尊敬的评审专家：

您好！感谢您对本人的硕士毕业论文提出的宝贵修改意见，这些意见对于提升本论文的学术水平和质量有着很大的帮助，因此，本人在第一时间内对这些修改意见进行了阅读，并按照修改意见逐条对论文进行了认真细致地修改，以下为每条意见的详细修改说明，请您审阅。

（1）实验对比算法陈旧，也未给出算法的出处。无法体现作者构建的两种算法的优势。

修改说明：此意见修改内容体现在本文3.5.1节、3.5.2节、4.5.1节、4.5.2节中，以下为详细的修改内容：

1. 在异常检测算法MTAD-TSD的对比实验中，本文在原文已有的对比算法基础上新增了五种近年来发表在顶会上的算法（文中3.5.1节，P40-P41），并在原有实验设置条件下对比了新增算法与MTAD-TSD的实验结果（文中3.5.2节，P42-P44），新增对比算法包括：

FEDformer（Zhou T, Ma Z, Wen Q, et al. Fedformer: Frequency enhanced decomposed transformer for long-term series forecasting[C]//International Conference on Machine Learning, PMLR, 2022: 27268-27286.）

TimesNet（Wu H, Hu T, Liu Y, et al. TimesNet: Temporal 2D-Variation Modeling for General Time Series Analysis[C]//Proceedings of The 11th International Conference on Learning Representations, 2023: 1-23.）

Graph-MoE（Huang X, Chen W, Hu B, et al. Graph mixture of experts and memory-augmented routers for multivariate time series anomaly detection[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2025, 39(16): 17476-17484.）

ModernTCN（Luo D, Wang X. Moderntcn: A modern pure convolution structure for general time series analysis[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Learning Representations, 2024: 1-43.）

iTransformer（Liu Y, Hu T, Zhang H, et al. iTransformer: Inverted Transformers Are Effective for Time Series Forecasting[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Learning Representations, 2024: 1-25.）

2. 在异常预测算法MTAP-DM的对比实验中，本文在原文已有的对比算法基础上新增了三种近年来发表在顶会上的算法，（文中4.5.1节，P61-P62），并在原有实验设置条件下对比了新增算法与MTAP-DM的实验结果（文中4.5.2节,P62-P64），新增对比算法包括：

DCdetector（Yang Y, Zhang C, Zhou T, et al. Dcdetector: Dual attention contrastive representation learning for time series anomaly detection[C]//Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2023: 3033-3045.）

CAE-Ensemble（Campos D, Kieu T, Guo C, et al. Unsupervised Time Series Outlier Detection with Diversity-Driven Convolutional Ensembles[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2021, 15(3): 611-623.）

TranAD（Tuli S, Casale G, Jennings N R. TranAD: deep transformer networks for anomaly detection in multivariate time series data[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2022, 15(6): 1201-1214.）

3. 本文在文中给出了所有对比算法的出处，同时也给出了实验所使用公开数据集的出处（文中3.5.1节和4.5.1节）。

（2）有些信息可不用表格给出，如表4-1，4-2，浪费空间。

修改说明：此意见修改内容体现在本文3.5.1节、4.5.1节中，以下为详细的修改内容：

1. 删除原文中的表3-1“实验软硬件环境设置”、表3-2“实验参数设置”，并改用文字描述原表格内容（文中3.5.1节，P39-P40）。

2. 删除原文中的表4-1“实验软硬件环境设置”、表4-2“实验参数设置”，并改用文字描述原表格内容（文中4.5.1节，P61）。

（3）文中所有的图应尽量用中文标记。文章中还有很多图来自其他论文，虽然有引用，但是依然有版权问题。

修改说明：文中所有图片已尽量改用中文标记；同时删除原文中引用的图片，改为重新绘制；在原文图片的基础上新增了部分图片，以增加文章内容的直观表达能力。以下为详细的修改内容：

1. 文中所有图片已尽量改用中文标记，涉及的图片包括：图2-6“多层感知机结构示意”（P21），图3-1“MTAD-TSD整体结构”（P29），图3-3“单变量注意力机制”（P31），图3-4“时间序列片段划分”（P32），图3-5“基于单变量注意力Uaformer网络”（P34），图4-1“MTAP-DM整体结构”（P55）。

2. 原文中引用的图片已改为重新绘制，涉及的图片包括：图2-1“时间序列点异常”（P18），图2-2“时间序列条件异常”（P19），图2-3“时间序列集体异常”（P19），图2-4“时间序列异常检测”（P20），图2-5“时间序列异常预测”（P20），图2-7“注意力机制”（P22），图2-8“Transformer模型结构”（P22），图2-9“图神经网络结构示意”（P23）。

