

# 基于冗余的动态适应性复杂体系的冗余负效益分析 Negative Benefits Analysis for Redundancy-Based Complex Systems with Dynamic Adaptation

张送保<sup>1</sup>, 张维明<sup>2</sup>, 曾前腾<sup>1</sup>, 王光新<sup>1</sup>

ZHANG Song-bao<sup>1</sup>, ZHANG Wei-ming<sup>2</sup>, ZENG Qian-teng<sup>1</sup>, WANG Guang-xin<sup>1</sup>

(1. 桂林空军学院, 广西桂林 541003; 2. 国防科技大学 C<sup>4</sup>ISR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

(1. Guilin Airforce Academy, Guilin, Guangxi, 541003, China; 2. Key Laboratory of C<sup>4</sup>ISR, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan, 410073, China)

**摘要:**针对基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想,分析冗余系统单元的引入对体系的运行及其效能实现所产生的费用和时间约束,探讨冗余调度所导致的体系复杂性和相应调度代价,并通过具体实例进一步阐释,指出由于冗余功能系统的添加,使得体系的管理控制复杂性同时增加,而冗余调度的进行,也使得体系新增相应的冗余调度行为代价和冗余调度对象代价。

**关键词:**复杂体系 冗余 动态适应性 负效益

**中图分类号:**TP18,N94 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2010)04-0393-04

**Abstract:** Considering the method of designing a dynamic adaptive structure for redundancy-based complex systems, some new constraints, such as expenditure and time are analyzed, which are derived from introducing some redundant system units and have an effect on the implement of complex systems. Then according to the analysis, some extra complexity and cost are synthetically explored, which are also derived from redundancy redeployment. Lastly, through a specific application, it indicates that the addition of redundant functional system units will increase the complexity of management and control in the complex systems, and the redundancy redeployment will increase relevant behavior and object cost.

**Key words:** complex system of systems, redundancy, dynamic adaptation, negative benefits

复杂体系随着时间推进而不断演化发展,体系的实际使命环境和本身的功能及其结构也在不断变化,从而使得复杂体系在静态环境下设计的优化结构不能够再与当前的实际使命环境相匹配<sup>[1,2]</sup>。冗余性是一般的复杂体系都具有的重要特征之一,一方面基于冗余的动态适应性复杂体系能够通过灵活地调用各种不同冗余单元的功能来适时地增加各组成子系统的可用性,进而有效地增强复杂体系对动态使命环境的适应性<sup>[3,4]</sup>。另一方面,冗余系统单元

的引入,必然使得复杂体系的运行及其效能实现新增一些额外的约束;而且,通过调用相应冗余系统单元来构建健壮、灵活的复杂体系,也会同时引进新的体系复杂性与调度代价。因此,在利用冗余特性进行复杂体系的动态适应性结构设计时,必须充分考虑冗余调度所产生的相应负效益,以保证体系在其它约束条件下以尽量小的代价来不断优化改进现有的结构及性能,灵活、快速地适应复杂多变的使命任务环境。本文针对基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想,分析冗余系统单元的引入对体系的运行及其效能实现所产生的费用和时间约束,并在此基础上,深入研究冗余调度所导致的体系复杂性和相应调度代价。

收稿日期:2010-07-05

作者简介:张送保(1978-),男,博士,主要从事智能决策技术与系统集成研究。

## 1 复杂体系的冗余约束

基于冗余的动态适应性复杂体系对其体系运行及效能实现的冗余约束主要包括冗余组成子系统的费用及其运行时间两个方面. 冗余组成子系统的费用会影响到体系的总成本开销及其合理分配, 而冗余组成子系统的运行时间涉及到各功能系统之间的协作同步, 并对体系使命任务的完成效率产生影响.

### 1.1 费用约束

基于冗余的动态适应性复杂体系的整个费用由组成子系统的费用和体系构建及其通信等其它费用组成. 其中, 子系统的费用变化对体系总体效能影响很大, 而每种系统单元的费用是其性能的函数. 设基于冗余的动态适应性复杂体系中包含  $n$  种不同的系统单元, 则有

$$\begin{cases} c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, \\ c_i = h_i(p_i), \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $c$  表示整个体系所有系统单元费用的构成, 而  $c_i, p_i$  以及  $h_i$  分别表示第  $i$  种系统单元的费用、性能以及二者之间的费用函数. 因此, 复杂体系的整体费用为

$$C = (m_1, m_2, \dots, m_n)c^T + C_0, \quad (2)$$

其中,  $m_i$  表示第  $i$  种系统单元的冗余数量,  $C_0$  表示除系统单元费用之外的复杂体系构建及通信等其它费用.

