

# 基于冗余的复杂体系动态适应性研究

## Research on Dynamic Adaptation of Complex System of Systems Redundancy-Based

张送保, 曾前腾, 王光新

ZHANG Song-bao, ZENG Qian-teng, WANG Guang-xin

(桂林空军学院, 广西桂林 541003)

(Guilin Airforce Academy, Guilin, Guangxi, 541003, China)

**摘要:**从分析复杂体系中单个系统单元的可用性及其对动态使命任务环境的适应性出发, 探讨复杂体系动态适应性冗余结构本身的可用性及其对任务和使命目标的适应性所产生的影响, 提出基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想, 并通过具体实例进一步阐释, 指出基于冗余的复杂体系能够适时地增加复杂体系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任务环境的适应性。

**关键词:**复杂体系 冗余 动态适应性 可用性 任务环境

**中图分类号:**TP18, N94 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2010)04-0389-04

**Abstract:** The availability of a single system unit in complex system of systems is described and the adaptation of system to the dynamic mission environment is discussed. The concrete availability of the redundant structure with dynamic adaptation for complex system of systems is analyzed and the effect of the adaptation on the complex mission environment is synthetically expounded. Based on these information a new design method which applies redundancy theory to effectively improve the dynamic adaptive ability of complex system of systems is proposed. The application of complex system of systems redundancy-based with dynamic adaptation is simply illustrated.

**Key words:** complex system of systems, redundancy, dynamic adaptation, availability, mission environment

复杂体系在行使功能以达成其使命目标的过程中, 由于外部环境的变化或者体系的行动计划、过程的适应性, 体系本身组成及其结构的变迁, 使得它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点之一<sup>[3]</sup>。基于冗余的动态适应性体系结构能够根据使命环境的动态变化, 灵活地调用各种不同的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, 从而更好地适应新的任务环境。本文针对复杂体系使命任务环境复杂多变的特性, 提出基于冗余的复杂体系动态适应性结构设计思想, 从分析复杂体系中单个系统单元的可用性及其对动态使命任务环境的适应性出发, 深

入研究复杂体系动态适应性冗余结构本身的可用性及其对任务和使命目标的适应性所产生的影响, 并通过具体实例进一步阐释基于冗余的复杂体系能够适时地增加体系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任务环境的适应性。这说明, 对不确定性任务环境下复杂体系动态适应性结构的构建及其体系改进等研究具有一定的指导意义。

### 1 单一冗余系统单元的可用性和动态适应性分析

为了对基于冗余的复杂体系动态适应性效应进行定量分析, 先根据复杂体系的结构特性及各种冗余的实质对复杂体系做如下的形式化描述:

(1) 复杂体系使命目标  $M$  由  $|T_M|$  个子任务组成;

(2) 子任务  $t_i (i=1, 2, \dots, |T_M|)$  由  $|F_{T_i}|$  个

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和系统综合集成研究。

子能力组成;

(3)子能力  $f_{i,j} (j=1,2,\dots, |F_{T_i}|)$  都由一个对应的具体系统单元  $s_{i,j}$  来执行;

(4)子能力  $f_{i,j}$  由  $|P_{f_{i,j}}|$  个性能组成,并且该子能力对其中任意性能  $p_{i,j,k}$  的需求量为  $p_{i,j,k}^0, k=1,2,\dots, |P_{f_{i,j}}|$ .

再设复杂体系经过冗余调用后,执行子能力  $f_{i,j}$  的系统单元  $s_{i,j}$  的冗余度为  $m_{i,j}$ ,其中第  $h$  个冗余系统单元关于性能  $k$  的实际拥有量为  $p_{i,j,k}^h, k=1,2,\dots, m$ .

### 1.1 可用性分析

复杂体系中每个系统单元在执行其使命功能时都可能会因为自身技术故障或是组件老化等问题而不能维持其正常的工作状态,此时必然对其相应使命功能的适应性产生影响.设每个系统单元执行相应使命功能时只包含两种状态:正常工作状态和非正常工作状态,并且处于非正常工作状态时,系统单元不能执行任何的使命功能.

