

基于模块化称重装置的系统集成与故障诊断技术研究

□陈洁¹ 裘尧华¹ 罗锋² 杨栋³ 边浩阳¹ 张子超¹ 李金扬¹ 赵志灏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】模块化称重装置因其良好的易用性和可扩展性，被广泛应用于工业控制与工艺监测场景。然而，在系统集成过程中，受限于模块间接口兼容性差异、性能匹配不足或通信协议不一致等因素，易引入耦合风险，进而对系统整体稳定性造成影响。为确保模块化称重装置的实际应用效果，优化模块间协同能力、提升系统集成效率与故障诊断能力，是本研究的核心关注点。本研究围绕多源感知融合技术、终端——计算——平台协同架构设计以及故障诊断等关键技术展开，旨在提升模块化称重装置在工业控制场景下的应用性能，为推动产业智能制造提供一定的技术参考与解决方案。

【关键词】称重系统；多源感知；模块化；系统集成优化；故障诊断技术

文献标识码：A

文章编号：1003-1870 (2026) 04-0018-04

A Study on System Integration and Fault Diagnosis Technique for Modular Weighing Devices

【Abstract】 Modular weighing devices are widely used in industrial control and process monitoring thanks to their excellent ease of use and scalability. However, during system integration, factors such as differences in interface compatibility between modules, insufficient performance matching, or inconsistent communication protocols often introduce coupling risks, which can subsequently affect the overall stability of the system. To ensure that modular weighing devices achieve the expected performance in practical applications, optimizing inter-module coordination, improving system integration efficiency, and enhancing fault diagnosis capability have become the main focus of this study. This study focuses on key techniques such as multi-source perception fusion technology, edge-computing-platform collaborative architecture design, and fault diagnosis, so as to enhance the application performance of modular weighing devices in industrial control scenarios, thereby providing technical references and solutions for advancing industrial intelligent manufacturing.

【Keywords】 weighing system; multi-source perception; modularization; system integration optimization; fault diagnosis technique

引言

称重计量在道路、桥梁、钢铁、焦化、能源等重点领域的应用日趋广泛，已成为保障基础设施建设、质量安全管理、推动科技创新和产业创新融合发展的重要测量技术手段，精准、可靠的称重装置是众多工业流程管控的基础，模块化设计使得称重装置能灵活适配复杂多变的工业应用场景，成为实现柔性制造与数字化管控的重要基石。研究其系统集成技术，核心在于解决异构设备间的数据互通与协同控制问题，通过统一的通信协议和标准接口，将模块化称重单元无缝嵌入整体自动化系统中，可实现生产数据的实时采集与闭环优化，这是构建智慧工厂、实现精益管理的核心环节。故障诊断技术的研究则直接关乎系统可用性与运维成本，模块化结构虽便于更换，但故障源的快速精准定位更为关键，极大减少非计划停机，保障生产连续性与产品质量稳定性。因此，本研究不仅能够直接提升称重

系统本身的性能与可维护性，更是推动工业物联网落地、赋能制造业数字化转型的重要技术支撑，对促进产业升级，提高社会效益具有明确的实践价值。

1 基于模块化称重装置的基本结构

本研究围绕模块化称重装置基本结构展开，重点研究了一种能够适应多种称重应用场景、支持在线适配的多协议感知设备。该设备能够实时采集运行过程中的各项数据，并与称重检测结果相融合，集成到多种管理平台，从而为管理人员提供涵盖称重数据监测、分析、诊断、预测与优化在内的系统运行状态评估服务，辅助判断称重系统的健康状态与运行可靠性。典型模块化称重装置系统架构，可划分为以下五个层次：称重应用场景层、物理感知与执行层、信号采集与预处理层、核心计算与控制层、应用与人机交互层，如图1所示。

