

# 施工期水土流失估算及可靠性分析

苏 飞<sup>1</sup>, 胡嘉东<sup>2</sup>, 粟苏文<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市环保局, 广东 深圳 518032;  
3. 深圳市环境科学研究所, 广东 深圳 518001)

**摘 要:** 水土流失是生态环境建设的主要问题。对深圳市福田河综合整治工程施工期可能产生的水土流失量进行了估算, 并给出了可靠性估计, 提出了相应的水土保持措施。将随机可靠性作为水土流失评价的一个方面做了初步的探讨。

**关键词:** 施工期; 水土流失; 可靠性; 一次二阶矩法(AFOSM)

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2004)01—0020—04

中图分类号: S157

## Estimation of Soil and Water Loss and Reliability Analysis in Engineering Construction Period

SU Fei<sup>1</sup>, HU Jia-dong<sup>2</sup>, SU Su-wen<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Environment, H ehai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;  
2. Shenzhen Environmental Protection Bureau, Shenzhen 518033, Guangdong Province, China;  
3. Shenzhen Institute of Environmental Science, Shenzhen 518000, Guangdong Province, China)

**Abstract:** One major problem in re-establishing ecological system is soil and water loss. Through the project of comprehensive treatment of the Futian River of Shenzhen City, the quantity of soil and water loss caused during the engineering construction period is estimated, and the results of reliability and measurements of soil and water conservation are brought forward accordingly. As a primary point of discussion, the reliability analysis of water loss and soil erosion is probed as one aspect in environment evaluation.

**Keywords:** construction period; water loss and soil erosion; reliability index; AFOSM(advanced first order second moment)

福田河位于深圳市福田区中心, 水土流失每年将大量的泥沙带入福田河。由于河道纵坡较小, 水流速度慢, 导致泥沙淤积降低了河道行洪能力。城市建设中的福田河综合整治工程在施工过程中, 河床及山坡均处于裸露的状态, 在暴雨形成的地面径流作用下, 水流挟带着泥沙, 填埋或冲毁施工场地建筑, 甚至造成堤坡局部失稳、滑坡、塌方等事故。在工程施工期间, 工区内大面积开挖, 地表裸露, 对推土及施工沙石料等如处理不当, 遇上大雨则可能会发生严重的水土流失, 不仅会影响到附近的环境, 而且破坏了河道上游植被生态系统, 降低了上游山体的水源涵养能力, 加大了洪水的洪峰流量, 使洪涝灾害加剧。因此, 有必要对工程施工过程中的水土流失进行分析估算, 采取合适的水土保持措施, 以期最大限度地减少水土流失对生态环境的破坏作用。

## 1 水土流失量的估算

水土流失量估算涉及的因素众多、不确定性较强, 是一个综合气象、地貌等自然因子以及有人为参与的复杂过程, 而正确的估算又是水土流失评价的直接依据。美国农业部水土保持局通用土壤流失方程即 ULSE 模型是开发项目建设环境评价中经常采用的模型<sup>[1]</sup>, 其形式如下:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:  $A$ ——单位面积多年平均土壤流失量;  $R$ ——降雨侵蚀力因子;  $K$ ——土壤可蚀性因子;  $LS$ ——地形组合因子( $L$  坡长,  $S$  坡度);  $C$ ——植物覆盖因子(作物经营管理因子);  $P$ ——侵蚀控制措施因子。

### 1.1 参数选取

1.1.1  $R$  的计算 不同地区的降雨侵蚀力因子是

收稿日期: 2003-05-09

资助项目: 国家“十五”科技攻关项目“水安全保障技术研究—中国分区域生态用水标准研究”(2001BA610A-01)

作者简介: 苏飞(1974—), 男(汉族), 内蒙古人, 河海大学博士生, 主要研究水资源和环境保护。电话(010)68415522—3505, E-mail: iefus@sohu.com。

