**目 录**

[摘 要 I](#_Toc132220456)

[ABSTRACT II](#_Toc132220457)

[第一章 绪论 1](#_Toc132220458)

[1.1 研究背景 1](#_Toc132220459)

[1.2 研究现状 1](#_Toc132220460)

[1.3 本文研究意义 1](#_Toc132220461)

[1.4 本文研究内容 1](#_Toc132220462)

[1.5 本文组织结构 1](#_Toc132220462)

[1.6 本章小结 1](#_Toc132220462)

[第二章 需求分析及系统框架 2](#_Toc132220463)

[2.1 业务场景描述 2](#_Toc132220464)

[2.1.1 变压器物理结构 2](#_Toc132220464)

[2.1.2 变压器故障分析 2](#_Toc132220464)

[2.2 功能性需求分析 2](#_Toc132220465)

[2.3 非功能性需求分析 2](#_Toc132220467)

[2.4 系统架构设计 2](#_Toc132220467)

[2.5 本章小结 2](#_Toc132220467)

[第三章 工业时序数据分析预测方法实现 3](#_Toc132220468)

[3.1 基于TRANSFORMER的异常检测 3](#_Toc132220469)

[3.2 基于高斯混合模型的故障数据聚类 4](#_Toc132220470)

[3.3 基于LSTM的工业时序数据分类 5](#_Toc132220471)

[3.4 基于VARMA的工业时序数据预测 6](#_Toc132220471)

[3.5 基于时域和频域的故障数据增强算法 7](#_Toc132220471)

[3.6 本章小结 8](#_Toc132220471)

[第四章 原型展示及实验验证 9](#_Toc132220472)

[4.1 系统实现 9](#_Toc132220473)

[4.2 界面展示 9](#_Toc132220474)

[4.3 实验验证 9](#_Toc132220474)

[4.4 本章小结 9](#_Toc132220474)

[第五章 结论 10](#_Toc132220472)

[5.1 工作总结 10](#_Toc132220474)

[5.2 研究展望 10](#_Toc132220474)

[参 考 文 献 11](#_Toc132220475)

[致 谢 12](#_Toc132220478)

关注实现

不要凑字数

7个字为一查重

总结和摘要不能重复

# 需求分析及系统框架

本章主要分析工业变压器时序数据分析预测系统的需求并提出具体的系统架构设计。从变压器理论知识到相应的业务场景，进行功能性和非功能性的需求分析，设计本系统原型的框架结构。

### 2.1 业务场景描述

### 2.1.1 变压器物理结构

油浸式变压器是工业中最常见，最常用的变压器，其良好的散热效果，优异的绝缘性能和高负载能力使其备受工业厂家喜爱。油浸式变压器主要有六个组成部分：线圈，铁芯，油箱，绝缘系统，冷却系统和终端子。

表1.1 油浸式变压器组成明细表

线圈 铁芯 油箱 绝缘系统 冷却系统 终端子

低压侧线圈、 铁芯柱、 油位计、 绝缘材料、 散热器、 高压绕组终端子、

高压侧线圈 端环、 温度计、 绝缘涂层 冷却器 低压绕组终端子、

中间接头、 箱体、 接地终端子、

绕组 油泵 冷却器终端子、

温度探头终端子、

油位计终端子

变压器的线圈由高压和低压绕组构成，分别用于升压和降压。绕组由导线绕制而成，并通过隔离层和绝缘层与铁芯和油箱隔离。绕组的导线通常是由铜或铝制成，具有良好的导电性和机械性能。高压绕组和低压绕组之间通常有一些辅助线圈，用于控制变压器的电性能和安全性能。

铁芯是变压器的重要组成部分，用于增强磁路并降低磁阻。铁芯通常由多个薄片组成，每个薄片之间都有绝缘层隔开，以防止涡流损耗和磁通漏失。铁芯材料通常是硅钢片或镍铁合金，具有高导磁率和低磁滞损耗，可以有效地增强变压器的效率和性能。

