

基于蒙特卡罗仿真法的研究型项目 风险量化分析技术

高建伟

西北工业大学科技处, 西安 710072

摘要 科学研究型项目的执行过程正逐步走向规范化、信息化、科学化和理性化,这就要求项目风险的评估和量化方式必须深入,不仅需要分析此类项目风险的重要度排序,还必须分析相关项目风险将会对进度和成本造成的影响,也就是对研究型项目进行风险量化管理。本文着重研究面向研究型项目的风险量化技术,提出了基于蒙特卡罗仿真法的项目定量风险量化技术,基于三角分布模型构建了相关风险数据的采集与处理方法,基于最早开始时间和最早完成时间构建了项目周期模型,基于成本分解结构构建了项目成本模型,在此基础上,定义了基于蒙特卡罗仿真的抽样算法与流程,并提出了相关概率风险误差的分析方法。在风险量化的基础上提出了分层次的项目风险分析方法,针对总项目进度风险,提出了面向指定工期约束的项目相应完工概率计算方法,同时基于关键度指标,提出了面向子项目进度风险的分析方法。

关键词 风险;量化;蒙特卡罗;科学研究课题

中图分类号 C935

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.13.003

Risk Quantification and Analysis for the Research-typed Projects Based on MCS Method

GAO Jianwei

Office of University Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract With standardization, informatization, scientificness, and rationalization are more and more popular in the research project management, the risk management becomes more and more important. In risk management, risks in research project should be ordered by their importance, and the influence of risks on project schedule and cost should be also analyzed. A Monte Carlo Simulation (MCS)-based method for quantifying the risk in research project is developed in order to analyze the importance, schedule as well as the cost of the project. Firstly, the method for risk data capturing and processing is developed on basis of the triangle distribution. Secondly, the circle and cost models are developed separately on basis of Earliest Start Time (EST), Earliest Finish Time (EFT) as well as the Cost Breakdown Structure (CBS). Thirdly, the sampling algorithm and flow based on MCS is defined, the analysis method for probabilistic risk error is also proposed. Finally, a leveled risk analysis method is also developed on basis of the risk quantification; the total risk is divided into the risk of project and risks of subprojects. A method for computing completion probability of appointive deadline constraint-oriented project is discussed; in the meantime, the method for analyzing subproject progress-oriented risks is developed by using the index of key targets which are Key Probability (KP) and Key Importance (KI).

Keywords risk; quantification; Monte Carlo Simulation; research project

0 引言

研究项目通常具有创新性强、资金投入多、研制生产周期长等特点。在众多系统环节中,风险因素层出不穷,一个环节考虑不周便会导致项目的进度拖延、费用成本增加,甚至导致整个项目的失败,造成人、财、物的巨大损失^[1]。因此,对

研究项目的风险进行管理是必然趋势。研究项目风险量化是在风险识别基础上,综合考虑风险发生概率和风险损失,评估研究项目风险及其影响的过程。其主要分析和评估项目运行过程中的各种不确定性,直到项目完成为止,主要研究管理、技术、环境、设备和材料等诸方面可能对项目的影响以及

收稿日期: 2012-03-21;修回日期: 2012-04-12

基金项目: 西北工业大学政策研究基金重点项目 (ZY201102)

作者简介: 高建伟,博士,研究方向为科技风险管理,电子信箱: gaojw@nwpu.edu.cn

对这种影响进行评估和量化的方法。

美国国家宇航局(NASA)于1998年开始引入持续风险管理的理论和方法(Continuous Risk Management, CRM);1999年,在应用CRM的基础上,NASA又引入了概率风险评估理论和方法(Probabilistic Risk Analysis, PRA),并于2002年3月发布针对各项目负责人的PRA手册。2001年起,NASA开始加强了风险量化和评估研究,并倾向于采取一体化的定量风险管理理论(Integrated Quantitative Risk Management)评估项目研发过程中的风险^[2]。在中国,研究项目的风险管理也逐渐受到重视。2004年,西北工业大学朱松岭等^[3]提出了一种结合三角模糊数和层次分析法对风险进行量化的方法。2008年,装甲兵工程学院邢俊文等^[4]提出了技术风险事件量化指标的体系结构、等级标准和量化方法,建立了基于风险事件发生可能性、后果影响和可控性的多级递阶层状结构的技术风险三参数量化模型。科学研究型项目,不同于其他型号研制类项目,多为预研、基础研究、前沿探索类项目,项目研究过程中存在的不确定性较大,相关研究计划变化也较大。不同的风险分析方法适用于不同类型的项目管理过程,针对科学研究型项目管理而言,目前常见的型号研制类项目的风险量化与分析方法并不完全适用,随着我国科学研究型项目的不断增多,亟需建立一种合理的风险量化与分析方法。

