



复杂装备研制质量 风险传导分析： 方法与应用

杨 敏 周晟瀚 魏法杰 常文兵/著



科学出版社

复杂装备研制质量风险传导 分析：方法与应用

杨 敏 周晟瀚 魏法杰 常文兵 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

质量风险是指由于质量问题影响装备研制的进度、性能、费用、安全等目标实现的风险事件。本书首先分析复杂装备研制过程中的主要质量风险因素以及常用分析方法的优缺点,介绍如何利用技术成熟模型度量化分析影响质量的技术风险,如何利用因果贝叶斯网络、基于模糊相关的方法和蒙特卡罗仿真构建风险传导分析模型并应用于复杂装备研制质量风险传导分析。其次对风险传导分析中专家概率判断的抽取与集成方法进行专门分析,以便更好地使用这些模型和方法。最后提供一个复杂装备研制过程中的真实案例,展示这些传导分析和控制方法的应用及效果。

本书是面向实际应用的学术专著,可供复杂系统开发中风险传导分析的研究者和装备研制风险管理的实践者,以及工程风险管理相关专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂装备研制质量风险传导分析:方法与应用 / 杨敏等著. —北京:科学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-03-055015-6

I. ①复… II. ①杨… III. ①军事装备—研制—质量管理—中国 IV. ①E242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 264141 号

责任编辑:王丹妮 / 责任校对:王晓茜
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2018 年 2 月第一次印刷 印张:13

字数:262 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

质量风险是指由于质量问题影响装备研制的进度、性能、费用等目标实现的风险事件。随着质量风险因素在复杂装备研制体系内的多向传导,风险可能被放大甚至被激化,从而严重影响装备研制工作,形成不可接受的质量风险。近年来,我军武器装备更新换代步伐加快,研制生产强度大幅提高,由此带来的质量风险更高、更难控制,质量保证难度更大,对质量风险传导的分析和控制成为一个紧迫且重要的问题。

本书是对复杂装备研制过程中质量风险传导分析研究和应用的一个系统总结,全书分为8章,第1章绪论,简要介绍风险传导的基本概念和相关理论、复杂装备研制中的质量风险及传导分析的常用方法;第2章介绍目前大型复杂装备研制的特点和质量风险识别与分析的主要方法,给出某型无人机研制中主要风险因素的分析案例;第3章介绍基于技术成熟度的质量风险量化评估方法和发动机设计风险评价案例;第4章介绍基于因果贝叶斯网络的质量风险传导建模与分析方法,并给出一个在某型空面导弹大型地面试验的应用案例;第5章介绍基于云模型的TOPSIS (techniques for order preference by similarity to ideal solution)、影响图等风险量化分析方法,利用这些方法对复杂装备研制的概念设计和初步设计阶段的风险进行建模评估;第6章介绍基于蒙特卡罗仿真的风险传导分析方法,给出供应商延迟交付风险传导的仿真分析案例;第7章介绍质量风险传导分析中的专家判断抽取与集成的基本概念、常用的方法,提出一个基于贝叶斯网络融合的专家判断集成模型和相应应用案例;第8章介绍某型空面导弹大型地面试验中的质量风险传导分析与控制的案例。

本书是作者课题组全体成员的结果,除了作者,高春雨、郭文彧、郭亚兵、胡陈、雷景淞、李琛、李磊、李权葆、鲁雪峰、庞娇子、乔通、乔小朵、时倩、田爽、王凤天、杨林超、袁丹、苑晓鹏、张凡、张佳宁、张洁、张雪等参与了本书的研究与稿件整理、校对工作,作出了很多贡献。

作者衷心感谢中航工业防务科研一部无人机项目办公室、中航贵州飞机有限责任公司、中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司、中航工业洛阳电光设备研究所、北京航空航天大学无人驾驶飞行器设计研究所等单位对本书研究工作的大力支持和帮助。

感谢编辑李莉的耐心和专业的工作,让本书能以更好的面目展示给读者。

本书的研究获得了国家自然科学基金(编号:71271014、71332003、71501007)、国防技术基础科研项目(编号:JSJC2013601C023、Z132012A002、Z132014A001)和航空科学基金项目(编号:2014ZG51075、2017ZG51081)的资助,在此表示衷心的感谢。

