DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.063

集成进度和风险的价值工程模型在公路工程设计方案优选中的应用研究

李珏，刘焕
（长沙理工大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410114）

摘要：公路工程项目设计方案比选时，传统价值工程（Value Engineering 简称 VE）模型考虑以最优成本实现项目必要功能，可能会忽略项目进度和风险，从而导致结果偏差，影响评价的科学性。该文在分析方案优选影响因素的基础上，引入进度指标和风险评价，构建改进的价值工程模型，并以公路工程软基处理设计案例进行实证优选分析。模型采用模糊层次分析法评价项目绩效指标和蒙特卡罗（Monte Carlo）模拟方法评价项目综合风险。改进的价值工程模型将为项目利益相关方提供一种方案评选参考方法。

关键词：公路工程；价值工程；风险；进度；方案优选

1 引言

价值工程（Value Engineering 简称 VE）是一种高效的管理技术，最初运用在美国的军事工业，并先在制造业中广泛应用，而后开始推行运用于工程行业，目标是以最优的寿命周期成本实现必要的功能或绩效，VE与工程项目管理有机结合，可以提高管理效率。工程设计阶段是公路工程投资控制的关键阶段，在该阶段运用价值工程理论对设计方案优化比选，可以有效实现投资的最优运用。在公路工程设计方案优选应用中，焦隆华、郑长安和段劲等将 VE 运用于路线方案、隔离设施和边坡防护方案比选中，都取得了较显著的经济效益。但运用于公路工程方案比选的 VE 普遍还是制造业中运用 VE 的基本结构，仅考虑以最优成本完成项目必要功能或绩效，这可能会忽略对工程项目

****

找出重点风险因素，并且可以根据风险分级结果为风险的预防和处理制定相应的对策措施。

（4）将 LECT 评价法应用于某高速 X 标段的施工现场，根据评价结果确定了边坡塌方、路面开裂、漏水、洞口失稳、突水涌泥、物体打击、触电为施工过程中重点风险因素。根据参数 T，从风险早期预警、风险应对态度和具体处理措施入手，制定了风险控制措施，对其进行重点防护，有效降低了施工风险，印证了该风险评价模型的可靠性。

参考文献：

[1] 吴忠广，王海燕，陶连金，等.高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J].中国安全科学学报，2014(12).

[2] 柳皎，李夕兵，宫凤强，等.基于安全学原理的大跨浅埋隧道施工风险辨识[J].地下空间与工程学报，2015(3).

[3] 刘保国，沈铭龙，马强.模糊网络分析法在公路山岭隧道施工风险分析中的应用[J].岩石力学与工程学报，2014(s1).

[4] Yu H，Yuan Y，Qiao Z，et al.Seismic Analysis of a Long Tunnel Based on Multi－Scale Method[J].Engineering Structures，2013，49(2)：572－587.

[5] 陈洁金，张永杰.下穿既有桥梁隧道施工风险定量评估方法[J].中南大学学报：自然科学版，2015(5)：1 862－1 868.

[6] 李鹏.山区高速公路建设安全评价方法研究[D].长安大学硕士学位论文，2013.

[7] 刘辉，孙世梅.基于改进 LEC 法的公路隧道施工安全评价研究[J].现代隧道技术，2015(1).

[8] 吉武军.大范围山区环境下高速公路施工风险控制研究[D].西南交通大学硕士学位论文，2013.

收稿日期：2018－10－18

作者简介：李珏，男，博士，副教授.E－mail：lij93@csust.edu.cn

方案同样重要的进度和风险。为了完善 VE 模型在工程项目中的应用，Lee 等.在绩效指标中考虑了进度因素；Pedju 等将风险管理技术集成于价值工程理论。参考相关的研究成果，该文在传统价值工程的基础上，集成进度指标和风险评价，建立改进的价值工程模型，并以公路工程软基处理设计案例进行实证优选分析，从而为项目利益相关方提供一种方案评选参考方法。

