

管路系统结构可靠性稳定性分析中的参数优化方法研究

芦泉池

中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司，辽宁 沈阳 110000

摘要：管路系统作为众多设备中的重要组成部分，其结构稳定性和可靠性对于设备的正常运行有着至关重要的作用。本研究致力于对管路系统的结构可靠性及稳定性进行优化与改进。本文提出了一种新的参数优化方法，通过对管路系统内的关键参数进行有效分析和优化，以提高其结构可靠性和稳定性。首先，我们建立了管路系统的数学模型，通过数学模型对管路系统的实际工况进行模拟。接着利用该优化方法确定管路系统内的关键参数。经过优化后的管路系统，其结构稳定性和可靠性得到了显著的提高，能更好地抵抗各种不理想工况的影响。维护了设备的正常运行，也降低了设备运行的风险。此研究成果对于管路系统的设计与改进具有一定的理论和实践价值。

关键词：管路系统；结构稳定性；参数优化

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.10

引言

在工业领域，管路系统是核心组成部分，负责流体的输送，其结构稳定性和可靠性对设备安全和运行效率至关重要。随着技术发展和工业需求增加，传统的管路系统设计已难以满足现代工业的复杂需求。因此，改进管路系统的稳定性和可靠性已成为工业设计和维护的重要任务。本研究提出了一种新的管路系统参数优化方法，通过建立数学模型并对系统关键参数进行优化，旨在提升管路系统在各种工况下的表现。研究通过模拟实际工况来测试模型的准确性和参数优化的有效性，希望这一成果能够提供新的理论支持和技术途径，为工业管路系统的设计与改进提供参考，进而增强系统的整体性能和可靠性。

一、管路系统概述

（一）管路系统的定义及分类

管路系统是指在各类设备中用于输送液体、气体或其他介质的管道集合体^[1]。它主要包括管道、阀门、接头、支架等组成部分，通过这些组件的相互连接和配合，实现介质的稳定流动与控制。根据传输介质的不同，管路系统可分为液体管道系统、气体管道系统和两相流管道系统。液体管道系统应用于水、油、化学试剂等液体输送；气体管道系统多用于空气、天然气、氢气等气体的传输；两相流管道系统则适用于包含液体与气体的介质，如蒸汽管道系统^[2]。管路系统的设计与应用广泛分布在工业、建筑、运输、航空航天等多个领域，是确保生产与生活正常运行的关键基础设施。

（二）管路系统的结构特点

管路系统的结构特点主要体现在其多样

性、复杂性和功能性。管路系统通常由管道、接头、阀门、泵和过滤器等组成，这些部件的组合构成了具有特定功能的复杂网络。该系统需在各种工况下保持高度可靠性和稳定性，管材的选择、管道的布置及连接方式尤为重要。在设计中，需考虑到流体特性、压力条件、温度变化和运行环境等因素，以保证系统的高效运行和长期安全。而且，管路系统需具备足够的耐腐蚀性和抗震性能，确保在苛刻环境下的稳定性和耐久性。这些结构特点对管路系统的整体性能和维护成本有直接影响。

（三）管路系统的工作原理及性能

管路系统的工作原理是通过管道连接各个组件，使介质能够在系统中流动和传输^[3]。管路系统利用压力差使介质从高压区流向低压区，完成能量和物质的传递。在工作过程中，流体的流动速度、流量、压力等参数会受到管道直径、长度、材质及连接方式等因素的影响。管路系统的性能主要体现在其压力损失、流量稳定性以及抗震和耐腐蚀性能上。优化设计和合理的参数配置能够提高管路系统的可靠性和运行效率，确保设备的稳定运行。

二、结构可靠性与稳定性概述

（一）结构可靠性的定义及度量方法

结构可靠性指的是系统在规定条件下完成预定功能的能力，是评估和预测系统长期运行能力的重要指标。对于管路系统，结构可靠性分析旨在识别和评估由于设计缺陷、材料疲劳、环境因素等导致的潜在故障^[4]。常用的度量方法包括概率度量法、应力强度分析法以及故障模式与影响分析（FMEA）。概率度量法通过评估系统不同状态下的失效概率，来预测系统在一定时间内的可靠性。应力强度分析法则涉及对局部损伤或载荷变化的评估，确保系

统在极限条件下的正常运行。故障模式与影响分析侧重于识别关键环节的失效模式和影响，进而提高管路系统整体的可靠性^[5]。通过这些方法的综合应用，能够有效提升管路系统的设计和运行质量，保障设备的正常运作。