因此,为保证研究型项目的顺利实施与完成,需要对相关项目执行过程中的风险进行量化,并根据量化结果,分析控制项目风险。本文针对科学研究型项目风险的评估和量化方式,提出一套基于蒙特卡罗仿真方法的风险量化方法,并对量化后的风险进行分析。

1 基于蒙特卡罗仿真法的研究项目风险量化

蒙特卡罗仿真(Monte Carlo Simulation, MCS)方法,又称随机仿真法或统计仿真法,属于计算数学的一个分支^[5]。其主要思想是在计算机上仿真实际概率过程,然后加以统计处理,具有思想新颖、直观性强、简便易用等优点。使用蒙特卡罗仿真法的理论和技术对研究项目进行定量风险量化主要包含了数据采集与处理、构造周期与成本模型、仿真及抽样、误差分析等步骤,如图1所示。

1.1 数据采集与处理

如图1所示,数据获取与处理是基于蒙特卡罗仿真法的

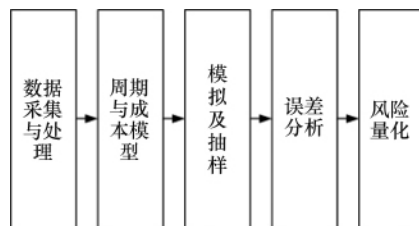


图1 基于蒙特卡罗仿真法的研究型项目风险量化流程

Fig. 1 MCS-based risk quantification process for research-typed projects

研究项目风险量化方法的第一步。其重要性并不亚于仿真过程本身,因为所收集数据的完整性及准确性将直接影响蒙特卡罗法仿真结果质量。尽管研究项目实施过程中风险变量的概率分布类型是多种多样的,但可归纳为4种:离散分布、均匀分布、正态分布和偏态分布。考虑到偏态分布是难以准确估计的,为简化计算量,本文用三角分布代替偏态分布^[6]。

由于研究项目本身具有创新性强、资金投入多、研制生产周期长等特点,本文在莫尔(Monroe)法的基础上处理研究项目风险数据。具体步骤包括:(1)确定待估的风险变量概率分布类型及风险变量概率分布参数;(2)选择评估专家并确定相应权重;(3)评估专家根据自身经验确定风险变量概率分布参数值,同时给出相应解释或原因;(4)项目风险管理人员收集专家评估结果,并整理专家评估意见成文档;(5)将该文档反馈给各评估专家,请专家考虑该文档再次给出他们的估计值;(6)项目风险管理人员再次收集专家评估结果,并对专家二次评估结果进行整理。

应用Monroe法能够从专家处获取风险变量概率分布参数值,专家们可能给出不同意见,因此必须对专家的不同意见进行处理。通常情况,使用概率和统计理论都能得到理想的结果。以三角分布为例,假定有 m 个专家,其权重分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$,其中 $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m = 1$,他们对某风险变量概率分布参数值给出的意见分别是 $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_m$,则由三角模糊数性质,综合后的风险变量概率分布参数值可表示为 $\tilde{A} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \tilde{A}_i$ 。

图2显示了对3个专家不同意见的处理过程,3个专家的权重分别为0.5, 0.3, 0.2, 给出的风险变量概率分布参数值分别为 $\tilde{A}_1 = (40, 50, 60)$, $\tilde{A}_2 = (50, 65, 80)$, $\tilde{A}_3 = (50, 70, 90)$ 。

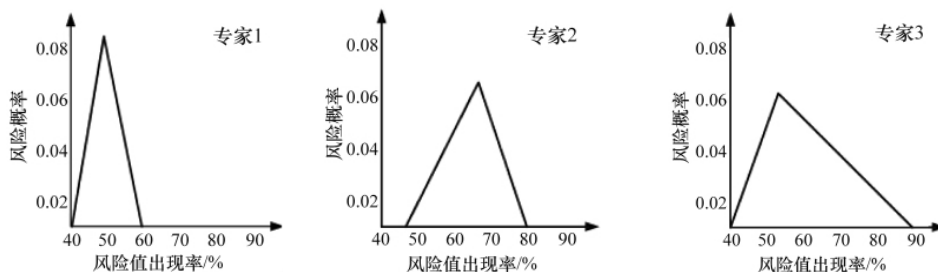


图2 不同专家的不同意见

Fig. 2 Different views from different experts

1.2 项目周期和成本模型

1.2.1 周期模型

项目工期计算是以各工作的最早开始时间和最早完成时间的计算为前提的。工作最早开始时间和最早完成时间的计算规则如下。

(1) 工作最早开始时间(ES)定义如式(1)所示:

