

基于区间截断法的地下结构模糊能度可靠性模型研究

曹文贵, 张永杰

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 根据地下结构稳定性影响因素的随机性和模糊性特点, 首先, 引进三角模糊数理论, 建立地下结构物理力学参数的可能性分布函数, 然后, 在地下结构稳定性评价之模糊可靠性功能函数确定方法研究基础上, 引进区间截断法和区间数运算规则, 建立了功能函数值域区间的确定方法, 并避免了功能函数值域的扩展问题, 最后, 通过研究地下结构模糊能度可靠性度量方法, 建立了地下结构模糊可靠性指标的可能性分布曲线及其失效可能度的确定方法, 从而建立了地下结构模糊能度可靠性分析模型与方法。工程实例分析与计算结果表明了本文模型和方法的合理性与可行性。

关键词: 地下结构; 模糊能度; 可靠性; 三角模糊数; 区间截断法; 失效可能度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1455-05

作者简介: 曹文贵(1963-), 男, 湖南南县人, 湖南大学教授, 博士生导师, 从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: cwglyp@public.cs.hn.cn。

Study on reliability model of fuzzy probability of underground structure with interval-truncation approach

CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie

(Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the randomness and fuzziness of the factors which affected the stability of underground structure, firstly, by introducing the theory of triangular fuzzy number, the probability distribution function of physical and mechanical parameters of underground structure was established. Then, based on the studies on methods to decide the functional function of analysis of fuzzy reliability for underground structure, a method to determine the range interval of functional function was founded by introducing interval-truncation approach and rules of operation of interval numbers, and the interval expansion of functional function was avoided. Finally, through studying the method to measure fuzzy probability of reliability of underground structure, a method to determine the distribution curve on probability of fuzzy reliability index and the failure possibility of underground structure was developed, thereby. A model to analyze the reliability of fuzzy probability of underground structure was brought forward, and its rationality and feasibility were validated by the computation and analysis of a practical engineering project.

Key words: underground structure; fuzzy probability; reliability; triangular fuzzy number; interval-truncation approach; possibility of structure failure

0 引 言

在地下结构可靠性分析中, 围岩与支护结构物理力学参数不仅具有随机性, 而且具有模糊性, 理想的地下结构稳定性可靠性分析模型必须反映此特点。张清等^[1]、苏永华等^[2]考虑参数的随机性建立了地下结构概率统计可靠性分析模型。之后, 赵奎等^[3]、Sawyer J P 和 Raoss^[4]对这一方法进行了完善, 建立了模糊概率可靠性分析模型。这是一个有益的尝试, 但也存在诸多不足: 一则, 模糊概率可靠性模型只是在概率统计可靠性模型中考虑了物理力学参数的隶属度分布, 并且仍然采用概率统计的计算方法, 其实际为广义的

概率统计模型^[5]; 二则, 地下结构物理参数及稳定性的隶属度函数确定缺少统计数据, 主观性太大, 增加了分析结果误差; 再则, 分析结果仅给出失效概率, 信息量太少, 不能反映物理力学参数在各种不确定条件下的失效可能性。因此, 有必要对现有的地下结构可靠性分析方法进行改进, 建立能够反映围岩与支护结构物理力学参数随机性与模糊性的地下结构稳定性的可靠性分析模型, 这也正是本文研究的核心内容。

本文将在深入研究已有方法和工程特点的基础

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50378036); 湖南省自然科学基金资助项目 (03JJY5024)

收稿日期: 2006-08-28

上,首先,根据地下结构统计数据的随机性与模糊性,确定出表示物理力学参数取值变化的三角模糊数,即可能性分布,然后,由地下结构力学分析模型建立可靠性评价功能函数,引进区间截断法^[6]对某一截集水平下的参数区间值进行功能函数计算,最后,采用模糊能度可靠性分析方法^[7-8]得到地下结构模糊可靠性指标及其可能性分布,进而得到地下结构失效可能与不失效的必然度,至此,将建立基于区间截断法的地下结构稳定性的模糊能度可靠性分析模型,以期使地下结构可靠性分析结果更趋合理性。