**定义 1** 复杂体系中系统单元  $h$  的可用性是指其执行相应使命功能时维持正常工作状态的概率,记为  $D(h)$ .

一般地,系统单元的可用性服从如下的指数分布<sup>[4]</sup>(指数分布说明复杂体系的系统单元序列具有马尔柯夫特性,即当前系统单元的可用性与过去一个系统单元的可用性无关):

$$D(h) = e^{-\lambda_h(t)}, \tag{1}$$

其中,  $\lambda_h(t)$  为系统单元  $h$  的故障率函数.如果设系统单元  $h$  工作期间的故障率为  $\lambda_h$ ,而作为冗余备份期间的故障率为  $\mu_h$ ,且其工作时间所占比例为  $\rho_h$ ,则系统单元  $h$  发生故障的条件概率为

$$\lambda_h(t) = \rho_h \lambda_h + (1 - \rho_h) \mu_h. \tag{2}$$

### 1.2 动态适应性分析

复杂体系中无论是各类型体系子任务还是系统复合元的综合效能,归根结底都是由系统单元来实现,而系统单元的效能测度又取决于其相应性能的大小.因此,复杂体系的动态适应性分析可以用系统单元实际具备的性能和体系任务所需性能之间的关系来表示<sup>[5]</sup>.

**定义 2** 当前系统单元  $h$  执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应性能  $p_{i,j,k}$  的适应性程度记为  $A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k})$ ,其中,

$$A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k}) = \begin{cases} p_{i,j,k}^h, & \text{如果 } p_{i,j,k}^h < p_{i,j,k}^0, \\ p_{i,j,k}^0, & \text{否则.} \end{cases} \tag{3}$$

**定义 3** 当前系统单元  $h$  执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应使命功能  $f_{i,j}$  的适应性程度记为  $A(h, t_i, f_{i,j})$ ,其中

$$A(h, t_i, f_{i,j}) = \sum_{k=1}^{|P_{f_{i,j}}|} w_{i,j,k} A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k}), \tag{4}$$

$w_{i,j,k}$  为执行子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时性能  $p_{i,j,k}$  的相对权重,且  $\sum_{k=1}^{|P_{f_{i,j}}|} w_{i,j,k} = 1$ .

**定义 4** 可用性为  $D(h)$  的系统单元  $h$  执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应使命功能  $f_{i,j}$  的适应性程度记为  $DA(h, t_i, f_{i,j})$ ,其中

$$DA(h, t_i, f_{i,j}) = D(h) \sum_{k=1}^{|P_{f_{i,j}}|} w_{i,j,k} A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k}). \tag{5}$$

## 2 复杂冗余体系可用性和动态适应性分析

### 2.1 可用性分析

**定义 5** 记冗余度为  $m_{i,j}$  且可用性分别为  $D(h) (h=1,2,\dots, m_{i,j})$  的系统单元执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时可用性为  $D^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j})$ ,其中,

$$D^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}) = 1 - \prod_{h=1}^{m_{i,j}} (1 - D(h)). \tag{6}$$

$D^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j})$  说明  $m_{i,j}$  个冗余系统单元中只要任何一个冗余系统单元是可用的,则相应的复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  是可执行的.显然,  $D^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}) \geq D(h) (h=1,2,\dots, m_{i,j})$ ,表明通过冗余系统单元的调用,可以有效地增强复杂体系中相应系统节点的可用性.

### 2.2 动态适应性分析

通过  $A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k})$  和  $A(h, t_i, f_{i,j})$ ,即可以定义冗余度为  $m_{i,j}$  时系统单元的相应适应性.

