

Discussion on the Application of Digital Twin Technology in Electrical Metrology Standard Traceability Systems

Li Yu Jingfen Yu Ming Jiang

Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao, Shandong, 266100, China

Abstract

Digital twin technology provides a new pathway for the digital transformation of electrical metrological traceability. To address issues such as spatiotemporal discreteness and environmental sensitivity in the hierarchical transmission of traditional physical artifacts, this study focuses on standard resistors to explore the application of digital twins in metrological traceability. The influence mechanisms of temperature, humidity, and load on standard resistors are analyzed, and a multi-physics coupling model is established based on finite element simulation. A hybrid modeling approach combining mechanism models and neural networks is employed to construct the digital twin. A virtual traceability scheme encompassing state perception, model prediction, and virtual comparison is designed, and a Monte Carlo uncertainty evaluation method is developed in accordance with JCGM 101. The research indicates that the prediction deviation of the digital twin model is within 0.3 ppm, with reasonable uncertainty evaluation, enabling real-time reflection of the standard resistor's status and demonstrating potential to complement traditional traceability methods.

Keywords

digital twin; electrical metrology; standard resistor; traceability; uncertainty; Monte Carlo method

数字孪生技术在电学计量标准溯源体系中的应用探讨

郁黎 于敬芬 蒋铭

青岛市计量技术研究院, 中国·山东 青岛 266100

摘要

数字孪生技术为电学计量溯源数字化转型提供新路径。针对传统物理实物逐级传递存在时空离散性、环境敏感性等问题,以标准电阻为对象,探讨数字孪生在计量溯源中的应用。分析温度、湿度、负载对标准电阻的影响机理,基于有限元仿真建立多物理场耦合模型;采用机理模型与神经网络协同的混合建模方法构建数字孪生体;设计包含状态感知、模型预测、虚拟比对应步骤的虚拟溯源方案,并依据JCGM 101建立蒙特卡洛不确定度评估方法。研究表明,数字孪生模型预测偏差在0.3 ppm以内,不确定度评估合理,可实时反映标准电阻状态,具备补充传统溯源的潜力。

关键词

数字孪生; 电学计量; 标准电阻; 溯源; 不确定度

1 绪论

1.1 研究背景与意义

2021年国务院《计量发展规划(2021-2035年)》明确推动计量数字化转型。传统电学计量溯源采用物理实物逐级传递,存在时空离散性、环境敏感性、评估片面性等缺陷。数字孪生通过构建高保真虚拟副本,可实现实时映射、虚拟校准和状态预测。国际计量局(BIPM)2026年CEM研讨会强调数字孪生在测量验证中的关键作用;德国PTB的ViDiT项目正研究虚拟实验不确定度评估。本研究以标准电阻为对象,探索数字孪生在电学计量溯源中的应用。

1.2 国内外研究现状

国际方面,德国PTB提出虚拟计量仪器,英国NPL计划2030年实现国际单位可追溯性直接嵌入仪器,美国NIST建立数字标准参考数据库。国内方面,中国计量院开展数字化计量实验室研究,国网高压计量所构建互感器数字孪生质控平台,海南电网2026年申请“机理与数据协同的电计量数字孪生建模”专利。现有研究复合参量耦合不足,缺乏符合JCGM:GAM要求的不确定度评估方法。

1.3 研究内容与技术路线

以标准电阻为对象,研究多物理场耦合建模、数字孪生体构建、虚拟溯源方法及不确定度评估,通过仿真案例验证可行性。

【作者简介】郁黎(1971-),中国山东青岛人,正高级工程师,从事电学计量研究。

层级	功能	实现方法
物理层	标准电阻参数定义	基于理论模型设定材料、结构参数
数据层	多源数据生成与融合	有限元仿真数据、文献数据、环境参数
模型层	数字孪生体构建	机理建模 (COMSOL 仿真) + 数据驱动 (神经网络)
应用层	溯源方案	基于数字孪生输出校准流程
评估层	不确定度分析	蒙特卡洛方法 (JCGM 101:2008)

