

火力发电厂压缩空气系统管道设计优化

王明臣 柳泽政 张 森 吕悦辰 赵天昊
山东电力工程咨询院有限公司 山东 济南 250013

摘 要：火力发电厂压缩空气系统作为关键辅助系统，其管道设计优劣直接影响电厂运行的安全性与经济性。本文聚焦火力发电厂压缩空气系统管道设计优化。阐述了其理论基础，涵盖流体力学、压力损失计算及材料力学。分析了系统现状，指出构成复杂、运行参数差异大及现存问题。从管道材料与附件选型、布局与管径、节能与可靠性、智能化监测与动态优化、维护管理与全生命周期优化五个维度提出优化设计策略。通过材料优选、合理布局、智能监测等措施，降低系统能耗与压力损失，提升可靠性与运行效率，构建全生命周期维护体系，为火力发电厂压缩空气系统管道设计优化提供理论支持与实践指导。

关键词：火力发电厂；压缩空气系统；管道设计优化

引言：随着电力行业对节能降耗与高效运行要求的不断提高，传统压缩空气系统管道设计逐渐暴露出诸多问题，如压力损失大、能耗高、可靠性不足等。本文旨在通过系统探讨压缩空气系统管道设计优化的理论基础、现状问题及优化策略，为提升火力发电厂压缩空气系统性能提供科学依据与实践方案。

1 火力发电厂压缩空气管道设计优化的理论基础

在火力发电厂压缩空气系统管道设计优化中，流体力学、压力损失计算及材料力学构成了核心理论基础，为系统高效、稳定运行提供科学依据。（1）流体力学原理。伯努利方程作为核心理论，描述了流体在管道中流动时动能、势能与压力能的转换关系，揭示了流速与压力的反比特性，是管径选型与布局优化的重要依据。

（2）精确的压力损失计算。压力损失分为沿程阻力与局部阻力，沿程阻力采用达西-魏斯伯格方程计算，通过摩

擦系数、管径、管长及流速的参数耦合，量化单位长度管道的压力降。（3）材料力学理论为管道结构设计提供安全保障。在压缩空气系统中，管道需承受内压、温度变化及机械振动等多载荷作用。采用有限元分析（FEA）方法模拟复杂工况下的应力分布，优化支撑结构设计，避免共振与疲劳失效^[1]。

2 火力发电厂压缩空气系统管道现状

2.1 系统构成复杂多样

火力发电厂压缩空气系统管道宛如人体的脉络，连接着各个关键环节。从源头看，主要由空气压缩机、储气罐、干燥器、过滤器及各类阀门等设备，经管道串联或并联而成。管道则以不同材质（如镀锌钢管、不锈钢管、铝合金管）构建起庞大网络，将处理后的压缩空气输送至全厂各处用气点，涵盖热工控制、除灰输渣、设备检修等领域，形成一个错综复杂却又至关重要的供气体系。

2.2 运行参数差异显著

在运行参数方面，压缩空气系统管道呈现出多样特性。工作压力是关键参数之一，热工控制用气压力一般稳定在0.6-0.7MPa，以确保气动执行机构精准动作；除灰输渣等气力输送场景，因需克服长距离管道阻力与物料输送阻力，压力要求更高，常达0.7-0.85MPa。流量上，不同用气设备需求差异大，检修用气属间歇性、大流量用气，启动瞬间流量峰值高；而热工控制仪表用气相对连续、流量小且稳定。温度方面，空压机出口压缩空气温度较高，经冷却、干燥处理后，进入管道时温度基本稳定在环境温度附近^[2]。

2.3 现存问题

当前，压缩空气系统管道在实际运行中暴露出诸多

作者简介：王明臣，男，1984，汉族，山东济南，硕士学历，主任工程师，高级工程师，研究方向：能源动力工程专业，专注火电厂除灰除渣系统及压缩空气系统设计，深耕电力行业节能环保与智能化升级方向，在大型火电机组辅助系统的高效化、低碳化设计领域具有丰富的工程经验。

通讯作者：张森，男，1983，汉族，山东济南，本科学历，机务环保部主任，高级工程师，研究方向：能源动力工程专业，长期聚焦火电厂除灰除渣系统及配套压缩空气系统的全流程设计，擅长结合机组容量（300MW至1000MW级）、燃料特性及环保要求，制定定制化技术方案。主持/参与国内外大型火电厂工程设计项目40余项，涵盖超临界、超超临界机组及垃圾掺烧、生物质混燃等特殊工况电厂。

问题。压力损失问题突出，部分管道因管径选择不合理，存在“大马拉小车”或“小马拉大车”现象，导致流速过快或过慢，增加沿程阻力；局部管件如弯头、三通、阀门等设计安装不当，引发涡流，造成局部压力损失过大，使得远端用气点压力不足。