另外, 由于每种系统单元  $i$  的性能度量都要受到一个特定的低端性能阈值(记为  $p_i^*$ )的限制, 因此每种系统单元  $i$  的费用也有一个低端阈值  $c_i^*$ :

$$c_i^* = h_i(p_i^*). \quad (3)$$

于是, 复杂体系的费用约束就是

$$\begin{cases} C \leq C^U, \\ c^* \leq c \leq c^U, c^* = \{c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*\}, \\ c^U = \{c_1^U, c_2^U, \dots, c_n^U\}, \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $C^U$  和  $c^U$  分别表示复杂体系和系统单元的最大费用阈值.

### 1.2 时间约束

基于冗余的动态适应性复杂体系的时间约束虽然也主要由组成子系统的时间开销所决定, 但是它与费用约束不同, 不是各组成子系统时间开销的简单叠加关系. 设复杂体系运行时任意系统单元  $i$  的时间开销为  $t_i$ , 则  $t_i$  是其相应性能的函数:

$$\begin{cases} t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \\ t_i = \tau_i(p_i), \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $t$  表示整个体系所有系统单元时间开销的构

成, 而  $t_i$  和  $\tau_i$  分别表示第  $i$  种系统单元的时间开销以及相应的时间函数. 对于任意两个系统单元  $i$  和  $j$  ( $i \neq j$ ), 如果它们在执行顺序上处于完全的串联关系, 则总的时间开销为  $t_i + t_j$ ; 如果处于完全的并联关系, 则总的时间开销为  $\max\{t_i, t_j\}$ ; 否则, 时间开销的大小处于二者之间, 而其具体计算也应该分解为串联和并联进行.

因此, 假定复杂体系的时间开销为  $T$ , 则其时间约束为

$$\begin{cases} T \leq T^U, \\ t \leq t^U, t^U = \{t_1^U, t_2^U, \dots, t_n^U\}, \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $T^U$  和  $t^U$  分别表示复杂体系和系统单元的最大时间开销阈值.

一般情况下, 很难直接找到公式(5)和公式(6)中  $h_i$  和  $\tau_i$  的显式解析式, 但可以根据历史数据进行预测, 再进行拟合回归分析<sup>[5]</sup>.

## 2 复杂体系的冗余负效益

基于冗余的动态适应性复杂体系随着冗余系统单元的不断引入, 它的复杂性也在不断增加, 其中包括冗余系统单元的调度和控制、冗余调控中心与固有体系结构的交互等. 这必然会使得体系要花费一定的额外精力与费用来处理这种复杂性, 从而在一定程度上降低了复杂体系的任务解决能力, 即动态适应性结构在带来效益的同时, 也会造成一定的负效益. 从理论上讲, 要想充分有效地利用冗余系统单元, 提高复杂体系动态适应性结构任务处理的效能, 必须在基于冗余的复杂体系动态适应性结构所带来的效益和负面影响间进行适当地权衡.

### 2.1 冗余调度复杂性

设基于冗余的动态适应性复杂体系中共包含  $n$  种不同的系统单元, 进一步假设该复杂体系在引入冗余系统单元前为完成某个使命目标所需的系统单元为所有系统单元的前  $\rho$  ( $\rho \leq n$ ) 种系统单元, 而复杂体系在任意时刻为适应动态使命目标环境而引入相应的冗余系统单元后, 所需的第  $i$  种系统单元的冗余数量为  $m_i$ , 则对于某个特定的动态使命任务环境, 调度相应冗余系统单元所造成的网络连接复杂性是完成该动态使命任务所需的各系统单元冗余数量的函数, 即

$$g(C) = f(m_1, m_2, \dots, m_\rho, m_{\rho+1}, \dots, m_n), \quad (7)$$

其中,  $C = \{m_1, m_2, \dots, m_\rho, m_{\rho+1}, \dots, m_n\}$  表示冗余调用后影响复杂体系复杂性的因素. 函数  $f(m_1, m_2, \dots, m_\rho, m_{\rho+1}, \dots, m_n)$  的选择具有很大的灵活性, 此

处取其为  $C$  的线性函数<sup>[6]</sup>:

$$f(m_1, m_2, \dots, m_\rho, m_{\rho+1}, \dots, m_n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i m_i, \quad (8)$$

