

# 基于扩展影响图的体系结构可靠性分析

张萌萌<sup>1</sup> 罗爱民<sup>1</sup> 杨圩生<sup>1</sup> 张晓康<sup>2</sup>

(国防科技大学信息系统工程重点实验室 长沙 410073)<sup>1</sup>

(武汉军械士官学校弹药与仓储系 武汉 430075)<sup>2</sup>

**摘要** 扩展影响图是决策者基于不确定信息表示来求解复杂决策问题的图模型,由影响图延伸而来。体系结构可靠性分析是度量体系结构质量的重要内容之一。介绍了扩展影响图的基本思想,引入了防御图原理来构建体系结构可靠性的扩展影响图,通过与数据模型结合,给出了评价目标节点的效用值的方法。实验结果验证了基于扩展影响图的体系结构可靠性分析的可行性。

**关键词** 体系结构,扩展影响图,防御图,可靠性

**中图法分类号** TP31 **文献标识码** A

## Architecture Reliability Analysis Based on Extended Influence Diagram

ZHANG Meng-meng<sup>1</sup> LUO Ai-min<sup>1</sup> YANG Wei-sheng<sup>1</sup> ZHANG Xiao-kang<sup>2</sup>

(Information System Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)<sup>1</sup>

(Dep of ammunition and storage of Wuhan Mechanical Technology College, Wuhan 430075, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Extended influence diagram is a graph model to solve complex decision problems based on uncertain information indicates, which extends from influence diagram. Architecture reliability analysis is one of the main contents for the quality measurement of architecture. This paper introduced the basic idea of extended influence diagram, developed extended influence diagram of architecture reliability with the defense graph, then combining with architecture data model, evaluated the utility value of the target node finally. The experimental result suggests the feasibility of architecture reliability analysis with extended influence diagram.

**Keywords** Architecture, Extended influence diagram, Defense graph, Reliability

## 1 引言

近年来,体系结构已经成为指挥信息系统领域的研究热点之一。作为体系的蓝图,它为人们宏观把握体系的整体结构提供了一条有效途径。指挥信息系统体系结构可靠性指系统一定时间内遂行作战任务的能力。体系结构可靠性分析是系统开发的重要依据,是体系结构质量度量的重要内容之一。当前,可靠性分析多用于社会中的一些具体应用,一般采用AHP等方法分析,不能反映现实事物间的依赖关系,缺乏说服力。而且,由于系统的复杂性,传统的可靠性分析方法很难贯穿到指挥信息系统的各个方面、各个阶段。

在体系结构可靠性分析时,首先要建立与可靠性相关的指标体系。然而,以往构建的指标体系大多存在概念定义、经验误差、因果关系等不确定性因素,如采用“信息安全”等较抽象的概念时缺乏准确的定义;统计的数据过时或不准确;在现实世界中,很难准确确定不同现象之间的影响关系等,这些都直接影响到最后的分析结果<sup>[1]</sup>。

扩展影响图是 Pontus Johnson 等人对比 UML、贝叶斯网络、影响图等方法在体系结构分析中的运用,于 2007 年提出

的一种决策分析方法。该方法不仅较好地解决了传统体系结构分析中遇到的问题,而且与体系结构数据模型结合,形成了一整套完善的体系结构分析体系。Pontus 等人最先运用扩展影响图对企业体系结构的信息安全、质量、可维护性等性能做了一些研究,而国内基本没有采用扩展影响图进行体系结构分析的相关研究。本文在扩展影响图研究的基础上,把防御图的思想贯穿于扩展影响图构建过程中<sup>[6-8]</sup>,针对体系结构可靠性分析问题,提出基于扩展影响图的体系结构可靠性分析方法,既验证了扩展影响图对体系结构可靠性分析的可行性,又展示出基于扩展影响图的体系结构分析方法的优点。

