

T/CAMETA

团 体 标 准

T/CAMETA XXXX-202X

35kV-500kV 电力变压器剩余寿命预测方法

Methods for Predicting the Remaining Service Life of 35kV-500kV Power Transformers

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国机电一体化技术应用协会

发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基于人工智能的变压器寿命预测方法 2

5 基于设备折旧的变压器寿命预测方法 5

6 基于综合指征的变压器寿命预测方法 6

7 安全性与隐私保护 6

附录 A（资料性） 数据处理流程 8

参考文献 15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广东电网有限责任公司电力科学研究院提出。

本文件由中国机电一体化技术应用协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

35kV-500kV 电力变压器剩余寿命预测方法

1 范围

本文件规定了35kV-500kV电力变压器剩余寿命预测的方法选择、技术要求及实施流程。
本文件适用于 35kV-500kV 电力变压器制造、保险、资产管理、运行风险预防领域。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

IEC 63270-1:2025 Predictive maintenance of industrial automation equipment and systems
- Part 1: General requirements

GB/T 1094.1 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 36572 电力监控系统网络安全防护导则

DL/T 572 电力变压器运行规程

发改价格规〔2019〕897号 国家发展改革委 国家能源局关于印发《输配电定价成本监审办法》的通知

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

变压器 transformers

一种静止电气装置，具有两个或两个以上绕组，通过电磁感应原理，在相同频率下将一种电压—电流系统变换为另一种电压—电流系统，以实现电能的传输与转换。

3.2

设备寿命 equipment life

指从设备投入使用直至其不再具备经济或技术上的使用价值这一时间段，通常分为自然寿命、技术寿命和经济寿命三个概念。

3.3

设备寿命预测 equipment life prediction

基于设备的运行数据、历史报废记录、历史维护数据和环境因素等，利用人工智能法、成本折旧法、综合指数法方法预测设备剩余使用寿命。

3.4

CatBoost

一种先进的梯度提升决策树算法，由 Yandex 开发，特别适用于处理分类特征和处理缺失值，具有高精度和鲁棒性。

3.5

Transformer

一种基于自注意力机制的深度学习模型架构，彻底摆脱了传统的循环神经网络结构，能够并行处理序列数据并高效捕捉长距离依赖关系，已成为当今大语言模型和诸多序列处理任务的核心基础。

3.6

MSE（均方误差） mean-square error

一种常用的模型评估指标，衡量预测值与真实值之间差异的平方的平均值，MSE 越小，表示模型的预测精度越高。

3.7

决定系数 (R^2) coefficient of determination

也称为拟合优度，衡量模型对目标变量波动的解释能力，其值越接近 1 表示模型拟合效果越好。

3.8

交叉验证 cross-validation

一种统计学方法，通过将数据集分成 k 个子集，轮流将其中一个子集作为测试集，其余作为训练集，重复 k 次，最终取平均值作为模型性能的评估结果。

3.9

特征工程 feature Engineering

从原始数据中提取、转换和构造有助于模型学习和预测的特征的过程。

3.10

过拟合 overfitting

指模型在训练数据上表现很好，但在未见过的数据上表现较差。

3.11

欠拟合 underfitting

指模型在训练数据和未见过的数据上都表现不佳，通常由于模型过于简单或特征不足。

3.12

健康指数 health index

一个综合反映变压器整体健康状态的量化分数，通过对多源异构状态监测指标进行清洗、归一化和加权计算而得。

3.13

剩余寿命 remaining service life

设备从当前状态运行至其寿命终止（达到经济或技术寿命终点）的预期剩余时间。

3.14

特征选择 feature selection

从所有特征中筛选出对预测目标有显著影响的特征子集，以简化模型并提高性能。

3.15

置信区间 confidence interval

对预测结果不确定性的一种度量，表示在给定置信水平下，真实值可能落入的数值范围。

4 基于人工智能的变压器寿命预测方法

4.1 数据处理流程

电网关键设备残余寿命预测的数据处理流程包括数据采集、预处理、特征工程、模型训练与评估、模型部署与维护等环节。总体流程如附录 A.1 所示。

4.2 数据准备的要求

4.2.1 数据来源

主要包括台账数据、在线监测数据、缺陷记录、告警数据、反措数据和试验报告数据、退役鉴定报告等。其中台账信息、在线监测数据、缺陷数据、告警数据、试验报告数据为必须项，反措数据、退役鉴定报告为可选项。具体数据字段可见附录 A.2。

4.2.2 非结构化数据处理

对于 PDF、Word、图片等非结构化数据，采用信息智能识别技术提取文本信息。提取后的文本需进行结构化处理，并根据阈值规则处理后作为寿命预测模型的输入数据。以下为不同格式的处理方法：

