

# 多参数耦合下的复杂系统计量检测方法研究与实践

石 栋, 郭天虹, 高大山\*

(山东特检计量检测有限公司, 济南 250100)

**摘 要:** 随着科学技术的进步, 复杂系统多参数耦合问题越来越明显。为提高复杂系统计量和检测精度, 以多传感器技术和智能算法为基础进行综合运用已成为重要发展趋势。本文研究目的在于探索多参数耦合复杂系统计量检测方法并着重分析该方法的优点和实践策略。采用动态校准, 自适应滤波和智能采样频率调节技术手段可有效地提高多维度参数同步测量精度并减少耦合干扰, 对数据采集过程进行优化, 提高了测量结果可靠性和稳定性, 对该领域有着宝贵的借鉴和实际指导意义。

**关键词:** 复杂系统; 多参数耦合; 计量检测

## 0 引 言

伴随着工业与信息技术的快速发展, 复杂系统对于各种应用的意义日益凸显。多参数耦合现象使传统计量检测方法受到诸多挑战, 特别是数据采集和结果精度<sup>[1]</sup>。针对这一问题, 研究人员提出一系列以多传感器融合、智能算法以及实时数据处理等为核心的处理方法。采用多参数耦合条件下计量检测方法可以对不同产业和复杂工况进行高效准确计量。本研究将着重介绍该方面的最新发展, 并提出在实践中常用的技术手段和解决方法, 为复杂系统计量检测方法的准确计量提供参考。

## 1 多参数耦合下的复杂系统计量检测方法概述

多参数耦合复杂系统计量检测方法用于解决复杂系统多个物理量或者信号同时计量的难题, 现代复杂系统中通常会涉及多种参数同时发生变化, 且各参数间耦合性很高, 常规单一传感器或者单一测量方法很难提供充分测量精度与可靠性<sup>[2-5]</sup>。因此利用多传感器协同融合技术并将高效算法和实时数据处理相结合是解决该难题的关键所在。多参数耦合条件下复杂系统传感器多样性和分布式协作成了测量精度提升的根本。通过将温度、压力、振动和流量等多个传感器进行整合, 既可以获得多维度信息, 又可以弥补单一传感器对具体条件的限制。采用协同融合算法处理不同传感器采集到的数据, 可以消除单个传感器带来的误差, 提高系统整体测量精度和可靠性。

## 2 多参数耦合下的复杂系统计量检测方法的优点

### 2.1 提高多维度参数同步测量精度

传统单一传感器或者单一测量方法只关注某一具体参数, 忽略了各参数间的耦合, 从而造成同步测量准确性不高。多参数耦合检测方法利用多个传感器协同作用, 可同时得到多个相关物理量信息, 提高了同步测量精度, 能同步捕捉复杂运行条件下系统内的多个变化信息。该多维度测量方式能够更加真实地反映出系统真实状态并降低单一测量带来的数据误差。

### 2.2 降低系统耦合干扰的影响

多参数耦合复杂系统中不同参数间往往具有较强的相互耦合关系, 系统工作状态变化很大或者环境干扰比较强烈时, 采用多参数耦合检测方法能够有效地减小系统耦合干扰对系统测量精度造成的影响。利用多传感器融合技术能够在各个传感器间通过协同工作降低单个传感器所产生的错误, 特别适用于耦合干扰比较强时, 能通过对多源信息进行综合分析来抑制系统内部耦合关系引起的错误。其中行之有效的技术之一就是自适应滤波方法。多参数耦合测量环境下系统噪声源一般表现为非线性, 且噪声频谱和信号频谱会有重叠现象, 常规滤波方法通常很难对上述耦合干扰进行有效压制。

