[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.06.015

基于 ANSYS_Workbench 的深海取样 外筒多目标优化设计

付 平,殷 硕*,张明赛,王晨旭

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘 要:为了安全、稳定地收集深海浮游微生物,课题组对具有保温、保压和过滤功能的取样外筒进行了优化设计。首 先,对取样外筒进行三维建模,通过 ANSYS_Workbench 软件对取样外筒进行静力学分析;其次,对取样外筒的设计参数 进行灵敏度分析,筛选出对输出结果(质量、最大变形和最大等效应力)影响程度比较大的参数,通过响应面法构建设计 参数和输出结果之间的近似函数关系。结果表明:课题组的研究在保证取样外筒质量较小的前提下,提高了其综合强度 和稳定性,节约了设计成本,提高了材料利用率。

关键 词:取样外筒;多目标优化;灵敏度分析;响应面法;多目标遗传算法;综合强度
 中图分类号:P715.1;TH766
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2021)06-0090-06

Multi-Objective Optimization Design of Deep-Sea Sampling Outer Cylinder Based on ANSYS_Workbench

FU Ping, YIN Shuo*, ZHANG Mingsai, WANG Chenxu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: In order to collect deep-sea planktonic microorganisms safely and stably, the sampling outer cylinder with heat preservation, pressure holding and filtration functions was optimized. Firstly, the three-dimensional modeling of the sampling outer cylinder was carried out through ANSYS_ Workbench software, and static analysis was carried out on the sampling outer cylinder. Second, the sensitivity analysis of the design parameters was carried out on the sampling outer cylinder, and the parameters that having a great influence on the output results (mass, maximum deformation and maximum equivalent stress) were selected. The approximate functional relationship between the design parameters and the output results was established by response surface method. The results show that on the premise of ensuring the small quality of the sampling outer cylinder, the comprehensive strength and stability are improved, the design cost is saved and the material utilization rate is improved.

Keywords: sampling outer cylinder; multi-objective optimization; sensitivity analysis; response surface method; multi-objective genetic algorithm; comprehensive strength

近几年,深海浮游微生物的研究吸引了大批科学家们的关注^[1],深海浮游微生物一般生活在深海、高压的黑暗环境中,是一种新兴的生物资源,具有较高的科研价值。浮游微生物能够在恶劣的环境下生存,具备了浅海和地面生物所不具备的基因,因此研究深海

浮游微生物的在生命的起源、生物学、新型基因和药品 的研发以及环境保护等许多方面都有着重要的意 义^[2]。取样筒在研究深海浮游生物过程扮演重要角 色。在深海取样筒下端管道外接蓄能器,预先将取样 筒的压强调为取样地点的实际压强,当取样过程完成

收稿日期:2021-06-29;修回日期:2021-09-14

基金项目:国家重点研发计划专项课题(2016YFC031903);国家重点研发计划专项课题(2016YFC0302203)。 第一作者简介:付平(1972),女,山东青岛人,教授,硕士生导师,主要研究方向为高压及超高压技术及其应用、深海装备。通信 作者:殷硕(1997),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为深海关键技术与装备。E-mail:740531632@ qq. com 后,取样管道阀门关闭,保压管道阀门打开,使取样筒 实现保压功能^[34]。取样外筒在整个取样过程中至关 重要,是收集深海浮游微生物的重要容器。

优化通常指的是设计结果的最大化或者最小化, 优化设计可以很大程度上提高零件的综合性能^[5]。 优化设计中使用频率较高的模块是 Design Exploration 多目标驱动优化分析模块。为了让物体的多个输出结 果实现最优,往往需要提供多个优化目标。目前,互联 网的飞速发展使基于 CAE 技术的优化设计得到了较 大发展,并且应用于众多实际工程设计当中。

