

分类号_____

U D C _____

密级_____

编号 10736 _____

西北师范大学
硕士学位论文

软件风险管理研究

研究生姓名：吴朱军

指导教师姓名、职称：南振岐 教授

专业名称：计算机应用技术

研究方向：企业信息化

二〇一三年五月

硕士学位论文

M.D. Thesis

The research of software risk management

Wu Zhu Jun

西北师范大学研究生学位论文作者信息

论文题目	软件风险管理研究		
姓 名	吴朱军	学 号	2010210829
专业名称	计算机应用技术	答辩日期	2013.5.25
联系电话	15002571304	E_mail	wuzhujun_2006@126.com
通信地址(邮编):			
备注:			

目录

摘 要	I
Abstract	II
1 绪 论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外软件项目风险管理研究的汇总	2
1.2.1 国内软件项目风险管理的现状.....	2
1.2.2 国外软件风险项目现状.....	3
1.3 软件风险管理的必要性	4
1.4 论文的创新工作.....	5
1.5 论文结构	5
2 软件风险管理理论基础	6
2.1 软件风险的相关概念.....	6
2.1.1 风险定义.....	6
2.1.2 风险的两个属性.....	6
2.1.3 风险的特征.....	6
2.1.4 风险因素及风险驱动因子.....	7
2.1.5 软件风险的种类.....	8
2.2 常用的风险管理模型	9
2.2.1 Barry Boehm 理论	9
2.2.2 SEI 的 CRM(持续风险管理)模型.....	10
2.2.3 Soft risk 风险管理模型	11
2.2.4 CMMI (软件能力成熟度模型集成) 的风险管理过程域.....	12
2.2.5 Riskit 方法	13
2.3 本章小结	14
3 软件风险管理的过程	15
3.1 过程概述	15
3.2 风险规划	16
3.3 风险识别	17

3.3.1 风险识别过程.....	17
3.3.2 常用方法.....	19
3.4 风险分析.....	22
3.4.1 风险分析过程.....	22
3.4.2 风险的评估及排序.....	24
3.5 风险控制.....	25
3.5.1 风险控制过程.....	25
3.5.2 风险行动计划.....	27
3.6 风险跟踪.....	27
3.6.1 风险跟踪过程.....	27
3.6.2 相关过程活动.....	28
3.7 本章小结.....	29
4 基于联系数的三角模糊数评估软件风险研究	30
4.1 三角模糊数的相关理论.....	30
4.2 建立三角模糊数与联系数的关系.....	31
4.3 联系数决策模型.....	31
4.4 基于联系数的三角模糊数多属性决策评估步骤.....	32
4.5 实例分析.....	34
4.6 本章小结.....	39
5 结论与展望	40
5.1 本文总结.....	40
5.2 进一步研究.....	40
参考文献	41
攻读硕士期间发表的论文	44

摘 要

随着社会全面信息化和计算机的普及，软件的开发方式逐渐朝着规模化、产业化和工具化的方法转变，而软件风险是项目开发过程中所固有的、不以人的意志为转移的属性。在软件项目开发过程中由于缺乏对风险管理的重要性认识，导致了项目成本超支，进度延迟等一系列问题，软件项目相对于其他项目而言，更加系统、复杂、技术要求也更高，项目的成果更多是以一种信息等抽象性的技术成果来体现，衡量技术成果的标准也不固定。尤其是随着软件产业飞速发展，规模愈大，项目越来越复杂，伴随而来的项目风险也愈加难以控制。所以，软件项目的风险管理已经成为软件技术因素之外决定项目成败的关键，对项目风险管理也越来越成为软件项目系统化、规范化管理的迫切需求。只有进行系统化、科学化的风险管理，才能减少软件项目对未知成果的不确定性，并能够提前预知和避免由于这种未知性而给项目带来的损失，最终确保软件项目目标顺利实现。

软件风险管理工作就是在风险成为影响软件项目成功的威胁之前，识别、着手处理并消除风险的源头，它是对影响软件项目、过程和产品的风险进行评估和控制的实践过程。结合软件开发实际寻求一套软件风险估算体系，使得软件项目风险管理方法更为成熟，无论提高软件开发项目成功率还是提升软件组织应对风险的能力都具有一些指导意义。

本文首先分析了国内外软件风险管理的现状，汇总出软件风险管理中使用的一般方法；其次简要详述了软件风险管理相关理论基础；再者详细分析了较为成熟的软件风险管理的全过程；最后，就其中的关键过程——风险的定量评估，给出了一种基于三角模糊数的风险评估模型，实例分析有效可行。

关键词：项目管理 软件风险管理 联系数 三角模糊数

Abstract

With the popularity of computer and overall social information, the development method of software is now transforming to scale , industrialization and instrumentalization. Software risks are inherent attribute independent of man's will. Because of the absence of important cognition in software development, many projects are faced with overspending cost, schedule delay and so on. Compared to other projects, software is more complex and requires higher technology, the results of the project is reflected in the technical achievements of an information abstraction. The measure of technology standard is not fixed. What's worse, with the rapid development of software industry, the scale is large, the project is more and more complex, more project risks followed. Therefore, the key of software project risk management has become the software technological factors which determine the success of the software project. The project risk management has become urgent requirement specification. Only by using systematic management of software project, it can reduce the uncertainty of software project and be able to anticipate and avoid the uncertainty and bring losses, to ensure the success of software project.

Before the software risk management, the work is becoming to the success of software project risk identification, threat, addressing and eliminating the source of risk, it is the practice of software project, process and product risk assessment and control. Combined with the practice of software development for a set of software risk assessment system, the method of software project risk management is more mature, whether it has some guiding significance to improve the ability of software development project success rate or improves the software organization to cope with risks.

This thesis first analyzes the status of domestic and foreign software risk management, summarizing the general method of using software risk management; secondly, briefly describes the relevant theoretical basis of software risk management; further more, a detailed analysis of the whole process of software risk management is more mature. Finally, the key process ---- a quantitative assessment of risk, which resents a triangular fuzzy risk assessment model based on the analysis of the number,

effective and feasible.

Key words: project management, software risk management, connection numbers, triangular fuzzy numbers

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

软件与软件产业在国家经济中的地位日趋重要,已经成为国民经济中一个重要的组成部分。但是软件项目常常面临着一系列的问题,如成本超支、质量未满足客户需求、进度延迟等。特别是 21 世纪以来,由于电子信息技术的高速发展,客户对软件的质量提出了更高的要求,而且这种风险还将随着信息化的发展不断扩大,风险的掌控难度与软件的复杂度成正比,软件项目质量不过关、进度延迟、成本超支等问题日益严重^[1]。

一份来自于 KPMG 的调查认为:“风险管理的失控导致了 55%的项目运作失控;38%的失控的项目做了一些风险管理,但是在项目后期,大多数项目没有进行风险监督”。另一项调查分析也表明,大约 70%的软件项目超出预测的开发周期,多数项目平均超出预计交付时间的 20%-50%,90%以上的软件项目开发成本超出预算,并且其超出程度与项目的规模成正比^[2]。据美国电气电子工程师学会(EIEE)的调查表明,如果 50%—70%以上的软件风险能成功预测,那么 90%的项目可以避免失控;此外风险管理能起到杠杆效果^[3],风险投资回报率可达到 700%以上。不包括软件项目的风险管理,其它项目预期的投资回报率可到达 25%-30%,风险管理带来如此高的投资回报率,因此,软件项目风险管理的研究是迫在眉睫。大量的统计资料表明,目前风险管理被认为是 IT 软件项目中减少失败的一种重要手段^[4]。

加强风险管理还表现在如下两个方面:第一,风险管理是现代管理风险的一种科学而直接的方法。通过对风险的识别、分析、评估和跟踪,为管理人员运用各种对策的最佳组合对风险进行有效、系统地处置提供了方法。另一方面,传统的方法处置风险具有单一性,为突破这种局限性,将各种控制风险的措施综合利用,从而完善了风险处置是方法,这些都使得项目组争相利用风险管理方法,趋势越来越火。第二,风险管理成了项目开发团队的内在需求。由于软件技术飞速发展,信息系统在社会生产各个环节的广泛应用,大大增加了各种风险因素及风险发生的概率,风险造成的损失也在大规模的扩大,项目主管人员的管理要求被迫提升了一个档次,因而风险管理的各种手段倍受青睐。

结合我国软件行业的实际，国内软件风险管理整体水平还存在众多不足^[5]，主要表现在以下几个方面：

1. 风险意识弱。在项目风险管理的研究和实践方面，我国起步较晚，大多数的软件企业在项目风险管理方面尚未重视，只是在项目初期象征性的做一下可行性分析，因此“风险”一词在软件领域也比较陌生，很少在实践过程中对软件风险进行系统管理。

2. 掩盖风险。国内软件行业主要依托项目负责人的个人经验，无论是编程人员还是项目经理，因自己某一方面的能力不足，进行掩盖风险，很少有人主动愿意提出与自己有关的风险，从而带来管理的随意性，项目负责人往往不能正确评价和对待实际效果，更谈不上在大面积推广了。

3. 缺乏风险定量分析。资料和数据收集方面，有些项目缺乏目的性，使得定量分析的方法在项目风险管理中得不到充分利用，从而导致该领域的知识得不到有效的积累，反过来不利于管理水平的提升。

4. 系统性弱。常用的一些风险识别和分析方法局限于解决某一方面的问题，不适合整个项目风险管理的推广，对项目风险的管理形不成体系，缺乏系统性。

1.2 国内外软件项目风险管理研究的汇总

1.2.1 国内软件项目风险管理的现状

由于管理方法、技术基础和社会环境等多方面因素的影响，我国在风险管理的研究往往不如西方国家，软件项目不仅体现在以建设方面为主的主要矛盾上，还体现在软件项目风险管理的理论探究和实际应用上。

在理论基础方面，国内研究通常认为软件项目风险管理从属于管理信息系统和软件工程两大分支学科，在关于管理信息系统和软件工程的研究中，有关风险管理的研究只停留在可行性分析^[6]与项目管理^[7]这两个环节上。可行性分析中没有明确提出风险管理的概念，项目管理中则是按照一般风险管理的过程给出了风险管理的四项活动：风险识别，风险分析，风险评价和风险监控。总之，研究领域的风险管理方面的成就不多。文献^[8]中针对信息系统开发过程的动态风险，给出了一种综合评估方案，文献^[9]利用模糊数学理论提出了多阶段多层次综合风险估算模型。文献^[10]汇总了若干种典型生命周期模型、开发方法与风险管理的关系。文献^[11]则使用实体联系模型，整体性地将风险管理开发逐步完善。

在实践方面，文献^[12]认为在项目启动的前期决策时，应该“唱唱反调”，初步将风险识别的想法体现在风险管理过程中；还从企业的角度阐述了软件 and 开发组选择的问题及实施重点，渗透了风险控制的思想，虽然作者没有用风险管理的理论阐述预防风险的过程，但为实施 MRPII 中引入风险管理思想提供了大量的数据和资料。文献^[13]认定企业采用 ERP 管理模式存在着三个方面的风险：外部风险、流程风险和信息决策风险，认为实施风险、软件风险、和转变风险是风险管理过程中的主要表现形式。

