

## 湘潭大学博士研究生开题报告

# 开源拓扑优化软件包 **SOPTX**: 数值算法实现、应用及性能研究

报告人: 何 亮  
专 业: 数 学  
导 师: 魏华祎 教授

湘潭大学 • 数学与计算科学学院

2025 年 5 月 14 日

## 目录

- 1 选题背景
- 2 研究内容
- 3 工作进展与论文安排

# 目录

## 1 选题背景

## 2 研究内容

## 3 工作进展与论文安排

## 结构拓扑优化简介

- **定义与优势:** 拓扑优化是一种先进的结构设计方法,旨在给定载荷和约束条件下,在设计域内自动寻找最优的材料分布,以实现结构性能的最优。与传统优化方法相比,拓扑优化具有更高的智能化和设计自由度。
- **计算挑战:**
  - **大规模计算:** 结构分析与优化耦合,计算量大。
  - **迭代求解:** 需反复求解边值问题和灵敏度分析。
  - **资源消耗:** 处理大型线性系统,需求高。
  - **核心难题:** 提升效率与可扩展性,兼顾精度。

## 结构拓扑优化发展概述

### ● 早期解析阶段:

- 1904 年, Michell [7] 提出最优材料分布理论(桁架结构), 奠定理论基础并确立“最优布局”核心思想。
- Prager [9, 10] 等人将理论扩展至板和梁结构(解析法), 但仅限于简单案例。

### ● 数值方法突破:

- 1984 年, Cheng 与 Olhoff [2] 提出首个通用数值拓扑优化方法(固体弹性板), 标志着数值方法在该领域的兴起。

### ● 现代发展:

- 1988 年, Bendsøe [1] 引入均匀化方法, 为变密度方法奠定基础。
- 如今, 拓展出多种数值方法, 例如变密度方法、边界演化方法、进化方法等, 为不同设计提供技术支持。

## 结构拓扑优化的应用

- **应用领域:** 随着理论和方法的不断完善, 拓扑优化作为一种先进的结构设计技术, 已在汽车工业、船舶、机器人、生物工程、航空航天和土木工程等多个领域得到广泛应用 [4-6, 8, 12, 15]。
- **应用场景扩展:** 拓扑优化的应用场景日益多样化, 不仅局限于传统的线弹性问题, 还逐步扩展至非线性理论框架下的复杂工程问题, 例如材料非线性约束 [11], 应力约束 [3], 和几何非线性约束 [13, 14] 等。

## 结构拓扑优化代码的发展概述

拓扑优化作为一个跨学科的复杂领域,其理论和方法的多样性为初学者带来挑战。为降低门槛并推动普及,研究人员通过教学论文和开源代码注入活力。

- 2001 年, Sigmund 发布了首个 99 行 MATLAB 教学代码 (top99), 简洁且具教学性, 标志开源代码发展的开端, 极大促进研究与应用。
- 此后, 开源代码的数量和质量不断提升, 涵盖多种优化方法和技术, 为大规模问题求解和实际工程应用提供了重要支持。

# 目录

1 选题背景

2 研究内容

3 工作进展与论文安排



## 研究内容

本文提出了基于 **FEALPy** 平台开发的高性能拓扑优化框架 **SOPTX**。**FEALPy** 是一款开源的智能 **CAE** 计算引擎,为 **SOPTX** 提供了高效且灵活的底层支持。**SOPTX** 通过模块化设计显著提升了框架的可扩展性和可复用性,为复杂工程应用提供了有力支持。

## SOPTX 框架设计

- **实现层面:** SOPTX 基于 FEALPy 开发,支持 NumPy、PyTorch、Jax 等多种后端,确保框架的灵活性和广泛兼容性。同时,适配 CPU 和 GPU 等设备,利用 FEALPy 高效计算引擎,显著提升大规模拓扑优化问题的求解效率。
- **算法层面:** SOPTX 支持多种拓扑优化算法,包括变密度方法和水平集方法。其模块化设计便于集成其他先进算法,例如 ESO/BESO、相场方法以及 MMC,从而增强框架的灵活性和可扩展性。
- **应用层面:** SOPTX 支持求解多种拓扑优化应用,包括经典的静力学问题、热传导问题以及柔顺机械设计。同时,框架能够处理复杂的工程应用,例如应力约束优化、制造约束、3D 打印优化以及多物理场耦合,为工程设计提供全面支持。

## SOPTX 的变密度拓扑优化

- **任意维数与网格:** SOPTX 支持任意维数的拓扑优化问题,兼容结构化与非结构化网格,提升适应性和精度。
- **分析与优化解耦:** SOPTX 将结构分析和优化过程分离,提升框架的灵活性和可维护性。
- **多种优化方法:** SOPTX 支持灵活切换优化算法,例如 OC、MMA、SQP 等,提升优化效率与结果质量。
- **任意过滤方法:** SOPTX 支持灵活切换过滤方法,例如灵敏度过滤、密度过滤等,提升设计质量和计算稳定性。

## SOPTX 的水平集拓扑优化

- **分析与演化解耦:** SOPTX 将结构分析和求解演化方程更新水平集的过程分离,提升框架的灵活性和可维护性。
- **灵活的方程配置:** SOPTX 提供多样化的 Hamilton-Jacobi 方程选择,支持拓扑导数项的包含或排除,以适应不同的拓扑变化需求。
- **多种水平集方法:**
  - 参数化水平集方法:通过参数化表示提升效率,减少重初始化。
  - 基于反应扩散方程的水平集方法:引入扩散机制,增强结构演化的平滑性与稳定性。
- **结合变密度方法:** SOPTX 支持水平集方法与变密度方法的融合,扩展优化设计的适用性。

