



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

申請博士學位論文

基于全寿命期风险分析的路堑与隧道  
方案决策研究

姓名：李志宏

学号：0610020163

所在院系：土木工程学院

学科门类：工学

学科专业：隧道及地下建筑工程

指导教师：黄宏伟 教授

副指导教师：薛亚东 副教授

二〇一〇年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

**Decision making between cut-slope and  
shallow tunnel alternatives based on life  
cycle risk analysis**

Candidate: Zhihong Li

Student Number: 0610020163

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Tunnel and Underground Engineering

Supervisor: Prof. Hongwei Huang

Assistant Supervisor: Associate Prof. Yadong Xue

March, 2010

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

深挖路堑方案与浅埋隧道方案之间的决策普遍存在于山岭重丘区公路及铁路建设中。实际操作中,在工程技术均可行的前提下,主要是考察经济的合理性,在运营成本相差不大的情况下,以建设成本决定方案的优越性。然而,工程建设项目是一个周期长、投资大、技术要求高、系统复杂的生产和消费过程,在工程建设全寿命期内难免会受到各种各样风险因素的影响。本论文依托交通部西部科技项目——山区高速公路工程风险分析与控制对策研究(项目编号:2006318799107),基于多目标决策理论,通过分析不同方案施工期内的常规成本风险、常规工期风险、施工期偶然风险导致的人员伤亡、经济损失和工期损失,以及运营期内的运营维护成本、方案可靠性和环境影响评价等指标,将全寿命理念和风险定量分析方法融入方案决策,构建了路堑与隧道方案的决策模型,并利用 Monte-Carlo 仿真技术,以 MATLAB 为平台开发了“基于全寿命期风险分析的工程方案决策系统”。论文取得的主要研究成果如下:

(1) 根据工程建设中风险的特点,将风险分为常规风险和偶然风险进行分析,阐述了常规风险与偶然风险的含义。认为常规风险是必然发生的风险,由它导致的常规工期和成本风险是在项目能够按原计划顺利实施且无重大偶然风险发生时的工期和成本,一般可用连续的概率分布表示。工程建设中可能发生的重大的对工程造成较严重后果的风险属于偶然风险,这类风险是不确定性风险,可能发生也可能不发生,但一旦发生就会导致严重的后果,偶然风险事故是导致工程能否顺利完工的主要原因。

(2) 阐述了常规工期风险和常规成本风险的计算方法。根据规划评审技术 PERT 原理,运用 Monte-Carlo 仿真技术,综合考虑影响各施工工序持续时间的常规风险因素,得到工程项目的工期分布图。结合各施工工序的特征,将各工序的成本分为时间相关成本、数量相关成本和固定成本计算,考虑成本构成要素的不确定性,通过对各工序的成本求和得到工程总成本分布图。基于此绘制工程项目的常规成本—工期散点图。

(3) 提出了滑坡风险的定量分析方法,详细阐述了滑坡风险分析过程。在总结前人研究的基础上,提出了滑坡风险易损性定量评价模型;以力学计算为基础,利用不同的数值模拟手段,辨识出最危险的滑坡场景,预测滑坡发生的概率以及滑坡体的体积、可能影响的区域,从而确定承险体的种类、数量和分布情况,在此基础上进行后果分析;借鉴“球与盒子”的经典概率问题提出了人员伤亡的分

析方法；基于事件树原理，采用 Monte-Carlo 技术定量的分析了滑坡风险导致的后果损失（人员伤亡、经济损失和工期损失），从而得到滑坡风险的损失分布。

（4）详细论述了隧道塌方冒顶风险的分析过程，提出了隧道塌方冒顶风险的定量分析方法。根据可靠度理论，预测隧道塌方发生的概率；根据围岩性质及已有统计数据，运用普氏压力拱理论计算出塌方的长度、跨度以及塌方形成的空腔面积，从而确定加固所需建筑材料数量，得到加固措施所需费用；与滑坡风险定量分析类似，基于事件树原理和 Monte-Carlo 方法对人员伤亡和工期损失进行预测，最终得到隧道塌方冒顶风险导致的损失分布。

