

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.02.009

基于 CSSO 算法的抛弃式探头结构优化设计

宋海润, 陈振涛, 王晓蕾, 杨会兵

(国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 210000)

摘要:在海洋水文探测系统中,抛弃式探头是整个探测系统的核心,也是探测工作的执行者。为了得到准确有效的探测数据,就需要对抛弃式探头做进一步的优化设计。采用多学科设计优化方法(multi-disciplinary design optimization, MDO)中的并行子空间优化方法(concurrent subspace optimization, CSSO)对抛弃式探头进行设计。首先对系统进行分析,得到系统分析的近似模型,其次对并行的子学科进行优化,再次更新系统分析模型,最后验证优化模型的收敛性。结合抛弃式探头的结构,选取了头部进行了优化设计,给出了圆环型、半圆型、圆锥型 3 种设计方法。利用 CAD 软件画出三维仿真模型,然后用 CFD 软件进行流体工作环境仿真,最终确定半圆型头部探头为最优化设计探头。

关键词:抛弃式探头;多学科优化设计方法;并行子空间优化方法;收敛性检验

中图分类号:TH764 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2019)02-0055-08

抛弃式探头(以下简称探头)集压力传感器、温度传感器等于一体,是海洋水文监测系统中获取水深、温度等气象水文要素的执行者。由于其功能要求,探头在设计中要满足:外形小、质量轻、功耗低、测量精度高、下落速度慢、耐高压好等特点^[1]。

从 20 世纪 30 年代开始,国外就开始了抛弃式探头的研究,首先研发出了抛弃式温度计(XBT, Expandable Bathythermograph 船载抛弃式温深仪)系列探头,而后相继研发出了船载抛弃式温盐深仪、投弃式海流剖面仪(Expendable Current Profiler, XCP)等系列探头,能够在一次任务航线上,利用同一种探测平台快速获取远海目标海域的多要素实时数据,是至今机动性最好的远海探测手段。国外抛弃式探头生产主要来自美国的 Sippican 公司和日本的 T.S.K 公司,其抛弃式探头技术一直处于世界领先地位,且对外长期封锁。国内对抛弃式探头的研究始于 20 世纪 80 年代,处于起步较晚但进步较快的状态,在国家自然科学基金的资助下,针对机载抛弃式温、盐、深探头的相关技术展开研究,采

用了与国外系统基本相同的组成结构和运行机制。目前,已经基本掌握了 XBT 探头的设计与制作。同时,也已经开始了对 XCP 系列探头的研究。国外海洋水文探测系统的探头大部分外形较大,质量较重,下沉速度较快。相比之下,本文最终仿真设计的探头具有外形小、质量轻、速度慢等优点。

探头的优化设计是一个十分复杂的系统工程,主要涉及到材料科学、流体力学、电子技术、传感器技术、工程结构等多个学科,且各个子学科之间既相互独立又相互关联。利用 MDO 方法^[2]在多个学科中协调折中从而得到最优设计方案。MDO 方法提出了对各个学科进行并行设计的方法,并提供了对不同设计需求相适应的环境框架与算法。在得到最终设计方案后,利用计算流体力学^[3](Computational Fluid Dynamics, CFD)进行探头工作环境的仿真,验证探头的收敛性,以判断其是否满足实际需要。

MDO 的算法可分为:单级优化算法和多级优化算法^[4]。并行子空间优化算法(CSSO)是一种非分层

收稿日期:2018-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41406107)

作者简介:宋海润(1996-),男,硕士,主要研究方向为测试计量与战场环境检测。E-mail:songhairun1996@163.com

通讯作者:陈振涛(1983-),男,博士,讲师,主要从事军事气象海洋探测理论与技术。E-mail:cz1212@126.com

的多级优化算法。CSSO 在学科间的耦合采用近似简化的策略,将系统设计变量分到相关的子学科中进行优化,能在单个学科内实现最优设计,缩短了设计周期,提高了设计效率。

黄银水等^[5]在理论上分析了在探测过程中线圈对机载抛弃式温度剖面测量系统 (Airborne Expendable Thermograph, AXBT)探头的影 响;井彦明等^[6]进一步研究了 AXBT 海洋测深的功能;张瑞等^[7]对不同攻角下 XCP 探头的流体动力特性进行了数值计算;刘凤等^[8]借助 Inventor 软件快速成型技术建立了探头零部件的三维实体模型,并利用 3D 打印技术完成模型的初步制作;陈振涛等^[9]结合国内外对探头的研究、基于协同优化算法建立了探头的基本模型,设计出了探头的基本结构。本文主要基于 CSSO 算法对探头的外形以及内部结构进行了优化设计。

