

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2785

隧道岩质围岩亚级分级可靠度分析 方法及其工程应用

李术才, 贺 鹏, 李利平, 张乾青, 石少帅, 徐 飞, 刘洪亮

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 在隧道工程岩体分级中, 由于岩土体参数本身的不确定性, 加之各定性、定量评定指标在获取过程中由仪器误差、人为操作等产生的离散性及随机性, 往往是应用同一评价体系及分级标准, 却得出不同的评判等级, 尤其是在围岩亚级分级中, 评定结果鲁棒性差, 甚至出现跳级, 这就决定了围岩类别的可靠性的存在。据此, 基于《工程岩体分级标准》, 通过分析岩石强度及岩体完整程度等评价指标的概率分布规律, 引入体系可靠度分析理论, 构建不同围岩等级的功能函数, 经 Monte Carlo 法计算围岩隶属于各评定等级的可靠概率, 进而提出了基于国标 BQ 法的围岩亚级分级可靠度分析方法。该方法充分利用了分类系统本身蕴含的信息, 考虑了评价指标的不确定性及离散性, 所计算可靠性指标可更为直观地对围岩等级作出稳健评估, 且可靠概率在一定程度上综合考虑了包括局部破碎带、软弱夹层等掌子面围岩信息的离散程度。研究成果应用于济南绕城高速老虎山超大断面隧道的围岩亚级分级中, 所评价结果与实际围岩等级完全吻合, 且各等级可靠指标的延续性可对隧道施工过程中地质属性的变化情况进行定量表征, 有助于工程地质人员据此对围岩质量的渐变过程进行动态评估, 为合理确定工法转换区间, 优化支护参数提供数据支撑。研究成果对类似超大断面隧道的围岩亚级分级有一定参考价值。

关 键 词: 围岩亚级分级; 可靠度分析理论; 不确定性分析; BQ 法; 工程应用

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 03-0967-10

Reliability analysis method of sub-classification of tunnel rock mass and its engineering application

LI Shu-cai, HE Peng, LI Li-ping, ZHANG Qian-qing, SHI Shao-shuai, XU Fei, LIU Hong-liang

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250061, China)

Abstract: During the classification of surrounding rock in tunnel engineering, different results are normally obtained by the same evaluation system and classification standard. It is caused by the uncertainty of rock parameters and the discreteness and randomness of evaluation indices, which are resulted from the instrument error and artificial operation in the testing process. Especially in the sub-classification of surrounding rock, evaluation results usually have poor robustness, even grade skipping. Hence, it is necessary to investigate the reliability of surrounding rock classification. Based on the handbook of Engineering Rock Classification Standards, we analysed the probability distribution function of rock strength and rock mass integrity index. The system reliability analysis theory was also introduced to build the function of different surrounding rock grades. Moreover, Monte Carlo method was applied to calculate the reliable probability belonging to different evaluation levels. Finally, the reliability analysis method was proposed for the sub-classification of surrounding rock, according to the basic quality (BQ) method. Since this method takes into account the uncertainty and discreteness of the evaluation indices sufficiently, the calculated reliability indices can make a more steady evaluation result. Besides, the reliable probability can reflect the dispersion degree of working face information of the developed fault fracture zone and the weak interlayer to a certain extent. This method was applied to the surrounding rock sub-classification of Laohushan tunnel in Jinan belt highway. It was found that the evaluation results were consistent with the actual levels of surrounding rock. Besides, the continuity of reliability indices at different surrounding rock levels can quantitatively express the changing conditions of

收稿日期: 2016-11-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No.2013CB036000); 国家自然科学基金资助项目 (No.51479106)。

This work was supported by the State Key Development Program for Basic Research Program of China (2013CB036000) and the National Natural Science Foundation of China (51479106).

第一作者简介: 李术才, 男, 1965 年生, 博导, 主要从事断续节理岩体力学特性和锚固机理及不良地质超前预报研究。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn

通讯作者: 贺鹏, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩体结构稳定可靠性分析及动态评估方面的研究。E-mail: hepenghank@163.com

geological attributes during the tunnel construction. Therefore, this study provides data support for the transformation of construction method and the optimisation of supporting parameters. Research results have significant references for surrounding rock sub-classification in large-cross-section tunnels.

Keywords: sub-classification of surrounding rock; reliability analysis theory; uncertainty analysis; rock mass basic quality (BQ); engineering application

1 引言

合理的工程岩体分级是岩体稳定性判断的基础, 各行业均推出了各自的岩体分级标准与规范^[1-5]。然而, 在实际应用过程中, 往往是应用同一评价体系及分级标准, 却得出不同的评判等级, 尤其是在围岩亚级分级中, 评定结果鲁棒性差, 甚至出现跳级, 难以对围岩等级作出合理、稳健的评定。

目前, 国内外围岩分级方法多以定量与定性相结合的方式的综合评定^[6]。定量分析是依据室内、现场试验数据来对岩体(或岩石)性质进行定量表征的, 如岩石强度、岩体完整性系数等。然而, 在测试过程中, 往往由于试验操作、仪器误差等致使所得指标值具有较大的不确定性, 同时由于统计信息有限, 所得数据有“以点代面”之嫌。定性分析则通过对影响岩体质量的诸因素进行定性描述、鉴别或作出评判、打分。由于个人经验、理解不同, 主观因素影响显著, 即使应用同一评价体系, 不同的地质人员对同一围岩也往往作出不同的评定结果, 同时存在定性分级与定量分级结论不一致的情况。在定量与定性结合、多指标综合评判的分级方法中, 这种由仪器操作、人为主观因素以及岩体工程本身带来的不确定性、随机性尤为凸显, 致使评价等级结果可靠性严重降低。尤其是在深埋、超大断面等特殊隧道工程, 合理、精确的围岩等级评定对施工方法转换、支护参数优化、预加固措施选取等有重要的参考价值。

