

队伍编号	21150040032
题号	C

基于多目标规划的海底数据中心的散热优化设计

摘 要

海底数据中心通过与海水热交换在实际生活中有广泛应用，而如何在有限空间，保障正常散热下，存放更多正常工作的服务器仍是一个具有难点的问题。本文通过建立物理模型，利用数学物理方法对海底数据中心的散热效果进行了优化设计。

针对问题一，本文分析集装箱在海底的散热的过程，建立了**传热模型**。主要考虑对流传热，通过建立能量守恒,动量守恒，质量守恒方程以及**数量级分析法**对方程简化后的得到换热系数  $h=295.27$ 。以服务器的数量  $n$  最大为规划目标，通过传热模型中的传热方程确定目标函数，以集装箱内温度不超过  $80^{\circ}\text{C}$  等为约束条件建立**非线性规划模型**。使用 MATLAB 编程求解得到最大服务器数量  $n=244$ 。

针对问题二，通过问题一的分析，集装箱的散热效果主要受传热面积  $A$  的影响，所以本文设计翅片结构如图 1 所示和翅片对应参数。以传热面积  $A$  最大为规划目标，通过设计翅片结构确定目标函数，以集装箱外壳最大尺寸的限制等为约束条件，建立了**非线性规划模型**。利用**蒙特卡洛模拟**确定了翅片的初始参数如表 2 所示，将其代入规划模型求解得到新的传热面积  $A=101.1646\text{ m}^2$ ,并得到翅片各参数的最优解如表 4 所示，即完成了设计翅片的外壳结构。

针对问题三，对于附件所给的材料，建立了**模糊综合评价模型**对其进行打分，选取 Ti6Al-4V 为集装箱外壳材料，具体结果见表 5。考虑到较深的海底深度有较低的温度从而取得更好的散热效果，但是随着海水深度的增大对材料的抗压性和耐腐蚀性也提高了要求进而提升了成本。所以本文建立了成本最小和散热效果最优即服务器数量最大为目标的**多目标规划模型**，建立全寿命周期成本模型和问题一中的传热模型确定各目标函数。以各目标函数值作为评价指标，采用**基于熵权的 TOPSIS 法**对不同方案进行优化排序，最终确定海底深度为 400 米和服务器最大容纳个数为 543 为规划最优解，具体结果见表 7。

针对问题四，本问主要考虑随着潮汐和季节等外界因素的变化对集装箱散热效果的影响，实质上是对模型进行**灵敏度分析**。潮汐和季节的变化主要影响传热模型中海底温度和海水流速，所以在环境变量给定的前提下分别调整这两个参数的取值观察各个参数与散热量（即服务器最大容纳个数）之间的变化关系，具体结果如图 2 和图 3。分析曲线可知：随着海底温度的下降，散热量总体呈现提高的趋势，且在温度为  $10^{\circ}\text{C}$  时散热量变化率出现了变化，温度大于 10 摄氏度时要比温度小于 10 摄氏度散热量的变化率高；随着海水流速的提升散热量总体呈上升趋势，观察曲线走势得到散热量对海水流速较为敏感的结论。

关键词：传热模型，非线性规划模型，蒙特卡洛模拟，多目标规划模型，基于熵权的 TOPSIS 法，灵敏度分析

# 目录

1.问题重述.....	1
2.问题分析.....	1
2.1 问题一的分析: .....	1
2.2 问题二的分析: .....	2
2.3 问题三的分析: .....	2
2.4 问题四的分析: .....	2
3.模型假设.....	2
4.符号说明.....	2
5.问题一.....	3
5.1 问题一模型的建立: .....	3
5.2 问题一模型的求解.....	5
6.问题二.....	6
6.1 问题二模型的建立: .....	6
6.2 问题二模型的求解: .....	7
7.问题三.....	9
7.1 问题三模型的建立.....	9
7.2 问题三模型的求解.....	13
8.问题四（灵敏度分析） .....	15
8.1 问题四模型的建立: .....	15
8.2 问题四模型的求解: .....	16
9.建议信（问题五） .....	17
11.模型的评价改进与推广.....	17
11.1 优点.....	17
11.2 缺点.....	17
11.3 模型的推广.....	18
参考文献.....	19
附录.....	20

## 1.问题重述

“海底数据中心项目”是互联网设施安装在具有冷却功能的海底密闭的压力仓中，利用海底复合电缆供电，并将数据回传至互联网；通过与海水进行热交换，对互联网设施进行散热，有效节约了能源并且极大地缩短数据与用户的距离，是一个全绿色可持续发展的数据中心解决方案。2015年8月，微软首次对水下数据中心的原型机进行了测试。2018年微软 Project Natick 项目在苏格兰海岸线附近的水域中实验性地部署了一个水下的数据中心，经测算，海底数据中心的故障率是陆地的  $1/8$ 。2021年1月10日，北京海兰信数据科技股份有限公司联合中国船舶集团广船国际有限公司打造了全国首个海底数据舱，标志着我国大数据中心逐步走向海洋时代。

目前对于该项目来说如何在有限空间，保障正常散热下，存放更多正常工作的服务器仍是一个具有难点的问题。基于此种背景下，要求建立合适的数学模型，分析并解答以下问题：

(1) 设数据中心集装箱为直径 1m，长 12m 的圆柱形，水平悬空放置在南海中（南海温度为 20 摄氏度）现有若干规格为：长 525mm，宽 482.6mm，高 44.45mm，产热 500w，正常工作温度不能超过 80 摄氏度，1U 服务器，试从服务器散热需求评估可存放服务器的最大数量。

