计算机模糊控制原理及应用

戎月莉　编著

北京航空航天大学出版社

计算机模糊控制原理及应用

戎月莉　编著

北京航空航天大学出版社

（京）新登字 166 号

内 容 简 介

模糊控制作为九十年代的高新技术，在当今世界上有极迅速的发展。本书在采集国外（特别是德国）1991～1993 年的研究成果基础上，深入浅出地阐述了计算机模糊控制的基本原理和基本方法，系统介绍了模糊控制的软件开发工具和模糊芯片硬件电路，并对神经网格、混沌——与模糊控制新发展的有关的基本知识作了简明论述。后半部对模糊控制技术在工业过程控制、汽车驾驶、电梯群控及家电产品等方面的最新应用作了典型的实例分析。特点是内容新颖、文字精炼、信息量大、通俗易懂，并附有大量参考文献目录。可供从事模糊控制应用研究和开发的科技工作者、工程技术人员及大专院校师生参考。

计算机模糊控制原理及应用
JISUANJI MOHUKONGZHI YUANLI JI YINGYONG
戎月莉　编著
责任编辑　韦秋虎
北京航空航天大学出版社出版　　邮编　100083
新华书店总店科技发行所发行　各地新华书店经销
朝阳科普印刷厂印装
*
850×1168　1/32　印张：6.75　字数：181 千字
1995 年 4 月第一版　1995 年 4 月　第一次印刷　印数：10100 册
ISBN 7-81012-550-8/TP・149　　定价：7.50 元

常用名词与符号表

一、 模糊逻辑

名　　词	符　　号	出现页次
模糊集合	A,B,C	
元素	x	
隶属度函数(MF)	$\mu_A(x)$	
属于	$\in$　如　$x\in R$ $\mu_A\in[0,1]$	
模糊算子		
并(OR)	$\cup$	
交(AND)	$\cap$	
余(NO)	$\overline{A}$	
取大	MAX	
取小	MIN	
平衡算子	$\circ$	
γ 算子	γ	
权数	δ_A　δ_B	
乘积算子	$\bullet$	

二、 模糊控制器

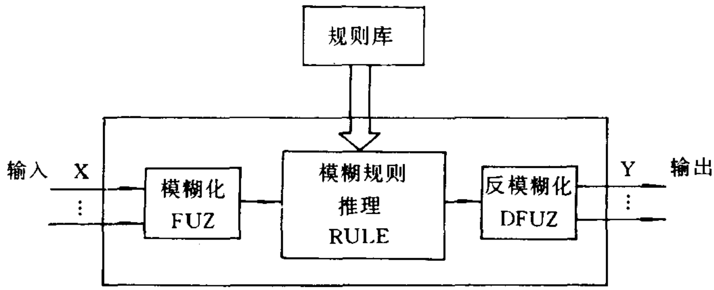
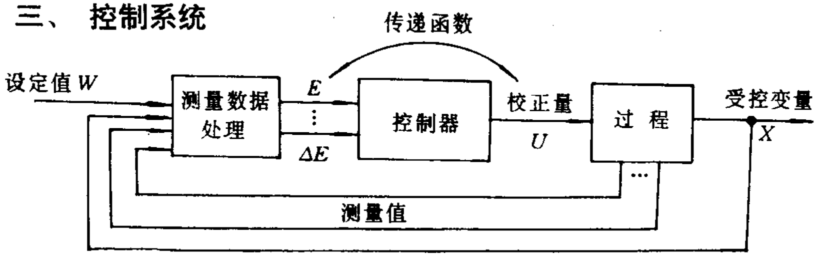


图 0-1 模糊控制器

名 词	符 号	出现页次
输入变量	X	
输出变量	Y	
输入/输出数据	x/y	
模糊化	FUZ	
模糊规则推理	RULE	
反模糊化	DFUZ	
语言变量		
语言值，级(Label)		
正大 正中 正小	PL,PM,PS	
零	ZE	
负大 负中 负小	NL,NM,NS	
语言控制规则	IF…THEN…	
或 (OR)		
和 (AND)		
最大-最小-推理法	MAX-MIN-Inference	
最大-乘积-推理法	MAX-PROD-Inference	
面积重心法	COG	
力度(适合度)		
模糊推理机	FIM	

