

# 化工车间管道三维布局优化与碰撞检测研究

龚德鑫 张睿哲

惠生工程(中国)有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文聚焦化工车间管道三维布局优化与碰撞检测研究。阐述管道布局优化以系统工程学等为支撑, 兼顾效率、安全与经济性; 碰撞检测涵盖几何相交检测等模块。构建优化模型, 设计目标体系、量化约束条件并基于智能算法实现。设计碰撞检测分层策略, 优化核心算法, 完善结果处理与反馈机制。最后构建系统, 设计总体架构并实现关键功能模块, 为化工车间管道布局提供理论与实践支持。

**关键词:** 化工车间管道; 三维布局优化; 碰撞检测

引言: 化工车间管道布局的合理性直接影响生产效率、安全性与成本。传统二维布局设计难以应对复杂化工场景, 易出现碰撞、空间利用不合理等问题。三维布局优化与碰撞检测成为关键。通过三维建模可直观呈现管道布局, 优化路径、管径等参数, 降低能耗与成本; 精准碰撞检测能提前发现并解决潜在碰撞问题, 保障生产安全。本文深入探讨相关理论与技术, 旨在为化工车间管道设计提供科学有效的方法。

## 1 化工车间管道三维布局与碰撞检测核心理论基础

### 1.1 管道布局优化核心理论

管道布局优化核心理论以系统工程学、流体力学及空间拓扑学为支撑, 旨在实现化工车间管道系统的高效、安全与经济运行。该理论强调布局设计需兼顾流体输送效率与空间利用率, 通过优化管道路径、管径及连接件布置, 降低流体阻力损失与能耗, 契合化工生产连续化、高效化的核心需求。同时, 结合化工工艺特性, 严格遵循物料流向合理、操作维护便捷原则, 规避高危介质管道与设备、操作区的近距离接触, 筑牢生产安全防线。此外, 拓扑优化理论在其中发挥关键作用, 通过建立管道空间拓扑模型, 剔除冗余路径, 实现布局方案的最简化与合理化<sup>[1]</sup>。多目标优化理论亦为核心支撑, 统筹考虑投资成本、运行效率、安全风险、环保效益等多维度指标, 构建全面的优化体系, 为后续模型构建提供坚实理论依据, 确保布局方案兼具技术性、安全性与经济性。

### 1.2 碰撞检测核心理论

碰撞检测核心理论是保障管道三维布局合理性与安全性的关键, 主要涵盖几何相交检测、空间分区管理及碰撞响应分析三大核心模块, 为复杂化工车间多实体布局提供精准检测支撑。几何相交检测以计算几何为理论基础, 通过对管道、设备、建筑结构等实体的几何模型进行离散化处理, 转化为点、线、面等基本几何元素, 再

通过向量运算、距离判断、相交判定等算法, 精准判定不同实体间是否存在空间重叠。空间分区管理理论通过对车间三维空间进行网格化或分层划分, 缩小碰撞检测的范围, 有效降低算法运算量, 大幅提升检测效率, 尤其适配化工车间实体数量多、布局复杂的场景。碰撞响应分析则针对检测出的碰撞问题, 基于优先级原则制定科学调整策略, 明确管道与设备、管道与建筑、管道与管道等不同碰撞类型的处理逻辑。另外, 边界盒算法作为常用辅助技术, 通过构建实体的最小包围盒, 快速排除无碰撞可能的实体对, 为精准检测奠定基础, 确保检测结果的准确性与高效性。

## 2 化工车间管道三维布局优化模型构建

### 2.1 布局优化的目标体系设计

布局优化的目标体系设计是构建管道布局优化模型的前提, 需围绕化工车间生产需求, 建立多维度、可量化的目标框架, 兼顾技术性、安全性与经济性的统一。该体系以核心目标为导向, 辅以次要目标, 形成层级清晰的目标结构。核心目标聚焦管道输送效率与安全稳定性, 通过优化管道路径缩短输送距离, 降低流体阻力与能耗, 同时规避介质泄漏、管道磨损等风险, 保障生产连续运行。次要目标涵盖经济成本与操作便捷性, 需控制管道材料、施工及后期维护成本, 优化管道布置位置, 为设备检修、人员操作预留充足空间。此外, 融入绿色环保目标, 减少管道布局对车间环境的影响, 符合化工行业低碳发展要求。各目标采用量化指标表征, 如以管道总长度、能耗值衡量效率目标, 以投资预算上限界定成本目标, 通过权重分配平衡多目标冲突, 为后续模型构建提供明确的优化方向与评价标准<sup>[2]</sup>。