不同的, 并在同一地区具有随机性, 它对可靠性的估计有直接的影响。对于  $R$  的计算, 由于区域的不同而异, 如黑龙江省、滇东北地区、福建省等都有自己的经验估计式<sup>[2]</sup>。对于多年的平均降雨侵蚀力, 依据 Wischmeier 经验公式计算:

$$R = \prod_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.511g \frac{P_i^2}{P} - 0.8188)} \quad (2)$$

式中:  $P$ ——多年平均降雨;  $P_i$ ——月平均降雨。

取深圳市多年平均降雨计算, 其降雨侵蚀力因子  $R$  为 449.36。10 月至翌年 3 月间历年最大降雨过程  $R$  为 157.6, 4—6 月历年最大降雨过程  $R$  为 518.2, 7—9 月间历年台风影响最大降雨过程  $R$  为 752.4。

1.1.2  $K$  的计算 土壤可蚀性因子  $K$  与土壤组成、结构级配等性质有关。根据区域土壤特性, 查土壤可蚀性诺模图或由实测及经验法而得。由 Wischmeier 经验式:

$$100K = 2.1 \times 10^{-4} (12 - O_m) M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3) \quad (3)$$

式中:  $O_m$ ——有机质的百分比含量;  $S$ ——土壤结构指数;  $P$ ——透水性能指数;  $M$ ——粉沙和细沙的百分比含量。

工程所在区域的土壤为沙壤土, 有机质含量少于 5%, 结合地区土壤侵蚀图和试验, 取均值 0.14, 变异系数为 0.01。

1.1.3  $LS$  的计算 地形因子  $LS$  是地表径流长度与坡度的函数, 可用经验式计算:

$$LS = (L/22.1)^m \cdot (65.4I^2 + 4.56I + 0.065) \quad (4)$$

式中:  $L$ ——侵蚀坡面的坡长;  $I$ ——侵蚀坡面的坡度;  $m$ ——常数, 当  $I > 0.05$  时,  $m$  取 0.5; 取最大坡度  $I$  为 3%, 坡长  $L$  取 150 m, 则  $LS$  取 0.685。

1.1.4 植物覆盖因子  $C$  的计算 可由表 1 中选取, 覆盖率越大,  $C$  值越小。

表 1 植物覆盖因子					
地面覆盖率	20%	40%	60%	80%	100%
草 地	0.24	0.15	0.09	0.04	0.01
灌 木	0.22	0.14	0.09	0.04	0.01
乔灌木	0.20	0.11	0.06	0.03	0.01
茂密森林	0.08	0.06	0.02	0.00	0.00
裸 地	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

1.1.5  $P$  值的计算 侵蚀控制措施因子  $P$  由《深圳市福田河综合整治工程环境影响报告书(报批稿)》(深圳市环境科学研究所, 2002.9)中选取, 据是否采取防止水土流失的措施影响, 分几种典型情况取值。(1) 建设期施工时不采取任何防护措施时,  $P$  取 1.0;

(2) 设置挡沙墙时,  $P$  取 0.8; (3) 设置沉沙和拦沙坝时,  $P$  取 0.4。

## 1.2 USLE 方程的修正及计算

虽然水土流失方程形式简单, 但 USLE 这一经验方程在不同的地区必须经过修正检验后用于水土流失量的估算。对方程的修正大多数是针对降雨侵蚀力因子  $R$  和土壤可蚀性因子进行的, 本次经过讨论后进行了综合系数修正, USLE 方程为:

$$A = \alpha \times R \times K \times LS \times C \times P \quad (\alpha = 0.247) \quad (5)$$

工程水土流失区域主要包括施工场地、施工道路、滞洪区。在建设过程中, 由于大量的清淤、开挖、回填、及弃土、弃渣等, 不仅会影响到原有的植被, 而且会使原来相对稳定的下垫面受到不同程度的影响, 产生新的水土流失。

工程需整治的河长 5.05 km, 河道部分水土流失面积达  $9.82 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 主要为公共绿地; 滞洪区直接破坏水土保持面积达  $1.27 \times 10^5 \text{ m}^2$ , 主要为绿地和荔枝林。分有水土保持措施和不采取任何措施 2 种情况, 深圳市福田河综合整治工程水土流失量计算结果详见表 2。

