

往复式压缩机组配套管道模块化布局优化设计

尹 凯 (中石化石油机械股份有限公司三机分公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 本研究主要对往复式压缩机组配套管道的模块化布局设计进行研究。分析往复式压缩机工作原理、主要特性, 对关联管路系统组成、性能特点做全面分析, 阐述模块化设计理念基本内涵及实施路径。主要研究了降低振动、控制压力损失、便于安装等技术要素的设计标准。以整体统筹协调为出发点, 研究管道走向设计、缓冲构件安置和支撑结构改善等具体方向, 以达到保证设备安全稳固、运维操作简明便捷的全方位目标。

关键词: 往复式压缩机; 配套管道; 模块化布局; 优化设计

中图分类号: TH457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0124-03

Optimization Design of Modular Layout for Pipeline of Reciprocating Compressor Unit

Yin Kai (Sinopec Petroleum Machinery Co., Ltd. 3rd Machinery Branch, Wuhan Hubei 430040, China)

Abstract: This study investigates the modular layout design of piping systems for reciprocating compressor units. It analyzes the working principles and key characteristics of reciprocating compressors, comprehensively examines the composition and performance features of associated piping systems, and elucidates the fundamental concepts and implementation pathways of modular design philosophy. The research focuses on establishing design standards for technical elements such as vibration reduction, pressure loss control, and installation convenience. With holistic coordination as the foundation, it explores specific aspects including pipeline routing design, buffer component placement, and support structure optimization, aiming to achieve comprehensive objectives of ensuring equipment safety and stability while simplifying operation and maintenance procedures.

Keywords: reciprocating compressor; auxiliary piping; modular layout; optimized design

往复式压缩机是典型的容积型压缩机, 在很多工业领域都起着核心的作用。其配套管道系统设计是否合理, 直接影响到整机的运行性能和稳定性。传统的管道布局方案很难满足多样化的工艺流程、场地限制、主机规格的变化, 在实际使用中经常出现设计周期过长、加工工序繁杂、质量控制难、后期维护不便等状况。

模块化设计思想把复杂的系统分成若干独立的、可以互换的功能单元, 给解决上述实际问题提供了一种新的思路。模块化技术的应用一方面可以大大提高管道系统的灵活性以及扩展性, 另一方面可以大大提高生产装配流程的自动化程度, 还可以大大提升后期维护操作的便捷性, 有重要的理论价值和实践意义。

1 往复式压缩机组配套管道布局基础理论

1.1 往复式压缩机工作原理与特性

往复式压缩机属于典型的容积式压缩机, 工作原理为吸气、压缩、排气这三个阶段。

进气行程时, 活塞在气缸内壁上做周期性往复运动。活塞向外出的时候, 气缸容积变大, 气缸内的压力减小。当外界气体的压力大于气缸内介质的静压差时, 在压差的作用下, 进气阀自动打开, 外部空气在压差的作用下进入气缸, 直到活塞到达最低点, 完成一次吸气。

压缩行程时, 活塞向内运动, 气缸容积逐渐减小,

气体被压缩, 温度逐渐升高, 此阶段压力和温度都逐渐增大。当气缸内压力达到一定数值并且大于排气管道内的平衡压力时, 排气阀打开, 高压气体在活塞到达上止点之前完成压缩过程。

排气阶段, 活塞继续向内运动, 利用排气阀将被压缩、温度高、压力大的气体引向气缸外的专门通道。活塞回到下止点时, 一个完整的工作循环就结束了, 然后又开始下一个往复运动周期, 对气体进行连续的压缩和输送。

往复式压缩机在运转时就会产生固有的脉动与振动。活塞往复运动造成气缸内压力、流量的波动, 经由管道向外传出的是脉冲; 高速旋转部件受到离心力的作用会产生机体共振, 把振动传到管路系统。这些因素互相叠加就形成管道应力集中、加快疲劳损伤、加大泄漏危险, 影响流体流动情况和设备总体表现, 在最坏的情况下还会致使核心组件发生故障, 给整个系统的安全稳定运作带来潜在的危險。

1.2 配套管道系统组成与功能

往复式压缩机配套的管道系统主要有进气管路、排气管路、冷却水管路等。进气管线是气体输送的主要通道, 其主要作用就是保证流体流动稳定, 减小管线内摩擦阻力, 提高设备吸气效率及整个系统性能。排气管道是用来把压缩后的高温高压气体从压缩机气

缸输送出去的。排气时需要对气体进行冷却、净化等处理，所以排气管道一般与冷却器、分离器等设备相连接。冷却管道可以将压缩时产生的高温气体进行降温，精确控制气流温度，提高压缩机整体性能以及稳定性。主要冷却方式有风冷、水冷两种，利用流动的介质（空气或者冷水）带走高温气体中的热量，保证气体一直处在合适的温度范围内。