本书借鉴、参考和引用了国内外许多学者的研究,在此一并表示感谢。书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 风险的定义与度量	1
1.2 风险传导机理	3
1.3 复杂装备研制中的质量风险及风险传导分析	8
第 2 章 复杂装备研制质量风险因素识别	13
2.1 复杂装备研制的主要工作和挑战	13
2.2 复杂装备研制质量风险因素识别的主要方法	14
2.3 某型无人机研制的主要风险因素	19
第 3 章 基于技术成熟度的质量风险评价研究	24
3.1 技术成熟度评价标准	24
3.2 基于技术成熟度的技术风险识别	29
3.3 基于技术成熟度的技术风险量化	31
3.4 基于工程数据采集的发动机设计风险评价	34
第 4 章 基于因果贝叶斯网络的质量风险传导建模与分析	38
4.1 贝叶斯网络	38
4.2 因果关系和因果贝叶斯网络	45
4.3 基于因果贝叶斯网络的风险传导建模	50
4.4 基于因果贝叶斯网络的风险传导分析与控制	58
4.5 某型空面导弹大型地面试验质量风险传导分析	69
第 5 章 基于云模型和模糊相关的质量风险传导分析	97
5.1 云模型的基本理论	97
5.2 云 TOPSIS 模型	101
5.3 影响图与风险耦合分析	105
5.4 基于影响图的装备研制质量风险传导分析模型	111
5.5 某型无人机研制质量风险传导分析	117
第 6 章 基于蒙特卡罗仿真的风险传导分析	129
6.1 系统仿真原理	129
6.2 蒙特卡罗仿真	129
6.3 蒙特卡罗仿真适用性分析	130

6.4	Z 公司供应商延迟交付风险传导分析	131
第 7 章	质量风险传导分析中的专家判断抽取与集成	144
7.1	概述	144
7.2	行为方法和数学方法	144
7.3	基于因果逻辑的专家判断集成	150
7.4	基于贝叶斯知识融合的专家判断集成	159
7.5	专家诚实判断激励	161
7.6	贝叶斯网络融合在某型导弹试验风险分析中的应用	162
第 8 章	某型空面导弹大型地面试验质量风险传导分析与控制	180
8.1	案例背景	180
8.2	某型空面导弹大型地面试验质量风险传导分析	182
8.3	某型空面导弹大型地面试验质量风险应对	182
8.4	某型空面导弹大型地面试验质量风险监控	187
参考文献		198

第1章 绪 论

1.1 风险的定义与度量

1. 风险定义

风险广泛存在于现实生活的各个领域，人们的背景 and 知识储备的不同，直接导致其对风险的认识与分析角度不同。在绝大多数风险分析中，通常考虑两方面的内容：风险发生可能性和风险发生后果^[1-4]。然而在不同领域中侧重点不同，例如，金融领域一般用损失或收益的方差大小表示风险，侧重考虑出现损失的可能性大小；政府部门通常把可能导致重大社会动荡、重大人员伤亡的事件视为重大风险，侧重后果损失的严重程度；而在保险行业则同时考虑不确定性后果发生的可能性大小和损失的严重程度^[5, 6]。

一般来说，风险是在特定环境和时间段内，实际结果相对于预期结果的不确定性，更一般地讲，风险是不确定性对目标的影响^[7]，用函数形式可表示为

$$R = F(P, C) \quad (1.1)$$

其中， R 为风险； P 为发生概率； C 为偏离目标的后果。在复杂装备研制工程中，决策者更关注达不到预定目标的情况，即损失的大小^[8]。本书中如无明确说明，风险后果就意味着风险损失。

2. 风险发生机制

根据风险的产生机理，风险因子诱发风险事件，同时风险事件爆发时不同的条件造成不同的风险损失后果。为了后面进行风险识别和风险传导建模研究，在这里有必要对风险因素、风险事件以及风险损失（后果）等术语进行分析。

（1）风险因素。风险因素是指产生或影响风险事件并造成相应后果的要素。按照可见性，风险因素可分为有形的和无形的两类。有形的风险因素通常表现为可见的，如不满足要求的产品、恶劣的天气等。无形的风险因素通常表现为认知因素，如个人道德因素产生的欺诈，无意识造成的不谨慎、疏漏等。

（2）风险事件。风险事件是指直接引起损失的随机事件。它具有损害性和不确定性，如汽车制动失灵、飞机被鸟击中、油料泄漏都属于风险事件，它们的发生对相关的人或物造成损害，并且事件具有不确定性，无法事先确定。