在隧道开挖工程中掌子面揭露的岩体质量经常会处于两级围岩之间。如III类偏IV类围岩和III类偏II类围岩的开挖、支护方案是有很大的差别的, 可能围岩级别只需调整半级就能满足施工要求, 然而没有相匹配的围岩亚级分级方法, 就不得不按高一级处理, 从而造成很大浪费^[7-8]。而针对这种阶梯性评价结果, 现有规范并没有恰当地描述二者之间的差别。实际上围岩类别情况, 既有类间差别, 又有类内差别, 而大多基于最大隶属度原则下的阶梯型评价结果只能反映类间差别, 不能反映类内差别^[9], 即各评价指标值、隶属度函数以及权重在一定范围内变化时不会引起评价结果的变化。当评价对象在类内一定范围内时, 评价结果比较准确, 但对于类

别边界附近的对象却不是如此。许多学者基于不同理论方法对围岩分级中这种不确定性和阶梯性进行了探索, 如可变模糊集合理论^[10]、粗糙集理论^[11]、区间理论^[12]、可拓方法^[13]、集对分析理论^[14]及人工神经网络^[15-16]等, 均取得有益的进展。但在实际应用中存在一定缺陷, 如模糊数学中隶属度函数及权重难于确定问题; 粗糙集理论方法在属性约简过程中可能删掉重要的评价因子; 区间理论操作简单、实用性强, 但未考虑评定指标概率分布模型; 集对分析方法在评价中难以确定差异度系数; 神经网络方法则存在知识获取瓶颈问题, 评价结果可靠性不高。

据此, 本文基于《工程岩体分级标准》^[1], 通过分析岩体强度及岩体完整性系数概率分布规律, 以 3σ 准则对3修正系数进行模糊概率处理, 将体系可靠度分析理论引入到围岩分级中, 构建不同围岩等级的功能函数, 经Monte Carlo法计算围岩隶属于各评定等级的可靠概率, 进而提出了基于BQ的围岩亚级分级可靠度分析方法, 并应用于济南绕城高速老虎山超大断面隧道围岩亚级分级中, 以对该隧道施工工法转换、支护参数优化等提供理论指导。

2 围岩分级可靠度分析方法

2.1 围岩分级可靠度理论

岩土体参数的不确定性是岩土工程领域极为显著的特征之一, 岩土工程的可靠度理论是从岩土体的不确定性出发分析研究对象的可靠概率和失效概率的。从分类的角度来看, 失效就是不可靠, 判断可靠和失效实际上就是一个关于两个类别的分类问题^[9]。对围岩分类而言, 定量指标参数获取的离散性及定性评价标准的不确定性、模糊性决定了围岩类别可靠性的存在, 即某围岩属于某类围岩的概率有多大, 这就是围岩分类的可靠度问题。

给定基本随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 及极限状态方程^[17-18]:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

可知, 功能函数为

$$Z(X_i) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

由可靠度基本理论可知:

$$\left. \begin{aligned} Z(X_i) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0 &\text{为可靠状态} \\ Z(X_i) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 &\text{为极限状态} \\ Z(X_i) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0 &\text{为失效状态} \end{aligned} \right\} (3)$$

从分类角度来看，由式 (3) 可知，可靠与失效的概率（表示为 P^s 与 P^f ）可以看作是安全余量 Z 以 0 为分类界线的两个类别的分类问题。为表明分类界线，安全余量 Z 可以改写为以 0 为分类界线的安全余量 Z_0 ，公式如下：

$$Z_0 = g(X_1, X_2, \dots, X_n) - 0 \quad (4)$$

此时可靠概率为

$$P_0^s = P(Z_0 \geq 0) \quad (5)$$

式中： P_0^s 为以 0 为分类界限的可靠概率。

则对应的失效概率 P_0^f 为

$$P_0^f = 1 - P_0^s = P(Z_0 < 0) \quad (6)$$

假定围岩分类的评价模型为

$$C = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

式中： C 为基于某一围岩分类方法所得评定值， x_1, x_2, \dots, x_n 表示围岩类别的各影响因素。则一个以常数 k 为分类界线的分类问题的安全余量 Z_k 为

$$Z_k = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - k \quad (8)$$

根据岩体工程可靠度理论，此时可靠度概率 P_k^s 为

$$P_k^s = P(Z_k \geq 0) \quad (9)$$

按照概率论的基本原理，若各评定指标的联合概率密度为

$$h(x) = h(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (10)$$

即

$$P_k^s = P(Z_k \geq 0) = \int_{Z_k \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_k \geq 0} \dots \int h(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (11)$$

同样，可以求得一个以 j 为分类界线的分类问题时的可靠概率 P_j^s 为

$$P_j^s = P(Z_j \geq 0) = \int_{Z_j \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_j \geq 0} \dots \int h(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (12)$$