油箱是存放变压器油的容器，通常由钢板制成，并且具有良好的密封性和耐腐蚀性。油箱的主要作用是存放绝缘油，并且通过自然对流或强制循环散热，以保证变压器的正常运转。油箱还可以安装一些辅助设备，如油位计、温度计、压力表等，以便监测变压器的运行状态。

绝缘系统是变压器的重要组成部分，用于保护变压器的电气性能。绝缘系统通常由多层隔离层和绝缘材料组成，以防止高压和低压绕组之间的放电和绝缘破坏。绝缘材料通常是纸板、胶木、云母等，具有良好的绝缘性能和机械强度。

冷却系统是变压器的重要组成部分，用于保持变压器的正常运行温度。油浸式变压器的冷却系统通常采用油循环冷却方式，通过油的自然对流或强制循环将热量传递给油，并通过油箱和冷却器将热量

### 2.1.2 变压器故障分析

由表1.1可以看出油浸式变压器的构成较为复杂，种类繁多，而通常发生故障的部位是绝缘系统，铁芯和冷却系统。变压器故障按照发生位置来分可以分为外部故障和内部故障，外部故障发生在变压器外部，包括铁芯，绕组等，由于这些故障发生在变压器外部，较容易被检察人员发现，并及时对故障部位进行修补，而对于内部故障，则多表现在油箱产生的气体浓度，油温或者电路数据上。

变压器的故障种类较多，产生的原因也各不相同，下面介绍几种常见的故障类型以及他们的产生原因和表现。

1. 绝缘老化

绝缘老化是油浸变压器中一种常见的问题，主要是由于变压器内部绝缘材料老化，破损或者腐蚀等原因导致绝缘性能下降。这些绝缘材料通常是有机材料，例如纸张、纤维板、绝缘漆等，它们在变压器内部隔绝高压和低压绕组，以及保护变压器内部的铁芯等部件不受损坏。当绝缘材料老化后，它们会失去原有的绝缘性能，电气设备内部的电弧、电晕、电击穿等现象就容易发生。当这些现象发生时，绝缘材料内部的有机物质就会被分解并释放出一些气体，其中包括甲烷和乙烷等。

甲烷和乙烷是绝缘材料分解产生的有机物质，它们通常都是无色无味的气体。当它们被释放到变压器内部的油中时，就会导致油中的甲烷和乙烷气体浓度升高。这些气体的存在会对油浸变压器产生一些不良的影响，例如加速油的老化、增加油的黏度、导致变压器内部部件的腐蚀等。同时，这些气体还会对工作人员的健康产生潜在的危害。

因此，在绝缘老化问题发生时，及时采取检修和更换绝缘材料等措施，可以有效地降低甲烷和乙烷气体的浓度，保障变压器的安全运行和工作环境的健康。

（2）绕组故障

绕组故障是指变压器内部绕组中发生短路或开路等异常情况，可能导致电弧和局部放电现象产生，这些异常放电过程会产生大量的热量和气体，其中主要是氢气。

绕组故障导致氢气浓度升高的原因是因为绕组中使用的绝缘材料通常是有机材料，如纸板、绝缘漆等，这些材料会随着时间的推移逐渐老化，产生气体。同时，当绕组发生短路或开路时，电流过大会导致绝缘材料的热分解，也会产生气体。

这些产生的气体包括氢气、一氧化碳、二氧化碳等，其中氢气浓度最高。氢气是一种极易燃的气体，如果氢气浓度超过一定限度，就有可能引发爆炸事故，对人员和设备造成巨大的威胁。

因此，氢气气体浓度升高是绕组故障的一个主要表现，它是变压器内部绝缘老化和电气故障的重要指标之一。对于油浸式变压器，通常采用氢气监测系统对氢气浓度进行实时监测，一旦发现氢气浓度升高，需要及时采取相应的措施，避免事故的发生。

