岩土参数模糊隶属函数的构造方法及应用

苏永华
（湖南大学土工程木学院，湖南 长沙 410082）

摘 要：研究了隶属函数的特点，指出其在主值区间特点上表现为宽域型和窄域型，在过渡带形式特点上表现为突跳式、线性式和非线性式，在函数图形控制点上有最清晰和最模糊点。根据隶属函数的特点和隶属度总和为 1 的原理，提出了完整隶属函数的构造方式和函数具体形式参数的计算方法。根据岩体力学和模糊综合评判原理，以岩体的稳定性模糊分类为例，证明在不同的原函数条件下采用上述所提方法构造隶属函数，就具体模糊隶属度值而言存在差异，但最后分类结果一致。作为该隶属函数构造方法的应用，考虑岩体单轴抗压强度、吸水软化性、完整性、岩溶发育等地质条件，山地类型、坡地类型等地理条件，建立了西南山区公路岩质类建设场地模糊分类系统，并将该系统应用于某山区公路建设场地的分类，所得分类结果被施工和设计采用。

关键词：岩土工程；隶属函数；模糊分类；山区公路；建设场地
中图分类号：TU413.6 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1772－08

作者简介：苏永华(1966－)，男，湖南涟源人，博士，教授，博士生导师，从事边坡工程、地下结构工程可靠性领域的科研和教学工作。E-mail: syh5327@hnu.cn。

Constructing method of fuzzy membership function of geotechnical parameters and its application

SU Yong-hua
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on studies on the characteristics of membership function, it was indicated that its principal interval could be divided into wide domain model and narrow domain model and that there were three types of its transitional zone forms, namely mutation, linear and nonlinear, and there were the clearest point and the most fuzzy point among the reference point of the function graph. According to the characteristics of membership function and the theory of the summation of membership degree equal to 1, the constructing method of integral fuzzy membership function and the calculation method of the parameters were brought out. Based on rock mechanics and the theory of fuzzy synthetical assessment and taking the fuzzy synthetical classification of rock stability as an example, it was proved that although there were differences among concrete values of fuzzy membership, the final classifications were consistent when the membership functions were constructed by different basic functions according to the above method. As an application of this constructing method of integral fuzzy membership function, the fuzzy classification system of rock construction site of highways in southwest mountainous region was established. Some geomechanical conditions, such as uniaxial compressive strength, softening coefficient because of absorbing water, integrated modulus and karst development degree, and some geographical conditions, such as the mountain land type, slope land type, were taken into account in the system. Finally, this system was accepted by the design and construction engineers, and was used to classify a construction site of highways in mountainous area.

Key words: geotechnical engineering; membership function; fuzzy classification; mountainous highway; construction site

0 引 言

对于岩土物理、力学、工程性质的模糊性，目前主要采用模糊数学方法进行研究。模糊数学的重点在于确定参数对于某一概念或性质的从属程度。采用模糊数学描述岩土的模糊性时，其中最基本问题之一是隶属函数的形式[1]。在实际工程中，作为隶属函数的函数形式很多，其中比较常用的有岭形函数[1]、正态

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50378036)；湖南省交通厅项目（200503）
收稿日期：2007－01－19

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

函数[2-3]、三角形模糊数[3]、梯形函数[4]及直线形函数[5]或分段式线性式函数等。但对于某一工程或研究对象，在选定隶属函数时，通常采用两类方法，第一类方法是模糊统计法，该法是在具有大量的岩土参数模糊样本情况下，对参数值分段统计，根据实际统计数据数值范围，拟合统计曲线的隶属函数方程[6-8]。另一类方法是根据一般经验和主观判断，从常用的分布函数中选取或直接按经验赋值。这两种隶属函数确定方法对岩土隶属参数的模糊性研究起到了很大的推动作用，但也存在一些疑虑和问题。对于统计方法，虽然确定的隶属函数具有较大的准确性，但需要大量的模糊样本，在工程中难于实现。主观方法确定的函数，其形状的选择依赖于专家意见，不能推断一种函数类型比另一种函数类型更适合。在构造中加入了过多的人为因素作用（专家知识），带有较大的随意性[8]。分析结论的一致性如何没有保证。本文将通过分析岩体力学参数的特点，探讨其隶属函数建立的基本准则，研究不同隶属函数下最终分析结论的一致性，建立隶属函数的构造方式。

1　岩土隶属函数特征

工程物理力学模糊性参数描述函数，其值域区间为[0,1]，在形状特征上，可以划分为最清晰区域、最模糊区域和过渡区域三部分。按照隶属度定义，当参数的某一值的归属最清晰时，其隶属度为 0 或 1，最模糊时隶属度为 0.5，在（0，0.5）和（0.5，1）之间为过渡区域。同时对于分段隶属函数值在不同区域的隶属度也经历过渡区域。在图形特征上，隶属度为 1 的区间称为隶属函数主值区间[9]。主值区间的大小直接影响隶属函数曲线的顶部形状。如果主值区间是点区间，为了研究方便，称为窄域隶属函数，如图 1 所示；如果主值区间是连续的无限区间，称为宽域隶属函数，如图 2 所示。

