

基于ANSYS的结构拓扑优化

林丹益, 李 芳

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对拓扑优化技术在现实中的应用问题,将拓扑优化技术应用到自行车车架和多拱拱桥的最优化设计中。开展了各种拓扑优化方法的分析研究,建立了“以单元材料密度为设计变量,以结构的柔顺度最小化为目标函数,体积减少百分比为约束函数”的数学模型;通过采用商用有限元软件 ANSYS 中的拓扑优化设计模块对自行车车架和多拱拱桥进行了拓扑优化设计,优化结果表明所得拓扑结构清晰,并与实际的自行车车架和多拱拱桥非常相似。研究结果表明,该结构拓扑优化方法正确而有效,具有一定的工程应用前景。

关键词: 拓扑优化; ANSYS; 自行车车架; 多拱拱桥

中图分类号: TH112; U484 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)08-0898-04

Topological optimization of continuum structure based on ANSYS

LIN Dan-yi, LI Fang

(Machinery Engineering Studio, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the application problems of topological optimization technology in reality, the bicycle frames and multiple arch bridge was investigated. After the analysis of all kinds of methods of topological optimization, the mathematical model that unit material density as design variables, the minimum of structural compliance as the objective function, the volume reduction percentage as the constraint function was established. The topology optimization design module of the commercial finite element software ANSYS was used to the bicycle frame and multiple arch bridge for the topology optimization design. The topological structure is clear and they are very likely to the bicycle frame and multiple arch bridge in reality. The results indicate that the method is correct and effective, it has a certain engineering application prospect.

Key words: topological optimization; ANSYS; bicycle frame; multiple arch bridge

0 引言

连续体结构优化按照设计变量的类型和求解问题的难易程度可分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化3个层次,分别对应于3个不同的产品设计阶段,即详细设计、基本设计和概念设计3个阶段。相对于前两种优化,拓扑优化能从根本上改变物体的结构,更能体现真正意义上的最优设计^[1]。虽然拓扑优化有很好的应用前景,但拓扑优化设计被公认是结构优化设计领域中比较困难的课题。随着拓扑优化技术的发展,近年来,拓扑优化设计已经应用于汽车设计中^[2-5]。

本研究将利用 ANSYS 的拓扑优化模块,对自行车车架和多拱拱桥进行拓扑优化,并通过与实物作对

比,验证拓扑优化的正确性和有效性。

1 连续体结构拓扑优化基本理论

1.1 均匀化法

1988年, Bendsøe 和 Kikuchi^[6]提出的均匀化方法是连续体结构拓扑优化中较早且目前研究、使用较多的算法之一。该方法在组成结构的材料中引入微结构(单胞),如图1、图2所示,实体和开孔的微结构分布可以显示出连续体结构的形状和拓扑形态。研究者通过计算确定材料密度分布,得出最优的拓扑结构。

变密度法是在均匀化法的基础上提出来的,该方法的思想是引入一种假想密度可以改变的材料,同时直接人为假定所设计材料的宏观属性(如许用应力、

弹性模量)与材料密度之间的关系。本研究以密度为拓扑设计变量,把优化时结构的拓扑优化问题转化为材料的最优分布问题。

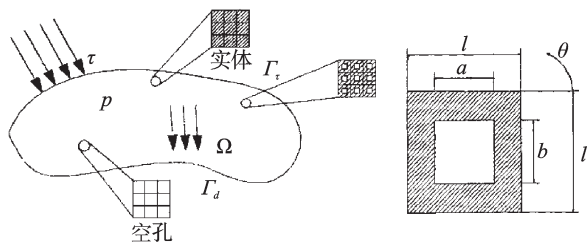


图1 拓扑优化设计区域及其材料微结构 图2 微结构单元

近期基于该方法的拓扑优化有了新发展,如:J. Paris 等^[7]研究了在局部应力和整体应力约束下的连续体结构的拓扑优化。隋永康等^[8]研究了基于ICM法的全局应力约束下的拓扑优化,使约束的数量大大减少,避免了局部优化问题。悉尼大学的J.Lin 等^[9]结合SIMP和PP的优点,对柔性机构进行了多目标的拓扑优化。

