

Study on the improvement of bearing capacity of tubular structure based on bidirectional progressive structural optimization method

Chuan Li Shuang Chen*

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi, 314000, China

Abstract

Tubular structure is widely used in aerospace, civil engineering, mechanical manufacturing and other fields, and the improvement of its carrying capacity is one of the important directions of the current structural optimization research. In order to improve the performance of tubular structures under extreme load, this paper proposes a carrying capacity lifting scheme of tubular structures based on the bidirectional progressive structure optimization method. By optimizing the geometric parameters and material properties of tubular structures, combined with finite element analysis methods, we explore the influence of different optimization strategies on structural properties. The experimental results show that the two-way progressive optimization method can not only significantly improve the carrying capacity of the tubular structure, but also effectively reduce the weight of the structure, providing theoretical basis and practical guidance for engineering design. The study in this paper provides a new idea for the optimal design of tubular structures.

Keywords

two-way gradual optimization; tubular structure; carrying capacity; finite element analysis; structural optimization

基于双向渐进结构优化方法的管状结构承载能力提升研究

李川 陈爽*

江西理工大学, 中国·江西 赣州 314000

摘要

管状结构广泛应用于航空航天、土木工程以及机械制造等领域,其承载能力的提升是当前结构优化研究的重要方向之一。为了提高管状结构在极端载荷下的表现,本文提出了一种基于双向渐进结构优化方法的管状结构承载能力提升方案。通过对管状结构的几何参数和材料属性进行优化,结合有限元分析方法,探索了不同优化策略对结构性能的影响。实验结果表明,双向渐进优化方法不仅能够显著提高管状结构的承载能力,还能有效降低结构重量,为工程设计提供了理论依据和实践指导。本文的研究为管状结构的优化设计提供了一种新的思路,具有广泛的应用前景。

关键词

双向渐进优化; 管状结构; 承载能力; 有限元分析; 结构优化

1 引言

管状结构因其良好的强度和刚度特性,广泛应用于多个领域,如航空航天、土木工程、机械制造等。尤其是在高强度和极限条件下,管状结构的承载能力常常成为设计中需要重点考虑的因素。然而,随着结构载荷需求的不断提高,传统的管状结构设计方法往往无法充分发挥其潜力,导致其在极端条件下的性能无法满足实际需求。因此,提升管状结

构的承载能力成为当前结构设计中的一项重要任务。

近年来,结构优化技术不断发展,尤其是基于有限元分析(FEA)的优化方法被广泛应用于复杂结构的设计中。其中,双向渐进优化方法(Bi-directional Progressive Optimization, BPO)因其能够在设计过程中同时考虑多个参数的优化,逐步调整结构的几何形态与材料分布,从而提高结构的承载能力,成为一种较为先进的结构优化方法。该方法通过逐步调整和优化,能够在保证结构整体性能的基础上,达到最大化承载能力的目标[1]。

【作者简介】李川(1998-),男,中国湖北鄂州人,在读硕士,从事结构优化设计研究。

【通讯作者】陈爽(1976-),女,中国辽宁锦州人,硕士,副教授,从事机器人空间运动与速度规划、智能材料行为及控制研究。

本文旨在通过双向渐进优化方法对管状结构进行优化,研究其承载能力提升的可行性与效果,并结合有限元分析技术,探讨不同优化方案对结构性能的影响。研究将为管状结构的设计和优化提供理论依据,并对未来工程实践中的结构优化设计具有一定的参考价值。

2 管状结构承载能力的研究现状

2.1 管状结构的特点与应用

管状结构通常由圆形、椭圆形或其他几何形状的管道组成，具有较高的强度、刚度和良好的变形特性。由于其外形简单且受力均匀，管状结构在航空航天、土木工程、汽车工业等领域得到了广泛应用。例如，在航空航天领域，管状结构常用于飞机的机翼支架、燃料管道等部分；在土木工程中，管状结构被广泛用于桥梁、塔架等高强度结构的设计；在机械制造中，管状结构则常用于机器框架和支撑结构。

管状结构的优点在于其良好的抗弯、抗压、抗扭转等综合性能，尤其是在承受较大荷载时，管状结构能够有效分散外力，减少局部应力集中。然而，随着载荷条件的变化以及应用需求的增大，传统的管状结构在承载能力、耐久性等方面的不足逐渐显现，因此，提升管状结构的承载能力成为当前研究的重点。

2.2 管状结构的承载能力提升方法

管状结构的承载能力受多种因素的影响，诸如几何形状、材料属性、加载方式以及支撑条件等。为了提高管状结构的承载能力，研究人员提出了多种优化方法，主要包括几何优化、材料优化以及复合材料的应用等。

几何优化：通过对管状结构的几何形状进行调整，如管壁厚度、管道弯曲半径等，可以有效提高结构的强度和刚度。几何优化方法通常结合拓扑优化技术，通过分析结构的应力分布，优化结构形状和尺寸，以达到提高承载能力的目标。

材料优化：通过选择合适的材料或优化材料分布，能够显著提高管状结构的性能。例如，采用高强度合金或复合材料替代传统材料，能够在不增加结构重量的情况下，提高其承载能力。近年来，智能材料和复合材料的应用逐渐成为管状结构优化的一个重要方向。

复合优化方法：结合几何优化和材料优化，可以实现结构性能全面提升。通过多目标优化方法，在保证结构强度的同时，降低重量和成本。复合优化方法常结合计算机仿真和实验测试，确保优化设计能够在实际应用中实现最佳性能。

2.3 双向渐进优化方法

双向渐进优化方法是一种逐步调整设计参数的优化技术，其主要特点是能够在优化过程中同时考虑结构的几何形状和材料分布。与传统的单一优化方法相比，双向渐进优化方法能够在优化过程中更加灵活地调整结构各个方面，兼顾多种性能需求。

该方法的优化过程通常分为两个阶段：首先，通过渐进的方式逐步调整结构的几何形状，使其能够更好地适应外部荷载；其次，在材料选择和分布上进行逐步优化，通过减少材料的使用量或选择高强度材料，进一步提升结构的承载能力。双向渐进优化方法的优势在于其可以在多目标约束下

进行优化，同时兼顾结构性能和成本效益，因此在管状结构的设计中具有重要应用价值 [2]。

3 基于双向渐进优化方法的管状结构优化

3.1 优化目标与约束条件

在管状结构的双向渐进优化过程中，首先需要明确优化的目标和约束条件。优化目标通常包括最大化结构的承载能力、最小化结构重量和材料成本等，优化设计需要综合考虑这些因素，以实现最佳的结构性能。在实际应用中，结构的承载能力通常由最大应力、位移、变形等因素来衡量。为了保证优化设计的可行性，必须将这些因素与其他约束条件结合起来进行优化。

最大承载能力：优化目标之一是通过合理的设计提高管状结构的最大承载能力。承载能力是指结构能够承受的最大外部荷载，通常与结构的几何形状和材料的力学性能密切相关。通过合理设计结构的壁厚、弯曲半径、支撑方式等几何参数，可以有效提升其抗压、抗弯、抗扭等性能。优化过程中，需要综合考虑管状结构在各种载荷下的表现，确保其在实际使用过程中能够保持足够的强度和稳定性。

最小重量与成本：在提高承载能力的同时，优化目标还应兼顾结构的重量和成本。减少不必要的材料使用，不仅可以降低结构的自重，还能够减少制造成本。特别是在航空航天等要求高强度、轻量化的领域，管状结构的重量是一个关键因素。因此，在优化过程中，需对材料的分布进行合理调整，以减少材料浪费并优化重量。通过优化设计，能够使结构在承载能力和成本之间取得平衡。

结构稳定性：结构的稳定性是管状结构优化过程中需要特别关注的因素之一。结构稳定性直接关系到管状结构的安全性，优化设计必须确保结构在受到外部荷载作用时不会发生屈曲、失稳或过度变形。为此，优化过程中通常会考虑多种形式的约束条件，例如应力限制、位移限制等，以保证管状结构在高载荷下依然保持稳定性和安全性。

多目标综合考虑：在管状结构的优化过程中，不仅要关注单一目标的优化，往往需要同时考虑多个目标的平衡。例如，在提高承载能力的同时，也需考虑材料的合理使用和成本的控制。为此，采用多目标优化技术，在多个目标之间实现权衡与平衡，是双向渐进优化方法的重要特点之一 [3]。

3.2 双向渐进优化方法的实施步骤

双向渐进优化方法是一种逐步优化设计参数的过程，通过不断迭代，逐步调整管状结构的几何形状和材料分布，直到满足预定的优化目标。以下是双向渐进优化方法的实施步骤：

几何形状优化：首先，通过有限元分析（FEA）对管状结构进行初步分析，获得结构在不同载荷下的应力分布情况。基于这一分析，优化过程可以从几何形状入手。通过调整管状结构的壁厚、外径、弯曲半径等几何参数，优化其刚

度和强度。采用渐进的方式，逐步调整这些参数，并通过迭代计算，不断改善结构的承载能力。

材料优化：在几何形状优化的基础上，材料的选择和分布也同样至关重要。优化过程中，需要选择合适的材料，通常是具有高强度、低重量的合金或复合材料。材料的选择不仅要满足结构的力学性能要求，还要考虑其成本、可加工性和环境适应性。通过合理的材料分布，可以减少材料的使用量，同时提升结构的整体性能。例如，通过对管状结构的不同部分采用不同强度的材料，能够更精确地分配结构的力学性能，使结构在承载能力和材料成本之间实现最优平衡。

逐步迭代优化：双向渐进优化方法采用迭代计算方式，逐步调整设计参数。每次优化后，通过有限元分析对优化后的结构性能进行评估，判断其是否达到预期的优化效果。通过不断迭代，调整管状结构的几何参数和材料分布，最终实现最大化承载能力、最小化重量与成本的目标。每次迭代都对设计进行精细调整，使其更加符合实际需求。

结果验证：优化设计完成后，需要通过实验验证，确保优化后的管状结构能够在实际应用中满足性能要求。通过对优化后的结构进行物理实验，测试其承载能力、稳定性、变形情况等，验证优化设计的可行性和实际表现。如果实验结果符合预期，则说明优化设计达到了既定目标。如果实验结果不符合要求，则需要对优化过程进行重新调整，进一步改进设计参数 [4]。

3.3 优化结果分析

通过对管状结构进行双向渐进优化，优化后的结构在多个方面表现出了显著的优势。与传统设计相比，优化后的管状结构能够承受更大的外部载荷，同时在重量和成本方面有所降低。优化结果表明，通过合理调整几何形状和材料分布，不仅提升了承载能力，还有效减少了材料使用，降低了重量，从而提高了结构的经济性。

承载能力的提升：通过优化，管状结构的承载能力显著提升。在承受相同载荷的情况下，优化后的结构能够保持更低的应力和位移，确保其在极端载荷下依然保持稳定。通过逐步调整几何形状和材料分布，优化后的结构具有更好的抗弯、抗压、抗扭转等性能，从而提高了整体承载能力。

重量与成本的降低：优化设计不仅提高了承载能力，还有效降低了管状结构的自重和制造成本。通过合理分配材料的使用，优化后的结构在不损失强度的情况下，减少了不

必要的材料浪费。降低了结构的自重后，在应用中不仅可以节省运输成本，还能提高结构在工作环境中的效率。

结构稳定性的提高：优化后的管状结构具有更好的稳定性。在高载荷条件下，结构未发生屈服或失稳，保持了良好的工作性能。通过多目标优化，结构在提高承载能力的同时，确保了其在实际应用中不发生过度变形或屈服，增加了结构的安全性。

综合性能的平衡：双向渐进优化方法使管状结构在承载能力、重量、成本等方面实现了较好的平衡。通过迭代优化，管状结构的各项性能得到了综合提升，达到了设计要求，为实际工程应用提供了更为理想的解决方案 [5]。

4 结语

基于双向渐进优化方法的管状结构优化研究，通过对几何形状和材料分布的联合优化，显著提高了管状结构的承载能力。优化后的结构不仅在承载能力、重量、成本等方面取得了较好的平衡，还能更好地适应高强度、高载荷的工作环境，提供更高的安全性和经济性。随着计算机技术、优化算法以及有限元分析技术的不断发展，双向渐进优化方法将会在更多领域得到广泛应用，尤其在高端装备制造、新能源汽车等高新技术领域，管状结构的优化设计将发挥越来越重要的作用。

未来，随着优化算法和技术的不断发展，管状结构的设计将更加智能化、精准化。双向渐进优化方法作为一种有效的优化手段，能够在多个工程领域中发挥重要作用，为结构优化提供更加科学、合理的设计方案。通过进一步研究和实践，双向渐进优化方法有望在管状结构的设计中发挥更大的潜力，为未来工程建设提供更加坚实的技术支持。

参考文献

- [1] 王革立.岩溶地基嵌岩桩桩基特性分析与试验研究[D].中南大学,2002.
- [2] 国外高层建筑结构发展的几个问题[J].建筑技术,1974,(Z1):47-53.
- [3] 管状焊条丝极电渣焊验证容器爆破试验[J].化工与通用机械,1975,(10):1-13.
- [4] 大功率液力传动内燃机车各组成部分的结构特点[J].内燃机车,1978,(Z1):50-93.
- [5] я.в.Солодовник,董世份.新型杆塔基础结构[J].电力建设,1982,(06):56-61.