

# 结构优化技术在桥梁工程中的应用实例

冯阅<sup>1</sup>, 韩建刚<sup>1</sup>, 布鲁诺·布里斯杰拉<sup>2</sup>

(1 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 福州大学 土木工程学院)

**摘要:**简要介绍了结构优化技术在工程领域的应用方向,分析了结构优化技术在桥梁结构中应用困难的原因,简要叙述了实际桥梁结构优化问题的求解技术。分别介绍了钢拱桥尺寸优化研究实例和组合梁桥拓扑优化应用实例,实例展示了优化的目标、实现手段及基本流程,并给出了最终的优化结果,可为中国桥梁工程师提供参考。

**关键词:**尺寸优化; 拓扑优化; 桥梁; 优化技术; 应用实例

## 1 概述

结构优化的目的在于,在一定的约束条件下,通过寻找结构最优的拓扑形态、形状和尺寸,获取最佳的结构性能。近几十年来,随着结构优化方法和理论不断完善,以及计算机技术的巨大进步,结构优化技术与商用结构分析软件相结合,已在航空、机械和土木等工程领域中得到了广泛应用。目前应用较多的是尺寸优化和拓扑优化,尺寸优化以结构设计参数为优化对象,在结构类型、材料、布局和轮廓形状一定的情况下,优化各个组成构件的截面尺寸;拓扑优化以材料分布为优化对象,寻找在设计空间内分布材料的最佳方案。优化技术辅助工业产品如飞机、汽车设计时,能实现结构的轻量化,降低材料成本的同时提升产品的整体性能,如波音777和空客A380的发动机和机翼等的优化设计,经济效益明显。当其应用到建筑结构领域,可以打破设计师的思维局限,在概念设计阶段给出新颖的结构形式,为最终设计提供形态参考,如卡塔尔国际文化会议中心和上海喜玛拉雅中心就是借助优化技术找形的典型例子。

然而,在同为工程结构的桥梁领域,结构优化的应用实例却并不多见,可能有以下几个原因:①桥梁结构的体系成熟,整体找形难以突破现有的体系框架。谢亿民、荣见华等和陈艾荣等很早就尝试采用渐进结构优化法对桥梁结构进行找形,但都是模拟现有桥梁结构的边界条件,在给定的设计域内施加规定的荷载,

分析现有结构形式的合理性;②找形得到新颖的结构形式,限于目前的桥梁制造与施工技术,方案也较难实现,如中空的壳管人行桥概念设计和有机态的人形桥设计方案存在大量的空间曲面,施工难度较大;③实际桥梁设计中,构件的材料富余度不大,过分地追求节约材料和减轻自重,除经济效益不明显外,反而容易增加安全风险。尽管结构优化技术在桥梁领域应用困难,但作为一门新兴技术,仍有应用前景。该文在简要叙述实际桥梁结构优化问题的求解技术之后,分别介绍一个研究实例和一个应用实例,供中国桥梁工程师参考。

## 2 桥梁结构优化问题的求解

对于具有复杂约束的实际工程的尺寸优化问题,主要采用以数值搜索技术为基础的数值优化方法。一类基于目标函数或约束函数的导数信息(即灵敏度分析)来构造搜索算法,如最速下降法和梯度投影法等。这类方法从初始点出发,利用导数信息确定搜索方向和步长,获得新的设计点,如此反复,直至收敛。其求解效率高,但是当设计变量较多或约束函数非线性较强时,容易陷入局部最优解。另一类根据目标函数值构造搜索算法,如序列单纯形法和启发式算法(模拟退火法、遗传算法等),这类方法求解效率低,往往需要成百上千次的有限元计算,但因不需要导数信息,能跳出局部最优解,趋近全局最优。

拓扑优化问题相对较为复杂,结构在优化过程中

收稿日期:2020-11-10(修改稿)

基金项目:海南省自然科学基金资助项目(编号:518QN216);海南大学科研启动基金资助项目(编号:kyqd1632)

作者简介:冯阅,男,博士,讲师, E-mail: jxfyue@sina.com

产生新的孔洞和连接改变了其构型,需要利用物理模型用较少的设计变量来描述设计域内各种可能的拓扑形式。目前较常用的是 SIMP 材料模型(带罚因子的固体各向同性微结构/材料插值模型),该模型假定宏观结构设计域的每一点由微结构材料构成,引入一种假想的相对密度为  $0\sim 1$  的可变材料,以材料的相对体积密度  $\rho$  为设计变量,以弹性模量和相对体积密度之间的经验关系为基础,直接定义一个经验公式来表达密度与弹性模量之间假定的函数关系。这样,将结构拓扑优化问题转化为材料的最优分布问题,可通过上述数值优化方法求解。

