

某钢铁厂压缩空气系统群控技术研究与应用

孙暑明, 潘德茂, 胡 晖, 胡江明, 胡志宇, 沈 岑

(杭州哲达科技股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要:针对某大型钢铁厂压缩空气系统存在的设备调控缺乏统一管理、压力波动大、运行能效偏低及人工粗放管控等问题,为挖掘其节能潜力并实现智能化运行,采用以“系统能效最优与智能协同”为控制目标的压缩空气数字化智慧管理系统改造方案。其包括构建“控制中心—空压站—设备”三级管控架构,并集成负荷均衡控制、压力高精度稳压、AI 预测与前馈控制以及多站协同等核心技术。改造后的运行数据表明,系统整体能效提升,平均电单耗从 0.105 kWh/m^3 降至 0.100 kWh/m^3 ,管网压力波动在 $\pm 0.02 \text{ MPa}$ 以内,为同类大型压缩空气系统的节能改造提供参考。

关键词:钢铁;压缩空气;多站协同;节能

中图分类号:TP23

文章编号:1000-0682(2026)04-0084-05

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.014

Research and application of centralized control technology for compressed air systems in a steel plant

SUN Shuming, PAN Demao, HU Hui, HU Jiangming, HU Zhiyu, SHEN Cen

(Hangzhou ZETA Technology Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310051, China)

Abstract: Addressing the issues existing in the compressed air system of a large steel plant, such as the lack of unified management for equipment regulation, significant pressure fluctuations, low operational energy efficiency, and manual extensive control, a transformation solution of a digital intelligent management system for compressed air was adopted to tap its energy-saving potential and achieve intelligent operation. Focuses on the control objective of "optimal system energy efficiency and intelligent coordination", this solution is implemented through the same system. It includes establishing a three-level management and control architecture of "control center - air compressor station - equipment", and integrating core technologies such as load balancing control, high-precision pressure stabilization, AI-based prediction and feedforward control, and multi-station coordination. According to the operational data after the transformation, the overall energy efficiency of the system has been improved, the average specific power consumption has decreased from 0.105 kWh/m^3 to 0.100 kWh/m^3 , and the pipeline pressure fluctuations have been within $\pm 0.02 \text{ MPa}$. This project provides a reference for the energy-saving transformation of similar large-scale compressed air systems.

Keywords: steel; compressed air; multi-station coordination; energy-saving

0 引言

“双碳”目标下,节能减排是我国工业领域实现可持续发展的核心任务之一,钢铁企业作为高耗能、高排放生产企业,其能源利用水平对行业低碳转型

至关重要^[1]。压缩空气是钢铁企业仅次于电力的第二大动力能源,被应用于烧结输灰、高炉喷吹、连铸雾化冷却、转炉底吹等冶金流程^[2],系统耗电量约占工业耗电的 9% ~ 15%^[3],是企业节能降耗的重点方向。但目前我国钢铁企业压缩空气系统存在的共性问题包括调度不合理、响应不及时、能源利用率偏低等^[4-8],不但造成企业的能源浪费,增加企业成本,也影响了钢铁行业的绿色低碳发展。

压缩空气系统的改造不仅需要单体设备的匹配

收稿日期:2026-03-16

第一作者:孙暑明(1982—),男,江西赣州人,本科,工程师,研究方向为能源系统智能化控制。

升级,更离不开群控技术的优化。目前,许多钢铁企业仍采用单机独立或简易集中控制形式,依靠人工经验调节压缩空气系统供气量,难以适应生产过程中复杂多变的用气负荷,导致能效低下,运行不稳。针对钢铁企业自身特有的用气场景,选用适配性强、控制精准、协同高效的智能化群控技术,有针对性地解决设备调控离散化、压力与负载调节低效、人工调控粗放化、用气需求适配性差等痛点,即有利于实现国家节能降碳的要求,又有利于提升企业经济效益。该文以某大型钢铁厂压缩空气系统为例,剖析其运行过程中存在的问题,运用一套基于压缩空气数字化智慧管理系统的解决方案实施改造,并对改造效

