

基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法*

李江, 雷晓刚

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:大型航天研发项目对于社会经济发展和国防安全有着重要影响,是国家重大工程中一类较为特殊的项目,而风险分析是大型航天研发项目按计划、高质量、低成本完成的重要保障。通过分析大型航天研发项目的特点、风险因素以及管理过程,结合 Multi-Agent 以及分布式项目管理的理论和技术,研究和提出了一种新的基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法,在此基础上针对具体项目进行了实验仿真,获取了项目的风险水平和关键风险因素,为航天研发项目风险管理与控制提供决策支持。

关键词:项目管理;风险分析;Multi-Agent;信息处理

中图分类号:F426.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2012)06-0148-05

Risk analysis method of large-scale space development project based on multi-agent technology

LI Jiang, LEI Xiaogang

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Large-scale space development project (LSDP) is a kind of project which possesses some special characteristics and is significant for the social economy development and national security. Risk analysis is an important guarantee to accomplish these projects designed with high quality and low cost. According to the characters, management process and risk factors of the LSDP, using the theory and technology of Multi-Agent and Disturb Project Management, a new risk analysis method of LSDP based on Multi-Agent technology is proposed. It is applied to a large-scale space development project. The risk level of the project is evaluated and the key risk factors are identified. These results can provide decision information for the project risk control and management.

Key words: project management; risk analysis; multi-agent; information process

大型航天研发项目是一个庞大的系统工程,项目风险因素多,相关关系复杂、识别困难,且处在动态的变化之中。对于这类项目,要从纷乱繁杂、日益庞大,而且异地分布的数据源中收集信息,并自动地处理这些信息和进行风险分析是个非常复杂和系统的工作,需要风险分析人员具有很强的风险意识和较高的风险管理技术知识,以及风险分析系统具有较强的模型计算能力和实时的信息收集和处理能力,是风险分析的瓶颈所在。通过分析航天研发项目的风险特征和风险因素之间的关系,结合分布式项目管理的思想,借鉴 Multi-Agent 技术,研究大型航天研发项目新的风险分析方法,并应用于这类项目的风险管理,可使风险分析与评估变得更加科学与准确,为风险管理与控制提供决策支持,满足其风险管理的需要。研究可为大型航天研发项目风险管理提供新的思路与方法指导,具有重要的理论和实际意义。

1 大型航天研发项目的风险特征及其风险因素网络结构模型

1.1 大型航天研发项目的风险特征

大型航天研发项目是一个涉及多学科、多专业的大规模复杂系统工程,具有技术创新性强、投资规模大、研制周期长、研制失败的概率大、参与单位多且分布广、项目管理复杂、质量和可靠性要求高、内外部环境复杂、要求的管理和协调能力高以及对国家影响大等特点,这些特点导致其风险呈现出诸如风险因素多、来源广泛,风险具有多样性和多层次性;风险具有潜在性和动态变化性;风险具有典型的非线性;风险与管理者的行为紧密相关;风险后果严重,风险管理技术复杂等许多鲜明的特征^[1-3]。

* 收稿日期:2012-06-06

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:李江(1964—),男,湖南长沙人,副教授,博士后, E-mail:lijiang@189.cn

1.2 大型航天研发项目的风险因素网络结构

在以往的研究中,更多的是认为项目风险因素之间是独立无关联的,而大型航天研发这类项目的风险因素相互之间的影响是不可忽视的,因此需要一种新的风险分析与评估技术来解决这类项目风险管理中的现实问题。网络层次分析法 (Analytic Network Process, ANP) 是 1996 年美国匹斯堡大学的 T. L. Saaty 教授提出的,它是在层次分析法 (Analytic Hierarchical Process, AHP) 考虑反馈和依赖关系上的延伸^[4-6]。ANP 可以将复杂系统描述得更为深刻,ANP 首先将系统元素划分为两大部分,第一部分为控制因素层,包括问题目标及决策准则,所有的决策准则均被认为是彼此独立,且只受目标元素支配。控制层中可以没有决策准则,但至少有一个目标,控制层中每个准则的权重均用 AHP 方法获得。第二部分为网络层,它是由所有受控制层支配的元素组成,其内部是相互影响的网络结构。