1 基于区间截断法的地下结构模糊能度可靠性模型

对地下结构进行基于区间截断法的模糊能度可靠性分析,首先,必须确定地下结构物理力学参数的三角模糊数,即参数取值的可能性分布,然后,构建模糊可靠性功能函数,并避免区间数运算过程中的值域扩展问题,最后,针对功能函数值域区间,给出相应的模糊能度可靠性度量方法。上述即为地下结构稳定性模糊能度可靠性分析所要解决的关键问题,也是本文研究重点,针对具体实施方法,将分别予以阐述。

1.1 物理力学参数的三角模糊数确定方法

(1) 三角模糊数确定

影响地下结构稳定性的物理力学参数,如抗剪强度参数 c 与 φ 、抗拉强度 σ_t 、抗压强度 σ_c 等,同时具有变异性和界限的模糊性,可靠性分析时所采用的数据须能体现此特点^[9],为此,本文将采用三角模糊数来表示物理力学参数的可能性分布。为了便于展开研究,首先,对三角模糊数及相关定义做详细介绍,然后,给出物理力学参数三角模糊数的确定方法。若 $\tilde{A} = (a^L, a^M, a^R)$, 其中 $a^L \leq a^M \leq a^R$, 称 $\tilde{A}$ 为一个三角模糊数,如图1,其隶属函数可表示为

$$u_a(x) = \begin{cases} (x - a^L)/(a^M - a^L), & a^L \leq a^M, \\ (x - a^R)/(a^M - a^R), & a^M \leq a^R, \\ 0, & \text{其它。} \end{cases} \quad (1)$$

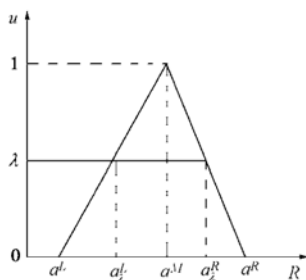


图1 三角模糊数

Fig. 1 Triangular fuzzy number

根据上述三角模糊数的定义及地下结构物理力学参数的统计数据,通过统计分析较容易确定取值范

围的上下界限值,此时,可以把上限值作为该参数三角模糊数的 a^R ,把下限值作为该参数三角模糊数的 a^L ,此外,还可以得到包含统计数据最多的某一个小区间(可取上下界限值的五分之一)内各个数据的平均值,令其为该参数三角模糊数的 a^M ,由图1及公式(1)可知,以上确定的3个值可以满足三角模糊数的表述形式,并且其确定方法体现了参数变异性和模糊性,因此,可以把岩体地下结构物理力学参数用三角模糊数来表示其可能性分布函数。

将上述确定的地下结构物理力学参数三角模糊数应用于实际工程分析必须通过截集理论将其转换为区间数,进而由区间数的运算规则进行计算。因此,需要确定物理力学参数三角模糊数计算截集水平。

(2) 三角模糊数截集水平的确定方法

地下结构物理力学参数的三角模糊数可以表示为图1所示,为了能够体现所有统计数据对计算分析结果的影响,反映不同截集水平地下结构的可靠性,根据模糊数截集水平定义,设 $A \in F(U)$, $\lambda \in [0, 1]$, 记

$$A_\lambda = \{u | u \in U, A(u) \geq \lambda\}, \quad (2)$$

称 $A_\lambda = [a_\lambda^L, a_\lambda^R]$ 为 $\tilde{A}$ 的一个 λ 截集, λ 称为阈值(或置信水平), $A(u)$ 称为 $\tilde{A}$ 的隶属函数(或称为 u 对 $\tilde{A}$ 的隶属度), A_λ 是由 U 中所有隶属度大于或等于 λ 的元素组成的集合。

本文将分别计算截集水平为 0.1, 0.2, ..., 0.9 时地下结构的可靠性指标,进而得到其可能性分布曲线。

1.2 地下结构功能函数确定与计算方法

运用物理力学参数对地下结构稳定性评价进行可靠性分析必须通过功能函数来实现。首先,设某一地下结构的岩体及支护结构模糊变量的向量集合为 $\tilde{X} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n)$, 则由失效准则确定的功能函数(极限状态方程)为

$$M = g(\tilde{X}) = g(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n), \quad (3)$$

式中, $g(\tilde{X})$ 为 $\tilde{X} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n)$ 的连续函数。

