输水管网震害最危险路随机模糊网络预测方法

刘锡荟[1)]　王海燕[1)]　张大名[2)]

提要　输水管网的破坏，会导致地震灾害的严重扩大。输水管网的震害预测，已有运用随机模糊网络进行关键段的分析和管路可靠性的分析方法。[1),2)]本文建议的模糊最危险路（或最可靠路）分析，把管段的可靠性概率，扩展为语言概率，从而可以很好地容纳模糊性，使输水管的震害预测更加合理，为城市抗震防灾服务。

一、前　　言

历次强烈地震都说明，城市输水管网的破坏会导致极为严重的后果。因此，在编制城市抗震防灾规划中，人们都十分重视生命线工程的震害预测和减少地震灾害的措施。

关于震害预测，从确定性方法过渡到概率的方法，是一个重大进步。这对于本来就是具有强不确定性的震害估计和带有风险性的措施决策，显然都是必要的。自从文献〔3〕、〔4〕、〔5〕等提出应该把模糊性包含进去以来，人们普遍认识到不考虑模糊性是不合理的。据此建立起来的以模糊推理为基础的震害预测模型，已经并正在用于许多城市的抗震防灾规划编制上。国内外也出现了许多使用模糊集方法进行震害预测的文献。

在输水管网的震害预测方面，文献〔1〕提出用模糊矩阵表示它的关联性，用求传递闭包的方法分析它的连通性，使一般概率方法前进到了随机的、模糊的方法。文献〔2〕则对从供水点到用水点管道模糊可靠性作了科学的定义，并运用模糊事件概率的概念计算了模糊可靠性。为了使输水管网震害预测方法配套，还有两个重要问题需要研究。一是强烈地震后，水头损失的分析。另一是最危险管线的分析。所谓最危险的管线，就是从水厂到某用水点中，一切可能连通的管线中可靠性概率最小的管线。如果我们要着手改造一个城市的输水管网，从何处着手呢？当然是从最危险的管线着手。否则，就不可避免盲目性，甚至会得到适得其反的效果。正因为这样，笔者才把最危险路分析提到重要高度予以研究。至于水头损失将另文讨论。

输水管网在地震作用下的表现是极为复杂的，很难搞得清楚。所谓搞不清楚，就是模糊。因此要科学地、合理地作好输水管网地震作用下最危险路的分析，不考虑模糊性就是不可能做到的。本文的建议，就是把概率的，连同模糊的不确定性都考虑的一种合理方法。

1）机电部电子科学研究院

2）广东省地震局

二、输水管网管段可靠性的语言变量表示方法

模糊集理论创始人L、A、Zadeh在文献〔6〕中详细论述了语言度量。人们已经认识到，由于系统的极端复杂性，在很多情况下，高精度不仅是多余的，甚至是有害的。人们不必要在汽车的方向盘上刻上精确的刻度，并让司机按预定的精确程序去驾驶汽车。那样将不可能使汽车行驶得平稳而又安全。人类的自然语言包含着大量的模糊的词和句，但却能深刻地刻画系统的表现和事物的过程。语言变量是以人们自然语言的词或句作值的变量，它由五重组（A、T、Z、G、M）表征。A定变量的名称，T是A的辞集，Z为论域，G是构造T的句法规则，而M（A）则是语言值辞义，它以可能性分布或模糊集表示。我们认为管段的可靠性应是一个语言变量，而用语言概率来表示其值，比之仅给出一个精确的概率值要丰富得多。这里首先对语言概率作一介绍，而后给出管段语言概率的辞义及具体求法，这是模糊最危险路分析的基础。

1．语言概率

定义1．语言概率是布尔语言变量，它是以原词（如可能），有限的程度辞（何非常、十分、很、………），和包括连词如和*、或、非*组成的辞集：

$$
\begin{aligned}
T(\underset{\sim}{P}) = &\text{可能}+\text{未必}+\text{不可能}+\text{很可能}+\text{有些可能}+\text{不大可能}+\cdots\cdots\\
&+\text{象}+\text{不象}+\text{很象}+\cdots\cdots\\
&+\text{既不是很象也不是很不象}+\cdots\cdots\\
&+\cdots\cdots\\
&+\text{接近}0+\text{接近}9.1+\cdots\cdots+\text{接近}1\\
&+\text{很接近}0+\text{很接近}0.1+\cdots\cdots
\end{aligned} \tag{1}
$$