三、 控制系统



（注：控制器可为 PID 也可为 FUZZY 或两者结合）

图 0-2　控制系统

名　词	符　号	出现页次
PID 控制	PID	
设定值		
受控变量	X	
校正量、调整量	U，u	
偏差（＝实测值－设定值）	e	
误差（＝设定值－实测值）	E	
偏差变化率$\left(\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right)$	Δe	
误差变化率$\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}\right)$	ΔE	
传递函数	$U(S)=K_P\left(1+\frac{1}{T_iS}+T_dS\right)E(S)$	
比例增益	K_P	
积分时间	T_i	
微分时间	T_d	
微分元件	D	
积分元件	P	
可编程控制	SPS	
过程控制系统	PLS TELEPERM M（西门子公司产品）	

四、 神经网络

名　　词	符　　号	出现页次
逆传播	(Back-Propagation)	
BP 神经网络		
输入层、输出层、隐含层	x^0, x^1, x^2	
网络的权重	w	
权重、连接权	w_{ij}	
连接权矩阵	W, W^T	
样本	(x, y)	
模糊联想记忆网络	FAM	
模式对	(A_K, B_K)	
交一并合成运算	$\circ$	
神经元状态	$C_i(t), C_1$	
模糊认知映射网络	FCM	
网络初始态	S, S^1	
处理单元	PE	
模糊神经网络	FNN	
误差函数	$E=\frac{(r-y)^2}{2}$	
误差信号	$\delta=-\frac{\partial E}{\partial u}$	
阈　　值	θ	

五、 其　它

名　　词	符　　号	出现页次
输入变量	Input	
输出变量	Output	
脉冲宽度调制	PWM	
输入变量	$v, d, ver(=\mathrm{d}a/\mathrm{d}g)$	
面积权重	α, α'	
校正值	$b \quad (\alpha'+b=\alpha)$	
兆模糊逻辑运算/秒	MFLIPS	

目　录

第一章　模糊控制原理

§1.1　隶属度和模糊算子

模糊控制是以**模糊集合论**(Fuzzy Set)作为它的数学基础的。那么,什么是模糊集合,它是怎样描述和定义的,又有哪些运算,这些问题是学习与掌握模糊控制技术的基础。

在数学上常用到的集合概念,可以表示为

例 1　集合 A 由四个离散值 x_1, x_2, x_3, x_4 组成

$$A = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$$

例 2　集合 A 由在 1.0 至 10.0 之间的所有实数集合 R 组成。

$$A = \{x;\quad x \in R,\qquad 1.0 \leqslant x \leqslant 10.0\}$$

要注意,这样的集合概念是完全不模糊的。这里不模糊指的是一个**元素** x,它要么属于集合 A,要么不属于集合 A,只有这两种可能性。这个特性可以用特征函数 $\mu_A(x)$ 描述。函数 $\mu_A(x)$ 只取 0 或 1 两个值。

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \text{ 属于集合 } A \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } x \text{ 不属于集合 } A \text{ 时} \end{cases}$$

基于这一集合概念的布尔代数在计算机上的运用就构成了计算机的二值逻辑{0,1}运算。

然而,自然界中很多事物和概念却并不能这样简单地描述。比如说,摄氏零度以下水结冰的现象,可以用图 1-1(a)表示,这里集合 A 为冰冻状态时所有温度的集合。这样结冰与不结冰状态之间可以以摄氏零度作为一个明确的分界线。但是,“冷”这个概念就找不到某一个温度作为它的分界线。大致地说,-10℃以下是冷的,

10℃以上是不冷的，那么在－10～10℃之间的温度究竟属于"冷"还是不属于"冷"？

为了表示类似的这样一些模糊概念，将图 1-1(*a*)的特征函数 $\mu_A(x)$的取值范围进行了扩大，由此产生了**模糊集合**的概念。我们说一个元素 x 属于某一个模糊集合的程度可取[0,1]之间的所有实数，以**隶属度** $\mu_A(x)$表示