2 模型构建

按照中国国家标准 GB 8223－87《价值工程基本术语和一般工作程序》的定义，价值工程是“通过各相关领域的协作，对所研究对象的功能与费用进行系统分析，不断创新，旨在提高所研究对象价值的思想方法和管理技术。”VE 的目的就是以“对象的最低寿命周期成本，可靠地实现使用者所需功能，以获取最佳的综合效益。”基本原理如下：

$$\text{价值}=\frac{\text{功能}}{\text{全寿命周期成本}},\text{即 } V=\frac{F}{C} \tag{1}$$

传统价值工程被广泛应用于各行各业，通过技术与经济相结合，产生了显著的经济效益和社会效益。随着工程管理技术的发展，会对项目方案进行更综合的分析评价，如考虑项目的绩效、成本、进度和风险。而传统价值工程在公路工程方案优选中仅考虑最优成本和项目功能或绩效的关系，忽略了对工程项目同样重要的进度和风险，这样影响方案评价结果。考虑到传统 VE 缺陷，Lee 等曾提出在公路项目中用基于质量和安全、施工可行性、公众满意度、环境友好度、社会经济性、经营效率和项目管理等绩效指标为基准的价值工程方法来更全面地分析公路工程项目设计优选问题，其基本公式定义为 $V=P/C$。该文再引入进度因素和风险评价，形成改进的价值工程理论，并建立价值工程评价流程如图 1 所示。原理公式如下：

$$V=\frac{P\gamma_i}{\omega_1 C\gamma_j+\omega_2 S\gamma_k} \tag{2}$$

式中：V 为价值；P 为绩效；C 为成本；S 为计划进度；γ_i 、γ_j 、γ_k 分别为绩效、成本和进度的风险系数；ω_i 为成本和进度对应权重($i=1,2$)。

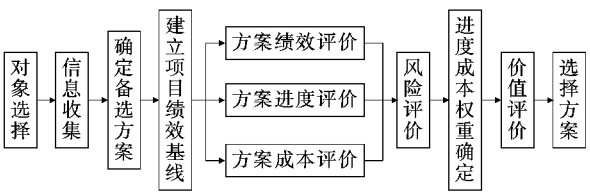

图 1 价值工程评价基本流程

3 模型计算

3.1 绩效指标确定及评价

笔者以公路工程边坡、路面和软基处理、方案评价、因素分析和优化设计等为关键词，在中国知网、万方和维普等学术网站检索到 2000—2017 年发表的相关文献 50 篇。在这些论文中，记录了公路工程优化设计方案比选影响因素和其相应的频率，如表 1 所示。

表 1 公路工程优化设计方案比选因素频率

影响因素	频率/篇	影响因素	频率/篇
工程造价	50	工期	50
环境影响	35	技术可行性与可靠性	33
施工技术难度	33	效果预测	27
维护运行费	18	稳定安全系数	14
资源消耗	14	同类工程经验成熟性	11

由表 1 可知：有 10 个影响因素出现的频率大于 10 篇，其中成本和进度是 50 篇文献中都考虑到的因素，其余的因素随着项目的不同会有所改变。传统 VE 考虑功能和成本之间的关系，它既忽略了表中其余关键影响因素，同时也影响了评价的科学性。为了更科学地优选设计方案和丰富价值工程指标体系，该文提取表中成本和进度为改进价值工程的子项，其余因素归纳为公路工程方案优选的可选绩效指标。

根据绩效指标具有多因素、多层次且某些性能指标难以量化的特点，该文选用层次分析法确定指标权重，模糊综合评价法确定方案价值。其基本过程是在问卷调查、专家访谈基础上对绩效因素进行两两比较，构建判断矩阵，然后对判断矩阵进行一致性检验，若满足要求即可确定因素权重 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}$；确定权重后设定绩效因素集合 $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$ 和评语集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}=\{$很好，较好，一般，较差，很差$\}$；再对单个绩效指标 $u_i(i=1,2,\cdots,m)$ 作单因素评价得到 u_i 的单因素评价集：$r_i=\{r_{i1},u_{i2},\cdots,u_{in}\}$；作 m 个绩效指标的评价得总的评价矩阵：

$$R=(r_{ij})_{m\times n}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix},\ \sum r_{ij}=1$$

最后根据式(3)进行模糊综合运算得出每个方案

的绩效评价值：

$$B_i = W \cdot R \cdot V^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

3.2　风险分析及评价

方案优选作为包含多个影响因素的复杂的系统工程，有其独特的特点，不仅要考虑质量、效益、环保和工期方面的目标，还要考虑复杂地质条件、天气灾害（如洪水和地震）等风险的影响，且各种风险事件发生具有不可预见性，一旦发生会直接引发人员财产损失，因此进行方案风险评估是非常必要的。受风险的影响，项目成本和进度估计值并不是一个确定值。它会随着风险是否发生和严重程度在一个范围内变化，而蒙特卡罗模拟就是对这种风险变化范围的分析，文中选用该方法进行改进价值工程的风险分析及评价。

