

计量校准中机械力学模型的应用研究

安子豪

(河南理工大学, 河南 焦作 454003)

摘要 计量校准直接决定了工业生产、科研试验等领域的精度控制水平, 而机械力学模型的出现, 则可凭借量化校准对象的结构特性、受力状态, 为解决传统校准中动态误差难补偿、复杂工况适配差等问题提供技术路径。基于此, 本文围绕机械力学模型的应用基础与约束条件展开分析讨论, 深入分析其在几何量、力值扭矩等场景的技术策略, 提出模型构建、参数辨识与优化的关键技术, 旨在对提升计量校准的精准度、稳定性与适用范围有所裨益, 进而推动技术的可持续发展。

关键词 计量校准; 参数优化算法; 机械力学模型

中图分类号: TH113

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.004

0 引言

计量校准的核心目标是实现量值的溯源与传递, 随着数字化时代的到来, 被校对象的结构复杂度、运动动态性进一步提升, 传统依赖经验公式、静态标定的校准方法已逐渐无法满足微米级精度需求。而机械力学模型可利用抽象校准对象的力学行为, 建立量化关系, 精准揭示校准过程中力、位移等物理量的内在关联, 实现误差的预测、补偿与校准流程的优化。因此, 研究计量校准中机械力学模型的应用策略, 有助于推动计量校准技术向高精度、宽量程方向发展。

1 计量校准中机械力学模型的应用前提与约束条件

机械力学模型在计量校准中的应用是以刚体力学、弹性力学等理论为支撑, 结合计量学的量值传递原理, 形成完整的技术体系。

刚体力学模型适用于校准对象变形可忽略的场景, 需要优先创立运动学方程, 描述其位置、姿态的变化规律, 典型应用以三坐标测量机的运动轨迹校准、几何量测量仪的姿态误差分析为主。而弹性力学模型则聚焦校准对象的弹性变形特性, 基于胡克定律、梁弯曲理论, 量化外力作用下的变形量, 为结构变形导致的校准误差提供补偿依据。

机械力学模型在计量校准中的有效应用需确保模型假设的合理性, 根据校准对象的结构特性与工况条件, 适当简化物理模型, 避免过度复杂, 造成计算冗余。同时, 也要保证参数辨识的准确性, 借助高精度检测设备与辨识方法获取真实参数, 并在计量校准阶段, 明确校准环节的受力边界、约束边界, 确保模型与实际工况的一致性。

2 机械力学模型在核心计量校准场景中的应用策略

2.1 几何量计量校准的模型应用策略

几何量计量校准主要涵盖长度、角度、形状等参数的校准, 机械力学模型的应用目标需要放在补偿结构变形与运动误差上。

2.1.1 刚体运动学模型用于姿态误差校准

在三坐标测量机等几何量测量设备的校准中, 设备的运动部件(比如X、Y、Z轴导轨、测头)的姿态偏差会引入测量误差。为此, 可采用刚体运动学模型, 将运动部件视为刚体, 建立基于欧拉角的姿态误差方程, 从而量化平移误差与旋转误差(比如滚转角、俯仰角)。具体应用策略表现为: 通过激光干涉仪等设备测量运动部件在不同位置的姿态参数, 基于最小二乘法, 辨识模型中的误差系数。之后, 建立姿态误差与测量结果的映射关系, 生成误差补偿矩阵。再将补偿矩阵嵌入测量设备的控制系统, 实现姿态误差修正。

2.1.2 弹性变形模型用于结构应力误差补偿

大型几何量校准对象在自身重力、夹紧力作用下难以避免地会产生弹性变形, 致使校准结果偏差。为此, 可采用基于梁弯曲理论的弹性变形模型, 通过有限元分析, 构建校准对象的三维力学模型, 明确重力、夹紧力的作用点与分布规律。之后基于材料的弹性模量、泊松比等参数, 计算关键测量位置的变形量。通过将变形量转化为校准误差, 制定反向补偿策略。例如: 在大型机床导轨直线度校准期间, 根据床身的弹性变形模型, 计算不同支撑位置下的导轨挠度, 进而针对性地调整支撑点高度, 实现变形补偿, 能够将直线度校准精度提升近40%。

2.2 力值与扭矩计量校准的模型应用策略

力值与扭矩计量校准是工业生产中强度检测、装配质量控制的重中之重，而机械力学模型的作用则在于优化加载特性、补偿系统误差，最大程度提升校准的准确性。

2.2.1 弹性力学模型用于标准测力仪校准

标准测力仪作为力值传递的器具之一，其弹性体的力—变形特性直接决定了校准精度。为此，可采用弹性力学模型，打造弹性体的力—位移关系，根据弹性体的结构形式，基于胡克定律，建立应力—应变方程。凭借应变片测量弹性体的应变信号，再结合模型参数，计算实际作用力大小。并在此基础上引入温度修正系数，用以补偿环境温度对弹性模量的影响。而对于高精度标准测力仪来说，则更适合用三维弹性力学模型，结合有限元分析，进一步优化弹性体的结构设计，使力值校准的相对误差小于 $\pm 0.01\%$ 。除此之外，还要针对动态力值校准，在弹性力学模型基础上引入阻尼项，设置力—位移—速度的动力学响应模型，旨在补偿加载期间的惯性误差以及振动误差^[1]。