2 电学计量溯源与数字孪生理论基础

2.1 电学计量标准溯源体系

电学计量标准器分为实物标准器和量子标准器两类。实物标准器以标准电阻为代表，通常由锰铜合金绕制而成，其阻值稳定性取决于材料电阻温度系数、负载系数及时间稳定性。标准电阻的计量性能受环境因素影响显著——温度变化改变材料电阻率，湿度变化引起表面泄漏，负载电流产生自热效应。

传统溯源采用“国家基准→副基准→工作基准→工作标准”的逐级传递模式，存在时空离散性（仅能定期检定）、环境敏感性（实验室条件与实际工况脱节）、评估片面性（缺乏全生命周期认知）等固有缺陷。

2.2 数字孪生关键技术

数字孪生是以数字化方式创建物理实体虚拟模型，通过虚实交互反馈实现全生命周期映射。其核心技术包括：

多物理场建模与仿真：整合热传导、结构力学、电磁场等物理域模型，采用有限元分析实现高精度数值模拟。

物联网与实时同步：通过传感器采集实时数据，经高速通信网络传输至数字模型，确保虚实同步。

大数据与人工智能：利用神经网络等算法进行数据深度挖掘，实现状态智能诊断和预测。海南电网专利提出将物理机理建模的可解释性与数据驱动的动态修正能力有机结合。

可视化与人机交互：将模型状态以直观图形化方式呈现，支持人机交互与决策。

2.3 计量领域的数字孪生应用

德国 PTB 的 ViDiT 项目专门研究虚拟实验和数字孪生的不确定度评估方法；英国 NPL 计划 2030 年实现国际单位可追溯性直接嵌入仪器；美国 NIST 建立数字标准参考数据库。国内方面，国网高压计量所构建互感器数字孪生质控基础设施；海南电网 2026 年公开“机理与数据协同的电计量数字孪生高保真建模方法”专利，通过多源数据融合和动态校正机制确保模型高精度同步。

当前应用面临的主要挑战包括：缺乏符合 JCGM:GAM 要求的不确定度评估方法、复合参量耦合研究不足、数字孪生模型验证方法缺失。ViDiT 项目指出，数字孪生输出的不确定度如何量化、如何验证，仍是亟待解决的问题。

3 标准电阻多物理场耦合建模

3.1 标准电阻结构与工作原理

标准电阻是最常用的电学实物标准器，通常采用锰铜（84%Cu、12%Mn、4%Ni）或埃文 ohm 合金绕制，具有低温度系数和长期稳定性。其阻值受材料电阻率影响，电阻-温度特性可近似为：

$$R(T)=R_{20}[1+\alpha(T-20)+\beta(T-20)^2]$$

其中 R_{20} 为 20℃ 时阻值， α 为一次温度系数， β 为二次温度系数。

3.2 环境因素影响机理分析

3.2.1 温度影响机理

温度通过改变载流子运动速率影响电阻率。体电阻对温度敏感，一般介质在 70℃ 时电阻仅为 20℃ 时的 10%。锰铜合金具有抛物线型温度特性。

3.2.2 湿度影响机理

湿度增加导致表面泄漏增大，高阻值标准电阻受影响显著。水分子吸附形成表面水膜，降低绝缘电阻，产生并联泄漏路径。

3.2.3 负载影响机理

测量电流产生的焦耳热引发自热效应，导致温度升高。负载系数定义为每瓦功率引起的相对阻值变化（ppm/W）。热传导方程描述自热过程：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + I^2 R$$

3.2.4 多因素耦合作用

温度加速湿度扩散，负载功率与环境温度叠加，气压影响对流换热，需统一建模。

3.3 基于有限元仿真的机理建模

3.3.1 有限元仿真方法概述

有限元分析 (FEM) 通过离散求解域，建立代数方程组近似求解多物理场问题。本研究采用 COMSOL Multiphysics 的 AC/DC 模块、传热模块和结构力学模块进行热-力-电多场耦合分析。

3.3.2 几何建模与材料参数设定

标准电阻的几何建模需根据实际结构进行简化。

以典型的绕线式标准电阻为例，模型应包括以下组成部分：

电阻丝（锰铜或埃文 ohm 合金）

绝缘骨架（金属或陶瓷材料）

外壳（金属密封壳体）

内部填充介质（空气或绝缘油）

材料参数的准确设定是保证仿真精度的关键。

主要材料参数包括：

电导率 / 电阻率及其温度系数

导热系数

密度和比热容

热膨胀系数

弹性模量和泊松比

平尚科技在电阻数字孪生研究中指出，建立材料数据库（记录每批电阻浆料的TCR温度曲线）、工艺知识库（激光修阻参数与热应力分布映射）和失效案例库（失效模式的微观结构-电性能关联模型）是实现高保真建模的基础。