则围岩介于 $k \sim j$ 值之间所隶属等级的可靠概率 $P_{k \sim j}^s$ 为

$$P_{k \sim j}^s = P_k^s - P_j^s = P(Z_k \geq 0) - P(Z_j \geq 0) \quad (13)$$

对应的失效概率 $P_{k \sim j}^f$ 为

$$P_{k \sim j}^f = 1 - P_{k \sim j}^s \quad (14)$$

联合式 (12)、(13)，即可求得围岩隶属于各等级的可靠概率。

2.2 分级标准及指标概率分布模型

在工程岩体分级中，国标中岩体基本质量指标 BQ 自实施以来，已在水利水电、交通、矿山等行业相关工程中得到广泛应用。与传统的水利水电地下工程围岩分类 HC 法、巴顿岩体质量 Q 系统法及 Bieniawski 的裂隙化岩体的地质力学分类 RMR 法相比，国标 BQ 法具有自身特点^[6]。其首先选取岩石坚硬程度和岩体完整程度这两个能反映岩体基本属性的独立因素作为评价岩体基本质量的分级因素，平行建立定性和定量评价体系，相互验证。并将影响岩体工程特性的因素作为修正系数，以实现工程岩体质量的合理分级，具体分类方法及步骤参见文献[1-2]，本文不再赘述，岩体基本质量分级标准如表 1 所示^[3]。

表 1 公路隧道围岩基本质量分级

Table 1 Classification of rock mass basic quality in highway tunnel engineering

级别	I		II		III			IV			V	
	III ₁	III ₂	IV ₁	IV ₂	IV ₃	V ₁	V ₂					
BQ 值	≥551	550~451	450~401	400~351	350~316	315~285	284~251	250~211	210~150			

由岩石饱和单轴抗压强度 $R_c(\text{MPa})$ 与岩体完整性指数 K_v 确定 BQ 值的公式是根据 103 组样本数据（后又新增 54 组样本数据）逐次回归建立的，最终选定为带两限定条件的二元线性回归公式^[1]，并进行地下水影响修正系数 k_1 、结构面产状影响修正系数 k_2 与初始地应力影响修正系数 k_3 修正，即

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v - 100(k_1 + k_2 + k_3) \quad (15)$$

由于岩石饱和单轴抗压强度 R_c 的确定需要钻孔取芯，兼有尺寸要求，为满足隧道围岩快速分级，大多采用点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 进行换算，且同组试验岩样数量不小于 15 个，试验结果舍去最大、最小

测试值后取均值^[1], 然而由于试验误差, 现场试验所得数据存在较大的离散性, 变异系数一般为10%~30%, 甚至更大, 而如果盲目地集中取样, 则试验数据无法全面反映岩体强度, 代表性差^[19]。因此, 岩石强度测试中数据离散无可避免, 而在BQ值计算中, R_c 值的敏感性也较高, 以 $R_c=60$ MPa的坚硬岩为例, 假定变异系数为15%, 则所计算BQ值存在一量值为27的离散区间, 在以30~40个量值为区间的围岩亚级分级中, 足以影响地质人员对围岩分级结果的评定。根据已有大量点荷载数据的研究资料^[19-24]发现, 点荷载强度值的分布基本符合正态分布规律, 因此本次试验测试数据采用基于正态分布规律的统计分析检验方法。

在岩体完整程度指标定量获取方面, 应用最广泛的是岩体完整性指数 K_v 、岩体体积节理数 J_v 两项。岩体完整性指数的获取通常采用弹性波测试的方法, 针对不同的工程地质岩组或岩性段选择有代表性的点、段, 测定其弹性纵波速度, 并在同一岩体取样测定岩石弹性纵波速度, K_v 值由两者计算所得^[1]。岩体体积节理数 J_v 是国际岩石力学学会(ISRM)推荐用来定量评价岩体节理化程度的指标, 可反映岩体结构面的几何发育特征, 如结构面组数、间距、延展性等。岩体体积节理数 J_v 应针对不同的工程地质岩组或岩性段, 选择有代表性的露头或开挖壁面进行节理(结构面)统计。 J_v 值根据节理统计结果按下式计算所得, 继而依据表2实现对岩体完整性系数 K_v 的确定^[1-2]:

$$J_v = s_1 + s_2 + \dots + s_n + s_k \quad (16)$$

式中: $s_1, s_2 \dots s_n, s_k$ 为每立方米岩体第*i*组节理条数。

表2 J_v 、 K_v 与岩体完整程度定性值的对应关系
Table 2 Relationship between J_v , K_v and qualitative integrity of rock mass

J_v /(条/m ³)	K_v	岩石完整程度定性值
<3	>0.75	完整
3~10	0.75~0.55	较完整
10~20	0.55~0.35	较破碎
20~35	0.35~0.15	破碎
>35	<0.15	极破碎

然而在实际操作过程中, 无论是弹性波测试法还是体积节理数法, 都会因仪器操作、数据统计或人为因素等使所得数据存在离散性与随机性。以岩体体积节理数为例, 由表2可见, J_v 每多统计(或少统计)一条, BQ值将产生3~7个量纲的离散区间。而由于测窗法或测线法^[25-27]进行体积节理数统

计时所选位置的不同, 所得数据的不确定性将会越发显著。

更为常见的问题是, 某掌子面岩体整体较完整, 节理裂隙弱发育, 但局部存在破碎带或软弱夹层, 致使掌子面岩体不同区域岩性离散度大, 如此一来, 在进行岩体体积节理数统计中则往往是模棱两可的, 而规范中也只是模糊地说明要对有代表性的节理、裂隙区域进行统计^[28]。这对于初级地质人员进行围岩分级中是经常遇到的, 会直接影响岩体完整性系数的计算, 进而导致围岩等级误判。

