

# 智能信息处理

熊和金 陈德军 编著

ZHINENG XINXI CHULI

国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 智能信息处理

熊和金 陈德军 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

智能信息处理在复杂系统建模、系统分析、系统决策、系统控制、系统优化和系统设计等领域具有广阔的应用前景。

本书介绍了智能信息处理的10个专题,包括模糊信息处理、神经网络信息处理、云信息处理、可拓信息处理、粗集信息处理、遗传算法、蚁群算法、免疫算法、信息融合和量子智能信息处理等。

本书除了可以供智能信息处理与智能控制技术研究人员参考外,还可以作为有关专业研究生教材和大学高年级选修课教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能信息处理/熊和金,陈德军编著. —北京:国防工业出版社,2006.6

ISBN 7-118-04431-8

I. 智… II. ①熊…②陈… III. 人工智能—应用—信息处理 IV. G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019348 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 430 千字

2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

智能信息处理就是模拟人或者自然界其他生物处理信息的行为,建立处理复杂系统信息的理论、算法和系统的方法和技术。智能信息处理主要面对的是不确定性系统和不确定性现象信息处理问题。智能信息处理在系统建模、系统分析、系统决策、系统控制、系统优化和系统设计等领域具有广阔的应用前景。

本书介绍了智能信息处理的 10 个方面,包括模糊信息处理、神经网络信息处理、云信息处理、可拓信息处理、粗集信息处理、遗传算法信息处理、蚁群算法信息处理、免疫算法信息处理、信息融合和量子智能信息处理等专题。

本书得以成稿,需要特别感谢众多专家学者扎实而富有创造性的工作,是他们的研究成果为本书提供了广泛而精深的写作素材。在此由衷地感谢和敬重他们。

智能信息处理理论与技术经过 40 年的发展研究,成果丰硕。尽管我们悉心工作,反复琢磨,但是由于专业素养所限,本书一定存在以偏概全、理解含混甚至错误之处,恳请广大读者予以指正。

编 者  
2006 年 4 月

# 目 录

第 1 章 模糊信息处理	1
1.1 电气设备故障诊断模糊模型	1
1.1.1 故障诊断模糊化的必要	1
1.1.2 三比值法模糊化处理	1
1.1.3 举例说明	4
1.1.4 模糊故障诊断要点	4
1.2 多目标模糊优化方法	5
1.2.1 多目标优化问题	5
1.2.2 多目标结构模糊优化问题的解法	5
1.2.3 隶属函数选取时对优化结果的影响	6
1.2.4 数值实例	8
1.3 数据处理的模糊熵方法	10
1.3.1 模糊事件的熵	10
1.3.2 用基于熵的模糊方法评定测量结果	11
1.3.3 实例分析	11
1.4 自适应模糊聚类分析	12
1.4.1 基本的 FCM 聚类算法	12
1.4.2 自适应模糊 C 均值聚类(AFCMC)算法	13
1.4.3 应用实例	13
1.5 模糊关联分析	14
1.5.1 模糊综合评价分析	14
1.5.2 模糊关联分析法原理与方法	14
1.5.3 实例研究	16
1.6 模糊信息优化方法	17
1.6.1 模糊信息优化处理概述	17
1.6.2 模糊信息优化处理的基本理论	18
1.6.3 黄土湿陷性评价实例分析	19
1.7 模糊多属性决策的模糊贴近度方法	19
1.7.1 模糊多属性决策	19
1.7.2 模糊多属性决策模型	20
1.7.3 模糊多属性决策的模糊贴近度解法	20
1.7.4 算例分析	21

