

机械基础结构多目标拓扑优化设计方法

汪兵兵, 丁晓红, 孙晓辉, 张 横

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 机械的基础结构在保证具有足够的刚度、强度和稳定性的条件下, 经济性也必须要好, 因此机械基础结构常采用内部布置有加筋板的箱体结构。以某机械基础结构为例, 分别用基于经验设计的内部筋板布置方法和多目标拓扑优化方法进行优化设计, 得到了 2 种设计方案; 比较了 2 种方案的动静态力学性能。结果表明, 多目标拓扑优化设计的基础结构比一般经验设计的结构, 刚度有所提高, 而结构质量减小 11.21%, 一阶固有频率提高 25.07%。

关键词: 机械基础结构; 多目标优化; 拓扑优化; 折衷规划

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)15-0015-04

Multi-objective Topology Optimal Design of Mechanical Infrastructure

WANG Bing-bing, DING Xiao-hong, SUN Xiao-hui, ZHANG Heng

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Mechanical infrastructure should have good economic efficiency under the condition of sufficient rigidity, strength, and stability. Therefore, box structure with inner stiffener plates is usually applied for mechanical infrastructure. Empirical design method and multi-objective topology optimal design were carried out respectively on layout of inner stiffener plates of a sample mechanical infrastructure, and two design schemes were obtained. The static and dynamic mechanical properties by the two design schemes were compared. The result showed that multi-objective topology optimal design is much better, by which the rigidity of the optimized structure is improved, the weight of the optimized structure is reduced by 11.21%, and the first natural frequency is increased by 25.07% by compared with that of the empirical design method.

Key words: mechanical infrastructure; multi-objective optimization; topology optimization; compromise programming

大部分机械基础结构为箱型结构, 一般由外壁和布置于内部的纵、横加筋板组成, 承受着安装在其上的零部件的动态载荷和静态载荷, 其结构对于整个机器的性能影响很大。纵横布置的内部加筋板可增加箱型支撑结构的强度和刚度, 使其具有轻质、高强度、高刚度的优点, 因此在工程实际中得到了日益广泛的应用, 如机床的床身、立柱等支撑件, 起重机的大梁与支腿, 以及船舶船体、车辆车体结构等。

目前大部分机器基础结构的设计均基于材料力学理论, 根据经验在箱体内部布置各种形式的加筋板, 如垂直对角筋、垂直纵向筋和垂直横向筋等。在对这

些加筋结构进行力学分析比较的基础上, 对原有设计进行改进, 或者在确定了若干个加筋板布局形式的基础上进行布局选型。为了保证机械基础结构的安全性, 设计的结构强度、刚度有较大的富余, 造成了材料浪费, 增加了生产成本。

连续体结构的拓扑优化技术可以在设计域空间内寻找到结构最佳的传力路线形式, 以优化结构的力学性能和减小结构的质量^[1]。应用拓扑优化设计技术来确定箱型结构内部加强筋的分布, 单一目标函数的拓扑优化问题研究较多^[2]; 然而, 包括机械基础结构在内的实际工程问题大多是多目标拓扑优化问题,

收稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875174, 51175347); 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ114)

作者简介: 汪兵兵(1989-), 男, 江西人, 上海理工大学硕士生, 主攻结构分析与结构优化。

通讯作者: 丁晓红(1965-), 女, 浙江人, 博士, 上海理工大学教授、博士生导师, 主要从事工程系统和结构的优化设计方法研究。

只有通过多目标拓扑优化技术才能得到实际工程需要的最优结构拓扑,因此多目标拓扑优化技术及其在工程实际中的应用已成为近年结构优化设计领域的研究热点。范文杰等人^[3]运用 OptiStruct 软件,以静态刚度和振动频率为目标,对汽车车架结构进行了多目标拓扑优化设计。占金青等^[4]以平均柔度最小化和平均特征值最大化为目标,采用密度法进行拓扑优化,运用移动近似算法求解,并且通过过滤求解技术避免了优化中数值不稳定的现象。马超等人^[5]以 VHT800 立式车铣加工中心立柱结构的多工况加权静态应变能最小、结构低阶加权固有频率最大为目标,进行了多目标拓扑优化设计,减小了立柱的质量,同时立柱的刚度和一阶固有频率有所提高。