1 探头的优化设计

1.1 优化模型的建立

根据设计目的,建立了探头的结构模型,如图 1 所示。探头的外形是成流线形的弹状体,主要由头部、密封仓、传感器仓、导流腔、开放仓、尾翼等组成。由于探测需要和探测平台的约束,将探头各项的尺寸指标规定如下:长度 L 为 22 cm,最大横截面半径 R 为 5 cm,最大质量 M_{max} 为 0.8 kg,导流腔半径 r 为 0.5 cm,尾翼半径 R_1 为 2 cm。尖拱部分长度 L_1 为 3 cm,平直段长度 L_2 为 9.5 cm,收缩段长度 L_3 为 6 cm,尾翼部分长度 L_4 为 2.5 cm。

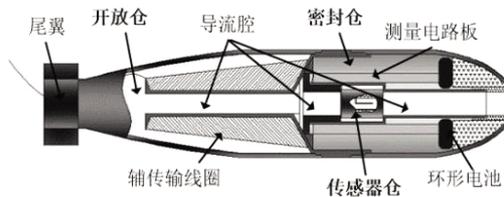


图 1 探头的结构模型

Fig.1 The probe structure model

1.1.1 系统分析 优化的目的是对探头的所有设计参数按照 CSSO 的方法进行计算寻优,在满足所有约束条件的情况下,消除各学科之间的矛盾,从而达到各学科的一致性。

根据探头优化设计的学科组成,可分为材料、电子、结构、流体等 4 个子学科。其优化设计流程如图 2 所示。

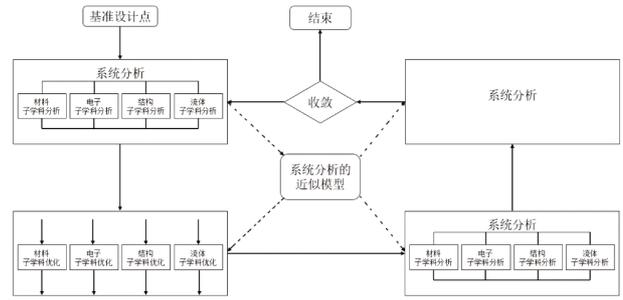


图 2 并行子空间算法流程图

Fig.2 Algorithm flow chart of parallel subspace

以尾翼后截面的中心为原点 O ,以抛弃式探头的中轴线为 X 轴,以导流腔的法线方向为 Y 轴,建立二维平面直角坐标系,如图 3 所示。



图 3 探头概念模型图及其坐标系

Fig.3 Conceptual model diagram of the probe and its coordinates

定义基准设计点:材料子学科设计变量 X_1 ,最大工作压力 P_{max} ,在水下 800 m 时静压 P_1 ,最大动压 P_2 ,材料的种类 A 。电子子学科设计变量 X_2 ,测温方案 H ,传感器所占体积 V_T ,电路板尺寸 Φ_E 。结构子学科设计变量 X_3 ,探头的质量 M ,总排水体积 V ,总容积 V' ,密封仓容积 V_1 ,开放仓容积 V_2 ,传感器仓容积 V_3 ,电路板体积 V_4 ,探头重心与原点的距离 Cg 。流体子学科设计变量 X_4 ,包括运动极限速度 v_{max} 。

系统分析的方程组如式(1):

$$\begin{cases}
 \text{find } f(X_1(P_{max}, P_1, P_2, A), X_2(H, V_T, \Phi_E), \\
 X_3(M, T, V, V', V_1, V_2, V_3, V_4, Cg), X_4(v_{max})) \\
 \text{s.t. } P_{max} \geq P_1 + P_2 \\
 V + V' \leq 306 \text{ cm}^2 \\
 V_2 \geq 80 \text{ cm}^2 \\
 V_3 \geq 5.5 \text{ cm}^2 \\
 M \leq M_{max} \\
 3L/4 \leq Cg \leq L \\
 1.85 \text{ m/s} \leq v_{max} \leq 2.15 \text{ m/s}
 \end{cases} \quad (1)$$

按照并行子空间优化方法的要求,现将系统整体的多个设计变量分到各自子学科内进行分析。

1.1.2 材料子学科分析 由于不同的部位在探头中起到的作用不同,因此对各个部位的材料要求也不相同。现将各仓材料的选择定义为 $X_{li}, i=1, 2, 3$,