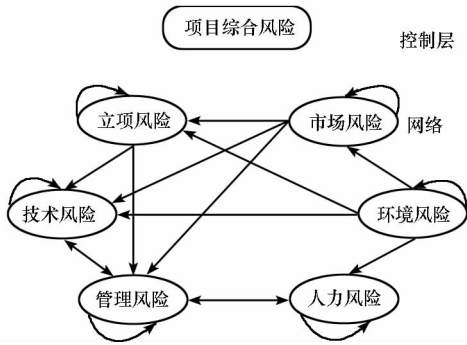


图 1 基于 ANP 的大型航天研发项目的风险因素网络结构模型

Fig. 1 Risk factor network structure model of LSDP based on ANP

作者以 ANP 思想为基础,依据大型航天研发项目的风险特征,通过深入分析大型航天研发项目的风险因素,设计相应的调查问卷和邀请相关领域的专家、项目管理人员和技术人员,对风险因素的结构进行研究,确定大型航天研发项目风险因素以及各因素之间的关系,建立了图 1 所示的大型航天研发项目风险因素网络结构模型。

2 基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析

我国航天项目风险管理经历了两个阶段:第一阶段是 20 世纪 80 年代到 90 年代,主要采用可靠性分析技术,包括可靠性框图 (Reliability Block Diagram, RBD)、故障树 (FTA) 和实效模式及影响分析 (FMEA) 方法进行风险分析;第二阶段是 90

年代后,引入美国 NASA 的概率风险分析 (PRA) 方法,并在此基础上进行改进,提出了 CPRA (Chinese PRA) 方法。CPRA 方法主要包括风险管理人员熟悉项目、初步事件分析、建立集成故障树模型、底事件数据采集、定量评价集成、灵敏度与不确定性分析和技术报告等七个步骤。

当前,随着人们对航天工程风险管理认识的加深,以及相关技术的成熟,航天工程风险分析技术有向综合化、一体化、量化与分布式管理发展的趋势,科学性越来越强。本文提出的基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析法正是一种新的基于分布式项目风险管理、定性与定量相结合的综合化系统风险分析方法。

2.1 大型航天研发项目风险分析与 Multi-Agent 技术

一个大型航天研发项目包含的任务多,项目往往被划分成若干子项目,而且项目的参与单位和人员多、相互制约关系复杂,除了主项目和子项目的关系之外,相同级别的项目任务之间,也存在相互制约的关系。对于这类复杂项目,由于人力、设备等资源的分散、异地分布,项目风险分析必须具有很高的多任务异地分布处理能力和协调能力,需要处理足够数量的任务节点。在分布式环境下,人们工作的群体性、交互性、分布性和协作性将成为研究的重点,开放性和复杂性对这类项目风险分析提出了新的挑战。

Multi-Agent 技术是分布式人工智能研究的一个重要分支,发展迅速,其目标是将较大的复杂系统构造成较小的、彼此相互通信、能协调工作的、易于管理的子系统。Multi-Agent 系统是一个松散耦合的 Agent 网络,由多个可计算的 Agent 组成,其中每个 Agent 使一个物理的或抽象的实体能作用于自身环境,并与其他 Agent 通信^[7-8]。

Multi-Agent 技术为实施分布式项目风险管理模式的大型航天研发项目风险分析的实现提供了新思路。将多 Agent 引入风险分析系统中,智能 Agent 具有独立性、智能性、可移动性,并有很强的协作能力,适合在大型航天研发项目风险管理中辅助管理者进行风险分析,提高风险管理效能。

2.2 基于 Multi-Agent 技术的项目风险分析系统结构模型

大型航天研发项目风险分析是一种支持多成员参与的协作行为,而 Agent 是一个具有通信能力、感知能力和问题求解能力的实体,我们可以

用 Agent 代替在风险分析系统中的各个功能单元,通过系统中各个 Agent 协调合作去求解复杂问题,以实现智能化的风险分析。针对大型航天研发项目的特点,结合分布式项目管理和 Multi-Agent 系统的思想,在对大型航天研发项目风险分析工作原理进行研究的基础上,作者设计给出了如图 2 所示的基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析系统的结构模型。