超曲面 $g(\tilde{X}) = 0$ (或称失效面)将地下结构的根本参量空间分为失效域 $\Omega_f = \{X : g(X) < 0\}$ 和安全域 $\Omega_s = \{X : g(X) > 0\}$ 。将功能函数转化成标准形式为

$$M(\lambda) = g(\tilde{X}) = G(\lambda, \delta), \quad (4)$$

式中, $M(\lambda)$ 为 λ 截集水平时的功能函数。由式(3)可知,对确定的截集水平 λ , 功能函数中的模糊变量可转化为区间变量。

对含区间变量的功能函数进行计算分析时,由区间数运算规则^[10]可知,当函数式中变量只出现一次时,值域区间即为函数值的真实区间,但是,当区间变量出现两次以上时,通过区间扩张分析后,其值域将超过真实区域,存在一个不为零的区间超宽度,此时计算函数值域界限的关键在于使区间超宽度任意小,可以通过构造适当区间的扩张形式满足这一要求。

在此, 本文引入改进区间截断法^[6]来确定区间变量的函数值域区间。

设 $A_{i\lambda} = [a_{i\lambda}^L, a_{i\lambda}^R]$ ($i=1, 2, \dots, n$) (n 为变量个数) 为输入模糊变量 $\tilde{A}_i$ 在 λ 截集水平时的区间值, $B_\lambda = [b_\lambda^L, b_\lambda^R]$ 为函数在 λ 截集水平时的值域区间, 由 $A_{i\lambda}$ 的中心值 $A_{i\lambda 0} = (a_{i\lambda}^L + a_{i\lambda}^R)/2$ 可求得相应的 B_λ 的中心值 $B_{\lambda 0}$, 当 $B_{\lambda 0}$ 接近于 0 时, 截断法失效, 而当 $B_{\lambda 0}$ 离 0 较远时, b_λ^L, b_λ^R 与其中心值 $B_{\lambda 0}$ 的相对偏差 Δ_1, Δ_2 的计算公式可表述如下:

$$\Delta_1 = |(b_\lambda^L - B_{\lambda 0}) / B_{\lambda 0}|, \quad (5)$$

$$\Delta_2 = |(b_\lambda^R - B_{\lambda 0}) / B_{\lambda 0}|, \quad (6)$$

总的相对偏差为 $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$, 对于保守设计总是希望 Δ 值大于真实值, 现假设函数值域区间的最大相对偏差为 $2t$, t 的值可选为所有输入区间变量相对其中心值偏差最大的值, 用截断区间 $[c_\lambda^L, c_\lambda^R]$ 来表示 B_λ 的最终取值区间, 具体取值如下:

a) 当 $\Delta_1 \leq t, \Delta_2 \leq t$ 时,

$$c_\lambda^L = b_\lambda^L, c_\lambda^R = b_\lambda^R; \quad (7)$$

b) 当 $\Delta_1 > t, \Delta_2 > t$ 时,

$$c_\lambda^L = B_0 + t(b_\lambda^L - B_0) / \Delta_1, \\ c_\lambda^R = B_0 + t(b_\lambda^R - B_0) / \Delta_1; \quad (8)$$

c) 当 $\Delta_1 \leq t, \Delta_2 > t$ 时,

$$c_\lambda^L = b_\lambda^L, c_\lambda^R = B_0 + t(b_\lambda^R - B_0) / \Delta_1; \quad (9)$$

d) 当 $\Delta_1 > t, \Delta_2 \leq t$ 时,

$$c_\lambda^L = B_0 + t(b_\lambda^L - B_0) / \Delta_1, c_\lambda^R = b_\lambda^R. \quad (10)$$

根据上述区间数运算规则及区间截断法进行地下结构稳定性评价之可靠性功能函数计算, 可以得到更加符合实际情况的函数值域区间, 也即提高了可靠性评价的准确性。对于得到的地下结构稳定性评价之可靠性功能函数值域区间, 如何对其进行可靠性度量成为模糊能度可靠性模型实施的关键。