BQ值计算过程中, 半定量修正指标有3个, 即地下工程 k_1, k_2, k_3 。由于部分修正系数值较难测定(当然, 如果在隧道开挖过程中能获取足够多的样本数据进行统计则更好), 加之评定标准有定性成分, 很难获取足够代表性数据进行统计分析。在隧道水文地质条件无突变情况下, 隧道短区间内各修正系数离散程度不大。以结构面产状影响修正系数为例, 评定 k_2 的标准为结构面走向与洞轴线夹角及结构面倾角两组合因素, 但所给定的量化区间却极为宽泛^[28], 很容易出现不同结构面产状对应同一 k_2 值的情况, 敏感性较低。为简化计算, 在统计各修正系数过程中引用区间数理论^[12,29], 综合定性分析与所给定量评定标准, 仅确定 k_i 的最大值 k_{imax} 与最小值 k_{imin} , 令 $k_{imax}=\mu+3\sigma$, $k_{imin}=\mu-3\sigma$ ^[29], 并假定 k_i 服从正态分布。

2.3 围岩等级功能函数构建

由2.2节可知, 围岩分级的评定模型为

$$BQ = f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) \quad (17)$$

岩体基本质量分级标准如表2所示, 由此可确定岩体隶属类别的上下限阈值。

以V级围岩为例, 依据2.1节所述, 可获取其功能函数, 为便于后续分类计算, 同步将其进行归一化处理:

$$Z_v = \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - [BQ]_v}{[BQ]_v} \quad (18)$$

即

$$Z_v = \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - 250}{250} > 0 \quad (19)$$

则该岩体隶属于V级围岩的概率为

$$P_v^s = 1 - P(Z_v > 0) = \int_{Z_v > 0} f(x) dx = \iint_{Z_v > 0} \dots \int f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) dR_c dK_v \dots dk_3 \quad (20)$$

需要注意的是, I级、V级围岩的评判标准仅

有一个。而对于常见的IV级、III级以及II级围岩,其评定标准是既定区间,以IV级岩体为例,只有当 $BQ \in (251, 350)$ 时,才可评定为IV级,也就是说,IV级、III级以及II级岩体的评定是双标准的,其失效模式有两种。为此,将其视为体系可靠度问题,依据式(12)、(13),可获取围岩隶属于IV级、III级及II级的可靠概率。

以IV级围岩可靠概率计算为例,其功能函数为

$$\left. \begin{aligned} Z_{IV}^L &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - [BQ]_{IV}^L}{[BQ]_{IV}^L} \\ Z_{IV}^R &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - [BQ]_{IV}^R}{[BQ]_{IV}^R} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

即

$$\left. \begin{aligned} Z_{IV}^L &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - 250}{250} > 0 \\ Z_{IV}^R &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - 350}{350} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

则有

$$P_{IV}^s = P(Z_{IV}^L \geq 0) = \int_{Z_{IV}^L \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_{IV}^L \geq 0} \dots \int h(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) dR_c dK_v \dots dk_3 \quad (23)$$

$$P_{IV}^s = P(Z_{IV}^R \geq 0) = \int_{Z_{IV}^R \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_{IV}^R \geq 0} \dots \int h(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) dR_c dK_v \dots dk_3 \quad (24)$$

则该围岩隶属IV级的可靠概率 P_{IV}^s 为

$$P_{IV}^s = P_{IV}^s - P_{IV}^s = P(Z_{IV}^L \geq 0) - P(Z_{IV}^R \geq 0) \quad (25)$$

同理,亦可求得围岩隶属于III级、II级的可靠概率。

在实践中发现,隧道施工过程中揭露出的岩体经判定常常会处于两级围岩之间,这种现象在III~V级围岩中尤为突出。为提高隧道支护的优化程度,有必要对稳定性较复杂、施工方法、支护结构参数等相对多样化的III、IV、V级围岩进行更加细致地级别划分,即进行围岩亚级分级可靠度计算。

据表1所提供围岩基本质量分级BQ阈值^[3,7],可依次求得围岩各亚级分级的可靠概率。同样以IV级围岩为例。

IV_i级围岩的功能函数为

$$\left. \begin{aligned} Z_{IV_i}^L &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - [BQ]_{IV_i}^L}{[BQ]_{IV_i}^L} \\ Z_{IV_i}^R &= \frac{f(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) - [BQ]_{IV_i}^R}{[BQ]_{IV_i}^R} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

有

$$P_{IV_i}^s = P(Z_{IV_i}^L \geq 0) = \int_{Z_{IV_i}^L \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_{IV_i}^L \geq 0} \dots \int h(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) dR_c dK_v \dots dk_3 \quad (27)$$

$$P_{IV_i}^s = P(Z_{IV_i}^R \geq 0) = \int_{Z_{IV_i}^R \geq 0} h(x) dx = \iint_{Z_{IV_i}^R \geq 0} \dots \int h(R_c, K_v, k_1, k_2, k_3) dR_c dK_v \dots dk_3 \quad (28)$$

则该围岩隶属IV_i级的可靠概率 $P_{IV_i}^s$ 为

$$P_{IV_i}^s = P_{IV_i}^s - P_{IV_i}^s = P(Z_{IV_i}^L \geq 0) - P(Z_{IV_i}^R \geq 0) \quad (29)$$

为满足计算精度,可靠概率求解采用 10^6 次Monte Carlo法模拟(MC)计算(具体计算过程详见文献[18],本文不再赘述)。至此,基于所构建不同围岩等级的功能函数,可获取不同围岩等级的可靠指标,进而建立基于《工程岩体分级标准》BQ法的隧道围岩亚级分级可靠度计算方法,并可通过最大隶属度原则^[30]对围岩等级进行定量评定。

