

## 计及技术风险的复杂系统多分辨率风险评估方法\*

徐一帆,吕建伟,谢宗仁,王广强

(海军工程大学管理工程与装备经济系,湖北武汉 430033)

**摘要:**针对技术风险难以直接度量、模型参数设定主观性较强等问题,利用技术成熟度的规范化方法评估系统组成的技术实现条件和难度;通过矩阵化的系统描述及关联关系推理,建立各分系统技术成熟度与系统过程模型动态参数之间的量化关系;采用系统过程建模仿真的间接方法,计算进度或费用超出可承受范围的不确定性,用以评估复杂系统研制的技术风险。通过多分辨率建模方法提高系统分析粒度,使该方法具有随系统演化过程对技术风险评估保持更新和分析粒度提升的能力。

**关键词:**风险分析;技术风险;多分辨率建模;设计结构矩阵;复杂系统

**中图分类号:**C931.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)05-161-10

## Multi-resolution risk assessment for complex system including technical risk

XU Yifan, LYU Jianwei, XIE Zongren, WANG Guangqiang

(Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to deal with the difficulty of technical risk direct measurement and the strong subjectivity for model parameter setting, the TRL (technology readiness level) as a standard method, was applied for evaluating the condition and the difficulty of technology realization. The quantitative relations were built by system representation with matrix and relation inference between the TRLs of all subsystems and the dynamic parameters of system process model. Then the uncertainties of schedule and cost beyond tolerable range were evaluated by the indirect method of system process modeling and simulation for the technical risk assessment of complex system development. Additionally, to improve the system resolution for analysis, the multi-resolution modeling method is designed to update the assessment continuously and to improve the analytical resolution along with system evolution.

**Key words:** risk analysis; technical risk; multi-resolution modeling; design structure matrix; complex system

对于大型武器装备等复杂系统而言,风险组成通常包括费用、进度、技术和计划四大类风险。其中,主要考虑费用、进度和技术风险。前两项是研究较为全面深入、研究成果最为丰富的风险领域。然而从本质上看,技术风险是在复杂系统研制中起决定性作用的风险成分,是其风险演化过程的分析重点和难点。进度和费用方面的风险事件往往有深层次的技术风险问题。合理准确地量化评估技术风险在风险分析和管控中富有挑战性和研究价值。

在各类文献中,技术风险的称谓和定义不尽相同,存在技术风险(technical risk)、性能风险(performance risk)甚至技术性能风险(technical performance risk)等相近称谓。相关研究还探讨了技术风险、性能风险内涵的联系和区别<sup>[1]</sup>。在

不引起歧义的情况下,本文中技术风险界定为在规定时间内、在一定经费保障条件下目标系统未能达到预期要求的不确定性及其后果<sup>[2]</sup>。除经验研究外<sup>[3]</sup>,相关研究主要采用以下三种技术途径。一是指标等级量化的评估方法:其中一类是基于技术性能指标的等级评估方法,在关键性能参数(Key Performance Parameters, KPP)、有效性度量(Measures Of Effectiveness, MOE)、匹配性度量(Measures Of Suitability, MOS)等指标<sup>[1]</sup>基础上,评估系统达到技术性能要求的实现程度;另一类是应用广泛的技术成熟度方法<sup>[4]</sup>,将技术性能指标与技术实现难度和成熟条件联系起来,并划分为若干等级。在技术成熟度基础上,还发展出集成成熟度、系统成熟度,以及全寿命期其他阶段的制造成熟度、使用成熟度等。二是基于概率分

\* 收稿日期:2017-08-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71401171);装备发展部装备预研基金资助项目(6140002050101)

作者简介:徐一帆(1981—),男,湖北武汉人,讲师,博士,E-mail: boat\_xu@nudt.edu.cn

析的方法,主要采用故障树分析与失效模式影响分析<sup>[5]</sup>、概率风险评估<sup>[6]</sup>、贝叶斯网络分析<sup>[7]</sup>等,往往从系统结构分解、功能实现、因果关联的角度通过概率模型,分析和评估技术风险事件的概率及影响后果。三是基于仿真的方法,采用蒙特卡洛仿真<sup>[1]</sup>、图示评审技术<sup>[8]</sup>、Petri 网<sup>[9]</sup>、系统动力学<sup>[10]</sup>等方法构建系统过程模型,在设定进度费用约束、任务成功率等条件下,通过随机性仿真评估系统研制的成功概率。

综合来看,前两种方法是从定义出发的直接评估,第三种方法则采用间接途径。基于技术性能指标,虽具有详细成熟的评估实施规范,但难以避免较强的主观性。而且技术成熟度并不等同于风险,未将技术性能指标与技术风险的概率及后果直观地联系起来。基于概率分析的方法主要适用于系统局部或底层结构,对掌握系统构成、技术功能原理的要求较高。尤其对于复杂系统,系统全局或综合层次的技术风险建模难度较大。基于仿真的方法是复杂系统分析的有力工具,也是近年来相关研究采用的主流途径。然而系统过程模型中,与技术成熟度相关的关键动态参数估计方法较少,系统过程模型与系统结构之间往往缺乏联系。系统发展演化过程中,系统组成粒度细化对过程模型提供的信息也未能利用和详加考察。

结合上述方法的优缺点,本文建立一种复杂系统技术风险评估方法,并具有随系统演化过程对技术风险评估保持更新和分析粒度提升的能力。采用系统过程建模仿真的总体框架,利用技术成熟度的规范化方法评估系统组成的技术实现条件和难度,通过矩阵化的系统描述及关联关系推理,建立各分系统技术成熟度与系统过程模型动态参数之间的量化关系,进而根据仿真结果的进度、费用情况评估技术风险。