（二）结构稳定性的理论基础

结构稳定性的理论基础涉及多个方面。稳定性定义为系统在外界扰动下保持其平衡状态的能力。管路系统的结构稳定性分析主要依赖于力学理论，包括弹性力学和塑性力学。当外力作用于管路系统时，必须确保系统不发生屈曲或失稳。振动理论用于分析管路在不同工作频率下的动态响应。材料科学也是稳定性的关键，材料的强度、韧性和耐腐蚀性直接影响系统的稳定性。在实际应用中，有限元分析和可靠度理论被用来预测和评估管路系统的稳定性。

（三）结构可靠性与稳定性对管路系统影响

结构可靠性与稳定性是管路系统设计和应用中的两个关键要素，对管道的正常功能和寿命具有深远影响。结构可靠性确保管路在规定条件下完成预期功能，而不发生失效；结构稳定性则保证管路在动态和静态载荷下维持其结构不变形。可靠性与稳定性的提高可以减小故障发生率，提高设备运行的安全性和经济效益。管路系统中不理想工况，如压力波动、温度变化和震动等都可能结构失效或性能下降，通过提升这些方面的能力，降低风险，确保设备长时间高效运转，是实现设备正常运作的保障^[6]。

三、管路系统的数学模型

（一）管路系统数学模型的建立原理

管路系统数学模型的建立基于分析其流体

力学特性和结构参数，旨在准确模拟其在不同工况下的行为表现。模型的建立需考虑管路的几何特性、材料属性和流体性质等因素，通过建立管路的动态方程描述其性能表现。流体流动方程如连续性方程和动量方程被用于定义流体动力学特性，结合边界条件可以实现对复杂流动情况的描述。此模型不仅要准确捕捉流体的流动特性，还需考虑管道的振动和压力变化对系统稳定性的影响。通过离散化方法将连续系统转化为可求解的数学方程，借助数值仿真工具进行验证和调整，以确保模型的准确性与适用性。在模型验证中，实际工况数据和实验结果被用来校正模型参数，使其在代表性条件下更为精确地反映实际情况。

（二）管路系统数学模型的特性及应用

管路系统数学模型的特性主要表现在其准确性和鲁棒性。该模型通过模拟实际工况，能够有效反映管路系统的压力、流速和温度分布等关键参数的变化，具有高度的精确度。该模型的鲁棒性使其能够在多种复杂环境和运行条件下保持稳定运行，具备较强的容错能力。在应用方面，管路系统的数学模型广泛应用于设计、优化和故障诊断等领域。通过对模型的不断改进，可以提高管路系统的整体性能，为设备运行的可靠性和稳定性提供有力保障。

（三）管路系统数学模型的实用工具

在管路系统的数学模型研究中，一系列实用工具被广泛应用，以提升模型的精度和实用性。有限元分析软件被广泛用于模拟管路系统的力学行为，通过离散化处理复杂结构及其环境影响，可以得到系统在不同负载条件下的响应和应力分布。计算流体动力学工具则用于分析管道内流体流动特性，帮助预测流量、压力降及流体动力影响。数学编程软件也被用于数值计算，优化模型参数，提高模型求解的效率

和准确性，从而增强对系统复杂行为的预测能力。

四、参数优化方法

（一）优化方法的基本原理

参数优化方法的基本原理主要涉及对管路系统内关键参数的有效分析与优化，以提升其结构可靠性和稳定性。优化方法的核心在于通过数学建模和数值分析，识别出影响管路系统性能的主要参数，并采用优化算法对这些参数进行调整和改进。在具体应用中，通常需结合实际工况，利用数据驱动和物理模型相结合的方法，针对不同的参数进行灵敏度分析，确定其对系统性能的影响程度。随后，采用诸如遗传算法、粒子群优化等优化技术，生成改进后的参数集，以达到最佳的系统性能。通过这种方法，可以显著提升管路系统的抗干扰能力，确保在各种复杂工况下运行的稳定性与可靠性。优化方法不仅有助于管路系统的设计与改进，还提供了一个系统化的解决方案，以应对可能出现的各种工程挑战。

（二）关键参数的选择与定义

选择和定义管路系统的关键参数是优化过程的核心环节。关键参数主要包括管道材料特性、管径、壁厚、连接方式及工作温度和压力等。管道材料特性影响耐腐蚀和机械强度，管径和壁厚直接影响压力损失和流量分布，而连接方式则影响系统的整体稳定性。工作温度和压力参数关乎管道的热胀冷缩和受力情况。这些参数的确定需要结合管路系统的使用环境和运行要求，通过系统理论分析及实验数据进行评估，以便在优化过程中的选择和应用，从而提升整个管路系统的可靠性和稳定性。

