

基于静动态特性的管道清淤机器人 清淤盘的优化研究

罗继曼,刘思远,郭松涛,戴璐璐

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为实现清淤装置的轻量化和提高工作可靠性,以参数优化和拓扑优化结合的方法对清淤盘进行静、动态特性研究. 方法 优化前通过有限元分析确定优化目标和顺序优化方法;以质量最小化作为优化目标,以应力和柔度作为约束条件建立参数优化数学模型,对基盘进行参数化优化;以柔度最小作为优化目标,以体积缺省比和应力作为约束条件,建立拓扑优化模型,对清淤盘进行拓扑优化;最后对优化后的清淤盘进行静、动态有限元对比分析. 结果 优化后,结构的质量减轻了37.94%;迎水面积大幅减小;最大变形改变量分别为3.04%和11.07%;结构应力分别降低了55.24%和87.97%. 结论 清淤盘的优化达到了轻量化和减小迎水率的目的,结构刚度、强度均满足设计要求,且动态性能有所提高.

关键词 管道清淤机器人;清淤盘;静动态性能;参数化优化;拓扑优化

中图分类号 TH122

文献标志码 A

Optimization of Dredging Plate for Dredging Robot Based on Static and Dynamic Characteristics

LUO Jiman, LIU Siyuan, GUO Songtao, DAI Lulu

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to realize the light weight of the dredging device and improve its working reliability, and the static and dynamic characteristics of the disk was studied by the combination of parameter optimization and topology optimization. Firstly, the optimization objective and sequence optimization method were determined by finite element analysis before optimization. The mathematical model of parameter optimization was established to optimize the basic disk by taking the minimization of quality as the optimization goal and using the stress and flexibility as the constraints to establish the parameter optimization mathematical model. A topology optimization model is established to optimize the topology of the dredger by taking the minimum flexibility as the optimization objective and the volume default ratio and stress as the constraints. Finally, the static and dynamic finite element comparison and analysis of the optimized dredging disc was carried out.

收稿日期:2018-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51575365);辽宁省自然科学基金项目(201602620)

作者简介:罗继曼(1966—),女,教授,博士,主要从事机器人设计、工程机械等方面研究.

The quality of the structure is reduced by 37.94%, the area of water intake is greatly reduced, The maximum deformation changes were 3.04% and 11.07% respectively, and the structural stress decreased by 55.24% and 87.97% respectively. The optimization of dredging plate has achieved the goal of lightening and reducing the water intake rate. The stiffness and strength of the structure meet the design requirements and the dynamic performance has been improved.

Key words: pipeline dredging robot; dredging plate; static and dynamic performance; parametric optimization; topology optimization

目前,国内外的污水管网的清理工作正在逐步被机器人取代^[1].而清淤装置作为管道清淤机器人的清淤作业承载部分,是管道机器人的关键机构之一,在清淤作业时,该装置的静、动态性能的优劣直接影响机器人的清淤效率和工作稳定性,因此在设计初期,需要对清淤装置进行优化研究,使其静、动态特性满足工作可靠性要求.

参数化优化是较为普遍的一种有优化方法,通过将设计目标参数化,采用优化方法,在设计空间内不断地调整设计变量,使得设计结果不断接近目标值.拓扑优化的目的是在设计空间寻求结构最佳的传力路线形式,以优化结构的某些性能或减轻结构的重量,以寻求结构最优的拓扑关系^[2-3].采用参数化优化和拓扑优化结合的顺序优化方法的优势:在满足结构功能要求的前提下,最大限度地优化结构布局,使其静、动态特性达到最优.其中,应济等^[4]提出了从高层次拓扑优化到底层次参数化优化的顺序优化设计方法,该方法对拓扑优化得到的模型进行规整,对规整后的模型进行参数化优化,得到最终的顺序优化模型;姜衡等^[5]为满足在加工中心初始动静态刚度的条件下达到整机轻量化的要求,提出基于质量和第一阶固有频率为目标函数的整机多目标优化设计方法;王宗彦等^[6]提出机械结构的参数化三级优化设计方法,通过建立统一数据管理机制,将优化设计与参数化设计技术相结合,在基于变密度法的拓扑优化设计与单元生死技术的基础上,以结构最大柔度为优化目标,体积和平衡条件为约束条件,小密度单元为杀死单元,实

现了参数化的连续体结构拓扑优化;Qiu F S等^[7]通过引入约束因子,改进了变密度结构拓扑优化方法,提出了一种基于约束因子的变密度法的密度-刚度插值模型,最后通过实例分析,验证了该算法的可行性.

笔者采取低层次的参数化优化到高层次的拓扑优化结合的顺序优化方法,对清淤盘进行优化研究,并对优化前后进行静、动态性能的对比分析.通过研究,实现在满足刚度和强度、避免共振的同时,达到清淤盘质量和迎水率最小的设计要求.

1 工作原理

清淤盘由轮-爪混合动力推进系统搭载,安装在机器人的最前端,由推进系统与旋转电机共同作用实现螺旋运动.可实现刮削-搅拌-过滤-推进四位一体的清淤作业方式.清淤盘在管道内清淤作业时会产生很大的阻力,所以对清淤盘的结构优化,以达到最大限度的减小其质量和迎水率具有很重要的现实意义.管道机器人模型见图1,清淤盘组装图见图2.