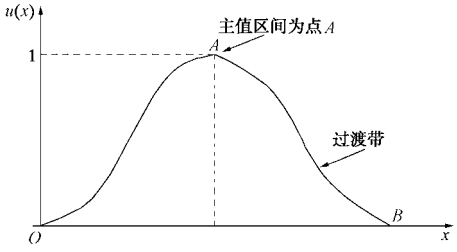


图 1　窄域型隶属函数示意图

Fig. 1 The model of narrow range membership function

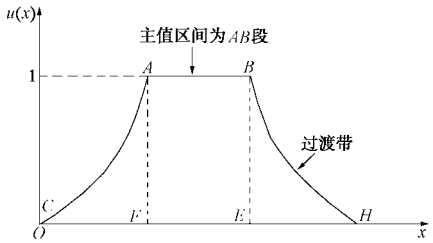


图 2　宽域型隶属函数示意图

Fig. 2 The model of wide range membership function

过渡带是位于最清晰点和最模糊点之间，根据大量的文献研究总结，过渡带主要表现为突跳式、线性式和非线性式三种。突跳式出现在分段的非连续隶属函数中，如文献[10]对于非连续性隶属函数就采用了这种形式。表 1 是岩体溶蚀发育情况的隶属函数取值表，其特征见图 3，其相应的过渡特带为突跳式。在某些连续的分段隶属函数形式中也有类似的特征。

表 1　溶蚀发育稳定性隶属度取值表

Table 1 The table for stability membership degree of karst erosion development

溶蚀发育情况	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
极发育　(*)	0.05	0.15	0.35	0.45
较发育　(Δ)	0.10	0.30	0.40	0.20
不发育　(O)	0.40	0.30	0.20	0.10

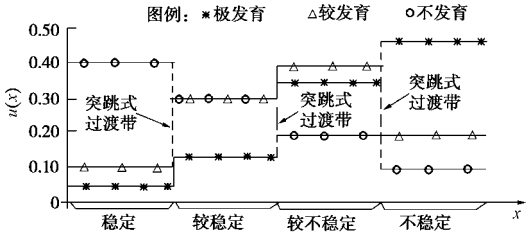


图 3　岩体溶蚀发育隶属函数突跳式过渡带示意图

Fig. 3 The jump transition extent of membership function with magmatic rock karst erosion growth

在连续隶属函数中，其过渡带是连续的。可以是线性或非线性形式。具体表现为直线式的线性、非线性式的下凹型和上凸型三种具体形式[9]，如图 4 所示。

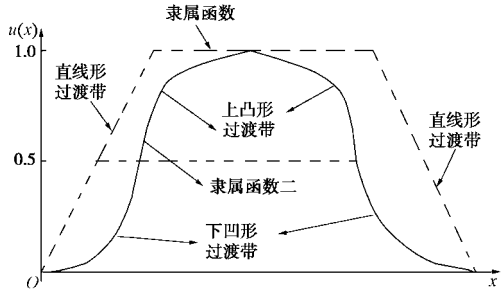


图 4　隶属函数过渡带的三种形式

Fig. 4 Three forms of membership function transition extent

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 隶属函数形态选择

对于岩土稳定模糊性分类研究，实际是评判因素集到决策评语集的映射。决策评语集由模糊性因子组成，每一评判单因素与决策评语集对应划分成相应的区段，所以决策评语集是多相模糊集。多相模糊集中相邻两相的分界点是最模糊的点，区段的中点是模糊集中最清晰的点，该点对于所属模糊相隶属度为 1，对于相邻模糊相隶属度为 0。在模糊评判中，通常认为最模糊点是相邻两相的中点[10]。由于岩土力学评判因素的模糊性不是均匀的或线性的，因此其模糊集的最模糊点应该在区间分段的端点而不在相邻相的中点．同时在岩土力学性质函数参数的模糊分析中，除了参数的两个极端外，如要将一区间范围内的一段连续子区间值清晰地归为某一属性，在理论上是难以确定的。因此，在中间区段内，主值区间通常是一个点区间，隶属函数形式采用窄域型。最模糊点和清晰点这些关键点确定后，就进行选定隶属函数的曲线形式。如果判别因素集某区段元素在评语决策模糊集中某区段的隶属程度随着元素的变化成线性变化，则选择线性过渡带（如三角模糊数和梯形分布）；如果越靠近最清晰点处的元素对于相应的模糊相的隶属度越剧烈，可以选择下凹型过渡带（如尖Γ 型等）；如果变化平缓，可以选择上凸型过渡带（如正态型、岭型等）。

