轮胎生产设备冷却循环水温度在线监测数字化应用研究

梁江林，李晨晖，张超，贺杰，马瑞琪，王晓雷，吴越，牛志新，王维维，马强，马亚菲
（双钱集团（新疆）昆仑轮胎有限公司，新疆　乌鲁木齐　830000）

摘要：针对轮胎生产冷却循环水温度人工巡检存在监测滞后、误差偏大、预警缺失等问题，双钱集团（新疆）昆仑轮胎有限公司搭建四层数字化在线监测系统。系统采用 LoRa 与工业以太网融合通信方案，部署高精度无线温度传感器，适配车间高温、高粉尘、强电磁干扰工况。平台集成实时预警、数据追溯、多维分析与趋势预测功能，结合工业互联网构建水温适配模型，推动设备运维由被动抢修转向预防性维护。应用后杜绝水温异常引发的停机与胶料报废问题，年节约生产成本 20 万元，异常响应时间缩短至 1 min 内，实现数据驱动型管理升级。该方案已在多条生产线落地，具备较强的行业复制推广价值，可为橡塑制造产线智能化改造提供实践参考。

关键词：轮胎生产；冷却循环水；温度在线监测；数字化转型；工业互联网；新质生产力

引用论文：梁江林，李晨晖，张超，等．轮胎生产设备冷却循环水温度在线监测数字化应用研究 [J]. 橡塑技术与装备，2026，52(11):21-26.

中图分类号：TQ330.46　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0021-06

文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.004

0　引言

数字化、智能化技术正推动传统制造业转型升级，轮胎制造作为典型流程型产业，密炼、开炼、挤出、压延等核心工序均依靠冷却循环水完成设备散热与工艺温控，水温及进出水温差是把控胶料质量、保障设备稳定运行的核心指标。

炼胶工序运转过程中会产生大量摩擦热，若冷却循环水参数偏离工艺标准，易造成胶料焦烧、填料分散不均等质量缺陷，同时加速设备部件老化，引发非计划停机。目前国内多数轮胎企业仍沿用人工定点巡检模式，该方式数据采集频次低、实时性差、人为误差明显，且不具备事前预警能力，不仅无法满足高精度工艺管控要求，还形成生产数据盲区，制约企业数字化转型[1]。

为解决上述问题，双钱集团（新疆）昆仑轮胎有限公司结合车间复杂工况，引入无线传感与融合通信技术，搭建冷却循环水温度在线监测数字化平台，实现温度数据实时采集、动态预警、智能分析与趋势预测。同时依托工业互联网与大数据技术构建工艺适配模型，推动设备运维模式升级，并逐步向多条生产线拓展应用。本文阐述该系统的架构设计、实施过程、技术应用与落地成效，为轮胎及橡塑行业同类数字化改造提供参考。

1　企业概况与项目建设背景

1.1　企业基本情况

双钱集团（新疆）昆仑轮胎有限公司成立于 2002 年，是新疆地区唯一国有轮胎制造企业，拥有两大生产基地、千余种轮胎产品，为当地轮胎产业核心企业。公司数字化基础扎实，已建成工业 4.0 标准智能工厂，全面上线 MES、ERP、数字化营销平台等信息系统，实现生产、物流、能耗全流程数字化管控。企业先后获评自治区先进级智能工厂、国家级绿色工厂等资质，拥有多项实用新型专利与核心生产工艺，综合实力位居西北轮胎行业前列，具备开展工艺数字化改造的良好条件。

1.2　冷却循环水在轮胎生产中的核心作用

轮胎制造核心设备对冷却循环水依赖性极高，工

作者简介：梁江林（1972–），男，本科，高级企业信息管理师、中级智能制造 IT 规划师，长期专注于信息化、数字化及智能化运维与管理领域。曾荣获自治区劳动模范、新疆工匠等荣誉称号，所带领的团队获自治区总工会授牌成立“梁江林数字智能创新工作室”。

艺明确要求开炼机出水温度控制在 20~35 ℃，进出水温差保持在 0.5~4 ℃。炼胶工序中，水温过高会缩短胶料焦烧时间，引发提前硫化、硫磺喷霜等问题；水温过低则会造成填料分散不均，降低胶料综合性能，最终影响成品轮胎使用寿命[2]。在挤出、压延等后续工序中，水温失衡还会导致胶片出现气泡、形变、表面不平整等缺陷。冷却循环水参数的波动会逐级影响全生产链条，因此水温精准、连续监测是轮胎工艺管控的关键环节[3]。