1.3 地下结构模糊能度可靠性度量

对由区间数运算规则及区间截断法得到的地下结构功能函数值域区间, 可根据文献[8]的分析思想进行可靠性度量。在 λ 截集水平下, 功能函数标准形式为

$$M(\lambda) = g(\tilde{X}) = G(\lambda, \delta), \quad (11)$$

其相应的模糊可靠性指标定义为

$$\eta_{\lambda F} = \min(\|\delta\|_\infty), \quad (12)$$

须满足条件:

$$M = g(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n) = G(\delta_{1\lambda}, \delta_{2\lambda}, \dots, \delta_{n\lambda}) = 0, \quad (13)$$

其中, $\delta_\lambda = (\delta_{1\lambda}, \delta_{2\lambda}, \dots, \delta_{n\lambda})$ 为模糊变量集合 $\tilde{X} = g(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n)$ 在 λ 截集水平下的标准化区间变量向量。

当 $M = g(X)$ 形式复杂, 变量数目多, 或其关于基本模糊变量 $\tilde{X}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) 的增减性不明确时, 由

区间变量函数运算的优化计算方法可知, 对任意截集水平 λ , 式 (12) 可等价于

$$\eta_{\lambda F} = M_{0\lambda} / M'_\lambda, \quad (14)$$

其中, $M_{0\lambda}$ 与 M'_λ 分别为地下结构可靠性分析之功能函数在 λ 截集水平下的值域区间数 M_λ 的均值和偏差。

由式 (12) 可知, 在地下结构稳定性评价可靠性度量过程中是把坐标点到模糊失效面的最短距离 (按无穷范数 $\|\bullet\|_\infty$ 度量) 作为地下结构稳定性评价之可靠性分析的非概率可靠性指标, 由于结构失效域的边界是模糊的, 因此, 模糊可靠性指标 η_F 为一模糊变量, 且为截集水平 λ 的单调递增函数。若 $\eta_F > 1$, 则结构性能的实际波动范围与失效域不交, 结构可靠, 否则结构不可靠, 且 η_F 的值越大, 其安全程度越高。

通过求得不同截集水平下的可靠度指标值, 可以得到模糊可靠性指标的可能性分布曲线, 将为地下结构稳定性评价提供更多的信息。此外, 曲线还能反映地下结构失效的可能性, 为了便于求解, 先给出可能性测度的定义, 如下:

由可能性理论^[7]知, 模糊变量 X 可能性分布函数 π_X 在数值上等于隶属函数 u_A 。若 A 为论域 U 上的模糊集合, Π_X 为在 U 上取值的变量 X 的可能性分布, 则 A 的可能性测度 $\pi(A)$ 定义为

$$\text{Poss}\{X=A\} \triangleq \pi(A) \triangleq \sup_{u \in U} \{u_A(u) \wedge \pi_X(u)\}, \quad (15)$$

式中, $\pi_X(u)$ 是 Π_X 的可能性分布函数, “ $\wedge$ ” 表示取小运算。

根据上述定义及式 (12) 或 (14) 可得地下结构可靠性的失效可能度 π_f 和不失效必然度 N_r 分别为

$$\pi_f = \text{Poss}(\eta_F \leq 1) \\ = \sup\{\lambda(\eta) | \eta \leq 1, \lambda \in [0, 1], \eta \in R\}, \quad (16)$$

$$N_r = \text{Ness}(\eta_F > 1) = 1 - \pi_f \\ = \inf\{\lambda(\eta) | \eta > 1, \lambda \in [0, 1], \eta \in R\}. \quad (17)$$

地下结构失效可能度的几何解释如图 2 所示。

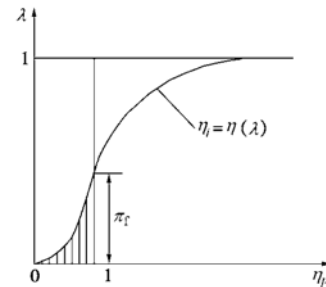


图 2 失效可能度几何解释

Fig. 2 Geometrical explanation of possibility of failure

由前述可知, 地下结构稳定性评价模糊可靠性指标和失效可能度并不是一一对应的, 模糊可靠性指标反映结构可靠性的模糊分布情况, 而失效可能度反映结构失效的最大可能性, 不失效的必然度反映结构不失效的最小可能性。