蒙特卡罗模拟方法是一种基于“随机数”的计算方法，也被称为随机的或统计的计算机模拟。基于 Mircrosoft Excel 运用 Oracle Crystal Ball 软件分别对价值工程绩效、成本和进度进行蒙特卡罗模拟，在这过程中假定 3 个自变量服从三角分布，然后根据以往专业经验和计算确定成本和进度的最小值、最可能值和最大值，根据模糊综合评价法的最低分确定绩效最小值，平均分确定最可能值，最高分确定最大值，再运行模拟 20 000 次得到目标值的概率分布和数字特征，最后根据结果进行风险分析和评价。基本流程如图 2 所示。

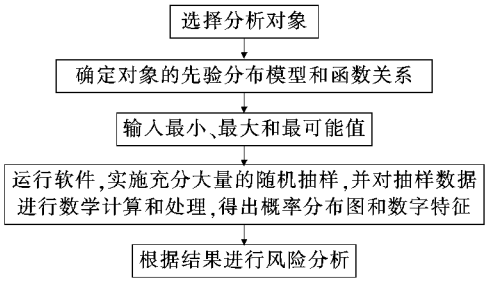

图 2　蒙特卡罗模拟分析流程

3.3　价值评价

价值评价是在绩效、成本、进度的风险评价基础上，按式(2)进行的一个系统综合评价。在评价前，需要根据项目利益相关方对实际项目成本和进度提出的要求确定其权重，再根据归一化后的绩效、成本、进度和风险评价的函数关系，经蒙特卡罗模拟得到每个拟选方案的价值系数的概率分布图和数字特征。通过对各方案价值系数的概率分布图的稳定情况衡量方案的整体价值，再由数字特征中的价值系数平均数、峰度和最小最大值选择最优方案。

4　案例分析

某高速公路软基路段处路堤高 5.2 m，路基顶宽 26 m，软基路段长 800 m。这些软基路段地势平坦，湖塘发育。其地层自上而下分别为：素填土、淤泥、黏土、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土和粉砂等。其中的淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土的厚度最大可达 15 m，呈流塑和软塑状态，含水量高、孔隙比大、强度很低，必须经过处理才能修筑路堤。根据该工程特点，拟采用碎石桩、塑料排水板、二灰桩及粉体搅拌桩方案进行处治，拟应用改进的价值工程理论对上述 4 种方案进行优选。

(1) 绩效指标选取及评价。由于维护运行费和稳定安全系数绩效指标一般在边坡防护工程中选用，且该案例拟采用的软基处理方案都是普通的软基处理方法，技术较成熟，一般不需考虑同类工程经验成熟性，故案例选取表 1 中除上述 3 个以外的绩效因素。

选取的表 1 中绩效因素有 F1：技术可靠性与可行性，F2：施工技术难度，F3：效果预测，F4：环境影响，F5 资源消耗。根据上述计算方法，通过基于 1～9 标度的问卷调查和结构化访谈得出层次分析法判断矩阵，并用方根法近似计算各指标，其结果如表 2 所示；再通过对从事高速公共管理与评价领域的 20 名专家进行调查，其中碎石桩方案调查结果如表 3 所示。

表 2　F1～F5 判断矩阵及权值

绩效因素	F1	F2	F3	F4	F5	W_i
F1	1	3	1/2	1	4	0.244 6
F2	1/3	1	1/3	1/3	2	0.101 6
F3	2	3	1	2	3	0.350 1
F4	1	3	1/2	1	3	0.231 0
F5	1/4	1/2	1/3	1/3	1	0.072 7

注：$\lambda_{max}=5.146\ 0$，$C.I.=0.036\ 5$，$R.I.=0.032\ 6<0.10$，满足一致性检验。

表 3　碎石桩方案专家定性评价结果

评价指标	评价尺度				
	很好	较好	一般	较差	很差
F1 技术可靠性与可行性	3	15	1	1	0
F2 施工技术难度	0	2	14	4	0
F3 效果预测	5	14	1	0	0
F4 环境影响	6	12	2	0	0
F5 资源消耗	0	0	6	13	1

根据式(3)和表 3 中归一化的数据可计算得出碎石桩方案的最可能绩效系数 B_1 为 0.675 4，其中 $V=\{0.9,0.7,0.5,0.3,0.1\}$，过程如下：

$$B_1=\begin{bmatrix}0.244\ 6\\0.101\ 6\\0.350\ 1\\0.231\ 0\\0.072\ 7\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}0.15&0.75&0.05&0&\\0&0.1&0.7&0.2&0\\0.25&0.7&0.05&0&0\\0.3&0.6&0.1&0&0\\0&0&0.3&0.65&0.05\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}0.9\\0.7\\0.5\\0.3\\0.1\end{bmatrix}=0.675\ 4$$