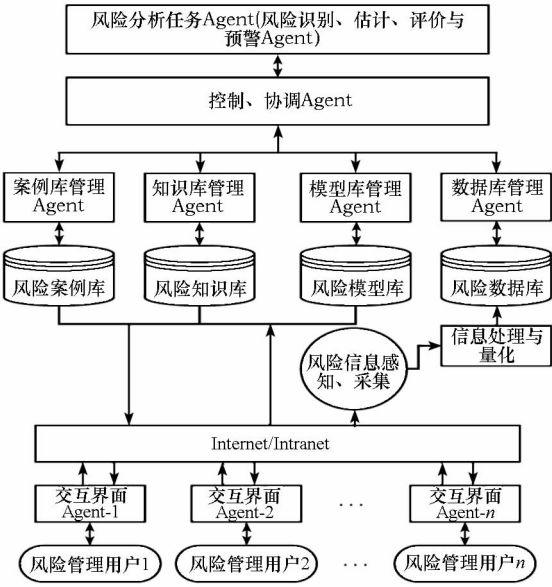


图 2 大型航天研发项目风险分析系统结构模型
Fig. 2 Risk analysis system structure model of LSDP

2.3 基于 Multi-Agent 技术的项目风险分析系统组成及功能

如图 2 所示,基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析系统是一个多层次动态结构,该结构不仅能够很好地分类识别信息,而且能很好地表达风险分析行为,系统主要功能模块:

(1)感知与信息采集。主要是通过各种传感器,获取开展项目活动产生的信息,包括名称信息、项目时间、计划、进度、质量信息、外部环境信息及其他与项目有关信息等。

(2)信息处理及量化。对采集的项目相关信息进行分类处理,从混杂信息中提取出可能导致不良后果的风险因素。通过风险知识库等 Agent 分析各种风险因素对项目产生的影响,并按一定的规则和方法对风险因素信息进行量化处理。

(3)问题求解。针对风险分析任务形成的问题进行求解,由案例库 Agent、知识库 Agent、数据库 Agent、模型库 Agent 等决策资源库 Agent 组成,其可将问题通过多库协同求解得出问题的解。

(4)控制协调。由控制 Agent 和协调 Agent

共同组成,控制 Agent 是负责将问题求解资源层所产生的结果进行综合和评价,以得出问题的解;协调 Agent 通过控制模块来负责各 Agent 之间的信息交换和通信,控制和监督各 Agent 执行任务的情况以及进行任务分配。

(5)任务规约。由风险分析任务 Agent 组成,它将风险任务形成的复杂问题分解为多个 Agent 所能求解的子问题。

(6)对话功能。由多个交互界面 Agent 组成,是风险管理用户与风险分析系统的交互接口。

3 仿真实验与结果分析

3.1 实验结果

以某大型航天研发项目的风险分析工作为背景,结合论文提出的新方法进行了仿真实验,获取了该项目的风险分析结果。实验的主要依据、步骤及结果如下^[9]:

(1)确立风险评价指标及指标之间依赖关系,建立风险知识库、案例库等

以图 1 所示的风险因素网络结构模型为基础,建立风险评价指标体系,确定指标之间的相互影响关系,并建立风险知识库、案例库等。其中确立的该大型航天研发项目风险评价指标体系及指标之间的依赖关系如表 1 所示。

(2)确立风险因素的评价等级

考虑到各种风险因素可能对项目产生的进度、费用和性能的影响,将风险评价集设定为五个评价等级:

$$V = \{ \text{低, 较低, 一般, 较高, 高} \}$$

(3)风险评价指标权重的求解

为了便于求解各个风险指标在项目综合风险中所占的权重,将项目综合风险设置为目标,一级风险指标定义为指标簇(C1—C6),二级风险指标定义为指标节点(S11—S63)。利用专家提供的(风险知识库、案例库、模型库)关于该大型航天研制项目中风险指标之间优势度的判断信息,经计算处理构造出项目综合风险评价指标体系中 6 项评价指标簇之间相对重要度的权矩阵,23 项评价指标的超矩阵。进一步计算可得到评价指标的加权超矩阵和极限超矩阵。其中极限加权超矩阵反映了风险指标体系中各个二级指标对项目综合风险的相对权重,也就是指标权重。实验获得的该大型航天研制项目风险评价指标体系中各指标(23 项二级指标,S11—S63)相对于项目综合风险的权重向量为