1.8	信息不完全确知的模糊决策集成模型	22
1.8.1	信息不完全确知的多目标决策	22
1.8.2	$I^2DM$ 模糊决策集成模型	22
1.8.3	$I^2DM$ 模糊决策集成模型分析	25
1.9	模糊 Petri 网	26
1.9.1	Petri 网	26
1.9.2	基于模糊 Petri 网模型的知识描述	26
1.9.3	基于模糊 Petri 网的推理算法	28
1.9.4	推理实例	29
<b>第 2 章</b>	<b>神经网络信息处理</b>	<b>31</b>
2.1	神经网络一般模型	31
2.1.1	一般形式的神经网络模型	31
2.1.2	神经网络学习算法	31
2.1.3	神经网络计算的特点	32
2.2	BP 神经网络模型	33
2.2.1	BP 神经网络学习算法	33
2.2.2	BP 神经网络建模	34
2.3	贝叶斯神经网络	35
2.3.1	传统神经网络和贝叶斯方法	35
2.3.2	神经网络的贝叶斯学习	35
2.3.3	贝叶斯神经网络算法	37
2.4	RBF 神经网络	37
2.4.1	RBF 特点	37
2.4.2	RBF 神经网络的结构与训练	37
2.4.3	高速公路 ANN 限速控制器的设计	39
2.5	贝叶斯—高斯神经网络非线性系统辨识	39
2.5.1	BPNN 分析	39
2.5.2	BG 推理模型和 BGNN	40
2.5.3	BGNN 的自组织过程	42
2.5.4	仿真研究	42
2.6	广义神经网络	43
2.6.1	智能神经元模型	43
2.6.2	广义神经网络模型及学习算法	45
2.6.3	交通流预测模型	45
2.7	发动机神经网络 BP 算法建模	45
2.7.1	发动机性能曲线神经网络处理方法	45
2.7.2	发动机神经网络辨识结构	46
2.8	组合灰色神经网络模型	49
2.8.1	灰色预测模型	49

2.8.2	灰色神经网络预测模型	51
2.8.3	电力远期价格预测	52
<b>第3章</b>	<b>云信息处理</b>	<b>54</b>
3.1	隶属云	54
3.1.1	模糊隶属函数	54
3.1.2	对隶属函数的质疑	54
3.1.3	隶属云定义	55
3.1.4	隶属云的数字特征	55
3.1.5	隶属云发生器	56
3.1.6	隶属云发生器的实现技术	58
3.2	云滴与云滴生成算法	59
3.2.1	云滴	59
3.2.2	云滴生成算法	59
3.3	云计算	60
3.3.1	云模型与不确定推理	60
3.3.2	云计算原理	62
3.3.3	云化计算过程	62
3.3.4	云化计算的系统实现	65
3.4	定性规则的云表示	65
3.4.1	二维云模型	65
3.4.2	二维云及多维云生成算法的改进	66
3.4.3	定性规则的云模型表示	67
3.4.4	一条带“或条件”的定性规则的表示	69
3.4.5	一条多重条件的定性规则的表示	69
3.4.6	定性规则的统一表示	70
3.5	云综合评判模型	71
3.5.1	综合评判	71
3.5.2	云综合评判	71
3.5.3	应用实例	72
3.6	云决策树	73
3.6.1	决策树方法	73
3.6.2	基于云理论的神经网络映射学习	73
3.6.3	云决策树的生成和应用	76
3.7	定性预测系统的建模	77
3.7.1	二维云算法	77
3.7.2	算法描述及实现机制	77
3.7.3	算法步骤	78
3.8	三级倒立摆的云控制	79
3.8.1	三级倒立摆	79