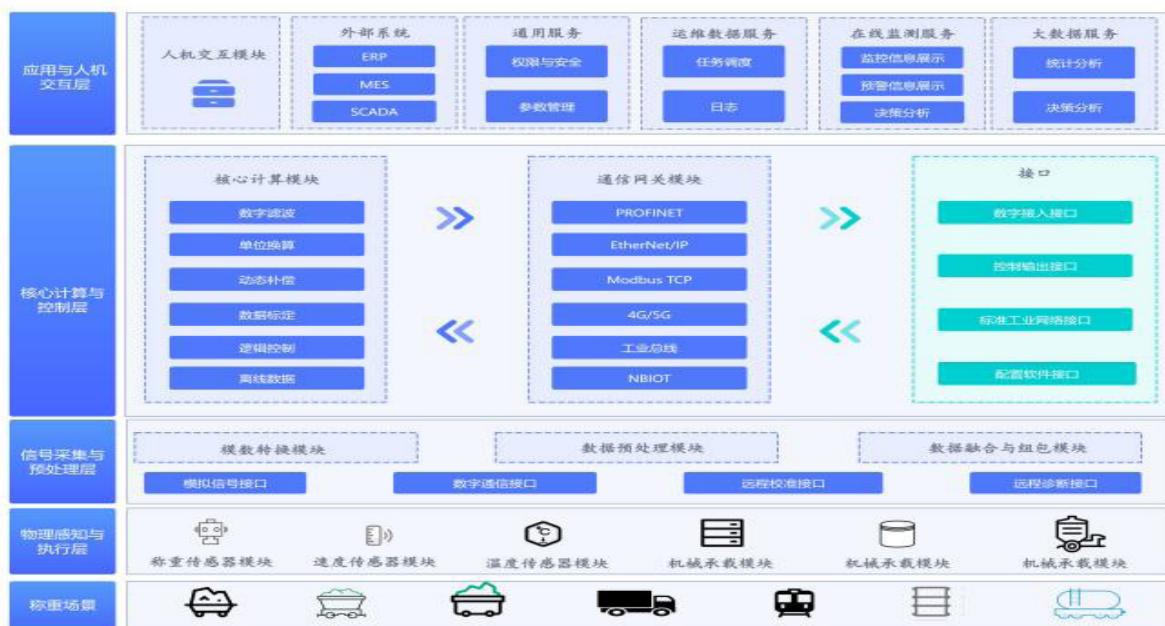


图1 典型模块化称重装置的系统架构

总体而言，该分层模块化模型将复杂的称重系统解构为一系列功能清晰、接口标准的独立单元，一方面为系统的快速集成提供了规范化的实现路径，另一方面也为故障的精准分层定位（如快速区分感知层与通信层异常）奠定了坚实基础。因此，该架构是构建智能化、可视化称重系统的理想选择。

2 基于模块化称重装置的优缺点分析

基于模块化称重装置相较于单一称重装置，其优点主要体现在以下几个方面：

（1）良好的灵活性与可扩展性。模块化设计允许用户根据具体需求（如量程、准确度、安装方式等）选择和组合模块，如机械承载结构模块、感知

模块、运算与处理模块、控制模块等，从而快速构建定制化称重系统。用户可根据产线改造或升级的具体需求，只需更换或添加相应模块，即可显著降低系统更新周期。

(2) 良好的可维护性与可用性。当系统发生故障时，模块化设计使得故障定位与隔离非常迅速。维修人员可快速判断是感知、结构、仪表还是系统模块的问题，并直接更换故障模块，极大地缩短了停机时间，从而显著降低维护成本。

(3) 良好的可升级性与可迭代性。在技术快速发展的背景下，用户可以单独升级某个技术模块，而无需废弃仍然完好的机械和感知部分，实现“渐进式”升级，有效保护既有模块。

(4) 良好的标准化与质量一致性。模块化生产促使内部接口和性能标准化，有利于规模化生产，提升单个模块的制造质量和一致性，从而在系统层面提高整体可靠性。

(5) 良好的并行开发与快速交付。在研发阶段，不同模块（如感知、机械、电气、软件等）可以并行设计和测试，加速整体产品的开发进程，从而实现快速交付。

当然，模块化称重装置存在上述优势的同时，也存在一些缺点与挑战，具体表现在：

初期设计与集成成本较高。实现良好的模块化称重装置需要前瞻性的系统架构设计、严格的接口定义（如电气、通信协议）等。这导致前期研发与系统集成复杂度远高于单一称重装置的设计。

