

基于粒计算的哈夫曼树 SVM 多分类模型研究

陈丽芳¹ 陈 亮² 刘保相¹

(华北理工大学理学院 唐山 063009)¹ (唐山职业技术学院机电工程系 唐山 063004)²

摘 要 针对多分类问题,将粒计算与最优二叉树相结合来构建 SVM 多分类模型。应用粒计算思想粒化多分类问题,计算出每个类别的粒度;以粒度为权值集合,构建哈夫曼树,以解决类内样本分布不均和分类效率低下的问题;对粗粒结点分别设计多个 SVM 分类器;最后,以低温存储罐材料多分类问题为研究背景,对模型进行了仿真实验。与其他方法的对比分析表明,该模型提高了分类效率,为多分类问题的处理提供了一个新的研究思路。

关键词 粒计算,哈夫曼树,支持向量机,多分类

中图分类号 TP311.O1 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.015

Research of SVM Multiclass Model Based on Granular Computing & Huffman Tree

CHEN Li-fang¹ CHEN Liang² LIU Bao-xiang¹

(College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)¹

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan Vocational & Technical College, Tangshan 063004, China)²

Abstract In view of the multi-classification problems, we built the SVM multiclass model based on granular computing and Huffman-tree. After applying granular computing to grain classification problem, we could calculate the granularity and build the Huffman tree based on granularity weight set, which solves the uneven distribution of samples in the class and low classification efficiency. We also designed SVM classifier for coarse grain nodes, and selected the low temperature storage tanks material multi-classification problem as the research background to simulate our model. Meanwhile, we compared our model with other methods. The result shows that the new model improves the efficiency of classification. It provides a new idea and a perfect method for multi-classification problem.

Keywords Granular computing, Huffman tree, Support vector machine, Multi-classification

1 引言

利用支持向量机(SVM)^[1]解决多分类问题是目前研究的热点之一。研究人员在用 SVM 解决多分类问题时主要用到两种思路^[2]:(1)“一次性求解法”,该方法把多个分类面的参数求解组合为目标优化问题,进而求解最优参数(如全局优化分类法)。但由于该方法变量个数多、计算复杂度较高,尤其是在类别数目较多时,其训练速度较低,分类精度也受到影响,因此实用性不太强。(2)“分解重构法”,即把多分类问题转化为若干个二分类问题,并采用某种策略将多个两分类器组合起来实现多分类的方法。这种方法由于计算复杂度相对较低,更适合应用于实际问题中。目前“分解重构法”主要有:一对一、一对多、决策导向非循环图、二叉树等。其中的二叉树模型区别于其他模型的优点是训练的 SVM 只有 $K-1$ 个,不存在属于多类或不属于任何一类的问题,训练和分类的效率有了一定的提高。但是,该方法采用的是固定的树结构,而且包括根结点在内的各个决策结点的选择具有很大的随意性,因而容易产生“误差累积”的问题,导致分类性能并不稳定。

因此,本文提出将粒计算与哈夫曼树相结合,构造 SVM 多分类模型,利用粒计算思想实现各类粒度计算,并对粒度进行排序,依据排序结果构建最优二叉树,进而设计多个 SVM 分类器,实现多分类划分。以低温存储罐材料多分类问题为研究背景,应用 MATLAB 编程仿真,验证了模型的正确性。对比分析表明,该模型具有更高的分类效率。

2 原理及技术

2.1 粒计算原理

近年来,粒计算因求解问题速度快、计算复杂度低而逐渐成为研究热点。目前,粒计算的三大主要理论是:模糊集、粗糙集和商空间。但一种观点认为三大理论并不能揭示粒计算的广度、深度和普适性。在此背景下,粒计算三元论应运而生。三元论强调该计算的哲学、方法论和计算模式的相互支持^[3]。三元论将粒计算研究分成 3 个侧面:其哲学思想是结构化思维,其方法论是结构化问题求解,其计算模式是结构化信息处理。