（3）风险损失。风险损失是风险事件产生的后果。在复杂装备研制过程中，

项目目标通常由性能、进度、费用、安全等组成，相应的风险表现为达不到这些目标的程度及对应的可能性^[9, 10]。显然，风险因素是导致风险损失的内在原因，风险事件则是造成风险损失的外在表征，风险因素通过风险事件起作用^[11]，其逻辑关系如图 1.1 所示。

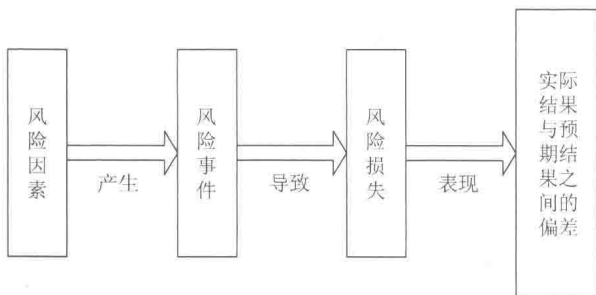


图 1.1 风险因素、风险事件与风险损失间的逻辑关系图

3. 风险的度量

由于对风险的定义不同，风险的度量也有不同的形式。其中应用较为广泛的主要有以下四种风险度量方式^[5]。

(1) 方差。设项目 A 的收益为 e ，且 e 的概率密度函数为 $f(e)$ ，期望为 e^* ，则方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (e - e^*)^2 f(e) de \quad (1.2)$$

以方差为指标来衡量风险的大小时，方差越大则风险越大。

(2) 自方差。当关注的重点为可能的损失时，可以用自方差 s^2 度量风险。 ε 为预先设定的收益临界值，即收益小于 ε 的部分为风险：

$$s^2 = \int_{-\infty}^{\varepsilon} (e - \varepsilon)^2 f(e) de \quad (1.3)$$

(3) 临界概率。临界概率描述收益小于临界值 ε 的概率，其定义为

$$P(e < \varepsilon) = \int_{-\infty}^{\varepsilon} f(e) de \quad (1.4)$$

(4) Fishburn 定义。这种定义结合了自方差和临界概率的定义^[12]：

$$R(A) = \int_{-\infty}^{\varepsilon} (\varepsilon - e)^{\lambda} f(e) de \quad (1.5)$$

当 $\lambda=2$ 时，式 (1.5) 就是自方差；当 $\lambda=0$ 时，式 (1.5) 为临界概率。

1.2 风险传导机理

1.2.1 多米诺骨牌理论和能量释放理论

风险传导的实质是将风险看成一个实体, 风险之间的联系就是实体之间的影响, 这种影响主要体现为一种因果关系, 即一个风险会导致另外某个或某些风险发生。国内学者李存斌等将这种传导关系用数学定义为: 对于目标风险 y , 和初始风险 x_i 之间有某种对应关系 f , 使得初始风险 x_i 满足 $y = f(x_i)$, 则称 $x \rightarrow y$ 的变化过程为风险传导, 对应关系 f 称为风险传导函数^[13, 14]。

有多种理论可以表示这种传导机理, 经典理论有多米诺骨牌理论和能量释放理论。

1. 多米诺骨牌理论

20 世纪 30 年代初, Heinrich 提出了多米诺骨牌理论。该理论指出风险的发生过程可分为五步^[11], 如图 1.2 所示。

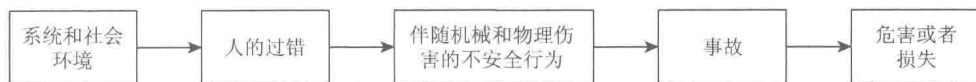


图 1.2 风险发生五步骤

多米诺骨牌理论的核心是通过去除关键步骤进行风险管理, 如当多米诺骨牌开始坍塌时, 抽取掉中间的一些牌就能阻止其之后的塌陷。该理论潜在假设风险事件逐一线性传导, 最终结果是某一风险事件的必然后果^[15], 因此很难解释风险因素和风险事件的复杂因果关系, 也导致其在进行一些不规则风险因素量化建模时适用性较差。