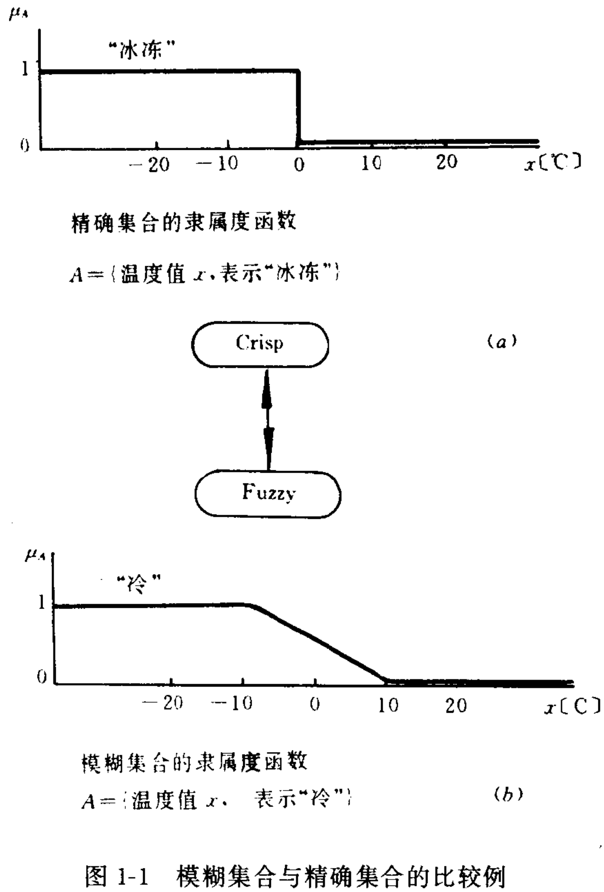


图 1-1　模糊集合与精确集合的比较例

(*a*) 集合 *A* 指"冰冻"状态所有温度的集合

(*b*) 集合 *A* 指"冷"的所有温度的集合

$$\mu_A(x)=\begin{cases}1 & \text{表示 } x \text{ 完全属于集合 } A\\ 0 & \text{表示 } x \text{ 完全不属于集合 } A\\ \text{其它值} & \text{表示 } x \text{ 属于集合 } A \text{ 的程度}\end{cases}$$

$$\mu_A(x)\in[0,1]$$

这样，对于每一个元素 x_i，给出它的属于模糊集合 A 的隶属程度（或称隶属度）$\mu_A(x_i)$，简记为 μ_i，它的取值范围在 0.0 至 1.0 之间。

如模糊集合 A 定域于离散型元素 $x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots$ 上，则可用数学式子表示[1]

$$A=\mu_1/x_1+\mu_2/x_2+\cdots+\mu_i/x_i+\cdots$$

或者

$$A=\{(x_1,\mu_1),(x_2,\mu_2),\cdots,(x_i,\mu_i),\cdots\}$$

如模糊集合 A 定域于连续实数，则各元素的隶属度就构成了**隶属度函数**(Membership Function)$\mu_A(x)$，可用数字式子表示

$$A=\int\mu_A(x)/x$$

注意，上述式子中出现的符号“/”、“+”、“$\int$”，并不代表数学意义上的除号，加号和积分号，它们是模糊集合的一种表示形式。

总起来，一个模糊集合是完全以隶属度函数 $\mu_A(x)$ 来描述的。隶属度的概念是整个模糊集合理论的基石。

下面，以人体的身高作为模糊集合的例子，具体说明隶属度函数的确定方法。（见图 1-2）

通常我们评判一个成年男子，当他的身高低于 1.60 米时，认为他是“矮个子”，在 1.65 米左右可算作“中等”，在 1.74 米时则列入“高个子”，当他超过 1.90 米时，就是“非常高”的人了。这里以“矮”、“中等”、“高”和“非常高”作为身高的四个**模糊子集**。图 1-2 给出了这四个模糊子集的隶属度函数，它们各以梯形或三角形表示，图上横坐标表示身高，以厘米作单位，纵坐标表示隶属度，取值范围在[0,1]之间。当一个人的身高为 1.82 米时，从图上可以看

