

功能梯度材料拓扑优化研究

陆丹, 刘毅

南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016

[摘要] 改进了传统的双向渐进拓扑优化(BESO)方法, 引入了新的增删单元准则, 结合梯度单元法成功地对功能梯度材料进行了拓扑优化, 对今后进一步的发展作了展望。

[关键词] 双向渐进优化; 拓扑优化; 梯度单元法; 功能梯度材料

[中图分类号] V221, TU318

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)07-0038-03

Topology Optimization for Functionally Graded Materials

LU Dan, LIU Yi

College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: By using a new criteria of evolution, the traditional Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) method is successfully applied to the topology optimization for FGM. Graded finite elements method are used in FEA in the process of optimization.

Key Words: BESO; topology optimization; graded finite elements; FGM

CLC Numbers: V221, TU318

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)07-0038-03

0 引言

功能梯度材料(Functionally Graded Materials, FGM)是以计算机辅助材料设计为基础, 采用先进的材料复合技术, 使材料的组成和结构在指定的方向上呈梯度变化, 从而使材料的性能也呈梯度变化的一种新型材

料^[1]。目前, 商用有限元软件的一个缺陷是不能够适当处理对单元内材料属性的剧烈变化。梯度有限单元法在单元内对材料的弹性模量等进行插值表示, 能够适应这种单元内属性的剧烈变化, 获得很好的计算结果^[2]。

收稿日期: 2007-01-08

作者简介: 陆丹, 男, 南京航空航天大学航空宇航学院, 硕士研究生, 研究方向为飞机结构设计; Email: danny_loo@163.com

刘毅(通讯作者), 男, 南京航空航天大学航空宇航学院, 副教授, 研究方向为计算机辅助飞机设计及复合材料;

E-mail: liuyi.chine@126.com

构开裂出现非贯穿性裂缝, 一般可采取如下措施: ① 分层浇筑混凝土, 其后保温保湿, 延长养护时间; ② 缓慢均匀降温; ③ 加强水平构造配筋; ④ 合理选定材料及配比, 提高其极限拉伸能力等。

4 结论

从上面的分析可以看出, 在已知内外最大温差及收缩差的条件下, 可以假定厚壁梁的降温分布曲线为指数函数, 推导其自约束应力的表达式, 并进行实际工程分析计算。其计算结果与参考文献[1]中降温曲线为抛物线情况的结论一致。

参考文献(References)

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
WANG Tiemeng. Control of cracking in engineering structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 袁勇. 混凝土结构早期裂缝控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
YUAN Yong. Control of early crack in concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2004.

(责任编辑 齐志红)

双向渐进结构拓扑优化(Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, BESO)方法是对渐进结构拓扑优化(Evolutionary Structural Optimization, ESO)方法的重要改进。BESO方法克服了ESO方法在优化中存在的单元删除后不能恢复的缺陷,可以在材料“高效能”(如材料应力较高)区域添加单元,这种可以添加单元的能力使进化优化方法的形状优化能力变得更强,更容易降低最大应力和应力集中,使结构应力分布均匀,可以找到更好的传力路径,获得更优的拓扑结构^[3]。

Paulino^[4]使用SIMP方法对FGM进行了拓扑优化的初步探索,而本文改进了BESO方法,并利用其进行了FGM的拓扑优化研究,在有限元分析时使用的是梯度单元法。

1 基于梯度单元法的BESO方法

ESO方法和BESO方法在很多算例中均被证明是有效的。为了更好地进行FGM的拓扑优化,本文对荣见华^[5-6]的BESO方法一般流程做了一些改进,主要在以下两个方面。

1) 采用大量添加单元的方式而未采用人工单元,并且使用下式对删除率(RR)和添加率(IR)的计算进行分离

$$RR = r_1 + r_2 \cdot SS + r_{ON} \cdot ON$$

$$IR = a_1 + a_2 \cdot SS + a_{ON} \cdot ON$$

式中, $r_1, r_2, r_{ON}, a_1, a_2, a_{ON}$ 是BESO方法的常量参数,由经验确定; SS 和 ON 分别是优化过程中已经达到的稳态和震荡的次数。

如果仅需要增加删除率就能使优化继续进行,只按照上式改变删除率而添加率保持不变;如果仅需要减小添加率,则只改变添加率,避免这两个参数相关时可能产生的在需要增加单元时却无法增加单元的情况。由于添加率是独立计算的,所以会很快减小,并且常常会出现由当前添加率值计算得到大量添加单元的情况。考虑到大量添加单元有利于在结构中形成更有效的传力路径,有利于修改结构的形状使结构光滑,在优化过程中对添加单元的数量不进行限制,而只对删除单元进行限制。