此外，我国台湾学者^[14]提出了聚合风险率的算法，该算法在群决策中用模糊集理论评估软件风险；另外，台湾科技大学的学者^[15]又在此基础上进行改进。“质量管理 and 质量保证标准(GB/T1900~2000)”提出了两部分的因素，第一部分：选择和使用指南，只在产品安全性中提到了风险因素；第二部分：软件开发、供应和维护中的使用指南中，只在合同评审部分提到了风险辨识和风险管理问题。

1.2.2 国外软件风险项目现状

20 世纪 80 年代以前，风险管理学，是伴随着软件开发的失控和失败而逐步发展起来的。20 世纪 80 年代以来，开始向软件工程阶段进一步发展，从理论上来看，1989 年，Barry Boehm 编写的《软件风险管理》，在沿袭了传统的项目风险理论基础上第一次深入地探讨了软件项目风险管理，奠定该领域的理论基础。他认为，软件项目风险管理指的是“试图以一种可行的原则和实践，规范化地控制影响项目成功的风险”，其目的在于“辨识、描述和消除风险因素，以免它们威胁软件的成功运作^[16]”。Boehm 思想的核心为 10 大风险因素清单，其中包括频繁的需求变动、人员不足、不科学的进度安排和预算等。

Charette 和 Robert 提出了包含风险识别、估算、评价、计划、控制和监控的软件项目风险管理，从不同角度也构造出了类似的风险管理模型。不同的是，Charette 认为风险管理是一个循环往复的过程，每个步骤之间应当是相互重叠并反复交错的^[17]。美国卡内基—梅隆大学的软件工程研究所 SEI (Software Engineering Institution) 开始提出了风险管理模型 CRM (Continuous Risk Management)，认为软件风险评价、持续的风险管理和团队风险管理构成了软件风险管理的基本框架^[18]。SEI 提出了基于分类的风险辨识 (Taxonomy-Based Risk Identification) 方法，项目管理研究院 (PMI) 采用风险评估方法学^[19] (Risk Assessment Methodology) 度量软件开发风险软件项目开始区分出系统分析、系

统设计、程序开发等不同的开发阶段，项目管理随着技术水平更加先进而不断得到提高。微软认为风险管理可分为 5 个阶段：风险辨识、风险分析、风险活动计划、风险跟踪和风险控制^[20]。Tallon 等学者进一步地把风险管理提前到 IT 项目投资阶段^[21]，Walsh 等学者认为软件项目风险管理仅仅依靠方法是不够的，决策者的想法和行动对项目的结果有很大影响，文章 *software project management* (第二版) (Bob Hughes, Mike Cotterell) 作为大学教科书，收录了经过十几年发展比较成熟的技术、方法和工具^[22]。

20 世纪 90 年代以来，互联网高速发展，从产品的研发到开发，软件的规模和复杂性进一步扩大，项目开发方对项目开发的进度、项目的成本和项目质量的保证越来越难以控制，最后导致项目成果愈加难以预测。一个软件项目最终能够顺利完成，管理上的问题日益突出，而不仅仅关注技术个这唯一的对象。软件项目的风险管理在这个阶段和背景下逐步发展起来，风险的理论分类和实践中，一些方法的研究和工具的使用，为风险管理提供了一些新思路，风险管理的必要性日益突出，软件企业也将风险管理作为信息化程度的一个重要指标，成为项目成功的一个必不可少的组成部分。在 SEI 提出的软件成熟度模型集成 (CMMI3) 中，将风险管理作为关键过程域，系统地对其进行管理。

1.3 软件风险管理的必要性

软件工作者面临一个挑战，那就是把以不规范方式开发项目的程序员转变为规范地开发高质量软件地软件工程师。软件工程的定义是为建立和使用正确的工程准则获得可靠的、在机器上高效运行的经济型软件。软件工程包括方法、工具和过程，它们使控制过程得到合理掌控，还为工作者提供了高效的、高质量的软件基础。

将风险管理引入当前的软件项目，有多方面的因素。针对有限的资源、有待改进的技术以及瞬息万变的环境对复杂系统的强烈需求，管理人员必须具备管理项目不确定因素的能力。在目前的商业大环境下，利润缩减，经济全球化带来的市场不稳定性，技术飞速发展压力下竞争激烈，我们都可使用一种应对机制，针对这一需求，软件项目负责人和团队骨干会根据具体情况，采用风险管理方法。

一个团队逃避风险是不可取的，任何企业都不可能一直处于相对无风险的状态。面对机会敢做敢为的意思就是要正视风险但要成功地向风险挑战需要的不只是合适的过程和驻足思考的能力，还需要行为规范。风险管理能让你在蕴含着风

险和机会的环境中谋求成功的行为准则。软件风险管理就是制定的准则，并为保证软件项目、过程或产品的质量而准备的。对风险进行管理的目的是为了帮助那些负责软件系统的人获得实施软件风险管理的必要知识。

1.4 论文的创新工作

本文的研究思路是：以软件项目风险管理经典风险管理模型为理论基础，从传统的风险管理和软件项目风险管理理论出发，将理论研究和实践活动相结合，以定量研究为主，定性研究为辅。

本文的主要工作有：

1. 查阅相关文献，阐述软件风险管理的理论基础。
2. 探究软件风险管理的过程，依次从风险识别、风险分析、风险控制和风险跟踪方向出发，对每个过程详尽分析，总结风险管理的一般方法。
3. 针对软件风险管理中的关键过程——风险分析，进行定量分析，提出了一种基于联系数的三角模糊数评估软件风险；用联系数决策模型得出决策综合值，进而对风险进行排序。该方法简单有效，可行实用。

1.5 论文结构

第一章：绪论阐述软件风险管理的背景和国内外研究现状，以及软件风险管理的必要性。

第二章：阐述软件风险管理的相关理论，首先介绍了风险的概念、属性、特征，其次介绍了常用的风险管理模型。

第三章：论述了风险管理的一般步骤：风险计划、风险识别、风险分析、风险控制和风险跟踪。

第四章：提出了一种定量风险评估模型，基于联系数的三角模糊数评估风险模型。

第五章：对本文的内容进行总结和展望。总结了文中所做的工作，指出了仍然存在的不足，对以后的所要研究的内容指明了方向。

2 软件风险管理理论基础

2.1 软件风险的相关概念

2.1.1 风险定义

风险：可能发生的某一事件，该事件将导致不好结果^[23]。

按照以上定义，软件风险是指软件开发过程中潜在的可能造成的伤害或损失。风险是指尚未发生的问题，问题是业已成真的风险，风险本身考虑未来的事情，这意味着，风险涉及不确定性，在软件工程的生命周期中，产品面临各种决策，风险介于确定性和不确定性之间的状态，因此风险管理只是个抽象的概念，在尚未发生时考虑补救的过程。

2.1.2 风险的两个属性

1. 潜在可能性：风险发生的概率。
2. 产生的损失：一是如果风险发生，将会带来损失，产生危害。二是产生的损失的大小。

根据 Boehm 的定义，风险暴露表示为： $RE=P(UO)L(UO)$ ，其中 RE 表示风险的影响， $P(UO)$ 表示令人不满意结果发生的概率， $L(UO)$ 表示不满意结果带来的损失。

2.1.3 风险的特征

1. 风险存在的客观性和普遍性。风险的发生总是客观存在的，人们无法完全控制和预测风险的发生，直到现在也只能在有限的空间和时间内改变风险存在和发生的条件，减少损失程度，而不能也不可能完全消除风险[24]。

2. 不确定性特点。风险的发生都是诸多风险因素和其他因素共同作用的结果，是一种随机现象。个别风险事故的发生是无序的，没规律可循，用概率统计方法及其他现代风险分析方法来估算风险发生的概率和损失程度，也导致风险管理的迅猛发展。

3. 不利性特点。风险的发生势必对项目产生影响，大的损失将会影响项目进度、成本、质量等重要目标。千里之堤，溃于蚁穴，小的影响会潜伏在项目中，

直到满足一定的触发条件或者超过某个设定的阈值，便会发生无法预计的损失。

2.1.4 风险因素及风险驱动因子

一般来说，对项目目标的理解程度越清晰，软件风险管理越到位，从因素的可能性、损失及优先级程度方面评估风险影响，在风险发生前预测风险，并针对其中重要风险制定和执行合理的风险行动计划来应对风险。

为了很好地识别和消除软件风险，项目管理者需要标识影响软件风险因素的风险驱动因子，这些因素包括性能、成本、支持和进度。风险因素是以如下的方式定义^[25]的：

1. 性能：产品满足客户需求并符合客户满意的不确定程度。
2. 成本：项目预算是否超支的不确定程度。
3. 支持：软件容错性、适应性及可修改性的不确定程度。
4. 进度：项目进度能够被维持且产品能按时交付的不确定的程度。

每个风险因素延伸下去得到风险驱动因子，该风险因子对风险的影响均可分为四个类别——可忽略的、轻微的、严重的、灾难性的。下表指出了由于软件缺陷或错误而产生的潜在影响和没有达到预期的结果所产生的潜在影响。

表 2.1 风险严重程度的定性分析

影响评估					
类别\因素		性能	支持	成本	进度
灾难的	1	无法满足需求而导致任务失败		错误将导致进度延迟和成本增加	
	2	严重退化使得根本无法达到要求的技术性能	无法做出响应或无法支持的软件	严重的资金短缺，很可能超出预算	无法在交付日期内完成
严重的	1	无法满足需求而导致系统性能下降，使得任务能否成功受到置疑		错误将导致操作的延迟，并使成本增加	
	2	技术性能有所下降	在软件修改中有少量的延迟	资金不足，可能会超支	交付日期可能延迟
轻微的	1	无法满足要求而导致次要任务的退化		成本、影响和即可恢复的进度上的小问题	
	2	技术性能有较小的降低	较好的软件支持	有充足的资金来源	实际的、可完成的进度计划

可忽略的	1	无法满足要求而导致使用不方便或不易操作		错误对进度及成本的影响很小	
	2	技术性能不会降低	易于进行软件支持	可能低于预算	交付日期将会提前
<p>注：1、未测试出的软件错误或缺陷所产生的潜在影响。</p> <p>2、如果没有达到预期的结果所产生的潜在影响。</p>					

2.1.5 软件风险的种类

按照风险的内容，可大致分为：

1. 技术风险。主要包括软件在设计、实现、接口、验证和维护过程中可能发生的潜在问题，如设计的不合理性、接口的技术等等，对软件项目带来的危害。

2. 过程风险。如果软件过程定义得不清楚；如果分析、设计、测试以无序的方式进行；如果质量是每个人都认为很重要的概念，但没有人切实采取行动来保证它，那么这个项目就处在风险之中。

3. 客户风险。客户有不同的需要。一些人只知道他们需要什么；而另一些人知道他们不需要什么。一些客户希望进行详细的讨论，而另一些客户则满足于模糊的承诺。

4. 商业风险。销售部门是受商业驱动的，而商业考虑有时会直接与技术实现发生冲突。开发了一个没人需要的优质软件，或推销部门不知如何销售，这一软件产品，或开发的产品不符合公司的产品销售战略。

按风险性质分，可大致分为：

1. 已知风险。如交付时间不现实，没有需求或软件范围的文档、开发环境不佳，可以通过仔细评估项目计划、开发项目的商业及技术环境、以及其它可靠的信息来源来识别。

2. 可预测风险。能够从过去的项目经验中推测出来(如：人员调整，与客户之间无法沟通，由于需要进行维护而使开发人员精力分散)。

3. 不可预测风险。它们可能、也会真的出现，但很难事先识别出它们来。

一般来讲，软件项目过程是一个不断识别风险、分析风险、计划风险、监控风险和应对风险的过程。一个大型软件的开发大约存在 30 至 40 种风险。如果每种风险都需要 3 至 7 个风险管理步骤，那么风险管理本身就可以构成软件开发。

