

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.05.005

考虑材料非线性的结构拓扑优化研究综述

尹益辉, 刘远东, 豆麟龙

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 结构拓扑优化作为结构设计的重要组成部分, 正变得越来越重要。目前国内外学者对结构拓扑优化的研究仍主要局限于材料的线性变形范围, 但实际许多工程结构都会产生材料非线性响应, 如设计在一定地震载荷下坏而不倒的房屋结构, 此时要得到更加符合实际的拓扑构型, 就需要考虑材料非线性进行结构拓扑优化设计。笔者对材料非纯属结构拓扑优化研究进行了综述, 并提出了展望。

关键词: 结构设计; 拓扑优化; 材料非线性; 综述

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)05-034-05

Review of researches on structure topology optimization with material nonlinearity

YIN Yihui, LIU Yuandong, DOU Linlong

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, P.R.China)

Abstract: Structure topology optimization, which is an important part of structure design, is becoming more and more important in recent years. At present, the research on structure topology optimization is mainly based on the theory of material linearity, in which the deformation of material is assumed linear. However, the nonlinear behavior of material occurs inevitably in practical engineering structures, such as house structure in earthquake area. It is demanded that the house can not be destroyed within a certain range of earthquake load. Therefore, the material nonlinearity must be taken into account in the research of structure topology optimization, so that the more practical topology structure can be obtained. In this paper, a review of researches on structure topology optimization with material nonlinearity was stated, and a brief expectation was presented.

Keywords: structure design; topology optimization; material nonlinearity; review

随着科技的发展, 社会各行业各领域对结构性能都提出了更高要求, 但提高结构性能通常会增加设计和生产代价。如何以最少的材料、最低的造价和最简单的工序实现结构的最佳性能, 是结构优化的目标所在。近 20 年来, 结构优化正日益成为材料和结构设计的重要组成部分, 并已被广泛应用于汽车和航空等领域。

结构优化分为尺寸、形状和拓扑优化 3 个层次, 各层次分别处理结构设计问题的不同方面。拓扑优化是

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(11432011); 中国工程物理研究院重点学科项目“计算固体力学”资助。

Supported by National Natural Science Foundation of China(11432011) and Key Subject Program of China Academy of Engineering Physics.

作者简介: 尹益辉(1965-), 男, 中国工程物理研究院总体工程研究所研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事工程力学研究和工程结构分析工作, (E-mail)yinyh@caep.ac.cn。

刘远东(联系人), 男, 副研究员, 博士, 主要从事结构化研究, (E-mail)liuyd@caep.ac.cn。

在结构的初始拓扑关系未知的情况下,寻求材料在设计空间中具有最佳传力路径或最佳刚度分布的拓扑形式,它先于尺寸和形状优化,对于所设计产品的有效性往往具有决定性意义^[1-2]。

根据结构类型的不同,拓扑优化又分为离散结构拓扑优化和连续体结构拓扑优化。文中仅讨论连续体结构的拓扑优化。连续体结构的拓扑优化的基本思想是:在给定的设计域内找出满足既定约束条件和规定性能的材料的最优分布。基本方法是:将设计区域离散成有限单元,将0、1整数变量问题变为0~1的连续变量优化模型,根据一定的算法删除部分低密度或低应力单元,从而使结构成为由带孔洞材料构成的连续体,实现连续结构的拓扑优化设计。这样设计的结构在微观尺度上有孔洞,而在宏观尺度上连续。目前,比较成熟的拓扑优化方法有均匀化方法^[3]、渐进结构优化法(evolutionary structural optimization, ESO)^[4]和变密度法(artificial density method)^[5]等,常见的数值算法有优化准则法(optimality criteria, OC法)^[6]和移动渐近线法(method of moving asymptotes, MMA法)^[7]。

目前,关于线弹性范围内的结构拓扑优化研究已经比较深入,如Bendsøe^[8], Eschenauer^[9-10], Sigmund^[11]等分别给出了比较详尽的评述。但是考虑材料非线性变形的拓扑优化研究还很少,且已有研究主要是在忽略惯性力作用和材料损伤效应情况下的单载荷、单目标(比如最小柔度)拓扑优化。笔者对这些研究进行了综述,以便为相关人员开展该方面的研究工作提供总体认识^[12-14]。

1 单相材料结构的静力学拓扑优化

Ryu等^[15]首先研究了材料非线性和几何非线性的结构优化设计问题,开辟了人们研究非线性结构优化的先例。之后, Tsay等^[16]建立了考虑几何非线性和材料非线性结构响应的连续体的一般优化理论,发展了连续体结构拓扑优化的理论基础。

