



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

电力设备数值计算模型的可靠性评估及 不确定性量化导则

(征求意见稿)

Guidelines for Verification, Validation, and Uncertainty Quantification of
Computational Models for Electrical Apparatus

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次	I
前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号、代号和缩略语	2
5 模型可靠性评估和不确定性量化方法	2
5.1 模型可靠性评估和不确定性量化流程	2
5.2 模型可靠性评估和不确定性量化的文档规范	3
6 模型建立方法	4
6.1 建模 workflow	4
6.2 概念模型	4
6.3 数学模型	4
6.4 计算模型	4
7 数值验证方法	4
7.1 数值验证流程	4
7.2 代码验证	4
7.3 计算验证	5
8 模型确认方法	7
8.1 模型确认目的	7
8.2 物理实验要求	7
8.3 模型确认结论	7
8.4 模型修正	7
9 不确定性量化	7
9.1 不确定性量化任务	7
9.2 不确定性来源	8
9.3 不确定性量化的输入与输出	8
9.4 不确定性量化方法	8
附录 A (资料性) 电力变压器磁-力-声耦合计算模型可靠性评估和不确定性量化案例	10
参 考 文 献	14

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。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会高电压试验技术及开关设备工作组归口。

本文件起草单位：重庆大学、西安交通大学、西安西电变压器有限责任公司、保定天威保变电气股份有限公司、北京云道智造科技有限公司、北京大学、华北电力大学、清华大学、中国电力科学研究院有限公司、全球能源互联网研究院有限公司。

本文件主要起草人：杨帆，廖瑞金，王嘉玮，杜振斌，王革鹏，刘兰荣，姜慧，孔祥宇。

本文件为首次发布。

引 言

基于计算机辅助工程软件的数值仿真对电力设备的优化设计、安全运行和及时维护有着重要的理论和工程价值，是我国高端电力装备制造产业的核心竞争力体现之一。但是，数值仿真结果的可靠性高度依赖仿真人员的操作经验和具体应用场景。针对同一电力设备数值仿真需求，采用不同的仿真软件、建模方法和参数设置，易导致仿真结果呈现显著差异，难以形成一致、可复现的工程结论。通用数值仿真结果可靠性评估标准的缺乏，严重限制数值仿真结果的实际工程指导价值，也导致已有的数值仿真模型难以高效拓展至新应用场景或新仿真软件平台。

目前，国内尚无相关标准规范针对电力设备数值计算模型的可靠性评估和不确定性量化工作。为明确数值计算模型可靠性评估和不确定性量化工作的标准流程、实施方法、术语定义等，特制定本文件，为电力设备仿真人员开展系统、标准化的数值计算模型可靠性评估和不确定性量化及相关工作提供相应技术支持。

电力设备数值计算模型的可靠性评估及不确定性量化导则

1 范围

本文件界定了电力设备数值计算模型的可靠性评价和不确定性量化的术语和定义、缩略语；规定了对电力设备数值计算模型开展精度验证、实验确认和不确定性量化的导则。

本文件面向以电磁场/电路效应为核心、可能包含多物理场耦合效应的电力设备，包括但不限于变压器、电抗器、套管、气体绝缘金属封闭开关（GIS）、气体绝缘金属封闭输电线路（GIL）和换流阀等，提供基于商业软件或自主开发程序对电力设备开展数值仿真时的模型可靠性评价和不确定性量化通用方法导则。

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。

GB/T 33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则

ASME V&V 10-2019 计算固体力学中的模型验证、确认标准 [Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics]

ASME V&V 20-2009 (Reaffirmed 2021) 计算流体力学及传热学中的模型验证、确认标准（2021修订） [Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