## 2 扩展影响图

扩展影响图<sup>[1-3]</sup>是决策者基于不确定信息表示和求解复杂决策问题的图模型,包含定性部分和定量部分。定性部分指构建扩展影响图的过程,主要包括确定节点间的概率依赖关系;定量部分主要确定扩展影响图中的前验概率和节点间的条件概率矩阵。

扩展影响图包含影响图所有的语法元素。由于影响图难以确定概念模糊节点之间的因果关系,扩展影响图中引入“定

到稿日期:2013-05-07 返修日期:2013-07-22

张萌萌(1990—),男,硕士生,主要研究方向为 C4ISR 体系结构等;罗爱民(1970—),女,教授,主要研究方向为 C4ISR 基础理论、C4ISR 体系结构等。

义关系”。扩展影响图通过“定义关系”对概念模糊的节点进行划分,得到概念清晰的节点,满足节点多层次的抽象。扩展影响图把概念模糊的节点称为“词汇性定义节点”,把概念清晰的节点称为“规定性定义节点”。

在体系结构分析中,效用节点一般受多个节点影响,但是决策节点可能只影响一部分节点。这些与决策节点无关的节点不提供决策信息,也不受决策节点的影响,因此没有必要探讨这些节点及它们的分支。扩展影响图把与决策节点相关的节点称为“控制节点”,与决策节点无关的节点称为“非控制节点”。

图 1(a)是一个简单的扩展影响图,用来分析系统的信息安全性。“信息安全”的概念较为模糊,首先采用“定义关系”把它划分为“机密性”、“完整性”、“可用性”3个方面。这里认为“机密性”、“完整性”、“可用性”是概念清晰的节点,且与决策节点有直接控制关系。因此“机密性”、“完整性”、“可用性”可通过“因果关系”直接与决策节点“方案选择”相连。绘制扩展影响图定性部分的同时要确定定量部分,如图 1(b)所示。然后采用专家打分、数据挖掘、文献搜集等方法确定父子节点间的条件概率矩阵,进而采用贝叶斯计算方法计算,得到“信息安全”节点的效用值。

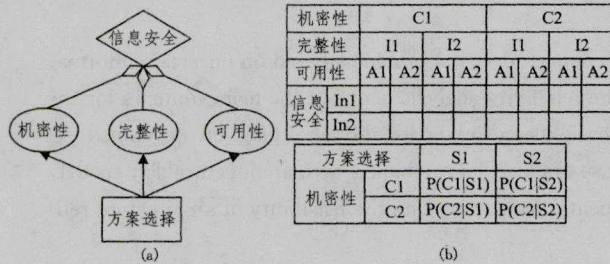


图 1 一个简单的扩展影响图

### 3 基于扩展影响图的体系结构可靠性分析流程

决策者在进行体系结构分析时总是会面对 3 个问题:可选方案有哪些,哪个方案是最优的,如何得到可选方案中最优的方案。针对扩展影响图分析的特点,建立体系结构可靠性分析流程,如图 2 所示。

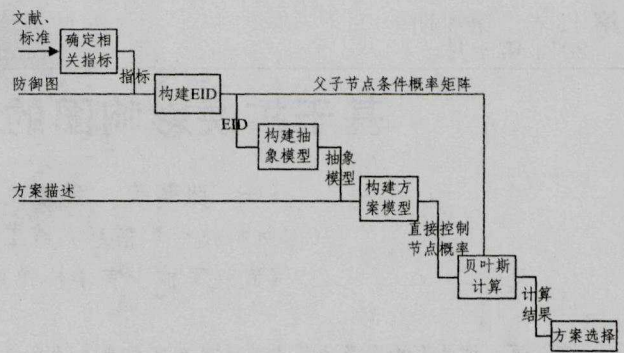


图 2 基于扩展影响图的体系结构可靠性分析流程

#### (1) 确定相关评估指标

针对可靠性分析问题,通过搜集文献或统计数据<sup>[11-15]</sup>,提取与目标节点相关的指标。相关评估指标的确定既方便扩展影响图的构建,又便于数据信息的获取。