2. 能量释放理论

能量释放理论由 Haddon 在 1966 年创立。该理论提出利用风险能量的概念来描述和分析疾病与灾难等的防控, 并取得不错的效果。此后, Haddon 矩阵越来越广泛地应用于社会、医学和灾害防控等风险管理方面, 取得了广泛的肯定。

该理论是一种定性风险分析方法, 核心思想是通过分析风险发生前、发生时和发生后的环境, 承受者及风险能量源的状态改变的情况, 建立起 Haddon 矩阵, 进而分析风险能量源与风险结果之间的关系, 最后给出风险控制的相关建议^[11, 15]。

能量释放理论认为当系统所接受的能量超过其承受范围时，风险便会发生，风险承受者因此遭受损失。该理论包括三个基本要素：风险环境 X 、风险承受者 Y 、风险能量源 E ，它们的相互关系是 $X \rightarrow \begin{cases} Y \\ E \end{cases}$ 。在此对应关系描述中， X 、 Y 和 E 的关系式只是定性分析的方式，没有定量分析的相关数学模型。

Haddon 矩阵是能量释放理论的主要工具，形式如表 1.1 所示。

表 1.1 Haddon 矩阵

事件所处阶段	事件发生前 (Fore)	事件发生时 (Cur)	事件发生后 (After)
风险环境 (X)	Fore- X	Cur- X	After- X
风险承受者 (Y)	Fore- Y	Cur- Y	After- Y
风险能量源 (E)	Fore- E	Cur- E	After- E

当只存在单个能量源时，考察 X 、 Y 和 E 在不同时期的特征。若 X 在各个时期的变化不大，认为 E 是直接影响 Y 的，而与 X 的关系不大，得出 E 和 Y 之间的关系；再进一步比较 Y 和 E 在不同时期的对应关系，则得出 E 影响 Y 的主要阶段 (Fore||Cur||After)。若 X 在各个时期的变化较大，则认为 E 在影响 Y 时，存在改变 X 的现象，可以通过改变 X 的状态来限制 E 对 Y 的作用。

当存在多个能量源时，建立对应的多个 Haddon 矩阵，进行两两比较，比较能量源 A 和 B 作用下 X 和 Y 在不同时期的特征得出主能量源。在存在多个风险能量源对风险承受者产生影响时，就需要建立相应数量的 Haddon 矩阵，然后进行相互比较确定主要风险能量源，之后再按照上述方法进行风险控制。

能量释放理论的主要局限在于缺乏定量分析工具，不适合建立定量的风险分析模型，导致其结果可信度较差。

1.2.2 风险传导要素

1. 风险源

风险源是研究风险传导的出发点，后续风险之所以能产生是因为有风险源的存在，它本身也是风险，是影响目标实现的不确定性因素，主要包括系统内部或者外部环境的不确定性变化。

2. 风险产生者

风险产生者是研究传导的一个区域时的最初风险，而风险源是整个研究问题

的最初风险。风险产生者可能是在先接收其他地方传导过来的风险之后，再将风险向其能影响的地方传导出^[16]。

3. 风险传导的载体

1) 风险传导载体的内涵

在风险传导的过程中，由于事物的普遍联系，风险会依附于某些物体（载体），在风险网络中按照某种线路进行流动影响（可称为风险能量流）。因此，风险网络中那些承载或传导风险能量流的事物就是风险传导载体^[11, 17]，如信息、技术、人才、材料、产品等，它们是风险传导载体内涵最突出的体现^[16]。

2) 风险传导载体的分类

风险传导载体可按照载体的形式和层次进行分类。

（1）根据载体的形式分类。按形式，风险传导载体分为显性传导载体和隐性传导载体，如图 1.3 所示。

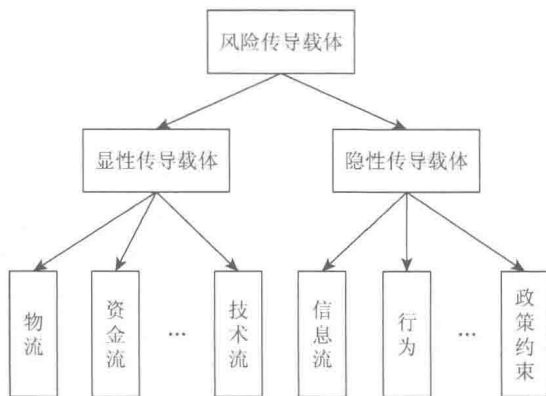


图 1.3 按传导载体的形式分类

（2）根据载体的层次分类。按层次，风险传导载体可分为微观和宏观两大类，主要按照载体所承载的风险源在系统内部还是外部而划分。微观传导载体是指对系统内部的风险进行传导的载体；而将外部环境中的风险传递给系统，并对系统的正常运营造成不利影响的载体称为宏观传导载体，如图 1.4 所示。