1.3 传统监测模式存在的问题

传统人工巡检模式存在多重弊端。一是监测效率低、实时性不足，车间测温点位分散，常规巡检间隔达 12 h，巡检空档期内管道结垢、水泵故障、冷却塔效率下降等问题无法及时发现，每年因监测不及时造成的直接设备损失超 10 万元，间接生产损失难以统计，同时人工操作也会带来数据误差。二是缺乏智能预警能力，仅能记录瞬时数据，隐患累积至引发质量事故或设备故障后才会被发现，且人工记录数据零散无序，出现质量问题后难以追溯根源，工艺整改缺少数据支撑。三是形成数据盲区，冷却水温作为核心工艺参数无法实现数字化采集，导致大数据、智能分析等技术难以落地，成为企业全流程数字化转型的阻碍。

1.4 政策与行业发展导向

当前国家大力培育新质生产力，鼓励传统制造企业开展数字化、智能化技术改造。轮胎、橡塑行业作为基础制造业，淘汰落后人工管控模式、推进关键工序数字化升级已是行业发展趋势。在此背景下，企业将冷却循环水温度在线监测改造列为智能工厂建设重点项目，旨在通过单点工艺数字化突破，探索可复制、可推广的传统轮胎企业智能化升级路径。

2 数字化在线监测系统总体设计与实施

结合轮胎车间高温、高粉尘、高震动、强电磁干扰的复杂工况，企业摒弃传统有线布线监测方案，构建感知层－传输层－处理层－应用层 4 层一体化数字化架构，选用工业级无线传感设备与融合通信技术，分阶段完成系统部署、联调、测试与上线运行[4]。

2.1 系统总体架构设计

本次搭建的冷却循环水温度在线监测系统采用分层设计思路，4 层架构各司其职、协同联动，形成“数据采集－传输－分析－应用”的完整数字化闭环，整体架构稳定性、抗干扰性适配工业现场环境，如图 1 所示。



图 1 四层数字化架构示意图

2.1.1 感知层：高精度数据采集

感知层负责全点位水温数据采集，项目选用 HW－T2－L1－FB 有源无线管道温度传感器，测温范围 －40~125 ℃，测温精度 ±0.5 ℃，满足轮胎工艺管控要求；设备防护等级 IP65，可适应车间恶劣环境，采用 LoRa 无线通信，内置锂电池可连续工作 3 年，免布线设计有效降低施工与运维成本[5]。配套 HWTH－R100－R2－N1 无线测温接收器，单台可接入 48 路传感器，支持本地数据缓存、断点续传与掉电保护，避免数据丢失[6]。

项目在终炼胶、母炼胶两条密炼生产线布设 72 个标准化测温点位，覆盖密炼机、开炼机、挤出机、压片机等核心设备的进水、回水管道，实现测温全覆盖（见表 1）。

2.1.2 传输层：融合通信数据传输

轮胎车间空间跨度大、设备密集、电磁干扰源多，单一通讯方式难以保障数据稳定传输。项目采用 LoRa 无线通讯 + 工业以太网融合传输方案：LoRa 技术具备传输距离远、功耗低、穿透性强的优势，负责传感器与本地接收器之间的短距离无线数据传输，通讯频段选用 410~525 MHz，视距传输距离可达 100 m，有效消除车间信号盲区；工业以太网结合单模光纤组网，负责将接收器汇总的数据稳定上传至后台服务器，有线传输抗干扰能力强、时延低。

为保障数据完整性，系统内置 CS 累加取反校验算法，对每一组传输数据进行校验，一旦检测到数据错误，自动放弃当前数据包并在下一采集周期重新上传。传感器数据采集频率设定为 1 次 /min，兼顾数据实时性与设备功耗，全链路传输时延满足工业监控要求（见表 2）。

