

文章编号:1671 - 251X(2010)05 - 0051 - 04

粗糙集理论在滚动轴承故障诊断中的应用

闵 勇^{1,2}, 郭一楠¹, 闫俊荣²

(1. 中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008; 2. 徐州师范大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:粗糙集是一种软计算方法,它不需要任何先验知识和理论推导,仅依赖于原始数据,从数据中发现潜在规律和隐含规则,其核心任务是数据约简,得到最简决策规则。文章基于粗糙集理论的可辨识矩阵算法,对滚动轴承故障信息表进行属性约简和属性值约简,得到了精简的诊断规则,从而方便了信息的机器处理,也为基于规则的滚动轴承智能故障诊断系统提供了一种更为简单的知识库自动构造方法。

关键词:滚动轴承; 故障诊断; 粗糙集; 可辨识矩阵

中图分类号:TH165.3/TP206.3 **文献标识码:**A

Application of Rough Set Theory in Fault Diagnosis of Roller Bearing

MIN Yong^{1,2}, GUO Yi-nan¹, YAN Jun-rong²

(1. School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China.

2. Mechanical and Electrical Engineering Institute of Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Rough set is a soft computing method which needn't any validated knowledge and theoretics deducing, just depends on original data, and it aims at discovering latent laws and rules. Its core task is reducing data in order to get the simplest decision rules. Based on the discernibility matrix of rough set theory, the attribute and attribute value of fault information table of roller bearing were reduced and the simpler diagnosis rules of fault diagnosis were achieved, which was good for computer dealing. This method provides a simpler method of automatic construction of knowledge base for intelligent fault diagnosis system of roller bearings based on rules.

Key words: roller bearing, fault diagnosis, rough set, discernibility matrix

0 引言

滚动轴承是旋转机械中的重要组件,它在旋转机械中起关键作用,其工作状态正常与否直接影响整台机组的性能,而滚动轴承故障约占旋转机械故障总数的30%,因此,研究滚动轴承的故障诊断一直是机械故障诊断领域的重要研究课题^[1]。由于滚动轴承故障信号表现为非平稳性,故障特征也较弱,近年来,许多学者采用具有较强的弱信号分辨能力的小波变换来诊断滚动轴承的故障,取得了一定的研究成果^[2~4]。小波变换方法比传统的快速傅立

叶变换(FFT)方法能更有效提取故障特征,但在智能诊断系统的规则自动获取和知识库自动构造方面缺乏可操作性,因为其诊断条件单一,规则唯一,如果实测信息不完整,该方法就失效^[3]。

粗糙集^[5](Rough Set, RS)最初是由波兰科学家 Pawlak 提出的,是一种处理模糊与不确定性的数学方法,它不需要任何先验知识和系统的数学模型,仅从数据本身提取有用信息,揭示潜在规则,由RS导出的决策规则集给出了最小的知识表示,适用于智能诊断系统规则的建立。本文基于粗糙集理论的可辨识矩阵方法进行属性约简和属性值约简,获得了较为简单的滚动轴承故障诊断规则。

1 粗糙集基本理论^[6~8]

1.1 粗糙集的基本概念

在粗糙集理论中,知识被认为是基于对研究对

收稿日期:2010-01-10

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2007029)

作者简介:闵勇(1973-),男,江苏沛县人,实验师,硕士,2004年毕业于同济大学电信学院,研究方向为机械故障诊断。
E-mail:myczang@163.com

象分类的能力,分类就是将相似的对象分为一类,它们之间的关系就是不可分辨关系,也称等价关系。

定义 1.1:给定一个有限的非空有限集 U ,称为论域,设 R 是 U 上一个等价关系, U/R 表示 R 的所有等价类构成的集合, R 称为 U 上的分类族,即知识库 $K=(U, R)$ 为一个近似空间。

定义 1.2:若 $P \subseteq R$,且 $P \neq \emptyset$,则 P 中全部等价关系的交集也是一种等价关系,称为 P 上的不可分辨关系,记为 $IND(P):[X]_{IND(P)} = [X]_R, P \subseteq R$ 。

