

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01122

大坝安全预警的综合信息模糊推理

陆晨¹, 李子阳^{2,3}, 刘成栋^{2,3}, 刘红坤¹

(1. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 南京 210022; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029;
3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: 现有大坝安全预警常用的多层次模糊评判方法存在不足, 因此引入模糊推理模式, 采用多重蕴含命题的特征展开近似推理的相关理论, 研究了大坝安全预警的多重多维近似模糊推理方法。首先对反映大坝性态的强影响性驱动因子所表征的大坝状态和大坝警情进行模糊划分, 通过事先归纳出的模糊条件语句构建推理大前提; 然后以强影响性驱动因子所表征的大坝状态作为模糊推理系统的多输入, 以大坝警情作为模糊系统的单输出, 对现有的因子集组成的小前提根据模糊推理规则做出大坝警情的响应; 最后实例分析了该方法的使用流程。

关键词: 大坝; 安全预警; 综合信息; 模糊推理

中图分类号: TV 698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0122-04

Fuzzy Inference of Comprehensive Information of Early Warning for Dam Safety

LU Chen¹, LI Zi yang^{2,3}, LIU Cheng dong^{2,3}, LIU Hong kun¹

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute CO. Ltd, Nanjing 210022, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The multi level fuzzy evaluation method is commonly used for the early warning for dam safety, but this method has deficiencies. In this paper, the fuzzy inference method was introduced and the related theories of approximate inference based on the features of multiple implicational propositions were used to determine a multi dimensional approximate fuzzy inference method for early warning of dam safety. Firstly, the dam conditions and dam safety warning were performed fuzzy classification based on the strong driving factors reflecting dam characteristics, and the speculative premise was developed using the summarized fuzzy conditional statement. Secondly, the dam conditions represented by the strong driving factors were the multiple inputs of fuzzy inference system, the dam safety warning was the single output of fuzzy inference system, and the response of dam safety warning was determined by the small premise composed of current factors based on the fuzzy inference rule. Finally, case studies were presented to analyze the application process of the method.

Key words: dam; safety early warning; comprehensive information; fuzzy inference

大坝安全预警是一个复杂综合信息的融合分析处理问题, 不仅涉及包括水压、温度等大坝所处的外界环境状况, 也与大坝的防洪、渗流及结构等性态安全和管理水平密切相关。由于大坝综合性态的复杂性和信息分析的多源性, 模糊推理和评判一直是大坝安全评价和警情诊断的最主要方法^[1,2]。其中多层次模糊综合评判因为层次性强, 考虑因素较为全面, 是大坝警情诊断综合信息融合的常用方法^[3], 但其也存在如下不足: (1) 人为层次的划分, 使得下一级指标的评判只对上一级指标起作用, 而实际的预警中, 有些处于最

底层、影响性较强的驱动因子, 完全可以直接影响到大坝的警情, 但是在计算过程中由于数值的转化, 必然造成信息的流失, 逐层得出的结果可能带来较大的不确定性和偏差; (2) 考虑因子、层次多, 诊断流程包含多项计算内容, 尤其是权重的确定需要专家的参与, 增加了诊断的复杂性, 影响了警情诊断的快捷性和适用性。因此, 本文引入模糊推理模式, 构建大坝警情综合信息的模糊近似推理评判方法, 以期建立从现象直接到诊断结果的评估方法, 尽可能地减少由于评判环节中的模糊性带来的诊断结果的不确定性。

收稿日期: 2013-09-03 修回日期: 2013-11-04 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01122.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209144; 51209145; 51209143; 51139001; 51109143; 51079086); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y713008; Y712005)

作者简介: 陆晨(1980), 男, 江苏南京人, 工程师, 主要从事水利工程安全监控自动化研究。E-mail: 464748184@qq.com

1 模糊推理

模糊推理实质上是把专家意见这种模糊的实践经验,运用模糊集理论,归纳整理成一组定性的模糊条件语句,构成推理大前提,然后针对所分析的工程现状运用模糊算法求得量化的预报输出,从而为决策提供依据。

