

文章编号:1671-8879(2006)06-0069-04

# 高速公路建设项目可靠性后评估

陆 宁<sup>1</sup>, 李 莉<sup>2</sup>, 杨 睿<sup>2</sup>, 肖 燕<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 经济管理学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对当前中国高速公路建设项目评估工作的现状、存在的问题和高速公路建设项目后评估的重要性,依据可靠性工程原理,运用故障树(FTA)的方法,提出了高速公路建设项目可靠性后评估的指标体系。并给出了各指标的测度算法,进而运用最小割集法确定出全部最小割集,给出了可靠性后评估的可靠性概率组成函数和具体算法,依此构建了高速公路建设项目可靠性的后评估故障树模型。结果表明,该模型不仅能评估高速公路营运效能,而且对评估工作有积极推动作用。

**关键词:**交通工程;高速公路;建设项目;可靠性后评估;故障树;概率组成函数

**中图分类号:**U491.1 **文献标识码:**A

## Reliability past-evaluation to expressway construction projects

LU Ning<sup>1</sup>, LI Li<sup>2</sup>, YANG Rui<sup>2</sup>, XIAO Yan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To the present situation of the expressway construction projects evaluation, this paper proposed the importance of the reliability past-evaluation to the expressway construction projects, analyzed the problems existing in it at present. Based on the principle of reliability engineering and the thought of FTA, this paper established the target system and the measure algorithm of the reliability past-evaluation to the expressway construction projects, and produced minimal cut sets completely with the method of minimal cut sets, put forward the reliability past-evaluation composition function and the concrete algorithm, developed the model of the past-evaluation FTA to the expressway construction projects reliability. The results indicate that this model can accurately evaluate the operation of expressway. 1 tab, 1 fig, 9 refs.

**Key words:** traffic engineering; expressway; construction projects; reliability past-evaluation; FTA; dependability probability function

## 0 引 言

1988 年 10 月 31 日,全长 18.5 km 的上海—嘉定高速公路建成通车<sup>[1]</sup>,标志着中国高速公路通车里程实现了零的突破。自 1998 年国家加大了对交

通基础设施建设的投资力度以来,中国高速公路建设取得了举世瞩目的成就<sup>[2]</sup>,并为国民经济和区域经济的持续发展带来了巨大的效益。高速公路建设是关系到国计民生的重大问题,且投资巨大,因此不仅在投资建设前期要做详细的可行性论证,而且还

应进行后评估。

然而,人们普遍重视高速公路建设项目的前期可行性论证工作,而往往忽视了后评估工作。对此,有些学者曾进行了高速公路建设项目后评估的研究<sup>[3-6]</sup>,其绝大多数研究成果仅就其重要性或原则性进行阐述,难以运用于具体实践。为此,探寻一种可量化的、可操作的高速公路建设项目可靠性后评估模型具有积极的现实意义。

## 1 可靠性后评估模型

### 1.1 后评估指标体系及测度

高速公路建设项目可靠性后评估的指标(即底事件<sup>[7]</sup>)体系组成:收益不佳率( $x_1$ )、投资利润率变化过大率( $x_2$ )、成本过高率( $x_3$ )、交通噪声污染过大率( $x_4$ )、设施故障率( $x_5$ )、路面损坏率( $x_6$ )。

设投资营运年度为  $k_1$ ,后评估年度为  $k_2$ (其中  $k_1 \leq k_2$ ), $r_t$  为第  $t$  年的年利税总额, $w$  为投资总额, $c_t$  为第  $t$  年的年经营成本, $e_1$  为实际投资利润率, $e_2$  为预测投资利润率, $m_t$  为第  $t$  年的故障设施维修失败数, $y_t$  为第  $t$  年总设施数, $s_t$  为第  $t$  年受损路面面积, $n_t$  为第  $t$  年建成路面总面积, $L_{\text{DNP}}$  为从早 6 点到晚 10 点的噪声级<sup>[8]</sup>, $L_{\text{NNP}}$  为从晚 10 点到次日早 6 点的噪声级。则有

$$x_1 = 1 - e_1 = \left[ 1 - \frac{\sum_{t=k_1}^{k_2} r_t}{w} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{e_1 - e_2}{e_1} = \left[ \frac{\sum_{t=k_1}^{k_2} r_t}{we_2} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$x_3 = \left[ 1 - \frac{\sum_{t=k_1}^{k_2} r_t}{w + \sum_{t=k_1}^{k_2} c_t} \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$x_4 = \frac{10 \lg [2 \times 10^{0.1L_{\text{DNP}}/3 + 10^{0.1(L_{\text{DNP}}+10)}/3}] \times 100\%}{100} \quad (4)$$

$$x_5 = \frac{\sum_{t=k_1}^{k_2} m_t}{\sum_{t=k_1}^{k_2} y_t} \times 100\% \quad (5)$$

$$x_6 = \frac{\sum_{t=k_1}^{k_2} s_t}{\sum_{t=k_1}^{k_2} n_t} \times 100\% \quad (6)$$