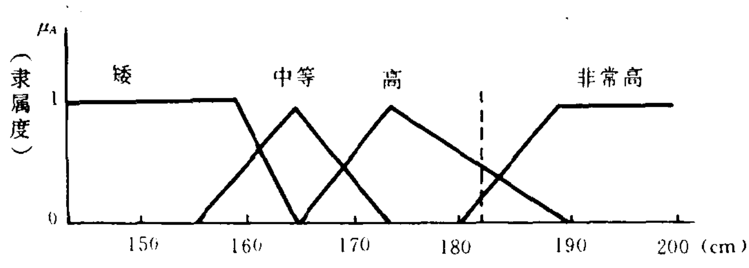


图 1-2　身高的模糊集合

到，他属于“高个子”的程度为 0.5，而他属于“非常高”的程度则为 0.2。注意，这四个模糊子集的隶属度函数是相互重叠的。尽管它们的确定带有人为的主观随意性，然而它要比普通集合更符合人的思维过程，更贴近客观实际，因为对于一个身高 1.70 米的成年男子，我们不能把他绝对地划分到“高”或“中等”的范围内。从图 1-2 上也可见到，由于隶属度函数重叠情况的不同，它是不受归一化条件的限制的，这也是模糊性与概率的一大区别。

在实际控制问题中，一般我们都选用上述的三角形或梯形作为模糊集合的隶属度函数，如图 1-3 所示。因为它们的数学表达和运算简便，所占的内存空间小，并且与采用其它复杂形状的隶属度函数相比，在达到控制要求方面并无大的差别，因此已被广泛采用。

还要说明的是，在实际控制问题中，除了常用三角形或梯形作为隶属度函数外，对于控制输出部分，还常常用到更简单的狄拉克函数(即单值函数)作为隶属度函数，见图 1-4。

为了使读者对隶属度函数有个更深入的了解，这里再给出一些其它形状的隶属度函数。

图 1-5 表示了偏小型、偏大型和中间型三种隶属度函数，它们的数学表达式为[3]

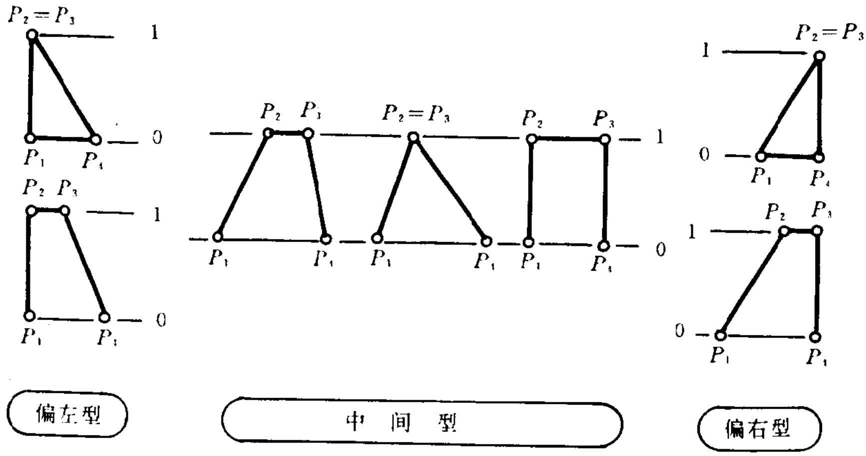


图 1-3　由四个支点构成的线性隶属度函数

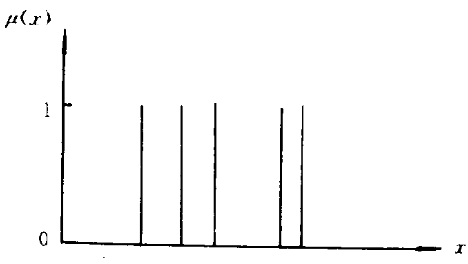


图 1-4　δ 函数作为推理结果的隶属度函数

偏小型

$$\mu_A(x)=\begin{cases}1+[a(x-c)^b]^{-1} & x>c\\ 1 & x\leqslant c\end{cases}$$

偏大型

$$\mu_A(x)=\begin{cases}0 & x<c\\ 1+[a(x-c)^{-b}]^{-1} & x\geqslant c\end{cases}$$