1.2 渐进结构优化法

1993年,澳大利亚维多利亚大学的XIE Y M和悉尼大学的Steven G P^[10]提出了渐进结构优化法(ESO),该方法把适者生存的生物进化思想引入结构拓扑优化,在优化过程中逐步移去对结构的刚度贡献较小的材料单元。渐进结构优化方法的基本原理就是根据这个概念得出:首先预先选取结构设计域和初始域,给定结构所需满足的目标函数和约束条件,进行受力分析,计算各部分材料对目标函数和约束条件的贡献度,根据其贡献度大小删除材料,循环该过程,达到终止条件,最终得到最佳拓扑结构。

近几年,渐进结构优化ESO和双向渐进结构优化法(BESO)有了很大的发展,主要有:Huang和Xie^[11]提出了基于SIMP材料模型的软删单元的BESO算法,并从理论上证明了BESO方法的合理性;Huang等^[12]提出了修正的SIMP材料模型,并结合软删单元的BESO法应用于频率优化问题中;X.F.SUN等^[13]扩大了BESO的适用范围,从原来的只是用于各向同性材料到现在能用于各向异性的复合材料上,减少了应力集中现象,而且其拓扑形状易于用现在所有的制造技术进行制造。

2 算例分析

基于ANSYS的结构拓扑优化目标函数是在满足结构约束的条件下使整体的变形能最小,等效于整体的刚度最大。约束函数是在给定载荷和最小柔度情况下缩减结构体积的百分比。所以其拓扑优化的数学模型是:

$$\begin{cases} \min & F(\eta_i) \\ \text{s.t.} & \int_{\Omega} \eta_i d\Omega \leq \alpha V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F —结构的变形能, η_i —第 i 单元的伪密度, α —缩减体积的百分比, V_0 —结构的原体积。

2.1 自行车车架的拓扑优化设计

车架是自行车的骨架和主体,它的强度、刚度和重量直接影响着整辆自行车的承载能力和轻便程度。随着自行车行业的发展,先后出现了各种形状的车架,主要有以下3种结构^[14](如图3所示):第1种为2个三角形的车架,第2种为1个四边形和1个三角形的车架,第3种为1根弯杠和1个三角形的车架。为了获得车架在较轻重量下的最大刚度,本研究用ANSYS对结构形状进行了拓扑优化设计。

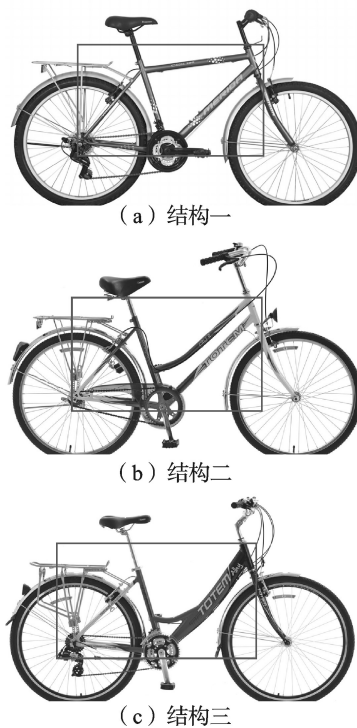


图3 自行车车架

2.1.1 前处理

在本研究中,设计区域为长为1.2 m,宽为0.6 m的矩形区域,单元类选择Plane82,材料的弹性模量为 2×10^{11} Pa,泊松比为0.3,划分为单元大小为0.03 m的网格。

