

可扩展方舱结构中侧向拓展机构的机械连接强度与稳定性 优化研究

朱伟龙

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215101

【摘要】：可扩展方舱结构中的侧向拓展机构在工程应用中具有重要意义，尤其在机械连接强度与稳定性方面的表现对其安全性至关重要。研究采用力学分析与数值模拟相结合的方法，优化了连接部位的强度与稳定性，提出了改进的设计方案。在实验验证中，通过静态与动态载荷测试，分析了优化设计对拓展机构性能的提升效果。优化方案不仅增强了结构的稳定性，还提高了其在复杂工况下的可靠性，为可扩展方舱结构的设计与应用提供了理论支持和实践指导。

【关键词】：方舱结构；侧向拓展机构；机械连接；强度优化；稳定性设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.034

引言

方舱结构作为重要的工程结构形式，其拓展机构的设计与优化直接关系到系统的性能与可靠性。侧向拓展机构作为方舱结构的核心部分，其机械连接的强度与稳定性对于保障结构的安全性至关重要。现有的设计方法往往忽略了连接部位的力学特性，导致拓展机构在使用过程中出现性能不足或故障。因此，研究如何优化侧向拓展机构的机械连接强度与稳定性，已成为提升方舱结构安全性的关键。通过创新的设计方案与优化方法，可以显著提高结构的综合性能，为方舱结构的广泛应用奠定基础。

1 侧向拓展机构的力学特性分析

1.1 拓展机构的结构构型与加载方式

拓展机构的结构设计通常包括一系列相互连接的组件，这些组件通过机械连接方式来实现方舱的展开与收缩。在拓展机构的构型设计中，考虑了侧向载荷、轴向载荷和剪切力的综合影响，确保结构在不同操作状态下都能稳定工作。加载方式方面，侧向拓展机构通常受到较大的水平力和扭矩的作用，特别是在拓展过程中，这些载荷集中作用在连接部位，容易引起局部应力集中。在设计时，必须对这些关键部位进行详细的力学分析，确保在加载条件下结构能够保持足够的强度和稳定性。结构的刚度和变形特性也是评估拓展机构性能的重要指标，尤其是在拓展时，由于结构变形较大，加载过程中的响应尤为重要。

1.2 连接部位的力学行为分析

连接部位的力学行为对拓展机构的整体性能起着决定性作用。尤其在方舱结构的侧向拓展过程中，连接点承受的载荷往往较为复杂，涉及到多种力的交互作用。连接件的材质、几何形状以及装配方式直接影响其承载能力和力学性能。应力集中现象在连接部位尤为突出，特别是在转角和弯曲区域，可能引发裂纹扩展或者局部失效^[1]。力学行为分析不仅要考虑外力

作用下的应力分布，还需要研究连接件在动态载荷和周期性载荷作用下的疲劳特性。疲劳破坏是连接部位常见的失效模式，连接部位的分析需要结合动态载荷的变化和应力循环效应来进行，以确保在长期使用过程中能够保持足够的强度和稳定性。

1.3 结构强度与稳定性评价方法

结构强度与稳定性是评价拓展机构设计优劣的关键指标。强度评价主要依赖于材料的抗拉、抗压及抗剪性能，结合有限元分析法进行应力分析，以验证结构在最大载荷下是否会发生塑性变形或失稳。对于侧向拓展机构而言，稳定性分析同样不可忽视，特别是在动态载荷作用下，结构的屈曲和振动特性必须进行精确分析。常用的稳定性评价方法包括临界载荷法和模态分析法，通过这些方法能够预测在特定荷载条件下结构的失稳风险。结构的稳定性不仅仅是静态条件下的评估，还需考虑其在外界干扰、风载或其他环境因素作用下的动态响应，确保结构在实际使用中的安全性和可靠性。

2 机械连接强度优化方法

2.1 力学模型的建立与分析

建立准确的力学模型是优化机械连接强度的前提。拓展机构的连接部分受多种因素的影响，如外部载荷、材料特性以及连接方式等。必须综合考虑这些因素，建立包括几何非线性、材料非线性和接触非线性的力学模型。模型需要对连接部位的应力分布、变形特性以及载荷传递路径进行详细描述。有限元分析（FEA）常常被应用于这种模型的求解，通过对连接部位进行网格划分，计算出在不同工况下的应力、应变和位移，进而揭示潜在的弱点和应力集中区域。力学模型的分析不仅提供了优化方向，还能够为后续的设计改进提供数据支持，帮助识别影响强度和稳定性的关键因素。

