

复杂产品创新风险综合评估模型及其应用研究

段秉乾, 王安宇, 司春林

复旦大学管理学院, 上海 200433

[摘要] 复杂产品创新是实现“建设创新型国家”战略的重要组成部分, 对于提高国家竞争力具有决定性作用。复杂产品创新具有高风险性, 需要对其进行全面的风险评估, 然而现有评估方法均存在某些不足。本文分析了复杂产品创新的关键风险因素, 提出了模糊层次分析法风险综合评估模型。该模型突破了传统方法的限制, 融合了多种评估方法, 符合当代风险评估研究的发展趋势。

[关键词] 复杂产品; 模糊层次分析法; 风险评估

[中图分类号] F406.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)11-0058-05

Comprehensive Risk Assessment Model for Complicated Product Innovation and Its Application

DUAN Bingqian, WANG Anyu, SI Chunlin

Management School, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Complicated product innovation is an important part of the strategy in building a country into one of innovative type and plays a decisive role in enhancing the national competitive power. Due to the high risk nature, the innovation risk of complicated products must be assessed comprehensively. But most existing methods were found not very satisfactory in that respect. In this paper, key risk factors of complicated product innovation are analyzed and a comprehensive risk assessment model based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) is put forward. The model is well in accord with the trend of the current innovation risk assessment development, and is an improvement of traditional risk assessment methods in integrating various assessment methods.

Key Words: complicated product; Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP); risk assessment

CLC Number: F406.3

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)11-0058-05

0 引言

进入 21 世纪, 随着人类社会的演变, 技术创新在解决社会可持续发展等一系列重大问题上发挥着越来越重要的作用, 成为保持企业竞争优势和社会可持续发展的重要推动力量。复杂产品创新是一类特殊的技术创新, 目前对它的研究还比较少。与大规模制造产品的创新不同, 复杂产品创新对提高国家竞争力具有决定性作用, 是国家创新体系的重要组成部分, 也是实现我国“自主创新战略”和“建设创新型国家”目标的基

础。

创新风险评估是复杂产品创新管理的重要内容, 为风险管理提供了科学依据。复杂产品创新具有技术先进、用户定制化程度高、时间跨度大、需要跨组织协调等特点^[1], 是一项充满风险与挑战的系统工程。创新过程中, 任何微小的失误都有可能导致灾难性后果, 因此创新者必须既勇于突破又小心谨慎, 科学地制定各项规划和决策, 全面地评估和管理复杂产品的创新风险。

复杂产品创新包含多种风险因素, 虽然每个风险因

收稿日期: 2007-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(70472021), 教育部人文社会科学重点研究项目(02JAZ790003)

作者简介: 段秉乾, 男, 上海市邯郸路 220 号复旦大学管理学院, 博士研究生, 研究方向为创新管理与风险投资;

E-mail: duanbq@163.com

司春林(通讯作者), 男, 上海市邯郸路 220 号复旦大学管理学院, 教授, 研究方向为技术与创新管理;

E-mail: clsi@fudan.edu.cn

素都可能引发创新风险,但并非所有风险因素都会对创新结果产生显著的影响。复杂产品创新的关键风险因素包括成本因素、进度因素、技术因素和市场因素等。这些风险要素不是孤立存在的,而是相互影响,此消彼长,共同决定创新项目的成败。因此,复杂产品创新风险评估及管理具有一定难度和复杂性,只有建立恰当的风险评估模型,才能实现“更快、更好、更省、更安全”的创新目标。

本文结合复杂产品创新的特点,重点讨论创新风险评估模型的改进。首先比较、分析两种主要的复杂产品创新风险评估方法,即概率风险评估和风险模糊综合评估;然后,详细描述模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Fuzzy AHP) 风险综合评估的基本原理与分析框架;最后,结合实际案例说明该方法在复杂产品创新风险管理中的应用。

1 复杂产品创新的主要风险评估方法分析

创建风险评估模型可以采用定性方法和定量方法。定性与定量相结合的综合性评估方法是当前创新风险评估模型的主要研究方向^[2]。其中,最具代表性的综合性评估方法是概率风险评估和风险模糊综合评估。