#### (2) 构建扩展影响图

构建扩展影响图时,首先引入分析问题的效用节点与决策节点,本文把“体系结构可靠性”作为效用节点,把“方案选择”作为决策节点。然后从效用节点到决策节点逐层引入具有概率关系的父节点。具体构建过程可参考文献<sup>[1-3]</sup>。

为了使构建的扩展影响图便于理解,本文在构建过程中引入防御图的思想<sup>[6-8]</sup>。防御图是在袭击树的基础上演化而来的。袭击树模拟敌方可能采取的袭击路径,其中根节点表示袭击的目标,分解成具有“与”、“或”关系的子节点,表示可能采取的袭击方式。针对敌方可能采取的袭击方式,我方做出相应的对策,结合在一起构成防御图。防御图的结构从上到下分别为敌方的袭击路径和我方采取的对策,因此防御图的思想主要是从对方、从问题的反面思考问题。这种反向思考问题的方式更偏向人的思维方式,能更好地表达事物间的因果关系,可用于扩展影响图的构建。体系结构可靠性指系统一定时间内遂行作战任务的能力,任务的成功与否受敌方与我方两方面因素的影响。因此,本文在采用防御图思想构建体系结构可靠性扩展影响图时,综合考虑了敌方与我方两方面的因素。

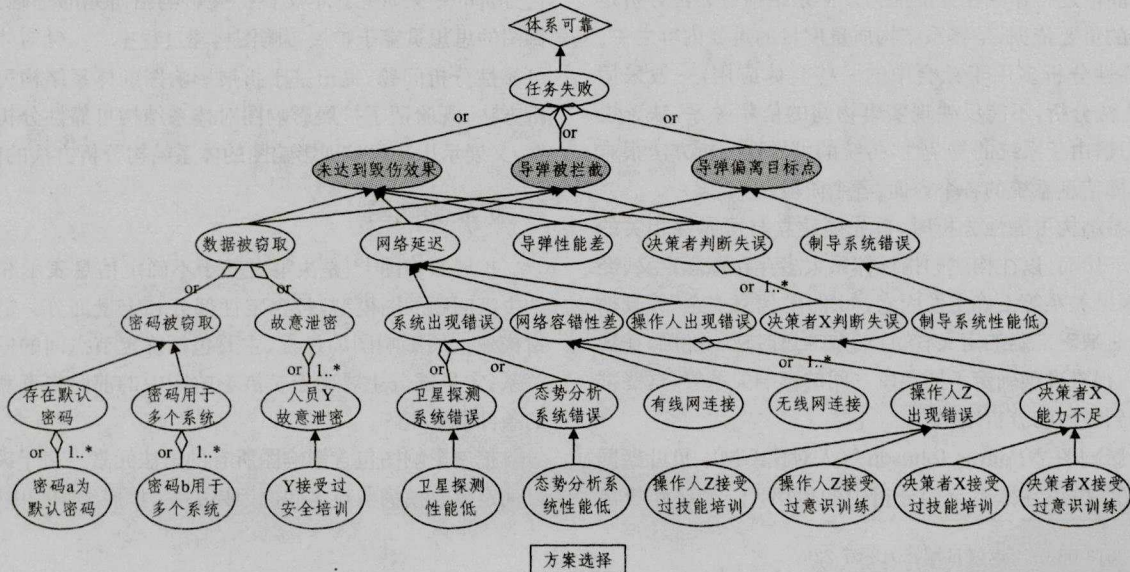


图 3 体系结构可靠性扩展影响图

体系结构可靠性分析的扩展影响图如图 3 所示,其中“与”、“或”关系用定义关系表示。在图 3 所示的扩展影响图模型中,若“一定时间内任务失败”,可能因为“未达到毁伤效果”、“导弹被拦截”或“导弹偏离目标点”,如图 3 中灰色节点所示,进而针对每一方面分析产生的原因及采取的对策。