2 模块化布局优化设计理念与原则

2.1 模块化设计概念

模块化设计是将复杂的系统分解成若干个小部分，每一个小部分有独立的功能、可互换、结构简单。各个部分依靠标准接口来协同工作，它的基本思想就是根据系统的功能特性或者物理属性，把系统拆分为几个部分，使每个部分完成一定的任务，依靠清晰的标准接口实现良好的配合。

这样设计思路突破了传统单一集成方式的局限，把复杂的技术难题转化成对基本单元进行规划与控制的过程。模块化的设计理念在往复式压缩机配套管道系统的实际运用中具有明显的技术优势，最根本的特点是方案的整体灵活性和兼容性都得到了极大的提升。当存在工艺流程、场地情况、设备参数等不确定因素的时候，就可以根据重新排列各功能模块的方式使之互相适配，并且采用局部改组而不是全部翻修的方法来适应新的需求出现，在此过程中耗费的研究时间被大大缩减，资源调配的速度变快。

该模式大幅度地提高了制造环节的标准化水平和质量控制能力。各种预制组件以专用流水线的形式进行大规模批量生产，依靠统一的技术标准来保证产品质量稳定，并且能明显提高装配速度。模块化生产模式下各个功能单元可以分开来检测、调试，发现并解决问题及时防止废品的产生以及带来的损失。

该种设计思想对于管道系统安装、运行、维护以及技术升级换代有明显的改善作用。工程实施阶段各部件可以在工厂预先预制，经过严格检验合格之后运往现场进行模块化组装，现场工作量大大减少，整体装配效率提高。检修或者进行技术改良时只需更换指定的单元便可提高性能，并不需要对整个系统展开大面积的拆卸重建工作，这样既能够削减维修开支，又可缩减设备停止运转的时间。

2.2 模块化布局优化设计原则

2.2.1 基于减少管道振动的原则

往复式压缩机工作时产生的脉动振动对管道系统危害很大，所以控制管道振动是模块化设计的关键目标。科学选择缓冲装置的位置十分关键，它的主要功能就是吸收、衰减压缩机输出的脉冲能量，减小管道

内压力波动的程度。应当充分考量压缩机型式，工况参数以及管道特性等诸如此类的因素，准确判定缓冲元件的安装位置和数量，并保证其拥有良好的消振效果。同时还要重视缓冲组件同管道间的连接方式以及机械强度评价，防止接口有缺陷或者承载力不够而造成泄漏或者损坏等情况发生。

2.2.2 考虑降低管道阻力的原则

管道阻力增大，压缩机排气量下降，效率降低，能耗增加。模块化系统设计时不能忽略由于管道阻力上升所造成的技术问题。合理设计管道的布置十分重要，应该尽可能地避免急弯、曲折结构，减少流体运动过程中遇到的阻碍，从而减小内部摩擦损失以及撞击损耗。通过减少弯头数量可以提高性能，在设计初期就要充分考虑流量需求和流速限制的因素，根据实际工况条件选择合适的管径规格。管道尺寸不合适会造成能量浪费或者压降过高的现象。

2.2.3 便于安装检修的原则

为了提高管道系统的安装效率以及维护便利性，模块化布局优化设计要突出模块的标准化、通用化设计。标准化设计使模块有统一尺寸、接口、性能参数，便于模块的生产、存储、运输；通用化设计使同一模块可以适应不同管道系统和工况条件，提高模块的互换性、重复利用率。模块的设计要考虑安装和检修的实际需要，在合理的模块安装位置上安排适当的操作空间，便于安装工人快速组装拆卸模块。模块要有很好的可维护性，可以方便地对模块内的零部件进行检查、更换与修理，减少停机时间，提高工作效率。

3 往复式压缩机组配套管道模块化布局优化策略

3.1 管道走向规划模块化

管道系统会遇到各种各样的工况条件，压缩机的运行特性也存在着较大的差别。在高压工作状态下，管道布局中存在较多锐角弯道时，局部会存在较高的流动阻力损耗，使出口压力上升、能耗增大，严重时还会引发过载保护装置启动，危及整个系统的稳定可靠。大流量工况下设计不合理会引起流体分布不均，部分区域流速过大，湍动增强，磨损加剧，不但缩短了设备的使用寿命，还会影响设备服役效率及经济性。

按照功能分区并根据工艺流程进行优化之后，可将整个系统分隔成进气、压缩、排气以及冷却等若干个独立的单元。进气时合理规划管道走向，使气体顺利进入压缩机，尽量减少流动阻力，一般采用直线型管道走向。压缩过程中根据压缩机的结构及运行的要求来合理的管路连接方式可以防止机械干涉产生的隐患。排气时重点将高压气体快速平稳的输送给下游设备，常利用渐缩形管道调节流速并减少能耗损失。冷