概率风险评估以初始事件和风险场景为基础,从初始事件着手,通过综合运用事件树、故障树分析方法,建立风险场景;然后根据风险场景中各事件之间的逻辑关系,并利用概率分析原理,计算风险场景的概率。概率风险评估精确、严谨,注重利用历史数据和试验数据,善于分析复杂产品系统潜在的技术风险。

对概率风险评估方法的研究始于 20 世纪 60 年代,1975 年该方法被成功地应用于核电站的创新风险评估;Stamatelatos^[2]描述了概率风险评估的原理及其在美国国家航空和宇宙航行局的应用;Sen^[3]讨论了该方法的软件实现及其在太空计划中的应用。

随着研究的深入,某些学者对概率风险评估结果的准确性提出了疑问,他们发现许多风险事件如市场风险等,很难用概率形式精确地表达^[4]。针对这些不足,许多

学者开始利用模糊数学理论研究风险评估问题。

风险模糊综合评估是重要的模糊风险分析方法之一,在创新风险管理中广泛应用。赵冬梅^[5]研究了该方法在软件研发中的应用,根据软件项目的特点改进了层级分析法和模糊逻辑法,首先确定软件项目各风险因素的权重,进而计算项目风险的大小,最后对风险进行了排序,具有一定的实用性。Chen^[6]指出专家意见也具有模糊性,对于复杂度高、技术先进、不确定性大的创新项目,采用传统的风险模糊综合评估方法往往无法取得满意的结果。针对这一不足,Chen 引入了模糊层次分析法,进一步完善了风险模糊评估方法。即在评估过程中,首先根据专家意见确定产品创新的关键成功因素;然后利用模糊层级分析法原理确定各层节点的权重;最后计算出项目的整体风险。

专家的主观判断是风险模糊综合评估法的主要数据来源。该方法首先利用模糊数学原理综合各位专家的评估意见,形成各风险因素的评估隶属向量;然后根据各风险因素的权重计算复杂产品创新的总体风险。与概率风险评估相比,这一方法更注重利用专家的隐性知识,不受客观数据量的限制,善于评估组织、市场等因素引起的创新风险。

综上所述,复杂产品创新受到多种因素的影响,对其进行风险评估相当复杂。如果仅采用风险模糊综合评估法,决策者将无法确切地评估产品系统的技术风险;如果仅使用概率风险评估法,决策者又很难了解组织管理等因素对创新风险的影响。因此,无论采取哪种方法,均无法获得满意的评估效果。两种方法的特点见表 1。

由此,本文提出了基于 Fuzzy AHP 方法的复杂产品创新风险综合评估模型。该模型利用模糊层次分析原理,融合了概率风险评估法和风险模糊综合评估法,既重视专家的隐性知识,又注重对客观数据的利用。这一模型首先对市场等风险因素进行模糊评判,对复杂产品进行概率风险评估;然后利用模糊层次分析法确定各风险节点;最后综合两种方法的评估结果,计算系统创新的总体风险。

表 1 概率风险评估法和风险模糊综合评估法比较

Table 1 Comparison of probability risk assessment and fuzzy comprehensive risk assessment

方法	优势	弱势
概率风险评估法	擅长分析技术风险;既可分析系统的事故原因,又可定量评估风险大小;有充足的理论依据,重视对客观数据的利用,评估结果可靠性较高	需要足够的数据支持,否则误差将被逐级放大;难以用概率形式表示组织、市场等风险因素;难以将创新者的先验知识融入模型
风险模糊综合分析法	擅长评估由市场、组织等因素引起的创新风险;能够将创新者的先验知识融入模型;对评估数据要求较低;有较大的灵活性和适应性	无法对具体风险进行精确的量化描述;无法直观表示变量的概率关系