表 1　炼胶车间密炼生产线冷却循环水无线测温点位部署

序号	设备位号	机台	使用位置	进水测温	回水测温	接收仪编号	传感器编号
1	一期	密炼机（终炼胶）	下顶栓	有	有	64 65 66	64－01 64－02
2			前转子	有	有		64－03 64－04
3			后转子	有	有		64－05 64－06
4			前室壁	有	有		64－07 64－08
5		ML1	后室壁	有	有		64－09 64－10
6		1# 开炼机	前辊筒	有	有		64－11 64－12
7			后滚筒	有	有		65－01 65－02
8		2# 开炼机	前辊筒	有	有		65－03 65－04
9			后滚筒	有	有		65－05 65－06
10			下顶栓	有	有		65－07 65－08
11		密炼机（母炼胶）	前转子	有	有		65－09 65－10
12			后转子	有	有		65－11 65－12
13			前室壁	有	有		66－01 66－02
14		ML2	后室壁	有	有		66－03 66－04
15		双螺杆	挤出机长螺杆	有	有		66－05 66－06
16			挤出机短螺杆	有	有		66－07 66－08
17			压片机上辊筒	有	有		66－09 66－10
18			压片机下辊筒	有	有		66－11 66－12

表 2　管道测温传感器方案对比

对比类别	超高频 RFID 测温方案	有源无线温度传感器方案	有源有线温度传感器方案
测温方式	无源无线测温	有源无线测温	有源有线测温
感温探头	智能温度传感器	数字式温度探头	热电阻 PT100
安装方式	接触式	接触式	接触式
供电方式	RFID 射频耦合供电	内置电池	外接 DC24 V 电源
测温范围	－40 ℃ ~125 ℃	－40~125 ℃	－100 ℃ ~600 ℃
测温精度	0~85 ℃时为 ±1 ℃，其他范围为 ±2 ℃	±0.5 ℃	±0.5 ℃
稳定性	中	高	高
通讯距离	5 m	视距 100 m	有线 200 m 内效果最好
硬件成本	高	中	低
维护成本	中（RFDI 标签、读写器备件价格高）	中（电池更换成本）	高（生产设备检维修期间传感器线路易被破坏）
优点	无源供电，标签部署简便	价格适中，部署极简单	价格低，PT100 传感器购买容易
缺点	价格高，读写器部署复杂且调试工作量大，读写器及天线与 RFID 标签有距离及方向限制，标签污染后影响读写性能。	3 年更换电池，单个电池价格 50 元左右，更换电池单台需要 2 min 左右。	部署施工工作量大，每个测温点与测温主机之间需要有线连接部署后期运维成本大、线路易损坏。

2.1.3　处理层：数据存储与智能分析

处理层为系统数据分析核心，由缓存单元、工业数据库与算法模块组成。接收器完成数据本地缓存，数据库按照“实时采集、定时存储、长期归档”规则存储水温、温差等数据，存储周期不少于 1 年，满足数据追溯要求。

数据解析模块集成信号校准、阈值判异、趋势计算等算法，依据工艺标准设置温度、温差双重预警阈值，参数超限时系统自动标记异常并触发预警；同时结合历史数据拟合温度变化曲线，实现设备工况短期预判。

2.1.4　应用层：可视化人机交互与系统管理

应用层采用 B/S 架构搭建统一监控平台，配套现场 LED 大屏、电脑端管理界面、移动端 APP 三类终端，面向不同岗位人员提供差异化功能，实现分级管控、协同作业。平台集成实时监控、曲线分析、报表查询、多级告警、日志管理、权限管控六大核心功能：支持温度数据实时可视化展示、历史曲线回放；可按时间、设备、点位多维度查询数据，报表支持 Excel、Word 格式导出；告警信息分级推送，全程记录告警处理日志；系统账号按操作人员、运维人员、管理人员划分权限，保障数据与系统安全。

2.2　设备选型对比与现场安装实施

综合三种测温方案对比结果，有源无线测温方案精度达标、施工简便、运维成本适中，适配车间复杂工况，为最优选择。

现场安装阶段，传感器通过磁吸底座固定于金属管道，打磨管壁、涂抹导热硅胶保证测温精度，再使用防水胶与扎带加固密封（见图 2）；接收器集中布置于生产线中间通讯机柜内，就近接入车间供电与工业

