柔性或刚性需求,就不能有效解决问题,这一问题在高层决策中经常遇到,而体系的研究就是对传统系统工程技术或方法的挑战。

Norman认为体系是动态环境中交互作用系统的集合,而体系同环境的边界是模糊的,体系边界的确定途径之一取决于体系决策者的判断^[5]。通常情况下,体系的决策者关注体系的效率和效能,但决策者对体系中系统的行为可能不能进行直接的控制,而且,对体系来说不存在如此之大的控制机制。这就导致了体系中系统行为可能呈现出较大幅度的自主行为。

Maier认为与复杂大系统相比较,体系具备以下特征^[6]:1)组织元素的独立性,如果体系被分解为各个分系统,则分系统能够独立运作;2)组成元素的持续性,体系的组成部分在获取和集成过程中保持独立性和运作的持续性;3)体系模式的演化,其存在和发展都伴随其功能和目标的变化以及经验或知识而进行体系的演化;4)体系的涌现行为,体系在实现其目标过程中所表现出的行为是其组成各部分所不具备或不能表现出的行为,这些行为是整个体系的“涌现”特性;5)体系的分布性,体系的各部分在地理上广泛分布。

现在比较普遍的观点是:复杂体系是动态环境中系列交互作用系统的集合,组成系统及其结构根据任务的需要可自适应挑战,其耦合是松散的^[7]。对于构建的体系来说,有效解决复杂问题的辅助决策方法不仅要考虑单个系统的局部利益,还要处理多个系统之间的制约关系。由于组成体系的各个系统是独立运行和维护的,因此,如何处理各个组成系统在个体目标和总体目标、各组成系统之间的资源冲突的问题是定义、开发和部署复杂体系的关键。

2 复杂体系的结构组成分析

复杂体系的结构分析主要描述复杂体系在某个时刻所处的状态以及整个体系的使命目标,而复杂体系的状态可由体系的组成元素以及这些组成元素之间的位置层次和功能映射等各种关联结构所决定。其中,组成元素间的关联结构描述构成复杂体系的结构建模,在本文的稍后另作详细讨论。

2.1 复杂体系的使命目标

复杂体系在行使功能完成其使命目标时都包括一个过程,在这个过程中,体系通过逐渐完成一系列的子任务子目标而最终达成其使命。可见,复杂体系的使命目标包含有一个时间和任务的积累过程。为了把握复杂体系的使命组成,进行灵活、快速的系列任务分配,从而更为有效地达成复杂体系的使命目标,可以对复杂体系的使命目标进行相应的分解。

复杂体系使命目标的分解包括三个过程:

①目标分解:将复杂体系的使命目标按其内容组成分解成一系列的子任务子目标,它属于复杂体系使命目标的初级分解过程。

②功能分解:将目标分解的系列子任务按其目标完成所必需的功能进一步分解成子任务所需能力集。

③行为分解:将功能分解所得到的子任务所需能力集按体系组成子系统所具有的性能首先分解成子任务所需能力可达子系统集,然后按照一定的优化算法从中选择最佳的子系统组合形成该子任务的最终行为集。

通过复杂体系使命目标的三级分解,就可获得复杂体系运行时所需的任务模型,即子任务到子系统

的任务分配,如图1所示。

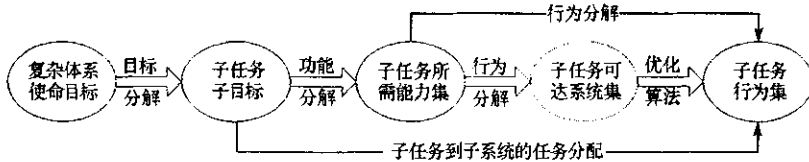


图1 复杂体系的使命目标分解

Fig. 1 The mission decomposing of complex system of systems

设复杂体系的使命目标为 M , 子任务为 T_i , 由上可知 $M = \langle T_i, G_T \rangle$, 其中 G_T 表示子任务序列 T_i 在各自执行时间上所需遵循的顺序, 通常包括三种情况: 顺序执行、并发执行和交错执行。而任务模型 T_i 则可表示成

$$T_i = \langle t_{start}, t_{end}, Set_e(T_i) \rangle \quad (1)$$

其中 t_{start} 和 t_{end} 分别表示子任务 T_i 的开始和结束时间, 而 $Set_e(T_i)$ 表示完成子任务 T_i 所需的子系统集以及这些子系统执行其相应行为时所应具备的属性特征, 即

$$Set_e(T_i) = \{ \langle e_j(T_i), t(e_j, T_i), F(e_j, T_i), P(e_j) \rangle \} \quad (2)$$

