抚顺特殊钢连轧泵站低碳运维改造实践

李国峰[1] 陈思远[2] 陈进[3] 刘佳伟[1] 杨华川[1]

1. 抚顺特殊钢股份有限公司连轧厂；2. 江苏科技大学；3. 江苏大学镇江流体工程装备技术研究院

摘要：抚顺特钢连轧泵站因设备老化，与当下生产系统不匹配，能耗高、水质差、依赖人工、故障响应滞后，难以满足 60 万 t/a 连轧生产线需求，提质增效改造迫在眉睫。此次改造内容包括优化浊水系统循环流程、改造管路系统、匹配泵与电动机以及应用高功率密度变频驱动永磁潜水泵，新增污水处理装置，部署智能化运维系统。改造后成效显著，水质大幅提升，能效提升明显，节电率达 48.6%，智能化水平飞跃，安全等级达标，为高效生产筑牢根基。

关键词：连轧泵站；节能优化；数智化改造；能效优化；流程优化

1 概述

1.1 研究背景

钢铁工业在我国国民经济发展中发挥重要的作用，为国家的战略性产业；钢铁工业是重要的耗能产业，耗电约占全国总用电的 10% 左右，占工业用电量的 15% 左右[1]；钢铁产业是劳动密集型产业，多数恶劣环境工作还依赖人工进行，人力成本居高，安全保障性差。因此迫切需要通过数智化技术优化钢铁生产工艺、更新传统装备，实现节能减排、降低人工劳动强度，提增安全保障。

泵站是钢铁生产过程中输送冷却水的重要设施，广泛应用在炼铁、炼钢、轧钢生产全流程中，是钢铁生产过程中主要的耗能设备，占钢铁生产用电量的 20% 左右，也是依赖人工操作的关键工段，目前面临人力资源匮乏、能源利用效率低、能源管理滞后等问题，同时面对节能减排的严峻形势，上述工业亟需通过绿色化、智能化实现可持续发展。

1.2 文献综述

黄晓构建系统实现数据采集等管理[1]；张入心借 3G 网络等实现循环水系统实时监控[2]；张蕾等建立火力发电厂循环水优化系统[3]；汤跃等制定节能供水策略[4]；吴骅鸣等用优化算法等优化模型计算[5]；马正军等设计监测系统可提供多种服务[6]。总体而言，国内外对循环水系统冷端设备建模、循环水泵优化及数据挖掘应用等有研究。不过多数还停留在基于机理模型阶段，分析结果与实际运行差距较大。虽数据挖掘在多领域有进展，但循环水系统优化工作仍有欠缺，需借助大数据综合分析、自动控制新技术，把数据挖掘与数据库及 Web 数据库系统有效整合。

1.3 研究意义

本泵站通过综合利用节能优化技术、先进装备、人工智能、多源信息融合、多变量智能调控等先进技术，搭建一体化水系统智能运营管控平台、突破泵站系统故障预警和智能调控等关键技术，综合提升泵站冷却循环系统冷水利用能效，可为化工、钢铁行业冷却系统的低碳化、数字化、智能化改造和“双碳”目标的实现提供理论和技术支撑[2]。