（3）冷却故障

油浸式变压器的冷却系统是保证变压器正常运行的重要组成部分之一。冷却系统通常采用油冷却或者风冷却的方式来散热，如果冷却系统出现故障，如冷却水泄漏、风扇故障等，就会导致变压器内部的油温升高。当油的温度超过正常范围时，会导致油的老化和变质，甚至引发绝缘材料老化和损坏。当变压器内部油温升高时，油中的氧化反应加速，同时会产生气体，主要有氢气和一氧化碳。这些气体会导致变压器内部气体压力升高，并可能引发变压器内部油位异常和气体放出。当变压器内部氢气和一氧化碳气体浓度升高时，可能会达到可燃或爆炸的危险水平。如果不及时采取措施，可能会引发变压器内部火灾或爆炸等严重安全事故。

（4）过载故障

过载故障是指变压器承受超过额定负荷的电流或功率，从而导致变压器的油温升高、氢气和一氧化碳等气体浓度升高的现象。这种现象的发生主要是因为过载会导致变压器的电路、磁路和热平衡等方面出现问题，从而引发一系列反应。

当变压器过载时，其绕组会产生较大的电流，从而产生较大的磁通量，使铁芯和绕组产生磁滞和铁损。磁滞和铁损会导致铁芯的温度升高，从而使变压器的油温升高。同时，变压器的绕组电流过大，使绕组内部的铜导体受到加热，也会导致油温升高。

此外，变压器过载还会使绕组中的电能转化为热能，使绕组的温度升高。当绕组温度升高到一定程度时，会导致绝缘材料损坏，产生局部放电，释放出大量氢气、一氧化碳和各种烃类气体。

总之，过载故障会导致变压器内部的电路、磁路和热平衡等方面出现问题，引发一系列反应，导致油温升高、氢气和一氧化碳等气体浓度升高的现象。这种现象不仅会对变压器的运行产生不良影响，而且还会对人员和设备造成危害。因此，定期对变压器进行维护和检测，及时发现和处理过载故障问题，是保障变压器安全运行的重要措施。

（5）绝缘击穿

绝缘击穿在油浸变压器中是一种严重的故障现象，会导致油中的气体逸出，其中包括氢气和乙炔气体。这是因为当绝缘材料受到电压过高时，绝缘系统中的气体会被离子化，进而形成电弧放电，造成绝缘击穿。

电弧放电会导致局部温度升高，使得油中的分子发生裂解，产生大量的氢气和乙炔气体。同时，电弧放电还会使得油中的固体颗粒被加热蒸发，形成气体，进一步增加气体浓度。这些气体会随着油流进入变压器油箱，如果无法及时检测和处理，就会导致油箱内气体浓度升高。

高浓度的氢气和乙炔气体是具有爆炸性的，一旦达到一定浓度，就会形成爆炸的危险。同时，氢气还有极高的燃烧性和可燃性，一旦遇到点火源，就会燃烧爆炸，引发严重的事故。因此，对于油浸变压器中出现绝缘击穿的情况，必须及时采取措施，降低气体浓度，防止发生危险。常用的处理方法包括进行油的绝缘油处理、通风换气、添加消防泡沫等。

## 2.2 功能性需求分析

在现有的变压器运行状态分析和故障检测中，多是按照以下流程：

1. 观察外观和气味：工作人员会定期检查变压器的外观和气味，以确保变压器没有泄漏和损坏，同时观察变压器的油位是否正常，检查油箱和绝缘件的状态等。
2. 测量电气参数：工作人员会使用特殊的测试仪器测量变压器的电气参数，包括电压、电流、电阻、电容等，以检测变压器的工作状态和性能表现。
3. 做油测试：变压器油测试是检测变压器内部绝缘材料的状态的一种方法。工作人员会通过提取变压器内的油样，并使用特殊的测试仪器检测变压器油的物理和化学性质，如介电强度、含水率、酸值、颜色等，以判断绝缘材料的状态。
4. 检查绝缘材料：工作人员会定期检查变压器内部的绝缘材料，包括绝缘油纸、胶合板、绝缘管等。通过检查这些材料的状态，可以判断绝缘材料是否老化或破损。
5. 进行巡视和听音诊断：工作人员会在变压器周围进行巡视，观察变压器运行过程中是否有异常现象。同时，工作人员会使用听音器等设备，通过听声诊断的方式检测变压器内部的故障声音，以发现变压器的故障问题。