### (3) 绘制抽象模型

抽象模型是扩展影响图和体系结构数据模型之间的桥梁,用来建立扩展影响图与数据模型之间的对应关系。它通过对扩展影响图的节点分类,约束数据模型的绘制,同时确定数据模型的数据与扩展影响图中直接控制节点概率的映射关系。抽象模型绘制方法可参考文献[1]。

对图 3 的扩展影响图各节点进行分类,绘制出体系结构可靠性的抽象模型。抽象模型包含影响体系结构可靠性的各方面,用体系结构数据实体表示,如“培训”、“人员”、“系统”、“网络”、“目标”、“机制”等。实体中的元素是扩展影响图中的效用节点与随机节点。如实体“培训”的数据可对应“Y 接受过安全培训”、“Z 接受过意识培训”、“Z 接受过技能培训”等,实体“人员”实例数据可映射“决策人 X”、“操作人 Y”等。

### (4) 绘制数据模型

根据方案描述文档,对抽象模型实例化可得到数据模型。任何一个指标体系都是在节点的不断完善下化复杂为简单,化抽象为具体,扩展影响图也不例外。因此,可采用专家评议或数据挖掘等方法从数据模型中提取出扩展影响图直接控制节点的概率值。如图 3 中把决策节点“方案选择”与所有直接控制节点相连,根据数据模型,得到所有直接控制节点的概率。

### (5) 贝叶斯计算

根据扩展影响图中父子节点间的条件概率矩阵和直接控制节点的概率值,按照贝叶斯方法,计算出不同方案下目标节点的效用值。

### (6) 方案选择

根据贝叶斯计算结果,选择较好的方案。

## 4 案例分析

军事卫星系统作为现代战争的太空信息平台,在支持高技术装备和天地一体化的战场信息网方面起着十分重要的作用。导弹是对敌进行远程精确打击的首要“杀手锏”武器。各作战基地协同通信,侦察卫星情报探测,指挥部指挥决策,导弹精确制导构成了卫星支持下的导弹火力打击体系。本节依照上节的分析过程,对不同的火力打击体系结构方案进行可靠性分析,选择出较好的方案。

### 4.1 构建体系结构可靠性扩展影响图

根据可靠性相关指标和扩展影响图构建过程,构建出如图 3 所示的扩展影响图。图中白色节点表示问题出现的原因及采取的对策,如“未达到毁伤效果”可能为“数据被窃取”、“网络延迟”、“导弹性能差”或“决策者判断失误”。当“数据被窃取”时,可能为“密码被窃取”或“故意泄密”。以此类推,直到得到便于数据模型获取数据的节点为止。

防御树思想的引入,使“与”“或”关系代替了一部分节点间的联合概率关系,降低了数据获取的难度。如只要“数据被窃取”的父节点有一个发生,则认为数据被窃取。对于“密码被窃取”节点来说,需要通过专家评价或数据统计等方法得到父子节点间的条件概率矩阵。表 1 为扩展影响图条件概率矩阵举例。

表 1 扩展影响图条件概率矩阵举例

(a)

密码被窃取		出现		未出现	
故意泄密		出现	未出现	出现	未出现
数据被窃取	出现	1	1	1	0
	未出现	0	0	0	1

(b)

存在默认密码		出现		未出现	
密码用于多个系统		出现	未出现	出现	未出现
密码被窃取	出现	0.7	0.5	0.5	0.05
	未出现	0.3	0.5	0.5	0.95

### 4.2 绘制体系结构数据模型

图 4 表示不同方案的简化模型。由图可知,方案 A 包含 3 个操作人和 1 个决策者,存在相关培训,存在密码保护机制,系统性能良好,网络不仅通过通信卫星传递信息,也通过有线网相连;方案 B 包含 3 个操作人和 2 个决策者,卫星探测系统性能较低,网络仅通过通信卫星相连,存在密码互用的情况,没有对决策者 Carl 进行培训,其它方面与方案 A 相同。