（三）参数优化的步骤与方法

在参数优化过程中，通过管路系统的数学

模型识别影响系统性能的关键参数，并设定合理的初始值和优化目标。利用适宜的优化算法，比如遗传算法、粒子群优化等，进行逐步迭代，以寻找参数的最优解。结合仿真技术，验证优化结果的有效性和可行性。每轮迭代根据性能反馈动态调整参数，以确保优化后管路系统的结构可靠性和稳定性得到显著提升。通过不断优化，最终实现对管路系统各项性能指标的全面提升。

五、优化效果与总结

（一）优化前后管路系统性能对比

优化前后管路系统性能的对比主要体现在结构稳定性和可靠性的显著提高。优化方法实施之前，管路系统在高压、低温等极端工况下容易发生结构变形和故障，从而影响设备的运行稳定性，增加维护成本。优化方法实施后，通过对关键参数如管径、壁厚、材料特性等进行调整，系统的应力分布更加均匀，抗变形能力显著增强，可靠性指标得到了大幅提升。经过模拟实验验证，优化后的管路系统在多种复杂工况下表现出更强的适应性和稳定性，故障发生率显著降低，进一步保障了设备的正常运行。优化效果不仅提升了系统的整体性能，也在一定程度上延长了管路系统的使用寿命，减少了因故障导致的停机时间和经济损失。

（二）参数优化方法的优点与局限性

参数优化方法的优点在于能够系统性地分析和识别管路系统中的关键参数，通过调整这些参数，提高系统的结构稳定性和可靠性。这种方法通过数学模型模拟实际工况，能够精确地预测参数变化对系统性能的影响，从而实现

针对性改进。这种方法的优点还包括优化过程的高效性和结果的可靠性。该方法也存在一定的局限性，如对数学模型的精度要求较高，实用性依赖于对系统工况的准确模拟；在实际应用中，参数优化过程可能涉及复杂的计算和大量数据处理，增加研究与实施的难度。

（三）研究成果对工程技术领域的启示及应用前景

研究成果在工程技术领域具有重要启示及广泛应用前景。其一，提出的参数优化方法为管路系统设计提供了新的方向，能够在设计初期确保结构的可靠性和稳定性。其二，通过优化关键参数，管路系统可更好地适应复杂工作环境，延长使用寿命，降低维护成本。其三，该方法在其他类似复杂系统的设计与优化中具有借鉴价值，有助于提升工程系统整体性能。研究成果不仅适用于管路系统，对于其他需要高可靠性和稳定性的工程系统也具有重要参考意义。

结束语

本研究通过深度探讨和优化管路系统的结构可靠性和稳定性为涉及领域提供了理论支持和实践价值。主要工作包括建立数学模型、模拟实际工况、利用新参数优化方法对关键参数进行优化，提高设备运行稳定性和可靠性，减少风险。但研究有局限性，例如优化方法依赖模型准确性，复杂工况下可能需调整模型；只关注关键参数优化，未深入研究非关键参数影响。未来研究可向建立复杂环境数学模型、深入研究非关键参数及互动影响、应用多元优化方法等方向推进。本研究开启新思路，改善管路系统稳定性和可靠性，期待更多相关研究。

参考文献

- [1] 王威, 谭永彦, 张军. 电炉液压系统稳定性分析与优化[J]. 莱钢科技, 2021, (02): 48-49.

- [2] 黄华, 闫俊涛, 张军. 人-电动助力车系统结构参数稳定性分析[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(05): 485-492.
- [3] 李胜辉, 王立杰, 刘志义, 王庆刚, 卢宏建, 耿帅. 复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J]. 金属矿山, 2021, (08): 41-45.
- [4] 韦书平, 李小涛, 吴啸龙. RTK 点校正的参数稳定性优化方法研究[J]. 工程勘察, 2020, (02): 64-68.
- [5] 张雪丽, 杨洪耕, 王杨, 高红均. 考虑线路分布参数的并网系统稳定性分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(04): 44-50.
- [6] 龚飞, 卢东斌, 邹强, 张靖. 特高压直流控制器参数优化与系统稳定性分析[J]. 电工技术, 2022, (02): 75-78.