本研究将模型上需要安装车把(前叉)、后轮、鞍座和脚蹬处的单元类型由单元1改为单元2,即改为不进行拓扑优化的区域;在模型的左上角、右下角即安装前叉和后轮的部位施加Y方向的约束;在模型上安装鞍座的部位施加X方向的力(人体对鞍座向后的摩擦力) F_x 为10 N,施加Y负方向的力(人体对鞍座的压力) F_y 为-500 N,在模型上安装脚蹬的部位施加X负方向的力(人体对脚蹬向前的蹬力) F_x 为-10 N,施加Y负方向的力(人体对脚蹬向下的蹬力) F_y 为-50 N。

经过前处理得到的自行车车架拓扑优化的初始

设计区域模型如图4所示。

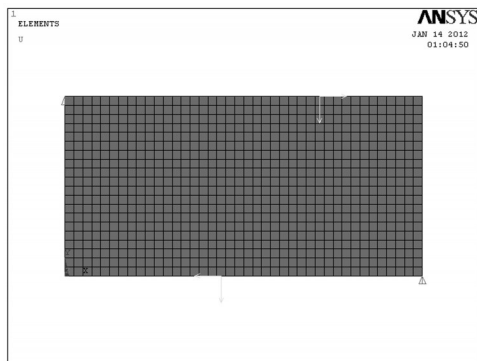


图4 初始设计区域模型

2.1.2 求解过程

求解过程分述如下:

- (1) 将单荷载荷载工况定义为拓扑优化函数,函数名称设为scomp;
- (2) 将拓扑优化函数scomp定义为目标函数;
- (3) 将体积函数VOLUME定义为约束函数,并将体积缩减量设为70%;
- (4) 选用OC准则进行拓扑优化求解,其中收敛精度设为0.000 1,迭代次数为30。

本研究在英特尔酷睿 2T5870, 1 GB 内存的计算机上进行运算,只需几十秒便可完成计算过程。

2.1.3 后处理

后处理过程分述如下:

- (1) 绘制节点和单元伪密度云图,如图5、图6所示。灰色区域为高伪密度区域,表示应该保留材料的区域,黑色区域为应该去除材料的区域。



图5 节点伪密度云图

- (2) 绘制目标函数及约束函数历程曲线。目标函数的历程曲线如图7所示,它反映的是迭代过程中结构变形能的变化情况,在迭代过程中,变形能逐渐减小。约束函数的历程曲线如图8所示,它反映的是迭代过程中体积的变化情况,迭代过程汇总,体积在 0.215 m^3 附近波动,与原来的设计区域体积 0.72 m^3 相