网络（见图 3）。安装完成后选取典型点位开展 24 h 连续测试，系统测温误差、断点续传、数据加密等功能均达到设计标准。

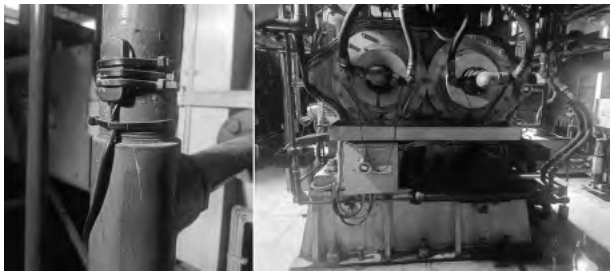


图 2　传感器安装

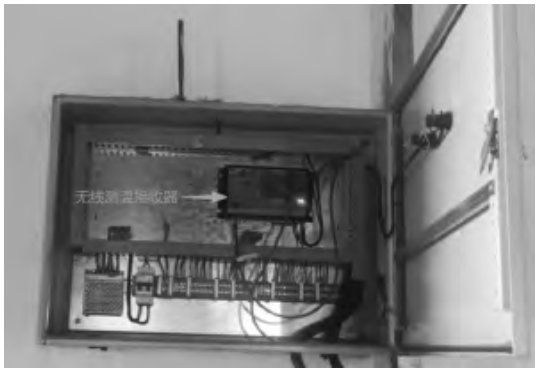


图 3　接收器安装

3　数字化管控模式与技术创新应用

依托在线监测系统，企业打破传统人工管理模式，构建数据驱动的新型工艺管控体系，结合工业互联网、大数据技术开展深度应用，实现管理创新与技术创新融合。

3.1　数据驱动下的全流程工艺管控

3.1.1　实时监测与动态预警

系统以 min 级频率采集全点位温度数据，现场 LED 大屏实时展示所有测点数值，系统平台采用颜色分级告警模式：正常数据默认黑色显示，超阈值异常数据自动标红，同时平台弹窗、移动端同步推送告警信息。相较于传统 12 h 一次的人工巡检，系统将异常响应时间从半天压缩至 1 min 以内，操作人员可第一时间调整冷却系统工况，从源头规避胶料质量缺陷与设备故障，筑牢工艺安全防线。



图 4　现场 LED 大屏实时展示所有测点数值

3.1.2　历史数据全周期追溯

系统设置 1 年以上长效数据存储机制，支持按生产线、设备编号、测温点位、时间区间多维度检索历史数据，以报表、趋势曲线形式直观呈现。当出现胶料质量波动、设备故障时，技术人员可调取对应时段水温数据，精准定位问题诱因，实现“故障可追溯、问题可复盘”。长期积累的历史数据，也为工艺优化、标准修订提供了原始数据支撑（见图 5）。

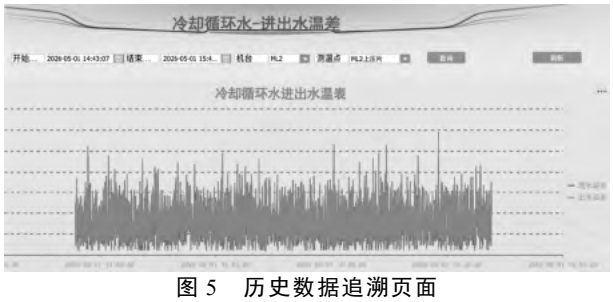


图 5　历史数据追溯页面

3.1.3　多维度数据深度分析

平台内置统计分析模块，自动计算各测温点温度的平均值、最大值、最小值、标准差等参数，识别水温昼夜、班次、季节性波动规律。同时联动冷却水流量、管道压力等参数开展关联性分析，可快速定位管道结垢、换热效率衰减、水泵工况异常等隐性故障（见图 6）。2024 年 11 月，厂区三站房冷却塔工况调整引发水温异常波动，技术人员依托系统实时数据快速锁定故障点位，及时完成工艺调整，避免了大规模质量事故。



图 6　系统测温数据页面

3.1.4　可视化定制与跨部门协同

监控平台支持自定义界面布局，管理人员可按需筛选重点设备、关键点位集中监控；数据可导出为通用格式，在生产、技术、质量、设备等部门之间共享流转，打破部门数据壁垒，提升跨部门协同处置效率。

