一种适应高温冲击工况的铁水罐车载称重系统设计与应用

□孙金铎[1] 张宇波[2] 蒋益[1] 沈瑜平[2] 曾宇[1] 戴明新[2]

1. 鞍钢股份炼铁总厂 2. 杭州钱江称重技术有限公司

【摘 要】传统轨道式铁水液面计，受对位精准度、地基下沉、铁水下地烧损、计量不连续等因素制约，易造成称量准确度下降、铁水罐重量不足，影响钢铁公司转炉侧环保、效率、温降效果。针对上述问题，本文设计了一种基于无线传输技术的铁水罐车载称重系统。本文深入分析四角偏载、高温热辐射及冲击振动对车载计量精度的影响，提出了一种采用特制耐高温桥式传感器搭配箱型梁支撑结构的解决方案。系统集成SAW声表面波车号识别技术、低功耗电源管理与Mesh 自组网无线传输技术，实现铁水运输过程中的实时、精准计量。现场实测数据表明，系统运行最大相对偏差仅为1.72%，有效解决了复杂高温工况下的铁水精准计量难题，提升了炼钢生产的安全性与效率。

【关键词】铁水罐；车载称重；高温传感器；温度补偿；SAW 识别；无线传输

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2026）07-0027-05

Design and Application of a Ladle Truck-Mounted Weighing System Adapting to High-Temperature Impact Conditions

【Abstract】Traditional rail-mounted molten iron level gauges are limited by such factors as alignment accuracy, foundation settlement, molten iron ground burn loss, and intermittent measurement, which lead to reduced weighing accuracy and insufficient ladle weight, negatively impacting environmental protection, operational efficiency, and temperature drop management of the converter side. To address these issues, a ladle truck-mounted weighing system based on wireless transmission technology has been designed. An in-depth analysis of the impact of four-corner eccentric loading, high-temperature thermal radiation, and impact vibration on vehicle-mounted measurement accuracy is introduced in this paper, proposing a solution employing high-temperature-resistant bridge sensors combined with a box-girder support structure. The system integrates SAW surface acoustic wave vehicle number recognition, low-power power management, and Mesh ad-hoc network wireless transmission technology, achieving real-time, precise measurement during molten iron transportation.Field test data indicate that the system operates with a maximum relative deviation of only 1.72%, effectively addressing the challenge of molten iron measurement under complex operating conditions and improving the safety and efficiency of steelmaking production.

【Keywords】ladle; vehicle-mounted weighing; high-temperature sensor; temperature compensation; SAW recognition; wireless transmission

引言

在钢铁冶炼过程中，铁水计量的准确性直接关系到炼钢时的铁水匹配精度与生产成本控制。传统的铁水计量方式主要依赖固定的轨道衡或铁水液面计，但在实际应用中存在显著局限性：一是灵活性差，无法满足多出铁口与转炉间的灵活调度；二是设备生存环境恶劣，一旦发生“跑铁”事故，轨道上的传感器易被烧毁，修复周期长且成本高昂；三是无法实现运输过程中的连续监测。

为了克服上述缺陷，车载式称重系统逐渐成为行业关注的焦点。然而，铁水运输环境具有极高温度（罐体温差大）、强冲击（落料振动）、高粉尘及车架形变大等特点，这对车载称重系统的传感器耐温性、抗偏载能力及供电续航提出了严峻挑战。本文基于实际工程需求，设计了一套高可靠性的铁水罐车载称重系统，通过结构优化与温度补偿算法，有效提升了系统的计量精度与稳定性。

1　影响车载计量误差的主要因素分析

车载称重系统的核心难点在于如何在动态、高温环境下保持静态计量的准确性。经分析，影响计量的主要因素如下：

1.1　结构性四角偏载

受限于车辆大梁的加工精度及液压系统的水平偏差，铁水罐吊装就位时，其耳轴底面往往无法同时均匀作用于四个传感器，导致“三点受力”现象。此外，导向限位卡槽的间隙会导致罐体受到侧向力，造成传感器受力轴线偏移，从而产生非线性误差。

1.2　温度场效应

铁水罐满载与空载状态下，传感器周边的温差可达50℃以上且四季环境温差大。普通传感器的温度漂移指标（ ±0.03%FS/10℃ ）在如此剧烈的温度波动下会产生显著的累积误差。此外，热辐射导致的不均匀受热会引起弹性体局部应力变化。