### 1.2 后评估模型的建立

底事件是影响后评估最基本的事件。高速公路建设项目可靠性后评估,主要涉及收益不佳、投资利润率变化率过大、交通噪声污染率过大、设施故障率过大、路面损坏率过大等底事件,这些事件又可以归纳为财务问题和技术问题,即中间事件。因此,高速公路建设项目故障树后评估模型如图 1 所示。

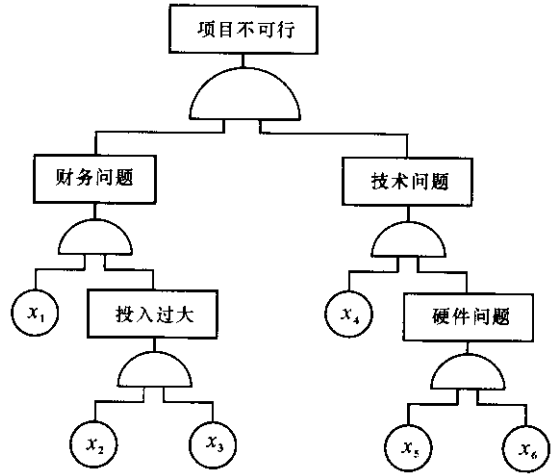


图 1 后评估模型

## 2 模型的定性分析

### 2.1 最小割集

求最小割集最基本的方法是上行法和下行法<sup>[9]</sup>。在此采用上行法,其基本方法是:对每一个输出事件而言,若是或门输出,则用该或门的诸输出事件的布尔和表示此输出事件;若是与门输出,则用该与门的诸输入事件的布尔积表示此输出事件。

上行法的工作步骤:从底事件开始,由下而上逐个进行处理,直至所有的结果事件都被处理完为止,这样可以得到一个顶事件的布尔表达式。根据布尔代数运算法则,将顶事件化成诸底事件的积的和的最简式,此最简式的每一项所包含的底事件集即为一个最小割集,从而求出故障树全部最小割集。

### 2.2 定性分析的结果

定性分析的任务就是找出故障树的全部最小割集,以此反映系统的全部故障模式,进而可以找出系统的薄弱环节,提高系统的安全性。本模型中的全部最小割集有: $L_1 = \{x_1, x_4\}$ ;  $L_2 = \{x_2, x_4\}$ ;  $L_3 = \{x_3, x_4\}$ ;  $L_4 = \{x_1, x_5, x_6\}$ ;  $L_5 = \{x_2, x_5, x_6\}$ ;  $L_6 = \{x_3, x_5, x_6\}$ 。

当这 6 组最小割集的任何一个发生时,顶事件必然发生,这有助于分析决策失误的原因,为预防决策失误提供了全面可靠的信息,并可根据这些信息

采取有效的预防措施,达到杜绝或降低决策失误可能发生的目的。

### 3 模型的定量分析

#### 3.1 故障树概率组成函数的确定

在故障树中,不论是顶事件、底事件还是中间事件都是故障事件。用“1”表示事件发生,用“0”表示事件不发生。

设底事件  $x_i$  发生的概率是  $p_i$ ,不发生的概率是  $q_i=1-p_i$ ,则

$$\begin{aligned}p_i &= p \left( x_i = 1 \right) \\q_i &= p \left( x_i = 0 \right)\end{aligned}$$

同样,设顶事件发生的概率是  $p$ ,不发生的概率是  $q=1-p$ ,则

$$\begin{aligned}p &= p \left( \varphi = 1 \right) \\q &= p \left( \varphi = 0 \right)\end{aligned}$$

显然,如果令  $p=(p_1,p_2,\cdots,p_n)$ , $n$  为底事件的总数,并设诸底事件是相互独立的,则有: $\varphi(p_1,p_2,\cdots,p_n)=\varphi(p)$ 即为故障树的概率组成函数。