3 火力发电厂压缩空气系统管道多维度优化设计

3.1 管道材料与附件选型优化

3.1.1 管道材料优选

管道材料的性能直接影响系统的使用寿命、能耗与安全性。在选型时，需综合考量压力等级、介质特性、环境条件等因素。对于工作压力在0.6-0.85MPa的常规压缩空气系统，可选用镀锌钢管作为基础材料，其成本较低且具备一定抗腐蚀性；但在湿度较大或对空气质量要求极高的区域，如热控仪表用气管道，应优先采用不锈钢管（如304、316L材质），此类材料具有优异的耐腐蚀性能，能有效避免铁锈等杂质混入压缩空气，减少对用气设备的损害。

3.1.2 关键附件性能提升

压缩空气系统的附件，如阀门、过滤器、干燥器等，对系统的运行效率和稳定性影响显著。阀门选型时，优先选用球阀或蝶阀，相较于闸阀，它们的局部阻力系数更小，可有效降低压力损失。过滤器的选择需依据用气设备对空气质量的要求，对于热控仪表等精密设备，应配置多级过滤装置，前置粗效过滤器去除大颗粒杂质，后置高效过滤器将灰尘粒径控制在1μm以下，同时配合使用除油过滤器，确保含油量低于0.1mg/m³。

3.2 管道布局与管径优化设计

3.2.1 管网布局优化

组合配置离心式与螺杆式压缩机，更能满足现代煤电机组的灵活性需求，然而，在系统运行中，当压缩机或其对应的干燥设备发生故障时，整条线路可能无法运行，这成为降低系统故障率的重要课题之一。

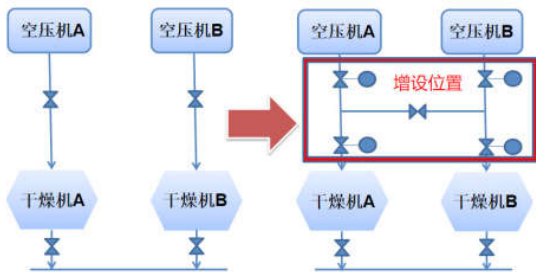


图1 压缩空气系统配置优化

根据统计数据，现有管道布置条件下，8000h工作时长内一条管道故障时长为1380h，此时可通过启用备用设备解决故障。两条压缩空气管道同时故障时长为288h，

会造成巨大经济损失，需要将故障时长降低到120h以下，即故障率降低到1.5%以下。

措施1：在两组离心式空压机之间设置连通管。当离心机A与干燥器B同时故障，或离心机B与干燥器A同时故障时，保障系统正常运行。

措施2：配套增加相关动力阀门组件。活动前阀门设置为DN200手动球阀，数量为4组；活动后增设4组DN200电动阀门，手动球阀减为3组；设置动力阀门，使其运行设备故障时实现快速切换备用。

措施3：完善空压机与干燥器的匹配逻辑控制程序。完善空压机A与干燥器B、空压机B与干燥器A的逻辑匹配情况，包括出力、功率等，保障连通管电动阀门启用时，压缩空气系统运转正常。

8000h内各设备故障时长：空压机A故障时长：240h；空压机B故障时长：240h；干燥机A故障时长：450h；干燥机B故障时长：450h。当单独一条压缩空气管道故障时，故障时长为：240+240+450+450 = 1380h。此时可启用备用压缩空气管道设备。当两条压缩空气管道故障时，故障时长为：125h（空压机A与干燥器B故障）+ 125h（空压机B与干燥器A故障）+38h（3台及以上设备故障）= 288h。通过启用连通管，使空压机A与干燥机B或空压机B与干燥机A配合使用，降低系统故障率。

系统原故障时长为：1380（启用备用设备）+288 = 288h系统原故障率为：288/8000 = 0.036 = 3.6%；因启用连通管降低的故障时长为：125+125 = 250h；系统故障率降低：250/8000 = 0.03125 = 3.125%；系统现故障率：（288-125-125）/8000 = 0.00475 = 0.475%；

综上，采取优化设备联锁、增加备用管路、改进控制策略等措施，将8000h工作时长内压缩空气系统故障率降低至0.475%，有效提升了系统的可靠性与稳定性。

3.2.2 管径精确计算与变径设计

管径大小直接影响管道内的流速和压力损失。传统的管径计算多依据经验公式或固定流速取值，存在一定局限性。优化设计中，应采用基于流量与经济流速的迭代计算模型，结合年折算费用法（综合考虑管道投资成本和运行能耗成本）确定最优管径。在计算过程中，需考虑压缩空气的可压缩性，通过气体状态方程修正不同压力下的流量和流速。此外，根据用气设备的负荷变化特性，可采用变径管道设计，在靠近气源端采用较大管径降低流速，减少沿程阻力；在末端用气点，根据实际流量需求逐步减小管径，避免“大管小用”造成的浪费。管道布局应尽量减少弯头、三通等局部阻力件的使用，优化其安装角度和曲率半径（弯头曲率半径宜 ≥