果进行分析和评价,以期同类系统节能改造提供方向。

1 项目改造背景

1.1 设备配置参数

某大型钢铁厂的压缩空气系统由一号站、二号站、四号站、六号站和七号站共 5 座空压站组成,各站互联互通,形成分布式供气网络,为炼铁、炼钢、热轧、冷轧以及智新电磁等主产线提供压缩空气。各空压站设备配置参数见表 1,空压机运行参数见表 2。

表 1 各空压站设备配置表

空压站名称		一号站	二号站	四号站	六号站	七号站
离心空压机	台数	4(3 用 1 备)	5(3 用 1 备)	4(3 用 1 备)	5(3 用 1 备)	3(2 用 1 备)
	额定排气量/(Nm ³ /min)	250	150	250	250	250
	额定功率/kW	1600	1120	1600	1600	1500
	排气温度/℃	≥110	≥110	≥110	≥110	≥110
	额定压力/MPa	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
	气量调节范围/%	78 ~ 102	78 ~ 102	78 ~ 102	78 ~ 102	78 ~ 102
干燥机	台数	4	4	4	4	3
	类型	余热吸附	余热吸附	余热吸附	余热吸附	转鼓式
	处理气量/(Nm ³ /min)	250	150	250	250	250

表 2 各空压站空压机运行数据表

空压站名称	一号站	二号站	四号站	六号站	七号站
台数	3	3	3	3	2
排气量/(m ³ /min)	746	420.2	604	783.3	468.5
	100		65	103.1	93.7
运行电流/A	96	均 71	92.8	98	93.8
	95		92.1	100.1	/
运行功率/kW	1558.8		1013.2	1607.1	1611.6
	1496.45	均 1106.7	1446.5	1527.6	1615.7
	1480.86		1435.7	1560.4	/
合计运行功率/kW	4536.1	3320.1	3895.4	4695.1	3227.3

整个系统共配置 21 台离心空压机、16 台余热有气耗干燥机(耗气率约 3%)及 3 台转鼓式干燥机,压缩空气经干燥系统处理后供给用户,实际运行中末端压力控制在 0.58 ~ 0.64 MPa,系统平均送风量约 3650 m³/min。

1.2 系统运行存在的问题

当前压缩空气系统 5 座空压站的设计及选型均基于最大生产用气量配置,但实际生产工况动态变化,叠加现有管控模式缺陷,导致系统长期处于低效

运行状态,能耗损失严重。

1.2.1 设备调控缺乏统一管理

当前压缩空气系统仍沿用传统的分散控制模式,各空压站虽已联网但仍独立运行,站内运行压力设定值差异较大。其中 3 个站设定压力偏高,离心空压机长期满载运行;另外 2 个站作为调节站,其离心空压机常处于低负载甚至放散工况,即便导叶开度仅 30% 却仍需运行,导致调节站的电单耗居高不下。而满载运行的空压站因供气压力长期维持上限,实际供气量大于生产需求。整个系统的离心空压机均处于无序管控状态,缺乏系统级协同调控,其负荷调节能力未能充分利用,不仅降低机组整体运行效率,还产生非必要放散,造成显著的能源损耗。

1.2.2 压力与负载低效控制

设备调控的离散性直接导致了系统负载的严重不均,部分空压机长期满载,而另一部分则长期低载运行,这种不均衡的工况迫使系统为保障最不利点的供气,不得不整体维持较高的供气压力(平均在 0.62 MPa 以上)。更高的系统压力直接加剧了管网泄漏量并抬高空压机能耗,形成可观的额外能耗。

1.2.3 粗放的人工管控方式

值班人员在远控大厅的可操作范围仅限机组启停和加卸载,无法进行负荷的精细化调节。面对生产节奏变化而造成的管网压力波动,缺乏有效的干预手段;各站离心空压机启停主要依靠人工观察管网压力反馈值,并结合电话沟通获取的末端压力信息进行主观判断,这种管控方式易造成运行决策偏差,且响应滞后。加之受限于现有控制技术的制约,离心空压机导叶无法精准定位,其反复动作不仅影响调节精度,也加速了导叶结构的磨损。系统压力控制采用简单的宽压力带反馈调节模式,难以满足精密仪表与特定工艺对供气压力稳定性的严格要求。