2.2.2 动力学模型用于动态力值校准优化

动态力值校准应充分考虑加载系统的动态响应特性，采用质量—弹簧—阻尼动力学模型，实现校准流程的改进与优化。具体策略为：依靠阶跃加载实验采集系统的动态响应曲线，结合最小二乘拟合辨识模型的固有频率、阻尼比等参数，基于动态响应特性，针对性调整加载速度、加载方式，最大程度规避共振现象。通过创建动态力的传递函数，将被校对象的响应信号进一步转化为真实力值。以冲击力度校准作为研究对象，采用二阶动力学模型，补偿加载系统的惯性效应，使动态力值校准的峰值误差小于 $\pm 0.5\%$ ，上升沿时间测量精度提升至 $1 \mu\text{s}$ 。

2.3 动态特性计量校准的模型应用策略

动态特性计量校准主要针对振动、冲击等动态物理量，主要需求表现为准确表征校准对象的动态响应规律，在模型应用期间，应着手建立动态传递函数与误差预测模型。

2.3.1 振动系统动力学模型用于振动校准

振动校准需要优先确定被校振动传感器的灵敏度、频率响应特性，采用多自由度动力学模型，描述振动台与传感器的耦合运动规律，具体策略为：将振动台视为激励源，被校传感器看作振动系统，建立位移、速度间的动力学方程。通过正弦扫频实验，采集传感器的输出信号，结合傅里叶变换辨识模型的频率响应函数。基于模型分析传感器在不同频率下的相位偏差

与幅值误差，生成校准报告。对于多自由度系统，可凭借模态分析方法，分离各阶固有频率对应的振动模式，旨在防止模态耦合导致的校准误差，使振动校准的频率范围扩展至 $5 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$ 。

2.3.2 冲击动力学模型用于冲击校准

冲击校准的重点在于模拟真实冲击环境，并准确测量冲击峰值与持续时间。采用刚体冲击动力学模型，描述冲击锤与被校件的碰撞过程，基于动量守恒定律与能量守恒定律，建立冲击过程的动力学方程，量化碰撞时间、冲击峰值与冲击能量的关系。依靠动态调整冲击锤的质量、冲击速度，模拟不同类型的冲击波形。通过引入接触刚度与阻尼参数，修正碰撞过程中的能量损失，使冲击峰值校准误差小于 $\pm 1\%$ 。

2.4 复杂结构件计量校准的模型应用策略

复杂结构件，比如航空航天零部件、精密仪器核心组件，考虑到其计量校准面临结构异形、多参数耦合等挑战，因此在应用机械力学模型时，应以实现“间接测量—模型换算”的校准模式为主。

采用有限元模型与多体动力学模型相结合的方法，依靠三维扫描获取复杂结构件的几何模型，基于有限元分析软件构建力学模型，明确关键测量点与不可达点的力学关联。之后，校准标准器具测量关键可达点的物理量，基于模型换算不可达点的参数。再引入误差传递模型，量化测量误差在模型换算过程中的传递规律，确保校准结果的可靠性。以航空发动机叶片的轮廓度校准作为研究对象，通过建立叶片的弹性力学有限元模型，测量叶片边缘的应变信号，换算叶片内部关键截面的轮廓偏差，可切实解决传统测量方法无法触及内部截面的难题，校准精度达到 $\pm 0.02 \text{ mm}$ ^[2]。

3 机械力学模型的构建与优化关键技术

3.1 模型构建的核心步骤

机械力学模型在计量校准中的构建需严格遵循理论建模、参数辨识、验证修正的流程，确保模型的适用性。

首先，根据校准对象的物理特性，选择适合的力学模型类型，比如刚体、弹性模型等，明确模型的基本假设与边界条件。简化物理结构，提取力学参数，建立数学方程。以力值校准为例，应简化弹性体为等截面梁，基于梁弯曲理论建立力—应变关系方程。在动态校准中，则要简化系统为单自由度质量—弹簧—阻尼模型，建立动态响应方程^[3]。