## 1 基于设计结构矩阵的复杂系统多分辨建模

### 1.1 系统结构建模及过程建模

#### 1.1.1 结构建模

设计结构矩阵 (Design Structure Matrix, DSM) 是一个  $n$  维方阵。DSM 中矩阵元素表示其所在行和列对应系统对象之间,存在关联关系。为了描述方便和直观,以某型舰船举例说明。该舰船总体由 10 个分系统及分段组成(以下均简称为分系统),每个分系统对应 DSM 的行和列。图 1 中标有“1”的矩阵元素表示所在列对应分系统对所在行对应分系统施加特定的关联影响,其

他空缺的矩阵元素(包括对角线元素)均为 0。由于篇幅所限,省略了判定分系统之间关联关系的详细分析,系统 DSM 如图 1 所示,采用 0-1 的二值表示。

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10
S01	1									
S02	1	1								
S03		1	1					1		
S04			1	1					1	
S05			1	1	1					
S06				1	1	1				
S07					1	1	1		1	1
S08						1	1	1		1
S09								1	1	1
S10									1	1

图 1 系统 DSM

Fig. 1 System DSM

#### 1.1.2 过程建模

DSM 除了可以表示系统静态的结构性关系,还可以描述系统过程的动态模型。以舰船设计为例,由概念、需求出发,划分为方案设计、技术设计、施工设计等若干阶段。以方案设计为例,采用 DSM 模型,各项任务及其关联关系如图 2 所示。

	101	102	201	202	301	302	303	401	402	403	501	502	503	504	505	601	602	701	702	703	704	705	706	
101 分析研制任务书	1																							
102 研制规划	1	1																						
201 平台系统布置规划		1	1																					
202 舰艇系统布置规划		1	1	1																				
301 排水量分析计算			1	1	1	1																		
302 主尺度分析计算			1	1	1	1	1																	
303 舰型系数分析计算			1	1	1	1	1	1																
401 中剖线设计				1	1	1	1	1	1															
402 首艉型线设计				1	1	1	1	1	1	1														
403 舷侧线设计				1	1	1	1	1	1	1	1													
501 航行性能分析					1	1	1	1	1	1	1													
502 排水量分析					1	1	1	1	1	1	1	1												
503 重量重心分析					1	1	1	1	1	1	1	1												
504 稳性分析					1	1	1	1	1	1	1	1												
505 结构强度分析						1	1	1	1	1	1	1												
601 强度方案优化						1	1	1	1	1	1	1												
602 方案评价						1	1	1	1	1	1	1												
701 功能区域划分							1	1	1	1	1	1												
702 重要检查布置							1	1	1	1	1	1												
703 舰艇布置布置							1	1	1	1	1	1												
704 舰艇布置布置							1	1	1	1	1	1												
705 主要结构面结构设计							1	1	1	1	1	1												
706 总体建造方案设计							1	1	1	1	1	1												

图 2 舰船方案设计流程 DSM

Fig. 2 Warship scheme design DSM

#### 1.1.3 集成建模与关联推理

除了系统结构、过程内在的关联关系,结构与过程之间也存在特定关联。识别这些关联,需要对系统结构与过程模型进行集成,可通过 DSM 的衍生矩阵获得。域映射矩阵 (Domain Mapping Matrix, DMM)、多域矩阵 (Multiple Domain Matrix, MDM) 可将系统研制涉及的不同领域要素联系起来进行整体描述<sup>[11]</sup>。DMM 的行与列对应不同视域中的系统对象。与 DSM 相似, DMM 的矩阵元素表示所在列对应对象对所在行对应对象施加影响。以某型舰船设计为例,系统组成、各项任务分别对应 DMM 的行和列,如图 3 所示。

DMM 标记为“1”的矩阵元素表示相应任务负责相应分系统的全部或部分设计工作。分系统可能由多项任务共同完成,而某项任务也可能对多个分系统的设计工作都有贡献。将不同视域的多个 DSM 与 DMM 组合起来,可得到多域矩阵,如图 4 所示。

DSM 和 DMM 是多域矩阵的分块矩阵,其中  $DSM_s$  和  $DSM_T$  分别表示系统结构 DSM 和过

	T101	T102	T201	T301	T303	T401	T402	T403	T501	T502	T503	T504	T505	T601	T602	T701	T702	T703	T704	T705	T706	
S01																						
S02				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							1
S03				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							1
S04				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
S05																						1
S06																						1
S07																						1
S08				1																		1
S09																						1
S10																						1

图 3 域映射矩阵 DMM

Fig. 3 Domain mapping matrix DMM

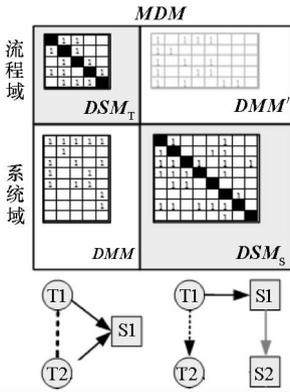


图 4 多域矩阵及关联推理

Fig. 4 Multiple domain matrix and relation inference

程 DSM,  $DMM$  和  $DMM'$  分别表示过程到结构的  $DMM$  及其转置矩阵。

在诸如舰船等复杂系统研制设计中,任务的产出是相应分系统的完整或局部设计成果。通过不同任务所涉分系统之间的关联关系,可以推导这些任务存在特定关联。这种关联主要有两种类型,如图 4 所示。类型一:当任务 T1 和 T2 均对分系统 S1 的设计构成影响时,则 T1 和 T2 存在关联。类型二:当任务 T1 和 T2 分别对分系统 S1 和 S2 的设计构成影响,且 S1 对 S2 存在关联影响,则 T1 和 T2 存在关联。以矩阵运算的表达方式,关联推理过程如下:

$$P_1 = DMM' \otimes DMM \quad (1)$$

$$P_2 = DMM' \otimes DSM_S \otimes DMM \quad (2)$$

$$P = P_1 \oplus P_2 = DMM' \otimes (DSM_S \oplus I) \otimes DMM \quad (3)$$

其中,  $P_1$  和  $P_2$  分别为任务之间两类关联关系矩阵,  $P$  为总的关联关系矩阵,  $I$  为对角线元素为 1、其余均为 0 的单位矩阵,  $\oplus$  和  $\otimes$  分别表示矩阵逻辑乘、逻辑和运算。具体而言,当  $Z = X \oplus Y$  时,按式(4)计算矩阵元素;当  $Z = X \otimes Y$  时,按式(5)计算矩阵元素。  $\wedge$  和  $\vee$  分别表示 0-1 矩阵元素的逻辑与和逻辑或运算。

$$z_{ij} = x_{ij} \vee y_{ij} \quad (4)$$

$$z_{ij} = \bigvee_k (x_{ik} \wedge y_{kj}) \quad (5)$$

上述关联关系在复杂系统研制中有其实际含义。对于关联类型一而言,任务 T2 的变更会导致与其共同设计 S1 的任务 T1 可能做出相应的变更和调整;对于关联类型二而言,任务 T1 发生变更会影响 S1 的设计,受 S1 影响的 S2 可能需要相应的变更,进而系统集成的传递影响可能导致任务 T2 也需要做出相应变更和调整。原有的过程 DSM 虽然给出了任务之间的关联关系,但主要是从工作流程、工序的角度加以识别的。上述从系统结构的角度识别和挖掘系统过程的关联关系,将提供具有潜在价值的丰富信息。

### 1.2 系统多分辨率建模

多分辨率建模源于计算科学及仿真领域。所谓“分辨率”,是模型对对象细节描述的详细程度和分析粒度<sup>[12]</sup>。对于复杂系统,多分辨率建模可以描述系统、结构、过程及其关联关系,根据特定的分析需要,提升或降低系统模型分辨率,描述、转化和跟踪建模对象及其关联关系,为建模和分析计算提供便利。以舰船设计为例,随着舰船设计阶段的推进,总体设计要求通过若干关键性能参数贯穿整个设计过程,而设计诸元的规模由小到大,精细程度由粗略到详细。为符合系统不断分解细化、设计要素粒度提升的分析需要,本节将以 DSM 作为实现系统分辨率提升的技术途径,给出系统分辨率提升后的模型扩展方法。

当系统分辨率较低时,逐一根据系统组成之间的关联关系确定 DSM 中  $n^2$  个元素,其工作量相对可控。如果系统分辨率大幅提升,确定  $n^2$  个矩阵元素所需的信息收集和建模工作量将十分庞大和烦琐。但如能合理运用矩阵元素的稀疏性和矩阵运算,则可大幅降低这一工作量。以图 2 为例,DSM 包含 529 项( $23^2$ ),其中仅有 161 项存在关联关系。在较低分辨率 DSM 的基础上,通过矩阵运算可有效降低那些需要明确是否存在关联关系的矩阵元素数量。

如同网格化的图像像素,粗粒度的像素被精细粒度的一组像素代替后,图像的清晰程度得以改善。系统分辨率提升时,DSM 的某一矩阵元素由新的 DSM 替代,如图 5 所示。  $L$  表示原有的低分辨率 DSM,  $L_{lb}$  表示需提升分辨率的系统组成。  $G_{aa}$  表示分辨率提升后的 DSM,  $G_{ab}$  和  $G_{ba}$  表示高分辨率系统组成与其他系统组成之间的关联矩阵。由于构成规模相对较小,确定  $G_{aa}$  内部以及与外部的关联关系相对易于实现,而且  $L$  的 9 个区域中 4 个灰色区域均无须变动。

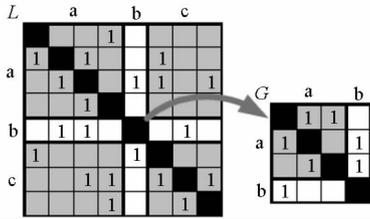


图 5 系统分辨率的提升

Fig. 5 System resolution upgrading

此外,还需要确定是  $L_{ab}$ 、 $L_{ba}$ 、 $L_{bc}$  和  $L_{cb}$  随分辨率提升后如何扩充的问题。将  $G_{aa}$  代替  $L_{bb}$  后,待确认的高分辨率 DSM 如图 6 所示。 $H$  为系统分辨率提升后的 DSM,  $H$  的 9 个区域分别通过矩阵计算,由式(6)~(14)确定。

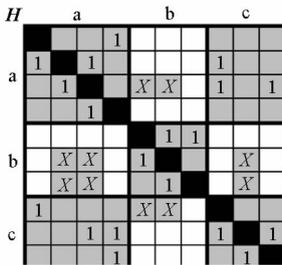


图 6 系统分辨率提升后待确认的 DSM

Fig. 6 Pending DSM after system resolution upgrading

其中,分辨率提升区域为:

$$H_{bb} = G_{aa} \quad (6)$$

分辨率提升后待确认区域为:

$$H_{ab} = L_{ab} \otimes G_{ba} \quad (7)$$

$$H_{ba} = G_{ab} \otimes L_{ba} \quad (8)$$

$$H_{bc} = G_{ab} \otimes L_{bc} \quad (9)$$

$$H_{cb} = L_{cb} \otimes G_{ba} \quad (10)$$

不变区域为:

$$H_{aa} = L_{aa} \quad (11)$$

$$H_{ac} = L_{ac} \quad (12)$$

$$H_{ca} = L_{ca} \quad (13)$$

$$H_{cc} = L_{cc} \quad (14)$$

$H$  中“X”表示待确认是否存在关联关系的矩阵元素,而其他矩阵元素则无须考察,从而进一步缩小建模工作的考察范围。假设经由信息收集、专家意见或专业领域相关知识的确认,标有“X”的矩阵元素有部分存在关联关系,系统分辨率提升后最终确认的 DSM 如图 7 所示。

