目　录

第 1 章　绪论 1

1.1　研究背景及意义 1

1.2　国内外研究现状及发展趋势 2

1.2.1　钢丝绳芯输送带缺陷智能识别研究进展 2

1.2.2　带式输送机关键部件故障监测研究进展 10

1.2.3　断带抓捕系统研究进展 13

1.2.4 下运带防飞车保护系统研究进展 16

1.3　系统总体思路及主要研究内容 17

1.3.1　系统总体思路 17

1.3.2　主要研究内容 18

1.4　本书主要工作及章节安排 20

第 2 章　钢丝绳芯输送带缺陷信号降噪和特征提取方法 28

2.1　钢丝绳芯输送带结构及其损伤模式 28

2.1.1　钢丝绳芯输送带结构 28

2.1.2　钢丝绳芯输送带损伤模式 30

2.2　缺陷检测原理及弱磁监测系统开发 31

2.2.1 钢丝绳芯输送带缺陷检测原理 31

2.2.2 缺陷弱磁监测系统设计 32

2.3 缺陷漏磁场空间分布研究 44

2.3.1 断绳缺陷漏磁场空间分布仿真分析 45

2.3.2 缺陷漏磁场仿真与测试结果对比 48

2.3.3 基于磁偶极子模型的接头位移缺陷漏磁场空间分布建模 51

2.4 缺陷弱磁信号降噪 56

2.4.1 缺陷弱磁信号噪声来源特点及降噪评价指标 56

2.4.2 改进阈值小波的变步长 LMS 自适应滤波降噪算法 57

2.5 缺陷弱磁信号特征提取 62

2.5.1 时域特征提取 62

2.5.2 小波包能量特征提取 64

2.5.3 基于改进邻域粗糙集的特征约简算法 65

2.6 本章小结 76

第 3 章 钢丝绳芯输送带缺陷智能识别方法 79

3.1 支持向量机分类算法概述 79

3.1.1 VC 维 79

3.1.2 结构风险最小化 80

3.1.3 支持向量机分类 81

3.2 支持向量机多类分类算法 87

3.2.1 常用支持向量机多类分类算法 87

3.2.2 基于类距离之和的模糊二叉树 SVM 多类分类算法 90

3.3 粒子群优化算法 93

3.3.1 基本粒子群优化算法 93

3.3.2 标准粒子群优化算法 94

3.4 分类实验结果分析 96

3.4.1 UCI 数据集分类实验结果分析 96

3.4.2 钢丝绳芯输送带缺陷分类实验结果分析 97

3.5 钢丝绳芯输送带接头位移缺陷定位与定量 98

3.5.1 接头位移缺陷定位和定量方法 98

3.5.2 输送带接头在线智能识别实验 102

3.6 本章小结 104

第 4 章 带式输送机关键部件故障预警方法 106

4.1 关键部件故障监测系统 106

4.2 关键部件红外图像去噪方法 108

4.2.1 带式输送机红外图像降噪方法 108

4.2.2 红外图像降噪实验验证 110

4.3 关键部件红外图像增强方法 112

4.4 关键部件红外图像分割方法 114

4.4.1 基于阈值的图像分割方法 116

4.4.2 基于区域生长的图像分割方法 117

4.4.3 基于改进区域生长的带式输送机关键部件红外图像分割方法 119

4.5 红外图像特征提取方法 122

4.5.1 关键部件轮廓提取 122

4.5.2 关键部件形状特征提取 123

4.5.3 关键部件纹理特征提取 124

4.6 关键部件红外图像分类方法 133

4.6.1 BP 神经网络算法 133

4.6.2 基于 BP 神经网络的分类算法 135

4.7 关键部件故障预警 140

4.7.1 红外图像诊断方法 140

4.7.2 关键部件的故障诊断 141

4.7.3 关键部件的故障预警 145

4.8 本章小结 147

第 5 章 带式输送机断带智能抓捕系统研发 150

5.1 带式输送机断带问题分析 150

5.2 断带抓捕器机械系统设计及仿真分析 151

5.2.1 电磁式断带抓捕器机械系统设计及仿真分析 151

5.2.2 电液式断带抓捕器机械系统设计及仿真分析 155

5.2.3 基于 ADMAS 的断带抓捕器仿真分析 156
5.2.4 断带抓捕器关键部位受力分析 161
5.3 断带抓捕器抓捕力及抓捕时机分析 167
5.3.1 断带抓捕器抓捕力分析及布置 167
5.3.2 抓捕时机及抓捕时间计算 169
5.4 断带抓捕器群智能联动控制系统设计 175
5.4.1 电液式断带抓捕器智能联动控制方法 175
5.4.2 电磁式断带抓捕器智能联动控制方法 175
5.5 本章小结 176