3 工程应用

3.1 工程概况

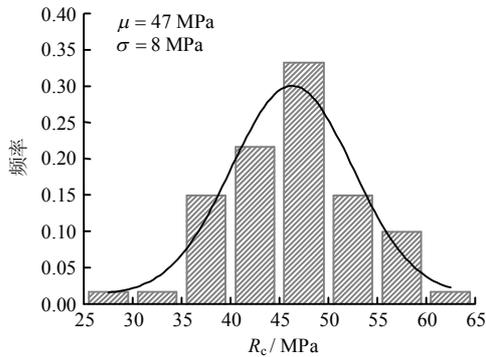
济南绕城高速济南连接线工程老虎山隧道跨济南市历下区、市中区两地,隧道采用上、下行分离的独立双洞,左线起讫里程ZK2+080~ZK3+820,长1740 m;右线起讫里程YK1+950~YK3+838,长1888 m;左右线相距约11~43 m,隧道主洞净空为(宽×高)17.608 m×8.961 m,每延米开挖土石方量均超过200 m³,设计为双向8车道,为全国单洞跨径最大的公路隧道。隧址区为剥蚀低山丘陵地貌区,洞顶最大埋深约127.8 m,受燕山运动的影响,其单斜构造中发育有多条规模较大的NNW向断裂,由东向西依次有文祖断裂、东坞断裂、千佛山断裂等。隧道岩体整体均一性较差,局部岩层存在不整合接触带,岩性接触带及破碎带和小型灰岩溶蚀裂隙。

由于老虎山隧道属超大断面隧道,施工工法及支护参数的选取均极为慎重,作为重要依据,围岩等级评定则显得尤为重要。初步地质勘探均已给出围岩设计等级,然而在隧道开挖过程中,揭露的掌子面可更为直观、准确地反映围岩质量。为此,本文通过所提出围岩分级可靠度分析方法对施工过程

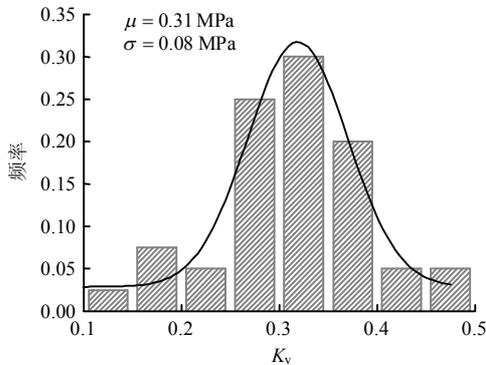
中的掌子面围岩等级进行分析计算，以指导施工工法转换及支护参数的动态修正。

3.2 结果分析与对比验证

以 ZK3+750~720 段为例，老虎山隧道作为超大断面隧道，单独某区域岩石强度或岩体完整性无法代表整个掌子面围岩情况，因此在进行现场围岩等级评定中，将各分部掌子面分为左、中、右 3 个子部进行分区评定，且考虑在一定工程岩体范围内，如无特殊岩性突变或断层破碎带，在 1~2 个爆破循环内岩体质量变化情况不大，即围岩在小区间段内存在近相关性。为保证所得数据的鲁棒性及获取合理的指标概率分布函数，每爆破一个循环进行一次围岩判定，共进行 3 次循环的数据统计。其中，岩石强度通过现场点荷载试验获取，岩体完整程度由岩体体积节理数统计获得。以此为基准，对离散性较大的区域辅以岩体声波参数测定，并对 K_v 值进行适当修正，最终获取其岩体完整系数的概率分布。两主控指标的概率分布模型及相关参数如图 1 所示。图中， μ ， σ 分别为指数统计值的均值和标准差。



(a) 岩石单轴饱和抗压强度 R_c 值概率分布



(b) 岩体完整性系数 K_v 统计值概率分布

图 1 各评价指标的概率分布模型及参数

Fig.1 Probabilistic distribution models and their relevant parameters of evaluation indexes

依据结构面统计信息获取优势产状玫瑰花图（见图 2，由于最优节理组为水平层状发育，视为无走向、倾向），结合文献[1]表 5.2 中 2-2，综合最优节理组与次优节理组获取结构面产状修正系数区间值 $k_2 = [0.2, 0.36]$ ，基于前述 3σ 准则，获取其概率密度分布参数值，即 k_2 服从 $\mu = 0.28$ ， $\sigma = 0.027$ 的正态分布。同理，地下水影响修正系数 k_1 与初始应力状态修正系数 k_3 可结合文献[1]表 5.2 中 2-1，表 5.2 中 2-1 分别通过区间值确定其概率分布函数。鉴于该段各掌子面多干燥无水，且隧道埋深均在 30~40 m 间，设定 k_1 ， k_3 值均为 0。

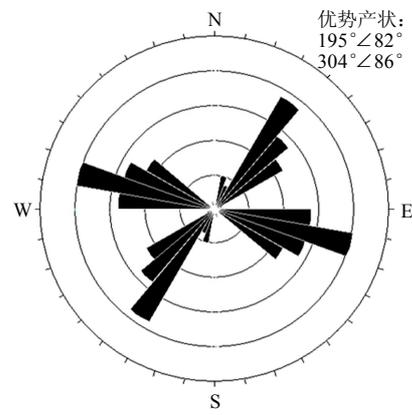


图 2 优势产状玫瑰花图

Fig.2 Rose diagram of advantage strata occurrence

基于所得数据及各指标概率分布函数，依据前述围岩等级可靠度计算方法，获取 ZK3+750~720 段隧道围岩隶属于各等级的可靠概率，计算结果如表 3 所示。

表 3 ZK3+750~720 段围岩隶属于各等级的可靠概率
Table 3 Reliable probability attached to different surrounding rock levels in ZK3+750~720