2 项目背景与改造需求

2.1 抚顺特殊钢连轧泵站概况

抚顺特殊钢连轧泵站主要向加热炉、轧机、高压除磷设备供应冷却水，包括净环冷却水循环系统和浊环冷却水循环系统[3, 4]，工艺流程如图 1 和图 2 所示。

改造前泵站共有 10 台泵，6 台泵运行，其中净环水供水泵因压力不足，同时防止故障停泵切换不及时，故 2 台泵运行，水泵运行参数见表 1。

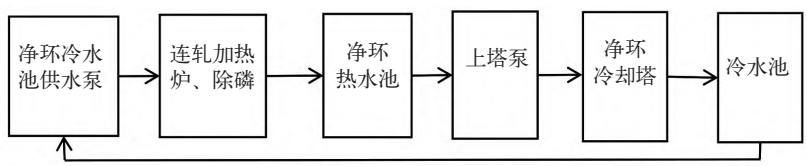

图 1 净环水系统工艺流程图

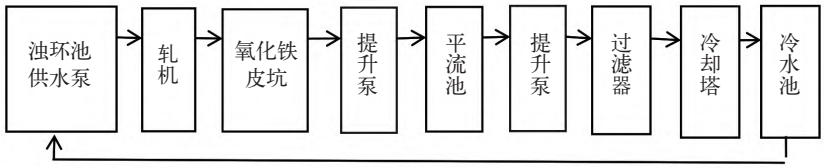

图 2　浊环水系统工艺流程图

表 1　改造前泵运行参数

	运行电流 /A	额定电流 /A	额定功率 /kW	实际运行功率 /kW
浊环一次提升泵（长轴泵）	100	164.3	75	45.65
浊水二次提升	120	164.3	75	54.78
浊环轧机供水泵	100	399	225	56.39
净环供水泵 1	140	399	225	78.95
净环供水泵 2	200	240	132	110
净环上塔泵	110	164.3	75	50.21
合计				395.98

现场监控均用数显表进行电流、主管流量、主管压力、水池液位的测量，监控现状如图 3 所示。水泵起停、调节及倒值机均由人工进行。

因此存在诸多亟待解决的问题。从设备层面来看，部分水泵运行年限已久，老化严重，泵体出现磨损、腐蚀现象，导致密封性能下降，频繁发生漏水问题，不仅浪费水资源，还对周边设备及环境造成影响。在运行效率方面，现有泵站的设备配置未能充分匹配钢铁厂复杂多变的用水需求。高峰期供水压力不足，影响钢铁生产流程的连续性；而在低峰期，水泵又常处于低效运行状态，能耗过高。同时，泵站的自动化控制水平较低，多依赖人工操作与监测 [5]，响应速度慢，难以实时精准调控，进一步降低了供水系统的可靠性与稳定性。此外，维护管理体系也存在漏洞，缺乏完善的定期巡检计划和专业维护团队，致使设备故障隐患不能及时发现与排除，增加了突发故障的风险，严重威胁钢铁厂的正常生产运营。

图 3　原现场监控现状

2.2　改造需求

连轧厂依据现状提出的要求产能具备实现 60 万 t/a 的能力，在轧制线规划产能提升的前提下，泵房净水、浊水的流量、压力已无法满足生产现场需求，同时泵房设备老化，管路锈蚀，过滤器堵塞，加之自动化能力差，完全依赖人工操作，在安全、效率及经济性方面已满足不了现有生产能力的需求，迫切需要设备节能更新、智能化改造。

3　数智化改造技术方案

本泵站改造从智能运维全视野角度全局考虑，遵循设备（系统）节能、运行节能和管理节能 3 个维度进行了优化。

3.1　设备（系统）节能

在设备（系统）节能维度，对泵站老旧设备进行全面评估与更新。

1）在保证水质提升及系统高效的基础上，对浊环水系统流程进行了优化，将浊环水中二次沉淀（氧化铁皮坑为一次沉淀，平流池为二次沉淀）舍弃，直接进入一体化高速水处理系统，保证了出水水质要求。同时净环水和浊环水均植入基于数字孪生的智能调控系统，保

表 2　工艺优化后水处理指标及水质

项目	高速一体化水处理装置
滤速 V/（m/h）	30 ～ 40
截污量 /（kg/m^3）	15 ～ 23
滤料直径 /mm	15 ～ 23
出水浊度 /NTU	0.2
孔隙率（%）	93
比表面积 /（m^2/m^3）	8 000
截泥洗出率（%）	96
反洗耗水率（%）	0.7

