

文章编号: 1006-2106(2013)01-0120-05

# 铁路风险控制经济可行性评价计算方法研究<sup>\*</sup>

石京 李希林 谭金华<sup>\*\*</sup>

(清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 研究目的: 我国铁路受自然灾害的影响严重, 为防范自然灾害, 减小铁路风险, 需要建设防灾工程, 并在建设决策中进行经济可行性评价。

**研究结论:** 本文采用概率论的方法, 将风灾等具有季节性的铁路灾害发生的概率随时间变化的函数离散化, 从而可以在经济可行性评价中考虑灾害发生的季节性, 针对不同的具有季节性的灾害防灾工程进行评价。结果表明, 考虑灾害季节性的计算方法所得到的净现值和效益成本比更符合实际。因此, 考虑某些灾害发生具有季节性, 比假定灾害在一年中每个月发生的概率均等所得到的防灾工程经济可行性评价计算结果更科学。

**关键词:** 铁路; 风险; 防灾工程; 经济; 评价

**中图分类号:** U216.41 **文献标识码:** A

## Study on Economic Feasibility Evaluation for Railway's Risk Control

SHI Jing, LI Xi-lin, TAN Jin-hua

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract: Research purposes:** The railways in China are affected by natural disasters seriously. Thus it is necessary to do the disaster prevention engineering in order to prevent the natural disasters and reduce the risk of railway. It is also necessary to evaluate the economic feasibility for the decision-making of the disaster prevention engineering.

**Research conclusions:** The discretization of probability function varying with time and relating to seasonal disaster to the railway is conducted with the probability theory to consider the seasonality in the economic evaluation of the various seasonal disaster prevention engineerings. The result shows that the ratio of the net present value and benefit-cost is more realistic on consideration of the seasonal factor. Therefore, considering the seasonal factor is better than assuming the uniform occurrence of disasters, and its calculation result for evaluating the economic feasibility of railway's seasonal disaster prevention engineering is more scientific.

**Key words:** railway; risk; disaster prevention engineering; economy; evaluation

我国地域十分辽阔, 地形和气候条件多种多样, 很大一部分铁路建在山区, 受到地质灾害的严重威胁。此外, 不少铁路还分布在沙漠地带和多风、多雨、多雪、多雾、严寒、沙尘暴等恶劣的气候条件下, 形成了很多对行车不利的因素, 潜在风险很大, 严重影响了铁路运输系统的可靠性, 威胁着铁路行车的安全。

为防范自然灾害, 减小铁路风险, 需要进行风险管

理, 建设防灾工程。在这类工程的建设决策中, 经济可行性评价必不可少。

防灾工程的经济效益主要体现在减少损失和增加收益两个方面。一些工程通过降低风险减少了灾害可能造成的损失, 间接地创造了效益, 称为减少损失型; 另一些工程在保持原有风险度不变的前提下提高了铁路运输能力, 增加了运输收益, 称为增加收益型。比如

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-09-21

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 石京, 1962年出生, 男, 教授。

为防范泥石流而建设的防护墙就属于前一种情况。为防范风灾而建设的挡风墙则属于后一种情况。挡风墙降低了线路上一定高度范围内的风速,使得风对列车运行的影响大大减小。这样一来,当风灾发生时,原本需要减速甚至停驶的列车可以维持原速度行驶,相当于提高了铁路的通行能力。本文针对减少损失型进行讨论。

## 1 计算方法研究

对于减少损失型的防灾工程,现金流如图1所示。图1(a)反映的是建设防灾工程前的现金流。在时刻 $T_1'$ 、 $T_2'$ 、 $T_3'$ 、 $T_1$ 和 $T_2$ 分别发生灾害,其中在时刻 $T_1$ 和 $T_2$ 发生的灾害所造成的损失为 $X$ 。建设防灾工程后,现金流可归纳如图1(b)所示。 $X_1(t)$ 为防灾工程的建设和维护投资, $X_2(t)$ 为防灾工程产生的直接经济效益,比如为防止铁路水害而建设的水利工程还可以发电、灌溉等。在时刻 $T_1$ 以前,灾害未发生或发生灾害的规模没有超过防灾工程的设防等级。对于损失减少型防灾工程来说,未超过设防等级的灾害可认为被工程完全防住,即没有给承灾体造成损失。在时刻 $T_1$ 发生超过设防等级的大灾害,防灾工程被完全破坏,总共造成的损失(包括防灾工程的价值)为 $X'$ 。以后的现金流重复时刻 $T_1$ 以前的现金流。建设一破坏一再建设,如此循环往复。防灾工程的经济效益在于免除了未超过设防等级的小灾害所造成的损失,以及减少了超过设防等级的大灾害所造成的损失(由 $X$ 降为 $X'$ ),代价为建设维护投资( $X_1(t)$ 与 $X_2(t)$ 之差)。