中间型(对称型或正态型)

$$\mu_A(x)=e^{-k(x-c)^2}$$

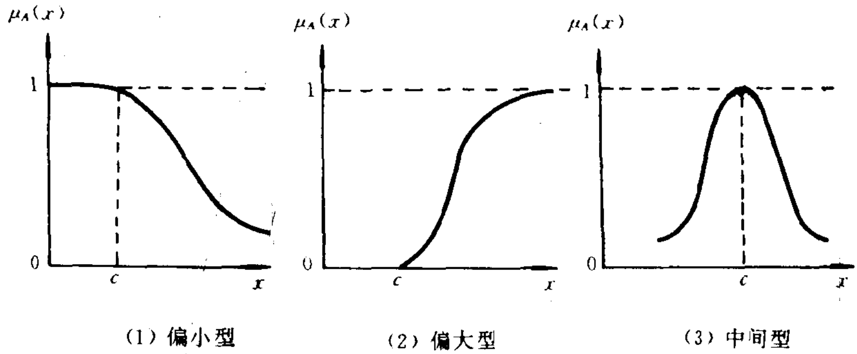


图 1-5　三类隶属度函数

对于模糊决策过程或模糊模式识别来说，则偏爱于采用如图 1-6 所示的费米曲线作为隶属度函数。图上各曲线相对应的模糊子集的隶属度函数的数学表达式详见表 1-1[13]。

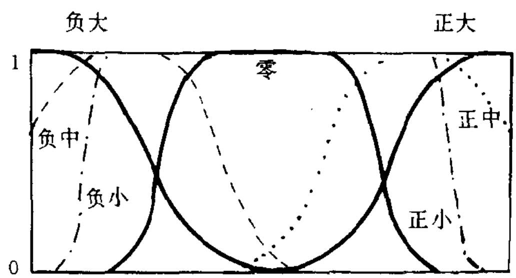


图 1-6　费米曲线状的隶属度函数

下面，我们讨论模糊集合的运算，即**模糊算子**(Fuzzy Operator)的确定问题。

对于一个实际控制过程，输入量往往并不是单一的。比如要同时根据温度及温度的变化率，或者温度与压力这样两个因素，来决定控制的输出。那么，这两个或两个以上的输入变量之间的关系，

或者说两个模糊集合之间的运算又是怎样进行的呢？

表 1-1　费米曲线的数学公式

模糊子集	隶属度函数
正　大	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.5}{\mathrm{abs}(1-x)}\right)^{2.5}\right]$
正　中	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.25}{\mathrm{abs}(0.7-x)}\right)^{2.5}\right]$
正　小	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.25}{\mathrm{abs}(0.4-x)}\right)^{2.5}\right]$
正　零	$\exp[-5\ \mathrm{abs}(x-0.05)]$
负　零	$\exp[-5\ \mathrm{abs}(x+0.05)]$
负　小	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.25}{\mathrm{abs}(-0.4-x)}\right)^{2.5}\right]$
负　中	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.25}{\mathrm{abs}(-0.7-x)}\right)^{2.5}\right]$
负　大	$1-\exp\left[-\left(\frac{0.5}{\mathrm{abs}(-1-x)}\right)^{2.5}\right]$

我们先来看计算机中的二值逻辑运算，对于普通集合 A 和 B，一般有它们的“并”(OR)、“交”(AND)、“余”(NO)运算，见图 1-7。这些运算与计算机中的{0,1}运算相对应。

同样，对于模糊集合 A 和 B，也可以定义它们的“并”、“交”、“余”运算。

定义 1　当 C 为模糊集合 A 和 B 的并集，即 $C=A\cup B$

则　$\mu_C(x)=\mathrm{MAX}[\mu_A(x),\mu_B(x)]$

定义 2　当 C 为模糊集合 A 和 B 的交集，即 $C=A\cap B$

则 $\mu_c(x)=\mathrm{MIN}[\mu_A(x),\mu_B(x)]$。

定义 3　当 $\overline{A}$ 为模糊集合 A 的余集(或称补集)