笔者以某机床部件试验台的台架结构为研究对象,分别用基于经验设计的内部筋板布置方法和多目标拓扑优化方法进行设计。台架结构多目标优化设计方案是以静态应变能最小、第一阶固有频率最大为目标,运用折衷规划法和密度法进行优化求解得到的。通过对比 2 种设计方案的动静态力学性能,验证机械基础结构多目标优化设计方法的有效性。

1 机械基础结构的经验设计方法

机械基础结构的经验设计要求有以下几点^[6-7]。

- 1) 具有足够的刚度。即基础结构在规定的最大载荷(额定载荷)作用下,变形不得超过一定的数值。
- 2) 具有足够的抗振性。抗振性包括两方面:抗受迫振动的能力,限制受迫振动的振幅不超过允许值;抵抗自激振动的能力,即在给定的条件下保证机器的稳定性。
- 3) 具有良好的工艺性以便于制造和装配。

为了满足上述的设计要求,箱体类机械基础结构内部通常需要布置合理的加筋板。由材料力学理论可知,对箱型结构来说,纵向加筋板抗弯效果好,设置于弯曲平面内;横向加筋板抗扭作用大,在垂直于扭矩的矢量方向上设置;斜向加筋板具有同时提高抗弯、抗扭的综合效果。通过比较不同加强筋箱体的刚度、频率以及质量,可以得到箱体动静态性能较好的设计方案。以某机床部件试验台的台架结构为例,说明机械基础箱型结构筋板的布置设计方法。台架的结构为开式箱型结构,外形尺寸(长×宽×高)为 2500 mm×1800 mm×700 mm,材料为 HT200。为了方便比

较不同加强筋类型台架的动静态力学性能,分别对不同加强筋类型的台架模型进行编号,见图 1。图 1 中,

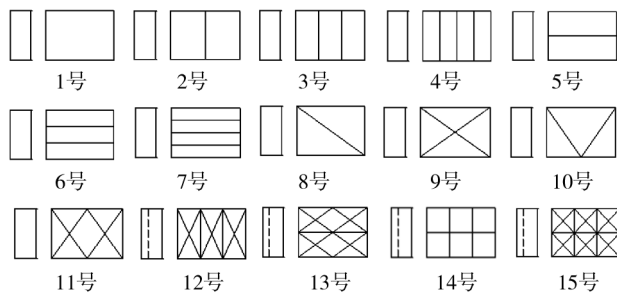


图 1 不同筋板类型台架示意图

Fig. 1 Different types of ribs bench

1-4 号为横向筋板,5-7 号为纵向筋板,8-11 号为对角筋板,12-15 号为混合筋板。

基础结构的静态和动态力学性能一般分别由结构静刚度和固有频率表示。静刚度是指结构抵抗外加静态力作用下产生变形的能力,以静态力作用下产生的变形量表示。模态分析可以确定结构的振动特性^[8]。

根据试验台的实际受力情况,将载荷简化为 3 个部分,见图 2。该载荷为试验台装夹被测工件的自重

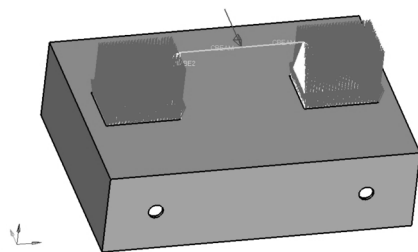


图 2 试验台的受力简图

Fig. 2 Force diagram of test bench

产生的均布载荷,分别为 2.45×10^{-2} 和 1.99×10^{-2} MPa,模拟切削力为 643 N。台架底部由 10 根地脚螺栓与地基固定连接,故台架底部螺栓连接处均约束 6 个方向的自由度。

对图 1 所示的 15 种不同筋板类型的台架进行动静态力学性能分析,得到了台架水平方向和垂直方向的平均变形量和一阶固有频率,见表 1。

通过比较 1-4 号模型的数据可得,单一地增加横向筋板数目,并不一定能提高台架的整体刚度和一阶固有频率。比较 1 号以及 5-7 号模型的数据可以看出,单一地增加纵筋板数目,台架的整体刚度和一阶

表 1 不同筋板布置形式台架的力学性能

Tab.1 The mechanical properties of different types of ribs bench

筋板布置 方式	平均位移/ μm		基频 /Hz	质量 /t
	水平	竖直		
1	0.82	28.73	51.82	2.67
2	0.15	5.30	58.10	2.83
3	0.23	7.43	58.37	2.99
4	0.61	13.75	58.25	3.15
5	0.22	9.60	42.37	2.89
6	0.31	6.45	42.45	3.11
7	0.41	8.66	42.49	3.33
8	0.37	13.53	39.18	2.94
9	0.06	2.60	61.32	3.21
10	3.64	13.12	50.56	3.05
11	0.23	8.08	93.56	3.44
12	0.18	3.38	58.66	3.37
13	0.44	8.99	58.91	3.28
14	0.17	5.01	111.24	3.21
15	0.18	4.90	112.55	3.67