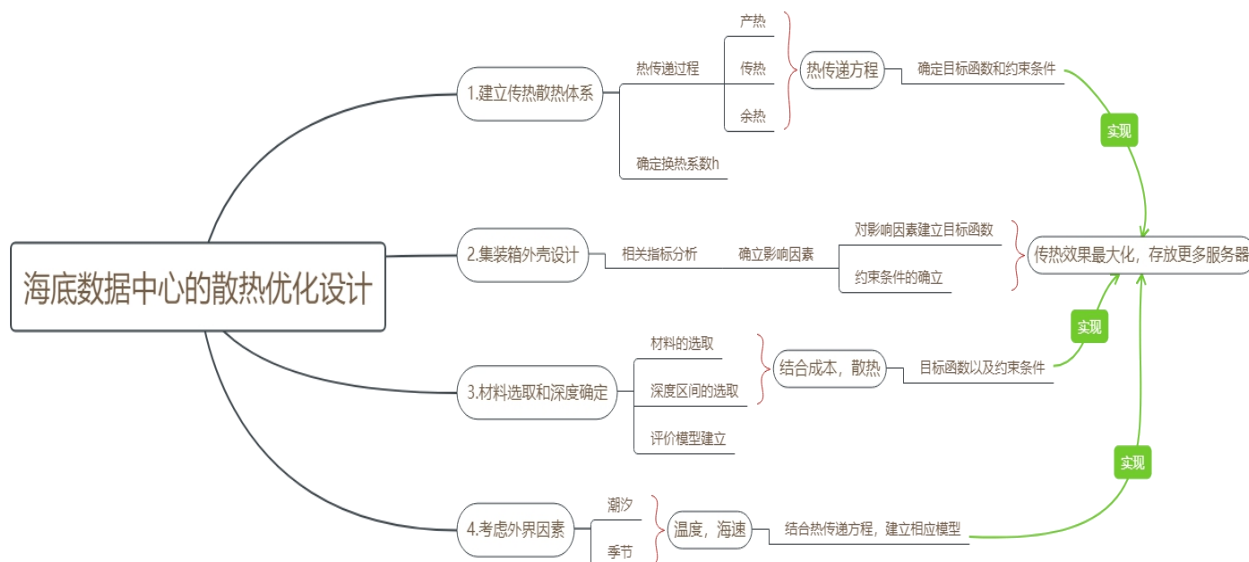
(2) 在第一问的基础上，设计集装箱外壳结构，来实现散热效果最大化。

(3) 在第二问的基础上，选择合适的材料以及海底深度去提高散热效果，并降低相应成本。

(4) 在潮汐和季节变化等因素下分析对海底数据中心集装箱散热效果的影响。

(5) 写一封建议信给相关设计部门，阐述自己的想法。

## 2.问题分析



### 2.1 问题一的分析：

题目要求在仅考虑服务器的散热需求下满足集装箱内部服务器数量最大化。而服务器的最大数量，主要受限制于两个方面：第一个方面为集装箱的体积，第二个方面为在

满足好的散热条件下尽可能合理的放置最大数量的服务器。对于第一个影响条件，仅仅是对服务器数量  $n$  的一个范围限制，所以该问题的考虑因素主要取决于散热条件。首先，结合物理相关的知识，确立出传热，余热以及产热三个阶段并分析三者之间的关系；其次，对每个阶段结合物理关系与已知指标建立联系，确定出服务器数量  $n$  与传热，余热，散热三者关系下的目标函数以及各个指标的约束方程；最后，利用规划模型对所列函数进行规划，求得的相应的取值与集装箱体积条件限制下服务器数量  $n$  的范围做对比，若满足条件极为所要求的最大数量  $n$  的值。

## 2.2 问题二的分析：

题目要求在第一问的基础上设计集装箱外壳且尺寸不超过  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 12\text{m}$ ，并能实现最大的散热量即存放更多的服务器。根据第一问已经构建的散热模型，通过分析得到，服务器数量  $n$  主要取决于散热面积也就是集装箱与海水的接触面积，进而问题转化为在  $n$  尽可能变的更多的情况下，让集装箱与海水的接触面积更大。通过构建面积表达式，结合第一问所构建的模型，使用规划模型可以求得满足  $n$  的条件下接触面积的最优解。利用该最优解下对应的相应集装箱的参数便可给出相应的集装箱的设计。

## 2.3 问题三的分析：

题目要求在问题二的基础上增加对材料和海底深度的选取，在降低成本的同时提高散热效果。对于材料选取集装箱材料与所能承受的压强和耐腐蚀性有关，综合压强和耐腐蚀性进行评价选择最优的材料。根据问题一的传热模型可知服务器的数量  $n$  代表散热效果，要使得散热效果与成本综合达到最优需要对这两个目标进行多目标优化，最终确定某一深度下散热和成本综合最优。

## 2.4 问题四的分析：

题目要求在考虑海水潮汐以及季节的变化下对数据中心散热的影响。根据题目海水潮汐和季节会改变海水的温度，并且由于潮汐带来的能量，海水的海流流速也会相应改变。当海水流速变化时，会导致传热系数  $h$  发生变化，进而使问题一中的传热模型的参数发生改变，因此可以求得相应散热效果的变化，从而可以分析出海水流速与散热效果的对应关系。而温度带来的变化通过结合问题三中的结论以及问题一所建立的传热模型可以求得相应规律。进而得到潮汐以及季节对于海底数据中心散热带来的影响。

## 3.模型假设

- 1.假设集装箱在海水中各质点的温度以及收到的作用力等因素是一致的。
- 2.忽略服务器在集装箱内部的排列情况。
- 3.假设服务器所散出的热量不会导致外部的环境发生变化，及海水的相应参数不会因为散热的原因而发生变化
- 4.假设每年潮汐以及季节的变化有一定的规律，忽略极端因素的影响
- 5.假设服务器在水中一直保持与海平面平行的状态，忽略因外界原因造成的位置变化。

## 4.符号说明

符号	符号说明	单位
$\phi$	传热功率，即单位时间内通过传热面的热量	W
A	海水与集装箱热传递过程中的接触面积	$m^2$
Q	温度增加时，单位时间下机箱内热量的增量	J
$W_0$	总的产热	W
n	集装箱内服务器的个数	
$t_n$	某一时刻下的温度	$^{\circ}\text{C}$
$M(\cdot, +): b_j$	模糊合成算子	
$C_{Lcc}$	全寿命周期成本	元
$h$	传热系数	

## 5.问题一

### 5.1 问题一模型的建立：

#### 5.1.1 传热模型的建立

对流是指流体由于各部分温度不同而产生的相对流动，即流体（气体或液体）通过各部分宏观流动的传热过程。在液体或气体中，较热的部分上升，较冷的部分下降，循环并相互混合，最终使温度趋于均匀。

将数据中心集装箱悬空放置（轴线与海平面平行）海水中，这里认为数据中心集装箱全部在海水的某一深度处，由于受到外界海水温度的影响，当未开始工作时，数据中心集装箱内部的温度与海水温度相同即：

$$t_{\infty} = 20^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

当服务器开始产热，产生的热量一部分由于与外界海水温度的差异造成对流，将热量热传递到了海水中，另一部分热量未被带走，残留在集装箱内，使得集装箱的温度升高。

依照上述分析将这个过程拟定为产热，传热以及余热三个阶段。

1. 产热阶段：依照所给材料可以了解到单个服务器的单位时间的产热量为 500W，当服务器产生热量后，会热传导到集装箱内，及传给箱内的空气。为箱内的空气提供了总的热量  $W_0$ 。由于考虑到不同形态下的传热，这里涉及传热率的问题，在这里结合参考文献[1]以及傅里叶定律，得到该集装箱的传导率为 150W/tm.。消去量纲的影响得到空气内由于单个服务器产生的热量所增加的热量为 75.75w，所以总的能量

$$W_0 = 75.75n$$

2. 传热阶段：当集装箱放置与海水中时，由于内外温度差以及海水对集装箱作用力两方面的影响，会产生热量传递的现象，该现象依照相关物理知识可以确认为强制对流。并且符合牛顿冷却定理：

$$\phi = Ah\Delta t = Ah(t - t_{\infty}) \quad (5.2)$$

即为所求得单位时间下传热阶段的能量

3. 余热阶段：由于海水的散热能力是一定的，不会每时每刻都将所产生的热量带走，机箱产生的热量会随着时间的积累逐渐使得能量升高，直到达到临界值  $80^{\circ}\text{C}$ ，也就是服务器可以正常工作的临界值 Q，对于 Q 来说也可以理解为当温度增加时，单位时间