$$\begin{cases} T_i^{\text{ES}}=0 & i=0 \\ T_i^{\text{ES}}=\max_h \{T_h^{\text{ES}}+D_h\} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, T_h^{ES} 为工作 i 的紧前工作 h 的最早开始时间, D_h 为工作 i 的紧前工作 h 的持续时间。ES 的计算应从项目网络图的起始节点开始, 顺着箭线方向依次逐项计算。

(2) 工作最早完成时间(EF)定义如式(2)所示:

$$T_i^{\text{EF}}=T_i^{\text{ES}}+D_i \quad (2)$$

因此, 确定完项目网络图中上述的时间参数以后, 就可以计算项目的工期, 计算公式如式(3), 其中 T_c 为项目的计算工期, T_n^{EF} 为终点节点的最早完成时间:

$$T_c=T_n^{\text{EF}} \quad (3)$$

1.2.2 成本模型

通常在应用蒙特卡罗仿真法进行项目成本分析时, 会以成本分解结构(cost breakdown structure)为基础, 即项目的总成本被直接表示为各个不同的成本要素之和。但实际上, 研究项目的进度是以每项工作(子项目)的完成来推动的, 即项目的实施是建立在工作分解结构(work breakdown structure)之上的, 因而以成本分解结构为基础的项目成本分析方式在项目实施过程中, 不能直接对项目的各项工作成本进行有效的控制^[7]。因此, 本文以工作分解结构为基础进行项目成本分析。以工作分解结构为基础来计算项目成本, 首先确定工作分解结构下各工作对应的成本项及各成本项对应的成本要素, 然后计算出每个工作的成本, 最后得出整个项目的成本。该成本计算模型如式(4)所示:

$$C=\sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

式中, n 为子项目数, C_i 为子项目 i 的成本, 有

$$C_i=\sum_{p=1}^{m_i} (X_{1ip}X_{2p}+X_{1ip}X_{3p}+X_{1ip}X_{4p}) \quad (5)$$

式中, m_i 为子项目 i 对应的成本数, X_{1ip} 为第 p 项成本项对应的工作量, X_{2p} 为人工成本, X_{3p} 为设备成本, X_{4p} 为材料成本。

1.3 仿真及抽样

基于蒙特卡罗仿真法的研究项目风险量化方法需要确定的一个重要参数是蒙特卡罗仿真法的仿真次数 N 。 N 与蒙特卡罗仿真法的仿真结果精度直接相关, 一般来说, 仿真次数越大, 仿真结果精度越高, 反之仿真结果精度越低。一般情况下仿真结果精度越高越好, 但仿真结果精度越高, 仿真次数必然越大, 相应带来的计算量就越大、计算时间也越长。因此, 必须选择适当的仿真次数, 使得仿真结果不但精度满足

相应要求, 而且计算量和计算时间适中。

对随机事件和随机变量仿真, 仿真次数 N 有着不同的计算公式。因此需要在给定置信度 β 和误差 ε 条件下, 计算随机变量 x 相应的仿真次数。为取得随机变量 x 的期望值 $E(x)$, 对 x 做仿真, 用样本均值代替总体期望值 $E(x)$, 则其误差可表达为

$$P(|\bar{x}-E(x)|<\varepsilon)=\beta \quad (6)$$

由于总体分布未知, 而且样本较大, 可以用中心极限定理估计误差 ε , 因为 $\varepsilon=\lambda_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$, 所以式(7)成立。