式（1）就是语言变量（语言概率）$\underset{\sim}{P}$的值集。

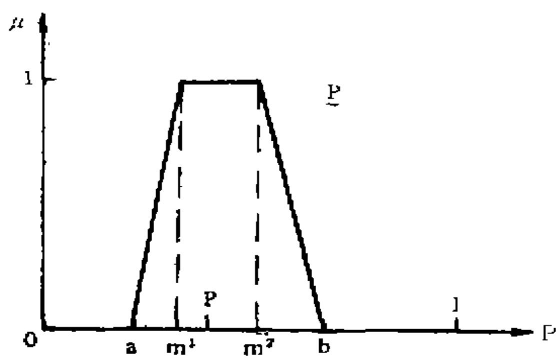

图 1

Fig. 1

定义2．输水管网在地震作用下管段的可靠性是语言变量(语言概率)$\underset{\sim}{P}$，以"接近P"的形式为$T(\underset{\sim}{P})$的原辞，以$\underset{\sim}{P}\overset{\triangle}{=}\vec{P}$表示，P是$\vec{P}$的范例，即假设系统是非模糊的情况下算出的管段的可靠性。因此有

$$T(\underset{\sim}{P})=\Sigma h_i\vec{P} \tag{2}$$

h_i为有限的程度词，$\Sigma\overset{\triangle}{=}$并。

$\underset{\sim}{P}$的辞义是以$P\in[0,\ 1]$为基础变量，用图1所示的梯形模糊集表示。因此，$\underset{\sim}{P}$就决定于四个参数a，m^1，m^2，b。可以定义程度词hi为使P左边扩展为a，m^1，右边扩展为m^2，b，

程度词h_i规定如表1。

表1 Table 1

程度词		m^1, m^2 %	a, b %
完全	h_0	0	0
十分	h_1	2	4
非常	h_2	4	8
很	h_3	6	12
相当	h_4	8	16
比较	h_5	10	20
大致	h_6	12	24
差不多	h_7	14	28
可谓	h_8	16	32

为了更灵活地反映决策者的判断，我们建议左、右两侧可以取不同程度词h^L、h^R。举例来说，某管段的可靠性为0.743，也就是说$\underset{\sim}{P}\overset{\Delta}{=}\vec{P}$的范例P为0.743，并有$h^L$为$h_3$、$h^R$为$h_4$，则

$$\begin{aligned}a&=(1-0.12)\times0.743=0.564\\ m^1&=(1-0.06)\times0.743=0.698\\ m^2&=(1+0.08)\times0.743=0.802\\ b&=(1+0.16)\times0.743=0.862\end{aligned}\tag{3}$$

应该注意有$P\in[0,1]$，即计算m^2、b时不应得出大于1的值。

定义3．语言概率$\underset{\sim}{P}_1$，$\underset{\sim}{P}_2$，……，$\underset{\sim}{P}n$的基础变量为p_1、p_2，……，p_n。若基础变量P_i，$i=1$，2，……，n之间有连带约束，则$\underset{\sim}{P}_i$，$i=1$，2，……，n之间为β交互的，（以后简称交互的）否则，就是非交互的。

如同我们通常在输水管网抗震可靠性计算中，假定各段管道的可靠性是在互相独立的一样，假设各段管道的语言概率是非交互的。

2．管段的可靠性的确定

如上所述，我们以$\vec{P}$来表征各管段的可靠性，即模糊可靠概率。于是，问题归结为如何给出P和h^L，h^R。P是假设系统是非模糊的情况下管段的可靠性。这里我们建议两种方法：

方法一：[7]首先依照过去的震害经验，给出某类管道在一定强烈地面运动下基本破坏比（以每km破坏数表示），然后按下式计算修正后的破坏比：

$$R^i_{fm}=C^i_g\ C^i_p\ C^i_d\ R^i_f\tag{4}$$

其中：R_{fm}^{i}—修正后的第i段管道的破坏比

c_g^i—地基影响系数，按地基分类采用0.4，0.9或2.0

c_p^i—管材影响系数、参照日本宫城1978年地震，铸铁管取1.0，有延性的铸铁管取0.2，焊接钢管取0.1

c_d^i—埋深影响系数．小于5 m时取1.0．大于5 m时要修正

R_f^i—该段管道在给定强度地面运动下的基本破坏比，参照历史震害取得

在破坏沿道是按波桑分布的假设下，节点i和l之间管道的破坏概率为

$$P_f^{kl}=1-\exp\left\{-\sum_{i=1}^{n} R_{fm}^{i} L^{i}\right\} \tag{5}$$

而可靠性概率，或可靠度为

$$P_R^{kl}=1-P_f^{kl} \tag{6}$$

方法二：[2]基本思想是地震作用下输水管网的管道变形，如小于该管道的容许变形，则为安全可靠，否则就会破坏而不可靠。管道在地震作用下接头的相对变形计算为：

$$S=\triangle L/n \tag{7}$$

其中：$\triangle L=66\cdot\zeta\cdot k_h\cdot T_m^2$

$\zeta=1/[1+0.5E\cdot F\cdot D/Vs^2]$　　$n=Vs\cdot T_m/(\sqrt{2}l)$

k_h—水平地震系数，g　　T_m—场地土卓越周期，秒

E—管材的弹性模量　　F—管道的截面积

D—管道壁厚　　Vs—剪切波速

l—每节管道长度

假设管道的允许变形为R^i，i＝1，2，对应于R^1—开裂允许变形，R^2—严重渗漏变形，则令

$$Z^i=R^i-S,\qquad i=1,\ 2 \tag{8}$$

判断准则是：1．$Z^1>0$　　基本完好

2．$Z^2<0$　　严重破坏　　（9）

3．$Z^1<0$且$Z^2>0$　　轻微或中等破坏

于是，在假定（7）式中某些参量的概率分布，并由试验查得R^i和它的概率分布后，可用Monte Carlo法计算出按（9）式中某准则判断的破坏概率及可靠度。或者假设S按正态分布，认为（7）式算得的是S的均值$\bar{S}$，并取10%的$\bar{S}$为均方差σ_s。由试验数据$\bar{R}^i$和σ_{Ri}，可计算