分别表示密封仓、传感器仓、开放仓的材料。在水下 800 m 时,探头所承受的静压 p_1 与最大动压 p_2 不能超过探头材料的承受能力 P 。

根据系统设计变量的分解,列出数学分析模型:

$$\begin{cases} \text{find } f(X_1(X_{11}, X_{12}, X_{13})) \\ \text{s.t. } P_1 \leq P(\sigma_s, \sigma_b, \rho) \\ P_2 \leq P(\sigma_s, \sigma_b, \rho) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_s 为材料的屈服强度; σ_b 为材料的拉伸强度; ρ 为材料的密度。

1.1.3 电子子学科分析 电子子学科主要有电路的设计、电路板的制作以及电池的选配。本文重点对电路板的体积和电池的选配进行研究,电路设计部分的内容另文介绍。

根据系统设计变量的分解,列出数学分析模型:

$$\begin{cases} \text{find } f(X_2) \\ V'_1 = V_1 - V_a - V_b - V_c \\ m = M - M_a - M_b - M_c \\ \text{s.t. } S_a = a \cdot L_a \\ V_a = S_a \cdot h_a \\ V_a + V_b + V_c \leq V_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_a, a 分别为电路板截面的长宽; S_a 为电路板的截面积; h_a 为电路板的厚度; V_a 为电路板的体积; V_b 为探头内部提供能量的电池; V_c 为改变探头重心位置预留配重物的体积。

1.1.4 结构子学科分析 探头的结构受多种因素制约,同时也与多个学科存在耦合关系,如密封仓和传感器仓体积的设计与电子子学科有关,外形各方面的设计与流体子学科有关。

根据系统设计变量的分解,列出数学分析模型:

$$\begin{cases} \text{find } f(X_3) \\ L' = L - C_g \\ \text{s.t. } V + V' \leq 306\text{cm}^2 \\ V_1 - V_4 \geq 40\text{cm}^2 \\ V_2 \geq 80\text{cm}^2 \\ V_3 \geq 5.5\text{cm}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: L 为探头的长度; C_g 为探头的重心位置,可以通过预留配重物的质量加以改变; V 为探头总的排水体积; V' 为探头的总容积; V_1 为密封仓的体积; V_2 为开放仓的体积; V_3 为传感器仓的体积; V_4 为电路板的体积。

1.1.5 流体子学科分析 流体子学科主要研究探头在水中的受力情况以及在水中的运动速度。

根据系统设计变量的分解,列出数学分析模型:

$$\begin{cases} \text{find } f(X_4) \\ \text{s.t. } v_{\max} = \sqrt{\frac{2(Mg - F_f)}{C_d \cdot \rho_w \cdot S_d}} \\ F_f = \rho_w g(V_1 + V) \\ 1.85 \text{ m/s} \leq v_{\max} \leq 2.15 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

式中: M 为探头的总质量,包括内部电路板、传感器以及信号传输线的质量; F_f 为探头在水中所受的浮力; C_d 为探头在水中发热阻力系数; ρ_w 为环境的密度; S_d 为探头与流体接触的表面积; v_{\max} 为探头在水中下落的极限速度。

1.2 系统分析近似模型的建立

在探头的优化设计中,设系统设计变量为 X ,材料子学科的输出为 Y_1 ,电子子学科的输出为 Y_2 ,结构子学科的输出为 Y_3 ,流体子学科的输出为 Y_4 。根据输入输出的关系,则有:

$$F(X, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) = 0 \quad (6)$$

经过数学变换,可以得到一个子系统的输出是其他因子的函数,如式(7)所示:

$$Y_i = Y_i(X, Y_j, Y_z) (i, j, z = 1, 2, 3; i \neq j, j \neq z, z \neq i) \quad (7)$$

对等式两边进行微分,写成倒数的形式则有:

$$\begin{cases} \frac{dY_1}{dX} = \frac{\partial Y_1}{\partial Y_2} \cdot \frac{dY_2}{dX} + \frac{\partial Y_1}{\partial Y_3} \cdot \frac{dY_3}{dX} + \frac{\partial Y_1}{\partial Y_4} \cdot \frac{dY_4}{dX} + \frac{\partial Y_1}{\partial X} \\ \frac{dY_2}{dX} = \frac{\partial Y_2}{\partial Y_1} \cdot \frac{dY_1}{dX} + \frac{\partial Y_2}{\partial Y_3} \cdot \frac{dY_3}{dX} + \frac{\partial Y_2}{\partial Y_4} \cdot \frac{dY_4}{dX} + \frac{\partial Y_2}{\partial X} \\ \frac{dY_3}{dX} = \frac{\partial Y_3}{\partial Y_1} \cdot \frac{dY_1}{dX} + \frac{\partial Y_3}{\partial Y_2} \cdot \frac{dY_2}{dX} + \frac{\partial Y_3}{\partial Y_4} \cdot \frac{dY_4}{dX} + \frac{\partial Y_3}{\partial X} \\ \frac{dY_4}{dX} = \frac{\partial Y_4}{\partial Y_1} \cdot \frac{dY_1}{dX} + \frac{\partial Y_4}{\partial Y_2} \cdot \frac{dY_2}{dX} + \frac{\partial Y_4}{\partial Y_3} \cdot \frac{dY_3}{dX} + \frac{\partial Y_4}{\partial X} \end{cases} \quad (8)$$

