文章编号: 1001- 2486(2007) 05- 0132- 07

基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计研究*

张送保[1,2], 张维明[1], 黄金才[1], 刘 忠[1]
(1. 国防科技大学 C4ISR 重点实验室, 湖南 长沙 410073; 2. 桂林空军学院, 广西 桂林 541003)

摘 要: 针对复杂体系动态适应性研究所存在的问题, 提出了复杂体系冗余概念和基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想, 讨论了基于冗余的复杂体系动态博弈设计过程及体系结构; 在此基础上, 根据复杂体系使命目标的执行特点及体系本身的结构特性, 详细地阐述了复杂体系中的任务冗余、系统冗余和结构冗余三种冗余类型, 并从冗余切换方式、冗余具体内容和冗余表现性质三个方面论述了复杂体系中各种冗余所组成的冗余体系, 指出冗余体系是复杂体系适应环境的一种策略, 也是复杂体系不断演化的需要和结果, 并且能够为复杂体系动态适应性结构的构建及其效能评估和复杂体系的优化及改进等研究提供一定的理论指导。

关键词: 冗余; 复杂体系; 动态适应性; 冗余体系
中图分类号: N94; TP18 文献标识码: A

Research on Structure Designing for Redundancy-based Complex System of Systems with Dynamic Adaptation

ZHANG Song-bao[1,2], ZHANG Wei-ming[1], HUANG Jin-cai[1], LIU Zhong[1]
(Key Laboratory of C4ISR, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China;
2. Guilin Airforce Academy, Guilin 541003, China)

Abstract: Considering some problems derived from the dynamic adaptation research on complex system of systems, a new design method which applies redundancy theory to effectively improving the dynamic adaptive ability of complex system of systems is presented. The concept of redundancy-based complex system of systems is firstly described. On this basis, both the dynamic game design process of redundancy-based adaptive complex system of systems and its framework are shown. Then three kinds of redundancy, such as task redundancy, system redundancy and structure redundancy, are illustrated in detail according to the structure hierarchy features and the mission performing rule of complex system of systems. Lastly, the redundancy framework existing in complex system of systems is synthetically discussed from the viewpoints of redundancy switching, redundancy material and redundancy character, which indicates that the redundancy framework is not only an adaptive strategy to dynamic environment for complex system of systems, but also the demand and result of its long-lasting evolvement. Thus, some theoretic guidance for structure design and effectiveness evaluation of the dynamic adaptation of complex system of systems and its upgrading and optimization should be conducted with this kind of analyzing methodology.

Key words: redundancy; complex system of systems; dynamic adaptation; redundancy framework

复杂体系在执行使命任务的过程中, 由于外部环境的变化或行动计划和过程的适应性以及体系本身结构的变迁, 使得静态环境下设计的优化结构不再与当前的使命环境相匹配[1]。如何将复杂体系中的决策资源进行有效的管理, 建立具有一定动态适应性能力的体系结构, 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[2-3]。而基于冗余的动态适应性结构能够根据使命环境的动态变化, 灵活地调用复杂体系中各种冗余和固有体系结构的功能, 重新进行体系结构的有效构造, 从而良好地适应新的任务环境。

* 收稿日期: 2007- 04- 22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60504036, 70271004)
作者简介: 张送保(1978—), 男, 博士生。

1 复杂体系冗余概念

冗余(Redundancy) 的概念最早来源于自动控制系统的可靠性理论, 意指通过将备用元件采用并联方式联接起来以提高系统的可靠度[4-6]; 后来许多学者对冗余的生态学意义也作过探讨, 认为冗余是指一种以上的物种或成分具有执行某特定功能的能力[7-8]。复杂体系中的冗余主要指在复杂体系中任意层级水平的一种以上的组成部分(例如子任务、组成子系统或子结构等) 具有执行某种特定功能的能力, 这些组成部分按并联方式进行组合, 一个组成部分的失效不会造成体系特定功能的失效, 也不会对整个体系的功能和结构造成很大的影响; 但当体系受到外部环境干扰或是本身使命任务和行动计划变化时, 冗余的功能组分发挥作用使得体系对动态环境保持足够的适应性。从另一角度上讲, 复杂体系中的冗余亦指体系任意层次子系统偏离其本身获取最大效益功能定态的扩展行为, 或是指对体系目标效益输出构成影响的各种水平的组成子系统过多或其结构过于庞大的部分[9]。