1.2.4 用气适配能力不足

钢铁生产中连铸、轧制等工序的用气负荷呈现阶跃式变化,原有系统控制策略仅为被动反馈,缺乏前馈与预测机制,对末端用气波动的响应存在固有滞后,无法及时调整机组运行状态,导致管网压力波动较大。当末端大用气量设备启动时,会造成局部管网压力瞬时下降,影响生产连续性。且系统缺乏用气预测能力,无法提前调整运行策略,易因压力骤变而影响系统的稳定运行。同时空压站高效调节区间狭窄,仅约为总负载的 15%~20%。有限的调节裕度导致大量工况下,机组运行在低效区,无法有效平抑用气峰谷变化,进一步加剧系统运行的不稳定性。

2 改造技术措施

为解决上述相关问题,本次升级改造采用压缩空气数字化智慧管理系统,打造“控制中心—空压站—设备”三级管控架构,综合采用多策略群控算法、AI 预测模型、智能运维等关键技术,实现系统的精细化控制、协同化运行和智能化管理。

2.1 系统架构

2.1.1 三级控制单元

系统构建控制中心单元(ZETOP)、空压站智能管控单元(ZETIC)、数据采集与执行单元(ZCCU)。其中控制中心单元部署在空压一站,用于实现全局优化、多站协同调度和全局数据统计分析。

空压站智能管控单元(ZETIC)在每个空压站部署 1 套,用于实现站内机组负荷协调、联动控制和压力带稳定控制。

数据采集与执行单元(ZCCU)为每台离心空压机独立配置,用于采集空压机运行数据(压力、流

量、温度、电流等)和管网关键参数,执行负荷控制指令,并在发生故障或异常时自动退出群控模式,回退至原控制模式,保障设备安全。

2.1.2 网络与硬件配置

各空压站与控制中心之间采用环网架构铺设单模光缆,并预留充足备纤芯。控制中心到各空压站光缆路由长度分别为:七号站 2100 m、六号站 1700 m、四号站 500 m、二号站 2750 m、一号站 1500 m。现场通信采用超 6 类双屏蔽网线,所有控制单元之间通过 TCP/IP 协议进行高速可靠通讯,支持模块带电热插拔。

新增 38 台插入式流量计(测量精度 $\pm 0.5\% \pm 1 d$,支持在线带压安装),其中,为离心空压机加装 18 台(空压六站前期已安装 3 台),在主要末端用户侧加装 20 台;同时配置管道式压力传感器(测量误差小于 $\pm 0.1\%$,防护等级 IP67),实现对压力、流量信号的精准采集。系统集成北斗对时系统,确保多站点数据时间同步精度。

2.2 核心控制技术应用

2.2.1 空压机负荷均衡控制技术

针对系统负荷分配不均的问题,采用负荷均衡控制算法,通过调节各离心机入口导叶(IGV)开度,使受控机组的导叶运动保持同步,实现负荷均匀分配。系统实时采集每台空压机的入口导叶(IGV)开度、放散阀(BOV)开度、电机电流、排气压力等参数,计算各机组的负载率和调节余量,动态优化控制指令,从根本上避免部分机组满载、而部分机组低负载放散的矛盾现象。扩大系统高效调节范围,杜绝非必要放散。

2.2.2 压力高精度稳压控制技术

为解决管网压力波动大的问题,采用压力高精度稳压控制技术,在远端用户及用气量波动大的用户管道入口处安装压力传感器,数据经生产/能源网络实时回传,控制系统通过算法快速作用于离心机入口导叶,实现低延时精准调节,将管网压力波动严格控制在 ± 0.02 MPa 以内,显著收窄了压力带宽。同时,系统可根据机组运行状态动态调整供气压力设定值。例如,当多台机组负载接近高效区下限时,策略性小幅提升管网压力设定值,以此储备应对负荷波动的缓冲容量,从而避免因微小的负荷增加而触发低效的加载或放散,在保障供气稳定性的前提下实现能效最优。