3 完整隶属函数构造

根据上述分析，本文提出隶属函数的具体构造方法如下：

设隶属函数为 $u(x)$，将研究因素范围值划分为 n 个级别，如图 5 所示，对于第一个级别，划分的端点通常为 $x \le b_0$，最后一个级别的端点通常为 $x > b_{n-1}$。对于第一区间和最后一个区间部分采用宽域方式。对于第一个级别实际其区间为[0， b_0]，中点为 $x = a_1 = \dfrac{b_0 + b_1}{2}$。对于第一级别区间，根据隶属模糊原则，在[0，$a_0$=$b_0$/2]范围内，令 $u_1^{(1)} = 1$；在[a_0= b_0/2，b_0]区间内，根据条件 $u\left(\dfrac{b_0}{2}\right) = 1$，$u(b_0) = 0.5$ 确定 $u(x)$ 的相关系数，从而确定 $u(x)$ 的具体形式为 $u_1^{(2)}$。对于第二级别区间[b_0， b_1]，利用条件 $u(b_0) = 0.5$，$u(a_1) = 1$ 确定 $u(x)$ 的具体表达形式 $u_2^{(2)}$。根据总隶属度为 1 的原则，得到 $u_1^{(3)} = 1 - u_2^{(2)}$。

对于最后一个区间，端点值为 $x > b_{n-1}$，取点 $a_n = b_{n-1} + 0.5b_{n-1}$ 作为区间的中点，当 $x > a_n$ 时，采用宽域函数形式，令 $u(x) = 1$，在［$b_{n\text{-}1}$,a_n）段内，按照 $u(b_{n-1}) = 0.5$，$u(a_n) = 1$，确定通式 $u(x)$ 中的系数，即得到其具体表达式 $u_n^{(2)}$；对于在中间级别区间内，隶属函数的确定方法均采用窄域函数方式。每一个中间级别区间隶属函数的建立都牵涉到其前边和后边区间相邻的半个区间部分。以第 n-1 个级别区间[$b_{n\text{-}2}$，$b_{n\text{-}1}$]为例，说明构造基本过程：

（1）$x < a_{n-2}$ 和 $x > a_n$，隶属函数值（隶属度）为 0，即 $u(x) = 0$。

（2）在段［$a_{n\text{-}2}$,$b_{n\text{-}2}$］内，首先计算前一区间的后半部的隶属函数，即 $u(a_{n-2}) = 1$，$u(b_{n-2}) = 0.5$ 确定 $u_{n-2}^{(3)}$，然后按照 $u_{n-1}^{(1)} = 1 - u_{n-2}^{(3)}$。

（3）在段［$b_{n\text{-}2}$，$a_{n\text{-}1}$），［$a_{n\text{-}1}$，$b_{n\text{-}1}$）内，可根据 $u(a_{n-1}) = 1$，$u(b_{n-2}) = 0.5$，$u(b_{n-1}) = 0.5$ 确定其具体表达式 $u_{n-1}^{(2)}$，$u_{n-1}^{(3)}$。

（4）在段［$b_{n\text{-}1}$,a_n）内，首先由 $u(b_{n-1}) = 0.5$，$u(a_n) = 1$ 确定 $u_n^{(2)}$，根据 $u_n^{(2)} + u_{n-1}^{(4)} = 1$，确定出 $u_n^{(2)} = 1 - u_{n-1}^{(4)}$。

根据上述原则就完全确定了各个级别区间的隶属函数。

4 分类结果的一致性

根据上述模糊隶属函数构造方法，不同的隶属函数对于同一参数得出的隶属度在数值上有差异，但最终的模糊结论一致。下面以西部某公路建设场地岩体模糊分类为例说明上述隶属函数构造方法的这一性质。

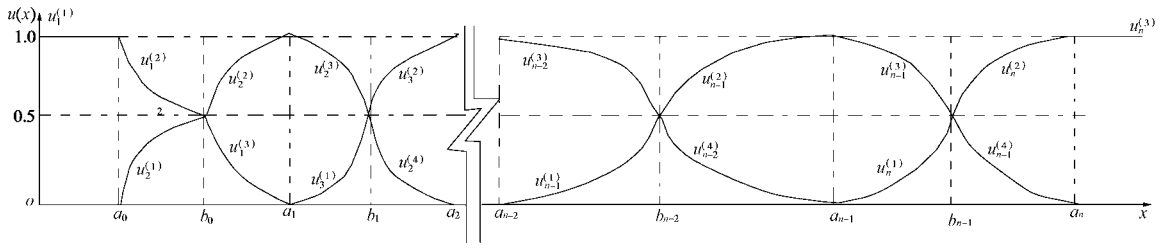


图 5 宽域与窄域方式结合构造隶属函数全过程示意图

Fig. 5 The whole course of constructing membership function by combining narrow with wide modes