（5）对工程方案的全寿命周期成本进行分析，改进了方案运营维护成本的计算方法。通过引入维修费用增长率系数，体现了结构随使用年限的增加发生老化和耐久性降低的趋势。

（6）运用模糊综合评判法和模糊层次分析法，对不同方案的可靠性及环境影响进行评价。以长期稳定性、可维修（护）性及结构变异（病害）及其它因素等作为方案可靠性因素集的基本层；通过对社会环境影响、生态环境影响和自然环境三类环境影响因素集的评价评判方案的环境影响指标。

（7）分析总结了常用的多目标决策集结算子，对模糊判断矩阵的构造方法、排序方法以及一致性检验方法进行了深入讨论，指出各种方法的长处与不足。确定采用加权几何平均算子（WGA）对单个决策者的决策信息进行集结，完成个体决策；采用组合加权几何平均算子（CWGA）对多个决策者的决策信息进行集结，完成群决策。

（8）根据风险定量分析过程以及选定的多目标决策方法，基于 MATLAB 平台开发了“基于全寿命期风险分析的工程方案决策系统”，其中包括施工期分析、运营期分析和多目标决策三个模块。施工期分析模块包括对常规工期风险、常规成本风险、以及偶然风险导致的人员伤亡、工期损失和经济损失进行分析；运营期分析模块包括对运营成本进行计算，对方案可靠性和环境影响评价；决策模块可提供个体决策以及群决策，可基于施工期的 5 个指标或全寿命期的 8 个指标进行决策。

**关键词：**隧道，路堑，多目标决策，全寿命，风险定量分析，常规风险，偶然风险，常规成本风险，常规工期风险，人员伤亡，经济损失，工期损失，运营成本，方案可靠性，环境影响，易损性，滑坡，塌方冒顶

## ABSTRACT

Decision making between cut-slope and shallow tunnel alternatives is a very common problem in construction of highways or railways in mountainous regions. In practice, on the premise that both are feasible in construction technology, economic rationality and maintenance cost are mainly regarded. If there is no marked difference in maintenance cost between the alternatives, construction cost is preferred to evaluate the superiority of alternatives. However, the construction is a process of production and consumption, with the characteristics of long term, big investment, high technical requirement and complex system. It is therefore inevitable that the project should be influenced by different kinds of risks during life cycle period. This research is based on Western Science & Technology Project of Ministry of Communications – Research on risk analysis and treatment of highway construction in mountainous regions (No. 2006318799107). The decision model proposed in this dissertation is a multi-objective decision-making model. The factors concerned in this model include normal cost risk, normal schedule risk, and casualties, economic loss and time overrun due to exceptional risks during construction period, together with maintenance cost, reliability and environment impact of different alternatives. In this dissertation, the life cycle ideology and quantitative risk analysis method are combined with the decision making approach, and a decision making model between cut-slope and shallow tunnel alternatives is proposed. Moreover, a program named “Decision Making System of Construction Schemes Based on Life Cycle Risk Analysis” is developed on MATLAB platform using Monte-Carlo simulation method. The major finding of the dissertation is listed as follows:

(1) According to the characteristics of risks which may occur during construction, the risks are divided into two kinds-normal risk and exceptional risk, and the meaning of these two kinds of risks is described. Normal risk is considered to be inevitable. It can be defined as “risks causing deviations in the normal time and cost spans.” The normal schedule and cost risk are associated with the condition that the project can be completed smoothly as original plan without major exceptional risks. They can often be represented as continuous probability distributions. The probable major risks, which result in serious consequences to the project, belong to exceptional risk. Exceptional risk is considered to be avoidable, but in case of

occurrence it can lead to severe consequences. It is considered to be key issue to cause major and unplanned changes in construction.

(2) The methodologies of estimating normal schedule and cost risks are described. Based on PERT (Program Evaluation and Review Technology) method, using Monte-Carlo simulation, the schedule distribution can be obtained comprehensively considering normal risk factors which influence durations of construction activities. Combined with characteristics of all construction activities and the uncertainties of cost components, the normal cost is calculated using time-dependent cost, quantity-dependent cost and fixed cost. On this basis, normal cost – schedule scatter of the project can be plotted.

(3) The method of quantitative risk analysis (QRA) for landslide risk is proposed, and the analyzing process is described in detail. On the basis of previous researches, a new quantitative model for estimating vulnerability to landslide hazard is proposed. Based on mechanical calculation, with different numerical simulation ways, the most hazardous scenario is identified, the occurrence probability, probable debris volume and impact area are estimated. The category, quantity and spatial distribution of elements at risk therefore can be determined, so that the consequence can be evaluated. Using event tree analysis and Monte-Carlo method, the consequence including casualties, economic loss and time overrun is estimated, and the consequence probability distribution is obtained.

