

数字孪生技术在计量标准器远程校准中的应用探索

王丹宇^{1*}, 马福鹤¹, 李聪蔚¹, 宗辉²

(1. 山东计量测试学会, 济南 250014; 2. 青岛市黄岛区市场监督管理综合保障中心, 青岛 266400)

摘要: 计量标准器是保证测量准确性和一致性的关键设备, 其校准精度直接影响各行业的测量可靠性。本文探讨数字孪生技术在计量标准器远程校准中的应用, 从数字孪生技术概述入手, 分析计量标准器远程校准的需求, 详细阐述数字孪生模型构建、实时数据采集与处理、校准过程虚拟仿真及优化决策支持等关键环节, 并结合案例分析其实际应用成效, 为计量标准器远程校准的智能化发展提供参考。

关键词: 数字孪生技术; 计量标准器; 远程校准

0 引言

计量标准器远程校准是计量体系中不可或缺的关键环节, 直接关系到测量结果的可靠性、溯源性及一致性。随着工业自动化、智能制造及数字化转型的加速推进, 传统计量标准器校准模式在时效性、经济性和环境适应性等方面的局限性逐渐显现。数字孪生技术是集物理建模、实时仿真、数据融合及智能优化于一体的新兴技术, 通过数字孪生技术在计量标准器远程校准中的深度融合, 可以实现标准器物理特性与虚拟映射的实时交互, 使远程校准过程具备更高的仿真精度、数据一致性及预测能力, 从而提升计量标准器远程校准的自动化水平、可靠性和溯源效率。本文将深入探讨数字孪生技术在计量标准器远程校准中的应用, 为智能制造和数字化转型的广泛应用提供坚实的技术基础和支撑。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术通过创建一个高精度的虚拟模型来映射计量标准器的物理实体, 该模型能实时接收和反馈来自其物理对应物的数据, 从而实现对计量标准器状态的精确监测与远程校准控制。其应用极大地推动了计量科学领域的创新发展。在数字孪生的环境下, 计量标准器的每一项物理参数都能被精确捕获并在其数字副本中得到详细仿真, 包括温度、压力、电流和电压等关键测量数据, 这些数据通过高效的数据采集系统被实时传输至处理中心, 经过高级数据分析后, 可用于调整和优化远程校准流程, 保证了校准过程的准确性与可靠性。数字孪生技术还支持对计量标准器操作环境的模拟, 包括环境变化对测量结果的影响,

这对于在复杂或变化环境中进行高精度测量具有重要意义。这种高度集成的技术应用可以在不直接干预物理设备的情况下, 进行故障预测、性能优化和维护计划制定, 进一步降低了维护成本, 提高了操作效率。

2 计量标准器远程校准的需求分析

计量标准器远程校准是计量体系精确性和稳定性的核心环节, 在高精度测量、计量标准溯源及跨区域计量一致性保障方面具有重要意义, 面对传统现场校准模式在响应速度、操作便捷性及成本控制方面的局限性, 远程校准需求愈发凸显。计量标准器远程校准的核心需求包括高精度测量参数的实时传输、标准器工作状态的动态监测、计量基准数据的远程溯源以及环境因素对校准结果的影响补偿, 要求具备低延迟、高稳定性、强抗干扰能力的远程测量系统, 同时必须满足多类型计量标准器的适配需求。远程校准体系需要实现高效的数据采集、精准的数据处理、动态的误差修正及智能的校准策略优化, 从而降低因物理环境差异、测量不确定度及标准器漂移造成的系统误差, 确保测量数据的可追溯性和一致性。此外, 计量标准器远程校准必须支持跨区域、多站点的标准数据互联互通, 实现测量数据的实时共享与溯源验证, 提高计量标准器的远程操作能力^[1-2]。

3 数字孪生技术在计量标准器远程校准中的应用

3.1 数字孪生模型构建

构建数字孪生模型实现计量标准器的远程校准过程的关键在于建立一个高精度的数学模型, 该模型能够反映

* 通信作者: 王丹宇, 助理工程师, 研究方向为质量工程、计量检测。E-mail: 465452702@qq.com

物理标准器的动态响应与行为。设标准器的物理状态由向量 $\mathbf{x}(t)$ 描述, 其中 t 为时间变量, 模型的构建首先从物理定律和经验数据出发, 形成基础的动态方程:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (1)$$

其中, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ 为状态演化函数; \mathbf{x} 为状态变量向量; \mathbf{u} 为输入变量向量; t 为时间变量。为了进行远程校准, 需引入观测模型:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{y}(t)$ 代表可通过远程系统监测到的输出。考虑到计量标准器可能面临的各种非理想因素, 引入噪声模型以增强系统的适应性和鲁棒性, 噪声向量 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{w}(t)$ 分别表示过程噪声和观测噪声, 系统模型可更新为:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \mathbf{v}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{w}(t) \quad (4)$$

使用基于卡尔曼滤波的算法进行状态估计和参数调整, 算法根据递归处理所有可用的测量数据, 不断优化状态估计。设 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 为给定前 $k-1$ 时刻测量结果时刻 k 的状态预测, $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 为预测的协方差, 校准更新可表示为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, t_k)) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (7)$$