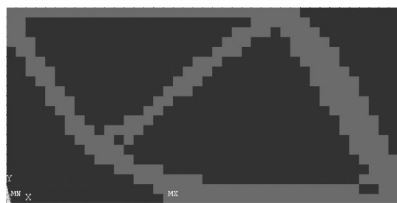


图6 单元伪密度云图

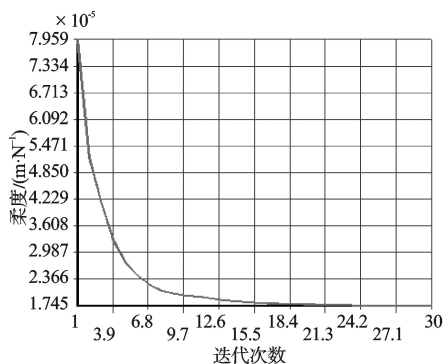


图7 目标函数历程曲线

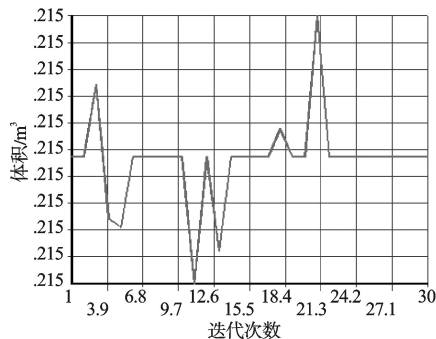


图8 约束函数历程曲线

比,缩减了70%。

- (3) 结论。经过拓扑优化设计,可以看到,其结果跟两个三角形的自行车车架比较类似。因此,在重量相等的条件下,第1款自行车的刚度最大。

从结果中还可以看出,两个三角形车架还不是最优的车架形状,应该适当减小左边的三角形尺寸,增大右边的三角形尺寸,且右边三角形的底边呈弯曲状。

2.2 多拱拱桥的拓扑优化设计

在工程实际应用中,碰到的绝大多数问题都是三维的,所以进行三维结构的拓扑优化设计研究是必不可少的步骤。尽管用于解决三维问题和二维问题的方法理论一样,但程序实现起来也会有很大的区别。同时三维问题和二维问题的求解规模不在一个级别上,量变到一定的程度必然引起质变,所以可能会产生新的问题。

桥梁建设是交通建设中的重要组成部分,随着我国各种跨海大桥、跨江大桥的大型桥梁的修建,如何改进桥梁形状、节约建筑材料是缩短建设周期、减少建设成本的关键问题^[15]。本研究利用ANSYS对多拱拱桥进行了拓扑优化设计,获得了桥梁设计的初始设计方案,为以后的设计者提供概念设计模型,以缩短设计周期。

2.2.1 前处理

本研究的设计空间为一长方体,长方体上表面为路面,路面长20 m,宽3 m,桥高4 m。拱桥5个桥墩的位置均布于长方体底面。路面指定为非设计区域,并

承受 100 Pa 均布载荷。桥梁结构材料属性为:弹性模量 $E=200$ GPa,泊松比为 0.3。要求分别在结构体积减少 70% 和 50% 的条件下寻找具有最大刚度的拱桥桥型。初始设计空间的有限元模型如图 9 所示,图 9 中上表面单元为非设计单元,选择单元编号为 2 的单元。本研究在上表面的所有节点上施加均布载荷,在下底面的 5 个桥墩位置施加约束。

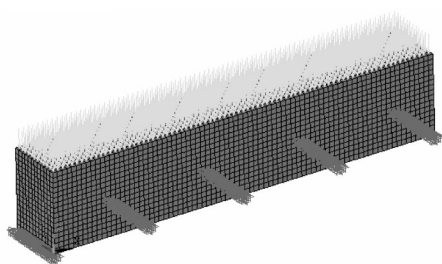


图9 初始设计空间模型

2.2.2 求解过程

具体求解过程如下:

- (1) 将单载荷载荷工况定义为拓扑优化函数,函数名称设为 scomp;
- (2) 将拓扑优化函数 scomp 定义为目标函数;
- (3) 将体积函数 VOLUME 定义为约束函数,并将体积缩减量设为 70% 和 50%;
- (4) 选用 OC 准则进行拓扑优化求解,其中收敛精度设为 0.000 1,迭代次数为 30。

在同台计算机上进行计算,本例花了 8 h 左右的时间。

2.2.3 后处理

后处理过程如下所述:

- (1) 绘制单元伪密度云图,如图 10、图 11 所示;

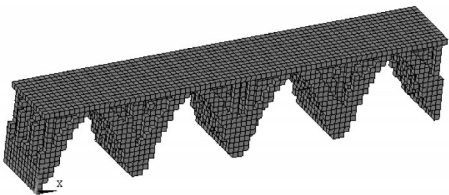


图10 体积缩减70%拓扑结构

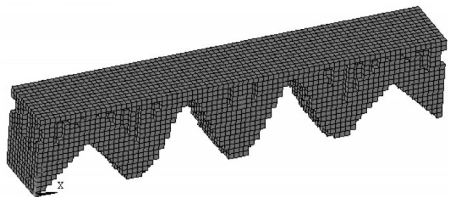


图11 体积缩减50%拓扑结构

- (2) 绘制目标函数历程曲线,如图 12、图 13 所示;
- (3) 结论。从节约材料的角度看,体积缩小 70% 的方案更加诱人,但从目标函数看,体积缩小 70% 的柔度为 0.596 m/N,而体积缩小 50% 的柔度为 0.427 m/N,