2.2.3 富余量检测与优化控制技术

系统内嵌离心空压机特性曲线自学习算法,实

时计算系统富余调节量,结合流量变化情况给出机组启停建议。当富余调节量明显大于单台机器产气量且流量无明显变化时,系统建议关闭 1 台离心空压机;若流量异常,则提示操作人员核实。该技术可有效避免机组富余运行造成的能耗空耗。在富余量预测性管理模式,单站可节约瞬时功率约 693.7 kW。

2.2.4 多站协同控制技术

控制中心单元统一调度各空压站运行参数,平衡全网供气能力与负载分布。多站协同控制策略根据各站负载率、压力水平和管网流量分布,差异化设定各站压力控制目标。通过优化各站出力分配,在维持管网压力稳定的前提下,为负载率较低的空压机创造停机条件,从而实现全系统少开 1 台空压机的运行目标,充分发挥环网供气网络的协同优势。

2.2.5 AI 预测与前馈控制技术

(1) 基于生产计划的 AI 预测控制

获取制造执行系统(MES)的钢坯浇铸计划(含钢种及工序时间节点),通过甘特图引擎解析生产时序逻辑,构建工序—时间—设备的三维映射关系。融合现场传感器实时数据(末端支路流量计)与连铸生产计划,采用 LSTM 算法构建动态用气量预测模型,借助注意力机制提取关键事件节点(如连铸浇筑及停浇的操作动作)对未来风量需求的时空关联性,对未来 24 h 压缩空气进行滚动预测,2 h 内预测准确率在 90% 以上。基于模型预测结果,采用强化学习模块对空压站内控制参数进行动态修正,形成“计划预测—实时反馈—参数修正”闭环控制,提前匹配生产节奏变化,避免连铸生产阶跃式变化对管网的冲击。

(2) 基于用户感知的前馈控制

采集主要末端用户入口侧压力作为空压站的前馈信号,当压力变化率(dp/dt)达到预设阈值(如 0.1 bar/min)且持续时间超过设定时间时,根据预先建立的每个用户端压力变化率与系统气量缺口值之间的对应关系,提前干预离心空压机导叶开度,补偿新增气量缺口,进而稳定管网压力。

2.3 辅助系统优化技术

2.3.1 后处理系统智能控制

针对干燥机能耗与露点直接相关的特性,制定露点需求曲线,并依此动态调控冷吹气量、循环水量和排气温度,有效减少循环水用量和压缩空气消耗量。同时,实施干燥机错峰冷吹策略,避免多台同时冷吹引起的管网压力波动。

2.3.2 循环水系统气水一体化控制

基于等温压缩原理,构建循环水系统与压缩空气系统的一体化优化体系,采用泵阀一体化变压差控制技术,联动阀门开度与水泵转速,确保水泵始终运行在高效区。根据空压机、干燥机和冷却塔的温度指标,优化系统流量分配和供给总量,使离心空压机、干燥机、水泵、冷却塔在满足用气工艺品质的前提下总体运行功率最低。

3 应用效果分析

3.1 节能效果显著提升

改造后,系统通过负荷均衡控制、压力高精度稳压、富余量优化和多站协同控制等技术的综合应用,实现了显著的节能效果。根据改造前后整年的能耗数据对比,在钢厂各产线产量保持稳定的情况下,压缩空气系统整体总耗电量降低 5.2%,年节约电量达到 1180 万 kWh,按照电费 0.57 元/kWh 计算,每年节约电费 672.6 万元。

从关键指标来看,在保证末端风压的前提下,系统平均运行压力由 0.62 MPa 降至 0.60 MPa,管网压力波动幅度被稳定在 ± 0.02 MPa 以内,符合项目初始设定的 $\leq \pm 0.04$ MPa 的控制目标;离心空压机因避免低效区运行和非必要放散的弊端,系统平均电单耗从 0.105 kWh/m³ 降至 0.100 kWh/m³ 以下。

3.2 运行稳定性大幅改善

应用 AI 预测与前馈控制技术,可预判用气负荷的变化趋势,提前调整机组运行状态,有效应对连铸、轧制等工序的阶跃式用气冲击。改造后,管网压力最大波动幅度从 0.06 MPa 降至 0.02 MPa,末端用户压力合格率从 92% 提升至 99.5%,从未发生因供气压力波动而影响生产工序的现象。

