

化工厂区工业管道布置优化设计研究

王玉博

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214188

摘要: 针对化工厂区管道布置面临的复杂空间约束与严苛安全要求, 本文深入探究了工业管道的布置优化设计方法。通过构建涵盖空间、安全、工艺及操作的约束体系, 确立了安全、高效、经济的优化目标。研究提出了基于规范的路由优选、工艺模拟管径选择、应力柔性优化及BIM碰撞检查等关键技术, 并建立多目标协调机制。该研究实现了管道系统的综合优化, 有效提升了厂区运行安全性与经济性, 为化工工程设计提供了科学依据。

关键词: 化工厂区; 工业管道; 布置优化设计

引言: 工业管道作为化工厂区的“血管”, 其布置合理性直接关系到生产安全与运行效率。然而, 化工厂区环境复杂, 管道布置面临空间受限、介质高危、工艺复杂等多重挑战。传统设计方法往往难以兼顾安全、经济与运维需求, 易导致布局混乱或安全隐患。因此, 开展化工厂区工业管道布置优化设计研究, 探索科学的优化方法体系, 对提升化工企业本质安全水平、降低工程成本具有重要意义。

1 工业管道布置的基础理论与设计规范

1.1 工业管道的分类与构成

工业管道是化工、石化、能源等工业生产系统的核心输送载体, 依据介质、压力、温度、用途等维度可形成标准化分类体系, 为管道布置设计提供基础依据。按输送介质可分为工艺物料管道、公用工程管道、消防管道及排污管道等类别, 不同介质的腐蚀性、易燃易爆性、毒性直接决定管道材质与防护标准。按压力等级可分为低压、中压、高压及超高压管道, 按温度可分为常温、高温、低温管道, 分级标准严格契合国家工业管道设计规范。管道系统核心构成包含管材、管件、阀门、法兰、支吊架、密封元件及检测附件, 各部件协同完成介质输送、调控、截断与安全防护功能。管材作为主体承载结构, 需匹配介质特性与工况条件, 管件实现管道转向、分流、变径, 阀门控制系统通断与流量, 支吊架保障管道结构稳定, 全套构件的标准化选型是管道合规布置的前提, 也是后续优化设计的基础载体。

1.2 管道布置的基本原则

工业管道布置需遵循合规性、安全性、工艺性、经济性与可运维性五大核心原则, 兼顾生产运行需求与长期检修管理要求。合规性原则为首要准则, 所有布置方案必须严格贴合GB、HG等行业设计规范, 满足管道间距、敷设高度、安全防护等硬性要求, 杜绝违规设计

隐患^[1]。工艺性原则要求管道走向贴合生产工艺流程, 缩短介质输送路径, 减少输送阻力与物料损耗, 保障生产工序连续稳定运行。安全性原则聚焦防火、防爆、防泄漏、防应力破坏, 规避管道与设备、构筑物的危险叠加, 远离高温、高压、腐蚀高危区域。经济性原则兼顾初期建设成本与后期运维成本, 合理选型管材、简化管路结构、优化空间布局, 控制工程投资。可运维性原则预留充足检修空间、操作通道与检测位置, 保障阀门操作、设备检修、管道检测作业顺利开展, 全面适配工业生产长期稳定运行需求。

1.3 管道布置的关键技术参数

工业管道布置设计的关键技术参数是保障管路系统安全稳定运行的核心指标, 参数选型与管控精度直接决定管道设计的合理性与可靠性。核心参数主要包含管径、壁厚、介质流速、设计压力、设计温度、管道坡度、支吊架间距及管道挠度等核心指标。管径与壁厚决定管道输送能力与结构强度, 需匹配介质流量与工况压力, 避免管径过小引发流速超标、阻力过大, 或管径过大造成资源浪费。介质流速需严格控制在规范允许区间, 液体、气体、蒸汽介质均有专属流速标准, 防止流速异常引发冲刷、气蚀、噪音等问题。设计压力与温度为管道极限工况参数, 需高于实际生产最大工况, 预留安全冗余。管道坡度适配介质输送与排污需求, 避免积液积气; 支吊架间距决定管道受力状态, 防止管道变形下垂。

2 化工厂区管道布置的核心约束与优化目标

2.1 空间约束分析

化工厂区管道布置面临严苛且复杂的空间约束, 厂区设备密集、构筑物排布紧凑、管廊层级有限, 是制约管道布局的核心客观因素。厂区内塔器、换热器、泵体、储罐等生产设备排布规整且间距固定, 管道需依