（图）

以上方法通过人工手段来检测油浸式变压器的运行状况和排查故障，存在以下问题：

1. 时间消耗：人工分析需要花费大量的时间来收集和处理变压器的数据，并分析故障的根本原因，这会耗费工作人员的精力和时间。
2. 数据量限制：人工分析所使用的数据量往往较小，难以覆盖变压器的全面运行状况，难以捕捉细微的变化和故障。
3. 精度受限：人工分析过程中，不同的工作人员可能会产生不同的结论和判断，这可能会导致结果的不准确性。
4. 无法实时监测：人工分析无法实时监测变压器的运行状态，难以对发生的故障做出及时响应。
5. 无法预测：人工分析只能对历史数据进行分析，无法进行预测和预警，难以避免潜在的故障和损害。
6. 不可持续性：人工分析的方法需要依赖工作人员的经验和技能，难以保证在员工流动性高的情况下，分析结果的持续性和准确性。
7. 故障数据稀少：实际工业场景中发生故障的概率很小，真实的故障数据样本稀少。

为了解决以上问题，对于工业时序数据分析预测系统有以下功能性需求：

1. 分析和故障诊断：系统需要能够对变压器的运行状态进行分析，并对可能存在的故障进行诊断，以便快速修复故障，保证变压器的正常运行。
2. 预测和预警：系统需要具备预测和预警功能，能够对变压器的运行状态进行预测，能够对未来可能存在的故障进行预警，并及时向维护人员发出预警信息。
3. 可视化展示：系统需要能够以图表、报表等形式清晰地展示变压器的运行状况，让维护人员能够直观地了解变压器的运行情况。
4. 数据存储：系统需要能够安全地存储变压器的各种数据，以确保数据的完整性和可用性。
5. 故障数据增强：系统需要能够对故障数据进行增强，以更好地训练模型，提高分析的效果。

## 2.3 非功能性需求分析

根据实际工业场景，对于工业时序数据分析系统的非功能性需求则主要关注运行状态分析的效率，用户使用的友好性和系统功能的可扩展性。

首先，运行状态分析的效率是指系统分析和处理工业时序数据的速度和效率。工业时序数据通常是大量、复杂的，需要对数据进行处理和分析。因此，系统需要具备高效的算法和模型，能够快速准确地对数据进行分析，提高系统的响应速度和运行效率。

其次，用户使用的友好性是指系统的界面和操作是否易于使用和理解。工业时序数据分析系统的用户通常是技术人员和工程师，需要进行专业的数据分析和处理。因此，系统需要提供清晰、简洁、易懂的界面和操作，方便用户使用，减少学习和使用成本，提高用户的工作效率。

最后，系统功能的可扩展性是指系统能否随着业务需求的变化而进行扩展和升级。工业时序数据分析系统需要具备高度的可扩展性，能够随着工业生产的发展和变化而进行适应和调整。例如，可以通过增加新的数据处理模型以支持新的功能等。

## 2.4 系统架构设计

基于以上功能性需求和非功能性需求，本课题设计的工业时序数据分析预测系统具有以下功能：

1. 工业时序数据分析功能

系统能够对真实变压器时序数据进行处理，并对其进行异常检测，判断变压器的运行状态。对于油浸式变压器，其运行状态和可能出现的故障类型基本均能反映在油气数据和线圈数据上，本课题设计的系统主要针对油浸式变压器的油气数据和线圈数据实现分析功能，对其进行异常检测以及故障诊断。