2 复杂产品创新的 Fuzzy AHP 风险综合评估模型

Fuzzy AHP 风险综合评估模型从技术、市场等方面对复杂产品创新风险进行多角度、多层次的分析,其基本原理及分析步骤如下。

2.1 建立因素集、初始事件集和评语体系

建立因素集和初始事件集是风险评估集成模型中重要的基础工作之一,通常采用的分析方法包括专家访谈法、头脑风暴法、故障模式影响分析等。如前所述,复杂产品创新受到 4 个关键风险因素的影响,而关键风险因素又是由许多更基本的风险因素所引起的。本文将基本风险因素分别放入风险因素集 U_S 和初始事件集 I_S ,用于风险模糊综合评估和概率风险评估。

$$U_S = \{U_1, U_2, \dots, U_F\} \quad I_S = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$$

另外,该评估模型采用 5 级评语体系 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_5\}$,依次表示非常低、较低、一般、较高、非常高等 5 个评语等级。

2.2 单因素评估

这一阶段的目的是建立从风险因素集 U_S 到评语集 V 的模糊映射 $f: U_S \rightarrow V$,一般采取专家打分方法对每个因素 U_i 进行评估。假设有 M 个专家参与评估,将因素 U_i 的评语隶属向量记为 $R_i = f(U_i) = [r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,5}]$ 。

2.3 概率风险评估

为了进行概率风险评估,假设如下。

假设 1 初始事件 I_i 可引起 K_i 个场景 $S_{i,j}$ ($j=1, 2, \dots, K_i$),分别对应结果状态 $E_{i,j}$,将初始事件 I_i 的风险场景集合记为 S_i 。

假设 2 所有风险场景按照结果状态可分为 Q 个风险类型,将风险类型集合记为 r 。

2.3.1 风险场景的概率风险评估

采用概率风险评估方法计算每个风险场景的概率^[7-8],然后按风险类型进行概率综合^[2],则风险类型 G_q ($q \in [1, Q]$)的概率可表示为

$$P(G_q) = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^{K_i} \left[\Phi(S_{i,j}, G_q) P(I_i) \prod_{s=1}^{T_{i,j}} P(P_{i,j,s}) \right] \right\} \quad (1)$$

其中, $T_{i,j}$ 是初始事件 i 所导致的第 j 个场景中关键事件的总数, $P_{i,j,s}$ 是该风险场景中的第 s 个关键事件。

2.3.2 风险等级评定

为了进行 Fuzzy AHP 风险综合评估,还需要建立概率风险等级评价标准,如表 2 所示。如果风险类型 G_q 的风险等级为 G ,则其对应的评语向量 R_q 为

$$R_q = [r_{q,1} \quad r_{q,2} \quad \dots \quad r_{q,5}] \quad (2)$$

其中

$$r_{q,i} = \begin{cases} 1 & i=G \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

表 2 G_q 型风险等级评价标准

Table 2 Risk scale evaluation criteria of G_q

风险等级 G	1	2	3	4	5
风险概率 P	$L_0^q \sim L_1^q$	$L_1^q \sim L_2^q$	$L_2^q \sim L_3^q$	$L_3^q \sim L_4^q$	$L_4^q \sim L_5^q$

2.4 构建递阶层次结构模型

根据复杂产品创新风险因素的逻辑关系,构建递阶层次结构模型^[9]。该模型展示了复杂产品创新潜在风险的产生及传递过程,分为系统风险层、风险约束层和风险因素层 3 个层次。

将系统风险层的节点记为 B_1^0 ;假设风险约束层有 C 个子层,第 i 子层的第 j 个节点记为 B_j^i ;假设风险因素层有 Y 个节点,第 k 个节点记为 A_k ;将系统风险层和风险约束层的节点统称为风险节点。

2.5 计算权重向量

计算权重向量是 Fuzzy AHP 风险综合评估模型的关键步骤。通过合理地配置权重,可以实现概率风险评估结果与模糊风险评估结果的整合,形成对系统创新风险的全面理解。权重计算的具体步骤如下。