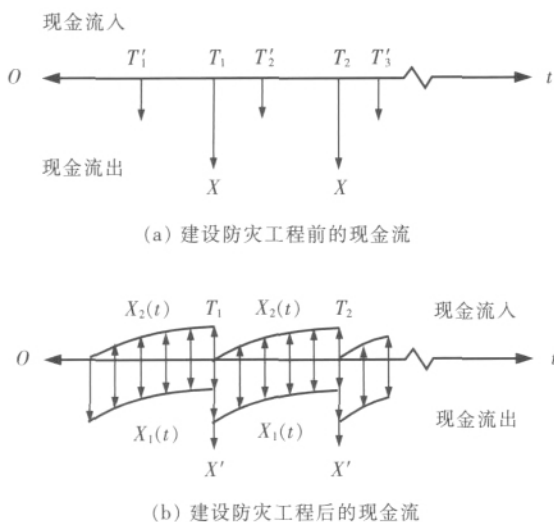


图1 减少损失型现金流量图

在已有对建设防灾工程后的现金流进行折现的数学方法的基础上,本研究由灾害发生的概率随时间变化的函数 $R(t)$ 计算灾害首次发生的时刻 $T$ 的概率分

布函数 $F(t)$ 。在某一足够短的时间段 $\Delta t$ 内,灾害发生的次数可以假定服从泊松分布。灾害不发生的概率 $p(k=0) = \exp(-\lambda)$ ,其中 $\lambda$ 为在该时段内灾害发生的平均次数,可认为 $\lambda = R(t) \Delta t$ 。把0时刻到 $T$ 时刻的时间段分成长度为 $\Delta t$ 的 $n$ 个小段,则在 $T$ 时刻首次发生灾害的概率:

$$p(T=t) = R(t) \exp \left[ - \int_0^t R(t) dt \right] \quad (1)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \int_0^t R(t) dt \right] \quad (2)$$

考虑防灾工程的效用随役龄增加而衰减, $R(t)$ 在整个防灾工程的寿命期内应当是变化的,为简化起见, $R(t)$ 采用线性函数(图2):

$$R(t) = (1-\alpha)R_0 + \frac{\alpha R_0}{N}t \quad (3)$$

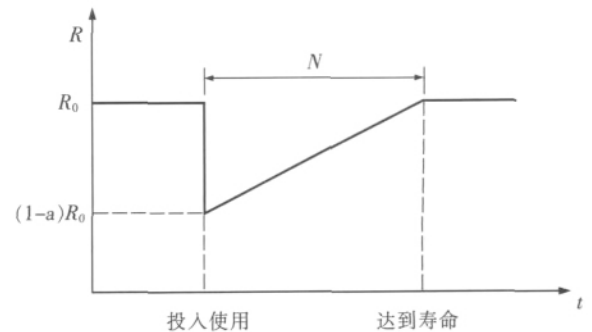


图2  $R(t)$  函数图像

式中  $R_0$ ——防灾工程建设前的灾害发生概率;  
 $\alpha$ ——防护率,反映防灾工程的防护能力,若防灾工程能够防住可能发生的所有灾害,则 $\alpha$ 取1,若能减少一半的灾害损失, $\alpha$ 取0.5,依次类推;  
 $N$ ——防灾工程的使用寿命。

考虑到灾害的发生具有季节性,即一般仅在一年的特定时间段发生。这样一来, $R(t)$ 就不再是连续的函数(图3),上述方法就不能使用。这时可以忽略灾害在同一年内的这个时间段内多次发生的可能性。设灾害在第 $i$ 年发生的概率为 $p_i$ ,把上述计算方法离散化。

设 $x_i$ 为某防灾工程在第 $i$ 年的投资额(假设集中发生在该年年末), $r$ 为年名义利率。又设灾害首次发生在第 $n$ 年,并且随机变量 $n$ 的概率分布列为 $p(n)$ 。整个投资过程中所有防灾投资的折现值:

$$Y = Y' = \frac{A}{B} \quad (4)$$

$$A = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \exp(-ri) x_i p(n)$$

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} [1 - \exp(-rn)] p(n)$$

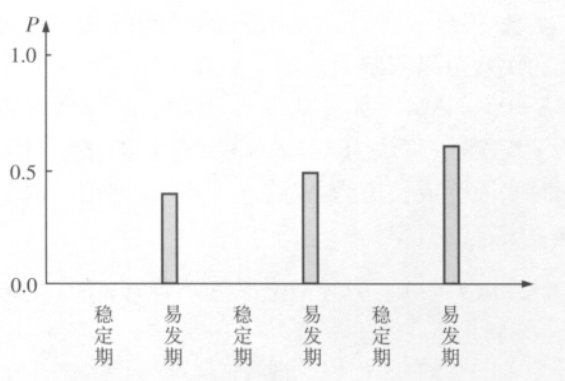


图3 季节性灾害风险度示意图

整个投资过程中所有灾害损失(直接经济损失,并假设集中发生在该年年末)的折现值:

$$S = S' = \frac{D}{B} \quad (5)$$

$$D = L \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-rn) p(n)$$

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} [1 - \exp(-rn)] p(n)$$

$$R(t) = \begin{cases} (1-\alpha)R_0 + \frac{\alpha R_0}{N}t & t \in [t_s + i - 1, t_e + i - 1] (i = 1, 2, \dots, N) \\ 0 & t \text{ 取其他值时} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $R_0$ 、 $\alpha$ 、 $N$  的意义同前。 $t_s, t_e \in [0, 1]$  为每年灾害易发期的起止时刻。在每一年中的灾害易发期内  $R(t)$  是连续的。设与第  $i$  年对应的连续的一段  $R(t)$  函数为  $R_i(t)$  则

$$R_i(t) = [(1-\alpha)R_0 + \frac{\alpha R_0}{N}(t_s + i - 1)] + \frac{\alpha R_0}{N}t \quad t \in [t_s + i - 1, t_e + i - 1] \quad (9)$$

由于  $R(t)$  在这个区间内是连续的,所以式(2)仍然有效。灾害在第  $i$  年发生的概率

$$p_i = 1 - \exp\left[-\int_0^{t_e - t_s} R_i(t) dt\right] \quad (10)$$

其中,  $\int_0^{t_e - t_s} R_i(t) dt$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{t_e - t_s} \left\{ \left[ (1-\alpha)R_0 + \frac{\alpha R_0}{N}(t_s + i - 1) \right] + \frac{\alpha R_0}{N}t \right\} dt \\ &= \left[ (1-\alpha)R_0 + \frac{\alpha R_0}{N}(t_s + i - 1) \right] (t_e - t_s) + \\ &\quad \frac{\alpha R_0}{2N} (t_e - t_s)^2 = (1-\alpha)R_0(t_e - t_s) + \\ &\quad (t_e - t_s)(t_e + t_s - 2) \frac{\alpha R_0}{2N} + (t_e - t_s) \frac{\alpha R_0}{N} i \end{aligned} \quad (11)$$

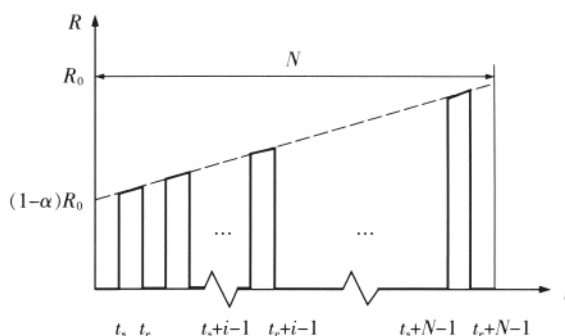
当  $F(t)$  接近 1 (这里取 0.95) 时,即超过防灾设防等级的灾害必定发生,可认为防灾工程到期。由式(7)、式(10)和式(11)联立计算得工程寿命  $N$  为:

显然首次灾害发生年数  $n$  服从几何分布,有:

$$p(n) = p_n \prod_{i=1}^{n-1} (1 - p_i) \quad (6)$$

$$F(n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (7)$$

如上所述,其中  $p_i$  为灾害在第  $i$  年发生的概率,下面由  $R(t)$  计算  $p_i$ 。 $R(t)$  仍然采用与上面相同的线性函数,只不过将稳定期内的函数值归零(图4)。

图4  $R(t)$  函数图像

$$N = -\frac{\ln 0.05 + 0.5(t_e - t_s)(t_e + t_s - 1)\alpha R_0}{(t_e - t_s)R_0(1 - 0.5\alpha)} \quad (12)$$

## 2 算例

下面以一例来说明铁路季节性灾害防灾工程经济可行性评价计算的具体方法。

设有一段铁路线,某种灾害的风险度为 0.8。现考虑建设一防灾工程,可防住已发生的一半灾害。灾害仅发生在每年的 6、7、8 月份。防灾工程建设一次性投资 500 万元,每年另有维护费 10 万元。未建设防灾工程时,若灾害发生,所造成的平均损失为 1000 万元。建设防灾工程后,若超过设防等级的灾害发生,所造成的损失为 500 万元。假定折现率  $r = 0.1$ 。