模型 model

某个系统、现象或过程在特定物理条件下的表征。这种表征包括概念模型、数学模型和计算模型。

3.2

概念模型 conceptual model

一组描述电力设备内部物理过程的定义和假设的集合，可据此构建数学模型和验证实验。

3.3

数学模型 mathematical model

描述概念模型所需的数学概念和语言，包括控制方程、边界条件、初始条件和建模数据（体现几何结构和材料特性等）。

3.4

计算模型 computational model

数学模型的数值实现，经常体现为数学模型经过网格剖分、有限元等数值算法离散等步骤后，形成的计算机可解的代数方程组。

注：计算模型是建模过程的最终体现，题目中的数值仿真模型指的就是计算模型。

3.5

预期用途 intended use

使用计算模型的具体目的和条件。

3.6

代码 code

实施计算模型及其求解、结果后处理的计算机程序。

注：商业数值仿真软件也应视作通过用户界面封装的代码。

3.7

关键输出量 quantity of interest

计算模型的关键输出量。

注：关键输出量是根据模型预期用途选取的，例如设备绝缘校核仿真模型的关键输出量可选取为设备内部的电场强度最大值。

3.8

后验误差估计 posterior error estimation

在数值计算完成后，基于已得到的数值解对结果误差进行定量估计的方法。

3.9

网格收敛指数 grid convergence index

在给定网格上求解计算模型得到的数值解的近似绝对误差界。

3.10

数值验证 verification

评估计算模型是否精确地描述了数学模型及其解的过程。

3.11

模型确认 validation

（从预期用途的角度）评估模型是否准确描述了真实的物理过程。

3.12

可靠性评估 verification and validation

综合数值验证和模型确认的模型可靠性评价过程。

3.13

敏感度分析 sensitivity analysis

研究当模型中的变量发生改变时，模型输出指标随之发生变化的敏感程度的一种分析方法。

3.14

不确定性量化 uncertainty verification

描述仿真、实验中的所有不确定性，并量化其对仿真或实验结果的影响的过程。

4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

V&V：数值验证和模型确认相结合的模型可靠性评价过程（Verification & Validation）

UQ：不确定性量化（Uncertainty Quantification）

VVUQ：模型可靠性评估和不确定性量化（Verification, Validation, and Uncertainty Quantification）

QoI：关键输出量（Quantity of Interest）

GCI：网格收敛指数（Grid Convergence Index）

5 模型可靠性评估和不确定性量化方法

5.1 模型可靠性评估和不确定性量化流程

计算模型的可靠性评估与不确定性量化（VVUQ）包括建模仿真、模型确认和不确定性量化三个分支。建模仿真、物理实验两个分支共同完成基本的模型可靠性评估流程；不确定性量化分支为可选项，完成几何尺寸、载荷、边界条件和材料特性等存在随机性的输入条件对模型输出结果不确定性的量化评估。计算模型可靠性评估与不确定性量化的工作流程如图 1 所示。