潜在的系统集成风险。模块来自不同供应商时，可能因接口兼容性、性能匹配或通信协议不一致等问题，引发难以排查的隐性故障，从而影响系统稳定性。

不同场景设计与模块的耦合风险。成功的模块化并非简单“分块”，而是需要对系统功能、未来变化和维护场景有深刻的理解。拙劣的模块划分，会导致模块间依赖复杂，丧失其核心优势。

模块化设计是称重装置面向智能制造的必然趋势，其带来的灵活性、易维护性和生命周期成本优势在长期运行中非常突出。然而，它并非容易实现，其成功高度依赖于精良的顶层架构设计、严格的标准化以及成熟的系统集成能力。因此，对于用

户而言，在选择模块化称重装置时，需要权衡其初期投入与长期收益，并优先选择接口开放、生态成熟的产品体系，以规避集成风险。

3 系统集成的优化研究

基于模块化称重装置的特点，系统集成的研究主要可以从多源数据、系统功能、运维等多个维度展开。

3.1 多源异构数据融合集成

研究开发统一数据接口规范，兼容CAN、Ethernet等工业协议构建标准化数据中台，实现多源传感器数据、环境参数、设备状态的融合存储，研究时序数据库优化技术，支持高并发实时数据写入与查询。

3.2 功能协同与硬件系统优化

研究采用模块化设计称重终端、数据采集单元和通信设备，开发抗干扰总线技术，确保信号传输稳定性。研究分布式系统架构，支持多节点协同工作。

3.3 状态监测与智能运维软件系统集成

(1) 远程诊断与维护：研究集成系统远程访问各模块的运行状态（如传感器零点漂移、模块温度），快速定位故障点，缩短停机时间。

(2) 预测性维护：通过长期积累的称重数据分析，发现细微异常（如称重响应变慢），提前预警潜在故障，实现从事后维修向状态维修的转变。

(3) 健康度评估：建立诊断体系，系统集成能够综合各模块数据，对装置的整体健康度进行趋势预测。

4 系统故障诊断技术研究

针对模块化称重装置在复杂多变的工业现场环境中运行，故障的发生难以完全避免，因此，实现故障的早期精准发现对保障系统可靠运行至关重要。

本研究聚焦当前称重装置在故障诊断方面存在的瓶颈：故障特征提取时效性差、早期微小故障辨识准确率低，传统诊断方法难以满足实时监测需求，尤其缺乏对潜在微弱故障的有效捕捉能力，严重制约了系统的预警及时性与快速响应能力。为此，亟须开展智能集成架构设计、三级诊断体系构建及自愈控制技术等的研究与攻关。研究通过构建“硬

件协同—软件适配—智能运维”三位一体的创新解决方案，可有效降低系统故障造成的不利影响。具体而言，实施故障诊断需解决故障的检测、分离与辨识难题。其本质在于，当系统发生故障时，其内部各类参量（可测或不可测）会表现出与正常状态不同的特征差异，这些差异蕴含了关键的故障信息。如何精准提取这种故障特征描述，并将其应用于故障的检测与分离，是故障诊断的核心任务。智能化

的故障诊断技术，能够综合运用自控系统的可靠性分析、故障检测诊断方法以及知识库驱动的自推理判断技术来解决上述问题。典型的诊断技术包括基于人工智能的防作弊诊断技术、网络拓扑诊断协议、神经网络诊断技术等，这些技术为构建高效、精准的三级诊断体系提供了核心技术支撑。典型故障解决方案如表1所示：

