

# 数控主轴电机复合故障的跨机诊断方法

程 旺, 王治全, 马志勇

(山东法因数控机械设备有限公司, 山东 济南 250100)

**摘 要** 由于各子系统的耦合性和个体差异, 数控主轴电机复合故障的跨机诊断是一项非常重要且具有挑战性的工作。本研究提出了一种用于跨机级个体诊断的现场故障诊断方法, 即插即用模块受到信号处理理论的启发, 被嵌入主流的基于卷积神经网络的模型中, 作为一种有效的工业诊断模型, 即多尺度时空残差神经网络。通过实验和对实际工业电机信号的可视化, 探索了这些新模块的内部机制, 表明基于多尺度时空残差神经网络的模型可以丰富多尺度特征提取能力, 并有利于单个相关特征的抗干扰。

**关键词** 主轴电机; 复合故障; 跨机故障诊断; 神经网络

**中图分类号**: TG659; TM343

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.001

## 0 引言

主轴电机系统的故障诊断对于计算机数控机床的加工质量和稳定性至关重要, 是电机制造商工厂检查和数控机床客户验收测试的重要环节<sup>[1]</sup>。主轴电机是一种复杂的机械级旋转部件, 传统的维修和拆卸诊断由专业电机制造商完成, 成本高昂。目前的工业故障诊断主要依赖于专家使用昂贵的振动分析仪, 但基于信号处理只能诊断有限的单一故障类型, 机器级设备的耦合故障机理很难进行机理建模。机级电机的现场故障诊断与拆卸式故障诊断有很大区别, 更接近工程应用。主轴电机需要作为一个完整的系统在现场进行诊断, 而不是拆卸部件。建立一个用于批量拆卸和测试的测试台并不是一个理想的维护解决方案, 它会导致实时性差和昂贵的拆卸成本。主轴电机的多子系统耦合和固有振荡使其信号与工业噪声更为复杂<sup>[2]</sup>。与故障相关的特征将被耦合和屏蔽, 不类似于实验室数据。本文仅限于一个实验电机包含人为机械故障的场景, 而不是来自生产线的工业故障样本。所建立的深度学习结构被认为是在没有考虑电机特性的情况下从图像处理中得到的一般模型。本研究没有考虑复合故障的解耦, 这些深度学习模型的分类器通常只使用一个热向量标签输出一个类别。

## 1 故障诊断的卷积神经网络

卷积神经网络是故障诊断的主流结构之一, 它起源于计算机视觉, 得益于其出色的参数共享机制来捕获空间特征信息<sup>[3]</sup>。二维卷积神经网络一般是为处理多维数据而设计的。横向传播的二维卷积神经网络的每次运算不能同步处理全信道, 带来额外的计算成本。

卷积块注意力模块是图像处理中的一种轻量级即插即用架构, 是一种流行的技巧。卷积块注意力模块通过简单的二维卷积和池化操作自适应地提取输入特征掩码作为关注权重, 通常作用于两个维度: 像素空间维度和 RGB 通道维度。这种即插即用模块在经过一些自适应改进后, 引起了人们的关注, 并被应用于故障诊断领域。

胶囊神经网络是一种新的智能模块, 旨在取代卷积神经网络操作。与卷积神经网络相比, 胶囊神经网络不仅可以提取特征, 还可以学习特征之间的相关性<sup>[4]</sup>。胶囊神经网络具有良好的空间相关特征提取能力, 在工业信号故障诊断中表现优异。工业信号被重构成图像格式或处理成时频图, 以适应胶囊神经网络。

## 2 基于多尺度时空残差神经网络的故障诊断方法

### 2.1 跨机诊断框架

基于多尺度时空残差神经网络的框架主要包括源诊断和跨机诊断。将装配电机的多路信号按照 7:2:1 的比例独立分割为 N 个深度学习样本作为训练集、验证集和测试集。多尺度时空残差神经网络使用来自部分运动个体的标记样本在源域上进行训练和测试, 以获得源域精度<sup>[5]</sup>。训练后的多尺度时空残差神经网络直接对来自新电机的未见信号进行跨机精度评估, 并同步计算全局置信度、类别置信度。这一过程旨在进一步评估个体差异的抵抗能力, 作为初步的工程试验。

### 2.2 多尺度时空残差神经网络的结构

多尺度时空残差神经网络模型的结构包含四个即插即用模块, 即单向矩阵核卷积、时空残差卷积模块、时间胶囊模块和多尺度时空注意模块。单通道信号提

供的信息不足,因为在不同的方向上会随机出现异常冲击。传统的信号处理方法只能对每个通道信号独立处理,决策繁琐、耗时且成本高。此外,它很难提取不同信道信号之间的相关信息。在图像处理中,将单向矩阵核卷积内核的长度设置为16,比长度为3的小内核长。