其中, \mathbf{K}_k 是卡尔曼增益, \mathbf{H}_k 是在 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 处观测模型的雅可比矩阵, \mathbf{R}_k 是观测噪声协方差矩阵^[3-4]。这个过程实质上是根据每一步测量结果来修正模型预测, 从而实现对计量标准器状态的精确控制和校准, 确保了远程校准的精度与效率^[5-6]。

3.2 实时数据采集与处理

在数字孪生技术应用于计量标准器远程校准的过程中, 实时数据采集与处理涉及从多个传感器收集大量测量数据, 通过先进的数据处理技术实现快速有效的数据分析与决策支持^[7-8]。采集过程中, 高精度传感器持续监测计量标准器的关键参数, 如温度、压力、电流和位移等, 这些数据通过安全的通信协议实时传输至中央处理系统^[9-10]。数据处理环节对收集到的数据进行快速分析, 包括数据清洗、异常检测、趋势分析及预测模型构建等, 确保数据能够实时地反映计量标准器的状态并指导远程校准的执行, 在维护计量精确性和可靠性方面发挥着至关重要的作用。数字孪生技术不仅增强了远程校准的实时性和精度, 也提高了计量过程的效率和智能化水平^[11-12]。

3.3 校准过程的虚拟仿真

校准过程的虚拟仿真是数字孪生技术在计量标准器远

程校准中应用的一个核心部分, 通过精确的数学模型和仿真算法在无需物理介入的情况下完成校准任务。此技术根据构建计量标准器的高精度数字副本, 即数字孪生, 来模拟和分析标准器在不同操作条件下的行为和反应。这种方式可以在虚拟环境中预测标准器的性能, 识别潜在的校准偏差和故障, 不直接影响实际设备。虚拟仿真中每一次模拟的校准操作都会产生数据, 数据通过高级算法进行处理, 模拟结果提供关于标准器性能的洞察, 这些洞察是优化校准周期和校准参数的基础^[13-14]。进一步地, 仿真过程还能通过迭代学习不断提升校准策略的精确度, 确保每一次的校准都尽可能地接近理想状态, 减少了物理校准中可能引入的风险和成本, 显著提高了校准工作的效率和安全性, 使得远程校准服务能在确保高精度和高可靠性的同时, 支持复杂设备和多变工况下的校准需求^[15-16]。

3.4 优化和决策支持

在数字孪生技术应用于计量标准器远程校准中的优化和决策支持环节, 根据高级数据分析和机器学习技术实现校准过程的优化, 关键在于利用历史数据和实时反馈来持续改进校准参数和周期的决策过程。假设校准参数向量为 $\boldsymbol{\theta}$, 实时监测到的数据向量为 \mathbf{x} , 目标是 최소화校准误差 E , 该过程可根据以下优化问题进行表述:

$$\min_{\boldsymbol{\theta}} E(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}) \quad (8)$$

其中, 误差 E 通常由标准器实际输出与其预期输出之间的差异定义, 可以具体表示为:

$$E(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}) = y_{\text{pred}}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}) - y_{\text{actual}}^2 \quad (9)$$

其中, y_{pred} 是基于当前校准参数 $\boldsymbol{\theta}$ 和输入数据 \mathbf{x} 预测的输出, 而 y_{actual} 是从实际测量得到的输出^[17-18]。不断迭代更新校准参数 $\boldsymbol{\theta}$, 使用梯度下降法可以有效地求解此优化问题, 更新公式为:

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{new}} = \boldsymbol{\theta}_{\text{old}} - \alpha \nabla E(\boldsymbol{\theta}_{\text{old}}, \mathbf{x}) \quad (10)$$

其中, α 是学习率, ∇E 是误差函数 E 关于 $\boldsymbol{\theta}$ 的梯度。通过这种方法, 数字孪生技术不仅能够对计量标准器进行实时校准, 还可以通过数据驱动的方法优化校准参数, 从而实现更高的校准精度和效率。此算法的实际应用表现在其能够动态适应不断变化的测量条件和设备状况, 确保计量标准器在其生命周期内始终保持在最佳校准状态, 极大提升了校准操作的智能化和自动化水平^[19-20]。

3.5 优化案例分析

某国家级计量检测实验室在对精密电学计量标准器进行远程校准时, 发现传统的校准方式存在较大的误差波动, 影响测量数据的稳定性和溯源能力。实验室采用的传统远程校准方法依赖于预设的校准模型, 仅基于历史数据进行参数设定, 无法实时修正误差, 导致校准结果的准确

性受到限制。为提高校准精度, 该实验室引入了数字孪生技术, 通过建立高精度的计量标准器数字模型, 结合实时数据采集、虚拟仿真和优化决策支持, 实现校准过程的智能化调控。主要包括以下关键环节: ①数字孪生模型构建: 基于标准器的物理特性建立高精度数学模型, 模拟其动态响应行为; ②实时数据采集与处理: 利用高精度传感器获取标准器运行数据, 并采用卡尔曼滤波优化测量值; ③校准过程虚拟仿真: 通过仿真模拟不同环境条件下的校准误差, 预测可能的偏差, 并调整校准策略; ④优化和决策支持: 采用梯度下降算法动态调整校准参数, 确保测量误差最小化。