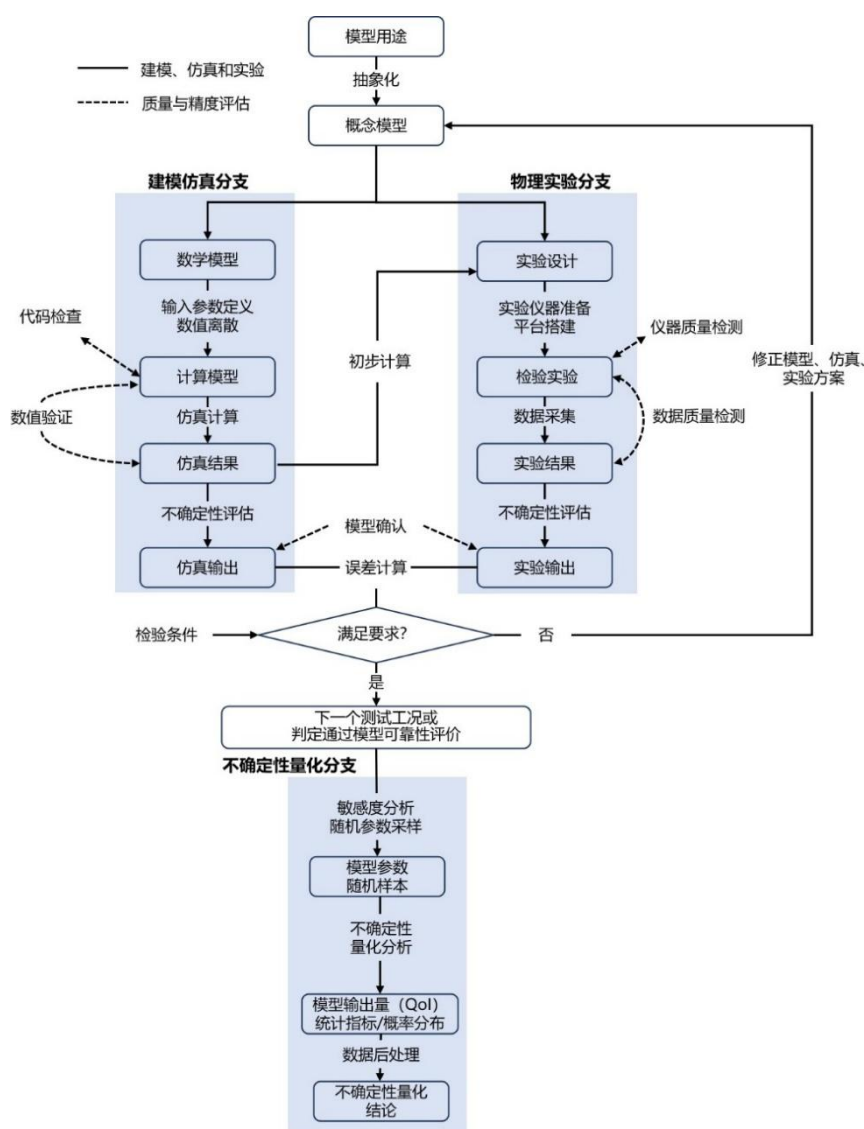


图1 模型可靠性评估与不确定性量化工作流程

5.2 模型可靠性评估和不确定性量化的文档规范

5.2.1 基本内容

计算模型可靠性评估与不确定性量化文档应包含以下内容：

- 建模仿真和物理实验的基本原理；
- 仿真和实验设置；
- 仿真和实验数据及其后处理结果；
- 模型评估结论与判定依据；
- 模型适用范围和局限性。

5.2.2 基本要求

计算模型可靠性评估与不确定性量化文档应符合以下原则：

- 完整性：包含计算模型可靠性评估与不确定性量化所有环节的全部必须材料；
- 自包含性：包含除基本知识和行业常识外的全部必要定义、公式、仿真设置、实验方法及设计等信息；
- 可重复性：文档记录的所有仿真、实验数据及后处理结果真实、可复现。

6 模型建立方法

6.1 建模 workflow

计算模型可靠性评估与不确定性量化中的建模包括概念模型、数学模型、计算模型三个层次，建模 workflow 如图 2 所示。

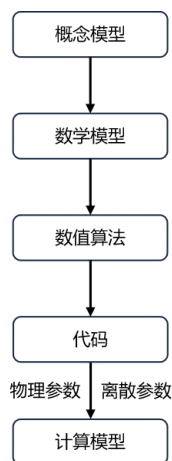


图2 建模 workflow

6.2 概念模型

概念模型是电力设备内部物理过程的理想化描述，其基本要求和特征包括：

- 根据模型预期用途，明确规定关键输出量；
- 根据模型预期用途，确定建模细节程度，忽略影响较小的物理现象并移除无关几何细节；
- 指定各分界面、边界的边界条件类型；
- 明确模型中材料特性的建模方式。

6.3 数学模型

数学模型是概念模型的数学描述，其基本要求和特征包括：

- 形式包括方程、函数和数据表（后二者常见于材料行为建模）；
- 包含物理规律、材料行为、分界面特性、边界条件和载荷的完整信息；
- 明确定义模型的输入参数；
- 根据模型预期用途、参数的物理意义和算法稳定性等限制因素，明确输入参数的允许范围。

6.4 计算模型

计算模型是数学模型经数值算法离散后得到的、输入模型参数即可输出仿真结果的模型，其基本要求和特征包括：

- 包含几何模型的离散（网格剖分）、控制方程及载荷/边界条件的离散（有限元等空间离散格式）、时间离散、求解算法；
- 求解算法的参数设置（例如时间步长、采取迭代求解方法时的容许迭代误差等）也应视作计算模型的构成要素。

7 数值验证方法

7.1 数值验证流程

数值验证方法分为代码验证和计算验证两个步骤。

7.2 代码验证

7.2.1 分类

代码验证分为以下两类：

- a) 数值代码验证 (Numerical code verification)：评估代码是否正确实施数值算法；
- b) 软件质量保证 (Software Quality Assurance, SQA)：评估代码是否存在编程错误和因软件/硬件配置环境引起的错误。

7.2.2 数值代码验证

7.2.2.1 方法

使用代码计算一些具备可靠参考解的简单模型，对比代码计算结果和参考解，判断代码是否正确实现数值算法。

7.2.2.2 参考解获取方法

用于数值代码验证的参考解有以下几种来源：

- a) 解析解：几何结构、材料特性较简单的模型，其精确解析解可作为验证的参考解；
- b) 虚构解 (Method of Manufactured Solutions, MMS)：预先指定解的分布函数作为参考解，代入数学模型反推出控制方程的激励源项和边界条件，将上述条件输入代码，对比计算结果与预设解；
- c) 基准解 (Benchmark Solutions)：行业内一些公认的经典问题（如国际计算磁学协会的 TEAM Problem），其数值解可作为数值代码验证的参考解。