其中 $e_j(T_i)$ 表示完成子任务 T_i 需要子系统 e_j ; $t(e_j, T_i)$ 表示为完成子任务 T_i , 子系统 e_j 必须在 t 时刻开始运行; $F(e_j, T_i)$ 表示为完成子任务 T_i , 子系统 e_j 所必须执行的功能 F ; $P(e_j)$ 表示子系统 e_j 所处的位置 P 。

2.2 复杂体系的组成元素

复杂体系的组成元素包括系统、系统的系统和体系外部环境。其中, 系统即一般所说的复杂体系的组成子系统, 它是复杂体系的基本组成单元; 系统的系统即为比所研究的目标复杂体系要简单的体系, 它也是复杂体系的组成子系统, 但是它本身也由简单子系统或是更为简单的体系或是二者的混合而组成; 体系外部环境则是复杂体系赖以生存的外部基础。

• 系统单元

系统由于其具有(或部分具有)实现复杂体系使命目标某个(些)子任务的特有功能属性, 从而存在于复杂体系之中, 成为复杂体系组成的最基本单元; 虽然如此, 系统却具有自己独立的构建、生存、衍化和消亡的生命周期, 也就是说, 复杂体系的构建工作只是进行组成系统(或系统的系统)的综合集成, 而不需要另外去设计和构建新的系统。从复杂体系的使命目标出发可知, 系统单元的研究需要关注它所具有的功能属性, 即系统单元具有哪些能够实现使命目标某些子任务所需的功能属性, 而系统的功能属性又由其性能所决定, 因此, 复杂体系中的系统单元可以用如下的多元组所描述:

$$e_{unit} = \langle Set_{func}, Set_{perf}, Set_{para}, Input, Output, m \rangle \quad (3)$$

其中, e_{unit} 表示复杂体系组成的系统单元, Set_{func} 表示系统单元所具有的功能属性集, Set_{perf} 表示决定系统单元功能属性集的性能集, Set_{para} 表示系统单元的性能参数集, $Input$ 和 $Output$ 分别表示系统单元的输入和输出, m 表示复杂体系中该类系统单元的数量。

• 复合元

即系统的系统, 它也由于具有(或部分具有)实现复杂体系使命目标某个(些)子任务的特有功能属性, 从而存在于复杂体系之中。因为复合元本身就是一个简单体系, 所以对它的研究就应该集中于该简单体系各组成系统的功能属性、所有组成系统形成的复合元的涌现性能以及由这些涌现性能所达成的整体功能属性。由此可以得出复杂体系中复合元的如下多元组描述:

$$e_{poly} = \langle Set_{func}, Set_{emergency}, \{ \langle Set'_{func}, m' \rangle \}, Input, Output, m \rangle \quad (4)$$

其中, e_{poly} 表示复杂体系组成的复合元, Set_{func} 表示该复合元所具有的功能属性集, $Set_{emergency}$ 表示决定复合元功能属性集的复合元涌现性能集, Set'_{func} 表示该复合元的某个子系统所具有的功能属性集, 而 m' 表示该复合元中此子系统的数量, $Input$ 和 $Output$ 分别表示复合元的输入和输出, m 表示复杂体系中

该类复合元的数量。

- 体系外部环境

体系外部环境 Θ 是复杂体系赖以生存的外部基础,外部环境的变化可能会引起运转中的复杂体系本身体系结构的变迁,复杂体系在其生命周期中不断同外部环境进行相应的物质、能量和信息的交换,从而使其得以生存和不断衍化。