一般认为, 在一个复杂体系中存在着可以维持复杂体系正常功能的最小组成部分数, 即在复杂体系中有一定数目的关键子任务、组成子系统或子结构等, 它们的数目在一定程度后趋于饱和, 此时其它的子任务、组成子系统或子结构等对复杂体系而言则是冗余的。冗余的子任务、组成子系统或子结构等是防止复杂体系功能丧失的一种保险和缓冲。并且, 增加复杂体系的冗余子任务、组成子系统或子结构等不但能提高其抵御和适应动态不确定性环境的能力, 还为复杂体系的未来进一步发展提供机会。所以冗余子任务、组成子系统或子结构等是复杂体系适应不确定性使命任务环境并不断动态演化的基础, 对复杂体系的功能展现和使命任务的达成具有重要意义。

2 基于冗余的复杂体系动态适应性结构

2.1 基于冗余的复杂体系动态适应性原理

基于冗余的复杂体系动态适应性结构的设计包含概念分析、冗余设计、运行实现三个过程, 其中, 每一个过程都以建立和完善复杂体系的动态适应性结构为目标而展开。另外, 由于任务环境的动态不确定性和体系本身的不断演化性, 因此各种过程也在体系的长期运转与演化过程中不断更新和完善。也就是说, 基于冗余的复杂体系动态适应性结构从设计方法上讲是一种动态博弈, 体现为和其动态任务环境以及体系本身演化之间的一种多层次、多阶段的博弈过程, 如图 1 所示。

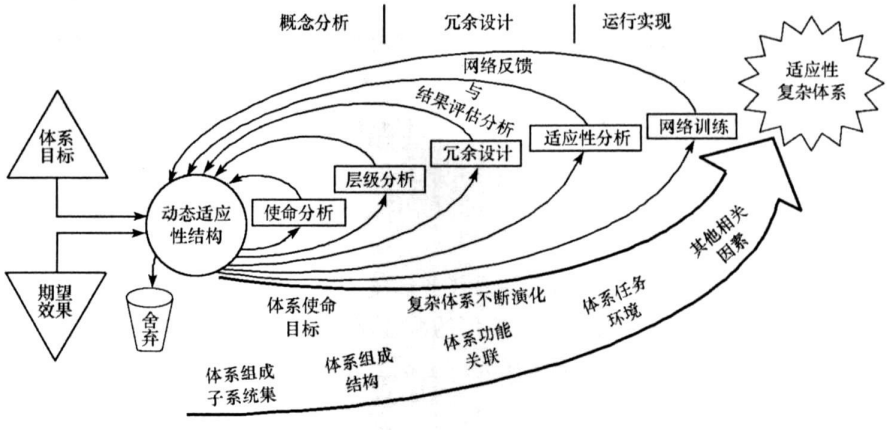

图 1 基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计的博弈过程

Fig. 1 The game design of dynamic and adaptive structure for redundancy-based complex system of systems

由图 1 可知, 基于冗余的复杂体系动态适应性结构的设计是在复杂体系静态结构的基础上, 以共享的体系使命目标为基础, 对复杂体系的组成结构和功能特性进行分析[10-11], 以建立使命任务和体系结构之间的初始功能映射; 然后根据复杂体系的动态适应性需求, 进行相应的冗余设计及动态适应性分析, 并将结果与期望的效果进行比较, 制定相应方案或选择行动, 使其在实际运行中不断地进行完善与

改进, 从而在复杂体系的不断动态演化过程中得到相应的动态适应性复杂体系。

简单地说, 基于冗余的复杂体系的动态适应性就是在复杂体系中适当地引入一些各种形式的冗余, 这些冗余根据任务环境需要通常处于各种备用状态; 一旦复杂体系固有结构的工作组成部分不能满足某些不确定性环境的使命任务需要或是复杂体系本身结构由于某些原因而不能满足其原有的环境使命任务需求时, 相应冗余就会按照一定的机制从备用状态激活为工作状态以执行某些体系功能, 从而确保复杂体系在不确定性使命环境或其它不适应状态下的正常运转。