7.2.2.3 辅助验证手段

数值代码验证的可选辅助判据包括：

- a) 减小网格尺寸、时间步长时，代码计算结果的收敛速度是否与算法误差理论相符；
- b) 代码计算结果是否具备预期的对称性、守恒性等。

7.2.3 软件质量保证

7.2.3.1 软件质量保证的要素包括源代码、软件架构、版本控制、硬件环境、软件环境、编译器等。

7.2.3.2 建模人员未参与代码开发、利用已有软件的情况，可跳过软件质量保证的相关检验，但应提供软件使用过程中的异常情况反馈，及时更新软件版本。

7.3 计算验证

7.3.1 概述

7.3.1.1 计算验证的目的是：在代码已经通过验证的前提下，针对计算模型，评估网格数量、时间步长、迭代容差等参数设置对数值求解是否显著影响计算精度，并估计数值求解误差。

7.3.1.2 计算验证的方法包括网格无关解和后验误差估计两类。

7.3.1.3 当验证人员不熟悉数值算法底层细节时，宜采用网格无关解方法。

7.3.1.4 当计算资源有限、无法得到收敛的网格无关解时，宜采用后验误差估计方法。

7.3.2 网格无关解

7.3.2.1 定义

网格无关解指随着网格逐步加密逐步收敛至稳定值、进一步增加网格数量变动极小的数值解，可视为数值意义上的精确解。

7.3.2.2 实施步骤

网格无关解的实施步骤如下：

- a) 定义数值解的观测指标 u （可取为模型关键输出量或全域场分布）；
- b) 设置数值解的容许波动率 δ_0 ；
- c) 生成计算模型的初始网格；
- d) 在初始网格剖分下，计算得到初始数值解观测指标 u_0 ；

- e) 将网格按照单元特征尺寸等比例缩小的规则均匀加密;
- f) 基于加密后的网格计算数值解的观测指标 u_1 ;
- g) 计算数值解波动率 δ , 按式(1)计算:

$$\delta = \frac{|u_1 - u_0|}{u_1} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

- h) 若 $\delta \leq \delta_0$, 则当前解即为网格无关解, 且可作为数值解的近似相对误差;
- i) 若 $\delta > \delta_0$, 则判定数值解未收敛, 重复步骤 e-h;
- j) 对于存在多个关键输出量的情况, 对每个关键输出量重复步骤 a-i, 全部关键输出量均收敛才可认为网格无关解验证通过。

7.3.2.3 概念拓展

网格无关解的思想可拓展应用至时间步长、迭代容许误差等参数设置的优化和误差估计中。

7.3.3 后验误差估计

7.3.3.1 定义

后验误差估计指经过至少一次数值计算后, 根据数值解的信息, 对其进行误差估计的技术。

7.3.3.2 方法分类

根据是否要求密度不同的多级网格剖分, 后验误差估计技术可分为单级网格方法(针对有限元方法)和多级网格方法(网格收敛指数方法)两类。

7.3.3.3 方法选择

当计算模型使用有限元离散时, 宜采用基于单级网格剖分的有限元后验误差估计方法; 当缺乏计算模型离散格式等必要信息时, 宜采用适用一般离散格式的网格收敛指数方法。

7.3.3.4 有限元后验误差估计方法

有限元后验误差估计方法包括残差法(检验数值解对数学模型的局部拟合精度)和恢复法(检验数值解和高精度恢复解的偏差程度)两类, 必需输入信息包括网格剖分、网格节点处的数值解、有限元形函数。

7.3.3.5 网格收敛指数方法

网格收敛指数方法的实施步骤如下:

- a) 定义网格细化比 r (大于1的常数)、模型观测指数 u (模型关键输出量或全域场分布)、观测指标的容许绝对误差 Δ 和经验安全系数 C_s (推荐取值1.25; 可根据模型预期用途取更保守的安全系数, 不超过3.00);
- b) 生成计算模型的初始网格, 其网格单元特征尺寸为 h_1 ;
- c) 按照细化比 r 对初始网格均匀加密2次, 得到网格单元特征尺寸 $h_2 = h_1/r$ 和 $h_3 = h_2/r$ 的两级加密网格;
- d) 在三级网格上分别求解计算模型, 得到模型观测指标 u (模型关键输出量 QoI 或全域场分布)的三个数值解 u_1 、 u_2 和 u_3 ;
- e) 计算观测收敛阶数 p , 按式(2)计算:

$$p = \ln \left(\frac{u_3 - u_2}{u_2 - u_1} \right) / \ln(r) \dots \dots \dots (2)$$

