

# 基于冗余的动态适应性复杂体系研究<sup>①</sup>

张送保, 张维明, 黄金才, 刘忠

(国防科技大学 C<sup>4</sup>ISR 重点实验室, 长沙 410073)

**摘要:** 针对复杂体系动态适应性研究时所存在的问题, 提出了基于冗余的动态适应性复杂体系设计思想, 介绍了冗余概念及其动态适应性原理和冗余假说等冗余原理; 在此基础上, 根据复杂体系的结构特性, 讨论了复杂体系的四种冗余类型及其所形成的动态适应性冗余结构; 最后, 详细地阐释了复杂体系的动态适应性冗余效益的度量方法, 从而为动态适应性复杂体系的构建和效能评估及其体系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; 效益分析

**中图分类号:** N94; TP18      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2008)05-0145-08

## 0 引言

复杂体系作为一个宏观高层概念, 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 and 增强对挑战性机遇的快速应变能力, 因而引起了不同领域高层决策者的广泛重视<sup>[1]</sup>. 针对复杂行为体系的处理问题, 以钱学森同志为首的国内学者从系统论的观点出发, 提出了从定性到定量的综合集成法, 而后又进一步将其拓展为综合集成研讨厅体系<sup>[2-4]</sup>, 又从整体论的角度对其进行了系列的建模及可靠性计算与优化研究<sup>[5,6]</sup>, 并且逐渐将复杂系统理论渗透到组织演化和组织的社会网络分析等组织管理理论中, 用复杂性理论认识组织系统的运动规律, 解释或解决现实的复杂现象或问题, 为组织理论研究和理论管理研究提供了一条新的研究途径<sup>[7,8]</sup>.

复杂体系运行过程中, 由于外部环境的变化或是体系的行动计划和过程的适应性以及体系本身组成及其结构的变迁, 使得体系内部动态均衡结构的变化不但具有空间结构, 而且具有一定的时间结构, 即静态环境下设计的优化结构不再与

当前的实际使命环境相匹配<sup>[9,10]</sup>. 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. 但是, 当前对复杂体系动态适应性的研究或是多集中于复杂体系结构的动态变化所引起的体系动态实时决策, 而忽略复杂体系本身动态适应性的设计<sup>[11]</sup>, 或是习惯于从体系的组分或结构的多样性上去分析复杂体系对不确定环境的动态适应性, 认为复杂体系的多样性能够有效的提高复杂体系的动态适应能力<sup>[12]</sup>. 事实上, 多样性导致适应性是一种表面现象, 其本质是冗余导致适应性, 并且与冗余相比, 多样性既没有反映出体系各个成分的组合方式及其功能作用, 也没有考虑成分的失效率<sup>[13]</sup>. 在揭示复杂体系的适应性机制方面, 冗余理论比多样性导致适应性更深刻、更具有普遍意义<sup>[14]</sup>; 而基于冗余的动态适应性体系结构能根据环境的动态变化, 灵活地调用冗余单元和固有体系结构的功能, 重新进行复杂体系结构的有效构造, 从而良好地适应新的任务环境.

① 收稿日期: 2006-07-03; 修订日期: 2007-07-09.

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, 湖南岳阳人, 博士生. Email: zhangsongbao@nudt.edu.cn

# 1 冗余原理

## 1.1 冗余概念及动态适应性原理

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;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种特定功能的能力<sup>[15,16]</sup>.而复杂体系中的冗余主要指在复杂体系中一种以上的组成子系统或结构具有执行某种特定功能的能力,这些组成子系统或结构是按并联方式组合的,一个组成子系统或结构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动态环境保持足够的适应性.从另一个角度上讲,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.因此,复杂体系中的冗余涉及到两个方面的问题,即冗余促成复杂体系对动态环境的足够适应性以及冗余给复杂体系本身所带来的一定复杂性.