$$\bar{Z}^i=\bar{R}^i-\bar{S} \tag{10}$$

$$\sigma_{Z^i}=\sqrt{(\sigma_{R^i}^2+\sigma_s^2)}$$

并得
$$P_1 = P(Z^1 > 0) = \phi\left(\frac{Z^1}{\sigma_1}\right) \qquad (11-1)$$

$$P_3 = P(Z^2 < 0) = \phi\left(-\frac{Z^2}{\sigma_2}\right) \qquad (11-2)$$

$$P_2 = 1 - P_1 - P_2 \qquad (11-3)$$

ϕ为标准正态函数，可以查表。这样管段的可靠度就可以求得。例如取可靠度是基本完好，于是就得可靠度$=P_1$。

这样，就可以得到输水网络的各个管段的P，并在给出h^L、h^R后得到$\vec{P}$。h^L，h^R见表1，决策者可根据：系统的复杂性，计算公式的可靠程度，有关参数是否充足，这些参数可能的上、下限范围，决策者对计算结果的把握程度等来给出。十分显然，这里不仅可以考虑地震危险性分析和管材性质的随机性，而且可以考虑这些因素导致的模糊性，当然不仅仅是给分析带来了灵活性，而且更合理地反映了问题的性质和实际情况，这显然是十分有意义的。

三、输水管网震害预测中模糊最危险路分析

以上已经清楚地给出了管道可靠度以可靠性概率给出的具体方法。输水管网作为一个系统，更重要的是从整个系统出发进行分析。最危险路分析是就这种从整体出发分析的一个重要方面。

1．非模糊的网络的最危险路

设输水管网可表示成有向网络$G=(N, E, W)$，其中

$$N \overset{\triangle}{=} \{n_1, n_2, \cdots\cdots, n_n\} \qquad \text{节点集}$$

$$E \overset{\triangle}{=} \{e_{ij}\}, \quad i, j \in N \qquad \text{管段集} \qquad (12)$$

$$W \overset{\triangle}{=} \{w_{ij}\}, \quad i, j \in N \qquad \text{边权集}$$

并设G没有回路，且连接i，j没有一条以上的管段。网络源点为1（多个源点时只要再增加一个虚节点就可以了），终点为n（以下分析可取源点外任一节点为终点，这里仅仅为了方便起见取终点为n）。

设从源点（水厂）1到终点（用水点）n间有节点，管段的有序序列：

$$L = (n_1, e_{1i}, n_i, e_{ij}, n_j, \cdots\cdots, n_k, e_k, n) \qquad (13)$$

称为一条管路。为方便起见，也可以写成

$$L^t = (e_{ij})^t \qquad (14-1)$$

或
$$L^t = (w_{ij})^t \qquad (14-2)$$

这里t是管路的序号，因为1～n间可能有多条管路。

若w_{ij}表示管长、水头损失等，则

$$w^t = \sum_{w_{ij} \in L^t} w_{ij} \tag{15}$$

就是管路L^t的总长度或总水头损失。若w_{ij}是可靠概率，则

$$w^t = \pi_{w_{ij} \in L^t} w_{ij} \tag{16}$$

就是管路L^t的可靠性，或可靠概率。为了有所区别，也可写成

$$P^t = \pi_{P_{ij} \in L^t} P_{ij} \tag{16'}$$

在该两点间的一切管道中，$w^t = \min(w^1, w^2, \cdots\cdots)$的一条，就是最短路（取max则为最长路），而$P^t = \min(P^1, P^2, \cdots\cdots)$的一条，就是最危险路。

2．模糊网络的最危险路

本文主要研究当输水管网管段可靠度是模糊的，即以语言概率$\underset{\sim}{P}$表示时，怎样定义和找出最危险路。

Zadeh在文献〔8〕中，对模糊变量与可能性分布作了精辟的论述。

设A是模糊变量，在论域区中取值。命题"A是$\underset{\sim}{w}$"，对应写作可能性分布为

$$\Pi_A = (x) \overset{\triangle}{=} \mu_{\underset{\sim}{W}}(x) \tag{17}$$

$\mu_{\underset{\sim}{W}}(x)$是$\underset{\sim}{W}$的隶属函数。具体地说，$\underset{\sim}{W}$是T（A）中的一个值，这个命题相当于给该模糊变量赋以值$\underset{\sim}{W}$，为$\mu_{\underset{\sim}{W}}$是$\underset{\sim}{W}$的辞义，是以它的基础变量的模糊集表征的。

