

基于蒸汽管道旋转补偿器的应用与优化设计

王兴

河南建科市政工程设计有限公司江苏分公司，江苏南京

摘要：本文以蒸汽管道旋转补偿器为工程对象，研究了旋转补偿器原理，结构组成，工作原理；研究了旋转补偿器在工业蒸汽系统、非特殊领域的运用；研究了旋转补偿器的设计要求和难点，设计参数、材质选择、耐温耐压要求；重点研究了旋转补偿器的优化设计，结构有限元分析优化设计、多目标参数化设计、智能算法布局优化、密封系统新设计、现代设计优化。

关键词：蒸汽管道；旋转补偿器；应用领域；设计要求；优化设计方法

Application and Optimization Design of Steam Pipeline Rotating Compensator

Xing Wang

Henan Jianke Municipal Engineering Design Co., Ltd. Jiangsu Branch, Nanjing, Jiangsu

Abstract: This study focuses on steam pipeline rotary compensators as a key engineering component. It examines the principles, structural composition, and operational mechanisms of rotary compensators, explores their applications in industrial steam systems and non-specialized fields, and analyzes design requirements and challenges, including design parameters, material selection, and temperature/pressure resistance specifications. The research emphasizes optimization design approaches, such as structural finite element analysis, multi-objective parametric design, intelligent algorithmic layout optimization, innovative sealing system design, and modern design optimization techniques.

Keywords: steam pipeline; rotary compensator; application field; design requirements; optimization design method

1 蒸汽管道旋转补偿器的工作原理

1.1 补偿器的结构组成

补偿器是由旋转筒体、密封装置、固定支架、连接法兰组成。旋转筒体是补偿器的关键，它能够围绕固定轴进行旋转，吸收管的热胀冷缩移动，密封装置能够避免旋转时蒸汽泄漏，保障补偿器的安全。固定支架是用来固定支撑补偿器的，能够使补偿器固定在系统中。连接法兰是用来连接补偿器的，方便拆卸。

1.2 补偿器的工作机制

补偿器的运行原理主要是凭借自身特殊结构设计来实现对管道位移补偿的，在蒸汽管道热胀冷缩的情况下，旋转筒体能够在固定轴旋转的过程中吸收管道因为温度变化而造成的轴向、横向、角向位移，避免了管道应力的集中损伤；密封装置在旋转的过程中全程闭合，不会出现蒸汽泄漏，保障了管道系统安全；固定支架在全程运行中发挥支撑力，保证了补偿器的稳定。

2 蒸汽管道旋转补偿器的应用领域

2.1 工业蒸汽系统中的应用

在工业蒸汽系统中，蒸汽管路旋转补偿器发挥着关键的作用。蒸汽管路旋转补偿器由一定的部件构成，其具有特殊的工作原理，能够有效解决工业蒸汽管路热胀冷缩的问题。在结构组成结构上，由几个部件组成，能够保证工业蒸汽管路旋转补偿器的工作稳定性，它主要是利用热胀冷缩原理来进行工作的，在工业蒸汽管路温度发生变化时，其可以通过旋转和移动的方式来进行补偿，降低管路的应力，提高管路使用寿命。

其中，在化工生产领域，工业蒸汽作为热源和动力，蒸汽管道旋转补偿器可以满足化工生产过程中的复杂生产工艺流程和频繁的温度变换，保证蒸汽管道安全可靠运转，为化工生产提供持续的动力来源；在电力领域，蒸汽管道输送高温高压蒸汽为汽轮机发电提供蒸汽，旋转补偿管可以吸收管道热胀冷缩的位移，防止管道应力过大造成损伤，为电

力生产提供安全可靠的动力；在纺织印刷领域，蒸汽被用于加热、定型等过程，蒸汽管道旋转补偿器可以保证蒸汽管道在温度变化下正常运行，为纺织印刷生产提供稳定的蒸汽；在食品加工领域，蒸汽用于杀菌、蒸煮等过程，旋转补偿器可以保证蒸汽管道在卫生的同时安全可靠运转，为食品加工提供安全可靠的动力。