1.1 模糊推理介绍

模糊推理的基本结构或流程由模糊产生器、模糊规则库、模糊推理器、模糊消除器构成^[4],见图1。

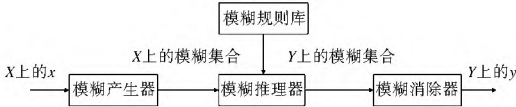


图1 模糊推理基本结构框图/流程

Fig.1 Flow chart of fuzzy inference

由于模糊推理对数据的处理是基于模糊集合的方法,因此对输入数据进行模糊化是必不可少的一步。模糊产生器的作用就是将输入论域的观测量映射到输入论域上的模糊集合,完成模糊化运算。

模糊规则库是基于领域专家的知识 and 经验总结出来的,通常由若干“if ... then”语句描述,其中的前提和结论均是模糊概念。

模糊推理器是模糊推理的理论基础。在模糊推理中,模糊规则库中存在很多条控制规则,若给定 $A^* \in F(X)$,则推理结果应是 $B^* \in F(Y)$ 。这里 A^* 是不同于控制规则前提中的任一模糊集, $F(X)$ 代表论域 X 上的所有模糊集之集。则上述确定模糊集 B^* 的过程便是模糊推理器要完成的任务。

模糊推理的结果为模糊响应。为做出确定的输出,必须将模糊响应变为确切响应,因此需要利用模糊消除器在模糊推理得到的模糊响应集合中,取一个能最佳代表这个模糊结果精确值,即模糊判决或清晰化过程。

模糊推理有多种形式,其中最著名的模糊推理方法是 Zadeh^[5] 提出的CRI方法和王国俊^[6] 提出的全蕴含三I方法^[6]。这两种模糊推理方法的核心是构造模糊蕴涵关系(蕴涵算子) R ,作关系合成运算。这对于二元关系“若 A_i 则 B_i ”的运算易于实现。而大坝安全预警模糊推理涉及多元因素,是多重复合蕴涵命题,如要构造多元模糊蕴涵关系,即出现多维模糊合成运算的极大困难,计算相当麻烦甚至无法完成。为此,本文采用多重蕴含命题的特性展开近似推理法。

1.2 多重蕴含命题特征展开近似推理

多重蕴含命题特性展开近似推理法是陈永义和陈图云^[7] 1984年提出的。此方法既不必作合成运算,也不要构造推理关系,尤其是对多重蕴含命题计算简便。其要点如下。

定理1 设 $\{A_i^{(1)}\}, \{A_i^{(2)}\}, \dots, \{A_i^{(m)}\}$ 分别是 m 个论域 X_1, X_2, \dots, X_m 的独立系, $\{B_i\} \subset F(Y)$, 一个近似推理系统是由一组多重蕴含命题“若 $\{A_i^{(1)}\}$ 且 $\{A_i^{(2)}\}$ 且 $\dots, \{A_i^{(m)}\}$ 则 B_i 构成,如果已知 $A_i^{(1)*} \in F(X_1), A_i^{(2)*} \in F(X_2), \dots, F(X_m)$ 则推理结果为:

$$B^* = \bigcup_{i=1}^n (\bigwedge_{j=1}^m a_i^{(j)}) B_i \in F(Y) \quad (1)$$

其中: $a_i^{(j)} = \sup_{x \in X_j} (A_i^{(j)*}(x) \wedge A_i^{(j)}(x)), i=1, 2, \dots, n, j=1, 2,$

\dots, m , 称为 A_i^* 关于 $\{A_i^{(j)}\}$ 的特征系数。这一方法的突出特点是,只要求出特征系数便可得出推理结果。

2 大坝预警的近似模糊推理

依据模糊推理流程及特征展开近似推理方法,对大坝安全警情进行诊断时,以多个影响性强的驱动因子作为模糊推理系统的多输入,以大坝警情作为模糊系统的单输出,首先根据已有的大坝评判规则、工程实例或经验归纳出一系列模糊条件语句作为模糊推理的规则或模糊推理的大前提,而后根据现有的因子集所组成的小前提和模糊推理规则用特征展开近似推理的方法推出警情的模糊响应,最后将模糊响应转化为确切响应,以此实现对大坝的预警。