粒计算的核心概念是多层次和多视角粒结构。粒计算的基本概念由粒子、粒层和粒结构组成。粒层是对问题空间或

到稿日期:2015-04-17 返修日期:2015-05-24 本文受河北省自然科学基金面上项目(F2014209086)资助。

陈丽芳(1973—),女,博士,教授,主要研究方向为人工智能、数据挖掘、计算机应用,E-mail:hbgl_cdf@163.com;陈 亮(1971—),男,硕士,副教授,主要研究方向为数据挖掘,E-mail:ts_chenliang@126.com;刘保相(1957—),男,教授,主要研究方向为粗糙集与信息处理、有限群论,E-mail:liubx5888@126.com。

计算对象的一种抽象化描述,基于某种需求的粒化准则得到粒子的全体构成一个具有某种相同性质的内部粒子的粒层。不同层的粒子具有不同的粒度。粒计算往往在不同粒层上求解。粒结构是由粒层之间的相互联系构成的一个关系结构。

多层次的基本成分是粒和层,它的结构描述粒与粒、粒与层、层与层之间的关系和联系。在问题描述和求解的某一个阶段,粒是讨论的基本单元或焦点。粒度是粒的一个主要特征,在不同应用中,它可以解释为大小、抽象度或复杂度。不同的粒可以按其粒度进行排序,每一层由具有相同粒度或相似特征的粒组成,每一个粒提供一个局部、部分的描述,该层中所有的粒合起来提供一个全局的、完整的描述。一个层的粒度由其所包含粒的粒度决定,不同层可按其粒度构成一个偏序关系,其结果就是一个多层次粒结构。粒结构反映多视角、多层次的分析与理解,粒结构的构造往往依赖于每个人所掌握的知识 and 经历。多视角的粒结构把不同层次的粒通过粒度组织起来,进而构成一个有序的多层次结构,这是对问题的一种描述或观点。

粒计算三元论的思想有更高层次的指导作用,这种指导性比具体解决问题的方法更有价值,因此更应该注重粒思维和粒处理思想。本文从粒计算思想的角度对实际问题进行粒化和分层处理,是一种结构化思维在实际问题中的应用。

2.2 哈夫曼树

哈夫曼树(Huffman Tree, HT)又称最优二叉树,其特点是带权路径长度最短。因此,可以利用哈夫曼树的优点,构建最优二叉树,从根本上解决训练样本集分布不均等问题,以提高分类效率。

构造哈夫曼树的算法步骤如下^[4]:

(1)初始化:给定 n 个权值 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 构造 n 棵只有一个根结点的二叉树,从而得到一个二叉树集合 $F = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$;

(2)选取与合并:在 F 中选取根结点的权值最小的两棵二叉树分别作左、右子树,构造一棵新的二叉树,这棵新的二叉树的根结点的权值为其左、右子树根结点的权值之和;

(3)删除与并入:在集合 F 中删除作为左、右子树的两棵二叉树,并将新的二叉树加入到集合 F 中;

(4)重复(2)、(3)两步,当集合 F 中只剩下一棵二叉树时,这棵二叉树便是哈夫曼树。

哈夫曼树使权值越大的叶子结点越靠近根结点,能够将新出现的样本更快、更准确地归类。在实际应用中,根据领域知识确定其权重值,进而构造哈夫曼树,将会更有利于多分类问题处理。

2.3 SVM 原理与现状

支持向量机是机器学习领域中继神经网络之后的又一研究热点^[2]。支持向量机的核心思想是通过非线性变换将输入空间变换到一个高维空间,然后在这个新空间中求取最优线性分类面 $\omega \cdot X + b = 0$, 满足 $y_i((\omega^T \cdot X_i) + b) - 1 \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ (参数 ω, b 为权向量与阈值),而这种非线性变换是通过定义适当的内积函数实现的。支持向量机有完善的理论——统计学习理论支撑,对二分类有较成熟的求解方法,但是面对当今社会发展所产生的大数据信息,存在以下几点不足:1)训练复杂度过高;2)SVM 的性能过分依赖核函数和参

数的选取;3)对于训练样本内的分布不均问题并没有高效的解决办法。

Y. C. Tang 于 2004 年提出将粒计算与 SVM 结合^[5],其主要思想是通过常用的粒划分方法构建粒空间,获取信息粒,在信息粒上进行学习。随后不同领域的学者对其进行了研究,主要有:基于关联规则^[6]、聚类^[7]、粗糙集^[8]、决策树^[9]、商空间^[10]以及神经网络^[11]等,但是这些方法仅对二分类问题解决得较好,在多分类问题上还处于研究的初级阶段,因此本文提出将粒计算与哈夫曼树相结合,以解决 SVM 在处理多分类问题中存在的不足。