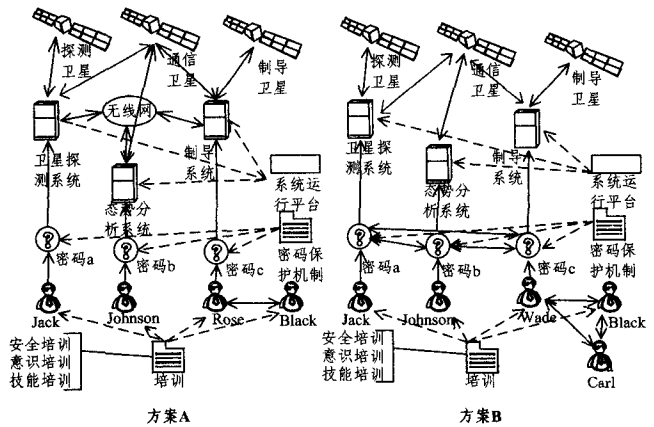


图 4 体系结构数据模型

根据方案模型,采用专家评议或数据挖掘等方法,获得扩展影响图中直接控制节点的概率。如可统计两个方案中操作人和决策者参加相关培训的情况来确定扩展影响图中对应培训节点的概率,统计两个方案中密码使用情况确定扩展影响图中密码节点的概率。直接控制节点概率如表 2 所列,因为直接控制节点较多,这里只列出一部分。

表 2 直接控制节点概率举例

(a)

方案选择	A	B
密码 a 用于多个系统	是 0	1
	否 1	0

(b)

方案选择	A	B
Jack 接受过安全培训	高 0.95	0.95
	低 0.05	0.05

(c)

方案选择	A	B
卫星探测系统性能低	是 0.05	0.95
	否 0.95	0.05

(d)

方案选择	A	B
有线网连接	是 1	0
	否 0	1

(e)

方案选择	A	B
有线网连接	是 1	1
	否 0	0

(f)

方案选择	A	B
Jack 接受过意识培训	高 0.95	0.95
	低 0.05	0.05

### 4.3 方案选择

本文采用软件 GeNIe 计算卫星支持下的导弹火力打击

(下转第 48 页)

- [7] Stojmenovic I, Liu D, Jia X. A scalable quorum based location service in ad hoc and sensor networks[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2007, 1(1):71-94
- [8] Erman A T. Multi-Sink Mobile Wireless Sensor Networks: Dissemination Protocols, Design and Evaluation[D]. Turkey: the University of Twente, 2011
- [9] Gungor V C, Akan O B, Akyildiz I F. A real-time and reliable transport (RT) 2 protocol for wireless sensor and actor networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008, 16(2): 359-370
- [10] 江海峰, 钱建生, 孙彦景, 等. WSN 中基于能量代价的能量优化路由算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 73-76, 84
- [11] 王江涛, 陈志刚, 邓晓衡. WSN 中基于可信核心树的路由算法研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(12): 36-42
- [12] Mezei I, Malbasa V, Stojmenovic I. Robot to robot; communication aspects of coordination in robot wireless networks[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2010, 17(4): 63-69
- [13] Selvaradjou K, Siva Ram Murthy C. Maximizing lifetime of mobile actors in wireless sensor and actor networks[J]. Ad Hoc & Sensor, Wireless Networks, 2010, 34(9): 179-202
- [14] Bechkit W, Koudil M, Challal Y, et al. A New Weighted Shortest Path Tree for Convergecast Traffic Routing in WSN[C]//Computers and Communications (ISCC). 2012: 187-192
- [15] Mian A N, Baldoni R, Beraldi R. A survey of service discovery protocols in multihop mobile ad hoc networks[J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(1): 66-74

(上接第 23 页)

