

提升复杂环境下称重系统抗干扰能力的优化设计研究

□陈洁¹ 罗锋² 杨栋³ 裘尧华¹ 赵志灏¹ 张子超¹

1. 浙江省质量科学研究院 (浙江省市场监管测力与称重计量重点实验室)
2. 慈溪市质量技术监督检验检测服务中心
3. 无锡市检验检测认证研究院

【摘要】工业现场环境复杂,存在低频振动、强电磁干扰、高冲击等不利因素,这些因素易对称重系统的测量准确度与长期稳定性造成显著干扰,进而影响系统的实际应用效果。为确保测量系统符合预期使用要求,提升称重系统在复杂环境下的抗干扰能力已成为优化设计的基本目标。本项目围绕称重系统的结构设计,遵循“感知—算法—系统”的整体架构开展研究与优化,通过采用环境自适应传感设计、时序信号增强方法以及“硬件同步+软件对齐”的双重时序校验机制等技术手段,有效提升了称重系统的环境适应性与抗干扰性能。试验结果表明,在复杂工况下,系统计量误差稳定可靠,能较好地解决工业环境下的称重测量难题。

【关键词】称重系统;复杂环境;抗干扰设计;测量稳定性

文献标识码:A 文章编号:1003-1870(2026)02-0019-05

Optimization Design Research on Improving Anti-interference Capability of Weighing Systems in Complex Environments

【Abstract】The industrial environment is complex, with adverse factors such as low-frequency vibration, strong electromagnetic interference, and high impact. These factors can significantly interfere with the measurement accuracy and long-term stability of the weighing system, thereby affecting the actual application effect of the system. To ensure that the measurement system meets the intended usage requirements, improving its anti-interference capability in complex environments has become a basic goal of optimization design. This project focuses on the structural design of the weighing system, and conducts research and optimization in accordance with the overall architecture of "perception-algorithm-system". By employing technical approaches such as environmental adaptive sensing design, timing signal enhancement method and dual timing verification mechanism of "hardware synchronization + software alignment", the environmental adaptability and anti-interference performance of the weighing system are effectively improved. The experimental results show that due to the stable and reliable measurement error under complex working conditions, the system can effectively solve the weighing measurement problems in industrial environments.

【Keywords】weighing system; complex environment; anti-interference design; measurement stability

引言

近年来,随着我国在大型高端装备制造、钢铁冶金转型升级、碳达峰碳中和以及智能交通等领域

的快速发展,对称重计量技术的需求持续攀升,该技术已成为推动科技创新与产业深度融合的关键支撑。然而,在振动与冲击、强电磁干扰、高温高湿

等复杂环境下，传统称重计量装备在传感机制、数据处理算法与抗干扰能力等方面仍存在明显短板，严重制约了称重测量系统的精准、稳定与可靠，难以满足高端应用需求。为突破当前技术瓶颈，提升复杂环境下称重系统的综合性能，已成为支撑相关行业向高端化、智能化、绿色化转型的重要任务。特别是在冶金工艺升级、交通基础设施智能监测、能源装备精准控制等应用背景下，攻克复杂环境下高可靠、高精度称重系统的关键技术，显得更加重要与迫切。

1 复杂环境对称重测量系统影响因素分析

称重测量系统主要包含承载机构、传感模块、数据处理器、控制系统、系统通信接口等关键部件，在工况现场，复杂环境对称重测量系统的影响因素众多且常相互耦合，主要可归纳为以下几类：

(1) 环境物理干扰因素

机械振动与冲击影响：如工程机械作业、锻造冲压、交通桥隧的固有振动或过往车辆引起的持续振动，会导致传感器输出信号漂移、波动。

宽温范围与高湿影响：如冶金高温区附近温度变化大、沿海区湿度大等，会导致传感器弹性体、应变计及电子元件的材料特性、灵敏度变化与零点漂移。

化工粉尘与腐蚀影响：盐雾、化工粉尘或腐蚀性气体环境，可能侵蚀传感器接线盒、电缆接口及电子线路，导致绝缘性能下降、信号短路或器件失效等。

(2) 强电磁干扰因素

强电磁场影响：工业环境下大型电机、变频器、电力线路、焊接设备等产生的强电磁辐射，可能耦合到传感模块、数据处理器、控制系统，严重时会导致信号失真、系统死机。

电网电源干扰影响：电网电压波动、谐波污染，或同一电网内大功率设备的启停造成的瞬间电压跌落与浪涌，会影响数据处理器、控制系统的稳定工作。

(3) 称重系统自身与安装因素

传感器本身的局限：传统应变式传感器存在非线性、蠕变、滞后等固有特性，在复杂动态载荷下，若其固有频率与环境振动频率接近，易引发共振，

导致误差被放大。

安装与结构约束：基础沉降、秤台变形、机械结构约束未完全释放，会导致传感器受力不均，产生偏载进而影响稳定性。

信号传输与处理缺陷：称重系统长距离模拟信号传输易受干扰。数据采集卡的采样率、分辨率不足，或滤波算法不适应复杂环境，无法有效分离有效信号与噪声等。

总而言之，复杂环境下的称重测量问题，是一个涉及机械、电气、材料及信息处理的交叉学科挑战。解决上述影响因素需从传感器创新、系统设计优化、先进信号处理算法以及环境补偿模型等多维度进行系统性研究与技术攻关。