2.2 常用的风险管理模型

2.2.1 Barry Boehm 理论

对于风险管理过程的认识，不同的组织或个人是不一样的。20 世纪 80 年代，Boehm 在软件行业里引入风险管理的概念，《Software Risk Management》(Boehm1989)中也提到风险管理由风险评估和风险控制组成。在风险管理步骤上，风险评估又可分为风险识别(Risk identification)、风险分析(Risk analysis)、优先级设定(Risk prioritization)三个步骤，风险控制则包括制定管理计划(Risk management planning)、解决(Risk resolution)和监督风险(Risk monitoring)三个步骤，并按照方案实际执行化解风险的活动，并在过程中进行监控。如图 2.1 所示：

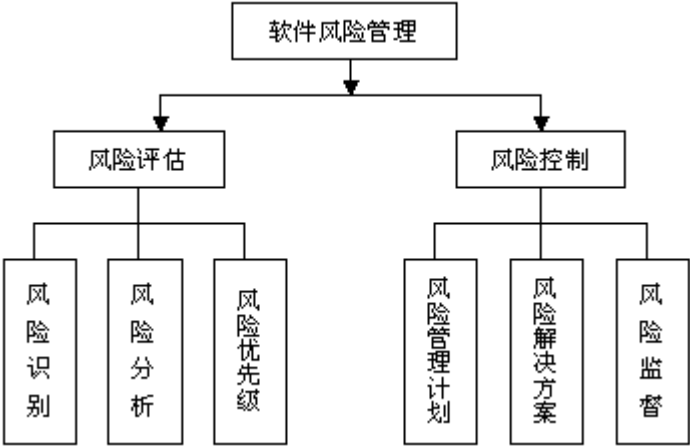


图 2.1 Boehm 的软件项目风险管理模型

Boehm 开发了一套风险分析模式，它是通过对美国几个大型航空或国防系统软件项目的深入调查，编辑整理而成的，有一定的普遍性和实际性，它有助于识别高优先级的对需求、技术和管理方面有影响的风险项目，该列表还同时提供了有效避免和解决关键风险项目的风险管理技巧。Boehm 于 1989 年就是从风险清单中提取出了十大高风险项列表，从此奠定了风险管理的基础。并在之后又提出了风险检查清单方法，补充了前面十大风险因素集及相应管理措施，如下表 2.2 所示

表 2.2 Boehm 的十大风险因素

序号	风险因素	风险管理措施
1	不切实际的项目计划和预算	成本计划;增量开发;软件复用;需求清晰
2	不断的需求变更	信息隐藏;增量开发
3	人员能力不足	招聘高级人才;团队建设;激励士气;交叉培训
4	新技术风险	检查;兼容性分析
5	软件功能和属性缺失	组织分析;任务分析;操作概念形成;用户调研
6	用户界面设计不合要求	用户调研;定期评审
7	范围界定不准确	明细需求;原型;成本效益分析
8	实时性能不足	激励;模块化;原型
9	外部组件不足	跟踪检查;优化设计;团队建设
10	外包任务履行不足	技术分析;算法分析;成本效益分析

2.2.2 SEI 的 CRM(持续风险管理)模型

SEI(Software Engineering institution)作为软件工程和应用的权威机构,根据多年在软件项目管理领域中的经验,提出 CRM(Continuous Risks Management)模型^[26]。CRM 模型提出在软件项目生命周期的所有阶段中都要重视风险识别和管理,它将风险管理划分为循环反复的五个部分:识别、分析、计划、跟踪和控制。如图所示:

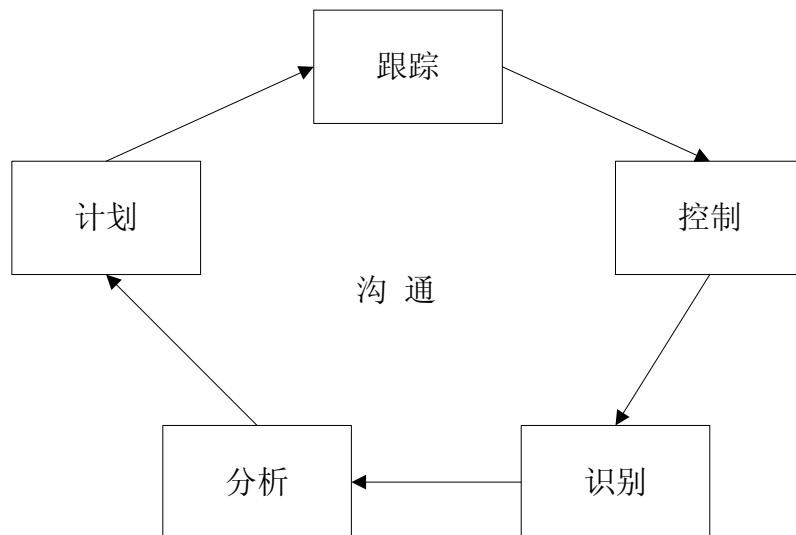


图 2.2 CRM 过程模型

SEI 的 CRM 模型有 7 条软件风险管理原则，分别是(1)全局性；(2)综合管理；(3)开放的沟通环境；(4)积极的策略；(5)统一的产品观点；(6)持续的过程；(7)团队协调合作。

2.2.3 Soft risk 风险管理模型

Soft risk 模型它最大的特点是，把注意力集中放在高可能性和高破坏性的风险上，记录它们并找到有效管理它们的方法。该方法不但有效减轻风险的破坏性，同时可以有效地节约人员成本和时间成本。此模型确保了在软件项目中持续地进行风险管理，如图所示

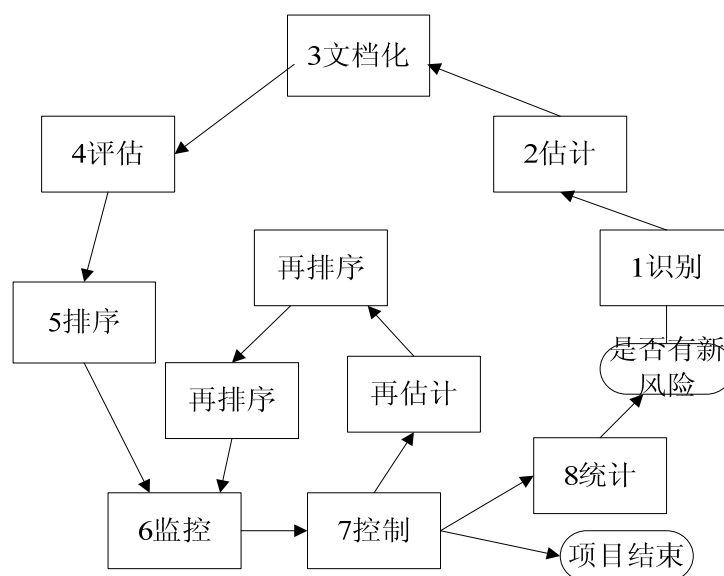


图 2.3 Soft risk 风险管理模型

它一共有八个步骤来完成一次风险管理，当发现新的风险，则再使用八个步骤，如此循环下去直到风险缓解消除。因此，该模型的核心是持续地发现和控制风险，并通过更新、维护基于 Boehm 理论的十大风险识别列表来管理风险。

2.2.4 CMMI (软件能力成熟度模型集成) 的风险管理过程域

CMMI 是国际上推广实施的一种软件能力成熟度评估标准，它以 SEI 的 CMM 为基础发展而来，主要应用领域在于用来评估软件开发过程的改进以及对软件开发能力进行评估。风险管理过程域处在 CMMI 第 3 级，故而成为已定义级中的一个关键过程域。在 CMMI 的风险管理过程理论中，风险管理是一种具有预期性且需要长期关注的活动。它首先要对未知但却潜在的有危险因子的因素予以识别，然后针对风险因素进行策划，采取具体的应对风险措施，通过一系列的活动来避免产生失败的结果，最终顺利完成任务，实现组织的目标。下图为 CMMI 的风险管理模型

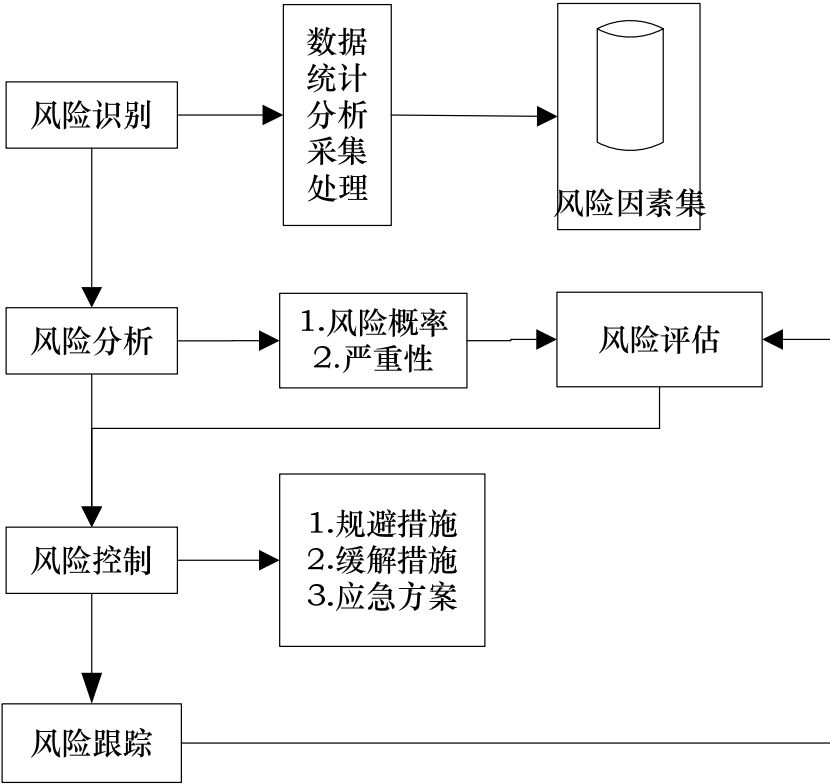


图 2.4 CMMI 管理模型

CMMI 模型[27]的核心是风险库，在模型中，每个实现目标的活动都会关联到风险库，且要关注其随时的更新活动。其中活动“制订并维护风险管理策略”

就与风险库之间存在着一个双向的交互的关系，也意味着必须通过不断收集风险库中相对应的信息，并结合随时更新的活动，才能更好地制定出风险管理的策略。

CMMI 的风险管理被清晰地描述为实现 3 个目标：（1）决定风险的来源和类型；（2）定义风险参数；（3）建立风险管理的策略一系列的活动来完成。

该模型的核心是风险库，实现各个目标的每个活动都会更新这个风险库。其中活动“制订并维护风险管理策略”与风险库的联系是一个双向的交互过程，即通过采集风险库中相应的数据并结合前一活动的输入来制订风险管理策略。