- a) PDF 格式：直接采用信息智能识别技术提取文本信息；
- b) 图片格式：直接采用信息智能识别技术提取文本信息；
- c) Word 格式：把文档转为 PDF 格式，再采用信息智能识别技术提取文本信息；
- d) 其他格式：把文档转为 PDF 格式，再采用信息智能识别技术提取文本信息。

4.3 特征处理

4.3.1 特征选择

剔除无统计意义的字段，保留与设备寿命显著相关的特征，如设备基本信息、技术参数、在线监测数据、缺陷、告警信息等。

4.3.2 特征变换

为确保模型效果与稳定性，针对不同类型的特征采用相应的变换与编码方法：

- a) 数值型特征：为消除量纲影响，采用 Z-score 标准化或 Min-Max 归一化处理；
- b) 类别型特征：优先利用算法对类别特征内置的原生支持进行处理；若不适用，则采用标签编码将其转化为数值形式；
- c) 时序特征：基于业务时间窗口，提取如滑动均值、最大值、方差等一系列统计量，以构建更具代表性的时序特征。

4.3.3 阈值规则与等级化映射

依据相关行业标准，对设备各类运行参数设定健康状态与缺陷状态的判断阈值。具体阈值规则详见附录 A.3。

4.4 模型建立与训练

4.4.1 模型选择原则

4.4.1.1 通则

在设备寿命预测任务中，模型的选择需综合考虑数据量、特征类型、预测目标的特性以及模型的适用性。常用的预测算法主要分为两大类：时序模型（如长短期记忆网络（Long Short-Term Memory, LSTM）、门控循环单元（Gated Recurrent Unit, GRU）、Transformer 等）和树模型（如梯度提升决策树（Categorical Boosting, CatBoost）、极限梯度提升（eXtreme Gradient Boosting, XGBoost）、随机森林（Random Forest）等）。

4.4.1.2 时序模型

如 LSTM、GRU 等循环神经网络，能够直接捕捉时间序列中的长期依赖关系，适用于具有强时序性的数据。然而，这类模型通常需要大量样本（通常上千条以上）才能有效训练，且对计算资源要求较高。

4.4.1.3 树模型

如 XGBoost、CatBoost 等梯度提升算法，在处理结构化数据时表现出色，尤其擅长捕捉非线性关系，对数据量要求相对较低（几十至几百条即可构建有效模型），且训练速度快、可解释性强。

4.4.2 训练流程

4.4.2.1 在模型训练阶段，首先将预处理后的主变压器数据划分为训练集、验证集和测试集，以便分别用于模型训练、参数调优和最终性能评估。

4.4.2.2 为提升模型的泛化能力与稳定性，采用交叉验证方法（如五折交叉验证），通过多次训练与验证，全面评估模型在不同数据子集上的表现。

4.4.2.3 针对模型的关键超参数（如树模型的深度、学习率等）进行系统调优，以优化模型结构并提升预测精度。

4.5 模型评估

4.5.1 常用评估指标

4.5.1.1 平均绝对误差（MAE）

MAE 是所有样本预测值与真实值之差的绝对值的平均值。它直接反映了预测误差的平均大小，数值越小表示模型预测越准确。MAE 对异常值不敏感，具有较好的鲁棒性，其量纲与预测目标相同，易于业务解释。

4.5.1.2 均方误差（MSE）

MSE 是所有样本预测值与真实值之差的平方的平均值。由于平方操作，MSE 会放大较大误差的影响，因此对异常值更为敏感。该指标常用于优化算法的损失函数，但其结果量纲是原量纲的平方，直观解释性不如 MAE。

4.5.1.3 均方根误差（RMSE）

RMSE 是 MSE 的平方根。它解决了 MSE 量纲不一致的问题，使得误差指标与预测目标回到同一量纲，更便于业务理解。与 MSE 一样，RMSE 对较大误差更为敏感，常用于衡量预测误差的严重程度。

4.5.1.4 平均绝对百分比误差（MAPE）

MAPE 是预测误差相对于真实值的百分比的平均值。它是一个相对误差指标，能够直观地以百分比形式反映预测的平均偏差程度，便于在不同量级的数据集或模型间进行比较。然而，当真实值接近或等于零时，MAPE 计算会趋于无穷大，失去意义。

4.5.1.5 决定系数（ R^2 ）

R^2 也称为拟合优度，它衡量了模型对目标变量波动的解释能力。 R^2 的取值范围通常为 0 到 1（也可能为负），其值越接近 1，说明模型对数据的拟合效果越好，能够解释的方差比例越高；值越接近 0，则表示模型性能越接近简单使用均值进行预测的基准模型。