- f) 计算模型观测指标的最优估计 u_3 的误差估计 E , 按式(3)计算:

$$E = \left| \frac{u_3 - u_2}{1 - r^p} \right| \dots \dots \dots (3)$$

- g) 计算观测的误差界, 即网格收敛指数 GCI, 按式(4)计算:

$$GCI = C_s \cdot E \dots \dots \dots (4)$$

- h) 若 $GCI \leq \Delta$, 则判定当前结果是满足精度要求的可靠数值解;
- i) 若 $GCI > \Delta$, 则判定当前结果在数值求解意义上是不可靠的, 应继续按照细化比 r 生成特征尺寸 $h_4 = h_3/r$ 的均匀细化网格, 求解计算模型得到观测指标 u_4 , 对 u_2 、 u_3 和 u_4 重复步骤 e-i。

8 模型确认方法

8.1 模型确认目的

开展物理实验并对比实验结果和计算模型仿真值，评估计算模型是否准确描述了真实的物理过程。

8.2 物理实验要求

8.2.1 实验输入参数的调节范围应尽量覆盖计算模型预期用途的所有可能工况。

8.2.2 实验中测量的特征物理量应选取为模型关键输出量或方便计算关键输出量的中间量。

8.2.3 实验中的传感器部署位置应依据（通过数值验证的）计算模型初步仿真结果，选择响应最显著、最易测量的测点。

8.2.4 实验仪器设备应经过质量认证和校准。

8.2.5 实验数据应经过质量检查并移除异常数据，避免因传感器超量程、和操作错误等因素干扰实验结果。

8.2.6 应多次重复实验，降低实验结果中随机误差的影响。

8.3 模型确认结论

8.3.1 若全部关键输出量的计算模型预测值和实验结果相对误差均在容许误差率之内，则判断模型确认通过，完成模型可靠性验证。

8.3.2 若至少一个关键输出量的计算模型预测值和实验结果相对误差超出容许误差率，则判定模型确认及模型可靠性评估不通过，应进行模型修正，并再次完成数值检验和模型确认流程。

8.4 模型修正

8.4.1 模型参数校正

8.4.1.1 模型参数校正的操作对象是数学模型和计算模型。

8.4.1.2 模型参数校正的方法和适用范围：

- a) 当模型参数校正中存在显著的随机因素（如实验测量结果中的环境噪声、仪器随机误差等），且随机因素的概率密度分布显式已知时，宜采用极大似然估计法；
- b) 当随机因素概率分布未知、或实验结果测量等环节随机性不显著时，宜采用最小二乘法；
- c) 当经过最小二乘法或极大似然估计法校正参数后的计算模型预测值与实验结果相对误差仍超出容许误差率的情况，宜采用神经网络、遗传算法等人工智能方法进一步改进模型参数。

8.4.1.3 用于模型参数校正的实验数据应与模型确认中的物理实验数据相互独立；必要时，可重新设计并开展专门用于参数校正的独立实验。

8.4.2 模型形式修正

8.4.2.1 模型形式修正的操作对象是概念模型、数学模型及计算模型。

8.4.2.2 判断需进行模型修正的依据包括：

- a) 经过模型参数校正的计算模型计算精度仍无法满足容许误差水平；
- b) 计算模型的数值结果呈现与物理常识和实验结果相悖的特征（分布规律、变化趋势、时域/频域特征等）。

8.4.2.3 模型修正的方式包括但不限于：

- a) 重新考虑当前模型中被忽略的多物理场耦合效应；
- b) 将二维模型扩展为三维模型；
- c) 检查几何细节简化是否显著影响模型预测结果；
- d) 修正材料建模方法、边界条件等物理假设。

9 不确定性量化

9.1 不确定性量化任务

不确定性量化的目的是定量评估具有随机性的模型输入对模型预测结果的影响，具体任务主要分为以下两类：

- a) 在模型可靠性评估阶段，计及模型输入、实验测量结果中的不确定性，给出模型可靠性结论；
- b) 在确认模型可靠性后，考虑模型各输入参数的不确定性，得到符合实际的模型关键输出量的概率分布。

