

基于安全性的工业蒸汽管道布局优化设计研究

朱玉金

山东神州工程设计有限公司南京分公司，江苏南京，210000；

摘要：工业蒸汽管道作为能源输送核心载体，其布局合理性对系统运行安全与生产连续性具有显著影响。针对当前工业蒸汽管道布局设计中安全问题防控碎片化、多因素耦合优化缺失等问题，本文以安全性为核心导向，结合《工业管道安全评估与质量控制规范》(GB/T 10095-2023)、《石油化工蒸汽动力设备设计规范》(GB50041-2020)等行业标准，通过问题识别-因素解析-模型构建-案例验证路径，系统分析水锤冲击、应力破坏、介质泄漏等核心安全问题机理，构建融合多安全指标与成本约束的布局优化模型，提出适配高温高压工况的4项核心优化策略(管道路径调整、疏水装置增设、支吊架优化、检修空间预留)。研究表明，优化方案可使管道安全问题发生率降低69.0%以上，规避应力超标，控制水锤冲击在安全阈值内。该成果为工业蒸汽管道布局设计提供安全导向技术支持(适配化工、电力行业高温高压管线场景)，弥补了现有研究安全与经济性平衡不足的缺陷，具有较强工程实践价值(已在2个石化、炼油改造项目落地，连续运行12个月零安全问题)。

关键词：工业蒸汽管道；布局优化设计；安全性防控；水锤抑制；应力校核(CAESAR II软件应用)

DOI：10.69979/3029-2727.26.03.053

1 工业蒸汽管道布局设计基础

1.1 设计核心要求

工业蒸汽管道布局设计得搞定安全、经济、操作这三大核心要求。安全是头等大事，得避开介质泄漏、热胀冷缩搞破坏、水锤冲击这些风险，保证在高温高压下别出岔子；经济性方面，在达标基础上优化管道路径和管径，把成本压下来(DN200的20#无缝钢管，一公里成本得卡在70到90万之间)；操作性要实在，检修方便，像通行地沟的人孔间距别超100米，人孔口得比地面高至少15厘米。

工业蒸汽管道输送的介质温度150到450度、压力0.6到10兆帕，材质得选20#或20G无缝钢管(温度不超过425度)，超过425度就用不锈钢或合金钢。布局设计时得琢磨透高温高压带来的热应力和振动问题，别让管道变形或累坏了。

1.2 行业标准适配

咱们按行业标准来，重点看GB/T 10095-2023(安全评估和质控)、GB50041-2020第4.3.2条(蒸汽和原油管道间距至少1.5米，绝对不能和易燃易爆管道同沟埋)、CJJ/T34-2022第5.2.4条(蒸汽管道必须单设舱室，不和电力电缆混在一起)。这些标准是死规矩，得死守，方案才合规。

1.3 布局设计核心流程

蒸汽管道布局设计主要分四步：先调研，摸清用汽点、场地和介质关键参数；然后设计，定好管道走向、敷设方式和关键节点；接着安全校核，专门查应力、水锤这些隐患(用CAESAR II软件算，能综合热应力和机

械荷载，比以前简单算的强多了，还能可视化，对优化布局特管用)；最后调整优化，出最终方案。安全校核这块是命脉，占了设计总时间的三成多。

2 工业蒸汽管道布局安全性风险识别与影响因素分析

2.1 核心安全风险识别

工业蒸汽管道布局核心安全风险有三类，均有案例与数据支撑：

水锤冲击是最具破坏性的安全问题，瞬间冲击力可达正常压力数十倍，易致管道破裂。某化工企业因疏水点设置不规范，启动时冷凝水冲击弯头引发破裂(事件编号：HG-SC-2023-089，数据来源：该企业《2023年生产安全事故复盘报告》第3节)，近70%蒸汽设备提前报废与水锤相关(数据来源：《化工设备安全与运维》2023年第12期第45页)。相关研究表明，蒸汽管网优化系统可有效降低水锤问题^[2]，其流向相反时间距≤300m的疏水点布置方案，可为本文优化提供技术参考。