2.2 优化目标与约束条件的确定

在优化过程中，确定清晰的优化目标和约束条件是非常重要的

要的。优化目标通常是提高连接强度、降低结构变形、增强稳定性等，而这些目标必须量化并与设计要求相符。强度优化目标可以定义为最大化连接部位的抗拉强度或抗剪强度，或是最小化连接部位的应力集中程度^[2]。约束条件方面，常见的包括结构尺寸、材料特性、最大变形量等，这些都需要在优化过程中加以考虑，以确保结构不仅具有良好的强度，还符合实际工程中的空间和材料限制。约束条件的合理设定对于确保优化方案的可行性至关重要，不仅避免了不现实的设计，还能保证优化结果具备实际应用价值。

2.3 优化算法的选择与实施

优化算法在机械连接强度优化过程中起着决定性作用。常见的优化算法包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。选择合适的优化算法需要综合考虑问题的非线性特性、优化目标的复杂度以及计算资源的限制。遗传算法适合处理复杂的多目标优化问题，能够有效搜索到全局最优解，而粒子群优化算法在解决多变量、多约束的优化问题时表现出色，尤其适用于连续空间的优化。模拟退火算法则主要用于解决局部极小值问题。实施时，首先需要将优化目标和约束条件转化为数学模型，再通过选定的优化算法进行求解，最终得出最佳的设计方案。优化过程中，精细的算法调参和收敛性分析也是确保优化效果的重要环节。

3 稳定性分析与设计改进

3.1 拓展机构稳定性分析方法

拓展机构的稳定性分析通常依赖于精确的力学模型与结构响应分析。对于侧向拓展机构，稳定性问题主要表现为局部失稳、屈曲和振动等现象。在静态载荷作用下，结构的稳定性可通过临界载荷法进行评估，这一方法能够计算出结构在受力过程中可能发生的最小稳定荷载。考虑到动态载荷和外界环境因素的影响，模态分析与动力学分析成为必不可少的评估工具。模态分析通过研究结构的固有频率和振型，揭示潜在的振动共振区，从而有效预测结构的动态稳定性。结合有限元分析（FEA）技术，动态稳定性可以在不同工况下进行深入研究，对拓展机构在复杂使用环境中的稳定性提供详细的数值预测与分析依据。

3.2 影响稳定性的关键因素

影响拓展机构稳定性的因素较为复杂，涉及材料性能、几何形状、载荷分布等多个方面。材料的刚度和强度直接决定了结构的抗变形能力，尤其是在受力过程中，材料的屈服强度、疲劳性能及弹性模量等因素显著影响着稳定性^[3]。拓展机构的几何设计，特别是连接部位的形状和尺寸，也对稳定性有着深远影响。连接点的形状如果设计不当，可能会导致局部应力集中，从而加剧结构的失稳倾向。在受外部载荷作用下，载荷的分布方式和作用点位置对稳定性具有重要影响。如果载荷偏移

或不均匀，可能导致结构某一部分承受过大应力，从而引发屈曲。为了优化稳定性，必须全面评估这些影响因素，通过适当的设计修改与优化，使结构在复杂的操作条件下保持足够的稳定性。

3.3 优化设计对稳定性的提升

优化设计能够显著提高拓展机构的稳定性。通过对结构的几何形状和材料选择进行优化，可以有效减小应力集中区域，提高关键部位的强度和刚度。采用加强型连接设计可以有效分散载荷，降低局部失稳的风险。通过合理优化拓展机构的配重和支撑结构，可以改善其受力状态，增加结构的临界稳定载荷。优化设计还可以考虑减少不必要的部件或简化结构，使其在承载能力不变的情况下达到更轻的重量，从而降低振动和扭曲风险。采用现代优化算法，如拓扑优化和形状优化，可以在保证功能需求的基础上，达到最佳的结构稳定性设计。这些优化手段不仅提升了拓展机构的安全性，还增强了其适应复杂环境的能力。

4 数值模拟与实验验证

4.1 数值模拟模型的构建与验证

数值模拟模型的构建是分析拓展机构力学性能的重要手段。通过有限元分析（FEA），可以建立涵盖结构几何、材料属性及边界条件的数值模型，模拟连接部位在不同工况下的应力、应变分布。构建时，选择适当的网格划分和材料模型非常关键，确保模拟结果的准确性。模型中的几何特征需要细致刻画，特别是连接件和接触界面的处理，以避免由于简化而引起的计算误差。在验证过程中，将数值模拟结果与实验数据进行对比，验证模型的准确性和适用性。通过对比分析，能够校正模拟过程中的不合理假设，为后续优化设计提供依据。多次对比验证后，模型能够为结构的稳定性和强度分析提供可靠的数值支持，为实际工程中的决策提供理论依据。