1 三维模型的建立

深海浮游微生物的取样主要依靠取样系统,其三 维结构如图1所示。



图 1 取样系统结构 Figure 1 Structure of sampling system

取样筒是取样系统中的重要组成部分,其设计放 弃了传统法兰结构,采用"双层筒体+活寒"结构^[6]。 如图2所示,取样筒双层桶体间填充保温材料,防止温 度出现变化;同时在保温材料层与内胆间放置小型温 度传感器,以实时监测温度情况。活塞为一倒置圆筒 形结构,活塞底部采用固定圈将微生物滤膜固定于活 塞上,使滤膜与活塞间形成一封闭腔。取样时大量海 水由上方入口涌入,经微生物滤膜过滤,其余海水则由 筒壁下方出口排出,深海浮游微生物被截留在活塞腔 内,得到高浓度浮游微生物海水样本。内胆与活塞间 则采取支撑环固定,活塞上有2个孔,分别连接一个进 入方向与导出方向的单向阀,桶体上开有一个洞,连接 一个三通管,三通管的另外两端一端连接蓄能器,另一 端连接电磁阀作为控制出口。优化既要满足储存样本 的空间需求,又要实现取样筒的质量轻量化,并且能够 让取样外筒的综合强度得到较大提高。





此次优化只对取样外筒进行参数优化,在 SolidWorks软件中进行取样外筒的设计,其结构如图3 所示。



图 3 取样外筒结构 Figure 3 Structure of outer sampling cylinder

2 取样外筒的有限元分析

2.1 模型导入和材料添加

课题组采用 SolidWorks 对取样筒进行三维建模, 并将三维模型导入 Workbench 中进行参数优化。优化 之前,首先设置参数的变量名。将"DS_"加在每个参 数的变量名前,方便参数的识别。打开 Workebnch 软 件,依次点击 Static Structure, Geometry,在 Geometry 中 点击 Import,导入取样外筒三维模型。在 Geometry 中 查看导入的模型,可以看到所有的设计参数均被识别, 点击设计变量前端的方框,出现"P"字样的,设置为后 续优化的参数。

材料选择 7075 铝合金,密度为2 850 kg/m³,弹性 模量为71 GPa,泊松比为0.3,屈服强度是 455 MPa,抗 拉强度是 524 MPa。

2.2 划分网格

在静力学分析模块 Model 中点击 Generate Mesh 进行系统自动网格划分,观察网格的质量。为了进一

步提高网格质量,兼顾计算精度和速度,重新选择网格 划分的方法,点击 Mesh-insert-Method,在 Geometry 中 选择整个三维模型,选择 Patch Independent,将最小尺 寸限制定义为1 mm。网格划分如图4所示,网格质量 分布柱状图如图5所示。从图5可以看出,取样外筒 的元素数量基本集中在0.9 左右,说明网格质量良好。



Figure 5 Mesh quality

2.3 施加约束和载荷

取样筒在工作时,整个取样系统固定在支撑架上, 所以在取样外筒的顶端施加固定约束 Fixed Support。 在深海的取样过程中,搭载蛟龙号的深海取样装置一 般能够下潜到深海 6~7 km,取样外筒的裸漏部位会 受到海水的挤压,对取样外筒的外壁沿径向施加压力, 施加的径向力为 30 MPa;对取样外筒的筒底沿 Y 轴方 向施加轴向力为 28 MPa。

2.4 求解

在 Solution 上选择整体变形量、等效应力和等效 应变,并求解。最终获得取样外筒的整体变形云图、等 效应力云图和等效应变云图如图 6~8 所示。

图 6 中取样外筒的外壁变形量由两端向中间呈阶梯状递增,其中筒壁中间的变形量最大,为 14.459 μm,远小于取样外筒的限定最大变形量 48.000 μm。 因此,结构设计符合要求,可以进行进一步地优化。 图 7 所示的等效应力云图可以看出,等效应力最 大值为 188.79 MPa,小于 7075 铝合金的屈服极限值 455.00 MPa,并且有相对较大的应力值的安全范围。 由图 7 可知,取样外筒外壁四周所受应力较小,中间部 位所受应力相对较大,外壁正面所受应力呈对称分布, 均在合理范围内。取样外筒底部承受应力较大,底部 出口处承受应力值最大。