举例来说，一个输水管网的某段管道的可靠度就可看成是模糊变量，值取自式（2），如$\underset{\sim}{P}$是以图1那样的模糊子集来表示的，那么这段管道的可靠度就可以写成

$$\Pi_A(x) = \mu_{\underset{\sim}{P}}(P) \tag{18}$$

也就是说：可靠度的可能性分布好象图1那样的隶属函数所表征。

令事件S是X的一个子集，定义S的可能性为

$$\Pi[s] = \sup\{\Pi_A(x) \mid x \in x\} \tag{19}$$

设有m个论域X_j，$j=1, 2, \cdots\cdots, m$上的模糊变量A^j，并有命题"A^j是$\underset{\sim}{W_j}$"，即有可能性分布$\Pi_{A^j}(x_j)$，$x_j \in X_j$，$j=1, 2, \cdots\cdots, m$。设对应于论域$X = \pi_{j=1}^{m} X_j$有多维的模糊变量A，则其可能性分布为

$$\Pi_A(x) = \min(\Pi_{A^1}(x_1), \Pi_{A^2}(x_2), \cdots\cdots, \Pi_{A^m}(x_m)) \tag{20}$$

条件是A^j是非交互的。其中$x = (x_1, x_2, \cdots\cdots, x_m)$是m维基础变量。

设事件s是 $X=\prod_{j=1}^{m} X_j$ 的一个子集，则

$$\Pi[s]=\sup\{\Pi_A(x)\mid x\in s\} \tag{21}$$

有了以上这些准备，我们就可以来定义模糊最危险路了。因为以下的计算，都有以最短路（最长路）为主的，所以还是先从最短路（最长路）说起。

3．模糊最短路（最长路）

设从源点到终点（1～n）有路 $L=\langle e_{ij}\rangle=\langle w_{ij}\rangle$，每边长度为 $\underset{\sim}{W}_{ij}$ 即为可能性分布 $\Pi(w_{ij})$，$w_{ij}\in R^1$所约束。当给定路长为一定值w时，在

$$w=\sum w_{ij} \tag{22}$$

的条件下，有矢量族

$$\Gamma=\{\langle w_{ij}\rangle\mid x=w\} \tag{23}$$

也就是说，满足式（22）可以有多种 w_{ij} 值的组合。把 $w=\sum w_{ij}$ 约束下的Γ看成是事件s，则按式（21）可知管路L的长度的可能性分布为

$$\Pi_L(x)=\sup_{\langle e_{ij}\rangle\in\Gamma}\{\min(\Pi(w_{1j}),\ \Pi(w_{ij}),\ \cdots\cdots,\ \Pi(w_{kn}))\} \tag{24}$$

具体地说，从点1到点n有路L，它是 $\langle e_{ij}\rangle$，设L由共计m段管段所组成，那么，当w为一给定值时，m个 w_{ij} 在 $\sum w_{ij}=w$ 的条件下，可以有许多种组合，这些组合可以看成是m维空间的一个点集，或者说一个子集。每一个点的可能性取每段管道的可能性的最小值，而对于这一个子集，则取各个点的可能性中最大者。

定义4．设有向网络G中自节点1到节点n有路k条：$L^t(1,n)$，$t=1,2,\cdots\cdots,k$。L^t的长度为可能性分布

$$\Pi(w^t=x) \tag{25}$$

所约束。最短路 $\hat{L}$ 的可能性分布为

$$\Pi_{\hat{L}}(x=w)=\mu(x) \tag{26}$$

，对于 $\mu\in[0,1]$ 为给定值，有

$$\Pi_{L^t}(w^t)=\mu,\qquad t=1,2\cdots\cdots,k \tag{27}$$

$$x=\min(w^1,w^2,\cdots\cdots w^k) \tag{27'}$$

亦即当μ给定时，w^t最小的路就是最短路 $\hat{L}$。如（27'）式取max，则为最长路 $\mathring{L}$。

4．模糊最危险路

可仿照模糊最短路，，当给定P为定值，并在下式条件下

$$P=\pi P_{ij} \tag{28}$$

有矢量族 $\Gamma' = \{ \langle p_{ij} \rangle \mid x = p \}$ （29）

则路L的可靠性可以仿式（24）得可能性分布如

$$\Pi_L(x) = \sup_{\langle e_{ij} \rangle \in \Gamma'} \{ \min [\Pi(w_{11}), \Pi(w_{ij}), \cdots\cdots, \Pi(w_{kn}))] \qquad (30)$$

