

基于毫米波辐射特性的水面植被检测方法

李贝贝, 张光锋, 娄国伟, 周璐艳, 刘静

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 针对采用 3 mm 波段辐射计对水面植被辐射特性进行检测的问题, 在研究分析了水面的亮度温度和水面植被的介电特性的基础上, 采用相干法建立了水面植被辐射特性的多层介质模型, 与 3 层介质模型相比, 仿真结果与实验数据更加吻合, 表明多层介质模型能更精确地模拟水面植被的辐射特性; 通过实验得出, 在不同的人射角下, 水面植被亮温相比水面亮温均有上升, 说明水面相比植被具有亮温低、冷目标的毫米波辐射特征, 可利用毫米波辐射特性监测区域内水面植被。

关键词: 多层介质模型; 毫米波; 水面植被; 辐射特性

Detective Method for Aquatic Vegetation Based on Millimeter Wave Radiant Characteristics

Li Beibei, Zhang Guangfeng, Lou Guowei, Zhou Luyan, Liu Jing

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aim at the measurement of radiant characteristics of aquatic vegetation which use a 3mm radiometer, base on the study of water's brightness temperatures and aquatic vegetation's radiant characteristics. The establishment of multilayer dielectric model about aquatic vegetation is based on coherent method. Compared to 3 layer dielectric model, this model's result is in better accordance with the experimental data. this shows that the multilayer dielectric model can model aquatic vegetation's radiant characteristics more precisely. The experiment shows that the aquatic vegetation's brightness temperature is higher than water's in different incident angles. This result shows that water has millimeter wave radiant characteristics of low brightness temperature, cold target compared to aquatic vegetation, so the radiant characteristics can be used to monitor aquatic vegetation.

Keywords: multilayer dielectric model; millimeter wave; aquatic vegetation; radiant characteristic

0 引言

遥感技术主要有红外式、激光式和毫米波式等, 其中毫米波式与红外式和激光式相比, 具有全天候、探测精度高和隐蔽性好等优点^[1]。这些特点使其在农业、地质、环境、测绘与军事等领域应用广泛。目前, 国内外关于毫米波辐射研究涉及有海洋、土壤、月壤等^[2-4], 对于目标辐射特性研究主要涉及有草地、金属、水面等^[5]。较少采用毫米波辐射计监测水面植被, 相关实验数据和模型尚不完善。在遥感领域水面植被监测方面, 国内中科院的谭衢霖博士使用多源遥感影像数据(Landsat TM/ETM、Radarsat SAR 和 TerraMoids 数据等)对鄱阳湖湿地生态环境进行了遥感监测研究^[6], 华东师范大学的王甘霖博士利用 MODIS 数据和合成孔径雷达(SAR)联合监测太湖蓝藻水华, 对太湖的蓝藻水华主被动遥感结合监测问题进行了研究^[7]。

对于水污染及生态环境方面, 再通过对污染区域的实地调查针对采用毫米波辐射计检测水面植被的问题, 分析了水面植被辐射特性, 在此基础上采用相干法建立了水面植被毫米波辐射特性多层介质模型, 进行了实验测试, 并对实验数据进行分析。

1 基本原理

由毫米波波段的理论研究及测试可知, 不同物体发射、吸收和散射电磁辐射的能力存在异同, 这种能力受到物体内部结构、介电常数及温度的空间分布状况影响。因此可以采用毫米波辐射计测量物体的亮度温度, 从而区分出不同的物体。其基本过程为: 从毫米波辐射计得到输出数据, 通过定标方程对其进行换算, 算出天线实际温度, 不一样的天线需要用不同的反演方式, 且得出的视在温度与测量高度有关。最终, 目标的亮度温度通过辐射传递方程得出。

因物体的辐射特性受到其本身复介电常数影响, 研究和测量目标的复介电常数十分关键, 故研究了影响水面植被复介电常数的因素, 在此基础上利用相干法建立了水面植被辐射特性的多层介质数学模型, 并研究了该模型得到水面植被的 3mm 波段的辐射特性^[8]。