4.5.2 选用准则

- 4.5.2.1 侧重误差的直观大小：若需直接了解预测值与真实值偏差的平均水平，且希望指标对异常值不敏感，应优先选用 MAE。
- 4.5.2.2 侧重惩罚大误差：若在业务中较大误差带来的后果远大于小误差（如故障预警），需严格避免大偏差预测，则应选用 MSE 或 RMSE。其中，RMSE 因与原始数据量纲一致，更推荐用于结果报告。
- 4.5.2.3 需要进行跨数据集或量级的比较：若需比较不同设备类型、不同单位的模型性能，使用相对误差指标 MAPE 更为合适，但需确保数据中无零值或接近零的真实值。
- 4.5.2.4 评估模型的整体解释能力：若需从全局评估模型捕捉数据波动和趋势的能力， R^2 是最佳选择。它有助于判断模型是否比简单的基准预测有显著提升。

4.6 模型部署与维护

4.6.1 部署方式

模型采用 API 服务形式部署于电网管理平台，支持实时调用与批量预测两种模式，满足不同业务场景下的推理需求。

4.6.2 维护策略

- 4.6.2.1 定期重训练机制：建议每年结合新采集数据对模型进行重新训练，确保其预测能力与业务环境变化保持一致。
- 4.6.2.2 性能衰减监测：每季度对模型进行验证评估，监控预测性能的衰减情况，及时发现潜在问题。
- 4.6.2.3 版本管理与追溯：建立完善的模型版本管理机制，详细记录每次模型更新的内容、时间及效果，便于追踪与回溯。

5 基于设备折旧的变压器寿命预测方法

5.1 设备折旧

设备折旧是指在其使用寿命内，通过系统计提折旧的方式，将其账面价值逐步转入成本费用，直至其净值接近于零的预定时间周期，其终结表示会计账面上的价值摊销完毕。

5.2 变压器折旧寿命

根据国家发展和改革委员会规定，变压器折旧年限为 16 年。其折旧额主要取决于有形损耗与无形损耗两方面因素影响：

- a) 有形损耗表现为绝缘老化、绕组变形、组件锈蚀等物理性能的逐步下降，这类损耗决定了变压器的物理寿命上限；
- b) 无形损耗则主要体现为技术迭代加速、能效标准提升、运维成本增加等因素，这些往往主导其经济寿命的终结。通常，在技术进步与成本效益的双重驱动下，变压器的经济寿命会先于其物理寿命终结。

5.3 折旧方法

变压器资产计提折旧普遍采用年限平均法，该方法将变压器的应计折旧额在其规定使用寿命内平均分摊，计算逻辑清晰且易于操作，具体计提流程如下所述，折旧流程详见图 A.3。

5.3.1 资产卡片建立与信息确认

变压器工程竣工决算后，财务部门根据决算结果建立或调整资产卡片信息，准确记录资产原值。确保卡片上关键信息准确无误，包括设备身份证编码、电压等级、设备全路径、运维部门等关键字段。若后续竣工决算调整了变压器的原值，实行“两不调”原则，不调整之前的投产日期，也不调整价值调增前已计提的折旧总额。

5.3.2 确定计提起点

折旧从变压器达到预定可使用状态的次月开始计提，即使工程尚未完成竣工决算，也应先办理暂估入账并开始计提折旧。

5.3.3 计算月折旧额

5.3.3.1 月折旧额按公式（1）、（2）、（3）进行计算。

$$\begin{aligned} \text{年折旧额} &= (\text{变压器资产原值} - \text{预计净残值} - \text{已计提的减值准备}) / \text{预计使用年限} \dots\dots\dots (1) \\ \text{预计净残值} &= \text{资产原值} \times \text{预计净残值率} \dots\dots\dots (2) \\ \text{月折旧额} &= \text{年折旧额} / 12 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

5.3.3.2 财务系统每月根据卡片信息自动计算并生成折旧凭证。

5.3.4 折旧复核与一致性检查

- 计划与财务管理部门定期核实变压器资产的折旧计提是否准确，确保“三一致”要求：
- a) 核实折旧方法、折旧年限、残值率及开始使用日期是否与计提折旧的时点保持一致；
 - b) 核对资产累计折旧金额是否与自投入使用之日起、按既定折旧方法计算的理论折旧值相符；
 - c) 并确认已计提折旧的期间、所选折旧方法是否符合资产实际使用状况及相关规定。

