

基于对流传热和材料综合评价指数的海底数据中心的外壳散热设计

队伍编号	mc21010090008
题号	C

基于对流传热和材料综合评价指数的海底数据中心的外壳散热设计

摘 要

问题一，模型考虑海底数据中心服务器通过集装箱进行散热的两种形式：自然对流传热和强制对流传热。借助自然流传热公式，计算出每个集装箱的最大散热功率，得出在此限制下的最大服务器数量。然后，建立起线性规划模型，在最大散热功率和集装箱尺寸两个限制条件下，分别计算在三种不同摆放方式下（长宽面、长高面、宽高面平行于集装箱底面）能放入的最多服务器数量。计算得出单个集装箱内可摆放的最大服务器数量为 588 台。

问题二，集装箱的不同形状结构会导致其与海水接触的有效表面积的不同，进而影响整体的散热性能。根据给出的集装箱最大尺寸（1m*1m*12m），在服务器的正常工作温度不超过 80 摄氏度条件下，设计了三种不同的集装箱模式来计算其最大能够承载服务器的个数：圆柱体结构（直径为 1m，高为 12m）、长方体结构（高 1m，宽 1m，长 12m）、圆柱体翅片结构（CPG ($\varphi 900 \times 3.5 / 1000 / 10 / 1$)）。通过定义服务器的分布疏密程度，评估集装箱总体散热能力。得出圆柱体翅片结构的散热能力最强，圆柱体的散热均匀性最好。

问题三，查阅文献得到中国南海的海水深度、温度、盐度以及压强的相关资料和数据，通过公式计算不同的深度的海水各方面的参数和特性。按照题目附件中的各项性能参数，利用弹性模量、屈服强度和抗拉强度综合计算得出材料的耐压能力，利用腐蚀电位量化得出材料的耐腐蚀性，建立了 TOPSIS 模型对所有金属材料进行评估并排序，选取第一名镍基合金 825，第二名 302 不锈钢，以及第三名 CDA 铜合金做进一步研究和讨论。在该模型中，海水温度影响材料的散热效果，材料的耐腐蚀性影响使用年限，进而影响总成本，同时，约束条件为不能超过材料所能承受最大的海水压强。因此，建立了两个目标函数，分别为最大化材料的散热效果（与海水温度和材料的传热系数有关）和最小化成本（与海水盐度材料的耐腐蚀性和价格有关）。最后，综合两个目标函数，并设立不同的系数来探究选取材料侧重点不同时选择的结果，得出 CDA 铜合金为最合适的材料，最大放置深度为约为 475.41 米。

问题四，季节变化会对海水温度造成一定影响，夏季海水温度相对较高，冬季海水温度相对较低；潮汐会导致水位的变化，涨潮时，相对于落潮，水位会上升，导致集装箱处海水温度的变化；同时，潮汐会带来海水流动，散热方式也转变为强制对流传热，导致散热效率产生变化。基于问题一和问题三中的对流传热模型，查阅中国南海的相关文献，计算所需数据，得出不同季节下涨潮或落潮时海底集装箱的散热能力。

关键词：对流传热；线性规划；翅片结构；服务器分布疏密程度；TOPSIS 评价法；材料评价指数

目录

1	问题的重述	1
1.1	问题背景	1
1.2	问题一	1
1.3	问题二	1
1.4	问题三	1
1.5	问题四	1
1.6	问题五	1
2	模型假设	2
3	符号说明	2
4	模型的建立与求解	3
4.1	问题一	3
4.1.1	基于散热能力限制的服务器数量模型	3
4.1.2	基于集装箱尺寸限制的服务器数量模型	4
4.2	问题二	6
4.2.1	圆柱体结构求解模型	6
4.2.2	长方体结构求解模型	6
4.2.3	圆柱体翅片结构求解模型	7
4.3	问题三	9
4.3.1	海水深度与温度、盐度和压强的关系	10
4.3.2	材料的选择	12
4.3.3	基于材料散热能力和成本的综合评价模型	17
4.4	问题四	19
4.4.1	夏季涨潮	19
4.4.2	夏季落潮	19
4.4.3	冬季涨潮	19
4.4.4	冬季落潮	19
4.5	问题五	20
5	参考文献	21
6	附录	22

1 问题的重述

1.1 问题背景

全球数据中心能源消耗的成本占整个 IT 行业近 50%，由于目前国内大数据中心在内陆地区建设的弊端较多，耗电耗水成本较大，海底数据中心项目（Project UDC）成为大数据中心绿色可持续发展的方案之一，即将服务器安装在海底集装箱内，通过与海水进行对流传热，既节省了冷却水资源，又节省了电力资源，同时还能与海上风电、石油等工业类活动互相服务，起到相互促进的作用。

从 2015 开始，微软公司先后在在美国加利福尼亚和苏格兰海岸线附近的海域布置了海底数据中心且效果超出预期，具有低成本、低时延、高可靠性、高安全性的特点。我国的海底数据中心还处于探索阶段，在 2021 年首个海底数据舱刚刚揭幕，因此，对集装箱外壳和服务器的尺寸、结构设计使得散热功率最大化是海底数据中心设计的核心问题。

1.2 问题一

对于问题一，集装箱放置在中国南海某水域，周围海水环境温度为 20°C ，集装箱尺寸为直径 1m，长 12m 的圆柱体，在集装箱内部放置数个高度为 44.45 毫米，宽度为 482.6 毫米，长度为 525 毫米的长方体服务器。其中服务器工作过程中产热，在海水中散热的主要方式为对流传热，即热量由集装箱壁传导给海水。已知单个服务器的产热为 500W，正常工作温度为八十摄氏度，求出在满足服务器散热的要求下，集装箱内可摆放服务器的最大数量。

1.3 问题二

由问题二可知，以第一问给出的条件为基础，包括服务器的尺寸、产热量，海水温度等一系列参数，在限制集装箱最大尺寸的情况下，通过改变它的形状结构，进而改变集装箱的表面积和散热功率，使得能够存放更多的服务器，同时保证服务器散热的需求，即正常工作温度不超过 80°C 。

1.4 问题三

针对问题三，主要考虑集装箱外壳材料的选择。随着海水深度的增加，温度也会降低，因此，集装箱与外界环境温度差增大，单位时间的散热量也随之提升，从而达到更好的散热效果。但在海水温度递减的同时，集装箱所承受的海水压强也会逐渐增大，这就对材料的抗压能力提出了更苛刻的要求，保证其在工作状态下不会因为压强过大而变形，从而保证服务器的工作安全。值得注意的是，海水作为一种强腐蚀性介质，对与其直接接触的各种金属材料都有不同强度的腐蚀作用。材料的耐腐蚀性越强，使用期限越长，相应的修建成本就会降低。因此，材料的耐腐蚀性也作为评估材料的一项重要依据。在第二问建立的圆柱体翅片结构的基础上，根据不同材料的抗压能力、散热能力、耐腐蚀性以及成本进行评估，选择合适的材料以及摆放的位置（在海水中的深度）。

1.5 问题四

对于问题四，季节变化会对海水温度造成一定影响；潮汐导致水位的变化，进而造成海水温度的一定变化，同时带来一定的海水流动，散热方式转变为强制对流传热。通过分析以上影响因素，分析季节与潮汐对海底数据中心集装箱散热性能的影响。

1.6 问题五

问题五要求根据前几个问题的分析结果，给中国南海的海底数据中心散热设计部门写一封信，提出关于集装箱设计等问题的建议。

2 模型假设

假设一 集装箱周围海水温度均匀；

假设二 服务器散热过程中，服务器相互之间没有影响且产生的所有热量能够被全部扩散；

假设三 集装箱散热不考虑其到海水的热传导过程；

假设四 海水盐度在某一区域内均匀分布。

3 符号说明

符号	含义
Q_1	圆柱体集装箱来自自然对流传热的散热功率(W)
h_1	自然对流传热的传热系数(W/(m ² ×℃))
A_1	圆柱体集装箱的表面积(m ²)
t_w	服务器工作临界温度(℃)
t_0	服务器周边海水温度(℃)
d_1	集装箱底面直径(m)
H	集装箱长(m)
D	服务器分布疏密程度
D_1	圆柱体集装箱的服务器分布疏密程度
A_2	长方体集装箱的表面积(m ²)
Q_2	长方体集装箱来自自然对流传热的散热功率(W)
D_2	长方体集装箱的服务器分布疏密程度
D_f	翅片外径(m)
P	翅片节距(m)
T	翅片厚度(m)
l	翅片高度(m)
n	1 米管长翅片的数目
A_f	1 米管长的翅片面积(m ²)
A_0	1 米管长上的裸管面积, 即翅片之间的光管面积(m ²)
A_b	1 米管长上的光管面积(m ²)
β	基管表面在加装翅片以后表面积扩大的倍数
η	翅片效率
γ	翅片有效性
d_2	圆柱体翅片结构集装箱的底面直径(m)
A_4	圆柱体翅片结构集装箱的表面积(m ²)
Q_3	圆柱体翅片结构集装箱来自自然对流传热的散热功率(W)
Δ	材料的屈强比
σ_y	材料的屈服强度
σ_u	材料的抗拉强度
δ	许用拉压力
δ'	许用挤压应力

P_{cr}	集装箱的临界压力
γ	集装箱的厚度(m)
v	材料的耐腐蚀性
T	海水温度($^{\circ}\text{C}$)
L	海水深度(m)
P	海水压强(pa)
f_i	第 <i>i</i> 种材料的综合评价指数
f_{i1}	第 <i>i</i> 种材料的散热能力指标
f_{i2}	第 <i>i</i> 种材料的成本指标
s_i	第 <i>i</i> 种材料的导热系数
v_i	第 <i>i</i> 种材料的耐腐蚀性
p_i	第 <i>i</i> 种材料的成本价格(元)
T_i	第 <i>i</i> 种材料在海水深度为 l_i 时的海水温度($^{\circ}\text{C}$)
L_i	第 <i>i</i> 种材料所能达到的最大深度(m)
Q_4	夏季涨潮时来自强制对流传热的散热功率(W)
Q_5	夏季落潮时来自强制对流传热的散热功率(W)
Q_6	冬季涨潮时来自强制对流传热的散热功率(W)
Q_7	冬季落潮时来自强制对流传热的散热功率(W)
h_2	强制对流传热的传热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C})$)
t_1	夏季涨潮时海水温度($^{\circ}\text{C}$)
t_2	夏季落潮时海水温度($^{\circ}\text{C}$)
t_3	冬季涨潮时海水温度($^{\circ}\text{C}$)
t_4	冬季落潮时海水温度($^{\circ}\text{C}$)

4 模型的建立与求解

4.1 问题一

服务器通过集装箱进行散热同时存在有两种形式，分别为自然对流传热和强制对流传热。自然对流传热是集装箱外壳与海水流动进程中发生的热量传递，强制对流传热与潮汐等有关，所以问题一中仅考虑自然对流传热。通过对自然流传热公式，计算散热功率，即为集装箱的最大散热功率，和在最大散热量限制下的最大服务器数量。然后，考虑服务器的不同摆放方式会影响集装箱内服务器的最大数量，在这里仅考虑集装箱的几何形状，分别讨论服务器的三种不同摆放方式下能放入的最多服务器数量。三种摆放方式分别为：长宽面紧贴集装箱圆面；长高面紧贴集装箱圆面；宽高面紧贴集装箱圆面。

通过分析题意可知，服务器的最大数量受到两方面的限制：服务器运行过程中产热，需要及时进行有效的散热，单位时间内总产热量不可超过最大散热量，从而保证其在正常温度内工作；服务器的尺寸、集装箱的尺寸以及服务器在集装箱内的摆放方式，对可摆放服务器的最大数量产生限制。

4.1.1 基于散热能力限制的服务器数量模型

设在单个服务器中可以存放 x 个服务器。由题意可知， x 个服务器同时在 80°C 正常工作需要合适的散热。对流传热主要有两种形式：自然对流传热和强制对流传热。自然对流传热是集装箱外壳与海水流动进程中发生的热量传递，强制对流传热与潮汐等有关。在此问题中，针对集装箱与海水，未考虑潮汐因素等，只考虑对流传热中的自然对流传热。

通过查阅相关文献^[1]，建立自然对流传热模型，公式为：

$$Q_1 = h_1 A_1 (t_w - t_0) \quad (1)$$

其中 Q_1 为来自自然对流传热的散热功率， h_1 为自然对流传热的传热系数， A_1 为集装箱的表面积， t_w 为服务器工作临界温度（80℃）， t_0 为服务器周边海水温度。根据有关文献的查阅^[2]，①式中 h_1 为125。集装箱表面积为

$$A_1 = 2\pi\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + 2\pi\frac{d_1}{2}H \quad (2)$$

其中 A_1 为集装箱表面积， d_1 为集装箱底面直径， H 为集装箱长。经过计算，得到表面积 $A_1 = 12.5\pi$ 。将以上数据代入公式③，得到散热功率 $Q = 93750\pi$ 。可知若使所有服务器全部正常运行，服务器的总产热功率不可大于 Q 。得到不等式为：

$$500x \leq h_1 A_1 (t_w - t_0) = 93750\pi \quad (3)$$

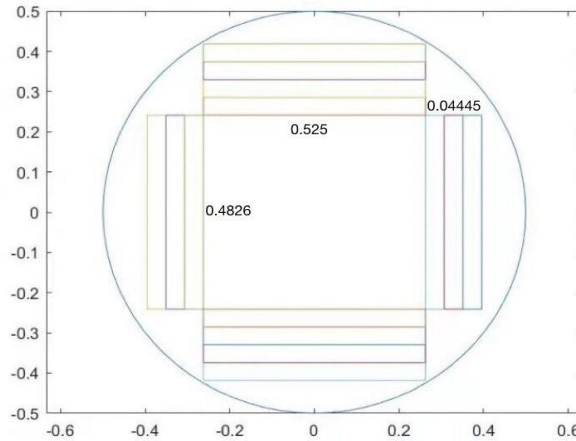
所以，在最大散热功率的限制条件下，最多放置 588 台服务器。

4.1.2 基于集装箱尺寸限制的服务器数量模型

通过服务器摆放方式的不同，可以分为三种情况进行讨论：

a. 服务器的长宽面与集装箱底面相贴

在此种情况下，只可以有一个服务器的长宽面与集装箱底面相贴，同时可以有多个服务器的长高面、多个服务器的宽高面同时与集装箱底面相贴，集装箱任意横截面如图(1)所示（MATLAB 代码见附录）：



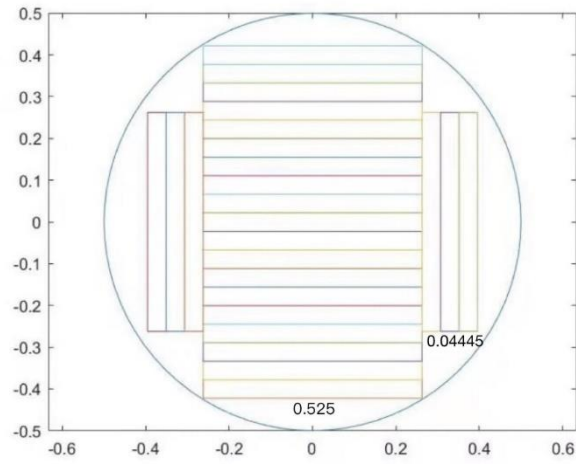
图(1) 集装箱任意横截面图

经过计算可知，此种放置情况下，集装箱内可以摆放服务器的最大数量为 593，得到不等式：

$$x \leq 593 \quad (4)$$

b. 服务器的长高面与集装箱底面相贴

在此种情况下，有多个服务器的长高面同时与集装箱底面相贴，集装箱任意横截面如图(2)所示（MATLAB 代码见附录）：



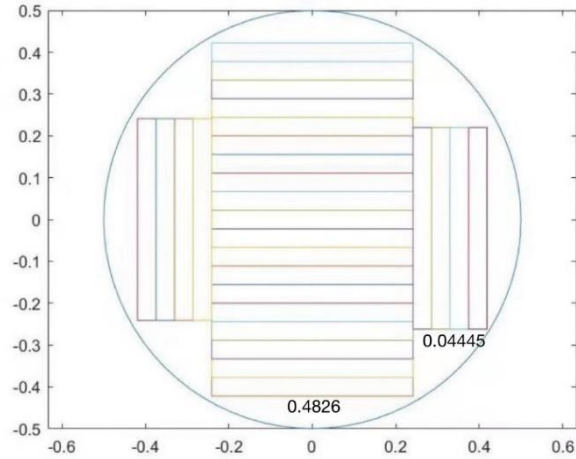
图(2)集装箱任意横截面图

经过计算可知，此种放置情况下，集装箱内可摆放服务器最大数量为 600，得到不等式：

$$x \leq 600 \quad (5)$$

c. 服务器的宽高面与集装箱底面相贴

在此种情况下，有多个服务器的宽高面同时与集装箱底面相贴，集装箱任意横截面如图(3)所示（MATLAB 代码见附录）：



图(3) 集装箱任意横截面图

经过计算可知，此种情况下，集装箱内可摆放服务器的最大数量为 594，得到不等式：

$$x \leq 594 \quad (6)$$

建立运筹学线性规划模型，设目标函数为 $y = \max x$ ，将(3)式分别联立(4)、(5)、(6)式，得到在 a、b、c 三种摆放方式下的三个不等式方程组。线性规划模型如下所示：

$$\begin{cases} y = \max x \\ 500x \leq 93750\pi \\ x \leq 593 \end{cases}$$

解得 a 放置下的最优解为 $x = 588$ 。

$$y = \max x$$

$$\begin{cases} 500x \leq 93750\pi \\ x \leq 600 \end{cases}$$

解得 b 放置下的最优解为 $x = 588$ 。

$$y = \max x$$

$$\begin{cases} 500x \leq 93750\pi \\ x \leq 594 \end{cases}$$

解得 c 放置下的最优解为 $x = 588$ 。

解得此问题的最优解为 $x = 588$ 。因此在满足散热与尺寸两方面约束下，单个集装箱内可摆放服务器数量为 588。

4.2 问题二

集装箱不同的形状结构会影响其与海水接触的表面积，进而影响整体的散热性能。在题目中给出的集装箱最大尺寸（1m×1m×12m）的限制下，为保证服务器的正常工作温度不超过 80 摄氏度，我们设计三种不同的集装箱模式来计算其最大能够承载服务器的个数。这三种外壳结构分别是：圆柱体结构（直径为 1m，高为 12m）、长方体结构（高 1m，宽 1m，长 12m）、圆柱体翅片结构。其中，翅片规格有多种选择，在查阅相关资料后，我们以 CPG（ $\phi 900 \times 3.5 / 1000 / 10 / 1$ ）为例，计算集装箱外围加装翅片后的有效表面积。然后分别计算三种模式的最大散热功率以及所承载的最大服务器数量，并进一步量化和评价这三种结构的散热能力。

根据题意，评估不同集装箱结构的散热能力时，可以从两方面进行分析：一方面，通过问题一中给出的公式，可以计算出服务器通过集装箱的最大散热功率，以此来分别评估三种结构的散热能力。

另一方面，在第一问的讨论中，我们假设服务器之间的距离等因素不会对服务器散热产生影响。但事实上，在讨论散热效果时，服务器的分布，即服务器放置的疏密程度、彼此之间的距离都会对总体散热产生一定的影响。因此，建立三维直角坐标系，将集装箱中的每个服务器看作质点，其位置位于服务器中心，计算在某种放置下，所有质点到集装箱中心的距离平方和，再以此距离平方和除以质点总数，将计算得出的距离平方的均值定义为服务器分布疏密程度，记作 D 。由定义可知，质点与集装箱中心的距离平方均值越大，服务器分布疏密程度越小，服务器分布越稀疏，集装箱散热效果越好。

4.2.1 圆柱体结构求解模型

由问题一模型的求解可以得到，此种结构下的最大散热功率为 93750π ，在服务器与集装箱尺寸的限制下，可以放置服务器的最大数量为 588。

通过 MATLAB 软件计算可知，在此结构下，服务器分布疏密程度为 $D_1 = 33.9126$ （MATLAB 代码见附录）。

4.2.2 长方体结构求解模型

当集装箱结构为长方体时，尺寸为高 1m，宽 1m，长 12m，所以表面积

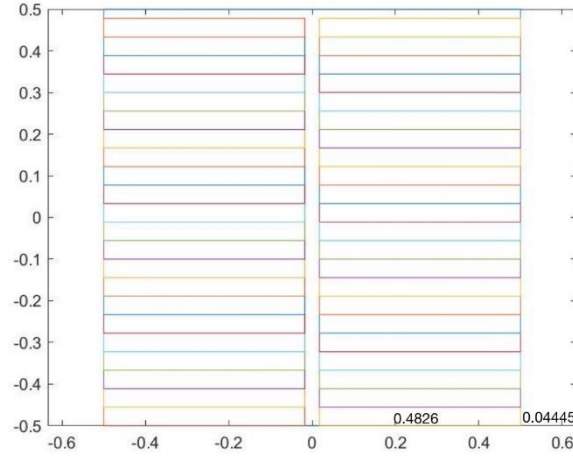
$$A_2 = 2(a * b + b * c + c * a) \quad (7)$$

其中， a 为集装箱的高， b 为集装箱的宽， c 为集装箱的长。带入数值计算可得，集装箱的表面积 $A_2 = 50$ 。

将以上数据代入公式①，得到在此种结构下散热总功率 $Q_2 = 375000$ 。可知若使所有服务器全部正常运行，服务器的总产热功率不可大于 Q_2 。得到不等式为：

$$500x \leq h_1 A_2 (t_w - t_0) = 375000 \quad (8)$$

经过计算，在尺寸为 $0.9\text{m} \times 0.9\text{m} \times 12\text{m}$ 的长方体集装箱内，当服务器的宽高面与其底面相贴时，可放置的服务器数量最大，集装箱任意横截面如图(4)所示 (MATLAB 代码见附录)：



图(4) 长方体集装箱任意横截面图

经计算，这种放置情况下服务器最大数量为 968，得到不等式：

$$x \leq 968 \quad (9)$$

建立运筹学模型，设目标函数为 $y = \max x$ ，联立⑭、⑮式，得到在此种摆放方式下的不等式方程组。运筹学线性规划模型如下所示：

$$\begin{aligned} y &= \max x \\ \begin{cases} 500x &\leq 375000 \\ x &\leq 968 \end{cases} \end{aligned}$$

解得此种结构下的最优解为 $x = 750$ 。

通过 MATLAB 软件计算可知，在此结构下，服务器分布疏密程度为 $D_2 = 33.0655$ (MATLAB 代码见附录)。

4.2.3 圆柱体翅片结构求解模型

通过查阅相关文献^[3]，对此结构进行量化分析如下：

首先，用 CPG 代表翅片管，翅片管的结构特性, 材质, 及加工方法可用下面的系列数字或符号表示: $CPG (\varphi D_b \times \delta / D_f / P / T)$

其中， $\varphi D_b \times \delta$: 基管外径和厚度 (D_b 为基管外径， δ 为基管厚度) (单位: mm)

D_f : 翅片外径 (单位: mm)

P : 翅片节距 (单位: mm)

T : 翅片厚度 (单位: mm)

根据工程上常用的翅片管规格和本题集装箱大小的限制，我们将本题的翅片规格设置成 $CPG (\varphi 900 \times 3.5 / 1000 / 10 / 1)$ ，即可以得到：

翅片高度：

$$l = \frac{1}{2}(D_f - D_b) = 50\text{mm} \quad (10)$$

1 米管长翅片的数目：

$$n = \frac{1000}{p} = 10 \quad (11)$$

1 米管长的翅片面积:

$$A_f = n \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_f^2 - D_b^2) \cdot 2 + \pi \cdot D_f \cdot T \right] = 30.16 \quad (12)$$

1 米管长上的裸管面积, 即翅片之间的光管面积:

$$A_0 = \pi \cdot D_b \cdot T \cdot \frac{(P-T)}{p} = 2.54 \quad (13)$$

1 米管长上的光管面积:

$$A_b = \pi \cdot D_b = 2.87 \quad (14)$$

将基管表面在加装翅片以后表面积扩大的倍数用翅化比 β 表示, $\beta = (\text{原光管外表面积}) / (\text{翅片管总的外表面积})$

$$\beta = \frac{A_f + A_0}{A_b} = 11.4 \quad (15)$$

圆柱体翅片安装在光管表面后, 热量将从翅片根部沿翅片高度向外传递, 同时不断地以对流换热的方式传给周围的流体, 其结果就使得翅片温度沿高度方向逐渐下降。单位面积的换热量在逐渐缩小。这样, 翅片表面积对增强换热的有效性在下降。因此, 在这里引入一个新的概念——翅片效率。翅片效率

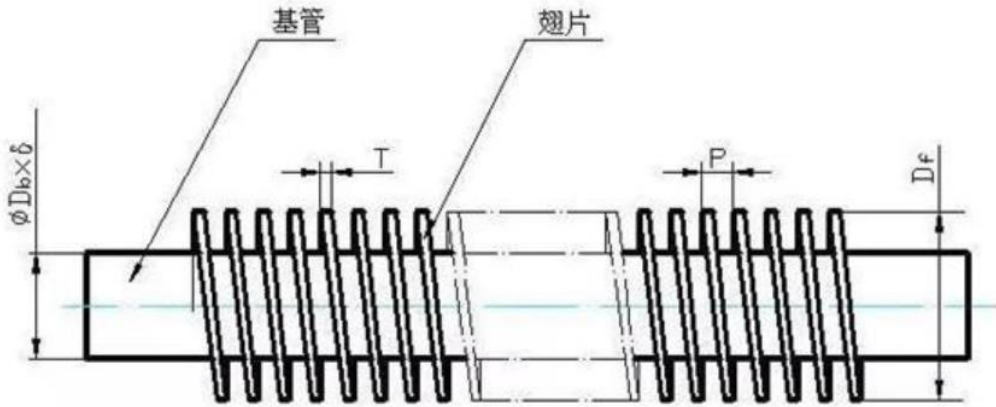
$$\eta = \frac{\text{翅片表面的实际散热量}}{\text{假定翅片表面温度等于翅根温度时的散热量}}$$

根据用工程上不同尺寸翅片效率, 假定其均值 0.78 为本题圆柱体翅片的翅片效率。引入翅片有效性 γ

$$\gamma = \beta \cdot \eta \quad (16)$$

代入本题圆柱体翅片数据可以得出, 翅片有效性 $\gamma = 8.89$ 。

圆柱体翅片结构侧面图(5)如下所示:



图(5)圆柱体翅片结构侧面图

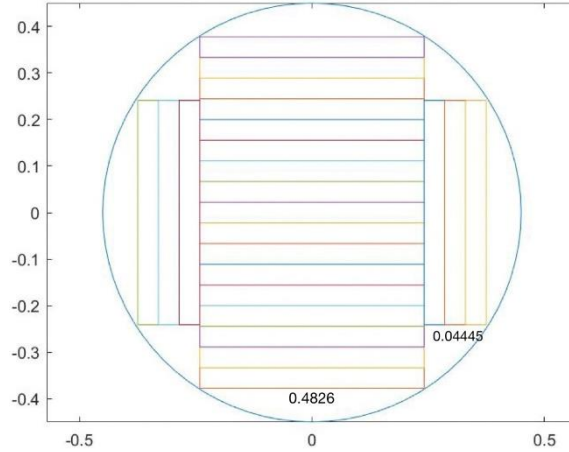
此时, 圆柱体集装箱的尺寸为 $0.9\text{m} \times 0.9\text{m} \times 12\text{m}$, 可知此时圆柱体底面直径 d_2 为 0.9m , 代入公式(2)中计算得出集装箱表面积为 $A_3 = 11.205\pi$ 。由翅片的性质可以得出, 翅片使散热面积扩大到了 8.89 倍, 于是得出有效散热面积为 $A_4 = 99.61245\pi$ 。

将有效散热面积为 A_4 代入到公式(1)中, 计算出最大散热功率 $Q_3 =$

747093.375π 。可知若使所有服务器全部正常运行，服务器的总产热功率不可大于 Q_3 。得到不等式为：

$$500x \leq h_1 A_4 (t_w - t_0) = 747093.375\pi \quad (17)$$

经过计算，在尺寸为 $0.9\text{m} \times 0.9\text{m} \times 12\text{m}$ 的圆柱形集装箱内，当服务器的宽高面与其底面相贴时，可放置的服务器数量最大，集装箱任意横截面如图(6)所示：



图(6) 圆柱体翅片结构集装箱任意横截面图

经计算，这种放置情况下服务器最大数量为 506，得到不等式：

$$x \leq 506 \quad (18)$$

建立运筹学线性规划模型，设目标函数为 $y = \max x$ ，联立⑰、⑱式，得到在此种摆放方式下的不等式方程组。运筹学线性规划模型如下所示：

$$\begin{cases} y = \max x \\ 500x \leq 747093.375\pi \\ x \leq 506 \end{cases}$$

解得此种结构下的最优解为 $x = 506$ 。

通过 MATLAB 软件计算可知，在此结构下，服务器分布疏密程度为 $D_3 = 32.9790$ （MATLAB 代码见附录）。

对以上三种结构进行散热能力的综合比较评估如下：

第一种（圆柱体结构）最大散热功率为 93750π ，可放置服务器最大数量为 588，服务器分布疏密程度为 33.9126；第二种（长方体结构）最大散热功率为 375000 ，可放置服务器最大数量为 750，服务器分布疏密程度为 33.0655；第三种结构（圆柱体翅片结构）最大散热功率为 747093.375π ，可放置服务器最大数量为 506，服务器分布疏密程度为 32.9790。

对于散热能力这一方面，圆柱体翅片结构由于增加了翅片结构，增大了有效散热面积，使散热能力得到了极大的提高（尽管由于服务器尺寸的限制，最终可放置的服务器数量并非三者最大值）。从服务器的分布疏密程度来看，三者相差不大，散热都比较均衡，其中圆柱体结构相对优于其余二者。

4.3 问题三

我们首先收集关于中国南海的海水深度、温度、盐度以及压强的相关资料和数据^[4]，找到海水深度与温度、盐度和压强的关系，从而可以通过公式计算不同的深度的海水各方面的参数和特性，为之后选择材料、讨论放置深度和优化设计提供约束条件和计算基础。

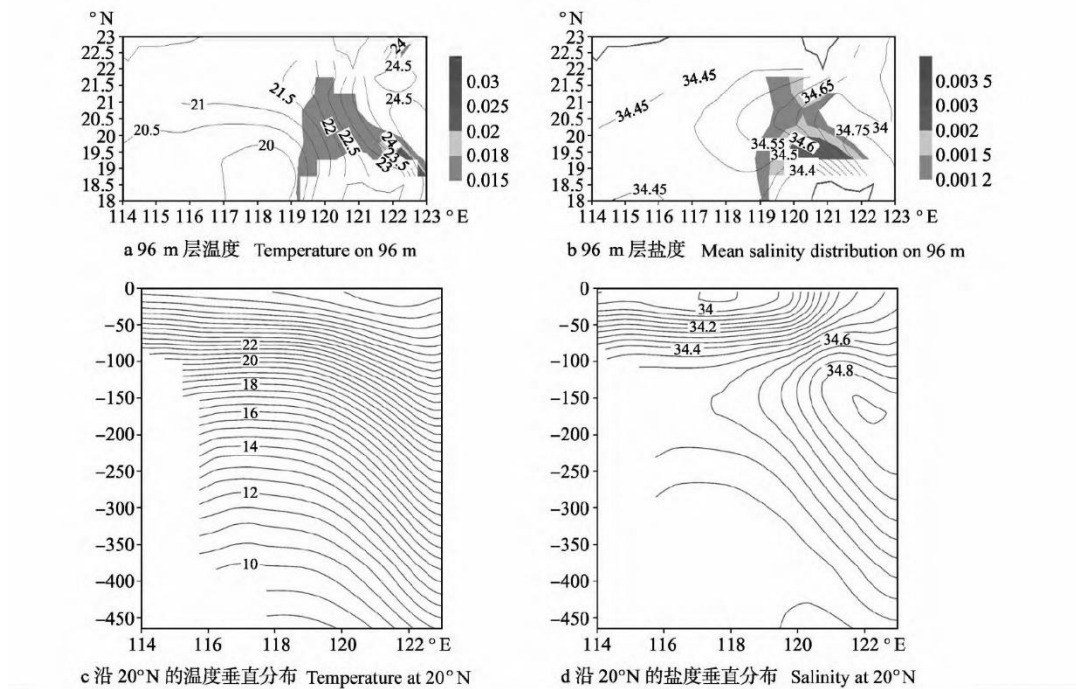
其次，根据题目附件提供的各种材料的性能数据，利用 TOPSIS 模型进行量化分析和评估。其中，材料可分为两大类：金属材料和非金属材料，由于非金属材料与金属材料相比导热性能非常差，因此不予考虑。所以，我们按照题目附件中的各项性能参数，利用弹性模量、屈服强度和抗拉强度综合计算得出材料的耐压能力，利用腐蚀电位量化得出材料的耐腐蚀性，建立 TOPSIS 模型对所有金属材料进行评估并排序。

接着，我们选取排名前三的三种材料做进一步研究和讨论。优化设计的最终目标为尽可能达到较高的散热效果，同时使用成本较低的材料，并提高集装箱的使用年限。在这一规划模型中，海水温度影响材料的散热效果，材料的耐腐蚀性影响使用年限，进而影响总成本，同时，约束条件为不能超过材料所能承受最大的海水压强。而由之前的分析可知，海水的温度和压强都与海水深度有关。因此，我们建立两个目标函数，分别为最大化材料的散热效果（与海水温度和材料的传热系数有关）和最小化成本（与海水盐度材料的耐腐蚀性和价格有关）。

最后，综合两个目标函数，并设立不同的系数来探究选取材料侧重点不同时选择的结果。

4.3.1 海水深度与温度、盐度和压强的关系

为探究某一具体海域内海水深度与温度、盐度和压强的关系，我们选取中国南海作为研究对象。通过查阅文献资料^[4]可以得到，南海海水沿 20° N 的温度垂直分布以及盐度垂直分布，具体数据如图(7)所示。

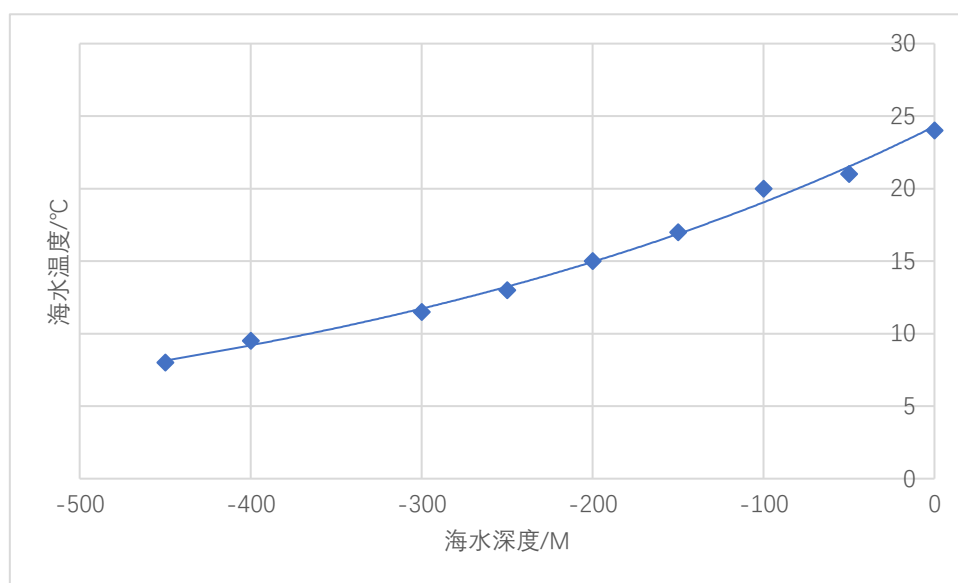


图(7)：南海海水沿 20° N 的温度垂直分布以及盐度垂直分布

可以看出，海水盐度随深度的变化不大，因此，我们不考虑盐度变化对于材料的影响。对于海水温度，通过图示数据进行数值拟合，得到南海海水深度与温度的关系式为：

$$T = 24.292e^{0.0024L} \quad (19)$$

其中， T 为海水温度（℃）， L 为海水深度（M）。如图(8)所示：



图(8)：南海海水深度与温度的关系图

对于海水压强随深度的变化关系，我们利用四种方式计算从深度到压强的转换，分别为线性函数、EOS-80 标准采用的方法、TEOS-10 标准采用的方法和海水吉布斯函数^[6]，得到数据如表(1)所示。

表(1)：四种不同方案计算南海海水压强数据表

压强/ DBAR	深度/M			
	线性方案	EOS-80	TEOS-10	GIBBS
50	49.62	49.65	49.82	49.82
100	99.24	99.30	99.58	99.47
200	198.48	198.54	199.04	199.04
300	297.72	297.74	298.41	298.41
400	396.95	396.89	397.70	397.68
500	496.19	496.00	496.85	496.85
1000	992.39	990.81	991.67	991.67
1500	1488.48	1484.44	1485.31	1485.31
2000	1984.77	1976.94	1977.84	1977.84
3000	2977.16	2958.52	2959.66	2959.66
4000	3969.55	3935.68	3937.13	3937.16
5000	4961.94	4980.56	4910.36	4910.44
5500	5458.13	5458.43	5395.42	5395.52

为使计算结果更加精确，取四种计算方式所得的平均值，所得结果如表(2)所示。

表(2)：男孩海水压强与深度数据表

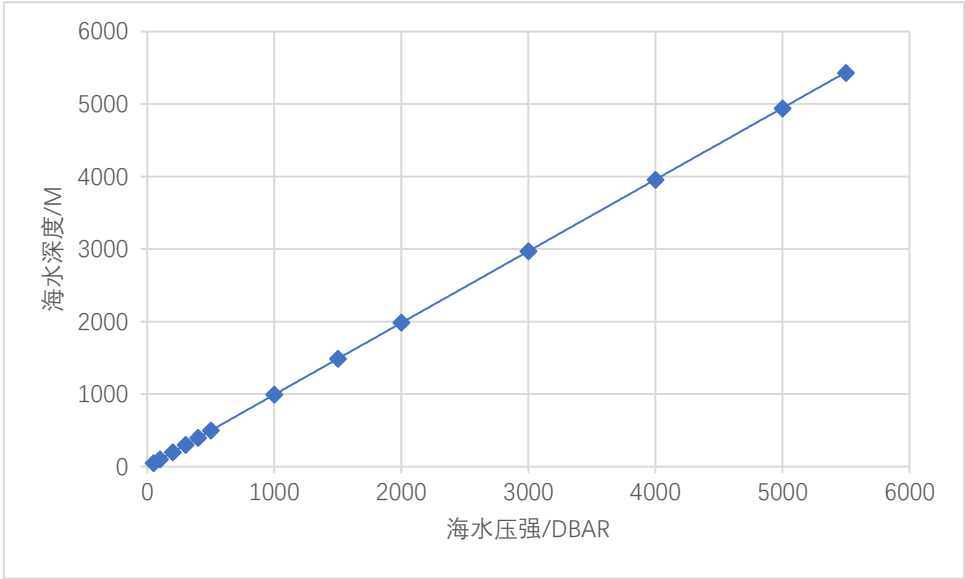
压强/DBAR	深度/M
50	49.7275
100	99.3975
200	198.775

300	298.07
400	397.305
500	496.4725
1000	991.635
1500	1485.885
2000	1979.3475
3000	2963.75
4000	3944.88
5000	4940.825
5500	5426.875

根据表(2)中的数据拟合得到南海海水压强与深度的关系式为：

$$L = 1.0069P_{cr}^{0.9979} \tag{20}$$

其中， P_{cr} 为海水压强（DBAR）， L 为海水深度（M）。如图(9)所示：



图(9)：南海海水深度与压强的关系图

4.3.2 材料的选择

1) 根据不同种类材料的导热系数排除不适用材料

集装箱外壳材料需要有较大的耐压能力、较好的耐腐蚀性和较好的传热能力，根据已知材料的类型，将材料分为铝合金、铜，铜合金、镍合金、钛合金、铁和钢（包括不锈钢）、聚合物（包括橡胶）、木头、纤维增强塑料（FRP），表(3)为几种材料的导热系数^[6]

表(3)：不同材料的导热系数表

材料	导热系数（W/m.k）
铝合金	200-250
铜和铜合金	71-400
镍合金	50-171
钛合金	14.63-17.1
铁和钢（包括不锈钢）	36-90

聚合物（包括橡胶）	0.12-0.5
木头	0.075-0.17
纤维增强塑料（FRP）	0.2-2.2

由上图可见，聚合物、木头、纤维增强塑料（FRP）导热系数较金属相比过低，由于集装箱的散热能力是能够存放更多服务器的关键，因此，选择材料时只考虑金属，在排除数据不完整的个别金属材料后，将剩下的 35 个金属作为备选材料。

2) 圆柱体集装箱的临界压力的测算

弹性模量、屈服强度、抗拉强度是衡量不同材料性能的重要因素，弹性模量^[7]是指材料在弹性变形阶段，其应力（外力）和应变（形变程度）的比例系数，是度量材料刚度的物理量；屈服强度^[8]是指当应力超过弹性极限后，单位面积的某种材料开始发生微量塑性形变的应力；抗拉强度^[9]是指金属由均匀塑性形变向局部集中塑性形变过渡的临界值，即单位面积的某种材料断裂或达到规定的破坏程度的应力，屈服强度和抗拉强度是度量材料强度的物理量。在一般工程中，屈服强度和抗拉强度是测算临界压力（材料能承受的最大压强）的重要物理量。

材料可分为塑性材料和脆性材料，塑性材料^[10]是指在外力作用下，虽然产生较显著变形而不被破坏的材料；脆性材料是指在外力作用下，发生微小变形即被破坏的材料。由于塑性材料和脆性材料的区分依据主要取决于是否能承受显著变形，因此，引入屈强比(Δ)来区分材料

$$\Delta = \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \quad (21)$$

其中， σ_y 是材料的屈服强度， σ_u 是材料的抗拉强度。根据已知数据，定义 $\Delta \leq 0.8$ 的材料是塑性材料， $\Delta > 0.8$ 的材料是脆性材料。

材料的许用拉应力（材料单位面积在拉伸时能承受的最大压强）与材料的分类有关^[11]。

对于塑性材料：

$$\delta = \frac{\sigma_y}{n_1} \quad (22)$$

对于脆性材料：

$$\delta = \frac{\sigma_u}{n_2} \quad (23)$$

其中， δ 是许用拉应力（材料单位面积在拉伸时能承受的最大压强）， n_1 、 n_2 分别是塑性材料和脆性材料的安全系数，根据国家有关部门制订要求， n_1 取值为 1.5-2.0，这里取值 1.75， n_2 取值为 2.0-5.0，这里取值 3.5。

材料的许用挤压应力（材料单位面积在挤压时能承受的最大压强）与许用拉应力（材料单位面积在拉伸时能承受的最大压强）的关系也与材料的分类有关

对于塑性材料：

$$\delta' = m_1 \cdot \delta \quad (24)$$

对于脆性材料：

$$\delta' = m_2 \cdot \delta \quad (25)$$

其中， δ' 是许用挤压应力（材料单位面积在挤压时能承受的最大压强）， m_1

取值范围是 1.5-2.5，这里取 2， m_2 取值范围是 0.9-1.5，这里取 1.2。

圆柱体集装箱的临界压力是导致筒体失衡的外压，根据资料^[12]可知

$$P_{cr} = \frac{2\delta'\gamma}{d_2} \quad (26)$$

其中， P_{cr} 为圆柱体集装箱的临界压力， γ 为圆柱体集装箱的厚度，这里假定为 $5mm$ ^[13]， d_2 为问题 2 集装箱直径 $0.9m$ 。

根据附件中关于金属材料抗压力性能，如表(4)，和以上模型分析，如表(5)，测算出 35 种金属材料的临界压力和电位均值。

表(4) 35 种金属材料抗压力性能的原始数据

材料类别	材料	弹性模量 (PSI)	屈服强度 (KSI)	抗拉强度 (KSI)
铝合金	铝合金5052	10	31	38
	铝合金6061	10	40	45
	铝合金7075	10.4	73	83
铜/铜合金	铜	17	50	55
	铍铜, CDA172	18	170	200
	红色黄铜, CDA230	17	49	64.5
	Inhibited Admiralty Brass	16	72	92.5
	Naval Brass	15	66	88
	铝青铜D, CDA614	18	47	80
	高硅青铜A, CDA655	15	52	88
	90-10铜镍	18	57	60
	70-30铜镍	22	79	85
	铸造硅黄铜和青铜	16.5	28.5	62.5
	铸铝青铜	17	60	102
镍合金	Monel400	26	110	120
	Inconel625	29.8	201	219
	Incoloy825	28	40	93
铁和钢	球墨铸铁	24	95	117.5
	AISI1040钢	30	86	113
	AISI1080钢	30	142	190
	HY-80钢	30	90	103
	HY-100钢	30	102.5	114
	ASTMA-242和A-441	30	50	70
	战300钢	29	299	150.3
钛/钛合金	非合金钛	15	90	100
	钛6Al-4V	16.5	155	167.5
不锈钢	302不锈钢	28	75	125
	303不锈钢	28	75	110
	304不锈钢	28	75	110
	316不锈钢	28	36	85
	17-4PH不锈钢	28.5	181.5	200
	410不锈钢	29	142.5	185
其他金属	商业上纯镁	6.1	3	13
	白金	23	27	29
	西尔弗	10.8	44	54

表(5) 35 种金属材料的临界压力和电位均值求解表

屈强比	许用拉应力	许用挤压应力	许用挤压应力	临界压力(MPA)	电位最大	电位最小	电位均值
0.816	10.3	11.4	78	0.864	-0.92	-1.1	-1.01
0.889	13.3	14.7	100	1.115	-0.72	-1.07	-0.895
0.880	24.3	26.8	183	2.034	-0.72	-0.83	-0.775
0.909	16.7	18.3	125	1.393	-0.12	-0.3	-0.21
0.850	56.7	62.3	426	4.737	-0.1	-0.25	-0.175
0.760	23.3	35.0	239	2.660	-0.2	-0.4	-0.3
0.778	34.3	51.4	352	3.909	-0.16	-0.25	-0.205
0.750	31.4	47.1	322	3.583	-0.2	-0.27	-0.235
0.588	22.4	33.6	230	2.551	-0.09	-0.26	-0.175
0.591	24.8	37.1	254	2.823	-0.17	-0.23	-0.2
0.950	19.0	20.9	143	1.588	-0.15	-0.3	-0.225
0.929	26.3	29.0	198	2.201	-0.17	-0.23	-0.2
0.456	13.6	20.4	139	1.547		-0.27	-0.135
0.588	28.6	42.9	293	3.257	-0.3	-0.4	-0.35
0.917	36.7	40.3	276	3.065	-0.04	-0.14	-0.09
0.918	67.0	73.7	504	5.601	-0.04	0.1	0.03
0.430	19.0	28.6	195	2.171	-0.03	0.05	0.01
0.809	31.7	34.8	238	2.647	-0.6	-0.72	-0.66
0.761	41.0	61.4	420	4.669	-0.6	-0.7	-0.65
0.747	67.6	101.4	694	7.709	-0.6	-0.7	-0.65
0.874	30.0	33.0	226	2.508			-0.63
0.899	34.2	37.6	257	2.856			-0.63
0.714	23.8	35.7	244	2.714	-0.57	-0.63	-0.6
1.989	99.7	109.6	750	8.332	-0.57	-0.58	-0.575
0.900	30.0	33.0	226	2.508	-0.05	0.06	0.005
0.925	51.7	56.8	389	4.319	-0.05	0.06	0.005
0.600	35.7	53.6	366	4.071	-0.25	-0.34	-0.295
0.682	35.7	53.6	366	4.071	-0.25	-0.34	-0.295
0.682	35.7	53.6	366	4.071	-0.15	-0.36	-0.255
0.424	17.1	25.7	176	1.954	-0.18	-0.38	-0.28
0.908	60.5	66.6	455	5.058	-0.15	-0.3	-0.225
0.770	67.9	101.8	696	7.736	-0.35	-0.46	-0.405
0.231	1.4	2.1	15	0.163	-1.6	-1.63	-1.615
0.931	9.0	9.9	68	0.752	0.2	0.35	0.275
0.815	14.7	16.1	110	1.226	-0.09	-0.14	-0.115

3) 不同材料耐腐蚀性的测算

海水为腐蚀性介质，含有多种盐类，大多数金属在海水中会发生腐蚀使得材料变软，强度降低，有时发生局部穿孔或断裂导致结构破坏。因此，材料的耐腐蚀性是材料选择时需要考虑的重要因素。由于金属在海水中的腐蚀是电化学腐蚀，耐腐蚀性可以由腐蚀电位决定，因此，根据材料已知数据，取每种材料的腐蚀电位均值对该材料的耐腐蚀性进行量化，即：

$$v = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (27)$$

其中， v 为材料的耐腐蚀性， V_1 为材料的最低腐蚀电位， V_2 为材料的最高腐蚀电位。

d. TOPSIS 综合评价法对各种材料性能进行评分^[14]

TOPSIS 法即优劣距离法，是一种通过规范化后，计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的距离，获得各个评价对象与最优方案相对接近程度，以此作为评价优劣依据的较为客观的方法。

设决策矩阵 A 是由 35 个金属材料的临界压力和耐腐蚀性的原始数据构成，

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{35,1} & a_{35,2} \end{pmatrix}$$

将 A 进行规范化处理，即：

$$z_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{35} (a_{ij})^2}} \quad (28)$$

得到的矩阵为

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \\ \vdots & \vdots \\ z_{35,1} & z_{35,2} \end{pmatrix}$$

定义最大值 $Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+)$

$$= (\max\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{35,1}\}, \max\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{35,2}\})$$

定义最小值 $Z^- = (Z_1^-, Z_2^-)$

$$= (\min\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{35,1}\}, \min\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{35,2}\})$$

定义第 $i (i = 1, 2, \dots, 35)$ 个评价对象与最大值的距离为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (29)$$

定义第 $i (i = 1, 2, \dots, 35)$ 个评价对象与最小值的距离为

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (30)$$

于是，我们可以计算出第 i 个评价对象的综合得分：

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (31)$$

对 35 种材料的综合得分 S_i 进行排序，选出最大的 3 个值为备选材料。

将各种材料的数据代入到以上方程中，可以得到综合得分排名前 3 的金属分别为第一名 410 Stainless Steel，第二名 Inconel 625，第三名 Inhibited Admiralty Brass。其中，410 Stainless Steel 的临界压力为 **7.736MPa**，Inconel 625 的临界压力为 **5.601MPa**，Inhibited Admiralty Brass 的临界压力为 **3.909MPa**。

表(6)为数据进行 TOPSIS 综合排序后选出的排名前 3 的金属

表(6) 基于 TOPSIS 模型的综合排序表

材料	规范化电位	规范化临界压力	与最大值的距离	与最小值的距离	分数	排名
铝合金5052	-0.337	0.039	0.545	0.204	0.273	34
铝合金6061	-0.299	0.050	0.508	0.244	0.324	33
铝合金7075	-0.258	0.092	0.451	0.293	0.394	32
铜	-0.070	0.063	0.352	0.472	0.573	25
铍铜, CDA172	-0.100	0.120	0.320	0.453	0.586	23
红色黄铜, CDA230	-0.058	0.214	0.221	0.523	0.703	3
Inhibited Admiralty Br	-0.068	0.176	0.256	0.500	0.661	8
Naval Brass	-0.078	0.162	0.274	0.485	0.640	13
铝青铜D, CDA614	-0.058	0.115	0.301	0.492	0.621	17
高硅青铜A, CDA655	-0.067	0.127	0.295	0.487	0.623	16
90-10铜镍	-0.075	0.072	0.347	0.468	0.574	24
70-30铜镍	-0.067	0.099	0.319	0.481	0.601	19
铸造硅黄铜和青铜	-0.045	0.070	0.335	0.498	0.597	20
铸铝青铜	-0.117	0.147	0.310	0.444	0.589	22
Monel400	-0.030	0.138	0.267	0.525	0.663	7
Inconel625	0.003	0.098	0.292	0.550	0.653	9
Incoloy825	0.010	0.253	0.148	0.601	0.803	1
球墨铸铁	-0.220	0.119	0.404	0.338	0.455	31
AISI1040钢	-0.217	0.211	0.350	0.381	0.521	27
AISI1080钢	-0.217	0.348	0.310	0.468	0.602	18
HY-80钢	-0.210	0.113	0.400	0.345	0.463	30
HY-100钢	-0.210	0.129	0.390	0.350	0.473	29
ASTMA-242和A-441	-0.200	0.122	0.387	0.358	0.481	28
战300钢	-0.192	0.376	0.284	0.506	0.641	12
非合金钛	0.002	0.113	0.278	0.551	0.665	6
钛6Al-4V	-0.098	0.184	0.270	0.474	0.637	14
302不锈钢	0.002	0.195	0.202	0.572	0.739	2
303不锈钢	-0.098	0.184	0.270	0.474	0.637	14
304不锈钢	-0.085	0.184	0.261	0.487	0.651	10
316不锈钢	-0.093	0.088	0.342	0.453	0.570	26
17-4PH不锈钢	-0.075	0.228	0.223	0.514	0.697	5
410不锈钢	-0.135	0.349	0.228	0.529	0.698	4
商业上纯镁	-0.539	0.007	0.730	0.000	0.000	35
白金	0.092	0.034	0.342	0.631	0.649	11
西尔弗	-0.038	0.055	0.346	0.503	0.592	21

4.3.3 基于材料散热能力和成本的综合评价模型

根据 TOPSIS 综合评价法对各种金属材料评分后进行排序, 选取前三名的材料, 分别是第一名镍基合金 825, 第二名 302 不锈钢, 以及第三名 CDA 铜合金, 做进一步讨论。

在经过之前的筛选后, 排名前三的三种金属材料在抗压性和耐腐蚀性方面具有良好的性能。这时, 材料的导热性和成本成为了决策的重要因素。影响导热性的主要因素是材料的传热系数以及海水的环境温度, 因此, 我们将服务器达到工作临界温度下, 材料单位面积单位时间内的散热量作为综合评价函数的第一个指标, 散热量越大, 则指标数值越大。而对于修建成本来说, 材料的耐腐蚀性会影响它的使用年限, 耐腐蚀性越强, 则使用年限越长, 进而减少了所需的总成本。我们还应该考虑到材料的价格。所以, 我们将第二个指标设立为耐腐蚀性 v 与材料单价倒数的乘积。

同时, 为了讨论在选择材料时侧重点的不同导致的选择结果的不同, 设立重要性指数 α , 用来表示材料的散热能力和成本在目标函数中所占的比重。这就意味着, α 较大时, 材料的散热能力作为决定性因素; 反之, α 较小时, 材料的成本成为我们主要考虑的因素。而相应的约束条件为材料所能承受的最大压强, 即用此材料建造的集装箱在海水中放置能达到的最大深度。在此基础上建立基于材料

导热能力和成本的综合评价模型：

$$\begin{aligned} \max f_i &= \alpha f_{i1} + (1 - \alpha) f_{i2} \\ f_{i1} &= s_i(80 - T_i) \\ f_{i2} &= \frac{v_i}{p_i} \\ T_i &= 24.292e^{0.0024l_i}, l_i \leq L_i \\ i &= \begin{cases} 1, 302 \text{ 不锈钢} \\ 2, \text{镍基铁合金 825} \\ 3, \text{CDA铜合金} \end{cases} \end{aligned}$$

其中， f_i 为第*i*种材料的综合评价指数， f_{i1} 为第*i*种材料的散热能力指标， f_{i2} 为第*i*种材料的成本指标， s_i 为第*i*种材料的导热系数， v_i 为第*i*种材料的耐腐蚀性， p_i 为第*i*种材料的成本价格， T_i 为第*i*种材料在海水深度为 l_i 时的海水温度， L_i 为第*i*种材料所能达到的最大深度。

三种材料的导热系数、耐腐蚀性、成本价格^{[15][16][17]}以及通过模型计算出来的两个指标数据如表(7)所示：

表(7)：三种不同材料各项性能数值表					
材料名称	成本价格 (kg/ 元)	导热系数 W/(m •℃)	耐腐 蚀性	散热能力指标	成本指标
302 不锈钢	26	17	0.00 5	1214.1	0.000192 3
镍基合金 825	159	90	0.03	6632.4	0.000188 6
CDA 铜合金	55	200	0.17 5	10835.7	0.003181 8

1) 侧重考虑材料的散热能力

取 $\alpha = 0.7$ ， $(1 - \alpha) = 0.3$ ，则得到三种材料的综合指标如表(8)所示：

表(8)：侧重材料侧重能力时综合指数表	
材料名称	综合指数
302 不锈钢	849.87
镍基合金 825	4642.71
CDA 铜合金	7585.06

2) 侧重考虑材料的成本

取 $\alpha = 0.3$ ， $(1 - \alpha) = 0.7$ ，则得到三种材料的综合指标如表(9)所示：

表(9)：侧重材料成本时综合指数表	
材料名称	综合指数
302 不锈钢	364.23
镍基合金 825	1989.74
CDA 铜合金	3250.74

综上所述，CDA 铜合金为最合适的材料，最大放置深度为约为 475.41 米，此时海水温度为 7.76℃。

4.4 问题四

问题四中提出了两个新的影响因素，分别为季节与潮汐。其中，季节的变化会对海水温度造成一定的影响，夏季海水温度相对较高，冬季海水温度相对较低；潮汐会导致水位的变化，涨潮时，相对于落潮，水位会有一定的上升，导致集装箱处海水温度的变化；同时，潮汐会带来海水流动，散热方式转变为强制对流传热，导致散热效率产生变化。基于问题一中建立的对流传热模型，对此进行一定的完善，通过查阅中国南海的相关文献，得到所需数据，量化得出不同季节下涨潮或落潮时海底集装箱的散热能力。

下面对季节与潮汐两个影响因素进行分析：季节不同，海水温度也会有所不同，夏季海水温度相对较高，冬季海水温度相对较低。通过查阅相关文献^[18]，得到在夏季与冬季之间的温度差 4℃，涨潮与落潮时的水位差约为 6m。根据问题三中由压强求解海水深度的模型，涨潮时，放置深度约为 475.41m，落潮时，深度约为 469.41m；根据问题三中由深度求解海水温度的模型可知，夏季涨潮时集装箱周围海水温度为 9.76℃，落潮时为 9.87℃，冬季涨潮时集装箱周围海水温度为 5.76℃，落潮时为 5.87℃。海水的强制对流传热系数 h_2 为 2000^[16]。

在问题一的基础上，对公式①进行完善，增添强制对流传热，得到：

$$Q_{i+3} = h_2 A_1 (t_w - t_i) \quad (32)$$

其中 Q_{i+3} 为来自强制对流传热的散热功率， $i = 1, 2, 3, 4$ ，其中 Q_4 为夏季涨潮时集装箱的散热功率， Q_5 为夏季落潮时集装箱的散热功率， Q_6 为冬季涨潮时集装箱的散热功率， Q_7 为冬季落潮时集装箱的散热功率， h_2 为强制对流传热的传热系数， A_4 为圆柱体翅片集装箱的表面积， t_w 为服务器工作临界温度（80℃）， t_i 为服务器周边海水温度， $i = 1, 2, 3, 4$ ，其中 t_1 为夏季涨潮时海水温度， t_2 为夏季落潮时海水温度， t_3 为冬季涨潮时海水温度， t_4 为冬季落潮时海水温度。

下面对此四种情况分别进行讨论：

4.4.1 夏季涨潮

经查阅文献可知，夏季涨潮时海水温度为 9.76℃。此时 $h_2 = 2000$ ， $A_4 = 99.61245\pi$ ， $t_w = 80$ ， $t_1 = 9.76$ ，将以上数据代入公式(32)，得到夏季涨潮时最大散热功率 $Q_4 = 13993556.98\pi$ 。

4.4.2 夏季落潮

经查阅文献可知，夏季落潮时海水温度为 9.87℃。此时 $h_2 = 2000$ ， $A_4 = 99.61245\pi$ ， $t_w = 80$ ， $t_2 = 9.87$ ，将以上数据代入公式(32)，得到夏季落潮时最大散热功率 $Q_5 = 13971642.24\pi$ 。

4.4.3 冬季涨潮

经查阅文献可知，冬季涨潮时海水温度为 5.76℃。此时 $h_2 = 2000$ ， $A_4 = 99.61245\pi$ ， $t_w = 80$ ， $t_3 = 5.76$ ，将以上数据代入公式(32)，得到冬季涨潮时最大散热功率 $Q_6 = 14790456.58\pi$ 。

4.4.4 冬季落潮

经查阅文献可知，冬季落潮时海水温度为 5.87℃。此时 $h_2 = 2000$ ， $A_4 = 99.61245\pi$ ， $t_w = 80$ ， $t_4 = 5.87$ ，将以上数据代入公式(32)，得到冬季落潮时最大散热功率 $Q_7 = 14768541.84\pi$ 。

四种情况进行相互比较可知：强制对流传热效率相对于自然对流传热有显著提高，因此潮汐带来海水流动时，海底集装箱的散热能力显著增大；冬季相对于

夏季，散热能力相对较高；潮汐通过影响水位，进而对散热能力产生一定影响，涨潮时相对于落潮时，散热能力相对较大。

4.5 问题五

给海底数据中心散热设计部门的建议书

尊敬的负责人：

您好！

在查阅各种文献和资料之后，我们知悉：在海底数据中心，如何在有限的体积内存放更多的服务器且保证服务器工作过程中向海水中正常快速的散热是一项非常有挑战性的问题。集装箱的外壳形状设计是解决问题的核心之一。

海底数据集装箱优化设计的目标，是要实现最终效益最大化。海底数据中心集装箱优化设计的技术关键是达到较高的散热效果，在节约材料成本的同时，提高集装箱的使用年限。

关于集装箱的设计问题，我们建议从以下几个方面来考虑。首先，找到集装箱最合适的材料。因为不同材料的抗压能力不同，导热能力不同，选择合适的材料有利于集装箱能够承受较大的海水压力，尽可能放置在较深的海水中，使其周围海水温度较低，从而获得较多的散热量。其次，确定集装箱的尺寸和结构。在外壳最大尺寸的限制下，合适的集装箱结构能够最大化集装箱容积和表面积，使得集装箱内既有空间存放更多服务器，又有能力将其产生的热量散出。在集装箱内部，还需要考虑服务器的摆放方式。由于服务器无法完全填满整个集装箱，因此，服务器的摆放方式要使得集装箱内服务器数量较多同时分布更加均匀。最后，确定集装箱放置的深度。由于受到季节和潮汐的影响，海水的水位和温度垂直分布都会发生相应的变化，因此，考虑到集装箱所能承受的最大压强和散热需求，我们以涨潮时的水位（高水位）以及夏季的海水温度（高环境温度）作为限制条件，计算出集装箱放置的深度。

综合以上分析，为了使最终效益最大化，我们向贵公司提出以下技术建议：

1. 集装箱材料：选用 Red Brass, CDA 230（红色黄铜 CDA230）；

2. 集装箱结构和尺寸：可选用圆柱体翅片结构以达到较好的散热效果，其中，圆柱体底面直径为 0.9 米，长为 12 米，翅片型号为 CPG ($\phi 900 \times 3.5 / 1000 / 10 / 1$)；