根据推导出的公式可知,由于各系统之间存在耦合联系,一个子学科的输出随系统设计变量的总变化是该子学科随其他子学科的变化和该子学科随设计变量的变化之和。从中可以看出各个子学科对其他子学科的敏感程度,从而分析出在优化过程中各个子学科之间的耦合关系。

1.3 并行子空间的优化

1.3.1 材料子学科优化 探头工作环境复杂,要求制作材料具有良好的稳定性、超强的耐腐蚀性和高抗压性。郑国芝等^[10]对海洋仪器的结构进行了研究,研究表明当前海洋仪器的制作多采用不锈钢、优质

碳钢、铝合金以及聚碳酸酯等材料。这些材料的特性总结如表 1 所示。

表 1 常用材料的性能指标

Tab.1 Performance indicators of commonly used materials

材料名称	σ_s /MPa	σ_b /MPa	E /GPa	ρ /g·cm ⁻³
不锈钢 316L	175	480	205	7.98
不锈钢 321	206	520	206	7.93
不锈钢 304	205	520	205	7.93
优质碳钢 45#	335	590	206	7.75
优质碳钢 40#	314	549	206	7.70
铝合金 Ly12	255	412	70	2.78
铝合金 Lc4	402	530	71	2.80
聚碳酸酯 T1230	60	91	2.2	1.22
聚碳酸酯 Tx1005	58	90	2.1	1.20

注：表中 σ_s 表示屈服强度； σ_b 表示拉伸强度； E 表示弹性模量； ρ 表示密度。

探头主要分为前半部分和后半部分。前半部分包括密封仓和传感器仓，后半部分包括开放仓和尾翼。在探头设计中，前半部分长度约 $1/4L$ ，后半部分长度约 $3/4L$ 。由于重心的限制， C_g 的坐标介于 $1/4L$ 和 $3/4L$ 之间，两部分的材料应不相同。

对于整个探头，选用聚碳酸酯材料。聚碳酸酯具有高强度、高抗压性、耐疲劳性好以及尺寸稳定性好等优点。为使重心前移，前半部分选用密度大的聚碳酸酯 T1230，后半部分选用密度较小的聚碳酸酯 Tx1005。传感器仓材质要求传热快，金属铝导热良好，则选择铝合金 Ly12 作为传感器仓的材料。由于探头两部分分离需要螺纹旋转，连接处易于密封不严导致海水渗入。因此，在探头的连接处采用优质碳钢 40# 密封。探头材料分布如图 4 所示。即 X_{11} 为聚碳酸酯 T1230， X_{12} 为聚碳酸酯 Tx1005， X_{13} 为铝合金 Ly12。

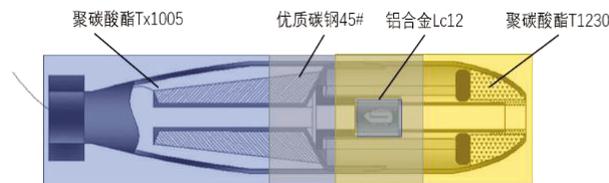


图 4 探头材料分布图

Fig.4 Probe material distribution

密封仓壁厚厚度 D 为：

$$D=R \cdot \sqrt[3]{\frac{4mP_{\max}(1-\mu^2)}{E}+C} \quad (9)$$

式中： m 为安全系数； P_{\max} 等于最大静压 P_1 与最大动压 P_2 之和； μ 为泊松比； C 为附加余量，与探头

的材料有关。

信号传输线采用聚酯亚胺和聚酰胺酰亚胺复合组成的漆包线。该传输线质量好、耐腐蚀、稳定性好。信号传输线的长度预先设置为 1 000 m，以满足对深海 800 m 水域的探测。

1.3.2 电子子学科优化 电子子学科方面，只考虑电路板的尺寸和电池的布放。经计算，密封仓容积约为 47.86 cm³，密封仓的最大宽度为 1.40 cm，最小宽度仅为 1.11 cm。电池采用直径为 d 的纽扣电池。结合当前存在的不同尺寸纽扣电池的特性，采用形状代号为 R44 的纽扣电池，其布放方式如图 5 所示。