5.3.5 终止计提

当变压器提足折旧后，即累计折旧额达到应计折旧额，不再计提折旧，无论其是否仍在物理上继续运行。若变压器提前报废处置，则自处置当月起不再计提折旧，且不再补提。

6 基于综合指征的变压器寿命预测方法

6.1 综合指征与健康指数计算模块

本模块是系统的基础数据处理核心，负责对输入的 120 多项异构原始指标进行清洗、归一化、加权计算，最终输出一个综合反映变压器整体健康状态的量化分数——健康指数。

6.2 剩余寿命预测模块

基于设备整体全生命周期的历史生存轨迹数据，结合寿险生命表方法，计算变压器的整体寿命，结合模块一输出的健康指数，构建预测模型，推算出变压器未来的健康状态趋势和剩余使用寿命。

6.3 保险精算应用模块

本模块是系统的创新与应用核心，将模块二的设备预测生存概率转化为设备失效风险的量化指标，并据此进行保险产品的定价。

7 安全性与隐私保护

7.1 数据安全

- 7.1.1 数据处理活动需同时遵守网络安全等级保护与数据安全分类分级制度。
- 7.1.2 等级保护合规：存储和处理电力变压器寿命预测相关数据的系统，应根据业务重要性定级并备案。通常，涉及关键生产数据的系统应至少达到网络安全等级保护第三级要求，并每年开展测评。2025年起，备案证明有效期为三年，测评结论改为“符合”、“基本符合”、“不符合”三档。
- 7.1.3 数据分类分级：必须参照《能源行业数据安全管理办法（试行）（征求意见稿）》对数据进行分类分级。仅影响企业自身运营的数据一般为一般数据；若泄露可能危害经济运行或社会稳定的数据，应识别为重要数据或核心数据，并采取更严格的保护措施。
- 7.1.4 全生命周期安全：对重要数据在收集、存储、传输、使用等环节需采用加密、访问控制、审计日志等技术手段。三级系统需实现数据异地备份。

7.2 隐私保护

- 7.2.1 隐私保护需严格落实个人信息保护相关要求，并促进数据要素的合规利用。
- 7.2.2 法律遵循：严格遵守《中华人民共和国个人信息保护法》（PIPL）和《网络数据安全管理条例》。处理个人信息需获取单独同意，不得强迫、欺诈、误导用户。
- 7.2.3 脱敏与匿名化：鼓励采用数据脱敏技术。经脱敏处理后依据规范被重新识别为一般数据的，可按一般数据流通使用。对于重要数据，鼓励通过“原始数据不出域、数据可用不可见”等技术实现价值开发。
- 7.2.4 合规审计：若处理个人信息，需按照《个人信息保护合规审计管理办法》开展合规审计。处理超过 100 万人个人信息的单位，应每两年至少进行一次审计。
-