2.2.5 Riskit 方法

Riskit 方法是由 Maryland 大学提出的，它是在长期理论研究和实践基础上提

出的一套系统化的风险管理方法。它旨在对风险的起因、触发事件及其影响等进行完整的体现和管理，并使用合理的步骤评估风险。

Riskit 方法的核心部分是采用图形化的工具 Riskit 分析图对风险建模，在定量分析前定性地记录风险。除此之外，Riskit 方法提供明确的风险定义，并明确的定义限制和影响项目成功的因素，使用应用性损失的概念排列风险的损失，对不同相关者的观点明确建模。总的来说，Riskit 方法对于风险管理中的每个活动，都提供了详细的活动执行模板，Riskit 风险管理过程包括了风险管理定义、风险识别、风险分析、风险控制计划、风险控制和风险监控这些基本活动，而这些活动可以同时进行，也可以重复进行。

风险因素是指影响风险事件发生的可能性的特征，例如使用新的开发工具、不稳定的需求等，它用来描述主要的项目环境特征。风险事件指的是对项目有负面影响的事情，它可能被多个风险因素触发，也可能性影响其他的事件或者因素。项目关键性成员的退出、一个主要需求的大幅度修改等都属于风险事件。而风险反应描述了对风险事件及其后果所采取的相应措施，它也可能影响风险事件发生的可能性。风险后果表示了风险事件对整个项目的最后影响。

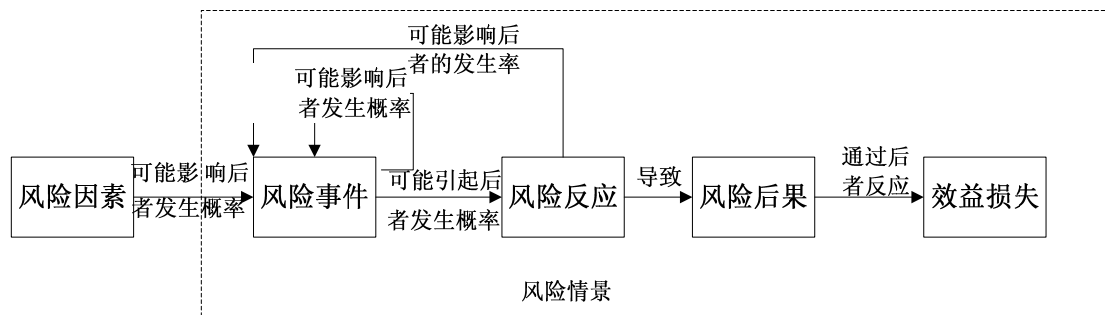


图 2.5 Riskit 分析图

在 Riskit 分析图中，使用不同的颜色或者形状表示不同的元素，可以详细而全面地表现与项目相关的风险信息及其制约关系。在此基础上可以 Riskit 以风险管理过程。Riskit 风险管理过程包括 7 个基本活动，在项目生命周期内，这些活动可以重复多次进行，也可以并发地开展。其中，1) 风险管理定义，指的是定义风险管理的作用域、重点、责任和频率等，并辨识所有相关的风险承担人员；2) 目标查阅，指的是查阅已经确立的项目目标，重新定义它们或者显式地补充定义一些原来隐含而未明确表达的目标，并且整理风险承担人员和这些目标的关系；3) 风险识别，指的是使用不同的方法识别对项目成功构成潜在威胁的元素，产生一系列的原始风险列表；4) 风险分析则是对风险元素进行划分和确认，构造完整的 Riskit 分析图，以对每个风险元素有清晰的认识；5) 风险控制计划对最严重的风险元素提出风险控制方案并选择最合适的计划；6) 风险控制则是对风险控制计划的实现；7) 风险监控保证在项目开发全过程中对风险情况进行监督和控制。

2.3 本章小结

本章首先阐述了软件风险的相关概念，包括风险的定义，风险的属性、特征、和分类；然后引入风险驱动因子和风险因素，定性的给出风险严重性的评判标准；最后介绍了几种常用的风险管理模型。

3 软件风险管理的过程

3.1 过程概述

风险管理的目的在于通过识别、评价风险，使项目管理者更加清楚地认识、理解所面临的风险并采取有效的措施管理风险。软件项目风险管理中最关键的一步便是风险识别，通常风险识别要回答以下问题：项目中有哪些潜在的风险因素？这些风险因素会引起什么风险？这些风险的严重程度如何？简单地说，风险识别就是找出风险之所在和引起风险的主要因素，对风险因素进行排序并建议风险识别体系的过程。

风险管理是一个持续的、前瞻的过程，此过程是管理的重要部分。风险管理应该强调可能会危害到重要目标的问题。持续的风险管理方法可以有效预测并降低对项目有重大影响的风险^[28]。

结合本文在第二章中对不同风险管理模型的借鉴，使用体系结构图形式，我们把软件项目的风险管理过程划分为：风险计划、风险识别、风险分析、风险控制、风险跟踪等过程。过程如图 3.1 所示

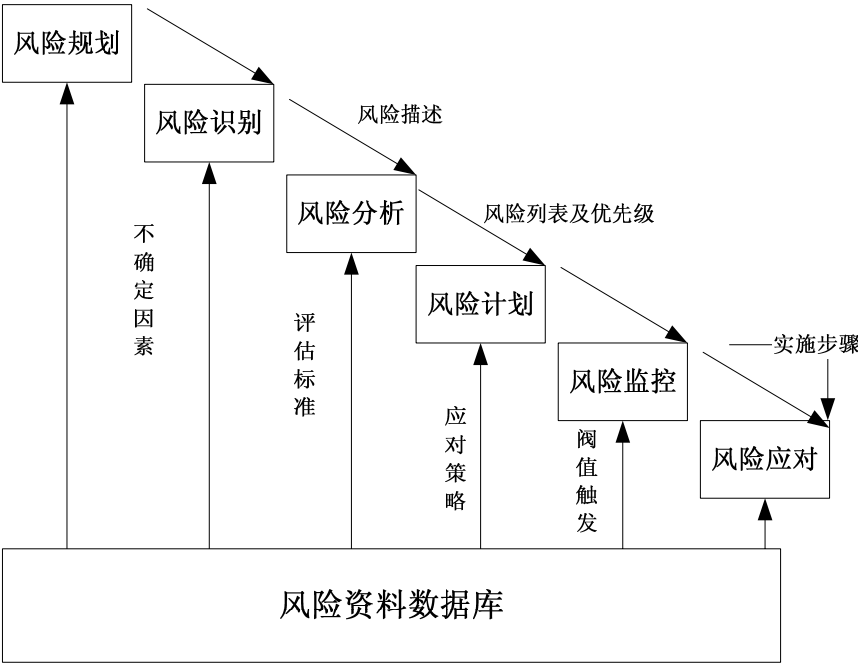


图 3.1 软件项目风险管理过程

软件项目风险管理贯穿于软件工程的生命周期过程，依托于软件项目框架，软件风险管理是软件工程的重要组成部分，它是保证软件项目按照计划进行的保障。此过程是SEI起先提出的风险管理框架结构图，此图说明了软件风险管理是一个持续的过程。

风险管理须同时考虑有关成本、进度、质量及其它风险的内部及外部来源。因为在项目初期进行变更或修正的工作负荷，通常比在项目后期来得容易、花费较低比较不具破坏性，所以，早期积极的风险侦测是重要的。

如同项目策划过程域和项目监控过程域所示，组织初期可能只专注于识别风险，以及当这些风险发生时采取行动。风险管理过程域描述这些特定实践之演进，已有系统的规划、预测及降低风险，使对项目的冲击降至最低。

3.2 风险规划

风险规划是指项目实施之前确定所使用的方法、目标的总体计划。涵盖了风险如何管理和怎样管理，制定风险管理计划是第一步。软件项目整体失败的首要因素往往是缺乏规划的结果。

首先要全面了解和认识将要管理的软件项目的实现目标、项目所具有的内在特征以及项目所处的外部环境。

1. 规划依据

第一步应该获取项目信息，将历史信息、企业规模、项目计划、预算、合同内容等搜集起来，作为风险管理计划的依据。

2. 风险规划过程

风险规划注重明晰的目标，操作性和可控性强，包括风险管理的目标、工作重点、所应采取的方法和策略，风险管理过程中使用的管理手段和工具以及风险管理应该达到的最终结果等。

3. 风险管理规划结果

检查确认风险管理规划的结果是否与项目的整体目标一致，是否符合项目实际情况以及具有可操作性和现实意义。如果符合，则正式成为项目风险管理的第一步成为整个项目的实施依据。

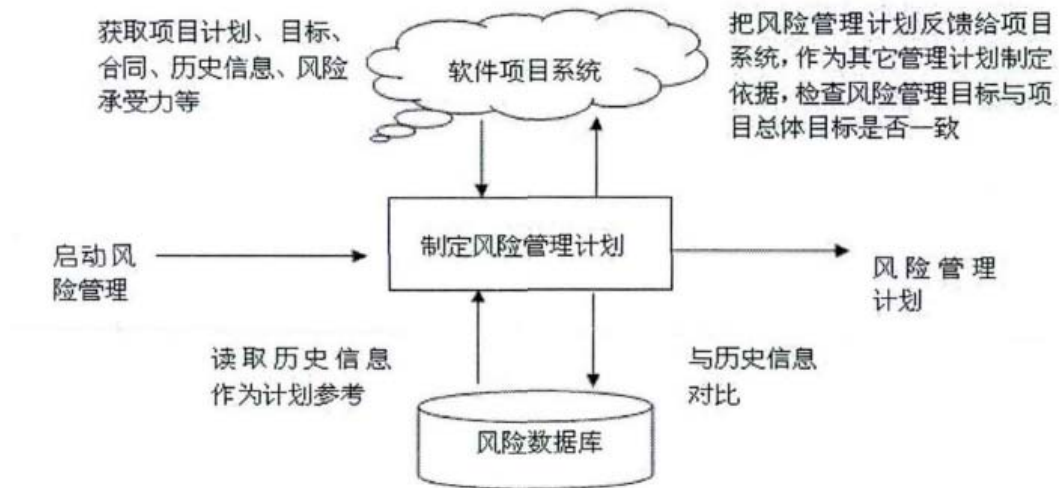


图 3.2 风险规划过程

3.3 风险识别

3.3.1 风险识别过程

如图 3.3 所示，风险识别过程定义使用的是 IDEF0 数据流程图表^[29]。IDEF0 是活动模型的缩写，它始创于 1981 年，是用来定义生产过程一个功能模型标准。IDEF0 是标准过程定义的符号表示法，流程图通过控制、输入、输出和机制描绘了过程的顶级活动是如何进行的。用于为可预测的风险识别描述可重用的过程部件。控制决定过程何时和如何执行。输入就是一个过程转变所需的项，它必须满足过程入口标准。输出是过程转变的结果，这一结果已经通过了过程出口标准的评审，具有实用性。