3. 本文新增了部分图片以增强文章内容的直观表达能力，涉及的图片包括：图1-2“港口设备传感器数量”（P11），图1-3“岸桥不同传感器数据变化示意”（P12），图1-4“不同工况下岸桥传感器相关系数”（P12），图1-5“岸桥张力传感器数据局部变化示意”（P13），图1-6“自动导引车齿轮振动信号时域及频域图”（P13），图2-10“使用傅里叶变换提取原始信号中不同频率成分”（P24），图3-6“基于局部图结构动态构建的空间维度特征学习”（P35），图3-7“局部动态图结构构建”（P35），图3-8“基于双向交叉注意力进行时空特征融合”（P37），图3-9“MTAD-TSD在各个测试集上的异常检测数据”（P44），图3-10“不同数据集上Uaformer网络层数量对模型性能的影响”（P47），图3-11“不同数据集上Uaformer时间序列片段大小对模型性能的影响”（P48），图3-12“不同数据集上局部图结构时间序列片段大小对模型性能的影响”（P48），图4-2“主导周期掩码序列生成模块示意”（P56），图4-4“MTAP-DM在各个测试集上的异常预测结果”（P64），图4-5“不同数据集上历史时间窗口对模型性能的影响”（P67），图4-6“不同数据集上预测时间窗口对模型性能的影响”（P68），图4-7“不同数据集上时间序列尺度组合对模型性能的影响”（P68）。

（4）第一章中对异常检测和预测的现状综述严重不平衡，预测方面的综述太简单。

修改说明：在第一章中增加了时间序列异常预测的研究综述内容，并且由于现有时间序列异常预测的研究较为缺乏，本文对与异常预测研究内容相近另外两个研究内容也进行了综述，分别是时间序列预测和时间序列极端稀有事件预测，同时也对原文时间序列异常检测的研究综述进行了部分修改。以下为详细的修改内容：

1. 本文在1.2.2节中对时间序列异常预测研究现状进行了综述，并总结了现有方法存在的问题，同时对时间序列预测和时间序列极端稀有事件预测的研究现状进行了综述，并分析了这两个研究方向与时间序列异常预测研究之间的联系，详细内容可见本文P8-P11。

2. 在1.2.1节中对原文关于时间序列异常监测研究现状的综述内容进行了部分补充修改，包括总结了不同研究方法的局限性，如“卷积神经网络因为其卷积操作具有固定的感受野而难以有效建模时间序列的长时间依赖关系，而通过叠加大量卷积层或使用膨胀卷积来扩大卷积感受野的方法会增加模型复杂度和训练难度。”、“基于Transformer模型的异常检测方法主要针对时间序列的时间维度进行建模分析，未考虑多维时间序列中不同变量维度之间的空间相关性对异常检测的重要性，并且Transformer模型将单个数据点作为token进行输入训练的方法无法有效捕捉时间序列的局部特征，其内部的全局注意力机制在处理多维时间序列时会对所有变量维度统一进行混合模式的学习，无法准确学习到各个变量内部的异质性特征。”、“然而现有大多数基于图神经网络的时间序列分析方法在构建多维时间序列图结构时普遍采用基于先验知识手动定义或者计算静态邻接矩阵构建节点之间的静态图结构，这个静态图结构在模型的整个训练和测试过程中保持不变，忽略了在实际系统中不同时序变量之间的关联关系会随着时间动态变化的特性，无法充分学习到多维时间序列的动态空间结构特征。”等内容；同时细化了部分研究方法的原理描述，如“TranAD是一种基于Transformer模型和生成式对抗网络的时间序列异常检测模型，其通过对输入序列施加多种变换来生成具有不同时间特性的增强样本，并且通过引入生成式对抗网络学习时间序列更鲁棒的特征表示，其结合局部和全局时间依赖关系来捕捉不同时间尺度上的异常，联合优化重构误差和对抗损失，有效提升了模型异常检测性能”、“Anomaly Transformer基于自注意力机制提出了异常注意力机制，对每个数据点同时建模两种关联关系：基于可学习高斯核函数构建的先验关联关系，用于刻画时间点之间的局部邻接偏好；基于传统自注意力机制计算的序列关联关系，用于捕捉全局依赖结构，并且设计了一种极小极大化的联合优化方法，用来放大异常数据和正常数据之间的关联差异，从而构建出一种基于关联差异的异常检测方法”等。此部分修改内容详见本文P3-P8。