9.2 不确定性来源

9.2.1 模型预测结果的不确定性来源包括几何尺寸、材料特性、载荷、边界条件等模型输入参数的不确定性。

9.2.2 实验结果中的不确定性来源包括实验设备的制造公差、传感器的偶然误差和材料参数的不稳定性等。

9.3 不确定性量化的输入与输出

9.3.1 不确定性量化的输入形式应为具有不确定性的模型输入的概率分布曲线或统计指标（均值和方差），数据来源为工程经验、历史数据或根据重复实验测量数据计算。

9.3.2 不确定性量化的输出形式应为具有不确定性的模型输入的概率分布曲线或统计指标（均值和方差）。

9.4 不确定性量化方法

9.4.1 工作流程

不确定性量化的工作流程如图 3 所示。



图3 不确定性量化工作流程

9.4.2 基于敏感度分析的不确定性量化方法

9.4.2.1 为避免计算资源浪费，在开展不确定性量化计算之前，应对具备随机性的所有模型输入参数开展敏感度分析，移除对模型影响较小的不确定性因素。

9.4.2.2 从不确定性量化中移除某一随机参数的判据可按照式（5）计算：

$$\varepsilon \times \delta \leq tol \dots \dots \dots (5)$$

式中：

ε --模型对某随机参数敏感度；

δ --某随机参数标准差；

tol--预设阈值。

9.4.3 不确定性量化计算方法

9.4.3.1 不确定性量化计算的方法包括多项式混沌展开（Polynomial Chaos Expansion, PCE）方法和蒙特卡洛（Monte-Carlo, MC）方法。

9.4.3.2 多项式混沌展开方法的适用条件和要求包括：

- a) 当计及不确定性的要素数量较少（不超过 3）、且全部随机变量均符合已知特殊分布（连续型随机变量：均匀分布/正态分布/伽马分布/贝塔分布；离散型随机变量：泊松分布/超几何分布/二项分布/负二项分布）的情况，宜采用多项式混沌展开（Polynomial Chaos Expansion, PCE）方法；
- b) 多项式混沌展开方法的随机采样方法可采用拉丁超立方方法和 SOBOL 采样法；
- c) 多项式混沌展开方法的随机样本容量（调用计算模型仿真的次数）可按照式(6)计算：

$$N = \alpha \cdot N_p = \alpha \cdot \frac{(p+m)!}{p!m!} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

- N --随机样本容量；
- α --过采样系数；
- N_p --基函数数量；
- p --最高基函数阶次；
- m --计及不确定性的要素数量。

- d) 过采样系数的推荐取值范围 $2 \leq \alpha \leq 3$ ；最高基函数阶次的推荐取值范围为 $6 \leq m \leq 12$ （或按照迭代方式逐步升阶）；当随机要素的波动较大（标准差超过均值的 8%）或对关键输出量的非线性效应较强时，应综合考虑计算负担，对 α 和 m 在推荐范围内尽可能取较大值，或以迭代的方式逐步增大样本取值（终止判据为混沌多项式展开代理模型对样本的拟合精度是否达到预设值）。

9.4.3.3 蒙特卡洛方法的适用条件和要求包括：

- a) 当计及不确定性的要素数量较多（超过 3）或至少一个随机要素的概率分布不符合已知特殊分布时，宜采用蒙特卡洛方法；
- b) 蒙特卡洛方法的随机采样要求符合随机要素的真实概率分布；
- c) 蒙特卡洛方法的随机样本容量推荐 $1000 \leq N \leq 2000$ ，或采取迭代的方式逐步提升（终止判据为随样本容量扩充，关键输出量的均值、标准差等统计学指标是否收敛）。

9.4.3.4 采用其他不确定性量化算法时，应面向简单算例基于蒙特卡洛法对其可靠性进行验证

附录 A (资料性)

电力变压器磁-力-声耦合计算模型可靠性评估和不确定性量化案例

A.1 模型概述

本附录针对一台 10 kV 电压等级的干式三相变压器(型号 SCB10-250/10, 铁心硅钢材料牌号 30Q120) 的噪声评估, 展示了磁-力-声多物理场耦合计算模型的建立、数值检验、模型确认和噪声不确定性量化评估过程。