固有频率也没有显著提高。比较 1 号以及 8-11 号模型数据可得, 8 号和 10 号模型刚度较差且一阶固有频率偏低; 9 号模型的质量比 11 号模型小, 但一阶固有频率没有 11 号模型高。通过对比分析以上几种单一筋板布置形式的数据可知, 单一筋板的布置方式并不是提高台架的刚度和一阶固有频率的最佳途径, 需要考虑改变混合筋板布置形式来提高台架的整体刚度以及一阶固有频率。

从 12-15 号模型的混合筋板数据可以看出, 合理的混合筋板布置形式能够有效提高结构刚度和一阶固有频率。14 号和 15 号模型是 15 种方案中比较好的设计方案, 14 号模型和 15 号模型的竖直方向变形量和一阶固有频率相差不多, 但是 14 号模型的质量比 15 号模型小很多。因此, 可选择 14 号模型的筋板布置方式作为最终的设计方案。

2 试验台台架多目标拓扑优化设计

在经验设计中, 通过分析上述 16 种不同筋板布置类型的台架动静态性能, 得到了较好的设计方案, 但并不能保证是最优的设计方案。单目标拓扑优化一般以应变能为目标函数, 得到优化结果后, 对优化结构进行简单的固有频率分析。由于结构应变能和固有频率之间的不一致性^[9], 单目标优化很难得到结构最优拓扑形态, 因此对台架进行多目标拓扑优化设

计非常有必要。多目标拓扑优化一般采用约束法、分层序列法、评价函数法和折衷规划法建立数学模型。

2.1 优化数学模型

台架结构的多目标拓扑优化以体积为约束, 同时将静态应变能和一阶固有频率作为优化目标。运用折衷规划法得到多目标优化数学模型:

$$\min F(\rho) = \sqrt{\omega^2 \left(\frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \right)^2 + (1 - \omega)^2 \left(\frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\min}} \right)^2}$$

使得 $V(\rho)/V_0 \leq 0.5$ (1)

$$0 < \rho < 1$$

式中: ρ 为材料伪密度; V_0 为结构的初始的体积; f 为结构的一阶固有频率; f_{\max} 为结构以频率最大为目标函数进行优化时, 达到的频率值的上限值; f_{\min} 为结构以频率最大为目标函数进行优化时, 达到的频率值的下限值; C 为结构的应变能; C_{\max} 为结构以频率最大为目标函数进行优化时, 达到的应变能的上限值; C_{\min} 为结构以频率最大为目标函数进行优化时, 达到的应变能的下限值; ω 为权重系数, 取值为 0.6。

2.2 优化过程和结果

为了进行拓扑优化设计, 需要将台架内部结构用实体单元填充, 建立设计初始模型。设台架上顶板和下底板为非优化区域, 其余部分为优化区域。边界条件为: 上顶板受由试验台装夹被测工件的自重产生的均布载荷以及切削工件产生的切削力, 下底板螺栓连接处进行全约束处理。采用密度法求解优化数学模型, 得到拓扑优化结果, 见图 3, 图 3a 中优化区域的螺

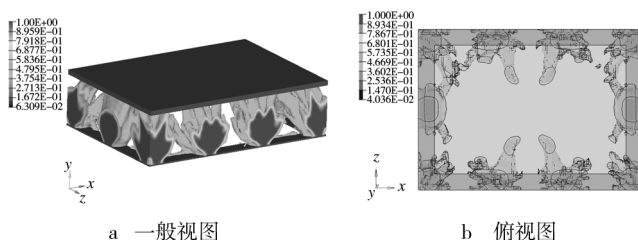


图 3 台架拓扑优化材料分布

Fig.3 The optimal material distribution of bench

栓连接处材料呈柱状分布; 图 3b 中优化区域中间部分呈对角材料分布。应变能在第 30 次迭代后趋于收敛, 一阶固有频率收敛于 210.11 Hz, 见图 4 和 5。