应力破坏往往就是布局没摆对，热应力和振动应力直接爆表。老办法就靠经验，简单算一算，没用CAESAR II这些专业工具，算得不准还漏掉不少。CAESAR II能一起算热应力、机械荷载、支吊架这些，给布局优化提供实打实的数据。冰区船上蒸汽管就吃过亏，支吊架摆得乱，一查发现二次应力飙到许用应力的290%，优化后才压到70%；工业上用它能精准揪出应力集中点，躲开疲劳泄漏。

介质泄漏常是管道间距不够，或者和危险介质管道交叉敷设搞的。某炼油厂蒸汽管和原油管就隔了0.5米(规范得1.5米以上)，漏了后引燃原油，烧得挺惨(事

故编号 LY-AQ-2022-037, 来源国家应急管理部 2022 年化工安全事故通报第 17 号), 这明明白白违反了 GB50041-2020 第 4.3.2 条强制要求。

2.2 安全风险核心影响因素

用层次分析法一捋, 影响安全的关键因素就四块, 每块都得盯住具体设计点和数据, 实用又管用。

布局参数是头等大事, 包括管道走向、弯头多少、疏水点怎么放。规范说, 蒸汽和凝结水流向一致时, 疏水点隔 400-500 米; 反着来就 200-300 米。低点和垂直升高前必须加疏水, 隔太远容易水锤。实测发现, 每多一个 90 度弯头, 振动强度涨 12-18%, 疲劳坏的概率升 23% (来源: 本文案例项目实测报告第 4 章第 1 节, 项目号 SH-GZ-2024-016)。

介质特性 (温度、压力、流速) 决定安全余量。温度压力越高, 热胀冷缩越厉害, 得留足补偿空间 (450℃、6.0MPa 时, 每 100 米管子热胀 50 毫米); 蒸汽流速控制在 15-25m/s, 太高振动大, 太低容易积冷凝水, 布局得结合流速调管径和走向。

环境条件 (地形、周边设施、腐蚀性) 也得琢磨。化工园区这种地方, 蒸汽管得加宽间距, 优先架空 (高度 ≥4.5 米); 高温高湿下, 支吊架容易生锈, 人孔间距得缩到 90 米以内, 方便检修。

运维适配至关重要, 布局未预留检修空间将延误问题整改。某电厂蒸汽管道与电缆桥架间距仅 0.3m (规范 ≥0.5m), 无法及时更换故障疏水阀, 导致冷凝水积存 3 天引发轻微水锤 (事件编号: DL-SB-2023-102, 数据来源: 该电厂《2023 年设备运维报告》第 6 条)。相关研究表明, 蒸汽管网运维智能监测系统可提升运维效率 30% 以上、缩短预警响应至 10 分钟内^[3] (数据来源: 《中外能源》2024 年第 2 期第 89 页), 该成果可指导新管道人孔与阀门空间规划。

3 现有布局优化方法综述与批判

3.1 主流优化方法及应用局限

现在常用的优化方法问题挺多, 搞不定复杂场景的安全要求:

空间冲突规避法只盯着场地冲突, 安全问题没顾上。某化工园区用了这法子设计后, 弯头堆得密, 疏水点少, 运行 3 个月就水锤冲击, 整改费比最初设计费高了 2.3 倍。

单一目标遗传算法就奔着省钱去, 安全只是个约束, 没顾上多问题一起算, 结果省钱了但安全出问题。某项目用了后, 应力超标概率涨了 40% (来源: 《计算机集成制造系统》2022 年第 4 期第 1135 页)。

单一安全指标优化法老是漏了水锤、泄漏这些, 应力分析还靠老经验简单算, 没用 CAESAR II 这些专业工

具, 算得不准。冰区船上的蒸汽管就吃过这亏, 早期优化没用 CAESAR II, 留下振动疲劳隐患, 数据也不靠谱, CAESAR II 能补上这漏洞 (来源: 《船舶工程》2022 年第 7 期第 156 页)。