1) 建立评判标度系统

系统如表 3 所示。

表 3 评判标度系统

Table 3 Judgement and evaluation criteria system

评价等级(定义 r_{ij})	标度	三角模糊数	评价等级(定义 r_{ij})	标度	三角模糊数
因素 j 比 i 极端重要	1	(0.1, 0.1, 0.2)	因素 i 比 j 稍微重要	6	(0.5, 0.6, 0.7)
因素 j 比 i 重要得多	2	(0.1, 0.2, 0.3)	因素 i 比 j 明显重要	7	(0.6, 0.7, 0.8)
因素 j 比 i 明显重要	3	(0.2, 0.3, 0.4)	因素 i 比 j 重要得多	8	(0.7, 0.8, 0.9)
因素 j 比 i 稍微重要	4	(0.3, 0.4, 0.5)	因素 i 比 j 极端重要	9	(0.8, 0.9, 0.9)
因素 i 和 j 一样重要	5	(0.4, 0.5, 0.6)	—	—	—

2) 建立模糊数判断矩阵群

任取递阶层次结构模型的风险节点 B , 假设下层有 J 个元素 $S_1, S_2, \dots, S_J$ 与之相关。根据表 3, 两两比较这些元素的相对重要性, 生成模糊数判断矩阵。当有 T 个专家参与评判时, 共可构造 $T \cdot \left(\sum_{i=1}^c K_i + 1 \right)$ 个模糊数判断矩阵。

3) 计算风险节点的单层权重向量

对于风险节点 B , 将第 t 个专家给出的判断矩阵记为 D^t 。根据式 (3), 可以求出风险节点 B 的综合判断矩阵 D 。由此, 能够计算出节点 B 的综合重要程度向量^[10], 如式 (4) 所示。最后, 根据纯量测度原理计算 B 的单层权重向量 W , 如式 (5) 所示。同理, 可以计算递阶层次结构模型中所有风险节点的单层权重向量 W_j^i 。

$$D = D^1 \cdot D^2 \cdot \dots \cdot D^T = (d_{mn}) \quad (3)$$

$$S = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_J)^{-1}, S_k = \left(\sum_{n=1}^J d_{k,n} \right) \left(\sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^J d_{m,n} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$W = (W_1 \ W_2 \ \dots \ W_J) = \left(\sum_{k=1}^J H_k \right)^{-1} (H_1 \ H_2 \ \dots \ H_J) \quad (5)$$

其中, $H_k = V(S_k \geq S_1, S_2, \dots, S_{k-1}, S_{k+1}, \dots, S_J)$ 。

2.6 创新风险的综合评估及结果分析

Fuzzy AHP 风险综合评估模型一般采用分步计算原则, 按照从下到上的次序, 根据式 (6) 逐层计算各节点的评语隶属向量。首先, 计算 C 层各节点的评语隶属向量; 然后, 依次计算 $C-1, \dots, 2, 1$ 层各风险节点的评语隶属向量; 最后, 计算系统风险层节点 B_1^0 的评语向量 X_1^0 , 从而求得创新风险的综合评估结果

$$X = W(X_1 \ X_2 \ \dots \ X_i \ \dots \ X_J)^T \quad (6)$$

式中, X_i 表示下层相关风险因素的评语模糊向量。

分析风险评估结果是一项富有创造性的工作, 本文采用最大隶属度原理^[9]作为基本分析方法。对于每个风险节点的评语隶属向量 X_i^j , 利用最大隶属度原理可以计算出其对应的风险评估结果 V_i^j 。根据 V_1^0 可以确定复杂产品创新的总体风险。根据所有风险节点的评估结果, 采用自上而下的方法, 还可以找出主要的创新风险源和复杂产品创新的薄弱环节, 确定创新风险管理的最佳切入点。

3 应用案例分析

宇宙飞船是载人航天计划的重要组成部分, 具有技术密集、创新成本高等特点, 是典型的复杂产品系统。逃生控制系统是宇宙飞船的子系统, 也属于复杂产品范畴, 是保护宇航员安全的最后屏障, 其安全性要求极高。对逃生控制系统进行全面的创新风险评估是其研发工