1.3　刚性变形干扰

传感器底座、支撑架与车大梁构成了一个弹性系统。若大梁刚性不足，重载下的形变会被传感器误读为载荷变化，或改变传感器的受力角度。

针对上述误差源，本系统在机械结构与传感器选型上进行了针对性设计，系统硬件结构如图1 所示。

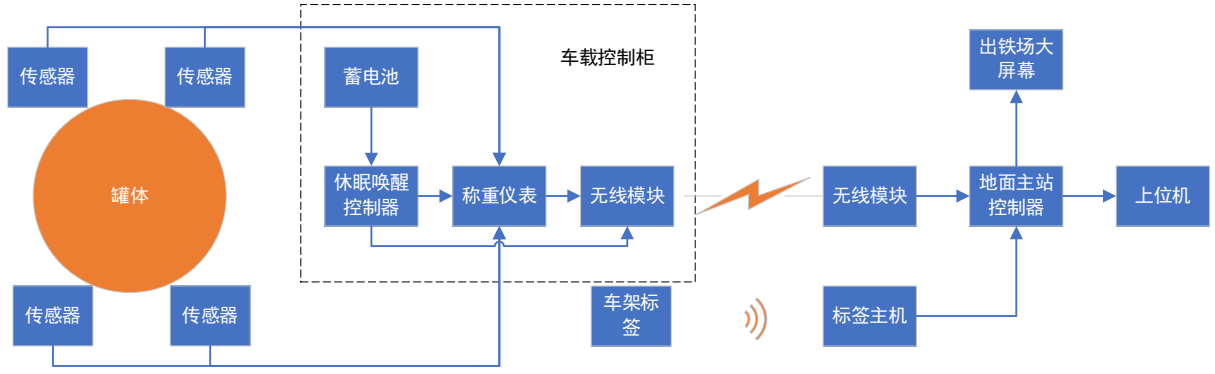


图1　系统硬件结构图

2　系统机械结构与传感器优化设计

2.1　特制耐高温桥式传感器应用

系统选用杭州钱江称重技术有限公司生产的特制耐高温桥式传感器。该传感器针对现场工况完成以下技术升级：

高温材料与工艺：采用优质合金钢淬火工艺制作弹性体，并在–20 ~ 200℃宽温区内进行多点温度补偿，突破了传统传感器仅作简单线性温度修正的局限。

结构一体化：承重横梁与压头采用一体化设计，增加了横向刚性，有效抵抗侧向力引起的输出波动。

独立四角修正：每个称量单元独立进行四角误差调试，结合制造工艺上的抗偏载优化，最大限度消除了因罐体不正或车架不平整带来的四角误差。

2.2　隔热与防护结构设计

为阻断热源，设计了多层防护体系（如图2、图3所示）。

箱型梁支撑：称重模块安装于Q355优质结构钢焊接的箱型梁内，经去应力退火处理，确保长期承受50吨/个的载荷而不发生塑性变形。

复合隔热层：隔热侧板选用高强度硬质云母板，耐温达1000℃，内部填充高效隔热材料。

热辐射防护：称重箱表面喷涂耐温隔热反光面漆，物理阻隔热辐射；传感器信号线采用耐高温屏蔽线并铺设隔热管线。

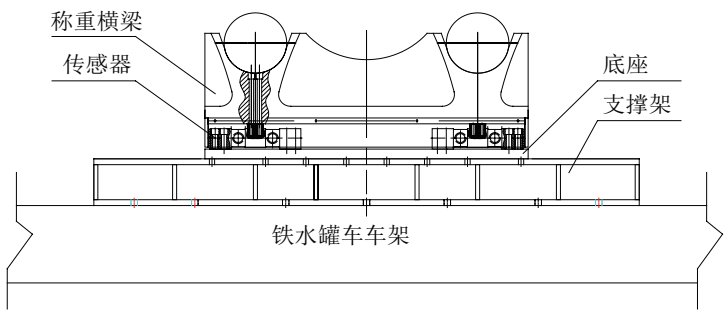


图2　传感器安装示意图

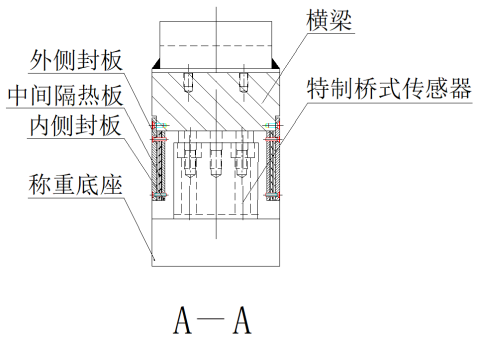


图3　称重装置整体示意图

2.3　整体式安装与力学校核

系统采用整体螺栓固定的模块化设计，称重装置尺寸预设为2.55m×0.25m。

抗压校核：整体支撑应力计算为500×103N/(2.55m×0.25m)≈0.784MPa，远低于材料许用应力。

抗剪校核：底部单侧设置超10颗M24高强螺栓，按侧向力为垂直载荷的20%估算，螺栓剪切应力约167MPa，满足强度要求。

3　硬件电路与低功耗控制系统设计

铁水罐车不仅运行环境恶劣且移动性强，无法采用有线供电。因此，如何在保证数据采集实时性的前提下解决电源续航与安全问题，是硬件设计的关键。

3.1　高安全性电源管理系统

考虑到现场存在高温烘烤及熔融金属喷溅风险，电源模块选用了宁德时代高能量密度磷酸铁锂（$LiFePO_4$）电芯。相较于传统三元锂电池，磷酸铁锂具备极高的热稳定性（热失控温度>500℃），在针刺、挤压或短路等极端工况下不起火、不爆炸。