表1 某大型航天研发项目风险评价指标体系

Tab.1 Risk evaluate index system of a LSDP

一级指标	二级指标	依赖关系(依赖于)
C1 立项风险	S11 对国内外市场形势估计不充分	S51, S63
	S12 技术可行性论证不充分	C4, C5
	S13 经济合理性论证不充分	
C2 技术风险	S21 预先研究不充分	S31, S32
	S22 设计的不成熟	S12, S21
	S23 工艺技术水平不够	C1, C3
	S24 元器件的可靠性达不到要求	C5, C6
	S25 原材料的质量问题	S21, S22, S23, S25, S26
	S26 设施、设备达不到要求	
	S27 海外依赖性	S51, S61
C3 管理风险	S31 进度计划不合理	S12, S27, S34, S63
	S32 费用预算不合理	S13, S61, S62
	S33 组织结构与项目不匹配	C1, C2, C4, C5
	S34 协调不顺畅	S33, S41, S43
	S35 指挥、控制不力	S33, S41
C4 人力风险	S41 责任心不强	S33, S43
	S42 专业能力不够	C3, C6
	S43 研制队伍流动性大	
C5 环境风险	S51 国内外政治经济军事形势发生较大变化	
	S52 自然风险	S52
C6 市场风险	S61 汇率变化	S51
	S62 通货膨胀率	C5
	S63 市场需求的急剧变化	S51

$W = (0.0611, 0.0859, 0.0078, 0.1677, 0.2721, 0.0167, 0.0391, 0.0087, 0.0095, 0.0155, 0.1185, 0.0295, 0.0106, 0.0390, 0.0152, 0.0293, 0.0130, 0.0087, 0.0245, 0.0061, 0.0046, 0.0027, 0.0144)$

(4) 综合风险分析

综合风险分析由风险分析任务部分的各 Agent 来完成,实验时的具体做法如下:

用可能性、损失和可控性三个维度来描述风险的特征:

$$R = f(P, L, C)$$

$$F.R_{(P)} = \begin{pmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.286 \\ 0.429 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 \\ 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.429 & 0.571 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.429 & 0.286 \\ 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.286 \\ 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.000 \end{pmatrix}^T$$

$$F.R_{(L)} = \begin{pmatrix} 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.143 \\ 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 \\ 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.286 \\ 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.143 & 0.286 \\ 0.143 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.000 \end{pmatrix}^T$$

其中, R —风险, P —风险发生的可能性, L —风险引起的损失, C —风险的可控性。

邀请多位航天研发项目各领域的专家就该大型航天研发项目进行问卷调查,对各个风险因素的每个特征维度进行打分,经处理后得到该项目各个风险因素相应维度上的评价矩阵如下:
其中, $F.R_{(P)}$ —单因素概率评价矩阵, $F.R_{(L)}$ —单因素风险引起的损失评价矩阵, $F.R_{(C)}$ —单因素的可控性评价矩阵, $F.R$ —单因素综合评价矩阵。

$$F.R_{(C)} = \begin{pmatrix} 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.571 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.143 & 0.429 & 0.000 & 0.286 & 0.000 & 0.286 & 0.429 & 0.000 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.000 \\ 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.286 & 0.000 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.286 \\ 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.243 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.286 & 0.286 & 0.286 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.429 \\ 0.143 & 0.286 & 0.286 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.429 & 0.286 & 0.000 & 0.143 & 0.286 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.143 & 0.000 & 0.286 & 0.143 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \end{pmatrix}^T$$

假设风险的三个维度优先关系一致(即 f 取平均),得到对单个风险因素的模糊评价矩阵:

$$F.R = \begin{pmatrix} 0.048 & 0.095 & 0.000 & 0.048 & 0.191 & 0.191 & 0.238 & 0.190 & 0.143 & 0.095 & 0.238 & 0.143 & 0.334 & 0.048 & 0.238 & 0.048 & 0.143 & 0.191 & 0.000 & 0.048 & 0.143 & 0.095 & 0.143 \\ 0.381 & 0.238 & 0.143 & 0.286 & 0.429 & 0.334 & 0.238 & 0.238 & 0.238 & 0.334 & 0.191 & 0.191 & 0.286 & 0.238 & 0.238 & 0.333 & 0.286 & 0.238 & 0.143 & 0.191 & 0.286 & 0.191 & 0.286 \\ 0.334 & 0.429 & 0.429 & 0.429 & 0.191 & 0.286 & 0.191 & 0.286 & 0.429 & 0.334 & 0.381 & 0.334 & 0.238 & 0.429 & 0.381 & 0.334 & 0.286 & 0.334 & 0.286 & 0.429 & 0.381 & 0.429 & 0.334 \\ 0.191 & 0.238 & 0.286 & 0.191 & 0.143 & 0.191 & 0.191 & 0.143 & 0.143 & 0.143 & 0.191 & 0.143 & 0.191 & 0.095 & 0.191 & 0.191 & 0.143 & 0.334 & 0.238 & 0.143 & 0.238 & 0.191 \\ 0.048 & 0.000 & 0.143 & 0.048 & 0.048 & 0.000 & 0.143 & 0.143 & 0.048 & 0.095 & 0.048 & 0.143 & 0.000 & 0.095 & 0.048 & 0.095 & 0.095 & 0.095 & 0.191 & 0.095 & 0.048 & 0.048 & 0.048 \end{pmatrix}^T$$