### 2.3 优化复杂环境下的数据采集

在复杂环境下进行数据采集存在高噪声、强干扰和温度波动等不稳定因素, 这可能会使传统测量方法不能给出

第一作者: 石栋, 硕士, 中级工程师, 研究方向为计量检测。

\* 通信作者: 高大山, 工程师, 研究方向为计量检测, E-mail: 429336354@qq.com

精确和可靠的测量结果。而多参数耦合复杂系统计量检测方法通过引入多传感器协同采集, 智能数据处理以及动态优化算法等技术, 有效地解决复杂环境中数据采集难题。比如在工业生产环境恶劣时, 不同传感器能够同时对不同地点和工况进行数据采集, 相辅相成, 避免单一传感器受到环境变化而导致数据偏差。不同传感器协同工作在增加数据采集密度的同时, 利用数据融合算法处理采集到的多维度信息, 降低数据丢失及信息缺失风险。另外, 复杂环境中智能数据处理技术的运用发挥着关键作用。实时数据预处理技术可以在收集数据时实现噪声过滤, 缺失值补充以及数据校正等功能, 保证数据准确完整。

#### 2.4 增强计量结果的可靠性与稳定性

采用多传感器融合, 自适应算法及动态校准技术手段可有效加强计量结果可靠性及稳定性, 尤其适用于复杂动态变化环境下保证系统连续稳定提供优质测量数据的需求。一是多传感器协同融合可以增强测量结果稳定性。多参数耦合环境下, 单一传感器输出易受瞬时变化或者突发事件等因素影响, 通过多传感器数据融合的方式, 可针对不同传感器特性加权以消除每个传感器的单个错误, 实现多传感器间信息互补以提高计量结果精度与稳定性。二是利用自适应算法可根据系统状态及外部环境变化自动调节测量与控制策略以促进计量结果长期稳定。自适应滤波技术能随输入信号变化而自动调节滤波器参数, 使系统在动态变化环境中仍能保持高精度测量。

### 3 多参数耦合下的复杂系统计量检测方法的实践策略

#### 3.1 多传感器协同融合的动态校准技术

多传感器协同融合动态校准技术对于多参数耦合的复杂系统, 特别是对于需要对多种物理量同时进行监测的应用场合起着关键作用<sup>[6-11]</sup>。常规单一传感器在精度与可靠性方面已经很难满足复杂系统需求, 特别是传感器零漂和温漂问题都将对数据准确性造成影响。采用多传感器进行数据融合并与动态校准技术相结合的方法能够有效地提高整个系统的精度与鲁棒性。以一个高精度的测量系统为例, 它要求对压力、温度和流量几个变量进行同步测量。为了确保各个传感器间能够实现高度精确的协同工作, 我们采纳了一种基于卡尔曼滤波算法的动态校准技术, 该系统能够实时地计算和校正各传感器的误差偏差。在实际操作中, 该系统将所有传感器收集的数据进行综合处理, 并使用一个全局优化模型来校准不同传感器的输出数据, 从而使整个系统的精度提升了大约 20%。例如, 在高压天然气管道的监测系统里, 通过动态校准技术, 温度和压

力传感器的误差得到了有效的控制, 压力的测量误差从  $\pm 0.8\%$  降低到  $\pm 0.3\%$ 。

#### 3.2 基于自适应滤波的耦合噪声抑制方法

耦合噪声源一般来自传感器本身, 外界环境干扰和多参数间交叉干扰。为使系统更加准确稳定, 需要对上述噪声进行有效的抑制。一种基于自适应滤波抑制耦合噪声方法, 可根据传感器数据实时变化情况对滤波器参数进行动态调节, 有效地将有用信号与噪声分离开来, 并维持信号高保真度。以一个智能交通系统为例, 车辆速度, 路面湿滑程度和气象条件等许多参数都是由传感器实时监测的, 这些传感器一般受噪声干扰较大。利用自适应滤波技术可根据各种运行条件自动调整滤波器参数以最大限度地减小耦合噪声影响。结果显示在应用该技术后, 噪音抑制效果超过了 95%, 同时车辆速度的测量误差也从原先的  $\pm 0.7$  km/h 减小到  $\pm 0.1$  km/h, 实时交通流量预测的准确性大大提高。