表 2 水土流失量估算结果				
区域	时 段	无水保 措 施	有水保措施	
			挡沙墙	沉沙、拦沙坝
河道部分	10—翌年 3 月	366.592	70.386	1.613
	4—6 月	1205.381	231.433	5.304
	7—9 月	1750.152	336.029	7.700
	多年平均	1045.253	200.689	4.600
滞洪区	10—翌年 3 月	474.091	91.025	2.082
	4—6 月	1558.925	299.314	6.858
	7—9 月	2263.394	434.572	9.957
	多年平均	1351.804	259.546	5.944
多年平均合计		2397.057	460.235	10.544

在不采取任何措施, 多年平均降雨情况下, 河道部分水土流失量为 1045.253 t/a; 滞洪区水土流失量为 1351.804 t/a; 采取设置沉沙和拦沙坝水土保持措施时, 河道部分水土流失量为 4.60 t/a; 滞洪区水土流失量为 5.944 t/a; 采取设置挡沙墙水土保持措施时, 河道部分水土流失量为 200.689 t/a; 滞洪区水土流失量为 259.546 t/a。

计算结果表明, 在施工期采取水土保持措施条件下, 水土流失量与施工期没有任何植被和水土保持措施情况下相比, 水土流失量可以成倍减少; 计算结果也表明, 滞洪区在施工期的水土流失量最大, 开挖后如不及时清运会带来严重的水土流失。

从降雨侵蚀力因子  $R$  值的统计结果看,6—8 月的值最大,3 个月  $R$  值之和占年总值的 75% 以上,说明表土层只要不在这 3 个月内裸露,就可以减少水土流失量 3/4 以上。可见,不仅要选择施工期,而且在施工过程中,针对不同的季节采取相应的防护措施,对于防止水土流失就能获得较好的效果。因此,应尽量避开在 6—8 月施工,若确实不能避开时,应密切注意天气情况,避免在雨期施工。

## 2 可靠性分析

对估算的水土流失量进行可靠性分析时,首先要定义功能函数  $Z$ ,取  $Z = L - R$  的形式,采用改进的一次二阶矩法(AFOSM)进行计算<sup>[3]</sup>,给出可靠性指标  $\beta$ 。

### 2.1 AFOSM 简介

AFOSM (advanced first order second moment) 是相对于均值一次二阶矩法(MFSOM),通过在失效面(由  $Z = 0$  的点组成)上一个可能失效点,利用 Taylor 展开的方法将  $Z$  线性化,当各统计变量相互独立时,用在该失效点展开的 Taylor 级数来近似  $Z$  的数学期望和方差:

$$E(Z) = g(x^*) + \sum_{i=1}^n C_i(\bar{X}_i - x_i^*) = \sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*) \tag{6}$$

$$Var(Z) = \sum_{i=1}^n C_i^2 Var(x_i) \tag{7}$$

$$C_i = \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \tag{8}$$

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \alpha C_i \sigma_i \tag{9}$$

式中:  $\alpha$ ——敏感系数,  $\alpha = \frac{C_i \sigma_i}{\left[ \sum_{i=1}^n (C_i \sigma_i)^2 \right]^{1/2}}$  (10)

$$\beta = \frac{E(Z)}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*)}{\sum_{i=1}^n \alpha C_i \sigma_i} \tag{11}$$

式中:可靠性指标  $\beta$ ——从可靠性指标  $\beta$  的表达式中,得到  $n$  个方程组,即:

$$\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*) - \beta \sum_{i=1}^n \alpha \sigma_i = 0 \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^* - \beta \alpha \sigma_i) = 0 \tag{13}$$

对(13)式成立的一个充分条件是对所有的  $i$  均有  $\bar{x}_i - x_i^* - \beta \alpha \sigma_i = 0$  都成立,则:

$$x_i^* = \bar{x}_i - \beta \alpha \sigma_i \tag{14}$$

由上述  $n$  个方程再加上回归方程  $g(x^*) = 0$  就可以求得  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*, \beta$  这  $n+1$  个未知数,通常利用迭代法或简捷法求解<sup>[4]</sup>。