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.1　综合模糊评判方法概述

不失一般性，设在某一岩体工程稳定性分类研究中，考虑的影响因素有 m 个，分别表示为 $u_1,u_2,u_3,\mathrm{L},u_m$。依工程的具体需要，将岩体分为 n 个等级 $v_1,v_2,v_3,\mathrm{L},v_n$。根据模糊评判原理，可以给定两个论域：

$$\left.\begin{aligned} U&=\{u_1,u_2,\mathrm{L},u_n\}\\ V&=\{v_1,v_2,\mathrm{L},v_n\} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中，U 代表综合评判的因素所组成的集合，V 代表决策评语所组成的集合。

决策评语一般取为 4～5 级，即决策评语模糊集由 4～5 相组成，v_1=I 表示很好，v_2=II 表示好，v_3=III 表示一般，v_4= IV 表示不好，v_5=V 表示很不好，则评语集集为：$V=\{v_1,v_2,\mathrm{L},v_n\}$={I, II, III, IV, V}={很好，好，一般，不好，很不好}。

在岩体工程的模糊评价分析中，首先考虑 U 中 $u_i\ (i=1,2,\mathrm{L},m)$ 作单因素评判，从因素 u_i 考虑该事物对决策评语 v_j 的隶属度 r_{ij}，这样第 i 个因素 u_i 的单因素评判集

$$r_i=(r_{i1},r_{i2},\mathrm{L},r_{in}) \quad 。 \quad (2)$$

它是决策评语 V 上的模糊子集。有 m 个考虑因素的评判就构成了总的评判矩阵 R。R 是考虑因素论域 U 到决策论域 V 的一个模糊关系。可表示为 $R=(r_{ij})_{m\times n}$，在所考虑的因素 $u_i\ (i=1,2,\mathrm{L},m)$ 之间，各因素在决策中所起的作用不同，于是定义一个权重 $\tilde{W}$，$\tilde{W}$称为 U 的因素重要度模糊子集，可表示为

$$\tilde{W}=(w_1',w_2',\mathrm{L},w_m') \quad 。 \quad (3)$$

当模糊子集 $\tilde{W}$和模糊矩阵 R 为已知时，即可作模糊变换进行综合评判：

$$\tilde{B}=\tilde{W}\circ R=(b_1,b_2,\mathrm{L},b_n) \quad 。 \quad (4)$$

$\tilde{B}=(b_1,b_2,\mathrm{L},b_n)$ 成为决策评语集上 V 的等级模糊子集。得到了模糊子集 $\tilde{B}$后，则可根据最大隶属原则确定岩体的质量类别。

4.2　不同隶属函数的等效性

（1）隶属函数构造

在岩体工程中影响其稳定性的主要因素有单轴饱和抗压强度 σ_c（MPa）、岩石质量指标 RQD（%）、岩石软化系数 K_w、岩体完整性系数 K_v、结构面 F 发育和胶结情况。则有

$$U=\{\mathrm{RQD},\ \sigma_c,\ K_v,\ K_w,\ F\} \quad , \quad (5)$$

参照文献[11]，σ_c，RQD（%），K_w，K_v 与决策评语模糊集对应如表 2。按照本文前述的完整隶属函数构造方法和图 5，可以构造出各因素在各区间内以正态函数、岭形函数、梯形函数等为基本函数的各个区间的隶属函数。结构面 F 隶属函数按表 3 取值。

表 2 影响因素及其与评语集元素的对应区间划分

Table 2 The corresponding range partition of factors and evaluation set elements

指标类型	RQD/%	σ/MPa	K_V	K_w
I	>90	>200	>0.9	>0.8
II	75～90	100～200	0.75～0.9	0.68～0.8
III	50～75	50～100	0.45～0.75	0.55～0.68
IV	25～50	25～50	0.2～0.45	0.4～0.55
V	<25	<25	<0.2	<0.4

表 3 裂隙因素隶属度取值表

Table 3 The table of membership degree for fissure factors

类型	稳定类型隶属度值			
	裂隙不发育或虽然发育但胶结良好	裂隙发育但多数胶结充填	裂隙发育但仅部分胶结充填	裂隙发育、充填少或根本没有充填
I	0.45	0.30	0.10	0.05
II	0.35	0.45	0.20	0.10
III	0.10	0.10	0.35	0.15
IV	0.06	0.10	0.25	0.25
V	0.04	0.05	0.20	0.45

（2）隶属函数的等效性

某公路通过段地质情况：根据选线地质勘探、声波测试资料、室内岩石力学试验和排水导洞地质素描等资料综合分析，山坡岩性主要为页岩，呈灰白色、紫色、青灰色的中厚层~厚层结构，砂质、砂泥质结构。节理裂隙发育，节理面部分被泥质及页岩破碎角砾充填。平均 RQD 为 93%，单轴抗压强度平均值为 125.64 MPa，平均完整性系数为 0.28，同时根据吸水软化试验，其相应的软化系数为 0.58。