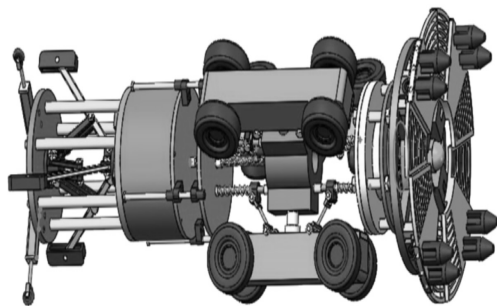
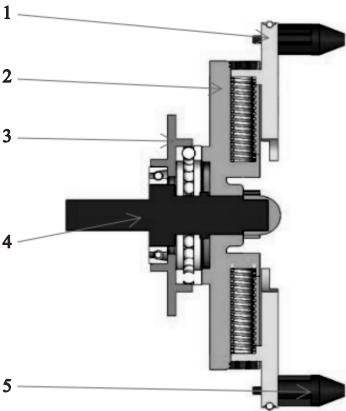


图1 管道清淤机器人模型

Fig.1 Model of pipe dredging robot



1. 扇形盘;2. 基盘;3. 轴承盘;4. 主轴;5. 刮刀。

图2 清淤盘剖视图

Fig. 2 Dissection view of dredging plate

2 优化前有限元静态分析

在不考虑水流的工况下,对清淤盘的受力极限工况进行有限元分析,得到主轴、基盘、扇形盘和刮刀的位移和应力云图,对结果进行数据分析,确定优化目标区域;对清淤盘整体直接拓扑优化,得到伪密度云图,对结果进行分析,确定采用顺序化的优化方法对清淤盘进行优化研究。

2.1 清淤盘受力分析

对清淤盘进行受力分析是进行有限元分析的前提,其主要受力为自身重力、搅拌时刮刀承受的刮削力,以及轴承盘内的支撑力。由于笔者以设计轻量化和最小迎水率为目标,暂不考虑水流阻力。考虑刮削力作用在刮刀的端部,受力简图如图3所示。

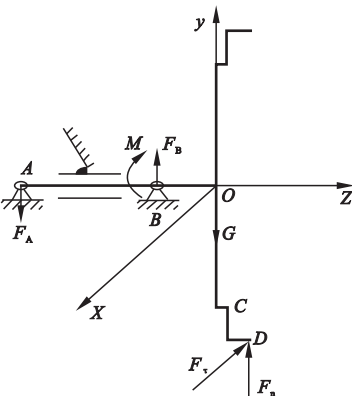


图3 清淤盘的受力示意图

Fig. 3 Force diagram of dredging plate

在 XOY 面对清淤盘进行受力分析得到式(1)、式(2):

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ F_{Ax} - F_{Bx} + F_{Dx} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum F_y = 0, \\ F_{Ay} - F_{By} + G = 0. \end{cases} \quad (2)$$

对 O 、 C 两点进行力矩分析得到式(3)、式(4):

$$\begin{cases} \sum M_O = 0, \\ F_{Ax} \times \Delta z_{OA} - F_{Bx} \times \Delta z_{OB} + F_{\tau} \times \Delta z_{OD} = 0, \\ F_{Ay} \times \Delta z_{OA} - F_{By} \times \Delta z_{OB} + F_n \times \Delta z_{OD} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum M_C = 0, \\ F_{Ax} \times \Delta z_{AC} - F_{Bx} \times \Delta z_{BC} + F_{\tau} \times \Delta z_{CD} = 0, \\ F_{Ay} \times \Delta z_{AC} - F_{By} \times \Delta z_{BC} + F_n \times \Delta z_{CD} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

上述分析考虑载荷最大情况发生在刮刀端部,其中 F_{Ax} 、 F_{Ay} 分别为 A 点处在 X 和 Y 方向的受力; F_{τ} 为刮刀搅拌时的切向载荷; F_n 为刮刀搅拌时的径向载荷; G 为清淤盘的自身重力; Δz_{AO} 表示 A 点和 O 点在 Z 方向的垂直距离; M_O 、 M_C 分别表示在 O 点和 C 点的力偶。

由图3和式(1)~式(4)分析可知, O 、 C 两处受到双向力偶作用,清淤盘应力最大处在 O 点和 C 点。

2.2 优化前有限元静力学分析

在清淤盘旋转刮削的清淤过程中,刮刀承载的刮削力是影响清淤盘正常工作的危险外载荷。笔者将考虑外载荷最大时,集中作用在刮刀前端为极限危险工况,采用有限元静力学分析的方法,对该结构进行静力分析,以得到关键零件的变形和应力云图,其中主轴和刮刀选取结构钢材料,基盘和扇形盘选取铝合金材料,材料属性见表1。

表1 材料属性

Table 1 Material properties

清淤盘 关键件	弹性模量/ 10 ⁻¹⁰ Pa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
主轴、刮刀	0.21	0.31	7 850
基盘、扇形盘	7.10	0.33	2 770

对清淤盘进行对称简化,考虑到一些细小特征对结构整体的性能影响很小,根据圣维南原理,对部分局部特征如倒角、圆角等进行了适当的简化^[8];对结构进行离散化处理,由于六面体网格相比四面体网格单元数量少,能降低分析误差,适用于几何质量高的结构,选取 HEX Dominant 六面体单元进行网格划分,得到 53 670 个单元和 162 893 个节点,有限元模型见图 4。