第 6 章 下运带式输送机防飞车保护系统设计 178

6.1 下运带式输送机工况分析及制动要求 178
6.1.1 下运带式输送机工况分析 178
6.1.2 防飞车保护装置的制动要求 178
6.2 下运带式输送机防飞车保护系统方案 179
6.2.1 机械系统方案 180
6.2.2 控制系统方案 180
6.2.3 液压系统方案 181
6.3 防飞车保护机械系统设计 181
6.3.1 防飞车保护机械系统方案设计 181
6.3.2 防飞车保护装置制动力分析及布置 182

6.3.3 防飞车保护机械系统关键部件设计及有限元仿真 183
6.4 防飞车保护液压系统设计 193
6.4.1 防飞车保护液压系统总体方案 193
6.4.2 防飞车保护液压系统关键部件选型及计算 195
6.5 防飞车保护控制系统设计 202
6.5.1 防飞车保护速度检测系统设计 202
6.5.2 防飞车保护控制系统硬件设计 204
6.5.3 飞车判据及控制方法 206
6.5.4 防飞车保护控制系统软件设计 208
6.6 本章小结 211

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

矿用带式输送机具有输送量大、输送距离远和通用性强等特点，是大多数煤矿的主运输系统，在现代化煤矿生产中发挥着极其重要的作用。随着高带速、长距离、大运量带式输送机的应用，矿用带式输送机电动机、托辊和滚筒等关键部件故障和断带事故频发。降低带式输送机电动机、托辊、滚筒等关键部件故障和减少断带事故发生是迫切需要解决的重大问题，对煤矿安全生产和提高经济效益具有重要意义。

目前，许多矿用带式输送机缺乏先进的钢丝绳芯输送带缺陷检测系统，导致断带事故时有发生。断带事故不仅造成较大的经济损失，甚至造成人员伤亡。对于钢丝绳芯输送带内部缺陷检测问题，目前主要有人工检测方法、弱磁检测方法和X射线检测方法。人工检测方法无法实现输送带缺陷在线监测，并且检测不准确。X射线检测方法是一种比较成熟的输送带缺陷检测方法，但成本较高，并且存在有辐射和无法检测疲劳缺陷等缺点。本书提出了一种弱磁检测方法。该方法具有检测精度高、检测速度快等特点，并且可以实现输送带钢丝绳芯疲劳缺陷检测，是目前比较先进的钢丝绳芯输送带缺陷在线监测方法。

近年来，主要应用分布式光纤测温系统检测电动机、托辊和滚筒等关键部件的故障，但因连接、熔接及外部受损而引起的光纤系统功能损伤将降低监测系统的整体性能。红外热像技术通过测取目标物体表面的红外辐射能，将被测物体表面的温度分布转换为形象直观的热图像，通过对热图像中目标物体的温度进行分析，可以揭示物体中尚未被察觉的异常状态。利用红外热像技术，可以在不取样、不解体、不停电的状况下对带式输送机进行热故障的诊断分析，快速、便捷地对带式输送机电动机、托辊、滚筒等关键部件的热故障进行判断。

断带事故发生后采取的措施主要是采用断带抓捕器。断带抓捕器主要有机械式断带抓捕器、液压式断带抓捕器和智能联动控制断带抓捕器。机械式断带抓捕器利用逆止原理，采用棘轮、超越离合器等元件触发，形成楔形力或连杆压紧力，抓捕力不大。这种断带抓捕器采用多点布置方式布置，无法实现同步抓捕，有些断带抓捕器不动作。液压式断带抓捕器抓捕力大，整条皮带一般布置1～2个断带抓捕

器。当不在断带抓捕器位置断带时，液压式断带抓捕器无法实现抓捕。本书提出了一种智能联动控制断带抓捕器。这种断带抓捕器可以克服上述断带抓捕器的不足，实现多个断带抓捕器同步动作，确保可靠抓捕。

目前主要采用阻尼摩擦式防飞车保护装置进行下运带式输送机防飞车保护。采用阻尼摩擦式保护装置，在带式输送机正常运行时，阻尼板也与输送带摩擦，容易导致输送带磨损。本书提出了一种集机、电、液于一体的下运带式输送机防飞车保护系统，该系统可以实现飞车故障智能诊断，有效克服现有阻尼摩擦式防飞车保护装置在带式输送机正常运行时对输送带的磨损问题。