引入材料非线性行为的连续体结构的拓扑优化研究是从对框架结构的拓扑优化研究开始的,此后, Pedersen^[17]又以最大化结构刚度为目标,对2D框架结构进行了考虑材料非线性行为的拓扑优化研究。但这几篇文献均是进行的单目标的最大结构刚度设计(即最小柔度设计),不适用于更一般的连续结构拓扑优化设计。

Schwarz等^[18]基于线性各向同性硬化的弹塑性材料模型,对平面应力条件下的结构进行了拓扑和形状优化,先通过拓扑优化获得结构的初始构型,再通过形状优化得到结构边界的详细形状。Cho等^[19]首次把位移加载引入了材料非线性结构的拓扑优化。之后, Jung等^[20]进行了同时考虑几何非线性和材料非线性的结构拓扑优化,并进行了数值验证。Boroomand等^[21]将材料非线性的拓扑优化应用到平板弯曲问题,采用指数形式的连续密度场,以连续方式把密度网格从粗糙改变到精细的同时,采用独立的精细网格进行有限元分析,有效地解决了网格依赖性和棋盘格等数值不稳定现象。这几篇文献逐渐拓宽了材料非线性的连续体结构的拓扑优化的应用范围,但也都局限于单目标的拓扑优化。

随着对材料非线性结构拓扑优化研究的深入,研究者也不断进行优化方法的探索工作。Yuge等^[22]将材料非线性引入到结构的拓扑优化,并对Terada等^[23]提出的弹塑性均匀化方法进行改进,增加了计算效率。Bruns等^[24]将拓扑优化拓展到非线性弹性范围,提出一个良态的拓扑优化方法,解决了收敛方面的网格依赖问题。Jog^[25]把对偶算法引入到非线性结构的拓扑优化,采用周长约束来保证拓扑问题的适定性,基于应力的混合单元的形式推导了约束和目标函数的解析表达,减少了更新设计变量所需的时间,能够有效处理局部应力约束的优化问题。Chang等^[26]将非线性问题引入到结构的拓扑优化,提出了改进的ACO(ant colony optimization)方法,减少了非线性有限元分析的计算时间,克服了低密度单元所引起的数值奇异现象,改善了优化算法的性能以及收敛性。Maute等^[27]将材料的拓扑优化问题拓展到了弹塑性范围,提出了几何自适应优化算法,避免了优化过程中的人工应力奇异,增加了优化过程的数值计算效率,并且考虑了屈服应力的变化对于目标函数敏感度所产生的影响,增加了数值求解的精确性和有效性。ECP(element connectivity parameterization)法首先被应用于材料线性的结构拓扑优化设计,也可以解决牵涉到传热和动力响应的结构优化问题,该方法逐渐被拓展到材料非线性的连续结构的拓扑优化:克服了单元密度法的不足,解决了低

密度单元导致的数值不稳定现象,并且可以通过使用商业软件就能获得相当简单的解析敏度计算,提高了程序的通用性。Huang 等^[28]采用改进的渐近结构优化法(bi-directional evolutionary structural optimization, BESO)对位移加载下的几何和材料非线性结构进行了拓扑优化,利用网格独立的 Gaussian 权因子过滤法来计算所需增添单元的敏度数,能有效抑制棋盘格式和网格依赖,增加数值计算的稳定性,把连续体的 2D 拓扑优化拓展到了 3D 情形,并且在中间设计过程中不存在低密度单元,改善了非线性有限元分析的稳定性,所得非线性拓扑设计的结果优于线性的拓扑设计。Lee 等^[29]对原先的 ESLs(equivalent static loads)法进行改进,把改进后的 ESLs 法用于非线性结构响应的拓扑优化,通过综合使用已有的非线性静态分析和线性静态响应拓扑优化方法来产生非线性静态响应拓扑优化的结果,克服了非线性静态行为的拓扑优化所面临的困难。豆麟龙等^[30]将渐近结构优化法(ESO 法)从弹性材料拓展到弹塑性材料的结构拓扑优化,建立了考虑应力约束和材料弹塑性变形的结构拓扑优化模型,给出了弹性优化和弹塑性优化的对比算例,表明:在相同设计域和载荷条件下,弹塑性材料的结构拓扑优化构型与线弹性材料的明显不同;无论是弹性还是弹塑性结构拓扑优化,材料用量都随优化结构的应力约束系数增大而减少,且在材料用量—应力约束系数曲线上存在一个对应于结构弹性极限状态的转折点,在该点临近右侧曲线变化率(取绝对值)比左侧的大很多,充分表明了进行考虑材料弹塑性的结构拓扑优化对于节约材料非常有意义。这些文献所提出的方法很好地解决了材料非线性的引入所产生的计算效率降低的问题以及低密度单元所产生的数值不稳定现象,但所研究的范围也均是进行的单载荷单目标的拓扑优化,并未考虑多载荷多目标的情形。