2.2 基于冗余的复杂体系动态适应性结构

根据基于冗余的复杂体系动态适应性原理可以得出其相应的动态适应性结构, 主要包括六个组成部分: 复杂体系、冗余冷备池、任务监控中心、冗余调控中心、冗余状态库和冗余知识库, 如图 2 所示。

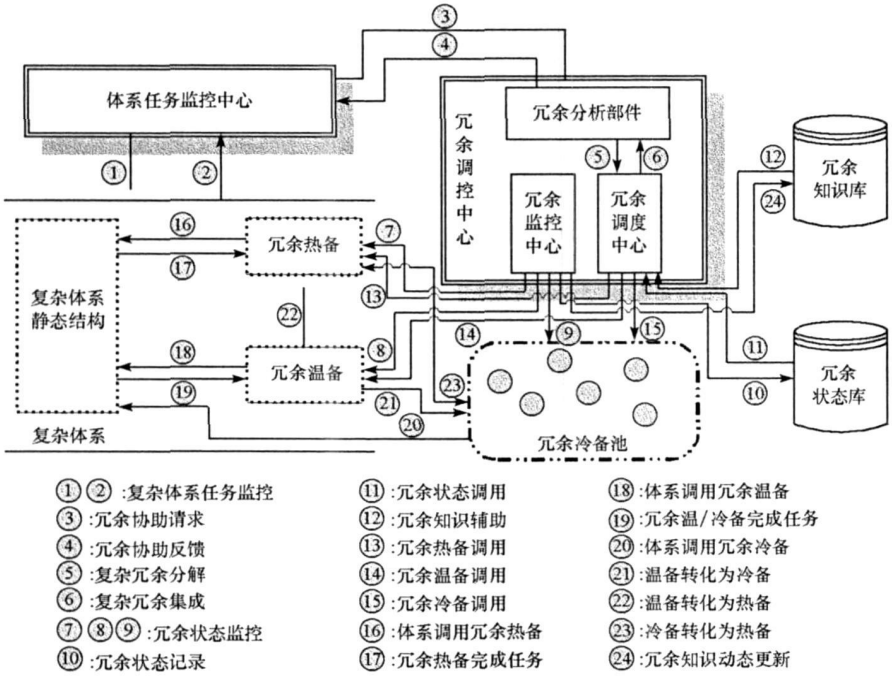

图 2 基于冗余的复杂体系动态适应性结构

Fig. 2 The framework for redundancy-based complex system of systems with dynamic adaptation

复杂体系在静态结构的基础上, 根据任务需求适当地引入一些各种类型的冗余备份, 包括对冗余热备、冗余温备和冗余冷备的调用, 其中, 热备、温备和冷备只是冗余调用时的三种切换方式, 三者之间可以相互转化, 且冗余热备和冗余温备存在于运转的复杂体系中, 而冗余冷备则集中放置在复杂体系之外的冗余冷备池。

冗余冷备池中的冷备实质上是复杂体系使命任务环境需要时能够发挥冗余作用的系统单元集合, 也就是说, 复杂体系中所有的冗余冷备不包含任何的系统复合元, 而体系中系统复合元的冗余或其它较为复杂的冗余可以在一系列相应的冗余系统单元的基础上通过冗余调控中心相应部件的冗余重组处理得到。

体系任务监控中心负责对复杂体系使命目标的任务执行过程进行监控, 必要时向冗余调控中心实时地发送冗余协助请求, 以便及时获得某个特定冗余的协助, 从而适应当前的体系任务环境。

冗余调控中心负责对各种冗余进行监控和调度, 它由冗余分析部件、冗余监控中心和冗余调度中心三个部分组成。其中, 冗余分析部件主要对体系任务监控中心发送的冗余协助请求进行分析, 并将复杂冗余请求解析成简单冗余请求系列, 然后将分析处理的结果递交给冗余调度中心, 即传递给冗余调度中心的冗余协助请求都是简单冗余或是简单冗余系列; 当所请求的冗余为复杂冗余时, 冗余分析部件还负