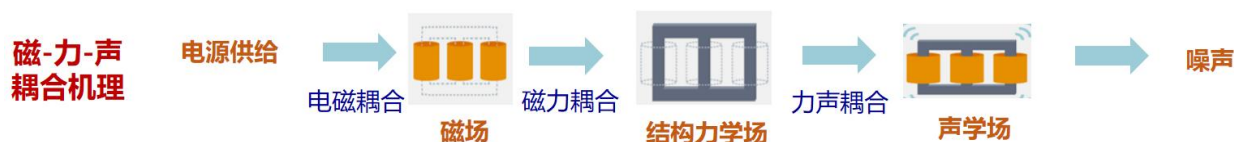
A.1.1 应用背景

电力变压器是现代电力系统的重要支撑设备, 被广泛应用于输电、配电等多个领域。在变压器运行过程中, 由于硅钢材料的磁致伸缩效应, 其铁心在交变磁场的影响下, 因磁致伸缩力产生的振动变形, 不仅带来了环境噪声问题, 长期振动还会导致铁心松动, 引起额外磁滞/涡流损耗, 降低效率, 并且可能引发局部过热现象, 影响整个变压器的安全稳定运行。因此, 有必要对磁致伸缩效应引发的变压器铁心振动噪声水平开展可靠的建模计算和不确定性量化, 确保实际设备的噪声、安全等性能达标。

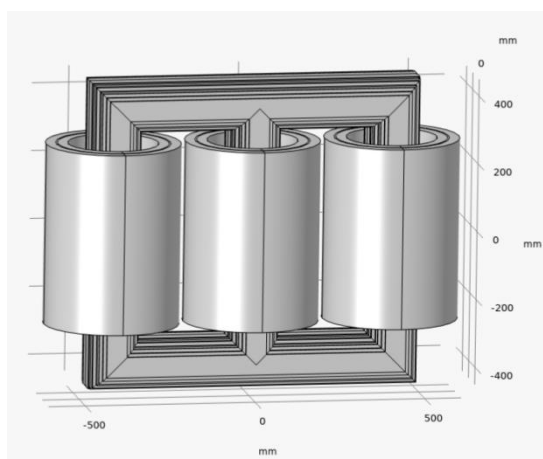
A.1.2 建模流程

按照本文件正文条款 6: 模型建立方法中的建模工作流程, 各层次建模工作的要点如下:

a) 概念模型: 本模型的预期用途是评估电力变压器铁心振动引起的噪声, 产生噪声的多物理场机理如图 A.1 所示; 模型关键输出量 (QoI) 选取为铁心表面处的噪声声压等级; 重点关注的铁心按照严格的叠片铁心方式绘制 CAD 模型, 绕组等次要结构按照同心圆柱等方式简化, 几何模型 (已隐藏空气区域) 如图 A.2 所示; 基于拟合多项式描述铁心的非线性磁特性和磁致伸缩特性。



图A.1 磁-力-声多物理场耦合关系



图A.2 几何模型示意图

b) 数学模型: 磁场仿真的载荷为加载于线圈的电压激励, 计算所得磁场根据磁致伸缩本构关系转换为结构力学场的载荷, 结构力学场计算所得铁心振动位移结果以硬声场边界的形式加载

为声学场的载荷；模型的输入参数除已包含在 CAD 模型中的几何尺寸参数外，还包含变压器各部件的材料特性和运行参数，如表 A.1 所示。

表 A.1 模型参数

参数名称	数值	单位
额定电压	10000	V
相数	3	无量纲
频率	50	Hz
容量	250	kVA
初级线圈匝数	1137	无量纲
次级线圈匝数	25	无量纲
导线截面积	5.515	mm ²
导线电阻率	1.667×10^{-8}	$\Omega \cdot m$
杨氏模量	2×10^{11}	Pa
泊松比	0.3	无量纲
硅钢片密度	7650	Kg/m ³

- c) 计算模型：数学模型基于商业软件 COMSOL Multiphysics（版本号：6.0）完成有限元离散、仿真计算和结果后处理。

A.1.2 数值验证

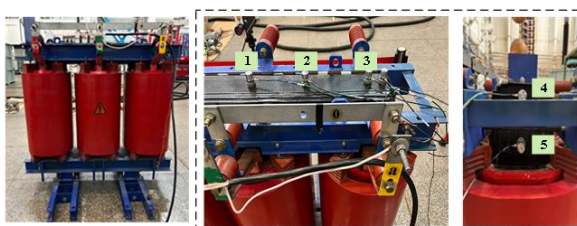
对变压器磁-力-声耦合计算模型的初始网格剖分进行逐步加密至，对磁场、结构力学场和声学场开展了计算验证，容许相对误差限均设置为 5%。数值验证结果如表 A.2 所示，可以看出当四面体网格单元数增加至 1747486 时，全部物理场的观测量相对误差均在 3.1%以内，数值验证通过。

表 A.2 数值验证结果

物理场	验证方式	观测量	相对误差	结论
磁场	有限元后验误差估计	矢量磁位全局误差	3.07%	通过
结构力学场	有限元后验误差估计	位移全局误差	0.65%	通过
声场	网格无关解	最大声压	0.22%	通过