(4) The quantitative estimating method of tunnel collapse risks is proposed. The collapse probability is estimated according to reliability theory. Using Protodyakonov's compressive arch theory and statistical data, the length, span and area of newly generated cavity of collapse can be calculated, so that the quantity of construction material of reinforcing measures and the cost could be obtained. Similar to landslide risk analysis, the casualties and time overrun due to collapse can be estimated. Finally, the consequence due to collapse can be expressed as probability distributions based on event tree analysis and Monte-Carlo simulation method.

(5) The life cycle cost (LCC) theory is studied, and the method of calculating maintenance cost is improved. Through introducing growth-rate coefficient of maintenance cost, the aging and durability issue of structures due to increasing service life is reflected.

(6) The reliability and environment impact of different alternatives are evaluated using both fuzzy comprehensive evaluation method and fuzzy analytic hierarchy

process. The basic level of factor set for evaluating reliability is regarded to consist of three factors including long-term stability, maintainability and structural defect etc. Through evaluating social, ecological and natural environmental impact, the environment impact degree by different alternatives is evaluated.

(7) The commonly used aggregation operators of multi-objective decision making are analyzed and summarized. The construction, ranking and consistency checking method of fuzzy judgment matrix are discussed and analyzed, and advantages and disadvantages are pointed out. Finally, the weighted geometric average operator (WGA) and combined weighted geometric average operator (CWGA) are preferred to aggregate the information from individual decision maker or group decision makers.

(8) According to the methods of quantitative risk analysis and multi-objective decision making, a program named “Decision Making System of Construction Schemes Based on Life Cycle Risk Analysis” is developed on MATLAB platform. The program consists of three modules including risk analysis during construction period and operational period, and decision making. The module of construction period comprises quantitative risk analysis of normal schedule, normal cost, and casualties, economic loss and time overrun due to exceptional risks. The maintenance cost, reliability and environment impact constitute the module of operational period. In the decision making module, individual or group decision making method can be selected, and 5 indicators of construction period or 8 indicators of life cycle period can be applied to make decision.

**Key Words:** tunnel, cut-slope, multi-objective decision making, life cycle cost, quantitative risk analysis, normal risk, exceptional risk, normal schedule risk, normal cost risk, casualties, economic loss, time overrun, maintenance cost, reliability, environment impact, vulnerability, landslide, collapse

## 目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状分析.....	2
1.2.1 工程风险研究现状.....	2
1.2.2 风险分析中的全寿命理念.....	6
1.2.3 多目标决策.....	8
1.2.4 路堑与隧道方案决策比选.....	11
1.3 论文的主要研究内容及思路.....	12
1.4 论文的关键技术与创新点.....	13
1.4.1 关键技术.....	13
1.4.2 创新点.....	14
第 2 章 工程施工期常规风险分析.....	16
2.1 工程项目风险.....	16
2.2 常规工期风险.....	19
2.2.1 常规工期风险.....	19
2.2.2 规划评审技术.....	21
2.2.3 工期分布模拟方法.....	23
2.3 常规成本风险.....	26
2.3.1 常规成本风险.....	26
2.3.2 蒙特卡罗模拟法.....	33
2.3.3 常规成本风险计算.....	35
2.4 本章小结.....	36
第 3 章 工程施工期偶然风险分析.....	37
3.1 概述.....	37
3.2 偶然风险损失分析原理.....	37
3.2.1 一般原理.....	37
3.2.2 人员伤亡分析.....	39
3.2.3 经济损失分析.....	41
3.2.4 人员伤亡导致的工期损失.....	42
3.3 路堑边坡滑坡风险定量分析.....	44
3.3.1 滑坡发生概率及规模预测.....	45
3.3.2 滑坡灾害易损性分析.....	46
3.3.3 滑坡风险损失分析.....	59
3.3.4 工程实例应用.....	61