#### 3.2 模型的求解

在一个有  $m$  个最小割集的故障树中,设  $N_1$  为这些最小割集出现的概率之和, $N_2$  为这些最小割集两两出现的概率之和, $N_3$  为这些概率三三出现的概率之和,……,直至  $N_m$ 。按照概率法则,顶事件出现故障的概率为  $\varphi(p)=N_1-N_2+N_3-N_4+\cdots+(-1)^{m-1}N_m$ ,则可靠性概率组成函数为

$$\varphi'(p)=1-\varphi(p) \tag{7}$$

本模型顶事件出现故障的概率为

$$\varphi(p)=N_1-N_2+N_3-N_4+N_5-N_6 \tag{8}$$

其中, $N_1$  为  $L_1,L_2,L_3,L_4,L_5,L_6$  同时出现的概率之和,即

$$\begin{aligned}N_1 &= p_1 p_4 + p_2 p_4 + p_3 p_4 + p_1 p_5 p_6 + \\&\quad p_2 p_5 p_6 + p_4 p_5 p_6\end{aligned} \tag{9}$$

最小割集两两出现的概率计算式为

$L_1,L_2$  同时出现,即  $x_1,x_2,x_4$  同时出现,故概率为  $p_1 p_2 p_4$ ,所以  $L_1,L_2$  同时出现的概率  $P_{L_1 L_2}=p_1 p_2 p_4$ 。同理可以得  $P_{L_1 L_3}=p_1 p_3 p_4$ , $P_{L_1 L_4}=p_1 p_4 p_5 p_6$ , $P_{L_1 L_5}=p_1 p_2 p_4 p_5 p_6$ …… $P_{L_5 L_6}=p_2 p_3 p_5 p_6$ 。所以  $N_2=P_{L_1 L_2}+P_{L_1 L_3}+P_{L_1 L_4}+\cdots+P_{L_5 L_6}$ ,即

$$\begin{aligned}N_2 &= p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4 + p_1 p_4 p_5 p_6 + \\&\quad p_2 p_4 p_5 p_6 + p_3 p_4 p_5 p_6 + p_1 p_2 p_5 p_6 + \\&\quad p_1 p_3 p_5 p_6 + p_2 p_3 p_5 p_6 + 2 p_1 p_2 p_4 p_5 p_6 + \\&\quad 2 p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 + 2 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6\end{aligned} \tag{10}$$

最小割集三三出现的概率计算式为

$$\begin{aligned}P_{L_1 L_2 L_3} &= p_1 p_2 p_3 p_4, P_{L_1 L_2 L_4} = p_1 p_2 p_4 p_5 p_6, \\P_{L_1 L_2 L_5} &= p_1 p_2 p_4 p_5 p_6 \cdots \cdots P_{L_4 L_5 L_6} = p_1 p_2 p_3 p_5 p_6。所以 \\N_3 &= P_{L_1 L_2 L_3} + P_{L_1 L_2 L_4} + P_{L_1 L_2 L_5} + \cdots + P_{L_4 L_5 L_6},即 \\N_3 &= p_1 p_2 p_3 p_4 + 4 p_1 p_2 p_4 p_5 p_6 + 4 p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 + \\&\quad 4 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 + 7 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6\end{aligned} \tag{11}$$

同理

$$\begin{aligned}P_{L_1 L_2 L_3 L_4} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6, P_{L_1 L_2 L_3 L_5} = \\p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6, P_{L_1 L_2 L_3 L_6} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 \cdots \cdots \\P_{L_3 L_4 L_5 L_6} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6。即 \\N_4 &= p_1 p_2 p_4 p_5 p_6 + p_1 p_3 p_4 p_5 p_6 + \\&\quad p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 + 12 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}P_{L_1 L_2 L_3 L_4 L_5} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6, P_{L_1 L_2 L_3 L_4 L_6} = \\p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6, P_{L_1 L_2 L_3 L_5 L_6} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 \cdots \cdots \\P_{L_2 L_3 L_4 L_5 L_6} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6。即\end{aligned}$$

$$N_5 = 6 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 \tag{13}$$

$$N_6 = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 \tag{14}$$

将式(9)~式(14)代入式(8)可得到故障树的概率组成函数  $\varphi(p)$ ,将其结果代入式(7)便可得出高速公路建设项目的可靠性概率组成函数  $\varphi'(p)$ 。

### 4 高速公路建设后评估示例

设某高速公路投产营运年度为 2000 年,后评估年度为 2002 年,投资总额为 25 亿元,预测投资利润率为 67%, $L_{DNP}$  为 6, $L_{NNP}$  为 4。

2000~2002 年的经营成本  $c_t$ 、利税总额  $q_t$ 、故障设施维修失败数  $m_t$ 、总设施数  $y_t$ 、受损路面面积  $s_t$  及建成路面总面积  $n_t$ ,如表 1 所示。

表 1 2000~2002 年某高速公路相关指标

相关指标	2000 年	2001 年	2002 年
$c_t$ /亿元	1.3	1.2	1.1
$q_t$ /亿元	7.2	6.3	6.5
$m_t$ /台	7	6	7
$y_t$ /台	60	65	75
$s_t/10^3\text{ m}^2$	180	120	100
$n_t/10^3\text{ m}^2$	350	330	320