定义5．设有向网络G中自节点1到节点n有路k条：$L^t(1, n)$，$t=1, 2, \cdots\cdots, k$．L^t可靠度为可能性分布

$$\Pi(p^t = x) \qquad (31)$$

所约束，最危险路$\check{L}$的可能性分布为

$$\Pi_{\check{L}}(x = p) = \mu(x) \qquad (32)$$

亦对于μ为给定值，有

$$\Pi_{L^t}(p^t) = \mu, \quad t = 1, 2, \cdots\cdots k \qquad (33)$$

$$x = \min(p^1, p^2, \cdots\cdots, p^k) \qquad (33')$$

即当μ给定时，P^t最小的路就是最危险路$\check{L}$。

四、输水管网模糊最危险路算法

在定义3输水管网在地震作用下可能出现的地震灾害情况下最危险路的定义之后，关键就是如何计算了。在非模糊的情况下，最危险路（最可靠路）是转换成求网络最长路（最短路）．这是因为求最短路的算法比较成熟，有许多好算法、好程序可以利用．对于模糊的，我们也要借助最短路（最长路）算法。

1．非模糊最危险路算法

若令： $w_{ij} = -\log(p_{ij})$ （34）

则取L^t，$t=1, 2, \cdots\cdots, k$中$w^t = \sum w_{ij}$，$P^t = \pi_{p_{ij}}$，

必然有关系： $P^t = 10^{-w^t}$ （35）

且 $\min(P^t \mid t = 1, 2, \cdots, k)$

和 $\max(w^t \mid t = 1, 2, \cdots, k)$

完全对应。$\max(w^t)$的寻找，就是最长路算法（一般网络分析均是找最短路，故以上我们多讨论最短路．而一切讨论对最长路却是一样的）。

2．模糊最危险路的算法

同样，把最危险路变换成最长路来计算。设路$L = \langle e_{ij} \rangle$的管段可靠度是$\underset{\sim}{p_{ij}}$，其可能性

分布用隶属函数$\mu_{\underset{\sim}{p}_{ij}}(x)$来表征。于是，我们把$\underset{\sim}{p}_{ij}$变换成$\underset{\sim}{w}_{ij}$：

$$\mu_{\underset{\sim}{w}_{i}}(y)=\mu_{\underset{\sim}{p}_{ij}}(x) \qquad x\in[0,1] \quad y\in R^{1} \quad \text{并且} y=-\log x \tag{36}$$

以$\underset{\sim}{w}_{ij}$为管段长度，求出最长路$\overset{\circ}{L}$，并得到$\Pi_{\overset{\circ}{L}}(y)$。只要取

$$\Pi_{\check{L}}(x)=\Pi_{\overset{\circ}{L}}(y) \qquad x\in[0,1] \quad y\in R^{1} \quad \text{并且} x=10^{-Y} \tag{37}$$

于是，$\check{L}$就是模糊最危险路，并有（37）式所示的可能性分布。这点证明要通过式（27）、（33）及（24）等，比较繁复，这里就不详细介绍了。

3．模糊最长路的具体算法

上面已经介绍了模糊最危险路的算法是把$\underset{\sim}{P}_{ij}$变换成$\underset{\sim}{w}_{ij}$，以$\underset{\sim}{w}_{ij}$为管段长度，求出最长路$\overset{\circ}{L}$，它也就是$\check{L}$，并作（37）式变换，就可以得到最险危路的可能性分布。于是问题便归结成已知$\underset{\sim}{w}_{ij}$，如何求出最长路，一般地说，这个算法是非常繁的。Buckley在研究模模PERT时，就可能性分布为梯形时提出了一个简单算法[9]。我们这里对于最长路作了补充定义以后，参照Buckley的方法，提出了更确切的算法。

设管道的长度是如图1所示的隶属度函数，也就是说可以写成

$$\mu_{\underset{\sim}{w}_{ij}}(x)=\begin{cases}(x-a_{ij})/(m_{ij}-a_{ij}), & a_{ij}\leqslant x\leqslant m^{1}_{ij};\\ 1, & m^{1}_{ij}<x<m^{2}_{ij};\\ (x-b_{ij})/(m^{2}_{ij}-b_{ij}), & m^{2}_{ij}\leqslant x\leqslant b_{ij};\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \tag{38}$$

令

$$\begin{aligned}L_{ij}(\alpha)&=(m^{1}_{ij}-a_{ij})\alpha+a_{ij}\\ U_{ij}(\alpha)&=(m^{2}_{ij}-b_{ij})\alpha+b_{ij}\end{aligned} \tag{39}$$

$\alpha\in[0,1]$以$L_{ij}(\alpha)$及$U_{ij}(\alpha)$作为管段长度，分别运用常用的程序，计算最长路得结果$\langle e_{n}^{1}(\alpha)\rangle$和$\langle e_{n}^{2}(\alpha)\rangle$，并定义

$$\mu(w=x)=\begin{cases}\alpha, & \text{若} x=e_{n}^{1}(\alpha),\ 0\leqslant\alpha<1;\\ 1, & \text{若} e_{n}^{1}(1)\leqslant x\leqslant e_{n}^{2}(1);\\ \alpha, & \text{若} x=e_{n}^{2}(\alpha),\ 0\leqslant\alpha<1;\\ 0, & \text{其它}\end{cases} \tag{40}$$