基于冗余的复杂体系的动态适应性原理就是:在复杂体系中适当地引入一些不同种类的冗余单元,通常情况下,这些冗余单元根据体系使命任务的需要或是一直处于工作状态但只接收和监测数据而并不执行相应的任务处理,或是预先具有工作所必需的能量,但并未进入工作状态,或是完全处于休眠状态;一旦复杂体系要执行某些不确定性环境使命,体系中冗余单元的调控中心就会按相应的策略算法选出恰当的冗余单元序列并激活它们;然后,这些冗余单元序列就按调控中心所发出的相应指令来执行复杂体系的系列功能,从而确保复杂体系在不确定性使命环境下的正常运转.

## 1.2 复杂体系冗余假说

研究和分析基于冗余的动态适应性复杂体系时,一个关键的问题就是冗余组成子系统或结构对复杂体系本身的影响.针对复杂体系的冗余本

质和体系动态演化的特性,可以提出如下的复杂体系冗余假说:

在一个复杂体系中存在着可以维持体系正常功能的最小组成子系统或结构数,即在复杂体系中有一定数目的关键组成子系统或结构,它们的数目在一定程度后达到饱和,其它组成子系统或结构对复杂体系而言则是冗余的.冗余组成子系统或结构的丢失不会对复杂体系功能和使命任务的完成产生很大影响,但它们也不是不必要的,而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组成子系统或结构不但能够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.所以冗余组成子系统或结构是复杂体系适应不确定性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完成具有重要意义.

# 2 复杂体系的冗余结构

## 2.1 复杂体系的结构特性

复杂体系从逻辑上分为体系顶层和组成子系统层,各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.

但是,在进行具体的复杂体系结构分析时通常会出现这样一种情况:体系的某个组成子系统可能仍由一系列的子子系统组成,而这些子子系统还可能拥有自己的子系统,并且这种迭代循环可以不断进行下去.换一句话说,某层次上的某子系统可能本身就是一个体系,而某些体系也有可能是某更大体系的组成部分,如图1所示.例如对于一架作战飞机来说,其电子数据通信系统由通信系统和导航系统组成,而电子数据通信系统和其它的系统又作为组成元素一起构成整个作战飞机这个独立的系统;当考虑到更高层次时,该架作战飞机也作为一个组成子系统,和其它的作战飞机等军事单元构成一个更大的体系——联合作战体系.

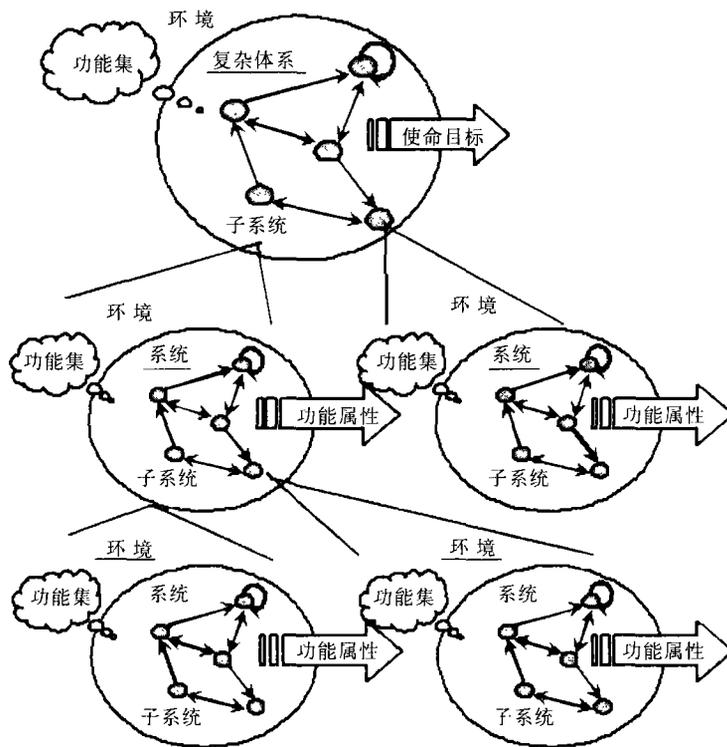


图1 复杂体系的结构层次

Fig.1 The hierarchy framework for complex system of systems

另外,复杂体系在行使功能的过程中,一般都是通过逐渐完成一系列的子任务目标而最终完成其使命. 为了把握复杂体系的使命组成,进行灵活、快速地任务序列分配,从而更为有效地达成复杂体系的使命任务,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:将系列子任务按完成其目标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2所示.