附录 A
(资料性)
数据处理流程

A.1 数据处理流程

数据处理流程详见图 A.1。

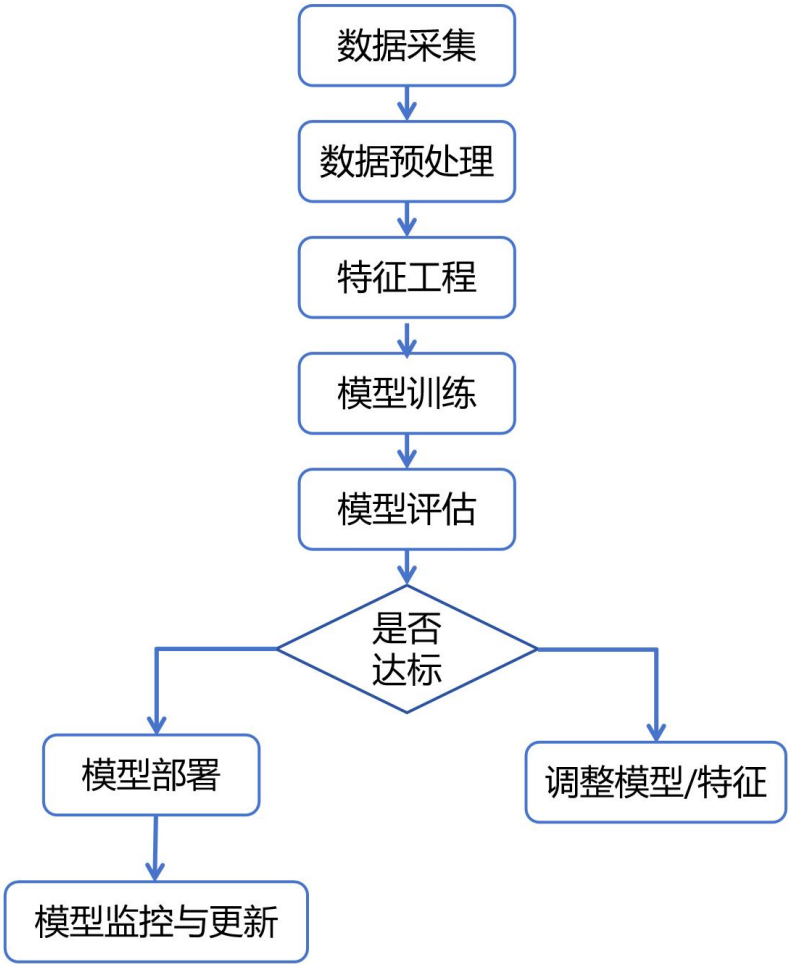


图 A.1 数据处理流程图

A.2 数据字段

具体数据字段见表 1。

表 1 数据字段表

数据类别	示例字段	说明
台账	设备型号、电压等级、额定容量、出厂厂家	静态属性，用于设备身份识别
在线监测	油温、绕温、油色谱、负载率	动态时序数据，反映设备运行状态
缺陷	缺陷等级、缺陷类型、发现时间、发生次数、发生部位	事件类数据，用于健康状态评估
告警	最早告警时间、油温是否超标、绕温是否超标、当前告警值	事件类数据，用于健康状态评估
反措	反事故措施内容、是否已完成、实际完成时间	事件类数据，用于健康状态评估
试验报告	套管绝缘电阻状态、铁芯及夹件绝缘电阻状态、绕组直流电阻状态	时序数据，反映设备运行状态
退役鉴定报告	退役前的试验结果、退役原因	事件类数据，阐述设备退役原因