1.1 水面亮度温度分析

由于毫米波仅可以穿透水体的表面, 通常情况下, 水体可以看作均质等温物体, 其亮温可以表示为:

$$T_B(\theta; \rho) = [1 - \Gamma(\theta; \rho)] T_S \quad (1)$$

其中: θ 是入射角, T_S 是水体的热力学温度。 $\Gamma(\theta; \rho)$ 表示的是空气与水分界面的反射率。

设空气的复介电常数为 1, 水的相对复介电常数为 $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ 。令水体的相对磁导率 $\mu_r = 1$, 则可得空气和水分界面的反射率:

$$\Gamma(\theta; v) = \frac{(\epsilon'_r \cos\theta - P)^2 + (\epsilon''_r \cos\theta - Q)^2}{(\epsilon'_r \cos\theta + P)^2 + (\epsilon''_r \cos\theta + Q)^2} \quad (2)$$

收稿日期: 2015-12-18; 修回日期: 2016-03-07。

基金项目: 国家自然科学基金(61371038)。

作者简介: 李贝贝(1990-), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事毫米波、亚毫米波测量技术方向的研究。

$$\Gamma(\theta;h) = \frac{(P - \cos\theta)^2 + Q^2}{(P + \cos\theta)^2 + Q^2} \quad (3)$$

其中： v 代表垂直极化， h 代表水平极化。 P 和 Q 分别为：

$$\begin{cases} P = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{(\epsilon_r' - \sin^2\theta)^2 + \epsilon_r''^2} + (\epsilon_r' - \sin^2\theta) \right] \right\}^{1/2} \\ Q = \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{(\epsilon_r' - \sin^2\theta)^2 + \epsilon_r''^2} - (\epsilon_r' - \sin^2\theta) \right] \right\}^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 水面植被介电特性分析

植被的复介电常数受多种因素影响，植被含水量、电磁波频率等因素都影响着植被的复介电特性^[9]。

植被体内都含有一定量的水分，而水的介电常数一般较高，因此，植被的介电特性在较大程度上取决于自身的含水量，经典的 Debye—Cole 双频散射模型和中科院李震等^[10]建立的经验模型都证实植被的复介电常数会随其内部含水量的增加而增大。此外，水分状态对介电常数也有一定影响，通常情况认为植被由干物质、结合水、自由水三部分组成，其介电常数公式为：

$$\epsilon_v = \epsilon_r + v_{fw}\epsilon_f + v_b\epsilon_b \quad (5)$$

其中： ϵ_r 是植物的介电常数， v_{fw} 、 ϵ_f 分别是自由水的体积含量及其介电常数， v_b 、 ϵ_b 分别是结合水和与其结合植物的体积含量及结合水介电常数。在常温 22℃ 下，植被介电常数公式为：

$$\epsilon_v = \epsilon_r + v_{fw} \left[4.9 + \frac{75.0}{1 + jf/18} - j \frac{18\sigma}{f} \right] + v_b \left[2.9 + \frac{55.0}{1 + (jf/0.18)^{0.5}} \right] \quad (6)$$

式中， f 为频率 (GHz)， σ 为自由水电导率 (S/m)。由式 (6) 可知，结合水、自由水所占不同比例对介电常数也有影响^[11]。

植被由干物质和水构成，频率对干物质的介电常数影响很微弱，但频率对水的介电常数影响非常大，根据 Ulaby 等人的实验数据^[12]，植被的复介电常数随频率的变化遵循一定的规律：频率增加，复介电常数实部单调递减，虚部在低频处先减小，达到一个极小值后再增加，最后趋于稳定。

2 水面植被多层介质建模及实验

2.1 多层介质建模原理

目标反射的电磁波是由通过其表面上传播的所有电磁波相加得到，为此引入有效反射率的概念。相干法和非相干法是求解非均匀物质有效反射率的主要方法^[13]，相干法考虑了反射波的幅度和相位，非相干法仅受反射波幅度影响，相干法能够反映电磁波随着材料厚度震荡衰减的特性，精确度较高。综上，采用相干法建立水面植被的多层介质模型。

相干法的理论基础是电磁场理论，通过相干法求得物质和空气分界面上的反射系数 $R(\theta, p)$ ，入射角用 θ 表示，极化方式用 p 表示，进而求得有效反射率。这种方法以下两个条件制约：(1) 厚度是影响介质的复介电常数的唯一因素；(2) 介质内部的体散射忽略不计，同时要将不同介质间的电磁波传递近似为点与点之间的传递。由于水面植被是多层介质，通常使用等效传输线法来求得多层介质的相干反射系数。