下机箱内热量的增量. 由比热容公式可以得到

$$Q = cm\Delta t = cm(t - t_{\infty}) \quad (5.3)$$

依照能量守恒公式可得

产热阶段的能量=传热阶段的能量+余热阶段的能量（统一考虑单位时间内）即

$$W_0 = Q + \phi \quad (5.4)$$

由于温度从 20 °C-80°C 是一个连续累加的过程，在单位时间下，假定  $t_n$  为现态， $t_{n+1}$  为次态，现态是指，在单位时间下，还未放热时的集装箱内所对应的温度，而次态为这个时刻将要结束时，热量被海水带走一部分后集装箱内所对应的温度。所以在这里  $Q$  所对应的温度应为次态所对应的温度与初始温度之差，故在 20 °C-80°C 某一单位时间下

$$Q = cm\Delta t = cm(t_{n+1} - t_{\infty}) \quad (5.5)$$

而在单位时间下  $\phi$  所对应的温度为海水传热后的温度，即为现态的温度，这里

$$\phi = Ah(t_n - t_{\infty}) \quad (5.6)$$

将公式 (5.5)，(5.6) 带入得

$$75.75n - Ah(t_n - t_{\infty}) = cm(t_{n+1} - t_{\infty}) \quad (5.7)$$

传热模型为：

$$n = \frac{cm(t_{n+1} - t_{\infty}) + Ah(t_n - t_{\infty})}{75.75} \quad (5.8)$$

$m$  为空气的质量，即集装箱内空气的质量，空气所对应的体积应为圆柱体集装箱的体积减去所有服务器的体积，即  $v = 3\pi - 0.01126n$ ，将  $v$  带入到公式 (5.8) 中可以求得：

$$n = \frac{c\rho v(t_{n+1} - t_{\infty}) + Ah(t_n - t_{\infty})}{75.75t_n + c\rho v_x(t_{n+1} - t_{\infty})} \quad (5.9)$$

### 5.1.1 优化模型的建立

对于所创建的传热模型，

$$n = \frac{c\rho v(t_{n+1} - t_{\infty}) + Ah(t_n - t_{\infty})}{75.75t_n + c\rho v_x(t_{n+1} - t_{\infty})}$$

将其看作所需优化的目标函数而  $n$  为所得到的最优解，并且该解为约束条件下的最大解，而  $c$  为空气的比热容， $m$  为空气的质量， $A$  为传热面积， $h$  为传热系数，这些值均为定值. 变量仅有温度  $t$ 。

由于集装箱内温度升高的过程为累加的过程，并且服务器所能接受的最大的温度为 80°C，所以对于温度  $t$  来说将不会超过 80°C，而  $t_n$  为还未传热的温度， $t_{n+1}$  为传热后的温度，所以  $t_{n+1}$  的值将小于等于  $t_n$ 。

通过上述条件对  $t$  经行限制得到如下关系

$$\begin{cases} 0^\circ\text{C} \leq t_{n+1} \leq 80^\circ\text{C} \\ t_{n+1} \leq t_n \end{cases} \quad (5.10)$$

利用上述不等式组，通过非线性规划对目标函数进行限制，得到了最优解  $n$ 。

根据题干所给已知条件所有服务器的总体积应当小于集装箱的体积即  $n \leq 836.4$  将所得结果与之相比看是否在相应区间内，若满足，即为最有服务器数量

## 5.2 问题一模型的求解

### 5.2.1 h 值的确定

首先将集装箱表面外壳微元化，由局部换热方程可得：

$$h_x = \frac{\lambda}{\Delta t_x} \times \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{wx} \quad (5.11)$$

由于流入微元体的净质量=微元体内流体质量变化可得下述关系：

设  $u$  为  $x$  方向上的速度， $v$  为  $y$  方向的速度，依照  $x$ ， $y$  速度的关系可知

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5.12)$$

由动量守恒可得

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5.13)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5.14)$$

由能量守恒可得

$$\rho C_p \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (5.15)$$

结合上述的五个关系式，依照数量级分析法以及相似解法，对其进行化简处理得到如下结果：

$$N_{ux} = \frac{h_x x}{\lambda} = 0.332 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} (Pr > 0.6) \quad (5.16)$$

其中  $N_u$  为努塞尔数， $Re_x$  为雷诺数， $Pr$  为普朗特数， $\lambda$  为热导率， $x$  为微元后的长度。所需求的是整个圆柱上的对流换热方程，将  $h_x$  进行积分

$$h_x = \int_0^l h_x dx = 2h_1 \quad (5.17)$$

带入求得：

$$\overline{N_u} = \frac{\bar{h}l}{\lambda} = 0.664 Re_x^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} (Pr > 0.6) \quad (5.18)$$

其中  $l$  为整个圆柱形集装箱的轴线长 ( $l=12m$ )，由于该式子仅适用于外掠等壁温平流层换流，在这里忽略外界环境的变化规律等其他影响，普遍认为集装箱环境的初始温度为  $20^\circ\text{C}$ ，最终的温度为  $80^\circ\text{C}$

$$t_m = \frac{1}{2} (t_w + t_0) \quad (t_0 = 20^\circ\text{C}, t_w = 80^\circ\text{C}) \quad (5.19)$$

求得  $t_m = 50^\circ\text{C}$ 。

依照参考文献[2]，可知该壁温下所对应的参数，可以发现  $Pr=3.54>0.6$ ：

表 1， $50^\circ\text{C}$ 下的性质

温度 $t$	饱和蒸 汽压	密度 $\rho$	焓	比定压热 容	导热系数 $\lambda$	黏度 $\mu$	体积膨胀 系数 $\alpha$	表面张 力 $\sigma$	普兰德数 $Pr$
50	12.31	988.1	209.30	4.174	64.78	54.94	4.49	67.7	3.54

为更好的解决该问题，将引入层流以及紊流的概念：由于粘度的存在，实际液体有两种流型。层流是液体颗粒有序运动而不相互混合的一种形式。液体颗粒的不规则运动、

混合、曲折和混沌的运动轨迹称为紊流. 区分层流以及紊流通常利用普朗克数, 依照所对的普朗克数的大小将  $Re < 5 \times 10^5$  定为层流, 大于定为紊流. 紊流不满足上述的方程 (5.15) .

在参考文献[1]中同时发现  $v=2.5\text{m/s}$ . 通过图 1 中的数据, 带入求得

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = 4032 < 5 \times 10^5$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{\lambda} = 0.5$$

由于普朗克数满足层流的要求, 将所求得的  $Re$ ,  $Pr$  带入方程 (5.18) 中, 得到  $\bar{h} = 295.27$ , 满足一般条件下水的对流传热系数。

## 5.2.2 模型的求解

$$\max \quad n = \frac{c\rho v(t_{n+1}-t_{\infty}) + Ah(t_n - t_{\infty})}{75.75t_n + c\rho v_x(t_{n+1}-t_{\infty})} \quad (5.19)$$

$$s.t. \begin{cases} 0^{\circ}\text{C} \leq t_{n+1} \leq 80^{\circ}\text{C} \\ t_{n+1} \leq t_n \end{cases} \quad (5.20)$$

- 通过查找相关资料可以了解到空气的比热容为  $C=1.003\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- 传热面积为圆柱形集装箱的侧面积 (忽略两个底面积的影响)  $A=12\pi\text{m}^2$
- 空气的质量为圆柱形集装箱内空气的质量, 忽略空气压缩等条件的影响  
 $m=12.13\text{Kg}$
- $h = \bar{h} = 295.27$