4. 风险流

风险传导具有流动性等形象特征，为了更好地描述系统风险的传导规律，可以将风险看作一种能量：能量越大，风险越大^[18]。而风险能量存在于风险源当中，由于内外环境的影响，风险能量从风险源中迸发出来，通过风险载体的传导，向系统的各个节点不断蔓延，风险能量到达系统节点之后，与节点内部的风险能量

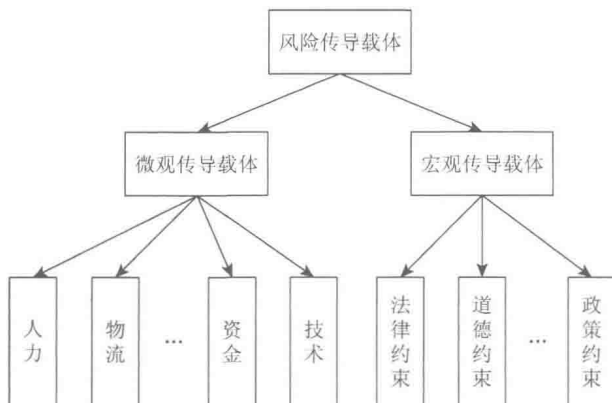


图 1.4 按传导载体的层次分类

汇合交融改变节点的状态，最终导致风险事件并引发相应的风险损失。这种风险能量又称为风险流。

5. 风险接受者

风险接受者与风险产生者对应，是风险传导后吸收的地方。如果没有它，风险传导就无从谈起，因为这时风险就没有了完整的流动链。

6. 风险阈值

风险阈值是指某一时刻风险接受者能承受风险的最大值。当风险接受者无法容纳这个风险时，风险便会溢出到与之相关的其他节点，在风险载体的承载下，在系统内部流动和蔓延，形成风险在系统中的动态流动的现象。