3.8.2	云模型与云推理	80
3.8.3	倒立摆的智能控制试验与分析	80
3.8.4	试验结果分析	81
<b>第4章</b>	<b>可拓信息处理</b>	<b>83</b>
4.1	可拓学概述	83
4.1.1	可拓学的研究对象、理论框架和方法体系	83
4.1.2	可拓工程思想、工具和方法	86
4.2	可拓集合	91
4.2.1	可拓集合涵义	91
4.2.2	扩展的可拓集合概念	91
4.2.3	可拓集合的应用	94
4.3	集装箱生成量可拓聚类预测	95
4.3.1	集装箱生成量可拓聚类预测的建模机制	95
4.3.2	可拓聚类预测的物元模型	95
4.3.3	集装箱生成量可拓聚类预测的物元模型	96
4.4	可拓故障诊断模型	99
4.4.1	变压器故障诊断	99
4.4.2	变压器故障的可拓诊断	99
4.4.3	实例研究	102
4.5	可拓层次分析法	103
4.5.1	层次分析法分析	103
4.5.2	可拓区间数及其运算	103
4.5.3	可拓区间数判断矩阵及其一致性	104
4.5.4	可拓层次分析	105
4.5.5	实例算法	106
4.6	可拓控制策略	107
4.6.1	可拓控制的提出	107
4.6.2	可拓控制器的结构	107
4.6.3	可拓控制器的设计	108
4.6.4	仿真与展望	111
4.7	菱形思维可拓神经网络模型	111
4.7.1	菱形思维方法	111
4.7.2	菱形思维的可拓神经网络模型及表示	112
4.7.3	菱形思维可拓神经网络模型的学习算法	113
4.7.4	菱形思维可拓神经网络的评判机制	114
<b>第5章</b>	<b>粗集信息处理</b>	<b>116</b>
5.1	粗集理论基础	116
5.1.1	粗集理论的提出	116
5.1.2	等价类	116

5.1.3	知识的约简 .....	118
5.2	粗糙模糊集合 .....	118
5.2.1	粗集与模糊集合分析 .....	118
5.2.2	模糊粗集 .....	120
5.2.3	知识近似模型的统一 .....	121
5.3	粗集神经网络 .....	122
5.3.1	Rough-ANN 结合的特点 .....	122
5.3.2	决策表简化方法 .....	122
5.3.3	粗集神经网络系统 .....	123
5.4	贝叶斯分类器粗集算法 .....	124
5.4.1	简单贝叶斯分类 .....	125
5.4.2	基于粗集的属性约简方法 .....	125
5.4.3	基于粗集的贝叶斯分类器算法 .....	126
5.4.4	试验结果 .....	128
5.5	系统评估粗集方法 .....	129
5.5.1	系统评估粗集方法的特点 .....	129
5.5.2	系统综合评估粗集方法 .....	129
5.5.3	建立评估体系的粗集方法 .....	130
5.5.4	试验验证 .....	131
5.6	文字识别的粗集算法 .....	132
5.6.1	模式识别与粗集方法 .....	132
5.6.2	文字粗集表达与知识简化 .....	133
5.6.3	基于粗集理论方法的文字识别 .....	133
5.7	图像中值滤波的粗集方法 .....	135
5.7.1	基本依据 .....	135
5.7.2	粗集中值滤波 .....	135
5.7.3	试验结论和讨论 .....	136
5.8	灰色粗集模型与故障诊断 .....	136
5.8.1	灰色关联分析方法 .....	136
5.8.2	参数属性分析 .....	137
5.8.3	灰色粗集模型的建立 .....	138
5.8.4	试验结果及分析 .....	139
<b>第 6 章</b>	<b>遗传算法</b> .....	<b>141</b>
6.1	遗传算法基础 .....	141
6.1.1	遗传算法的历史 .....	141
6.1.2	遗传算法的基本原理 .....	141
6.1.3	遗传算法数学基础分析 .....	143
6.2	遗传算法分析 .....	145
6.2.1	遗传算法结构分析 .....	145