则根据所构造的隶属函数，能分别求得在以正态函数、岭形函数、梯形函数等为基本函数的隶属函数下的隶属度，其结果见表 4～7。

表 4 σ_c 在不同隶属函数下的隶属度

Table 4 Membership degree of σ_c from different membership functions

函数	类型				
	I	II	III	IV	V
正态型	0	0.8491	0.1509	0	0
岭型	0	0.8606	0.1394	0	0
三角型	0	0.7564	0.2436	0	0

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 RQD 在不同隶属函数下的隶属度

Table 5 Membership degree of RQD from different membership functions

函数	类型				
	I	II	III	IV	V
正态型	0.8680	0.1320	0	0	0
岭型	0.9044	0.0955	0	0	0
三角型	0.8000	0.2000	0	0	0

表 6 K_v 在不同隶属函数下的隶属度

Table 6 Membership degree of K_v from different membership functions

函数	类型				
	I	II	III	IV	V
正态型	0	0	0	0.9146	0.0854
岭型	0	0	0	0.9220	0.0780
三角型	0	0	0	0.8200	0.1700

表 7 K_w 在不同隶属函数下的隶属度

Table 7 Membership degree of K_w from different membership functions

函数	类型				
	I	II	III	IV	V
正态型	0	0	0.8189	0.1811	0
岭型	0	0	0.8316	0.1684	0
三角型	0	0	0.7308	0.2692	0

根据隶属函数的不同，r_{ij} 不同。第 i 个因素 u_i 的单因素评判集 $r_i=(r_{i1},r_{i2},\mathrm{L}\ ,r_{in})$ 不同，总评判矩阵不同。5 个因素中除结构面充填情况是离散型，只有 1 个 $r_i=(r_{i1},r_{i2},\mathrm{L}\ ,r_{in})$。其他 4 个因素各有 3 个不同的 $r_i=(r_{i1},r_{i2},\mathrm{L}\ ,r_{in})$。根据排列组合，总评判矩阵有 81 种不同结构。$U$ 的因素重要度模糊子集 w 通过访问专家并在统计基础上，得出 $w'=(0.195,0.193,0.203,0.198,0.200)$。对于 RQD，$\sigma_c$，$K_v$，$K_w$ 的隶属函数分别取为岭型、三角型和岭型隶属函数，则总评判矩阵为

$$R=\begin{bmatrix}0.9044 & 0.0955 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.7564 & 0.2436 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0.820 & 0.178\\ 0 & 0 & 0.8316 & 0.1684 & 0\\ 0.1 & 0.15 & 0.35 & 0.25 & 0.20\end{bmatrix}。$$

根据 $B'=w\circ R=(b_1,b_2,\mathrm{L}\ ,b_n)$ 归一化后有 $B'=$（0.1964，0.1946，0.2817，0.2498，0.07613）。

最大隶属度为 0.2817,根据最大隶属原则，岩体质量属于 III，即质量一般的岩体。

如果 RQD, σ_c, K_v, K_w 分别采用正态型、岭型、三角型和岭型，则总评判矩阵为

$$R=\begin{bmatrix}0.8680 & 0.1320 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.8606 & 0.1349 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0.8200 & 0.178\\ 0 & 0 & 0.8316 & 0.1684 & 0\\ 0.1 & 0.15 & 0.35 & 0.25 & 0.20\end{bmatrix}。$$

根据相同运算，得到 $B'=$(0.1893，0.2176，0.2607，0.2498，0.0761)，同样得出属于 III，为质量一般的岩体。

取其他任何组合，均可得到岩体的质量是一般岩体结论。这一结果说明，按照本文方法采用不同基本函数构造岩土体物理力学量隶属函数，虽然计算得到的隶属度存在差别，但分类结果一致。这一结论解决了以往进行模糊分类时，隶属函数选取的随意性问题，给隶属函数构造提供了准则和方法。

5 西南山区公路路基地质条件模糊分类系统

5.1 影响因素及区间划分

目前西南山区公路建设已经大规模进行。由于山区地理、地质条件的复杂性、模糊性，对于路基建造所经过区域没有一个综合性的分类系统。本文利用上述研究的模糊隶属函数构造方法，建立西南山区岩质类地表条件下，公路路基地质条件模糊分类的基本方法。

西南部山区特点是沟壑纵横、河谷深切，岩溶发育。地表条件总体可分为土质和岩质两类[12]。岩质类是指基岩埋藏的深度较浅，表土覆盖层薄，基岩裸露或半裸露的地区，工程活动的主要对象是处理风化岩体。土质类是基岩埋藏深度较大，表层覆盖物比较厚，工程活动的主要对象是岩石碎屑或土石混杂体。