3.4 隧道塌方风险定量分析 .....	73
3.4.1 塌方发生概率及规模预测 .....	77
3.4.2 塌方风险损失分析 .....	85
3.4.3 计算实例 .....	93
3.5 本章小结 .....	97
第4章 工程方案运营期风险分析 .....	99
4.1 概述 .....	99
4.2 运营成本预测 .....	99
4.3 方案可靠性分析 .....	102
4.3.1 模糊综合评判法 .....	102
4.3.2 工程方案可靠性评价 .....	105
4.4 环境影响评价 .....	119
4.4.1 环境影响评价 .....	119
4.4.2 计算实例 .....	125
4.5 本章小结 .....	128
第5章 工程方案决策理论模型与程序实现 .....	129
5.1 多目标决策 .....	129
5.2 模糊互补判断矩阵 .....	132
5.2.1 构造判断矩阵 .....	132
5.2.2 模糊互补判断矩阵的排序方法 .....	134
5.2.3 模糊互补判断矩阵一致性检验 .....	137
5.3 群决策方法 .....	142
5.4 程序实现 .....	144
5.4.1 施工期风险分析 .....	145
5.4.2 运营期风险分析 .....	147
5.4.3 决策分析 .....	149
5.4.4 部分参数输入界面 .....	150
5.5 本章小结 .....	151
第6章 应用案例 .....	153
6.1 工程概况 .....	153
6.2 路堑边坡方案风险定量分析 .....	154
6.2.1 施工期常规风险分析 .....	154
6.2.2 滑坡风险分析 .....	156
6.2.3 运营期风险评价 .....	164
6.3 浅埋隧道方案风险定量分析 .....	167
6.3.1 施工期常规风险分析 .....	167
6.3.2 塌方冒顶风险分析 .....	168
6.3.3 运营期评价 .....	174

6.4 基于施工期风险分析的方案决策.....	176
6.5 基于全寿命期风险分析的方案决策.....	178
第7章 结论与展望.....	180
7.1 成果与结论.....	180
7.1.1 常规工期风险与常规成本风险分析.....	180
7.1.2 滑坡风险定量分析.....	181
7.1.3 隧道塌方风险定量分析.....	182
7.1.4 方案运营维护成本计算.....	182
7.1.5 方案可靠性和环境影响评价.....	183
7.1.6 多目标决策与程序实现.....	183
7.2 存在的问题与展望.....	183
致谢.....	185
参考文献.....	187
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	197

### 常用符号说明:

$C$	工程总成本
$C_n$	常规风险成本
$C_e$	偶然风险成本
$a$	施工工序的最乐观时间
$b$	施工工序的最保守时间
$m$	施工工序的最可能时间
$C_i$	工序 $i$ 的常规成本
$C_{nt}$	时间相关成本
$C_{nq}$	数量相关成本
$C_{nf}$	固定成本
$R_H$	人员伤亡风险指标
$P_{(T R)}$	偶然风险发生的时间概率
$P_{(n S,R)}$	偶然风险发生时空间区域 $S$ 内有 $n$ 个人的概率
$V_{(S R)}$	空间区域 $S$ 内人的平均易损性
$V_f$	死亡的易损性平均值
$V_s$	重伤的易损性平均值
$V_l$	轻伤的易损性平均值
$I_{hi}$	人员伤亡综合指标
$R_{NSD}$	可移动承险体的偶然风险经济损失指标
$P_{(n S,R)}$	偶然风险发生时空间区域 $S$ 内有 $n$ 个承险体的概率
$NV$	承险体的平均市场净值
$V_{sd}$	施工机械严重损坏的易损性平均值
$V_{md}$	施工机械中度损坏的易损性平均值
$V_{ld}$	施工机械轻微损坏的易损性平均值
$LE_{hi}$	施工机械经济损失指标
$R_{SD}$	已建结构的经济损失指标

$P_{(D R)}$	滑坡体或塌方体影响结构的概率
$V_{(S R)}$	结构的易损性
$C_S$	建造相应损坏结构的成本
$I$	滑坡灾害强度
$R$	承险体抗灾害能力
$I_{dyn}$	动力强度参数
$I_{gem}$	几何强度参数
$I_{dpt}$	滑坡体厚度参数
$I_{dyn-s}$	开阔空间内结构遭受滑坡体冲击的动力强度参数
$I_{dyn-p}$	开阔空间内人员遭受滑坡体冲击的动力强度参数
$C_L$	滑坡体平均速度
$D_{dpt}$	建筑物位置处滑坡体的厚度
$\xi_i$	抗灾能力系数
$R_{str}$	建筑结构的抗灾能力
$\xi_{sfd}$	基础深度系数
$\xi_{sty}$	结构形式系数
$\xi_{smn}$	建筑维护状态系数
$\xi_{shl}$	建筑物高度系数
$D_{fod}$	建筑基础深度
$R_{per}$	人员抗灾能力
$\xi_{phy}$	身体抵抗力指标
$\xi_{kng}$	知识抵抗力指标
$V_{p-s}$	建筑物内人员的易损性
$V_{str}$	建筑物的易损性