表1 典型故障与诊断解决方案

设备级问题	传感器失效检测	问题	称重传感器漂移、应变片断裂、温度补偿模块失灵等硬件故障
		方案	通过残差分析结合LSTM时序建模，识别渐进性漂移或突发性失效
	机械结构异常诊断	问题	承载机构变形、皮带跑偏、轴承磨损等机械故障导致的计量偏差
		方案	振动信号小波包分解 + CNN 频谱特征分类，定位异常振动源等
	环境干扰抑制	问题	温度波动、电磁干扰、粉尘附着等环境因素引发的测量误差
		方案	采用多传感器数据融合（如温度—湿度—振动联合建模），建立动态补偿模型
系统级问题	多源数据冲突与同步失效	问题	不同采样率的传感器数据（如1kHz 振动 vs 1Hz 温度）时序失准
		方案	基于时间戳的动态插值算法（如Akima 插值）或PTP 精密时钟同步协议
	通信链路故障	问题	工业总线（Modbus/PROFIBUS）断线、数据丢包导致监测中断
		方案	冗余通信设计 + 基于MQTT 的断点续传机制，结合心跳包检测链路状态
工艺级问题	计量误差引发的生产失控	问题	钢铁连铸坯称重偏差导致切割长度错误，或火电煤仓计量失准影响燃烧效率
		方案	数字孪生实时仿真（如ANSYS 力学模型 + 数据驱动修正），预测误差对工艺的影响
	隐蔽性故障累积风险	问题	皮带秤纵向撕裂初期无明显征兆，但可能引发断带事故
		方案	声发射信号 + 红外热成像多模态融合，通过GAN 生成对抗样本，增强早期识别

5 研究的局限性和展望

本研究的多项成果，在多个工业场景中实现了应用，为应用单位的质量控制、工艺优化及安全监测等方面发挥了良好的支撑作用，也取得了明显社会效益，但仍存在以下技术局限性：

（1）在不同感知模块的集成方面。由于不同应用领域的工况环境（如振动、电磁干扰等）和工艺要求存在显著差异，尚需有针对性地研究建立多维度工况数据库和自适应关联算法模型。通过开展特定工况影响机理研究，构建环境参数—测量误差的定量关系模型，开发具有环境参数自识别功能的智能

补偿算法，实现多模块称重系统在不同复杂工况下的准确、可靠运行。

（2）在感知信号分离与预测方面。鉴于不同应用场景多物理量间存在显著的交叉耦合影响，各类待接入传感信号在时间同步性、采样频率特性及滤波分离性能等维度呈现显著差异。这种差异性不仅增加了信号处理的复杂度，更对多源传感信号的有效融合与精准拟合构成挑战。故尚需有针对性开展适应多场景下多模态传感信号协同处理、异构传感时钟同步机制、环境耦合干扰高效分离，以及非线性（下转第42页）

性精确拟合等技术研究，确保测量结果更加准确与有效。

本项目研究得到了浙江省市场监管局科技计划（项目编号：ZC2026014）的资助，特此致谢！

参考文献

- [1] 赵彩. 车辆动态荷载实时监测技术与融合算法[D]. 同济大学, 2023.
- [2] 刘林, 陈艳丽, 王言等. 轨道交通系统车辆称重台校准技术研究[J]. 宇航计测技术, 2025, 45(06): 29–34.
- [3] 李怀新, 陈梅珍, 李锦辉. 炼钢厂废钢平台秤的集成优化[J]. 衡器, 2020, 49(08): 26–29.
- [4] 高森祺. 基于物联网的散料高精度智能称重系统及故障诊断技术研究[D]. 南京理工大学, 2017.

[5] 陈上甫. 动态称重设备的故障模式与监控处理方法[J]. 中国交通信息化, 2019, (05): 112–114.

[6] 朱子健. 基于先进数据处理技术的智能称重传感器研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2004.

[7] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748–758.

[8] 王岩, 徐佳昊, 包钰光等. 自动化码头智能集成装备故障诊断系统研究与应用[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(5): 119–125, 132.

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：称重计量与故障诊断技术研究。