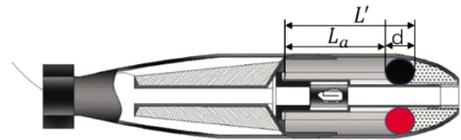


图 5 电池布放图

Fig.5 Battery layout

在直径为 d 的纽扣电池布放之后，就需要对电路板的尺寸加以限制。对电子子学科模型要增加约束条件：

$$L_a \leq L' - d \quad (10)$$

在有限的密封仓空间中，需要对电路板进行特殊设计，把电路板设计成半径为 25 mm 的圆环状，如图 6 所示。圆环状的排列方式，使电路板可以稳定地镶嵌在导流腔上，有效地避免海水对探头的冲击，减小了电路板与外界的距离，能够快速感知水文信息。

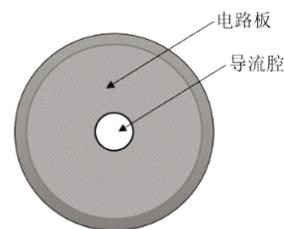


图 6 电路板截面图

Fig.6 Cross section of the board

1.3.3 结构子学科优化 在探头结构的设计中，各仓体积的优化是一个比较灵活的设计。在满足总体探头体积的情况下，可以对探头的空间进行划分。在划分过程中，各仓的体积要满足系统约束。为了在结构上使探头的重心可以前移，可以增加预留配重物。

在优化设计中，探头内部的组成对其结构的影响较大。如电路板的放置、电池的布放、信号传输线

的摆放。在这些设计中,电路板的放置和电池的摆放较难改变,现就信号传输线的摆放加以设计。为使探头的重心前移,把信号传输线的重心前移,采用横梯形的绕线方式对信号传输线进行摆放,如图 7 所示。把横梯形分为若干个宽度为信号线直径的长矩形,有效防止了信号线滑落,固定了信号传输线的位置。

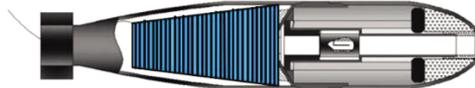


图 7 信号传输线绕线方式

Fig.7 Signal transmission line layout

1.3.4 流体子学科优化 根据探头的功能需求,探头下落的最佳速度为 2 m/s,可行速度范围为 1.85~2.15 m/s。利用 CFD 进行仿真实验可得到导流腔的最小直径、探头的极限速度和在水中的最大动压。

1.3.5 更新系统近似模型 在子空间优化过程中,各个子学科是并行独立的。在系统级优化的过程中,各个子学科存在联系,共同影响系统,但各个子学科对系统的影响并不是均等的。在这里,引入权重因数的概念。 w_i 表示第 i 个学科优化设计的权重因数。 w_1, w_2, w_3, w_4 分别为材料、电子、结构、流体等子学科的权重因数。结构优化不仅对重心造成影响还会对下落的极限速度有影响,则 w_3 应最大。由于现代集成电路技术的成熟,电路板以及电池的尺寸可以做到很小,所以 w_2 最小。则有:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 w_i = 4 \\ w_3 > w_1 = w_4 > w_2 \end{cases} \quad (11)$$

由建立的系统模型可知:

$$\frac{dY_1}{dX} = w_1 \frac{dY_2}{dX} + w_2 \frac{dY_3}{dX} + w_3 \frac{dY_4}{dX} + w_4 \frac{\partial Y_1}{\partial X} \quad (12)$$

先对各权重因数的分布加以讨论^[8],结果如表 2。

表 2 各权重因数对系统优化的影响

Tab.2 The influence of each weighting factor on system optimization

各权重因数	C_g	v_{max}
1:1:1:1	+	+
1:0.8:1.2:1	++	+
1.1:0.6:1.2:1.1	++	++

表中只是对探头的重心和极限速度进行分析,“+”越多表明对其的积极影响就越为显著。因此,在设计中主要采用第 3 种权重因数的设计方案,探头的基本结构如图 8 所示。

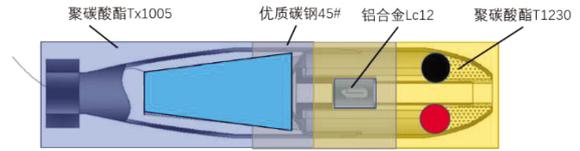
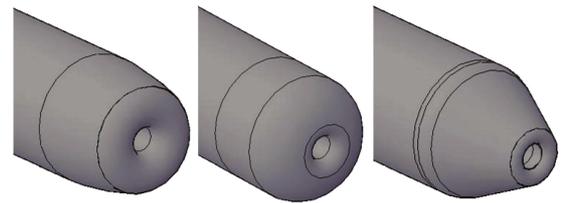


