

基于有限元分析的高精度计量容器结构优化策略探究

庄国栋¹, 曲润波¹, 党安芳^{2*}

(1. 青岛海关, 青岛 266555; 2. 山东鲁检科技有限公司, 青岛 266000)

摘要: 在工程设计领域, 高精度计量容器的结构优化是确保计量准确性和稳定性的关键。随着有限元分析技术的不断发展, 其在结构优化设计中的应用日益广泛。本文基于有限元分析, 通过构建精确的有限元模型, 对容器的应力分布、变形情况进行了详细分析, 并提出了针对性的优化方案。从研究结果来看, 优化后的容器在保持高精度计量的同时, 提高了结构的稳定性和耐用性。

关键词: 有限元分析; 高精度计量容器; 结构优化; 应力分布; 变形控制

0 引言

在工业生产、科研实验及日常生活中, 高精度计量容器扮演着至关重要的角色。它们不仅要求具备精确的计量功能, 还需在复杂环境中保持高度稳定性和耐用性^[1]。然而, 传统的容器设计方法往往依赖于经验公式和实验测试, 难以全面准确预测容器的性能表现。随着计算机技术的飞速发展, 有限元分析作为一种先进的数值分析方法, 逐渐成为结构优化设计的首选工具。有限元分析将复杂结构划分为有限数量的小单元, 对每个单元进行力学计算, 再通过整体求解来得到结构的应力、变形等信息, 实现对结构性能的精确预测和优化设计。本文通过深入探讨基于有限元分析的结构优化策略, 以期对相关领域的工程设计提供新的思路和方法。

1 高精度计量容器结构优化的必要性

1.1 确保产品质量与实验准确性

高精度计量容器在科研实验及工业生产中扮演着至关重要的角色, 被广泛应用于检测、计量和传输各种流体介质, 其性能直接关系到科研实验的准确性和产品质量。科研实验中, 这些容器用于精确测量实验样本, 提供准确数据支持, 确保结果的准确性和可重复性^[2]。在工业领域, 高精度计量容器被用于控制原材料的配比, 确保生产过程达到预设标准, 从而生产出合格产品。然而, 高精度计量

容器往往面临高压、高温和腐蚀性等复杂的使用环境。这些复杂的使用环境对容器的结构强度和密封性能提出了极高的要求, 因此, 进行结构优化显得尤为重要。

1.2 适应现代工业的高精度需求

传统的设计方法往往基于经验公式和简化模型, 难以准确预测容器在各种复杂工况下的性能表现, 难以满足现代工业对高精度和稳定性的需求^[3]。高精度计量容器的设计必须采用更加先进和精确的分析方法。有限元分析、计算流体动力学等数值分析方法的应用, 使设计师能够更准确地模拟容器在各种工况下的应力分布、变形情况和流体流动特性, 从而进行更精确的结构优化, 提高容器的计量精度和稳定性, 满足现代工业对高精度计量的需求。

1.3 提升经济效益与社会效益

通过优化结构设计, 可以降低容器的生产成本^[4]。例如, 通过合理的材料选择和壁厚设计, 可以减少材料浪费和加工成本; 优化容器的形状和尺寸, 可以提高生产效率和降低运输成本。此外, 优化后的容器具有更长的使用寿命和更高的可靠性, 提供更加可靠和满意的产品体验。同时, 在环保、能源等领域的应用也有助于推动可持续发展和节能减排目标的实现。

2 高精度计量容器结构优化的现状分析

2.1 有限元分析技术的应用范围与内容

(1) 应力分析。通过有限元分析, 工程师可以精确模

第一作者: 庄国栋, 硕士, 工程师, 研究方向为大宗资源商品检验鉴定。

* 通信作者: 党安芳, 工程师, 研究方向为检疫处理技术及效果评估研究、安全生产管理、环境保护研究。E-mail: xiaofangwahaha@163.com

拟容器在各种极端工况下的应力分布状态, 这对于评估容器的结构强度和稳定性至关重要。有限元分析能够识别潜在的应力集中区域, 为设计师提供调整结构设计的依据, 确保容器在高压条件下仍能保持足够的强度和稳定性。此外, 应力分析还有助于优化容器的材料选择, 通过有限元分析可以预测不同材料在相同工况下的应力响应, 从而选择性价比最高的材料方案。

(2) 变形分析。高精度计量容器的计量精度往往受到微小变形的影响。这些变形可能源于温度变化、压力变化或长期负载等因素^[5]。通过有限元分析, 工程师可以预测容器在各种工况下的变形情况, 进而对容器的结构进行微调, 以减少变形对计量精度的影响。不仅如此, 变形分析还为容器的长期使用性能评估提供了重要依据。通过模拟长期负载条件下的变形累积效应, 可以预测容器的使用寿命, 为定期维护和更换提供指导。

(3) 优化算法应用。在有限元分析的基础上, 结合各种优化算法可以进一步推动高精度计量容器的结构优化。梯度优化法、遗传算法和粒子群算法等先进算法被广泛应用于这一领域。梯度优化法通过计算目标函数的梯度信息来指导搜索方向, 适用于目标函数连续且可导的情况。而遗传算法则模仿生物进化过程, 通过选择、交叉和变异等操作不断进化出更优的解, 适用于解决复杂的非线性优化问题。粒子群算法则模拟鸟群觅食等自然现象, 通过粒子间的信息共享和协作来寻找全局最优解。通过结合有限元分析和这些优化算法, 设计师可以在保证容器结构强度和稳定性的前提下, 最大限度地提高计量精度和降低成本。

2.2 有限元分析应用过程中存在的突出问题

(1) 复杂三维结构的建模与求解难题。对于具有复杂几何形状和边界条件的三维结构, 有限元模型的建立和求解过程往往耗时较长且计算资源消耗大。这主要是因为复杂结构需要划分更细致的网格以获得更准确的模拟结果, 而网格数量的增加会直接导致计算量的剧增^[6]。此外, 复杂边界条件的处理也需要更多的时间和精力。为了解决这个问题, 研究者们正在不断探索更高效的网格划分技术和求解算法。例如, 自适应网格划分技术可以根据应力分布和变形情况自动调整网格密度, 从而在保持计算精度的同时减少计算量。此外, 并行计算技术和高性能计算集群的应用也大大提高了有限元分析的求解效率。然而, 这些技术的实施仍需要一定的硬件支持和专业知识, 因此在实际应用中仍需权衡成本效益和技术可行性。

(2) 优化算法选择与参数设置的挑战。在高精度计量容器的结构优化中, 优化算法的选择和参数设置对最终优化结果具有重要影响。在实际应用中, 需要结合具体问题

和需求选择合适的优化算法, 并进行细致的参数调试。这通常需要对优化算法的原理和特性有深入的理解, 以及丰富的实践经验。然而, 对于许多设计师和工程师来说可能具有挑战性。为了解决这个问题, 研究者们正在开发更加智能和自适应的优化算法选择工具。这些工具可以根据问题的特征和约束条件自动推荐合适的优化算法, 并提供参数设置的建议。当然, 在实践中通过机器学习等技术对优化算法的性能进行预测和评估, 也可以为算法选择和参数设置提供更科学的依据。

3 基于有限元分析的高精度计量容器结构优化策略

3.1 精确建模与网格划分

在进行有限元分析之前, 精确建模是确保分析结果准确性的关键步骤^[7]。对于高精度计量容器而言, 其几何形状、材料属性、边界条件等因素均对分析结果产生重要影响。因此, 在建模过程中, 需要充分考虑这些因素, 确保模型的准确性和完整性。以某化工集团生产实践为例, 该集团在生产过程中需要使用一种高精度计量容器来储存和计量具有腐蚀性的液体。为了确保容器的安全性和可靠性, 该集团与某科研机构合作, 采用有限元分析技术对容器的结构进行优化设计。在建模过程中, 科研人员首先根据容器的实际几何形状和材料属性, 利用专业的有限元分析软件建立了精确的容器模型。同时, 考虑到液体对容器的腐蚀作用, 科研人员还在模型中加入了腐蚀层, 以模拟实际工作环境对容器的影响。

网格划分是有限元分析中的另一个关键环节。为了确保分析结果的准确性, 科研人员对容器进行了细致的网格划分。在应力集中区域和变形较大的区域, 采用了更密集的网格, 以提高分析精度^[8]。而在应力较小、变形不大的区域, 则采用了较稀疏的网格, 以节省计算资源。通过精确的建模和细致的网格划分, 科研人员得到了容器在各种工况下的应力分布和变形情况。分析结果显示, 容器在底部和侧面存在应力集中区域, 且变形较大。针对这些问题, 科研人员对容器的结构进行了优化调整, 如增加壁厚、改变形状等, 以提高其结构强度和稳定性。经过优化后的容器在实际应用中表现出了良好的性能。在腐蚀性液体的作用下, 容器的应力水平和变形量均得到了有效控制, 确保了容器的安全性和可靠性。同时, 优化后的容器还提高了计量精度, 满足了该化工集团的生产需求。

由此可知, 在进行高精度计量容器的结构优化设计时, 精确的建模和细致的网格划分是确保分析结果准确性的基础。只有建立了准确的模型, 并进行了合理的网格划

分, 才能得到可靠的分析结果, 为后续的优化设计提供有力支持。因此需要积极强调精确建模与网格划分工作。

3.2 多工况分析与优化

高精度计量容器在使用过程中往往面临多种工况, 如不同压力、温度、腐蚀性等^[9]。这些工况对容器的性能产生重要影响, 因此在进行有限元分析时, 需要考虑多种工况对容器性能的影响。以某电力公司生产实践为例进行分析, 其在发电过程中需要使用一种高精度计量容器来测量高压高温蒸汽的流量。该公司采用有限元分析技术对容器的结构进行优化设计, 在充分考虑高压高温蒸汽对容器影响的基础上, 建立了精确的容器模型, 之后通过设定不同的压力和温度条件, 对容器进行了多工况分析。分析结果显示, 随着压力和温度的升高, 容器的应力水平和变形量均有所增加。特别是在容器的某些关键部位, 如焊缝、法兰连接处等, 应力集中现象尤为明显。针对这些问题, 科研人员对容器的结构进行了优化调整, 如增加壁厚、改变形状、优化焊缝设计等, 以提高其结构强度和稳定性。科研人员还充分考虑了蒸汽对容器的腐蚀作用。因此在模型中加入了腐蚀层, 并模拟了蒸汽对容器内壁的腐蚀过程。分析结果显示, 腐蚀作用对容器的应力分布和变形情况产生了一定影响。因此, 在优化设计中, 应采取相应的防腐措施, 如选用耐腐蚀材料、增加防腐涂层等, 以提高容器的耐腐蚀性。

结果显示, 经过优化后的容器在实际应用中表现出了良好的综合性能。比如在高压高温蒸汽的作用下, 容器的应力水平和变形量均得到了有效控制, 确保了容器的安全性和可靠性。优化后的容器还提高了计量精度和耐腐蚀性, 满足了该电力公司的生产需求。因此, 在进行高精度计量容器的结构优化设计时, 必须要考虑多种工况对容器性能的影响。同时要通过多工况分析找出容器在各种工况下的应力分布和变形规律, 对容器的结构进行优化设计。

3.3 结合优化算法进行迭代优化

在有限元分析的基础上, 可以结合各种优化算法对容器的结构进行迭代优化^[10]。以某科研机构为例, 在进行某项科研实验时, 需要使用一种高精度计量容器来精确测量实验过程中的流量。该机构采用有限元分析技术和优化算法对容器的结构进行优化设计。科研人员首先根据容器的实际几何形状和材料属性, 建立了精确的容器模型, 然后通过有限元分析得到了容器在各种工况下的应力分布和变形情况。针对分析结果中存在的问题, 科研人员采用了遗传算法对容器的结构进行迭代优化。在优化过程中, 科研人员设定了合理的目标函数和约束条件, 以确保优化结果

的准确性和可行性。通过多次迭代计算, 科研人员得到了最优的容器结构参数。优化后的容器在计量精度和稳定性方面均得到了显著提高。同时, 优化后的容器还具有良好的加工性和经济性, 满足了该机构的生产需求。

从最终的结果来看, 经过优化后的容器在科研实验中表现出了良好的性能。而且在精确测量流量的过程中, 容器的计量精度和稳定性均得到了有效控制, 还具有良好的加工性和经济性, 为后续的批量生产提供了有力支持。可见, 在进行高精度计量容器的结构优化设计时, 需要通过选择合适的优化算法和设定合理的目标函数及约束条件搜索最优解, 从而提高优化设计的效率和准确性。

4 结束语

综上所述, 基于有限元分析的高精度计量容器结构优化策略具有显著的优势和应用前景。通过精确建模与网格划分、多工况分析与优化以及结合优化算法进行迭代优化等措施, 可以实现对容器结构的全面优化和性能提升。未来, 随着有限元分析技术和优化算法的不断发展完善, 高精度计量容器的结构优化将更加高效和精确, 为相关领域的工程设计提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 王野平, 董远川, 黄韬. 飞针测试机侧向驱动零件的有限元分析与结构优化[J]. 印制电路信息, 2023, 31(2): 55-58.
- [2] 李明. 基于有限元分析的机械结构优化与性能改进[J]. 2024, (1): 112-114.
- [3] 王旭. 煤矿提升绞车滚筒有限元分析及结构优化研究[J]. 机械管理开发, 2024, 39(3): 166-168.
- [4] 许康伟. 基于ANSYS的离合器膜片弹簧结构优化与有限元分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2602-2610.
- [5] 董中华. 掘锚机机载钻机的钻臂有限元分析和结构优化[J]. 煤矿机械, 2024, 45(7): 135-137.
- [6] 张思维, 唐宇峰, 李文杰, 等. 基于NLWLDPSO的压力容器关键部位的结构优化[J]. 化工设备与管道, 2025, 62(1): 28-37.
- [7] 包博宇, 王子龄, 姚琳. 一种新燃料运输容器结构设计及验证[J]. 包装工程, 2025, 46(1): 305-311.
- [8] 梁元月, 董富荣, 王建刚, 等. 压力容器用整体设备法兰结构优化设计分析[J]. 大众标准化, 2024, (22): 50-52.
- [9] 夏萌. 矩形容器门结构设计方法及疲劳分析[J]. 中国化工装备, 2024, 26(6): 3-6.
- [10] 李馨楠, 张白茹. 某型新燃料运输容器结构设计及安全分析研究[J]. 包装工程, 2024, 45(21): 40-47.