将已知条件代入式(1)~式(6)可得:

$x_1=x_2=0.2,x_3=x_4=0.3,x_5=0.1,x_6=0.4$ 。即收益不佳率为 0.2,投资利润率变化过大率为 0.2,成本过高与交通噪声污染过大率均为 0.3,设施故障率为 0.1,路面受损率为 0.4。将其分别代入式(9)~式(14),则

$$N_1=0.06+0.06+0.09+0.008+0.008+$$

$$0.012=0.238$$

$$N_2=0.012+0.036+0.004\ 8+0.005\ 2+0.004\ 8+0.000\ 96+0.001\ 44+$$

$$0.001\ 44=0.109\ 84$$

$$N_3=0.003\ 6+0.001\ 92+0.005\ 76+0.001\ 008=0.012\ 288$$

$$N_4=0.000\ 48+0.001\ 44+0.001\ 728=0.003\ 648$$

$$N_5=6\times 0.000\ 144=0.000\ 864$$

$$N_6=0.000\ 144$$

将以上结果代入式(8)得

$$\begin{aligned}\varphi(p) &= N_1 - N_2 + N_3 - N_4 + N_5 - N_6 = \\ &0.238 - 0.109\ 84 + 0.012\ 288 - \\ &0.003\ 648 + 0.000\ 864 - 0.000\ 144 = \\ &0.138\ 52\end{aligned}$$

将  $\varphi(p)$  的值代入式(7)得

$$\varphi'(p)=1-0.138\ 25=0.861\ 75$$

即该高速公路后评估的可靠性约为 86.18%。决策者可根据该数值,结合同类项目,确定该高速公路建设项目的营运效能,或者建议采取降低某些因素发生的概率,以提高其营运效益。

## 5 结 语

(1)构建的高速公路建设项目可靠性后评估模型,不仅能评价营运效能,而且对后评估工作具有积极推动作用。

(2)由于可靠性后评估模型的计算较为繁琐,在实际应用中可编制计算机软件。

(3)建议相关部门制定高速公路建设项目后评估的可靠性的标准值,以便模型的推广应用。

参考文献:

References:

[1] 陈 红,梁立杰,杨彩霞.可持续发展的公路建设生态观[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):69-71.

CHEN Hong, LIANG Li-jie, YANG Cai-xia. Ecological view of sustainable development highway construction[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 69-71.

[2] 徐海成.高速公路的产业属性及发展规律[J].交通运输工程学报,2002,2(3):85-89.

XU Hai-cheng. Industry property and development rules of highway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(3): 85-89.

[3] 李秀宏,余攀峰.对高速公路建设项目后评价问题的探讨[J].交通标准化,2004,32(7):66-69.

LI Xiu-hong, YU Pan-feng. Inquire into the construction project evaluation in expressway [J]. Transportation Standardization, 2004, 32(7): 66-69.

[4] 奚宽武,吕津燕.关于高速公路后评价的几个问题[J].交通科技与经济,2004,6(1):37-38.

XI Kuan-wu, LÜ Jin-yan. Some issues on post-evaluation for highway construction [J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2004, 6(1): 37-38.

[5] 奚宽武,陶 峰.高速公路建设项目后评价研究初探[J].交通科技,2003,29(4):101-103.

XI Kuan-wu, TAO Feng. A preliminary study on post-evaluation of highway construction projects [J]. Transportation Science and Technology, 2003, 29(4): 101-103.

[6] 周 伟,向前忠.公路网规划后评估的理论与方法[J].中国公路学报,2003,16(1):99-103.

ZHOU Wei, XIANG Qian-zhong. The highway network past-evaluation theory and method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 99-103.

[7] 贾玉双,史宪铭.基于故障树模型的系统可靠性分析与仿真[J].湘潭大学自然科学学报,2001,23(4):101-105.

JIA Yu-shuang, SHI Xian-ming. Analysis and simulation on reliability based on fault tree model [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2001, 23(4): 101-105.

[8] 韩善灵,朱 平,林忠钦.交通噪声综合影响指数及噪声控制研究[J].噪声与振动控制,2005,25(1):25-27.

HAN Shan-ling, ZHU Ping, LIN Zhong-qin. Reserch on traffic noise integrated impact index and traffic noise control [J]. Noise and Vibration Control, 2005, 25(1): 25-27.

[9] 聂廷哲,段常贵.天然气常输管道可靠性故障树模糊分析[J].油气储运,2003,22(6):44-46.

NIE Ting-zhe, DUAN Chang-gui. Natural gas pipeline systems design based on fuzzy decision [J]. OGST, 2003, 22(6): 44-46.