体系结构的可靠性。GeNIe 是由匹兹堡决策系统实验室研发的图形化开发工具, 支持贝叶斯网络、影响图等计算。计算得出方案 A 体系可靠的概率为 25.6%, 方案 B 体系可靠的概率为 19.0%。

由于方案 B 缺乏软硬件和相应机制的支持, 导致整个体系结构的成熟度、容错性较差, 虽然增加了一个决策者辅助决策, 但也弥补不了整体体系结构可靠性的降低。因此, 选择方案 A 作为可行方案。

**结束语** 扩展影响图能够充分描述人类的推理模式, 综合运用先验概率和后验概率, 既可避免先验概率带来的主观偏见, 又可避免后验概率带来的噪声影响。它采用因果关系表达影响图中的概率依赖关系, 采用定义关系对应 AHP 方法中的权重关系, 具有影响图与 AHP 方法的综合优势。

通过在影响图基础上引入新的节点与关系, 并在构建过程中运用防御图的思想, 使扩展影响图不仅较好解决了传统体系结构分析中的薄弱环节, 而且使整个分析流程更加直观和紧密。本文验证了扩展影响图对体系结构可靠性分析的可行性, 由于可靠性是评价一般体系结构方案的重要内容, 因此该方法可扩展到体系结构其它方面的分析。

## 参 考 文 献

- [1] Johnson P, Lagerström R, Närman P, et al. Enterprise Architecture Analysis with Extended Influence Diagrams[J]. Information Systems Frontiers, 2007, 9(2/3): 163-180
- [2] Närman P, Schönherr M, Johnson P, et al. Using Enterprise Architecture Models for System Quality Analysis[C]//2008 12th International IEEE Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2008: 14-23
- [3] Johnson P, Lagerström R, Närman P, et al. Extended Influence Diagrams for System Quality Analysis[J]. Journal of Software, 2007, 3(2): 30-42
- [4] Lagerström R. Analyzing System Maintainability Using Enterprise Architecture Models[J]. Journal of Enterprise Architecture, 2007, 3: 33-42
- [5] Lagerström R, Johnson P, Närman P. Extended Influence Diagram Generation[C]//Proceedings of the Interoperability for Enterprise Software and Applications Conference. 2007
- [6] Sommestad T, Ekstedt M, Johnson P. Combining defense graphs and enterprise architecture models for security analysis[C]//12th International IEEE Enterprise Distributed Object Computing Conference. 2012
- [7] Sommestad T, Ekstedt M, Johnson P. Cyber Security Risks Assessment with Bayesian Defense Graphs and Architectural Models[C]//Proceedings of the 42nd Hawaii International Conference on System Sciences. 2009
- [8] Franke U, Sommestad T, Ekstedt M, et al. Defense Graphs and Enterprise Architecture for Information Assurance Analysis[C]//26th Army Conference. Orlando, 2008
- [9] Druzdzel M J, van der Gaag L C. Building Probabilistic Networks: "Where Do the Numbers Come From?" Guest Editors' Introduction[J]. IEEE Transactions On Knowledge and Data Engineering, 2000, 12(4): 481-486
- [10] Druzdzel M J, van der Gaag L C. Elicitation of Probabilities for Belief Networks: Combining Qualitative and Quantitative Information[C]//UAI'95 Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. USA, 1995: 141-148
- [11] 郭浩, 刘俊先. 基于体系结构的 C4ISR 系统可靠性指标体系[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(7): 36-42
- [12] 吴兴波. 对武器装备可靠性指标体系的探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 1997(4): 53-56
- [13] 任建军, 张喜斌, 张恒喜. 基于 AHP 的可靠性指标确定方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004(1): 59-63
- [14] 李根成, 姜同敏. 空空导弹可靠性指标体系研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006(8): 88-92
- [15] 赵建立, 高会生, 赵生岗. 贝叶斯网络在可靠性评估中的应用[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 51-53