6.2.2	基因操作 .....	146
6.2.3	遗传算法参数选择 .....	148
6.3	TSP 问题的遗传算法解 .....	148
6.3.1	问题的分析 .....	148
6.3.2	遗传算法算子 .....	148
6.3.3	算法与试验 .....	150
6.4	神经网络的遗传学习算法 .....	150
6.4.1	遗传算法概述 .....	151
6.4.2	遗传学习算法之一 .....	152
6.4.3	遗传学习算法之二 .....	153
6.5	复数编码遗传算法 .....	154
6.5.1	复数编码遗传算法的基本原理 .....	154
6.5.2	基于神经网络的控制结构 .....	155
6.5.3	机器人竞争性协进化仿真 .....	156
6.6	并行遗传算法 .....	158
6.6.1	遗传算法并行化的必要性 .....	158
6.6.2	并行选择过程 .....	158
6.6.3	并行遗传算法的设计方案 .....	159
6.7	回溯遗传算法 .....	161
6.7.1	回溯机制 .....	161
6.7.2	回溯遗传算法的特点 .....	162
6.7.3	试验 .....	162
6.8	协同进化遗传算法 .....	164
6.8.1	生态种群捕获竞争模型 .....	164
6.8.2	捕获竞争遗传算法 .....	165
6.8.3	试验结果及比较 .....	165
<b>第 7 章</b>	<b>蚁群算法</b> .....	<b>168</b>
7.1	蚁群算法原理 .....	168
7.1.1	基本原理 .....	168
7.1.2	蚁群系统模型及其实现 .....	169
7.2	ant-cycle 算法 .....	170
7.3	自适应蚁群算法 .....	172
7.3.1	基本蚁群算法分析 .....	172
7.3.2	自适应蚁群算法(Adaptive ACS) .....	172
7.3.3	仿真结果 .....	173
7.4	遗传算法与蚁群算法的融合 .....	174
7.4.1	遗传算法与蚁群算法分析 .....	174
7.4.2	蚁群算法的优化机理及模型描述 .....	175
7.4.3	遗传算法与蚁群算法的融合(GAAA) .....	176

7.4.4	仿真试验结果 .....	177
7.5	组合优化的蚁群算法 .....	180
7.5.1	路径优化问题 .....	180
7.5.2	最优树问题 .....	182
7.5.3	软件实现 .....	183
7.6	连续优化问题的蚁群算法 .....	183
7.6.1	无约束非线性最优化问题 .....	183
7.6.2	连续优化问题的蚁群算法 .....	183
7.6.3	计算实例 .....	185
7.7	系统辨识的蚁群算法 .....	185
7.7.1	连续空间寻优的蚁群算法回顾 .....	185
7.7.2	系统蚁群辨识算法 .....	186
7.7.3	实例研究及仿真结果 .....	190
7.8	聚类问题的蚁群算法 .....	191
7.8.1	数学模型 .....	191
7.8.2	$K$ -均值算法 .....	192
7.8.3	模拟退火算法 .....	192
7.8.4	蚁群算法 .....	192
7.8.5	算法比较 .....	193
7.9	函数优化蚁群算法 .....	194
7.9.1	函数优化的蚁群模型 .....	194
7.9.2	典型测试函数应用实例 .....	195
7.10	蚁群神经网络 .....	196
7.10.1	基于蚁群算法的神经网络训练 .....	196
7.10.2	蚁群神经网络算法步骤 .....	197
7.10.3	计算机仿真试验 .....	198
7.11	智能蚁群算法 .....	198
7.11.1	蚁群算法缺陷 .....	198
7.11.2	智能蚁群模型 .....	199
7.11.3	参数设定及结果 .....	200
7.12	自适应进化蚁群算法 .....	200
7.12.1	进化的必要性 .....	200
7.12.2	自适应进化蚁群模型 .....	200
7.12.3	仿真试验结果 .....	201
<b>第8章</b>	<b>免疫算法 .....</b>	<b>203</b>
8.1	免疫算法基础 .....	203
8.1.1	遗传算法的缺憾 .....	203
8.1.2	免疫算法的生物学基础 .....	203
8.1.3	免疫算法及其收敛性 .....	204