责将冗余调度中心所调用的相应简单冗余系列依据其功能关联重组为相应的复杂冗余, 从而以整体的形式去执行复杂冗余协助请求的使命任务。冗余监控中心对各种冗余进行实时监控, 并将它们的实时状态和知识分别记录到冗余状态库和冗余知识库中。冗余调度中心主要负责对各种冗余的调用以及各种冗余备份之间的相互转化控制。

冗余知识库和冗余状态库主要负责记录复杂体系中各种冗余的系统单元所包含的知识及实时状态, 以用于相应冗余调用时的功能匹配和动态适应性计算, 并且冗余系统单元在复杂体系不断演化过程中所积累的知识可以通过冗余监控中心的作用得到动态更新。

3 复杂体系的冗余种类

根据复杂体系使命目标的执行特点及体系本身的结构特性, 可将复杂体系中所包含的冗余类型主要分为任务冗余、系统冗余和结构冗余三种, 它们的定义及特点分别如下。

3.1 任务冗余

任务冗余是从复杂体系目标任务的执行特点的角度来描述复杂体系中任务部署的冗余特性, 可以根据如下几个概念来描述。

定义 1 任务分割

任务分割是按照指定要求将复杂体系使命目标所包含的任务集合 T 分割为 $n(n \geqslant 1)$ 个子任务集 $t_1, t_2, \cdots, t_n$, 且 $T = t_1 \cup t_2 \cup \ldots \cup t_n$, $t_i \cap t_j = \phi$, $i, j = 1, 2, \cdots, n$ 且 $i \neq j$。

定义 2 任务调度

任务调度作为一种映像, 指在满足复杂体系各种约束条件下, 将任务集 $T = \{t_1, t_2, \cdots, t_n\}$ 映像到作为任务处理器的复杂体系的组成子系统集 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$ $(m \geqslant 1)$ 上, 从而使得复杂体系任务处理的代价函数达到最小值或是任务处理的效率最大化。

任务调度的结果可能出现如下的四种情况:

(1) 子任务 t_i 只分配给了一个组成子系统 s_j, 且 s_j 为一个系统单元, 此时称子任务 t_i 为简单子任务;

(2) 子任务 t_i 只分配给了一个组成子系统 s_j, 但 s_j 为一个系统复合元, 此时称子任务 t_i 为复杂子任务;

(3) 子任务 t_i 分配给了多个组成子系统, 此时也称子任务 t_i 为复杂子任务;

(4) 子任务 t_i 没有组成子系统可分配, 则表示复杂体系需要重新进行任务分割或体系重构才能有效完成该子任务。

定义 3 任务冗余调度

任务冗余调度与任务调度相似, 只是子任务 t_i 根据其动态适应性需求系数 TR_i(即冗余度) 分配给 TR_i 个不同的任务处理器, $1 \leqslant TR_i \leqslant m$, m 为复杂体系中作为任务处理器的组成子系统的个数。

根据上述几个概念, 就可给出复杂体系中任务冗余的定义。

定义 4 任务冗余

任务冗余是从复杂体系目标任务的执行特点来描述复杂体系中任务部署的冗余特性, 指复杂体系根据提高使命任务的并行性和增加任务对动态环境的适应性的原则进行复杂体系目标任务的任务分割、任务冗余调度和任务监控, 从而使得相应子任务所需的某些能力对于该子任务的完成具有一定程度的重叠, 即复杂体系中具有多个对应的冗余组成子系统或冗余组成子系统集能够同时完成相应的子任务, 而依赖于这些冗余任务间的协同, 复杂体系就可一定程度上对不确定的任务环境进行动态适应, 从而更为有效地完成其使命目标。