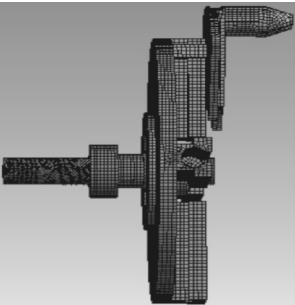
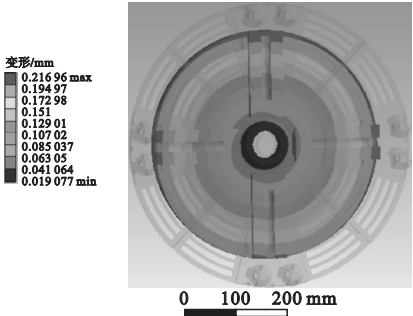


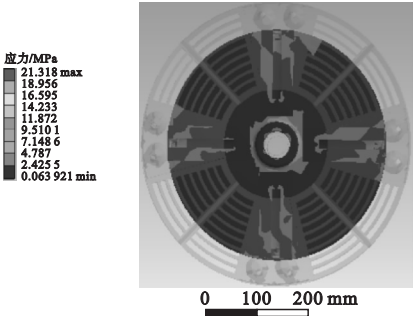
图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

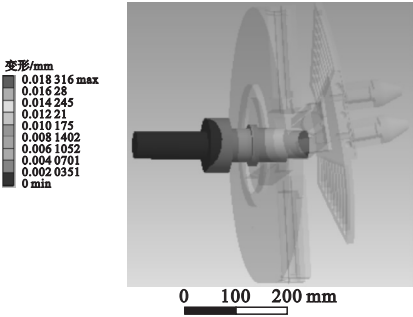
将基盘与主轴接触面施加固定约束,在刮刀端部设置 $F_c = 500\text{ N}$ 和 $F_n = 200\text{ N}$ 的刮削阻力,最后进行求解,静力求解的变形和应力云图如图 5 所示。有限元分析结果见表 2。



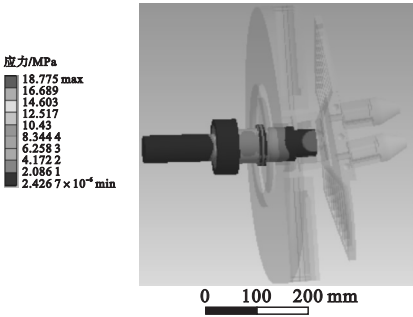
(a)基盘变形图



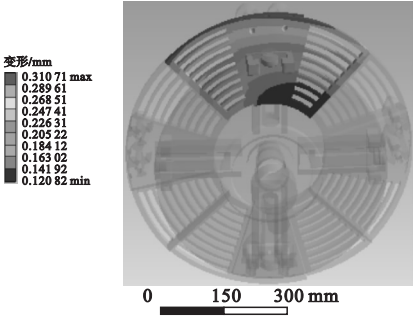
(b)基盘等效应力图



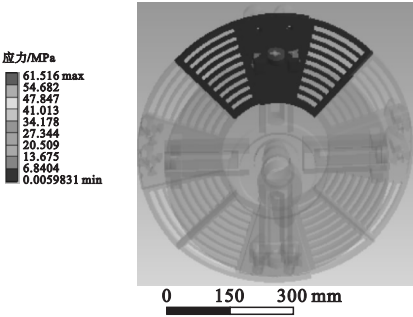
(c)主轴变形图



(d)主轴等效应力图



(e)扇形盘变形图



(f)扇形盘等效应力图

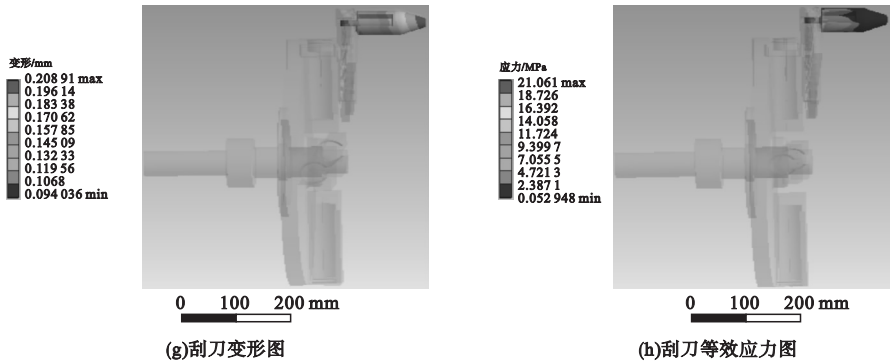


图 5 清淤盘关键零件有限元分析

Fig. 5 Finite element analysis of key parts of dredging plate

表 2 有限元静力分析结果

Table 2 Results of finite element static analysis

清淤盘关键件	最大位移/mm	最大应力/MPa	极值发生位置	质量/kg
基盘	0.216 96	21.318	滑道与螺塞啮合处	9.472 2
扇形盘	0.310 71	61.516	端部,靠近受力刮刀一侧	1.249 7
主轴	0.018 32	18.775	端部	3.837 3
刮刀	0.208 91	21.061	端部和根部	0.495 7

根据以上分析结果得出结论:

(1)根据静力学分析结果,得到主轴和刮刀的变形值均小于 0.5 mm,在理论上并不影响清淤装置的正常工作,同时由于对清淤装置刮削功能的要求,主轴和刮刀的构型无需改变;扇形盘的变形和应力偏大,在滑块根部会产生应力集中,所以需要在满足清淤功能的前提下进行结构优化;基盘的结构对整体装置的轻量化和过滤性能具有重要的影响,需要进行优化设计;所以只对基盘和扇形盘进行优化研究。

(2)根据式(1)~(4)和位移、应力云图分析,对于基盘, *O* 点(主轴的端部)和 *C* 点(滑道与螺塞的接合处)发生了最大的位移和应力;对于扇形盘, *C* 点(滑块的根部)产生了最大应力. 验证了式(1)~(4)的正确性。

3 顺序优化

结构优化就是通过优化的方法找到一种合适的结构,以满足最好的功能需求^[9]. 清

淤盘的性能决定着管道清淤机器人的作业效率与能耗,对清淤盘的要求:质量轻、强度高、耐久性强、迎水率低等. 清淤盘结构优化目标是:在满足清淤功能的前提下,保证结构的强度和稳定性;减轻质量和减小迎水率。

3.1 确定优化方法

对清淤盘直接进行拓扑优化分析,得到伪密度云图如图 6 所示,深色为建议去掉部分. 分析图 6 可以得出:优化结果不满足加工制造要求,与工程应用还有一定距离;优化后的结构无法实现清淤功能. 所以需要寻找适

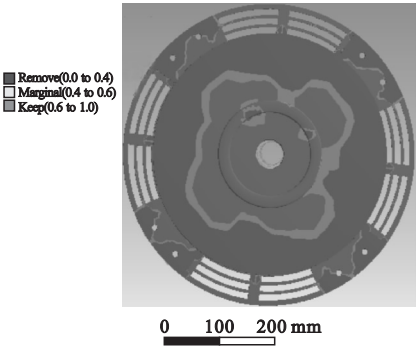


图 6 拓扑优化伪密度云图

Fig. 6 Pseudo-density plot of topological optimization

合的优化方式,以有效地降低清淤盘的质量,同时满足其结构对清淤功能的需求。

参数化优化方法可使结构在设计空间内,在满足约束条件的前提下,通过不断改变参数值,寻找目标函数最佳的一组参数,进而改进结构,完成基于清淤功能的形状优化。拓扑优化主要是在给定材料品质和规定的设计区域内,通过优化设计方法,在给定的外载荷和边界条件下,改变结构的拓扑,以满足应力、位移、频率等约束条件,使得结构的某种性能指标达到最优。拓扑优化最重要的视角就是“拓扑优化的最终构型实际上是传承载响的合理路径”^[10]。

通过以上分析确定优化方法为顺序优化:对基盘采用低层次参数化优化,实现其接近工程应用最佳形状优化;在此基础上,对清淤盘整体(扇形盘+基盘)采用高层次的拓扑优化方法,最大限度地发掘材料潜能,使结构最终达到最理想的状态。顺序优化方法可使结构在功能和便于加工制造的基础上,最大化地发掘材料潜力,完成最优化设计。

3.2 基盘的参数化优化

ANSYS Workbench 中进行优化设计是通过响应面(线)来完成,通过实验数据法(DOE)模块进入到参数优化界面,它通过指定参数作为设计变量、状态变量和目标函数建立分析程序,并以设计变量为自变量,不断改变其数值,迭代计算直至目标函数达到最优。

基盘参数化模型示意图见图 7。其中由 R_1 、 R_2 和 L_1 围成的扇形区域是预设的可优化区域;由于清淤盘的组成呈对称布置状态,为了简化计算时间对优化模型进行对称简化(保留两个相邻扇形清淤盘),并只需求解基盘的 1/4 部分即可。

对该区域的具体优化需要通过给定的参数优化数学模型进行有限元计算求解,参数化优化数学模型见式(5)。

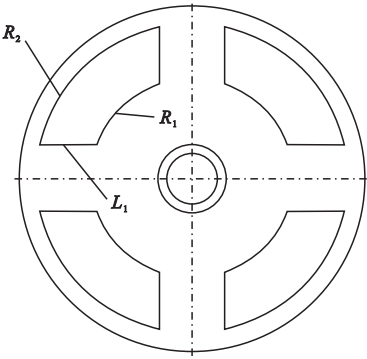


图7 参数优化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of parameter optimization

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } X = [x_1, x_2 \cdots x_i]^T, \\ \min \sum_{i=1}^n x_i, \\ \text{s. t. } \sigma_{\max} \leq [\sigma], \\ \delta_{\max} \leq [\delta], \\ R_{\min} \leq R_1 \leq R_{\max}, \\ R_{\min} \leq R_2 \leq R_{\max}, \\ L_{\min} \leq L_1 \leq L_{\max}. \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: x_i 为单元质量; $f(X)$ 为基盘最小质量; σ_{\max} 为基盘所受最大应力; $[\sigma]$ 为基盘许用应力, $[\sigma] = 2.8 \times 10^8 \text{ Pa}$; δ_{\max} 为基盘最大变形,取 0.5 mm; $[\delta]$ 为基盘许用形变; $90 \text{ mm} \leq R_1 \leq 120 \text{ mm}$; $170 \text{ mm} \leq R_2 \leq 200 \text{ mm}$; $40 \text{ mm} \leq L_1 \leq 110 \text{ mm}$ 。