1.2.3 风险传导的基本结构

风险传导尽管路径复杂，但通常由若干基本传导结构组成，通过分析这些基本传导结构，可以构建复杂系统中的风险传导分析模型。

一般来说，风险传导存在四种基本结构，现实中的风险传导网络最终都可以通过这四种基本结构组合而成^[13]。

1. 串行传导结构

串行传导结构是指风险的传导结构形成链式，风险是按照节点的先后顺序依次进行传导并进行影响的，如图 1.5 所示。

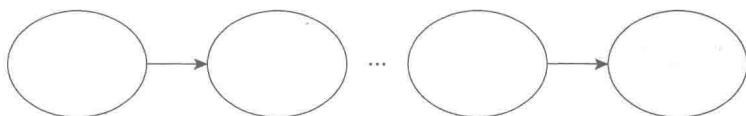


图 1.5 风险的串行传导结构

2. 并行传导结构

并行传导结构是指多个风险并行进行传递,而这些风险因素相互之间不影响,如图 1.6 所示。

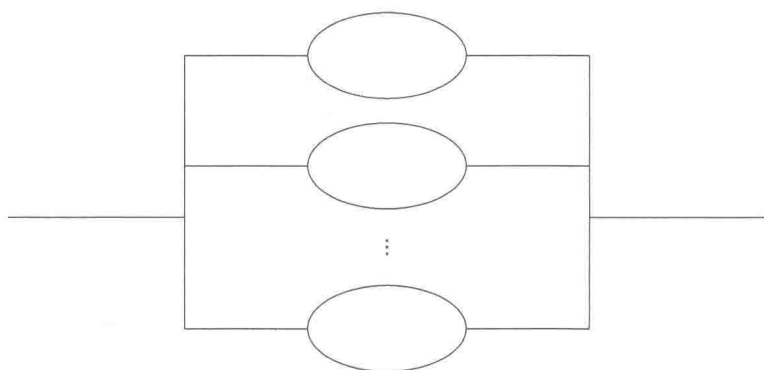


图 1.6 风险的并行传导结构

3. 与型传导结构

与型传导结构如图 1.7 所示。这种风险结构类型表示下层节点的所有风险必须同时传递给上层风险节点,同时对上层节点产生影响。

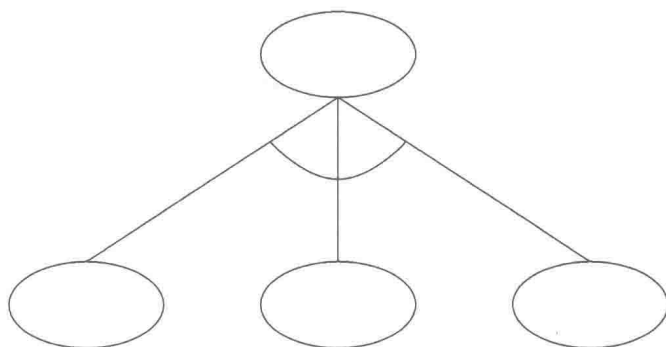


图 1.7 风险的与型传导结构

4. 或型传导结构

或型传导结构如图 1.8 所示。只要下层风险节点有一个风险发生，其风险就可以传递到上层的风险节点，而不用等下层其他风险节点风险的发生。

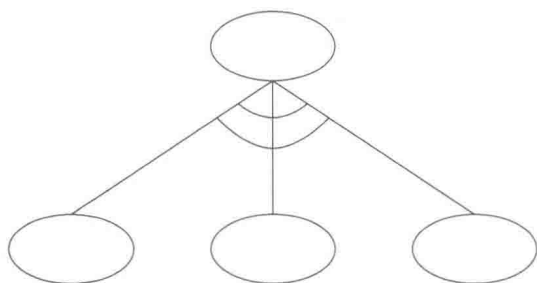


图 1.8 风险的或型传导结构

如果风险事件用一个随机变量刻画，以上四种基本结构可以简化为三种情况，分别是顺连关系、分连关系和汇连关系，风险事件间传导关系可用若干条件概率分布来描述，整个风险传导网络就可以用一个因果贝叶斯网络来表达，具体情况参见第 4 章。

1.3 复杂装备研制中的质量风险及风险传导分析

1.3.1 复杂装备研制中的质量风险及传导

质量风险是由于技术因素而造成质量问题，从而影响装备研制的进度、性能、费用、安全等目标的实现的风险事件。质量风险涉及初步设计、详细设计、制造、部装、总装、测试、试验试飞等研制阶段，包括设计方法、工艺方法、主要设施设备、关键原材料、关键元器件、关键加工技术、装配技术、测试试验技术、技术环境，以及技术人员结构等多个方面。复杂装备，如飞机、舰船、运载火箭等，其研制具有周期长、投资大、技术风险高、参研单位广、产业链长、多系统集成、多家单位协作、产业附加值高、影响因素多等特点，研制过程所需的原材料、零部件的提供以及子系统的研制涉及数量众多的供应厂商和大量的活动，存在大量质量风险因素^[9, 10]。

复杂装备研制过程涉及的零部件与技术参数要达到 10^7 量级，所需的通信、

导航、控制等设备的提供要涉及几十到几百家供应商,构成了一个结构复杂的装备研制体系,这为质量风险的传导提供了可能^[19,20]。质量风险在研制体系各个方向上传导的广泛性体现在以下两个方面:一方面,由于参研主体众多,项目管理过程复杂,不同管理计划之间可能相互脱节,各种不确定因素广泛存在,而围绕研发目标建立的供应网络具有临时性,也就是说供求主体之间客观存在着对抗性的短期合作博弈关系,这种关系会导致独立主体可能利用信息优势借助供应渠道来进行风险的规避与转移,从而激发了风险因素在项目型供应链内部的传导,而研制体系外部的各种环境、政治因素也会向内部传导风险;另一方面,由于复杂装备研制要运用大量的新技术、新工艺、新材料等,这会导致进度、费用、性能风险在供应链上的传导与放大,而相应的检测试验手段可能存在滞后性,不能及时发现其性能可靠性方面存在的潜在风险因素,这种潜在风险也很可能会沿着供应链传导、放大。