3.1.5　闭环优化与持续改进

系统与车间 MES 系统深度集成，实现水温、生产配方、排胶温度、工单数据互联互通。技术团队结合历史数据，制定不同季节、不同胶料配方对应的水

温、温差标准，实现精细化温控。企业建立“发现异常—分析原因—制定措施—落地执行—固化标准”的闭环管理机制，持续优化工艺参数，形成全员参与的改进体系。

3.2 工业互联网与大数据技术融合应用

3.2.1 水温－排胶温度适配模型搭建

冷却水温直接影响密炼机排胶温度与设备能耗，企业提取近 3 个月全量历史数据，运用大数据挖掘技术，分析冷却水温、进出水温差与胶料排胶温度、设备能耗的关联关系，针对密炼机 105~168 ℃常规排胶温度区间，搭建水温动态适配模型。模型可根据实时排胶温度自动给出冷却水温优化建议，动态调节冷却塔、水泵运行参数，在保证工艺质量的前提下降低设备整体能耗。后续企业计划利用异常工况数据迭代训练模型，将风险预警准确率提升至 95% 以上 [7]。

3.2.2 设备运行状态智能预测

基于长期水温运行规律与实时监测数据，系统搭建设备状态预测机制，可提前 72 h 预判冷却系统、生产主机的过热风险并发出预警。该功能推动设备维护模式发生根本性变革：由传统“故障后被动抢修”转变为“预警后主动预防性维护”，运维人员可利用生产间隙提前开展管道清洗、设备检修、配件更换等工作，彻底消除非计划停机隐患 [8]。

3.3 系统应用拓展推广

该在线监测系统在密炼生产线应用成效显著，企业逐步推进技术复制与场景拓展。钢丝压延生产线辊筒冷却水温异常，会造成帘布气泡、表面不平整、收缩形变等问题，为此企业在钢丝压延机挤出机、开炼机、冷却辊进出水管路加装同款无线测温设备，实现压延工序冷却水温数字化管控。按照企业数字化规划，后续还将把系统推广至半制品车间压出生产线、内衬层生产线，逐步实现全厂区关键生产设备冷却循环水监测数字化全覆盖。

4 项目实施成效

本数字化监测系统正式投运后，在经济效益、管理效益、社会效益三方面取得显著成果，充分验证了方案的可行性与推广价值。

4.1 经济效益

2024 年，企业 8 条密炼生产线因冷却循环水温度异常，累计产生 1 200 min 非计划停机，同时引发多批次胶料降级、报废。2025 年系统全面投用后，依靠实时监测与智能预警，水温异常引发的设备被动停机、胶料报废问题彻底清零。综合原材料损耗、生产工时损失、设备维修费用等各项成本，2025 年全年直接节约生产成本 20 万元。同时，精准温控优化了设备运行工况，冷却水系统整体能耗小幅下降，实现节能降本双重收益。

4.2 管理效益

一是管理模式全面升级，摒弃人工巡检与经验判断模式，建立数据采集、智能分析、科学决策的数字化管理体系，决策效率大幅提升，生产连续性显著增强；二是形成可复制的改造经验，总结出传感器选型、现场施工、系统运维、数据应用的全套流程，为企业后续工序智能化改造提供参考；三是完善工厂数据链条，打通冷却水温数据盲区，推动多套信息化系统数据联动，加快智能工厂建设步伐。

4.3 社会效益

项目立足新质生产力发展要求，攻克了轮胎行业冷却循环水监测这一共性技术难题，打造出感知 - 管理 - 决策全链路数字化解决方案。一方面，为国内轮胎、橡塑制造同类企业的传统产线智能化改造提供可落地的实践样本，推动整个行业工艺管控水平升级；另一方面，企业自主完成数字化系统集成与应用创新，摆脱了部分环节对外技术依赖，为制造业破解数字化转型“卡脖子”问题提供了基层实践案例，助力区域橡塑产业高质量发展。

5 结论与展望

5.1 结论

（1）针对轮胎车间高温、高粉尘、强干扰的复杂工况，采用 LoRa 无线 + 工业以太网融合通信、有源无线温度传感器搭建的四层架构在线监测系统，稳定性强、测温精度高、施工与运维便捷，完全适配轮胎生产现场工况，可有效替代传统人工巡检模式。