ANSYS Workbench 提供的优化算法有 6 种,其中多目标遗传算法支持多种目标和约束,其目的是找到全局最优,提供比筛选法更精确的方法,非常适合用于计算全局最大值/最小值,同时可以规避局部最优的陷阱。所以,本次优化算法选择多目标遗传算法进行迭代计算,进行优化设计目标函数和约束条件的设定,设置输入与输出参数的取值范围,其中设定输入参数有 R_1 、 R_2 、 L_1 、 $F_r = 450 \sim 550 \text{ N}$ 和 $F_n = 180 \sim 220 \text{ N}$,输出参数设置有基盘的最大质量、最大应力和最大变形,最后求解。

通过 DOE 实验优化分析模块进行上述优化函数的求解,得到输入与输出关系见图 8、图 9。

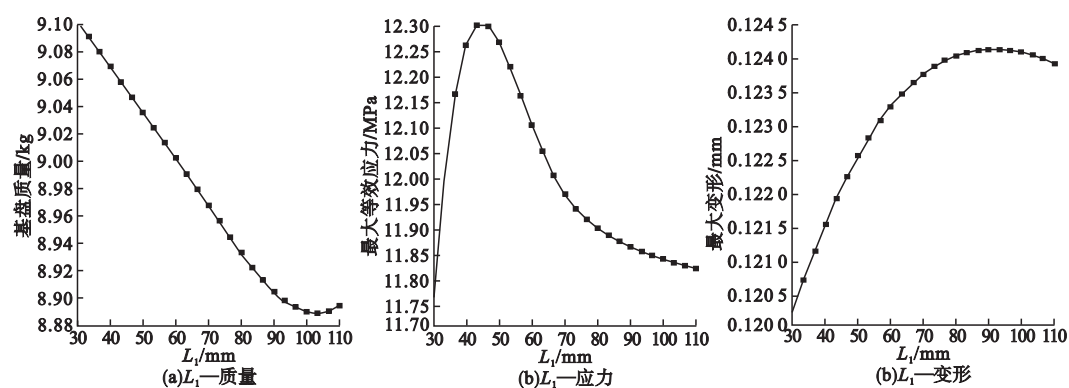


图 8 L_1 与输出参数关系图

Fig. 8 Diagrams of L_1 and output parameters

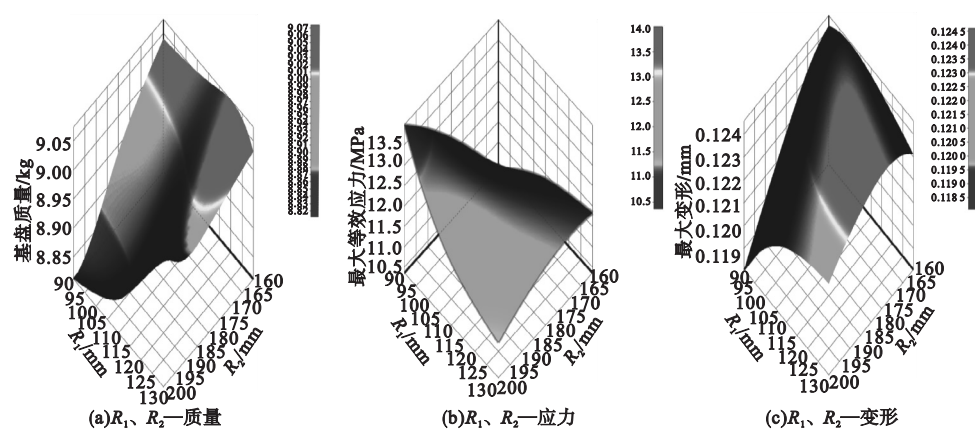


图 9 R_1, R_2 与输出参数关系图

Fig. 9 Diagrams of R_1, R_2 and output parameters

优化结果分析:

(1)由图 8 分析可知,在 $L_1 = 104$ mm 时质量达到最小,最小质量为 8.89 kg;在 $L_1 = 45$ mm 时,基盘的最大等效应力最大,最大值为 12.3 MPa;在 $L_1 = 95$ mm 时,基盘的最大变形量最大,最大值为 0.124 4 mm.

(2)由图 9 分析可知,当 $R_1 = 90$ mm 和 $R_2 = 200$ mm 时基盘的质量最小,最小值为 8.8 kg;当 $R_1 = 90$ mm 和 $R_2 = 200$ mm 时基盘的等效应力最大,最大值为 14 MPa;当 $R_1 = 90$ mm 和 $R_2 = 200$ mm 时基盘的最大变形值最小,最小值为 0.118 mm.

分析得出,最大等效应力小于许用应力 $[\sigma]$,最大变形小于许用形变 $[\delta]$,所以在形状允许区间内确定优化参数 $L_1 = 104$ mm、 $R_2 = 200$ mm、 $R_1 = 96$ mm. 根据参数化优化对基盘重新建模(见图 10). 优化后的基盘质量

为 5.508 3 kg,优化前的质量为 9.472 2 kg,质量减少了 42%. 优化后的结构对于扇形清淤盘过滤功能的实现起到至关重要的作用. 但是基于管道清淤装置功能的实现来进行的参数化优化,只能满足结构功能上最优,对清淤盘整体(扇形盘 + 基盘)还需通过拓扑优化的方法最大化地发掘现有材料的潜能.