以评价结果的最差评价指标为自变量计算得碎石桩方案最小绩效系数为0.401 7；以评价结果最优评价指标为自变量计算得碎石桩方案最大绩效系数为0.850 6。同理计算得到其余方案相关绩效系数如表 4 所示。

表 4 拟选方案最小、最可能和最大绩效系数

方案	绩效系数		
	最小	最可能	最大
碎石桩	0.401 7	0.675 4	0.850 6
塑料排水板	0.500 0	0.810 8	0.885 5
二灰桩	0.170 0	0.357 8	0.570 0
粉体搅拌桩	0.416 2	0.689 4	0.801 7

(2) 成本、进度系数评价。根据专业特点、相关工程量和以往经验，可确定各方案的进度和成本系数如表 5 所示。

表 5 优选方案最小、最可能和最大成本和进度

拟选方案	成本最小值/万元	成本最可能值/万元	成本最大值/万元	进度最小值/d	进度最可能值/d	进度最大值/d
碎石桩	217.84	311.2	404.56	70	100	130
塑料排水板	40.46	57.8	75.14	245	350	455
二灰桩	179.34	256.2	333.06	63	90	117
粉体搅拌桩	174.30	249.0	323.70	56	80	104

(3) 风险分析。根据表 4、5 的绩效、成本和进度系数值，利用 Oracle Crystal Ball 软件分别进行蒙特卡罗模拟分析，得出各概率分布，为方便方案比较，将各系数归一化后在叠加图中呈现如图 3～5 所示，图中左纵坐标为 2 万次模拟试验中发生的概率值，右纵坐标为发生的频率，这里的频率刻度显示绘制的每个区间中的值数量，横坐标分别为绩效、成本和进度的归一化模拟预测值。

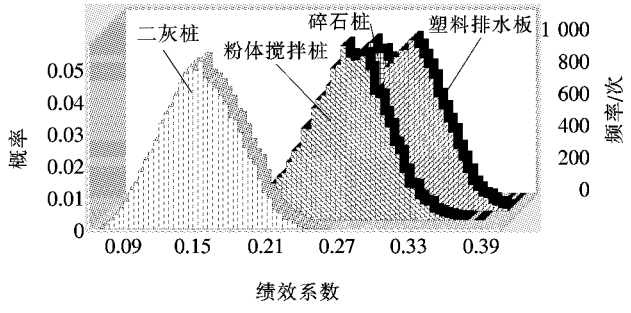

图 3 归一化后的各方案绩效系数

(4) 价值计算和选择方案。据有关专家确定该项目进度和成本的权重分别为 0.6 和 0.4。用绩效、成本

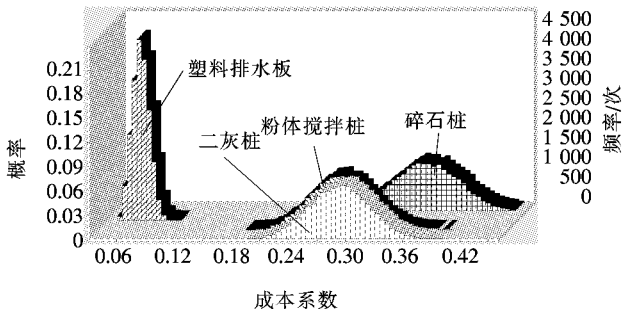

图 4 归一化后的各方案成本系数

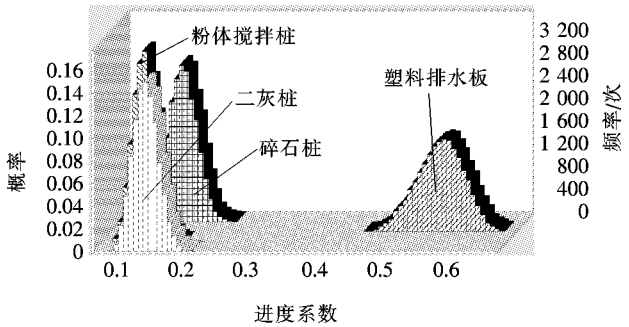

图 5 归一化后的各方案进度系数

和进度风险评价结果与式(2)进行模拟计算得到各方案的价值系数概率分布图和数字特征图如图 6、7 所示。从图 6 中可得粉体搅拌桩方案的价值系数分布相比其他方案总体要大，说明该方案整体优于其他方案。由图 7 可得：粉体搅拌桩方案的价值系数的平均值为 1.21，中间值峰度能达到 3.02，都大于其余方案。虽然其最小值为 0.71 小于塑料排水板的最小值 0.74，但其最大值为 1.95 却大于塑料排水板的最大值 1.78，且整体的价值系数分布大于塑料排水板方案，所以该工程应选择粉体搅拌桩为其软基处理方案。