其次,显著加强了系统故障应急处理能力,若某台机组发生故障,备用机组在 30 s 内自动投运,并加载至目标负荷,维持供气稳定。

3.3 管理效率明显提高

通过运行压缩空气数字化智慧管理系统,操作人员可直观监控 5 座空压站离心空压机及附属设备的运行状态与运行参数(压力、流量、温度、电流、IGV/BOV 开度等),减少人工现场巡检频次。

系统能够自动生成日、周、月等统计报表,涵盖累计电量、累计气量、平均气量、平均压力、露点、系统电单耗、输功效率、故障率、节能潜力等指标,为能源的精细化管理和持续优化提供了数据支撑。

3.4 环保效益突出

改造后,按系统年节约电量 1180 万 kWh,结合 2023 年全国电力平均二氧化碳排放因子为 0.530 6 kgCO₂/kWh 进行计算,相当于每年减少二氧化碳排放 6261 吨,为该钢铁厂落实“双碳”目标做出贡献。

4 结语

针对某钢铁厂压缩空气系统在设备调控、压力与负载控制及运行管理等方面存在的问题,通过采用“控制中心—空压站—设备”三级管控模式,集成负荷均衡控制、压力高精度稳压、富余量优化、AI 预测与前馈控制、多站协同等核心技术,解决了钢铁厂复杂用气工况下的负荷波动大、多站协同难、能效提升慢等技术难题。系统投运后,实际年节约电量达 1180 万 kWh,节约电费 672.6 万元,管网压力波动偏差小于 ±0.02 MPa,取得了显著的经济效益与管理效益。因此,该项目的成功应用可为同类型高耗能压缩空气系统节能改造提供可复制的工程范例。

参考文献:

- [1] 邢奕,崔永康,田京雷,等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报,2022,44(4):801-811.
- [2] 王江,赵利平,张欢,等. 某钢铁厂空压机站节能改造实践[J]. 冶金动力,2025(04):66-69.
- [3] 李达,吴玉成,何中炜,等. 工业压缩空气系统优化调度方法[J]. 仪器仪表标准化与计量,2023(05):14-17.
- [4] 毛俊杰. 某钢厂压缩空气系统节能改造实践总结[J]. 南方金属,2025(02):42-44.
- [5] 王裕民. 压缩空气系统的低碳运行改造[J]. 冶金设备管理与维修,2024,42(05):15-17.
- [6] 张璞琦. 钢铁企业压缩空气系统节能改造分析[J]. 冶金标准化与质量,2023,61(02):45-47.
- [7] 王东宇. 钢铁企业压缩空气系统的节能设计分析[J]. 河北冶金,2020(S1):93-95.
- [8] 张静,王伟业,魏唐槐,等. 大型钢铁企业压缩空气系统节能措施[J]. 冶金能源,2019,38(02):11-12+49.

喜 讯

三项压力仪表领域国家标准获批发布 赋能工业自动化高质量发展

2026 年 7 月 30 日,国家市场监督管理总局(国家标准化管理委员会)批准发布《船用外螺纹青铜截止阀》等 323 项推荐性国家标准及 7 项推荐性国家标准修改单(2026 年第 33 号公告)。其中,由全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会第三分技术委员会组织起草的 3 项压力仪表领域国家标准正式获批,将于 2027 年 2 月 1 日起实施。

此次发布的 3 项标准分别为:《自动标准压力发生器》(GB/T 48052-2026)、《机器视觉指针式压力表自动检测装置》(GB/T 48051-2026)及《动态压力测量方法》(GB/T 48053-2026)。三项压力仪表领域国家标准均围绕压力仪表领域的智能化、自动化检测技术展开,随着三项标准的发布,进一步完善了我国工业自动化标准体系,为压力仪表的智能化检定、动态性能评估及自动检测装置的设计与应用提供了统一的技术依据,标志着工业过程测量控制领域压力仪表标准化体系建设迈出重要一步。

全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会第三分技术委员会
(秘书处:陕西省西安市莲湖区大庆路 233 号,范丽俊,13571943556, tc124_sc3@163.com)