4.2 实验方案与测试结果

实验方案的设计是验证数值模拟结果的关键。为了确保测试的全面性和真实性，实验中应模拟拓展机构的实际工作条件，包括不同的载荷、环境温度以及操作方式。通过使用传感器和数据采集系统，实时监测结构在各类载荷下的变形和应力响应^[4]。测试方案通常包括静态载荷测试、动态响应测试以及疲劳测试，旨在全面评估拓展机构的性能。实验过程中，重点关注连接部位的应力分布以及结构的稳定性变化，通过应变片和位移传感器采集数据，获得关键部位的实际工作状态。在完成实验后，对比实验数据与数值模拟结果，分析其差异，进一步调整优化设计和数值模型，以提升结构的整体性能。

4.3 结果分析与对比

数值模拟与实验结果的对比分析为优化设计提供了重要依据。在结果分析中，需重点比较实际测试中的应力、变形与

模拟结果的差异,评估模拟模型的可靠性。若模拟结果与实验数据吻合,则表明模型的假设合理,模拟分析可用于进一步的设计优化。反之,需要分析误差来源,如边界条件设置、材料属性假设或网格划分问题。通过对比,能够发现潜在的设计缺陷,并针对性地进行改进。同时,测试数据还可用于优化参数的调整,为拓展机构在极限工况下的稳定性和强度提供保障。综合数值模拟与实验验证的结果,有助于推动拓展机构设计的完善,确保结构在实际应用中的安全性和可靠性。

5 优化设计方案的应用与前景

5.1 优化设计在实际工程中的应用

优化设计方案在实际工程中具有广泛的应用前景,特别是在空间结构和复杂机械系统中。通过对拓展机构进行优化设计,能够显著提高其在极限工况下的表现,确保系统的可靠性和稳定性。在工程实践中,优化设计能够减少不必要的冗余结构,优化连接部位的设计,使得整体结构更加紧凑和高效。通过实施优化后的设计,拓展机构不仅能承受更大的载荷,还能在动态负载作用下保持稳定,适应更复杂的使用环境。某些航天设备的拓展系统采用优化设计后,能够有效减轻重量,并提高系统的负载能力,使得整体性能得到大幅提升。优化设计的实施,不仅使得结构更加安全,也为实际操作提供了更高的保障。

5.2 设计方案的可行性与经济性分析

在实际工程中,设计方案的可行性和经济性是衡量其实施价值的重要标准。优化设计虽然能够提高结构性能,但需要综

合考虑制造、安装、维护等方面的成本。在可行性分析中,主要评估设计的复杂性以及与现有制造工艺的匹配度^[5]。结构设计的复杂度、材料的选择以及生产过程的可行性是评估设计是否能够顺利应用的重要因素。经济性分析关注的是在保证结构强度和稳定性的前提下,如何控制成本。通过选择合适的材料和制造工艺,可以使得优化设计不仅具有性能优势,还能满足成本控制要求。经济性分析还需考虑长期使用中的维护成本,合理的设计优化可以降低维护和更换的频率,进一步提升整体的经济效益。

5.3 未来研究方向与技术突破

未来的研究方向将在现有设计优化方法的基础上,结合先进的技术和理念,推动拓展机构结构优化的不断进步。随着智能制造和人工智能技术的发展,基于机器学习的结构优化方法可能成为未来研究的热点。通过机器学习算法,可以实现更加精准的设计方案预测和优化过程的自动化,从而大幅提升设计效率和效果。随着材料科学的发展,新型轻质高强度材料的应用将为拓展机构提供更多优化空间,进一步提高结构的负载能力与耐用性。

6 结语

优化设计在拓展机构的强度与稳定性方面发挥了重要作用,推动了相关结构的性能提升和应用前景的拓展。通过力学分析与数值模拟相结合,提出了更为科学合理的设计方案,并在实验验证中获得了积极的反馈。未来研究将进一步提升优化方法的智能化和多目标综合优化能力,为工程应用提供更强的技术支持。

参考文献:

- [1] 张怡敏,戴宪邦,张馨,等.集装箱式模块化船用医疗方舱结构强度与抗冲击能力仿真[J].造船技术,2025,53(05):84-87+92.
- [2] 姜笃山,刘营.方舱结构设计中人因工程因素应用与探讨[J].机电产品开发与创新,2025,38(04):179-182.
- [3] 邱田,李进军,王平山.模块化集成方舱结构销键拼装技术研究[J].住宅与房地产,2023,(29):26-28.
- [4] 韩伟.浅谈方舱舱体的电磁屏蔽设计[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(7):35-38
- [5] 孟晓东,郑静晨,李明,黄山林,徐冬,杨林波,赵喆,李晓雪,郝显文.上下板对折式多级扩展方舱自动扩展机构[J].中国医疗设备,2018,33(5):6-813.