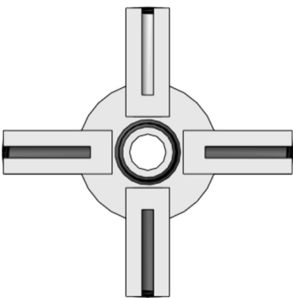


图 10 优化后的基盘结构

Fig. 10 Base disk structure after optimizing

3.3 清淤盘的拓扑优化

目前连续体拓扑优化方法主要有均匀化方法^[11]、变密度法^[12]、渐进结构优化法^[13]以及水平集方法^[14]等。其中变密度法是一种常用的拓扑优化方法,通过优化算法实现相对密度的变化,得到单元相对密度在 $[0, 1]$ 上连续变化的伪密度场,高密度的区域代表实体,相对密度接近 0 的区域代表空洞,从而实现结构拓扑优化设计^[15]。

以结构柔度最小化为目标,以将材料优化的体积缺省比 K (除掉的材料体积 V_p 与初始材料体积 V_0 的比值)、最大应力为约束条件,以材料单元密度为设计变量,建立基于变密度方法的静力状态下的拓扑优化数学模型为

$$\begin{cases} \min C(\rho) = U^T K U = \sum_{j=1}^N \rho_j^P U_j^T k_0 U_j, \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^N V_j \rho_j - V_{\min} \leq 0, \\ K U = F, \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_j \leq 1, \\ V_p = k V_0, \\ \sigma_{\max} \leq [\sigma]. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C(\rho)$ 为结构的总柔度; U_j 、 U 、 F 分别为

单元位移矢量与结构的总体位移、力矢量; k_0 、 K 分别为结构的单元刚度矩阵和总刚度矩阵; ρ 为设计变量相对单元密度; ρ_j 为第 j 个单元的伪密度; P 为惩罚因子, $P \geq 2$; V_{\min} 为机构目标总体积; V_j 为第 j 个单元的体积; N 为单元总数目; ρ_{\min} 为单元相对密度的下限; K 为体积缺省比; V_p 为去掉的材料体积; V_0 为材料的初始体积; σ_{\max} 为基盘所受最大应力; $[\sigma]$ 为基盘许用应力。取惩罚因子 $P = 3.0$, 优化效果最好^[16]。

将清淤盘的模型作简化处理同参数化优化,建立拓扑优化模块,其中 Static Structural 模块的设置求解同优化前静力学分析;设置最大迭代次数为默认值 500, 为避免总体刚度矩阵奇异设置为密度下限为 0.001;设置收敛精度为 0.1%;根据静力学分析确定优化区域为基盘和扇形盘;约束条件为体积约束,体积缺省比 $K = 0.3$;设置优化目标为最小柔度,保留伪密度阈值为 0.3,求解。目标函数最小柔度经过 6 次迭代时收敛,得到拓扑优化后的清淤盘(扇形盘和基盘)的伪密度云图见图 11。

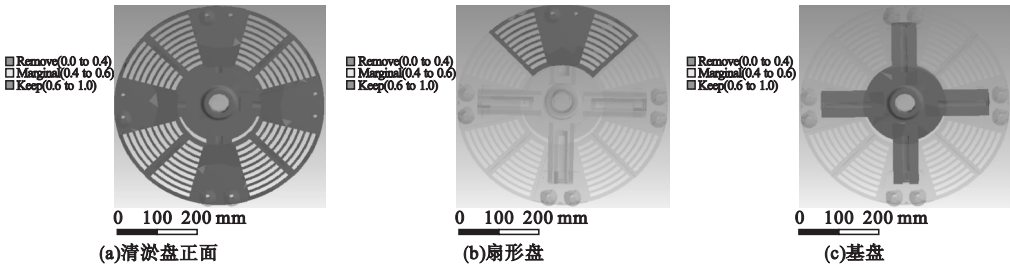


图 11 清淤盘伪密度云图

Fig. 11 Pseudo density plots of dredging disk

优化结果的可制造化处理:优化设计只是一种概念设计手段,其优化结果通常不便于加工制造,因此必须对优化结果进行可制造化处理^[17]。由图 11 和图 5 分析确定优化方案:

(1) 扇形盘的滑块和中下部分需要进行优化;考虑清淤功能和美观,将滑块的外边缘和扇形清淤盘中下部分等多余的部分去掉;为减小滑块根部的应力集中现象,将滑块优化处理,优化前后的扇形盘见图 12。

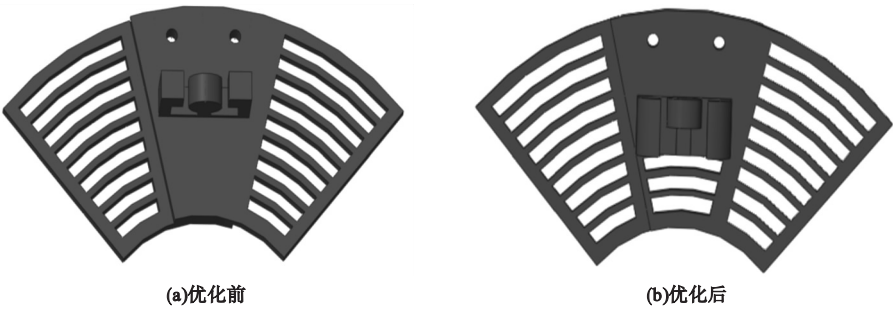


图 12 拓扑优化前后的扇形盘

Fig. 12 Fan disk before and after topology optimization

(2)为制造方便,经过参数化优化后的基盘 结构无需进行优化. 优化前后对比见表 3.