围岩类型	计算可靠概率	最大可靠度指标
V ₂	0.020 2	Max(P_i)=0.407 3($i=I, II, \dots, V$), 属 IV ₃ 类围岩
V ₁	0.186 7	
IV ₃	0.407 3	
IV ₂	0.282 6	
IV ₁	0.098 2	
III ₂	0.000 0	

据此，分别计算老虎山隧道左、右线围岩等级的可靠概率，所得结果与设计围岩等级、实际围岩等级进行对比（见表 4、5），实际围岩等级由地质专家通过现场地质调查，综合 BQ 法与 RMR 法所得。由表 4、5 可知，实际围岩等级一般优于设计围岩等级，而本文方法所评判结果也与实际围岩等级

完全吻合，且等级可靠概率更为直观地反映了其分类信息，有助于工程地质人员据此对围岩质量的变化情况作出稳健评估，进而合理地进行施工工法转换，并对支护参数优化提供量化依据。

依据所评定结果，在设计围岩等级为 V_2 隧道段的施工过程中，考虑围岩等级隶属于 V_1 级的可靠概率较大，故将原定的双侧壁导坑开挖变更为 CRD 法。在 ZK3+750~720 段设计围岩等级出现跳级，

表 4 老虎山隧道左线围岩等级对比

Table 4 Comparison of classification results of Laohushan tunnel left line

隧道里程	设计等级	实际等级	现场 BQ 法	本文方法	最大隶属等级可靠概率	设计工法	工法变更
ZK3+810~790	V_2	V_2	V_2	V_2	0.637 7	双侧壁导坑	双侧壁导坑
ZK3+790~770	V_2	V_1	V_1	V_1	0.607 9	双侧壁导坑	CRD 法
ZK3+770~750	V_2	V_1	V_1	V_1	0.444 2	双侧壁导坑	CRD 法
ZK3+750~720	IV_3	IV_3	$V_1 \sim IV_3$	IV_3	0.407 3	CRD 法	CD 法
ZK3+720~700	IV_3	IV_3	IV_2	IV_3	0.356 4	CRD 法	CD 法
ZK3+700~675	IV_3	IV_2	IV_2	IV_2	0.455 5	CRD 法	CD 法
ZK3+675~660	IV_2	IV_2	IV_2	IV_2	0.409 4	CD 法	CD 法
ZK3+660~640	IV_2	IV_2	$IV_3 \sim IV_2$	IV_2	0.404 3	CD 法	CD 法
ZK3+640~620	IV_2	IV_3	IV_2	IV_3	0.449 4	CD 法	CD 法
ZK3+620~600	IV_2	IV_2	IV_2	IV_2	0.416 5	CD 法	CD 法

表 5 老虎山隧道出口左线围岩等级对比

Table 5 Comparison of classification results of Laohushan tunnel right line

隧道里程	设计等级	实际等级	现场 BQ 法	本文方法	最大隶属等级可靠概率	设计工法	工法变更
YK3+818~798	V_2	V_2	V_2	V_2	0.774 5	双侧壁导坑	双侧壁导坑
YK3+798~778	V_2	V_1	V_1	V_1	0.515 4	双侧壁导坑	CRD 法
YK3+778~758	V_2	IV_3	$V_1 \sim IV_3$	IV_3	0.434 7	双侧壁导坑	CRD 法
YK3+758~738	IV_2	IV_3	IV_3	IV_3	0.352 9	CRD 法	CD 法
YK3+738~718	IV_2	IV_2	$IV_3 \sim IV_2$	IV_2	0.454 2	CRD 法	CD 法
YK3+718~698	IV_2	IV_2	IV_2	IV_2	0.478 0	CRD 法	CD 法
YK3+718~698	IV_2	IV_2	IV_2	IV_2	0.392 3	CD 法	CD 法
YK3+698~678	IV_3	IV_2	$IV_2 \sim IV_1$	IV_2	0.488 7	CD 法	CD 法
YK3+678~658	IV_3	IV_1	III	IV_1	0.413 7	CD 法	CD 法
YK3+658~638	IV_3	IV_2	IV_2	IV_2	0.445 7	CD 法	CD 法

施工方亦考虑继续以 CRD 法开挖，并按 V 一般进行支护。基于围岩等级可靠度评定方法，分别获取了现场实际围岩隶属于各亚级的可靠概率（见表 3），评定为 IV_3 ，且考虑隶属于 IV_2 级的可靠概率亦大于 V_1 级的可靠概率，故建议施工可采用 IV 加强进行支护。后续监控量测数据显示，该处围岩拱顶沉降与净空收敛值均在规范允许范围内，监测位移变化趋于稳定。

3.3 讨论

在老虎山隧道左线的施工过程中，针对同一掌子面不同区域围岩，不同地质人员分别对其进行现场地质调查及岩石强度试验，计算各 BQ 值，统计结果如图 3 所示。由图可知，即使是同一隧道里程掌子面，由于取样区间、仪器操作及个人经验认知等不同，尤其是当掌子面围岩存在小型破碎带或软弱夹层等岩体质量局部显著变化的情况下，所得 K_v 值致使 BQ 有很大的离散性，甚至出现了跳级现象。在隧道围岩亚级分级中，这种离散性与随机性直接影响了围岩级别的最终评定结果。而本文方法在分

级过程中考虑了岩体属性获取的不确定性及各指标的概率分布函数，充分利用了分类系统本身所蕴含的信息，克服了常规 BQ 法采用所谓的期望值引起的输入指标取值随意性大而导致计算结果鲁棒性差的缺陷。