**定义 6** 冗余度为  $m_{i,j}$  的系统单元执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应性能  $p_{i,j,k}$  的适应性程度记为  $A^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k})$ ,由定义  $A(h, t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k})$  可知,

$$A^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k}) = \begin{cases} \bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h, & \text{如果 } \bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h < p_{i,j,k}^0, \\ p_{i,j,k}^0, & \text{否则.} \end{cases} \tag{7}$$

对于  $\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h$  有如下两种情况:

(1)当性能  $p_{i,j,k}$  为可加型性能时,例如多架相同型号作战飞机所装载的同一种炸弹的数量,有



$$\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h = \sum_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h \quad (8)$$

(2)当性能  $p_{i,j,k}$  为非可加型性能时,例如多架相同型号作战飞机所装载的不同雷达的探测半径,

$$\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} p_{i,j,k}^h = \max \{p_{i,j,k}^1, p_{i,j,k}^2, \dots, p_{i,j,k}^{m_{i,j}}\} \quad (9)$$

**定义 7** 冗余度为  $m_{i,j}$  的系统单元执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应使命功能  $f_{i,j}$  的适应性程度记为  $A^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j})$ ,由定义  $A(h, t_i, f_{i,j})$  可知,

$$A^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}) = \sum_{k=1}^{|P_{f_{i,j}}|} \omega_{i,j,k} A^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}, p_{i,j,k}) \quad (10)$$

定义 6 和定义 7 说明,复杂体系可以通过冗余系统单元之间的性能互补或增强来提高系统单元对相应体系能力需求的适应性.

根据每个系统单元的两种工作状态可知,  $m_{i,j}$  个冗余系统单元执行相应使命功能时可能会出现  $2^{m_{i,j}}$  种工作状态组合. 对其中的任意一种状态  $l(1 \leq l \leq 2^{m_{i,j}})$ , 设其出现的概率为  $CP(l)$ , 则有

$$CP(l) = \prod_{h=1}^{m_{i,j}} cp(l, h) \quad (11)$$

显然有  $\sum_{l=1}^{2^{m_{i,j}}} CP(l) = 1$ . 另外,  $cp(l, h)$  表示冗余系统单元  $h$  在任意工作状态组合  $l$  中当时所处状态的概率, 并且

$$cp(l, h) = \begin{cases} D(h), & \text{如果 } h \text{ 在 } l \text{ 中处于正常工作状态.} \\ 1 - D(h), & \text{否则.} \end{cases} \quad (12)$$

**定义 8**  $m_{i,j}$  个冗余系统单元处于其  $2^{m_{i,j}}$  种工作状态组合中的任意状态  $l$  时,对相应的复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  的使命功能适应性为  $A^{m_{i,j}^l}(t_i, f_{i,j})$ , 其中,

$$A^{m_{i,j}^l}(t_i, f_{i,j}) = \sum_{k=1}^{|P_{f_{i,j}}|} \omega_{i,j,k} \left[ \frac{\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h}{p_{i,j,k}^0} \right] \quad (13)$$

其中,

$$\left[ \frac{\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h}{p_{i,j,k}^0} \right] = \begin{cases} \frac{\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h}{p_{i,j,k}^0}, & \text{如果 } \bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h < p_{i,j,k}^0, \\ 1, & \text{否则.} \end{cases}$$

同样地,对于  $\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h$ , 有

(1)当性能  $p_{i,j,k}$  为可加型性能时,

$$\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h = \sum_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h \quad (14)$$

(2)当性能  $p_{i,j,k}$  为非可加型性能时,

$$\bigcup_{h=1}^{m_{i,j}} cr(l, h) p_{i,j,k}^h = \max \{cr(l, 1) p_{i,j,k}^1, cr(l, 2) p_{i,j,k}^2, \dots, cr(l, m_{i,j}) p_{i,j,k}^{m_{i,j}}\} \quad (15)$$

$cr(l, h)$  表示冗余系统单元  $h$  在任意工作状态组合  $l$  中当时所处状态下的性能可用程度, 显然,

$$cr(l, h) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } h \text{ 在 } l \text{ 中处于正常工作状态,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (16)$$