2.3 优化前后结构性能分析比较

根据多目标拓扑优化结果可得, 台架内部的传力

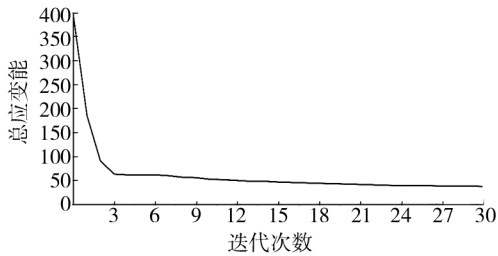


图4 应变能迭代历程

Fig. 4 The iterative process of strain

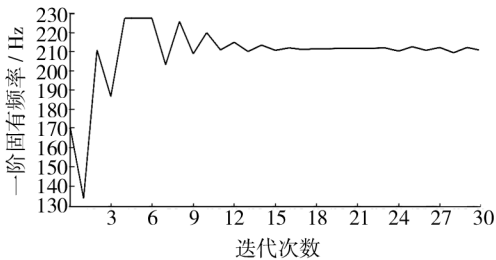


图5 一阶固有频率迭代历程

Fig. 5 The iterative process of first order natural frequency

区域主要集中在中间部位,因此在优化后台架结构的中间部位设计2个对角斜向筋板;同时在台架四周的侧板的去除材料处设计成孔洞,见图6。在与经验设

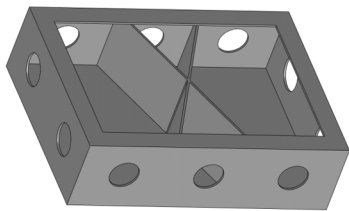


图6 优化后台架结构

Fig. 6 The optimal structure of bench

计结构相同的工况条件下,对优化后结构进行动静态力学性能分析,得到的优化后台架水平方向和竖直方向的最大位移见图7和8。

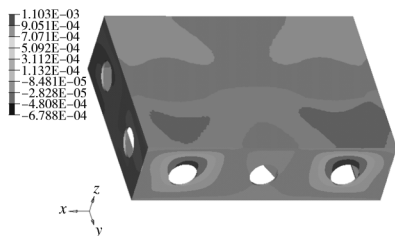


图7 优化后台架结构的水平位移

Fig. 7 The horizontal displacement of the optimal bench

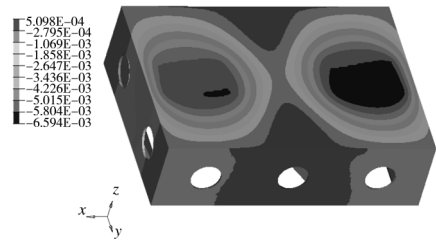


图8 优化后台架结构的竖直位移

Fig. 8 The vertical displacement of the optimal bench

14号方案和优化设计方案的台架动静态力学性能比较见表2。

表2 各种设计方案的台架动静态力学性能比较

Tab. 2 Comparison of design schemes with static and dynamic mechanical properties of benches

台架 结构	最大位移/ μm		基频 /Hz	质量 /t
	水平	竖直		
14号方案	0.17	5.01	111.24	3.21
优化设计	0.15	2.65	210.11	2.85
变化率	11.76% ↓	47.11% ↓	88.88% ↑	11.21% ↓

注: ↑表示升高, ↓表示降低

与经验设计方案相比,优化设计方案中台架在水平方向和竖直方向上的变形量分别降低了11.76%和47.11%,而一阶固有频率增加至210.11 Hz,提高了88.88%;同时,台架的质量减少至2.85 t,减小了11.21%。

3 结语

以某机械基础结构为例,分别用基于经验设计的内部筋板布置方法和多目标拓扑优化方法进行优化设计,得到了2种设计方案。通过和一般经验设计的台架结构的动静态力学性能的对比,验证了多目标拓扑设计方法的有效性和优越性。该方法能够广泛地应用于各种机器箱型支撑结构的设计。

参考文献:

- [1] 罗震,陈立平,黄玉盈,等. 连续体结构的拓扑优化设计[J]. 力学进展,2004,34(4):463-476.
LUO Zhen, CHEN Li-ping, HUANG Yu-ying, et al. The Topology Optimization of Continuum Structures[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4):463-476.