2.2 水面植被多层介质建模

由于在水面植被中，植被叶片常有层叠，叶片之间有一定

厚度的空气间隙，因而建立水面植被多层模型如图 1 所示。每一层的复介电常数用 ϵ_{ri} 表示、磁导率用 μ_{ri} 表示，本质阻抗用 η_{ri} 表示。

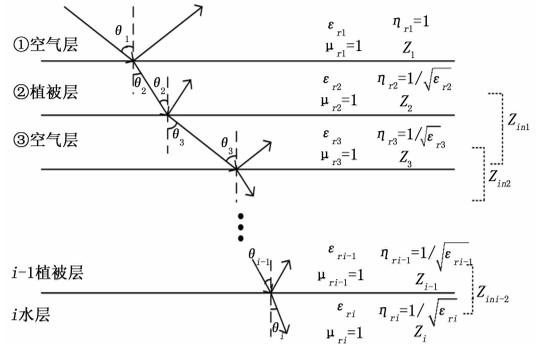


图 1 水面植被多层介质模型

等效传输线法基本原理如下：把图 1 中多层模型的每一层分别等效为一段传输线，每一层对应传输线的特性阻抗分别为： $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_i$ 。对于第 2 层植被层、第 3 层空气层... 第 $i-1$ 层植被层的等效传输线长度分别为 $d_2, d_3 \dots d_{i-1}$ ，第 i 层水层长度等效为无穷大。各层被等效为传输线后的传输常数分别为 $\gamma'_1, \gamma'_2, \gamma'_3 \dots \gamma'_i$ 。第 2 层与第 3 层、第 3 层与第 4 层... 第 $i-1$ 层与第 i 层交界面的反射系数分别为 $R_2, R_3 \dots R_{i-1}$ 。从第 1 层与第 2 层界面、第 2 层与第 3 层界面... 第 $i-1$ 层与第 i 层界面看入的整体特性阻抗分别为 $Z_{in1}, Z_{in2} \dots Z_{in(i-2)}$ 。其中，

$$Z_i = \begin{cases} \eta_i \cos\theta_i, & p = v \\ \eta_i \sec\theta_i, & p = h \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$\gamma'_i = \gamma_i \sec\theta_i = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

$$R_i(\theta, p) = (-1)^n \left(\frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \right); \quad n = \begin{cases} 0, & p = h \\ 1, & p = v \end{cases} \quad i = 2, 3, 4 \quad (9)$$

$$Z_{in1} = Z_{i+1} \left[\frac{1 + R_{i+1} e^{-j2\gamma'_{i+1} d_{i+1}}}{1 - R_{i+1} e^{-j2\gamma'_{i+1} d_{i+1}}} \right] \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

图 2 (a) 为图 1 等效传输线的多层模型，图 2 (b) 为简化后的模型。根据 $i-1$ 次迭代，最终的反射系数为 R_i 。根据推导，可以得到：

$$R_i(\theta, p) = (-1)^n \left(\frac{Z_{in1} - Z_1}{Z_{in1} + Z_1} \right); n = \begin{cases} 0, & p = h \\ 1, & p = v \end{cases} \quad (11)$$

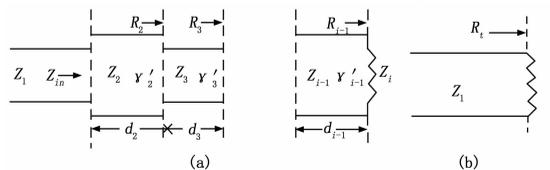


图 2 等效传输线法多层模型及简化模型

根据反射系数与相干反射率的关系，可以求得最终的相干反射率 Γ_c ：

$$\Gamma_c = |R_i|^2 = R_i R_i^* \quad (12)$$

设定水面植被的热力学温度为 T_g ，则水面植被的表面亮温为：

$$T_B(\theta_i; p) = [1 - \Gamma_c(\theta_i; p)] T_g \quad (13)$$

3 实验与结果分析

为了验证建立模型的正确性, 在宜兴太湖流域进行了室外真实 3 mm 波段水面植被辐射特性实验。并利用实验数据与建立的水面植被多层模型仿真结果进行对比, 从而验证模型的正确性。测试时间为 18 时, 室外实验条件: 温度: 34℃, 湿度 44%, 西南风 2 级。