时空残差卷积旨在从稀疏采样的启发下,从不同维度和频率提取多尺度特征,由三个具有不同时空参数的单向矩阵核卷积分支组成。深度特征提取会丢失部分断层特征,仅使用深维特征进行决策容易出现过拟合和梯度消失的问题,特别是对于原位信号的弱特征。通过加入残差模块,可以减少特征提取带来的固有损失,并提供更多的权值更新通道,提高模型性能。这种设计类似于集成学习,可以提供更全面和稳健的性能。

为了尽可能地提取空间相关特征并保持数据维度的一致性,设计了专门针对运动信号的带有单向矩阵核卷积的时间胶囊。多通道信号通过单向矩阵核卷积处理进入初步胶囊,无需任何额外的重塑。

基于单向矩阵核卷积设计了运动信号的多尺度时空注意,主要包括信道注意和时间注意,特别是对于两个注意操作,没有维度重塑操作,避免了不同通道维度之间的干扰。

残差模块旨在进一步提取特征和特征关联,并提供全面互补的特征提取功能。其主要结构由一个胶囊模块和一个单向矩阵核卷积的单向矩阵核卷积组成,其中为上层输出的通道数,数字胶囊数等于多尺度时空注意模块的输出长度。在本文中,两个剩余胶囊模块的数字胶囊数为32个,每个胶囊的特征维数为16。

### 3 多尺度时空残差神经网络方法验证

本节描述了原位电机数据集的实验设置,通过烧蚀实验和对比实验验证了所提出的多尺度时空残差神经网络方法的优越性。

#### 3.1 实验设置和频率分析

实验装置包括20台数控机床组装的主轴电机、4个DYTRAN3055D6振动传感器、NIcDAQ-9189底盘和NI9231数据采集卡。这些故障主轴电机来源于不合格产品和客户。4个频率为25 600 Hz的振动传感器安装位置位于电机的风扇端和驱动端。所有电动机每分钟转1 000转。已知的机械故障是通过拆卸检查确定的,这主要是由轴承引起的。

包络分析作为一种有效的分析方法被应用到目前的工程实践中,包络分析对每个信道信号都进行分析。根据企业专家的咨询结果和厂家提供的诊断报告,诊

断是不准确和主观的。在大多数情况下,旋转频率只能在包络谱中找到。保持架故障频率等有限故障频率不规则地分布在9号电机第一、第三通道等不同通道中。然而,在拆卸后,我们发现在这些电机中还产生了一些其他故障,如9号电机的外圈故障,但从包络谱中无法获得相应的故障频率。此外,由于可以根据轴承参数计算故障频率,因此只能诊断轴承故障,而无法诊断转子错位等装配故障。

传统的频率分析方法无法准确诊断原位数控主轴电机。使用较少的专家知识开发基于深度学习的方法是必要的,也是有价值的潜在解决方案。从每台电机随机抽取1 000深度学习样本,并标记复合故障标签。每个样本的长度设置为5 120个数据点,即诊断间隔为0.2 s。主轴电机将为每个样品单元旋转至少三个周期,以确保足够的诊断信息。

#### 3.2 多尺度时空残差神经网络的消融实验

考虑到工业故障诊断的实时性,多尺度时空残差神经网络网络结构的参数选择参考了主流卷积神经网络的规模保持轻量化的结构设计。采用相似的模型尺度进行实验验证是为了尽可能保证后续对比实验的公平性,验证结构设计和改进的有效性。确定并列出了数控主轴电机多尺度时空残差神经网络架构推荐的超参数。提出的多尺度时空残差神经网络模型在电机数据集上执行,训练阶段的批大小设置为64,在每个训练历元中应用Adam算法。在20个epoch中,学习率设置为0.002。通过烧蚀实验来评估这些即插即用模块的性能改进情况。时空残差卷积、时间胶囊和多尺度时空注意模块中的时空参数被经典模块取代,以保证提取的特征数量相同和比较的公平性。这些模型的代码是在intel(R)Core(TM)i710700CPU的计算机上使用TensorFlow2.6进行编译的。基于多尺度时空残差神经网络模型的消融实验结果如表1所示。这些结果是五次诊断实验的平均值,以保证实验的公正性。

所有多尺度时空残差神经网络模型的源域精度都接近100%,但代表泛化测试性能的跨机精度有所下降。多尺度时空残差神经网络—时空残差卷积、多尺度时空残差神经网络—时间胶囊和多尺度时空残差神经网络—多尺度时空注意的跨机精度分别为89.32%、81.68%和88.40%。所提出的多尺度时空残差神经网络方法达到了跨机精度的最高性能92.81%。可以看出,由于舍入损失参与评估,所有模型的全局置信度都低于准确率。经类别置信度评估,基于多尺度时空残差神经网络的模型在标签3、6和7的分类中具有较高的