3.2 系统冗余

系统冗余是从复杂体系组成子系统的性能角度来分析复杂体系中子系统的冗余组成特性, 它同样可以根据如下几个概念来描述。

定义5 能力分割

能力分割是指将完成子任务 t_i 所必需的功力集合 F_i 分割为 $p_i(p_i \geqslant 1)$ 个子能力集 $f_{i1}, f_{i2}, \cdots, f_{ip_i}$，且 $F_i = f_{i1} \cup f_{i2} \cup \ldots \cup f_{ip_i}, f_{ij} \cap f_{ik} = \phi, i = 1, 2, \cdots, n, j, k = 1, 2, \cdots, p_i$ 且 $j \neq k$。

定义6 能力匹配

能力匹配是一种映像，指在满足复杂体系各种约束条件下，将完成子任务 t_i 所必需的能力集 $F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \cdots, f_{ip_i}\}$ 首先映射到复杂体系组成子系统所具有的能力集 $F' = \{f'_1, f'_2, \cdots, f'_q\}$ 上，进而再映像到所对应的组成子系统集 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$ 上，从而使得复杂体系任务处理的代价函数达到最小值或是任务处理的效率最大化。

如果子任务 t_i 所需的某个子能力 $f_{ij}(j \leqslant p_i)$ 经过能力匹配的首次映射结果为 $f'_k(k \leqslant q)$，则 f_{ij} 所对应的组成子系统应为 f'_k 所属的组成系统。

定义7 系统冗余设置

系统冗余设置与能力匹配相似，只是子能力 f_{ij} 根据其动态适应性需求系数 SR_{ij}（即冗余度）分配给 SR_{ij} 个不同的组成子系统，$1 \leqslant SR_{ij} \leqslant m$，$m$ 为复杂体系中组成子系统的个数。

根据上述几个概念，则可给出复杂体系中系统冗余的定义：

定义8 系统冗余

系统冗余是从复杂体系组成子系统的性能来分析复杂体系中子系统的冗余组成特性，指复杂体系根据提高某些组成子系统的功能稳定性及功能适应性的原则进行复杂体系子任务的能力分割、系统冗余设置和系统监控，从而使得相应子能力所需的组成子系统对于该子能力的执行具有一定程度的重叠，即复杂体系中具有多个对应的冗余组成子系统能够同时执行子能力所对应的系统功能，而依赖于这些冗余组成子系统间的协同，复杂体系就可一定程度上提高本身体系结构的功能稳定性及不确定任务环境下的功能适应性，从而更为有效地完成其使命目标。另外，根据复杂体系组成子系统的类别，也可将系统冗余分为系统单元冗余和系统复合元冗余两种类型。

3.3 结构冗余

结构冗余是从复杂体系的层次结构角度来分析复杂体系的冗余组成特性，指复杂体系中能够执行某共同使命任务或体系功能并具有一定结构的多个组成子系统组合（即子结构）的冗余。由此可知，复杂体系中的复杂子任务冗余和系统复合元冗余都属于结构冗余的范畴，并且复杂体系中的结构冗余按照现实需求也主要是复杂子任务冗余和系统复合元冗余两种类型，因此可以认为结构冗余实质上就是任务冗余和系统冗余的特例。

结构冗余的处理遵循任务冗余或系统冗余的处理原则，只是在进行相应的任务冗余调度或系统冗余设置的过程中，需要对相应的结构主体进行结构解析，即按照其物理组成及需要执行的使命任务或体系功能分解为组成子系统集、物理结构关联集和功能映射关联集；然后，对组成子系统集中的每个组成子系统进行冗余系统设置，从而得出相应的冗余系统集；接着，再根据对应的物理结构和功能映射通过冗余结构重组将冗余系统集重新组合为所需的冗余结构。显然，冗余结构重组是结构解析的逆过程，它们可分别表示为

$$< S_{sub}, \cup rh_{ij}, \cup tf_{ij} > = \Gamma(SubStruc) \tag{1}$$

$$SubStruc' = \Gamma^{-}(S'_{sub}, \cup rh_{ij}, \cup tf_{ij}) \tag{2}$$

如果用 $A = Rd(B)$ 表示实体 A 为实体 B 的一个冗余备份，则式(1)和(2)中各变量表示的意义如下：

$SubStruc$：复杂体系中某个需要进行冗余处理的子结构，而 $SubStruc'$ 为 $SubStruc$ 的一个冗余结构，即 $SubStruc' = Rd(SubStruc)$；