实验步骤如下: 首先测量水面的 3 mm 波辐射特性, 在岸边放置 3 mm 辐射计, 之后摇动天线手柄, 扫描的过程中每隔一个角度读取辐射计显示的电压读数, 得到了不同入射角时水面的辐射特性数据。然后以水面植被为目标, 使辐射计以不同入射角扫过 90°, 得到了探测目标为水面植被时的数据。

辐射计测量的电压值需要通过定标方程转换为亮温值, 由于 3 mm 辐射计的天线孔径很小, 所以天线温度基本可以等效为物体的视在温度。本次实验采用整体定标法进行定标。测量吸波材料、天顶和水面辐射特性如表 1 所示, 其中吸波材料和天顶测量条件均为天线口面正对物体, 测量水面和草地时入射角为 45°, 本实验采用 3 mm 波段的垂直极化入射波。因室外温度较高, 故而水面亮温测量值较高。

表 1 典型地物的 3 mm 波段辐射特性测量

亮温	吸波材料	天顶	水面	草地
温度/K	307.00	100.00	249.06	294.60

文献 [14] 中研究了一种水面植被 3 层模型, 由于水面植被叶片常有层叠, 叶片之间有一定厚度的空气间隙, 因而对于上文建立的多层模型, 分别取层数 i 为 3、5、7, 因为每重叠一次叶片, 同时会增加一层空气间隙层。根据水面植被多层模型, 由公式 13 仿真得出入射角为 45° 时, 水面植被亮温随植被厚度变化关系如图 3 所示。随着植被厚度增加, 亮温呈震荡增加趋势, 即有效反射率为震荡衰减趋势。这和前文所述的相干法考虑电磁波的相位, 其结果会具有震荡衰减的特征一致。

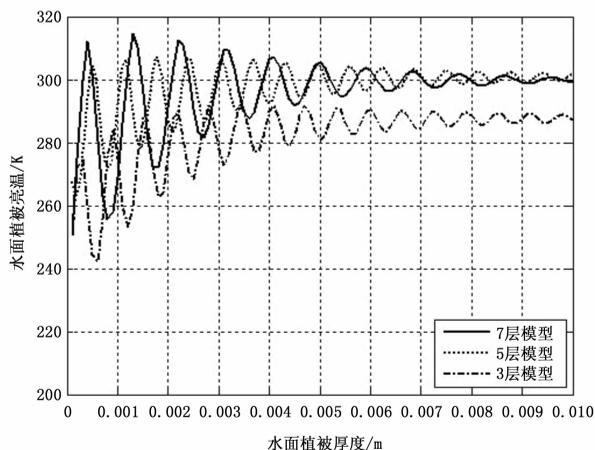


图 3 45°入射角仿真数据

3 mm 波段水面植被亮温与入射角的关系的实测数据和仿真数据如图 4 所示。实验入射角分别为 65°、60°、55°、50°和 45°。以实验值为真值, 分别求得 7 层、5 层、3 层介质模型的均方根误差为 3.92, 8.52, 25.6, 可以看出, 7 层模型误差最小, 但同时计算量较高, 5 层模型较 3 层模型而言, 精确度已