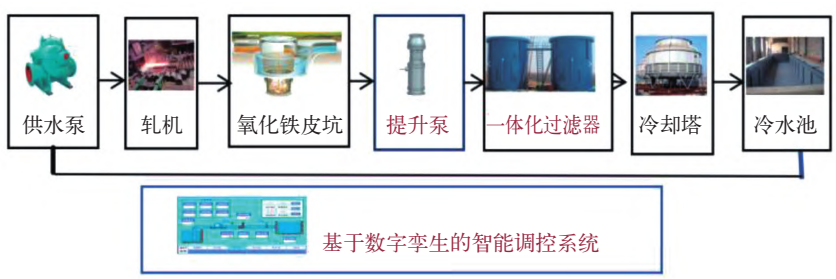

图 4　优化后浊环水系统工艺流程图

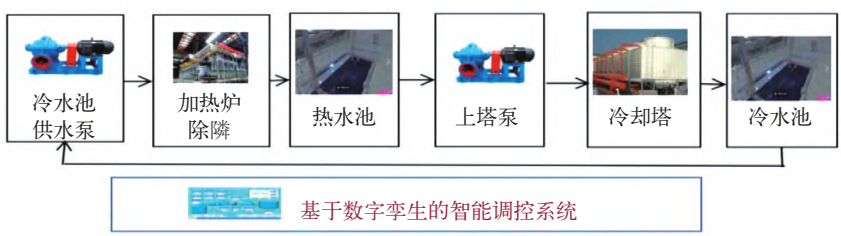

图 5　优化后净环水系统工艺流程图

证高效运行及无人值守。优化后浊环水净化系统工艺流程如图 4 所示，优化净环水系统工艺流程如图 5 所示，工艺优化后水处理指标及水质情况见表 2。

2）保证泵与系统的匹配性，即保证泵的流量、扬程与系统一致，偏离率最小。依据行业标准 JB/T14165—2022《泵给排水能效限定值及能效等级》，对净环水系统、浊环水系统管路及所有泵组的系统特性曲线进行拟合优化，实现了实际工况下性能参数特别是效率的偏离率不大于 5%。改造前后泵流量、扬程参数对照见表 3。

3）选用高效节能型水泵，其先进的水力设计与高效变频电机配置，能大幅降低能耗。所有泵均配备变频器，根据工况的实际需求进行自动调频，达到最佳的节能状态；在氧化铁皮坑中采用新型的变频永磁调速驱动水泵，可依据实际流量需求精准调节转速，相较于传统定速水泵，节能效果可达 40% ～ 50%。

4）引入智能控制系统，通过传感器实时监测设备运行参数，自动调控设备工作状态，使系统始终处于最佳运行工况。根据水位、压力、流量等数据，精准控制水泵的起停与运行台数，避免设备空转或低效运行，进一步提升设备（系统）整体节能水平。

3.2 运行节能

运行节能层面，借助智能运维系统构建精准的运行模型。基于大数据分析过往运行数据，结合实时工况，优化设备运行策略，如图 6 所示。例如在用水低谷时段，合理降低水泵运行频率，在满足供水需求的同时，减少能源消耗。通过优化泵站内的水流路径，降低水头损失，提升水流输送效率。安装智能监测仪表，实时掌握管道流量、压力变化，及时发现并解决管道泄漏等问题，防止能源浪费。另外，合理安排设备检修维护计划，运用状态监测技术，在设备即将出现故障前进行维护，避免设备故障引发的额外能耗与停机损失，确保泵站运行过程中的节能高效。

表 3 改造前后泵流量、扬程及实际运行情况对比

工位名称	流量 /（m^3/h）			扬程 /m			偏离率（%）			
	改造前	优化后	实际	改造前	优化后	实际	改造前		优化后	
							流量	扬程	流量	扬程
净环供水泵	750	460	445	55	29	28	41	49	3.3	3.4
净环上塔泵	750	420	410	32	10	10	45.3	68.8	2.3	0
氧化铁皮坑提升泵	1 000	350	340	30	20	20	66	33.3	2.8	0
二次提升泵	750	——	——	39	——	——	——	——	——	——
浊环供水泵	750	420	410	55	12	12	45.3	78.2	2.4	0