表 3 目标参数优化前后对比

Table 3 Comparison of target before and after parameter optimization

优化目标	质量/kg		质量改变量/%	迎水面积/mm ²		面积改变量/%
	优化前	优化后		优化前	优化后	
基盘	9.472 2	5.508 3	42	125 663. 7	50 164. 02	60. 1
扇形盘	1.249 7	1.143 9	8. 5	28 064	26 283. 26	6. 34

分析表明,优化后的基盘质量较原始结构减轻了 42%,迎水面积减少了 60.1%,优化效果显著,达到目标要求;优化后的扇形盘较原始结构减轻了 8.5%,迎水面积减少了 6.34%. 总体结构满足清淤作业要求.

4 优化后清淤盘静动态分析

4.1 静态对比分析

改进后对清淤盘进行静力学分析,有限元设置同优化前,得到清淤盘总体、基盘和扇形盘的变形和应力云如图 13 所示. 优化前后静力学对比分析结果见表 4.

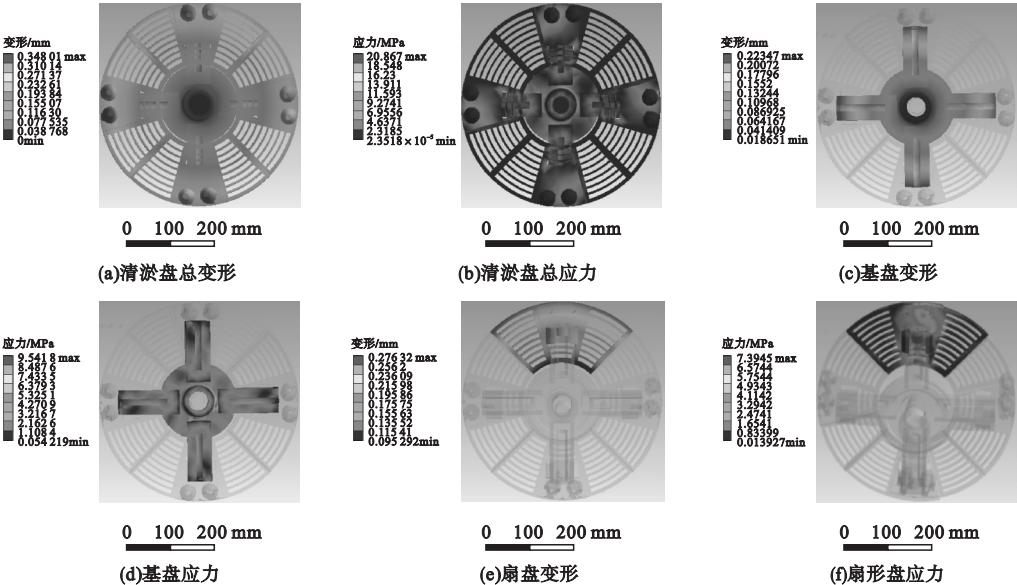


图 13 优化后静力学分析

Fig. 13 Static analysis after optimization

表 4 优化前后静力学对比分析

优化目标	最大变形/mm		变形改变量/%	最大应力/MPa		应力改变量/%
	优化前	优化后		优化前	优化后	
基盘	0.216 9	0.223 5	3.04	21.318	9.541 8	55.24
扇形盘	0.310 71	0.276 3	11.07	61.516	7.394 5	87.97

分析数据表明,优化后的基盘的变形量较优化前变化不大,均满足设计要求,最大应力减小 55.24%;优化前扇形盘的最大变形减小 11.07%,最大应力减小 87.97%.基盘与扇形盘的优化效果显著,满足结构强度和刚度的要求.

4.2 优化前后模态对比分析

模态分析法是凭借振动系统的模态参数来对结构的动态性能进行分析、预测、评价和优化的方法^[18].清淤装置的固有频率是其动态特性的一个主要指标,提高清淤装置的固有频率,可以提高清淤装置的抗振能力,避免装置的振动导致机构连接松脱,所以对清淤装置进行模态分析是对该装置设计和优化的有效依据和手段^[19-20].

模态分析计算方程:

$$(K-\omega_i M\{\varphi_i\})=0.$$

(7)

式中: K 为刚度矩阵; M 为质量矩阵; ω_i 为振动频率; φ_i 为模态固有振型,结构要求是线弹性的,无阻尼.

在空载状态下,对清淤盘整体进行有限元模态分析,有限元设置同静力学分析,求解.得到前四阶模态频率见表5.

表 5 顺序优化前后模态频率对比

阶数	频率/Hz		改变量/%
	优化前	优化后	
1	170.83	238.71	39.73
2	171.21	242.69	41.75
3	184.22	243.38	32.11
4	260.99	266.44	2.09
5	265.49	328.34	23.67
6	327.21	365.28	11.63

从表5可以看出,优化后,前6阶固有频率均有显著提高(平均提高25.16%).设计清淤作业为低速重载,转速为100~600 r/min(1.67~10 Hz),远远小于其固有频率,满足振动稳定性要求.

5 结 论

(1)在刚度基本不变且满足要求的情况下,清淤盘大大降低了质量和应力,减小了迎水面积.