2) 在删除单元数量超过限制时,仍然计算各个单元的应力灵敏度,以此为标准进行需要删除的单元的筛选。同时,不对灵敏度进行绝对值计算,因为在功能梯度材料中,一些单元的删除反而能够使最大应力单元的应力减小,保留应力灵敏度的符号可以避免删除这样的单元。而在添加单元时,因为使用大量添加单元的方法,不需要使用应力灵敏度。

下面以一个算例说明。算例的几何模型如图1所示,尺寸为 90×45 ,分为 90×45 个有限元单元。假设在此设计域内的弹性模量分布为

$$E(x) = E_0 e^{\alpha x + \beta y}$$

在本例中, $E_0=10$,并且选择不同的 α, β 值进行优化分析。当 $\alpha=\beta=0$ 时,设计域即为一般的均匀材料。此时,两种方法的拓扑优化结果分别如图2(a)、图2(b)所示,两种方法的结果很一致,说明对于均匀材料,SIMP和BESO方法的优化结果都比较可行。

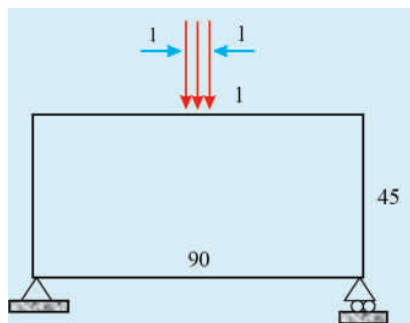


图1 算例几何模型

Fig. 1 Geometry model

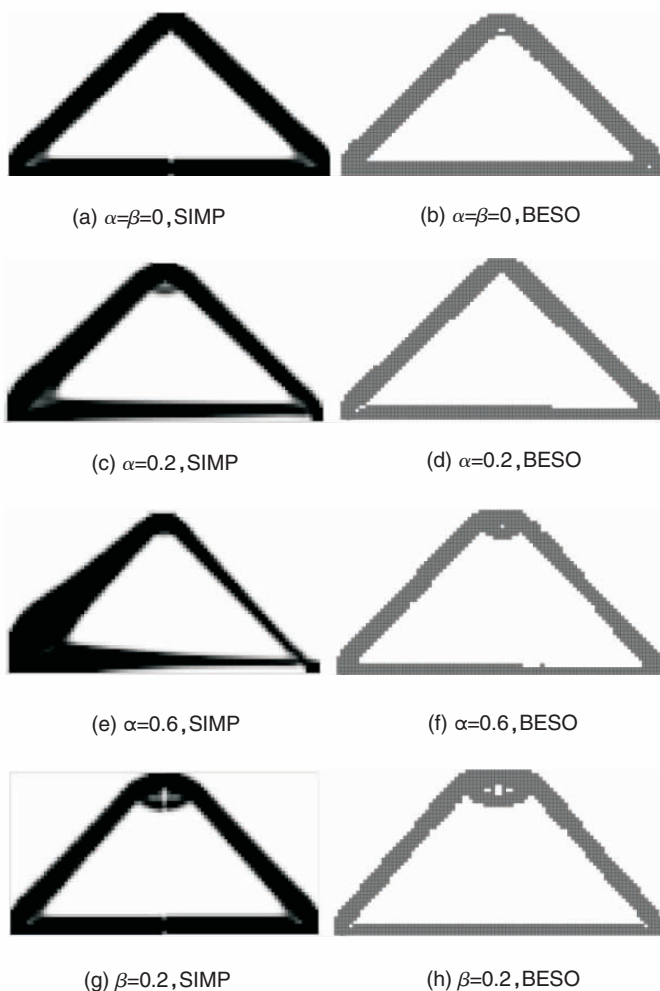


图2 SIMP方法和BESO方法拓扑优化结果比较

Fig. 2 Topology optimization results by using SIMP and BESO methods

通过对比 SIMP 和 BESO 方法的拓扑优化结果可以发现,在结构不对称时,BESO 方法的结果与 SIMP 方法的结果相差很大。BESO 方法对于各个不同材料变化系数的结构优化结果基本上相差不大。这是因为弹性模量大的区域(即模型右侧)应变较小,但因弹性模量较大,其应力水平与模型左侧弹性模量较小区域的应力水平应该在一个数量级上。因为 BESO 是根据应力准则进行优化的,所以得到这样的结果也是合理的。