数值优化方法与灵敏度分析、模型近似技术以及结构分析软件相结合,借助有限元等数值离散技术,将优化模型转化为离散参数优化模型,可以很方便地处理各种类型的约束,解决桥梁结构优化问题。

### 3 钢拱桥尺寸优化(意大利威尼斯宪法桥)

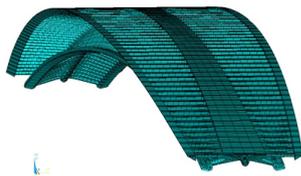
威尼斯宪法桥[图 1(a)]为一座钢拱人行桥,是由建筑师主导、追求建筑造型而结构不尽合理、具有争议的一座桥。该桥在周围古老的建筑中运用现代轻质高强的钢材和玻璃建造,建筑设计新颖,但结构有着明显的不合理之处。开口星形截面刚度不大,在非对称荷载下产生较大的变形; $\pi$ 形连接钢板不仅要承受主拱的剪力,还要承受局部弯矩,其某些部分临界应力达到极限状态;特别是当地土质疏松,却采用了  $1/16$  的矢跨比,使得桥梁产生巨大的水平推力,其值几乎是竖向力的 7 倍。为避免基础位移影响结构受力,在桥台和上部结构之间安装了千斤顶系统,当桥台的位移超过  $2\text{ cm}$  时启动千斤顶系统,恢复桥的初始几何位置。

该文从改善结构受力性能出发,结合数学计算软件 Matlab 和结构分析软件 Ansys,建立参数化有限元模型[图 1(b)],考虑风荷载和 7 种不同的人行荷载,即  $6\text{ kN/m}^2$  的人行荷载均布在全跨、横桥向半跨(2 种工况)、纵桥向半跨(2 种工况)、两对角半跨(2 种工况),进行全桥尺寸优化设计。以开口星形截面各构件的尺寸为设计变量[共 12 个设计变量,图 1(c)],以荷载最不利组合下桥台处的最大水平推力为目标函数,以全桥钢结构的最大应力、各荷载工况下的最大竖向位移为约束,对全桥钢构件尺寸进行重新设计。采用遗传算法全局寻优,共进行 360 次有限元分析,最终得到总体积仅上升  $2.75\%$  但最大水平推力下降  $20.1\%$

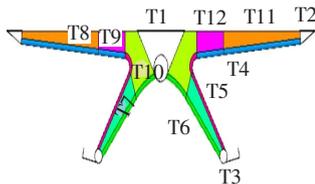
的优化结果。



(a) 实桥图片



(b) 全桥有限元模型



(c) 开口星形截面

图 1 意大利威尼斯宪法桥

### 4 组合梁桥拓扑优化(意大利皮亚韦桥)

意大利皮亚韦桥是一座全长  $500\text{ m}$  的多跨梁桥,共 5 跨,每跨跨径  $100\text{ m}$ ,位于意大利威尼斯附近的皮亚韦河上。该桥原设计是采用钢筋混凝土结构,施工了大部分的基础和桥台后,因建造经费问题一度停工,再建时却面临两个问题。第一,意大利更新了抗震设计规范,已施工的基础难以满足新的设计规范要求;第二,威尼斯水务管理部门要求施工时不能在河道内设置支撑影响通航。为解决这一问题,考虑了两个解决方案:①对已有基础进行加固;②保留已建成的下部结构,减轻桥梁的上部结构重量。综合考虑施工、工期和预算等因素,最终选择后者。新的设计用钢箱梁代替钢筋混凝土结构,减轻重量的同时避免现场架设支架施工。并通过拓扑优化技术,将钢箱梁的翼缘部分进行挖空,在保证桥梁承载力与刚度的同时降低上部结构的自重。

通过有限元软件 Ansys,建立参数化模型,如图 2 所示。采用 SIMP 模型,以结构柔度为目标函数,在体积约束下最大化结构的刚度。给定不同的体积挖空率,从  $15\%$  逐渐增加到  $90\%$ ,对钢箱梁的翼缘部分进行拓扑。通过识别低伪密度(即相对体积密度)的区域,去除这些区域的材料对钢箱梁的几何形状进行更新,并校验挖空后桥的承载力是否满足要求。在优化过程中,随着设定的体积挖空率的增加,呈现出不同的优化结果(图 3),从初始的两个小椭圆形孔洞,逐渐扩大