A.3 折旧方法流程

折旧方法流程详见图 A.3。

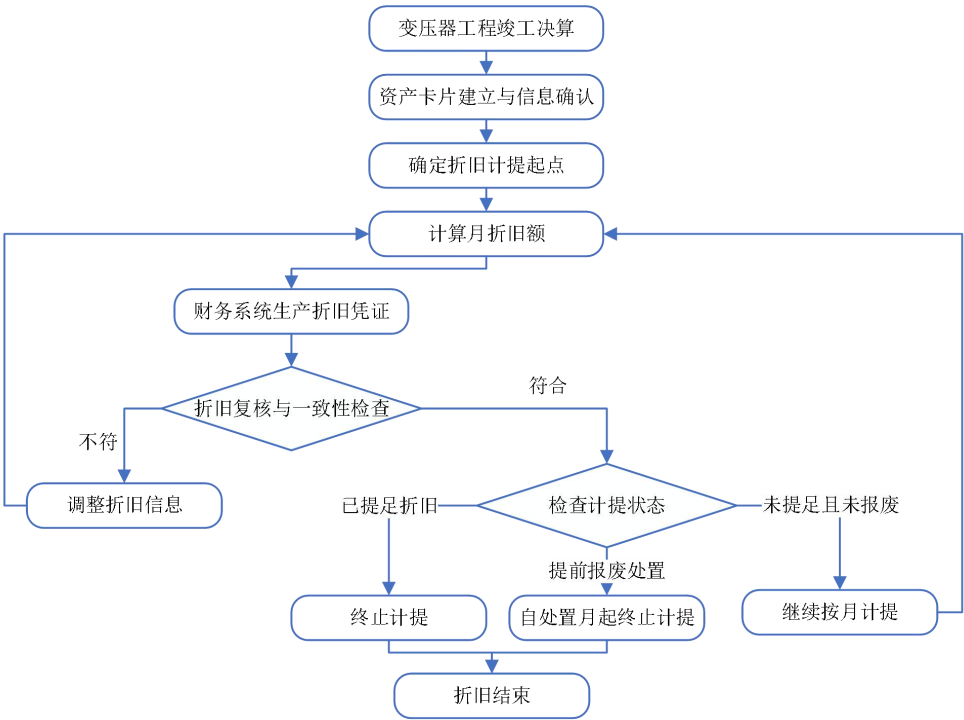


图 A.3 折旧方法流程图

A.4 阈值规则

A.4.1 本体部分

A.4.1.1 重过载情况：容量为额定容量的50%~80%则处于健康状态，小于50%则处于轻载状态，大于80%则处于过载状态。

A.4.1.2 运行电压：运行电压与额定电压偏差在 $\pm 5\%$ 以内则处于健康状态，偏差大于 $\pm 5\%$ 则处于缺陷状态。

A.4.1.3 运行电压比：电压比误差在 $\pm 0.5\%$ 以内则处于健康状态，误差大于 $\pm 0.5\%$ 则处于缺陷状态。

A.4.1.4 负载损耗：小于额定容量的2%则处于健康状态，大于额定容量的2%则处于缺陷状态。

A.4.1.5 负载电流：低于额定电流的80%则处于健康状态，高于额定电流的80%则处于缺陷状态。

A.4.1.6 油温（自然循环自冷、风冷）：最高顶层油温低于 95°C 则处于健康状态，高于 95°C 则处于缺陷状态。

A.4.1.7 油温（强迫油循环风冷）：最高顶层油温低于 85°C 则处于健康状态，高于 85°C 则处于缺陷状态。

A.4.1.8 油温（强迫油循环水冷）：最高顶层油温低于 70°C 则处于健康状态，高于 70°C 则处于缺陷状态。

A.4.1.9 绕组温度：绕组温度不超过 105°C 则处于健康状态，超过 105°C 则处于缺陷状态。

A.4.1.10 绝缘油击穿电压：

- a) 500kV 及以上：不低于 50kV 则处于健康状态，低于 50kV 则处于缺陷状态；
- b) 330kV：不低于 45kV 则处于健康状态，低于 45kV 则处于缺陷状态；
- c) 220kV：不低于 40kV 则处于健康状态，低于 40kV 则处于缺陷状态；
- d) 110kV/66kV：不低于 35kV 则处于健康状态，低于 35kV 则处于缺陷状态。

A.4.1.11 体积电阻率：

- a) 新投运（所有电压等级）：不低于 $6 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 则处于健康状态，低于此值则处于注意状态；
- b) 运行中（500kV 及以上）：不低于 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 则处于健康状态，低于此值则处于缺陷状态；
- c) 运行中（330kV 及以下）：不低于 $5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ （南网）或 $5 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ （国网，需确认适用标准）则处于健康状态，低于此值则处于缺陷状态。

A.4.1.12 微水含量（投运前）：

- a) 500kV：不超过 10mg/L 则处于健康状态，超过 10mg/L 则处于缺陷状态；
- b) 220kV：不超过 15mg/L 则处于健康状态，超过 15mg/L 则处于缺陷状态；
- c) 110kV：不超过 20mg/L 则处于健康状态，超过 20mg/L 则处于缺陷状态。

A.4.1.13 微水含量（运行中）：

- a) 500kV：不超过 15mg/L 则处于健康状态，超过 15mg/L 则处于缺陷状态；
- b) 220kV：不超过 25mg/L 则处于健康状态，超过 25mg/L 则处于缺陷状态；
- c) 110kV：不超过 35mg/L 则处于健康状态，超过 35mg/L 则处于缺陷状态。

A.4.1.14 油介损：

- a) 110~330kV：在 0~0.04 范围内则处于健康状态，低于 0 或高于 0.04 则处于缺陷状态；
- b) 500kV：在 0~0.02 范围内则处于健康状态，低于 0 或高于 0.02 则处于缺陷状态。

A.4.1.15 油中总烃含量（新投运前）：

- a) 500kV 及以上：不超过 10ppm 则处于健康状态，超过 10ppm 则处于注意状态；
- b) 220kV 及以下：不超过 20ppm 则处于健康状态，超过 20ppm 则处于注意状态。

A.4.1.16 油中乙炔含量（新投运前）：

所有电压等级：不超过 0.1ppm 则处于健康状态，超过 0.1ppm 则处于注意状态。

- A. 4. 1. 17 油中乙炔含量（运行中）：
- a) 500kV 及以上：不超过 1ppm 则处于健康状态，超过 1ppm 则处于注意状态；
 - b) 35-220kV：不超过 5ppm 则处于健康状态，超过 5ppm 则处于注意状态。
- A. 4. 1. 18 油中氢气含量（新投运前）：
- a) 500kV 及以上：不超过 10ppm 则处于健康状态，超过 10ppm 则处于注意状态；
 - b) 220kV 及以下：不超过 30ppm 则处于健康状态，超过 30ppm 则处于注意状态。
- A. 4. 1. 19 产气速率（密封式）：烃类气体总和产气速率小于12mL/d则处于健康状态，大于12mL/d则处于异常状态。
- A. 4. 1. 20 产气速率（相对）：相对产气速率小于10%/月则处于健康状态，大于10%/月则处于异常状态。
- A. 4. 1. 21 一氧化碳含量：不超过300ppm则处于健康状态，超过300ppm则处于缺陷状态。
- A. 4. 1. 22 根据变压器油中溶解特征气体通过三比值法的特定比值进行编码，以诊断其内部过热或放电故障，编码规则和故障类型判断方法如表2和表3所示。

表 2 编码规则

气体比值范围	比值范围的编码		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
<0.1	0	1	0
$\geq 0.1 \sim <1$	1	0	0
$\geq 0.1 \sim <3$	1	2	1
≥ 0.1	2	2	2