3 全局模型构建

3.1 粒计算预处理

在多分类问题模型的建立中,应用粒计算进行处理,本文采用粒计算三元论思想。

首先,用粒计算的思想对问题进行观察、定义和转化,即:多层次、多视角地分析问题,找出基本元素粒、粒层、粒度,并从粒计算的角度解释其含义。

其次,用主成分分析、聚类分析计算每类的粒度。

3.2 基于粒度的哈夫曼树构建

根据不同领域的问题进行粒度的计算,依据粒度构造哈夫曼树。算法步骤如下:

Step1 计算每一类 $S_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 归属于训练样本集的粒度,得到 $D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_k)$, 其中 d_i 为 S_i 类的粒度值。

Step2 根据粒度结果,构造 k 棵只有一个粒的二叉树。

Step3 如果 $k = 2$, 则这两类分别作为左、右子树,粒度和作为根结点,算法结束(二分类问题)。

Step4 如果 $k > 2$, 从 D 中找出所有类别中粒度最小的两个 d_i 和 d_j , 整合新的粒 S_{ij} , 新粒 S_{ij} 的粒度 $d_{ij} = d_i + d_j$, 将 d_{ij} 放回集合 D 中。

Step5 重复 Step4, 直至最后只剩一个粒,该粒即为二叉树的根结点。

Step6 生成最优粒结构树,从上到下编码,左子树赋值 0, 右子树赋值 1。则每一个分类都能被最快找到,如 S_1 : 0110。

3.3 SVM 多分类器设计

根据粒结构树构造内部分类器。由不同多分类问题的决策树可知分类器分为 3 种:一对一、一对多和多对多。算法步骤如下:

(1)根据前面构建的粒哈夫曼树对应得到不同粒层、混合粒、纯粒,每一个分支粒训练一个 SVM 分类器。

(2)根据粒哈夫曼树,需要 3 种分类器,如果中间粒需要多对多 SVM,将粒分为 a_1 和 a_2 组, $a_1 + a_2 = a$, a 为中间粒所包含的类别总数;如果中间粒需要一对多 SVM 分类器,将粒分为 1 和 $a-1$ 组;如果中间粒需要二分类,则直接运用 SVM 即可。

(3)重复(2),直到分类结束。

(4)运用测试样本集,实现模型的仿真验证。

3.4 全局模型

根据以上描述,构建粒-哈夫曼树 SVM 全局模型如图 1 所示。

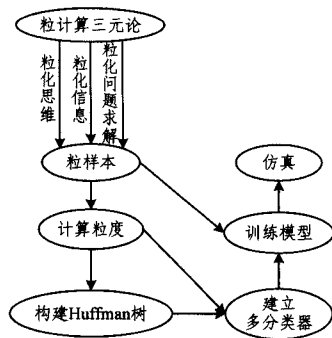


图1 全局模型

该模型依据实际问题计算粒度,按粒度排序后构建哈夫曼树,提高了搜索速度,进而构建 SVM 分类器,能够解决样

本内分布不均造成的分类速度慢的问题,加快了分类速度,提高了分类精度。

4 模型验证

本文选用多种低温存储罐材料(铝合金、奥氏体钢、钛合金等)的几个评价指标进行分析。实验数据来自文献[12]。运用本文的多分类模型,从粒计算的角度,定义分析评价指标,降低评价过程中的复杂度,科学地分配指标的粒度,建立合理的粒结构树,更好地体现不同候选材料的优劣差异,证明模型的合理性和正确性。

