**一：基于智能模型的健康监测**

1. 基于智能模型的健康监测主要步骤

基于智能模型的健康监测定量评估，**其输出**为具有特定取值区间的连续值。因此，该类方法所用的智能模型一般是机器学习中的**“回归模型”**，即通过训练集对回归模型进行学习，从而建立特征空间到连续取值空间的**映射关系**。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 高质量数据库 | 特征提取 | 健康状态定量评估 |
| 振动  声发射  温度  …… | 时域分析  频域分析  时频分析  …… | 循环神经网络  支持向量机  逻辑回归  …… |

1. 循环神经网络

①循环神经网络（Recurrent neural network, RNN）是一类用于处理时序信号的深度神经模型。

②RNN允许网络中出现环形结构，从而可让一些神经元的输出反馈回来作为输入信号。这种结构与信息反馈过程，使得网络在时刻t的输出不仅与时刻t的输入有关，还与时刻t-1的网络隐含层的输出有关，从而RNN能处理**与时间有关的动态信息**。

1. RNN在轴承健康状态监测中的应用

①以滚动轴承为监测对象，定量评估滚动轴承的健康状态。在测试轴承上加装**加速度传感器**采集轴承的振动信号。

②对17个滚动轴承进行加速寿命实验，分别记录为B1-B17 。如轴承B1在全寿命周期内的振动信号。

③首先，提取振动信号的14种特征构成特征向量；

然后，选取轴承B2-B17的数据作为训练数据集，训练RNN模型。

最后，以轴承B1的数据测试训练好的模型。如测试轴承的健康评估值随时间出现增长趋势。轴承的健康评估值分布在0到1之间。

**二：问题描述**

（1）人为故障诊断遭遇“大数据”

①**机械设备的故障信息**隐含在振动、声发射、温度等检测数据中，有效捕捉检测数据变化所传递的故障信息，能够准确识别设备故障。长期地“经验”积累使工程人员能够敏锐地捕获监测数据变化中所蕴含的设备健康状态信息。

②“大数据”为设备故障诊断提供了海量的监测数据，仅依靠人类自身“经验”积累易于“迷失”在数据的海洋，难以满足大数据驱动下的故障诊断需求。

（2）大数据智能诊断的基本内涵

①机器学习赋予计算机学习能力，使之能够分析数据、归纳规律、总结经验，代替人类学习或“经验”累积过程，将人类从纷繁复杂的数据海洋中解放出来。

②**大数据智能诊断**可理解为：利用大数据识别机械设备健康状态的科学，即以**传感器系统获取数据**为基础、**机器学习积累经验知识**为途径、**智能判别设备健康状态**为目的，保障机械设备运行的可靠性。

大数据智能诊断示意图：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 机械监测大数据 | 机器学习 | 故障智能识别 |
| 传感器系统 | Machine learn | 故障位置：内圈  故障类型：磨损  故障程度：严重 |

（3）大数据智能诊断的基本问题

①**智能诊断模型的输入**为机械设备监测数据的样本；**输出**为一系列离散值。

②通过对训练样本进行学习，建立特征空间到标签空间的非线性映射关系f(x)

即智能诊断模型训练。

③将训练完成的智能诊断模型，用于预测健康状态未知时采集的样本（测试样本）的标签，即实现故障智能诊断。

**三：基于浅层模型的智能诊断**

1. 基于浅层模型的智能诊断

①基于浅层模型的智能诊断流程

A 特征提取：机械设备的检测信号中虽然蕴含了设备的健康状态信息，需要凭借统计分析手段，如时域分析、频域分析、时频分析等，提取信号的数字特征，发现特征量的变化规律，表征设备的健康状态。

|  |  |
| --- | --- |
| 高质量数据库 | 特征提取 |
| 振动  声发射  温度  …… | 时域分析  频域分析  时频分析  …… |

B 特征优选：大数据下机械设备的监测数据体量大、价值密度低，提取的大量数据特征中存在不相关或冗余信息，因此，需要借助特征选择技术，剔除冗余或不相关特征，避免“维数灾难”，提高智能诊断效率，达到去粗取精的目的。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 高质量数据库 | 特征提取 | 特征优选 |
| 振动  声发射  温度  …… | 时域分析  频域分析  时频分析  …… | 主成分分析  特征评估  信息熵  …… |

C 故障分类：优选得到的敏感特征隐含机械设备不同的健康信息，需要结合浅层模型，**建立敏感特征与机械设备健康状态之间的非线性映射关系**，获得智能诊断模型，最终高效、自动地识别机械设备的健康状态。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 高质量数据库 | 特征提取 | 特征优选 | 故障分类 |
| 振动  声发射  温度  …… | 时域分析  频域分析  时频分析  …… | 主成分分析  特征评估  信息熵  …… | ANFIS  NN  KNN  …… |