2 防撞结构的动力学拓扑优化

结构撞击会产生很大的冲击载荷,引起结构的动力响应,并产生大的塑性变形,为了精确模拟结构的撞击过程,必须考虑材料和几何非线性以及应变率效应等。Mayer 等^[31]考虑了材料的弹塑性模型,以最大化撞击能量吸收为目标函数,对动载情形下壳结构进行拓扑优化。采用准静态条件的近似值进行敏度分析,首次将材料非线性、动载荷引入到壳结构的拓扑优化,进行结构的防撞性设计。之后,Patel 等^[32]采用能产生快速收敛的 HCA(hybrid cellular automaton)法处理复杂的汽车结构的防撞性设计问题,很大程度上缩减了计算时间,并考虑了更加符合实际撞击过程的材料和几何非线性行为以及应变率效应等,把这些复杂行为引入到汽车结构的拓扑优化,得到了更符合实际的拓扑设计。这两篇文献处理了动载情形下的结构防撞性设计的拓扑优化问题,考虑了材料非线性行为,能够得到更加符合实际的拓扑构型,但所进行的也都是单目标的拓扑设计,而汽车结构的防撞性设计应该考虑吸能效果和结构刚度的综合效应。

3 多相材料结构的拓扑优化

上述文献进行的都是单相材料的拓扑优化设计,最终实现的拓扑构型是实体与空穴的 0、1 设计,但实际结构中往往包含多种材料,比如钢筋混凝土结构,这时就要考虑多相材料的拓扑设计。Swan 等^[33]以结构的极限强度最大化为目标,将材料的拓扑优化问题拓展到了两相材料,并考虑了材料的弹塑性和粘弹性行为。Kato 等^[34]主要针对 FRC(fiber reinforced concrete)结构,进行了多相材料的拓扑优化,并考虑了材料非线性行为和更加符合实际材料微观构型的损伤效应。Michael 等^[35]对 RC(reinforced concrete)结构进行拓扑优化,采用 Drucker-Prager 屈服准则来模拟抗压强度大于抗拉强度的混凝土的材料行为,将非线性材料模型引入到 RC 结构的优化设计过程,所提出的拓扑优化过程涉及到两种材料的分布,并对两种材料采用不同的破坏准则,所提出的方法也允许拓扑构型中存在孔洞。这几篇文献进行了考虑多相材料非线性行为的拓扑设计,拓宽了拓扑优化的应用领域,但也仅仅是考虑了单目标单载荷的情形,并未考虑多目标多载荷以及惯性力效应的情形,然而这些情形在实际的工程结构中经常出现。

4 结束语

简要介绍了考虑材料非线性因素的材料/结构拓扑优化的研究情况,指出目前国内还没有针对材料非线性问题的拓扑优化研究,国外对此的研究也还不多,并且目前已有研究大多采用了各向同性线性硬化的双线性弹塑性模型,主要进行的是忽略惯性力作用和材料损伤效应的单目标、单载荷拓扑优化设计。针对实际工程需求,在除此之外的很多方面都还有待于深入的理论和应用研究。

由于大多数结构都存在微裂纹等损伤,因此有必要把损伤模型引入到材料的本构模型中,进行考虑损伤效应的结构拓扑优化研究。

针对结构所需优化的目标不仅是结构柔度/刚度,而需要同时优化多个目标的问题,有必要开展非线性材料模型下的多目标拓扑优化设计研究。

针对实际结构通常承受多类型载荷的情形,有必要进行多类载荷情况下的拓扑优化研究,如土木工程结构的自重、旋转机械的离心加速度等,都需要考虑体力载荷。

压力载荷的位置和方向会随着结构设计的改变而变化,又称为设计依赖载荷。针对承受压力载荷的实际结构,如承受风载和雪载的土木工程结构、压力容器等,有必要开展考虑设计依赖载荷的材料非线性问题的拓扑优化研究。

另外,在动载荷下结构的非线性拓扑优化和多相材料的结构非线性拓扑优化方面研究都还不深入,还需要从方法到应用的更多研究。

参考文献:

- [1] 谢亿民, 杨晓英, Steven G P, 等. 渐进结构优化法的基本理论及应用[J]. 工程力学, 1999, 16(16): 70-81.
XIE Yiming, YANG Xiaoying, Steven G P, et al. The theory and application of evolutionary structural optimization method[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(16): 70-81. (in Chinese)
- [2] 周克民, 李俊峰, 李霞. 结构拓扑优化方法研究综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 69-76.
ZHOU Keming, LI Junfeng, LI Xia. A review on topology optimization of structures[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 69-76. (in Chinese)
- [3] Hassani B, Hinton E. Homogenization and structural topology optimization theory[M]. Practice and Software, London: Springer, 1999.
- [4] Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization[M]. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [5] Sigmund O. Design of material structures using topology optimization [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1994.
- [6] Zhou M, Rozvany G I N. The COC algorithm, part II: topological, geometry and generalized shape optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1991, 89(1-3): 309-336.
- [7] Svanberg K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987, 24(2): 359-373.
- [8] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology optimization: theory, methods and applications [J]. Handbook of Global optimization, 2003, 34(88): 179-203.
- [9] Eschenauer H A, Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: a review[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(4): 331-390.
- [10] Eschenauer H A, Kobelev V V, Schumacher A. Bubble method for topology and shape optimization of structures[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 1994, 8(1): 42-51.
- [11] Sigmund O, Petersson J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima[J]. Structural Optimization, 1998, 16(1): 68-75.
- [12] Yoon G H, Kim Y Y. Topology optimization of material-nonlinear continuum structures by the element connectivity parameterization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(10): 2196-2218.
- [13] Shin M K, Park K J, Park G J. Optimization of structures with nonlinear behavior using equivalent loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2007, 196(4-6): 1154-1167.
- [14] Kim Y I, Park G J. Nonlinear dynamic response structural optimization using equivalent static loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2010, 199(9-12): 660-676.

- [15] Ryu Y S, Haririan M, Wu C C, et al. Structural design sensitivity analysis of nonlinear response[J]. *Computers & Structures*, 1985, 21(1-2): 245-255.
- [16] Tsay J J, Arora J S. Nonlinear structural design sensitivity analysis for path-dependent problems, Part 1: general theory [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1990, 81(2): 183-208.
- [17] Pedersen C B W. Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2004, 193(6-8): 653-678.
- [18] Schwarz S, Maute K, Ramm E. Topology and shape optimization for elastoplastic structural response[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2001, 190(15-17): 2135-2155.
- [19] Cho S, Jung H S. Design sensitivity analysis and topology optimization of displacement-loaded non-linear structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2003, 192(22-24): 2539-2553.
- [20] Jung D, Gea H C. Topology optimization of nonlinear structures[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2004, 40(11): 1417-1427.
- [21] Boroomand B, Barekatein A R. On topology optimization of linear and nonlinear plate problems[J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 2009, 39(1): 17-27.
- [22] Yuge K, Iwai N, Kikuchi N. Optimization of 2-D structures subjected to nonlinear deformations using the homogenization method[J]. *Structural Optimization*, 1999, 17(4): 286-299.
- [23] Terada K, Yuge K, Kikuchi N. Elasto-plastic analysis of composite materials using the homogenization method: 1st report, formulation[J]. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu A Hen/transaction of The Japan Society of Mechanical Engineers Part A*, 1995, 61(590): 2199-2205. (in Japanese)
- [24] Bruns T E, Tortorelli D A. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2010, 190(26-27): 3443-3459.
- [25] Jog C S. A dual algorithm for the topology optimization of non-linear elastic structures[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, 77(4): 502-517.
- [26] Chang D H, Yoo K S, Park J Y, et al. Optimum design for nonlinear problems using modified ant colony optimization[J]. *International Proceedings of Computer Science Information Tech*, 2012, 41: 45.
- [27] Maute K, Schwarz S, Ramm E. Adaptive topology optimization of elastoplastic structures[J]. *Structural Optimization*, 1998, 15(2): 81-91.
- [28] Huang X, Xie Y M. Topology optimization of nonlinear structures under displacement loading[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(7): 2057-2068.
- [29] Lee H A, Park G J. Topology optimization for structures with nonlinear behavior using the equivalent static loads method[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 134(3): 310-311.
- [30] 豆麟龙, 尹益辉, 张元章, 等. 弹塑性材料的结构拓扑优化[J]. *机械强度*, 2014, 36(6): 966-970.
DOU Linlong, YIN Yihui, ZHANG Yuanzhang, et al. Structural topology optimization of elasto-plastic material[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2014, 36(6): 966-970. (in Chinese)
- [31] Mayer R R, Kikuchi N, Scott R A. Application of topological optimization techniques to structural crashworthiness[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39(8): 1383-1403.
- [32] Patel N M, Kang B S, Renaud J E, et al. Crashworthiness design using topology optimization[J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2007, 131(6): 1-12.
- [33] Swan C C, Kosaka I. Voigt-Reuss topology optimization for structures with nonlinear material behavior[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1997, 40(20): 3785-3814.
- [34] Kato J, Lipka A, Ramm E. Multiphase material optimization for fiber reinforced composites with strain softening[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, 39(1): 63-81.
- [35] Bogomolny M, Amir O. Conceptual design of reinforced concrete structures using topology optimization with elastoplastic material modeling[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2012, 90(13): 1578-1597.