# 第1章 绪论

## 1.1 引言

随着我国经济建设持续快速发展，越来越多的高速公路、铁路等基础设施建设项目正在或即将在山地丘陵地区实施。在项目实施过程中不可避免地会出现一些典型工程的比选，如深挖路堑与浅埋隧道、高架桥与高路堤等。这些典型工程不仅对路线总体方案影响重大，还对整个工程的工程造价以及工期有极强的控制作用，同时不同工程方案对区域生态环境的影响程度不同，对道路安全运营的影响程度也有差异。因此在山区高速公路建设中必须重视对典型工程方案的比选，决策时必须综合考虑各种目标因素，选择最优的工程方案。

山区高速公路建设中，深挖路堑与浅埋隧道方案之间的可替代性竞争十分常见。在工程规划设计决策中，通常是先计算各方案的工程量，通过造价计算得出工程建设成本，然后估算出运营期预计消耗的费用，最后通过对比不同方案间的净效益来选择方案。实际操作过程中，在工程技术均可行的前提下，工程可替代方案的比选主要是考察经济的合理性。在营运成本相差不大的情况下，以建设成本决定方案的优越性。然而，工程建设项目是一个周期长、投资大、技术要求高、系统复杂的生产和消费过程，在施工过程中及运营期间会受到各种各样的不确定因素的干扰。在对工程方案决策时，若考虑因素不周会导致不合理的决策结果，如：西康线 K61+650~+820 段，在方案决策时考虑到挖填平衡，降低造价，放弃了隧道方案，采用了 37m 高的深路堑方案。然而在建成后不久便发生了两次大滑坡，造成了巨大的经济损失，并严重影响了西康线正常运输。决策时，深路堑方案成本为 540 万元，加上滑坡抢险费用 282 万元和工程修复费用约 4000 万元，最终成本为 4822 万元；若采用浅埋隧道方案 900 万元，加上附近路堤填方的 200 万元，总成本约 1100 万元。由于没有考虑工程的风险干扰因素，最终导致路堑方案比与隧道方案多花了 3722 万元，中断和影响运输的损失还没有计算在内（雷大鹏，2004）。

除需考虑风险因素外，在对工程方案进行决策时，还需要引入全寿命的理念。根据可持续发展的思路，工程建设方案既要考虑当前发展的需要，又要考虑今后发展的需要；既要考虑当前的利益，也要考虑后期的风险；既要重视工程建设的初始造价，又要考虑到寿命周期内所需的费用。即要以工程全寿命周期的性能与成本作为衡量工程性能和成本的指标，并以此来进行典型工程方案的决策。

从环境保护的角度看，一般来说，深挖路堑对环境的破坏程度较隧道要大。

深挖方路堑土石方量大，会破坏地面植被和原有地貌，导致地表裸露，造成水土流失。废弃的土石往往就近堆弃在山沟、斜坡上，人为造成了崩塌、泥石流、滑坡等地质病害。采用隧道方案避免了对山体大填大挖，有效的保护了当地的生态资源，弃方数量也相应减少，减少了由于弃土场的设置对环境的影响。横亘于山区的高速公路还将区域内的动植物群落割为两块，截断了动物的生活、迁徙、饮水等路径，进而改变其原有生存环境。如果在深挖方路堑地段采用隧道方案，则可以架起一座天然的桥梁，为沟通高速公路两边的动物群落起到一个很好的缓冲作用。