②自适应模糊神经网络（ANFIS）

A 模糊化层。模糊化层将输入变量模糊化，输出对应模糊集的隶属度。

B 规则层。规则层的每个节点M充当简单的乘法器，其输出代表了每条推理规则的使用度。

C 正规化层。正规化层节点N对规则层输出的各条规则的激励强度进行归一化处理。

D 解模糊层。解模糊层每个节点Fi的传递函数为线性函数，用以计算每条规则的输出。

E 输出层。输出层的节点S计算所有规则的输出之和。

③ANFIS在滚动轴承故障智能诊断中的应用

A 以电机滚动轴承为诊断对象，识别其4种健康状态：正常、外圈故障、内圈故障与滚动体故障。在电机驱动端安装加速度传感器采集轴承的振动信号。截取轴承振动信号的采样点组成检测数据样本，再由样本组建轴承故障数据集。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 健康状态 | 振动信号 | 训练样本数 | 测试样本数 | 样本标签 |
| 正常 | B1 | 50 | 50 | 1 |
| 外圈故障 | B2 | 50 | 50 | 2 |
| 内圈故障 | B3 | 50 | 50 | 3 |
| 滚动体故障 | B4 | 50 | 50 | 4 |

B 提取数据集样本的11种时域特征与13种频域特征，将这24种特征组成特征数据集。利用特征评估技术计算样本特征之间的距离，评估特征对故障的敏感度。

C 每种特征对轴承健康状态的敏感程度不一。将特征评估因子降序排列，选取特征评估因子最大的**前4种敏感特征作为智能诊断模型的输入**。

D 利用带标签训练样本的优选特征训练智能诊断模型，再识别无标签的测试样本。

E 基于ANFIS的智能诊断模型对无标签的测试样本具有较高的分类精度，测试样本中仅有极少数的样本被错误分类，测试精度达到98.5%。

**四：基于深度学习的智能诊断**

1. 基于深度学习的智能诊断利用深度学习方法，如深度置信网络、栈式自编码神经网络、卷积神经网络，逐层将初始的“底层”特征转换为“高层”特征表达。
2. 将特征提取与故障分类过程合二为一，建立“高层”特征与设备健康状态之间的非线性映射关系，获得智能诊断模型。

|  |  |
| --- | --- |
| 高质量数据库 | 特征表达及故障分类 |
| 振动  声发射  温度  …… | 深度置信网络  栈式自编码网络  卷积神经网络  …… |

1. 栈式自编码器（SAE）

栈式自编码机（SAE）在行星齿轮箱故障智能诊断中的应用。

以两级行星齿轮箱为诊断对象，应用SAE识别其**8种健康状态**。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 健康状态 | 样本个数 | 工况数 | 样本标签 |
| 正常 | 1888 | 8 | 1 |
| 第一级太阳轮点蚀 | 1888 | 8 | 2 |
| 第一级太阳轮齿根裂纹 | 1888 | 8 | 3 |
| 第一级行星轮齿根裂纹 | 1888 | 8 | 4 |
| 第一级行星轮剥落 | 1888 | 8 | 5 |
| 第一级行星轮轴承裂纹 | 1888 | 8 | 6 |
| 第二级太阳轮剥落 | 1888 | 8 | 7 |
| 第二级太阳轮缺齿 | 1888 | 8 | 8 |

智能诊断模型对测试样本的分类精度大于99%。

**五：新一代人工智能概述**

1. 人工智能定义

①人工智能（Artificial intelligence, AI）在1956年就已经提出。

关于知识的学科，即如何表示知识、获得并使用知识的科学。研究对象是人类智能活动规律；依赖工具是计算机等具有类人智能的人工系统；目的利用计算机软硬件模拟人类某些智能行为的基本原理、方向和技术。

②人工智能就是研究如何使计算机去做过去只有人才能做的智能工作。

③当前大数据、感知融合和深度强化学习等技术的发展，促使人工智能迈向人工智能2.0，即新一代人工智能。人工智能2.0定义：基于重大变化信息新环境和发展新目标新一代人工智能。

1. 新一代人工智能发展意义

重大装备故障诊断方法普遍存在受到结构复杂、信号微弱等因素影响导致其精度与准确性不高的问题。

新一代人工智能技术在**特征挖掘、知识学习与智能程度所表现出显著优势**，为智能诊断运维提供了新途径。

1. 深度神经网络

①卷积神经网络

②深度置信网络

③堆栈自编码网络

④循环神经网络

（4）迁移学习