2 称重测量系统抗干扰优化设计

称重测量系统的抗干扰优化设计是一个系统工程，需从机械结构、传感模块、信号链路、数据处理到系统集成等进行全方位综合考量。其核心设计原则是通过抑制干扰源头、阻断传播路径、增强系统免疫、优化算法补偿等途径，建立一个集机械、电气、信号处理层面都具有高稳定性和高环境适应性的闭环称重测量系统，从而解决复杂工业现场高可靠、高精度的称重计量难题。

(1) 传感模块抗干扰的优化

传感器结构与工艺优化：优化弹性体结构，增强其对非目标方向力的抑制能力，降低横向干扰。选用低温敏感性材料制作弹性体，并在生产工艺中进行全工作温区补偿与蠕变补偿，以抑制环境温度变化与长期载荷引起的测量误差。设计具备防尘防潮能力的封装结构（如IP67防护等级），减少粉尘附着与冷凝水导致的信号漂移或失真。

采用多源传感的冗余设计：多源传感信号融合是应对复杂环境干扰的有效方法。该系统能够对不同传感器采集的信号进行数据采集、A/D转换、数据传输、数据分析与运算，并将处理结果实时显示或指示。通过系统内部各类接口，这些数据可靠接入计量监测平台，实现各状态数据的准确上传，进而为称重状态判断与决策提供支撑。采用多源传感冗余设计，还可通过数据间的互补性有效抑制单一传感器故障带来的风险，提升系统整体可靠性。

环境自适应传感技术的优化设计：如通过开发温

度-湿度-振动耦合补偿模型，采用多项式回归与神经网络动态修正传感器输出，有效提升抗环境的干扰能力。

(2) 信号处理层抗干扰算法的优化

针对机械振动噪声的优化：改进小波阈值去噪算法，保留有效称重信号高频成分。通过高采样率获取数据，再进行滑动平均或动态加权平均，抑制随机噪声。

针对电磁干扰的优化：根据干扰特性，灵活运用低通、带阻、自适应滤波等算法实时跟踪并抑制工频噪声及其谐波频率，动态调整滤波器参数，可以有效提升抗电磁干扰能力。

时序信号增强方法：设计基于卡尔曼滤波与LSTM的混合预测模型，区分真实载荷变化与环境扰动引起的信号波动，有效抵御环境扰动引起的信号变化。

(3) 机械结构与安装的优化

基础与承载器优化设计主要包括两个方面：首先，构筑坚固、稳定且抗沉降的系统基础，有效隔离外部应力通过基础传递至秤体，从而确保传感器处于理想的、无干扰的纯粹受力状态，获得准确的应力分布。其次，优化承载器的结构刚度并合理调节固有频率，使其远离主要环境振动频段，避免因频率耦合而产生共振，保障系统在动态环境下的测量稳定性与准确性。

传力与限位机构的优化主要包括两个目标：首先，通过设计合理的传力机构（如球面轴承或自适应复位装置），确保垂直载荷被低损耗、高保真地传递至传感器，同时有效解除水平方向与扭转等非测量方向的约束，避免引入附加应力。其次，设置高

精度的水平限位机构，使其能够在承受冲击、风力等横向干扰时有效抑制秤体位移，同时避免在垂直方向产生任何额外的力干扰，从而在动态环境中保持称重准确性与结构稳定性。

(4) 系统级抗干扰的优化

系统级抗干扰的优化可采用“硬件同步+软件对齐”的双重时序校准机制，以提升数据一致性与可靠性。硬件层面，通过精确时间协议实现传感器间的微秒级时钟同步，确保数据采集时刻统一。软件层面，利用动态时间规整算法对非均匀采样的多源数据进行时序对齐与插补，消除因采样时延或丢包带来的偏差。在此基础上，构建基于D-S证据理论的冲突数据决策模型，对异常或矛盾的传感器读数进行可信度评估与融合，有效识别并抑制单点失效或干扰。通过上述综合优化，系统在复杂工业环境下的测量精度、运行可靠性与整体环境适应性均得到显著增强。