### 2.2 多约束条件量化与处理

多约束条件量化与处理是布局优化模型构建的核心环节, 旨在将化工车间管道布局中的各类限制因素转化

为可量化、可计算的数学约束,保障模型的实用性与可行性。约束条件主要涵盖工艺、空间、安全、经济四大类,需结合化工生产特性,通过科学方法完成量化与冲突适配处理。工艺约束方面,基于物料输送核心要求,将介质流速、压力损失、管道坡度、连接方式等指标量化为明确数值范围,如易燃介质流速需严格控制在0.5-3m/s,确保满足生产工艺连续运行需求。空间约束通过精准测量车间建筑尺寸、设备安装位置与尺寸,量化为管道布置的空间边界条件,明确禁止布置区域与允许布局范围。安全约束针对不同介质特性,量化安全距离标准,如有毒介质管道与操作区距离不小于1.5米。经济约束则将管道材料、施工、维护等成本转化为预算阈值,采用权重分配法处理多约束冲突,结合层次分析法确定各约束优先级,通过约束松弛技术化解矛盾,确保模型在满足核心约束的前提下实现优化目标。

### 2.3 基于智能算法的优化模型实现

基于智能算法的优化模型实现是将布局优化目标与约束条件转化为可求解方案的关键,依托智能算法的全局搜索与自适应能力,突破传统优化方法在复杂多约束场景下的局限性。模型构建以多目标优化函数为核心,整合管道总长度、输送能耗、投资成本、安全风险等目标参数,结合已量化的工艺、空间、安全等约束条件,建立完整的数学优化模型。选取遗传算法作为核心求解算法,因其具备良好的全局寻优能力与鲁棒性,可高效适配化工车间管道布局的复杂多约束场景。通过编码将管道路径、管径、连接件位置等设计变量转化为染色体,以目标函数值作为适应度评价标准,经过选择、交叉、变异操作迭代更新种群,逐步筛选最优布局方案。同时,引入粒子群算法辅助优化,弥补遗传算法局部搜索能力不足的缺陷,通过粒子位置更新机制提升收敛速度与求解精度。模型实现中,需结合车间实际场景调试算法参数,设定合理迭代次数与收敛阈值,确保优化结果既满足理论要求,又贴合化工车间实际生产需求。

## 3 化工车间管道三维碰撞检测算法设计与实现

### 3.1 碰撞检测的分层策略设计

碰撞检测的分层策略设计旨在通过分阶段、分层次的检测逻辑,平衡检测精度与运算效率,适配化工车间复杂的三维布局场景,解决大规模实体检测中精度与速度的矛盾。该策略采用“粗检测-精检测-二次校验”三层递进架构,构建全方位、高效精准的碰撞检测体系。粗检测阶段基于空间分区理论,将车间三维空间划分为若干独立单元,仅对同一单元内的管道、设备、建筑结构等实体进行初步筛选,快速排除跨单元无碰撞可能的实

体对,大幅降低后续检测的计算量,提升整体检测效率。精检测阶段针对粗检测筛选出的疑似碰撞实体,采用边界盒算法与几何相交算法结合的方式,通过构建实体最小包围盒进行二次过滤,再对包围盒重叠的实体进行精准几何运算,精准判定是否存在真实碰撞。二次校验阶段结合化工工艺特性与实际生产需求,对检测结果进行合理性验证,排除因模型误差、离散化偏差导致的虚假碰撞,确保检测结果的可靠性与准确性。

### 3.2 核心检测算法优化

核心检测算法优化的核心目标在于显著提升碰撞检测的精度与效率。在化工车间复杂的三维布局场景中,传统算法往往面临运算量巨大且精度难以保证的困境,因此必须进行针对性的改进与优化。对于几何相交算法,创新性地引入了自适应离散化技术。该技术能够依据实体结构的复杂程度,动态地调整离散化的精度。具体而言,对于管道弯头、阀门、三通等结构复杂的关键部位,会提高离散精度,以确保检测的准确性,不放过任何潜在的碰撞风险;而对于直管段等结构相对简单的部分,则适当降低精度,从而减少不必要的运算量,实现精度与效率的精妙平衡。同时,对边界盒算法也进行了优化升级,采用轴向包围盒与方向包围盒相结合的复合模式<sup>[3]</sup>。针对设备、建筑等规则实体,使用轴向包围盒可大幅提升构建速度;针对异形管道、非标设备等不规则实体,使用方向包围盒能减少包围盒的冗余空间,提高筛选效率。另外,引入并行计算技术,将庞大的检测任务分解为多个独立子任务,通过多线程并行处理,大幅缩短检测时间,完美适配大规模化工车间管道布局的检测需求,还建立了算法参数自适应调整机制,确保在不同场景下都能保持最佳性能。