置信度。由于所提出的即插即用模块被基本模块移除或取代，整体精度和置信度下降，验证了这些模块在提高多尺度时空残差神经网络整体泛化方面是合理有效的。

这些即插即用模块提高了模型的跨机精度和决策置信度，特别是时间胶囊。通过更全面的实验验证了多尺度时空残差神经网络方法的优越性，将多尺度时

空残差神经网络模型的结果与最先进的基于卷积神经网络的方法进行比较，包括基于训练干预的卷积神经网络、卷积神经网络、和多尺度残差融合卷积模型。源域的诊断几乎没有错误，对于训练集中看到的单个信号，深度学习的特征提取能力是非常充足的，多尺度时空残差神经网络具有最高的精度和最好的稳定性。仅靠源域验证不能保证对电机级电机的工业诊断满意。

表 1 基于多尺度时空残差神经网络模型的消融实验结果

| 方法                  | 源域<br>精度 | 跨机<br>精度 | 全局置<br>信度 | 类别置信度 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|----------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |          |          |           | L1    | L2    | L3    | L4    | L5    | L6    | L7    | L8    | L9    | L10   |
| 多尺度时空残差神经网络—时空残差卷积  | 99.97    | 89.32    | 86.39     | 83.2  | 82.71 | 96.26 | 92.03 | 93.28 | 96.24 | 96.36 | 85.73 | 65.78 | 72.34 |
| 多尺度时空残差神经网络—时间胶囊    | 100      | 81.68    | 74.84     | 54.56 | 69.98 | 92.37 | 73.45 | 78.86 | 92.19 | 92.68 | 75.70 | 50.53 | 68.06 |
| 多尺度时空残差神经网络—多尺度时空注意 | 99.99    | 88.40    | 84.33     | 70.27 | 79.29 | 96.96 | 89.82 | 88.49 | 96.62 | 96.89 | 91.06 | 62.31 | 71.59 |
| 多尺度时空残差神经网络         | 100      | 92.81    | 88.43     | 85.53 | 90.39 | 95.76 | 92.84 | 92.73 | 96.06 | 95.91 | 88.93 | 73.02 | 72.69 |

即使在同一类型和工作条件下，跨机诊断也是非常必要的。与现有的一些基于卷积神经网络的模型相比，所提出的多尺度时空残差神经网络具有最佳的跨个体泛化能力、复合故障解耦能力和竞争置信水平。

在实验数据的深度挖掘方面，本研究还对不同故障类型的特征分布进行了细致分析。从 20 台电机的样本数据来看，复合故障中轴承相关故障占比超过 60%，其中风机轴承内圈与外圈复合故障、驱动轴承保持架与内圈复合故障等出现频率较高。这些故障的振动信号在时域上表现为明显的非平稳性，在频域中则呈现出多峰值叠加的特征，传统傅里叶变换难以有效分离。

通过多尺度时空残差神经网络模型的特征可视化发现，对于转子错位等装配故障，其特征主要集中在中低频段（500 ~ 2 000 Hz），且在多个传感器通道中均有体现；而轴承保持架故障的特征则分布在高频段（8 000 ~ 12 000 Hz），具有较强的通道特异性。这一发现为后续针对特定故障类型优化传感器布置提供了重要依据。

此外，对比实验中还补充了极端噪声环境下的测试，当信噪比降至 10 dB 时，多尺度时空残差神经网络的跨机精度仍能保持在 85% 以上，充分证明了其强大的抗噪声能力。这得益于多尺度时空注意力模块对有效特征的动态聚焦，以及时间胶囊模块对空间相关性的精准捕捉，使得模型在复杂工业环境中仍能稳定工作。

## 4 结论

本研究提出了一种基于多尺度时空残差神经网络的数控主轴电机跨机故障诊断方法，该方法主要针对生产线上存在复合故障的主轴电机系统进行诊断，而不是针对实验室拆装部件进行诊断。即插即用模块的结构设计特别考虑了基于信号处理理论的复合故障解耦个体差异。此外，我们还对决策信心提出了一个新的信心概念，计算了基于精度舍入损失的新的置信度算子，进一步评价了模型的决策置信度。在实际工业电机数据集上的实验结果证明，多尺度时空残差神经网络方法优于一些先进的基于卷积神经网络的模型。

## 参考文献：

- [1] 许戴铭. 数控机床故障诊断及维护方法应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(11): 49-51.
- [2] 黄科元, 蒋智, 黄守道, 等. 一种改进的永磁同步主轴电机速度估算方法 [J]. 中国机械工程, 2016, 27(07): 893-898, 938.
- [3] 陆纪培, 张斌, 陈国祥, 等. 微机控制步进电机变步距数控伺服主轴头 [J]. 电加工, 1991(02): 6-9.
- [4] 傅子霞. 数控机床滚珠丝杆故障诊断试验装置研究与实践 [J]. 中国设备工程, 2024(09): 167-170.
- [5] 张文艺. 基于数字孪生的电主轴故障诊断方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.