$$N=\lambda_\alpha^2 \sigma^2 / \varepsilon^2 \quad (7)$$

式中, 当置信度 β 给定, λ_α 由给定 β 经查 $\phi\left(\frac{\beta+1}{2}\right)$ 确定; 由于

s^2 是 σ^2 的无偏估计, 因此对 σ^2 而言可用样本方差 $s^2=\frac{1}{N+1}$

$\sum_{j=1}^N (X_j-\bar{X})^2$ 代替。由于先并不知道总体方差 σ^2 , 因此仿真次数和仿真误差的确定方法是: 先给定初始仿真次数 N_0 , 并进行 N_0 次仿真, 根据初始仿真的结果计算样本方差 s^2 , 再以样本方差 s^2 代替总体方差 σ^2 计算出仿真误差 t , 如果 $t \leq \varepsilon$, 说明精度已经满足精度要求, 即可停止仿真并输出结果。否则需要追加仿真次数 N_1 , 并继续仿真 N_1 次再做判断。这样继续下去, 直到达到所要求的精度, 从而确定出相应的仿真次数。综上所述, 蒙特卡罗仿真法的误差可表示为

$$\varepsilon=\frac{\lambda_\alpha \sigma}{N} \quad (8)$$

式中, λ_α 为正态差, 与置信度 β 一一对应; N 为抽样次数; σ 为随机变量的标准差。

由式(8)可知, 蒙特卡罗仿真法的误差与所涉及问题的维数无关, 只与抽样次数和随机变量的方差有关。因此在方差固定的情况下, 若单靠增加抽样次数提高精度, 那么每提高一位数的精度就需增加 10 倍工作量。因此若对 k 个风险变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 进行 n 次抽样, 可通过以下步骤减少方差:

步骤 1 对每个输入变量的取值范围按假定的概率密度函数以等概率(取值为 $1/n$)分为 n 个互不重叠的区间间隔。

步骤 2 对每个输入变量在每个间隔内的取值按各自的概率密度分布随机抽样。

步骤 3 再对 x_1 的 n 个取值随机地与 x_2 的 n 个取值组成 n 个配对, 然后这 n 个配对再与 x_3 的 n 个取值随机组合, 以此类推, 可得一组 n 个抽样的 k 维随机变量组值。

步骤 4 对输入变量的随机配对进行有效筛选, 选择出一个适当的间隔配合。

1.4 误差分析

基于蒙特卡罗仿真法的研究项目风险量化方法的误差主要来自两个方面: 一是专家确定的风险变量概率分布代替风险变量实际概率分布造成的误差; 二是该方法本身的仿真误差。由于不知道实际风险变量的概率分布, 无法确定同时理论上也无法证明第一种误差的大小。为了缩小这种误差,

唯一能做的就是选择多个项目风险评估专家进行其概率分布的估计,然后通过莫尔法尽量地减小这种误差。而对于第二种误差,实际上就是蒙特卡罗仿真方法的误差,即式(8)。

因此,在既定的 λ_α 下,第二种误差主要取决于风险变量概率分布的标准差 σ 和仿真次数 N 。对于按照莫尔法让专家们估计出来的风险概率分布类型来说, σ 是一个确定的值。因此要想缩小这种误差,只需增加 N 即可。

2 项目进度风险分析

对研究项目而言,成本超支风险在项目立项时就被限制,因此本文对风险量化后的分析将主要针对项目进度风险展开。关键路径法(Critical Path Method, CPM)和计划评审技术(Program Evaluation and Review Technique, PERT)是项目进度计划和控制的主要手段,目前已广泛应用于研究项目。CPM适用于项目中各子项目间逻辑关系和持续时间都确定的情况,然而实际研究项目中通常包含诸多风险因素,进而导致进度计划存在着一定的不确定性,因此应用CPM对研究项目进行进度风险分析需要明确其不确定性。PERT为各子项目持续时间不确定而逻辑关系确定的情况,提供了简捷的处理方式,各子项目持续时间的期望值 D 和方差 σ^2 可由式(9)和式(10)表示:

$$D = \frac{a+4m+b}{6} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{36} \quad (10)$$

其中, a 、 m 、 b 分别为最悲观、最可能、最乐观的子项目估计持续时间。

在此基础上就可按CPM处理,并计算方差、完成概率等。然而,这些简化处理基于以下基本假定:

(1) 各子项目持续时间服从 β 分布。

(2) 网络图中只有一条线路占支配地位,其他线路成为关键线路的概率可忽略不计。

(3) 网络计划中的线路的持续时间服从正态分布。

下面就总项目进度风险和子项目进度风险分析方法分别展开论述。

2.1 总项目进度风险分析

研究项目管理者通常对风险因素将会对总项目周期产生什么影响较为关心,这种影响可通过基于蒙特卡罗仿真法的研究项目定量风险量化技术分析得到,具体过程如下:

步骤1 确定项目各任务的持续时间并根据它们之间的逻辑关系绘制项目单代号网络图。

步骤2 根据莫尔法,从专家处收集项目各风险变量的概率分布类型及概率分布参数。

步骤3 基于拉丁超立方体抽样方法使计算机产生 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数 r_i 。

步骤4 令 r_i 和项目各风险变量的分布函数相等,由解方程 $r=F'(x_i)$ 得出相应各风险变量的随机值 x_i 。

步骤5 选定仿真次数 N ,并根据项目工期计算模型,计算项目总工期。

步骤6 确定分组区间总范围,根据分组区间总范围制定分组数和组距,统计各分组中的频数,得到频数直方图。

步骤7 将绝对频数转换为相对频数,得到近似的总项目周期分布密度函数 $f'(T)$ 。

步骤8 将 $f'(T)$ 按区间累加得到总项目周期的近似累计分布函数 $F'(T)$ 。

至此,便可以计算在某一指定工期 T_p 下,项目相应的完工概率为

$$P(T \leq T_p) = F'(T_p) \quad (11)$$

2.2 子项目进度风险分析

除去总项目的进度风险外,子项目的风险也是管理者主要关注的。在研究项目相关子项目具有不确定性的情况下,常常不但需要知道项目在某一时间内完工的概率有多大,而且还要知道项目中哪些子项目或研究内容比较关键,哪些子项目对项目的完工日期有着重要的影响,即需要对研究项目进行子项目层的风险分析。本文主要通过两个关键度指标Key Probability(KP)和Key Importance(KI)进行子项目层的进度风险分析。

(1) KP

KP为子项目位于关键线路上的概率^[8-9],其值可借助蒙特卡罗仿真法,由式(12)确定,其中 $n(i)_{\text{critical}}$ 为子项目 i 在总共 N 次仿真试验中成为关键项目的次数,可由统计确定:

$$KP(i) = \frac{n(i)_{\text{critical}}}{N} \quad (12)$$

(2) KI

KI最早由Bowers和Williams率先提出,用于衡量各子项目进度风险水平^[8-9]。其可定义为子项目持续时间 D_i 与总项目周期 T 间的线性相关系数,如式(13)所示:

$$\begin{cases} KI(i) = \text{Corr}(D_i, T) \\ \text{Corr}(D_i, T) = \frac{\text{Cov}(D_i, T)}{[\sigma(D_i) \cdot \sigma(T)]} \\ \text{Cov}(D_i, T) = E(D_i \cdot T) - E(D_i)E(T) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\text{Corr}(D_i, T)$ 、 $\text{Cov}(D_i, T)$ 分别为 D_i 和 T 的相关系数和协方差, $E(\cdot)$ 和 $\sigma(\cdot)$ 分别表示相应随机变量的期望值和标准差。其中, $E(T)$ 、 $\sigma(T)$ 、 $\text{Cov}(D_i, T)$ 通常很难精确求解,常需借助于蒙特卡罗仿真求其近似解,求解公式如式(14):

$$\begin{cases} E(T) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T^{(k)} \\ \sigma(T) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (T^{(k)} - E(T))^2} \\ \text{Cov}(D_i, T) = \sum_{k=1}^N (D_i^{(k)} - E(D_i))(T^{(k)} - E(T)) \\ = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (D_i^{(k)} \cdot T - E(D_i) \cdot E(T)) \end{cases} \quad (14)$$

当子项目持续时间类型为某种经典概率分布时,式(14)

中 $\sigma(D_i)$ 、 $E(D_i)$ 可由分布参数直接求取, 而对于一般分布而言需要借助于蒙特卡罗仿真, 如式(15)所示:

$$\begin{cases} E(D_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^{(k)} \\ \sigma(D_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i^{(k)} - E(D_i))^2} \end{cases} \quad (15)$$

在式(13)~(15)中, $D_i^{(k)}$ 为第 k 次仿真时, 随机抽样得出第 k 个计划的第 i 项子项目持续时间; $T^{(k)}$ 为第 k 个计划按前述时间参数公式得到的计算总周期。

KP 和 KI 两个指标从不同角度反映了各子项目的相对重要程度。从风险分析的角度看, KP 是进度风险概率的重要影响因素, 因为只有可能处于关键线路上的子项目才能最终影响到总项目周期; 然而它却与风险的后果并无多大关联。KI 则不然, 从相关系数的统计学意义可知, 它所反映的是子项目持续时间对总项目总周期的影响程度, 是对风险因素两要素一定程度上的综合反映。