有较大提高, 在不严格要求精确度的情况下, 选择 5 层模型进行仿真较为合适。

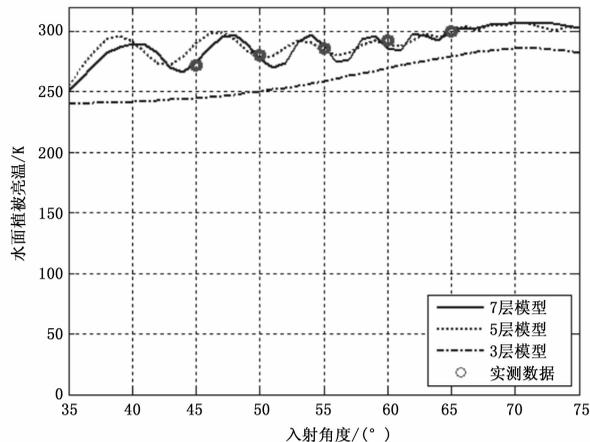


图 4 3 mm 波段水面植被亮温实测和仿真数据对比

图 5 给出了固定住入射角, 改变水平扫掠角, 辐射计测得的亮温变化。当水平扫掠角为 0 时, 相当于接收到水面的亮温, 最高点为该入射角情况下接收到的水面植被的亮温。可以看到, 入射角 45°、50°、55°、60°、65° 时, 水面植被的亮温分别比水面的高出 19.5 K、20 K、20.6 K、21.3 K 和 21.5 K。在不同入射角下, 水面植被的辐射亮温均比水面的辐射亮温高出 7.7% 以上。综上, 实验证明了采用 3 mm 毫米波辐射计能够通过辐射亮温的差异, 从水面中有效地区分出水面植被。

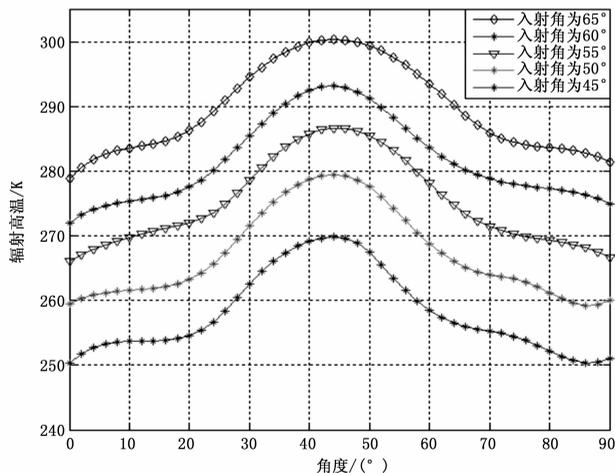


图 5 辐射亮温随水平扫掠角变化实测数据

4 结论

本文研究了 3 mm 波段辐射计监测水面植被的问题, 采用相干法建立了水面植被多层介质模型。与 3 层模型相比, 多层介质模型的仿真结果与实验数据更加吻合, 精确度更高。由于测试时环境物理温度较高, 且为近场测试, 故实验结果存在一定误差, 但仍可表明, 在 3 mm 波段, 水面植被的辐射亮温与所在水面的辐射亮温相比, 差异明显, 可以利用该特性监测区域内水面植被情况。在毫米波辐射成像领域, 与相比 8mm 波段而言, 3 mm 波段空间分辨率较高, 有利于对目标进行成像处理^[15], 拟进一步进行水面植被辐射成像研究。

参考文献:

[1] 任丽娜, 曲延滨. 毫米波与红外技术在军事领域中的应用 [J]. 红外技术, 2004, 26 (3): 66-70.

[2] Yin X B, Liu Y G, Wang Z Z, et al. A new algorithm for microwave radiometer remote sensing of sea surface salinity and temperature [J]. Science in China, Ser. D Earth Sciences, 2006, 51 (11): 1368-1373.

[3] Boyarskii D A, Tik Honov V, Komarova N Y. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2002, (35): 251-269.

[4] 连懿, 陈圣波, 孟治国, 等. 基于嫦娥二号卫星微波辐射计亮温数据反演月壤介电常数 [J]. 地球科学, 2014, 39 (11): 1744-1750.

[5] 陶佳. 3 mm 波段目标辐射特性与成像研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[6] 谭衢霖. 鄱阳湖湿地生态环境遥感变化监测研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.

[7] 王甘霖. 内陆水体蓝藻水华被动遥感监测研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.

[8] Shrestha B L, Wood H C, Sokhansanj S. Modeling of vegetation permittivity at microwave frequencies [J]. IEEE Trans Geosci Re-

mote Sensing, 2007, 45: 342-348.

[9] Bijay L S, Hugh C W, Shahab S. Modeling of vegetation permittivity at microwave frequencies [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (2): 342.

[10] 李震, 曾江原, 陈权, 等. 植被复介电常数的测量与模型构建 [J]. 中国科学, 2014, 44 (3): 519-530.

[11] Samir T, Stuart O N. Temperature dependent behavior of dielectric properties of bound water in grain at microwave frequencies [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17 (8): 2289-2293.