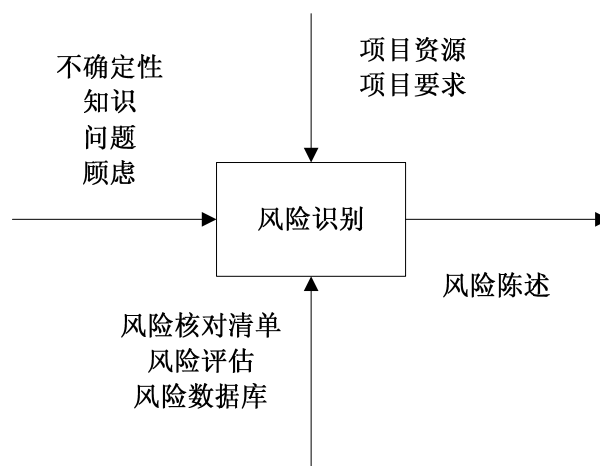


图 3.3 风险识别过程

1. 过程输入

风险识别过程的输入包括不确定性、知识、顾虑和问题。

不确定性：我们不能断言的事，例如，含有“待定”这一词组的要求就可能是潜在风险的聚集地。同样的，以历史数据为基础的风险估算往往低于不以过去经验为基础的估计。

知识：是指我们目前已知的对于软件体系方面的相关经验和当前项目的现状来识别软件风险的应对能力。

问题：是对于项目过程来说，还没有解决的事。它是我们共同工作来解决的开放项目。

顾虑：我们担心将来会发生的事，它们会导致焦虑、恐惧和不安，从而影响我们的项目，通常与风险有关。

2. 过程输出

风险识别过程的输出是风险陈述与风险场景。风险陈述是用标准的表示法对风险进行简要的说明。这一表示法是:问题、可能性、结果。风险陈述的简单使其易读。风险陈述分解为主题和风险的两个主要属性。风险陈述的价值在于它促进了风险交流中的理解。而且，它能帮助确定一个问题是否是风险。

3. 过程控制

风险识别过程是项目资源、项目要求和风险管理计划的调节而驱动的。项目资源靠成本、时间和人员限制风险识别的大致范围。成本受限时，可用更便宜的手段来识别风险；时间受限时，可以使用便捷的方法；人员稀缺时，可以邀请更

少的人来完成风险识别。

3.3.2 常用方法

1. 风险检查表法^[30]

在进行风险识别时，将项目可能发生的许多潜在风险列于一个表上，供识别人员进行检测校对，以判别某项目出现的风险是否是表中所列的或相似的。检查表中罗列的都是以往类似项目曾发生过的风险，是项目风险管理经验的体现和总结，对新的项目管理人员来说，具有启发思维、开阔思路的作用。一个成熟的项目开发团队或项目组织应具备丰富的风险识别能力，针对检查表工具灵活应用。下表 3.1 是基于 CMMI 的某个风险列表库。

表 3.1 CMMI 的风险列表库

风险类型	可能的风险因素
产品规模	1. 是否以 LOC 或 FP 估算产品的规模；
风险	2. 产品的用户量；
	3. 产品需求的改变；
	4. 对于估算出的产品规模的可信程度；
	5. 是否以程序、文件或事务处理的数目来估算产品规模；
	6. 产品规模与之前开发过的项目偏差大小；
	7. 产品使用的数据库规模大小；
商业风险	1. 本产品对公司的收入有何影响；
	2. 延迟交付带来的成本损失；
	3. 产品缺陷带来的成本损失；
	4. 本公司是否得到公司主管部门的重视；
	5. 交付期限是否合理；
	6. 产品满足用户需求的程度；
客户风险	1. 你以前是否曾与这个客户合作过；
	2. 客户对需求的理解程度；

	3. 客户是否重视需求，花时间召开会议确定需求范围；
	4. 客户与开发者的沟通渠道是否通畅；
	5. 客户是否愿意参加项目阶段性的评审；
	6. 该客户是否具有改产品领域的技术素养；
过程风险	1. 软件工程的一系列培训是否覆盖到管理者和开发人员； 2. 是否定期对需求、设计和编码进行正式的技术复审； 3. 组织上是否拟定了一份用于本项目开发的软件过程的相关说明； 4. 是否使用一个机制来控制用户需求的变化及其对软件的影响； 5. 是否使用配置管理来维护系统/软件需求、设计、编码、测试用例之间的一致性； 6. 开发组织是否已经拟定了一份已经成文的、用于本项目开发的软件过程的说明；
技术风险	1. 是否使用方便易用的规格说明技术来辅助客户与开发者之间的通信； 2. 软件分析中是否使用特定的方法进行； 3. 是否使用特定的方法进行数据和体系结构的设计； 4. 高级语言编写代码是否占编码的九成以上； 5. 代码编写是否定义及使用特定的规则； 6. 测试用例的设计是否使用特定的方法进行；
开发环境	1. 是否有可用的软件项目管理工具；
风险	2. 是否有可用的分析及设计工具； 3. 是否有可用的软件配置管理工具； 4. 环境是否利用了数据库或数据仓库； 5. 是否有可用的测试工具； 6. 是否有可用的软件配置管理工具； 7. 环境是否利用了数据库或数据仓库；
与人员有	1. 最优秀的人员可用；
关的风险	2. 技术上是否配套； 3. 足够的人员可用；

-
4. 员是否能够自始至终地参加整个项目的工作；
 5. 是否有一些人员只能部分时间工作；
 6. 员对自己的工作是否有正确的期望；
 7. 员是否接受过必要的培训；
 8. 员的流动是否仍能保证工作的连续性；
-

2. 头脑风暴法

头脑风暴法是在一个自由的无批评的环境下进行的，通过会议，充分交流，畅所欲言，互相启迪，发挥集体的智慧，提高风险识别的正确性和效率，形成创造性意见，最终得出一份风险综合列表。

3. 故障树分析法^[31]

故障树分析是一种常用的风险识别方法。该方法从结果出发，演绎推理查找原因，在风险识别中，故障树分析不仅能够查明项目风险的各方面因素，给出风险事件发生的概率，还提供了风险应对和控制风险因素的相关依据。

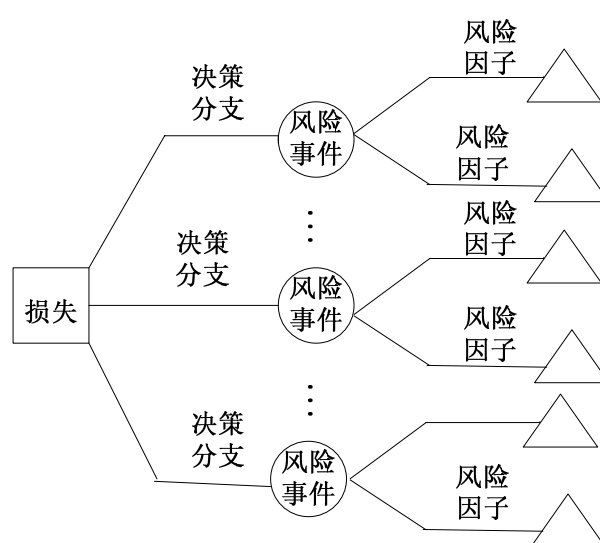


图 3.4 故障树分析法

故障树是故障分析的主要工具，所以关键是建故障树来加以分析。如果故障来源分析不明，出现遗漏或找错的因素，都可能会使定性和定量分析失去意义。建树的过程是一个逐渐深入和完善的过程。建树人既要透彻地了解项目组和各组成部分、各种影响因素，又要严格掌握内在的演绎逻辑。在建树过程中发现薄弱环节，采取改进措施，使所建故障树更科学、更合理。

4. 专家调查法

专家调查法也称德尔菲法，把所要调查的问题汇总后制成表反馈给各位专家，通过多轮次的函询调查识别项目风险。这种方法的最大特点是匿名地、多次整理、归纳、统计直到稳定的意见。背靠背地进行，不发生任何关系，这就减少了权威、资历、口才、人数和心理等因素的影响，各位专家能大胆思考、各抒己见、畅所欲言，在整个应答过程中随时可以改变自己的意见，重新做出预判，也不至于损害自己的威望。应答结果完全是靠专家的经验 and 知识做出的主观判断和分析。

这种方法适用于缺乏客观数据和历史资料的情况，也同样适用于项目计划阶段的风险预测。德尔菲法的两大核心是编制调查表和选择专家。调查表设计得合适与否会直接影响调查结果，编制调查表的原则是方便专家应答，以专家的应答意见来做出预测响应。由于预测质量的好坏来源于专家的应答效果，所以选择合适的专家来提高预测准确确定是关键。由于专家个人因素影响，考虑角度不同，所以对问题的理解也不同，应答结果可能不尽相同。实践表明，一次函询调查很难形成共识，一般要通过多轮调查后，专家才能取得一致意见。用这种方法一般可预测项目的风险造成损失，风险事件的概率，风险事件后果影响程度的评价，风险应对方案等等。

3.4 风险分析

3.4.1 风险分析过程

风险分析一般完成识别风险的来源、风险的影响、风险优先级排序，其中风险的影响程度最为关键，为后期风险应对策略提供必要依据。

风险分析概括了将输入转变为输出的过程活动。控制(位于顶端)调节过程。输入(位于左端)进入过程。输出(位于右端)退出过程。机制(位于底部)支持过程。

风险分析将风险识别过程中发现的特定项目风险估计量或数据转化为一种可被项目团队用来确定优先决策的形式。风险排序让项目团队可以负责项目资源从而对最重要的风险进行管理。

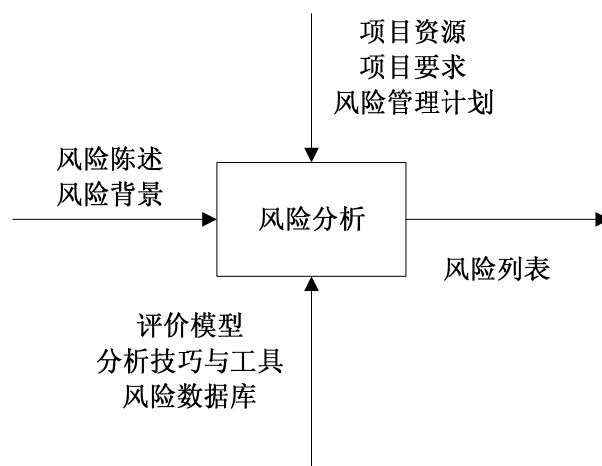


图 3.5 风险分析过程

1. 过程输入

风险分析过程的输入有风险描述与相关的风险背景。风险陈述是用标准格式表示的风险简要说明。具体可表述为：问题、可能性和预测的结果。在输入中表述是主观的，有时甚至是不确定的。通过风险分析过程，可以理清问题改进风险描述。通过提炼风险背景、合并和分解风险陈述来重新描述风险。你也可更详细陈述可能性和后果来改进风险陈述。详细的风险影响价值在有利于排列风险的优先级。风险交流通过简单地用数字(而不是词组)来表示风险影响，所以更有效。

2. 过程输出

风险分析过程的输出产品是相关背景下的风险列表，该列表是按风险优先级顺序排列。一个按优先级等级排序的风险列表是一个详细的风险目录，其中包含了所有已识别风险的相对排名。风险背景展示了一些间接信息，陈述了风险周围的包括事件、条件、约束、假想、环境、诱发因素等相关问题。风险背景经过提炼，使风险分析得出的结论更加可靠，如风险类别和风险来源通过风险数据库的相关信息得到。

3. 过程控制

项目资源、项目需求和风险管理计划调节风险分析过程，其方式类似于它们控制风险识别过程的方式。

3.4.2 风险的评估及排序

风险分级是风险估算后的活动，项目评估组从风险因素的多个角度评估对每一个风险发生的可能性或概率，以及风险发生后所产生的后果。项目启动者、相关管理人员以及技术人员共同参与并执行四个风险预测活动：