因此，本书运用先进的弱磁检测技术、红外热像技术、断带抓捕智能联动控制技术和先进信号处理技术，构建矿用带式输送机智能监测与防护系统，实现带式输送机钢丝绳芯输送带、电动机、滚筒和托辊全传动链智能监测，以有效防控断带事故发生和实现关键部件故障预警。该矿用带式输送机智能监测与防护系统对确保煤矿安全生产和提高煤矿经济效益具有重要的意义，具有广阔的应用价值和市场前景。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 钢丝绳芯输送带缺陷智能识别研究进展

1.2.1.1 钢丝绳芯输送带缺陷检测技术研究进展

钢丝绳芯输送带作为煤矿的重要运输设备，由于缺少有效的检测手段，一直是影响煤矿安全生产的重大危险源。煤矿检测钢丝绳芯输送带的主要办法是人工检测和定期更换输送带，只有少部分煤矿应用强磁检测方法、X 射线检测方法或弱磁检测方法。

1. 人工检测方法

人工检测方法主要对接头变形进行简易检测。人工检测常用的具体方法如下。

1）起泡现象观测法

起泡现象是输送带接头损伤常见的故障特征之一，由起泡部位的钢丝绳芯抽动所致。起泡现象观测法是我国煤矿现场经常使用的一种人工检测方法，即在停机后，首先清除接头区输送带表面的物料，然后查看有无起泡。当起泡区域的宽度扩展到全带宽的 1/3 时，立刻进行更换处理。

2）接头长度测量法

在新做好的硫化接头两边界适当位置等距离地刻画三组标志线，并对每组标志线的长度进行测量并记录。输送带投入使用后，定期地测量每组标志线的长度。当发现三组中任意一组的长度伸长量超过设定的阈值时，用 X 射线探测仪对此接头进行拍片处理和分析，从而确定该接头的损坏严重程度，并评价该接头能否继续使用。

3）表面应变测量法

表面应变测量法是指首先在输送带低应力区给接头区域表面画上网格，当运转到高应力区时，重复测量此网格的变形情况，从而判别输送带内钢丝绳芯之间产生抽动与否及其严重程度。该方法由于一般根据现场的经验和具体使用情况来设定变形量阈值，所以可靠性不高。

在实际应用中，上述方法具有很多局限性。例如，接头表面及其网格或标志线通常会被煤泥污染，从而导致无法辨认和测量等。同时，上述方法是离线的静态人工检测方法，无法应用于输送带横向断带的在线检测。

2. *强磁检测方法*

浙江大学与中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司合作研发的 GDJ 型钢丝绳芯输送带综合监测系统，已经完成了在矿山连续运输系统中的全部工业试验，通过了原冶金部的技术鉴定，并应用到矿井中。澳大利亚学者 A Harrison 采用电磁感应方法对钢丝绳芯输送带进行了无损检测，并研制出钢丝绳芯输送带钢丝绳芯检测装置。此方法在 20 世纪 80 年代后期广泛用于南非、德国、美国、加拿大等地的采矿工业，该项检测技术的应用使危险的高张力钢丝绳芯输送带的检测成为可能。

20 世纪末，我国科研院所利用电磁感应原理相继研发出了钢丝绳芯输送带钢丝绳芯检测装置。这些装置实现了在线检测、曲线显示，能给出钢丝绳芯输送带断裂的大致位置和程度，但不能直观显示输送带的内部图像，且探伤周期较长，断裂的精确位置和详细状况还要通过辅助设备来判断，存在准确性差、显示不直观、不能远程监测等缺点，而且当输送带内有纵向撕裂保护丝网时，更难探测。21 世纪初，我国专家利用电磁检测传感器研发出了钢丝绳芯输送带实时在线监测装置。该装置主要用于对钢丝绳芯输送带接头位移、断绳等故障的检测和定位。该装置采用数字信号处理器(DSP)作为下位机进行数据的采集、控制和传输，保证了显示处理的快速跟随性和可靠性。但是，强磁检测信号易受周围磁场和工作环境的干扰，从而导致装置精度低、稳定性差，工作人员不能对输送带内部钢丝绳芯的情况进行全面了解，检测结果不直观。

3. X 射线检测方法

X 射线检测方法是一种基于射线投影成像及 PC 图像处理的无损探伤技术。在我国，过去一直采用 X 射线检测方法对钢丝绳芯输送带进行静态检测。20 世纪 90 年代，我国利用计算机技术成功地研制了 X 光机实时在线监测系统，大大推动了该项技术的发展。这种检测方法对钢丝绳芯的断丝和接头移位等损伤故障的诊断结果直观。但是，此方法存在 X 射线对人体有损害、设备复杂、抗干扰能力弱、安装不方便等缺点。1993 年，中国矿业大学(北京)运用 X 射线检测方法对钢丝绳芯输送带进行了无损检测，并研制出了钢丝绳芯输送带横向断裂预报装置，提高了钢丝绳芯缺陷定量的精度。但是，此装置受当时的软硬件技术限制，存在检测速度慢、不具备远程实时监测等缺点，这些缺点在很大程度上限制了它的应用和推广。