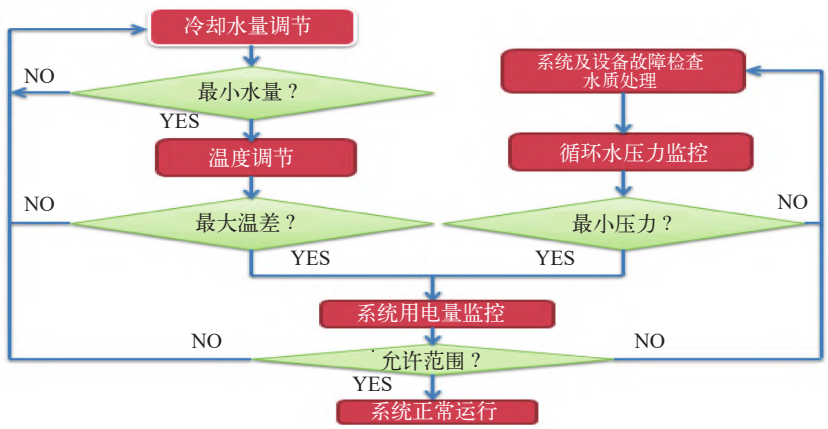

图 6 运营管控模型图

3.3 管理节能

管理节能侧重于利用智能运维实现精细化管理。建立能源管理平台，对泵站能耗数据进行集中采集、分析与可视化展示，如图 7、图 8 所示。管理人员可直观了解各设备、各时段能耗情况，精准定位高耗能环节，从而针对性制定节能措施。制定科学合理的绩效考核制度，将节能指标纳入员工考核体系，激励员工积极参与节能工作。加强员工节能培训，提升员工节能意识与操作技能，确保设备正确、节能运行。利用智能巡检系统，替代部分人工巡检，提高巡检效率与准确性，减少人力成本与因人工疏忽导致的能源浪费，从管理环节全方位助力泵站节能。

4 实施过程与保障措施

抚顺特殊钢连轧泵站浊环水和净环水泵站消耗大量能源。对其进行节能及智能改造，既能降低生产成本，又能提升生产效率与管理水平。

4.1 实施过程

4.1.1 设备评估与方案设计

对现有水泵、电动机、管道及控制系统进行全面评估，包括设备性能、运行状态、能耗情况等。依据评估结果，结合生产需求，设计针对性改造方案。所有效率低的水泵，选用了高效节能型水泵；将老旧电动机，更换为高效电动机，并采用了变频调速技术。同时，规划智能控制系统架构，确定传感器、控制器及通讯网络的选型与布局。

4.1.2 设备更换与安装

按设计方案，更换了老旧低效设备。安装新水泵、电动机时，确保其与管道精准连接，保证密封性与稳定性。在安装智能传感器过程中，要合理确定安装位置，如在管道关键节点安装压力、流量传感器，以准确采集运行数据。同