表 3 故障类型判断方法

编码组合			故障类型判断
C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
0	0	1	低温过热（低于 150℃）
	2	0	低温过热（150～300℃）
	2	1	中温过热（300～700℃）
	0, 1, 2	2	高温过热（高于 700℃）
	1	0	局部放电
2	0, 1	0, 1, 2	低能放电
	2	0, 1, 2	低能放电兼过热
1	0, 1	0, 1, 2	电弧放电
	2	0, 1, 2	电弧放电兼过热

- A. 4. 1. 23 绕组绝缘电阻：绝缘电阻不低于上一次测试值的70%则处于健康状态。
- A. 4. 1. 24 绕组变形式（频率响应法）：与初始结果或三相间结果无明显差别则处于健康状态，出现明显差别则处于缺陷状态。
- A. 4. 1. 25 空载电流测量：不超过10%则处于健康状态，超过10%则处于健康状态（注：原文逻辑需确认）。
- A. 4. 1. 26 空载损耗测量：不超过3%则处于健康状态，超过3%则处于缺陷状态。
- A. 4. 1. 27 铁心绝缘电阻（运行中）：不低于100MΩ则处于健康状态，低于100MΩ则处于缺陷状态。
- A. 4. 1. 28 铁心接地电流：在0～0.1A范围内则处于健康状态，超过0.1A则处于缺陷状态。

A. 4. 2 套管部分

- A. 4. 2. 1 总烃含量（运行中套管）：不超过150ppm则处于健康状态，超过150ppm则处于注意状态。

- A. 4. 2. 2 氢气含量（运行中套管）：不超过500ppm则处于健康状态，超过500ppm则处于注意状态。
- A. 4. 2. 3 乙炔含量（运行中套管，500kV）：
 - a) 500kV：不超过 1ppm 则处于健康状态，超过 1ppm 则处于注意状态；
 - b) 220kV 及以下：不超过 2ppm 则处于健康状态，超过 2ppm 则处于注意状态。
- A. 4. 2. 4 油中水分（投运前，500kV）：
 - a) 500kV：不超过 10mg/L 则处于健康状态，超过 10mg/L 则处于缺陷状态；
 - b) 220kV：不超过 15mg/L 则处于健康状态，超过 15mg/L 则处于缺陷状态。
- A. 4. 2. 5 110kV及以下：不超过20mg/L则处于健康状态，超过20mg/L则处于缺陷状态。
- A. 4. 2. 6 局部放电测量：局放量不大于20pC则处于健康状态，大于20pC则处于缺陷状态。

A. 4. 3 有载分接开关部分

- A. 4. 3. 1 总烃含量：
 - a) 500kV 及以上：不超过 10ppm 则处于健康状态，超过 10ppm 则处于缺陷状态；
 - b) 220kV 及以下：不超过 20ppm 则处于健康状态，超过 20ppm 则处于缺陷状态。
- A. 4. 3. 2 氢气含量：
 - a) 500kV 及以上：不超过 10ppm 则处于健康状态，超过 10ppm 则处于缺陷状态；
 - b) 220kV 及以下：不超过 30ppm 则处于健康状态，超过 30ppm 则处于缺陷状态。
- A. 4. 3. 3 乙炔含量：所有电压等级：不超过0.1ppm则处于健康状态，超过0.1ppm则处于缺陷状态。

A. 5 公式

A. 5. 1 均方误差（MSE）

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

..... (4)

A. 5. 2 平均绝对误差（MAE）

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

..... (5)

A. 5. 3 平均绝对误差（MAE）

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

..... (6)

A. 5. 4 平均绝对百分比误差（MAPE）

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

..... (7)

A. 5. 5 决定系数（R²）

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (8)$$

参 考 文 献

- [1] Liudmila Prokhorenkova, Gleb Gusev, Aleksandr Vorobev, Anna Veronika Dorogush, and Andrey Gulin. 2018. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. In Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'18). Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, 6639 – 6649.
- [2] 鹿艳锦. 金融保险精算与风险控制, 不可不知[J]. 云端, 2024, (26):117-119. DOI:CNKI:SUN:YUND. 0. 2024-26-034.
- [3] 钱林义, 李丹萍, 韩易辰, 等. 大数据背景下保险精算课程教学实践改革研究[J]. 上海保险, 2024, (03):56-57. DOI:CNKI:SUN:SHBX. 0. 2024-03-011.
- [4] 曹亮. 基于人工智能的保险精算定价模型研究[J]. 财讯, 2023, (24):165-167. DOI:CNKI:SUN:CAXU. 0. 2023-24-055.
-