图 8 探头的基本结构

Fig.8 Basic structure of the probe

2 收敛性检验

在以上方法的基础上,设计了 3 种不同头部的探头,如图 9 所示。



(a) 圆环形 (b) 半圆型 (c) 圆锥形

图 9 探头头部的 3D 模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of the 3D model of the probe head

探头在释放过程中会受到海面风浪的影响,以一定攻角匀速下落,需要运动一段时间后会恢复垂直下落状态,恢复时间的长短取决于探头的受力情况。

在进行仿真的过程中,设定释放的攻角为 $0^\circ \sim 60^\circ$,选定 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 5 个角度。以 2 m/s 的速度入水之后,各个攻角的探头引起周围流体速度变化和压力变化 CFD 仿真输出如图 10~图 11 所示。仿真结果如表 3 所示。

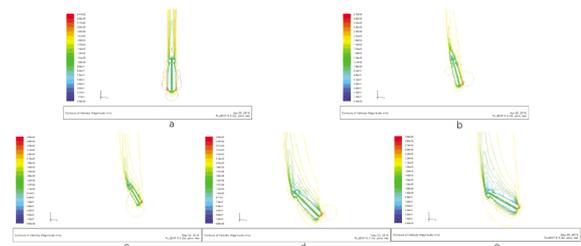


图 10 抛弃式探头不同攻角速度分布图

Fig.10 Velocity profile of the probe at different angles of attack

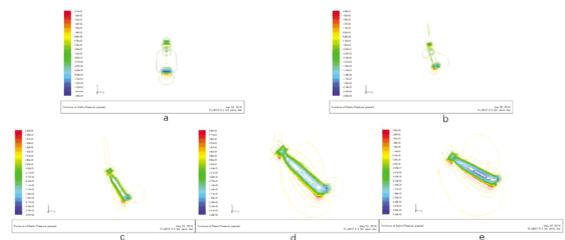


图 11 抛弃式探头不同攻角压力分布图

Fig.11 Pressure distribution of the probe at different angles of attack

表 3 不同头部在不同攻角下的受力仿真结果

Tab.3 Force simulation results of different heads at different angles of attack		合力		
方案	角度/(°)	X/N	Y/N	Z/N
圆环型头部	0	0.01	1.53	0.01
半圆型头部	0	0.00	1.72	0.00
圆锥形头部	0	0.00	1.45	0.00
圆环型头部	15	1.91	2.13	0.00
半圆型头部	15	1.95	2.17	0.01
圆锥形头部	15	1.96	2.01	0.00
圆环型头部	30	3.33	3.54	0.05
半圆型头部	30	3.37	3.56	0.02
圆锥形头部	30	3.35	3.39	0.02
圆环型头部	45	3.72	4.93	0.15
半圆型头部	45	3.75	4.89	0.05
圆锥形头部	45	3.71	4.72	0.06
圆环型头部	60	3.35	6.43	0.26
半圆型头部	60	3.49	6.18	0.00
圆锥形头部	60	3.39	6.01	0.06

表中, *Total Force X*, *Total Force Y* 和 *Total Force Z* 是探头以 2 m/s 匀速下落时分别在 *x*, *y* 和 *z* 方向所受的合力。根据表中数据可知, 在 *z* 轴上的受力相比其它两个轴受力数量级较小, 故将其省略进行分析。

对下落中的探头进行受力分析, 如图 12 所示。其中, *Total Force* 为 *Total Force X* 与 *Total Force Y* 的合力。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (13)$$

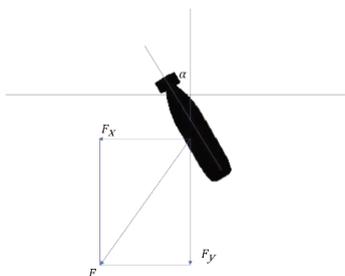


图 12 抛弃式探头在下沉过程中的受力分析

Fig.12 Force analysis of the probe during sinking

根据受力分析可知, *Total Force* 的大小与 *y* 轴正方向的夹角的大小决定了探头在有攻角情况下恢复垂直下落速度的快慢。现将 *Total Force* 按照探头的攻角方向与垂直于探头的攻角方向进行分解, 如图 13 所示。