（2）冷却循环水温度在线监测数字化系统，实现了温度数据实时采集、动态预警、全周期追溯、智能分析与趋势预测，有效解决了传统模式监测滞后、误差大、无预警、难追溯等痛点，从源头保障胶料质量与设备安全。

（3）依托大数据、工业互联网技术搭建的水温适配模型与设备状态预测机制，推动设备维护由被动抢修转为主动预防，工艺管控由“经验驱动”转为“数据驱动”，管理效能大幅提升。

（4）该数字化改造成本低、成效显著、可复制性强，在密炼、压延等多条生产线成功应用，适合在轮胎及橡塑制造行业大范围推广。

5.2 展望

结合行业技术发展趋势与企业规划，后续将从三方面持续优化升级：一是迭代优化算法模型，丰富多参数耦合分析功能，深度挖掘数据价值；二是推进全域覆盖，逐步完成全厂各生产线冷却循环水监测数字化改造；三是实现联动自动控制，推动监测系统与水泵、温控阀门等执行设备联动，由单纯监测预警升级为“监测 + 自动调控”，打造无人化智能管控体系。

在新质生产力发展背景下，传统橡塑制造企业可从单点工艺数字化改造切入，循序渐进推进全流程智能化升级，以数字化技术赋能生产、设备、管理各环节，助力行业实现高质量、可持续发展。

参考文献：

[1] 周明 . 传统制造企业数字化转型路径及两化融合实施要点 [J]. 中国制造业信息化，2022,51(09):36–40.
[2] 周政 , 何立刚 .PLC、PID 调节仪表在轮胎密炼机循环水温控制装置中的应用 [J]. 橡胶工业，2003,50(07):53–54.
[3] 李军 , 赵伟 . 轮胎生产冷却系统工艺管控优化与实践 [J]. 橡胶工业，2024,71(02):135–139.
[4] 王健 , 刘峰 . 工业以太网与无线传感融合网络在流程制造业的应用 [J]. 制造业自动化，2022,44(05):112–115.
[5] 张磊 .LoRa 通信技术在工业恶劣环境温度监测系统中的应用研究 [J]. 仪表技术与传感器，2023(08):78–82.
[6] Hidayat A.Wireless Temperature Monitoring System for Industrial Production Lines[J]. International Journal of Computer Applications, 2022,184(4):22–27.
[7] Andrejiova M,Grincova A,Marasova D.Machine Learning Based Fault Prediction for Rubber Manufacturing Equipment[J]. Applied Sciences, 2026,16(12):6048.
[8] 刘思源 . 基于工业互联网的设备状态预测与预防性维护技术 [J]. 机械设计与制造，2024(03):289–292.

Research on the digital application of online monitoring for cooling circulating water temperature in tire production equipment

Liang Jianglin, Li Chenhui, Zhang Chao, He Jie, Ma Ruiqi, Wang Xiaolei, Wu Yue, Niu Zhixin, Wang Weiwei, Ma Qiang, Ma Yafei

(Double Coin Group (Xinjiang) Kunlun Tire Co. LTD., Urumqi 831400, Xinjiang, China)

Abstract: In response to issues such as monitoring lag, significant errors, and lack of early warnings in manual inspection of tire production cooling circulating water temperature, Double Coin Group (Xinjiang) Kunlun Tire Co., Ltd. has established a four-tier digital online monitoring system. The system adopts a LoRa and industrial Ethernet integrated communication solution, deploys high-precision wireless temperature sensors, and adapts to high-temperature, high-dust, and strong electromagnetic interference conditions in the workshop. The platform integrates real-time early warning, data traceability, multi-dimensional analysis, and trend prediction functions. It combines with the industrial internet to construct a water temperature adaptation model, promoting equipment operation and maintenance from reactive repair to preventive maintenance. After implementation, it completely eliminates downtime and rubber compound scrap issues caused by abnormal water temperature, saving annual production costs of 200,000 yuan. The response time to abnormalities is shortened to within 1 minute, achieving data-driven management upgrades. This solution has been implemented on multiple production lines and has strong industry replication and promotion value, providing practical reference for the intelligent transformation of rubber and plastic manufacturing production lines.

Key words: tire production; cooling circulating water; online temperature monitoring; digital transformation; industrial internet; new quality productivity

(R-03)