其次，要进行参数辨识，采用实验测量与数据拟合相结合的方法，获取模型参数的准确值。对于材料参数，通过标准试样的拉伸、压缩实验测量。对于几

何参数，则需通过高精度激光测距仪、三坐标测量机测量。针对难以直接测量的参数，比如接触刚度，则要采用间接辨识方法，测量模型的输出响应，反推参数值。

最后，要通过校准实验验证模型预测结果与实际测量结果的一致性，采用均方根误差、相对误差等指标评估模型精度。若模型误差超出允许范围，需分析误差来源，进行针对性修正。比如若忽略温度影响导致模型误差过大，需引入温度修正项。

3.2 模型优化的关键技术

3.2.1 模型降阶技术

复杂校准对象的三维有限元模型通常包含大量单元与节点，计算效率低下，难以满足实时校准的需求。为此，可采用模型降阶技术，在保证精度的前提下简化模型结构，例如：保留对校准结果影响显著的前几阶模态，忽略高阶小振幅模态；将模型的自由度凝聚到关键测量点，减少计算量；通过少量样本点的计算结果构建简化模型，替代复杂有限元模型进行快速预测。以大型机床床身变形校准为例，可采用模态截断法，将有限元模型的自由度从10万级降至1 000级，计算效率提升50倍，同时模型预测误差小于±2%。

3.2.2 参数优化算法

模型参数的准确性直接决定了模型精度，因此，可采用智能优化算法提升参数辨识的鲁棒性。例如：粒子群优化算法，适用于多参数、非线性的参数辨识问题，凭借粒子群的全局搜索与局部搜索平衡，找到最优参数组合；遗传算法，基于生物进化理论，通过选择、交叉、变异操作优化参数，适用于复杂多峰函数的参数辨识；贝叶斯优化算法，通过概率模型预测参数的后验分布，提升小样本数据下的参数辨识精度^[4]。

3.2.3 多场耦合建模技术

在复杂环境下，比如高温、强电磁，需要校准对象的力学行为受温度、电磁等多场因素影响，采用多场耦合建模技术。先计算温度场、电磁场等物理场，将其结果作为力学场的载荷条件，建立力学模型^[5]；或是直接通过耦合控制方程，同时求解多场物理量，适用于强耦合场景。以高温力值校准作为研究对象，在计量校准期间，可依靠温度—力学顺序耦合模型，先计算弹性体的温度分布，再基于温度分布计算热应力与弹性变形，使高温环境（100～300 °C）下的力值校准误差小于±0.15%。

3.3 模型不确定分析

机械力学模型的不确定性主要来源于参数测量误差、模型假设近似、边界条件不确定性等，因此，应

采取科学的不确定性分析方法，量化其对校准结果的影响。例如：蒙特卡洛模拟方法，通过随机抽样生成大量模型参数样本，基于参数的概率分布，代入模型计算校准结果的分布特征，用以获取校准结果的扩展不确定度。在实际应用期间，应优先确定各模型参数的概率分布类型，如正态分布、均匀分布，得到其标准不确定度。之后基于概率分布随机生成N组参数样本，再将每组样本代入模型计算校准结果。统计校准结果的均值、标准差，根据置信水平，计算扩展不确定度。除此之外，还可采用灵敏度分析方法，量化各模型参数对校准结果的影响程度，识别关键不确定度来源。常用方法包括局部灵敏度分析与全局灵敏度分析。例如：在几何量校准模型期间，可通过Sobol法（基于方差的敏感性分析法），分析得出弹性模量、温度是影响校准结果的关键参数，之后，针对这两项参数，采取高精度测量与实时补偿措施，使模型不确定性降低40%^[6]。

4 结束语

通过对计量校准中机械力学模型的应用策略展开分析讨论发现，该模型可基于经典力学原理，适配力值、质量、扭矩等计量校准场景，通过描述被校对象的力学行为，构建理论建模、数据处理、模型验证的完整应用体系。在选择模型类型、明确参数与边界条件以及模型优化后，可有效解决传统校准中误差难量化、场景适配性不足等问题。在实现计量校准从传统经验驱动向模型驱动的转变基础上，也能显著提升校准结果的精准度与实用性，具有一定的推广价值。

参考文献：

- [1] 敏乾.电气传动机电扭振动力学模型设计探究[J].技术与市场,2024,31(07):25-28.
- [2] 张都,马保吉.加油车罐内液体侧向晃动等效机械模型[J].力学与实践,2025,47(01):171-178.
- [3] 任明珠,马青亮,刘伯涛.钳形电流表半自动计量校准软件的设计与实现[J].计量与测试技术,2024,51(01):105-106,109.
- [4] 徐沛,王文娟.基于自动控制的远程计量校准技术研究[J].计算机时代,2023(11):6-11.
- [5] 赵彬,侯庆强,王谦,等.考虑机械故障因素的光伏阵列功率预测模型研究与应用[J].模具制造,2024,24(10):233-235.
- [6] 叶艺生,骆建.5G数字移动通信测试仪校准方法分析与建议[J].计量与测试技术,2022,49(06):91-94.