据此, KP 可作为评定子项目优先级的标准, 而 KI 则可作为子项目风险水平的衡量尺度。KP 和 KI 单独使用都存在不同程度的局限性, 而且还可能会得出有悖于管理者直觉的不合理结论。因而, 对子项目层的进度风险分析应兼顾 KP 和 KI, 具体情况如下:

(1) KP 和 KI 都比较高

对于 KP 和 KI 都较高的子项目, 理应将其作为研究项目进度管理中的重中之重, 此类子项目不仅是实现总周期的关键途径, 此外还应加强风险管理以消除或降低其不确定性影响。

(2) KP 高而 KI 低

对于 KP 高, 而 KI 低的子项目, 管理者应主要关注于如何缩短此子项目的持续时间, 因为 KP 高意味着此子项目极有可能位于关键线路, 成为影响总项目周期的瓶颈。另一方面, KI 低则意味着此子项目并非高风险, 不作为工期风险管理的重点。

(3) KP 低而 KI 高

对于 KP 低, 而 KI 高的子项目, 项目管理者应将其列入风险防范及管理的重点, 对其采取强有力的进度风险管理措施。这种子项目类似于“稀有事件”中被称为“零-无穷小”(Zero-Infinity Dilemmas)的风险情况; 虽然其关键概率很小, 但其风险程度很高, 一旦该位于关键线路上, 便会严重影响到总项目周期。

(4) KP 和 KI 都比较低

对于 KP 和 KI 都低的子项目, 项目管理者可基本将其忽略。因为其成为关键子项目的概率很小; 即使成为关键子项目, 对总项目周期的影响也很小。

研究项目管理中, 合理地应用 KP 和 KI 对进行子项目进度风险分析, 将使项目管理者能准确地把握项目进度计划中的关键环节, 从而将保证研究项目进度计划的顺利实施和完成, 并最终将提高研究项目的管理水平。

3 结论

本文分析了研究项目定量风险量化的必要性, 重点研究了基于蒙特卡罗仿真法的研究项目风险量化与分析技术, 实现了面向研究项目的进度风险分析。本文主要完成了以下研究内容:

(1) 提出了基于蒙特卡罗仿真法的研究项目定量风险量化技术, 给出了其具体过程, 详细研究了其关键环节, 包括数据采集与处理、项目周期及成本建模、仿真及抽样、误差分析等。

(2) 给出了基于风险量化技术的研究项目进度风险分析的详细方法, 引入 KP 和 KI, 实现了总项目层和子项目层两个层次的进度风险分析。

参考文献 (References)

- [1] 黄瑾. 科研项目风险管理与评价研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(8): 193-196.
Huang Jin. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(8): 193-196.
- [2] 朱启超, 匡兴华. NASA 高技术项目风险管理技术与方法[J]. 世界科技研究与发展, 2004(6): 95-102.
Zhu Qichao, Kuang Xinghua. *World Sci-tech R&D*, 2004(6): 95-102.
- [3] 朱松岭, 周平, 韩毅, 等. 基于模糊层次分析法的风险量化研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(8): 980-984.
Zhu Songling, Zhou Ping, Han Yi, et al. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(8): 980-984.
- [4] 邢俊文, 迟宝山, 刘锋. 研发项目技术风险度的三参数量化模型研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(10): 131-137.
Xing Junwen, Chi Baoshan, Liu Feng. *System Engineering Theory and Practice*, 2008, 28(10): 131-137.
- [5] Nylund K L, Asparoutiov T, Muthen B O. Deciding on the number of classes in latent class analysis and growth mixture modeling: A Monte Carlo simulation study [J]. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 2007, 14(4): 535-569.
- [6] Liu K. On the distribution of primitive Pythagorean triangles [J]. *Acta Arithmetical*, 2010, 144(2): 135-150.
- [7] 郭宇, 刘尔烈. 应用蒙特卡罗方法改进项目成本风险分析 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2002, 35(2): 199-203.
Guo Yu, Liu Erle. *Journal of Tianjin University: Science and Technology Edition*, 2002, 35(2): 199-203.
- [8] Elmaghraby S E. On criticality and sensitivity in activity networks [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 127(2): 220-238.
- [9] Willimas T M. What is critical [J]. *International Journal of Project Management*, 1993, 11(3): 197-200.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件, 以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等, 撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿, 每篇文章约 2000 字, 同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱: kjdbbjb@cast.org.cn。