## 2 基于设计结构矩阵的系统成熟度

### 2.1 技术成熟度与集成成熟度

技术成熟度等级 (Technology Readiness Level, TRL) 是对特定技术成熟程度进行度量和

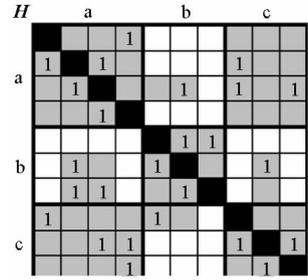


图 7 系统分辨率提升后确认的 DSM

Fig. 7 Determined DSM after system resolution upgrading  
评测的一种标准和尺度,是对技术达到预期目标符合程度的一种度量标准<sup>[4]</sup>,通常分为 9 级<sup>[4]</sup>,如表 1 所示。

表 1 技术成熟度等级标准

Tab. 1 Technology readiness levels

TRL	定义
1	发现技术基本原理或见于报道
2	阐明技术概念和用途
3	验证技术概念的关键功能和特性
4	在实验室环境下完成基础部件/原理样机验证
5	在相关环境下完成部件/原理样机验证
6	在相关环境下完成系统/分系统模型或样机验证
7	在使用环境下完成系统样机验证
8	完成实际系统试验验证
9	完成实际系统使用验证

技术成熟度最初用于单项技术评估,对于复杂系统需使用集成成熟度等级 (Integration Readiness Level, IRL) 评价各分系统之间的集成匹配程度<sup>[13]</sup>,用于评估系统集成状态,综合考虑集成中接口、标准等物理属性,以及各关键技术之间相互作用的匹配兼容和一致性要求。集成成熟度分为 9 级<sup>[13]</sup>,如表 2 所示。

表 2 集成成熟度等级标准

Tab. 2 Integration readiness levels

IRL	定义
1	技术之间的接口已经明确,并能描述细节特征
2	通过接口描述技术之间相互作用的关系
3	技术之间有兼容性,可有序有效集成及相互作用
4	技术之间有足够的详细信息以确保集成质量
5	具有建立、管理和终止所需技术集成的控制机制
6	集成技术能按既定规则接收、解释和构建信息
7	有充分细节验证和确认技术集成具有可行性
8	完成集成并在典型环境下进行了试验验证
9	集成通过实际实施获得验证

## 2.2 系统成熟度

传统方法是将各分系统技术成熟度和集成成熟度按照系统构成综合起来,得到总的评估结果。这种评估结果存在两方面不足:一是单一的综合评估值仅为静态等级,与表征系统研制代价的进度、费用及研制成败不确定性没有直观的联系;二是得到了系统总体的综合评估,但损失了分系统的局部情况,实际上少数成熟度过低的分系统往往在很大程度上会导致研制失败。

本节将各分系统的技术成熟度以及存在集成关系的分系统之间的集成成熟度,以 DSM 的形式集中清晰地加以描述,如图 8 所示。分系统技术成熟度在矩阵的顶端和左侧列出,分系统之间的集成成熟度在 DSM 中列出,颜色越深表明成熟度越低,越有可能成为技术层面的风险源。

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10
	6	6	8	9	6	6	9	9	7	6
S01	6	9								
S02	6	6	9	6						
S03	8		6	9				8		
S04	9			9	7				7	
S05	6	7		6	9	7				
S06	6	7		6		9		6		
S07	9			9	6		9		7	6
S08	9				7	6	9	9		6
S09	7						7		9	6
S10	6		6				6			9

图 8 系统技术成熟度及集成成熟度矩阵

Fig. 8 System TRL & IRL matrix

分系统技术成熟度及相互间集成成熟度综合后得到新的 DSM,称其为系统成熟度矩阵  $DSM_R$ 。矩阵元素  $r_{ij}$  由式(15)计算得到。

$$r_{ij} = TRL_i \cdot TRL_j \cdot IRL_{ij} \quad (15)$$

其中,  $TRL_i$ 、 $TRL_j$  分别为分系统  $i$ 、 $j$  的技术成熟度,  $IRL_{ij}$  为分系统  $i$  与  $j$  之间的集成成熟度。系统成熟度矩阵  $DSM_R$  如图 9 所示,颜色越深表明成熟度越低。

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10
	6	324	8	9	6	6	9	9	7	6
S01	6	324								
S02	6	216	324	324						
S03	8		288	576					576	
S04	9			729	378				441	
S05	6	252		288	324	252				
S06	6	252		324		324		324		
S07	9			729	324		729		441	324
S08	9				378	324	729	729		324
S09	7						441		441	252
S10	6		288				324			324

图 9 系统成熟度矩阵  $DSM_R$

Fig. 9 System readiness matrix  $DSM_R$

## 3 系统仿真建模

### 3.1 任务执行关系

当某任务所需的前导任务均已完成时,该任务方可开始执行。从 DSM 的角度来看,对该任务施加影响的所有任务均已完成时(有时也可以是任务达到某指定的完工率,本文均按照任务完成为准),该任务开始执行。

具有耦合关系的任务之间存在相互交织的影响关系。在设计过程中,某项任务的过程输出或完成结果会影响另一项任务的执行,引起返工、调整甚至重新执行。原本受影响的任务也会反过来成为施加影响的任务,引起进一步的返工和调整。具体而言,发生返工的情况有两类:前馈型返工和反馈型返工。后者是由于排序靠后的任务完成后,需要修改、调整或重新执行排序靠前的任务而引起返工。前者则是由于反馈型返工发生之后,排序靠前的任务完成了返工任务,进而再次修改、调整或重新执行下游任务而引起的继发性返工。这些返工均以一定概率发生。

### 3.2 任务用时与费用

每项任务开始执行后,有其相应的完成时间,完成时间反映任务的工作量。本文采用三角分布随机数描述任务执行的持续时间,通过最乐观时间  $t_o$ 、最可能时间  $t_m$  和最悲观时间  $t_p$  确定随机数的分布。某项任务执行持续时间的概率分布函数  $f(t)$  如下所示:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{2(t-t_o)}{(t_p-t_o)(t_m-t_o)} & t_o \leq t \leq t_m \\ \frac{2(t_p-t)}{(t_p-t_o)(t_m-t_o)} & t_m \leq t \leq t_p \end{cases} \quad (16)$$