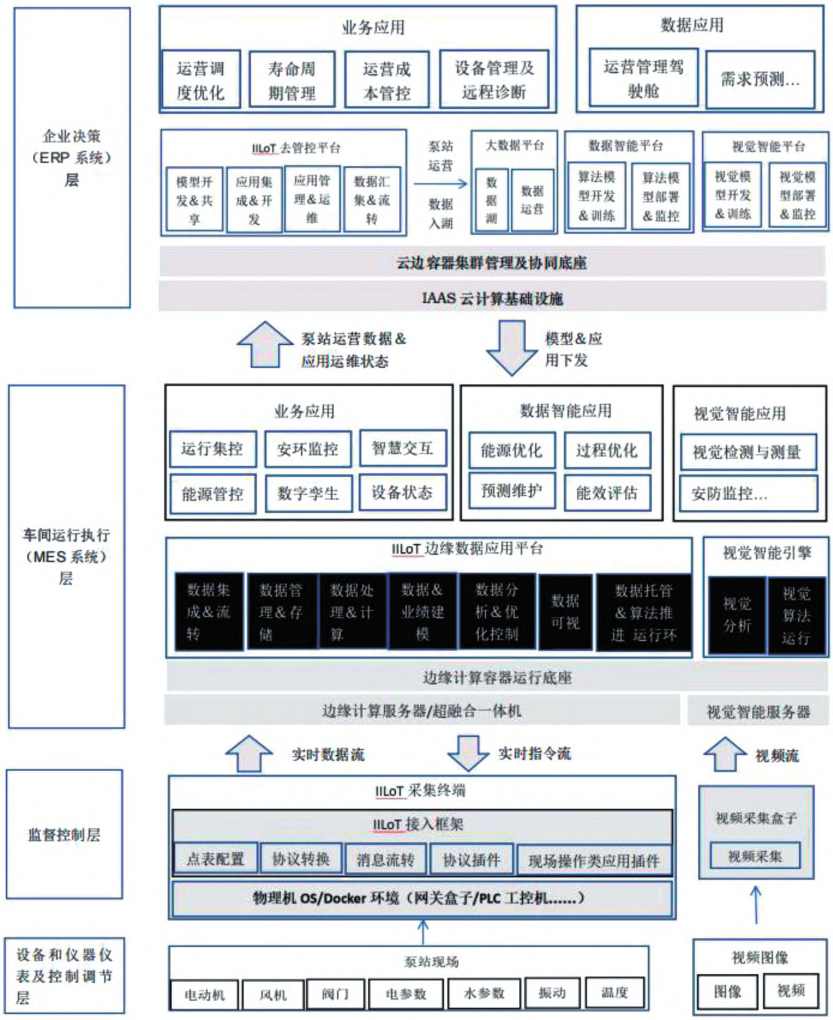

图 7　智能管控系统架构图

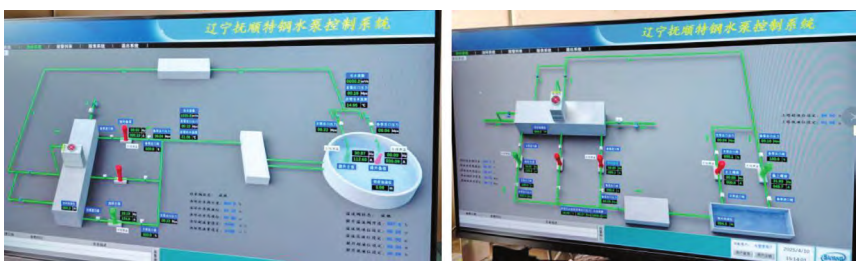

图 8　管控系统界面图

时，铺设通信线路，连接各智能设备与中控室，构建数据传输网络。

4.1.3　智能控制系统调试

完成硬件安装后，进行智能控制系统调试。首先对传感器进行校准，确保采集数据准确可靠。接着调试控制器参数，根据生产工艺要求，设定水泵的起停逻辑、转速调节范围等。通过模拟不同工况，测试系统的响应速度与控制精度，对出现的问题及时调整优化，直至系统能稳定、准确地运行。

4.1.4　系统联调与试运行

在智能控制系统调试完成后，进行全站系统联调。模拟钢铁厂实际生产过程，让浊环水和净环水系统协同运行，检查各设备间的联动性、协调性。在试运行阶段，安排专人监测系统运行状态，详细记录能耗、水质、设备运行参数等数据。对试运行中暴露的问题，如设备故障、控制逻辑不合理等，及时组织技术人员分析解决。

4.2　保障措施

4.2.1　技术保障

组建专业技术团队，成员涵盖机械、电气、自动化等多领域工程师。技术团队负责改造方案设计、施工指导及调试优化，确保技术的先进性与可行性。同时，与设备供应商、科研机构保持密切合作，及时获取新技术、新方法，解决改造过程中的技术难题。

4.2.2　施工管理保障

制定详细施工计划，明确各阶段任务、时间节点及责任人。加强施工现场管理，严格执行安全操作规程，确保施工安全。建立施工质量监督机制，对设备安装、线路铺设等关键环节进行质量检验，保证施工质量符合设计要求。

5　改造效果与效益分析

5.1　系统功能实现情况

1）流量和压力：净环、浊环水流量和压力均达标，满足生产现场需求；2）智能化：实现设备自动化控制和可视化，无人值守；3）故障诊断：具备故障诊断及预警功能；4）自动过滤：实现自动过滤及反冲洗；5）智能巡检：提供数字巡检记录；6）能耗预警：实现能耗平衡及预警；7）报表生成：生成各类报表。

5.2　关键性能指标达标情况

5.2.1　节能效果

原系统运行总功率为 396 kW，现系统运行总功率为 204 kW，运行总功率降低 192 kW，系统节电率达 48.6，智慧安全管控系统技术指标实现情况，见表 4。

5.2.2　技术指标分析

1）节能效果显著：通过优化泵站设备和系统，运行总功率从 396 kW 降至 204 kW，节电率达 48.6%，表明项目在节能方面取得了显著成效；2）智

表 4　智慧安全管控系统技术指标实现情况

序号	指标内容	标准值	实测值	结论
1	网络延迟	1. 静态数据传输网络延迟≤ 1 s 2. 动态数据传输网络延迟≤ 0.5 s 3. 数据更换频次≤ 2 s	1. 静态数据传输网络延迟 0.8 s 2. 动态数据传输网络延迟 0.4 s 3. 数据更换频次 1.8 s	符合
2	安全等级	依据 GB/T22240 达到安全等保 2.0 级	现场为内部网络，满足安全等级要求	符合
3	响应时间	1. 交互类平均响应时间 0.2 ～ 0.8 s，峰值响应时间 0.5 ～ 1 s 2. 查询类平均响应时间为 1 ～ 3 s 3. 在线分析类平均响应时间为 0.3 ～ 1 s，峰值响应时间为 0.5 ～ 3 s 4. 统计报表类平均响应时间为 1 ～ 3 s，峰值响应时间为 3 ～ 8 s	1. 平均响应时间 0.5 s，峰值响应时间 0.8 s 2. 查询类平均响应时间为 3 s 3. 在线分析类平均响应时间为 0.6 s，峰值响应时间为 3 s 4. 统计报表类平均响应时间为 2.81 s，峰值响应时间为 6 s	符合
4	稳定性	1. 要求 7×24 h 运行，通过性能监测、系统巡检等方式，及时发现并避免系统故障 2. 每年意外死机不超过 2 次 3. 因平台问题导致的操作失败率不超过 0.3% 4. 服务器系统时间与标准时间应实时同步	目前无死机、操作失败现象，服务器系统时间与标准时间应实时同步	符合
5	能效提升	通过本文件技术的应用，实现管控能效提升较传统装置比较不低于 5%，生产效率提升 10%	通过工艺优化、装备更新及管控系统改造，能效提升 48.6%，生产效率提升 12.6%	符合