3.2 现有研究核心缺陷总结

现有研究有三大硬伤: 一是安全不突出, 老盯着成本、空间, 跟“安全第一”对着干; 二是问题零敲碎打, 没搞出多问题一起优化的体系; 三是理论和实际脱节, 模型没工程验证, 参数不靠谱, 治不了安全问题, 说明我们这研究得做。

4 基于安全性的工业蒸汽管道布局优化模型构建

4.1 优化目标设定

我们定下“安全优先, 兼顾经济和操作”的量化目标体系:

头等目标是安全拉满: 水锤风险系数 ≤0.2 (冲击力 ≤2 倍工作压力)、应力 100% 达标 (CAESAR II 算的, 综合热应力和机械荷载, 符合 GB/T 10095-2023, 二次应力 ≤材料许用应力 80%)、泄漏风险 ≤1.0‰ (按 GB50041-2020 第 4.3.2 条, 间距达标)。

次要目标是经济和操作优化: 总成本别涨超 10% (单公里成本涨 7-9 万, DN200 管线为例), 检修空间、人孔间距这些得满足运维 (人孔间距 ≤90m、阀门操作空间 ≥0.8m×1.0m), 但次要目标得让着安全目标。

4.2 优化指标体系构建

搞出 3 个一级、12 个二级优化指标, 权重让 5 个干了 10 年以上的专家用 AHP 打分, CR<0.1, 结果靠谱。核心一级指标: 安全风险控制 (60%, 管水锤、应力、泄漏)、施工经济性 (25%, 材料、施工、运维成本)、操作便利性 (15%, 检修空间、人孔), 都量化了。

4.3 多目标优化模型建立

我们用改进的 NSGA-II 算法搞多目标优化模型, 决策变量是管道走向、弯头数量等 5 个核心参数, 结合指标体系、标准和工程约束, 平衡安全、经济和操作。这算法挺适合管道布局优化^[1], 模型参考蒸汽管网热力计算数学模型^[4], 把介质特性对安全的影响算得更准。我们用改进的 NSGA-II 算法搞多目标优化模型, 决策变量是管道走向、弯头数量等 5 个核心参数, 结合指标体系、标准和工程约束, 平衡安全、经济和操作。这算法挺适合管道布局优化^[1], 模型参考蒸汽管网热力计算数学模型^[4], 把介质特性对安全的影响算得更准。

目标函数:

$$\min F(X) = [\omega_1 F^1(X), \omega_2 F^2(X), \omega_3 F^3(X)],$$

其中 $\omega_1 = 0.6$ (安全风险指数)、 $\omega_2 = 0.25$ (成本

指数)、 $\omega_3 = 0.15$ (操作便利性负向指数), $F_1(X)$ 由安全指标加权求和, $F_2(X)$ 以初始成本为基准归一化, $F_3(X)$ 越大操作越差。

约束条件包括安全、空间、成本 (增幅 $\leq 10\%$) 与施工可行性 (如管道转弯半径 ≥ 3 倍管径), 模型求解后输出最优方案供工程选。

5 案例验证与效果分析

5.1 案例概况

挑了个石化企业蒸汽管道改造项目当案例 (项目名: XX 石化 2024 年蒸汽管网升级, 项目号 SH-GZ-2024-016, 备案号 NJSH-2024-038), 这管道 2018 年建的, 介质 350℃、4.0MPa, 总长 1200 米, 运行老出水锤冲击, 3 处弯头应力超标 (达许用应力 180%), 跟原油管间距才 0.8 米 (不合规), 安全问题太严重, 得赶紧优化。

基础情况: 8 个用汽点分 2 个区, 场地平、设施密; 初始成本 860 万, 安全风险指数 0.72, 操作便利性指数 0.65, 这次优化重点就抓安全。

5.2 优化方案实施

结合模型和实际情况, 定了 4 条合规优化措施:

调管道路径和间距, 原油管间距从 0.8 米加到 1.8 米 (符合 GB50041-2020 第 4.3.2 条), 90° 弯头减到 8 个 (含 2 个 45° 缓弯), 减小振动和应力集中。

补疏水和支吊架, 加 2 个启动疏水 (间距 400 米, 合规), 支吊架间距从 8 米缩到 6 米, 再加 2 个弹性支吊架, 降温应力和振动。

300 米交叉地沟段改 4.5 米高架空敷设, 配 ZJ-100 抗震支架, 避开交叉风险, 抗振能力更强。

优化检修空间, 人孔间距由 150m 缩至 90m, 扩大阀门操作空间至 0.8m \times 1.0m, 保障运维安全便捷。

5.3 优化效果验证

优化后各项指标均达标: 安全方面, 水锤风险系数降至 0.18, 经 CAESAR II 软件全程应力模拟, 所有节点应力均低于规范限值 (二次应力 \leq 材料许用应力 75%), 应力达标率 100%, 泄漏风险 $\leq 1.0\%$, 安全风险指数降幅 70.8%; 经济方面, 总成本增幅 7.0%, 年运维成本降低 15 万元; 操作方面, 便利性指数提升至 0.92, 运维效率提升 30% 以上, 应急响应时间 ≤ 5 分钟, 验证了模型实用性。类似案例^[5]印证了思路有效性, 体现本文成果普适价值。

6 布局优化设计中的技术瓶颈与应对策略

蒸汽管道布局安全优化三大技术瓶颈及应对策略:

一是多风险耦合计算复杂 (单项目耗时超 8h): 归类次要变量, 优先优化核心参数, 引入并行计算提效。

二是老旧厂区空间受限 (部分区域净距仅 1.2m, 未达 1.5m 规范): 分段优化核心风险区, 采用柔性补偿、抗震支架平衡安全与空间约束。

三是安全与成本平衡难 (安全等级提升 1 级, 成本增幅 8-12%): 建立平衡矩阵, 优先采用低成本高安全收益措施 (如优化支吊架间距)。

7 结束语

本文以蒸汽管道布局安全性为核心, 突破现有研究缺陷, 核心成果: 明确三大安全问题机理与四类关键影响因素; 构建科学的多目标优化模型; 案例验证优化方案可实现安全问题降幅超 70%、应力达标率 100%、成本增幅 $\leq 10\%$, 工程价值显著 (2 个项目落地, 连续运行 12 个月零安全问题, 项目编号: SH-GZ-2024-016、LY-GZ-2024-023)。该成果在冶金行业 (介质温度超 400℃) 的适配性仍需验证, 存在场景约束。

本研究存在一定局限: 案例聚焦石化行业, 对其他行业适配性需验证; 模型未充分纳入极端环境影响, 应用精度可能受影响。后续可扩大案例覆盖范围, 融合数字孪生、AI 技术构建动态优化系统, 提升优化效率与精准度。

参考文献

- [1] 董宗然, 王法胜, 楼偶俊, 卞璇屹. 基于改进 NSGA-II 的船舶管路路径设计[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1129-1142.
- [2] 苏华, 杨林. 蒸汽管网优化系统应用[J]. 石油石化节能与减排, 2023, 8(3): 20-25.
- [3] 焦胜忠, 汤志武, 刘建华. 蒸汽管网运行管理优化调度智能监测系统应用[J]. 中外能源, 2024, 29(2): 87-91. ISSN: 1673-579X.
- [4] 王威, 罗先喜. 蒸汽管网的热力计算数学模型[J]. 中国设备工程, 2023(15): 199-201.
- [5] 张伯嗣, 钟国晶, 王亮. 炼油化工企业蒸汽管网的数值模拟及分析[J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(7): 56-60.