将所有的值带入, 依照 MATLAB 下非线性规划实现, 得到最终的解:

$$n = 244(n < 836.4)$$

在体积一定的集装箱内, 仅考虑服务器的散热条件下, 服务器的数量  $n$  最多为 244 个

## 6.问题二

### 6.1 问题二模型的建立:

通过分析第一问所建的传热模型不难看出, 在考虑集装箱外壳的条件下, 抛去无关项的影响, 集装箱内服务器个数  $n$  主要受到传热面积  $A$  的影响, 为了实现传热效果最大化即存放更多的服务器, 应当加大海水与集装箱外壳的接触面积。通过增强海水传热能力来实现更好的散热效果。

一般的集装箱通常采用长方体或是圆柱体等形式, 在  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 12\text{m}$  的规格下, 通过计算, 圆柱体的表面积要大于长方体或其他常见的形式。在这里将仍然采用圆柱体作为集装箱的初始设计方案, 通过在集装箱表面增加翅片的形式来增大与海水的接触面积。

翅片是一种导热性较强的金属片, 通常会被放置在需要进行热传递的换热装置的表面, 以增大换热装置的面积。常见的翅片一般分为常规形翅片, 三角形翅片, 梯形翅片等。通过参考论文[3]中对于这几种翅片的分析比较, 在相同的翅片高度, 厚度, 间距下, 三角形和梯形翅片的散热性能优于常规形等其他翅片, 并且三角形翅片的散热效果



要略优于梯形。并且该参考文献再次证明了在对翅片高度，宽度以及间距三种影响因素进行研究分析时，影响散热效果的最主要因素是翅片效果发生了变化。所以本模型将采用圆柱体的集装箱形式通过在上面加上一定数量的翅片来满足散热效果最大化即存放更多的服务器。

假定翅片的长度为  $x$ ，宽度为  $y$ ，厚度为  $h$ ，间距为  $L$ ，沿着圆柱体的轴线展成：长为  $\pi D_m$ ，宽为  $12m$  的长方形后，在  $12m$  宽上认为可以容纳  $m$  个翅片，在  $\pi D_m$  的长上可以容纳  $n$  个翅片。

通过表面积的计算得到以下公式：

$$A = mn \times \left[ xy + 2h\sqrt{\frac{x^2}{4} + y^2} \right] + mnL \quad (6.1)$$

将  $A$  经优化后所得到的值带入第一问传热模型当中，比较是否满足  $n$  的范围，并结合实际情况分析并设计集装箱模型。

## 6.2 问题二模型的求解：

分析所得到的关于  $A$  的目标函数，该函数式为非线性函数式，在这里将采用非线性规划的方式寻求  $A$  的最优方案：

$$\max \quad A = mn \times \left[ xy + 2h\sqrt{\frac{x^2}{4} + y^2} \right] + mnL \quad (6.2)$$

Step1：约束条件的选取

在不考虑翅片的条件下，圆柱形集装箱最大的尺寸为：直径为  $1m$ ，高度为  $12m$ ，当加上翅片后圆柱体实际的直径将小于  $1m$  即底边周长小于  $\pi m$ ，而在两底面由于考虑到服务器拿出，放入会存在对应的门，因此，不考虑在底面安置翅片的情况，所以所有的翅片厚度以及间距将等于圆柱体的最大高度。

$$nx \leq \pi \quad (6.3)$$

$$m(L + h) = 12 \quad (6.4)$$

由于所能接受的最大规格为  $1m \times 1m \times 12m$  即最大容纳量为  $12m^3$ ，所以在进行结构调整后的圆柱体以及所有翅片的总体积应当小于  $12m^3$

$$\frac{1}{2}xyhmn + 12\left(\frac{1-2y}{2}\right)^2\pi \leq 12 \quad (6.5)$$

结合参考文献[4]可以得到，在翅片排列时，一般  $>1mm$  的布管即可，结合翅片的结构，翅片的厚度结合实际一般很小，且小于翅间距，对厚度  $h$ ，间距  $L$  进行约束可得：

$$h \leq L \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} \quad (6.6)$$

$$y \leq 0.1 \quad (6.7)$$

综上所述：

$$s.t. \begin{cases} nx \leq \pi \\ m(L + h) = 12 \\ \frac{1}{2}xyhmn + 12\left(\frac{1-2y}{2}\right)^2\pi \leq 12 \\ h \leq L \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} \\ y \leq 0.1 \end{cases} \quad (6.8)$$

将  $m(L + h) = 12$  带入化简，得到

$$A = \frac{12}{L+h}n \times \left[ xy + 2h\sqrt{\frac{x^2}{4} + y^2} \right] + \frac{12}{L+h}nL \quad (6.9)$$

最终：

$$\begin{aligned} \max \quad & A = \frac{12}{L+h}n \times \left[ xy + 2h\sqrt{\frac{x^2}{4} + y^2} \right] + \frac{12}{L+h}nL \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} nx \leq \pi \\ \frac{1}{2}xyhmn + 12\left(\frac{1-2y}{2}\right)^2 \pi \leq 12 \\ h \leq L \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} \\ y \leq 0.1 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Step2: 初始值的确定

在非线性规划中对于初始值 $x_0$ 的选取非常的重要，因为对于非线性规划问题来说，所求解调用fmincon函数返回是一个局部最优解。所以初始解 $x_0$ 的选取至关重要。因此，为了得到最后所需的一个‘全局最优解’，在这里将采用蒙特卡罗模拟确定初始解 $x_0$ 。

Step1: 从上面四个约束条件中求得每个变量所能承受的大致范围。

Step2: 在该范围下，用随机数生成若干组实验点，并验证它们是否满足所有的约束条件，将所有满足的实验点划分到可行组内。

Step: 从可行组中找到所对应的最大值即为所需的非线性规划的初始值。

在这里选用 MATLAB 对该过程进行模拟，并得到如下结论：

表 2: 初始值

长度 x	宽度 y	厚度 h	间距 L	n	m
0.0500	0.0500	0.0100	0.0200	60	100

Step3: 将初始值带入到目标函数以及约束条件中，采用非线性规划的方式利用 MATLAB 中 fmincon 函数得到最优方案即

$$A=101.1646\text{m}^2$$

将 A 带入到第一问所构建的模型当中

$$\begin{aligned} \max \quad & n = \frac{cpv(t_{n+1} - t_{\infty}) + Ah(t_n - t_{\infty})}{75.75t_n + cpv_x(t_{n+1} - t_{\infty})} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} 0^{\circ}\text{C} \leq t_{n+1} \leq 80^{\circ}\text{C} \\ t_n \leq t_{n+1} \end{cases} \end{aligned}$$

此时所求得的 A 对应的服务器的个数  $n=439$ ，并且  $n<836.4$ ，与问题一相比：增加翅片即改进集装箱结构后，面积从  $12\pi\text{m}^2$  提升到  $101.1646\text{m}^2$ ，在满足正常工作温度不超过  $80^{\circ}\text{C}$  的条件下集装箱可容纳服务器的数量从 244 提升到了 439，即说明散热效果得到了提升。具体结果见表 3