能化水平高：设备自动化控制和监测覆盖率达到 100%，实现了泵房的无人值守，提高了运行效率和安全性；3）数据交换和传输高效：网络延迟和响应时间均符合标准要求，确保了数据的实时性和准确性，为系统的稳定运行提供了有力支持；4）系统信息安全可靠：安全等级达到内部网络要求，系统运行稳定，无死机和操作失败现象，时间同步正常，保障了系统的安全性和可靠性。

6　挑战与改进方向

6.1　实施中的挑战

1）数据质量波动：旧设备传感器噪声干扰→增加数据清洗模块；2）算法泛化能力不足：轧制工艺变化导致模型失效→引入迁移学习。

6.2　未来优化方向

1）数字孪生深化应用：实现泵站“虚实联动”仿真优化；2）扩展 AI 应用场景：钢水质检数据与泵站运行参数联动分析。

7　结论

抚顺特钢的连轧泵站，作为保障生产的关键设施，近年来却因设备老化陷入重重困境。其原有的设备与当下的生产系统严重不匹配，能耗居高不下，水质也持续恶化，这不仅导致设备磨损愈发严重，还使得整个泵站对人工的依赖性极强。一旦出现故障，响应往往滞后，根本无法满足 60 万 t/a 连轧生产线的高强度生产需求，进行提质增效改造迫在眉睫。

此次改造的核心内容极为丰富：在工艺流程方面，对原浊水系统循环工艺流程进行了深度优化，让水循环更加科学合理。管路系统也迎来全面改造，确保水流输送高效稳定。同时，针对泵及电动机开展系统匹配性优化工作，使其运行更为协调。特别值得一提的是，应用了高功率密度变频驱动永磁潜水泵，极大提升了泵的工作性能。还新增了高效一体化污水处理装置，从根源上改善水质问题。此外，创新性地部署安装了基于物联网（IoT）、大数据分析与智能控制的智能化运维系统，为泵站的智能化管理奠定基础。

改造成效显著：水质方面得到大幅提升，出水悬浮物 SS ≤ 15 mg/L、出水含油≤ 5 mg/L，完全达到高标准的水质要求。能效提升也十分惊人，运行总功率从 396 kW 锐减至 204 kW，节电率高达 48.6%，有效降低了生产成本。智能化水平更是实现质的飞跃，设备自动化控制和监测覆盖率达到 100%，网络延迟和响应时间均符合标准要求，确保数据实时且准确。安全等级也达到内部网络要求，系统运行稳定，无死机和操作失败现象，时间同步正常，全方位保障了系统的安全性与可靠性，为抚顺特钢的高效生产提供了坚实支撑。

参考文献：

[1] 黄晓．热电厂外循环水系统的数据采集和管理 [D]．杭州：浙江大学，2005．

[2] 张入心．基于 3G 网络和 PLC 控制的远程循环水监测净化系统的研究与应用 [D]．上海：上海交通大学，2013．

[3] 张蕾，魏龙．基于能量价值理论的电站循泵优化及系统开发 [J]．排灌机械工程学报，2011, 29(2):144-148.

[4] 汤跃，马正军．冷却循环水系统节能及应用 [J]．排灌机械工程学报，2012, 30(6):706-709.

[5] 吴骅鸣．电厂负荷优化分配和循环水系统优化运行的研究 [D]．杭州：浙江大学，2004．

[6] 马正军，何小柯．一种基于云计算的工业循环冷却水系统监控系统 [P]．CN106094764A.2016-11-9．