然而，浅埋隧道的工程造价往往比路堑方案要大得多，且在特定的地形及地质环境下，比如地形地质条件有利、环境保护措施到位、路堑附近存在或已设天然的或人工的动物通道时，深挖方路堑对环境的影响程度有限。因此在对方案进行决策时，需要找到一个合理的平衡点，提出一套合理的评价模型，使得最终选择的方案在经济、安全、环境保护方面达到最优的组合。因此，为了更加合理的对深挖路堑和浅埋隧道方案进行决策，提出基于全寿命期风险分析的路堑与隧道方案决策模型具有十分重要的意义。将风险和全寿命期的理念结合起来，运用多目标决策理论进行方案决策，将会使浅埋隧道和深挖路堑的决策更加合理，具有重要的工程价值。

## 1.2 国内外研究现状分析

### 1.2.1 工程风险研究现状

#### 1.2.1.1 隧道及岩土工程风险、决策研究现状

1964年Casagrande首次提出了岩土工程的计算风险，并以“Role of ‘Calculated Risk’ in Earthwork and Foundation Engineering”为题作太沙基讲座演讲，标志着岩土工程风险分析研究的开始。

随后，Einstein（1974，1994，1996a，1996b，1998）在隧道与地下工程中进行了大量的风险分析研究，其研究多以理念的建立和定性的研究为主，定量的研究主要侧重于结构和岩土体介质材料的可靠度计算方面。他还提出了一种适用于硬岩隧道的基于计算机模拟的隧道成本模型——Tunnel Cost Model（Einstein and Vick，1974），该模型是隧道工程行业最早的一个将不确定性引入工程造价估计中的模型，在之后的研究中得到了改进并在实际工程中得到大量应用。Einstein et al.（1994）曾分析了Adler隧道的长期风险和施工风险，对3种施工方案进行决策，比较了3种施工方案的总成本，并对各方案的长期性能进行了评价。

Salazar (1983) 的博士论文“Stochastic and Economic Evaluation of Adaptability in Tunnelling Design and Construction”认为, 风险分析与管理是降低软土隧道造价的一种有效手段。

Sturk et al. (1996) 提出了一个以概率方法和有效统计为工具的风险分析与决策系统, 并将其应用于斯德哥尔摩环形公路隧道工程几种不同设计方案的比选中, 从风险和可靠性角度得到了一些方案决策的有价值的结论。

Laughton (1998) 在其博士论文“Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in Variable Rock Masses”中考虑了岩体参数的不确定性以及设备故障的不确定性对 TBM 工法施工的隧道施工风险的影响, 预测了隧道施工的费用及工期。

针对哥本哈根地铁工程, Kampmann et al. (1998) 运用风险评估技术概括总结了 40 多种灾害的 10 种风险类型, 对风险事件发生的可能性、影响结果提出了具体的分类体系, 并汇总了 48 个风险控制措施。

Isaksson (1998, 1999) 在对隧道工程成本估计中, 考虑了不希望的潜在事件发生的可能性、影响结果和不同地质因素对建设效率的影响, 提出了工程总成本的表达式, 并将其用于瑞士 Grauholz 隧道选择不同盾构及隧道施工方法的决策中。

Snel and Van Hasselt (1999) 针对阿姆斯特丹南北地铁线路, 提出了一个包括列举主要因素清单、预防措施和额外措施的 IPB 风险管理模式 (Inventory of Critical Aspects; Preventive Measures; Backup Measures), 以控制复杂的地下工程设计施工过程中的工期、造价和质量方面的风险。

Weiss and Vigl (2001) 对工程中不可预见的影响工程目标的一些事件的发生概率进行分析评价, 并通过传统的成本和时间评估方法对单个事件的损失进行分析。

美国华盛顿州运输局 (Reilly, 2003; Reilly and Brown, 2004) 针对工程费用超支的问题研究开发了 CEVP (Cost Estimate Validation Process) 程序, 它将“可能成本范围”的概念引入到费用估计中, 提高了预测的准确性。随后, 美国联邦运输局对此程序进行了鉴定, 并要求以后的费用估计必须引入风险成本估计。

2003 年, Duijvestijn and Bout (2003) 采用定量风险分析的手段分析了阿姆斯特丹城市南北线地铁工程初步设计阶段各方案的成本风险图和结构的可靠度, 并在最终设计过程中对影响工期、成本、技术质量和安全的所有识别的风险进行了粗略的风险分析, 帮助决策者在设计的几个不同阶段做出合理的决策。

Kolic (2003) 分析了克罗地亚 Mala Kapela 公路隧道投标阶段所有可能影响其设计、施工、成本预算和合同关系方面的风险。针对隧道的设计和施工, 引入