2.1 论域离散化及语言变量定义

为能使已知信息归纳为模糊条件语句,首先将连续论域进行模糊分级,定义语言变量。设第 $j (j=1, 2, \dots, m)$ 个因子的论域为 X_j (包含输入论域和输出论域),用 $A_i^{(j)}$ 表示该因子的语言变量,根据警情划分的一般分级标准^[1,6] 令其在论域 X_j 上取5个语言值(划分为5级) $A_1^{(j)}, A_2^{(j)}, \dots, A_5^{(j)}$, 分别对应安全状况或警情的不同状态(从 $1 \rightarrow 5$ 逐渐恶化)。然后采用模糊统计五分法确定各语言的隶属函数:每一个语言值对应论域 Y 上的一个模糊子集,每一级的区间中值为该语言值的隶属度为 l ,对其它级的隶属度为0,相邻两语言值的分界值对这两语言的隶属度均为0.5,其间以隶属度0.8、0.2过渡,由此便得到描述各论域 X_j 的隶属函数。

按上述方法,可将论域 X_j 均分为17级进行离散化划分,离散化为 $X_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{j17}\}$,见表1第一列。进一步根据模糊集理论 λ 截集方法判断其归属。取 $\lambda=0.5$,记语言值的 λ 截集为 $(A_i^{(j)})_\lambda = A_i^{(j)} (l=1, 2, \dots, 5)$,则具体有:

$$\begin{cases} A_1^{(j)} = (x_{j1}, x_{j3}] \\ A_2^{(j)} = (x_{j3}, x_{j7}] \\ A_3^{(j)} = (x_{j7}, x_{j11}] \\ A_4^{(j)} = (x_{j11}, x_{j15}] \\ A_5^{(j)} = (x_{j15}, x_{j17}] \end{cases} \quad (2)$$

显然 $\{A_1^{(j)}, A_2^{(j)}, A_3^{(j)}, A_4^{(j)}, A_5^{(j)}\}$ 构成了 $A_i^{(j)}$ 的模糊划分。

表1 论域的离散化

Table 1 Discretization of domain

X_j	$A_1^{(j)}$	$A_2^{(j)}$	$A_3^{(j)}$	$A_4^{(j)}$	$A_5^{(j)}$
x_{j1}	1				
x_{j2}	0.8	0.2			
x_{j3}	0.5	0.5			
x_{j4}	0.2	0.8			
x_{j5}		1			
...
x_{j13}				1	
x_{j14}				0.8	0.2
x_{j15}				0.5	0.5
x_{j16}				0.2	0.8
x_{j17}					1

2.2 归纳模糊推理规则

由上述论域划分及语言变量定义,若已知信息中的第 j

个因子观测值 $a_j \in A_j^{(j)}$, 则语言变量即可取值为 $A^{(j)}$, 即 $A^{(j)} = A^{(j)}$ 。由此由第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 条数据信息可归纳出一条语句“ $\text{if } A_1^{(1)} \text{ and } A_2^{(2)} \text{ and } \dots \text{ and } A_n^{(n)} \text{ then } B_i$ ”。如此对所有信息均作这样的归纳, 去掉重复的之后所获得的语句即可作为模糊推理规则, 也即模糊推理的大前提:

$$\left. \begin{aligned} R_1: & \text{if } A_1^{(1)} \text{ and } A_1^{(2)} \dots \text{ and } A_1^{(n)} \text{ then } B_{i1} \\ R_2: & \text{if } A_2^{(1)} \text{ and } A_2^{(2)} \dots \text{ and } A_2^{(n)} \text{ then } B_{i2} \\ \dots & \dots \\ R_n: & \text{if } A_n^{(1)} \text{ and } A_n^{(2)} \dots \text{ and } A_n^{(n)} \text{ then } B_{in} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.3 确定预警诊断因子集

由论域划分及语言变量定义, 根据因子取值确定小前提, 即若 $a_j^* \in A_j^{(j)}$, 则语言变量 $A^{(j)*}$ 取值为 $A^{(j)}(x)$, 由此得出警情评判模糊推理的小前提。