其中,系数  $\beta_i (0 \leq i \leq n)$  与复杂体系的结构和系统单元  $i$  的具体性能及其复杂体系中的相应位置有关. 对于任意一种系统单元  $i$ , 冗余调用后其冗余数量  $m_i$  的计算方法为:如果复杂体系当前使命环境不存在该种系统单元,则  $m_i = 0$ ; 如果一个新的冗余系统单元加入复杂体系,则  $m_i = m_i + 1$ ; 如果一个旧的冗余系统单元退出复杂体系,则  $m_i = m_i - 1$ . 显然,对于冗余调度之前复杂体系的初始状态,有

$$m_i = \begin{cases} 1, & i \leq \rho, \\ 0, & i > \rho. \end{cases} \quad (9)$$

此时  $f(m_1, m_2, \dots, m_\rho, m_{\rho+1}, \dots, m_n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{\rho} \beta_i$ .

在冗余系统单元连接复杂性的基础上,通过管理控制复杂性和冗余调度相对复杂性来深入分析复杂体系的冗余调度复杂性.

**定义 1** 管理控制复杂性:冗余系统单元调用所带来的复杂体系管理控制的复杂性  $G(C)$  是冗余系统单元连接复杂性  $g(C)$  的函数,并且二者遵循 Logistic 方程的 S 曲线型<sup>[7]</sup>:

$$G(C) = \Psi(g(C)) = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i m_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i m_i)}. \quad (10)$$

显然,  $G(C)$  表示复杂体系在某个动态使命环境下进行冗余调度后的绝对复杂性,满足  $G(C) \in (0, 1)$ . 新增任意系统单元或是增加已有系统单元的冗余数量,都会导致复杂体系相应复杂性的增大,反之减小. 有时,为了比较某冗余调度前后的复杂性差异,可用复杂体系冗余调度的相对复杂性表示.

**定义 2** 冗余调度的相对复杂性:复杂体系冗余调度的相对复杂性为  $G_{a \rightarrow b}(C)$ , 并且

$$G_{a \rightarrow b}(C) = \frac{G_{a+}(C)}{G_{a-}(C)}. \quad (11)$$

其中,  $G_{a+}(C)$  和  $G_{a-}(C)$  分别表示复杂体系进行该冗余调度后的绝对复杂性与其调度前的绝对复杂性,二者均按照公式(10)计算得出.

通过相对复杂性  $G_{a \rightarrow b}(C)$  值,可分析复杂体系进行该冗余调度后复杂性的变化情况. 将定义 2 进行推广,即可得到复杂体系任意两个动态使命任务环境(设其为  $a$  环境和  $b$  环境)的相对复杂性

$G_{a \rightarrow b}(C)$ :

$$G_{a \rightarrow b}(C) = \frac{G_a(C)}{G_b(C)}, \quad (12)$$

其中,  $G_a(C)$  和  $G_b(C)$  分别表示复杂体系适应任意动态使命任务环境  $a$  的冗余调度和适应任意动态使命任务环境  $b$  的冗余调度所导致的相应绝对复杂性.

## 2.2 冗余调度代价

复杂体系进行某些冗余调度时(例如系统单元的新旧更替等),其最终操作结果是使得某种系统单元的  $i$  个冗余系统单元退出复杂体系,同时又新增  $i$  个相同的冗余系统单元进入复杂体系. 显然,该冗余调度并没有引起复杂体系相应复杂性的改变,但是确实又使得复杂体系产生了相应的冗余调度代价.

复杂体系的冗余调度代价包括两种:冗余调度行为代价和冗余调度对象代价,其中前者指执行调度行为时所产生的代价,而后者则指所调用的冗余系统单元本身的成本代价. 设复杂体系的冗余调度行为代价和冗余调度对象代价分别为  $\Gamma(C)$  和  $Z(C)$ , 且对于任意一种系统单元  $i$  来说,退出和新增一个冗余系统单元的代价是相同的,都记为  $\vartheta_i$ , 第  $i$  种系统单元中第  $j$  个冗余系统单元的成本代价为  $c_{i,j}$ , 则有

$$\begin{cases} \Gamma(C) = \sum_{i=1}^n \vartheta_i \sum_{j=1}^{M_i} |H_{r+}(i, j) - H_{r-}(i, j)|, \\ Z(C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_i} c_{i,j} (H_{r+}(i, j) - H_{r-}(i, j)), \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $n$  表示复杂体系所包含的所有系统单元的种数,  $M_i$  表示第  $i$  种系统单元所包含的所有冗余系统单元数量,  $H_{r+}(i, j)$  和  $H_{r-}(i, j)$  分别表示第  $i$  种系统单元中第  $j$  个冗余系统单元在该冗余调度后和冗余调度前是否存在于复杂体系中执行相应的使命任务. 如果是,则其值均取 1, 否则其值均取 0.