2.2 特殊环境下的应用分析

在低温环境下，蒸汽管道受温度较低，管道收缩量较大，蒸汽管道旋转补偿器可利用管道的伸缩力补偿管道收缩量，防止管道过度的收缩而导致的管道爆破等事故的发生，保障蒸汽管道运输平稳运行。在高温环境下，例如一些冶金企业的蒸汽管道，管道受热膨胀剧烈，旋转补偿器可吸收管道膨胀位移，防止管道受膨胀阻碍而应力过大的现象，保障管道在高温下安全运行[1]。在腐蚀环境下，例如一些化工企业，蒸汽管道会接触腐蚀性介质，蒸汽管道旋转补偿器选用耐腐蚀材料制作，可抵御腐蚀侵蚀，提高补偿器使用寿命，保障蒸汽管道平稳运行。在地震环境下，地震会引发震动，地震产生的震动会使管道产生位移变形，旋转补偿器具有抗地震性能，可在地震发生时吸收管道位移，防止地震对管道的破坏，减少蒸汽泄露等危险事故的发生。

3 旋转补偿器的设计要求与挑战

3.1 设计参数的确定

设计参数的选择是旋转补偿器设计中重要的一部分，需要综合考虑多种因素。首先需要根据蒸汽管道实际工况，蒸汽压力、温度、流量等条件确定补偿器的公称压力、通径等基本参数，确保补偿器不会影响蒸汽的输送，能够承担管道中蒸汽压力；其次需要根据管道的安装方法、走向，管道的伸缩、位移量，位移方向等条件计算补偿器的补偿量，确保补偿器能够对管道因温度、地震等各种变化引起的管道变形进行补偿；最后需要根据安装场地、是否便于检修等条件确定补偿器的结构尺寸及安装方式，确保补偿器能够在满足工作需求的情况下便于安装检修。

3.2 材料选择与耐温耐压要求

在旋转补偿器设计中, 材料的选择是首要问题, 涉及到补偿器使用的耐温性、耐压性和耐久性。蒸汽管道中所含蒸汽温度较高、压力较高, 这要求补偿器材料具有较高耐高温强度, 有足够大的耐蠕变性, 在高温高压下可长时间工作, 在补偿器结构性能方面要求具有耐腐蚀性, 蒸汽中所含杂质不应应对补偿器材料产生腐蚀。从耐温性方面来说, 就是要求补偿器材料必须满足蒸汽管道的最高温度, 避免温度过高导致补偿器材料性能丧失, 甚至丧失[2]。在耐压性方面, 材料强度、韧性要满足蒸汽管道的压力变化, 避免蒸汽管道压力过大导致蒸汽管道破裂, 引发安全事故。因此, 材料的选择必须从材料的力学性能、物理性能、化学性能等角度出发, 保证材料满足旋转补偿器蒸汽管道应用。

4 旋转补偿器的优化设计方法

4.1 基于有限元分析的补偿器结构优化

使用有限元分析软件对旋转补偿器结构进行建模, 模拟补偿器在蒸汽管道中的受力情况。通过改变结构尺寸、形状以及结构连接方式等参数, 对不同结构进行分析其应力、变形以及疲劳寿命等关键性指标。根据分析结果, 找出结构中的薄弱点以及应力集中的区域, 对结构进行优化改进, 使补偿器结构具有足够的强度, 能够稳定工作在复杂的蒸汽管道上。

在建模的过程中充分考虑材料特性及边界条件、载荷情况等, 保证最终模拟结果正确可靠, 最后结合工程经验对有限元模型进行简化假设, 提高计算效率[3]。经过不断地迭代优化, 最后得到满足设计方案的补偿器结构, 为后续旋转补偿器优化设计奠定基础。

4.2 多目标参数化设计模型的建立

在建立多目标参数化设计模型中, 首先确定旋转补偿器设计过程中的多目标, 如补偿能力提高, 应力降低, 减小结构尺寸, 减小材料消耗和成本等, 确定影响目标的一些常用参数, 如: 补偿器结

构尺寸参数, 补偿器材料参数, 连接方式参数等, 对这些参数进行合理参数化后, 建立起多目标数学模型。通过遗传算法, 粒子群算法等先进的优化算法对数学模型进行求解, 找到满足多目标的最优化的参数组合[4]。通过建立多目标参数化设计模型, 对旋转补偿器的优化设计更加科学全面, 提高优化设计的质量。

多目标参数化设计模型建立还需模型验证和修改, 通过与实际工程对比, 检测模型预测结果的真实性, 对误差较大的模型进行修正修改, 对各类工况下的目标函数权重问题根据实际需求修改目标优先顺序, 确保设计旋转补偿器满足不同工程的应用场景, 利用计算机辅助设计软件自动对多目标参数化设计模型求解、显示等, 增强设计便捷性和直观性等。

4.3 智能算法在补偿器布局优化中的应用

智能算法具有全局搜索能力和自适应性强等特点, 因此引入智能算法对补偿器的布置位置, 布置间距, 布置方式等多种布局方案优化, 首先建立以蒸汽管道系统实际工况和系统设计约束性条件为优化目标, 管道系统热应力小, 补偿器数量尽量小即系统造价尽量小等布置优化目标函数, 然后结合优化算法与有限元分析等计算方法, 由优化算法对布局参数与有限元分析计算优化布局每一次布局优化, 由优化算法对布局参数与有限元分析计算优化布局每一次调整, 在充分考虑管道系统复杂程度和系统约束性条件, 提高补偿器布局优化精度和可靠性, 使蒸汽管道系统运行平稳可靠[5]。

4.4 旋转补偿器密封系统的创新设计

针对传统密封结构泄漏风险高、后期维护不易的问题, 提出以多层密封元件组合方式、不同材料密封环层层密封、确保密封环具有高温高压可靠性的自补偿密封方式为新型密封结构的设计方式, 通过弹性元件进行预紧力补偿密封面之间不同, 解决密封面热胀冷缩失效, 设计压力传感器进行密封状态在线检测, 提供后期维护预防, 提高密封寿命与可靠性。

4.5 现代优化设计技术的应用

积极利用现代优化设计技术提升旋转补偿器设计水平,在优化设计过程中积极应用现代化设计技术,利用先进的计算机辅助设计软件进行补偿器快速建模分析,缩短了设计时间;利用虚拟仿真技术可以在设计阶段模拟补偿器在实际工况下的运作情况,发现存在的问题和缺点,提前做好调整处理;利用大数据分析 with 机器学习的算法,分析大量设计数据,可以为设计人员提供更加合理的设计指标和设计方案建议,提升旋转补偿器设计的智能化程度。

将多学科优化设计方法相结合,把结构力学、力学、热学、材料学等学科结合起来,考虑多学科对旋转补偿器的各方面影响,从整体上最优设计,同时云技术支撑使优化设计有了强大的算力支持,计算复杂化模型、海量计算成为可能,大大提高设计并行能力、设计效率。这些先进的优化设计技术在旋转补偿器设计中的综合应用,大大提高了旋转补偿器设计的水平和竞争力。

5 结语

通过蒸汽管道旋转补偿器的研究,对其工作

原理、应用领域、设计要求和困难、优化设计方法有了全面了解,从结构组成工作原理、运行机理到工业蒸汽系统及特殊条件的广泛应用都说明了旋转补偿器在蒸汽管道中的重要性。在设计过程中,设计参数的确定,选型耐温耐压的材质是前提,各种优化设计方法的加入都有利于提高补偿器的性能,现代优化设计技术的引入将旋转补偿器的设计更加趋于智能化、精确化。相信在今后技术的发展,蒸汽管道旋转补偿器将发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 吉堂盛.现代优化设计技术在旋转补偿器设计中的应用前景[J].现代制造工程,2022,(07):122-127.
- [2] 刘明超;郭东升.直埋蒸汽管道的设计要点分析[J].区域供热,2022(06):130-134.
- [3] 张童龄.PTA装置高压蒸汽管道的保温设计和优化[J].化学工程与装备,2024(08):94-97.
- [4] 李博义.工业厂区蒸汽管道的设计要点[J].化工设计通讯,2022(11):189-190.
- [5] 曾鑫.长输直埋蒸汽管道保温结构设计及优化分析[J].区域供热,2024 (06):141-148.

