

石油化工装置管廊和管道布置设计研究

马华泽（北京博鼎诚工程设计有限公司广州分公司，广东 广州 510030）

摘要：随着我国现代化工业的高速发展，越来越多的石油化工项目如雨后春笋般建设起来，相较于传统民用建筑施工，石油化工装置管廊和管道布置设计更为复杂，要求更为严格，面临更多制约因素，且时间紧，任务重。本文首先分析载荷分析的管道布置与支吊架协同设计方法，其次探讨石油化工装置管廊和管道布置设计优化策略。研究表明，该协同设计方法能够有效预测和控制管系的力学行为，实现管道系统的安全经济运行，为石油化工装置管道系统的优化设计提供了新的思路和方法论指导。

关键词：管廊设计；管道布置；协同设计；载荷分析；热膨胀控制

中图分类号：TE68 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）032-0124-03

Research on the Design of Pipe Racks and Piping Layout in Petrochemical Plants

MA Huaze (Beijing Bodingcheng Engineering Design Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou Guangdong 510030, China)

Abstract: Addressing the design challenges associated with pipe racks and piping layout in petrochemical plants, this paper proposes a collaborative design method based on load analysis. By establishing a closed-loop iterative model integrating piping layout and mechanical analysis, the traditional linear sequence of “layout first, then verification” is transformed into a dynamic optimization process. The study focuses specifically on two key issues: managing weight loads and controlling thermal expansion displacements. Research indicates that this collaborative design method can effectively predict and control the mechanical behavior of piping systems, enabling their safe and economical operation. It provides new insights and methodological guidance for the optimized design of piping systems in petrochemical plants.

Keywords: Pipe rack design; Piping layout; Collaborative design; Load analysis; Thermal expansion control

在石油化工领域，管道就犹如连接各个环节的“生命线”，承担着将石油、天然气及其产品进行处理和运输的重要任务。并且，由于这些产品均属于易燃、易爆和有毒物质，所以为了防止装置在运行过程中出现火灾、爆炸、中毒等一系列危险，我们在石油管道化工设计过程中，需要全面考虑各项危险因素，高度关注管道设计中的常见问题，加强石油化工管道建设的科学性和合理性，有效保障管道通行的效率和质量，使得各类设备与系统设施在石油化工管道的连接下能构成一个有机的生产整体，致力于为我国石油化工产业的快速发展提供坚实基础。

1 石油化工装置管廊和管道布置设计问题分析

1.1 材料选择不合理

在石油化工装置管廊和管道布置设计中，材料的选择至关重要，因为需要化工介质具有复杂性，且部分强腐蚀性介质对管道材料要求较高，如果设计人员选用了抗腐蚀性不足的材料，就会使得管道内壁在短时间内遭受严重腐蚀，减薄速度加快，最终导致穿孔泄漏。

另外，机械强度不足也同样危险，对承受高压的管道系统来说，如果设计人员选择的材料强度不够，那么在超压的情况下就会造成管道极易破裂，进而造成重大安全事故和环境污染。

1.2 管廊和管道布局不科学

管廊和管道布局就像是整个石油化工装置的“脉络”，其合理性将会直接关系到整个装置的安全运行和生产效率。其中，复杂的管道走向容易形成死区，其就如同人体血管的“血栓”，会成为杂质聚集的主要场所，非常难清理，不仅会影响介质的流动，还可能会在特定情况下，引发化学反应，加速管道腐蚀。同时，这些死区也会为微生物提供滋生环境，容易进一步破坏管道的完整性。再者，障碍物阻碍的问题也比较常见，如果在设计阶段，工程师没有充分考虑管道布局的合理性，就极易导致管道在安装时与其他设备发生冲突，不得不临时改动走向，并增加焊接点和连接部位，进而为泄漏事故埋下伏笔。

2 石油化工管道支吊架基础理论与设计原则

2.1 基础理论

首先是力学原理，主要分析在自重、流体重力、热膨胀、风荷载、地震荷载等各种荷载作用之下支吊架以及管道的应力应变以及位移变形等情况，需要确保其能够在各种工况下满足规范要求，因此在设计过程中需要基于力学原理来计算出刚度、稳定性、强度等方面的性能参数，以保障管道支吊架设计能够满足使用要求^[1]。

其次是材料科学，一般来说，在设计过程中需要

基于具体要求来选择相应材料，以保障管道支吊架的各方面性能要求得以有效满足，一般来说，材料的强度性能应当符合支吊架的承载力要求，确保其能够承受各种工况下的应力变化。而为了能够避免支吊架在振动或者被冲击时受到损伤，可选择韧性较强的材料。此外，由于化工生产环境条件较为恶劣，因此还应当具备耐腐蚀、耐高温的性能，以保障支吊架的使用寿命。