候选低温存储罐材料的 8 个初始评价指标(见表 1)为:低温韧性、室温屈服强度、室温弹性模量、密度、热膨胀系数、热导率、室温~77K 的比热容、成本。

表 1 候选低温存储罐材料及性能

	材料	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
铝 合 金	2014-T6	75.5	420	74.2	2.80	21.4	1.547	0.686	0.44
	5052-0	95.0	91	70.0	2.68	22.1	1.379	0.686	0.46
	5083-0	97.6	147	72.0	2.66	23.4	1.170	0.686	0.46
	5456-0	103.0	161	72.0	2.66	22.1	1.170	0.686	0.48
	7075-T6	40.0	511	74.0	2.80	21.8	1.212	0.686	0.50
不 锈 钢	301(全硬态)	770.0	1365	189	7.90	16.90	0.167	0.334	0.76
	304(退火态)	196.0	210	189	7.84	17.00	0.167	0.334	0.76
	310(75%冷)	186.4	1120	210	7.90	14.40	0.125	0.334	0.60
	321(退火态)	265.5	266	189	7.90	16.74	0.155	0.334	1.00
	410(退火态)	94.0	609	207	7.70	11.00	0.242	0.334	0.46
	Cr-Ni-Mn-N (60%冷加工)	131.0	1281	189	7.90	15.00	0.167	0.334	0.80
钛合金	Ti-5Al-2.5Sn	176.4	700	112	4.46	9.36	0.067	0.376	2.05
	Ti-6Al-4V	178.5	875	112	4.43	9.4	0.067	0.376	2.25
铜 合 金	高导无氧铜	136	60	120	8.94	16.8	3.386	0.293	0.9~0.97
	70Cu-30Zn(退火态)	273	200	112	8.53	19.9	1.212	0.251	0.8~0.9
	70Cu-30Zn(硬态)	63	441	112	8.53	19.9	1.212	0.251	0.8~0.9
	70-30铜-镍合金(退火态)	139	126	154	8.94	16.2	0.293	0.293	1.3~1.5
聚合物	聚四氟乙烯	2	14	0.42	2.16	99	0.004	0.552	30
	环氧树脂玻璃纤维层压板	9	300	50	2.5	80	0.004	0.585	70
镍基合金	InconelX-750	368	840	217	8.51	11.5	1.379	0.293	1.87~2.13
	Inconel718	239	1190	217	8.51	11.5	1.296	0.293	1.87~2.13

注: P1:低温韧性; P2:室温屈服强度(/MPa); P3:室温弹性模量($\text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$); P4:密度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); P5:热膨胀系数($/10^6 \text{K}^{-1}$); P6:热导率($\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$); P7:室温~77k 的比热容($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); P8:成本(美元/磅)。

首先,对低温存储罐候选材料的影响因素进行分析,并粒化计算。

根据文献[12]可知:低温存储罐是可移动的,因而质量较轻,为避免发生突然的脆性破坏,就低温应用而言,工作温度下,韧性是最重要的,第二是屈服强度。在确定低温容器的厚度和刚度时,材料的室温屈服强度和弹性模量也很重要。强度较高的材料可以采用薄壁,这意味着容量质量更轻,冷却热损失更少。材料密度越小,容器质量越轻;而材料导热率以及材料的比热容越低,热损失越小。材料的热膨胀系数低,能降低容器的热应力,此外还要比较制造成本。因此,对于文献[12]提供的数据,此处以粒度思想对其进行重新标识,如表 2 所列。经主成分分析后,得到表 3 数据,指标 y_1 — y_6 为 P_1 — P_8 综合处理后得到的主成分粒度。

表 2 各影响指标的粒度

指标	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
粒度	0.21	0.16	0.10	0.12	0.11	0.11	0.08	0.11

表 3 模型处理后各影响指标粒度

指标	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
粒度	0.2716	0.1851	0.1358	0.1358	0.1358	0.1358

其次,从粒计算的角度,对低温存储罐候选材料进行粒化定义和转化。

在候选材料中,2014-T6、5052-0、铝合金、InconelX-750 等为最基本元素粒子,对候选材料的从属空间类别或计算对象进行抽象化,基于粒化准则得到的粒子的全体构成一个具有相近粒度关系的内部粒子的粒层,铝合金、不锈钢、铜合金、镍基合金、聚合物、钛合金在同一粒层中,2014-T6、304(退火态)、聚四氟乙烯、Ti-5Al-2.5Sn、InconelX-750 等材料属于一个粒层。上层与下层粒子具有不同的粒度。粒结构是粒层之间的相互联系构成的一个关系结构树。