天津工业大学等进行了 X 射线钢丝绳芯输送带无损检测系统通信和图像处理软件的研究。该系统能够实现钢丝绳芯输送带图像的实时传输、检测和处理，能够发现输送带接头伸长超过 10.24 mm 或强度减少到标准输送带的 10%以上等故障，并能够及时报警。该系统实时性较好，可以提高图像质量和输送带的运动速度。但是，由于实验中缺乏强力输送带“缺陷图像”的样本，所以采用该系统时，对输送带接头伸长及强度的判断只能靠物理方法。

虽然随着现代科技的发展，X 射线实时检测技术有了很大提高。但是，X 射线检测方法成本仍较高，且对人体有害，对输送带钢丝绳疲劳缺陷的检测灵敏度、分辨力均较低。

4. 弱磁检测方法

21 世纪初，洛阳 TCK 钢丝绳检测技术有限公司的窦毓棠等人采用弱磁检测技术研制了钢丝绳弱磁无损定量检测系统并获得了国家专利，研制了钢丝绳弱磁探伤仪并将该弱磁检测传感器命名为“窦氏元件”。该传感器灵敏度较高，根据钢丝绳内外部空间磁矢量和磁能势分布变化，以附加弱磁与钢丝绳剩磁间的场能置换方式来获取钢丝绳内外部各类损伤导致的磁场差异信息。后来，窦毓棠等人在此基础上开发了钢丝绳芯输送带在线弱磁检测系统。该系统中弱磁检测传感器的灵敏度可达 5 V/mT，可减少振动、晃动和股波噪声的影响，检测最高速度可达 8 m/s，可以检测出断绳、断丝、疲劳和接头位移等缺陷。但是，系统的稳定性、缺陷识别还存在不足，检测的精度还有待提高。

强磁检测技术运用电磁感应法和霍尔效应法探测输送带钢丝绳芯缺陷，由于感应线圈和霍尔传感器灵敏度很低，所以存在无法准确地捕捉到相对微弱的损伤信号、无法消除各种外界噪声干扰和检测结果不稳定等缺点。X 射线检测技术存在检测速度慢、对人体有辐射等缺点。弱磁检测技术采用弱磁检测传感器，弱磁检测传感器具有灵敏度高的优点，可以提高信号的信噪比。

综上所述，在钢丝绳芯输送带各种缺陷在线实时检测方法中，弱磁检测方法以其灵敏度高等特点，比强磁检测方法和 X 射线检测方法具有明显优势。

1.2.1.2　缺陷漏磁场分布研究进展

目前，国内外缺陷漏磁场计算的分析方法有两种：一种是解析法，它以磁荷分析方法为基础，用磁荷代替缺陷处的铁磁性材料，设法得出磁荷在铁磁性材料体外的漏磁场分布；另一种是数值解法，以麦克斯韦方程为基础，通过计算机辅助计算来获得漏磁场的分布。

1. 解析法研究进展

Zatsepin 和 Shcherbinin 于 1966 年最早给出漏磁场解析方程磁偶极子模型，模拟工件表面的点状缺陷和裂纹。此后，基于磁偶极子模型的解析法在研究缺陷形状对漏磁场的影响方面得到了广泛应用。杨叔子等利用磁荷模型研究了单丝断口的漏磁场模型、钢丝绳表面断丝断口及内部断丝断口的漏磁场模型，为钢丝绳局部损伤的定量检测奠定了良好的基础。何利勇等进行了基于磁荷模型的钢丝断口漏磁场定量分析实验，获得了漏磁信号宽度与钢丝断口宽度、传感器提离距离之间的解析表达式。Tan Jiwen 等建立了基于等效磁偶极子模型的钢丝绳缺陷检测系统，实现了断丝根数及断丝在轴向的定位准确识别。

2. 数值解法研究进展

W Lord 和 J H Hwang 最早将有限元分析方法运用到漏磁场的计算中，得出了裂纹宽度对缺陷漏磁场的影响结果，使得漏磁检测理论得到了重大发展。F I Al-Naemi 等研究了板材漏磁检测的有限元建模技术，他们的研究结果为漏磁检测传感器的标定奠定了理论基础。周郁明等人运用有限元法计算了钢丝绳断丝产生的漏磁感应强度，可为传感器的设计提供理论依据和参考。赵敏等人应用有限元仿真方法实现了对钢丝绳缺陷漏磁场的研究，为缺陷定量识别的进一步研究奠定了基础。