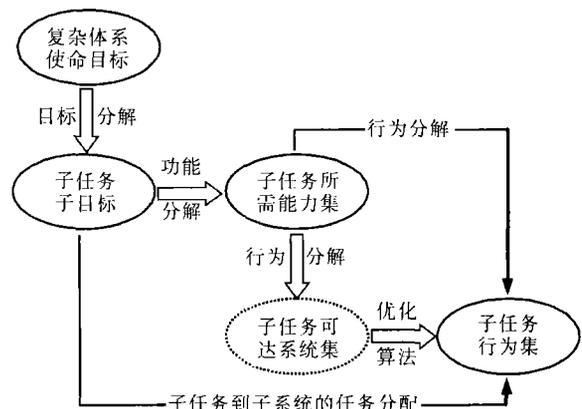


图2 复杂体系的使命目标分解

Fig.2 The mission decomposing of complex system of systems

总之,复杂体系的结构层次和使命目标的三级分解过程从总体上描绘了复杂体系的结构特性,因而有助于加深复杂体系冗余种类的理解和其冗余结构设计的可操作性.

## 2.2 复杂体系的冗余种类

根据复杂体系的结构特性,可将复杂体系中所包含的冗余类型分为系统冗余、业务冗余、信息冗余和结构冗余四种.

### (1) 系统冗余

系统冗余是从复杂体系组成子系统的性能和效能的角度来分析复杂体系中子系统的组成特性及整个体系的功能特性,指复杂体系中某些子系统(平台)在体系功能上有一定程度的重叠,当它们缺失时,不会引起体系内其他子系统(平台)的丢失,也不会对体系的结构和功能造成很大的影响或产生严峻的问题,有时也可称为平台冗余.关于冗余系统对复杂体系的功能及稳定性等影响,从某种角度看,这些“冗余”也许是完全多余的,冗余系统的去除或丢失也不会对整个复杂体系产生较大的影响.但是,同时应该认识到,系统冗余是复杂体系为了适应环境的一种策略,是一种长期效应,是体系不断进化的需要也是其不断进化的结果.

### (2) 功能冗余

功能冗余是从复杂体系的目标任务和涌现级行为特性的角度来描述复杂体系的任务部署特性,指复杂体系中子任务所需的某些能力在其能力集中对于该子任务的完成具有一定程度的重叠,当它们缺失时,不会引起能力集内其他功能的正常发挥,也不会对该子任务的顺利完成产生很大的影响.同系统冗余一样,功能冗余也是复杂体系适应环境的一种策略.由于功能冗余针对的是复杂体系完成其目标和子任务的所需功能等具体业务应用,因此也可称为业务冗余.

系统冗余和功能冗余虽然都是为了满足复杂体系不断演化的适应需要,但是,二者存在着根本性不同.首先,描述的内容不同,系统冗余所描述的是体系的底层构造,而功能冗余所描述的是体系的顶层应用;其次,冗余设计的考虑层次不同,功能冗余的设计应该在对复杂体系的子任务子目标进行功能分解所得的子任务所需能力集中考虑,而系统冗余的设计在对子任务所需能力集进行深入的行为分解所得的子任务可达子系统集中考虑;最后,实施时的控制不同,功能冗余的控制重点在于对各种冗余方案的更新或切换等决策,而系统冗余的控制则重点在于对各个冗余组件的适时无缝接入或退出等具体技术.

### (3) 信息冗余

信息冗余是从复杂体系业务结构和系统结构

中的任务关联和系统交互的角度来研究体系的信息资源特性,指复杂体系中的信息资源对于任务和行动所要求的信息流以及各组成子系统间的信息交互均存在一定程度的重叠,当它们缺失时,不会引起其他信息资源的正常应用,也不会对任务和行动的完成以及组成子系统间的交互产生很大的影响.从理论上讲,冗余信息是复杂体系生存的一种对策,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,信息冗余与体系的演化和发展有着相当密切的联系.一方面,对某些重要信息可能起到备份作用,一旦某些信息在其交互时出错,这些信息可起到修复作用;另一方面,复杂体系的冗余信息可以有信息调控的作用:在体系使命环境发生变化时,可能引起信息资源的信息内容的变异,从而导致复杂体系本身的演化和发展,这也是体系适应使命环境改变的结果.