托设备接口定位敷设,可灵活调整的空间范围极小。厂区管廊作为管道集中敷设区域,存在层级高度、跨度、承载负荷的硬性限制,多层管廊的管线排布需区分高低压、轻重型管道,避免空间叠加冲突。同时,厂区需预留消防通道、检修通道、人行通道,各类通道的宽度、高度规范进一步压缩管道敷设空间^[2]。另外,地下管网、电缆桥架、暖通管线交叉分布,地上管道与地下设施存在立体空间干涉风险。空间约束导致管道走向、管径排布、支吊架布置均需精准规划,需在有限空间内实现管线规整排布,规避交叉碰撞,最大化利用厂区空间资源,保障布局规整有序。

2.2 安全约束分析

化工厂区介质多具有易燃易爆、有毒腐蚀、高温高压特性,管道布置的安全约束是保障厂区安全生产的核心底线,贯穿设计全过程。防火防爆约束要求可燃、易燃介质管道远离明火设备、电气防爆区域,严格控制管道与火源、热源的安全间距,杜绝介质泄漏引发燃爆事故。防毒防泄漏约束针对有毒、腐蚀性介质管道,要求尽量减少法兰、接头等易泄漏点位,布置在通风良好区域,规避人员密集作业区,配套泄漏检测与防护设施。压力温度安全约束严禁超工况布置管道,高压高温管道需规避薄壁构件与脆弱设备,防止应力过载引发管道破裂。各类安全约束相互关联、层层管控,需全面覆盖极端工况与常规运行场景,彻底规避管道运行的安全隐患,保障厂区人员、设备与生产系统安全。

2.3 工艺与操作约束分析

化工管道布置需严格适配生产工艺逻辑与现场操作需求,工艺连续性与操作便捷性是核心约束条件,直接影响生产效率与运维便捷度。工艺约束要求管道走向完全贴合工艺流程顺序,保障介质输送流向、流量、压力参数匹配工艺指标,避免管路冗余、拐点过多导致工艺参数波动,影响产品质量与生产稳定性。对于间歇生产、回流循环、泄压排污等特殊工艺,管道需预留专属管路结构,满足工艺启停、循环调控、紧急泄压的运行需求。操作约束聚焦现场运维作业,阀门、调节阀、仪表等操作部件需布置在人员易操作、易观测的位置,高度、间距符合人体工程学标准,杜绝高空、狭窄空间等高危操作场景。同时需适配设备检修、管道清洗、介质置换等作业需求,预留操作空间与拆装余量,确保工艺运行稳定、日常操作便捷、检修维护高效。

2.4 优化目标体系构建

结合化工厂区管道布置的各类约束,需构建多维度、层级化的优化目标体系,实现管道系统安全、高

效、经济、合规的综合最优。目标体系以安全稳定为核心首要目标,通过优化管路布局、应力分布、密封结构,彻底规避泄漏、燃爆、变形等安全风险,保障管道长期稳定运行。以工艺高效为核心运行目标,优化管道路由、管径参数与管路结构,降低输送阻力与介质损耗,稳定工艺参数,提升生产运行效率。以经济节能为成本目标,精简冗余管路、优化管材选型、合理规划敷设路径,降低工程建设、设备耗材与后期运维成本,减少能源消耗。以运维便捷为保障目标,规整管线布局、优化操作点位、预留检修空间,提升日常操作、检测检修的便捷性。

3 管道布置优化设计的方法体系

3.1 优化设计的总体框架

工业管道布置优化设计需搭建标准化、系统化的总体框架,统筹约束条件、优化方法与目标需求,实现全流程规范化设计。框架整体分为基础调研、约束校核、方案设计、多维度优化、仿真验证、成果落地六大核心环节,形成闭环设计体系。基础调研阶段梳理厂区空间布局、设备参数、工艺要求、介质特性及规范标准,收集完整设计基础数据。约束校核阶段逐一核查空间、安全、工艺、操作各类约束,筛选设计限制条件,明确优化边界^[3]。方案设计阶段结合基础数据与约束条件,完成初步管路布局、参数选型与结构设计。多维度优化阶段通过路由、管径、柔性、空间、多目标协同优化,迭代完善设计方案。仿真验证阶段借助专业软件完成碰撞检查、应力分析、工艺模拟,排查设计隐患。最终优化方案经校核合规后落地应用,整体框架实现从理论到实操、从单一设计到综合优化的全覆盖,保障设计质量。

3.2 基于规范的管道路由优选方法

基于行业设计规范的管道路由优选方法,是管道布置优化的基础核心方法,以合规性为前提实现路由最优布局。该方法以GB 50319、HG/T 20549等工业管道设计规范为核心依据,明确路由敷设的禁止区域、安全间距、敷设方式等硬性标准,杜绝违规路由设计。优选过程中优先梳理厂区管廊、设备接口、通道布局等固定条件,优先选用管廊集中敷设方式,规避零散敷设导致的布局混乱与安全隐患。结合介质特性差异化优选路由,易燃易爆介质管道避开明火与电气高危区域,腐蚀性介质管道远离精密设备与人行主干道。同时遵循短路径、少拐点原则,精简管道路由长度,减少弯头、三通管件数量,降低输送阻力与泄漏点位。