图7 等效应力云图







[制造・使用・改进]

3 灵敏度分析

3.1 实验对象的选取

在取样外筒的轻量化过程中,如果只考虑取样外 筒的质量,可能会由于质量的改变导致取样筒的其他 性能发生变化,需要考虑的因素包含取样外筒的最大 等效应力和最大变形量^[7]。所以在参数灵敏度分析 当中,除了要分析各个输入参数对最大等效应力和最 大变形量的影响之外,还要分析各个输入参数对质量 的影响。

实验因子包含取样外筒的质量、取样外筒最大等 效应力和取样外筒最大变形量。

3.2 设计参数

灵敏度分析不仅可以显示设计变量对输出结果的 影响,而且能够直观的看出各设计变量对于输出结果 影响程度的大小,因为设计变量都不是单一的,所以需 要灵敏度分析^[8]。通过分析,可以得出灵敏度柱状 图,显示出3个设计参数对目标结果影响程度的大小。 灵敏度分析柱状图如图9所示。





Figure 9 Sensitivity histogram

由图9可知,取样外筒的半径 D_1 和取样外筒外壁 的厚度 D_5 这2个设计参数对输出结果的影响较大,这 2个设计参数对每个输出结果的灵敏程度都在0.6以 上;取样外筒的高度 D_6 的灵敏度在0.5 左右。

4 响应面的构建

4.1 参数设置

实验设计方法是设计空间内测试样本的有效方法,是从所有实验因子组合中选出最合适的组合进行测试的方法,通过模拟数据的方式替代实际测试,达到降低设计成本和缩短实验周期的效果^[9]。将3个设计参数 *D*₁,*D*₅,*D*₆ 设定为输入参数,将取样外筒的的质

量、取样外筒所受最大等效应力以及取样外筒最大变 形量设定为输出结果,设定设计参数的变化范围如表 1 所示。

表1 设计参数的变化范围

Table 1	Variation	range	of	design	parameters
---------	-----------	-------	----	--------	------------

设计参数(变量)	D_1/mm	D_5/mm	D_6 /mm
初始值	125.0	14.0	13.0
最大值	137.5	15.4	14.3
最小值	112.5	12.6	11.7

课题组采用了最优填充空间设计法,设计空间内 均分分布所有设计点,空间填充能力强,能够覆盖整个 空间,对后期构建响应面模型做好铺垫。样本点类型 为自定义,设计类型为最大熵,设计样本点数为 30,最 大编码数为 10,系统基于 Monte Carlo 抽样技术自动生 成各设计参数点,最终可以得到全部设计参数的计算 结果,用作后期响应面的拟合数据^[10]。

4.2 模型的建立

响应面法是一种搭建近似模型的方法,利用筛选 实验来选定优化方向,按照质量最轻方向和满足约束 条件寻找最优解,规定好收敛条件,就能够得到最佳设 计结果。其模型构建的优点是精度高,并且可以同时 显示预测位置的预测误差和预测值^[11-12]。采用最小 二乘法,进而拟合出一个响应面函数,从而得到近似的 模型,并将原来的隐形函数关系变成显式函数,建立起 输出结果与设计参数之间的明确关系。通常情况下, 响应面模型选用比较精准的二阶模型,*n* 个设计变量 的二次多项式模型可以表示为:

$$G(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{1=i < j}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\circ}$$

式中:G(x)为拟合函数;x为设计变量; ε 为随机误差; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ii}, \alpha_{ij}$ 为待定系数,其个数共 有Z = (n+1)(n+2)/2,未知参数由最小二乘法确定 时,实验点数必须大于 Z_o

二次多项式构建完之后,进行数学模型的建立。 优化设计的3要素分别为设计变量、目标函数和约束, 得到取样外筒设计参数与输出结果之间的近似函数关 系之后^[13],建立取样外筒优化设计的数学模型,如下 所示:

 $\begin{array}{l} \min S(X) = \min \left[S_1(X) , S_2(X) , S_3(X) \right]_{\circ} \\ \text{s. t} \qquad S_2(X) \leqslant 455 \text{ MPa}; \\ S_3(X) \leqslant 0.048 \text{ mm}; \\ 112.5 \text{ mm} \leqslant x_1 \leqslant 137.5 \text{ mm}; \\ 12.6 \text{ mm} \leqslant x_2 \leqslant 15.4 \text{ mm}; \end{array}$

11.7 mm $\leq x_3 \leq 14.3$ mm_o

式中:S(X)为目标函数; $S_1(X)$ 为质量; $S_2(X)$ 为最大 应力; $S_3(X)$ 为最大变形。 x_1 为取样外筒的半径; x_2 为 取样外筒外壁的厚度; x_3 为取样外筒底端厚度。

根据 Kriging 模型,利用协方差函数对平均值为0 的随机过程进行插值,从而得出模拟设计参数与目标 结果之间的响应关系^[14]。设计点观测值与响应面函 数预测值之间的数值分布如图 10 所示。从图中可以 看出,所有的点均匀分布在与横坐标呈 45°的同一条 直线上,说明其拟合精度很高。



图 10 归一化图



从图 11 可以看出,变量 D_1 和 D_5 与取样外筒的质量呈正相关关系,质量随着设计变量 D_1 和 D_5 的增大而增大,在 D_1 和 D_5 最大点处,质量最大。



图 11 质量响应面 Figure 11 Mass response surface

从图 12 可以看出,最大变形随着 *D*₁ 的增大而增 大,呈正相关。而最大变形随着 *D*₅ 的增大而减小,呈 负相关。当 *D*₁ 取得最大值时,最大变形量最大,当 *D*₅ 取得极小值时,最大变形量最大。



图 12 最大变形响应面



从图 13 可以看出, D₅ 对取样外筒最大等效应力 影响较小, D₁ 对取样外筒最大等效应力影响较大, 最 大等效应力随着 D₁ 的增大而增大, 呈正相关。最大等 效应力随着 D₅ 的增大而减小, 呈负相关。



图 13 最大等效应力响应面 Figure 13 Maximum equivalent stress response surface

4.3 多目标遗传算法求最优解

多目标遗传算法是在自然环境条件下,通过仿真 生物的遗传和进化,不断淘汰和进化过程,逐渐形成的 一种遗传算法。在满足所有约束和各个目标函数的条 件下,求解一组最优解集。多目标遗传算法^[15-17]为处 理多个设计目标之间存在矛盾的状况提供了设计思 路,效率较高。

通过 ANSYS_Workbench 中的 Optimization 模块进 行优化计算得到以下 3 组备选设计点如表 2 所示。

4.4 分析优化结果

由表 3 可知,3 组设计点的最大变形都没超过 48 μm,最大等效应力都没超过材料的许用应力 455 MPa,因此 3 组设计点均符合要求。优化的主要目的 是在满足取样外筒质量最轻化的前提条件下,尽可能 表2 备选设计点

• 95 •

Table 2 Alternative design points							
序号	D_1/mm	D_5/mm	D_6/mm	质量/kg	最大等效应力/MPa	最大变形量/mm	
Ι	112.864 1	14.427 9	13.814 0	23.068 7	128.842 5	0.011 3	
П	112.784 6	13.287 7	13.446 3	21.743 5	138.276 4	0.012 3	
Ш	112.8644	14.014 3	13.145 8	22.478 8	138.488 8	0.011 6	

让取样外筒的最大变形和最大应力降低,使其综合强 度得到提高。综合分析,排除设计点Ⅰ,Ⅲ,选择设计 变量Ⅱ为最优设计点。与优化前的参数相比较,质量 降低了11.27%,最大变形降低了14.89%,最大等效 应力降低了26.70%,Ⅱ组质量降低的最大,满足质量 最轻化需求,是本次优化的最优结果。多目标优化前 后比较结果如表3所示。