通过以上研究,可以获得地下结构稳定性的模糊能度可靠性度量方法,进而建立地下结构模糊能度可靠性模型,对其稳定可靠性进行分析。

2 基于截断区间法的地下结构模糊能度可靠性评价实施过程

利用前述区间截断法的模糊能度可靠性分析模型对地下结构稳定性进行评价须解决其分析方法即实施过程问题,本文结合地下结构稳定性分析特点,通过深入研究,建立了地下结构稳定性评价的模糊能度可靠性评价方法,具体实施过程如下:

(1) 通过分析,确定出地下结构稳定性的主要影响因素,如地应力、围岩及支护力学参数等,并通过对各影响因素之参数进行统计分析,根据三角模糊数确定方法,确定各影响因素之参数的可能度分布函数。

(2) 选定一截集水平 $\lambda (\lambda = 0.1, 0.2, \dots, 0.9)$, 利用截集定义,确定地下结构稳定性影响因素参数区间值。

(3) 根据地下结构失效准则,建立其可靠性分析之功能函数 $M = g(\tilde{X}) = g(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n)$, 然后根据区间数运算规则和区间截断方法,即式(5)~(10),计算 λ 截集水平下功能函数值域区间 $[M^L, M^R]$ 。

(4) 由地下结构稳定性评价模糊能度可靠性度量方法,计算得到 $M_{0,\lambda}$ 和 M'_λ , 最后由式(14)计算出 λ 截集水平时的可靠性指标 $\eta_{\lambda F}$ 。

(5) 从 0.1~0.9 依次选取不同的截集水平,得到相应截集水平下的可靠性指标,并将其分别绘成模糊可靠性指标可能性分布曲线。

(6) 根据式(16)与(17)计算地下结构稳定性评价之模糊可靠性失效可能度 π_r 和不失效必然度 N_r , 并据此对地下结构稳定性进行评价。

3 工程实例分析

为了验证本文方法的合理性和探讨其应用方法,本文结合某具体工程实际问题进行了深入研究,具体情况如下。

3.1 工程概况

某煤矿^[11]在-490 m 水平有一水平圆形巷道,半径 R_0 为 1.4 m, 围岩为灰白泥岩、泥岩、黑泥岩和砂泥岩组成,蒙脱石含量为 15%至 20%,采用喷锚网支护。围岩力学参数:原岩地应力 p_0 的均值为 4.5 MPa, 方差为 0.5 MPa; 黏聚力 c 的均值为 0.098 MPa, 方差为 0.024 MPa; 内摩擦角 φ 变化幅度很小,取为定值为 25.1° ; 重度 γ 的均值为 26.4 kN/m^3 , 方差为 5.35 MPa; 变形模量 E 的均值为 $1.864 \times 10^3 \text{ MPa}$, 方差为 $0.42 \times 10^3 \text{ MPa}$; 泊松比 $\mu_1 = 0.5$, 侧压力系数 λ 为 1.0。

喷网力学参数为:喷层厚度 t 的均值为 0.25 m,

方差为 0.05 m; 变形模量 E_c 的均值为 $1.92 \times 10^4 \text{ MPa}$, 方差为 $0.25 \times 10^4 \text{ MPa}$; 泊松比 μ_2 为 0.168; 抗压强度 σ_c 的均值为 17.4 MPa, 方差为 1.5 MPa; 抗剪强度 τ_1 的均值为 3.4 MPa, 方差为 0.2 MPa; 钢筋网各个参数由于变幅小可取定值,分别为:钢筋直径 d_1 为 10 mm, 间距为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 抗剪强度 $\tau_2 = 91 \text{ MPa}$ 。

锚杆的相关参数为:间距 e 的均值为 1.0 m, 方差为 0.2 m; 排距 m 的均值为 1.0 m, 方差为 0.25 m; 承载拱厚度 W 的均值为 2.0 m, 方差为 0.3 m; 锚杆的其它参数相对变异性不大,作为确定性参数处理,弹性模量 $E_b = 1.96 \times 10^5 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_t = 372.5 \text{ MPa}$, 抗剪强度 $\tau_3 = 224 \text{ MPa}$, 锚杆直径 $d_2 = 20 \text{ mm}$ 。