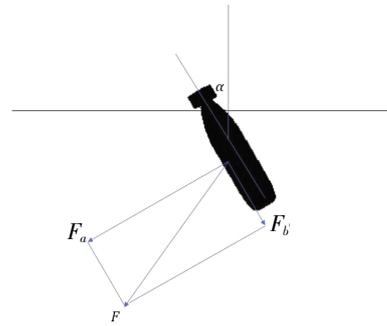


图 13 抛弃式探头所受合力的分解

Fig.13 Decomposition of the resultant force of the probe

Total Force 重新分解为两个力: F_a 与 F_b 。探头在以某个角度下落时, 垂直于探头攻角方向的 F_a 越大, 在该方向上的加速度就越大, 探头恢复垂直下落的时间就越短, 反之亦然。

$$F_a = F \cdot \cos(\arctan \frac{F_y}{F_x} - \alpha) \quad (14)$$

运用以上公式对 *Total Force* 进行计算, 结果如下。

探头垂直入水(攻角为 0°)时, 由于 *X* 方向上的力较小可以忽略不计, 所以只考虑 *Y* 方向上的力, 即 *Total Force Y*。

表 4 攻角为 0° 时的数据处理结果Tab.4 Data processing results when the angle of attack is 0°

方案	角度/(°)	合力 Y/N
圆环型头部	0	1.53
半圆型头部	0	1.72
圆锥型头部	0	1.45

可知在攻角为 0° 时, 半圆型头部的 *Total Force Y* 最大, 运动特性最为理想。

表 5 攻角分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时的数据处理结果Tab.5 Data processing results when the angle of attack is $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

方案	角度/(°)	合力			F/N
		X/N	Y/N	Z/N	
圆环型头部	15	1.91	2.13	2.86	2.39
半圆型头部	15	1.95	2.17	2.91	2.44
圆锥型头部	15	1.96	2.01	2.81	2.42
圆环型头部	30	3.33	3.54	4.86	4.65
半圆型头部	30	3.37	3.56	4.90	4.69
圆锥型头部	30	3.35	3.39	4.77	4.60
圆环型头部	45	3.72	4.93	6.17	6.12
半圆型头部	45	3.75	4.89	6.16	6.11
圆锥型头部	45	3.71	4.72	6.00	5.96
圆环型头部	60	3.35	6.43	7.24	7.24
半圆型头部	60	3.49	6.18	7.10	7.10
圆锥型头部	60	3.39	6.01	6.90	6.90

F_a 越大,探头的运动特性最为理想。攻角为 $15^\circ, 30^\circ$ 时,半圆型头部最为理想;攻角为 $45^\circ, 60^\circ$ 时,圆环型头部最为理想。

由于探头各个攻角的机会并不是均等的,若要综合地比较各个探头的流体特性,则要把所有角度都考虑在内。现定义一个值 W ,把探头在各个攻角下的性能按照权重求和,通过 W 值则可比较出各个探头总体的优劣。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 w_i = 1 \\ W = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot R_i \end{cases} \quad (14)$$

式中: w_i 为各个攻角的权重; R_i 为在攻角的情况下 F_a 的排名次序。

探头在实际释放时,攻角主要受海面风浪的影响,其初始攻角范围主要为 $0^\circ \sim 45^\circ$,且多数介于 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。因此,定义 $w_1=0.15, w_2=0.3, w_3=0.3, w_4=0.15, w_5=0.1$ 。

结合仿真结果,每种方案在不同角度的排名与 W 值如表 6 所示。

表 6 不同头部在不同角度的排名与 W 值

Tab.6 Ranking and W values of different heads at different angles

	0°	15°	30°	45°	60°	W
圆环型头部	2	1	2	3	3	1.95
半圆型头部	3	3	3	2	2	2.75
圆锥型头部	1	2	1	1	1	1.3

按照降序的顺序进行排序,如 15° 时,半圆型头部的 F_a 最大,则半圆型头部在 15° 的 R 值为 3;圆锥型头部的 F_a 次于半圆型头部,则圆锥形头部在 15° 的 R 值为 2;圆环型头部的 F_a 最小,则圆环型头部的 R 值为 1。以此类推。根据此表计算每个方案的 W 值。