**定义 9** 冗余度为  $m_{i,j}$  且可用性分别为  $D(h)(h=1, 2, \dots, m_{i,j})$  的系统单元执行复杂体系子任务  $t_i$  的子功能  $f_{i,j}$  时,对其相应使命功能  $f_{i,j}$  的适应性程度记为  $DA^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j})$ , 其中,

$$DA^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}) = \sum_{l=1}^{2^{m_{i,j}}} CP(l) A^{m_{i,j}^l}(t_i, f_{i,j}) \quad (17)$$

**定义 10** 由复杂体系执行当前子任务的所有子功能的适应性程度,定义复杂体系执行子任务  $t_i$  的适应性程度,记为  $DA(t_i)$ , 其中,

$$DA(t_i) = \sum_{j=1}^{|F_{T_i}|} \omega_{i,j} DA^{m_{i,j}}(t_i, f_{i,j}) \quad (18)$$

$\omega_{i,j}$  为执行子任务  $t_i$  时各子功能  $f_{i,j}$  的相对权重, 且  $\sum_{j=1}^{|F_{T_i}|} \omega_{i,j} = 1$ .

**定义 11** 由复杂体系执行所有子任务的适应性程度,定义复杂体系执行使命任务  $M$  的适应性程度,记为  $DA_{CSOS}(M)$ , 其中,

$$DA_{CSOS}(M) = \sum_{i=1}^{|T_M|} \omega_i DA(t_i) \quad (19)$$

$\omega_i$  为执行使命任务  $M$  时各子任务  $t_i$  的相对权重, 且  $\sum_{i=1}^{|T_M|} \omega_i = 1$ .

### 3 实例分析

以海军反水雷作战体系为例进行基于冗余的复杂体系动态适应性分析,实例中的部分数据主要来源于参考文献[6,7].为了简化分析,此处假设:

(1)反水雷作战体系为了能够顺利完成使命任务,在执行使命任务过程中为体系的探测声呐、识别声呐和导航 3 个关键子系统分别进行如下的冗余设置:探测声呐系统包含前视避撞声呐、侧视声呐和合成孔径声呐;识别声呐系统包含参量声呐和甚高频声呐;导航系统包含两个相同的导航系统.

(2)各冗余系统单元的可用性都为  $\delta$ ,各探测声呐的探测概率都为  $P_d$ ,各识别声呐的识别概率都

为  $P_c$  ,各导航系统的定位标准偏差都为  $\sigma$  .

### 3.1 冗余功能系统的动态适应性

#### 3.1.1 探测声呐系统的动态适应性

对于探测声呐,其动态适应性因子表现为探测声呐的探测概率  $P_d$  ,即通过对探测声呐进行冗余设置,可以有效地提高其相应的整体动态探测概率.由于进行冗余设置后的3个不同的探测声呐,可能出现的可用状态包括8种组合,因此,该冗余探测声呐系统的整体可用性  $D_d^{(3)}$  为

$$D_d^{(3)} = \delta^3 + 3\delta^2(1-\delta) + 3\delta(1-\delta)^2 = \delta^3 - 3\delta^2 + 3\delta.$$

该冗余探测声呐系统的整体动态适应性为

$$P_d^{(3)} = \delta^2(1 - (1 - P_d)^3) + 3\delta^2(1 - \delta)(1 - (1 - P_d)^2) + 3\delta(1 - \delta)^2 P_d.$$

#### 3.1.2 其它冗余系统的动态适应性

对于识别声呐,其动态适应性因子表现为识别声呐的识别概率  $P_c$  .对于导航系统,其动态适应性因子表现为导航系统对已正确识别水雷目标的重新成功定位概率  $P_L$  .利用冗余探测声呐系统整体动态适应性相同的计算方法,得出冗余识别声呐系统和冗余导航系统的整体可用性  $D_c^{(2)}$  和  $D_L^{(2)}$  及整体适应性  $P_c^{(2)}$  和  $P_L^{(2)}$  分别为

$$\begin{cases} D_c^{(2)} = D_L^{(2)} = -\delta^2 + 2\delta, \\ P_c^{(2)} = \delta^2(1 - (1 - P_c)^2) + 2\delta(1 - \delta)P_c, \\ P_L^{(2)} = \delta^2(1 - (1 - P_L)^2) + 2\delta(1 - \delta)P_L. \end{cases}$$