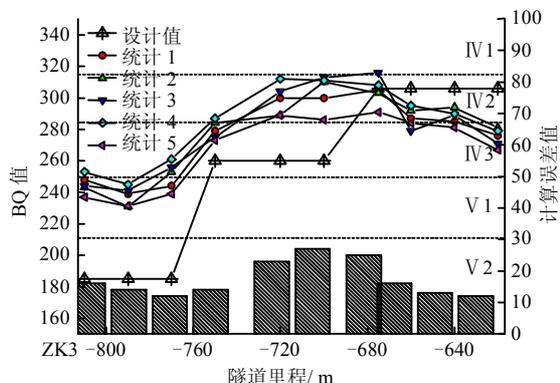


图 3 老虎山隧道左线不同围岩分类结果及误差分析
Fig.3 Classification results and error analysis of Laohushan tunnel right line

图 4 为老虎山隧道出口左线、右线已开挖段围

岩等级可靠概率及所评定结果，由图可知，隶属于各围岩等级的可靠指标均存在一定的延续性，由不同等级可靠指标可明显看出其变化趋势，体现了岩体结构本身在隧道施工过程中的延续性及彼此间的近相关性。而等级可靠性指标可定量地对这种地质属性的变化进行表征，为合理地确定工法转换区间提供数据支撑。虽然常规分类方法或评定指标也能通过其定量评定数值在一定程度上反映其相关性，如 v_p 波，岩石质量指标 RQD 值等，但须基于精确的岩体属性指标获取，且各指标值仅能反映等级的类间差别，无法对其类内差别及分类信息本身的模糊性作出合理的定量评判。

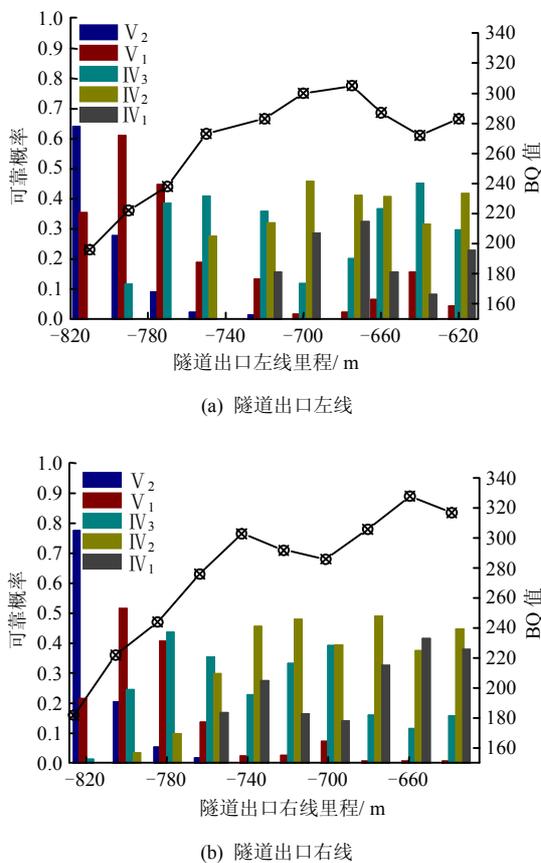


图4 老虎山隧道围岩等级可靠概率分布
Fig.4 Distribution of reliable probability attached to different surrounding rock levels in Laohushan tunnel

以 ZK3+720~700 为例，由于所得围岩等级可靠指标离散性较大，虽然评定等级一致，但其围岩最大隶属等级可靠概率偏低（评定为 IV₃ 的可靠概率为 0.356 4，评定为 IV₂ 的可靠概率为 0.316 8）。工程实际表明，该处各临近掌子面揭露围岩情况变化较大（见图 5），地质调查显示连续 2 个爆破循环内掌子面岩体较完整，而左上区域岩体破碎，呈镶嵌状，且发育有软弱夹层，层间结合差。单纯 BQ

法很难确定应针对哪一区域进行代表性体积节理数统计，并作出合理评定。如仅是对中部多处较完整岩体进行统计，则可评定为 III 级，造成潜在的施工风险；而如果仅针对局部破碎带及软弱夹层区进行 J_v 统计，则会得出围岩质量过差的评定结果。鉴于该处围岩等级可靠性指标较低，且实际揭露掌子面围岩持续发育有局部破碎带，施工方已对该处围岩进行了加固处理。



图5 ZK3+720 围岩掌子面照片
Fig.5 Photo of surrounding rock at working face ZK3+720

本文所提方法，由于充分考虑了 R_c 试验取样及 J_v 统计过程中的这种离散性、随机性问题，分析了其概率分布函数。从某种角度来讲，可靠指标大小可在一定程度上反映该处掌子面围岩信息的离散情况。

4 结 论

(1) 基于《工程岩体分级标准》，通过分析岩石强度及岩体完整程度等评价指标的概率分布规律，引入体系可靠度分析理论，构建了不同围岩等级功能函数，经 Monte Carlo 法计算围岩隶属于各评定等级的可靠概率，进而提出了基于国标 BQ 的围岩亚级分级可靠度分析方法。

(2) 围岩分级可靠度分析方法充分考虑了评价指标的不确定性及离散性，计算可靠性指标可更为直观地对围岩等级作出稳健评估，且可靠概率可在一定程度上反映掌子面围岩信息的离散程度，间接地将掌子面局部破碎带等反映在岩石强度、岩体完整程度等统计信息中。

(3) 等级可靠指标的延续性可对隧道施工过程中地质属性的变化情况进行定量表征，有助于工程地质人员据此对围岩质量的渐变过程进行动态评估，为合理确定隧道施工工法转换区间，优化支护参数提供数据支撑。