可以证明 $$\Pi_{\underset{L}{0}}(w=x)=\mu(w=x) \tag{41}$$

为了节约篇幅，详细的证明就不再介绍了。

于是，通过（37）式的变换，就可以找到最危险路的可能性分布了。

五、决策模和输水管网最危险路的评价

通过以上的分析，可以得到的是最危险路及它的可能性分布．怎样对这样可能性分布表示的结果作出合理的评价呢？笔者曾建议决策模的概念．[18]

定义6．设$x\in U$，$U\subseteq R^1$，有$\underset{\sim}{A}\in F(U)$，

即有映射 $$\mu_{\underset{\sim}{A}}: U\rightarrow[0,\ 1] \tag{42}$$

设还有映射 $$c: \mu_{\underset{\sim}{A}}\rightarrow[0,\ 1] \tag{43}$$

则决策模定义为 $$D=\int_U f(c(\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)),\ x)\,dx \tag{44}$$

f是决策者根据问题性质选定的函数．

例1：

设 $$\begin{cases} c=1, & \text{若}\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)=\sup\limits_{x\in U}(\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)) \\ c=0, & \text{其它} \end{cases}$$

并取 $f(c,\ x)=c\cdot x$

于是有 $D=x_*$，对应于$\mu_{\underset{\sim}{A}}$最大处．

例2：

设 $$\begin{cases} c=1, \text{若}\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)\geqslant\alpha,\ \alpha\in[0,\ 1] \\ c=0, \text{若}\mu_{\underset{\sim}{A}}(x)<\alpha \end{cases}$$

并取 $f(c,\ x)=c\cdot x/(b-a)$

则 $D=\bar{x}$， $x\in I$

$$I\triangleq\{x\mid x\in[a,\ b],$$

$$[a,\ b]\triangleq(\underset{\sim}{A})\alpha\}$$

对应于截集的平均值．

在我们编制的程序中，取了四种方法，

（1）m^1到m^2的中点；

（2）m^1，m^2中点及a，b中点的平均；

（3）$\alpha\in[0，1]$，$(\underset{\sim}{A})_{\alpha}$的中点的平均；

（4）取某给定的α值，$(\underset{\sim}{A})_{\alpha}$的中点。

六、计算机程序

据上述原理，编制了在微机上运行的程序。它具有以下特点：

（1）为了更加灵活，允许有两种形式的输入，即直接输入a、m^1、m^1、b和输入P，h^L，h^R；

（2）除了计算最危险路外，还可以计算模糊最可靠路；

（3）灵活的人机界面，允许用户在使用时直接用对话方式输入必要的信息。

应该指出的一点，是我们首先假设$\tilde{P}_{ij}$为梯形，而后用（36）式变换成$\tilde{w}_{ij}$。在运用式（38）、（39）及（40）进行计算时，又假设$\tilde{w}_{ij}$是梯形的，这显然是个近似。我们曾作了大量比较，发现主要取决于a，m^1，及m^2，b之间距离。在我们表1所示的范围内导致的误差，是微不足道的。因此，程序直接输入梯形，而后求路长时还以梯形隶属函数为基础，这并不会带来什么误差。

七、计算的例子

例一：有输水管网如图2，各管段的可靠度以a、m^1，m^2、b四个参数的形式输入，具体数据见表2，计算结果见图3

从计算结果可以看出，最危险路有：

① 1—2—5—4—6—9—8—10—12

② 1—2—5—4—6—9—8—10—12

③ 1—2—5—4—6—9—8—11—12

④ 1—2—5—4—6—8—10—12

其所以会出现多条，是因为定义最危险路时，是以同一个μ下对应的各管段的基础变量来求管路的可靠性概率的。当管段可靠度是模糊的，且各段左、右侧不同，有的段斜且宽，有的段则陡而窄，这就当μ变化时，可能使最危险路改道。