定义 1.3:令 $P, Q \subseteq R, P, Q$ 都是关于论域上的知识,且 $K=(U, P)$ 和 $K_1=(U, Q)$ 为 2 个知识库,当 $IND(P) = IND(Q)$ 时,称知识库 K, K_1 是等价的。

1.2 决策表、约简(RED)和核(CORE)

设 $S=(U, A, V, f)$ 为一个知识表达系统, $A=C \cup D, C \cap D = \emptyset, C$ 称为条件属性集, D 称为决策属性集。具有条件属性和决策属性的知识表达系统称为决策表。论域中的对象根据条件属性的不同,被划分到具有不同决策属性的决策类中。

决策表中的条件属性不是最简单的,有些属性被去除掉不会影响原有的表达效果,这就是属性约简,是粗糙集的核心内容。约简是可以区分所有对象的最小属性子集。约简可以代替整个属性集合而不降低分类能力,但约简可能有多种。

设有 2 个属性集 C 和 $B, B \subseteq C$,如果 $IND(B) = IND(C)$,且对于任意 $B \subset B, IND(B) = IND(C)$ 都不成立,则称 B 为 C 的一个约简,记为 $RED(C)$ 。

属性集 C 的所有约简的交集称为核,记作 $CORE(C) = \bigcap RED(C)$ 。核表示 C 中对于所有约简都不可缺少的属性集合,对于一个知识系统来说,核是唯一的。

1.3 可辨识矩阵(Discernibility Matrix)

对于一个决策系统,约简有多个,但人们总是想要最小约简,然而,已经证明找出最小约简是 NP-hard 问题^[8]。

可辨识矩阵是约简算法中的重要工具,可以方便地求出系统的属性核。

令 $S=(U, A)$ 为一个信息系统, U 为论域且 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}, A$ 为条件属性集合; D 为决策属性; $a(x)$ 为记录 x 在属性 a 上的值; c_{ij} 表示可辨识矩阵中的第 i 行第 j 列的元素,则可辨识矩阵定义为

$$M_D(i, j) = \begin{cases} \{a \in A : a(x_i) \neq a(x_j)\} & D(x_i) \neq D(x_j) \\ 0 & D(x_i) = D(x_j) \\ -1 & a(x_i) = a(x_j) \text{ 且 } D(x_i) \neq D(x_j) \end{cases}$$

$$(i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

应用可辨识矩阵属性约简算法步骤:

(1) 将决策表转换为可辨识矩阵的形式,并将矩阵中属性组合数为 1 的属性列入最终的属性约简集合,即 $Re\ duct = C_0$;

(2) 从可辨识矩阵中找出不包含核属性的组合 S ,即

$$Q = \{B_i : B_i \in Re\ duct, \phi, i = 1, 2, \dots, s\}$$

$$S = S - Q$$

(3) 将所有不包含核属性的条件属性组合表示为合取范式的形式,即

$$p = \{b_{i,k} : (i = 1, 2, \dots, s; k = 1, 2, \dots, m)\}$$

(4) 将 p 转换为析取范式的形式,并进行化简;

(5) 所有约简得到的合取式与核属性组成属性约简组合。

1.4 二值化数据过滤约简算法

对信息表进行属性约简简化了信息的复杂程度,但是属性约简后的信息表并不是表示每条记录的所有条件属性都是必须的。值约简的过程正是逐条对表中记录进行检查、删除所有不必要的条件属性值的过程。

基于可辨识矩阵的二值化数据过滤约简算法:

设属性 a 有 n 个属性值,可以用一个 n 维的二值向量表示这个属性值。对于这个向量的第 i 位定义为

$$V_{ai}(x) = \begin{cases} 1, & V_a(x) = i \\ 0, & V_a(x) \neq i \end{cases}$$

2 基于粗糙集理论的故障诊断方法

2.1 滚动轴承故障诊断数据表

表 1 给出了某滚动轴承的故障信息表。

表 1 某滚动轴承故障信息表

论域 U	条件属性(特征量)				决策属性 D
	a_1	a_2	a_3	a_4	
x_1	0	0	0	0	0
x_2	2	2	2	1	2
x_3	1	2	1	1	2
x_4	0	3	0	0	0
x_5	2	1	0	1	1
x_6	2	1	2	1	1
x_7	0	0	0	2	0

表 1 中, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$ 表示所测量的振动数据序号; a_1, a_2, a_3, a_4 分别为滚动轴承信号的时域

平均值、有效值、谱熵和谱能量; D 表示故障类型:0 表示正常轴承,1 表示内环故障,2 表示滚动体故障。属性中的数字表示属性离散化后特征值的高低:0 - 低;1 - 中;2 - 中高;3 - 高。

$$\begin{bmatrix} 0 & a_1 a_2 a_3 a_4 & a_1 a_2 a_3 a_4 & 0 & a_1 a_2 a_4 & a_1 a_2 a_3 a_4 & 0 \\ & 0 & 0 & a_1 a_2 a_3 a_4 & a_2 a_3 & a_2 & a_1 a_2 a_3 a_4 \\ & & 0 & a_1 a_2 a_3 a_4 & a_1 a_2 a_3 & a_1 a_2 a_3 & a_1 a_2 a_3 a_4 \\ & & & 0 & a_1 a_2 a_4 & a_1 a_2 a_3 a_4 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & a_1 a_2 a_4 \\ & & & & & 0 & a_1 a_2 a_3 a_4 \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

该可辨识矩阵关于对角线对称,只需计算对角线以上的元素。

在以上可辨识矩阵的所有属性组合中,仅含有 a_2 一个 $\text{card}(A) = 1$ 的属性组合,可求得条件属性的核为 $m_{2,6} = \{a_2\}$,将合取范式与核属性组成属性组合:

$$f(A) = (a_1 + a_2 a_4) (a_2 + a_3) (a_1 + a_2 + a_3) a_2 \\ = (a_2 + a_4) (a_2 + a_3) a_2 = a_1 a_2 a_3 + a_2 a_3 a_4$$

所以 $\{a_1, a_2, a_3\}$ 、 $\{a_2, a_3, a_4\}$ 是故障信息表的约简。可用 $\{a_1, a_2, a_3\}$ 或 $\{a_2, a_3, a_4\}$ 构造约简后的决策表。本文取约简 $\{a_2, a_3, a_4\}$ 。

(2) 属性值约简

基于可辨识矩阵的二值化数据过滤约简算法对由 $\{a_2, a_3, a_4\}$ 构成的决策表进行值约简,得到转换结果如表 2 所示。分析表 2 中的数据,进一步化简组合得到决策表 3。

表 2 约简决策表后得到的转换结果

U	a2			a3			a4			D	
	0	1	2	3	0	1	2	0	1		2
2	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	2
3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2
5	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
6	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
7	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

表 3 化简后的决策表

U	a2	a3	a4	D
2,3	2	*	1	2
5,6	1	*	1	1
1,7	0	0	*	0
4,7	*	0	0	0

2.2 利用粗糙集方法分析故障信息表

(1) 属性约简

基于可辨识矩阵方法进行属性约简,由表 1 得到的可辨识矩阵如下:

(3) 滚动轴承故障诊断策略规则

由表 3 得到决策规则如下:

- Ruler1: ($a_2 = 2 \quad a_4 = 1$) 故障 2(内环故障);
- Ruler2: ($a_2 = 1 \quad a_4 = 1$) 故障 1(滚动体故障);
- Ruler3: ($a_2 = 0 \quad a_3 = 0$) 故障 0(正常轴承);
- Ruler4: ($a_3 = 0 \quad a_4 = 0$) 故障 0(正常轴承)。