1. 建立一个标度，以反映风险发生的概率；
2. 描述风险的后果；
3. 估算风险对项目及产品的影响；
4. 按照风险的严重程度排序风险。

提供对风险等级评定的参考标准。为了方便管理起见，采取量化形式，并给出了有关风险的 3 个参数：

1. 风险严重性：风险发生后对项目的损失程度。
2. 风险可能性：风险发生的概率。
3. 风险系数：严重性和风险可能性的乘积。

表 3.2 风险损失的严重性等级

参数	等级	值	描述
风险严重性	很高	5	进度延迟超出 30%，或者成本预算超出 30%。
	比较高	4	进度延迟超出 20%~30%，或者成本预算超出 20%~30%。
	中等	3	进度延迟超出 20%，或者成本预算不足 20%。
	比较低	2	进度延迟不足 10%，或者成本预算不足 10%。
	很低	1	进度延迟不足 5%，或者成本预算不足 5%。

表 3.3 风险发生概率等级

参数	等级	值	描述
风险可能性	很高	5	风险发生可能性为 1.0 ~ 0.8
	比较高	4	风险发生可能性为 0.8 ~ 0.6
	中等	3	风险发生可能性为 0.6 ~ 0.4
	比较低	2	风险发生可能性为 0.4 ~ 0.2
	很低	1	风险发生的几率为 0.2 ~ 0.0

表 3.4 风险系数等级

风险系数		风险可能性				
		很高 5	比较高 4	中等 3	比较低 2	很低 1
风险 严重性	很高 5	25	20	15	10	5
	比较高 4	20	16	12	8	4
	中等 3	15	12	9	6	3
	比较低 2	10	8	6	4	2
	很低 1	5	4	3	2	1
本表灰色部分的风险系数值为 10-25，应当优先处理。						

3.5 风险控制

针对每个关键性的风险，制订可选择的活动、替代方案、返回点，并对每个风险皆有建议的行动过程，是风险降低计划的关键组件。特定风险的风险降低计划包括规避、降低及控制风险发生可能性的技术和方法，或风险发生时遭受的损失程度(有时称作[紧急应变计划])，或上述两者。控制风险，当风险超过设定的阈值时，展开风险降低计划，以使受冲击的部分回归到可接受的风险等级。只有风险结果评定为高或无法接受时，才对该风险制订风险降低计划和紧急应变计划，其它的风险可能仅是接受，并简单地监控。

3.5.1 风险控制过程

针对每个关键性的风险，制订可选择的活动、替代方案、返回点，并对每个风险皆有建议的行动过程，是风险降低计划的关键组件。特定风险的风险降低计划包括规避、降低及控制风险发生可能性的技术和方法，或风险发生时遭受的损失程度(有时称作[紧急应变计划])，或上述两者。监控风险，当风险超过设定的阈值时，展开风险降低计划，以使受冲击的部分回归到可接受的风险等级。只有风险结果评定为高或无法接受时，才对该风险制订风险降低计划和紧急应变计

划，其它的风险可能仅是接受，并简单地监控

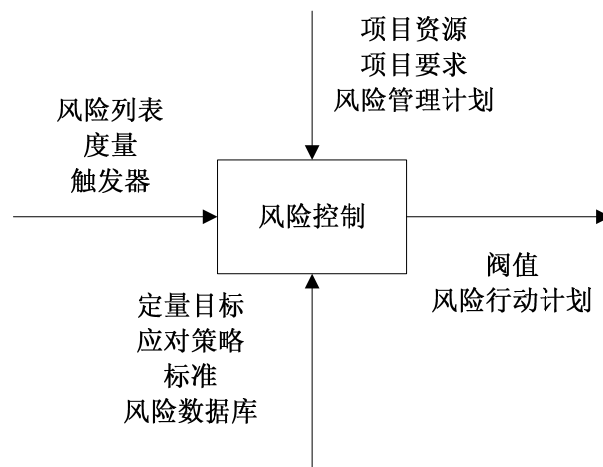


图 3.6 风险控制过程

1. 过程输入

风险列表：包含所有已知风险按优先次序排列的列表。

度量：确定风险严重程度的尺度。度量提炼后的风险背景—围绕在风险声明周围的间接信息(事件、情况、约束、假设、环境、有影响的因素和相关的问题)，可从风险数据库获得这些信息。

触发器：应对风险行动计划的装置。该装置可用来启动、缓解、终止风险行动计划。

2. 过程输出

输出项为阈值和风险行动计划。风险设想是对导致不如人意的结果的事件和情况的估计。事件描述导致风险发生时必然导致的后果。情况描述使未来事件成为可能的环境。

风险系数阈值：是专业技术人员根据经验或者是以往项目的参考数据制定的，它是风险启动的门限值，是风险处理的一个预警信号。

3. 过程控制

项目资源、项目需求和风险管理计划调节风险分析过程，其方式类似于它们控制风险识别过程的方式。

3.5.2 风险行动计划

按照风险的不同优先级，可采取如下五种风险行动计划：

- 1. 接受：对风险系数较低的风险因素，不采取任何动作
- 2. 转嫁：重新配置设计需求，以降低风险
- 3. 规避：改变或降低需求，但仍符合使用者需要
- 4. 缓解：制定相应缓解措施，对风险进行降低
- 5. 应急方案：通常，特别针对高风险，应产生一种以上的风险处理方法。

表 3.5 风险系数分类

风险系数	触发条件	处理措施
20-25	进度延迟 15% 成本超支 15%	向高级经理提交《风险管理报告》寻求解决办法。
10-19	进度延迟 10% 成本超支 10%	按预定义的规避措施，处理该风险。
1-9	进度延迟 5% 成本超支 5%	在以后的识别中重新评估

3.6 风险跟踪

3.6.1 风险跟踪过程

如图 3.6 的 IDEF0 图表所示为风险跟踪过程，IDEF0 是一个标准过程定义。图示表示法，把可预见的风险跟踪描述为可复用的过程组件。该图表描述了顶级过程的控制、输入、输出和机制。风险跟踪包含了输入转变为输出的过程活动，位于顶部的控制调节过程，位于左侧的输入进入过程，位于右侧的输出退出过程，位于底部机制支持过程。

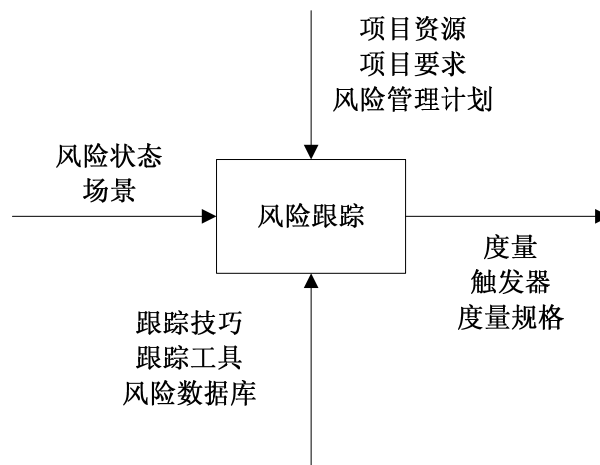


图 3.7 风险跟踪过程图

1. 过程输入

风险状态：实施风险行动的结果在数据库中获得。

阈值：为风险执行行动计划的边界值，当预先的值作为警告时，需要发布通知，执行行动计划。

场景：记录那些导致出人意料的结果的事件和情况，监视风险发生的可能性是否在改变。

2. 过程输出

度量如同代码行数来度量软件的大小，用来确定大小、数量或容量。度量规格如同软件产量度量规格，是度量复合的概念，它是在计划中非常有用的指南或控制规则。触发器是启动、解除或延缓活动的装置。

3. 过程控制

项目资源、项目需求和风险管理计划约束着风险跟踪过程。

4. 过程机制

风险跟踪过程可以是某些技巧、方法、工具或手段，它们使过程结构化。风险跟踪技巧是有利于协助监视特定情况下的某种风险状态的度量和度量规格。风险跟踪工具使得整个过程自动化。风险数据库包括度量规格、度量、和触发器。

3.6.2 相关过程活动

1. 监视风险设想

风险设想是我们针对严重的风险投资的，所需的时间是我们的。风险设想好像将风险串联成一连串的问题。我们监视风险设想，确定风险发生的概率是否有所变化。情况和事件的改变也能反应风险应对是否成功。无法看到全局时，风险设想可提供需要注意的证据，因为风险正在逐渐演变为现实。跟踪风险状态的事件和情况，可确定越来越明显的风险影响是否有必要立即采取行动。总之，跟踪风险设想可以有效地增加项目开发的信心，较少风险发生的可能性，提高项目总体掌控能力。

2. 比较状态与阈值

通过跟踪工具获得工作活动产生的状态。当状态为输入时，比较风险现状与计划中的阈值。如果指标的值超出可接受范围，则出现了不可接受的情况，这相当于一个提前示警系统。触发器控制风险计划的实施。如果风险降到阈值许可的范围内，触发器就终止风险应对活动。

3. 应对风险策略

应对风险策略——触发器提供 3 种控制活动的功能。第一为激活，触发器响应访问风险行动计划的预警。第二为解除，终止风险应对活动前，触发器用于发送信号。第三为挂起，暂停执行时，触发器响应风险行动计划。

4. 生成风险的度量

度量与度量规格——度量是确定大小、数量和容量的标准度量单位，用风险发生概率和相应的损失相乘的结果值来表示。已识别风险的度量记录在风险数据库中。度量规格是为管理层应对风险服务的，它记录着一段时间内与之相关的复合度量数据。

3.7 本章小结

本章详细讲了风险管理中的五大过程，分别是风险规划过程、风险识别过程、风险分析过程、风险控制过程、风险跟踪过程，并依次从输入、输出、过程机制等方面讲述了每个风险管理过程的具体活动。

4 基于联系数的三角模糊数评估软件风险研究

4.1 三角模糊数的相关理论

针对软件风险的定量评估,提出了一种联系数^[31]和模糊数学^[32-33]理论相结合确定风险优先级的定量分析方法,用三角模糊数表征专家的判断信息,将三角模糊数转化为联系数,用联系数决策模型得出决策综合值,按决策值的大小得出风险优先级的排序。相比单纯的三角模糊数多属性评估^[34-38],一是既考虑了三角模糊数的中值,又兼顾了三角模糊数的上下确界,即联系数的差异度,更具客观性;二是对专家的权重向量进行三角模糊化的修正,克服了权重确定带来的主观偏差。最后通过实例仿真验证了该方法对风险定量分析的可行性。

定义 1: 若 $a = [a^L, a^M, a^U]$, 其中 $0 < a^L \leq a^M \leq a^U$, 则称 a 是一个三角模糊数, 该模糊数的上确界、中值和下确界分别为 a^U 、 a^M 、 a^L , a^U 表示最悲观的值, a^M 表示最有可能的值, a^L 为最乐观的值, 称 $a^U - a^L$ 为三角模糊数的取值区间。其隶属函数可以表示为:

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{x - a^L}{a^M - a^L}, & a^L \leq x \leq a^M \\ \frac{x - a^U}{a^M - a^U}, & a^M \leq x \leq a^U \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

定义 2: 设两个三角模糊数 $a = [a^L, a^M, a^U]$, $b = [b^L, b^M, b^U]$, R 为实数集, 其中 $0 < a^L < a^M < a^U \in R$, $0 < b^L < b^M < b^U \in R$, 定义运算如下:

加法运算: $a + b = [a^L + b^L, a^M + b^M, a^U + b^U]$

乘法运算: $ab = [a^L b^L, a^M b^M, a^U b^U]$

除法运算: $\frac{a}{b} = \left[\frac{a^L}{b^U}, \frac{a^M}{b^M}, \frac{a^U}{b^L} \right]$

数乘运算: $\lambda a = [\lambda a^L, \lambda a^M, \lambda a^U]$

定义 3: 设 R 为实数集, $0 < a, b \in R, i \in [-1,1]$, 则称 $a+bi$ 为联系数。

若 $a+b=1$, 称 $a+bi$ 为归一化联系数; 若不满足上述要求, 可转化为满足 $a+b=1$ 的形式

$$\mu = \frac{a}{a+b} + \frac{b}{a+b}i$$

定义 4: 设 $u_1 = a_1 + b_1i$, $u_2 = a_2 + b_2i$ 是两个联系数, 定义两个联系数之和 $u_1 + u_2$ 为 $u = a + bi$, 定义运算如下:

加法运算: $u = u_1 + u_2 = a_1 + a_2 + (b_1 + b_2)i$

乘法运算: $u = u_1 \times u_2 = (a_1 + b_1i) \times (a_2 + b_2i) = a_1a_2 + (a_1b_2 + a_2b_1 + b_1b_2)i$

4.2 建立三角模糊数与联系数的关系

由于三角模糊数是确定与不确定的统一, 将三角模糊数的中值与联系数的确定性相对应, 令 $a = a^M$; 将三角模糊数的取值范围 $a^U - a^L$ 与联系数的不确定性对应, 有 $b = a^U - a^L$, 则有三角模糊数 a 可转化为 $a+bi$ 型联系数, 即

$$a = a^M + (a^U - a^L)i$$

为三角模糊数转换成联系数的公式。其中 $b = a^U - a^L$ 称作联系数的差异度, i 的取值区间为

$$\left[\frac{a^L - a^M}{a^U - a^L}, \frac{a^U - a^M}{a^U - a^L} \right]$$

由此有效的把三角模糊数转换成联系数, 在联系数的基础上, 针对三角模糊数的多属性问题决策, 采取联系数的方法得以解决。

4.3 联系数决策模型

把模型中的权重三角模糊数 w_t 与属性值三角模糊数 p_{kt} 分别转换成相应的联系数, 即

$$w_t = A_{w_t} + B_{w_t}i$$

$$p_{kt} = A_{p_{kt}} + B_{p_{kt}} i$$

利用联系数的加法和乘法定义，得到

$$M(r_k) = \sum_{t=1}^n (A_{w_t} + B_{w_t} i)(A_{p_{kt}} + B_{p_{kt}} i) = A_k + B_k i$$

该式称为基于联系数的三角模糊多属性决策模型，简称联系数决策模型，其值称为联系数决策值。

在联系数决策模型中， i 根据 i 的比例取值原理取值

$$i = \frac{A_k}{A_k + B_k}$$

计算出最后的综合决策值，综合决策值大的风险优先级大于决策值小的风险。

4.4 基于联系数的三角模糊数多属性决策评估步骤

步骤 1 组建专家集 $D = (d_1, d_2, \dots, d_p)$ ，确定评估风险项集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。

步骤 2 确定评估属性集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 及其评估标度集。

步骤 3 专家 $d_k \in D$ 给出个风险项 $r_i \in R$ 在评估属性中的三角模糊值 $x_{ij}^{(k)}$ ，得到专家的评估矩阵 $X_k = (x_{ij}^{(k)})_{n \times m}$ 。

步骤 4 利用加权法得到评估矩阵 X_k 中第 i 行的评估信息进行集结，得到专家 d_k 给出的评估风险项 r_i 的综合评估值 $z_i^{(k)} (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p)$

$$z_i^{(k)} = \lambda_1 x_{i1}^{(k)} + \lambda_2 x_{i2}^{(k)} + \dots + \lambda_m x_{im}^{(k)}, \text{ 其中 } \lambda_j \text{ 为加权系数, } \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1。$$

进而得到专家 $d_k \in D$ 下的风险项 r_i 的综合评估矩阵 $P = (z_{ij})_{n \times p}$ 。

步骤 5 为消除不同物理量纲对决策结果的影响，将矩阵 P 规范化设规范化后的矩阵为 $A = (z_{ij}^L, z_{ij}^M, z_{ij}^U)_{n \times p}$ ，对于效益型属性值，规范化公式为

$$z_{ij}' = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}$$

对于成本型属性值，规范化公式为

$$z_{ij}' = \frac{\frac{1}{z_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{ij}}}$$

对效益属性值可进一步求得

$$z_{ij}^{L'} = \frac{z_{ij}^L}{\sum_{i=1}^n z_{ij}^U}, \quad z_{ij}^{M'} = \frac{z_{ij}^M}{\sum_{i=1}^n z_{ij}^M}, \quad z_{ij}^{U'} = \frac{z_{ij}^U}{\sum_{i=1}^n z_{ij}^L}$$

对成本型属性值，有

$$z_{ij}^{L'} = \frac{\frac{1}{z_{ij}^U}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{ij}^L}}, \quad z_{ij}^{M'} = \frac{\frac{1}{z_{ij}^M}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{ij}^M}}, \quad z_{ij}^{U'} = \frac{\frac{1}{z_{ij}^L}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{ij}^U}}$$

步骤 6 将各位专家的权重表示成三角模糊数的权重矩阵

$W = (w_1, w_2, \dots, w_p)$ ，其中 $w_i (i=1, 2, \dots, p)$ 为三角模糊数。

步骤 7 将矩阵 A 的三角模糊数值和各专家的三角模糊数权重矩阵 W 分别转化成联系数 A' 和 W'

步骤 8 利用联系数决策模型计算各风险的综合决策值，根据综合决策值的大小作出风险大小的评估。

步骤 9 稳定性检验。取 i 在区间 $[\min \frac{a^L - a^M}{a^U - a^L}, \max \frac{a^U - a^M}{a^U - a^L}] \subseteq [-1, 1]$ 内的其他值，检验前述排序的稳定性。

4.5 实例分析

以文献^[33]的例子加以说明。某软件项目得出可能存在的较为严重的风险项有：人员流动性大 r_1 、项目高层管理者承担的义务不足 r_2 、需求不稳定 r_3 、不切实际的工期计划 r_4 、用户参与程度不够 r_5 、引进新技术风险 r_6 。

由客户、开发人员和项目管理者，3 位评估者 $d_k(k=1,2,3)$ 组成专家团队。风险评估属性给出了四个准则，分别为概率 u_1 、损失 u_2 、不可控制性 u_3 、发生时间段 u_4 ，用三角模糊数对风险的评估属性进行评估。其中 u_1 的评估值直接用 0 到 1 之间的三角模糊数给出， u_2 、 u_3 、 u_4 采用的标度集对应的三角模糊数如表 4.1、表 4.2，三个专家的评估矩阵如表 4.3、4.4、4.5。

表 4.1 u_2 的语言标度值与其对应的三角模糊数

语言标度值	三角模糊数
高	(0.75,1,1)
较高	(0.5,0.75,1)
中	(0.25,0.5,0.75)
较低	(0,0.25,0.5)
低	(0,0,0.25)

表 4.2 u_3 和 u_4 的语言标度值与其对应的三角模糊数

语言标度值	三角模糊数
早、高	(0.5,1,1)
中	(0,0.5,1)
晚、低	(0,0,0.5)

表 4.3 客户 d_1 给出的评估矩阵 X_1

	u_1	u_2	u_2	u_2
r_1	(0.2,0.3,0.4)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0,0.5)	(0,0.5,1)
r_2	(0.1,0.2,0.25)	(0.5,0.75,1)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_3	(0.2,0.3,0.4)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_4	(0.1,0.15,0.2)	(0.5,0.75,1)	(0.5,1,1)	(0,0,0.5)
r_5	(0.1,0.15,0.2)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_6	(0.1,0.2,0.3)	(0,0.25,0.5)	(0,0,0.5)	(0,0,0.5)

表 4.4 开发人员 d_2 给出的评估矩阵 X_2

	u_1	u_2	u_2	u_2
r_1	(0.3,0.5,0.6)	(0,0.25,0.5)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_2	(0.1,0.3,0.5)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0.5,1,1)
r_3	(0.3,0.4,0.7)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0.5,1,1)
r_4	(0.2,0.3,0.5)	(0.5,0.75,1)	(0.5,1,1)	(0,0.5,1)
r_5	(0.3,0.5,0.8)	(0.75,1,1)	(0,0.5,1)	(0.5,1,1)
r_6	(0.1,0.2,0.4)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)

表 4.5 项目管理者 d_3 给出的评估矩阵 X_3

	u_1	u_2	u_2	u_2
r_1	(0.4,0.5,0.7)	(0,0.25,0.5)	(0,0,0.5)	(0,0.5,1)
r_2	(0.3,0.4,0.5)	(0.5,0.75,1)	(0.5,1,1)	(0.5,1,1)
r_3	(0.3,0.35,0.5)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_4	(0.2,0.3,0.5)	(0.5,0.75,1)	(0,0.5,1)	(0,0.5,1)
r_5	(0.3,0.5,0.8)	(0.75,1,1)	(0.5,1,1)	(0.5,1,1)
r_6	(0.1,0.2,0.4)	(0.25,0.5,0.75)	(0,0,0.5)	(0,0.5,1)

由步骤 4 公式得到综合评估值 $z_i^{(k)}$ ，其中取 $\lambda = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25,)$ ，如表 4.6

表 4.6 风险项的综合评估值

	d_1	d_2	d_3
z_1	(0.1125,0.325,0.6625)	(0.075,0.4375,0.775)	(0.1,0.3125,0.675)
z_2	(0.15,0.4875,0.8125)	(0.2125,0.575,0.8125)	(0.45,0.7875,0.875)
z_3	(0.1125,0.45,0.7875)	(0.3875,0.725,0.8625)	(0.1375,0.4625,0.8125)
z_4	(0.325,0.5375,0.75)	(0.175,0.5125,0.875)	(0.175,0.5125,0.85)
z_5	(0.0875,0.4125,0.7375)	(0.5125,0.875,0.95)	(0.5125,0.85,0.9)
z_6	(0.025,0.1125,0.45)	(0.0875,0.425,0.7875)	(0.0875,0.3,0.6375)

由步骤 5，由于风险值高的优先级高，故采用效益型规范化公式的规范矩阵，如下表 4.7

表 4.7 规范化后的矩阵 A

	d_1	d_2	d_3
r_1	(0.027,0.140,0.815)	(0.015,0.123,0.534)	(0.021,0.097,0.461)
r_2	(0.036,0.210,1.000)	(0.042,0.162,0.560)	(0.095,0.244,0.598)
r_3	(0.027,0.194,0.969)	(0.077,0.204,0.595)	(0.029,0.143,0.556)
r_4	(0.077,0.231,0.923)	(0.035,0.144,0.603)	(0.037,0.159,0.581)
r_5	(0.021,0.177,0.908)	(0.101,0.246,0.655)	(0.108,0.264,0.615)
r_6	(0.006,0.048,0.554)	(0.017,0.120,0.543)	(0.018,0.093,0.436)

文献[33]中的专家权重是完全确定的，即 $w = (0.3, 0.3, 0.4)$ ，为消除权重确定带来的主观偏好，现将权重向量三角模糊化，取模糊区跨度为 0.2，这样更符合