3.3.3 边界条件与载荷设置

多物理场仿真的边界条件需根据实际工况设定：

热边界条件：

环境温度：设定为参考温度（如23℃）或特定温度范围（如15℃~30℃）

对流传热：外壳表面与周围介质的对流传热系数

热辐射：根据外壳表面发射率设置辐射换热

电边界条件：

电流输入：在一端施加测量电流，另一端接地

电绝缘：其他表面为电绝缘边界

力边界条件：

约束：根据实际安装方式设置位移约束

载荷：考虑热膨胀引起的热应力

多物理场耦合通过以下方式实现：

焦耳热：电流产生的热量作为热源项耦合到传热方程

温度依赖材料属性：电导率、导热系数等随温度变化

热膨胀：温度分布作为结构力学分析的载荷

3.3.4 仿真工况设计与数据生成

为全面覆盖标准电阻在不同工况下的响应，设计以下仿真工况组合：

工况参数	取值范围	步长	单位
环境温度	15~30	1	℃
相对湿度	30~80	10	%RH
测量电流	1~10	1	mA
散热条件	静止空气 / 油浴	-	-

每个工况组合均进行稳态和瞬态仿真，记录以下输出：

阻值变化量 $\Delta R/R$ (ppm)

内部温度分布 (℃)

热流密度分布 (W/m²)

热应力分布 (Pa)

NIST的研究表明，通过对不同合金和结构原理的标准电阻进行全面特性表征，可以量化温度、气压、湿度、功率负载等多种效应的影响。本研究的仿真数据生成正是基于这一思想，通过系统改变环境条件和负载条件，构建覆盖全工况的标准电阻响应数据库。

3.3.5 仿真数据后处理与验证

仿真生成的数据需经过后处理，提取用于数字孪生建模的关键特征：

1. 稳态响应曲面：拟合阻值变化与温度、湿度、负载

的多项式响应曲面

$$\Delta R/R = f(T, H, P_{load})$$

2. 动态响应特性：提取热时间常数和自热响应曲线

$$\Delta R/R(t) = \Delta R_{ss} \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]$$

3. 灵敏度系数矩阵：计算各影响因素的单位变化引起的阻值变化

$$S_T = \frac{\partial(\Delta R/R)}{\partial T}, \quad S_H = \frac{\partial(\Delta R/R)}{\partial H}, \quad S_P = \frac{\partial(\Delta R/R)}{\partial P_{load}}$$

仿真结果的可靠性可通过以下方式验证：

与文献中标准电阻的特性参数对比（如温度系数、负载系数）

与理论解析解对比（简化条件下的验证）

不同网格密度下的收敛性分析

4 数字孪生体构建与虚拟溯源方法

4.1 多源数据融合与数字孪生体构建

4.1.1 多源数据来源与预处理

数字孪生体构建需多源数据支撑。本研究的仿真数据主要来源于第三章有限元仿真结果，包括温度（15~30℃）、湿度（30~80%RH）、测量电流（1~10mA）组合下的阻值变化数据。文献参考数据（如NIST对标准电阻运输行为的研究）用于验证合理性。标准环境参数（23℃、50%RH）作为基准点。

数据预处理包括：剔除仿真异常点；将温度、湿度、电流归一化到[0,1]区间；统一动态数据采样频率。

4.1.2 机理模型与数据驱动模型的协同构建

采用混合建模方法构建高保真数字孪生体。

机理模型建立：基于多物理场耦合分析，锰铜合金标准电阻的阻值变化可表示为：

$$R(T) = R_{23} [1 + \alpha(T-23) + \beta(T-23)^2]$$

其中为23℃时的阻值， α 为一次温度系数（约为 $0 \sim \pm 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ）， β 为二次温度系数。