某项任务的完成费用 ( $C$ ) 为固定费用 ( $C_f$ )、人工费用 ( $C_m$ ) 和变动费用 ( $C_v$ ) 之和,即:

$$C = C_f + (C_m + C_v) \cdot t \quad (17)$$

### 3.3 基于系统成熟度的返工概率与返工量

#### 3.3.1 返工概率

返工概率矩阵  $Q$  以过程模型  $DSM_T$  (如图 2 所示)为基础。 $DSM_T$  中为“0”的矩阵元素由于不存在任务间的关联,因而返工概率为 0。对于  $DSM_T$  中为“1”的矩阵元素,需结合 1.1.3 节关联推理和 2.2 节系统成熟度进行计算,如式(18)所示。

$$R = DMM' \otimes DSM_R \otimes DMM \quad (18)$$

与式(3)进行类比,  $DSM_R$  对角线元素非零,与式(3)中的  $DSM_S \oplus I$  相对应。 $R$  矩阵元素既包含

了技术成熟度、集成成熟度,又涵盖了系统结构、过程之间的关联关系。由于  $DSM_R$  不同于 0-1 组成的二值矩阵  $DSM_S$ ,  $\otimes$  运算规则可类比定义为,当  $Z = X \otimes Y$  时按式(19)计算矩阵元素:

$$z_{ij} = \min_k (x_{ik} \cdot y_{kj}) \quad (19)$$

其中,  $\min(\cdot)$  表示关联程度依据所涉分系统技术成熟度、集成成熟度综合值的最低水平计算。

通常,成熟度越高,返工概率越低。最简单的方法是以线性函数建立成熟度与返工概率的关系。这里采用指数函数:在成熟度较低时,随成熟度降低,返工概率加速上升;在成熟度较高时,随成熟度提高,返工概率减缓降低。任务  $j$  触发任务  $i$  返工,返工概率如式(20)所示。

$$q_{ij} = \exp(-\alpha \cdot r_{ij}) + \beta \quad (20)$$

其中,  $q_{ij}$  为返工概率,  $r_{ij}$  为式(18)中  $R$  矩阵的对应元素,  $\alpha, \beta$  为参数。设定成熟度为 0 时,返工概率为 1;成熟度为 729 (最大可能值 93) 时,返工概率为基本返工率 0.1 (即无技术风险情况下仍有部分工作存在调整和返工的可能,可根据具体情况设定)。根据上述设定,确定参数后的函数为:

$$q_{ij} = \exp(-0.00316r_{ij}) \quad (21)$$

总结返工概率确定过程,返工概率矩阵  $Q$  的矩阵元素  $q_{ij}$  按下列三种方式设定:当  $DSM_T$  和关联关系矩阵  $P$  第  $i$  行、第  $j$  列矩阵元素均为 1 时,返工概率由式(21)计算;当  $DSM_T$  第  $i$  行、第  $j$  列矩阵元素为 1、而在  $P$  中为 0 时,返工概率  $q_{ij}$  设为基本返工概率 0.1;除此之外,  $q_{ij}$  均为 0。

### 3.3.2 返工量

如果任务  $j$  触发任务  $i$  返工,表明任务  $j$  所涉分系统的设计发生变更或调整。通过分系统之间的关联关系,将变更影响传递到涉及相同分系统的任务  $i$ ,导致任务  $i$  需做相应程度的返工。这一关联传递影响已在 1.1 节关联推理中给出推导过程。可由任务  $j$  与任务  $i$  共同涉及的分系统数量在任务  $i$  所涉分系统总数的占比,来估算任务  $i$  的返工量,如式(23)所示。该占比乘以对应任务用时,即可得到该任务具体的返工任务量。

$$V = [v_{ij}]_{n \times n} \quad (22)$$

$$v_{ij} = \frac{\text{任务 } j \text{ 与任务 } i \text{ 共同涉及的分系统数量}}{\text{任务 } i \text{ 所涉分系统总数}} \times 100\%$$

$$= \frac{N[\Omega(DMM_i) \cap \Omega(DMM_j)]}{N[\Omega(DMM_i)]} \times 100\% \quad (23)$$

其中,  $V$  为返工量矩阵,  $n$  为任务数,  $v_{ij}$  为任务  $j$  触

发任务  $i$  的返工量,  $DMM_i$  和  $DMM_j$  表示域映射矩阵  $DMM$  (如图 3 所示) 的第  $i$  列和第  $j$  列,  $\Omega(\cdot)$  表示  $DMM$  某列向量中任务所涉分系统的集合,  $N(\cdot)$  表示集合中元素的数量。如根据工作量设置分系统权重,以该占比估计返工量将更为准确。

为了模拟在现实中认识深入、经验积累的渐进过程,这里引入学习因子  $\theta (0 < \theta < 1)$ 。当任务  $j$  触发任务  $i$  返工时,返工量为上一次返工量与学习因子的乘积,如式(24)所示。

$$v_{ij}^{k+1} = \theta \cdot v_{ij}^k = \theta^k \cdot v_{ij} \quad (24)$$

其中,  $k$  表示任务  $j$  第  $k$  次触发任务  $i$  返工。

### 3.4 仿真流程

根据  $DSM_T$  给出的任务执行顺序和交互影响,触发后续任务。其中触发任务有三种类型:按序触发、触发前馈返工和触发反馈返工。按序触发是满足  $DSM_T$  的任务执行关系后,便开启的新任务。而两类反馈型触发应按返工概率、随机触发任务返工。仿真流程如图 10 所示。