对于岩质类地层，影响路基建设难易程度及其稳定性的主要影响因素，在地质条件[12]方面有单轴抗压强度 σ_c、岩体完整性系数 K_v，岩石软化系数 K_w 和岩溶发育率 K_L，地理条件[12]有山地起伏程度 H、坡地陡缓程度 β 等。

则因素集 $U=\{\sigma_c, K_v, K_w, K_L, H, \beta\}$。根据通常的工程经验，按路基稳定性大小和建设的易难程度，将建设场地分为 5 个类型，分别表示为 I，II，III，IV 和 V。同样评价集为 V={I，II，III，IV，V}。

对于 σ_c，K_V，K_w 相应的区间划分见上表 2。由于公路结构是带状结构，相对于研究区域可以看作线状结构，岩溶发育程度以线岩溶率作为表征指标。线岩溶率用 K_L 表示，按照下式计算：

$$K_L=L_1/L\quad , \tag{6}$$

式中，L_1 为测量线上的溶洞、溶隙累计长度，L 为测量线总长度。

根据研究，岩溶发育程度对工程建设及稳定性的影响程度[12]可采用表 8 所示的对应关系。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 8 岩溶发育程度与场地类型对应关系

Table 8 The corresponding relationship between karst erosion development degree and site condition

岩溶率发育/%	岩溶发育程度	场地类别
<3	弱发育岩溶区	Ⅰ
3～10	较少发育岩溶区	Ⅱ
10～15	一般发育岩溶区	Ⅲ
15～25	强烈发育岩溶区	Ⅳ
>25	极强烈发育岩溶区	Ⅴ

一个地区山地相对高度愈大，切割愈强烈，地表起伏愈显著，自然条件一般也愈复杂。公路工程是一个带状工程，直接影响施工难易及路基稳定性程度的是线路所过之处各地的相对高差 H，即地形的起伏程度。地形起伏程度描述与路基建设场地类型有如表 9 的关系[12]。

表 9 山地类型(H)与场地类型的对应关系

Table 9 The corresponding relationship between mountainous area condition and site condition

相对高差 H/m	切割程度	类别
<15	平缓	I
15～50	轻微切割	II
50～100	一般切割	III
100～500	中等切割	IV
>500	强烈切割	V

山地的另一重要因素是地势的陡缓程度，即坡地特征。参照国际地理学会的坡地分级，根据公路工程的实际，坡地倾角与建设场地类型对应关系见表 10。

表 10 坡度陡缓与场地类型的对应关系

Table 10 The corresponding relationship between slope steep degree and site condition

倾角β/(°)	陡缓情况描述	类别
<10	缓倾斜坡	I
10～20	斜坡	II
20～30	陡坡	III
30～45	急坡	IV
>45	急陡坡	V

5.2 隶属函数构造及参数确定

根据前述隶属函数构造方法知，原函数的形式对最后分类结果没有影响，在构造山区公路岩质类地形建设场地模糊分类系统时，选最为常用的正态函数作为原函数，其通用形式为

$$u(x)=\mathrm{e}^{-\left[\frac{(x-x_0)}{c}\right]^2}\quad , \tag{7}$$

式中，x_0 为最清晰点，$u(x_0)=1$，x_0 通常为模糊区间的中点；

$$c=\frac{(a_1-a_2)}{1.66}\quad , \tag{8}$$

其中 a_1 和 a_2 分别表示为该级别物理量的模糊区间边界值[11]。

根据式（7），(8）和前述研究的区间划分，可以得到 σ_c，K_v，K_w，K_L，H，β 等因素隶属函数的各参数值 x_0 和 c，汇总为表 11。这样就确定了各因素在各区段的隶属函数。

如果获得了某一地区的 σ_c，K_v，K_w，K_L，H，β 等参数值，则隶属函数和图 5 计算各因素参数的隶属度，得到模糊矩阵 R。同时可以通过统计分析等多种方法得出 U 的因素重要度模糊子集 $\tilde{B}$。根据模糊评判计算方法式（4）有

$$\tilde{B}=\tilde{A}\circ R=(b_1,b_2,\mathrm{L}\ ,b_n)\quad 。 \tag{9}$$

则根据最大隶属原则可以确定建设场地的类型。

5.3 某公路建设场地模糊分类

长吉（长沙—吉首）高速公路溆浦连接线第三施工合同段地处雪峰山北麓坡脚，属剥蚀残丘地貌，沿线为山谷地势，高差大，山体陡峻，山地坡度β平均在 35 ° 左右，相对高差 H 在 190～390 m 之间，平均为 200 m。岩层完整性系数 K_v 大约为 0.4，岩体软化系数 K_w 为 0.45，岩块单轴饱和抗压强度σ_c 为 5 MPa，岩溶发育率 K_L 为 8%左右，则可以计算得到模糊矩阵

$$R=(r_{ij})_{6\times5}=[r_\sigma,r_{k_v},r_{k_w},r_{K_L},r_H,r_\beta]^{\mathrm{T}}$$

$$=\begin{bmatrix}0&0&0&0&1\\0&0&0.21965&0.78035&0\\0&0.92631&0.07369&0&0\\0&0.88115&0.11885&0&0\\0&0&0.15821&0.84179&0\\0&0&0.07369&0.92631&0\end{bmatrix}。$$