[12] Ulaby F T, El-Rayes M A. Microwave dielectric spectrum of vegetation—Part I: experimental observations [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1987, 25 (5): 541-549.

[13] Wang Zhenzhan, Li Yun, Jiang Jingshan, Dong Xiaolong. A Microwave Radiative Transfer Model Applied To Lunar Soil Remote Sensing [A]. IEEE Conference, 2008: 1-4.

[14] 胡东翔. 水污染的毫米波辐射特性建模与实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[15] 张光锋, 郭伟, 张祖萌. 3 mm 和 8 mm 辐射成像比较与分析 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (6): 64-66.



(上接第 44 页)

输入神经网络之前对数据进行了归一化处理使输入向量的范围在 -1~1 之间。用相应的故障样本训练相应的网络时输出为 1, 其他故障样本训练时输出为 0。神经网络训练达到要求后, 用测试数据分别输入到这 3 个 BP 神经网络中得到的测试结果如表 2 所示。

表 2 分 3 个 BP 神经网络并行处理结果

测试样本	网络输出平均值			故障诊断结果 (%)		
	不平衡网络	支座松动网络	不对中网络	不平衡故障	支座松动故障	不对中故障
不平衡	0.9896	0.0109	0.0550	100	0	0
支座松动	0.0018	0.9978	0.0009	0	100	0
不对中	0.0038	0	0.9906	0	0	100

可以看到每个网络诊断对应的故障时平均输出结果都接近于 1。同样设置某个诊断网络的输出结果大于 0.7 时判断发生了这个故障, 结果显示故障诊断正确率为 100%。

从以上的结果可以至少得出以下三个结论: (1) 根据经过邻域粗糙集约简后得到的属性设计并行神经网络可以优化神经网络的结构; (2) 由于神经网络的输入节点和输出节点数变少, 网络的训练速度会变快; (3) 同时还能保障故障诊断的正确率。

5 结语

大型复杂旋转机械有着故障类型多、信号来源多、信号特征多等特点, 使用神经网络诊断故障时, 会出现神经网络输入向量确定困难、网络结果复杂、对设备并发故障容易出现误诊等问题, 使用本文提出的基于邻域粗糙集和并行神经网络的故障诊断方法能很好地解决这些问题。在 Matlab 中以 BP 神经网络

为例设计多个并行神经网络对转子实验台模拟的故障进行诊断, 结果显示根据经过邻域粗糙集约简后得到的属性设计并行神经网络可以优化神经网络的结构, 神经网络训练速度快且能保障故障诊断的正确率。在实际大型复杂旋转机械的故障诊断中, 此方法将会有极大的应用价值。

参考文献:

[1] 史忠植. 神经网络 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[2] Pawlak Z. Rough Sets—Theoretical Aspects of Reasoning about Data [Z]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991.

[3] 胡清华, 于达仁, 谢宗霞. 基于邻域粒化和粗糙逼近的数值属性约简 [J]. 软件学报, 2008, 19: 640-649.

[4] 谢娟英, 李楠, 乔子芮. 基于邻域粗糙集的不完整决策系统特征选择算法 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 2011 (4): 383-390.

[5] 段洁, 胡清华, 张灵均, 等. 基于邻域粗糙集的多标记分类特征选择算法 [J]. 计算机研究与发展, 2015 (1): 56-65.

[6] 韩虎, 党建武, 任恩恩. 基于邻域粗糙集的支持向量机分类方法研究 [J]. 计算机科学, 2010 (2): 229-231+285.

[7] 刘潇. 基于邻域粗糙集和超网络的不平衡数据分类方法研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2015.

[8] 崔建国, 宋博翰, 董世良, 等. 基于邻域粗糙集的航空发电机健康诊断方法 [J]. 数据采集与处理, 2012 (1): 80-84.

[9] 瞿金秀, 张周锁, 何正嘉. 基于多小波包和邻域粗糙集的故障诊断模型 [J]. 振动测试与诊断, 2013 (S1): 137-140.

[10] 胡清华, 赵辉, 于达仁. 基于邻域粗糙集的符号与数值属性快速约简算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21 (6): 732-738.

[11] 张燕平. 汽轮机轴系振动故障诊断中的信息融合方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[12] 周品. MATLAB 神经网络设计与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.