这样,通过冗余调度的相对复杂性  $G_{a \rightarrow b}(C)$  和调度代价  $\Gamma(C)$  与  $Z(C)$ , 就可以在对复杂体系冗余调度动态适应性效益分析的同时,进行相应冗余调度所产生的复杂性及代价等负面影响的分析.

## 3 实例分析

以海军反水雷作战体系为例来进行基于冗余的动态适应性复杂体系的冗余负效益分析,实例中的部分数据主要来源于参考文献[5]. 反水雷作战体系

的各主要功能系统包括探测声呐、识别声呐、导航系统、探测航行载体、重新定位传感器、清除处理航行载体、清除处理系统和计算机辅助系统. 为了能够顺利完成使命, 在执行任务过程中为其 3 个关键子系统进行的冗余设置分别为: 探测声呐 3 个(前视避撞声呐、侧视声呐和合成孔径声呐), 识别声呐 2 个(参量声呐和甚高频声呐)和导航系统 2 个.

从表 1 可以看出, 体系进行冗余调度之后, 关键功能系统的平均可用性与平均适应性都得到相应的增强, 它的直接效果便是促使整个反水雷作战体系对其不确定性使命任务环境的动态适应, 表现为体系对作战区域中所有水雷目标清除处理的期望数量增加, 这些都是体系冗余调度所产生的相应效益. 但是我们也发现, 体系最终清除水雷期望数量的增加导致体系使命任务执行总时间的延长.

表 1 体系冗余调度所产生的使命任务参数变化

使命任务	关键功能系统的平均可用性	关键功能系统的平均适应性	清除水雷的期望数量	任务执行总时间(h)
不进行冗余调度	0.8900	0.8446	60.20	22.84
进行冗余调度	0.9915	0.9830	94.95	26.51
参数变化	增加 0.1015	增加 0.1384	增加 34.75	增加 3.67

取反水雷作战体系各组成子系统间的连接复杂性  $g(C)$  为线性函数型, 并且设其相应的系数为  $\beta_0 = 0$  和  $\beta_i = 0.1 (i \leq n)$ . 由于体系中共存在 8 种不同的系统单元, 因此可以得出反水雷作战体系进行相应冗余调度前和冗余调度后的体系管理控制复杂性  $G(C)$  分别为  $G_{-}(C) = 0.6900$  和  $G_{+}(C) = 0.7685$ , 冗余调度所产生的相对复杂性为  $G_{\rightarrow}(C) = 1.1139$ , 即经过此冗余调度后, 反水雷作战体的体系管理控制复杂性增加了 11.39%.

又设任意系统单元  $i$  加入或退出体系的代价  $\vartheta_i$  均为单位代价 1, 且相同种类的系统单元的成本费用也都相同(探测声呐为 7.655, 识别声呐为 0.5, 导航系统为 0.45), 由于反水雷作战体系在进行冗余

调度前本身具有 1 个探测声呐、1 个识别声呐和 1 个导航系统, 因此进行冗余设置后的相应冗余调度代价为  $\Gamma(C) = 4, Z(C) = 7.655 \times 2 + 0.5 + 0.45 = 16.26$ , 即此冗余调度使得反水雷作战体系新增了 4 单位的冗余调度行为代价和 16.26 单位的冗余调度对象代价.

上述计算结果表明, 由于冗余功能系统的添加, 使得体系的管理控制复杂性同时增加, 而冗余调度的进行, 也使得体系新增相应的冗余调度行为代价和冗余调度对象代价.

#### 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] 张送保, 张维明, 黄金才, 等. 基于冗余的动态适应性复杂体系研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(5): 145-152.
- [4] 方润生, 李雄诒. 组织冗余的利用对中国企业创新产生的影响[J]. 管理工程学报, 2005, 19(3): 15-20.
- [5] Luman R R. Quantitative decision support for upgrading a complex system of systems[D]. The School of Engineering and Applied Science of the George Washington University in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Science, 1997.
- [6] 范金城, 梅长林. 数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] Moffat J. Complexity theory and network centric warfare[M]. UK London: Information age transformation series, 2003.

(责任编辑: 尹 闯)