决策时我们取“右边优于左边，上边优于下边”的原则，对它排序。可以看出，我们这个例子，最最危险的路乃是④，即1—2—5—4—6—8—10—12。

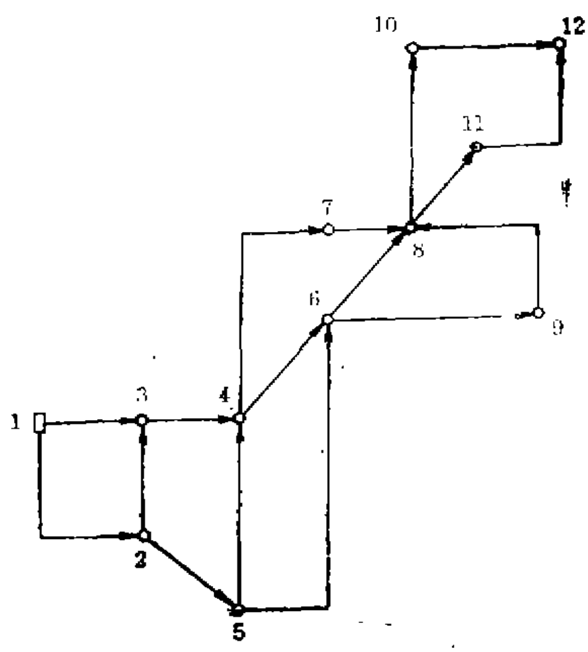

图 2

Fig. 2

表 2　　　　Table　2

管　段	a	m^1	m^2	b
1—2	0.194	0.215	0.220	0.226
1—3	0.893	0.901	0.915	0.966
2—5	0.975	0.980	1.000	1.000
2—3	0.903	0.914	0.956	1.000
3—4	0.716	0.716	0.774	0.822
4—6	0.241	0.266	0.371	0.384
4—7	0.230	0.362	0.376	0.384
5—4	0.299	0.300	0.345	0.367
5—6	0.987	0.987	1.000	1.000
6—8	0.765	0.765	0.765	0.800
6—9	0.965	0.967	0.988	0.988
7—8	0.612	0.814	0.814	0.822
8—10	0.320	0.333	0.340	0.411
8—11	0.320	0.333	0.356	0.367
9—8	0.543	5.566	0.566	0.579
10—12	0.433	0.444	0.445	0.512
11—12	0.433	0.454	0.456	0.488

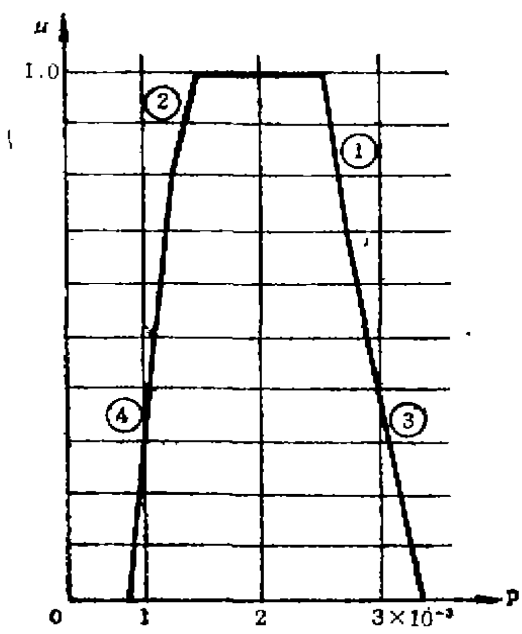

图 3　Fig. 3

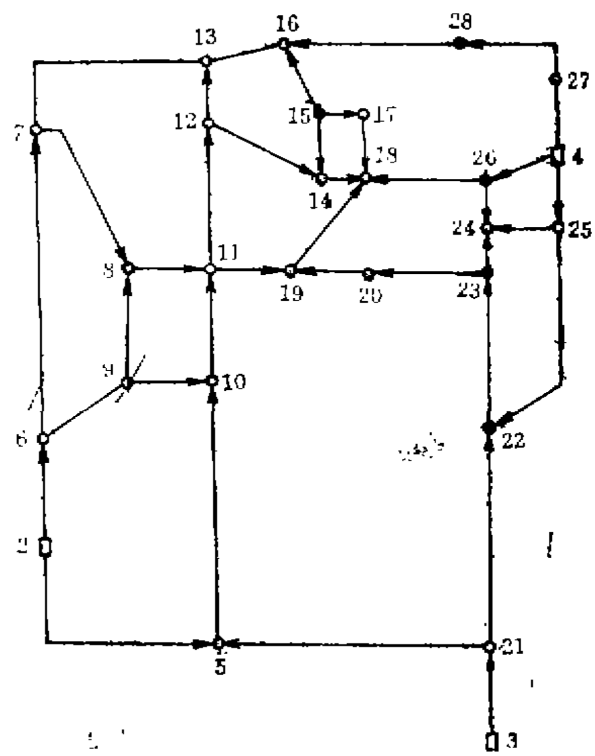

图 4　Fig. 4

例二、图4是取自文献[7]某城市的输水管网，但稍稍作了一点修改。共有三个水厂：节点2，3，4。因此，我们另加一个虚节点，编号为1，并使链路1－2，1－3，1－4的可靠度都是1。各管段的输入用P，h^L，h^R的形式。具体数靠见表3。