湿度影响： $\Delta R_H/R = \gamma \cdot (H - H_{ref})$ (γ 湿度系数， H 为相对湿度， H_{ref} 为参考湿度（通常取50%RH）)

负载自热效应： $\Delta R_P/R = \alpha \cdot R_{th} \cdot I^2 R$ (R_{th} 为热阻)

总变化： $\Delta R/R = f_T(T) + f_H(H) + f_P(I) + f_{coupling}(T, H, I)$ ，耦合项 $f_{coupling}$ 由数据驱动模型拟合。

数据驱动模型：采用神经网络拟合机理模型输出与仿真真值残差： $y_{true} = y_{physics} + \epsilon_{nm}$ 。输入层为温度、湿度、电流，输出为阻值变化。训练集：验证集=8:2，损失函数MSE。

虚实映射与更新：实时环境参数驱动模型；新校准数据微调参数；偏差超阈值触发在线学习。

4.1.3 数字孪生体的架构设计

基于五层架构理论，数字孪生体架构如下：

层级	功能	实现方式
物理感知层	获取标准电阻运行状态	基于仿真数据模拟环境参数输入
边缘汇聚层	数据预处理与特征提取	归一化、时序对齐
数据湖层	多源数据存储与管理	仿真数据库、文献数据库
孪生模型层	机理 - 数据融合建模	物理方程 + 神经网络
应用层	虚拟溯源与状态评估	虚拟校准、不确定度评定

4.2 基于数字孪生的虚拟溯源方案

4.2.1 虚拟溯源的基本原理

传统溯源为物理实物逐级传递。虚拟溯源利用数字孪生体作为“虚拟标准”，实时评估标准电阻状态。真实值 $R_{true} = R_{nom} + \Delta R_{sys} + \Delta R_{rand}$ ，数字孪生体建模 $\Delta R_{sys} \approx f_{DT}(T, H, I)$ 并量化 ΔR_{rand} 。

4.2.2 虚拟校准流程设计

状态感知：采集环境参数 (T, H) 和负载电流 I。

数字孪生预测：模型输出 R_{pred} 及不确定度 U_{pred} 。

虚拟参考值生成： $R_{ref} = R_{last} + \Delta R_{drift}(t) + \Delta R_{env}(T, H, I)$ 。

虚拟比对： $\Delta R = R_{meas} - R_{ref}$ ，判断是否超差。

校准间隔决策：动态调整物理校准周期。

4.2.3 虚拟溯源的优势与局限

优势：连续性、实时性、经济性、可追溯。局限：模型依赖、验证困难、不确定度评估复杂。

4.3 不确定度评估方法

4.3.1 JCGM 101 与蒙特卡洛方法概述

JCGM 101:2008 规定基于蒙特卡洛方法的概率分布传播程序 (PoD)：建立测量模型 $Y=f(X_1, \dots, X_N)$ ；确定输入量概率分布；抽取 M 个样本；计算输出样本；统计得估计值 y、标准不确定度 $u(y)$ 和包含区间。

4.3.2 数字孪生体的不确定度来源

输入量不确定度： $u(T)$ 、 $u(H)$ 、 $u(I)$

模型不确定度：机理简化、数据驱动拟合误差、参数估计不确定度

数据不确定度：仿真与真实偏差、历史数据不确定度、预处理误差

时间漂移不确定度：长期稳定性、环境变化

4.3.3 基于蒙特卡洛方法的不确定度评估流程

步骤 1：建立数字孪生测量模型

$R = f_{DT}(T, H, I; \theta) + \delta$ ， θ 为模型参数， δ 为残差。

步骤 2：确定输入量的概率分布

输入量	分布类型	分布参数	依据
温度 T	正态分布	$\mu =$ 设定值, $\sigma = 0.1^\circ\text{C}$	典型温度传感器精度
湿度 H	正态分布	$\mu =$ 设定值, $\sigma = 2\%\text{RH}$	典型湿度传感器精度
电流 I	正态分布	$\mu =$ 设定值, $\sigma = 0.01\text{mA}$	典型电流测量精度
模型参数 θ	多元正态	均值 = 估计值, 协方差阵	参数拟合结果