表 3: 参数前后对比

散热面积 A/ $\text{m}^2$	集装箱可容纳服务器的数量 n/个
----------------------	------------------

增加翅片前	$12\pi$	244
增加翅片后	101.1646	439

此时所对应的翅片所对应的参数为：

表 4：翅片参数

长度 x	宽度 y	厚度 h	间距 L	n	m
0.04829	0.0271	0.0189	0.0392	63	198

将圆柱体延轴线剖开，翅片结构即排放如下图所示

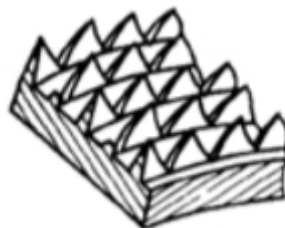


图 1：翅片设计图

## 7.问题三

### 7.1 问题三模型的建立

#### 7.1.1 基于模糊综合评价选取材料

##### 7.1.1.1 指标选取

在实际中，主要依据材料的抗压能力和抗腐蚀性来选择集装箱材料。首先将附件中的具有良好抗腐蚀性的合金提取出来，然后将反应抗压的参数 **Elastic Modulus**、**Yield Strength**、**Tensile Strength** 作为评选材料的三个指标。

##### 7.1.1.2 模型建立

在模糊评价模型的基础上，引入模糊综合评价模型来构建材料选取体系，应用变异系数法计算模糊综合评价模型每个指标的指标权重，通过加权平均法确定模糊综合评价结果，即确定材料的量化数值。

**Step1** 构建模糊综合评价模型：

i 确定评级指标和评价等级。本文将评价指标确定为 **Elastic Modulus**、**Yield Strength**、**Tensile Strength** 三个指标，评价等级为所取指标的具体量化。

ii 构造模糊综合评价矩阵。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

iii 根据变异系数法，确定各指标的权重。

a. 计算第 i 项指标的均值和方差

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (7.2)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (7.3)$$

b. 令  $v_i = s_i/|\bar{x}_i|$ , 归一化权重系数  $v_i$ , 即

$$w_i = v_i / \sum v_i \quad (7.4)$$

iv 选择合适的模糊合成算子, 使用加权平均算法来进行模糊综合运算, 即可得出信贷风险的量化值。

模糊合成算子:

$$M(\cdot, +): b_j = \sum_{i=1}^m (a_i \cdot r_{ij}) \quad (7.5)$$

### 7.1.2 全寿命周期成本模型的建立

在选定合适的材料后, 对可能出现的成本进行模拟。全寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 是指设备从购买、装备、运行、修理直至报废的全寿命过程需要支付的费用[5], 根据海底数据中心实际的运行情况把 LCC 分为初始投资成本  $C_1$ 、运行成本  $C_2$ 、维护成本  $C_3$ 、故障成本  $C_4$ 、和退役成本  $C_5$ , 计算公式

$$C_{LCC} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (7.6)$$

A. 初始投资成本:

初始投资成本  $C_1$  是指在海底数据中心投入运行之前所需要的费用, 包括材料购置费用  $C_{gz}$  和安装调试费用  $C_{az}$ :

$$C_1 = C_{gz} + C_{az} \quad (7.7)$$

其中, 安装调试费用为购置费用的 6.2% [6], 初始投资成本与材料的选取有关, 材料的耐压性和抗腐蚀性越好, 初始投资成本越高。

B. 运行成本:

运行成本  $C_2$  主要是: 设备在海底数据中心所用材料因海水的腐蚀造成的额外费用。

$$C_2 = \sum_{i=0}^{T-1} C_{sh} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^i \quad (7.8)$$

其中:  $C_{sh}$  为年损耗费用,  $R$  为折现率 ( $R=8\%$ ),  $r$  为通货膨胀率 ( $r=4\%$ ),  $i$  为年份

C. 维护成本

维护成本  $C_3$  包括每年为维护海底数据中心正常工作所耗费的人工费  $C_r$  以及材料维修费  $C_c$

$$C_3 = \sum_{i=0}^{T-1} (C_r + C_c) \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^i \quad (7.9)$$

$$C_c = f_m \gamma C_{gz} \quad (7.10)$$

其中,  $f_m$  为每年的平均维修次数,  $\gamma$  为单次维修费用因素, 结合参考 [7] 将其取值为 0.02

D. 故障成本

故障成本  $C_4$  是当海底数据中心发生故障时的损失值, 其中一部分为因其不能正常工作造成的损失, 另一部分为故障的检修费用:

$$C_4 = \sum_{i=0}^{T-1} (C_p + \varepsilon C_j) \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^i \quad (7.11)$$

其中,  $C_p$  为年故障损失费用,  $C_j$  为年故障修理费用 (一般选取 3%),  $\varepsilon$  为年故障率

#### E. 退役成本

退役成本  $C_5$  表示当海底数据达到最大使用年限后所包含的报废成本以及可以变卖的收益。

$$C_D = (C_{bf} - C_{cz}) \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^{T-1} \quad (7.12)$$

其中,  $C_{bf}$  为报废成本,  $C_{cz}$  为可变买收益,  $C_{az}$  为调试费 (一般  $C_{cz} = 32\%$ ),  $C_{gz}$  为购置费 (一般  $C_{gz} = 5\%$ ) [8]

### 7.1.3 多目标规划模型的建立

为综合考虑提升散热效果并尽可能降低成本, 以海底数据中心全寿命周期成本最小和散热效果最优及服务器数量最大为目标, 建立有关多目标规划模型,

$$\begin{cases} \min & C_{Lcc} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \\ \max & n = \frac{cpv(t_{n+1}-t_{\infty}) + Ah(t_n-t_{\infty})}{75.75t_n + cpv_x(t_{n+1}-t_{\infty})} \end{cases} \quad (7.13)$$

为使得目标函数同向化, 将上式转变为

$$\min \{C_{Lcc}, n\} \quad (7.14)$$

由于  $\begin{cases} \text{海水温度减少幅度较大, 海水深度} < 1000 \\ \text{海水温度变化幅度较小, 海水深度} \geq 1000 \end{cases}$ , 规划时选用的深度区间的数目相对较少, 因此可以省去优化算法的一般步骤, 直接经过计算得到各目标函数的值后, 把各目标函数值当作评价指标利用 TOPSIS 综合评价得到最优解。

### 7.1.4 TOPSIS 综合评价

Step1:

统一指标类型-----将原始矩阵正向化

原始矩阵正向话就是将所有的指标转化成极大型指标, 这里成本份额为极小型指标应转化为极大型指标。算法如下:

$$tran = max - xi \quad (7.15)$$

$max$  代表全寿命周期成本中数据的最大值,  $xi$  表示不同深度对应得成本,  $tran$  表示指标正向化后的结果。

正向化矩阵标准化

标准化的目的是消除不同指标量纲的影响, 为了保证评价体系的准确性更高, 这里正向化矩阵标准化, 设有 9 个要评价的对象, 2 个要评价的指标, 构成的正向化矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

那么对标准化后的矩阵记作 Z, 那么对 Z 中的每一个元素

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (7.16)$$

这样使评价结果更有准确性

Step2:

判断输入的矩阵中是否存在负数, 如果有则要重新标准化到非负区间

假设有 n 个要评价的对象 (这里指要选定得深度), m 个评价指标 (已正向化) 构成的正向矩阵如下

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

那么, 对其标准化的矩阵记为 Z, Z 中的每一个元素:  $z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}$  (7.17)

判断 Z 矩阵中是否存在着负数, 如果存在的话, 需要对 X 使用另一种标准化方法对矩阵 X 进行一次标准化得到  $\tilde{Z}$  矩阵, 其标准化的公式为:

$$\tilde{z}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (7.18)$$

计算第 j 项指标下第 i 个深度所占的比重, 并将其看作相对熵计算中用到的概率  
假设有 n 个要评价的深度, m 个评价指标, 且经过了上一步处理得到的非负矩阵为

$$\tilde{Z} = \begin{pmatrix} \tilde{z}_{11} & \cdots & \tilde{z}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{n1} & \cdots & \tilde{z}_{nm} \end{pmatrix}$$

计算概率矩阵 p, 其中 p 中每一个元素  $p_{ij}$  的计算公式如下:

$$p_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \tilde{z}_{ij}} \quad (7.19)$$

容易验证:  $\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1$  即保证了每一个指标所对应的概率和为 1.

对于第 j 个指标而言, 其信息熵的计算公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \ln(p_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (7.20)$$

令 信息效用值  $d_j = 1 - e_j$ ,

将  $d_j$  归一化, 能够得到每个指标的熵权:  $w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}$  (7.21)

第三步: 计算得分并归一化

设有 9 个要评价的对象, 2 个评价指标的标准化矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}$$

定义最大值  $z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+) = (\max\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \max\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}\}, \dots, \max\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$ 。这个向量表示求出每一个指标的最大值

定义最小值  $z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-) = (\min\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \min\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}\}, \dots, \min\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$ 。这个向量表示求出每一个指标的最小值， $w_j$  是 4.3 中的熵权。

定义第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 评价对象与最大值的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (7.22)$$

这里表示，每一个深度的每一个指标与该指标最大值之间的欧氏距离之和

定义第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 个评价对象与最小值的距离

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_j^- - z_{ij})^2} \quad (7.23)$$

这里表示，每一个深度的每一个指标与该指标最小值之间的欧氏距离之和

那么，我们可以计算得出第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 个深度与未归一化的得分： $s = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$  (7.24)

我们可以将得分归一化处理：

$$\tilde{s}_i = s_i / \sum_{i=1}^n s_i \quad (7.25)$$

## 7.2 问题三模型的求解

### 7.2.1 基于模糊综合评价选取材料的求解

利用熵权法对三个指标 Elastic Modulus、Yield Strength、Tensile Strength 进行赋权，结果见表 4

表 4：权重

指标	权重
Elastic Modulus	0.3646
Yield Strength	0.5344
Tensile Strength	0.1020

将赋得的值代入模糊综合矩阵中的到对于四种材料的评价结果，如表 5 所示：

表 5：评价结果

材料	评价结果
Ti6Al-4v	0.7768

Incoloy	0.5467
90-10 Copper-Nickel	0.4579
Aluminum alloy 7075	0.6634

根据模糊合成算子的结果选取了 Ti6Al-4V 为集装箱外壳材料。

### 7.2.2 全周期寿命成本的求解

由于海底深度在 0-1000 米温度下降较快，而在 1000 米以下温度下降不明显，但是考虑到随着海底深度的提高，对集装箱外壳材料的耐压性和抗腐蚀性的要求会大大提高，所以本文选取了深度为 200m, 300m, 400m, 500m, 600m, 800m, 1000m, 1500m, 2000m 进行分析，其深度对应的海水温度 $t_{\infty}$ 、传热系数 h 和最大容纳量 n 如表 5 所示

表 6: 深度与各项指标的对应关系

海底深度/m	$T_{\infty}/^{\circ}\text{C}$	传热系数 h	最大容纳量 n
200	20	295.271564	439
300	15	296.504944	510
400	12.5	296.8535565	543
500	9	297.1953473	596
600	7.5	298.8363436	630
800	5	299.5733983	698
1000	3.5	301.3938336	730
1500	2.5	302.5693323	765
2000	2	303.8032858	810

将选取的海底深度作为不同的规划方案，把上表数据代入 7.1.2 的模型对规划方案的 LCC 各个成本因子进行计算，结果如 7 所示

表 7: 海底深度与各成本关系

海底深度/m	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_{LCC}$
200	1803134	701616	1032165	601313	-57676.1	4080551.866
300	2306452	835381	1343832	683151	-68126.2	5100689.832
400	2809770	909146	1395499	734989	-235245	5614159.275
500	3313088	1012911	1467166	846827	-546368	6093624.12
600	3816406	1116676	1648833	928665	-1150020	6360560.221
800	4319724	1220441	1784500	1010503	-1430534	6904633.803
1000	4823042	1324206	1920167	1092341	-1977985	7181771.284
1500	5326360	1427971	1995834	1174179	-2178096	7746247.625
2000	5829678	1531736	2111501	1256017	-2236283	8492648.571

### 7.2.3 多目标规划模型的求解

根据式 (7.13) 建立多目标规划问题，在求得所有深度各目标函数的值（如表 5 和表 6）后，把目标函数值全寿命周期成本 CLCC 和最大容纳量 n 作为评价指标代入 TOPSIS 法评价模型进行求解，结果如表 8 所示

表 8: TOPSIS 结果



海底深度/m	n	CLCC	评价得分	TOPSIS 得分排序
200	439	40805.52	0.47973	7
300	510	51006.9	0.508216	4
400	543	56141.59	0.526092	1
500	596	60936.24	0.514097	3
600	630	63605.6	0.501609	5
800	698	69046.34	0.477837	8
1000	730	71817.71	0.469138	9
1500	765	77462.48	0.490443	6
2000	810	84926.49	0.52027	2

由表 8 可知，较低的海水深度会带来更好的散热效果，但是这对集装箱外壳材料的耐压性和抗腐蚀性要求不断提高，随之带来了成本的提升。所以综合考虑散热效果（这里用服务器的最大容纳量体现）和全寿命周期成本两个目标，根据 TOPSIS 评价得分，选取得分最高即深度为 400m 来的位置来安放海底数据中心。

## 8.问题四（灵敏度分析）

### 8.1 问题四模型的建立：

潮汐和季节的变化会改变局部的水位和温度，并会带来海水流速的改变，而水位的变化主要影响的是温度的改变。所以，本文把潮汐和季节变化因素转化为海水温度  $t_{\infty}$  和海水流速  $v$  的改变对海底数据中心集装箱散热效果的影响。而根据问题一的模型，可用单个集装箱外壳存放最多的服务器数量  $n$  的变化来体现海底温度和海水流速的变化对散热效果的影响。

#### 8.1.1 海底温度对散热效果影响的模型的建立

在问题四中存在大量的环境变量，包括空气比热容，空气密度，散热面积，集装箱体积。在观察海底温度对散热效果的影响时，可把  $h$  视为定值。将  $t_{\infty}$  取定一个变化范围，根据问题三的分析，此变化区间为  $2^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，代入问题一的目标函数进行求解：

$$n = \frac{c\rho v(t_{n+1}-t_{\infty}) + Ah(t_n-t_{\infty})}{75.75t_n + c\rho v_x(t_{n+1}-t_{\infty})} \quad (8.1)$$