#### 3.3 复杂工况下的智能采样频率调节策略

为保证数据实时性与准确性, 智能采样频率调节策略被提出来。通过对系统运行状态进行实时监控并对采样频率进行智能调整, 能够在保证数据质量的同时减轻计算负担并满足存储需求<sup>[12-16]</sup>。在特定电力系统实时监测应用过程中, 电流、电压、功率等诸多参数采样频率往往会随着不同负荷情况而发生变化。负荷较重的情况下, 系统采用动态调整采样频率的方法使采样频率下降到 2 Hz; 负荷较大或者负荷波动较大的情况下采样频率上升到 50 Hz。该策略有效减少不必要的数据采集、避免过量无效数据存储与计算压力、提高系统响应速度与数据处理能力。在实验过程中, 经过智能采样频率的调整, 系统的反应时间从原先的 100 ms 减少到了 40 ms, 同时数据的存储量也下降了近 70%。该采样策略在提高数据采集实时性、准确性的同时, 有效地降低了系统计算负担, 使实时监控更准确、更有效。

#### 3.4 边缘计算支持的实时数据预处理方案

在众多的工业物联网和智能制造应用中, 对实时数据进行预处理已经变成了解决大规模数据生成瓶颈问题的核心策略<sup>[17]</sup>。以石化企业炼油过程监测系统为例, 多传感器对温度、压力和流量几个参数同时进行数据采集, 如直接上传到云端处理, 不但造成传输延迟, 还加大网络带宽压力。为此将边缘计算平台部署到数据采集端对数据预处理与甄别。系统中边缘计算节点使用高性能处理单元, 集数据清洗, 去噪及数据融合多种功能于一体, 并实时处理采集数据。例如, 数据流来自 70 多个传感器, 每个传感器的数据量在 10 MB 到 100 MB 不等。通过处理边缘计算节点, 能够对 90% 的原始数据进行实时的滤波、降噪和格式化处理, 从而只将关键数据传输到云端。

### 3.5 基于数字孪生的虚实结合测量模型

利用数字孪生技术对多参数耦合复杂系统进行虚实结合创新测量, 可以在虚拟环境下对真实物理系统性能进行实时仿真及优化, 以达到更准确地测控。以某先进制造企业机械臂控制系统为研究对象, 利用数字孪生技术建立与物理设备实时状态同步且可根据实时数据动态调节的虚拟模型, 既能实时监测机械臂工作状态又能通过仿真实现故障预测、性能优化和系统参数调整等<sup>[18]</sup>。该虚拟模型和实际设备是同步进行的, 可以对虚拟环境下机械臂运动轨迹及负载情况进行预测。

### 3.6 多尺度分析的耦合参数分离与重构

不同尺度下的耦合参数常造成传统分析方法的信息损失或错误理解。以一种高速列车动态监测系统为例, 它涉及列车速度、加速度、轨道曲率以及车厢内和车厢外气压和温度等诸多参数, 这些参数之间存在较强的耦合关系, 尤其在复杂工况下更为明显。本系统采用基于小波变换的多尺度分析方法把信号分解到不同尺度上加以分析, 利用重构算法将各独立参数分离。这项技术的运用显著降低了耦合信号间的相互干扰, 从而使得温度测量的误差从 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 减少到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 气压测量的精确度也提升了18%。