却部分要全面考虑介质的循环方式和热交换性能，以达到更好的冷却效果。

根据模块设计理念，管道布局安排要重视功能区内部管线拆解以及规范化接口设定，实现各部件之间高效结合和快速装配。工程实施阶段根据具体的工况参数以及现场情况选择合适的标准部件组合，可以很快建立满足要求的管网系统。有利于后续养护管理工作的开展，在工艺流程发生变化时也具有局部改良的可能，避免由于整体翻新造成的浪费。

3.2 缓冲罐设置模块化

模块化设计的关键就是确定缓冲罐的关键参数，即安装位置、数量和容积等。从空间布局上来说，将缓冲罐放置在压缩机排气口附近最好，可以大大减少脉动信号沿管道传输的时间延迟。从设备配置来说，必须仔细考虑压缩机型号、排量特性以及内部压力波动曲线等因素，进行详细的计算。在存储容量规划上，应综合考虑压缩机额定功率数值、运行频率范围、最大允许压差等技术指标，在此基础上建立数学模型，用仿真测试检验其可行性，从而得到合理的储存体积设计方案。

按照模块化的设计思想改善缓冲罐的布局方案，把它变成标准化的组件单元，具有统一的技术参数以及接口标准。管道系统中按照实际需要可以加入不同的型号缓冲罐模块，利用其高度集成特点简化后期维护过程。设备出现故障或者需要更新时，只需要更换某一个模块就可完成维修工作，保证整个管网系统连续稳定地运行。

3.3 支架布置模块化

支架布置模块化设计分为类型选择和间距确定两大部分。选型时需要全面考虑管道直径、材质、介质属性、安装条件等各方面的因素，根据实际情况选择固定式、滑动式或者导向式等多种不同类型的支吊架。在间距确定部分要综合考虑温度应力变化、机械振动情况、支撑结构承受能力等各方面因素，用理论推导和工程实践相结合的方法来设计出最佳的布局方案。

按照模块化的设计理念对支架的布局方案进行改良，把复杂的支撑结构拆解成标准组件，创建统一的技术规范和安装步骤。依靠事先构建好的数字化模型可以快速、准确地装配各个功能单元，在保证定位精度、间距参数符合相关技术标准的前提下完成管道施工部分。既方便后期巡检维护操作，又能在设备出现故障或者部件松动时快速完成高效的替换工作，保证系统的持续稳定运行。

3.4 管道连接模块化

管道连接是配套管道系统中的关键环节，其质量

与效率直接影响整个系统的性能。传统连接方式如焊接，虽连接牢固，但施工周期长、灵活性差，后期维护时拆卸困难。模块化设计理念下，应优先选用可快速拆装的连接方式，如法兰连接、卡套连接等。法兰连接具有连接强度高、密封性好、便于拆卸和安装的优点，适用于各种规格的管道连接，通过标准化的法兰盘和螺栓，可实现不同模块间的快速对接。卡套连接则适用于小口径管道，它依靠卡套的弹性变形来密封，安装简便快捷，且对管道的精度要求相对较低。在管道连接模块化设计中，还需制定统一的连接标准和规范，明确不同连接方式的适用范围、安装要求和质量检验标准。同时，对连接件进行标准化生产，确保其尺寸精度和性能一致性。这样，在管道系统安装和维护过程中，可根据实际需求快速选择合适的连接方式和连接件，提高安装效率，降低维护成本，并且便于对连接部位进行检查和更换，保障管道系统的安全稳定运行。

4 结束语

往复复式压缩机组配套管道模块化布局设计改进，应以模块化设计理念及其理论为基础，从管线规划、缓冲罐摆放、支撑结构安放等几个方面进行研究。采用模块化设计的方法，在复杂的工况下可以实现管道系统合理的分布，大幅度降低水平方向的振动幅度，改善流体阻力的情况，提高设备安装的便利性，大大提高运维条件，大大提高整个系统的运行可靠性。该种运行状态能很好地缩减检修维护费用，给工业生产流程的安全高效运作赋予可靠的保证。随着技术创新的不断发展，该设计理念在相关行业中的应用将会越来越广泛，也会达到更高更超前的技术水平。

参考文献：

- [1] 闫锋. 基于往复复式压缩机安装要点及质量控制分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018(10):119-120.
- [2] 李嘉旭. 往复复式压缩机气阀失效形式分析及故障诊断[J]. 化工设计通讯, 2018,44(05):109-110.
- [3] 刘海涛. 往复复式压缩机运行过程中的故障分析与维护措施[J]. 当代化工研究, 2016,44(4):67-68.
- [4] 贾亚平. 往复复式压缩机气阀故障判断及排除后运行效果探讨[J]. 科技创新与应用, 2017,11(2):146.
- [5] 李贵旺. 海上平台往复复式活活塞压缩机故障分析及轻量化改造[J]. 天津科技, 2020,47(04):55-58.

作者简介：

尹凯(1995-), 男, 汉族, 北京市东城区人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 天然气往复复式压缩机研发设计。