通过上述研究可看出，解析法主要对磁偶极子模型进行研究，数值解法主要对有限元法进行研究。研究表明：解析法可求得缺陷漏磁场分布的解析表达式，方便对检测信号模式进行解释；数值解法得不到缺陷漏磁场的解析表达式，需借助计算机采用数值计算方法才能获得最终计算结果，该方法对分析问题和解释缺陷检测信号特征很不方便。

国内外对煤矿钢丝绳缺陷的漏磁场计算主要针对钢丝绳断丝缺陷，而对钢丝绳芯输送带内部钢丝绳芯断绳和接头的漏磁场计算鲜见报道。然而，影响煤矿钢丝绳芯输送带断裂的主要因素是接头位移和内部钢丝绳芯断绳。通过以上两种方法特点对比，本书采用基于磁偶极子模型的解析法对接头的位移漏磁场进行计算，

为缺陷的定性和定量分析奠定理论基础。

1.2.1.3 电磁信号滤波算法研究进展

由于煤矿钢丝绳芯输送带缺陷的电磁检测信号主要受到带式输送机的机头处设备运行的强噪声和电磁干扰，这些噪声频带宽而且统计特性随环境改变，电磁检测的缺陷信号容易被噪声淹没。因此，对采集的电磁检测信号进行降噪，保证获取的缺陷信号真实性非常重要。目前已有许多电磁检测信号降噪算法，如小波分析、神经网络等。上述算法虽然对提高电磁检测信号的信噪比具有实际意义，但是都存在一定的局限性，影响了检测结果的可靠性，缺陷的定位、定量和定性分析，以及评价的准确性。

小波变换为非平稳信号的时频分析提供了一个强有力的工具，被认为是近年来最有效、最有前途的信号处理技术。一些研究者将小波变换算法应用到电磁检测信号处理方面。宋大雷等人将小波理论有效地用于钢丝绳芯断丝检测信号的处理中，可有效地确定局部损伤的位置及识别内外部断丝。张东来等人运用线性 B-小波对钢丝绳检测信号进行消噪，有效地提高了信噪比，这表明小波变换对消除磁信号中的白噪声是十分有效的。S Mukhopadhyay 等人运用小波变换对管道缺陷的漏磁信号进行滤波，有效地从噪声中提取了缺陷信号。

小波变换的局限性在于用一个有限的函数或向量集合去表示任意的信号，而没有考虑信号本身的特征，因此所分离出来的噪声信号并不一定是所含噪声成分的最佳估计。弱磁信号的噪声属时变非平稳信号，难以用维纳滤波、卡尔曼滤波或小波变换滤波实现最优滤波，而自适应滤波能提供较好的滤波效果。利用基于最速下降原理与以最小均方误差为准则的 LMS(least mean square)自适应滤波算法设计的线性横向滤波器，因算法易于实现和计算量小，在实际中经常被采用。但是，由于当输入信号强相关引起输入信号的自相关阵特征值分散度变大时，标准的 LMS 自适应滤波算法的收敛速度和精度受到极大的制约，而将小波理论引入自适应滤波算法中，用小波变换的方法对自适应滤波器的输入进行正交变换，将输入向量正交分解到多尺度空间，可以减小自适应滤波器输入向量自相关矩阵的谱动态范围，从而提高 LMS 自适应滤波算法的收敛速度和稳定性，因此将小波变换与 LMS 自适应滤波结合来实现最佳滤波。对小波变换与 LMS 自适应滤波结合降噪的研究不少，但是这些研究在电磁检测信号降噪中应用较少。X Zhang 等人运用小波包与 LMS 自适应结合的滤波方法对噪声信号进行滤波，理论分析和仿真结果表明该方法相较 LMS 自适应滤波方法有更快的收敛性和更好的滤波效果。朱洪俊运用小波变换对噪声信号进行多尺度分解，将分离出的噪声成分作为自适应滤波器的输入信号，同时实现对多种噪声成分的最佳滤波，获得优良的滤波性能。刘昌

云等人研究认为，多尺度小波变换自适应滤波能更好地恢复信号，具有比自适应滤波更高的降噪能力。

以上研究表明：小波变换与 LMS 自适应滤波结合算法相对小波分析进行信号处理，具有自适应特点，降噪效果具有明显优势。但是，由于固定步长的 LMS 自适应滤波算法存在收敛速度和稳态失调的矛盾，因此，有必要研究一种基于小波变换的变步长 LMS 自适应滤波算法的弱磁信号提取技术。