3.2 模糊能度可靠性分析过程与结果

(1) 由上述物理力学参数三角模糊数的确定方法,得到该工程各个参数的三角模糊数分别为 $\tilde{p}_0 = (4, 4.5, 5) \text{ MPa}$, $\tilde{c} = (0.074, 0.098, 0.122) \text{ MPa}$, $\tilde{\gamma} = (21.05, 26.4, 31.75) \text{ kN/m}^3$, $\tilde{t} = (0.2, 0.25, 0.3) \text{ m}$, $\tilde{E} = (1.444 \times 10^3, 1.864 \times 10^3, 2.284 \times 10^3) \text{ MPa}$, $\tilde{E}_c = (1.67 \times 10^4, 1.92 \times 10^4, 2.17 \times 10^4) \text{ MPa}$, $\tilde{m} = (0.75, 1.0, 1.25) \text{ m}$, $\tilde{\sigma}_c = (15.9, 17.4, 18.9) \text{ MPa}$, $\tilde{W} = (1.7, 2.0, 2.3) \text{ m}$, $\tilde{\tau}_1 = (3.2, 3.4, 3.6) \text{ MPa}$, $\tilde{e} = (0.8, 1.0, 1.2) \text{ m}$, 其余参数则采用定值来计算。

(2) 对于确定的三角模糊数,根据截集定义先得到截集水平为 0.1 时的各个参数的区间数为 $c_{0.1} = [0.0764, 0.1196] \text{ MPa}$, $E_{0.1} = [1.486 \times 10^3, 2.242 \times 10^3] \text{ MPa}$, $t_{0.1} = [0.205, 0.295] \text{ m}$, $p_{0.1} = [4.05, 4.95] \text{ MPa}$, $\tau_{0.1} = [3.22, 3.58] \text{ MPa}$, $\gamma_{0.1} = [21.585, 31.215] \text{ kN/m}^3$, $E_{c,0.1} = [1.695 \times 10^4, 2.145 \times 10^4] \text{ MPa}$, $m_{0.1} = [0.78, 1.23] \text{ m}$, $\sigma_{c,0.1} = [16.05, 18.75] \text{ MPa}$, $W_{0.1} = [1.73, 2.27] \text{ m}$ 。

(3) 可靠性分析之功能函数确定方法。由于本工程为喷锚支护结构,其计算理论可采用喷锚结构承载力算法^[12],即喷层、锚杆、钢筋网、围岩共同组成承载环所提供的支护力 P_T 不小于巷道围岩特性曲线的最小支护抗力 $P_{\min}$, P_T 可以表示为

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (18)$$

式中, P_1 , P_2 , P_3 , P_4 分别为喷层、锚杆、钢筋网、围岩的承载能力,具体计算方法见文献[12]。当松动区岩体强度已大大降低,几乎完全丧失自承载能力,滑移体完全以重力形式作用在承载环上时,维持滑移体重力平衡所需支护力的最小值 $P_{\min}$, 其可由下两式联立计算得到^[12]

$$P_{\min} = \gamma(R_{\min} - R_0)/2, \quad (19)$$

$$R_{\min} = R_0 \left[\left(\frac{p_0 + c \tan \varphi}{P_{\min} + c \tan \varphi} \right) \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \right], \quad (20)$$

式中, $R_{\min}$ 为最小支护力时相应的松动区半径。根据抗力—荷载模型,可得其可靠性分析的功能函数为

$$M = P_T - P_{\min}, \quad (21)$$

采用步骤(2)中确定的参数区间数与确定性参数, 通过式(5)~(10)与式(21)计算可得 0.1 截集水平下功能函数的值域区间为[0.1, 2.1] MPa。

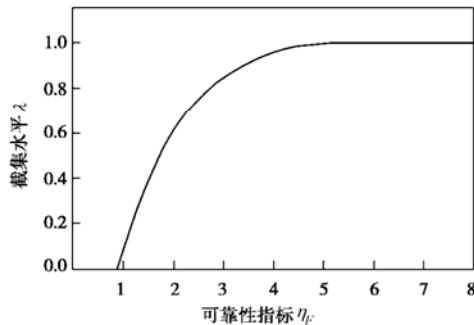


图 3 模糊可靠性指标可能性分布曲线

Fig. 3 Distribution curve on probability of fuzzy reliability index

(4) 由地下结构模糊可靠性度量方法, 计算得到 $M_{0\lambda}$ 和 M'_λ , 分别为 1.1 和 1.0, 最后由式(14)得 0.1 截集水平时可靠性指标 $\eta_{\lambda F}$ 为 1.1。