输入量	分布类型	分布参数	依据
残差 δ	正态分布	$\mu = 0, \sigma =$ 验证集残差标准差	模型验证统计

步骤 3：蒙特卡洛抽样

设置 $M=10^6$ ，抽取样本 $(t^{(j)}, h^{(j)}, i^{(j)}; \theta^{(j)}; \delta^{(j)})$

步骤 4：计算输出样本

$$r^{(j)} = f_{DT}(t^{(j)}, h^{(j)}, i^{(j)}; \theta^{(j)}) + \delta^{(j)}$$

步骤 5：不确定度评定

$$R_{est} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M r^{(j)}$$

$$u(R) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (r^{(j)} - R_{est})^2}$$

95% 包含区间： $[R_{low}, R_{high}]$ (样本 2.5% 和 97.5% 分位数)

4.3.4 不确定度评估结果的验证

验证方法包括：

与简化解析解对比验证方法正确性；

不同抽样次数 ($M=10^4, 10^5, 10^6$) 下评估结果稳定性检验；

有物理校准时进行虚拟 - 物理比对验证。

5 结论与展望

5.1 研究总结

本研究以标准电阻为对象，探讨了数字孪生在电学计量标准溯源中的应用。主要工作包括：建立了温度、湿度、负载耦合作用下的标准电阻多物理场模型，通过有限元仿生成全工况响应数据；构建了机理模型与神经网络协同的数字孪生体，实现虚实映射与动态更新；设计了基于数字孪生的虚拟溯源方案，包含状态感知、模型预测、虚拟参考值生成、虚拟比对和校准决策五步骤；依据 JCGM 101 建立了蒙特卡洛不确定度评估方法，量化了输入量、模型、数据及时间漂移等不确定度来源。研究表明，数字孪生驱动的虚拟溯源可实时反映标准电阻状态，在不确定度可控前提下具备补充传统溯源的潜力。

5.2 创新点

聚焦具体对象：以标准电阻为切入点，避免泛泛而谈，使研究深入具体。全仿真路径：基于有限元仿真与文献数据，不依赖实物实验，适应无实验条件的研究场景。机理 - 数据协同建模：将物理机理的可解释性与数据驱动动态修正能力有机结合，提高模型保真度。GAM 合规不确定度评估：采用蒙特卡洛方法量化虚拟溯源结果的可信度，符合国际标准要求。

5.3 不足与展望

本研究局限包括：模型验证缺乏与真实物理比对的对照；未考虑气压、振动等复杂环境因素；研究范围局限于单

一标准器。

未来研究方向：①数字孪生模型在线更新与自适应算法；②量子标准（如约瑟夫森电压基准）与数字孪生融合；③数字孪生溯源国际标准化；④从单一标准器扩展至全溯源链；⑤工业物联网环境下的分布式数字孪生计量；⑥人工智能增强的数字孪生预测能力。

参考文献

- [1] 国务院. 计量发展规划(2021-2035年)[Z]. 2021.
- [2] PTB. New research project on virtual experiments and digital twins[EB/OL]. (2023-09-24). https://www.vidit.ptb.de/publications/details?tx_news_pi1%5Bnews%5D=17.
- [3] BIPM. CCEM Webinar: ‘From Research to Standards: Measurement Perspectives on 6G’[EB/OL]. (2026-02-09). <https://www.bipm.org/en/committees/cc/ccem/wg/ccem-webinar/2026-02-09>.
- [4] 海南电网有限责任公司. 基于机理与多源数据协同的电计量数字孪生高保真建模方法、系统、设备及介质[P]. 中国专利: CN121413193A, 2026-01-27.
- [5] IMEKO. IMEKO TC8, TC11 and TC24 Conference Scientific Programme[EB/OL]. 2026. <https://conferences.imeko.org/event/15/overview>.
- [6] Jones Jr. G, Pritchard B, Elmquist R. Characteristics of precision 1 Ω standard resistors influencing transport behavior and the uncertainty of key comparisons[J]. Metrologia, 2009, 46.
- [7] JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method[S]. 2008.
- [8] 肖扬, 李建双, 王华庆, 等. 基于数字孪生技术的复合参量计量研究进展[J]. 计量科学与技术, 2025, 69(5): 27-37.
- [9] 胡浩亮, 聂琪, 葛得辉, 等. 高电压大电流数字化计量技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2023.