电源系统集成了智能BMS（电池管理系统），具备以下功能：

全方位保护：涵盖过充、过放、过流、短路及电芯过压保护。

状态监测：实时采集电量与电池温度，支持低温自加热启动，确保北方冬季环境下的可用性。

长续航设计：单次充电续航时间设计指标大于6个月，极大降低了人工维护频率。

3.2　智能采集与休眠唤醒机制

为进一步降低功耗，车载采集终端采用了“休眠—唤醒”双模式工作策略，如图4所示。

休眠模式：当车辆处于空闲或非出铁状态时，系统自动切断无线发射模块与传感器励磁电源，仅保留极低功耗的监听电路，电流消耗降至微安级。

唤醒模式：当车辆进入出铁位或计量区域时，通过外部触发信号或振动感知瞬间唤醒系统。仪表随即对传感器进行供电，执行AD转换、数字滤波、非线性修正及轴计量运算，并通过无线模块发送数据。

该终端支持全数字式自动角差修正与15点非线性修正，确保了数据采集源头的高精度。

3.3　基于SAW技术的无源车号识别

针对传统RFID标签在高温下易失效的问题，本系统引入了声表面波（SAW, Surface Acoustic Wave）识别技术，如图5所示。SAW标签基于压电效应工作，具有显著的技术优势。

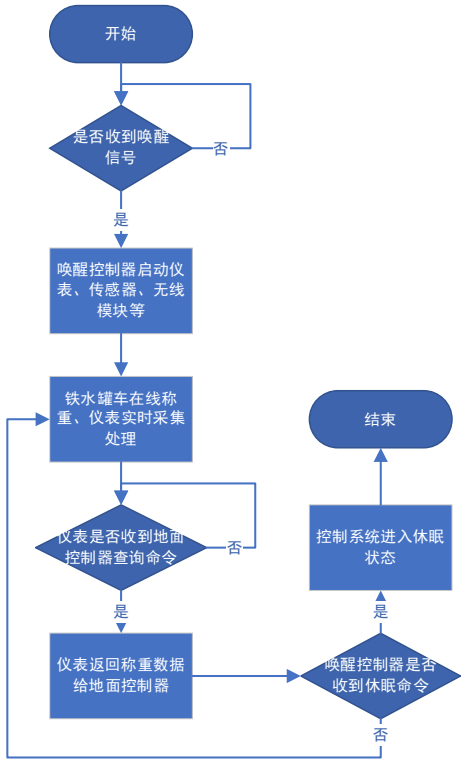


图4　车载采集传输流程

无源工作：标签本身无需电池供电，通过接收阅读器的射频信号获取能量并反射带有编码信息的声波信号，彻底解决了高温下电池寿命问题。

环境适应性：SAW 器件采用单晶材料经半导体平面工艺制造，在高温、高粉尘及电磁干扰环境下具有极高的频率稳定性与一致性。

信号穿透力：相较于光电识别，SAW 射频信号能有效穿透现场的烟尘，实现远距离、高灵敏度的车号自动匹配。

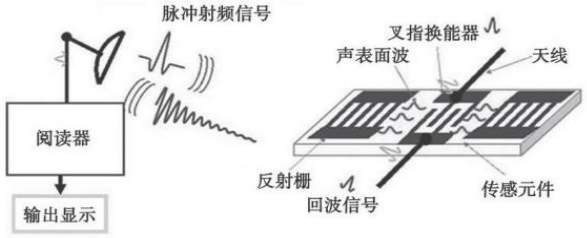


图5　车架识别工作原理

4　无线通信网络与地面监控系统

为了在复杂的钢厂金属结构环境中保证数据传输的可靠性，系统搭建了工业级低功耗无线Mesh 网络。

4.1　高可靠性无线自组网

网络拓扑结构如图6 所示，采用Mesh（网状）组网方式，具有以下特性：

自愈性：网络具备自动路由修复能力。若某一节点（如某辆移动中的罐车）脱离网络或发生故障，数据会自动寻找最优路径传输，确保链路不中断。

高容量与低时延：支持星状与网状混合结构，主节点可管理多达254 个子节点，最大网络容量可达65000 个节点，完全满足钢厂庞大车队的接入需求。从睡眠到工作的转换时延极短，有效配合了低功耗策略。