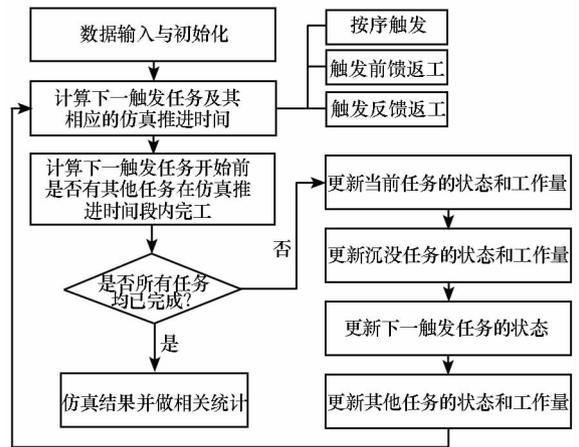


图 10 仿真流程

Fig. 10 Simulation process

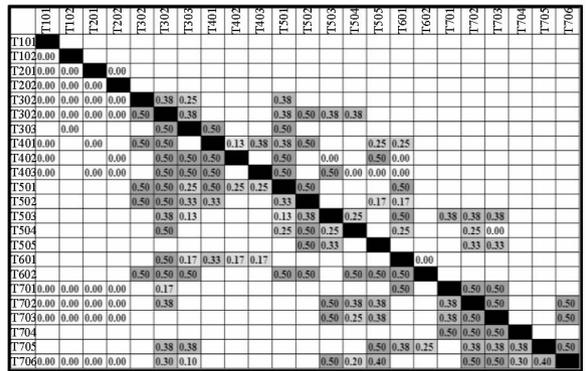
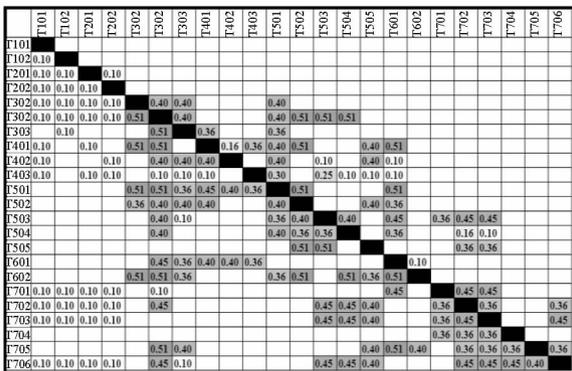
## 4 仿真结果及分析

算例以舰船研制设计为研究对象。系统结构  $DSM$ 、过程  $DSM$  及其之间的域映射矩阵  $DMM$  在前面的建模过程中已作为示例列出 (详见图 1 ~ 3)。设计流程中各项任务的用时及费用数据如表 3 所示。

算例 1: 由图 9 所示系统成熟度矩阵, 计算返工概率及返工量矩阵, 如图 11 所示。

表3 各项任务用时与费用  
Tab.3 Task schedule and cost list

任务编号	任务名称	最乐观时间	最可能时间	最悲观时间	固定费用	人工费用	变动费用
		$t_o$ /周	$t_m$ /周	$t_p$ /周	$C_f$ /万元	$C_m$ /(万元/周)	$C_v$ /(万元/周)
T101	分析研制任务书	1.50	2.00	2.50	2.00	0.50	2.00
T102	母型舰选取	0.50	1.00	1.50	1.00	0.50	2.00
T201	平台系统布置规划	0.50	1.00	1.50	1.00	0.50	2.00
T202	载荷系统布置规划	1.50	2.00	2.50	2.00	0.50	2.00
T301	排水量分析计算	0.60	1.00	1.40	4.00	1.50	3.00
T302	主尺度分析计算	1.70	2.50	3.30	6.00	1.50	3.00
T303	船型系数分析计算	1.70	2.50	3.30	5.00	1.50	3.00
T401	中部型线设计	2.40	3.00	3.60	6.00	2.00	3.00
T402	首部型线设计	0.80	1.00	1.20	3.00	2.00	3.00
T403	尾部型线设计	0.80	1.00	1.20	3.00	2.00	3.00
T501	航行性能分析	0.80	1.20	1.60	4.00	2.00	5.00
T502	排水量分析	0.80	1.20	1.60	5.00	2.00	5.00
T503	重量重心分析	0.80	1.20	1.60	5.00	2.00	5.00
T504	完整稳性分析	0.80	1.20	1.60	4.00	2.00	5.00
T505	结构强度分析	0.80	1.20	1.60	5.00	2.00	5.00
T601	型线方案优化	1.20	2.00	2.80	2.00	1.00	2.00
T602	裕量设计	0.80	1.00	1.20	1.00	1.00	2.00
T701	功能区域划分	1.00	1.50	2.00	2.00	1.00	3.00
T702	重要舱室布置	2.00	2.50	3.00	4.00	1.00	3.00
T703	舰面设施布置	1.00	1.50	2.00	3.00	1.00	3.00
T704	制作总布置图	1.00	1.50	2.00	4.00	1.00	3.00
T705	主要横剖面结构设计	1.00	1.50	2.00	4.00	1.00	3.00
T706	总体建筑造型设计	1.00	1.50	2.00	4.00	1.00	3.00



(a) 返工概率矩阵  
(a) Rework probabilities matrix

(b) 返工量矩阵  
(b) Amount of rework matrix

图11 返工概率及返工量矩阵

Fig.11 Probabilities and amount of rework matrix

算例 2: 由于技术风险难以直接量化, 可通过不同系统成熟度条件下进度、费用的差距进行比较。假设系统研制设计的技术难度低, 系统技术成熟度及集成成熟度矩阵如图 12 所示, 由此得到的返工概率矩阵如图 13 所示。返工量由 DMM 确定, 此时 DMM 没有发生变化, 返工量矩阵不变, 可参见图 11(b)。

		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10
		7	8	8	9	8	7	9	9	8	8
S01	7	9									
S02	8	7	9		8						
S03	8		8	9					9		
S04	9				9	8				8	
S05	8	8		8		9	8				
S06	7	7			8		9	7			
S07	9				9	8		9		8	8
S08	9				8	7	8	9			8
S09	8							8		9	8
S10	8		8					8			9