3 复杂体系的结构建模设计

3.1 复杂体系的结构建模框架

由复杂体系的组成和特性可知,在对其进行建模分析时,应遵循如图 2 所示的“两层四级”建模框架。

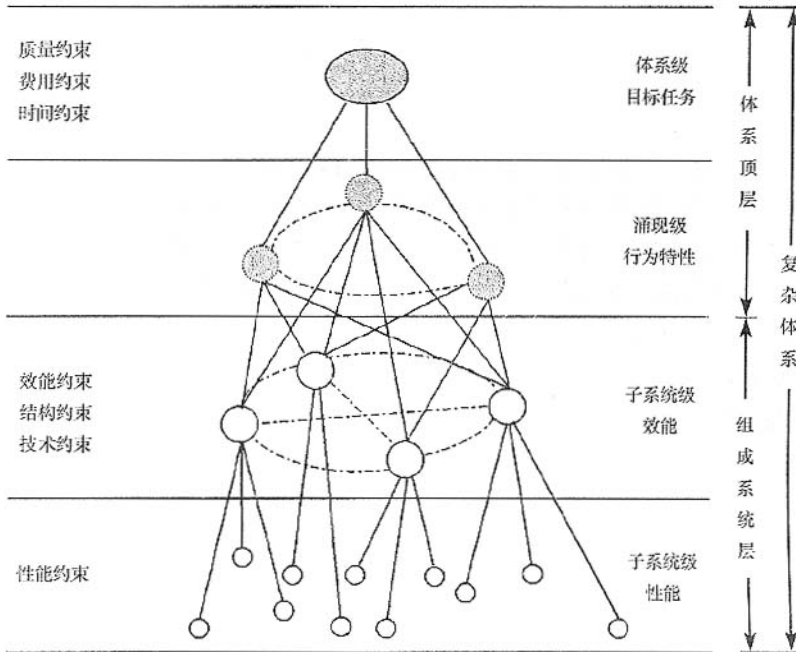


图 2 复杂体系的“两层四级”建模框架

Fig.2 The modeling framework for two levels-four grades of complex system of systems

其中,图中实心椭圆表示体系目标,实心圆表示体系所涌现出来的行为特性,较大空心圆表示体系的组成子系统,较小空心圆表示各个子系统所具有的性能,直线表示体系不同层次间的映射关系,点划线表示体系同一层次内各要素的相互关联。

由图 2 可知,复杂体系从逻辑上分为体系顶层和组成子系统层。组成子系统无论是构建还是运行及其管理都是相互独立的。但是实现各个子系统所具有的独特功能及所有子系统的功能和并不是复杂体系的最终目的。所有组成子系统为了一个共同目的,按照一定的途径进行适当组合并相互关联,从而整合成一个有机的体系。该体系具有其所有组成子系统所不具备的行为特性,这些行为特性的共同作用就构成了整个体系的功能目的。

为了对复杂体系进行更为有效的分析,可从对复杂体系的两层结构进行更为细致的划分:子系统级性能、子系统级效能、涌现级行为特性和体系级目标任务。

子系统级性能主要对单个子系统的所有组成性能进行性能分析建模,它受到体系和所在系统对其性能阈值的约束。子系统级效能主要对单个子系统进行系统效能分析建模,由于所有子系统相互整合,共同完成体系的功能,因此单个子系统的效能可能还会受到其它子系统的影响;同时,系统效能测度和性能测度一样也要受到效能阈值的约束;另外,它还受结构和技术的约束,其中结构约束包括结构的规模约束和组织约束。涌现行为来源于体系所有组成子系统整合后彼此之间大量复杂交互作用的不断演

化,因此,体系的涌现特性具有不可预测性,也不可能从任何孤立的组成子系统的行为知识中推断出来。涌现级行为特性的建模,主要是对通过涌现作用所反映出的体系整体行为进行相应的分析处理。由于涌现行为的不可控性,因而在对其进行相应建模分析时并不受其它因素的约束。体系级目标任务则是复杂体系目的的最终实现,主要对体系完成特定目标任务进行相应的建模分析。显然,这一层次必然会对体系完成任务的质量提出要求(一般表现为体系目标完成的可信度);此外,完成体系目标所需的费用和时间也是整个体系必须面对的限制。