### 2.1 防灾工程的建设维护投资

建设防灾工程后,由式(12)防灾工程的寿命为:

$$N = -\frac{\ln 0.05 + 0.5(8/12 - 5/12)(8/12 + 5/12 - 1) \times 0.5 \times 0.8}{(8/12 - 5/12) \times 0.8 \times (1 - 0.5 \times 0.5)} = 20 \text{ 年}$$

风险度函数(即超过防灾工程设防等级的灾害的发生概率)为:

$$R_i(t) = 0.02i + 0.388 + 0.02t \quad t \in \left[\frac{5}{12} + i - 1, \right.$$

$$\frac{8}{12} + i - 1]$$

由式(6)和式(10),灾害在第*i*年发生的概率 $p_i$

以及首次灾害发生年数*n*的概率分布 $p(n)$ 分别如表1所示。

表1 不同*i*值对应的 $p_i$ 和 $p(n)$

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$p_i$	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18
$p(n)$	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01

防灾工程首次建设投资直接计入净现值,重建投资计入灾害损失。维护费每年10万元,有:

$$A = 10 \sum_{n=1}^{20} \sum_{i=1}^n \exp(-0.1i) p(n) = 41 \text{ 万元}$$

$$B = \sum_{n=1}^{20} [1 - \exp(-0.1n)] p(n) = 0.4343$$

$$Y = \frac{A}{B} + 500 = \frac{41}{0.4343} + 500 = 594.4 \text{ 万元}$$

## 2.2 灾害损失

建设防灾工程后,将防灾工程的重建投资计入灾害损失,有:

$$D = 1000 \sum_{n=1}^{20} \exp(-0.1n) p(n) = 516 \text{ 万元}$$

$$B = \sum_{n=1}^{20} [1 - \exp(-0.1n)] p(n) = 0.4343$$

$$S = \frac{D}{B} = \frac{516}{0.4343} = 1188.12 \text{ 万元}$$

未建设防灾工程时:

$$p_i = 1 - \exp\left[0.8\left(\frac{5}{12} - \frac{8}{12}\right)\right] = 0.18$$

$$D' = 1000 \sum_{n=1}^{20} \exp(-0.1n) p(n) = 630 \text{ 万元}$$

$$B' = \sum_{n=1}^{20} [1 - \exp(-0.1n)] p(n) = 0.3515$$

$$S' = \frac{D'}{B'} = \frac{630}{0.3515} = 1792.32 \text{ 万元}$$

## 2.3 经济评价指标

净现值  $NPV = S' - S - Y = 1792.32 - 1188.12 - 594.4 = 9.8$  万元

效益成本比  $B/C = (1792.32 - 594.4) / 1188.12 = 1.01$

## 3 结论

由于某些自然灾害的发生具有季节特点,如暴雨、雪灾等,如果不考虑季节性,即假定灾害在全年每个月发生的概率均等,则一方面不符合这些灾害发生的实际情况,另一方面,也会导致计算结果不科学,当然,以此为基础所进行的经济可行性评价缺乏可信度。本研究采用概率论的方法,将具有季节性的铁路灾害发生

的概率随时间变化的函数离散化,从而可以在经济可行性评价中考虑灾害发生的季节性,针对不同的具有季节性的灾害防灾工程进行评价,得到更符合实际的净现值和效益成本比。

## 参考文献:

- [1] 罗云,陈龙桂,陆愈实,等. 防灾工程的价值及效益分析——灾害经济特性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1991(4):66-72.  
Luo Yun, Chen Longgui, Lu Yushi, etc. The Analysis of Value and Efficiency Concerning Preventing Project of Disasters [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1991(4):66-72.
- [2] 王海滋,沈荣芳. 论防灾工程投资经济效益评价的一般方法[J]. 自然灾害学报,1995(2):14-19.  
Wang Haizi, Shen Rongfang. General Methods of Economic Results Evaluation in Disaster Resistant Engineering Investment [J]. Journal of Natural Disasters, 1995(2):14-19.
- [3] 王海滋,沈荣芳. 防灾工程投资减灾效益的动态评价[J]. 同济大学学报,1996(1):66-69.  
Wang Haizi, Shen Rongfang. Dynamic Evaluation of Economic Results of Disaster Resistant Engineering Investment [J]. Journal of Tongji University, 1996(1):66-69.
- [4] 张于心,邢俊义,高巍. 铁路自然灾害宏观预警实现的方法和途径[J]. 北京交通大学学报,1999(3):73-76.  
Zhang Yuxin, Xing Junyi, Gao Wei. Approach of the Macro Precaution on Railway Natural Disaster [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 1999(3):73-76.
- [5] 付龙海. 青藏铁路输变电系统防雷及接地技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.  
Fu Longhai. Research on Lightning Protection and Grounding Technique in Qinghai-Tibet Railway Transmission Line and Substation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [6] 俞平. 铁路行车安全事故分析及对策研究[D]. 成都:

西南交通大学 2002.