改进一次二阶矩法克服了系统必须为近似线性及均值附近展开的限制,且基本变量间相关程度不高时,对可靠性的估计影响不大。

对参数不确定性的处理,是在一定的目标函数条件下,分别求得各实测值的参数,得到各参数的均值和标准差,同时也可以率定出所有实测值总体的一组最优参数。对非线性模型来说,均值与最优参数值并不一定相等,但应该接近。应该指出,目标函数不同,得到的参数也不相同。

表 3 水土流失量估算的可靠性指标  $\beta$

区域	时 段	无水保 措 施	有水保措施	
			挡沙墙	沉沙和拦沙坝
河道 部分	10—翌年 3 月	- 26.425	- 19.773	- 0.698
	4—6 月	2.382	1.780	0.159
	7—9 月	6.008	5.576	0.712
	多年平均	0.596	- 0.037	- 0.025
滞洪 区	10—翌年 3 月	- 25.574	- 18.687	- 1.681
	4—6 月	1.845	1.771	0.382
	7—9 月	5.663	5.552	1.663
	多年平均	- 0.039	0.036	- 0.005

### 2.2 水土流失量估算的可靠性分析

由于 ULSE 方程受很多随机因素的影响,逐一进行参数的分布分析及相关性探讨需要做大量的工作。为说明这一方法的应用并且对上述估算结果作可靠性比较,分析中考虑降雨侵蚀力因子  $R$  和土壤可蚀性因子  $K$  随机因素对可靠性的影响,对河道允许水土流失量  $A_R$  及滞洪区允许水土流失量  $A_F$  的分布设以多年平均为基础的近似正态分布, $R$  和  $K$  的任意分布形式都可以转化为当量正态分布<sup>[4]</sup>,河道功能函数  $Z_R = 16.615 \cdot R \cdot K - A_R$ ,滞洪区功能函数  $Z_F = 21.488 \cdot R \cdot K - A_F$ ,将其它因子的随机性进行了简化,分析以上对应的措施情况。基于上述 AFOSM 方法,计算结果见表 3。

由表 3 分析可以知道,在多年平均情况下,河道部分在无水保措施时的可靠性指标较大,即  $\beta = 0.596$ ,相应的发生可能性为  $\Phi(0.596) = 72.4\%$  ( $\Phi$  为标准正态分布,下同)。在采取设置挡沙墙及设置沉沙和拦沙坝 2 种水保措施情况下,对应的可靠性分别为  $\Phi(-0.037) = 48.5\%$  和  $\Phi(-0.025) = 49.0\%$ ;滞洪区部分在多年平均情况下,各种情况的可靠性较为接近,分别为无水保措施时  $\Phi(0.036) = 51.4\%$ ,设置挡沙墙时  $\Phi(-0.039) = 48.4\%$ ,以及设置沉沙

和拦沙坝时  $\Phi(-0.005) = 49.8\%$ 。总体上, 在无水保措施情况下, 河道部分较滞洪区更易发生水土流失。而采取了水保措施后, 因人为因素干扰, 两分区域多年平均情况下发生的可能性较为接近。

在 10 月至翌年 3 月这一时段, 除河道部分采取设置沉沙和拦沙坝措施情况下相对较大, 为  $\Phi(-0.698) = 24.3\%$  之外, 在河道部分或滞洪区的其它情况, 不论采取何种措施, 相对于多年平均水土流失量来说, 水土流失发生的可能性很小, 几乎均接近于 0 [ $\Phi(\beta) = 0$ ]。这一时期属于枯水季节, 降雨少甚至不发生, 是有利于施工的时期。

在 7—9 月这一时段, 除河道部分采取设置沉沙和拦沙坝措施情况可靠性相对较小, 为  $\Phi(0.712) = 76.2\%$ , 其它情况几乎必然发生 [ $\Phi(\beta) = 1$ ]。这也从一个侧面说明发生水土流失的失事点应该在偏于极值处, 而不在均值处, 因为最大降雨多发生在 7—9 月, 应该避开在此期间施工。