从实际的低温材料的定量比较中得知^[12]:铝及其合金由于具有强度高、容易加工、成本低等综合性能,因此在低温状态下的装置结构上已经大量采用。铜及其合金属于用作深冷装置结构的最佳金属之列,能在低温下保持优异的塑性,纯铜的缺点是屈服强度低,因而最好用铜合金而不是纯铜。奥氏体不锈钢的韧性系数也相当高(多在 100 以上),77K 以上的温度塑性好,冷到 77K 以下会发生马氏体转变,材料变得很脆。当然,不锈钢的耐蚀性能、强度、可焊性等都很高,但焊接部位将严重降低耐蚀性能。镍基合金在深冷温度下的耐蚀性能和

韧性都特别好,但是价格比较昂贵。钛合金的比强度很高,韧性比铝合金好,所以韧性系数高于铝合金,但价格较贵。聚合物材料的低温韧性和塑性都很差,这是严重缺点。

第三,在低温存储罐候选材料这个论域中,计算粒的不同粒度时运用粒计算中的聚类思想。论域上关系的全体中,在候选材料中铝合金的粒度比 2014-T6 的粒度大,并且两者属于不同粒层中的上层和下层,因此可以称铝合金是粗粒,2014-T6 是细粒,粗细是相对而言的。一个关系代表一种分类,表示粒度粗细。如果设粒度 $R_0 < R_1 < R_2 < \dots < R_{end}$ 表示一个嵌套关系簇,其中 R_0 代表论域本身是一个等价类,即最细的划分; R_{end} 为最粗的划分;其他的表示中间层次的划分。

本实例中选择需要划分的粒的个数为 6。将数据集划分为 6 个粒,即 $X = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_6)$,其中 X_i 为一次划分粒,其第 i 个粒的数据点个数为 l_i ,计算出各种候选材料的粒度,如表 4 所列。

表 4 各种候选材料粒度

	材料	粒度	优劣等级
铝合金	2014-T6	37.5	11
	5052-0	34.5	16
	5083-0	35.1	14
	5456-0	34.8	15
	7075-T6	36.1	13
不锈钢	301(全硬态)	70	1
	304(退火态)	41.3	10
	310(75%冷)	52.5	2
	321(退火态)	41.7	9
	410(退火态)	49.2	6
	Cr-Ni-Mn-N (60%冷加工)	49.8	5
钛合金	Ti-5Al-2.5Sn	48	7
	Ti-6Al-4V	45.3	8
铜合金	高导无氧铜	26.7	21
	70Cu-30Zn(退火态)	37.4	12
	70Cu-30Zn(硬态)	34.1	17
	70-30 铜-镍合金(退火态)	32.8	18
聚合物	聚四氟乙烯	29.1	20
	环氧树脂玻璃纤维层压板	31.3	19
镍基合金	InconelX-750	51	4
	Inconel718	52.0	3

第四,计算各个材料所归属的类别(粗粒),粗粒粒度如表 5 所列。

表 5 粗粒粒度

类别	铝合金 S1	不锈钢 S2	钛合金 S3	铜合金 S4	聚合物 S5	镍基合金 S6
粒度	35.66	50.53	46.2	32.6	30.21	51.75

从表 5 可以看出,排在 301 不锈钢后面的 310、Inconel718 和 InconelX-750 镍基合金都有比较好的力学性能和热性能。尽管铝合金最便宜,但缺点是力学性能差,比热容和导热率相对较高,所以排名较后。通过粒计算得到的粒度排序与实际情况相符,证明了该模型的正确性。对 X_i 的二次划分粒同上,不一一列举。

第五,利用粒计算中得到的粒度,构造粒-哈夫曼树,如图 2 所示。

最后,对每个分支结点(粗粒)训练分类器,由图 2 可知分类器分为两种:一对一 G-SVM 分类器和多对多 G-SVM 分类器。在用 MATLAB 设计实现时,需要构造 5 个 SVM,如图 3 所示。