由表中数据可知,半圆型头部的 W 值最大,综合各个不同的入水攻角,半圆型头部探头的流体特性最好。因此,在 3 种头部的设计方案中,确定半圆型头部探头。

3 结论

本文主要对海洋水文探测系统中的抛弃式探头进行了研究,首先介绍了抛弃式探头的发展现状和 MDO 的概念及应用,分析了抛弃式探头的设计原则和设计要求,然后基于 MDO 中的 CSSO 算法从材料、电子、结构、流体等 4 个方面对其进行了优化设计。针对得到的 3 种不同结构的抛弃式探头进行了 CFD 仿真收敛性检验,最终确定最优的设计方案为半圆型头部的探头。本次优化设计的主要对象是抛弃式探头的头部,然而抛弃式探头的工作性能不仅仅只与头部的设计有关,还与抛弃式探头的尾翼有关,尾翼的形状将会影响抛弃式探头在海水中运动状态。为了获得更好的探测效果,下一步将会对抛弃式探头的尾翼进行优化设计。

参考文献:

[1] 邓明,侯胜利.中国海底地球物理探测仪器的新进展[J].勘探地球物理进展,2004,27(4):243-245.
DENG M, HOU SH L. The Development of seafloor prospecting instrument in China[J].Progress in Exploration Geophysics, 2004,27(4): 243-245.

[2] Sobieszcanski-Sobieski J, Haftka R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments [J]. Structural Optimization,1997,14(1):1-23.

[3] 余雄庆.多学科优化算法及其在飞机设计中的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,1999.
YU X Q. Multidisciplinary optimization algorithm and its application in aircraft design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,1999.

[4] 韩占忠.FLUENT——流体工程仿真计算实例与分析[M].北京:北京理工大学出版社,2009.
HAN ZH ZH. FLUENT——example and analysis of fluid engineering simulation calculation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.

- [5] 黄银水,陶建华.线圈释放式温、盐、深探头运动特征的数值计算方法研究[J].海洋技术, 2003,22(3):45-48.
HUANG Y SH, TAO J H. Computation Method of the Kinetic Property of Salinity, Temperature and Depth Prode with Releasing Winding[J]. Ocean Technology, 2003,22(3):45-48.
- [6] 井彦明,谭世祥.机载投弃式温盐深浮标中的三项关键技术研究[J].海洋技术, 2001, 20(4):48-53.
JING Y M, TAN SH X. Key points study of airborne expendable CTD prode[J]. Ocean Technology, 2001, 20(4):48-53.
- [7] 张瑞,陈文义,刘宁,等.不同攻角下投弃式海流剖面仪流体动力特性研究[J].海洋技术, 2011,30(1):37-40.
ZHANG R, CHEN W Y, LIU N, TAO J L, ZHANG M M. Study on Fluid Dynamic Characteristics of XCP Probe at Different Angles of Attack[J]. Ocean Technology, 2011,30(1):37-40.
- [8] 刘凤,叶松,王晓蕾,等.NMOHEMS探测单元的三维建模与快速成型[J].机械设计与制造, 2012(3):68-70.
LIU F, YE S, WANG X L, CHEN ZH T, et al. Modeling and rapid prototyping of NMOHEMS' prode [J]. Machinery Design and Manufacture, 2012(3):68-70.
- [9] 陈振涛,叶松,王晓蕾,等.基于多学科协同优化 NMOHEMS 剖面探头设计[J].仪器仪表学报, 2012,33(7):1660-1653.
CHEN ZH T, YE S, WANG X L, WENG X G, ZHONG ZH. Design of NMOHEMS profile prode based on multidisciplinary and collaborative optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(7):1660-1653.
- [10] 郑国芝,罗玉玺,孙牵宇.深海沉积物地热探针结构设计分析[J].海洋技术, 2009, 28(3): 114-117.
ZHNEG G ZH, LUO Y X, SUN Q Y. Analysis of framework design of geothermal probe of deep-sea sediments [J]. Ocean Technology, 2009,28(3):114-117.

Optimized Design of the Profile Probe Structure Based on Concurrent Subspace Optimization (CSSO)

SONG Hai-run, CHEN Zhen-tao, WANG Xiao-lei, YANG Hui-bing

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China

Abstract: In marine hydrological detection systems, the profile probe is the core of the entire detection system and the performer of the detection work. In order to obtain accurate and effective detection data, it is necessary to further optimize the design of the disposable probe. The profile probe is designed to use the concurrent subspace optimization (CSSO) in multi-disciplinary design optimization (MDO). Firstly, the system is analyzed, with the approximate model of the system analysis obtained. Secondly, the parallel sub-disciplines are optimized, and the system analysis model is updated again, before finally verifying the convergence of the optimization model. Combined with the structure of the profile probe, the head is optimized and three design methods of ring, semicircle and cone are given in this paper. The CAD software is used to draw the 3D simulation model, and then the CFD software is used to simulate the fluid working environment, and finally the semicircular head probe is optimized to design the probe.

Key words: expendable probe; multi-disciplinary design optimization; concurrent subspace optimization (CSSO); convergence test