图 12 低技术风险下技术成熟度及集成成熟度矩阵  
Fig. 12 TRL & IRL matrix under low technical risk

	T101	T102	T201	T202	T301	T302	T401	T402	T501	T502	T503	T504	T601	T602	T701	T702	T703	T704	T705	T706	
T101																					
T102	0.10																				
T201	0.10	0.10																			
T202	0.10	0.10	0.10																		
T301	0.10	0.10	0.10	0.10																	
T302	0.10	0.10	0.10	0.10	0.25	0.20				0.20											
T401	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20				0.20	0.29	0.29									
T402	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.20			0.20	0.29	0.29									
T501	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T502	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T503	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T504	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T601	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T602	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T701	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T702	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T703	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T704	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T705	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									
T706	0.10	0.10	0.10	0.10	0.29	0.20	0.29	0.20	0.20	0.20	0.29	0.29									

图 13 低技术风险下返工概率矩阵

Fig. 13 Rework probability matrix of low technical risk

算例 3: 提升系统分辨率能够更详细地描述系统结构、过程中的关联关系及其关联影响程度。随着系统发展的推进, 系统组成的详细程度更加清晰具体, 技术成熟度也会更为明确或得到修正。因此, 在更高的系统分辨率下评估技术风险, 将更具优势和潜力。以算例 1 的数据为基础, 按 1.2 节方法提升系统分辨率后, DMM 如图 14 所示。系统结构 DSM、技术成熟度与集成成熟度矩阵如图 15 所示, 返工概率及返工量矩阵如图 16 所示。

图 17 显示了不同算例仿真结果分布情况, 表 4 列出了不同算例的进度及费用平均值, 表 5 列出了超出设定风险阈值的概率。

综合各算例仿真结果可得下列结论:

1) 进度、费用的分布区域反映了风险水平: 算例 2 中系统各项技术成熟度高, 样本点趋向于进度、费用相对较低的分布区域, 表明当系统处于技术成熟度高、技术难度小的情况下, 系统趋于进

图 14 系统分辨率提升后的 DMM

Fig. 14 DMM after system resolution upgrading

(a) 系统结构 DSM

(a) System structural DSM

(b) 系统技术成熟度及集成成熟度矩阵

(b) System TRL & IRL matrix

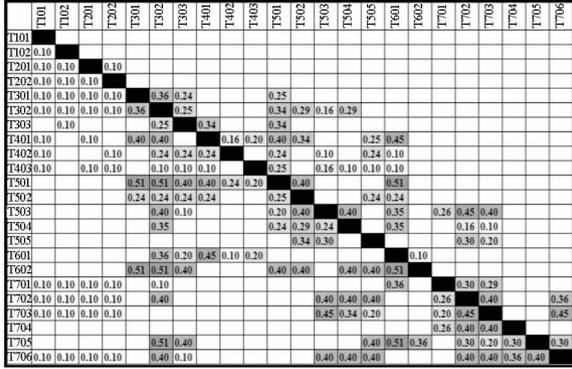
图 15 系统分辨率提升后的结构 DSM 及成熟度矩阵  
Fig. 15 System structural DSM and TRL & IRL matrix after system resolution upgrading

度、费用相对较低的低风险区。

2) 技术风险的相对度量: 技术风险虽难以直接量化, 但通过不同算例进度、费用统计差异可间接度量技术风险。例如算例 1 与算例 2, 如果以算例 2 对应系统为基准, 算例 1 的系统研制将由于

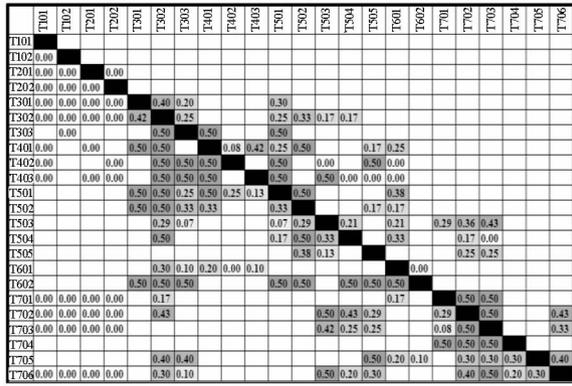
技术成熟度差异,面临约 1.5 周、185 万元的技术风险期望值。

超出可承受范围的概率(如表 5 所示),从而据此选择方案、对重要节点做出决策、制定和采取风险控制措施等。



(a) 返工概率矩阵

(a) Rework probabilities matrix



(b) 返工量矩阵

(b) Amount of rework matrix

图 16 系统分辨率提升后的返工概率及返工量矩阵

Fig. 16 Probabilities and amount of rework matrix after system resolution upgrading

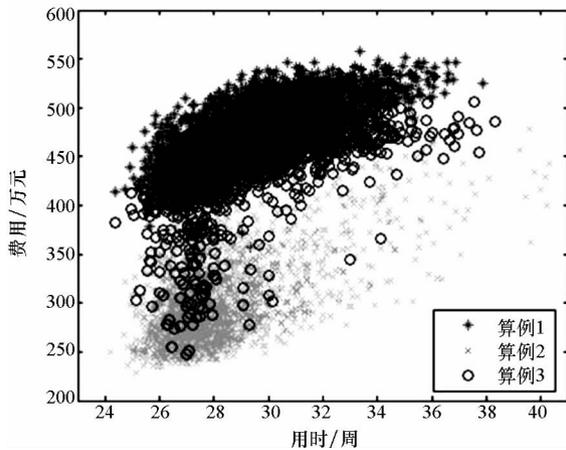


图 17 不同算例的进度与费用仿真结果分布

Fig. 17 Simulation distributions of schedule and cost indifferent cases

表 4 不同算例的进度及费用平均值

Tab. 4 Average schedule and cost in cases

	算例 1	算例 2	算例 3
进度平均值/周	29.83	28.28	29.43
费用平均值/万元	488.10	303.04	443.90

表 5 进度及费用超出阈值的概率

Tab. 5 Probabilities of beyond schedule and cost thresholds

进度阈值/ 周	费用阈值/ 万元	超出阈值的概率/%		
		算例 1	算例 2	算例 3
32	460	81.21	7.49	10.07
30	450	89.21	15.77	31.87