实际，按步骤 6 所述得到模糊化的权重向量 $W = \begin{pmatrix} 0.2, 0.3, 0.4 \\ 0.2, 0.3, 0.4 \\ 0.3, 0.4, 0.5 \end{pmatrix}$ 。

由步骤 7，将综合评估值矩阵 A 转化成联系数形式得到 A' ，如下表 4.8

表 4.8 联系数形式的矩阵 A'

	d_1	d_2	d_3
r_1	$0.140 + 0.788i$	$0.123 + 0.519i$	$0.097 + 0.440i$
r_2	$0.210 + 0.964i$	$0.162 + 0.518i$	$0.244 + 0.503i$
r_3	$0.194 + 0.942i$	$0.204 + 0.518i$	$0.143 + 0.527i$
r_4	$0.231 + 0.846i$	$0.144 + 0.568i$	$0.159 + 0.544i$

r_5	$0.177 + 0.887i$	$0.246 + 0.554i$	$0.264 + 0.507i$
r_6	$0.048 + 0.548i$	$0.120 + 0.526i$	$0.093 + 0.418i$

$$\text{专家权重矩阵 } W' = \begin{pmatrix} 0.3 + 0.2i \\ 0.3 + 0.2i \\ 0.4 + 0.2i \end{pmatrix}.$$

由步骤 8，利用联系数的决策方法计算出综合决策值如下：

$$M(r_1) = \sum_{t=1}^n (A_{w_t} + B_{w_t}i)(A_{p_{kt}} + B_{p_{kt}}i) = 0.1177 + 0.9895i$$

$$M(r_2) = 0.2092 + 1.166i$$

$$M(r_3) = 0.1766 + 1.1544i$$

$$M(r_4) = 0.1761 + 1.1402i$$

$$M(r_5) = 0.2325 + 1.1621i$$

$$M(r_6) = 0.0876 + 0.89i$$

i 根据 i 的比例取值原理取值 $i = \frac{A_k}{A_k + B_k}$ ，最终得到 $M(r_1) = 0.2354$ ，

$$M(r_2) = 0.4184, \quad M(r_3) = 0.3532, \quad M(r_4) = 0.3521, \quad M(r_5) = 0.4649,$$

$$M(r_6) = 0.1752$$

排序结果为 $r_5 > r_2 > r_3 > r_4 > r_1 > r_6$ 。

按步骤 9，稳定性检验，当 $i = -0.2$ 时，决策值依次是 -0.0802 ， -0.024 ， -0.05428 ， -0.05194 ， -0.00008 ， -0.0904 ，排序结果为 $r_5 > r_2 > r_4 > r_3 > r_1 > r_6$ 。

当 $i = 0$ 时，排序结果为 $r_5 > r_2 > r_3 > r_4 > r_1 > r_6$ 。

当 $i = 0.5$ 时，决策值依次是 0.6125 ， 0.7922 ， 0.7538 ， 0.7462 ， 0.8136 ， 0.5326 ，排序结果为 $r_5 > r_2 > r_3 > r_4 > r_1 > r_6$ 。

当 $i = 0.6$ 时，决策值依次是 0.7114, 0.9088, 0.8692, 0.8602 , 0.9298, 0.6216, 排序结果仍为 $r_5 > r_2 > r_3 > r_4 > r_1 > r_6$ 。

除 $i = -0.2$ 时， r_3 和 r_4 的前后排序与其他略有偏差，但综合上述数据，可以看出结果相对稳定。

综上，得出的结论与文献^[33]相吻合，即用户参与程度不够以及项目高层管理者承担的义务不足成为优先级较高的风险项，从而验证了本文方法的可行性和有效性。

4.6 本章小结

本章通过三角模糊数取中值的相对确定性与上下确界中间取中值以外其他值的相对不确定性，建立起三角模糊数转换成联系数，从而得到基于联系数的多属性决策模型，这不仅简化了计算过程，而且把两者有机地结合在一个决策模型中，较单纯利用三角模糊数来决策更合理，不易丢失相关信息；同时对专家的权重向量进行三角模糊化的修正，克服了权重确定带来的主观偏差，可为属性权重不完全确定的方案决策提供了一种新思路。

5 结论与展望

5.1 本文总结

本文首先从软件风险管理的相关概念出发，在国内外项目风险管理的研究基础上，系统地阐述了风险管理的理论基础，接着重点从风险计划、风险识别、风险分析、风险控制、风险跟踪这几个关键过程入手，探讨了风险管理的具体方法和策略；最后针对中小型企业的企业信息化风险评估，详细地介绍了一种定量评价方法，该方法将联系数和三角模糊数结合，给出风险优先级的排序，为风险应对提供必要依据。

- (1) 描述了国内外的软件风险现状；
- (2) 软件风险管理的基本概念和常用模型；
- (3) 软件风险管理过程的分解；
- (4) 提出了一种定量风险评估模型，基于联系数的三角模糊数评估风险模型。

5.2 进一步研究

软件风险管理可延伸到项目管理的整个生命周期中，因为决定了其管理的复杂性，本文重点研究和设计的软件项目风险管理系统还有很多工作需要深入探讨，由于时间和水平的关系，本文的研究工作还有许多不足，表现如下：

- (1) 进一步改进成熟的风险管理模型，以更好地用于实践评估中。
- (2) 针对大型项目的风险管理，应考虑风险管理投入的成本因素，包括人力和财力，从而减少企业的内部开销。

参考文献

- [1] 韩万江, 姜立新. 软件开发项目管理[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:45-49.
- [2] 唐爱国, 王如龙. 软件项目范围变更流程与过程控制研究[J]. 项目管理, 2006, 10(9):71-73.
- [3] 陈忠. 软件项目的风险管理[J]. 经济与社会发展, 2004, 2(12):37-39.
- [4] 文亚栋. 软件项目的风险管理[J]. 计算机系统应用, 2002, 8(2):72-74.
- [5] 单晓红. 软件项目开发风险应对的若干问题研究[D]. 北京: 北京大学, 2010:05.
- [6] 黄梯云. 管理信息系统(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1999:127-146.
- [7] 郑人杰. 软件工程(高级)[M]. 北京:清华大学出版社, 1999:316-318.
- [8] 何芳, 张李义. 信息系统开发过程的风险评估[J]. 武汉:武汉水利电力大学学报, 1999, 32(5):110-112.
- [9] 张李义. 信息系统开发的动态风险模糊估测方法[J]. 北京:系统工程理论与实践, 2001, 22(10):88-92.
- [10] 莫湘群. 软件项目的进度风险管理[J]. 电脑与信息技术, 2002, 13(4):67-70.
- [11] Shyi-Ming Chen. Fuzzy group decision making for evaluating the rate of aggregative risk in software development[J]. Fuzzy Sets and Systems. 2001, 118(11):75-88.
- [12] 陈启中. MRP II 制造资源计划基础[M]. 北京:企业管理出版社, 1997:189-220.
- [13] Huey-Ming Lee. Generalization of the group decision making using fuzzy sets theory for evaluating the rate of aggregative risk in software development[J]. Information Sciences, 1999, 113(6):301-311.
- [14] 方德英, 李敏强, 寇纪淞. 软件项目风险管理方法的比较与分析[J]. 运筹与管理, 2004, 13(3):81-85.
- [15] 李明树, 何梅, 杨达. 软件成本估算方法及应用[J]. 软件学报, 2007, 4(18):775-795.
- [16] Boehm, B. W. Software Risk Management[M]. Washington D. C:IEEE Computer Society Press, 1991:348-375.
- [17] Charette, Robert N. Software engineering risk analysis and Management[M]. New York Intertext Publication, McGraw-Hill Book, 1989:273-29.

- [18] Ronald, P.Higuera, Y.Haimes. Software Risk Management[J].CMU/SEI-96-TR-012, 2003, 33(8):1846-186.
- [19] Julie J.C.H. Ryan, Thomas A. Mazzuchi, Daniel J. Ryan. Quantifying information security risks using expert judgment elicitation[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(4):774 - 784.
- [20] Wslsh, K.R.&Schneider, K.R.&Schneide , H.The role of motivation and risk behaviors in software development success[J].Information Research, 2002, 30(26):26—30.
- [21] Tallon, A review of studies on expert estimation of software development effort[J]. The Journal of Systems and Software, 2004, 70(11):37 - 60.
- [22] Bob Hughes, Mike Cotterell. Software project management[J].McGraw — Hill, 1999, 3(26):26-30.
- [23] Tom DeMarco, Timothy Lister 著.熊节, 马姗姗译. 与熊共舞——软件项目风险管理[M]. 北京:清华大学出版社. 2004:33-35.
- [24] 孟祥睿. 软件项目风险管理研究[J]. 经济论坛, 2005, 15(7):98-99.
- [25] 于进. 软件项目风险管理中风险分析方法的研究[J]. 计算机现代化, 2005, 18(3):54-55.
- [26] Ray C, Williams George, Pandelios. Software Risk Evaluation(RE) Method Description(Version 2. 0), Technical Report CMU/SEI — 99-TR-029, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 15213, USA, 1999.
- [27] 罗运模. CMMI 软件过程改进与评估[M]. 北京. 电子工业出版社. 2005:42-53.
- [28] 张路玲, 李师贤. 软件项目风险管理方法比较和研究[J], 计算机工程, 2003, 29(3):92-93.
- [29] 方德英. IT 项目风险管理理论与方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2003:05.
- [30] E M Hall. 风险管理—软件系统开发方法[M]. 王海鹏译. 北京清华大学出版社, 2002:48-53.
- [31] 赵克勤. 集对分析中的不确定系统理论在 AI 中的应用[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 16-25.
- [32] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8):9-21.

- [33] 杨莉, 李南, 和媛媛. 三角模糊数多属性决策在软件项目风险评估中应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11):246-248.
- [34] 李志林. 关联函数为区间数的综合评价方法[J]. 江汉大学学报, 2003, 21(1):4-7.
- [35] 李志林. 区间关联函数的新定义及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2006, 2(2):207-210.
- [36] 于丽英, 李洪成, 于英川. 不确定情况下群体多属性决策的可能度决策方法[J]. 上海大学学报, 2002, 8(4):353-356.
- [37] 张全, 樊治平, 潘德惠. 区间数多属性决策中一种带有可能度的排序方法[J]. 控制与决策, 1999, 11(6):703-711.
- [38] 徐泽水. 基于可能度和误差分析的区间数互补判断矩阵排序法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(2):96-98.

攻读硕士期间发表的论文

- [1] 吴朱军, 南振岐, 孙艳川. 基于联系数的三角模糊数评估软件风险[J]. 《科技创新与应用》, 2013, 10:19-21.

致谢

感谢我的导师南振岐教授对我的关心和指导。不仅从生活中进行无微不至的关怀，而且给我们接触和参与其公司做项目的机会，论文的选题、定题到论文的写作、修改及定稿，导师都付出了很多心血，也学到了许多做事的方法和做人的道理！

感谢我的师门及我的同学们，大家像亲人一样在生活 and 工作中对我无微不至的照顾，并给我论文提出了大量的有益的建议。是他们让我在人生的这段时光中，感受到了温馨与快乐，让我在这段紧张的学习生活中并不感觉到寂寞。我们在一起度过了三年的美好时光。

感谢论文评审的各位专家，在百忙之中抽空评审我的论文，并给出宝贵意见。