2.4 特征展开近似推理

根据警情评判模糊推理的小前提, 依照定理 1 进行特征展开近似推理。由下式:

$$a_i^{(j)} = \sup_{x \in A_j^{(j)}} (A_j^{(j)*}(x) \wedge A_i^{(j)}(x)) \quad (4)$$

计算得 $A^{(j)*}$ 的特征系数 $a_i^{(j)}$, 其中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。由此由式:

$$B^* = \bigcup_{i=1}^n (\bigwedge_{j=1}^m a_i^{(j)}) B_i \quad (5)$$

可得 B^* 。

2.5 预警推理决策

B^* 仍然是一个包含 17 个元素的向量, 对 B^* 进行清晰化处理即可得推理结果的确切响应, 即预警推理决策。决策规则如下: (1) 若 B^* 输出信息较为集中, 可采用重心法等得到模糊推理结果; (2) 若输出信息较分散时, 采用模糊加权法^[8,9]求预警区间, 即不论某区间重复出现多少次, 仅作为一次信息输出, 统计各信息区间的权重系数, 加权计算公式为:

$$B_p = \sum a_i B_i \quad (6)$$

其中: a_i 为各级区间信息输出的权重系数; B_i 为 i 级区间的上、下限。

特征展开近似推理方法, 不需组建模糊关系矩阵, 也不需做关系复合运算, 因而极大地简化了推理运算程序。在大坝警情诊断这种复杂的多重复模糊蕴涵命题推理中, 特征展开近似推理方法更能显示出其优越性, 而且能够较好地处理多因素、模糊性及主观判断等问题。

3 实例分析

安徽某水库大坝为均质土坝, 主要存在问题有: 水库现状防洪能力不能达到 1000 年一遇的校核洪水要求; 水库大坝施工质量较差, 存在大坝清基不彻底、坝体填料压实度低、填筑质量差等问题; 上游坝坡在洪水骤降的特殊工况下, 有局部开裂滑坡的可能; 坝内浸润线位置及渗流出逸点较高, 大坝部分坝段渗漏明显等。根据水库的现行状况, 选取大坝的防洪能力 $A^{(1)}$ 、工程质量 $A^{(2)}$ 、坝坡抗滑稳定 $A^{(3)}$ 及坝体坝基渗漏 $A^{(4)}$ 四个指标作为该水库的强影响驱动因子为例近似对水库进行警情 B 的模糊综合诊断。

根据《水库大坝安全评价导则》(SL 258 2000), 将论域 $A^{(j)}, j=1, 2, 3, 4$ 和 B 模糊划分如下:

$$\left\{ \begin{aligned} A_1^{(1)} &= (-\infty, -0.5] & A_1^{(2)} &= (0, 0.2] \\ A_2^{(1)} &= (-0.5, 0] & A_2^{(2)} &= (0.2, 0.4] \\ A_3^{(1)} &= (0, 0.2] & A_3^{(2)} &= (0.4, 0.6] \\ A_4^{(1)} &= (0.2, 0.5] & A_4^{(2)} &= (0.6, 0.8] \\ A_5^{(1)} &= (0.5, \infty] & A_5^{(2)} &= (0.8, 1.0] \\ \\ A_1^{(3)} &= (0, 1.0] & A_1^{(4)} &= (-\infty, -0.2] \\ A_2^{(3)} &= (1.0, 1.2] & A_2^{(4)} &= (-0.2, -0.1] \\ A_3^{(3)} &= (1.2, 1.3] & A_3^{(4)} &= (-0.1, 0.1] \\ A_4^{(3)} &= (1.3, 1.5] & A_4^{(4)} &= (0.1, 0.2] \\ A_5^{(3)} &= (1.5, +\infty] & A_5^{(4)} &= (0.2, +\infty] \\ \\ B_1 &= [0, 0.2] \\ B_2 &= (0.2, 0.4] \\ B_3 &= (0.4, 0.6] \\ B_4 &= (0.6, 0.8] \\ B_5 &= (0.8, 1.0] \end{aligned} \right.$$