### (4) 结构冗余

结构冗余主要是指复杂体系中的结构层次冗余,复杂体系中都具有一个以上的层次或结构体,尽管它们在体系中的地位和作用有所不同,但它们都执行同一种功能——体系的使命任务.当某一层次或结构体受损时,其它层次或结构体便接替上来,以维持体系使命任务的正常实施.结构冗余除保持体系的使命任务执行的相对稳定外,还有一个重要作用是具有使体系恢复原貌的能力,一旦复杂体系的某一个层次或结构体被破坏,其下一层次或结构体将逐渐顶替上一层次或结构体而发展.可见复杂体系的结构冗余对于体系稳定有着重要作用.

## 2.3 复杂体系的冗余结构

尽管上述的系统冗余、功能冗余、信息冗余和结构冗余属于复杂体系不同组织水平上的冗余,但由复杂体系的结构特性以及各种冗余的内涵可知,这些冗余在体系中并不是孤立的,而是相互联系,共同组成一个能保持体系对使命环境具有足够的适应性并不断演化发展的多重混联冗余体系,如图3所示.

其中,大方框  $H_1, H_2, \dots, H_q$  为结构层次冗余,其内的小方框  $F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1i_1}, \dots, F_{qj_q}$  为功能冗余,  $S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1m_1}, \dots, S_{qm_q}$  为系统冗余,  $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1n_1}, \dots, I_{qn_q}$  为信息冗余.

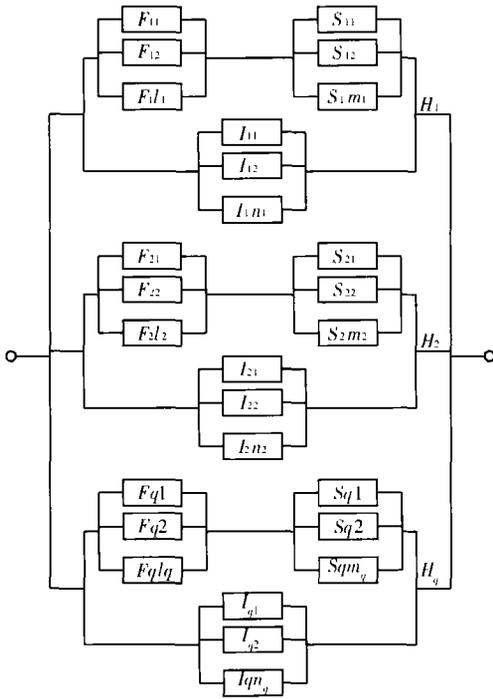


图3 复杂体系的多重混联冗余结构

Fig. 3 The redundancy structure for complex system of systems

如图可知,复杂体系中这几种冗余在其内部结构上都是按照冗余的本质采用并联方式结合,而不同冗余种类之间的结构却是由较为复杂的串并混联形式实现.例如,功能冗余面向复杂体系的使命目标和涌现级行为特性层次上的任务部署,它在使命目标三级分解的功能分解结果中的子任务所需能力集中进行设计,而系统冗余面向于复杂体系的子系统级效能和性能,它在使命目标三级分解的行为分解结果中的子任务可达子系统集中进行设计,因此,功能冗余和系统冗余间采用串联形式结合;信息冗余则面向复杂体系业务结构和系统结构中任务关联和系统交互,涵盖了使命目标三级分解的全过程,因此,它和功能冗余与系统冗余间采用并联形式结合;而由复杂体系的结构特性可知,功能冗余、系统冗余和信息冗余的结构体可构成复杂体系的一个结构层次的冗余内容,它和体系的其它冗余层次进行并联,共同形成复杂体系的结构冗余.