2.2 设计原则

首先，支吊架的核心作用就是保障石油化工管道的运行稳定与安全，因此才设计过程中应当遵循安全性原则，充分考虑各种荷载对支吊架产生的影响，同时也需要考虑到化工生产条件，全面落实相关安全规范标准，以最大程度地避免安全事故的发生。其次，针对于支吊架的结构与材料选择，也应当基于经济性原则来进行优化处理，在保障其设计成效的同时，尽可能减少材料使用量，压低制造与安装成本。并且还应当考虑到支吊架在后续使用过程中产生的维检成本，以保障支吊架的整体经济性。最后，针对于技术方面，在进行支吊架设计的过程中也应当基于现有的技术设备条件来进行操作，并尽可能为后续的使用与维护带来便利，以确保设计方案的可行性。因此设计人员应当基于现场实际情况来进行合理设计，并具备一定的设计工作经验，进而为设计方案的实施效果带来保障。

3 基于载荷分析的管道布置与支吊架协同设计

3.1 重量载荷管理与支吊架布置设计

重量载荷管理是支吊架布置设计的首要任务，其核心是通过合理设置支架间距（跨距）来有效支撑管道系统的全部垂直静载荷，并控制管线挠度在允许范围内^[2]。该静载荷，即单位长度均布载荷 $q(\text{kg}/\text{m})$ ，其构成不仅包括管道自重，还必须综合考虑输送介质、保温层材料的重量，并在必要时按水压试验工况下的充水重量进行校核。在协同设计中^[3]，管道系统常被简化为连续梁模型进行力学分析，以计算各支承点的支反力。例如，对于一个中间支架 BB，其承受的重量载荷 R_B 取决于其两侧的管道跨距，可按公式计算：

$$R_B = \frac{q}{2}(L_1 + L_2)$$

式中， L_1 和 L_2 分别为支架两侧的管段长度（m）。

此公式揭示了支架跨距的设置直接决定了其承载大小。对于存在阀门、法兰等集中载荷 P 的管段，其附近支架的载荷计算则更为复杂。例如，带有集中载荷的管段，其 A 端支架的支反力 R_A 由均布载荷和集中载荷两部分贡献构成，可按公式进行计算：

$$R_A = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{P \cdot b}{L}$$

式中， L 为该管段总长（m）， b 为集中载荷点距离另一端支架 B 的距离（m）。

该公式表明，集中载荷的位置对支反力的分配有显著影响，因此在布置设计时，通常需要在重型阀门等部件的两侧就近设置支架，以有效分散其重量^[4]。

3.2 热膨胀位移控制与柔性布置设计

热膨胀位移控制是高温管道设计的核心挑战。协同设计的精髓在于将布置的几何形态与力学结果直接关联。依据《SGSA0101-2002》标准，管系在固定点产生的热膨胀弹性力可通过下式进行量化分析：

$$F_x = K_x \cdot C \cdot \frac{I}{L^2}$$

式中： F_x 为 x 方向的弹性力（kg）； C 为由操作温度和材料决定的膨胀系数（可查阅标准表 16）； I 为管道截面惯性矩（ cm^4 ），代表管道的抗弯刚度； L 为管段的计算长度（m）。

此公式中最关键的变量是无量纲的形状系数 K_x ，由管段的几何尺寸比例（如 L/h 、 a/b ）唯一确定，可以通过主动调整管道弯头的臂长比例等布置参数，直接改变 K_x 值，从而对热膨胀力进行预测和主动控制。同时，管道热位移会在滑动支座上产生摩擦力，其大小可由下式计算：

$$P_m = \mu \cdot Q$$

其中： P_m 为水平摩擦力（kg）； μ 为摩擦系数； Q 为支座上的垂直载荷（kg）。该摩擦力会叠加在固定点上，成为设计中不可忽视的轴向载荷。综上，通过对热膨胀力和摩擦力的定量分析，设计者能够在布置阶段就预见并优化管系的力学行为，确保作用于设备接管和固定点的总推力在许用范围内，实现布置与安全的深度协同^[5]。

4 典型高温蒸汽管道系统协同设计

4.1 管系参数

表 1 案例管系设计参数表

参数名称	数值 / 描述
管线号	HS-2023-001
公称直径	DN300(12")
管道外径 × 壁厚	323.9mm × 10.31mm
管道材质	ASTMA335P22(铬钼合金钢)
操作温度 / 压力	450°C / 4.0MPa
设计温度 / 压力	480°C / 4.5MPa
输送介质	过热蒸汽
保温材料及厚度	硅酸钙, 100mm