计算结果见图5。这里只列了终点为18的结果。但计算程序可以一次给出任意多个终点的结果。

这里左侧也是折断了的，分为两截。这些结果是很有意思的。具体有

①1－4－27－28－16－13－12－14－18

②1－4－27－28－16－13－12－14－18

③1－3－21－22－23－20－19－18

出现多条的原因例一已经解释，这正是考虑了模糊性的优越之处。

为了比较，我们把四种决策模的计算结果

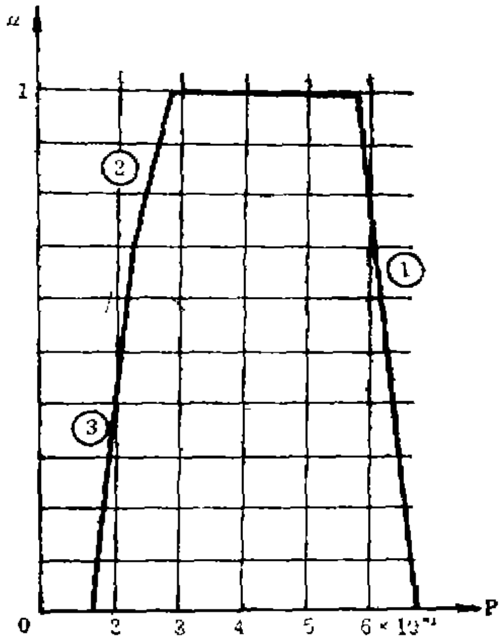

图5 Fig. 5

表3 Table 3

管段	P	h^L	h^R	管段	P	h^L	h^R
2—5	1.99	3	4	15—14	0.931	1	6
2—6	1	0	0	15—16	0.939	2	7
3—21	1	0	0	15—17	0.959	4	6
4—25	1	0	0	16—13	0.964	5	1
4—26	0.910	4	2	17—18	0.927	3	4
4—27	1	0	0	19—18	0.879	7	4
5—10	0.802	3	8	20—19	0.959	1	3
6—7	1	0	0	21—5	0.759	2	2
6—9	1	0	0	21—22	0.823	7	1
7—8	0.759	3	6	22—23	0.930	6	4
7—13	0.823	4	1	23—20	0.874	1	1
8—11	0.959	3	6	23—24	0.960	2	2
9—8	0.948	1	1	24—20	0.840	3	1
9—10	0.959	8	2	25—22	0.853	1	6
10—11	0.946	3	5	25—24	0.913	3	2
11—12	0.860	5	1	26—18	0.835	1	4
11—19	0.882	1	6	26—24	0.921	2	5
12—14	0.933	2	5	27—28	0.862	7	2
13—12	0.979	1	3	28—16	0.630	5	4
14—18	0.965	2	5				

列于下：

1. 0.437

2. 0.426

3. 0.432

4. 0.423

它均有概率的量纲，四个结果大体上都是接近的。

八、结　语

本文比较详细地介绍了模糊最危险路分析作输水管网的震害预测，这是用随机模糊网络进行生命线工程震害预测的一个部分。总的来说，这个模型包括四个部分：

1. 模糊连通性分析，使用的是模糊矩阵及术传递闭包，主要解决关键的问题；

2. 模糊管路可靠性分析，使用的是模糊积分，主要解决从水厂到供水点的可靠性问题；

3. 模糊水头损失分析，使用的是模糊最短路算法，主要解决供水点在地震后供水可能性分析；（正在研究中）

4. 模糊最危险路，这就是本文介绍的内容。

这样，就可以全面地进行输水管网地震表现的深入分析，为抗震防灾规划提供科学依据。随机模糊网络的提出及在生命线工程的应用，同时也是具有理论意义的。

参 考 文 献

〔1〕刘锡荟，李鹏程，张锐，城市生命线工程抗震的模糊图分析方法，地震工程与工程抗震，9卷1期，1989.

〔2〕刘锡荟，王海燕，张锐，输水管网模糊地震可靠性的Monte Carlo法分析程序，地震研究，印出，1989.

〔3〕刘锡荟，王孟玫，汪培庄，震害预测的模糊数学模型，建筑结构学报，第1期，1984.

〔4〕刘锡荟，王孟玫，，模糊烈度评定计算实用方法，地震研究，1985.

〔5〕刘锡荟，王孟玫，建筑物地震破坏等级的模糊数量化表示方法，华北地震科学，第二期，1984.

〔6〕L、A、Zadeh, The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ, Information Science, 8，9（1975，1976）

〔7〕金国梁，冯家琪，给水管网的震害预测方法，工程抗震，第二期，1989.

〔8〕L、A、Zadeh, Fuzzy sets as avbasis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets and Systems, 1（1978）

〔9〕J、J、BucKley, Fuzzy PERT, in Fuzzy Methodologies for Industrial and Systems Engineering, G、W、Evans et al、（Ed），Elsevier Science（1988）

〔10〕Liu Xihui, Decision—making for Urban Earthquake Disaster Mitigation in a Fuzzy Environment, in Fuzzy Mathematics in Earthquake Research, Seismological Press, 1985.

RANDOM FUZZY NETWORK PREDICTION FOR THE MOST HAZARDOUS PASSAGE OF THE EARTHQUAKE DAMAGE TO PIPELINE NETWORK IN THE WATER SUPPLY SYSTEM

Liu Xihui, Wang Haiyan

(China Academy of Electronics and Information Technology)

Zhang Daming

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

〔Abstract〕 Damage to the pipeline network in the water supply system would develope the earthquake disaster seriously. Random fuzzy network analysis and reliability analysis have been used in the prediction for the earthquake damage to pipeline network. [1], [2] In this paper, the most hazardous passage fuzzy analysis (or most, reliable passage fuzzy analysis) is proposed, that is: the reliable probability of the pipeline section is developed to language probability, so that the fuzzy property can be easily included for making the prediction of earthquake damage to the pipeline network more reasonable and serving the urban earthquake resistance and disaster prevention.