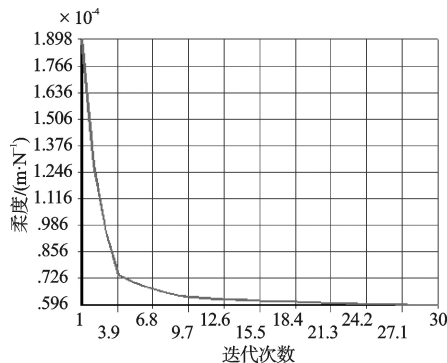


图12 体积缩减70%目标函数历程曲线

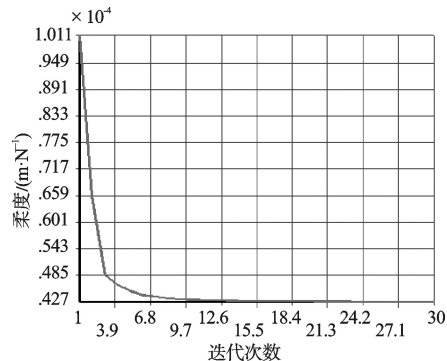


图13 体积缩减50%目标函数历程曲线

可以看出缩小 50% 的拱桥刚度更大,更加安全。在实际的桥梁设计中,具体方案要根据实际情况而定。

3 结束语

本研究介绍了拓扑优化的理论知识及其最近的发展状况,并以单元材料密度为设计变量,以最大静态刚度(最小柔顺度)为目标函数,以体积减少百分比为约束函数,对自行车车架和多拱拱桥作了拓扑优化研究,所得拓扑结构清晰,并与实际的结构非常相似。研究表明,通过结构拓扑优化设计可以获得结构初始设计阶段的轮廓布局,从而为工程设计人员提供可靠的、指导性的结构设计方案,避免了复杂繁琐的初始设计方案的制定过程,缩短了设计周期。

参考文献(References):

- [1] 李 芳,凌道盛. 工程结构优化设计发展综述[J]. 工程设计学报,2002,9(5):229-235.
- [2] MANA D, KUMAR N D, SOMASEKHAR B. Topology-optimized thermoplastic beams for automobile crashworthiness [N]. SAE Technical Paper, 2011-26-0055.
- [3] RIORDAN C, TOVAR A, RENAUD J. Topology optimization of a formula SAE upright using optistruct [N]. SAE Technical Paper, 2010-01-0396.
- [4] HONGWEI Z, XIAOKAI C, YI L. Topology optimization of hybrid electric vehicle frame using multi-loading cases optimization[N]. SAE Technical Paper, 2008-01-1734.

(下转第915页)

表4 平面旋转角

真值/(°)	η /(°)	差值/(°)	真值/(°)	η /(°)	差值/(°)
0	0.13	0.13	180	180.74	0.74
20	19.65	-0.35	200	200.13	0.13
40	40.24	0.24	220	220.65	0.65
60	60.05	-0.05	240	239.35	-0.65
80	80.01	-0.01	260	259.38	-0.62
100	99.63	0.37	280	279.80	-0.20
120	119.73	0.27	300	300.56	0.56
140	140.02	0.02	320	319.66	-0.34
160	160.27	0.27	340	340.14	0.14

5 结束语

本研究从工程应用角度出发,不仅考察了起重机吊钩传感器的精度、带宽、量程等测量指标,同时对磁强计误差补偿、系统功耗以及系统组合进行了研究。从测量数据可以看出,俯仰角和滚转角精度达到 0.3° ,补偿后的平面旋转角精度达到 0.8° ,数据输出速率 80 Hz ,可以满足用户需求。系统功耗实测正常工作电流 50 mA ,待机电流小于 5 mA 。驾驶员在驾驶室即可实时监控吊钩运动状态。

参考文献(References):

- [1] 杨山虎,李彦明,刘成良. 基于吊钩动作智能跟踪的塔机图像监控[J]. 机电一体化,2010,5(4):25-28.