Γ：结构解析处理过程，而 Γ^{-} 为冗余结构重组过程；

S_{sub}：子结构体的组成子系统集，而 S'_{sub} 为 S_{sub} 的一个冗余组成子系统集，即 $S'_{sub} = Rd(S_{sub})$，且

$\forall s_i \in S_{sub}$, $\exists s_j \in S'_{sub}$, 使得 $s_j = Rd(s_i)$;

rh_{ij} 和 tf_{ij}: 任意组成子系统 s_i 和 s_j 间的物理结构关联和功能映射关联, 且 $s_i, s_j \in S_{sub}$, $i \neq j$; 另外, 如果 $s_p = Rd(s_i)$, $s_q = Rd(s_j)$, 且 $s_p, s_q \in S'_{sub}$, $p \neq q$, 则 $rh_{pq} = rh_{ij}$; 如果 $s_p = Rd(s_i)$, $s_q = Rd(s_j)$, 且 $s_p, s_q \in S'_{sub}$, $p \neq q$, 则 $tf_{pq} = tf_{ij}$。

4 复杂体系的冗余体系

复杂体系的冗余体系指由复杂体系中存在的所有冗余及不同冗余间所存在的各种转化或表现关系所构成的体系, 它可以从冗余切换方式、冗余具体内容和冗余表现性质三个方面来分析。

• 冗余切换方式

冗余的切换方式主要包括热备、温备和冷备, 复杂体系在一定环境下可采用热备、温备或冷备的方式将各种所需的冗余切换到工作状态。其中, 热备是为复杂体系中某些关键节点设置的具有该节点任务环境所有运转信息的冗余备份, 并且它和所对应的关键节点始终都处于运作状态, 复杂体系可直接将冷备或温备转化为热备, 而热备完成相应的工作之后仍然以热备形式存在。冷备位于运转中的复杂体系之外, 它既不处于运作状态, 也不具备复杂体系运转的任何信息。温备则是复杂体系中除热备之外的各种备份在完成任务后的一种存在状态, 该状态中它仍然进行运作, 只是不再具有某个节点的任务环境运转信息, 并且一定时间后, 如果没有其它调用, 它就会自动转化为冷备。

• 冗余具体内容

冗余的具体内容主要包括任务冗余、系统冗余和结构冗余。其中, 任务冗余可以分为简单子任务冗余和复杂子任务冗余, 系统冗余也可分为系统单元冗余和系统复合元冗余, 而结构冗余主要由复杂子任务冗余和系统复合元冗余组成。另外, 简单子任务冗余可以直接转化为单个系统单元冗余来处理, 而复杂子任务冗余和系统复合元冗余也可通过结构解析转化为系列系统单元冗余。

• 冗余表现性质

冗余的表现性质主要分析复杂体系冗余组成部分的特性差异以及由此所产生的对复杂体系适应性的不同影响, 它包括数量冗余和质量冗余, 其中, 数量冗余指由性质相同的组成部分构成的冗余, 而质量冗余指由性质不同的组成部分构成的冗余。显然, 质量冗余对不确定性使命环境的适应性远远大于数量冗余, 而复杂体系在受到随机干扰后恢复稳定状态的过程中数量冗余则起着相当大的作用。另外, 复杂体系在运行过程中由于本身组成部分的不稳定性或性能老化和新旧系统的更替等问题所引起的适应性也主要由数量冗余来完成。

一般地, 复杂体系的冗余体系中, 任务冗余以质量冗余为主, 系统单元冗余以数量冗余为主, 而系统复合元冗余既包含质量冗余也包含数量冗余。当然, 在复杂体系的实际运行过程中, 应将质量冗余和数量冗余有机地结合在一起, 根据复杂体系的使命任务需求和本身结构及现有的系统单元资源进行冗余性质的灵活有效设计。