(5) 从 0.1~0.9 依次选取不同的截集水平, 得到其相应截集水平下的可靠性指标, 并把其分别绘成模糊可靠性指标可能性分布曲线, 如图 3。

(6) 根据公式(16)与(17)计算岩体地下结构模糊可靠性失效可能度 π_r 和不失效必然度 N_r 分别为 7.61% 和 92.39%, 表明该巷道是稳定的。实际上, 该巷道运行良好, 这与计算分析结果是相吻合的, 表明该方法与实际吻合良好。

4 结 论

(1) 该模型能够全面反映地下结构稳定性影响因素的随机性和模糊性, 更符合工程实际。

(2) 在现有模糊能度可靠性模型基础上, 引进区间截断法进行区间分析, 避免了值域的扩展。

(3) 评价结果为可靠度指标分布曲线和失效可能度, 为地下结构稳定性评价提供了更多的信息。

参考文献:

- [1] 张 清, 王东元, 李建军. 铁路隧道衬砌结构可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, **13**(3): 209 - 218. (ZHANG Qing, WANG Dong-yuan, LI Jian-jun. Reliability analysis of lining structures in Chinese railroad tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, **13**(3): 209 - 218. (in Chinese))
- [2] 苏永华, 方祖烈, 高 谦. 用改进的响应面方法分析特殊地下岩体空间的稳定可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 54 - 59. (SU Yong-hua, FANG Zu-lie, GAO Qian. Reliability analysis on special underground rock mass by response surface method[J]. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 54 - 59. (in Chinese))

- [3] 赵 奎, 蔡美峰, 等. 采空区块体稳定性的模糊随机可靠性研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(6): 987 - 990. (ZHAO Kui, CAI Mei-feng, et al. Study on fuzzy random reliability analysis for block stability in caved area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(6): 987 - 990. (in Chinese))
- [4] SAWYER J P, RAO S S. Strength-based reliability and fracture assessment of fuzzy mechanical and structural systems[J]. ALAA Journal, 1999, **37**(1): 84 - 92.
- [5] UTKIN L V, GUROV S V. A general formal approach for fuzzy reliability analysis in the possibility context[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, **83**(2): 203 - 213.
- [6] 吕震宙, 冯蕴雯, 岳珠峰. 改进的区间截断法及基于区间分析的非概率可靠性分析方法[J]. 计算力学学报, 2002, **19**(3): 260 - 264. (LÜ Zhen-zhou, FENG Yun-wen, YUE Zhu-feng. An advanced interval-truncation approach and non-probabilistic reliability analysis based on interval analysis[J]. Chinese Journal of Computation Mechanics, 2002, **19**(3): 260 - 264. (in Chinese))
- [7] CREMONA C, GAO Y. The possibilistic reliability theory: theoretical aspects and applications[J]. Structural Safety, 1997, **19**(2): 173 - 201.
- [8] 郭书祥, 吕震宙, 等. 基于可能性理论的结构模糊可靠性方法[J]. 计算力学学报, 2002, **19**(1): 89 - 93. (GUO Shu-xiang, LÜ Zhen-zhou, et al. A fuzzy reliability approach for structures in the possibility context [J]. Chinese Journal of Computation Mechanics, 2002, **19**(1): 89 - 93. (in Chinese))
- [9] 黄志全, 王思敬, 李华晔, 等. 岩体力学参数取值的置信度及其可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(1): 33 - 35. (HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing, LI Hua-ye, et al. Exactness and reliability of rock mechanics parameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(1): 33 - 35. (in Chinese))
- [10] GÖTZ Alefeld, GÜNTHER Mayer. Interval analysis: theory and applications[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, **121**: 421 - 464.
- [11] 苏永华, 蒋德松, 赵明华. 松软围岩结构稳定可靠性估计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, **23**(2): 10 - 13. (SU Yong-hua, JIANG De-song, ZHAO Ming-hua. Estimation of the stability reliability degree of tunnel structure in soft and loose rock mass[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2006, **23**(2): 10 - 13. (in Chinese))
- [12] 高 磊. 矿山岩石力学[M]. 北京: 机械工业出版社. 1987. (GAO Lei. Mine rock mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese))