

队伍编号	mc21040040002
题号	C

## 海底数据中心的散热优化设计

### 摘 要

随着云计算、大数据等新兴技术趋势的发展，服务器机柜不断增加，随之而来是能源利用效率低等一系列问题。为了解决这些问题微软公司将其沉入海底打造一个海底数据中心，使之成本，时延更低，可靠性和安全性更高。而如何在有限的体积内存放更多的服务器并保证服务器工作过程中向海水中正常快速散热是一项非常有挑战性的问题，我们将通过解决本文以下的问题，给企业提供合适的设计方案。

针对问题一，在仅考虑服务器散热需求的基础上，利用牛顿冷却公式求出不同对流传热所需要的服务器个数，同时结合题目中给的限定条件，求得理想情况下服务器存放个数，建立线性规划模型。得到的结论是：在自然对流换热下，存放该服务器的界限大约处于 80-94 个之间，而强制对流换热条件下大约处于 800-836 个之间。

针对问题二，通过分析三种不同的翅片结构，采用随机抽样类比分析的方法，找到影响每种翅片结构的主要因素并依据翅片结构的结构参数设计集装箱外壳。可以得出锯齿形翅片结构适用于长方体集装箱，波纹形翅片结构对圆柱体的集装箱散热效果更好。

针对问题三，采用因子分析法对附件中的数据分析，排除不适用于海底的材料。采用 BP 神经网络对其他材料进行分析，以力学参数，几何参数，海水深度压力为输入建立模型，分析其组成，密度，屈服强度，抗拉强度等属性，输出最合适的材料为镍合金 monel400。

针对问题四，采用时间序分段的算法建立潮汐与季节对集装箱散热变化的动态模型，求解的思路是通过对有无潮汐以及潮汐前期，中末期以及潮汐退却后集装箱的水位变化，季节变化带来的温度改变综合分析，得到的结论是：潮汐来临时，集装箱相对水位变深，散热效果好，温度越低散热效果也更好。

针对问题五，综合分析上述问题，对相关公司的海底数据中心的服务器存放个数，外壳形状设计，材料的选取，高度的设计，季节潮汐的变化这五个方面提出建议。

**关键词：**MATLAB，线性规划，曲线拟合，随机抽样，BP 神经网络，因子分析，数值模拟，时间序列分段法，动态规划

# 目录

一、问题重述.....	1
1.1 问题背景.....	1
1.2 问题概述.....	1
二、问题分析.....	2
2.1 对问题的整体分析.....	2
2.2 对问题的具体分析.....	2
2.2.1 对仅考虑服务器的散热需求评估集装箱容量的分析.....	3
2.2.2 对考虑翅片结构实现最大化散热效果的集装箱外壳设计的分析.....	3
2.2.3 对耐压能力，成本效益，抗腐蚀三种因素对集装箱材质与海底深度的分析.....	3
2.2.4 对水位和温度影响数据中心散热效果的分析.....	3
2.2.5 对相关公司海底数据中心散热设计部门的建议.....	3
三、模型假设.....	4
四、定义与符号说明.....	4
五、模型的建立与求解.....	4
5.1 问题一的求解.....	4
5.1.1 数据处理.....	5
5.1.2 算法分析.....	6
5.1.3 建立模型.....	6
5.1.4 得出结论.....	8
5.2 问题二的求解.....	9
5.2.1 数据分析.....	9
5.2.2 数据处理.....	9
5.2.3 建立模型.....	13
5.2.4 得出结论.....	14
5.3 问题三的求解.....	15
5.3.1 数据分析.....	15
5.3.2 数据处理.....	15
5.3.3 建立模型.....	16
5.3.4 得出结论.....	18
5.4 问题四的求解.....	19
5.4.1 数据分析.....	19
5.4.2 算法分析.....	20
5.4.3 建立模型.....	21
5.4.4 得出结论.....	22
5.5 问题五的求解.....	23
六、模型评价与推广.....	24
6.1 模型的优点.....	24
6.2 模型的缺点.....	24
6.3 模型的推广.....	24
七、参考文献.....	25
八、附录.....	26

# 一、问题重述

## 1.1 问题背景

信息的高速发展使支撑设备运行的无数个服务器的数目增加，一个数据中心耗掉的能源中大约 25%是用来服务它们的，而目前全球的能耗仍呈现指数级的增长，如何低成本的给数据中心降温一直是一个让人头疼的问题。

在国家海洋科学数据中心建设运行实施方案专家论证会上，对于加快推动海洋强国和科技创新强国建设，抓住海洋科学数据中心建设契机，围绕数据资源收集保存、涉海科技计划数据汇交、产品开发应用和共享开放等方面创新机制、强化服务，专家组们一致认为国家海洋科学数据中心建设，是新时期推动国家创新驱动发展战略的重要举措。



图 1 海底数据中心

恰逢微软（Microsoft）日前结束一场长达数年的实验，团队成员通过在海底深 117 英尺（约 35 米）处部署了 Northern Isles 数据中心。经过测试与监测，海底数据中心的故障率是陆上数据中心的八分之一。证实了海底数据中心的服务器的性能和可靠性。

日前《珠海市创建珠江三角洲国家大数据综合试验区实施方案》提出，将先行先试建设珠江三角洲国家大数据综合试验区，加快推动珠海市大数据应用和产业发展，实现珠海智慧城市产业孵化器、智能制造公共技术平台、智慧城市体验馆等多项功能。2021 年 1 月 10 日，全国首个海底数据舱在珠海高栏港揭幕，这标志着我国大数据中心走进了“海洋时代”。

## 1.2 问题概述

大数据建设在陆地上需要占用大量土地，冷却时需要消耗大量的电能和冷却水资源，并花费大量的建设成本。而微软将数据中心沉入海底，解决了这方面的问题。不仅方便了传递数据信息，减少了占地面积，而且还减少了数据包延迟，以及解决了热通道

问题。通过对服务器产热的计算，集装箱容量的预估以及集装箱外壳结构的设计、季节温度、压力、耐腐蚀性、潮汐引起的水位变化等多方面因素综合考虑进行海底数据中心的优化设计。

## 二、问题分析

### 2.1 对问题的整体分析

“海底数据中心项目(Project UDC)”对岸上土地占用极少，没有冷却塔，无需淡水消耗，既可以包容海洋牧场、渔业网箱等生态类活动，又可与海上风电、海上石油平台等工业类活动互相服务。将数据中心部署在沿海城市的附近水域可以极大地缩短数据与用户的距离，不仅无需占用陆上资源，还能节约能源消耗，是完全绿色可持续发展的大数据中心解决方案。

本文主要研究海底数据中心的散热优化问题，针对此问题，我们团队将对此分成 5 个问题进行研究。根据本文的研究思路，先给出整体的思路流程图，如图 2 所示

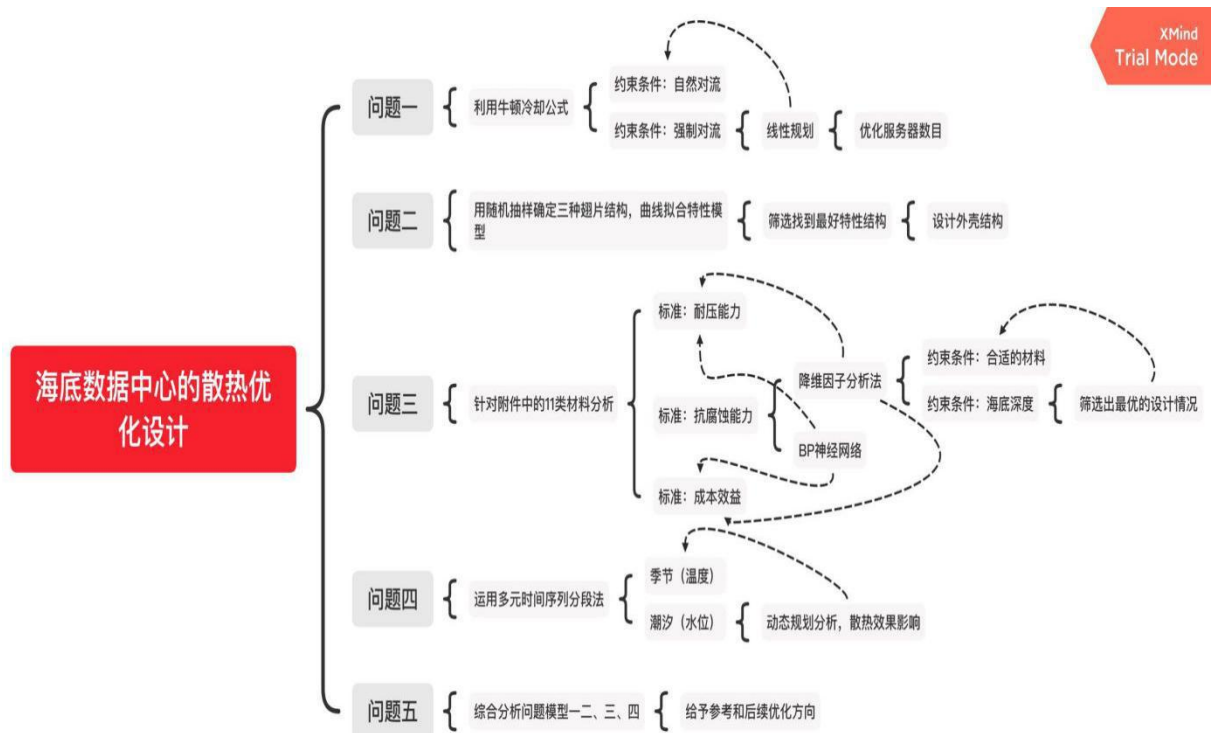


图 2 整体思路分析

### 2.2 对问题的具体分析

### 2.2.1 对仅考虑服务器的散热需求评估集装箱容量的分析

在尺寸与单个 IU 服务器产热功效固定的限制条件下，约束中心温度与最大温度，仅考虑服务器散热需求（包含辐射，传导，对流），在本题忽略辐射与传导带来的影响，从对流方式入手，对两种不同的对流方式进行分析，利用牛顿冷却定律，MATLAB 中的线性规划与曲线拟合，求解单个集装箱外壳存放服务器的最大值。

### 2.2.2 对考虑翅片结构实现最大化散热效果的集装箱外壳设计的分析

结合对问题一的分析，通过利用 Matlab 以及数学中的控制变量，数值模拟曲线拟合等方法对不同翅片不同结构进行分析，主要考虑以下三种结构：平直型翅片，锯齿型翅片，波纹型翅片。通过对影响每种翅片的因素进行随机抽样，数值分析得到散热效果最好的翅片结构。同时综合考虑不同类型的结构如圆柱体，长方体，球体等找出每种结构最适合的翅片形式。

