

调控,确保优化后参数能够实现。工艺性是指选取参数符合加工规范,在取值范围中保证尺寸处于正常值,避免出现无法加工的情况。在通常情况下,机械构件受力受安装孔径、连接部位等的影响,作为优化变量,一般需要灵敏度分析确定各参数的影响程度,最终筛选核心变量,并结合加工要求确定变量的合理取值范围,为后续优化求解设定边界。

4.2 响应面模型的构建

机械构件性能指标、设计变量之间关系复杂,整体难度相对较大,因此应构建响应面模型,简化二者联系。响应面模型构建即为通过试验点仿真设计,拟合除设计变量、性能指标之间关系,以此来减少计算量。在构建过程中,选择合适的试验方法,在合理设计试验点时,保证试验结果具有代表性。开展试验点性能分析,对试验点刚度、强度等性能指标进行测定。采用二次多项式拟合方法,对试验数据进行拟合,确保模型能够反映性能、变量直接关系,为后续优化提供一定数据^[3]。

4.3 遗传算法优化

以响应面模型为基础,结合遗传算法做好目标求解,在求解过程中应合理设置算法参数,明确优化目标。优化目标应兼顾强度,确保达标。算法参数设置直接影响求解效率、结果,在种群规模过大时计算量明显增加,种群规模过小时容易导致搜索不全面,因此应做好调控工作。迭代步数应依据问题复杂度进行合理设置,保证算法最优。合理设置参数,以此来实现最优解,并得到各设计的最优组合。

5 联合优化优势以及工程应用注意事项

5.1 核心优势

相比较单一拓扑优化、参数优化,二者在联合优化师优势明显,能够实现互补。第一,从结构源头进行创新,打破对于初始构型依赖,并突破设计瓶颈,整体性能明显提升。参数优化在拓扑构型的基础上进行改善,在弥补细节调控不足的同时,整体设计明显优化。第二,性能协同提升。联合优化通过拓扑优化从而实现改良,在解决单一优化中轻量化、高性能难以协调的问题,实现整体提升。第三,在拓扑结果优化后经过处理具有一定实用性,在优化参数时能够保证尺寸符合实际要求,确保优化后方案设计能够直接用于生产,更好进行实际应用。

5.2 联合优化工程应用注意事项

在将拓扑、参数优化应用于实际过程中,应把握相关注意事项,确保优化效果落地。结合工程实际,在优化过程中应以构件实际工况为基础,避免脱离实际,确保优化后构件符合实际要求^[4]。优化过程中除考虑力学性能外,还应结合企业的工艺水准、设备情况确定优化方案,兼顾制造成本,避免出现成本大幅度增加的情况。注重多学科融合设计,整个机械构件优化中应采用多学科融合模式,保证方案的综合

性。除此之外,联合优化方法应根据构件类型、结构复杂度进行灵活调整,针对复杂紧密构件应细化各环节要求,保证优化方法适配。

在实际应用过程中,拓扑与参数联合优化应重视流程规范化以及机制的完善性,在开展优化前,充分梳理构件需求,避免由于分析不充分导致模型反复修改。在优化过程中,应建立多方对比机制,依据不同结构、不同参数组合进行综合对比,选择优化方案。加强结果验证,做好结构检验,进一步缩小理论和实践的差距。在智能制造背景下,联合优化方法以及数字化设计,不断提升机械构件综合性能,从而推动机械构件转向智能化、高效化发展,为制造设备提供一定理论支撑。

6 结论

本文针对机械构件性能提出的工程需求,将拓扑和参数进行联合勾画分析,在构件设计问题、拓扑优化、参数验证等相关框架时,明确了变密度法拓扑优化、参数优化的实施要点,具体研究结论如下:

第一,拓扑和参数联合优化在突破传统单一模式的局限性时,给予结构创新以及参数调整,弥补了单一方式的不足。在给予高刚度、轻量化协调时,为机械构件性能设计提供一定框架。第二,基于变密度法的拓扑优化在确定材料的最优分布时,采用实用性、工艺性以及力学性原则进行处理,在保证构件基础力学性能时,能够为参数优化提供一定基础。第三,基于遗传算法的参数优化,在筛选相关敏感设计时,合理设置算法参数,针对构型设计的尺寸进行精准调整,从而能够促进性能优化提升,保证优化结果符合实际工程需求。第四,拓扑、参数设计在联合优化时能够提升工程实用优势,实现性能提升。在工程应用中应注重工程实际,在进行多学科融合时保证方案合理落地^[5]。

本次提出联合优化方法主要以提升性能为主,后续可将其拓展到动力学领域,结合实际情况构建符合工程实际的优化模式。结合3D打印等先进工艺,能够优化拓扑构型的工艺性,从而推动优化方法的联合应用,为高性能发展提供一定支撑。

参考文献

- [1] 何流,刘薛峰,熊顺康,等.面向智能响应的多功能机械超材料设计与应用[J].材料工程,2026,54(02):28-39.
- [2] 徐为民,王宁,吴珊.轻工生产设备的机械结构优化与高精度运行技术研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(01):349-351.
- [3] 薛世华.大型壳体类机械构件消失模铸造尺寸精度控制方法研究[J].铸造设备与工艺,2025,(06):28-32.
- [4] 朱俊达,高保香.面向绿色制造的造纸机械结构轻量化设计与性能验证研究[J].华东纸业,2025,55(11):53-55.
- [5] 高宝雷,侯海骄,杜智杰.工业机器人关键零部件拓扑优化及结构轻量化设计[J].网印工业,2025,(11):21-23.