3D, D为管道直径), 降低局部压力损失^[3]。

3.3 节能与可靠性优化

3.3.1 节能优化策略

降低压缩空气系统的能耗是优化设计的重要目标。通过优化管径和管网布局, 减少压力损失, 可直接降低空压机的运行压力, 从而降低能耗。在系统运行过程中, 采用智能化控制策略, 根据用气负荷变化实时调整空压机的运行台数和转速, 避免空压机长期处于低效运行状态。此外, 对压缩空气系统进行余热回收, 空压机运行过程中产生的大量热量可通过换热器进行回收, 用于预热进气或厂区供暖, 提高能源利用效率, 节能率可达8%-12%。

3.3.2 可靠性增强措施

在管道设计中, 合理设置固定支架和补偿装置, 固定支架间距根据管道直径和压力等级确定(如DN50管道支架间距 $\leq 3\text{m}$, DN100管道 $\leq 5\text{m}$), 防止管道振动引发疲劳断裂; 对于温差较大的管道(温差 $\geq 50^\circ\text{C}$), 需设置 Ω 型或波纹管补偿器, 补偿管道因温度变化产生的伸缩变形, 避免应力集中导致管道损坏。此外, 加强管道的防腐、保温措施, 在潮湿环境中对管道进行防腐涂层处理, 寒冷地区对管道进行伴热(电伴热功率 $\geq 20\text{W/m}$)和保温(保温层厚度 $\geq 50\text{mm}$ 岩棉), 防止管道腐蚀和冬季结冰堵塞, 确保系统长期稳定运行。

3.4 智能化监测与动态优化

随着工业自动化技术的发展, 引入智能化监测系统是压缩空气管道优化的重要方向。通过在关键节点部署高精度传感器(如压力传感器精度 $\pm 0.2\%\text{FS}$ 、流量传感器重复性 $\leq 0.5\%$), 实时采集管道压力、流量、温度及泄漏率等参数, 构建系统运行状态数字孪生模型。基于物联网(IoT)技术, 将数据传输至中央控制系统, 利用机器学习算法对历史数据进行分析, 预测用气负荷变化趋势, 提前调整空压机运行参数或管网阀门开度, 实现主动式优化控制, 通过部署智能诊断模块, 对管道异常进行快速识别。如当某段管道压力骤降时, 系统自动定位泄漏点并触发报警, 同时联动备用气源切换; 利用声学监测技术检测管道振动频率, 分析是否存在共振隐患, 及时调整支撑结构或优化气流路径。智能化监测系统不

仅能降低人工巡检成本, 还可通过动态优化减少非必要能耗, 使系统运行效率提升10%-15%, 并延长设备使用寿命。

3.5 维护管理与全生命周期优化

为保障压缩空气系统长期高效运行, 需构建全生命周期维护管理体系。(1)建立基于大数据的预防性维护模型, 通过分析传感器采集的管道压力波动、振动频率等历史数据, 结合设备运行时长与工况参数, 预测阀门密封件磨损、过滤器堵塞等潜在故障, 提前制定维护计划, 将非计划停机时间降低30%以上。(2)采用模块化设计理念, 对关键附件(如阀门、干燥器)实施标准化接口改造, 便于快速更换与升级, 减少维修复杂度与停机时间。(3)开发数字化维护管理平台, 集成设备台账、维护记录、备件库存等信息, 通过移动终端实现巡检任务派发、工单跟踪与实时反馈, 提升维护效率^[4]。定期开展能效审计与系统优化评估, 结合生产负荷变化动态调整维护策略, 例如在低负荷期集中进行管道内壁清洁与防腐层修复, 降低维护成本。

结束语

火力发电厂压缩空气系统管道设计优化是一项系统性工程, 涉及多个学科领域与多个环节。通过本文研究, 从理论基础出发, 结合系统现状分析, 提出了涵盖材料选型、布局设计、节能可靠性提升、智能化监测及全生命周期维护等多维度的优化策略。实践表明, 这些优化措施可有效降低系统能耗与压力损失, 提高运行效率与可靠性, 延长设备使用寿命。

参考文献

- [1]张来青.火力发电厂热控系统的优化设计与实现[J].电力系统装备,2025(2):152-154.
- [2]孟全,李诚,朱晓敏.火力发电厂自动控制系统的设计与优化[J].自动化应用,2025,66(7):17-19.
- [3]解李杨,马小丹.火力发电厂大容量压缩空气系统优化设计探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(12):19-22.
- [4]李婷.浅谈压缩空气站设备及管道系统设计[J].工程建设,2020,52(8):43-47,58.