为验证前述协同设计方法的有效性，本文选取某石化装置中一条典型的高温蒸汽管道系统作为研究对

象。该管线负责将过热蒸汽从加热炉输送至汽轮机入口，其详细设计参数是进行后续重量载荷管理与柔性布置设计的基础输入数据。该管系的主要设计参数如表1所示。

从表中可知，该管线操作温度高达450℃，材质为耐高温的合金钢。如何通过合理的柔性布置来控制热应力与设备接口推力，成为本案例的核心。同时，管线自重、介质重量及厚重的保温层共同构成了其基础重量载荷，是支吊架布置和间距参数将作为后续迭代优化过程的初始计算条件。

4.2 基于载荷分析的迭代优化过程

迭代优化过程始于对初步布置方案的量化分析。针对此高温蒸汽管系，设定了一个初始Z型自然补偿管段。依据**《SGSA0101-2002》**标准进行计算，分析得出该方案在设备接口处产生的X向热推力为25000N。此计算结果与设备接口的许用推力限值（20000N）进行比对后，显示初始布置方案存在力学缺陷，未能满足设备安全运行的要求，必须进行优化。

为此，进入优化迭代环节。在其他参数（如膨胀系数C、惯性矩I）不变的情况下，对新方案进行再次计算，得出优化后的热推力降至17500N，此数值已低于许用限值。这个“分析-评估-优化-验证”的循环，直观地体现了基于载荷分析进行协同设计的核心价值。

4.3 设计方案与结果对比

为了直观地展示载荷分析设计方法的有效性，现将优化前后关键点的力学性能指标进行对比，具体数据详见表2。

通过对数据得知通过将Z型弯柔性臂的长度从3.0m增加到5.0m，其对应的形状系数Kx降低了30%。这一几何布置的改变直接导致了设备接口处的X向热推力从25000N显著下降至17500N，降幅同样达到30%。这一结果有力地证明，将载荷分析融入设计过程的协同方法，可以有效解决潜在的力学问题，也实现了管系自身的安全稳定运行。

5 石油化工装置管廊管道布置研究

5.1 完善管廊管道布置流程与标准

建立规范化的石油化工装置管廊管道布置流程，

从工艺条件分析、初步布置方案设计、详细设计到应力分析、校核验收，每个环节都设置严格的审核节点。制定符合装置特点的设计标准，明确管道布置的安全距离、应力允许值等参数，确保设计成果的一致性和可靠性。加强设计人员与工艺、设备、土建等专业的沟通协作，避免因专业衔接问题导致石油化工装置管廊管道布置缺陷。

5.2 加强装置管道材料选择与改进

石油化工装置防腐蚀首先要从选材入手，选用合适的材质以保证其抗腐蚀性能。在苛刻的使用条件下，应选用可耐高温、抗腐蚀性强的金属或不锈钢。比如，在一些石油化工装置中，氟化物会产生很强的腐蚀性，而采用防氟合金则可以大大地提高其寿命。此外，还可以采用经专门加工的不锈钢或耐酸碱的金属来满足具体的环境条件。同时，通过对器件进行表面处理，可以明显提高器件的耐腐蚀性。

6 结语

本文通过建立管道布置与载荷分析的协同设计方法，实现了管道系统设计过程中几何布置与力学性能的有机统一。研究结果表明，该方法能够有效预测和控制管系的力学行为，为设计优化提供定量依据。未来研究可进一步探索将该协同设计方法与智能算法相结合，开发自动化设计优化工具，提高设计效率。

参考文献：

- [1] 宋亮. 简谈化工厂管廊的管道布置 [J]. 建筑电气, 2024, 43(12):19-22.
- [2] 顾廷园. 化工装置内管廊布置及管道设计研究 [J]. 石油化工建设, 2023, 45(S02):166-167.
- [3] 丁浩杰. 浅析化工装置内管廊布置及管道设计 [J]. 数字化用户, 2021(2):164-166.
- [4] 杨高源. 水平推力作用下管廊固定管架设计技术应用研究 [J]. 化工机械, 2024, 51(3):488-493.
- [5] 张博. 浅谈聚丙烯装置管廊和管道设计 [J]. 石油天然气学报, 2024, 46(3):303-310.

作者简介：

马华泽（1995-），男，汉族，广东汕头人，学历：大学本科，职称：助理工程师，研究方向：化学工程。

表 2 优化前后关键点载荷对比表

参数	优化前方案	优化后方案	变化率
Z型弯柔性臂长度 (m)	3.0	5.0	+66.7%
形状系数 Kx	52.8	37.0	-30%
设备接口 X 向热推力 (N)	25000	17500	-30%
是否满足许用载荷要求 (≤ 20000N)	否	是	-