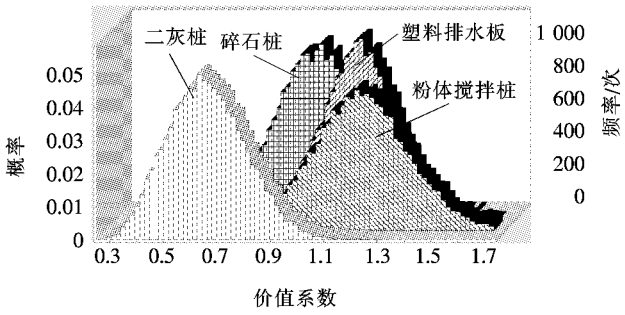

图 6　各方案价值系数概率分布图

图 7　各方案数字特征图

统计值	二灰桩 · 价值预测值	粉体搅拌桩 · 价值预测值	塑料排水板 · 价值预测值	碎石桩 · 价值预测值
试验次数	20,000	20,000	20,000	20,000
基本情况	0.6056	1.2267	1.2092	0.9506
平均值	0.6606	1.2126	1.1673	0.9775
中间值	0.6569	1.2079	1.1669	0.9718
模式	—	—	—	—
标准偏差	0.1437	0.1716	0.1339	0.1269
方差	0.0207	0.0294	0.0179	0.0161
偏斜度	0.1891	0.2233	0.0872	0.2650
峰度	2.76	3.02	2.95	3.01
变异系数	0.2176	0.1415	0.1147	0.1299
最小值	0.2861	0.7059	0.7444	0.5968
最大值	1.2207	1.9491	1.7814	1.5718
平均标准误差	0.0010	0.0012	0.0009	0.0009

5　结论

传统价值工程方法将经济与技术结合起来，致力于寻求价值的最大化，提高资源利用效率，是一种科学方法，但其运用到公路工程项目方案优选中时，仅考虑成本和功能，可能会导致结果偏差，影响评价的科学性。通过分析公路工程项目方案优选中的影响因素，在传统 VE 基础上，引入进度因素和风险评价，并以其他的影响因素为方案的可选绩效因素，建立改进的价值工程模型。该文也阐述了对于不同模型变量的计算方法，如对方案绩效采用模糊层次分析法；对风险在假设三角分布的基础上，用绩效、成本和进度的最小、最可能和最大值进行蒙特卡罗模拟分析(风险分析)确定价值系数。最后基于改进 VE 模型，对公路工程的软基处理方案进行设计方案实证分析和优选评价。改进的价值工程模型将为项目利益相关方提供一种方案评选参考方法。

参考文献：

[1] 伍湘琼.价值工程在工程项目管理中的应用[J].内蒙古科技与经济，2017(1).

[2] 焦隆华，侯云飞，吴卫，等.价值工程在龙永高速公路路线方案优选中的应用[J].湖南交通科技，2016(1).

[3] 郑长安，唐盛，姜华，等.价值工程在公路工程设计方案比选中的算法及应用[J].公路工程，2007(5).

[4] 段劲.基于 AHP 和熵的改进价值工程法在边坡防护方案中的应用[J].公路与汽运，2010(6).

[5] Lee，M.J.，Lim，J.K.，Hunter，G.，Performance－Based Value Engineering Application to Public Highway Construction[J].KSCE Journal of Civil Engineering，2010，14(3)：261－241.

[6] Pediu，M.J.，Mawu，M.，Considering the Integrated Value Engineering and Risk Management Techniquces During the Design Phase in Construction Project[J].Jurnalllmiah Media Engineering，2013，3(3)：214－226.

[7] 肖涛.基于集对分析湖相软基处理方案优选及风险评估[D].中南大学硕士学位论文，2012.

[8] 朱陆陆.蒙特卡洛方法及应用[D].华中师范大学硕士学位论文，2014.

[9] 陈向阳.高速公路软基处理方案智能决策模型研究[D].武汉理工大学硕士学位论文，2003.