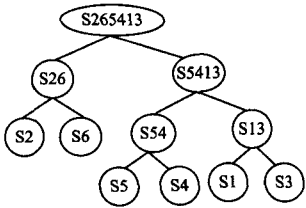


图 2 粒-哈夫曼树

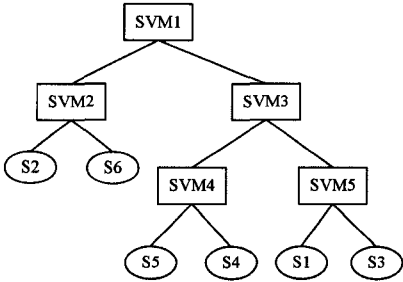


图 3 基于粒-哈夫曼树的 SVM 分类图

以 SVM1 为例,由于它是多对多分类器,用 MATLAB 进行代码设计时,将分类标签为 2、6 的二类转换成 -1;将分类标签为 5、4、1、3 的 4 类转换为 1,达到两大类粗粒的化分;SVM2(结点 S2,S6)设计的是一对一分类器,将分类标签为 2 的作为 -1;将分类标签为 6 的作为 1,实现两类的划分(粒细化)。该步骤完成后,类别 2 已经实现了正确分类。其余的 SVM 设计方法与此相同,不再赘述。

5 模型效率对比分析

将低温存储罐材料分类问题按照原来基于二叉树的多类 SVM 方法建模,得到图 4 所示的模型。

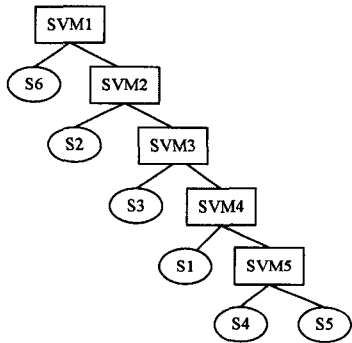


图 4 基于二叉树的 SVM 分类模型

按原基于二叉树的 SVM 模型计算 6 类的平均分类时间: $Time_{avr} = \frac{1+2+3+4+5+5}{6} = 3.333$ 。

按本文构建的粒-哈夫曼树 SVM 模型计算 6 类的平均分类时间: $Time_{avr} = \frac{2+2+3+3+3+3}{6} = 2.667$ 。

由此可见,本文所建模型大大缩短了分类所用时间,提高了分类效率;特别是对于粒度较大的类别(本例中 S6、S2),采用本方法可快速获得分类结果,尤其适合处理样本类别分布不均的多分类问题。

结束语 本文利用哈夫曼树带权路径长度最短的特点,结合粒计算三元论思想分层处理的优势,构建了基于粒计算-哈夫曼树的 SVM 多分类模型。应用粒计算思想多层次、多视角地粒化多分类问题,计算出相应的粒度;以粒计算得到的

粒度作为权值集合,构建哈夫曼树;对分支粒设计 SVM 分类器;最后,利用 MATLAB 实现模型的仿真实验。结果表明,应用该模型实现多分类问题求解为多分类问题的处理提供了一个新的思路和方法,具有一定的理论价值和应用价值。