近年来,我国装备建设得到了充分重视,装备建设投入不断增大,新型尖端装备系统经历了跨越式发展。随着我国装备性能的提高、系统规模的扩大,对经济可承受性和进度的要求也更加苛刻,装备研制项目中的风险传导问题也逐渐凸显出来。典型的情况是我国自行研制的某型地空导弹系统,历时近20年,耗资数十亿元,由国内数百家科研院所和企业共同参与。在该系统研制过程中,技术、工艺、材料等质量风险因素造成的性能、进度和费用风险在研制单位中不断传导、扩散和放大,最终导致装备的性能指标不断降低,多次追加经费和延长进度,极大地影响了装备定型和战斗力的形成。

随着质量风险在研制体系内的多向传导,在特定情况下,风险可能被放大甚至被激化,进而更严重地影响装备研制工作的质量,形成不可接受的质量风险。近年来,我军武器装备更新换代步伐加快,研制生产强度大幅提高,由此带来的质量风险更高、更难控制,质量保证难度更大。同时,在复杂的研制体系中,各种交叉进行的工作更容易引起质量风险的传导、扩散和放大。因此有必要研究复杂装备研制质量风险传导机理、传导形式,构建风险传导量化分析模型,探索相应的控制技术,采取有效的技术和管理措施,规避或降低质量风险,全面提升质量风险的管控能力。

1.3.2 风险传导分析的常见工具与方法

1. 云模型

由于在装备质量风险传导建模过程中,风险因子节点风险量的大小、风险之间的耦合程度的大小等都需要专家的定性分析和历史数据等来进行定性

的判断。如何将这些定性的语言定量化，一直是一个难题。云模型作为定性与定量转化的工具，能够将专家的定性语言值描述与科学的定量计算结合起来，将语言值表达的定性信息转化为定量数据的范围及其分布规律，或把精确数值有效转换为恰当的定性语言值进行分析。模糊集理论主要使用隶属度来表示模糊事物的主要性质——亦此亦彼性。在这个过程中，隶属函数是模糊集合的主要部分，也是最难明确的部分。传统模糊集理论的不彻底性是使用精确的隶属函数来表达模糊集造成的，为解决这个问题，有研究者提出了云模型。

云模型主要反映了人类认识或者实物概念中的两种不确定性：模糊性（边界亦此亦彼性）、随机性（发生概率），构建定性与定量之间的相互映射关系，从而将两者完全集成起来，云模型中将上述特性进行描述的工具就是云^[21, 22]。

云模型以自然语言中的基本语言为切入点，将定性概念通过数学运算转换为一个个定量化表述的数值，更形象地说是将其转换成论域中的一个点。转换的过程带有随机性和偶然性。每一个离散点都代表一个随机事件，类似于概率分布函数的表述。模糊性可通过云滴的确定度来反映，作为一个随机值，模糊性也可以采用概率分布函数进行描述。由此可见，云模型是云精确数值与定性语言之间的一个有效的转换工具，因此可用于质量风险传导的量化度量。

第5章展示如何利用云模型解决风险分析中的语义刻画问题。

2. 因果贝叶斯网络

贝叶斯网络（Bayesian network, BN）是一种概率图模型，由 Pearl^[23]首先提出。当贝叶斯网络中的有向边表示的是因果关系时，该贝叶斯网络成为因果贝叶斯网络（causal Bayesian network, CBN）^[24]。

因果贝叶斯网络 $\mathcal{B}$ 的有向无环图 $\mathcal{G}$ 中的节点表示论域中的随机变量 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，它们可以是可观察到的变量，或隐变量、未知参数等。存在因果关系（或非条件独立）的变量或命题则用箭头来连接。若两个节点间以一个单向箭头连接在一起，则表示其中一个是父节点，另一个是子节点，两节点间存在一个条件概率值。令 $\text{Pa}_{X_i}^{\mathcal{G}}$ 表示 X_i 在 $\mathcal{G}$ 中的父节点， $\text{NonDescendants}_{X_i}$ 表示 X_i 在图中的非后代节点变量，则有如下局部独立性。

对于每个变量 X_i ： $X_i \perp \text{NonDescendants}_{X_i} \mid \text{Pa}_{X_i}^{\mathcal{G}}$ 。

换句话说，局部独立性表明，在给定父节点条件下，每个节点 X_i 与其非后代节点条件独立，这大大简化了贝叶斯网络的分析。

图 1.9 展示了一个简单的贝叶斯网络。