### 3.3 碰撞检测结果处理与反馈机制

碰撞检测结果处理与反馈机制作为连接碰撞检测与布局优化的关键纽带,承担着对检测出的碰撞问题进行科学分类、高效处理,并将结果精准反馈至布局优化模块的重要使命,进而形成“检测-处理-优化-再检测”的完整闭环流程。在结果处理阶段,首先依据碰撞对象的不同,将其细致划分为管道与设备、管道与管道、管道与建筑结构三类。接着,根据碰撞的重叠程度、影响范围以及介质危险性等关键因素,进一步划分出不同的严重程度,从而明确紧急处理的优先级顺序。针对不同类型和等级的碰撞问题,制定了差异化的处理策略。对于轻微的管道重叠情况,可通过微调管道路径来巧妙规避;而对于严重的碰撞,则需重新优化设备布局或管道走向。处理完成后,通过数据标准化处理,将碰撞位置、类型、等

级、处理方案等重要信息转化为标准化数据。反馈机制采用实时反馈与批量反馈相结合的灵活模式,对于严重碰撞,实时反馈会迅速触发紧急调整机制;对于轻微碰撞,则进行批量汇总后反馈,并结合布局优化目标进行整体调整,确保优化方案与碰撞检测结果精准适配,实现布局方案的持续优化与完善。

#### 4 化工车间管道三维布局优化与碰撞检测系统构建

##### 4.1 系统总体架构设计

系统总体架构设计遵循“分层架构、模块独立、数据互通、安全高效”原则,构建基于B/S与C/S混合模式的化工车间管道三维布局优化与碰撞检测系统,兼顾操作便捷性与数据安全性。架构自上而下分为数据层、核心算法层、功能模块层与应用层四层,各层级职责清晰、协同联动。数据层负责车间设备参数、工艺数据、空间尺寸、介质属性等基础数据的存储与管理,采用分布式数据库架构,确保数据存储安全、访问高效,同时支持数据实时更新与多终端同步。核心算法层集成布局优化智能算法与碰撞检测优化算法,提供算法灵活调用、参数动态调整功能,为系统核心运算提供支撑。功能模块层划分为布局设计、优化计算、碰撞检测、结果展示四大模块,各模块独立运行且数据互通。应用层提供可视化操作界面,支持布局设计、参数设置、结果查看等操作,具备数据导出、报表生成功能,满足设计人员实际应用需求。

##### 4.2 关键功能模块实现

关键功能模块实现聚焦系统核心功能,基于总体架构设计,结合化工车间实际需求完成各模块技术落地与功能适配,确保系统稳定运行、便捷易用。布局设计模块采用三维可视化建模技术,提供拖拽式操作与参数化

设置功能,支持快速构建车间设备与管道模型,内置标准化管道、阀门、设备组件库,适配不同化工工艺场景,同时支持模型实时编辑、修改与保存<sup>[4]</sup>。优化计算模块集成已实现的遗传-粒子群混合优化算法,用户可自定义优化目标与约束条件权重,系统自动调用算法迭代计算,生成多组优化方案,同步展示各方案目标参数对比,辅助决策。碰撞检测模块嵌入优化后的分层检测策略与核心算法,支持检测范围、精度自定义调整,实时显示碰撞位置、类型、等级等信息,提供自动处理与手动调整两种模式。结果展示模块采用三维可视化技术直观呈现结果,支持数据报表导出与方案保存,为设计决策提供有力支撑。

##### 结束语

化工车间管道三维布局优化与碰撞检测研究,融合多学科理论,通过构建优化模型、设计检测算法及搭建系统,实现布局的智能化与精准化。研究有效提升了管道布局的合理性,降低碰撞风险,保障化工生产的安全高效运行。未来,随着技术发展,可进一步融合大数据、人工智能等前沿技术,持续优化布局方案,为化工行业的可持续发展提供更强大的技术支持。

##### 参考文献

- [1]马建华,路毅,张怡,等.石油化工管道工程三维协同设计的必要性[J].石油规划设计,2020,31(5):35-38,48.
- [2]庞森.三维软件管道设计在化工领域的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(23):124-126.
- [3]徐龙武.化工工程的设备、管道布置与管道材料优化设计[J].辽宁化工,2024,53(01):78-81.
- [4]李政.化工工艺管道设计风险分析与安全对策研究[J].山东化工,2024,53(02):194-195+200.