Core Points and Engineering Practice of the Full Life Cycle Design of Off-site Pipelines in Chemical Industrial Parks

Daolin Jiang

China Wuhuan Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430200, China

Abstract

As the "lifeline" connecting chemical plants with off-site facilities, the design quality of off-site pipelines directly affects the safe operation and investment returns of the entire chemical project. This paper, based on engineering practice, systematically expounds the core technical system of off-site pipeline design, including route planning and pipe rack layout, pipeline compensation and stress analysis, special section crossing technology, and support and hanger design. Based on the concept of full life cycle management, it is proposed that the design stage of off-site pipelines should consider construction feasibility, operation maintainability, and risk controllability. Research shows that scientific and reasonable off-site pipeline design requires the coordination of multiple constraints such as process requirements, geological conditions, economic indicators, and safety regulations. The application of systematic design methods can effectively enhance the inherent safety level of pipelines.

Keywords

Off-site pipeline; Pipe rack layout; Pipeline compensation; Stress analysis; Special section crossing; Full life cycle design

化工园区界外管道全生命周期设计核心要点及工程实践

姜道林

中国五环工程有限公司, 中国·湖北 武汉 430200

摘要

界外管道作为连接化工装置与厂外设施的“生命线”，其设计质量直接关系到整个化工项目的安全运行与投资效益。本文结合工程实践，系统阐述了界外管道设计的核心技术体系，包括路由规划与管廊布置、管道补偿与应力分析、特殊地段穿越技术及支吊架设计等关键环节。基于全生命周期管理理念，提出了界外管道在设计阶段应考虑的施工可实施性、运营可维护性及风险可控性等要素。研究表明，科学合理的界外管道设计需统筹工艺要求、地质条件、经济指标与安全规范等多重约束，采用系统化的设计方法可有效提升管道的本质安全水平。

关键词

界外管道；管廊布置；管道补偿；应力分析；特殊地段穿越；全生命周期设计

1 引言

随着我国石油化工事业的迅速发展，化工园区规模不断扩大，装置与装置之间、厂区与厂区之间的物料输送需求日益增长，界外管道的设计任务越来越多。界外管道通常指连接化工项目界区内外，跨越厂区边界或园区公共管廊的工艺管道、公用工程管道及辅助管道系统。与厂区内管道相比，界外管道具有线路长、涉及因素多、外部条件复杂、施工维护难度大等特点。

界外管道的设计质量不仅影响化工装置的正常运行，更与公共安全密切相关。近年来，国内外多起管道泄漏爆炸事故均与界外管道的设计缺陷或防护不足有关。因此，系统研究界外管道的设计方法，建立科学的设计体系，对保障化工项目的安全运行具有重要意义。本文从设计实践出发，结合相关规范要求与工程案例，对界外管道设计的核心技术要点进行系统阐述。

2 界外管道设计的技术体系

2.1 设计流程与专业协同

界外管道设计是一个多专业协同的系统工程，其设计流程主要包括：设计基础资料收集、路由方案比选、水力计算与管径确定、管架布置、应力分析、特殊地段设计、支吊架设计及施工图绘制等环节。在整个设计过程中，界外管道专业需要与总图、工艺、结构、给排水、电气、仪表等多个专业密切配合。

设计初期，界外管道专业应依据系统工艺流程图(PFD)和管道仪表流程图(P&ID)，结合总图专业提供的厂区总平面布置图、竖向布置图及周边地形图，初步确定管道的走向和路由[4]。这一阶段的工作尤为重要，因为路由的选择直接影响后续的管架布置、补偿方案及投资成本。

2.2 设计依据与规范体系

界外管道设计需遵循国家、行业及地方的相关标准规

范。主要的设计规范包括：《工业金属管道设计规范》（GB 50316）、《压力管道规范 工业管道》（GB/T 20801）、《石油化工企业设计防火标准》（GB 50160）、《石油化工有毒、可燃介质钢制管道工程施工及验收规范》（SH 3501）等。此外，还需考虑项目所在地的特殊规定，如穿越河流、铁路、公路时的专项设计要求。

3 管廊规划与管道布置优化

3.1 公共管廊的规划原则

在化工园区中，界外管道通常集中敷设在公共管廊上。管廊的规划应遵循以下原则：一是集约利用土地，合理确定管廊宽度和层数；二是兼顾近远期发展，预留适当的扩容空间；三是满足防火间距要求，确保相邻管道间的安全距离；四是便于施工安装和日常维护检修。