8.1.4	免疫算子的机理与构造 .....	206
8.1.5	免疫算子的执行算法 .....	207
8.1.6	免疫疫苗的选取示例 .....	207
8.1.7	TSP 问题的免疫算法求解 .....	208
8.2	免疫算法的设计 .....	210
8.2.1	免疫算法结构 .....	210
8.2.2	算法设计与实现 .....	211
8.3	多目标 Flow-shop 问题的免疫算法 .....	213
8.3.1	生产调度问题 .....	213
8.3.2	免疫调度算法 .....	214
8.3.3	工程应用 .....	215
8.3.4	免疫算法参数对优化效果的影响 .....	216
8.4	路径免疫规划算法 .....	217
8.4.1	系统描述 .....	217
8.4.2	算法描述 .....	218
8.4.3	仿真试验 .....	220
8.5	图像自适应免疫增强算法 .....	221
8.5.1	图像增强技术分析 .....	221
8.5.2	图像自适应增强 .....	221
8.5.3	图像增强的自适应免疫算法 .....	222
8.6	电网免疫规划算法 .....	223
8.6.1	免疫算法的亲和性 .....	223
8.6.2	电网规划免疫算法的基本步骤 .....	224
8.6.3	电网规划免疫模型 .....	225
8.6.4	应用实例 .....	225
8.7	电力系统最优潮流的免疫计算 .....	226
8.7.1	电力系统最优潮流的计算难题 .....	226
8.7.2	电力系统最优潮流的数学模型 .....	226
8.7.3	最优潮流的免疫算法实现 .....	227
8.7.4	算例分析 .....	229
<b>第 9 章</b>	<b>信息融合</b> .....	<b>230</b>
9.1	多传感器信息融合概述 .....	230
9.1.1	历史背景 .....	230
9.1.2	多传感器信息融合系统的处理模型 .....	232
9.1.3	多传感器信息融合的层次问题 .....	233
9.1.4	信息融合的实现方法 .....	234
9.2	信息融合模型与算法 .....	234
9.2.1	信息融合模型 .....	234
9.2.2	信息融合算法 .....	237

9.3	贝叶斯信息融合方法 .....	238
9.3.1	贝叶斯融合算法模型 .....	238
9.3.2	实例分析 .....	239
9.4	信息的模糊决策融合算法 .....	240
9.4.1	基于模糊决策树算法的融合模型 .....	241
9.4.2	应用实例 .....	243
9.5	信息融合的 D-S 算法 .....	244
9.5.1	互补信息 .....	244
9.5.2	D-S 理论基础 .....	245
9.5.3	Dempster 合成法则 .....	245
9.5.4	D-S 证据理论在多信息融合中的应用 .....	246
9.6	Vague 集模糊信息融合 .....	247
9.6.1	Vague 集 .....	247
9.6.2	基于 Vague 集的融合模型 .....	248
9.6.3	算例分析 .....	249
9.7	信息融合的神经网络模型与算法 .....	250
9.7.1	ANN 信息融合特点 .....	250
9.7.2	信息融合的 MART 模型及算法 .....	251
9.8	信息融合的模糊神经 Petri 网模型 .....	253
9.8.1	模糊 Petri 网 .....	253
9.8.2	模糊神经 Petri 网 .....	254
9.8.3	进一步关注 .....	255
<b>第 10 章</b>	<b>量子智能信息处理 .....</b>	<b>257</b>
10.1	量子信息论 .....	257
10.1.1	量子计算 .....	257
10.1.2	量子信息论基础 .....	258
10.1.3	量子信息处理 .....	260
10.1.4	量子加密 .....	264
10.1.5	信息论与量子信息论对比 .....	264
10.2	量子神经计算 .....	265
10.2.1	神经计算回顾 .....	265
10.2.2	量子计算与神经计算的结合 .....	266
10.2.3	量子神经信息处理 .....	266
10.2.4	量子神经计算模型 .....	268
10.3	典型量子神经网络模型 .....	269
10.3.1	ANN 概念的量子类比 .....	269
10.3.2	QNN 的物理实现 .....	270
10.3.3	几种 QNN 模型 .....	271
10.4	量子神经元 .....	274

10.4.1	量子逻辑门 .....	274
10.4.2	量子神经元模型.....	275
10.4.3	量子神经元学习算法.....	275
10.4.4	量子逻辑运算特性.....	277
10.5	量子遗传算法.....	279
10.5.1	量子遗传算法基础.....	279
10.5.2	改进量子遗传算法.....	280
10.5.3	新量子遗传算法.....	281
10.5.4	分组量子遗传算法.....	282
10.5.5	量子遗传算法的其他形式.....	283
参考文献.....		284

# 第 1 章 模糊信息处理

由 L. A. Zadeh 提出的模糊集合理论与模糊逻辑,就是用来度量处理模糊信息和描写分析与设计模糊系统的。他采用精确的方法、精确的公式、精确的模型,刻画、度量、分析那些模模糊糊的、信息不太完整或不太准确的现象与规律,而这些现象与规律通常用人类语言表达,并且在人们之间可以准确地传递有关这些现象与规律等语言信息。