Yu Ping. The Analysis of Traffic Accidents and Studies on Railway Transportation Measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University ,2002.

[7] 李晓慧. 宝成铁路凤县段地质灾害危险性评价 [D]. 北京: 中国地质大学 2010.

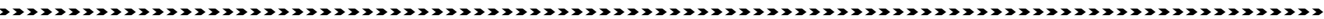
Li Xiaohui. Geological Hazard Risk Assessment of Bao – Cheng Railway in Fengxian Country [D]. Beijing: China University of Geosciences ,2010.

[8] 张志乔. 铁路交通灾害的致灾风险与预警管理系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学 2003.

Zhang Zhiqiao. The Studies on the Risk of Railway Transportation Disaster and Forewarning Management System [D]. Wuhan : Wuhan University of Technology , 2003.

[9] 黄建陵 杨丁颖. 铁路地质灾害防治工程经济效益分析方法研究 [J]. 铁道工程学报 2008( 11) : 99 – 103.

Huang Jianling , Yang Dingying. Research on the Analysis Method for Economic Benefit of Protection Engineering for Geological Disasters along Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society ,2008( 11) : 99 – 103.



( 上接第 65 页)

7 工程实例

昆明至河口铁路玉溪至蒙自段秀山隧道全长 10 302 m ,汉邑村隧道全长 6 700 m ,通过的白云岩地段占隧道总长的 80% 以上。白云岩的最大特点是破碎、富水 ,其中秀山隧道全隧日常涌水量为 15.5 万 m<sup>3</sup>/日 ,最大日涌水量为 23. 5 万 m<sup>3</sup>/日 ,局部地段有承压水 , IV、V 级围岩占隧道总长的 90% 以上 ,隧道在施工过程中 ,通过对施工方法的比选 ,优化了施工方案 ,2 个隧道均没有出现大的结构安全事故 ,且施工进度达到了比较理想的状态 ,过程成本也达到了有效控制。其施工进度和工程造价经统计和分析如表 2 所示。

表 2 施工进度和工程造价统计

方法 项目	方法一	方法二	方法三	方法四	方法五
月进度 /m	100 ~ 110	85 ~ 90	60 ~ 65	30	15
延米造价 /万元	3. 86	4. 13	4. 64	7. 5	11. 5

8 结论

从表 2 中可以看出 ,采用不同的施工方法 ,其施工进度和工程造价差异较大 ,因此 ,隧道在施工过程中应根据围岩的工程地质和水文地质情况加以认真分析 ,从而选定较为科学的施工方法 ,在保证结构安全的前提下 ,尽量优化施工方案 ,降低工程成本。该技术在玉

蒙铁路秀山隧道和汉邑村隧道施工过程中得到了较好的工程实践 ,可以在今后类似工程参考借鉴。但由于该施工技术受隧道工程地质和水文地质的差异性影响较大 ,还需要大量的类似工程实践来检验、完善。

参考文献:

[1] 铁道部第二勘察设计院. 新建铁路昆明至河口线玉溪至蒙自段通海( 现改为秀山) 隧道设计图 [Z]. 成都: 铁道部第二勘察设计院 ,2006.

China Railway Second Survey and Design Institute Group Ltd. Tonghai Tunnel Design Figure , Tonghai ( now Xiushan ) Tunnel of New Kunming ~ Hekou Railway Line [ Z ]. Chengdu: China Railway Second Survey and Design Institute Group Ltd 2006.

[2] TB 10204—2002 ,铁路隧道施工规范 [S].

TB 10204—2002 , Code for Construction on Tunnel of Railway [S].

[3] TB 10003—2005 ,铁路隧道设计规范 [S].

TB 10003—2005 , Code for Design on Tunnel of Railway [S].

[4] 杨仁春 ,李书静. 秀山隧道超前地质探孔技术研究 [J]. 铁道工程学报 2010( S) : 1 – 4 .

Yang Renchun , Li Shujing. Research on Geological Drilling Technology for Xiushan Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society ,2010( S) : 1 – 4.