3.6 优化成效分析

为了量化数字孪生技术的应用效果, 实验室对比了技术应用前后的校准数据, 结果如表 1 所示。从数据对比结果可以看出, 数字孪生技术的引入显著提升了计量标准器远程校准的精度和效率。这一优化的核心在于数字孪生技术能够基于实时测量数据动态修正校准参数, 使标准器在各种测量条件下都能保持高精度的测量性能。此外, 智能优化决策算法通过自适应调整校准策略, 使得远程校准过程更加高效和精准, 减少了人工干预的需求, 提高了远程校准系统的自动化程度。

表 1 技术应用前后的校准数据

评估指标	传统远程校准	数字孪生优化校准	改善幅度
校准误差 / μV	2.5	0.8	68%
误差修正时间 /s	12	3	75%
数据同步延迟 /ms	150	45	70%
远程校准成功率 /%	85	98	13%
校准周期 /h	5	2	60%

4 结束语

本文深入研究了数字孪生技术在计量标准器远程校准中的应用, 明确了其在提高校准精度、效率及减少人工误差方面的显著优势。通过构建物理设备的高精度虚拟模型, 并实现实时数据的同步更新和交互, 数字孪生技术不仅提升了远程校准的操作便捷性, 也确保了校准过程的精确可靠。研究表明, 该技术能有效降低传统校准方法中人为因素引入的误差, 增强计量数据的一致性和可追溯性。未来, 随着人工智能算法的优化、数字孪生技术的进一步发展及高精度测量技术的应用, 计量标准器的远程校准预计将朝着更高层次的智能化、自动化和网络化方向发展。

参考文献

[1] 黄超, 谢厚旻, 花海飞, 等. 数字孪生技术与信息安全在

- 智慧体育场馆中的研究[J]. 现代建筑电气, 2024, 15(12): 12-18+28.
- [2] 付希义, 田亮, 张庆萍, 等. 数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J]. 水利水电快报, 2024, 45(S2): 104-107.
- [3] 蔡仰楠, 邓航, 何芊蓉, 等. 基于数字孪生技术的船舶搁浅预警方法研究[J]. 珠江水运, 2024, (24): 4-6.
- [4] 黄夏明, 杨俊华, 童乐, 等. 基于数字孪生的隧道钻爆法智能施工关键技术[J]. 低温建筑技术, 2024, 46(12): 102-106.
- [5] 王火平. 基于数字孪生技术的南海深水导管架平台健康管理研究[J]. 中国海洋平台, 2024, 39(6): 62-71.
- [6] 朱荣森. BIM技术在数字孪生泵站运行中的应用研究[J]. 水上安全, 2024, (24): 40-42.
- [7] 邓森, 李颖, 赵光辉, 等. 数字孪生技术在大藤峡工程洪水防御中的应用[J]. 广西水利水电, 2024, (6): 136-138+147.
- [8] 席丹, 陈洞杉. 城镇燃气行业数字孪生技术的研究与应用[J]. 上海煤气, 2024, (6): 23-24+33.
- [9] 王娟, 赵美玲, 谢晓君. 数字孪生技术在智慧城市建设中的应用与应用策略研究[J]. 房地产世界, 2024, (24): 19-21.
- [10] 刘馥铭, 赵云, 单怡琳, 等. 新型电力系统下的数字孪生技术投资策略研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2024, 26(6): 53-62.
- [11] 陈阿琴, 刘民, 丁蔚, 等. 空间站计量标准器适应性研究地面验证探索[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(11): 57-62.
- [12] 樊春燕, 高小其, 王小娟, 等. 氦计量标准器量值传递技术研究与应用[J]. 地震, 2024, 44(3): 73-85.
- [13] 关增建. 祖冲之对古代计量标准器的研究[J]. 质量与标准化, 2024, (4): 33-36.
- [14] 潘军. 眼科光学仪器裂隙灯显微镜计量标准器设计应用及测量不确定评定[J]. 中国标准化, 2022, (23): 200-202.
- [15] 许建军, 张书伟, 贾会. 检定紫外-可见分光光度计波长误差的标准器选择[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(10): 1-3.
- [16] 吉林省计量院解决新冠病毒检测关键设备PCR仪计量标准器量值溯源难题[J]. 中国计量, 2022, (9): 146.
- [17] 杨志杰, 周倩倩, 梁珺成, 等. 人体甲状腺中 ^{131}I 活度测量的计量标准器研制[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 95-100.
- [18] 陈岫, 梁庆姣, 杨经荣. 计量标准器及配套设备的配置[J]. 中国计量, 2021, (9): 59-61.
- [19] 刘娟. 如何开展计量标准器及配套设备的科学管理[J]. 中国质量与标准导报, 2020, (3): 68-69.
- [20] 钟青, 袁文泽, 史艳平, 等. 毫米波功率计量标准器芯片的研制[J]. 计量学报, 2019, 40(2): 329-332.