数据安全：采用AES-128 位高级加密标准及访问控制清单（ACL），防止数据被恶意篡改或窃取。

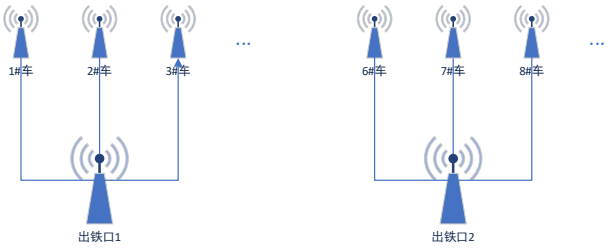


图6　无线网络拓扑图

4.2　地面监控与人机交互

地面控制站作为系统的“神经中枢”，负责接收车载终端的重量数据与SAW 标签的身份信息，并进行数据融合处理。处理后的数据通过两条路径输出：

现场可视化：启动出铁场的大尺寸全汉字点阵LED 大屏，如图7 所示。实时显示车号、毛重、皮重、净重，并配合声光报警装置，指导炉前工精准作业。

上位机管理：数据上传至服务器，上位机软件提供全景看板，对所有罐车的重量流向、电池电量、温度状态及工作模式时长进行统计分析，实现数字化管理。



图7　大屏幕现场使用情况

5　系统测试与结果分析

为验证系统的实际性能，在北方某钢厂现场进行了为期数月的实测。

5.1　试验对象与数据来源

选取车架号为07335（搭配罐号662、818 等）和07273（搭配罐号766、782 等）的铁水罐车作为测试样本。数据采集涵盖本车载称重系统的空罐/ 重罐重量、放铁净重，并与现场炼钢吊车秤数据进行比对。

5.2　数据一致性分析

2024 年11 月，整体设备在北方某钢厂进行了为期约一个月的数据一致性对比分析试验，累计采集44 组与吊车秤的有效对比试验数据，如图8 所示，统计结果分析。

鞍钢股份炼铁总厂车载式称重系统

数据比对记录

序号	日期	炉次	铁次	车架号	罐号	钱江重罐	炼钢吊车	钱江-吊车	偏差%
1	11月5日	10高炉	3406	07335	631	146.70	146.20	0.50	0.34
2	11月6日	10高炉	3418	07335	826	142.60	143.40	-0.80	-0.56
3	11月6日	10高炉	3418	07273	829	133.25	133.40	-0.15	-0.11
4	11月8日	4高炉	2830	07273	723	148.40	148.00	0.40	0.27
5	11月8日	4高炉	2830	07335	625	150.20	150.00	0.20	0.13
6	11月9日	10高炉	3448	07335	625	149.90	149.80	0.10	0.07
7	11月9日	10高炉	3448	07273	723	148.90	149.40	-0.50	-0.33
8	11月10日	11高炉	3176	07335	663	129.90	131.40	-1.50	-1.14
9	11月10日	11高炉	3176	07273	766	131.75	131.50	0.25	0.19
10	11月10日	10高炉	3463	07335	663	128.10	130.10	-2.00	-1.54
11	11月10日	10高炉	3463	07273	766	140.40	140.40	0.00	0.00
12	11月12日	10高炉	3484	07335	662	138.00	138.00	0.00	0.00
13	11月12日	10高炉	3484	07273	639	138.90	138.80	0.10	0.07
14	11月13日	10高炉	3494	07335	662	138.90	138.80	0.10	0.07
15	11月13日	10高炉	3494	07273	782	129.45	129.40	0.05	0.04
16	11月14日	10高炉	3506	07335	662	137.70	137.80	-0.10	-0.07
17	11月14日	10高炉	3506	07273	782	133.95	133.10	0.85	0.64
18	11月15日	10高炉	3517	07335	662	137.90	137.00	0.90	0.66
19	11月15日	10高炉	3517	07273	782	137.95	137.80	0.15	0.11
20	11月16日	10高炉	3529	07335	818	142.00	139.60	2.40	1.72
21	11月16日	10高炉	3529	07273	782	137.80	136.10	1.70	1.25
22	11月17日	10高炉	3540	07335	818	141.20	141.20	0.00	0.00
23	11月17日	10高炉	3540	07273	782	141.30	141.20	0.10	0.07
24	11月18日	11高炉	3262	07335	818	129.80	130.20	-0.40	-0.31