（5）文中出现大量“我们”，建议用本文，本章等替代。

修改说明：将原文中的“我们”对应替换成了“本文”、“本章”或“本工作”等词语。以下为详细的修改内容：

1. 原文3.1.3节中的内容“具体实现方面，我们希望通过引入一种多维时间序列图结构自动学习机制来构建可供图神经网络学习的图结构…”，改为“本工作希望设计一种图结构动态学习机制，用于实现多维时间序列图结构的动态构建…”；原文3.2节中的内容“在该框架中，我们同时从多维时间序列的时间维度和空间维度分别进行特征学习…”，改为“MTAD-TSD能够同时从时间维度和空间维度对多维时间序列进行特征学习…”；原文3.2节中的内容“具体来说，我们基于传统Transformer模型原有的点积注意力机制…”改为“MTAD-TSD在Transformer原始的全局注意力基础上进行改进，提出了单变量注意力机制UA…”；原文3.2节中的内容“另外在对多维时间序列进行空间维度特征提取方面，我们设计了一种多维时间序列图结构自动学习机制…”改为“MTAD-TSD设计了一种基于局部图结构动态构建的图结构动态学习方法，实现对变量间空间关联结构的动态构建…”；原文3.4.2节中的内容“为了有效学习多维时间序列时间维度特征，我们使用能够有效提取时间序列中长时间依赖关系的Transformer模型作为骨干网络…”改为“为了能够有效学习多维时间序列的时间维度特征，MTAD-TSD使用能够有效建模时间序列中长时间依赖关系的Transformer模型作为骨干网络…”；原文3.5.1.5节中的内容“在本章的实验中我们选择最优的F1分数来评价模型的性能…”改为“本实验选择在多次实验结果中最优的F1分数作为实验结果来评价模型性能…”；原文3.5.2节中的内容“我们将每次实验中最优

的精确率、召回率、F1分数加粗表示…”改为“每次实验结果中最优和次优的精确率（%）、召回率（%）、F1分数（%）已在表格中分别被加粗和下划线标记…”。

（6）消融实验不足，无模块内部消融。

修改说明：本文对异常检测模型MTAD-TSD和异常预测模型MTAP-DM分别进行了模块间消融实验和模块内部消融实验。以下为详细的修改内容：

1. 本文在3.5.3节中对MTAD-TSD进行了消融实验，其中3.5.3.1节为模块间消融实验，消融实验对象分别是无时间维度特征学习模块、无空间维度特征学习模块、无时空特征融合模块的MTAD-TSD，消融实验结果见文中表3-3和表3-4，结果讨论见文中P44-P45。3.5.3.2节为时间维度特征学习模块内部消融实验，消融实验对象包括将单变量注意力机制改为全局注意力机制、将Time2Vec编码改为位置编码、不进行时间序列分段处理后的MTAD-TSD模型，消融实验结果见文中表3-5和表3-6，结果讨论见文中P45-P46。3.5.3.3节为空间维度特征学习模块内部消融实验，消融实验对象包括未进行局部图结构学习、未使用图注意力网络、未进行全局图结构学习后的MTAD-TSD，消融实验结果见文中表3-7和表3-8，结果讨论见文中P46-P47。

2. 本文在4.5.3节中对MTAP-DM进行了消融实验，其中4.5.3.1节为模块间消融实验，消融实验对象包括移除主导周期掩码序列生成模块、移除多尺度特征学习模块、移除异常预测模块改用基于重构序列进行异常预测后的MTAP-DM，消融实验结果见文中表4-3和表4-4，结果讨论见文中P64-P65。4.5.3.2节为主导周期掩码序列生成模块内部消融实验，消融实验对象包括不进行单变量时间序列划分、使用随机周期掩码序列替代主导周期掩码序列后的MTAP-DM，消融实验结果见文中表4-5和表4-6，结果讨论见文中P65-P66。4.5.3.3节为多尺度特征学习模块内部消融实验，消融实验对象包括不进行多尺度子序列分段、使用单一尺度编码器替代多尺度编码器后的MTAP-DM模型，消融实验结果见文中表4-7和表4-8，结果讨论见文中P66。4.5.3.4节为异常预测模块内部消融实验，消融实验对象包括移除序列重构、移除多尺度特征间相似度计算后的MTAP-DM模型，消融实验结果见文中表4-9和表4-10，结果讨论见文中P66-P67。