参考文献

- [1] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. NY: Springer Verlag, 1995: 273-297
- [2] Hsu C W, Lin C J. A comparison on methods for multi-class support vector machines [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(2): 415-425
- [3] Miao Duo-qian, Li De-yi, Yao Yi-yu, et al. Uncertainty and granular computing [M]. Beijing: Science Press, 2011: 150-157 (in Chinese)
苗夺谦, 李德毅, 姚一豫, 等. 不确定性及粒计算[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 150-157
- [4] Ren Zheng-yun. Composition of the Huffman Tree and its Usage in Digital Compiling[J]. Journal of Sha-yang Teachers College, 2007(5): 31-33 (in Chinese)
任正云. 哈夫曼树的构造及其在信息编码中的应用[J]. 沙洋师范学院学报, 2007(5): 31-33
- [5] Tang Y C, In B, Zhang Y Q. Granular Support Vector Machines with Association Rules Mining for Protein Holomogy Prediction [J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2005, 35(1-2): 121-134
- [6] Weaton J, Watkina C. Multi-class Support Vector Machines; CSD-TR-98-04 [R]. Royal Holloway, University of London, 1998
- [7] Wang W J, Xu Z B. A Heuristic Training in Support Vector Regression [J]. Neurocomputing, 2004, 61(2): 259-275
- [8] Duan Dan-qing, Chen Song-qiao, Yang Wei-jun, et al. Deteet Intrusion Using Rough Set and Support Vector Machine[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(4): 627-630 (in Chinese)
段丹青, 陈松乔, 杨卫军, 等. 使用粗糙集和支持向量机检测入侵[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(4): 627-630
- [9] Lian Ke, Huang Jian-guo, Wang Hou-jun, et al. Study on a GA-based SVM Decision-tree Multi-Classification Strategy[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 35(8): 1502-1507 (in Chinese)
连可, 黄建国, 王厚军, 等. 一种基于遗传算法的 SVM 决策树多分类策略研究[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1502-1507
- [10] Wen Gui-hua, Xiang Jun, Ding Yue-hua. Large-scale SVM classification algorithm based on granularity of quotient space theory[J]. Application Research of Computer, 2008, 25(8): 2299-2301 (in Chinese)
文贵华, 向君, 丁月华. 基于商空间粒度理论的大规模 SVM 分类算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(8): 2299-2301
- [11] Guo Hu-sheng, Wang wen-jian. Research on SVM learning algorithms based on neural networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2009(2): 51-54 (in Chinese)
郭虎升, 王文剑. 基于神经网络的支持向量机学习算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(2): 51-54
- [12] Yang Rui-cheng, Deng Wen-huai, Feng Hui-xia. Engineering design of material selection and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 327-328 (in Chinese)
杨瑞成, 邓文怀, 冯辉霞. 工程设计中的材料选择与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 327-328
- (上接第 48 页)
- [10] Zhou L, Wu W Z. On generalized intuitionistic fuzzy rough approximation operators[J]. Information Sciences, 2008, 178(11): 2448-2465
- [11] Szmidi E, Kacprzyk J. Distance between intuitionistic fuzzy sets and their applications in reasoning [M] // Studies in Computational Intelligence. 2005: 101-116
- [12] Lin Meng-lei. A Characterization for Intuitionistic Fuzzy Sets Based on the Assistant Sets Generated by S-Rough Set [M] // Advances in Soft Computing. 2009: 627-637
- [13] Jena S P, Ghosh S K. Intuitionistic fuzzy rough sets[J]. Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets, 2002, 8(1): 1-18
- [14] Zhu W. Relationship between generalized rough sets based on binary relation and covering[J]. Information Sciences, 2009, 179(3): 210-225
- [15] Wei Lai, Miao Duo-qian, Xu Fei-fei, et al. Research on a covering rough fuzzy set model[J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(10): 1719-1723 (in Chinese)
魏莱, 苗夺谦, 徐菲菲, 等. 基于覆盖的粗糙模糊集模型研究[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(10): 1719-1723
- [16] Hu Jun, Wang Guo-yin, Zhang Qing-hua. Covering Based Generalized Rough Fuzzy Set Model[J]. Journal of Software, 2010, 21(5): 968-977 (in Chinese)
胡军, 王国胤, 张清华. 一种覆盖粗糙模糊集模型[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 968-977
- [17] Tang Jian-guo, She Kun, Zhu Feng. A new type of overing-based rough fuzzy set model[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1652-1662 (in Chinese)
汤建国, 余堃, 祝峰. 一种新的覆盖粗糙模糊集模型[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1652-1662
- [18] Zhang Zhi-ming, Bai Yun-chao, Tian Jing-feng. Intuitionistic fuzzy rough sets based on intuitionistic fuzzy coverings[J]. Control and Decision, 2010, 25(9): 1369-1373 (in Chinese)
张植明, 白云超, 田景峰. 基于覆盖的直觉模糊粗糙集[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1369-1373
- [19] Bonikowski Z, Bryniarski E, Wybraniec-Skardowska U. Extensions and intentions in the rough set theory[J]. Information Sciences, 1998, 107(1): 149-167
- [20] Wang Yan-ping, Sun Jing, Chen Mei-wei. Interval-valued intuitionistic fuzzy rough sets based on coverings [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(2): 155-156 (in Chinese)
王艳平, 孙静, 陈美巍. 基于覆盖的区间直觉模糊粗糙集[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(2): 155-156
- [21] Atanassov K T. Operators over interval valued intuitionistic fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 64(2): 159-174
- [22] Pawlak Z. Rough sets; Theoretical aspects of reasoning about data[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991: 1-79