其中: $A^{(1)}$ 表示防洪所需坝高与现有坝高差值的模糊划分; $A^{(2)}$ 表示工程质量的模糊划分; $A^{(3)}$ 表示现有坝坡抗滑稳定安全系数的模糊划分; $A^{(4)}$ 表示坝体坝基材料的实际最大出逸比降与允许出逸比降差值的模糊划分; B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 分别代表无警、轻警、中警、重警、强警。论域离散化 $x_{jk}, k=1, 2, \dots, 17$ 的取值根据上面的模糊划分进行均分。

根据大坝安全评价准则和经验, 首先归纳出如下部分模糊推理大前提:

$$\left. \begin{aligned} R_1: & \text{if } A_1^{(1)} \text{ and } A_1^{(2)} \text{ and } A_1^{(3)} \text{ and } A_1^{(4)} \text{ then } B_1 \\ R_2: & \text{if } A_2^{(1)} \text{ and } A_2^{(2)} \text{ and } A_2^{(3)} \text{ and } A_2^{(4)} \text{ then } B_2 \\ \dots & \dots \\ R_5: & \text{if } A_5^{(1)} \text{ and } A_5^{(2)} \text{ and } A_5^{(3)} \text{ and } A_5^{(4)} \text{ then } B_5 \end{aligned} \right\}$$

则对于该坝现状, 有:

$$a^{(1)*} \in A_4^{(1)}, a^{(2)*} \in A_4^{(2)}, a^{(3)*} \in A_3^{(3)}, a^{(4)*} \in A_3^{(4)},$$

根据表 1, 模糊推理的小前提为

$$\begin{aligned} A^{(1)*} &= (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0) \\ A^{(2)*} &= (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0) \\ A^{(3)*} &= (0, 0, 0, 0, 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0, 0, 0, 0) \\ A^{(4)*} &= (0, 0, 0, 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 0.8, 0.5, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

由式(4)计算 $A^{(j)*}$ 的特征系数 $a_i^{(j)} (i=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, 3, 4)$, 所得结果如下:

$$\left\{ \begin{aligned} a_1^{(1)} &= 0 & a_2^{(1)} &= 0 & a_3^{(1)} &= 0.5 & a_4^{(1)} &= 1 \\ a_1^{(2)} &= 0 & a_2^{(2)} &= 0 & a_3^{(2)} &= 0.5 & a_4^{(2)} &= 1 \\ a_1^{(3)} &= 0 & a_3^{(3)} &= 0.5 & a_3^{(3)} &= 1 & a_4^{(3)} &= 0.5 \\ a_1^{(4)} &= 0 & a_2^{(4)} &= 0.5 & a_3^{(4)} &= 1 & a_4^{(4)} &= 0.5 \\ \\ a_5^{(1)} &= 0.5 \\ a_5^{(2)} &= 0.5 \\ a_5^{(3)} &= 0 \\ a_5^{(4)} &= 0 \end{aligned} \right.$$

由式(5)计算:

$$B^* = \bigcup_{i=1}^5 (\bigwedge_{j=1}^4 a_i^{(j)}) B_i =$$

(0, 0, 0, 0, 0, 0. 2, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 2, 0)

B^* 是一个包含 17 个元素的向量, 且数据分散, 加权作区间运算。回故对 B^* 的求解, 实际不为 0 的输出为 B_3 (0. 4, 0. 6) 和 B_4 (0. 6, 0. 8) 两个区间各一次, 共为 2 次。由此, 区间的权数为 1/2。由式(6)综合输出区间数为:

$$B_p = 1/2(0. 4, 0. 6) + 1/2(0. 6, 0. 8) = (0. 5, 0. 7)$$

即警度介于 0. 5~0. 7 之间, 判为重警。该诊断结果与该坝在 2009 年大坝安全鉴定中被评定为“三类坝”的结论相符。

若经专家评审, 推理准确, 则可扩充归纳模糊推理大前提为:

$$R_6: \text{if } A_4^{(1)} \text{ and } A_4^{(2)} \text{ and } A_3^{(3)} \text{ and } A_3^{(4)} \text{ then } B_4$$