(2)固有振动频率增加,振型趋于规则,可根据模态频率设计转速,达到避免共振的目的.

(3)从低层次的参数化优化到高层次的拓扑优化,提出了一种新的结构优化思路,对于具有特定功能要求的结构的优化设计,具有一定的参考价值.

参考文献

[1] 曹建树,徐宝东,鲁军,等.蠕动式污水管道清淤机器人[J].机床与液压,2014,42(21):50-53.
(CAO Jianshu, XU Baodong, LU Jun, et al. Sewer cleaning inspection robot based on peristaltic walking [J]. Machine tool & hydraulics, 2014, 42(21): 50-53.)

[2] 孙晓辉,丁晓红.结构多目标拓扑优化设计[J].机械设计与研究,2012,28(4):1-4.
(SUN Xiaohui, DING Xiaohong. Research on multi-objective topology optimization design methods for structure [J]. Machine design & research, 2012, 28(4): 1-4.)

[3] 焦洪宇,周奇才,吴青龙,等.桥式起重机箱型主梁周期性拓扑优化设计[J].机械工程学报,2014,50(23):134-139.
(JIAO Hongyu, ZHOU Qicai, WU Qinglong, et al. Periodic topology optimization of the box-type girder of bridge crane [J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(23): 134-

- 139.)
- [4] 应济,李长勇. 注塑机后模板顺序优化设计研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 937-941.
(YING Ji, LI Changyong. Sequential optimization design research on rear mould board of injection machine [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2006, 40(6): 937-941.)
- [5] 姜衡,管贻生,邱志成,等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.
(JIANG Heng, GUAN Yisheng, QIU Zhicheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of a vertical machining center based on response surface method [J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(11): 125-133.)
- [6] 王宗彦,吴淑芳,苏铁熊. 机械结构参数化三级优化设计方法研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9): 2093-2106.
(WANG Zongyan, WU Shufang, SU Tiexiong. Research and implement on parameterized three-level optimization design for mechanical structure [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2014, 20(9): 2093-2106.)
- [7] QIU F S. Vertical tail topology optimization design based on the variable density method with constraint factor [J]. Applied mechanics and materials, 2013(300/301): 280-284.
- [8] 刘远东,尹益辉,余绍蓉. 螺栓-法兰连接结构的多目标优化设计研究[J]. 机械强度, 2010, 32(4): 656-659.
(LIU Yuandong, YIN Yihui, YU Shaorong. Structural optimization of a bolt-flange structure based on multi-objective optimization method [J]. Journal of mechanical strength, 2010, 32(4): 656-659.)
- [9] 姚寿文. 机械结构优化设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
(YAO Shouwen. Optimum design of mechanical structure [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology press, 2015.)
- [10] 隋允康,叶红玲. 连续体结构拓扑优化的 ICM 方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
(SUI Yunkang, YE Hongling. ICM method for topological optimization of continuum structures [M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [11] BENDSE M P, KIJUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [12] BENDSE M P. Optimal shape design as a material distribution problem [J]. Structural and multidisciplinary optimization, 1989, 1(4): 193-202.
- [13] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers & structures. 1993, 49(5): 885-896.
- [14] ALLAIRE G, JOUVE F, TOADER A M. A level-set method for shape optimization [J]. Comptes rendus mathématique, 2002, 334(12): 1125-1130.
- [15] 刘少玉,曹衍龙,梁学裕,等. 注塑机前模板的拓扑与参数优化设计[J]. 机械设计与制造, 2010(10): 229-231.
(LIU Shaoyu, CAO Yanlong, LIANG Xueyu, et al. Topological and parameter optimization design on front platen of injection molding machine [J]. Mechanical design and manufacturing, 2010(10): 229-231.)
- [16] 李志杰,张金,朱剑,等. 基于变密度法的双向载荷横梁拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 179-182.
(LI Zhijie, ZHANG Jin, ZHU Jian, et al. The topological optimization design of beam bearing two-way loads with variable density method [J]. Mechanical design and manufacturing, 2017(8): 179-182.)
- [17] 杜子学,罗辉. 基于拓扑优化的厢体骨架结构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2016(2): 236-240.
(DU Zixue, LUO Hui. Structure optimize design of van body skeleton based on topology optimization [J]. Mechanical design and manufacturing, 2016(2): 236-240.)
- [18] 杨明亚,杨涛,汤本金. ANSYS 在数控机床模态分析中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2006, 35(17): 40-43.
(YANG Mingya, YANG Tao, TANG Benjin. ANSYS applied in modal analysis of CNC machine tools [J]. China manufacturing informatization, 2006, 35(17): 40-43.)
- [19] 谢远森,李意民,周忠宁,等. 旋转预应力条件下的叶片流固耦合模态分析[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(4): 34-37.
(XIE Yuansen, LI Yimin, ZHOU Zhongning, et al. Modal analysis of fluid-solid coupling blade under rotational and pre-stress condition [J]. Noise and vibration control, 2009, 29(4): 34-37.)
- [20] 刘厚林,徐欢,王凯,等. 基于流固耦合的余热排出泵转子模态分析[J]. 流体机械, 2012, 40(6): 28-32.
(LIU Houlin, XU Huan, WANG Kai, et al. Modal analysis for rotor of residual heat removal pump based on fluid-solid coupling [J]. Fluid machinery, 2012, 40(6): 28-32.)