模糊理论与技术经过 40 年的快速发展,在诸多学科与工程技术领域得到了很好的应用。关于模糊理论与技术的文献和著作很多,本章不准备从模糊理论的 ABC 介绍起,有关这些内容,读者在需要时可以参考一些标准的教科书。本章介绍的是模糊集合理论与模糊逻辑在智能信息处理中若干典型而极富启发性的应用模式,这些应用范例可以为人们解决其他实际问题提供有价值的参考与借鉴。

## 1.1 电气设备故障诊断模糊模型

### 1.1.1 故障诊断模糊化的必要

在电力系统中,由于各种原因不可避免地会产生电气设备的故障。电气设备的故障原因相当复杂,存在大量不确定因素,对于目前使用的故障判断规程有两点不足:一是某些过于“精确”,太绝对化;二是某些规则反映故障现象不够全面,难以把握。如以变压器色谱分析的三比值法为例:某变压器发生  $150^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  低温范围内过热性故障,测得气体含量( $\times 10^{-6}$ ): $\text{H}_2 = 180$ ,  $\text{CH}_4 = 175$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 75$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4 = 50$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2 = 4$ 。利用常规的三比值法,可得  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  的编码均为 0,总的编码为“000”属于无故障。之所以会得出这个结论,就是因为三比值法的比值区间分割过于绝对化。解决的方法是运用模糊数学知识使原来的精确划分的区间模糊化。

又如变压器绝缘受潮受多种因素影响,很难直接根据绝缘体电阻大小做出正确的判断,变压器  $31^{\circ}\text{C}$  时绝缘电阻为  $700\text{M}\Omega$ ,比出厂值  $1700\text{M}\Omega$  下降  $1/2$  以上。按照规程“绝缘电阻与历次测量值相比有显著降低,绝缘应为不合格”,该变压器出现了绝缘故障。但实际发现,这是由于新注入的变压器油绝缘电阻过低造成的,而非绝缘问题。解决的方法应是绝缘电阻与吸收比试验和介质损耗试验等综合考虑,运用模糊综合评判来解决。

下面介绍徐文等人运用模糊信息处理技术,实现有效的故障诊断方法。

### 1.1.2 三比值法模糊化处理

这种方法是运用五种特征气体  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  组成三对比值来判断变压器故障性质。表 1-1 为常规三比值法。由表 1-1 可知,  $X = \text{CH}_4/\text{H}_2$  的编码为 1 时,特

征气体比值  $CH_4/H_2 < 0.1$ , 可用隶属函数  $u_1$  表示, 即

$$u_1 = \begin{cases} 1, & X < 0.1 \\ 0, & X \geq 0.1 \end{cases}$$

表 1-1 常规三比值法

特征气体比值	气体比值范围编码			特征气体比值	气体比值范围编码		
	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$		$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
<0.1	0	1	0	1~3	1	2	1
0.1~1	1	0	0	>3	2	2	2

表 1-2 为常规三比值法故障描述。

表 1-2 常规三比值法故障描述

序号	故障类型	气体比值范围编码			序号	故障类型	气体比值范围编码		
		$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$			$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
0	无故障	0	0	0	5	<150℃ 低温过热	0	0	1
1	低能局部放电	0	1	0	6	150℃~300℃ 低温过热	0	2	0
2	高能局部放电	1	1	0	7	300℃~700℃ 中温过热	0	2	1
3	低能放电	1~2	1	1~2	8	>700℃ 高温过热	0	2	2
4	高能放电	1	0	2					

模糊化处理, 就是将  $u_1$  由 1~0 的变化, 由陡变转化为缓慢变化, 由图 1-1 所示。

$$u_1 = \begin{cases} 1, & X \leq 0.08 \\ e^{-50(X-0.08)}, & X > 0.08 \end{cases}$$