管廊的走向应尽可能沿园区道路或厂区边界布置，既方便施工，也便于后期维护。管廊与周边建筑物的距离应符合防火规范的要求，穿越道路时需保证足够的净空高度——通常主干道不小于 5.5 米，次干道不小于 5.0 米。

3.2 管道布置的空间优化

在管廊断面上，管道的布置应遵循“重量大者靠近管架立柱，高温管道在外侧，小口径管道充分利用空隙”的原则。具体而言：

介质分配：易燃易爆介质管道宜布置在管廊上层，公用工程管道（蒸汽、水、压缩空气等）可布置在下层或中间层。腐蚀性介质管道应尽量集中布置，并采取相应的防护措施。

管径与重量：大口径、重量大的管道应靠近管架立柱或管廊主梁布置，以减小管架的弯矩。小口径管道可利用大口径管道上方的空间，采用支撑或吊挂方式敷设。

热位移考虑：高温管道应考虑热膨胀的影响，布置在管廊外侧便于设置补偿器，同时避免热位移与其他管道发生干涉。

检修通道：管廊上应预留必要的检修通道，对于阀门、法兰、补偿器等需要经常维护的部件，应设置在便于操作的位置。

4 管道补偿与应力分析

4.1 热膨胀与补偿方式选择

界外管道通常输送高温介质（如蒸汽、热煤油、工艺物料等），或处于温差较大的环境条件下，管道的热胀冷缩问题必须妥善解决 [4]。管道补偿方式主要有自然补偿和设置补偿器两种。

自然补偿是利用管道本身的弯曲或转折来吸收热膨胀，具有可靠性高、维护量小的优点。在路由规划阶段，应优先考虑利用管道的自然走向形成 L 形或 Z 形补偿。当自然补偿不能满足要求时，需设置补偿器。

常用补偿器的类型包括：方形补偿器、波纹补偿器和套筒补偿器。方形补偿器补偿能力大、耐压高、维修方便，但占地大、阻力大；波纹补偿器结构紧凑、占地小，但推力大、

寿命相对较短；套筒补偿器补偿量大，但易泄漏、维修量大。选择何种补偿器需综合考虑介质特性、压力等级、补偿量及场地条件等因素。

4.2 应力分析的关键要点

对于界外管道中的典型热介质管道或大直径管道，必须进行详细的应力分析。应力分析的主要目的包括：验算管道在一次应力（内压、自重）和二次应力（热膨胀）作用下的安全性；确定管道对设备管嘴的作用力是否在允许范围内；优化支吊架的位置和类型；指导补偿器的设置。

应力分析应重点关注以下几个方面：

计算工况的确定：需考虑设计工况、操作工况、安装工况及水压试验工况等不同条件下的应力状态。

边界条件的模拟：正确模拟管道与设备的连接点、固定架、导向架及弹簧支吊架的边界条件，是保证计算精度的前提。

疲劳分析：对于存在交变载荷的管道（如间歇操作的装置），应进行疲劳分析，评估其使用寿命。

敏感性分析：对于支撑条件复杂、温度变化大的管道，应进行参数敏感性分析，评估不同因素变化对管道应力的影响。

5 特殊地段穿越技术

界外管道不可避免地会遇到河流、铁路、公路、沟渠等障碍物，特殊地段的穿越设计是界外管道的重点和难点。

5.1 河流与沟渠穿越

对于大型河渠的穿越，倒虹吸方式是一种重要的立体交叉方式 [2]。倒虹吸技术广泛应用于渠道与河流、谷地、道路等线性工程相交的情况。在管道穿越设计中，可根据实际情况选择开挖穿越或定向钻穿越。

以某输气管道穿越大型河渠工程为例，该工程采用倒虹吸方式穿越，穿越段断面为涵洞型式，全身采用钢筋混凝土整体浇筑以保证密封性。施工过程中，在管道保护范围外上下游各延伸 2 米处开挖基础作业坑，基础底距离管道不小于 0.5 米，确保施工过程中管道的安全。

对于大型河流的穿越，水平定向钻（HDD）技术日益成熟。现代 HDD 技术已能实现管径达 56 英寸、穿越长度超过 1800 米的长距离穿越 [5]。该技术施工周期短、环境影响小，尤其适用于环境敏感区域或通航河流。

5.2 铁路与公路穿越

穿越铁路和等级公路时，通常采用顶管或定向钻等非开挖技术。穿越方案必须征得相关管理部门的同意，并满足相应行业规范的要求。穿越段管道应加设套管或采取加强级防腐措施，并在两端设置标志桩。

5.3 与其他管道的交叉处理

当界外管道与其他在役管道交叉时，需要采取特殊的保护措施。主要包括：精确测量既有管道的位置和埋深；施工前进行探坑开挖，确认管道的实际状态；交叉点两侧设置支撑或保护结构；施工过程中对既有管道进行变形监测。