表3 多目标优化前后结果比较

Table 3 Comparison results before and

after multi-objective optimization

	质量/kg	最大 变形量/μm	最大等效 应力/MPa
优化前	24.505 3	14.5	188.650 9
优化后	21.743 5	12.3	138.276 4
变化率/%	-11.27	- 14.89	-26.70

5 结语

课题组采用 ANSYS_Workbench 软件对深海浮游 微生物取样外筒进行优化设计。首先,对取样外筒进 行有限元分析,得到取样外筒整体变形云图、等效应力 和应变云图;然后,运用响应面法进行优化,拟合出设 计变量与输出结果之间的函数关系,并构建数学模型, 采用多目标遗传算法,生成优化设计的 Pareto 解集,考 虑和分析所有输出结果;最后,分析和比较所有数据, 确定最优设计点并得出最优参数尺寸。与优化前的参 数相比较,质量降低了 11.27%,最大变形降低了 14. 89%,最大等效应力降低了 26.70%。优化后既实现 了取样外筒的质量轻量化,又能显著提高取样外筒的 综合性能,优化结果较好,并且可以进一步调整整体结 构的尺寸,让主体取样筒达到最优化。

参考文献:

[1] 肖湘,王风平.深海微生物的研究开发[J].中国抗生素杂志, 2006,31(2):87-91.

- [2] 高振会,史先鹏.深海技术与可持续发展[J].海洋开发与管理, 2011,28(7):41-46.
- [3] 杨磊,丁忠军,李德威,等.基于蛟龙号的深海小型岩芯原位取样装置[J].海洋技术学报,2014,33(1):115-120.
- [4] 李阳.螺旋推进式水下航行器结构设计与外形优化[D].青岛:青岛科技大学,2020:61.
- [5] 杨书麟.水下机器人耐压舱结构设计及优化[D]. 赣州:江西理工 大学,2020,26(4):56-60.
- [6] 欧阳爱良.海底沉积物孔隙水原位采样柱设计研究[D].湘潭:湖 南科技大学,2017,42(3):55-67.
- [7] 程相文,刘钊,魏荣,等.基于 ANSYS Workbench 带式输送机传动 滚筒的多目标优化设计[J].矿山机械,2013,41(3):70-73.
- [8] 田明华,谢亮.基于 ANSYS Workbench 的轮盘多目标优化设计
 [J].市政技术,2020,38(1):268.
- [9] 刘承杰,李倩,罗鹏,等.基于响应面法的V带轮多目标优化设计
 [J].应用力学学报,2018,35(1):152.
- [10] 曾漾,周俊,沈志远,等.基于响应面法的复合材料舱壁结构优化 设计[J].重庆大学学报,2020,43(6):86.
- [11] JACOBS P H. A newrechargeable dialysis pore water sampler for monitoring sub-aqueous in-situ sediment caps[J]. Water Research, 2002,36(12):3125.
- DI MEO C A, WAKEFIELD J R, CRAY S C. A new device for sampling small volumes of water from marine micro-environments
 [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999,46(7):1299.
- [13] 陈浩然,项忠珂,程文明,等.基于响应面和遗传算法的C型梁确 定性多目标轻量化设计[J].机械强度,2021,43(3):636-642.
- [14] 王海东,李贵林,王肇喜,等.基于多目标遗传算法的三轴振动夹具结构参数优化设计分析[J].航天器环境工程,2020,37(2):
 156.
- [15] 侯振方,胡海欧,张爱兵,等.车门结构多目标轻量化研究[J].机 电工程,2020,37(4):359-364.
- [16] 付军豪,刘康,胥云,等.基于 GAPSO 算法的转台齿轮传动多目标优化研究[J].机电工程,2020,37(4):420-424.
- [17] 谭俊哲,边冰冰,司先才,等.基于多目标遗传算法的潮流能水轮 机专用翼型优化设计[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2020,50(7):127-134.