### 3 复杂体系的冗余效益分析

复杂体系的冗余效益分析就是研究其动态适应性冗余结构对体系任务和使命目标的适应性所

产生的影响,即确定基于冗余结构的复杂体系的动态适应性能力.这可通过综合考虑冗余单元的动态适应性能力、同种冗余的并联冗余效益以及不同冗余的混联冗余效益来进行.

#### 3.1 冗余单元的动态适应性能力分析

冗余单元的动态适应性能力分析就是通过冗余单元的可用知识量、冗余单元和相应的体系任务目标的相关程度、体系对该冗余单元的利用百分率以及复杂体系本身所具有的结构特性等相关参数和来进行计算该冗余单元对复杂体系使命环境的适应能力.

知识作为信息的综合表现,是进行复杂体系冗余效益分析的基础.定义知识为决策者对战场态势确定性或完成指定任务所需各种资源确定性把握的程度,那么当前知识的拥有量就应该为所描述对象的最大不确定性和当前不确定性二者的差.如果用熵量来表示不确定性,那么当前知识就可以表示为

$$K = H_{\max} - H_{\text{curr}} \quad (1)$$

其中,\$K\$为当前知识,\$H\_{\max}\$为最大熵量,\$H\_{\text{curr}}\$为当前熵.

如果复杂体系中冗余单元 \$i\$ 完成其任务所需资源为 \$1/\lambda\_i\$,并且设该冗余单元 \$i\$ 在一定的资源 \$r\$ 内完成其任务的概率服从如下的指数分布(指数分布说明复杂体系的任务序列具有马尔柯夫特性,即当前任务所需的资源与过去一个任务所需资源无关)

$$f_i(r) = \lambda_i e^{-\lambda_i r} \quad (2)$$

进而可以该冗余单元 \$i\$ 的可用知识为它处理完其任务所需资源的概率分布 \$f\_i(r)\$ 的函数,设其香农熵为 \$H\_i(r)\$,则

$$H_i(r) = - \int_0^{\infty} \ln(\lambda_i e^{-\lambda_i r}) \lambda_i e^{-\lambda_i r} dr \quad (3)$$

即

$$H_i(r) = \ln(e/\lambda_i) \quad (4)$$

那么,按照式(1)中知识的定义可知该冗余单元 \$i\$ 所包含的知识量为

$$K_i(r) = \ln\left(\frac{e}{\lambda_i \min}\right) - \ln\left(\frac{e}{\lambda_i}\right) = \begin{cases} \ln(\lambda_i/\lambda_i \min) & \text{if } \lambda_i \min \leq \lambda_i \leq e\lambda_i \min \\ 0 & \text{if } \lambda_i < \lambda_i \min \\ 1 & \text{if } \lambda_i > e\lambda_i \min \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\lambda_i \min$  表示单位资源必需平均要完成的最少任务量, 而  $1/\lambda_i \min$  则表示冗余单元为保证其任务的顺利完成所需的最大期望资源量.

由于冗余单元的存在, 因而复杂体系可以通过充分利用冗余单元的知识来提高体系中相应处理单元的任务处理能力, 即提高该结点的使命环境适应能力. 此外, 冗余单元的动态适应性能力的大小还与其所拥有的知识对所需完成的相应使命任务所能产生的有用程度有密切关系(即冗余单元和动态使命任务的相关系数). 冗余单元和动态使命任务的相关程度可以从资源、时间、性能状态、使命任务完成程度等因素来分析, 而同时考虑资源约束和时间约束, 就能从一定程度上较为集中地反映这些因素状态.

设冗余单元  $i$  和动态使命任务的资源相关系数为  $c_R^i$ , 则有

$$\begin{cases} c_R^i = \prod_{k \in T_S} \sum_{j \in N_k^i} (\omega_{jk}^R (r_{jk}^i / R_{jk}^i) -) \\ (r_{jk}^i / R_{jk}^i) - = \min \{ r_{jk}^i / R_{jk}^i, 1 \} \\ \sum_{j \in N_k^i} \omega_{jk}^R = 1, \forall k \in T_S \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $T_S$  表示复杂体系使命任务的子任务序列,  $N_k^i$  表示各个子任务对冗余单元  $i$  所需求的资源类型,  $R_{jk}^i$  和  $r_{jk}^i$  分别表示第  $k$  个子任务对冗余单元  $i$  中第  $j$  种资源的需求量以及该冗余单元  $i$  中该种资源的实际可用量, 显然  $\forall j \in N_k^i$  都有  $R_{jk}^i \neq 0$ . 另外,  $\omega_{jk}^R$  表示各种资源的权重, 即各种资源对完成子任务所具有的相对重要性.