作的核心内容之一, 具有特别重要的意义。由于逃生控制系统非常复杂, 本文仅选取如表 4 所示的基本风险因素和空气泄漏、能量危机两个初始事件进行讨论。

表 4 逃生控制系统的基本风险因素列表
Table 4 Pivotal risk factors of an emergency escape system

编号	风险因素 U_i 的定义	编号	风险因素 U_i 的定义
1	政策变化或行政干预对项目影响较大	6	产品质量管理规范 (负向)
2	项目初期, 客户无法提出明确需求	7	员工培训制度健全 (负向)
3	项目进度规划不合理	8	项目负责人管理经验丰富 (负向)
4	客户与项目组存在沟通障碍	9	成本及预算管理规范 (负向)
5	具有规范的进度管理方案 (负向)	10	项目预算不合理, 未考虑意外因素

3.1 单因素及概率风险评估

邀请多位业内专家对风险因素打分, 综合所有专家的观点, 风险因素评语隶属向量的计算结果如表 5 所示。对初始事件进行概率风险评估, 结果如表 6 所示, “任务失败”、“人员损失”的风险等级分别为较低、非常低。

表 5 风险因素的评语隶属向量
Table 5 Membership degree vector of remarks about risk factors

编号	风险因素评估结果的隶属向量	编号	风险因素评估结果的隶属向量
1	(0.31 0.35 0.17 0.13 0.04)	6	(0.32 0.33 0.23 0.08 0.04)
2	(0.03 0.22 0.54 0.15 0.06)	7	(0.3 0.38 0.2 0.09 0.03)
3	(0 0.06 0.15 0.59 0.2)	8	(0.14 0.23 0.35 0.16 0.11)
4	(0.14 0.27 0.38 0.19 0.02)	9	(0.41 0.21 0.12 0.1 0.16)
5	(0.2 0.36 0.24 0.14 0.06)	10	(0.16 0.35 0.17 0.14 0.18)

表 6 系统风险概率计算结果
Table 6 Probability of system risk

风险类型	成功	任务失败	人员损失
发生概率	1.92×10^{-4}	7.31×10^{-6}	3.07×10^{-7}

3.2 构建递阶层次结构模型、计算权重向量

对逃生控制系统进行系统分析和创新环境考察, 构建递阶层次结构模型, 如图 1 所示。邀请 3 位专家, 按照评判标度系统 (见表 3) 和递阶层次结构模型, 两两比较各组指标的相对重要性, 形成判断矩阵群。然后, 根据式 (3)~式 (5) 计算各个风险节点的权重向量, 结果如下

$$\begin{aligned}\bar{W}^{0,1} &= (0.2697 \quad 0.1067 \quad 0.0390 \quad 0.5846) \\ \bar{W}^{1,1} &= (0.1421 \quad 0.5760 \quad 0.2819) \\ \bar{W}^{1,2} &= (0.2310 \quad 0.1435 \quad 0.2147 \quad 0.0777 \quad 0.0420 \quad 0.2913) \\ \bar{W}^{1,3} &= (0.1713 \quad 0.0896 \quad 0.1278 \quad 0.3540 \quad 0.2572) \\ \bar{W}^{1,4} &= (0.6024 \quad 0.3975)\end{aligned}$$

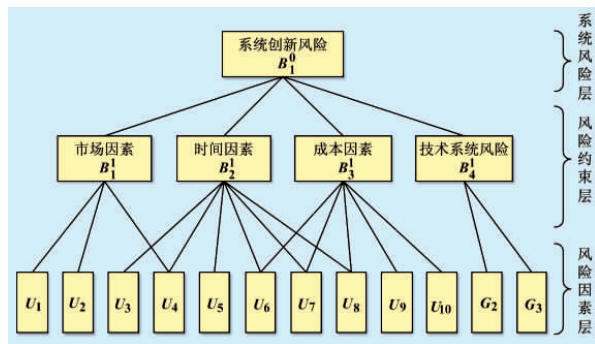


图1 逃生控制系统的递阶层次结构模型

Fig. 1 Hierarchy model of an emergency escape system

3.3 逃生控制系统的创新风险综合评估及结果分析

根据递阶层次结构模型和上述计算结果,按照从下到上的次序逐层计算各节点的风险水平,结果如下

$$X_1^1 = (0.1008 \quad 0.2526 \quad 0.4423 \quad 0.1584 \quad 0.0459)$$

$$X_2^1 = (0.1413 \quad 0.2385 \quad 0.2689 \quad 0.2502 \quad 0.0984)$$

$$X_3^1 = (0.2859 \quad 0.2843 \quad 0.1883 \quad 0.1136 \quad 0.1265)$$

$$X_4^1 = (0.3975 \quad 0.6024 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$X_1^0 = (0.2858 \quad 0.4568 \quad 0.1553 \quad 0.0738 \quad 0.0278)$$