（7）题目中仅体现异常检测，没有体现预测。

修改说明：原文题目为“基于多维时间序列的港口设备异常监测系统”，为了体现本文在异常预测研究中做的工作，现将题目变更为“面向港口设备的多维时间序列异常检测及异常预测技术研究”。

（8）分析问题不透彻，虽然论文提出了两种算法，但是要解决的问题不够明确，尤其是作者要处理的数据的特点是什么？是哪些特点导致现有的算法不能很好地处理这些数据？

修改说明：本文在1.3节中重点分析了港口设备时序数据的特点，以及现有的时间序列异常分析方法在处理港口设备时序数据时存在的问题，并在1.4节中针对这些问题给出了对应的解决方法。以下为详细修改说明：

1. 本文在1.3.1节中分析了港口设备时序数据的特点：高维异质性、变量动态相关、局部变化模式复杂、异常前兆数据稀疏，并结合相关港口设备数据详细介绍了每种特点的表现形式，详细内容可见文中P11-P13。

2. 本文在1.3.2节中分析了现有基于深度学习的方法在对港口设备时序数据进行异常检测时存在的挑战：Transformer面向文本任务的以单个数据点作为token的处理方式无法有效学习时序的局部特征、Transformer的全局注意力机制无法准确学习到时序的异质性特征、图神经网络难以有效构建时序间的动态空间结构，并详细分析了每种研究挑战的成因，可见文中P13-P14。

3. 本文在1.3.3节中分析了现有基于深度学习的方法在对港口设备时序数据进行异常预测时存在的挑战：难以从大量正常数据中准确学习稀疏异常前兆数据特征、多类型异常前兆数据特征建模不足、缺乏异常前兆特征与异常预测结果之间的显式关联关系，并详细分析了每种研究挑战的成因，可见文中P14-P15。

4. 本文在1.4节中介绍了本文针对这些研究挑战提出的解决方法：“针对多维时间序列异常检测任务，本文设计了一种基于时空双维特征学习的多维时间序列异常检测模型MTAD-TSD，其创新点包括：1.以时间序列片段替代单个数据点作为token，丰富token的局部语义信息，实现局部特征的有效捕捉；2.设计单变量注意力机制，通过在Transformer全局注意力的基础上增加变量分离和特征拼接操作，减少变量间信息干扰，专注于变量异质性特征的学习；3. 基于时间序列片段构建局部动态图结构，充分学习变量间的动态相关性，并结合全局静态图结构和图注意力网络深度建模时序空间特征**。**”，“针对多维时间序列异常预测任务，本文设计了一种基于主导周期掩码和多尺度特征学习的多维时间序列异常预测模型MTAP-DM，其创新点包括：1.利用傅里叶变换计算时序主导周期并生成对应的主导周期掩码序列，通过掩盖主导周期包含的正常数据来增强稀疏异常前兆数据特征表达能力；2.对主导周期掩码序列进行不同时间尺度下的特征学习，充分捕捉不同类型异常前兆数据特征；3.基于多尺度特征学习结果分别进行异常前兆存在性判断和异常波动程度评估，并建立异常前兆特征与异常预测结果之间的关联关系。”，本文具体工作和创新内容可见文中P15-P16。

除了您提出的修改意见外，经过本人与导师的多次讨论以及反复斟酌后，本人对论文的其余内容也进行了细致地修改，以下为这部分修改内容的详细说明：

（1）提高论文的撰写规范性。删除了一些不必要的用词，如“本文”、“本章”等，将一些口语化的表述变为更为规范的表述。

（2）修改本文的摘要，重点突出了港口设备时序数据特点、现有方法存在的挑战、本文做出的贡献和创新，详见文中摘要。

（3）在3.4节中重新绘制了MTAD-TSD的结构图，并深入描述了各个模块的设计方法，详见文中P29-P39。

（4）在3.5.4节中增加MTAD-TSD的参数敏感性实验，重点分析Uaformer网络层数、Uaformer时间序列片段大小、局部图结构时间序列片段大小这三个参数对模型性能的影响，实验结果见图3-10、图3-11、图3-12，并对实验结果进行了分析，详见文中P47-P48。

（5）重新润色第5章内容，对港口设备异常分析系统的设计需求、设计方法、功能展示部分内容进行了扩展和梳理，详见文中P71-P76。

最后，我真诚地感谢您对本论文的悉心指导，您的宝贵意见对我在学术研究和论文写作方面的成长至关重要。我衷心希望修改后的论文能得到您的认可。祝愿您身体健康、工作顺利！

此致

敬礼！