至相互连接,形成一个大椭圆孔洞。与此同时,结构的应力水平不断增大,包括最大应力和平均应力,挠度也在增加。最终综合考虑重量和结构受力因素,选择了体积挖空率40%的方案(图4)。

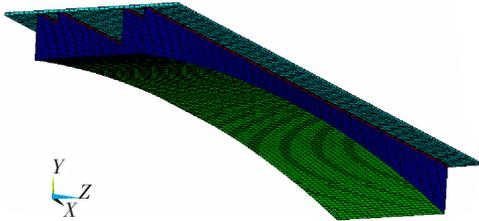


图2 意大利皮亚韦桥有限元模型

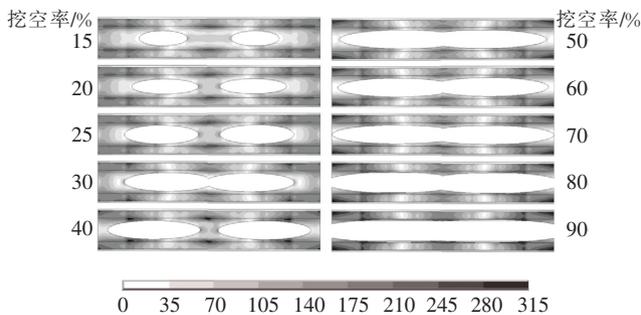


图3 不同体积挖空率下的应力云图(单位:MPa)



图4 建成的实桥图片

## 5 结语

由于多方面的原因,结构优化技术在桥梁结构中的应用比较困难,故实例不多。然而,正如文献[8]所述,作为一门新兴技术,结构优化不仅是一种优化技术,更是一种计算机辅助造型技术。该文通过介绍钢拱桥尺寸优化研究实例和组合梁桥拓扑优化应用实例,展示了优化技术应用于桥梁实际结构的可能性。

钢拱桥虽已建成,但该研究有别于以节约材料用量为目标的传统应用,提供了另一种参考;组合梁桥拓扑优化是从解决实际工程问题出发,具有参考价值。优化技术与结构分析软件相结合,在结构设计阶段可以辅助结构设计,找到材料的最佳分布方案,寻求受力合理的结构;在概念设计阶段可以给出新颖的结构形式,打破设计师的思维局限,进行创新。随着未来研究的不断深入、施工技术如3D打印的发展,桥梁结构优化特别是拓扑优化具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 冯仲仁,杨亚磊,李伟. 基于响应面法的连续刚构桥结构优化设计[J]. 中外公路,2018(3).
- [2] 杜建镇. 结构优化及其在振动和声学设计中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [3] López, C., Baldomir, A., Hernández, S. Deterministic Versus Reliability - Based Topology Optimization of Aeronautical Structures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 53(4): 907-921.
- [4] 崔昌禹,严慧. 结构形态创构方法——改进进化论方法及其工程应用[J]. 土木工程学报,2006(10).
- [5] Xie Y M, Zuo Z H. Architectural Design through Bidirectional Evolutionary Structural Optimization[J]. Time and Architecture, 2014 (5): 20-25.
- [6] 荣见华,姜节胜,颜东煌,等. 多约束的桥梁结构拓扑优化[J]. 工程力学,2002(4).
- [7] 陈艾荣,常成. 渐进结构优化法在桥梁找型中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012(1).
- [8] 陈艾荣,常成,马如进,等. 结构拓扑优化理论及其在桥梁结构找型中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016(5).
- [9] 陈宝春,冯阅,布鲁诺. 威尼斯大运河的第4座桥梁[J]. 世界桥梁,2011(1).
- [10] 冯阅,陈宝春,布鲁诺,等. 意大利威尼斯四桥受力性能分析[J]. 世界桥梁,2013(6).
- [11] ZORDAN T, BRISEGHIELLA B, MAZZAROLO E. Bridge Structural Optimization through Step-by-Step Evolutionary Process [J]. Structural Engineering International, 2010, 20(1): 72-78.
- [12] BRISEGHIELLA B, FENU L, LAN C, et al. Application of Topological Optimization to Bridge Design [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(8): 790-800.