总之,“两层四级”的建模框架从总体上描绘了复杂体系的层次结构,并在不同层级上对体系模型的建立进行了一定程度的分解,因而有助于加深对复杂体系的理解和提高其建模实现的可操作性。

3.2 复杂体系结构建模的层次映射

复杂体系各组成元素间的关联性是从功能上对复杂体系结构层次性模型中同一层次内部各建模要素之间的相互关联以及相邻或相间层次之间的相互影响的进一步描述。复杂体系各组成元素间的关联性是进行复杂体系建模及其分析处理的基础,其实质可以通过度量实体、层级映射、系统关联性和软构层等相应概念来阐释。

定义1 度量实体

度量实体(Entity)是对复杂体系建模框架中某一层分析处理的组成要素(M, X, C)以及各要素之间相互关联(R)的描述。其中, M 是某个分析处理的输出, X 表示该分析处理的输入变量, C 表示该分析处理进行时所需遵循的各种约束。同一层级中可能同时存在多个度量实体,例如子系统效能级的每一个子系统都具有一个相应的效能度量实体。这样,第 n 层级的第 i 个度量实体可以表示为式(5)的形式。

$$Entity_{n,i} = \{M_{n,i}, X_{n,i}, C_{n,i}, R_{n,i}\}, n \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (5)$$

式(5)中的层级 n 在“两层四级”结构中最大为4,但实际操作还可以对某些层次作适当的细分,而关联 $R_{n,i}$ 主要包括输入输出的关联(即该分析处理法则)和进行该分析处理时对输入变量以及输出变量的约束,如式(6)所示。其中,等号右边的 $M_{n,i}$ 和 $C_{n,i}$ 分别表示对应的分析处理法则和约束法则。

$$R_{n,i} = \begin{cases} M_{n,i} = M_{n,i}(X_{n,i}) \\ C_{n,i} = C_{n,i}(M_{n,i}, X_{n,i}) \end{cases} \quad (6)$$

度量实体中的相互关联实质上描述的是复杂体系建模框架中同一层次内部各要素之间的一种映射关系。

定义2 层级映射

设 y 为 $n-1$ 层级中所有度量实体的输出所组成的集合 M_{n-1} 中的某个元素,如果其同时满足 $y \in X_{n,i}$,那么记 M_{n-1} 中所有具有该特性的元素组成的集合为 M_{n-1}^i ;另一方面,对于 $X_{n,i}$ 中的任一元素 x ,如果其同时满足 $x \in M_{n-1}^i$,则有 $X_{n,i} = M_{n-1}^i$ 。此时可以定义层级 $n-1$ 到层级 n 间的映射: $Map: Level_{n-1} \rightarrow Level_n$ 。

映射的具体表现如式(7)所示,其中 C_{n-1}^i 表示集合 M_{n-1}^i 所需满足的约束。

$$\begin{cases} M_{n,i} = M_{n,i}(X_{n,i}) = M_{n,i}(M_{n-1}^i) \\ C_{n,i} = C_{n,i}(M_{n,i}, X_{n,i}) = C_{n,i}(M_{n,i}, M_{n-1}^i) \\ C_{n-1}^i = C_{n-1}^i(M_{n-1}^i) \end{cases} \quad (7)$$

复杂体系建模框架中的层级映射说明高层级的分析处理通过一定的映射关系都可以转化为对低层级系列要素的分析处理,所不同的只是各种映射法则的差别。

定义3 系统关联性

式(5)中的度量实体仅仅定义了同一层级中与某个度量相关的实体组成,如果考虑度量实体的进一步分解或层级间的相互映射,那么度量实体可以重新表示为式(8)的形式:

$$Entity_{n,i} = \{M_{n,i}, X_{n,i}, Sub_{n,i}, C_{n,i}, R_{n,i}\} \quad (8)$$

其中, $Sub_{n,i}$ 表示 n 层级中第 i 个度量实体 $Entity_{n,i}$ 在 $n-1$ 层级中的分解,它由 $n-1$ 层级中多个度

量实体组成,即 $Sub_{n,i}$ 表示度量实体 $Entity_{n,i}$ 的所有分解子系统的分析处理的输出所组成的集合。考虑到建模框架层级分解的充要性,可以推出

$$\cup X_{n,i} = \cup Sub_{n,i} \quad (9)$$

其中, $\cup X_{n,i}$ 表示 n 层级所有度量实体的所有输入变量,而 $\cup Sub_{n,i}$ 表示 n 层级所有度量实体在 $n-1$ 层级中的所有分解。