序号	日期	炉次	铁次	车架号	罐号	钱江重罐	炼钢吊车	钱江-吊车	偏差%
25	11月18日	11高炉	3262	07273	782	132.20	132.20	0.00	0.00
26	11月19日	10高炉	3562	07335	818	136.80	137.60	-0.80	-0.58
27	11月19日	10高炉	3562	07273	761	138.90	139.00	-0.10	-0.07
28	11月20日	5高炉	3482	07335	818	142.30	142.60	-0.30	-0.21
29	11月20日	5高炉	3482	07273	761	141.80	141.80	0.00	0.00
30	11月21日	5高炉	3495	07335	818	136.40	135.20	1.20	0.89
31	11月21日	5高炉	3495	07273	761	138.20	136.90	1.30	0.95
32	11月22日	11高炉	3308	07335	818	135.30	135.20	0.10	0.07
33	11月22日	11高炉	3308	07273	761	129.10	127.20	1.90	1.49
34	11月27日	10高炉	3636	07273	676	135.70	135.80	-0.10	-0.07
35	11月27日	10高炉	3636	07335	765	141.80	142.00	-0.20	-0.14
36	11月28日	11高炉	3379	07273	676	135.50	135.40	0.10	0.07
37	11月28日	11高炉	3379	07335	765	133.5	134.2	-0.70	-0.52
38	11月29日	5高炉	3591	07273	677	130.8	131.1	-0.30	-0.23
39	11月29日	5高炉	3591	07335	765	133.2	133.8	-0.60	-0.45
40	12月2日	5高炉	3627	07273	677	138.8	137.4	1.40	1.02
41	12月2日	5高炉	3627	07335	765	137.6	138.1	-0.50	-0.36
42	12月3日	11高炉	3110	07273	677	146.9	147.4	-0.50	-0.34
43	12月3日	11高炉	3110	07335	765	137	138.8	-1.80	-1.30
44	12月3日	5高炉	3642	07273	677	139	139.3	-0.30	-0.22
						6075.75	6073.60	最大偏差	1.72
								最小偏差	-1.54
								平均偏差	0.04

鞍钢股份炼铁总厂生产室

2024年12月16日

图8　试验对比数据

从上表分析：

总体计量偏差：系统测得的总重为6075.75t，吊车秤总重为6073.6t，整体相对偏差仅为0.04%，显示出极高的互校一致性。

单次计量精度：在单组数据比对中，超过50%的测试组偏差控制在±1% 以内，最大相对偏差1.72%，最小相对偏差0，达到了精密计量水平。

稳定性验证：数据表明，同一车架挂载不同罐体（如07335 挂载662、663 罐）时，计量偏差趋势保持一致。这证明了系统通过结构优化和四角修正，有效克服了罐体形变和加工公差带来的影响，具有良好的设备适配性。

6　结论

本文设计并实现了一种适应高温、冲击工况的铁水罐车载称重系统。通过采用特制耐高温传感器、箱型梁隔热支撑结构、SAW 无源识别技术及低功耗Mesh 无线网络，成功解决了传统轨道衡维护难、车载计量精度低的问题。

现场运行数据表明，该系统在长期恶劣工况下运行稳定，整体计量偏差率控制在0.04% 左右，最大对比偏差控制在2%。系统的成功应用不仅实现了铁水运输的全程可视化监控，提高了炼钢生产的节奏与安全性，也为钢铁企业实现“无人化”“数字化”物流管理提供了可靠的技术支撑，具有较高的推广应用价值。

参考文献

[1] 刘九卿. 高温应变式称重传感器技术与关键工艺. 衡器.2006(03).

[2] 舒琳. 声表面波谐振器的高温无线传感特性研究. 电子科技大学博士论文，2018 年第01 期.

作者简介

孙金铎，1992 年毕业于包头钢铁学院钢铁冶金专业，历任鞍钢股份总调度室调度长，鞍钢铁运分公司运输总站主任，鞍钢股份炼铁总厂副厂长。长期致力于铁钢界面提效的研究，推进实施分次调铁，创造性地提出了单罐调铁+ 接力送铁方案并付诸实践。