1.2.1.4　缺陷信号特征提取研究进展

处理大量的冗余信息和降低特征维数是进行缺陷特征提取的主要任务。常用的缺陷特征有时域特征、频域特征和时频域特征等。时域分析方法有均值、方差、均方值、均方根值、脉冲指标、均方幅值、波形指标、峭度及峰值指标等，而频域分析有频谱分析、细化谱分析及解调谱分析等，时频域特征提取方法主要有小波特征提取方法和小波包特征提取方法。煤矿钢丝绳芯输送带缺陷信号特征比较复杂，特征提取结果对缺陷识别的准确率和速度影响较大。因此，有必要研究一种缺陷特征约简算法，以获得反映缺陷的本质特征向量，提高缺陷识别准确率和效率。

粗糙集(rough sets)理论能有效地对完备信息和不完备信息进行特征约简，在知识发现和数据挖掘等方面获得了成功应用，并受到了国内外学者的广泛关注，成为人工智能领域的一个新的研究热点。粗糙集理论在模式识别领域也具有广泛应用，粗糙集理论能在确保分类正确率的条件下，提取数据集的本质特征。Chen Huiling 运用粗糙集理论作为特征约简工具，有效地去除了数据中的冗余特征，提高了支持向量机的分类精度和速度。

粗糙集理论模型主要有 Pawlak 经典粗糙集模型、模糊粗糙集模型、基于容差关系的粗糙集模型和邻域粗糙集模型。基于容差关系的粗糙集模型和邻域粗糙集模型是目前粗糙集理论的研究热点，因为 Pawlak 经典粗糙集模型和模糊粗糙集模型需要对数据进行离散化才能进行约简，离散化过程中会导致信息丢失，而基于容差关系的粗糙集模型和邻域粗糙集模型可直接对连续数据属性进行约简，消除了离散化过程带来的信息丢失问题。然而，基于容差关系的粗糙集模型需要信息系统中的属性值的概率分布情况等相关知识，而邻域粗糙集模型不需要信息系统中的概率分布等知识，可以直接对输送带缺陷电磁信号连续属性特征进行约简。

对邻域粗糙集的研究主要集中在属性重要度计算方法的改进和约简算法的改进上。在邻域粗糙集中，邻域大小的确定非常重要。在目前的邻域粗糙集研究中，通常是根据实验和经验对所有的属性设定同一邻域值。由于实际中各属性的数据往往存在较大差异，邻域粗糙集为不同属性设定同一邻域值，邻域值选择不好会导致属性约简效果不好。因此，本书提出一种基于属性数据标准差的改进邻域粗糙

集特征约简算法。该算法根据不同属性标准差为不同属性设定不同邻域值，从而解决了原邻域粗糙集难以为不同属性选择最佳邻域值的难题。

1.2.1.5 缺陷分类识别研究进展

缺陷分类是在缺陷特征提取的基础上，确定分类方法和设计出相应的分类器：首先，运用样本集合进行训练；然后，根据分类方法得到分类模型；最后，运用分类模型对缺陷进行自动分类。针对不同的分类对象，许多学者提出了相应的分类方法。目前，分类方法归纳起来主要有以下三种：基于统计的分类方法、基于规则的分类方法和基于学习的分类方法。常见的分类算法有决策树分类法、模糊分类法、人工神经网络分类法、贝叶斯分类法和支持向量机分类法等，其中应用比较广泛的分类算法有支持向量机分类法和神经网络分类法。

近年来，国内外学者在电磁检测缺陷分类方面进行了有益探索。田志勇等人运用基于 BP 神经网络的钢丝绳芯断丝损伤信号的模式识别方法对钢丝绳芯断丝损伤进行识别，通过模拟和实际检测，断丝损伤识别的准确率达到 86.19%，验证了 BP 神经网络的可靠性和实用性。由于人工神经网络需要大量的训练样本，所以在实际应用中条件往往难以满足。支持向量机（support vector machine，SVM）在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出的独特优势，引起了广泛关注。杨理践等人运用支持向量机分类法对管道漏磁检测缺陷进行识别，实验识别误差在 5%以下，而且支持向量机分类法泛化能力强，在有限样本情况下比人工神经网络分类法更具优势。

实际样本中，可能存在孤立点或噪声，这些孤立点或噪声对标准的 C-SVM 或者 v-SVM 的最优分类超平面影响较大。针对该问题，模糊支持向量机 FSVM 算法被提出。Abdulhamit Subasi 运用 FSVM 对神经肌肉紊乱的肌电描记仪的 EMG 信号进行分类，Stefan Scherer 等人运用 FSM 对声音质量进行分类，实验结果表明：该方法比标准 SVM 分类法分类精度高。