采用前面求得的各个风险指标的权重 W , 运用模糊数学运算方法,取加权平均模糊合成算子 (\bullet, \otimes) , 确定该项目综合风险分析评价结果。

$A = W \circ F.R = (0.1377, 0.3043, 0.3223, 0.1768, 0.0594)$, 经验证 A 满足归一化条件。

3.2 结果分析

从最后得到的项目综合风险分析评价结果来看,该大型航天研制项目以 13.77% 概率属于低风险,以 30.43% 的概率属于较低风险,以 32.23% 的概率属于中等风险,以 17.68% 的概率属于较高风险,以 5.94% 的概率属于高风险。

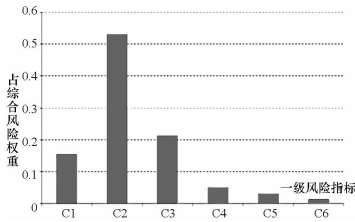


图 3 项目一级风险指标权重

Fig. 3 First risk index weightiness of project

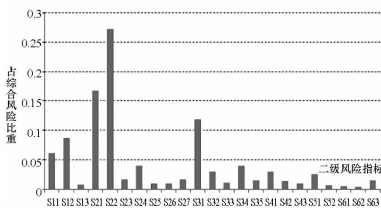


图 4 项目二级风险指标权重

Fig. 4 Second risk index weightiness of project

从各级风险指标相对于项目综合风险的权重来看,影响项目的关键一级指标是技术风险 52.93%、管理风险 21.28% 和立项风险 15.48%, 如图 3 所示。另外,从图 4 可以看出,影响项目的关键二级指标依次是设计不成熟、预先研究不充分、进度计划不合理、技术可行性论证不充分以及对国内外政治、经济、军事、市场形势估计不充分,这与航天研发项目探索性强、技术管理复杂、受国内外政治、军事、市场环境影响大的特点相吻合。

4 结束语

大型航天研发项目是典型的现代高技术复杂项

目,通过引入分布式项目管理思想,借鉴 Multi-Agent 技术,研究风险分析系统,提出了一种新的基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法,对项目的综合风险进行定量化评估,使项目的风险分析与评估变得更加科学与准确,为大型航天研发项目风险管理研究提供新的思路与方法指导。

参考文献 (References)

- [1] Stamatelatos M. Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners[R]. Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters, Washington, DC. March 31, 2002.
- [2] 袁家军. 神舟飞船系统工程管理[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
YUAN Jiajun. Shenzhou airship systems engineering management [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 林干, 李薇. 基于技术状态信息的型号研制风险主动控制管理研究[J]. 项目管理技术, 2009, 7(8): 22-27.
LIN Gan, LI Wei. Research on model develop risk initiative control and management based on technology state information [J]. Journal of Project Management Technology, 2009, 7(8): 22-27. (in Chinese)
- [4] Saaty T L. Decision making-the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP) [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35.
- [5] Saaty T L. Fundamentals of the analytic network process-dependence and feedback in decision making with a single network [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(2): 129-157.
- [6] Saaty T L. Making and validating complex decisions with the AHP/ANP [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2005, 14(1): 1-36.
- [7] 邓苏, 张维明, 等. 决策支持系统[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
DENG Su, ZHANG Weiming, et al. Decision supporting system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [8] 詹伟, 王兆红, 邱苑华. 基于 Multi-Agent 的分布式项目管理决策支持系统研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 2: 63-65.
ZHAN Wei, WANG Zhaohong, QU Wanhua. Research on distributed project management decision supporting system based on multi-agent technology [J]. Journal of Computer Application Research, 2007, 2: 63-65. (in Chinese)
- [9] 孙志武, 李平. 航空发动机研制项目风险分析指标体系设计[J]. 北京航空航天大学学报: 社会科学版, 2010, 23(3): 62-65.
SUN Zhiwu, LI Ping. The characteristics of risk and design of risk analysis index system for aero-engine projects [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: Social Sciences Edition, 2010, 23(3): 62-65. (in Chinese)