当材料变化方向为 y 方向时,此时模型为对称结构。从图 2(g)和图 2(h)中可以看出,两种优化方法的拓扑优化结果比较一致。

2 改进的 BESO 方法

对于一般的均匀材料,在设计域内材料的各项属性都相同,可以简单地使用应力准则来判断单元的“效能”,以此作为增删单元的标准。而对于功能梯度材料来说,材料的各项属性都不相同,但是一般只考虑其弹性模量的变化,而将泊松比假设为常数,也未将其他属性可能的变化考虑在内,如许用应力。

考虑材料许用应力的影响,将实际应力与许用应力之比作为单元增删的标准,以便更好地衡量材料的“效能”。实际应力与许用应力之比越大,材料被利用得越充分,其“效能”也就越高。在此,假设材料的许用应力在设计域上也按指数变化,即

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{\lambda x + \mu y}$$

其中, σ_0 是弹性模量为 E_0 的材料的许用应力。 λ, μ 与 α, β 呈正比关系。即

$$\lambda x + \mu y = k(\alpha x + \beta y)$$

在实际计算中,可以假设 $\sigma_0 = 1$,这样相当于计算出的节点应力除以修正系数 $e^{\lambda x + \mu y}$ 后,再以经过修正的应力来进行拓扑优化运算。

图 3 是使用此方法对图 1 的模型所做的拓扑优化结果。取材料变化系数 $\alpha = 0.6, k = 0.2$, 即 $\lambda = 0.12$ 。结果表明,这个拓扑与 SIMP 方法的结果具有相同的分布趋势。模型右侧的单元效能相对于左侧比较高,只需要较少的单元即可以达到与左侧相同的“效能”。

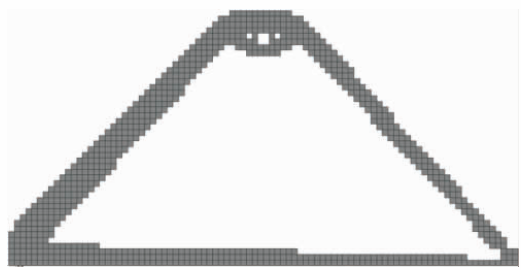


图 3 修正应力的拓扑优化结果

Fig. 3 Topology optimization result by using proved stresses

3 结论

使用 BESO 方法,成功地对 FGM 进行了拓扑优化,改进了原有的 BESO 算法,并且引入了许用应力,以实际应力与许用应力之比作为单元增删的标准,能够得到合理的拓扑优化结果。

今后的研究方向是:首先,在单元增删准则方面,从最简单的应力准则,到现在加入了应力灵敏度以及在 FGM 拓扑优化中使用的许用应力修正的应力准则,其计算中的结构应力都是 von Mises 应力。今后可以使用以主应力为应力的计算准则,并且引入材料拉、压状态下的许用应力,综合评估单元的拉、压应力状态,作为优化中单元增删的标准之一;其次,对于 ESO 和 BESO 方法的研究,目前仅限于静力学、动力学单个性能要求的优化问题,今后可以尝试多个性能要求综合考虑的拓扑优化问题,并进一步研究其在实际工程结构中的应用。

参考文献 (References)

- [1] MIYAMOTO Y, KAYSSER W A, RABIN B H, *et al.* Functionally graded materials: Design, processing and applications [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] KIM J H, PAULINO G H. Isoparametric graded finite elements for nonhomogeneous isotropic and orthotropic materials [J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69: 502–514.
- [3] 荣见华, 谢忆民, 姜节胜, 等. 渐进结构优化设计的现状与进展[J]. 长沙交通学院学报, 2001, 17(3): 16–23.
RONG Jianhua, XIE Yimin, JIANG Jiesheng, *et al.* Present situation and development of evolutionary structural optimization method [J]. Journal of Changsha Communications University, 2001, 17(3): 16–23.
- [4] EMILIO C N S, PAULINO G H. Topology optimization design of functionally graded structures[C]. The 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization. Brazil, 2005.
- [5] 荣见华, 姜节胜, 胡德文, 等. 基于应力及其灵敏度的结构拓扑渐进优化方法[J]. 力学学报, 2003, 35(5): 584–591.
RONG Jianhua, JIANG Jiesheng, HU Dewen, *et al.* A structural topology evolutionary optimization method based on stresses and their sensitivity[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5): 584–591.
- [6] 罗志凡, 卢耀祖, 荣见华, 等. 基于一种新的应力准则的渐进结构优化方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 372–375.
LUO Zhifan, LU Yaozu, RONG Jianhua, *et al.* New stress criteria based on algorithm for evolutionary structural optimization[J]. Journal of Tongji University (Natural Science edition), 2005, 33(3): 372–375.

(责任编辑 岳臣)