表 11 各级别区间隶属函数常系数

Table 11 The constant coefficients of membership functions

类别	σ_c/MPa		K_v/%		K_w/%		K/%		H/m		β/(°)	
	x_0	c	x_0	c	x_0	c	x_0	c	x_0	c	x_0	c
I	300.0	120.11	95.0	6.02	90.0	12.05	1.5	1.81	1.5	1.81	5.0	6.02
II	150.0	60.24	82.5	9.04	74.0	7.24	6.5	4.22	6.5	4.22	15.0	6.02
III	75.0	30.12	60.0	18.07	61.5	7.83	12.5	3.01	12.5	3.01	25.0	6.02
IV	37.5	15.06	32.5	15.06	47.5	9.04	20.0	6.02	20.0	6.02	37.5	9.04
V	12.5	15.06	10.0	12.05	20.0	24.10	37.5	15.01	37.5	15.01	67.5	27.03

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据现场调查，对于邵怀高速公路溆浦连接线工程，在 6 类因素中，各类的重要度模糊子集为 $W=(w_1',w_2',\cdots,w_m')=(0.08,0.08,0.12,0.18,0.27,0.27)$，则 $B=W\circ R=(b_1,b_2,\cdots,b_n)=(0,\ 0.26976,\ 0.11042,\ 0.53982,0.08)$。

最大隶属度为 0.5398，对应的评语为第 IV 类。根据最大模糊隶属原则，该施工标段属于第四类建设场地。对于第四类路基建设场地，路基的稳定性差且施工困难。为了路基的稳定性，建议在设计和施工上采取如下措施：

(1) 为了降低路基造价和工期，建议该标段路基采用半挖半填形式。

(2) 半挖半填交接面采用折线台阶型，且在交接面上采用土工格栅、土工格室作为加固材料，以加强天然（挖方）路基和填方路基之间的联结强度，防止路基沿交接面破坏和沉降差异。

(3) 在路基施工前，加强排水措施，将挖方路基部分的水位将到填方路基起点高度以下。

(4) 采用重力式挡土墙作为填方路基外坡面支挡结构，且在挡土墙施工完毕后再施工填方路基。

这些措施被设计、建设投资方及施工单位接受。作为施工建设单价、路基加固设计方案的重要依据之一。

6 讨 论

目前岩土的各种分类方法，考虑的因素非常单一。如《公路路基设计规范》(JTG D30—2004) 中，对于岩质边坡的分类，仅考虑了岩体的完整性。国标《工程岩体分级标准》(GB50218—94) 中，考虑了岩体完整性和其力学性质两类因素。这些分类方法在本质上是对岩体质量评价。公路工程是带状工程，不但关注岩土质量的好坏，更关注建设场地条件。岩土质量的好坏仅是建设场地条件的一个方面。地形、地势和气候对工程的稳定性、支挡方法、施工方法影响更大。因此，本文在模糊理论上提出的西南山区公路地质条件模糊分类方法，严格说应该建设场地的分类方法，不但包含对岩土质量的评价，而且包含了施工的难易程度，也为支挡选型提供参考依据。因此考虑的因素比现有的方法更全面。

7 结 语

本文在研究总结隶属函数基本形式、主要特点的基础上，提出了完整的隶属函数的构造和建立方法。通过对该方法在岩体模糊分类综合评判原理中的应用，证明了所提出的隶属函数构造方法，当采用不同的原函数时，对于分析结果的唯一性。根据西南山区的特点，考虑岩体单轴抗压强度、完整性和软化特性、浅层岩溶发育程度等地质条件和山地相对高度、切割强度及坡地特征等地理条件，利用所研究的隶属函数构造方法，建立了西南山区岩质类地区公路建设场地的模糊分类系统。采用该分类系统研究了长－吉高速公路溆浦连接线第三施工标段场地的所属类型，分类结果符合实际，被施工、设计和投资方接受。

参考文献：

[1] 张世海, 刘叔军, 欧进萍, 王光远. 基于二维隶属函数的场地模糊分类及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 912－918. (ZHANG Shi-hai, LIU Shu-jun, OU Jin-ping, WANG Guang-yuan. Site classification method and its application based on two dimensional membership function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 912－918. (in Chinese))