### 2.2.3 对耐压能力，成本效益，抗腐蚀三种因素对集装箱材质与海底深度的分析

针对附件中给的相关材料，通过因子分析法将不符合使用材料的几大类排除，同时运用 BP 神经网络，以力学参数，几何参数，海水深度压力为输入，热力学特性，耐压特性，耐腐蚀特性为输出。在通过对数据材料中各个材料的密度，屈服强度，抗拉强度，弹性模量等方面耐压能力进行评估，对材料组成等因素分析成本效益，对电位，腐蚀类型以及特殊备注进行抗腐蚀性分析。

### 2.2.4 对水位和温度影响数据中心散热效果的分析

通过使用时间序列分段法，将四个季节中每个季节都分成不同的时间段，逐个时间段采用动态规划分析温度的变化情况与对海底数据中心散热效果，同时考虑潮汐的影响，将潮汐的阶段分为潮汐来临前期，中后期，以及潮汐退却后的三个时期再用时间序列分段法逐个细致研究其影响集装箱散热情况。最后结合两种因素季节与水位，综合考虑其对集装箱的共同散热情况。

### 2.2.5 对相关公司海底数据中心散热设计部门的建议

本题基于前四小题的结果在满足密闭空间中最优散热的前提下，充分考虑其影响因

素：服务器的个数，集装箱的外壳结构，温度，压力，材质，水位等方面，建立数学模型并参考大量文献，对海底数据中心的散热优化设计提出一些建议。

### 三、模型假设

1. 假设题目中所给的数据真实可靠；
2. 所有程序中由于计算机运行带来的误差可忽略不计；
3. 假设选取的数据样本点都符合要求；
4. 假设忽略掉的数据对模型的影响很小，可以忽略不计；
5. 假设忽略的特殊因素对材质影响很小。

### 四、定义与符号说明

符号	符号说明
1	影响程度最高
2	影响程度较高
3	影响程度中等
4	影响程度较低
5	影响程度最低
6	材质对散热影响程度最高
7	材质对散热影响程度较高
8	材质对散热影响程度中等
9	材质对散热影响程度较低
10	材质对散热影响程度最低

### 五、模型的建立与求解

#### 5.1 问题一的求解

根据问题一的要求即集装箱的尺寸与形状固定，服务器产热功效固定，采用线性规划的方法，找寻自变量与因变量之间的关系，采用牛顿冷却定律，曲线拟合以及装箱方法，求解装入集装箱的服务器个数。

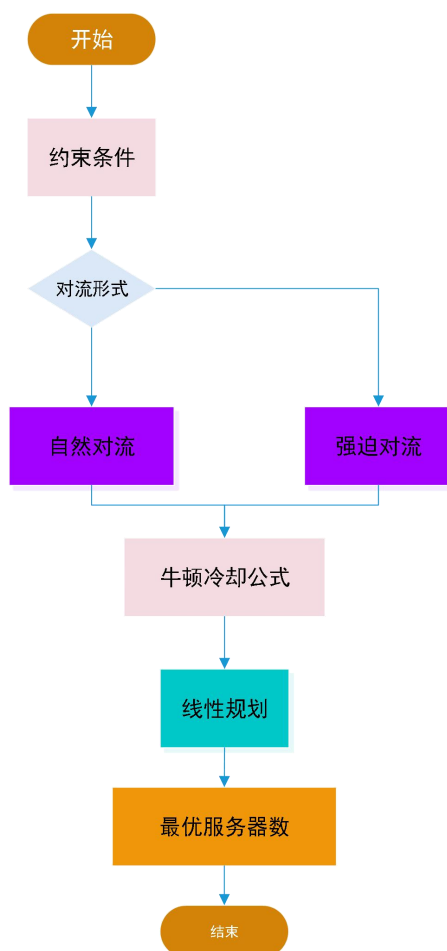


图 3 问题一的思路分析

### 5.1.1 数据处理

根据题目中给出约束条件：集装箱的尺寸直径 1m，长 12m，南海温度 20 摄氏度的海域深度，IU 服务器的产热为 500W, 正常工作温度不超过 80 摄氏度，以及给定服务器的长宽高分别为 525mm, 482.6mm, 44.5mm 的范围利用牛顿冷却定律对不同冷却方式的处理如下：

$$\phi = Ah(t_w - t_f) \dots\dots\dots (1)$$

依据数据中心沉入海底的原理，在自然对流的条件下，水自然对流换热系数 h 的数值范围为 100-1000，假设这时服务器的个数为  $x_1$ ，得出：

$$500x_1 = \frac{\pi}{4} \times 100 \times (80 - 20) \text{ 或 } 500x_2 = \frac{\pi}{4} \times 1000 \times (80 - 20) \dots\dots\dots (2)$$

所以，自然对流情况下存放服务器的个数大约在 9-94 之间。

而在强制对流的条件下，水强制对流换热系数 h 的数值范围为 1000-15000，假设这时服务器的个数为  $x_2$ ，得出：

$$500x_2 = \frac{\pi}{4} \times 1000 \times (80 - 20) \text{ 或 } 500x_2 = \frac{\pi}{4} \times 15000 \times (80 - 20) \quad \dots\dots\dots (3)$$

因此，强制对流情况下存放服务器的个数大约在 94-1413 之间。

在只考虑体积条件下，设服务器的个数  $x_3$ ，这时存放服务器个数为：

$$x_3 = (\frac{\pi}{4} \times 12) \div (525 \times 482.6 \times 44.45 \times 10^{-9}) \approx 836 \quad \dots\dots\dots (4)$$

### 5. 1. 2 算法分析

$$\min_x \quad c^T x \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$s.t. \begin{cases} Ax \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中  $c$  和  $x$  为  $n$  维列向量， $A$ 、 $Aeq$  为适当维数的矩阵， $b$ 、 $beq$  为适当维数的列向量。

一般线性规划问题的数学标准型为：

$$\max \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i (i=1,2,\dots,m) \\ x_j \geq 0 (j=1,2,\dots,n) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

### 5. 1. 3 建立模型

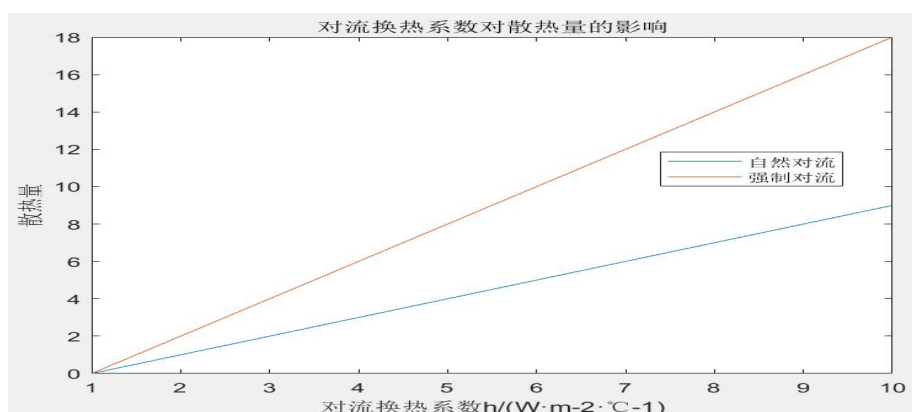


图 4 对流换热系数对散热量的影响

表面传热系数的大小反应了对流换热的强弱，它不仅取决于流体的物性，流动的状态，流动的成因，物体表面的形状和尺寸还与换热时流体有无相变等因素有关。如图 4



所示随着水对流换热系数的增加，散热量与其呈线性变化，其散热量逐渐增强，且水强制对流换热系数远大于水自然对流换热系数。

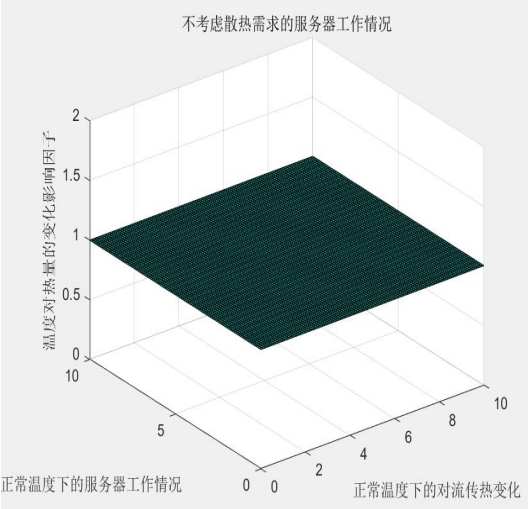


图 5 不考虑散热需求的工作情况

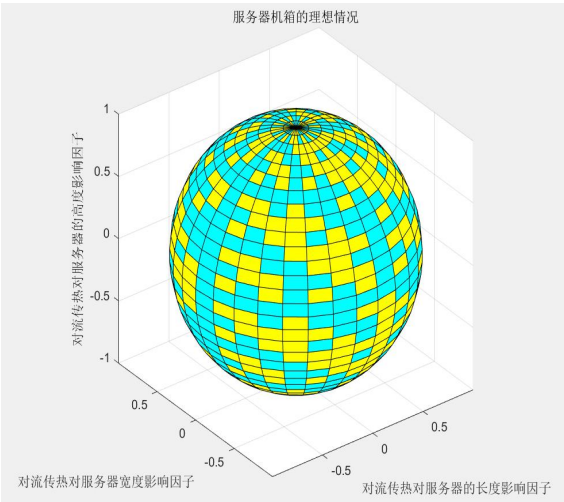


图 6 服务器机箱的理想情况

观察图 5，在不考虑产生热量需求理想情况下，正常温度下的服务器工作情况与对流热变化都保持不变，则不会影响温度的改变从而温度对热量的变化几乎可以忽略。理想条件下服务器可以一直持续工作，如图 6，采用装箱技术在集装箱中可以忽略产热的影响，无空隙的放置服务器以求达到集装箱中最大的容量。

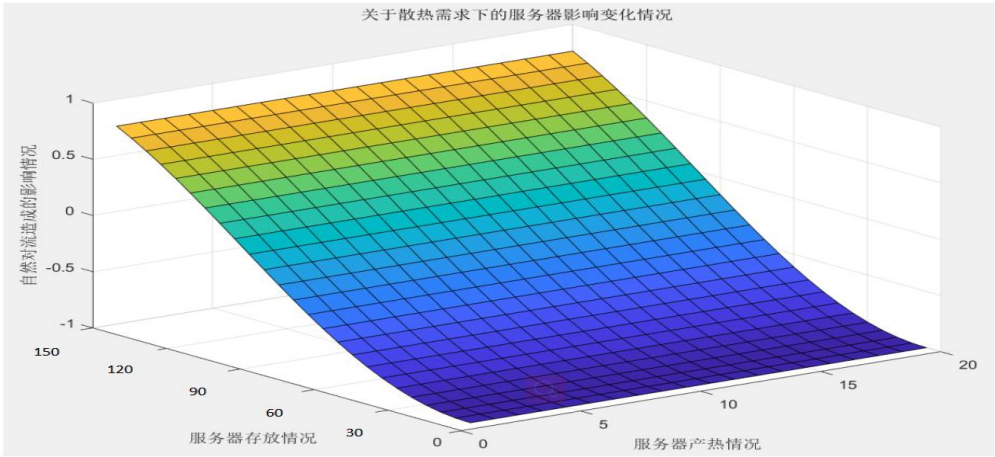


图 7 关于自然对流散热需求下的服务器影响变化情况

如图 7，通过分析服务器产热情况，服务器存放情况以及水自然对流换热三方面因素，采用曲线拟合方法拟合出图像，从图中可以看出随着服务器存放逐渐增多，服务其产热也逐渐增多，自然对流造成的影响情况也在逐渐改变。当存放服务器数据在 80-100 之间，服务器产热相对较少，自然对流造成的影响在可以接受范围内。满足题目中即要求温度不超过 80 摄氏度，又能使单个集装箱外壳中存放尽可能多的服务器。

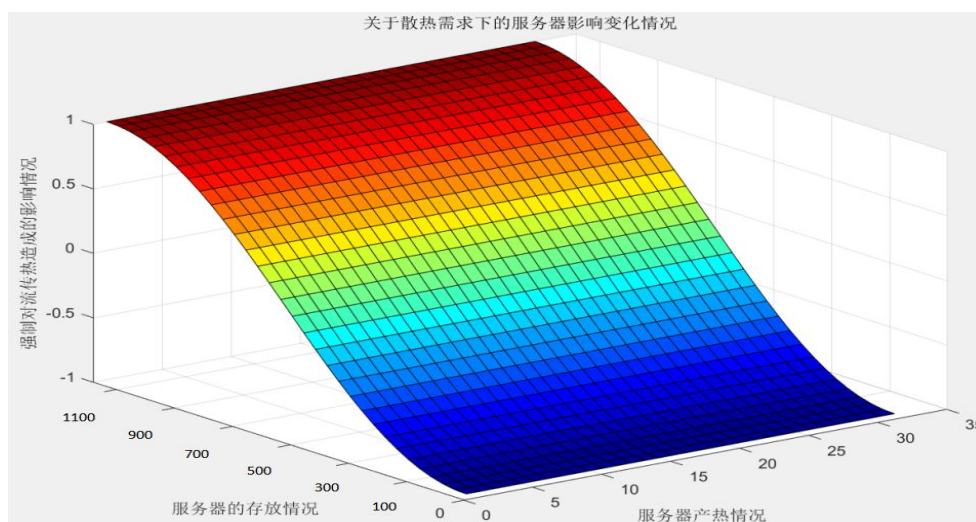


图 8 关于强制对流散热需求下的服务器影响变化情况

又如图 8，对水强制对流换热进行曲线拟合并评估服务器产热情况，服务器存放情况以及水自然对流换热三方面因素。同样从图中可以看出随着服务器存放逐渐增多，服务其产热也逐渐增多，强制对流造成的影响情况也在逐渐增加。因强制对流是采取用外界方式对密闭空间进行强制降温，因而存放服务器数量可以增多，从图中可以看出，当存放服务器数据在 700-900 之间，服务器产热相对较少，强制对流造成的影响在可以接受范围内。在该范围内可以很好的满足题目要求。

#### 5.1.4 得出结论

通过运用牛顿冷却公式，对自然对流换热和强制对流换热两种方式分别进行讨论，利用 MATLAB 和曲线拟合建立了它们分别对散热效果的影响模型图，对比后发现强制对流换热的影响效果要大于自然对流换热，再结合本题的限制条件（体积与温度），我们使用了线性规划和已知的数据进行了计算，得出在自然对流换热下，该存放服务器的界限大约处于 80-94 个之间，而强制对流换热条件下大约处于 800-836 个之间。

## 5.2 问题二的求解

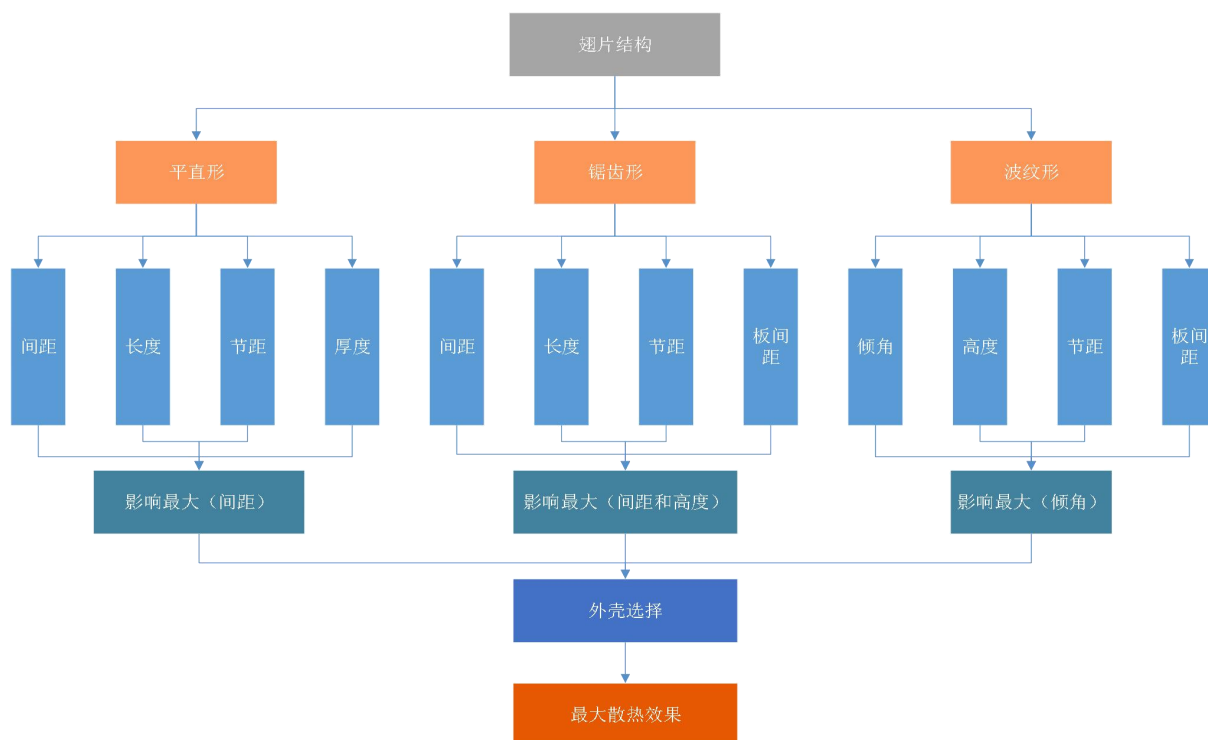


图 9 问题二的思路分析

### 5.2.1 数据分析

通过查阅相关资料，找到最具有代表性的三种翅片结构：波纹形的翅片结构，锯齿形的翅片结构，以及平直形的翅片结构，通过随机抽取的数据分析波纹形翅片结构的倾角，高度，节距以及板间距，锯齿形以及平直形翅片结构的间距，长度，节距，厚度四方面因素，寻找散热效果最好的尺寸。

### 5.2.2 数据处理

#### (1) 锯齿形翅片

表 1 锯齿形翅片参数

		间距/mm	长度/mm	节距/mm	板间距/mm	对流换热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$A_1$	1	1.85	—	—	—	332
	2	2.1	—	—	—	310
	3	2.35	—	—	—	268
	4	2.6	—	—	—	192
	5	2.85	—	—	—	155
	6	3.1	—	—	—	132

	7	3.35	—	—	—	98
	8	3.6	—	—	—	56
$A_2$	1	—	3.5	—	—	385
	2	—	5	—	—	351
	3	—	9.5	—	—	320
	4	—	11.5	—	—	276
	5	—	15	—	—	230
	6	—	17.5	—	—	180
	7	—	19	—	—	123
	8	—	21	—	—	52
$A_3$	1	—	—	2	—	23
	2	—	—	2.2	—	32
	3	—	—	2.4	—	40
	4	—	—	2.6	—	70
	5	—	—	2.8	—	99
	6	—	—	3.0	—	132
	7	—	—	3.2	—	156
	8	—	—	3.4	—	189
$A_4$	1	—	—	—	0.2	275
	2	—	—	—	0.22	255
	3	—	—	—	0.24	210
	4	—	—	—	0.26	196
	5	—	—	—	0.28	175
	6	—	—	—	0.3	123
	7	—	—	—	0.32	87
	8	—	—	—	0.34	52

(2) 波纹形翅片

表 2 波纹形翅片参数

	倾角 $\beta/ (^{\circ})$	高度 H/mm	节距 P/mm	板间距 B/mm	对流换热系数 $h/(W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1})$
$B_1$	1	10	—	—	123
	2	17.5	—	—	130
	3	20	—	—	132
	4	26	—	—	139
	5	37	—	—	141
	6	42	—	—	153
	7	51	—	—	162
	8	60	—	—	171
$B_2$	1	—	2	—	110
	2	—	4	—	118
	3	—	6	—	126
	4	—	8	—	132
	5	—	10	—	136
	6	—	12	—	140
	7	—	14	—	143
	8	—	16	—	149
	9	—	18	—	152

B <sub>3</sub>	1	—	—	10	—	149.5
	2	—	—	15	—	147
	3	—	—	20	—	145.5
	4	—	—	25	—	144
	5	—	—	30	—	143
	6	—	—	35	—	142
	7	—	—	40	—	138.5
B <sub>4</sub>	1	—	—	—	5	258
	2	—	—	—	10	176
	3	—	—	—	15	158
	4	—	—	—	20	152
	5	—	—	—	25	147
	6	—	—	—	30	136
	7	—	—	—	35	132

(3) 平直形翅片

表 3 平直形翅片参数

	间距/mm	长度/mm	节距/mm	厚度/mm	对流换热系数(W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
C <sub>1</sub>	1	2.38	—	—	134
	2	3.79	—	—	421
	3	1.01	—	—	764
	4	0.24	—	—	134
	5	13.52	—	—	954
	6	24.7	—	—	144
	7	21.12	—	—	642
	8	1.91	—	—	163
C <sub>2</sub>	1	1.31	—	—	542
	2	1.01	—	—	214
	3	1.12	—	—	754
	4	1.63	—	—	532
	5	1.47	—	—	127
	6	1.52	—	—	614
	7	1.84	—	—	211
	8	2.01	—	—	701
C <sub>3</sub>	1	—	1	—	23
	2	—	2	—	561
	3	—	3	—	69
	4	—	4	—	231
	5	—	5	—	521
	6	—	6	—	90
	7	—	7	—	532
	8	—	8	—	12
C <sub>4</sub>	1	—	—	0.01	631
	2	—	—	0.02	123
	3	—	—	0.03	450
	4	—	—	0.04	13
	5	—	—	0.05	61
	6	—	—	0.06	421
	7	—	—	0.07	19
	8	—	—	0.08	290

### 5.2.3 算法分析

数学表述：设给定离散数据

$$(x_k, y_k)(k=1, 2, \dots, m), \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中  $x_k$  为自变量  $x$  (标量或向量，即一元或多元变量)； $y_k$  为因变量  $y$  (标量) 的相对值。

曲线拟合要解决的问题是寻求与 (7) 的背景规律相适应解析表达式

$$y = f(x, b), \quad \dots\dots\dots (8)$$

使它在某种意义下最佳地逼近或拟合 (7),  $f(x, b)$  称为拟合模型； $b = (b_0, b_1, \dots, b_n)$  为待定参数，当  $b$  仅在  $f$  中线性地出现时。称该模型为线性的，否则为非线性的。量

$$e_k = y_k - f(x_k, b)(k=1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (9)$$

称为在  $x_k$  处拟合的残差或剩余，衡量拟合优度的标准通常有

$$T(b) \equiv \max_{1 \leq k \leq m} w_k |e_k| \text{ 或 } Q(b) \equiv \sum_{k=1}^m w_k e_k^2,$$

式中  $w_k > 0$  为权系数或权重（如无特别指定，一般取为平均权重，即  $w_k = 1$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 此时无需提到权）。当参数  $b$  使  $T(b)$  或  $Q(b)$  达到最小时，相应的 (8) 分别称为早加权切比雪夫意义或加权最小二乘意义下对 (7) 的拟合，后者在计算机上较简便且最为常用。

模型中参数的确定，一般的线性模型是以参数  $b$  为系数的广义多项式，即

$$f(x, b) = b_0 g_0(x) + b_1 g_1(x) + \dots + b_n g_n(x), \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中  $g_0, g_1, \dots, g_n$  称为基函数。对诸  $g_j$  的不同不同选取可构成多种典型的和常用的线性模型。从函数逼近的观点来看，式 (10) 还能近似体现出许多非线性模型的性质。

在最小二乘意义下用线性模型 (10) 拟合离散点组 (7)，参数  $b$  可通过解方程组

$$\frac{\partial Q(b)}{\partial b_i} = 0 (i=0, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (11)$$

来确定，即解关于  $b_0, b_1, \dots, b_n$  线性代数方程组

$$\sum_{j=0}^n s_{ij} b_j = s_{iy} (i=0, 1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^m w_k g_i(x_k) g_j(x_k) (i, j=0, 1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$R_1 = \frac{L \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad R_2 = \frac{L \cdot \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

方程组（12）通常称为法方程或正规方程，当  $m > n$  时一般有唯一解。

### 5.2.3 建立模型

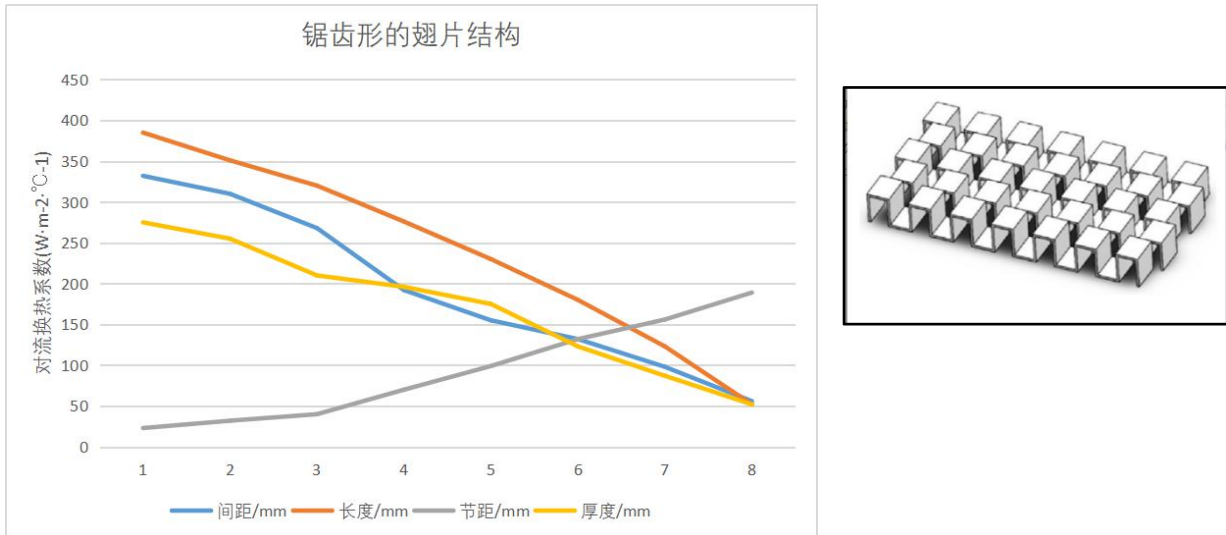


图 9 锯齿形翅片结构与对流换热系数的影响

如图 9 拟合模型所示，在默认其他因素相同的条件下，对  $A_1, A_2, A_3, A_4$  组不同影响因素的变化进行分析，间距，长度，厚度的变化导致锯齿形翅片的对热交换系数下降，且长度与间距对对热交换系数影响巨大，反观节距，随着 8 个组节距的增大，对应换热系数逐渐变大。

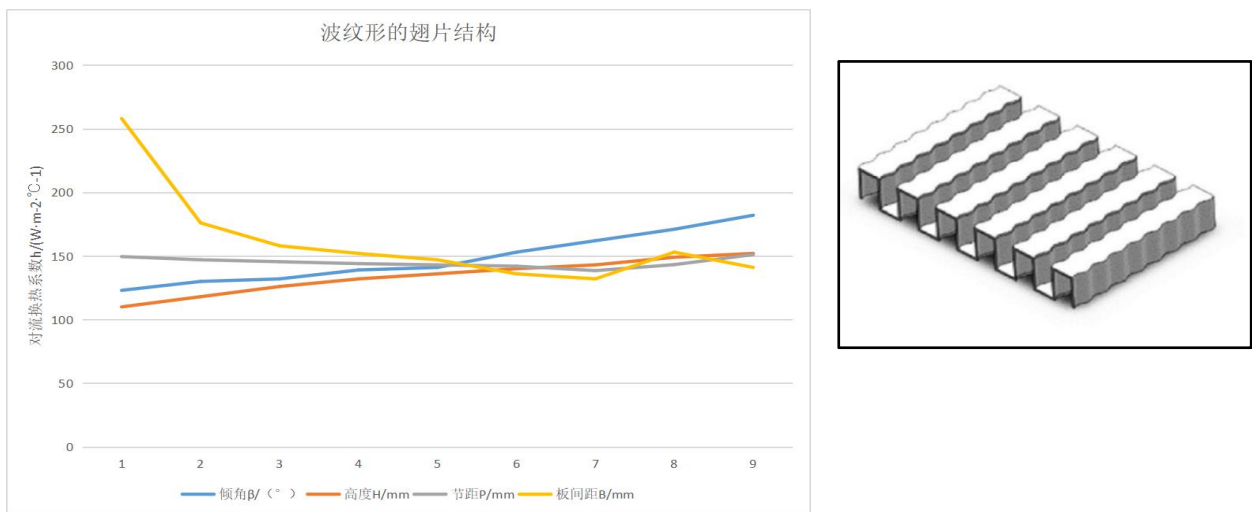


图 10 波纹形翅片结构与对流换热系数的影响

如图 10 所示将影响波纹形翅片结构的四种主要因素分组讨论，查询数据采用数值



模拟，曲线拟合的方法绘制在图上，当  $B_1$  组其他因素默认相同时，可以看出倾斜角增加对流换热系数也逐渐增大且倾斜角影响程度呈线性增长；当  $B_2$  组其他因素默认相同时，8 组数据随着高度的增大对流换热系数也随之增大，其影响程度小于倾斜角；当  $B_3$  组其他因素默认相同时，节距的改变对对流传换系数影响较少，随着节距的增加，对流传换系数逐渐减少；当  $B_4$  组其他因素默认相同时，从图中可以明显观察到板间距的减少，对流传换系数先明显下降，后趋于平稳变化。综上可知，倾斜角是影响波纹形翅片结构的主要因素。

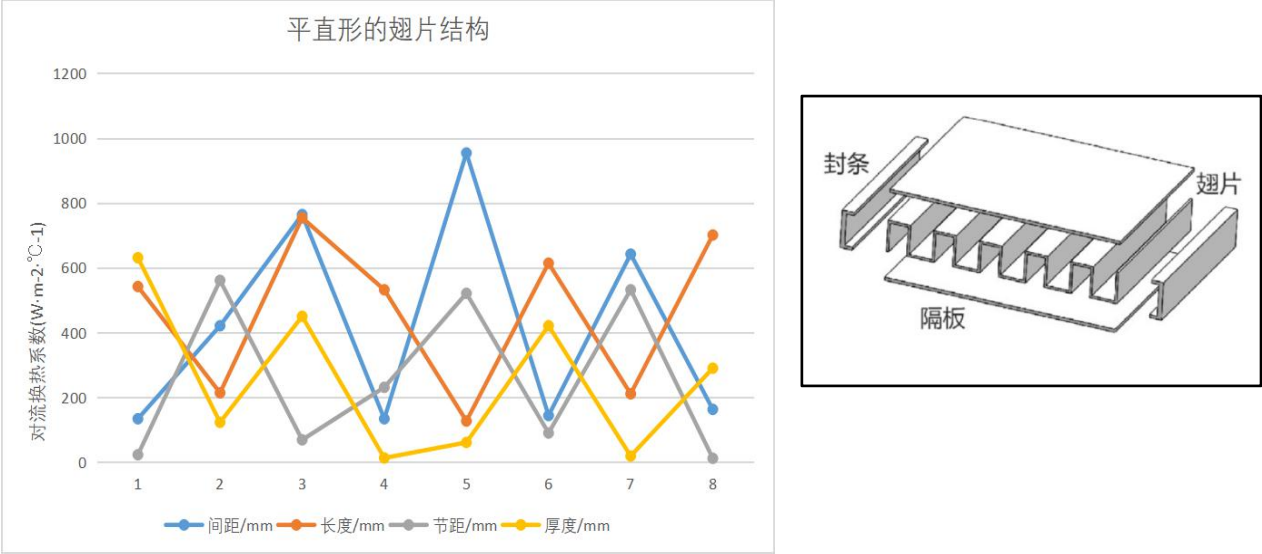


图 11 平直形翅片结构与对流换热系数的影响

如图 11 所示，在本文要求的适应温度下，可以观察到平直形翅片结构不同组，不同随机抽样数据呈现失序状况，难以承受高温情况，综上所述，在一些对换热性能要求比较高的环境下，锯齿形和波纹形比平直形翅片具有更好的换热性能。

#### 5.2.4 得出结论

在锯齿形翅片结构中发现：锯齿形翅片具有较强的换热能力，适用于高温热源的散热，随着翅片间距和翅片高度的增加，翅片对流换热系数和压降均减小。翅片节距对换热影响最大，翅厚对流动阻力影响最大，而翅片间距和翅厚对应力影响最大；优化后结构的换热效率增加了 10.62%，最大应力减少了 7.9%。

在波纹形翅片结构中发现：当波纹倾角和高度增大时，换热性能提高但是压降增大，反而板间距的减小，使板片换热性能提高。因而应设计波纹角为 45°、波纹高度较小的板片约 10mm 时，较小的板间距的翅片结构。

在综合考虑实际应用场合，在允许范围内，集装箱外壳最大尺寸不超过 1m×1m×12m



的条件下，因翅片高度与间距是影响锯齿形翅片结构的主要因素，所以在长方体结构中使用该类型翅片结构可以实现最大化的散热效果，即存放更多的服务器。同理，倾角对波纹形翅片结构影响最大，结合圆柱形的表面特征，可以发现在圆柱体中使用波纹形翅片结构可以达到最大的散热效果。

### 5.3 问题三的求解

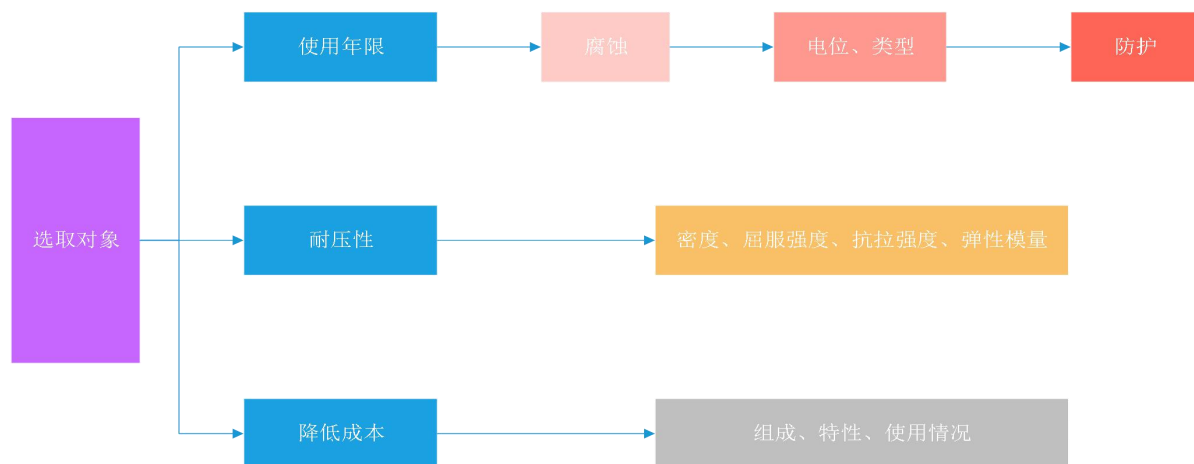


图 12 问题三的思路分析

#### 5.3.1 数据分析

根据附件中给出的十一大类的材料中分析比较，同时根据题意在选择材料中排除一些过于贵重的金属如：金（黄金与白金）和银，排除一些完全不能接触水的材料（木头等）和吸水过高的材料，综合考虑耐压能力，抗腐蚀能力与成本效益，采用降维因子分析法，并在一定的约束条件下筛选出最优的设计情况。

#### 5.3.2 数据处理

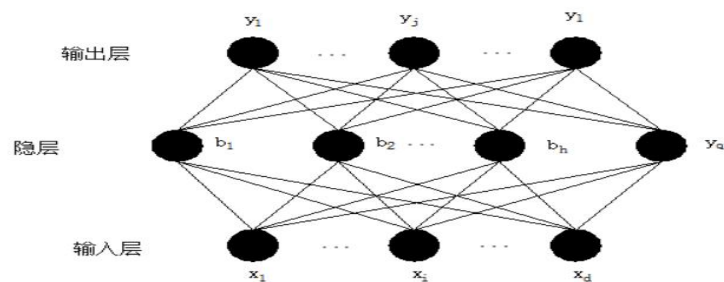


图 13 BP 神经网络分析

输出层：第  $j$  个输出神经元的输出

$$\beta_j = \sum_{h=1}^q \omega_{hj} b_h \quad \dots\dots\dots (15)$$

隐层：第 h 个隐层神经元的输入

$$\alpha_h = \sum_{i=1}^d v_{ih} x_i \quad \dots\dots\dots (16)$$

调整隐含层到输出层的权重调整规则：

$$\frac{\partial E_k}{\partial \omega_{hj}} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_j^k} \cdot \frac{\partial \hat{y}_j^k}{\partial \beta_j} \cdot \frac{\partial \beta_j}{\partial \omega_{hj}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

根据  $\beta_j$  的定义，显然有

$$\frac{\partial \beta_j}{\partial \omega_{hj}} = b_h \quad \dots\dots\dots (18)$$

由于  $f'(x) = f(x)(1 - f(x))$

$$\begin{aligned} \text{于是得出 } g_j &= -\frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_j^k} \cdot \frac{\partial \hat{y}_j^k}{\partial \beta_j} \\ &= -(\hat{y}_j^k - y_j^k) f'(\beta_j - \theta_j) \\ &= \hat{y}_j^k (1 - \hat{y}_j^k) (y_j^k - \hat{y}_j^k). \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

转化得 BP 算法中关于  $\omega_{hj}$  的更新公式：

$$\Delta \omega_{hj} = \eta g_j b_h \quad \dots\dots\dots (20)$$

### 5.3.3 建立模型

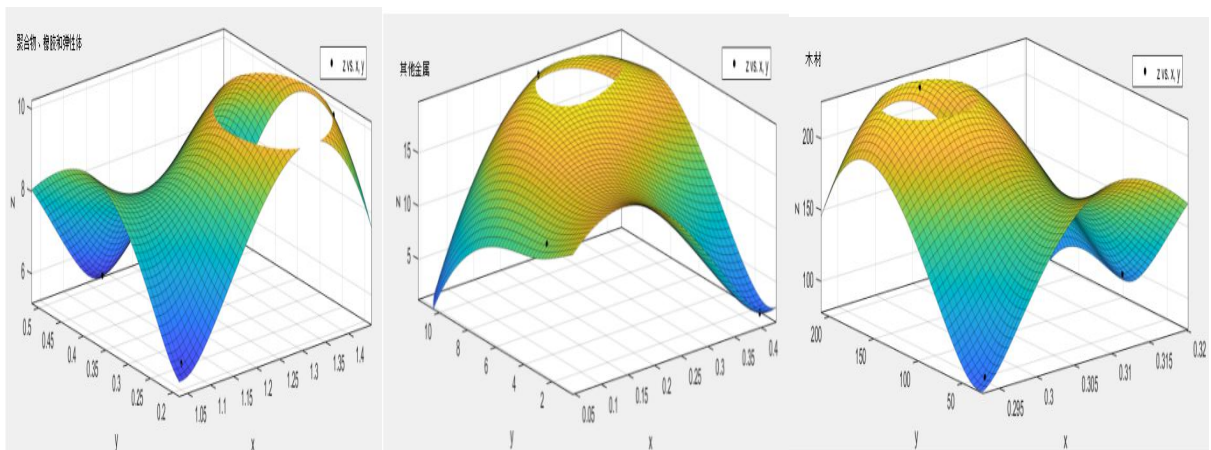


图 14 不适用于海底的材料

根据附件中给出的数据建立模型，发现如上图所示的其他金属，聚合物，橡胶和弹簧体和木材这三类型的材料波动变化不稳定，究其原因是不适用于与海底数据中心的集装箱，海底材料的选择最重要的因素就是防腐蚀，不与水产生反应，木材与大多数的聚合物，橡胶，弹簧体都有及其强的吸附性，不是好的选择，而其他金属有着良好的水下适应能力但价格过于昂贵，因而也不予考虑。

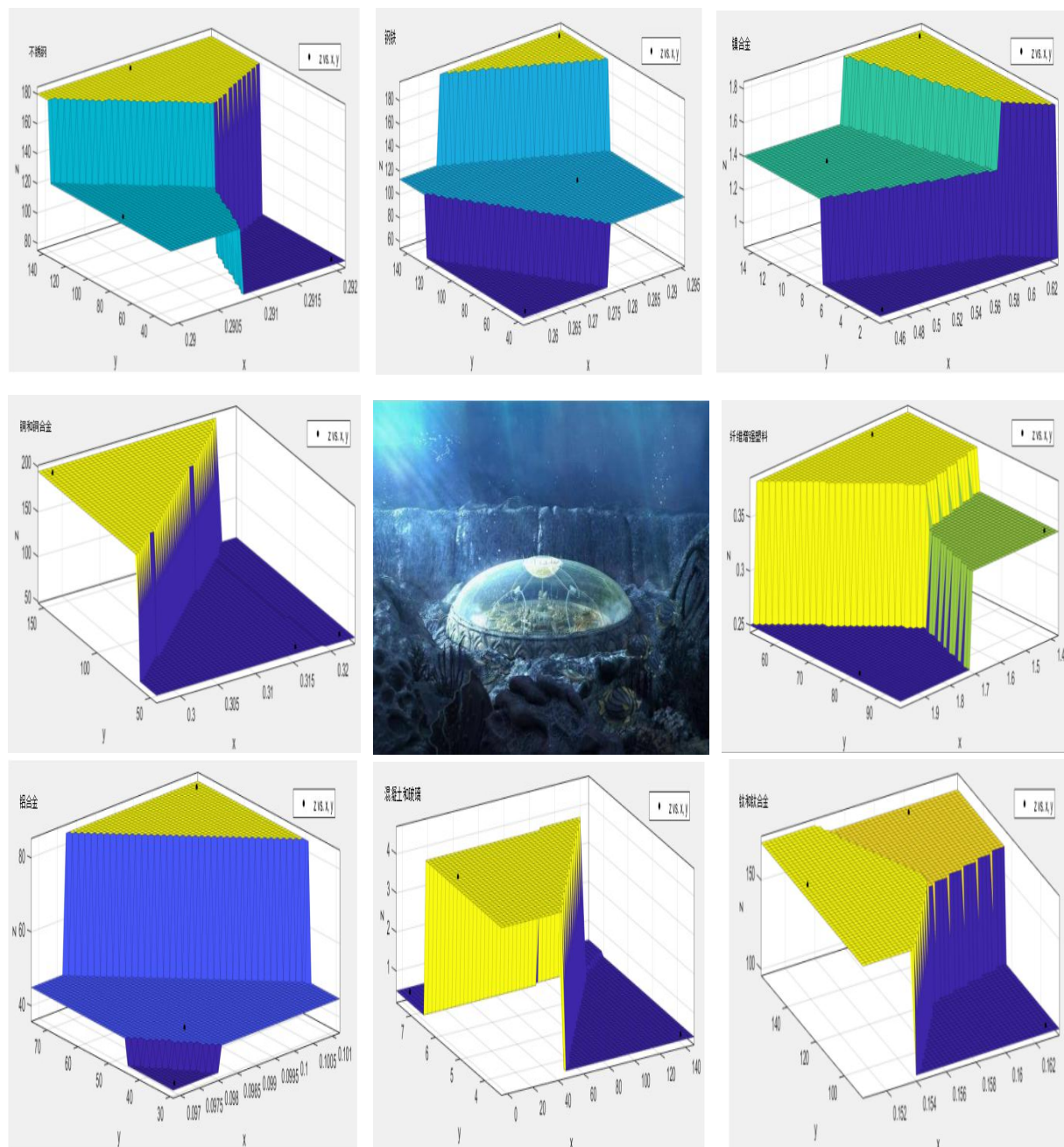


图 15 适用于海底的相关材料

如图 15 所示，在分析其在深度所带来的抗压能力时，结合数据表中给出的数据材料的密度，屈服强度，抗拉强度以及其他因素的综合考量建立如模型图 15，可以看出 11 类中大部分类型都随着深度的加深出现一定情况的分层阶梯现象，即在不同海水深度

下展现出不同的性能。其中以镍合金的效果最好，在不同海水深度都可以维持好的特性，不锈钢与铝合金在相对固定的海水深度较好，其他材料则次之。

### 5.3.4 得出结论

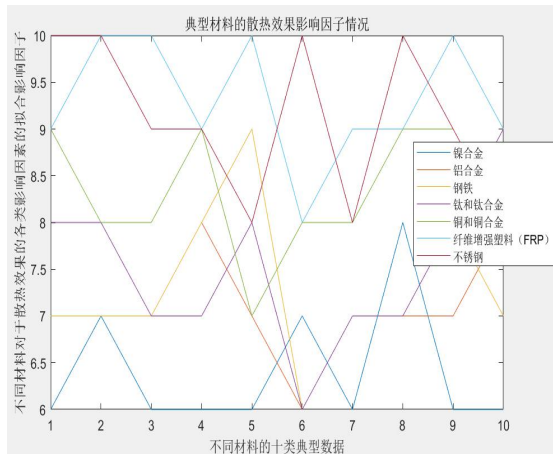


图 16 典型材料的散热效果影响因子情况

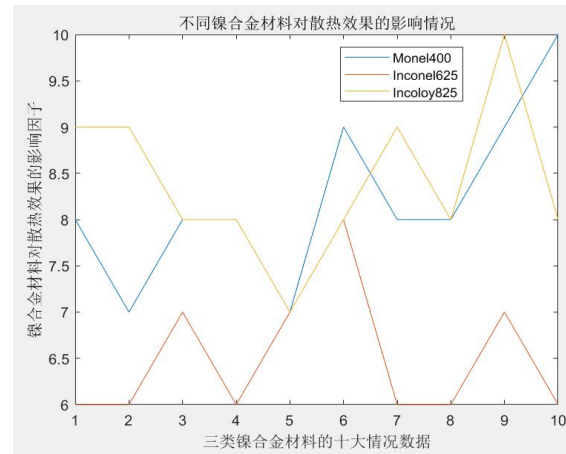


图 17 不同镍合金材料对散热效果的影响情况

综合对数据表格的分析，排除不能用于海底数据的类形，我们对其他材料的 10 个属性进行综合考虑建立如图 16 并将其数据影响散热效果用 6-10 影响因子表示，其中 6-10 分别表示影响程度高，影响程度较高，影响程度中等，影响程度较低，影响程度最低。观察图中数据很明显可以看出不同材质对散热效果的影响情况：镍合金>不锈钢=铝合金>钢铁>钛及钛合金>铜及铜合金>纤维增强塑料（FRP）。镍合金对散热效果影响程度因子系数高，因而镍合金是最佳用于制造海地数据中心的集装箱外壳的设备，进一步对表格中给出的三种不同的镍合金材料分析，如图 17 所示，mone1400 与 incoloy825 的综合效果较好，Incone1625 效果较差，进一步观察 mone1400 与 incoloy825 的波动变化趋势，可以得出 mone1400 是最佳适用材料。

5. 4 问题四的求解

5. 4. 1 数据分析

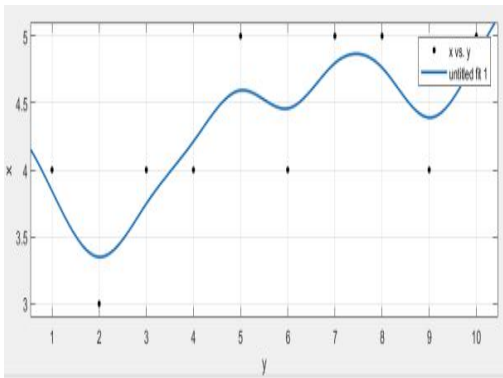


图 18 有潮汐的变化情况

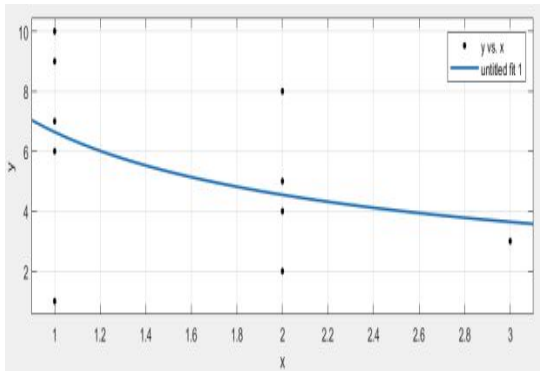


图 19 无潮汐的变化情况

如图所示选取了不同时间序列段中有无潮汐对水位的变化情况的动态拟合图，图 18 可以看出，有潮汐时，水位变化不稳定，时而升高，时而降低，随着时间的前进而不断改变。因而在海底的数据中心的水下相对位置会有较明显的改变。相反图 19 无潮汐时，水位几乎没有变化，大致趋于一定的平面而海底数据中心的水下位置相对稳定，没有明显的变化。

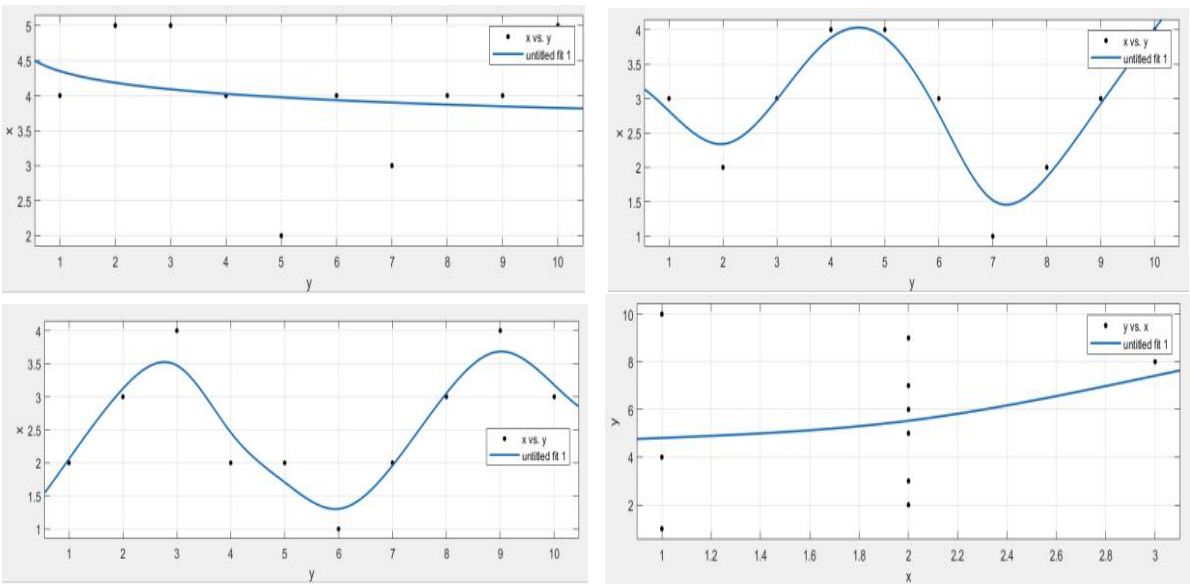


图 20 不同季节对温度的变化

如上述图所示，虽然有水的比热容的存在，但季节的变化会引起温度的大幅度改变，从而导致水的比热容产生相应的变化，类比分析春季，夏季，秋季，冬季每个季节中的时间序列分段变化可以发现，每个季节不同时间段温度的改变不同，不同季节的温度也有明显的不同。春季随着时间的演进，温度在逐渐升高，但其变动趋势较平稳；夏季温度总体趋势明显升高，在夏季的时间段序列中可以看出，由于夏季降雨量的增多，导致



温度会有相对低的时间段,但温度总体趋势变动明显,呈现上升;秋季承袭了夏季的变化趋势,整体温度仍相对较高,随着时间的推进,温度变化非常明显;反观冬季,温度在某段时间急剧下降,在剩余时间序列段中,维持低温的环境。

#### 5.4.2 算法分析

假定一个多元时间序列数据集为  $Z(t)$ ,  $t=1, 2, \dots, T$ ,  $t$  是数据集的时间戳,  $T$  是序列的长度,

$Z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_v(t), \dots, z_k(t)]^T$  是  $t$  时刻获取到的采样点,  $k$  是此多元时间序列包含的变量个数,  $z_v(t) (v=1, 2, \dots, k)$  是第  $v$  个变量在时刻  $t$  的采样值。用  $N$  ( $2 \leq N \leq T$ ) 表示时间序列的分段个数, 则序列的分段位置  $t_i (i=0, 1, \dots, N)$  满足  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = T$ . 由序列的分段位置划分出的  $N$  个区间  $[t_0+1, t_1], [t_1+1, t_2], \dots, [t_{N-1}+1, t_N]$  称为多元时间序列  $Z(t)$  的  $N$  个段。

时间序列的分段问题可以被视为一个优化问题, 通过最小化某个代价函数来得到最优分段个数和相应的最优分段位置. 定义如下分段代价函数:

$$L(t) = \sum_{i=1}^N e_{t_{i-1}+1, t_i}, \quad \dots\dots\dots (21)$$

其  $[t_{i-1}+1, t_i]$  中  $e_{t_{i-1}+1, t_i}$  是段  $[t_{i-1}+1, t_i]$  对应的分段误差. 分段误差  $e_{t_{i-1}+1, t_i}$  的大小依赖于段包含的数据子集  $\{z(t_{i-1}+1), z(t_{i-1}+2), \dots, z(t_i)\}$ , 用如下公式来计算:

$$e_{t_{i-1}+1, t_i} = \sum_{\tau=t_{i-1}+1}^{t_i} (Z(\tau) - \hat{Z}(\tau))'(Z(\tau) - \hat{Z}(\tau)). \quad \dots\dots\dots (22)$$

其中:  $Z(\tau)$  是一个  $k$  维时间序列,  $\hat{Z}(\tau)$  是  $Z(\tau)$  的某种回归估计. 假定  $Z(\tau)$  在段  $[t_{i-1}+1, t_i]$  内满足  $p$  阶向量自回归模型:

$$Z(\tau) = \theta_0^{(i)} + \theta_1^{(i)} Z(\tau-1) + \dots + \theta_p^{(i)} Z(\tau-p) + u^{(i)}(\tau). \quad \dots\dots\dots (23)$$

其中:  $\tau-p \geq 1$ ;  $u^{(i)}(\tau)$  是  $k$  维误差向量, 服从均值为 0、协方差矩阵为  $\Sigma$  的多元正态分布;  $\theta_0^{(i)}$  是  $k$  维列向量;  $\theta_1^{(i)}, \dots, \theta_p^{(i)}$  都是  $k \times k$  维矩阵; 上标  $i$  与段  $[t_{i-1}+1, t_i]$  对应, 表示第  $i$  个段内的数据子集满足的回归模型, 即不同段内的数据子集满足的  $p$  阶向量自回归模型可以不同, 有

$$\hat{Z}(\tau) = \hat{\theta}_0^{(i)} + \hat{\theta}_1^{(i)} Z(\tau-1) + \cdots + \hat{\theta}_p^{(i)} Z(\tau-p), \quad \dots\dots\dots (24)$$

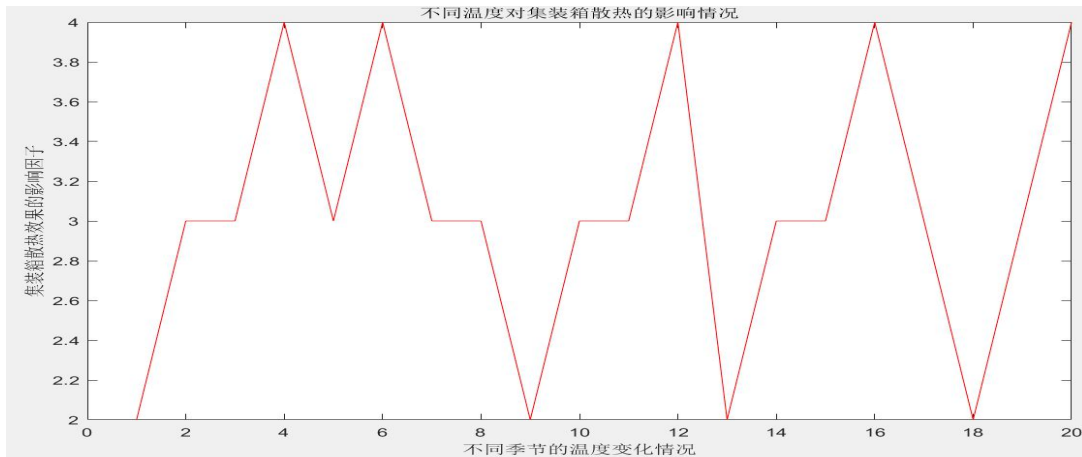
其中  $\hat{\theta}_0^{(i)}, \hat{\theta}_1^{(i)}, \dots, \hat{\theta}_p^{(i)}$  是第  $i$  个段内回归系数的估计.

为了缩减分段误差的计算复杂度, 用递归的形式计算所有可能情况的分段误差, 代入 (21) 式即可得相应的分段代价. 如果序列中包含  $N$  个段, 将最优分段位置表示为  $\hat{t} = (\hat{t}_0, \hat{t}_1, \dots, \hat{t}_N)$ , 则有

$$\hat{t} = \arg \min_{t \in T_N} L(t). \quad \dots\dots\dots (25)$$

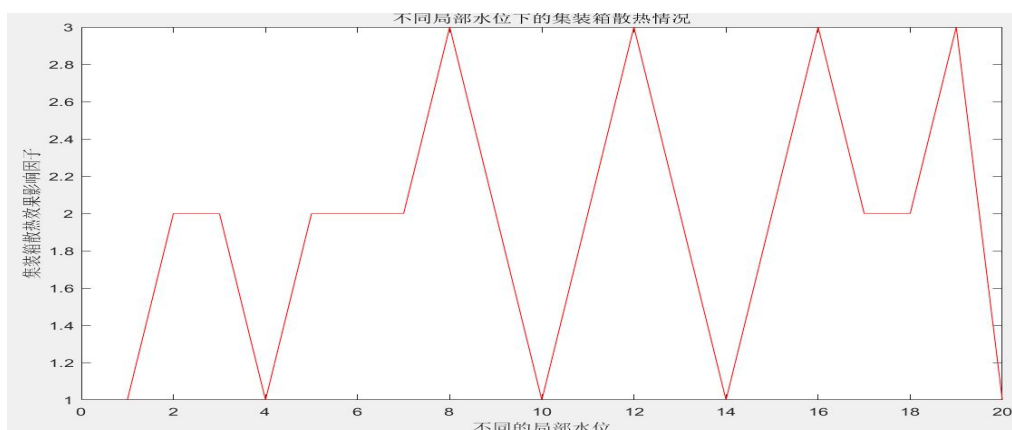
其中  $T_N$  是将多元时间序列分为  $N$  段时所有可能分段位置的集合. 对于向量自回归模型的阶数  $p$  和分段个数  $N$  的选择, 借助模型选择准则进行综合考量, 能够同时得到模型阶数和分段个数的最优值。

#### 5. 4. 3 建立模型



(图 21 不同温度对集装箱散热影响情况)

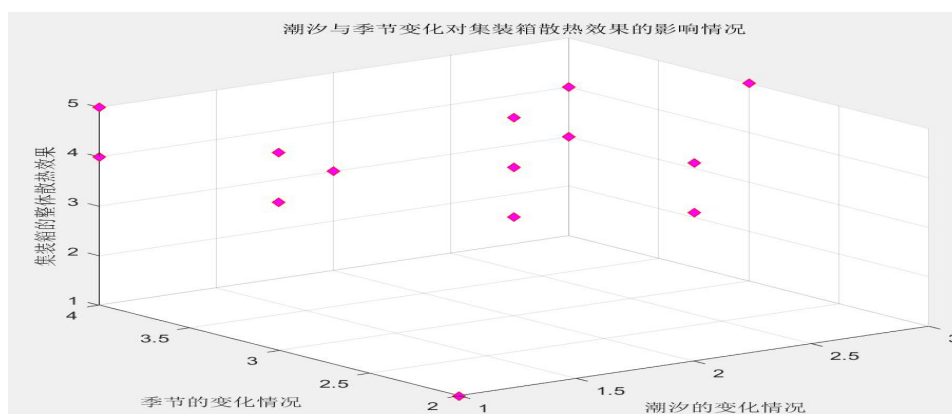
结合四种季节温度的变化程度对集装箱散热效果进行分析, 用影响因子 1-5 来表示影响程度, 1-5 分别表示影响程度最高, 影响程度较高, 影响程度中等, 影响程度较低以及影响程度最低这五方面. 季节变动是时间序列一年内重复出现的周期性波动因而从图中可以看出, 以时间序列进行划分时间段与周期, 在一个周期中, 春季初与冬季气候温度较低, 对集装箱散热效果影响程度较高, 该温度下对集装箱散热影响程度明显. 夏季与秋季初, 温度相对较高, 对集装箱散热效果影响较低, 不利于集装箱的散热。



(图 22 不同局部水位下的集装箱散热情况)

潮汐的变化同样会影响海底散热中心的散热程度，潮汐的变化不仅会带来水位的变化，也会带来该水位的海水流动的变化，如图 22 所示，选取了潮汐来临初期，潮汐中后期，潮汐退却三个时间段，潮汐来临初期时，水位急剧变化，海底数据中心的集装箱相对水底深度更深，对集装箱散热情况有着较重的影响，流动的水可以很好的将集装箱周围的热水流出去，潮汐后期即退潮时水产生剧烈的变化，对海底数据中心集装箱散热影响程度不稳定，当潮汐退却后，集装箱位置保持不变，因而不会再产生较大的影响。

#### 5.4.4 得出结论



(图 23 潮汐与季节变化对集装箱散热效果的影响情况)

在前面问题的分析基础上，综合考虑这两种因素对海底数据集装箱整体散热的共同作用如图 23 所示，观察可以发现，当某一季节所处的温度较低，且伴随有潮汐的时候可以发现，当潮汐产生时集装箱相对深度变深，海域内，深度越深，温度越低，因而在温度与潮汐的作用下对集装箱散热影响最为显著。除此之外，在冬季当温度达到最低时，或潮汐高潮时，对集装箱散热也有着显著的影响，反之在温度较高和无潮汐时，对集装箱的影响程度较少。



## 5.5 问题五的求解

### 建议信

尊敬的项目负责人：

您好

我们是 Mathorcup 的建模团队，我们针对海底数据中心的相关问题的研究与分析，采用一系列的散热优化设计方法，建立了模型。我们的主要工作和结论如下：

通过对该课题的研究，我们深知海底数据中心项目是一次重大的技术革命，它不仅能够很好的解决当下云计算与大数据带来的数据冗余，热量难以排放等问题，还能节约能源消耗，是一种完全绿色可持续发展的大数据中心解决方案。

对于海底数据中心项目，将集装箱沉入海底有需要考虑许多因素，以下是我们团队针对这些问题提出的建议：

1.在固定体积的条件下，我们可以采取在集装箱内放置一些设施(如风扇等降温措施)形成强制对流传热，同时采用较好的翅片结构进行进一步的降温。

2.在考虑外壳结构设计的基础上也要充分考虑翅片结构的选择，在长方体中选择锯齿形结构，并在约束范围内尽可能的减小间距，在圆柱体的结构中选择波纹形翅片结构在约束范围内尽可能增大倾斜角至  $45^\circ$ 。用液体压强公式  $p=\rho gh$ ，以及  $F=pS$ ，联立两式得  $F=\rho ghS$ ，从式子可以看出来在某一表面的压力与该点海水深度和该作用面表面积有关。同样是 50m 深度下，表面积越大，承受压力越大，所以在设计结构的同时还要考虑结构的表面积，从而尽可能减少压力。

3.对外壳的设计要求有着巨大的要求，应选择有着强大的抗压能力同时还要耐腐蚀性的材料且价格在可接受的范围，更建议使用镍合金 mone1400。

4.Mone1400 材料，具有较好的屈服强度与抗拉强度适用于阀门，泵，支柱轴，固定装置，紧固件。同时放入海底要进行防护措施避免异种金属接触；结构上避免大阴极对小阳极，设计易更换阳极部件的结构，两种不同金属接触面间采用电绝缘处理。

以上建议是我们团队的个人想法，希望能对贵公司有所帮助。祝您企业蒸蒸日上！

此致

敬谢！

mathorcup 参赛团队

2021 年 4 月 18 日

## 六、模型评价与推广

### 6.1 模型的优点

- (1) 利用随机抽样、曲线拟合来分析数据，更有说服力和理论性；
- (2) 模型的建立层层递进，有层次感；
- (3) 建立的模型准确性高；
- (4) 所建立的模型变量较少，增加了模型的可读性；
- (5) 模型简单易懂，具有很好的普及性；
- (6) 模型的计算采用专业的数学软件，可信度较高；
- (7) 对于海量进行分段处理和多次求取代表值，使得模型更加贴合与实际情况。

### 6.2 模型的缺点

- (1) 受题中数据的约束，有小部分因素未能考虑；
- (2) 模型利用线性规划进行预测，对服务器的个数范围，要求比较高；
- (3) 对实际情况进行预测时可能会出现一定偏差。

### 6.3 模型的推广

本文在主要运用了 MATLAB，线性规划，曲线拟合，随机抽样，BP 神经网络，因子分析，数值模拟，时间序列分段法，动态规划其具有准确性高，适用范围广的特点，可解决本领域的其他问题。

## 七、参考文献

- [1] 王漪, 姜晓轶, 梁志翔. 国家海洋科学数据中心建设运行实施. <http://www.nmdis.org.cn/c/2019-10-12/69083.shtml>. 2019-04-16.
- [2] 秦 赞, 关 欣, 顿 喆, 刘昊俊. 波纹板式空气预热器内流动换热过程的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35 (03): 215-217.
- [3] 董军启, 陈江平, 陈芝久. 锯齿翅片的传热与阻力性能试验[J]. 化工学报, 2007, 58 (02): 283-284.
- [4] 张学学, 李桂馥, 史琳. 热工基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. 167-168.
- [5] 王玲, 徐培培, 彭开香. 基于因子模型和动态规划的多元时间序列分段方法[J]. 控制与决策, 2020, 35 (01): 36-37.

## 八、附录

### 8.1 图 4 的代码

```
function createfigure(YMatrix1)
%CREATEFIGURE(YMatrix1)
% YMATRIX1: y 数据的矩阵

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 17:02:44 自动生成

% 创建 figure
figure1 = figure;

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 使用 plot 的矩阵输入创建多行
plot1 = plot(YMatrix1);
set(plot1(1),'DisplayName','自然对流');
set(plot1(2),'DisplayName','强制对流');

% 创建 ylabel
ylabel({'散热量'});

% 创建 xlabel
xlabel({'对流换热系数 h/(W · m-2 · °C-1)'});

% 创建 title
title({'对流换热系数对散热量的影响情况'});

box(axes1,'on');
% 创建 legend
legend1 = legend(axes1,'show');
set(legend1,...
    'Position',[0.528571428571428    0.806746031746032    0.176785714285714
0.0837301587301588]);
```

### 8.2 图 5 的代码

```
function createfigure(xdata1, zdata1)
%CREATEFIGURE(xdata1, zdata1)
% XDATA1: surface xdata
% ZDATA1: surface zdata

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 11:37:07 自动生成
```

```

% 创建 figure
figure1 = figure;

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 创建 surf
surf(xdata1,xdata1,zdata1,'Parent',axes1);

% 创建 zlabel
zlabel({'温度对热量的变化影响因子'});

% 创建 ylabel
ylabel({'正常温度下的服务器工作情况'});

% 创建 xlabel
xlabel({'正常温度下的对流传热变化'});

% 创建 title
title({'不考虑散热需求的服务器工作情况'});

```

```

view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');

```

### 8.3 图 6 的代码

```

function createfigure(xdata1, ydata1, zdata1, cdata1)
%CREATEFIGURE(xdata1, ydata1, zdata1, cdata1)
% XDATA1: surface xdata
% YDATA1: surface ydata
% ZDATA1: surface zdata
% CDATA1: surface cdata

```

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 11:27:07 自动生成

```

% 创建 figure
figure1 = figure('Colormap',[1 1 0;0 1 1]);

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.13 0.11 0.740470921174263 0.815]);
hold(axes1,'on');

% 创建 surf
surf(xdata1,ydata1,zdata1,cdata1,'Parent',axes1);

% 创建 zlabel

```

```

xlabel({'对流传热对服务器的高度影响因子'});

% 创建 ylabel
ylabel({'对流传热对服务器宽度影响因子'});

% 创建 xlabel
xlabel({'对流传热对服务器的长度影响因子'});

% 创建 title
title({'服务器机箱的理想情况'});

view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');
axis(axes1,'tight');
% 设置其余坐标区属性
set(axes1,'DataAspectRatio',[1 1 1]);
8.4 图 7 的代码
function createfigure(zdata1)
%CREATEFIGURE(zdata1)
% ZDATA1: surface zdata

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 17:14:50 自动生成

% 创建 figure
figure1 = figure;

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 创建 surf
surf(zdata1,'Parent',axes1);

% 创建 xlabel
xlabel({'自然对流造成的影响情况'});

% 创建 ylabel
ylabel({'服务器存放情况'});

% 创建 xlabel
xlabel({'服务器产热情况'});

% 创建 title
title({'关于散热需求下的服务器影响变化情况'});

% 取消以下行的注释以保留坐标区的 x 范围

```

```

% xlim(axes1,[0 20]);
% 取消以下行的注释以保留坐标区的 Y 范围
% ylim(axes1,[0 25]);
view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');
8.5 图 8 的代码
function createfigure(zdata1)
%CREATEFIGURE(zdata1)
% ZDATA1: surface zdata

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 17:18:12 自动生成

% 创建 figure
figure1 = figure;
colormap(jet);

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 创建 surf
surf(zdata1,'Parent',axes1);

% 创建 xlabel
xlabel({'强制对流传热造成的影响情况'});

% 创建 ylabel
ylabel({'服务器的存放情况'});

% 创建 xlabel
xlabel({'服务器产热情况'});

% 创建 title
title({'关于散热需求下的服务器影响变化情况'});

view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');
8.6 图 22 的代码
function createfigure(Y1)
%CREATEFIGURE(Y1)
% Y1: y 数据的向量

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 14:22:44 自动生成

% 创建 figure
figure1 = figure;

```

```

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 创建 plot
plot(Y1,'Color',[1 0 0]);

% 创建 ylabel
ylabel({'集装箱散热效果影响因子'});

% 创建 xlabel
xlabel({'不同的局部水位'});

% 创建 title
title({'不同局部水位下的集装箱散热情况'});

```

```

box(axes1,'on');

```

### 8.7 图 21 的代码

```

function createfigure(Y1)
%CREATEFIGURE(Y1)
% Y1: y 数据的向量

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 14:25:06 自动生成

```

```

% 创建 figure
figure1 = figure;

```

```

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

```

```

% 创建 plot
plot(Y1,'Color',[1 0 0]);

```

```

% 创建 ylabel
ylabel({'集装箱散热效果的影响因子'});

```

```

% 创建 xlabel
xlabel({'不同季节的温度变化情况'});

```

```

% 创建 title
title({'不同温度对集装箱散热的影响情况'});

```

```

box(axes1,'on');

```

### 8.8 图 23 的代码



```

function createfigure(X1, Y1, Z1)
%CREATEFIGURE(X1, Y1, Z1)
% X1: scatter3 x
% Y1: scatter3 y
% Z1: scatter3 z

% 由 MATLAB 于 16-Apr-2021 14:33:26 自动生成

% 创建 figure
figure1 = figure;

% 创建 axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1,'on');

% 创建 scatter3
scatter3(X1,Y1,Z1,'MarkerFaceColor',[1 0 1],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
        'Marker','diamond');

% 创建 zlabel
zlabel({'集装箱的整体散热效果'});

% 创建 ylabel
ylabel({'季节的变化情况'});

% 创建 xlabel
xlabel({'潮汐的变化情况'});

% 创建 title
title({'潮汐与季节变化对集装箱散热效果的影响情况'});

view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');
% 设置其余坐标区属性
set(axes1,'OuterPosition',[0.13 0 0.775 0.951031746031747]);

```