- [2] 喻 言,张春巍,李芦钰,等. 大型铺管船吊钩摆动监测的无线倾角传感器集成与测试[J]. 传感技术学报,2007,20(12):2716-2719.
- [3] YU Yan, OU Jin-ping, ZHANG Jun, et al. Development of wireless MEMS inclination sensor system for swing monitoring of large-scale hook structures[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56(4): 1072-1077.
- [4] OU Jin-ping, ZHANG Chun-wei, LI Lu-yu, et al. Swing Motion Control of Flexible Suspended Hook Structure System[C]//4th World Conference on Structural Control and Monitoring, Portugal:[s.n.], 2006:11-13.
- [5] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧,等. 双轴倾角传感器的设计与实现[J]. 传感器与微系统,2009,28(12):86-88.
- [6] 曾庆化,刘建业,李荣冰. 基于恒定姿态误差的磁罗差偏差补偿算法研究[J]. 传感器与微系统,2006,25(4):31-34.
- [7] 焦 飞,赵 忠,王 璐. 基于RBF神经网络的全姿态磁航向误差建模与补偿[J]. 测控技术,2007,26(10):85-87.
- [8] GEBRE E D. Magnetometer autocalibration leveraging measurement locus constraints[J]. **Journal of Aircraft**, 2007, 44(4):1361-1368.
- [9] 魏 萍,韩 波,李 平. 基于S3C44B0X的航姿测量系统的设计与实现[J]. 机电工程,2006,23(4):17-20.
- [10] 刘业颜,郑 文. 基于WINSOCK的远程信号采集与分析系统[J]. 机电工程技术,2010,39(1):28-29.
- [11] 张 震,王 剑,黄国辉,等. 高性能通用温度采集仪的研制[J]. 机电工程,2010,27(3):80-84.

[编辑:张 翔]

(上接第901页)

- [5] CALVO A P, VELAZQUEZ V F, ZEPEDA S A, et al. Topological design approach for an electrical car chassis [N]. SAE Technical Paper, 2011-01-0069.
- [6] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1988, 71(2):197-224.
- [7] PARIS J, NAVARRINA F, COLOMINAS I, et al. Topology optimization of continuum structures with local and global stress constraints [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2009, 39(4):419-437.
- [8] SUI Y K, YE H L, PENG X R. Topological optimization of continuum structure with global stress constraints based on ICM method[J]. **Computational Methods**, 2006(PTS1-2): 1003-1014.
- [9] LIN Jiang-zi, LUO Zhen, TONG Li-yong. A new multi-objective programming scheme for topology optimization of compliant mechanisms [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2010, 40(1-6):241-255.
- [10] XIE Y M, STEVEN G P. Evolutionary Structural Optimization[M]. Berlin:Springer Verlag, 1997.
- [11] HUANG X, XIE Y M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials [J]. **Computational Mechanics**, 2009, 43(3): 393-401.
- [12] HUANG X, ZUO Z H, XIE Y M. Evolutionary topological optimization of vibrating continuum structures for natural frequencies[J]. **Computers & Structures**, 2010, 88(5-6): 357-364.
- [13] SUN X F, YANG J, XIE Y M. Topology optimization of composite structure using bi-directional evolutionary structural optimization method[J]. **Procedia Engineering**, 2011(14):2980-2985.
- [14] 赵德斌,樊 军,厉国柱. 基于ANSYS的自行车车架拓扑优化设计[J]. 工程设计学报, 2009, 12(5):391-394.
- [15] 孙 蕾,任晓琳,孟 辉. 基于ANSYS的桥梁结构拓扑优化设计[J]. 中国高新技术企业, 2009(20):38-39.

[编辑:张 翔]