设冗余单元  $i$  和动态使命任务的时间相关系数为  $c_T^i$ , 则有

$$\begin{cases} c_T^i = \prod_{k \in T_S} \Gamma_k(t_k^i) \\ \text{s. t. } \begin{cases} \Gamma_k(t_k^i) = 0 \text{ if } t_k^i \in (0, \tau_{k-}^i) \cup (\tau_{k+}^i, +\infty) \\ \Gamma_k(t_k^i) = 1 \text{ if } t_k^i \in [\tau_{k1}^i, T_k^i] \\ \Gamma_k(t_{k1}^i) \leq \Gamma_k(t_{k2}^i) \text{ if } \tau_{k-}^i \leq t_{k1}^i \leq t_{k2}^i \leq \tau_{k1}^i \\ \Gamma_k(t_{k1}^i) \geq \Gamma_k(t_{k2}^i) \text{ if } T_k^i \leq t_{k1}^i \leq t_{k2}^i \leq \tau_{k+}^i \\ 0 < \tau_{k-}^i \leq \tau_{k1}^i \leq T_k^i \leq \tau_{k+}^i \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $T_k^i$  和  $t_k^i$  分别表示冗余单元  $i$  完成复杂体系使命任务第  $k$  个子任务时所需的规定时间和实际所用时间,  $\tau_{k-}^i$ 、 $\tau_{k1}^i$  和  $\tau_{k+}^i$  表示  $\Gamma_k$  取某些特定阈值时的  $t_k^i$  取值,  $\Gamma_k$  表示冗余单元完成第  $k$  个子任务的实际时间与规定时间的相关程度函数.

综上所述, 复杂体系通过有效利用冗余单元  $i$  而使相应结点对使命任务的动态环境任务所产生的适应性因子  $A_i$  可以表示为

$$A_i = (h_i c_R^i c_T^i K_i(r))^{0_i} = \{ h_i K_i(r) \prod_{k \in T_S} [\Gamma_k(t_k^i) \sum_{j \in N_k^i} (\omega_{jk}^R (r_{jk}^i / R_{jk}^i) -)] \}^{1+0_i} \quad (9)$$

其中,  $h_i$  表示复杂体系在实际执行其使命任务时对冗余单元  $i$  所具有知识的利用百分率, 而  $0_i$  表示位置扰动, 它与复杂体系本身结构和冗余单元  $i$  所处的位置层次有关, 当冗余单元  $i$  的位置扰动可忽略不计时取 0, 否则, 可根据实际需要取  $0_i > 0$  的某个值.

### 3.2 复杂体系的动态适应性冗余效益度量

动态适应性是复杂体系设计中的一个重要问题, 受多种条件, 如体系结构、资源种类和数量、使命目标、任务环境等的约束. 基于冗余的动态适应性复杂体系设计的本质就是在复杂体系中设置一定程度的冗余, 然后通过同种冗余的并联结果来提高体系对动态环境的适应能力.

设  $m_i$  为复杂体系第  $i$  个子系统中所包含的相同冗余单元数量, 且  $\alpha_i$  为满足其动态适应性要求的可选项设计. 若该子系统单个冗余单元的动态适应能力为  $A_i(\alpha_i)$ , 则其动态适应性能  $A_i(\alpha_i, m_i)$  与这些冗余单元的组合方式有着十分密切的关系.