[2] 霍润科, 李 宁, 马英军. 工程岩体 *c*, *φ*值选取的模糊—关联分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(9): 1481－1485. (HUO Run-ke, LI Ning, MA Ying-jun. Fuzzy relationnal analysis on selection of *c* and *φ* for engineering rockmasses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(9): 1481－1485. (in Chinese))

[3] 边亦海, 黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 664－669. (BIAN Yi-hai, HUANG Hong-wei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 664－669. (in Chinese))

[4] 刘环宇, 王思敬, 曾钱帮, 胡 波, 夏正义. 基于模糊神经网络兖州矿区立井井筒非采动破裂的判别[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1237－1241. (LIU Huan-yu, WANG Si-jing, ZENG Qian-bang, HU Bo, XIA Zheng-yi. Judgement for non-mining fracture of shaft-lining in Yanzhou mine based on fuzzy neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1237－1241. (in Chinese))

[5] 谭晓慧. 边坡稳定分析的模糊概率法[J]. 合肥工业大学学报, 2001, **24**(3): 442－427. (TAN Xiao-hui. The stability analysis of slope by fuzzy probability method[J]. Journal of

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hefei University of Technology, 2001, **24**(3): 442－427. (in Chinese))

[6] 申玉生, 赵玉光. 双连拱隧道围岩稳定性的模糊概率分析研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1358－1362. (SHEN Yu-sheng, ZHAO Yu-Guang. Research on fuzzy probability analysis of stability of surrounding rock in double-arch tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1358－1362. (in Chinese))

[7] 丁德磬, 张志军. 圆滑滑动边坡反演设计的自适应神经模糊推理方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 202－207. (DING De-qing, ZHANG Zhi-jun. Study on ANFIS-based approach for inverse design of with circular failure surface sliding slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 202－207. (in Chinese))

[8] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(4): 409－504. (XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming, SHI An-chi. Slope stability analysis using fuzzy set theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(4): 409－504. (in Chinese))

[9] 王　浩, 庄钊文. 模糊可靠性分析中的隶属函数确定[J]. 电子产品可靠性与环境实验, 2000(4): 2－7. (WANG Hao, ZHUANG Zhao-wen. Determination of membership function in fuzzy reliability[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2000(4): 2－7. (in Chinese))

[10] 赵明华, 程　晔, 曹文贵. 桥梁基桩桩端溶洞顶板稳定性模糊分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(8): 1376－1384. (ZHAO Ming-hua, CHENG Ye, CAO Wen-gui. Fuzzy method for the stability analysis of cave roof underground pile tip in karst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(8): 1376－1384. (in Chinese))

[11] 苏永华, 何满潮, 孙晓明. 岩体模糊分类中隶属函数的等效性[J]. 北京科技大学学报, 2007, **29**(27): 660－665. (SU Yong-hua, HE Man-chao, SUN Xiao-ming. Equivalent characteristic of different subject function type on rock mass fuzzy classification[J]. Journal of Beijing Science and Technology University, 2007, **29**(27): 660－665. (in Chinese))

[12] 黄新进. 山区公路半填半挖路基稳定性分析方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2006. (HUANG Xin-jing. Stability analysis method for half filling and half digging roadbed in mountain area[D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese))

第二届全国土力学教学研讨会论文征集通知

第二届全国土力学教学研讨会将于 2008 年 10 月在南京举行。本会议旨在对土力学教学进行全国范围的交流研讨，对《土力学》，《基础工程》及辐射的相关岩土工程课程（如《土工合成材料》、《环境岩土工程》、《城市地下工程》、《城市岩土工程》等），研究生的《高等土力学》及相关的岩土工程课程的教学理念、教学方法、教学经验、提供交流的平台。会议将邀请国内外著名学者、专家做学术报告并出版正式论文集。欢迎您投稿并参加会议。

主办单位

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位

东南大学岩土工程研究所

协办单位：

河海大学岩土工程研究所

南京工业大学土木学院

会议主题

土力学教学改革；土力学教学法；土力学内容体系；课程建设；教学研究；教学实验室；研究生教学；继续教育；教学中问题。

重要截止日期

研讨会论文将正式编辑出版，论文格式请按《岩土工程学报》论文体例，欢迎投稿。

2008 年 3 月 10 日：作者提交论文全文（一份电子稿，两份打印稿）；

2008 年 5 月 20 日：返回论文评审意见及结果；

2008 年 6 月 30 日：作者提交最终稿（一份电子稿，两份打印稿）。

联系方式

方磊 025-83795223，13002561987

邵俐 025-83795005，13851756103

李宏 025-83795086，13951812136

地址：南京市四牌楼 2 号东南大学交通学院岩土工程研究所；邮编：210096，传真：025-83795086，E-mail: hongl@seu.edu.cn。

（大会组委会　供稿）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net