在支持向量机求解中，参数 C、v 和核函数参数对支持向量机分类精度影响较大，且实际中很难确定。有些学者运用粒子群优化算法对支持向量机参数优化，获得了较高的分类精度。Liu Zhiwen 等人运用粒子群优化的小波 SVM 对轴承故障振动信号进行分类，结果表明：该方法比标准的 SVM 分类法有更高的分类精度。Mohammad Javad Abdi 等人运用粒子群优化支持向量机（PSO-SVM）对鳞状疾病进行分类识别，分类精度高达 98.9%。

煤矿钢丝绳芯输送带缺陷主要有接头位移、断绳、锈蚀、磨损和疲劳等，SVM 分类法本身是一种两类分类方法，如何将它推广到多类分类，以适应实际中煤矿钢丝绳芯输送带缺陷快速、准确识别，是一个迫切需要解决的问题。目前，多类 SVM

成为多类模式识别的热点。已有的多类 SVM 分类方法大致可分为两种：一次性求解算法和分解重构算法。一次性求解算法是在所有训练样本上求解一个大型二次规划问题，同时将所有类别分开，特点是变量个数多，计算复杂度很高，尤其是当类别数目较多时，它的训练速度较低，分类精度也不高；分解重构算法将多类分类问题转化为多个两类分类问题，并采用某种策略将多个两类分类器组合起来实现多类分类。分解重构算法比一次性求解算法更适合用于实际应用中，用它实现多类分类需要解决两个关键问题：模糊类的生成和多个两类分类器的组合策略。当前应用较广泛的 SVM 分解重构算法有 1-a-r（one-against-rest）方法、1-a-1（one-against-one）、DAGSVM（directed acyclic graph support vector machines）方法、DTSVM（decision tree support vector machines）方法，以及 HSVM（hierarchical support vector machines）方法等。这些方法在多分类中各有优缺点，研究表明：1-a-r 方法简单、有效，可用于大规模数据，但当工作集过大时，它的训练速度将会很慢。同时，它存在误分、拒分区域，泛化能力较差的缺点。1-a-1 方法的分类速度比传统的 1-a-r 方法快，而且分类精度也较 1-a-r 方法的分类精度高。它的缺点是：如果单个两类分类器不规范，则整个分类器将趋向于过学习，分类器的数目随类数急剧增加，导致在决策时速度很慢，存在推广误差无界及误分、拒分区域的缺点。DAGSVM 方法较 1-a-1 方法提高了测试速度，而且不存在拒分区域缺点；另外，它由于具有特殊的结构，有一定的容错性，而且分类精度较一般的二叉树方法高。该方法的泛化能力与各子分类器在有向无环图中的位置有关。DTSVM 方法和 HSVM 方法采用树结构的组合策略，具有较高的训练和分类速度，但分类树存在错分积累，如果选择的树结构合理，则可以获得较高的分类速度和精度。通过以上多分类方法特点比较可知，二叉树 SVM 综合性能较好，关键是要选择合理的二叉树结构。

针对以上 SVM 多类分类方法的特点，许多学者提出了不同二叉树结构的 SVM 多类分类方法，并取得了良好的效果。刘海涛等人提出了标记划分的新的二叉树 SVM 多分类算法，结果表明：该方法大大减少了子分类器的数目，大幅度提高了算法的速度，在实际应用方面具有优越性。胡林峰等人提出使用特征脸和基于类间可分离性度量的二叉树支持向量机（BT-SVM）分类器相结合的方法进行人脸识别，结果表明：该 BT-SVM 分类算法可获得比 SVM 分类算法更高的识别率。Jin Chen 等人提出了一种自适应二叉树支持向量机，结果表明：该方法可以加快测试速度，同时保持较高的分类精度。

以上研究表明：支持向量机分类法存在参数选择难、样本噪声和孤立点降低分类精度及多类分类精度和速度不高等问题。为了有效地提高缺陷分类的可靠性和实时性，有必要研究一种基于粒子群优化的模糊二叉树支持向量机多类分类的缺

陷分类算法，以通过粒子群优化算法选出 SVM 最优参数，通过模糊支持向量机减少噪声和孤立点对分类的影响，通过新的二叉树多类分类算法提高分类速度和精度。

1.2.2 带式输送机关键部件故障监测研究进展

针对矿用带式输送机电动机、托辊、滚筒等关键部件缺乏有效状态监测这一问题，人们提出了基于红外热像的带式输送机关键部件运行故障特征提取与智能识别方法，研发了状态监测、故障诊断和预警系统，实现了带式输送机电动机、滚筒和托辊等关键部件高精度识别及故障预警。

1.2.2.1 带式输送机监测与预警技术研究进展

带式输送机状态监测与故障诊断技术由状态监测、监测结果的分析诊断、治理和预防三个方面构成，主要是对带式输送机运行状态进行识别监测，对带式输送机运行状态的发展趋势进行预测。带式输送机状态监测与故障诊断技术经历了以下几个阶段。