若冗余单元按照串联方式进行组合, 则该子系统的动态适应性能就是各冗余单元动态适应能力的逻辑乘, 即

$$A_i(\alpha_i, m_i) = (A_i(\alpha_i))^{m_i} \quad (10)$$

由式(10)可知, 当子系统  $i$  的冗余单元数目  $m_i$  增大时, 该串联子系统的动态适应性便急剧下降, 并且任何一个冗余单元的失效都会引起该子系统的失效.

提高该子系统的动态适应性的途径之一是建立一个功能关系上的并联系统. 也就是说, 若冗余单元按照并联方式进行组合, 则该子系统的动态适应性能就是各冗余单元动态适应能力的逻辑和, 即

$$A_i(\alpha_i, m_i) = 1 - [1 - A_i(\alpha_i)]^{m_i} \quad (11)$$

由式(11)可知, 当子系统  $i$  的冗余单元数目  $m_i$  增大时, 该并联子系统的动态适应性也迅速增大, 且当某个冗余单元因干扰失效时, 其余冗余单元仍能正常工作, 不会导致该子系统的失效.

结合式(10)和式(11)可知,对于具有  $m_i$  个相同冗余单元的第  $i$  个子系统,其在组合方式上提高动态适应能力的有效途径应当是对这些冗余单元进行并联组合,而又由式(9)可知

$$A_i(\alpha_i) = \{h_i K_i(r) \prod_{k \in T_S} [\Gamma_k(t_k^i) \times \sum_{j \in N_k} (\omega_{jk}^R (r_{jk}^i / R_{jk}^i)_{-})]\}^{1+\theta_i} \quad (12)$$

所以,具有  $m_i$  个相同冗余单元的第  $i$  个子系统的并联冗余效益为

$$A_i(\alpha_i, m_i) = 1 - \{1 - h_i K_i(r) \prod_{k \in T_S} [\Gamma_k(t_k^i) \times \sum_{j \in N_k} (\omega_{jk}^R (r_{jk}^i / R_{jk}^i)_{-})]\}^{1+\theta_i} m_i \quad (13)$$

如果复杂体系中包含  $N$  个子系统,且对于每个子系统体系设计者都有多个可选设计来满足其动态适应性要求,则基于冗余的复杂体系的动态适应性效益问题可以描述为如下非线性整数规划

$$\begin{aligned} \max A_{SOS}(\Theta) &= A_{SOS}(m, \alpha) = \prod_{k=1}^N A_k(m_k, \alpha_k) \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} C_{SOS}(m, \alpha) = \sum_{k=1}^N c_k(\alpha_k) m_k \leq C_{SOS} \\ 1 \leq m_k \leq u_k; 1 \leq \alpha_k \leq \beta_k \\ R_{SOS}(m, \alpha) = \sum_{k=1}^N r_k(\alpha_k) m_k \leq R_{ROS} \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

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] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3—10.

Qian Xuesen, Yu Jingyuan, Dai Ruwei. A new discipline of science: The study of open complex giant system and its methodology[J]. Nature Journal, 1990, 13(1): 3—10. (in Chinese)

[3] 戴汝为, 操龙兵. 综合集成研讨厅的研制[J]. 管理科学学报, 2002, 5(3): 10—16.

Dai Ruwei, Cao Longbing. Research of hall for workshop of metasynthetic engineering[J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(3): 10—16. (in Chinese)

[4] 于景元, 周晓纪. 综合集成方法与总体设计部[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 22—24.

Yu Jingyuan, Zhou Xiaoji. Meta-syntheses and department of integrative system design[J]. Complex Systems and Complexity Sciency, 2004, 1(1): 22—24. (in Chinese)

[5] 廖守亿, 戴金海. 复杂适应系统及基于 Agent 的建模与仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 113—117.

Liao Shouyi, Dai Jinhai. Study on complex adaptive system and agent-based modeling & simulation[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(1): 113—117. (in Chinese)

[6] 鹿祥宾, 李晓钢, 林峰. 复杂系统的可靠性分配和优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 565—568.