根据最大隶属度原理, $V_1^0=2$, 系统综合风险处于较低水平; 市场因素和时间因素处于中度风险水平; 成本因素的风险水平非常低; 技术系统风险处于较低状态。综合分析所有创新风险评估结果, 可以确定对各风险因素进行管理资源分配的优先次序为技术因素、市场因素、时间因素、成本因素。

4 结论与展望

复杂产品是一类特殊的产品, 代表了未来科技发展的方向, 受到世界各国的高度重视。与大规模制造产品的创新相比, 复杂产品的创新风险评估不但要充分考虑技术因素, 而且还要全面理解来自组织的风险。所以, 仅采用概率风险评估或风险模糊综合评估将无法满足复杂产品创新风险评估的要求。

本文在分析复杂产品创新风险的基础上, 提出了 Fuzzy AHP 风险综合评估模型。与风险模糊综合评估法相比, 该模型充分利用了已有试验数据, 较准确地计算出创新的技术风险, 比专家评价法更加客观。与概率风险分析法相比, 该模型不但考虑了复杂产品创新的技术因素, 还考虑了非技术因素对创新风险的影响, 利用模糊层次分析法对技术因素和非技术因素风险进行了

系统思考, 充分利用了专家的隐形知识, 弥补了概率风险分析法的不足。

因此, Fuzzy AHP 风险综合评估模型可以较为全面地衡量技术、组织等风险因素对创新活动的影响, 为风险管理提供较为科学的依据。根据评估结果, 管理者既可以发现复杂产品创新管理中的薄弱环节, 又可以确定复杂系统的潜在技术风险, 还能够从系统整体角度进行风险排序, 从而实现资源最优配置。

对该模型的研究不但具有理论意义, 而且还具有一定的实用价值。未来几年是我国实现跨越式发展的几年, 大飞机、北斗卫星导航系统等无一不是复杂产品系统, 这些项目的成败关系到国家的兴衰, 如何评估和管理创新风险是创新管理的核心内容之一。以本研究为基础, 结合我国国情及项目的具体实践, 进行更有针对性、更为深入的研究, 改进理论模型, 实现模型的工程化, 将是今后一段时期继续研究的重要内容之一。

参考文献 (References)

- [1] HOBDAV M. Product complexity, innovation and industrial organization[J]. Research Policy, 1998, 26: 689-710.
- [2] STAMATELATOS M. *et al.* Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners [M]. Washington DC: Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters, 2002.
- [3] SEN D K, *et al.* Rapid development of an event tree modeling tool using COTS software [C]// IEEE. Aerospace Conference, New Jersey, 2006.
- [4] EPSTEIN S, RAUZY A. Can we trust PRA [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 88: 195-205.
- [5] 赵冬梅. 一种软件项目的风险评估模型及应用 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(23): 192-194.
ZHAO Dongmei. A model of risk assessment of software project and its application [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(23): 192-194.
- [6] CHEN H H, LEE A H I, TONG Y. Prioritization and operations NPD mix in a network with strategic partners under uncertainty[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 33 (2): 337-346.
- [7] SHALEV D M, TIRAN J. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved Fault Tree Analysis (FTA), reliability and safety calculations [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92 (9): 1231-1241.
- [8] RUTT B, CATALYUREK U, *et al.* Distributed dynamic event tree generation for reliability and risk assessment[C] // IEEE. Challenges of Large Applications in Distributed Environments, New Jersey, 2006: 61-70.
- [9] 沈建明. 项目风险管理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 101-120.
SHEN Jianming. Project risk management [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 101-120.
- [10] HUANG C C, CHU P Y, CHIANG Y H. A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection [J]. The International Journal of Management Science, 2006: 1-15.

(责任编辑 赵佳)