(4) 围岩分级的可靠度分析方法是基于 BQ 法所建, 具有明确的计算公式。由于工程中大多围岩分级体系多是综合定性、定量指标进行模糊评分确定, 对不同围岩分级评定指标甚至分级评价模型可考虑通过体系可靠度理论进行综合分析, 但就如何建立合理功能函数仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218-94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D70-2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] 中华人民共和国国家标准编写组. JTG/T D70-2010 公路隧道设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG/T D70-2010 Guidelines for design of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10003-2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10003-2005 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
The National Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. Code for engineering geological investigation of water conservancy and hydropower[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [6] 邬爱清, 柳赋铮. 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1514-1522.
WU Ai-qing, LIU Fu-zheng. Advancement and application of the standard of engineering classification of rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1514-1522.
- [7] 王明年, 刘大刚, 刘彪, 等. 公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1591-1594.
WANG Ming-nian, LIU Da-gang, LIU Biao, et al. Methods for surrounding rock sub-classification of road tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1591-1594.
- [8] 刘大刚. 公路隧道施工阶段岩体围岩亚级分级研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
LIU Da-gang. Study on rock mass sub-classification in construction stage for road tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [9] 肖云华. 双峰隧道围岩稳定性非线性系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
XIAO Yun-hua. Nonlinear systemic study on the stability of surrounding rock of Shuangfeng freeway tunnel[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [10] 陈守煜, 韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1857-1861.
CHEN Shou-yu, HAN Xiao-jun. Engineering method of variable fuzzy set for assessment of surrounding rock stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1857-1861.
- [11] 张鹏, 陈剑平, 肖云华, 等. 粗糙集-小波神经网络在隧道围岩分类中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 430-434.
ZHANG Peng, CHEN Jian-ping, XIAO Yun-hua, et al. Application of rough set-wavelet neural network to tunnel surrounding rock classification[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(3): 430-434.
- [12] 张亦飞, 程传国, 张海丰, 等. 公路隧道围岩的区间数组组合分类法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1916-1919.
ZHANG Yi-fei, CHENG Chuan-guo, ZHANG Hai-feng, et al. Interval numbers-based integrated classification method for surrounding rock of highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1916-1919.
- [13] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1450-1453.
LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Research on surrounding rock evaluation of underground engineering based on extension method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1450-1453.

- [14] 汪明武, 李丽, 金菊良. 围岩稳定性集对分析-可变模糊集综合评价模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 941—944.
WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. Set pair analysis-variable fuzzy set model for evaluation of stability of surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 941—944.
- [15] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 239—241.
FENG Xia-ting. Introduction to intelligent rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2000: 239—241.
- [16] 李德毅, 杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [17] 景诗庭, 朱永全, 宋玉香. 隧道结构可靠度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
JING Shi-ting, ZHU Yong-quan, SONG Yu-xiang. Reliability of tunnel structure[M]. Beijing: China Railway Press, 2002.
- [18] 张明. 结构可靠度分析-方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG Ming. Structural reliability analysis: methods and procedures[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [19] 王茹, 唐春安, 王述红. 岩石点荷载试验若干问题的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 130—133.
WANG Ru, TANG Chun-an, WANG Shu-hong. Study on several problems about point load test of rock[J]. **Journal of North Eastern University (Natural Science)**, 2008, 29(1): 130—133.
- [20] 郭曼丽. 试论岩石点荷载试验的适用性[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 488—494.
GUO Man-li. Discussion on adaptability of point load test of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 488—494.
- [21] 王维纲, 王明林. 点荷载试验的误差和相关分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(4): 309—319.
WANG Wei-gang, WANG Ming-lin. Errors and correlative analysis in point load tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1988, 7(4): 309—319.
- [22] HASSANI F P. Application of the point load index test to strength determination of rock and proposals for a new size-correction chart[C]//21st Symp. on Rock Mechanics. Missouri-Rolla: University of Missouri-Rolla, 1980.
- [23] FRANKLIN J A, PELLIS P, MCLACHLIN D, et al. 向桂馥译. 国际岩石力学学会实验方法委员会测定点荷载强度的建议方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1986, 5(1): 79—90.
FRANKLIN J A, PELLIS P, MCLACHLIN D, et al. Translated by XIANG Gui-fu. International society for rock mechanics experimental methods committee the suggested method of determination of point load strength[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1986, 5(1): 79—90.
- [24] 张国锋, 刘志双, 陈显坤, 等. 点荷载法测试易风化泥质岩强度的可靠性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 293—297.
ZHANG Guo-feng, LIU Zhi-shuang, CHEN Xian-kun, et al. Reliability analysis of measuring strongly weathered grey mudstone strength with point load measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 293—297.
- [25] KARZULOVIC A, GOODMAN R E. Determination of principle joint frequencies[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(6): 471—473.
- [26] KULATILAKE P, WU T H. The density of discontinuity traces in sampling windows[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1984, 21(6): 345—347.
- [27] WU Qing, KULATILAKE PHSW, TANG Hui-ming. Comparison of rock discontinuity mean trace length and density estimation methods using discontinuity data from an outcrop in Wenchuan area, China[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38: 258—268.
- [28] 于国新, 白明洲, 许兆义. 铁路隧道围岩分级的知识挖掘[J]. 铁道学报, 2007, 29(4): 126—130.
YU Guo-xin, BAI Ming-zhou, XU Zhao-yi. Knowledge mining of classification of railway tunnel surrounding rock[J]. **Journal of The China Railway Society**, 2007, 29(4): 126—130.
- [29] 曹晋华. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
CAO Jin-hua. An introduction to mathematics of reliability[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [30] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学: 原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003.
YANG Lun-biao, GAO Ying-yi. Fuzzy mathematics: theory and application[M]. Beijing: South China University of Technology Press, 2003.