## SOPTX 中的新兴技术

- **矩阵快速组装:** 通过分离刚度矩阵计算中的单元相关部分和无关部分,实现高效的计算与缓存。
- **GPU 加速:** 通过 GPU 并行处理实现计算密集型任务的显著加速,提升大规模问题处理效率。
- **自动微分:** 精确高效地计算梯度,支持基于梯度的优化方法,确保设计迭代精度。
- **自适应网格加密:** 动态调整网格分辨率,聚焦关键区域的计算资源,兼顾精度与效率。

## SOPTX 在拓扑优化中的应用

- **柔顺度最小化:** 优化结构刚度,减少变形,广泛应用于航空航天和汽车设计。
- **热传导优化:** 提升散热效率,适用于电子设备和能源系统的高性能设计。
- **柔顺机械设计:** 实现复杂运动与变形控制,用于微机电系统和机器人技术。
- **屈曲约束优化:** 增强结构稳定性,防止失稳,适用于桥梁和高层建筑。
- **应力约束优化:** 控制局部应力,确保结构安全性与耐久性。

## 目录

- 1 选题背景
- 2 研究内容
- 3 工作进展与论文安排

## 工作进展

- 系统调研了拓扑优化的常用方法、数值不稳定现象及其解决方案，以及拓扑优化问题的基本过程和定义。
- 基于调研成果，形成了变密度拓扑优化的编程数学文档，详细推导了柔顺度最小化的目标函数、密度惩罚模型和灵敏度分析公式。
- 开发了拓扑优化软件包 **SOPTX**，实现了变密度拓扑优化，支持任意维数、任意网格的柔顺度最小化问题的求解，数值结果达到预期。
- **SOPTX** 中集成了快速矩阵组装、GPU 加速、自动微分技术，验证了其在计算精度和效率上的显著提升。



## 未来计划

- 在 **SOPTX** 中集成水平集拓扑优化方法,丰富软件的优化算法库,进一步提升其在拓扑优化领域的适用性。
- 在 **SOPTX** 中引入自适应网格加密技术,提升 **SOPTX** 在复杂结构优化中的计算精度和效率。
- 扩展 **SOPTX** 的应用范围,包括热传导优化、柔顺机械设计、以及更复杂的工程应用(如应力约束优化、屈曲约束优化等)。

## 论文安排

- 2025.04-2025.10: 调研相关文献资料, 解决理论上的难点、实现相关程序, 完成论文框架;
- 2025.10-2025.12: 撰写论文, 完成论文初稿;
- 2026.01-2026.04: 修改论文, 和老师讨论, 完成论文终稿。

## 参考文献 I

- [1] Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71(2):197-224.
- [2] Cheng, K.-T. and Olhoff, N. (1981). An investigation concerning optimal design of solid elastic plates. *International Journal of Solids and Structures*, 17(3):305-323.
- [3] Han, Y., Xu, B., Wang, Q., Liu, Y., and Duan, Z. (2021). Topology optimization of material nonlinear continuum structures under stress constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 378:113731.
- [4] Jihong, Z., Han, Z., Chuang, W., Lu, Z., Shangqin, Y., et al. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1):91-110.
- [5] Koper, D. C., Leung, C. A., Smeets, L. C., Laeven, P. F., Tuijthof, G. J., and Kessler, P. A. (2021). Topology optimization of a mandibular reconstruction plate and biomechanical validation. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 113:104157.
- [6] Mallek, A., Albedah, A., Bouziane, M. M., Bouiadja, B. A. B., Mohammed, S. M., and Gill, R. H. (2024). Topological optimization of hip spacer reinforcement. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 160:106763.
- [7] Michell, A. G. M. (1904). Lviii. the limits of economy of material in frame-structures. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 8(47):589-597.
- [8] Park, J., Lee, D., and Sutradhar, A. (2019). Topology optimization of fixed complete denture framework. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, 35(6):e3193.
- [9] Prager, W. and Rozvany, G. I. (1977). Optimization of structural geometry. *Dynamical systems*, pages 265-293.
- [10] Rozvany, G. I. (1972). Optimal load transmission by flexure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1(3):253-263.

## 参考文献 II

- [11] Wang, L., Yue, W., and Zhu, M. (2023). An improved evolutionary structure optimization method for smooth topology design of structures. *International Journal of Computational Methods*, 20(04):2250061.
- [12] Xiao, Q., Guo, W.-n., Yang, L.-t., Zhou, S.-t., and Chen, D.-y. (2020). Design and topology optimization of air conditioning suspension bracket for metro. *Science Progress*, 103(4):0036850420980617.
- [13] Zhang, Z., Zhao, Y., Du, B., Chen, X., and Yao, W. (2020). Topology optimization of hyperelastic structures using a modified evolutionary topology optimization method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62:3071–3088.
- [14] Zhu, B., Zhang, X., Zhang, H., Liang, J., Zang, H., Li, H., and Wang, R. (2020). Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review. *Mechanism and Machine Theory*, 143:103622.
- [15] Zhu, J.-H., Zhang, W.-H., and Xia, L. (2016). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of computational methods in engineering*, 23:595–622.

感谢聆听