1. 工业时序数据预测功能

系统能够对变压器时序数据进行预测，判断变压器在未来一段时间内的运行状态并进行故障分析。

1. 故障数据增强功能

系统能够通过分析故障数据的特征信息，对少量的故障样本进行增强以扩充故障样本数据集，以更好地进行模型训练。

（图）

同时考虑到系统处理的高效性，友好性和可扩展性，系统具有能够对不同的功能模型进行参数选择和设置参数重训等功能，还可以支持上传新的数据处理模型以使系统支持新的功能。

## 2.5 本章小结

本章内容主要分析了原型系统所涉及的业务场景中油浸式变压器的物理结构和故障类型，基于真实的业务场景提出了原型系统应具有的功能性需求以及非功能性需求，在保证满足工业时序数据分析预测功能的前提下实现高效率数据处理能力和更友好的用户体验，以及提高系统的可扩展性，基于这些需求的剖析，本章提出了原型系统的架构设计和整体框架。

# 工业时序数据分析预测方法实现

本章依次介绍了原型系统中的算法模型，包括基于Transformer的油浸式变压器油气时序数据异常检测模型，基于高斯混合模型的变压器油气故障时序数据聚类模型，基于LSTM的变压器线圈时序数据分类模型，基于VARMA的变压器时序数据预测模型和基于时域和频域的变压器时序故障数据增强模型，本章主要介绍了各个模型的底层实现原理，超参数，模型输入数据参量等信息。

## 3.1 基于TRANSFORMER的异常检测

## 3.1.1 Transformer模型介绍

Transformer模型是一种在自然语言处理任务中表现出色的神经网络模型，最初被提出用于机器翻译任务。在传统的循环神经网络（RNN）模型中，输入序列是按照时间顺序逐步输入的，因此会出现梯度消失或梯度爆炸等问题。相比于之前的RNN模型，Transformer模型使用了self-attention机制，它允许模型在编码和解码阶段同时关注输入序列中的所有单词，并计算每个单词的权重，从而更好地捕捉单词之间的关系。同时，由于self-attention机制并不需要按照时间顺序逐步处理输入序列，因此可以并行化处理输入，大大提高了模型的训练效率。

具体来说，对于每个输入单词，Transformer模型使用self-attention机制计算出与其相关的单词，然后将这些相关单词的表示加权求和作为当前单词的表示。这样做的好处是可以更好地捕捉长距离依赖关系，同时避免了RNN模型中梯度消失和梯度爆炸等问题。此外，Transformer模型还可以进行多头self-attention，即在不同的维度上计算多个self-attention结果，并将这些结果拼接在一起作为最终结果，从而进一步提高模型的表示能力。

在Transformer模型中，除了self-attention机制之外，还使用了残差连接和层归一化等技术，可以加速模型的训练并提高模型的准确性。此外，Transformer模型还可以通过堆叠多个Transformer编码器或解码器来构建更深层次的模型，从而进一步提高模型的性能。

本课题实现的基于transformer的异常检测模型包括一个位置编码器（PositionalEncoding），一个序列编码器（TransformerEncoder），两个解码器（TransformerDecoder）以及一个全连接神经网络。

位置编码器（PositionalEncoding）

位置编码器是用来在输入序列中加入位置信息的，它将位置信息以一定的方式编码成一个向量，然后与输入向量相加，从而将位置信息与词向量融合在一起，进一步增强了输入序列的表征能力。在 Transformer 中，由于使用了 Self-Attention 机制，位置编码器的作用非常重要，它使得输入序列中每个位置的词向量都能够被准确地区分和处理。

位置编码器具有以下超参数

d\_model：表示输入和输出向量的维度大小。

dropout：dropout层的dropout概率。

max\_len：序列的最大长度。

alpha和beta：两个可学习参数，用于生成位置编码向量。

lr\_scheduler：自适应学习率调整器，用于调整alpha和beta的学习率。