3.3 基于工艺模拟的管径优化选择

基于工艺模拟的管径优化选择,依托专业工艺仿真

软件精准核算管路运行参数,实现管径的科学化、精细化选型优化。传统管径选型多依靠经验公式估算,存在参数偏差大、适配性不足、能耗偏高的问题,而工艺模拟可精准还原介质流量、流速、压力损失、温度变化等动态工况。通过搭建管道工艺仿真模型,输入介质物性、工艺负荷、输送距离等基础参数,模拟不同管径下的管路运行状态,精准测算各管径的压力损耗、输送效率与能耗水平。结合工艺运行波动区间,校核管径在额定负荷、最大负荷、启停工况下的适配性,规避小管径流速超标、压降过大或大管径资源浪费的问题。同时联动生产成本与运行能耗,平衡建设成本与长期运行成本,筛选出工艺适配、能耗最低、经济性最优的管径规格,实现管径参数与工艺工况的精准匹配。

3.4 基于应力分析的管道柔性优化

基于应力分析的管道柔性优化,核心是通过精准应力校核解决高温、高压管道的热变形、应力集中与振动隐患,提升管道系统柔性及稳定性。化工管道在温度升降、压力波动过程中会产生热胀冷缩形变,极易在弯头、变径、设备接口等位置产生应力集中,引发管道变形、开裂、接口泄漏等故障。借助CAESARII等专业应力分析软件,搭建管道应力仿真模型,全面核算管道在热工况、冷工况、安装工况下的应力分布、位移形变与支座受力情况。针对应力超标、形变过大的管路区域,通过优化弯头角度、增设膨胀节、调整支吊架位置与间距、优化管路走向等方式,释放管道形变应力,提升管路整体柔性。

3.5 基于碰撞检查的空间综合优化

基于碰撞检查的空间综合优化,是解决化工厂区管线密集、立体交叉、空间干涉问题的关键技术,实现厂区管道空间布局规整化。依托BIM三维建模技术,搭建厂区设备、管道、管廊、桥架、地下管网的全维度立体模型,精准还原现场空间布局状态。通过三维碰撞检测功能,自动筛查地上管道之间、管道与设备、管道与构筑物、地上管线与地下设施的硬碰撞与软碰撞问题,精准定位冲突点位与干涉范围^[4]。针对检测出的碰撞问题,结合工艺需求与安全规范,微调管道路由、调整敷设高度、优化管线排布层级,优先保障高压、高危、核心工艺管道的敷设空间,统筹排布低压、公用工程辅助管

道。通过迭代优化与多次碰撞校核,彻底消除空间干涉隐患,最大化利用厂区有限空间,实现管线排布整齐、层次清晰、无冲突、易运维的空间布局效果。

3.6 多目标优化的协调机制

管道布置优化涉及安全、工艺、经济、运维多个相互制衡的目标,需建立完善的多目标优化协调机制,破解单一目标最优、整体失衡的问题。各优化目标存在天然矛盾,例如极致压缩建设成本可能降低安全冗余,过度提升安全标准会增加投资与运维难度,单一维度优化无法满足工程实际需求。多目标协调机制通过量化各目标权重,结合厂区生产等级、安全等级、工程预算等实际条件,明确核心目标与辅助目标的优先级。采用加权分析法、帕累托最优算法等优化模型,对路由、管径、柔性、空间布局等设计参数进行多维度迭代校核,平衡安全性能、工艺效率、建设成本、运维难度四大核心指标。建立方案评估体系,对优化方案进行综合打分,筛选出全局最优方案,实现多目标协同平衡,保障管道布置设计整体最优,适配化工厂区长期稳定安全生产需求。

结束语

本文系统阐述了化工厂区工业管道布置的优化设计策略,从基础理论出发,明确了空间、安全等核心约束,构建多维优化目标体系。通过引入BIM碰撞检查、应力分析及工艺模拟等先进技术,解决管线冲突与柔性不足等难题。研究表明,科学合理的优化设计能显著提升管道系统的本质安全与运行效率。未来应进一步深化数字化技术应用,推动管道设计向智能化、精细化方向发展,助力化工行业高质量发展。

参考文献

- [1]鲍海霞,李文辉,陈斌,等.工业聚集区污水管道病害多元水质成因研究[J].市政技术,2024,42(8):191-198.
- [2]杨任全,张敏,钟达君.化工园区架空天然气管道运维管理的难点及优化对策[J].上海煤气,2026(2):9-11.
- [3]徐凌.化工检测技术在工业用水管道材料腐蚀分析中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):60-62.
- [4]杨柏胜.工业管道安装施工工序安排方案设计[J].石油工程建设,2025,47(9):75-78.