则 $\mu_{\overline{A}}(x)=1-\mu_A(x)$

例如，当$A=\{(x_1,0.7),(x_2,0.3),(x_3,0.8)\}$

$B=\{(x_1,0.2),(x_2,0.6),(x_3,0.4)\}$

则并集$C=A\cup B=\{(x_1,0.7),(x_2,0.6),(x_3,0.8)\}$

交集$C=A\cap B=\{(x_1,0.2),(x_2,0.3),(x_3,0.4)\}$

若x连续时，按以上定义，并、交、余的运算结果如图 1-7 所示[15]。

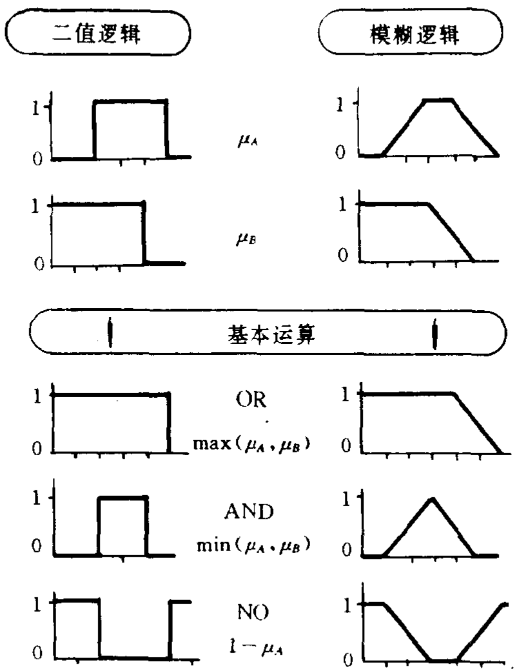


图 1-7　二值逻辑和模糊逻辑运算

从图 1-7 可见，模糊集合A与B的并、交、余的逻辑运算与普通集合相同。更进一步说，模糊集合的逻辑运算实质上就是隶属度函数的运算过程。除以上介绍的这三种逻辑运算外，还有很多其它形式的模糊集合的逻辑运算，如“限界差”、“限界和”、“限界积”、

"蕴涵"、"等价"等等[4]，在此不再作一一介绍了。要说明的一点是，对于普通集合成立的补余律，即$A\cup\overline{A}=$全集

$$A\cap\overline{A}=\text{空集}$$

对模糊集合不再成立。

用隶属度函数的取大(MAX)——取小(MIN)进行模糊集合的并、交逻辑运算是目前最常用的方法，但同时还有各种定义模糊集合逻辑运算的隶属度函数的计算公式，它们统称为**模糊算子**。下面介绍一些常用的模糊算子[11]。

对于模糊集合 A 和 B 的逻辑交，可有

$C=A\cap B$

(1) $\mu_c(x)=\mathrm{MIN}\{\mu_A(x),\mu_B(x)\}$　　最小值算子

(2) $\mu_c(x)=\mu_A(x)\cdot\mu_b(x)$　　乘积算子

(3) $\mu_c(x)=\mathrm{MAX}\{0,\mu_A(x)+\mu_B(x)-1\}$

同理，对于模糊集合 A 和 B 的逻辑并，有

$C=A\cup B$

(1) $\mu_c(x)=\mathrm{MAX}\{\mu_A(x),\mu_B(x)\}$　　最大值算子

(2) $\mu_c(x)=\mu_A(x)+\mu_B(x)-\mu_A(x)\cdot\mu_B(x)$

(3) $\mu_c(x)=\mathrm{MIN}\{1,\mu_A(x)+\mu_B(x)\}$

还有一种模糊集合的逻辑运算，称为平衡算子，记为

$C=A\circ B$

(1) $\mu_c(x)=\lambda[\mu_A(x)\cdot\mu_B(x)]+(1-\lambda)[\mu_A(x)+\mu_B(x)-\mu_A(x)\cdot\mu_B(x)]$

(2) $\mu_c(x)=[\mu_A(x)\cdot\mu_B(x)]^{1-\gamma}\cdot[1-(1-\mu_A(x))\cdot(1-\mu_B(x))]^{\gamma}$　　γ 算子

(3) $\mu_c(x)=[\mu_A(x)^{\delta_A}\cdot\mu_B(x)^{\delta_B}]^{1-\gamma}[1-(1-\mu_A(x))^{\delta_A}\cdot(1-\mu_B(x))^{\delta_B}]^{\gamma}$　　带有权数的 γ 算子

引入这一平衡算子是由于隶属度函数进行取大、取小运算时不可避免地要丢失部分信息，所以人们研究采用如 γ 算子一类的模糊算子，起到补偿的作用。图 1-8 表示 γ 算子在 $\gamma=0$ 的一端相