于是,对于某层级的某个子系统,如果其效能度量存在一个不属于它本身分解域的输入变量,那么就说明该子系统与那个输入变量所属的子系统存在系统关联性,如式(10)所示:

$$\exists x, x \in X_{n,i} \text{ 且 } x \notin Sub_{n,i}, x \in Sub_{n,j}, i \neq j \Rightarrow Entity_{n,i} R Entity_{n,j} \quad (10)$$

其中, n 表示层级, i 和 j 表示不同的度量实体,而 R 表示系统间的相互关联。

定义4 软构层

软构层是位于体系目标级和体系组成子系统效能级之间,为保证组成子系统效能到体系目标的映射顺利完成而增加的逻辑中间层。按其本身的产生或所体现出的特性,还可称为体系涌现层或目标子任务层,因此,它对应着“两层四级”建模框架中的涌现级。

系统的效能测度一般都可转化为系统具体性能到系统总体效能的简单映射。而对于一个体系,其效能是对体系所具有的各种体系特性和体系行为的综合度量,既不表现为体系某个特定组成子系统的系统效能,也不是其所有子系统的系统效能叠加,更不是对组成子系统的系列性能的直接度量,即子系统效能测度的输出并不能直接作为体系层效能测度的输入。但是,体系又确实是由众多的系统所组成。因此,在体系的分析处理和系统的效能测度间,应该存在一个中间层,将系统效能测度输出到体系分析处理输入的映射有机地衔接起来,如图3所示。

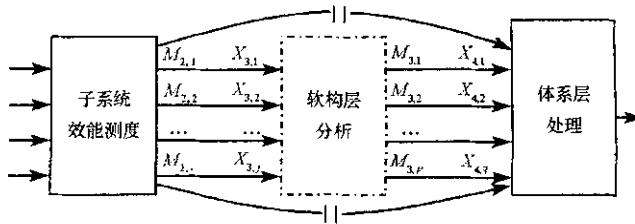


图3 软构层在体系层次映射中的作用

Fig.3 The function of soft structure level in the level mapping of complex system of systems

4 结束语

本文在阐述复杂体系概念及其特点的基础上,进行了复杂体系的结构组成分析,并提出了复杂体系的“两层四级”建模框架,对复杂体系组成的层次结构以及层级之间的相互关联作了一定的阐释,因而对复杂体系的构建及其体系改进等研究具有一定的指导意义。不过,本文并没有过多地讨论复杂体系的涌现行为和自组织、自适应现象以及体系内部的平行决策机制等内容,这些复杂体系的典型特征还有待于今后更深入的研究。

参考文献:

- [1] Soban D S, Vavris D N. Formulation of A Methodology For The Probabilistic Assessment of System Effectiveness[R]. Published by the Defense Technical Information Center, 2000.
- [2] Luman R R. Quantitive Decision Support for Upgrading Complex System of Systems[D]. A dissertation for the doctoral degree at George Washington University, 1997.
- [3] DeLaurentis D, et al. System-of-Systems Modeling For Personal Air Vehicles[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [4] Eisner, et al. Computer-Aided System of Systems (S2) Engineering[R]. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1991.
- [5] Geddes N D, Smith D M, Lizza C S. Fostering Collaboration in Systems of Systems[R]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998.
- [6] Maier M W. Architecting Principles for Systems-of-Systems[J]. System Engineering, 1998, 1(4): 267 - 284.
- [7] Sterman. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World[M]. Irwin McGraw-Hill, Boston, MA, 2000.