随着模糊推理大前提的增加, 可获得更准确的诊断结果。

4 结语

基于大坝警情评判中的强影响性驱动因子及警情诊断合理快捷的考虑, 引入模糊推理模式, 采用多重蕴含命题的特征展开近似推理, 研究了大坝警情特征展开多重多维近似模糊推理方法。实例分析表明该方法以事先归纳出的模糊条件语句作为推理大前提, 可以对现有的因子集组成的小前提根据模糊推理规则快速做出诊断, 是大坝安全综合信息预警方法的有益补充。

参考文献(References):

[1] 王志涛, 江超, 姜晓琳, 等. 基于模糊理论的土石坝风险综合评价方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 27-30, 105. (WANG Zhi tao, JIANG Chao, JIANG Xiaolin, et al. Research on Comprehensive Evaluation Method for Risk of Earthrock Dam Based on Fuzzy Logic[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 27-30, 105. (in Chinese))

[2] 张燕, 周围, 丛培江. 基于模糊规则推理的大坝安全监测变形预测模型[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(2): 51-54.

(ZHANG Yan, ZHOU Wei, CONG Pei jiang. Fuzzy Inference based Deformation Prediction Model for Dam Safety Monitoring [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2009. 33(2): 51-54. (in Chinese))

[3] 李子阳, 马福恒, 鲍杰. 基于多层次模糊综合诊断的燕山水库预警分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 79-82. (LI Zi yang, MA Fu heng, BAO Jie. Early Warning Analysis of Yanshan Reservoir Based Multilevel Fuzzy Comprehensive Diagnosis [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 79-82. (in Chinese))

[4] Timothy J Ross(著). 钱同惠, 沈其聪, 葛晓彬, 等(译). 模糊逻辑及其工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. (Timothy J Ross(author). Qian Tonghui, Shen Qincong, Ge Xiaobin, et al (translator). Fuzzy Logic and Its Engineering Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001. (in Chinese))

[5] Zadeh L A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process[J]. IEEE Trans on System, Man, Cybernetics, 1973, 3(1): 28-44.

[6] 王国俊. 模糊推理的全蕴涵三 I 算法[J]. 中国科学(E 辑), 1999, 29(1): 43-53. (WANG Guojun. Algorithm of Full Implication Three I for Fuzzy Inference[J]. Science in China (Series E), 1999, 29(1): 43-53. (in Chinese))

[7] 陈永义, 陈图云. 特征展开近似推理方法[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1984, 20(3): 1-7. (CHEN Yongyi, CHEN Tuiyun. Features Expand Approximate Fuzzy Inference Method[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 1984, 20(3): 1-7. (in Chinese))

[8] 李子阳. 大坝病险预警的盲分析模型和方法[D]. 河海大学, 2009. (LI Zi yang. The Models and Methods of Blind Analysis for Early Warning of Illcondition Dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))

[9] 张润杰, 古德祥, 蒲蛰龙, 等. Fuzzy 控制模型在三化螟幼虫数量预报中的应用探讨[J]. 生态科学, 1989(2): 38-46. (ZHANG Runjie, GU Dexiang, PU Zhelong, et al. Application Research on the Three Moth Larvae Number Forecast of Fuzzy Control Model[J]. Ecologic Science, 1989, (2): 38-46. (in Chinese))

(上接第 100 页)

Analysis of Slope Stability Based on Strength Reduction Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2690-2693. (in Chinese))

[11] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388. (ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of Strength Reduction FEM in Soil and Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese))

[12] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭光, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 人民

交通出版社, 2007. (ZHENG Yingren, CHENG Zuyu, WANG Gongxian. Slope and Landslide[M]. Communications Press, 2007. (in Chinese))

[13] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345-1348. (LIU Jirong, LUAN Maotian, ZHAO Shaofei, et al. Discussion on Criteria for Evaluating Stability of Slope in Elastoplastic FEM Based on Shear Strength Reduction Technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1345-1348. (in Chinese))