3. 集装箱中服务器摆放方式：一共有 32 层，在前 22 层中，每一层有 23 个服务器，每一个服务器的宽高面与集装箱底面平行，在后 10 层中，每一层有 1 个服务器，每一个服务器的长宽面与集装箱底面平行，共 516 个服务器，实现放置的服务器数量最大；

4. 集装箱放置的深度：同时考虑潮汐和季节影响，在涨潮时距海平面的距离应不超过 475.41 米。

我们对海底数据中心的的外壳散热设计通过建立模型进行了科学的分析，结果合理，易于实现，希望能给公司提供好的技术参考。

Xxx 团队
2021.4.18

5 参考文献

- [1]:林日亿.低温海水外掠圆管混合对流传热规律实验[J],中国石油大学学报(自然科学版),2019,42(06):135.
- [2]:豆丁网,一些对流换热系数取值的范围
<https://www.docin.com/p-1848968683.html> 2021.4.17
- [3]:个人图书馆,换热器翅片化、翅片效率和翅片参数的选择.
http://www.360doc.com/content/20/1209/13/72828568_950372023.shtml
2021.4.17.
- [4]:邱春华.南海北部深水海域温度以及盐度的季节及年际变化特征[J],中国海洋大学学报,2009,39(3):376-378.
- [5]:冀天宇,蒋国荣,史剑,周中刚,邓波.海洋中深度与压强的转换方法[J].海洋预报,2015,32(02):45-50.
- [6]:虞锦洪.高导热聚合物基复合材料的制备与性能研究[D].上海交通大学,2012.
- [7]:百度文库,弹性模量.
<https://wenku.baidu.com/view/842c2ec26aec0975f46527d3240c844769eaa097.html> 2021.4.18.
- [8]: 百度文库,屈服强度
<https://wenku.baidu.com/view/008b83d0bed5b9f3f80f1c64?fr=tag&word=%E5%B1%88%E6%9C%8D%E5%BC%BA%E5%BA%A6> 2021.4.18.
- [9]: 百度百科,抗拉强度
<https://baike.baidu.com/item/%E6%8A%97%E6%8B%89%E5%BC%BA%E5%BA%A6/949892?fr=aladdin> 2021.4.18.
- [10]:百度百科,塑性材料
<https://baike.baidu.com/item/%E5%A1%91%E6%80%A7%E6%9D%90%E6%96%99/5328723?fr=aladdin> 2021.4.18.
- [11]:百度文库,材料的许用应力和安全系数
<https://wenku.baidu.com/view/5e689114ab00b52acfc789eb172ded630a1c982b.html> 2021.4.18.
- [12]:王争昇,沈和云,王学生.对压力容器最高允许工作压力的探讨[J].化工设备与管道,2015,52(02):22-25+46.
- [13]:唐治国,王文江,李龙,耿德江.油气长输管道壁厚计算及选用[J].管道技术与设备,2011(06):52-53.
- [14]:杜挺,谢贤健,梁海艳,黄安,韩全芳.基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析[J].经济地理,2014,34(06):40-47.
- [15]: 百度百科,302 不锈钢
<https://baike.baidu.com/item/302%E4%B8%8D%E9%94%88%E9%92%A2> 2021.4.18
- [16]:百度百科,镍基合金 825
<https://baike.baidu.com/item/Incoloy%20825%E5%90%88%E9%87%91/16704187?fr=aladdin> 2021.4.18.
- [17]: 百度百科,CDA 铜合金
<https://baike.baidu.com/item/%E9%93%9C%E5%90%88%E9%87%91> 2021.4.18.

[18]:豆丁网, 一些对流换热系数取值的范围
<https://www.docin.com/p-1848968683.html> 2021. 4. 17.

6 附录

6.1 使用软件名称

MATLAB、Excel

6.2 MATLAB 代码

(1) MATLAB 参考代码一

```
a=0:pi/40:2*pi;
r=0.5
x=r*cos(a);
y=r*sin(a);
plot(x,y,'-');
hold on
axis equal
ax=-0.2625;
ay=-0.2413;
l=0.525;
w=0.4826;
m=[ax,ax+l,ax+l,ax,ax];
n=[ay,ay,ay+w,ay+w,ay];
plot(m,n);
hold on
for i=1:3
    ax=-0.39585+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2413;
    l=0.04445;
    w=0.4826;
    m=[ax,ax+l,ax+l,ax,ax];
    n=[ay,ay,ay+w,ay+w,ay];
    plot(m,n);
    hold on
end
for i=1:3
    ax=0.2625+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2413;
    l=0.04445;
    w=0.4826;
    m=[ax,ax+l,ax+l,ax,ax];
    n=[ay,ay,ay+w,ay+w,ay];
    plot(m,n);
    hold on
end
for i=1:4
    ax=-0.2625
    ay=0.2413+(i-1)*0.04445;
    l=0.525;
```



```

        w=0.04445;
        m=[ax, ax+l, ax+l, ax, ax];
        n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
        plot(m, n);
        hold on
    end
    for i=1:4
        ax=-0.2625
        ay=-0.4191+(i-1)*0.04445;
        l=0.525;
        w=0.04445;
        m=[ax, ax+l, ax+l, ax, ax];
        n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
        plot(m, n);
        hold on
    end
end

```

(2) MATLAB 参考代码二

```

a=0:pi/40:2*pi;
r=0.5
x=r*cos(a);
y=r*sin(a);
plot(x, y, '-');
hold on
axis equal
for i=1:19
    ax=-0.2413;
    ay=-0.422275+0.04445*(i-1);
    l=0.4826;
    w=0.04445;
    m=[ax, ax+l, ax+l, ax, ax];
    n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
    plot(m, n)
    hold on
end
for i=1:4
    ax=-0.4191+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2413;
    l=0.04445;
    w=0.4826;
    m=[ax, ax+l, ax+l, ax, ax];
    n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
    plot(m, n);
    hold on
end
for i=1:4
    ax=0.2413+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2413;
    l=0.04445;
    w=0.4826;

```

```

        m=[ax, ax+1, ax+1, ax, ax];
        n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
        plot(m, n);
        hold on
    end

```

(3) MATLAB 参考代码三

```

a=0:pi/40:2*pi;
r=0.5
x=r*cos(a);
y=r*sin(a);
plot(x, y, '-');
hold on
axis equal
for i=1:19
    ax=-0.2625;
    ay=-0.42275+0.04445*(i-1);
    l=0.525;
    w=0.04445;
    m=[ax, ax+1, ax+1, ax, ax];
    n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
    plot(m, n)
    hold on
end
for i=1:3
    ax=-0.39585+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2625;
    l=0.04445;
    w=0.525;
    m=[ax, ax+1, ax+1, ax, ax];
    n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
    plot(m, n);
    hold on
end
for i=1:3
    ax=0.2625+(i-1)*0.04445;
    ay=-0.2625;
    l=0.04445;
    w=0.525;
    m=[ax, ax+1, ax+1, ax, ax];
    n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];
    plot(m, n);
    hold on
end
ax=-0.5;
ay=-0.5;
l=1;
w=1;
m=[ax, ax+1, ax+1, ax, ax];
n=[ay, ay, ay+w, ay+w, ay];

```

```

plot(m,n);
hold on
axis equal
for i=1:22
    ax=-0.5;
    ay=-0.5+(i-1)*0.04445;
    l=0.4826;
    w=0.04445;
    m=[ax,ax+l,ax+l,ax,ax];
    n=[ay,ay,ay+w,ay+w,ay];
    plot(m,n);
    hold on
end
for i=1:22
    ax=0.0174;
    ay=-0.5+(i-1)*0.04445;
    l=0.4826;
    w=0.04445;
    m=[ax,ax+l,ax+l,ax,ax];
    n=[ay,ay,ay+w,ay+w,ay];
    plot(m,n);
    hold on
end

```

(4) MATLAB 参考代码四

```

s=0;
for i=1:24
    for j=1:19
        x=0;
        y=0.2413;
        z=-0.422275+(j-1)*0.04445;
        s=s+(x-0)^2+(y-6)^2+(z-0)^2;
    end
    for j=1:3
        x=0.284725+(j-1)*0.04445;
        y=0.2413;
        z=0;
        s=s+(x-0)^2+(y-6)^2+(z-0)^2;
    end
    for j=1:3
        x=-0.373625+(j-1)*0.04445;
        y=0.2413;
        z=0;
        s=s+(x-0)^2+(y-6)^2+(z-0)^2;
    end
    y=y+0.4826;
end
a=s/588;
disp(a);

```

(5) MATLAB 参考代码五

```

s=0;
for i=1:22
    for j=1:22
        x=0.2587;
        y=0.2625;
        z=-0.477775+(j-1)*0.04445;
        s=s+2*(x-0)^2+2*(y-6)^2+2*(z-0)^2;
    end
    y=y+0.525;
end
a=s/(44*22);
disp(a);

```

(6) MATLAB 参考代码六

```

s=0;
for i=1:22
    for j=1:17
        x=0;
        y=0.2625;
        z=-0.3556+(j-1)*0.04445;
        s=s+(x-0)^2+(y-6)^2+(z-0)^2;
    end
    for j=1:3
        x=0.263525+(j-1)*0.04445;
        y=0.2625;
        z=0;
        s=s+2*(x-0)^2+2*(y-6)^2+2*(z-0)^2;
    end
    y=y+0.525;
end
a=s/506;
disp(a);

```