Lu Xiangbin, Li Xiaogang, Lin Feng. Reliability allocation and optimization for complex systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(6): 565—568. (in Chinese)

其中,  $\Theta$  为决定体系动态适应能力的使命任务环境向量,  $A_{SOS}(m, \alpha)$  为具有冗余单元  $m$  和比较设计  $\alpha$  的复杂体系动态适应性,  $u_k$  为第  $k$  个子系统相同的冗余单元的上界,  $\beta_k$  为第  $k$  个子系统可选用设计的上界,  $C_{SOS}(m, \alpha)$  和  $R_{SOS}(m, \alpha)$  分别为体系满足冗余单元  $m$  和比较设计  $\alpha$  的费用函数和资源函数,  $c_k(\alpha_k)$  和  $r_k(\alpha_k)$  分别为第  $k$  个子系统满足其比较设计  $\alpha_k$  的单个冗余单元的费用函数和资源函数,  $C_{SOS}$  为体系费用的总约束,  $R_{SOS}$  为体系资源的总约束.

4 结 论

本文提出了基于冗余的动态适应性复杂体系设计思想,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,并讨论了复杂体系的动态适应性冗余效益的度量方法,因而对动态适应性复杂体系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. 不过,本文并没有讨论复杂体系中冗余单元的调控以及过多冗余单元所引入的复杂性惩罚等问题,这些内容还有待于今后更深入的研究.

- [7]戴汝为. 21世纪组织管理途径探讨[J]. 管理科学学报, 1998, 1(3): 1—6.  
Dai Ruwei. The exploration of approach for management in 21st century[J]. Journal of Management Sciences in China, 1998, 1(3): 1—6. (in Chinese)
- [8]李良, 郭耀煌. 组织理论对复杂系统理论的借鉴[J]. 管理科学学报, 2002, 5(6): 77—82.  
Li Liang, Guo Yaohuang. How can organization theory benefit from complexity systems theory[J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(6): 77—82. (in Chinese)
- [9]Damanpour F, Gopalakrishnan S. The dynamics of the adaptation of product and process innovations in organizations[J]. Journal of Management Study, 2001, 38(1): 45—65.
- [10]Maier M W. Architecting principles for systems-of-systems[J]. System Engineering, 1998, 1(4): 267—284.
- [11]叶明确, 张世英. 复杂系统的质量生存可达性决策[J]. 控制与决策, 2002, 17(3): 264—268.  
Ye Mingque, Zhang Shiyong. Quality viability reachable decision of complex system[J]. Control and Decision, 2002, 17(3): 264—268. (in Chinese)
- [12]孙青华, 张世英. 复杂系统的变结构分析[J]. 系统工程学报, 2000, 15(4): 344—351.  
Sun Qinghua, Zhang Shiyong. Structure change analysis of complex system[J]. Journal of Systems Engineering, 2000, 15(4): 344—351. (in Chinese)
- [13]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.
- [14]方润生, 李雄治. 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.  
Fang Runsheng, Li Xiongzi. The application of organizational slack and the impact on the innovative output of Chinese enterprises[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2005, 19(3): 15—20. (in Chinese)
- [15]Zhang R, Sun G J, Li F M. Definition of redundancy and the ecological mechanism of it occurrence[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2003, 23(5): 844—851.
- [16]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.  
Han Mingchun, Wu Jianjun, Wang Fen. Redundancy theory and its application in agro-ecosystem management[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 375—378. (in Chinese)

## Research on dynamic adaptation complex systems based on redundancy

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

Key Laboratory of C<sup>4</sup>ISR, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** Aiming at some problems derived from the dynamic adaptation complex systems, a new design method based on redundancy theory is presented to effectively improve the dynamic adaptive ability of complex systems. The redundancy principle is firstly described such as redundancy concept, dynamic adaptation principle and redundancy hypothesis. On this basis, both the redundancy type and its redundancy structure with dynamic adaptation are then shown according to the structure features of complex system of systems. Lastly, the measure of redundancy effectiveness for the dynamic adaptive ability of complex system of systems is synthetically illustrated. Thus, some theoretic guidance for structure design and effectiveness evaluation of the dynamic adaptation of complex system of systems and its upgrade and optimization should be provided through this kind of analyzing methodology.

**Key words:** redundancy; complex system of systems; dynamic adaptation; measure of effectiveness