相对于 7—9 月而言, 4—6 月这一时段采取设置沉沙和拦沙坝措施是降低水土流失发生可能性的有效措施, 在其它情况下, 水土流失发生的可能性极大, 均在  $\Phi(1.771) = 96.2\%$  以上, 因而, 若在 4—6 月施工, 设置沉沙和拦沙坝是非常必要的。

由以上分析可见, 可靠性指标计算结果与采取的措施有关。本文中采取设置挡沙墙估计的可靠性高于采取设置沉沙和拦沙坝, 在无人为干扰情况下比采取水保措施计算的可靠性高。同时表明可靠性指标最大最小均发生在河道部分, 从长期来看, 应将水保措施重点放在河道部分并设置沉沙和拦沙坝。

3 施工期水土保持措施

由于施工线路长, 呈线性开发, 水土流失分布不均, 河道两岸的水土流失直接威胁河道防洪安全及城市环境景观, 应选择合适施工期并采取相应措施, 尽量减少泥沙流失并对施工后的弃土做相应的处理。

3.1 充分利用枯季施工

福田河流域雨量主要集中在 4—10 月, 每年 11 月至翌年 3 月为枯水季节, 工程施工期共 10 个月, 安排在 2 个枯季施工, 不仅河水流量小, 方便河床内施工, 而且雨量少, 可以大幅度地减少水土流失量, 对做好水保工作十分有利。

3.2 挖方工程施工的水保措施

施工开挖中裸露地面, 在雨水和河水的冲蚀下, 极易产生水土流失, 因此, 需要采用以下的水保措施。

(1) 开挖前应做好施工围堰。因上游段流量小, 又受潮水影响, 应全断面截流; 下游段采用三向围堰

导流措施, 将河道施工分成左右两侧, 分期进行。这不仅保证施工不受河水影响, 方便施工, 且使可能因开挖裸露地面流失的泥土不致散落到其它地方。

(2) 开挖施工应分级进行, 开挖一级做好一级的防护, 再进行下一级开挖。这样不仅使下一级开挖施工不受上级水土流失的影响, 而且再次减少了因同期开挖裸露土地的面积。

(3) 在开挖施工之前应先做好河岸排水沟, 使河岸地面径流汇集于沟内, 不致于影响施工开挖场地; 同时少量的流失泥土亦可沉积于该沟内, 不致落入河床施工场地。

3.3 填方工程施工的水保措施

(1) 土方填筑时应边上料边碾压, 不让疏松土料上堤后搁置。碾压密实的土壤在水流作用下, 流失量远小于疏松土。

(2) 土方填筑完成后, 应随即进行衬砌或草皮护坡, 不让裸露面暴露久置。

3.4 弃土场的水保措施

工程设计河道部分, 开挖土方量为  $1.54 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 回填土方量为  $7.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 弃土外运  $7.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 旧砌体拆除外运  $2.69 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 清淤外运  $1.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滞洪区开挖土方量为  $3.69 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 回填土方量为  $3.07 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 弃土外运  $3.38 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 弃土、石渣及清淤总量  $4.52 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。这些弃土、石渣及淤泥必须妥善处理, 应在指定地点弃土, 并做好水保措施, 否则亦将形成新的水土流失。

4 结 论

(1) 利用 USLE 方程对深圳市福田河综合整治工程中施工期可能产生的水土流失量进行了估算, 结果表明, 在滞洪区的 7—9 月, 水土流失量从随机角度来说为年均的 1.6 倍左右, 施工应尽量避免在这一期间进行。在 4—6 月施工, 设置沉沙和拦沙坝是非常有效的措施之一。

(2) 对估算结果进行了可靠性分析, 相应地在河道部分 7—9 月估计的水土流失量的可靠性最高, 达 99% 以上, 可靠性最低的估算发生在河道部分 10 月至翌年 3 月, 几乎接近于 0。因而, 应该将水保措施重点放在河道部分并采取设置沉沙和拦沙坝措施。