综上所述, 复杂体系中的冗余体系可以用图 3 来表示。

从理论上讲, 复杂体系中的冗余体系是复杂体系生存的一种对策, 复杂体系对环境的适应结果倾向于保存具备最佳适应对策的体系结构, 即冗余体系是复杂体系适应环境的一种策略, 是一种长期效应, 是复杂体系不断进化的需要, 也是其不断进化的结果。

5 结 语

本文提出了基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想, 在相关冗余理论的基础上进行了复杂体系的冗余结构分析, 并论述了复杂体系的冗余种类和冗余体系, 因而对复杂体系动态适应性结构的构建和效能评估及其体系改进等研究具有一定的指导意义。

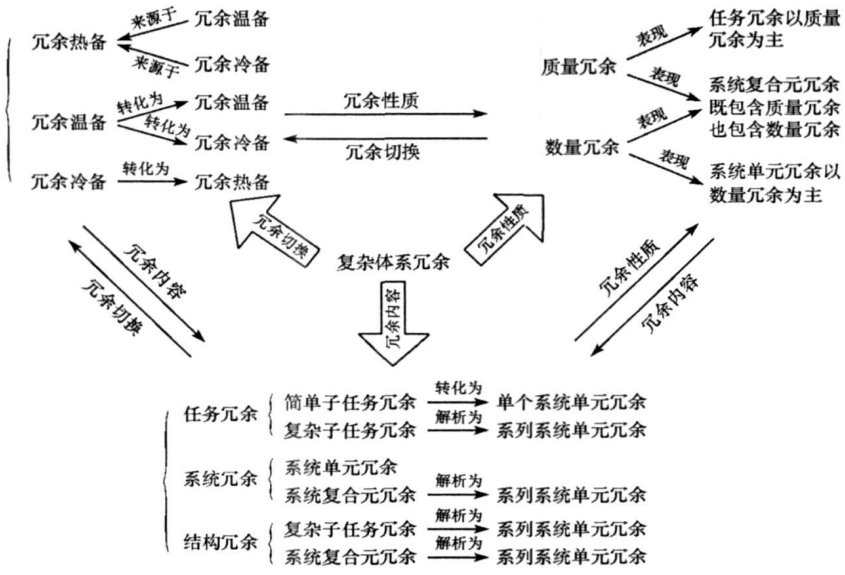

图 3 复杂体系的冗余体系

Fig. 3 The framework for redundancies in complex system of systems

参 考 文 献:

[1] DeLaurentis D, Callaway R K. A System-of-systems Perspective for Public Policy Decisions[J]. Review of Policy Research, 2004, 21(6): 829-837.

[2] Damanpour F, Gopalakrishnan S. The Dynamics of the Adaption of Product and Process Innovations in Organizations[J]. Journal of Management Study, 2001, 38(1): 45-65.

[3] Sage A P, Cuppan C D. On the Systems Engineering and Management of Systems of Systems and Federations of Systems[J]. Information, Knowledge, Systems Management, 2001, 2(4): 325-345.

[4] Nohria N, Gulati R. What Is the Optimum Amount of Organizational Slack A Study of the Relationship between Slack and Innovation in Multinational Firm[J]. European Management Journal, 1997, 15(6): 603-611.

[5] 方润生, 李雄诒. 组织冗余的利用对中国企业创新产出的影响[J]. 管理工程学报, 2005, 19(3): 15-20.

[6] Shi D H. A New Heuristic Algorithm for Constrained Redundancy-optimization in Complex Systems[J]. IEEE Trans. Reliability, 1987, 36(4): 621-623.

[7] Zhang R, Sun G J, Li F M. Definition of Redundancy and the Ecological Mechanism of It Occurrence[J]. Acta Bot Bereal-Occidient Sin, 2003, 23(5): 844-851.

[8] 韩明春, 吴建军, 王芬. 冗余理论及其在农业生态系统管理中的应用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 375-378.

[9] 田俊峰, 刘玉玲. 面向对象冗余服务系统的性能分析与测试[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(12): 2156-2159.

[10] Maier M W. Architecting Principles for Systems-of-systems[J]. System Engineering, 1998, 1(4): 267-284.

[11] 张送保, 张维明, 刘忠, 等. 复杂体系的结构分析与建模研究[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(1): 62-67.