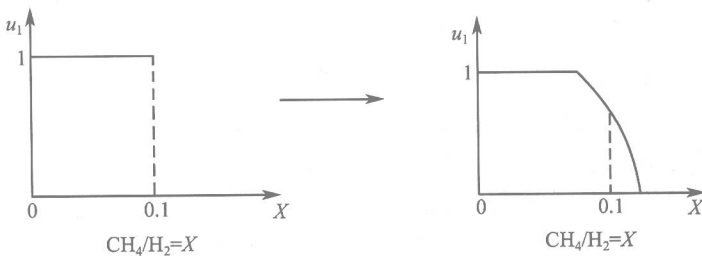


图 1-1  $u_1$  的模糊化处理示意图

同理, 当  $X = CH_4/H_2$  的编码为 0 时, 可用隶属函数  $u_0$  表示取值的隶属函数 (见图 1-2)。

$$u_0 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.08 \\ 0.5 + 0.5\sin(25\pi(X - 0.1)), & X \in (0.08, 0.12] \\ 1, & X \in (0.12, 0.9] \\ 0.5 - 0.5\sin(25\pi(X - 3)), & X \in (0.9, 1.1] \\ 0, & 1.1 > X \end{cases}$$

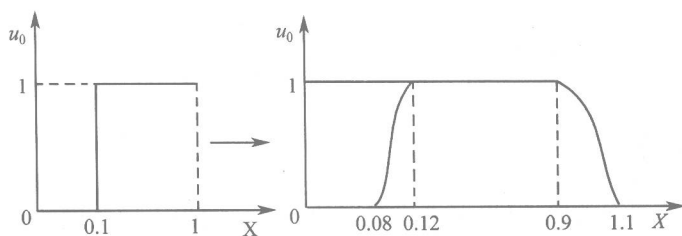


图 1-2  $u_0$  的模糊化处理示意图

当  $X = \text{CH}_4/\text{H}_2$  的编码为 2 时,可用隶属函数  $u_2$  表示取值的隶属函数(见图 1-3),即

$$u_2 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.85 \\ 1 - e^{-12(X-0.85)}, & X > 0.85 \end{cases}$$

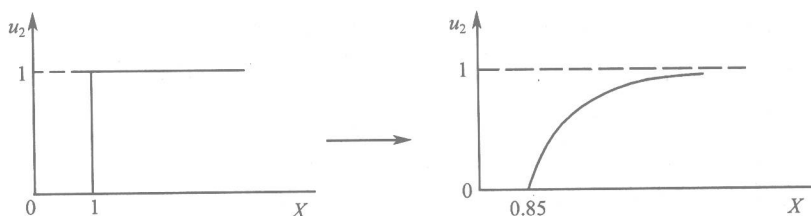


图 1-3  $u_2$  的模糊化处理示意图

当  $X = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  编码分别为 1,0 和 2 时,隶属函数  $u_1, u_0$  和  $u_2$  分别为

$$u_1 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.08 \\ 0.5 + 0.5\sin(25\pi(X - 0.1)), & X \in (0.08, 0.12] \\ 1, & X \in (0.12, 2.9] \\ 0.5 - 0.5\sin(25\pi(X - 3)), & X \in (2.9, 3.1] \\ 0, & 3.1 > X \end{cases}$$

$$u_0 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.08 \\ e^{-50(X-0.08)}, & X > 0.08 \end{cases}$$

$$u_2 = \begin{cases} 0, & X \leq 2.85 \\ 1 - e^{-12(X-2.85)}, & X > 2.85 \end{cases}$$

当  $X = \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  编码分别为 1,0 和 2 时,隶属函数  $u_1, u_0$  和  $u_2$  分别为

$$u_1 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.9 \\ 0.5 + 0.5\sin(5\pi(X - 1)), & X \in (0.9, 1.1] \\ 1, & X \in (1.1, 2.9] \\ 0.5 - 0.5\sin(5\pi(X - 3)), & X \in (2.9, 3.1] \\ 0, & 3.1 > X \end{cases}$$

$$u_0 = \begin{cases} 0, & X \leq 0.85 \\ e^{-50(X-0.85)}, & X > 0.85 \end{cases}$$