3 面向复杂环境下称重系统的应用验证

将上述优化后的称重系统进行试验验证，试验验证主要从两个方面入手，一方面为实验室条件下模拟验证，另一方面为工况条件下的性能验证。

(1) 实验室模拟验证结果

因为在复杂环境下，称重系统通常量程大，在实验室条件下无法进行整机试验，所以采用模块试验法来验证模块在复杂工况下的结果是否符合预期的应用效果。

传感模块在特定温度下的试验结果：量程约为30t，温度范围（-20 ~ +60）℃，准确度等级为C1级，不同试验条件下的输出结果如表1所示。

表1 传感模块在不同温度下的试验数据

试验负荷 kN	参考示值 mV/V	基础试验温度20℃		试验温度-20℃		试验温度+60℃		mpe (ν)
		示值mV/V	误差(ν)	示值mV/V	误差(ν)	示值mV/V	误差(ν)	
0	0.00000	0.00000	0.000	0.0000	0.000	0.00000	0.000	0.35
40	0.27108	0.27123	0.073	0.27122	0.068	0.27120	0.058	0.35
90	0.60994	0.61018	0.126	0.61014	0.103	0.61009	0.077	0.35
140	0.94095	0.94903	0.125	0.94898	0.098	0.94887	0.043	0.35
190	1.28764	1.28776	0.059	1.28770	0.032	1.28751	-0.067	0.7
220	1.49095	1.49094	-0.005	1.49089	-0.030	1.49066	-0.151	0.7
290	1.96535	1.96471	-0.326	1.96272	-0.317	1.96429	-0.539	0.7

称重指示控制模块在强电磁干扰下的试验结果：辐射电磁场试验严酷度，其频率范围：（80 ~ 2000）MHz，场强为10V/m；传导射频场试验严酷度，频率范

围：（0.15 ~ 80）MHz，射频幅值：10V（emf）；浪涌试验严酷度，3级；电快速瞬变脉冲群试验严酷度，3级，不同强干扰试验条件下的输出结果如表2所示。

表2 称重指示控制模块在强电磁干扰下的试验数据

干扰形式	严酷度	干扰前示值kg	干扰后示值kg	备注
辐射电磁场试验	频率范围：（80 ~ 2000）MHz，场强为10V/m	100.00	100.00	工业环境
传导射频场试验	频率范围：（0.15 ~ 80）MHz，射频幅值：10V	100.00	100.00	工业环境
浪涌试验	3级	100.00	100.00	强工业环境
电快速瞬变脉冲群试验	3级	100.00	100.00	强工业环境

（2）工况条件下的性能验证结果
宽温场环境下的试验结果：量程为200t，分度值为100kg，实际载荷为186.4t，温度范围变化接近

（+30 ~ +60）℃，当高温体接近称重系统时，称重系统的示值变化如表3所示。

表3 称重系统在宽温环境下的试验数据

时间变化量（分）	温度变化量（℃）	称重系统示值（t）	示值最大变化量/5℃
初始	32	186.4	0.05t/5℃
10	38	186.4	
20	47	186.6	
30	55	187.6	
40	62	187.7	

高湿环境条件的试验结果：量程为100t，分度值为50kg，施加载荷量为74t，在一段时间内，其温度

变化（34 ~ 32）℃，湿度变化（72% ~ 94%）RH，称重系统的示值变化如表4所示。

表4 称重系统在高湿度环境下的试验数据

时间	温度/℃	相对湿度/RH	加载量/t	称重系统示值/t	示值变化量/t
XX月14日	34	72%	74	74.00	0.05
XX月29日	32	94%	74	74.05	

上述试验数据表明，通过对传感模块、信号处理模块及系统整体进行针对性的优化，系统能够显著抑制复杂环境变化对称重测量结果的影响，从而有效提升了称重系统的抗干扰能力与测量稳定性。

4 结语

提升复杂环境下称重系统的综合性能，是称重技术人员持续追求的目标。项目团队经过多年研究与实践，针对若干特殊应用场景开展了深入探索，并取得了阶段性应用成果。本研究涉及传感测量、补偿算法、系统集成等关键技术，但由于不同应用

领域在工况环境与工艺要求方面存在显著差异，未来工作仍需围绕多维度工况数据库构建与自适应关联算法模型开展针对性研究。下一步需深入探究特定工况对系统性能的影响机理，建立环境参数与测量误差之间的定量关系模型，在此基础上开发具备环境参数自识别能力的智能补偿算法，最终实现高稳定性称重系统在复杂工况下的准确、可靠运行。

本研究得到浙江省市场监管局科技计划项目（项目编号：20200306/ZC2023014）的资助，特此致谢！

参考文献

- [1] 董兴民. 提高称重系统的计量准确度[J]. 中国科技信息, 2015,11(044) .
- [2] 尚贤平, 费利萍等. 基于低频振动模式下的动态称重关键技术研究[J]. 先进工程学刊,2016,11(1);
- [3] 王明, 张伟等. 基于物联网的称重系统动态校准技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020, 46(5):
- [4] 李华, 陈晓东等. 皮带秤传感器动态特性优化方法[J]. 自动化仪表, 2021, 42(2)
- [5] 俞琼, 马晓伟等. 剪切梁式S型称重传感器力学分析[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4).

[6] 刘旭东, 曲永兴等. 基于物联网的电炉上料称重数据采集系统[J]. 中国铸造装备与技术,2025,60(03).

[7] 王海轮, 杨军. 冶金行业智能计量系统解决方案的研究及应用[J]. 科技创新导报,2019,16(35).

作者简介

陈洁（1986—），女，浙江富阳人，工业工程专业，硕士研究生，高级工程师。主要研究方向：称重计量技术与抗干扰研究。