(3) 水土流失方程中各因子对估算结果的影响不同, 特别是植被因子在不同水土保持措施的情况下取值, 对估算结果会出现量级上的差异, 对其所具有的功能不论在理论经验方程中, 还是在指导实践中, 都需深入探讨它的作用机制。

规范化提供了重要的技术保障; 可为陕西省土地管理部门提供参考、决策数据。

## 5 系统的实践应用

### 5.1 坡耕地信息的复合检索

本系统有 2 种方式实现基础数据的检索: 一种是从图形找属性; 另一种是由属性找图形。其中, 数图查询是一种重要的查询方法, 即可以根据属性进行任意复杂程度的逻辑查询, 并将查询结果以图形方式表示。例如, 对于检索条件为“农业人口大于  $1.00 \times 10^5$  人, 并  $15 \sim 25$  坡耕地面积大于  $6.67 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 地处海拔 400 m 以上的地区”, 可以在系统属性库中实行复合查询, 并在屏幕上显示满足以上条件的区域。

### 5.2 坡耕县三维建模

随着计算机技术的发展, 平面电子地图已经不能满足人们认识客观世界的需要, 地形的三维显示成为一种必然趋势。陕西省土地信息与全省 1:100 万 DEM 数据的复合可以更直观、更形象地反映地表起伏状况和土地信息的区位特征, 为今后进一步的深层次空间信息分析创造了条件。此外, 利用 DEM 绘制地面晕渲图也具有相当逼真的立体效果。

### 5.3 对高层次管理、决策的支持

根据国家的有关法令、法规以及已有的管理方法与模式, 建立实用的专家分析模型、规范化的管理模

型, 并在此基础上, 建立为省级国土资源部门服务的决策支持系统。

陕西省生态退耕县坡耕地信息系统建立, 是 GIS 在资源管理方面的一个应用实例, 并且形成了应用于专门领域的 GIS 工具, 不仅有效地实现了对全省各生态退耕县土地统计信息与图形信息的有效检索与空间分析, 还对有关管理部门为制定相关的政策法规提供重要的依据, 从而为陕西省国土资源的科学化、自动化、规范化管理创造了良好的条件, 为类似系统的制作提供了有益的借鉴, 也为其它领域建设 GIS 提供了参考。

#### [参 考 文 献]

[1] 孙玲. GIS 在土地管理中应用和研究的新方向[J]. 遥感技术与应用, 1996(4): 54—58.

[2] 邬伦. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[3] 毋河海. 地图数据库系统[M]. 北京: 测绘出版社, 1991.

[4] 毋河海, 龚健雅. 地理信息系统(GIS)空间数据结构与处理技术[M]. 北京: 测绘出版社, 1997.

[5] 陈俊, 宫鹏. 实用地理信息系统——成功地理信息系统的建设与管理[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[6] Adam Nabil R, Gangopadhyay Aryya. Database Issues in Information Systems [M]. Kluwer Academic Publishers, 1997.

(上接第 23 页)

(4) 试算表明, 土壤可蚀性因子的不同分布形式在较小的范围内变化时, 对可靠性估计的影响可以忽略, 总体反映出当离散程度增大时, 可靠性将以幂函数形式降低。

(5) 相应对策措施的采取依赖于水土流失量估算的准确性和可靠性。研制适合于地区的经验预报模型以及对众多影响因子的综合分析, 对此仍需要进一步进行试验和研究。

#### [参 考 文 献]

[1] 叶翠玲, 许兆义, 董瑞银, 等. USLE 用于估算工程建设项目水土流失量的讨论[J]. 中国水土保持, 2001(12): 29—30.

[2] 王美芝, 杨成永, 许兆义. 铁路建设环评中沿线水土流失的评价问题[J]. 铁道工程学报, 2001(4): 40—43.

[3] 洪昌华, 龚晓南. 相关情况下 Hasofer—Lind 可靠度指标的求解[J]. 岩土力学, 2000(1): 68—71.

[4] 杨伟军, 李桂青. 结构可靠度的一种简捷计算方法[J]. 长沙交通学院学报, 1999(3): 62—67.