MPa, 134.48% 比较接近, 证实了方案的可靠性。

3) 戊二醛改性壳聚糖/纳米 TiO₂ 保鲜膜抗水性好。与壳聚糖/纳米 TiO₂ 复合膜相比, 使用戊二醛改性极大地降低了壳聚糖/纳米 TiO₂ 复合膜的吸水率。

参考文献:

- [1] 琚行松, 黄培, 徐南平, 等. 溶胶稳定性对氧化锆超滤膜结构和性能的影响[J]. 膜科学与技术, 1999, 19(5): 32-37.
JU Xing-song, HUANG Pei, XU Nan-ping, et al. Effects of Zirconyl Oxalate Sol Stability on Structure and Performance of Zirconia Ultrafiltration Membrane[J]. Membrane Science and Technology, 1999, 19(5): 32-37.
- [2] 邱春阳, 张克铮. 二氧化硅溶胶稳定性的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2005, 25(2): 1-4.
QIU Chun-yang, ZHANG Ke-zheng. The Stability of SiO₂ Sol[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2005, 25(2): 1-4.
- [3] 杨远谊. 壳聚糖/纳米 TiO₂ 抗菌保鲜膜的研制及性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2005.
YANG Yuan-yi. Research of Making the Chitosan/Nanometer TiO₂ Antimicrobial Film and Its Capabilities [D]. Chongqing: Southwest University, 2005.
- [4] 张祖华, 吴茂英, 周郭煌. 纳米 TiO₂ 在塑料中的应用进展[J]. 现代塑料加工应用, 2003, 15(6): 35-37.
ZHANG Zu-hua, WU Mao-ying, ZHOU Guo-huang. Progress in Application of Nano Titanium in Plastics [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2003, 15(6): 35-37.
- [5] 闻燕, 杜予民, 李湛. 壳聚糖/纳米 TiO₂ 复合膜的制备和性能[J]. 武汉大学学报(理学版), 2002, 48(6): 701-704.
WEN Yan, DU Yu-min, LI Zhan. Preparation and Properties of Chitosan/TiO₂ Nanoparticles Composite Films [J]. Wuhan University Journal (Natural Science Edition), 2002, 48(6): 701-704.
- [6] 孔伟, 周浩然, 赵书言, 等. 戊二醛改性壳聚糖缓释膜的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(4): 42-48.
KONG Wei, ZHOU Hao-ran, ZHAO Shu-yan, et al. Studying on Chitosan Cross-linking with Glutaraldehyde [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2010, 15(4): 42-48.
- [7] 潘丽军, 陈锦权. 实验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 232-237.
PAN Li-jun, CHEN Jin-quan. Experimental Design and Data Processing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 232-237.
- (上接第 18 页)
- [2] 丁晓红, 李国杰. 箱型支撑结构加筋板布局设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 449-453.
DING Xiao-hong, LI Guo-jie. Layout Design Optimization of Stiffener Plates Inside Housing Structures [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 23(4): 449-453.
- [3] 范文杰, 范子杰, 苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1505-1508.
FANG Wen-jie, FANG Zi-jie, SU Rui-yi. Research on Multi-objective Topology Optimization on Bus Chassis Frame [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1505-1508.
- [4] 占金青, 张宪民. 连续体结构的静动态多目标拓扑优化方法研究[J]. 机械强度, 2010, 329(6): 933-937.
ZHAN Jin-qing, ZHANG Xian-min. Research on Static and Dynamic Multi-objective Topology Optimization of Continuum Structures [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(6): 933-937.
- [5] 马超, 马雅丽, 赵宏安, 等. VHT800 立式车铣加工中心立柱结构静动态优化及轻量化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(3): 11-14.
MA Chao, MA Ya-li, ZHAO Hong-an, et al. Static-dynamic Optimization and Light-weight Design of the Column Structure on VHT800 Vertical Turning-milling Machining Center [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(3): 11-14.
- [6] 机械设计实用手册编委会. 机械设计实用手册 [K]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Mechanical Design Practical Handbook Editorial Board. Practical Handbook of Mechanical Design [K]. Beijing, China Machine Press, 2008.
- [7] 现代实用机床设计手册编委会. 现代实用机床设计手册 [K]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Modern Practical Machine Design Manual Editorial Board. Modern and Functional Machine Design Manual [K]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [8] 杨橹, 唐恒龄, 廖伯瑜. 机床动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
YANG Yong, TANG Heng-ling, LIAO Bo-yu. Machine Dynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [9] 刘加光, 陈义保, 罗震. 连续体结构的模糊多目标拓扑优化设计方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1095-1099.
LIU Jia-guang, CHEN Yi-bao, LUO Zhen. Fuzzy Multi-objective Topology Optimization of Continuum Structures [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5): 1095-1099.