来观察随着  $t_{\infty}$  的变化  $n$  的变化趋势，即可得到潮汐和季节的变化对海底数据中心散热效果的影响。

#### 8.1.2 海水流速对散热效果影响的模型的建立

在本问中存在大量的环境变量，在观察海水流速对散热效果的影响时，可把海底温度  $t_{\infty}$  视为定值。根据问题一的分析可知，海水流速  $v$  主要影响传热系数  $h$  进而影响集装箱服务器的最大容量  $n$ ，从而对散热效果带来的影响。通过公式：

$$h = \frac{0.664\sqrt{\rho v d p r^3 l \lambda}}{l} \quad (8.2)$$

可根据海水流速的变化范围来确定传热系数  $h$  的变化范围  
将公式(8.2)代入公式（8.1）中进行求解。来观察随着海水流速的变化  $n$  的变化趋势，即可得到潮汐和季节的变化对海底数据中心散热效果的影响。

## 8.2 问题四模型的求解：

问题四的环境变量包括，空气比热容  $c=1.003\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，集装箱内空气质量  $m=12.13\text{Kg}$ ，散热面积  $A=101.1646\text{m}^2$ （问题二改进结构后的面积）。在观察海底温度对散热效果影响时把传热系数视为定值为 295，对应海水流速为 31.4m/s；在观察海水流速对散热效果影响时把海底温度视为定值为  $25^\circ\text{C}$ 。

### 8.2.1 海底温度对散热效果影响的求解

查找资料发现，海底温度的大致变化范围为  $2\sim 20^\circ\text{C}$ ，上述环境变量和温度变化范围代入公式（8.1）进行求解来观察  $n$  的变化，并用 MATLAB 绘制曲线图，结果如图 1 所示

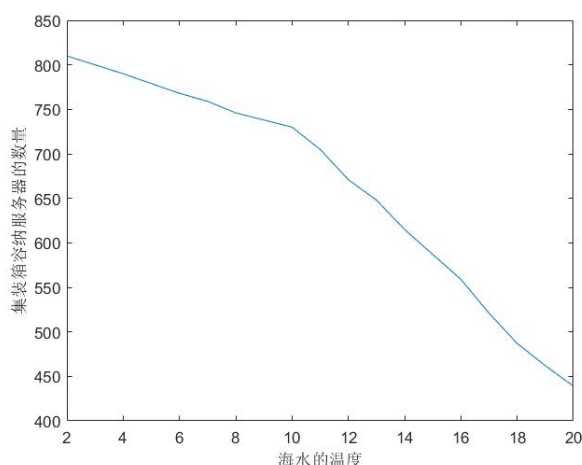


图 2：海水温度变化下服务器的变化

在图 1 中分析可得，随着潮汐和季节的变化伴随着海水的温度升高，最大服务器容纳量  $n$  即散热效果整体呈现下降趋势，且在海水温度小于  $10^\circ\text{C}$  时散热效果随着温度的降低变化趋势较小，而在海水温度大于  $10^\circ\text{C}$  时散热效果随海水温度变化趋势较大。

### 8.1.2 海水流速对散热效果影响的求解

海水流速的变化范围大致为  $25^\circ\text{C}$  到  $75^\circ\text{C}$ ，首先将海水流速  $v$  的变化范围代入公式（8.2）得到传热系数  $h$  的变化范围，上述环境变量和温度变化范围代入公式（8.1）进行求解来观察  $n$  的变化，并用 MATLAB 绘制曲线图，结果如图 2 所示：

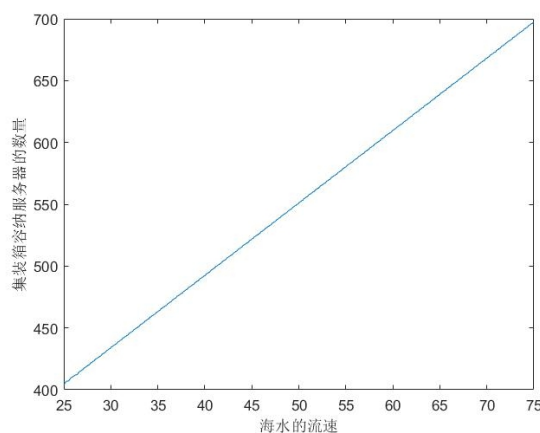


图 3：海水流速与服务器关系

观察图 2 可知，随着海水流速的提高，集装箱散热程度整体呈升高趋势，而且近似线性变化，所以散热程度对海水流速较为敏感。

## 9.建议信（问题五）

### 建议信

尊敬的各位领导：

我们非常荣幸有这样一个机会能与各位领导探讨海底数据外壳散热的设计问题。在这样一个全新的发展方向下，如何保证外壳的散热量是一个很重要的话题。基于前文研究得到的结果，我们冒昧地提出了一些相关的设计方面的建议。不足之处，还请领导批评指正。

海底水下中心相关的设计：海底水下中心如何设计对于集装箱内存放的服务器数量有很大的影响，一个好的集装箱外壳可以在有限的空间内满足功能，利益最大化。在结合海水散热情况以及服务器可以承受的最大工作温度等条件分析下，我们设计了一个传热模型，分析相关变量我们发现，海底水下中心的散热能力主要与传热面积有关，即集装箱外壳与海水的接触面积。当传热面积越大内部的散热效果越好，可以存放的服务器也将随之增加。通过分析，在规定尺寸下圆柱体集装箱要优于其他结构，并且通过在集装箱表面添加翅片结构可以更有效的增加传热面积。结合我们之前建立的传热模型，我们对翅片的规格进行了约束，最终得到了一个长为 0.04829m，宽 0.0271m，厚 0.0189m 的翅片结构，并且总共有 11907 个被安装在圆柱形集装箱表面。

海底水下中心的放置位置：海底水下中心由于放置的位置不同，所对应的实际海洋情况也会随之发生改变，内部可以容纳的最大服务器数也会发生变化。我们以潮汐和季节作为影响海水相应参数变化的外界环境因素，由于潮汐以及季节会对同一深度下海水的温度以及海流流速造成改变，因此我们结合相应的数据以及所建立的传热模型，对材料以及防止深度进行了讨论，最终得到。集装箱的材料应选用 Ti6Al-4v，并且放置在海水深为 400m 的位置，此时的散热效果即服务器放置个数将最优。

以上就是我们所设计的海底水下中心的相应参数。诚然，我们的模型相对于能否商业化还存在相当的局限性。但我们仍然希望您们能提供一定程度的帮助。感谢您们在百忙之中阅读我们的建议。

祝身体健康，工作顺利，企业发展更进一步！

此致

敬谢

Mathorcup 某团队

## 11.模型的评价改进与推广

### 11.1 优点

1. 本文综合考虑热传导和对流换热建立产热模型，对热量变化过程分为产热、传热、散热三个过程，考虑热量变化过程较为详细。
2. 将多目标规划模型转化为 TOPSIS 评价模型，降低了多目标求解的难度，较好量化了多目标并得到最佳方案。
3. 建立的模型符合实际求解情况，模型具有很好的通用性和推广性。