A.1.3 模型确认

针对本案例，于保定市天威保变电气股份有限公司开展了基于实验测试的模型确认工作，在实验样机上布置 5 个测试点布置压电式加速度传感器对铁心振动情况进行测量，计算模型的测点位移预测值与实验实测结果的容许相对误差设置为 5%。模型确认结果如表 A.3 所示，可以看出全部 5 个测点的模型预测值和实验测量值相对误差均在 3%以内，模型确认通过。



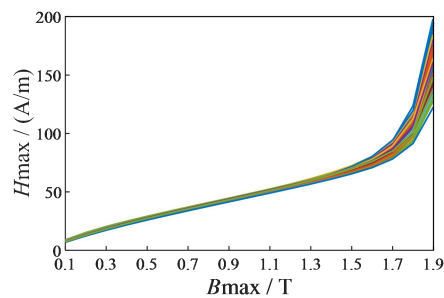
图A.3 实验测试样机示意图

表 A.3 模型确认结果

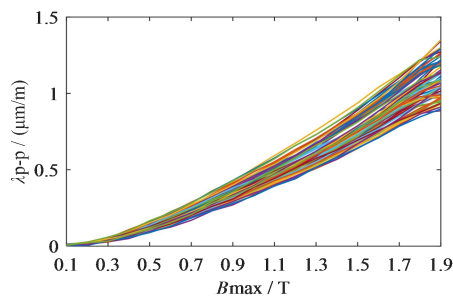
测点编号	位移仿真值/ μm	观测值/ μm	相对误差	结论
1	0.112	0.115	2.60%	通过
2	0.077	0.075	2.67%	通过
3	0.139	0.140	0.71%	通过
4	0.153	0.157	2.53%	通过
5	0.118	0.118	0.34%	通过

A.1.4 不确定性量化

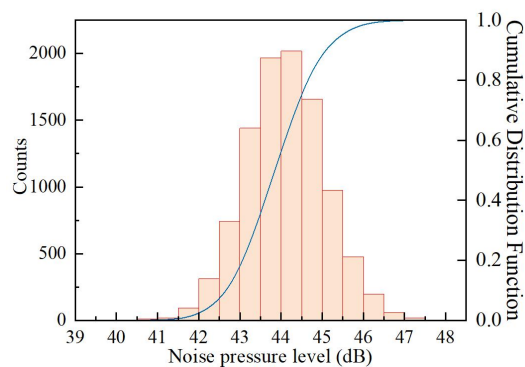
考虑硅钢材料 B-H 曲线和磁致伸缩曲线的不确定性，实验测量得到的某批次 30Q120 牌号硅钢材料 B-H 曲线如图 A.4 所示，磁致伸缩特性曲线如图 A.5 所示。



图A.4 实验测试样机示意图



图A.5 实验测试样机示意图



图A.6 最大声压直方图和累积概率曲线

采用蒙特卡洛法对铁心振动噪声进行不确定性量化评估。将全部被测硅钢样品的 B-H 曲线和磁致伸缩特性曲线输入计算模型，开展铁心振动的计算，并汇总得到图 A.6 所示的最大声压分布直方图和累积概率曲线。

根据 IEC 60076-10 标准，变压器噪声声压白天不应超过 55 dB，夜间不应超过 45 dB。本例噪声声压平均值为 43.65 dB，符合标准；但根据累积概率曲线，噪声声压有 12.5% 的概率超过 45 dB 的标准。这充分说明精确计算由模型输入的随机波动引起的 QoI 不确定性，对电力设备性能指标评估的重要性。

参 考 文 献

- [1] P. Roache, (1998), “Verification of Codes and Calculations,” *AIAA Journal*, 36, no. 5, pp. 696–702. DOI: 10.2514/2.457.
- [2] F. Yang, Y. Xia, J. Wang, P. Wang and H. Jiang (2025), "An Improved Prediction Algorithm for Noise of Transformer Considering Material Parameter Uncertainty," *IEEE Transactions on Magnetics*, early access. DOI: 10.1109/TMAG.2025.3626932.
- [3] National Research Council 2012. Assessing the Reliability of Complex Models: Mathematical and Statistical Foundations of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/13395.
- [4] Roy, C. J., & Oberkampf, W. L. (2011), “A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(25-28), 2131-2144. DOI: 10.1016/j.cma.2011.03.016.
- [5] ASME V&V 10-2019, Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York.
- [6] ASME V&V 20-2009 (Reaffirmed 2021), Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York.