（1）凭借工作人员的现场经验以及一起商讨得出故障原因，确定解决方案。

（2）利用测量仪器与测量设备获取带式输送机的速度、加速度、温度等基本参数，通过比较固有参数和测量参数得出故障发生的部位。

（3）随着计算机技术的发展，利用一些专用的监测仪器进行测量，并且进行数据的处理，在计算机上利用专用软件对参数进行综合分析评估。

（4）计算网络的高速发展使带式输送机的监测与预警朝着深度和广度并行发展。

国外在带式输送机监测与预警方面起步较早，主要应用动态分析、机电一体化、计算机监控等高新技术，对输送机进行动态监测与监控。我国与发达国家在带式输送机监测与预警方面存在一定的差距，近年来我国许多科研单位和高等院校已经将带式输送机的监控与预警作为重点研究内容。中国煤炭科工集团有限公司针对目前带式输送机温度监测存在的一些问题，利用分布式光纤测温技术研发了 KJ190 型带式输送机温度监测系统。该系统对带式输送机及其托辊、滚筒类轴承端盖、驱动电动机等各关键点的温度监测和预警效果良好。华南理工大学利用红外热像技术，设计了基于红外热像的煤矿火灾预警系统。该系统通过提取火灾红外图像的火灾区域，对火灾红外图像的早期特征进行分析，起到火灾早期报警、早期防护的作用。安徽理工大学利用红外非接触测温技术，设计了一种基于红外采集的包括数据处理及声光报警的带式输送机温度保护系统，提高了带式输送机生产的智能化和安全性。河南理工大学针对带式输送机温度

监测存在的问题，利用无线温度传感器设计了温度无线实时监测系统。该系统对带式输送机的异常温升通过使用 GSM 发射装置向指定手机发送警告短信来进行自动报警。西北工业大学针对以往带式输送机温度检测系统的不足，设计了基于 DSP2812 的带式输送机多路温度检测系统。该系统通过红外温度探测器提高了输送带温度检测的精度。

综上所述，对煤矿井下带式输送机的温度进行实时监测与故障预警，对保障煤矿井下带式输送机连续运行的可靠性和人员的安全具有十分重要的意义。

1.2.2.2　红外热像技术研究进展

红外热像技术的特点是：采用非接触测量，可以实现高温、高速等无法接近目标设备的温度测量；响应速度快，可以动态监视设备启动过程中的温度变化；灵敏度高，可分辨被检测物体的微小温差；温度测量范围广，适用于从零下几十摄氏度到零上两千摄氏度的检测目标；实时显示被测对象表面温度，能够进行目标整体温度分布的分析。

就世界范围而言，红外热像技术在工业领域得到了广泛的应用。意大利那不勒斯菲里德里克第二大学利用红外热像技术对机械部件应力评估进行了研究，为机械部件故障预测和维护提供了依据。代尔夫特理工大学利用红外热像技术对电气隔离开关的触点状态进行评估，从而为电力设备的维护提供了依据，保证了电力供应的可靠性。Engineer IT 利用红外热像技术对设备的预防性维护进行了研究，降低了设备因故障停机而造成的损失。保加利亚索非亚技术大学利用红外热像对仪器仪表的自动化的预防性诊断进行了研究，降低了其维修所用的时间和代价。保加利亚索非亚化工冶金大学利用红外热像技术，结合图像处理技术对冶金设备进行故障诊断，从而保障了设备运行的可靠性。莫斯科国立电子数学学院利用红外热像技术对房屋内的加热和电子设备进行节能控制和能量监测，提高了能源的利用率和电气设备的安全性。美国国家可再生能源实验室利用红外热像技术在生产过程中对燃料电池进行质量控制。美国北卡罗来纳农工州立大学利用红外热像技术对碳-树脂复合层板在压力增大时缺陷的发展进行了研究。加拿大圭尔夫大学利用红外热像技术，结合图像处理技术对电动机进行自动定量检测，从而使电动机能够得到有效的利用。摩洛哥 Jadida 的电子仪器信号处理科学实验室利用红外热像技术对石油管道腐蚀缺陷的数值建模进行了分析。马来西亚理科大学利用红外热像技术对混凝土建造物中的电气部件进行了评估和监测。韩国国立公州大学利用红外热像技术对滚珠轴承在动态加载阶段的状态进行了监测，实验表明：可以利用红外热像技术对滚珠轴承的故障进行定性和定量分析。

同发达国家的红外热像技术相比，我国的红外热像技术还有一定的差距。