团体标准《35kV-500kV 电力变压器剩余寿命预测方法》

编制说明

一、任务来源

本标准由广东电网有限责任公司电力科学研究院提出，由中国机电一体化技术应用协会归口。旨在统一行业内对包括但不限于主变压器在内的电器设备寿命预测的技术要求和评估方法，提升设备全生命周期管理水平，并为电力设备的状态检修、延寿评估和退役决策提供科学依据。计划完成时间为 2025 年 12 月。

二、标准的编制的背景

随着我国电力系统的快速发展以及智能电网建设的深入推进，主变压器作为输配电系统中的核心设备，其运行状态直接关系到电网的安全稳定运行。由于长期处于高电压、大电流、高温等复杂工况下运行，这些设备的绝缘材料会逐渐老化，导致性能下降甚至失效。

当前，国内外关于电力变压器寿命预测的方法尚未形成统一的标准体系，不同企业、研究机构采用的评估模型、参数选取、数据处理方式存在较大差异，影响了评估结果的可比性和权威性。通过引入 IEC 63270-1 的标准化术语和评估指标，本标准将建立统一的技术规范，提升预测结果在国际协作中的互认性，推动行业技术水平和标准化程度提升。在数字化转型的大背景下，大数据和人工智能技术的应用日益成熟，传统寿命预测方法依赖单一特征参数或经验公式，难以满足预测性维护对数据量和精度的要求。本标准依托 IEC 标准提出的“数据-模型-决策”协同框架，通过整合在线监测数据、历史运行数据及运维记录，构建动态演进的多维度预测模型(如融合振动、油色谱、局部放电等多源异构数据),实现对设备健康状态的动态评估与寿命的持

续优化预测。结合 IEC 标准对模型可解释性、置信度阈值的要求，本标准的实施可提升预测结果的可信度，为电力系统从定期检修向预测性维护模式 转型提供技术支撑。

同时，本标准将纳入 IEC 63270-1 提出的成本效益分析原则，为能源监管和电网资产价值核定提供量化决策依据(如基于剩余寿命置信区间的资产折旧率计算)，助力电网企业在成本管控和资产管理方面实现精细化、规范化发展。

三、标准编制的过程

(一) 任务来源

2025 年 8 月，中国机电一体化技术应用协会经调研论证，决定立项《35kV-500kV 电力变压器剩余寿命预测方法》团体标准。本协会将牵头开展团体标准的制订工作。

(二) 编制过程

1、标准起草阶段

本标准的编制在 2024 年 9 月正式启动，广东电网有限责任公司电力科学研究院等单位在中国机电一体化技术应用协会的指导下，成立标准编制工作组，确定了标准编制的工作方案，并组织起草工作组，进行标准初稿的起草。

2、征求意见阶段

2025 年 10 月，标准工作组完成意见征求稿，并挂网征询意见及定点发送各企事业单位、服务机构、相关行业专家等代表征询意见，进行意见征集。

3、专家评审阶段

四、标准编制依据、原则和主要内容

1、标准编制依据

本文件的编制符合产业发展的原则，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则以及标准的目标、统一性、协调性、适用性、一致性和规范性原则来进行本文件的编制工作。

本文件起草过程中，主要按 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》进行编写。本文件编制过程中，主要参考了以下标准或文件：

GB/T 20000.1 标准化工作指南第1部分：标准化和相关活动的通用术语

IEC 63270-1:2025 Predictive maintenance of industrial automation equipment and systems – Part 1: General requirements

GB/T 1094.1 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 36572 电力监控系统网络安全防护导则

DL/T 572 电力变压器运行规程

国家发展和改革委员会 关于印发《输配电定价成本监审办法》的通知

2、标准主要内容

- 1) 标准适用范围
- 2) 术语和定义
- 3) 预测方法
- 4) 安全性与隐私保护
- 5) 数据处理流程

五、重大意见分歧的处理依据和结果

本文件编制过程及征求意见过程，尚无重大意见分歧。

六、预期达到的社会、经济效益、对产业发展的作用等情况

通过本标准的制定与实施，可以提升设备全生命周期管理水平，并为电力设备的状态检修、延寿评估和退役决策提供科学依据。不仅能够推动电力设备状态评估技术的进步，也有助于提升我国电力系统的智能化、数字化管理水平，为电力系统从定期检修向预测性维护模式转型提供技术支撑。同时，可以为能源监管和电网资产价值核定提供量化决策依据(如基于剩余寿命置信区间的资产折旧率计算)，助力电网企业在成本管控和资产管理方面实现精细化、规范化发展。

七、贯彻标准的要求和措施建议

在标准发布后协会组织进行宣传推广，建议邀请相关政府监管部门和协会会员参与。

八、其他

无。

团体标准编制工作组

2025 年 10 月 17 日