### 11.2 缺点

1. 在建立传热模型时，简化了海水流速方向，适用较为理想的环境下，不适用于更

为复杂的环境。

2. 模型具有局限性，没有考虑服务器在集装箱内的具体排列方式。

### 11.3 模型的推广

该模型对海底散热装置进行了研究，并给出了在忽略海底海流流速方向的改变，海流流速的骤变等复杂海域情况下，一个良好的海水散热装置。本文主要研究的是一个海底数据中心，通过分析相关参数对该数据中心的集装箱的尺寸，材料以及形状给出了有效的建议。但由于缺乏海水实际情况的相关数据，忽略了在实际条件下海水的变化。因此该形状设计不适用于复杂的环境。但通过对所建立传热模型的分析，可以得到：一个好的散热装置，关键取决于传热面积。因此无论是在复杂海域还是理想海域，大的传热面积均是首要考虑的设计指标。

在实际的生产当中，该模型可以为相应的海底散热装置提供一个新的设计想法，结合实际当中可能出现的各种情况，通过将增加文中所建模型的变量，可以在一定程度上帮助企业克服相应的难题。减少企业的损失。

## 参考文献

- [1] 刘鹏辉, 苏梅英, 李君, 周鸣昊. 基于高功率密度芯片应用的微流道散热研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(01): 129-132.
- [2] <https://max.book118.com/html/2018/0522/168012436.shtm>
- [3] 刘祯, 林鑫, 吴华伟, 叶从进, 耿向阳. 基于 STAR-CCM+ 的 IGBT 散热翅片结构设计研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(03): 128-134.
- [4] <http://www.gzuar.com/newsinfo/20180820161937743.html>
- [5] 向驰, 武峻波, 高峰, 等. 基于全寿命周期成本的标准配送式智能配电台区建设方案优化[J]. 供用电, 2016, 33(3): 40-45. XIANG Chi, WU Junbo, GAO Feng, et al. Construction scheme optimization of standard distribution type smart power distribution area based on life cycle cost[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(3): 40-45.
- [6] 杨楠, 李宏圣, 袁景颜, 等. 计及不确定性和全寿命周期成本的配电变压器规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 94-104. YANG Nan, LI Hongsheng, YUAN Jingyan, et al. Planning method of distribution transformer considering uncertainty and life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 94-104.
- [7] 杨文锋, 王彬宇, 程卓, 等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604. YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium-and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [8] 夏成军, 邱桂华, 黄冬燕, 等. 电力变压器全寿命周期成本模型及灵敏度分析[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 26-30. XIA Chengjun, QIU Guihua, HUANG Dongyan, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of power transformer[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 26-30.

## 附录

### 附录一

介绍: MATLAB 非线性规划模型代码

```
clear;clc
format long g
x0 = [300,294];
Aeq = [-1,1];
beq = 0;
lb = [293,293];
ub = [353,353];
[x,fval] = fmincon(@fun1,x0,[],[],Aeq,beq,lb,ub,@fei)
fval = - fval
```

### 附录二

介绍: MATLAB 蒙特卡洛模拟确定初始解和确定最大面积 A 代码

```
clear;clc
format long g
clc,clear;
n=10000;
x1=unifrnd(0,100,n,1);
x2=unifrnd(0,100,n,1);
x3=unifrnd(0,100,n,1);
x4=unifrnd(0,100,n,1);
x5=unifrnd(0,100,n,1);

fmax=-inf; %

for i=1:n
    x = [x1(i), x2(i),x3(i),x4(i),x5(i)]
    if (x(5)*x(1)-pi<=0) &
(0.5*x(1)*x(2)*x(3)*x(5)*(12/(x(3)+x(4)))+12*(1-2*x(2)/2)^
2*pi-12 <= 0)
        result =
(x(5)*(12/(x(3)+x(4))))*(x(1)*x(2)+2*x(3)*sqrt((x(1)^2)/4+x
(2)^2)+x(1)*x(4))
        if result > fmax
            fmax = result;
            x0 = x ;
        end
    end
end
disp(x0)
```

```

disp(fmax)

A = [0,0,1,-1,0,0];
b = 0;
lb = [0,0,0,0,0,0]
ub = [pi,(sqrt(2)-1)/2,0.1,0.1,+inf,+inf]
[x,fval] = fmincon(@mf,x0,A,b,[],[],lb,ub,@lim)
fval = -fval

```

### 附录三

#### 介绍:MATLAB 模糊综合评价代码

```

[m,n]=size(A);%找出多少行多少列
maxA=max(A);%找出每列最大值
minA=min(A);%找出每列最小值
G=maxA-min(A);%最大值减去最小值
A1=max(A(:,1));%A1
A2=max(A(:,2));%A2
A3=max(A(:,3));
u=[A1,A2,A3];
R=zeros(m,n);%将模糊综合矩阵初值设置为 0
% 如下是得出模糊综合矩阵
for i=1:m
    for j=1:n
        R(i,j)=abs(A(i,j)-u(j))/G(j);
    end
end
%利用变异系数计算权向量
x=mean(A);
s=std(A);
v=s./x;
v2=sum(v);
c=zeros(1,3);
for i=1:3
    c(i)=v(i)/v2;
end
FF=R*c';

```

## 附录二

### 介绍: MATLAB TOPSIS 综合评价代码

```
load X.mat
[n,m] = size(X);
Judge = input(['J 为 0 或者 1:  ']);

if Judge == 1
    Position = input('正向化处理的指标所在的列:  '); % [2,3,4]
    Type = input('输入区间:  ');
    for i = 1 : size(Position,2)
        X(:,Position(i)) = Positivization(X(:,Position(i)),Type(i),Position(i));
    end
    disp('正向化后的矩阵 X = ')
    disp(X)
end
Z = X ./ repmat(sum(X.*X) .^ 0.5, n, 1);
disp(Z)
Judge = input('是否需要增加权重:  ');
if Judge == 1
    Judge = input('使用熵权法确定权重请输入 1, 否则输入 0:  ');
    if Judge == 1
        if sum(sum(Z<0)) > 0
            for i = 1:n
                for j = 1:m
                    Z(i,j) = [X(i,j) - min(X(:,j))] / [max(X(:,j)) - min(X(:,j))];
                end
            end
            disp(Z)
        end
        weight = Entropy_Method(Z);
        disp(weight)
    else
        weight = input(['输入这' num2str(m) '个权重: ']);
        OK = 0;
        while OK == 0
            if abs(sum(weight) - 1) < 0.000001 && size(weight,1) == 1 && size(weight,2) == m
                OK = 1;
            else
                weight = input('重新输入权重行向量: ');
            end
        end
    end
else
    weight = ones(1,m) ./ m ;
end
```



```
D_P = sum([(Z - repmat(max(Z),n,1)) .^ 2] .* repmat(weight,n,1),2) .^ 0.5;  
D_N = sum([(Z - repmat(min(Z),n,1)) .^ 2] .* repmat(weight,n,1),2) .^ 0.5;  
S = D_N ./ (D_P+D_N);  
stand_S = S / sum(S)  
[sorted_S,index] = sort(stand_S,'descend')
```