4) 系统分辨率的提高有助于技术风险的准确评估:算例 3 是算例 1 在系统经历相应研发,下级系统的构成、技术细节、成熟度条件获得进一步明确和发展之后系统分辨率更高的模型仿真结果。相对于系统分辨率较低的算例 1,系统成熟度的构成和等级得到粒度更高的精细化评价和修正,进而风险评估值也得以修正。

### 5 结论

本文采用系统过程建模仿真的间接途径研究大型装备等复杂系统研制的技术风险。应用技术成熟度评估底层系统技术实现难度,采用矩阵化的系统结构模型集成系统成熟度,并通过关联关系推理将系统组成的技术成熟度与系统过程建立内在联系,降低了返工概率、返工量等仿真动态参数设置的主观性,将系统研制的技术难度和潜在风险通过过程模型的返工概率、返工量等动态参数得以体现。此外,通过建立多分辨率建模方法,实现了随系统演化过程对技术风险评估保持更新和分析粒度的提升。

### 参考文献 (References)

[1] Lewis T L. Quantitative approach to technical performance measurement and technical risk analysis utilizing Bayesian methods and Monte Carlo simulation [D]. USA: George Washington University, 2010.

[2] 吕建伟,刘中华,杨建军,等. 大型海军舰船研制技术风险综合评估的一种结构化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(10): 2339-2344.

LYU Jianwei, LIU Zhonghua, YANG Jianjun, et al. A structural approach to assessment of technical risk in major

3) 发生技术风险的概率估计:管理决策人员不需对某项任务设定约束或任务成败概率,只需设定总的进度或费用阈值,即可得到进度或费用

- navy vessel's development [J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2012, 32(10): 2339–2344. (in Chinese)
- [3] Oehmen J, Olechowski A, Kenley C R, et al. Analysis of the effect of risk management practices on the performance of new product development programs [J]. *Technovation*, 2014, 34(8): 441–453.
- [4] Mankins J C. Technology readiness assessments: a retrospective[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9/10): 1216–1223.
- [5] Barends D M, Oldenhof M T, Vredenburg M J, et al. Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA [J]. *Journal of Pharmaceutical & Biomedical Analysis*, 2012, 64/65(4): 82–86.
- [6] Mohaghegh Z, Kazemi R, Mosleh A. Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment (PRA) of complex socio-technical systems: a hybrid technique formalization[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(5): 1000–1018.
- [7] Tzeng S. Management towards success—defense business system acquisition probability of success model[D]. Fairfax, VA, USA: George Mason University, 2015.
- [8] Xu Z, Li H B. Assessing performance risk for complex product development: a simulation-based model [J]. *Quality & Reliability Engineering International*, 2013, 29(2): 267–275.
- [9] Lee A. Petri net modeling of fault analysis for probabilistic risk assessment [D]. Oshawa, Canada: University of Ontario Institute of Technology, 2013.
- [10] Boateng P, Chen Z, Ogunlana S O. Megaproject risk analysis and simulation: a dynamic systems approach [M]. Bingley, UK: Emerald Group Publishing Ltd., 2017.
- [11] Eppinger S D, Browning T R. Design structure matrix methods and applications [M]. Massachusetts, USA: MIT Press Books, 2012.
- [12] Davis P K, Tolk A. Observations on new developments in composability and multi-resolution modeling [C]//Proceeding of Winter Simulation Conference, 2007: 859–870.
- [13] Sausser B, Gove R, Forbes E, et al. Integration maturity metrics; development of an integration readiness level [J]. *Information Knowledge Systems Management*, 2010, 9(1): 17–46.

---

(上接第 152 页)

- [5] Sun Y Z, Norick B, Han J W, et al. Integrating meta-path selection with user-guided object clustering in heterogeneous information networks [C]//Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2012: 1348–1356.
- [6] Yu X, Sun Y Z, Norick B, et al. User guided entity similarity search using meta-path selection in heterogeneous information networks [C]// Proceedings of the 21st ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2012: 2025–2029.
- [7] Sun Y Z, Norick B, Han J W, et al. PathSelClus: integrating meta-path selection with user-guided object clustering in heterogeneous information networks [J]. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 2013, 7(3): 11.
- [8] Kolda T G, Bader B W. Tensor decompositions and applications [J]. *SIAM Review*, 2009, 51(3): 455–500.
- [9] Kolda T G. Multilinear operators for higher-order decompositions; SAND2006–2081 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 2006.
- [10] Tucker L R. Some mathematical notes on three-mode factor analysis [J]. *Psy-chometrika*, 1966, 31(3): 279–311.
- [11] Lee D D, Seung H S. Learning the parts of objects by nonnegative matrix factorization [J]. *Nature*, 1999, 401(6755): 788–791.
- [12] Lee D D, Seung H S. Algorithms for nonnegative matrix factorization [C]//Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems, 2001: 556–562.
- [13] Zhang Z H. The singular value decomposition, applications and beyond [J/OL]. (2015–10–29) [2017–04–28]. <http://arxiv.org/abs/1510.08532v1>.
- [14] Cai D, He X F, Wang S H, et al. Locality preserving nonnegative matrix factorization [C]// Proceeding of International Conference on Artificial Intelligence, 2009: 1010–1015.
- [15] Sun Y Z, Han J W, Yan X F, et al. PathSim: meta path-based top-k similarity search in heterogeneous information networks [J]. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 2011, 4(1): 992–1003.
- [16] Chen J X, Dai W, Sun Y Z, et al. Clustering and ranking in heterogeneous information networks via Gamma-Poisson model [C]// Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining, 2015.