3 结语

滚动轴承故障诊断是一项复杂的运行信息融合过程。本文基于粗糙集理论的可辨识矩阵方法进行属性约简和属性值约简,删除了冗余信息,提取关键信息,得到精简的诊断规则。基于可辨识矩阵约简算法对于数据量较少的情况能够获得非常理想的约简规则,由于其是完全由数据驱动的,不需要任何先验知识和理论公式,因此更适用于系统变化频繁的环境,而且有利于信息的机器处理,为基于规则的智能诊断系统提供了一种更为简单的知识库自动构造方法。

参考文献:

- [1] LIJing, QU Liangsheng. Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and Its Application for Mechanical Fault Diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 135-148.
- [2] 程军圣,于德介,邓乾望,等.连续小波变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J].中国机械工程,2003, 14(23): 2037-2040.
- [3] 张邦基,于德介,杨胜.基于小波变换与粗糙集理论的滚动轴承故障诊断[J].中国机械工程,2008, 15(19): 1793-1795, 1831.
- [4] 袁云龙,迟军.基于小波分析的滚动轴承故障诊断[J].机电工程,2008(6): 31-34.

文章编号:1671 - 251X(2010)05 - 0054 - 04

基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器参数优化

安凤栓, 常俊林, 苏丕朝, 李亚朋, 魏晓宾

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:针对 PID 控制器参数整定问题,提出一种基于改进粒子群优化算法的优化方法。该方法在实数编码及设定参数搜索空间的基础上,采用基于指数曲线的非线性惯性权值递减策略,以较大幅度地提高算法的收敛速度和精度;嵌入基于差分进化算法变异算子的局部搜索策略,以有效提高粒子个体的适应性和群体的多样性,改善解的质量,同时增强算法全局空间探索和局部区域改良能力的平衡。仿真结果表明,该方法与传统和智能算法相比较,所得到的控制器参数能够使控制系统获得更好的动态响应特性和满意的控制效果。

关键词: PID 控制器; 粒子群优化算法; 参数优化

中图分类号: TP214 **文献标识码:** A

Optimization of PID Controller Parameters Based on Modified Particle Swarm Optimization Algorithm

AN Feng-shuan, CHANG Jun-lin, SU Pi-zhao, LI Ya-peng, WEI Xiao-bin

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

Abstract: An optimization method based on modified particle swarm optimization (PSO) algorithm was proposed for tuning PID controller parameters. On the basis of real coding and setting search space of parameters, the method uses idea of decreasing inertia weight of an exponential curve to greatly improve algorithm's convergence speed and accuracy, and embeds local search strategy based on mutation operator of differential evolution algorithm to raise flexibility of individual particle and diversity of population, improve solution quality, and enhance the balance between the algorithm's global space exploration and local area improved capacity. The simulation results showed that the controller parameters from the new solution can make control system have better dynamic response characteristics and satisfactory control effect than traditional and intelligent algorithm.

Key words: PID controller, particle swarm optimization algorithm, parameters optimization

收稿日期:2009-12-17

作者简介:安凤栓(1986-),男,山东兖州人,中国矿业大学信电学院2008级硕士研究生,主要研究方向为智能优化与生产调度。
E-mail:fengshuan_an@126.com

0 引言

PID 控制器因其算法简单、实现容易、鲁棒性好、可靠性高、参数物理意义明确、理论分析体系完整等诸多优点,被广泛应用于工业控制领域。PID

- [5] PAWLAK Z, BUSSE J G, SLOWINSKI R, et al. Rough Sets[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11):89-95.
- [6] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [7] 孙秋野, 黎明. 粗糙集理论及其电力行业应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.

- [8] 管利荣. 面向不确定性决策的杂合粗糙集方法及其应用[M]. 北京:科学教育出版社, 2008.
- [9] 周庆敏, 李永生, 殷晨波, 等. 基于粗糙集理论的故障诊断规则获取方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(26):64-65, 118.
- [10] 皮骏. 基于粗糙集理论的旋转机械故障诊断技术[D]. 兰州:西北工业大学, 2006.