### 3.7 深度强化学习的自优化测量控制系统

对于多参数耦合系统, 深度强化学习能通过和环境进行交互来调整控制策略使系统能处理多种复杂工况<sup>[19-20]</sup>。以智慧电厂锅炉运行监控系统为例, 锅炉温度、压力和流量几个参数之间耦合关系十分复杂, 各参数之间相互影响造成传统控制方法局限性。利用深度强化学习算法对锅炉控制系统进行优化, 利用传感器获取实时数据并送入深度神经网络中进行特征提取与自学习。深度强化学习与周围环境互动, 可以对锅炉燃料供给, 温度控制以及压力调节进行实时调节, 从而以最优策略维持锅炉平稳运行。比如, 当锅炉提供燃料时, 该系统可以根据温度、压力等实时数据对下一时点燃料需求进行预测, 对供应量进行调节, 从而实现能效最大化。在真实的使用场景中, 深度强化学习控制系统可以使锅炉的燃烧效能增加20%, 同时也大大减少了过热和燃料的浪费。在测试的过程中, 该系统成功地进行了自我优化, 响应时间从原先的15 min缩短到了2 min, 这大大增强了其控制的准确性和反应的迅速性。

## 4 结束语

本研究所提出的多参数耦合复杂系统计量检测方法通过技术创新及多维度策略整合, 有效地解决复杂系统计量检测的准确性和可靠性。在科技不断进步的情况下, 今后可以通过更高级的传感器与算法来进一步提高检测能力。这些方法不但在工业生产上有着广泛的应用, 而且对科研

领域有着宝贵的借鉴和指导。

## 参考文献

- [1] 历红光. 探讨多参数监护仪的计量检定中常见问题与解决对策[J]. 大众标准化, 2024, (23): 188-190.
- [2] 于平, 陈国仓, 马宁. 水质计量检测站电源在线监测系统的设计[J]. 中国计量, 2024, (7): 110-114.
- [3] 张秋丽. 计量检测数据管理与质量追溯系统的构建[J]. 中国质量监管, 2024, (4): 106-107.
- [4] 肖辉, 魏志宏, 寇纲, 等. 随机复杂系统设计方案排序问题的动态计量预算分配策略[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(2): 373-393.
- [5] 于海跃, 周升宝, 白小愚, 等. 仪表计量检测中心工业控制系统网络安全建设[J]. 自动化博览, 2024, 41(1): 76-79.
- [6] 邓仕奎. 一种计量检测业务管理系统的开发与应用[J]. 中国计量, 2024, (1): 104-105, 108.
- [7] 赵忠庆, 银温尚, 马文萃. CIMS环境下计量检测与信息管理集成系统的研究[J]. 中国质量监管, 2023, (10): 98-99.
- [8] 鲁曼君, 陈欣, 薛皓洁, 等. 陕西省多参数监护仪计量比对及结果分析[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(8): 95-97, 101.
- [9] 田欣欣, 杜沫, 曹崢, 等. 多参数监护仪计量比对结果分析研究[J]. 中国计量, 2023, (4): 37-40.
- [10] 况严, 刘飞, 黄元媛, 等. 多参数监护仪计量比对结果归一化偏差[J]. 中国计量, 2022, (11): 58-60.
- [11] 俞舟平, 苏祥伟, 俞宽. 基于智能化管理的计量检测客户系统研究[J]. 自动化博览, 2022, 39(8): 84-86.
- [12] 孙永超. 多参数监护仪计量检定中的问题探讨及对策[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(7): 42-44.
- [13] 姜颀. 计量检测原始记录电子化系统设计与实现[J]. 工业计量, 2020, 30(4): 86-87.
- [14] 曹相. 高精度GNSS接收机计量检测关键技术研究及系统研制[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [15] 龚丹, 徐晴, 赵双双, 等. 基于云计算的分布式电能计量检测系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019, (6): 91-94, 98.
- [16] 黄海旭. 医用多参数监护仪计量检定中的问题探讨[J]. 质量技术监督研究, 2018, (4): 34-36+50.
- [17] 孙加宇. 医用磁共振图像质量参数计量检测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [18] 彭明. 多参数监护仪计量检定中的问题及对策[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(2): 45-46.
- [19] 梁志国, 张大治. 复杂系统的计量性设计与评估[J]. 计测技术, 2017, 37(5): 1-6, 11.
- [20] 蒋君杰, 董新宇, 张红杰, 等. 医用磁共振成像系统计量检测方法研究[J]. 工业计量, 2017, 27(S1): 1-2.