### 3.2 体系冗余调度前后的动态适应性比较

当取  $\delta=0.8900$  ,  $P_d=0.9400$  ,  $P_c=0.9300$  及  $P_L=0.9768$  时,计算出反水雷作战体系进行冗余调度前与冗余调度后各功能系统的动态适应性.冗余调度前,各功能系统的可用性为  $\delta=0.8900$  ,且探测声呐的动态适应性为  $P_d^{(0)}=\delta P_d=0.8366$  ,识别声呐的动态适应性为  $P_c^{(0)}=\delta P_c=0.8277$  ,导航系统的动态适应性为  $P_L^{(0)}=\delta P_L=0.8694$  .冗余调度后,探测声呐的可用性和动态适应性分别为  $D_d^{(3)}=0.9987$  和  $P_d^{(3)}=0.9956$  ,识别声呐的可用性和动态适应性分别为  $D_c^{(2)}=0.9879$  和  $P_c^{(2)}=0.9703$  ,导航系统的可用性和动态适应性分别为  $D_L^{(2)}=0.9879$  和  $P_L^{(2)}=0.9829$  .

图1和图2显示,反水雷作战体系相应功能系统在进行冗余调用之后,体系对动态不确定性使命任务环境的可用性 & 动态适应能力都得到了一定的改善.其中,平均可用性和平均适应性指反水雷作战体系中探测声呐、识别声呐和导航系统3个关键功能系统对相应体系不确定性使命任务环境的平均可用性和平均动态适应性.

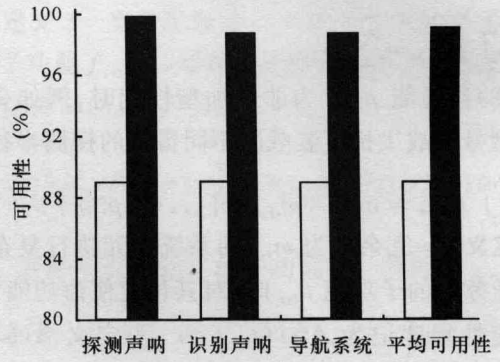


图1 反水雷作战体系冗余调度前后的可用性比较

□:调度前,■:调度后.

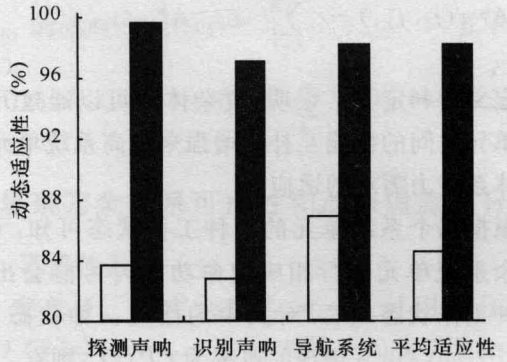


图2 反水雷作战体系冗余调度前后的动态适应性比较

□:调度前,■:调度后.

#### 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] Zhang S B, Huang J C, Zhang W M ,et al. Research on parallel decision analyzing for complex system of systems [C]. International Conference of Machine Learning and Cybernetics, Dalian, China, 2006:1812-1817.
- [3] 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: 603-611.
- [4] Moffat J. Complexity theory and network centric warfare[M]. UK, London :Information age Transformation series, 2003.
- [5] 修保新. C2 组织结构设计方法及其鲁棒性、适应性分析[D]. 国防科技大学博士学位论文,2006.
- [6] 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.
- [7] Benedict J R. Final report: long-term mine reconnaissance system (LMRS) cost and operational effectiveness analysis (COEA) [R]. Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory Report, NWA-96-009, 1996.

(责任编辑:尹 闯)