

海底数据中心的优化散热设计

摘要

信息科技技术在21世纪撑起了人类生活工作的蓝天，而信息科技的重要支柱便是数据中心。数据中心需要交换处理大量数据，在陆地上需要占用土地，冷却散热较为困难。因此，将其放入海底便是一个很好的选择，它利用海水散热减少能量损耗，同时降低传输距离上有无可比拟的优势，本文主要研究在中国南海20摄氏度海域内放置集装箱，如何利用其中有限的体积存放尽可能多的服务器，同时又保证服务器能够正常散热的问题。利用传热学，考虑了服务器总体对流传热，通过对流传热方程建立散热模型，以

对于第一问，基于导热微分方程及边界条件构成了对数据中心导热问题的数学描写，将服务器理想化为内热源，忽视集装箱两端面的传热，建立起一维稳态常物性有内热源的传热模型。利用热阻分析的方式将传热过程分解为多个热阻的串联，并且根据最高温度为80摄氏度的约束条件计算得到数据中心服务器的最大容纳数量为722个。

对于第二问，基于第一问所建立的传热模型，将集装箱外壳与海水直接进行对流传热，优化为通过肋片（直肋）及肋片基部与海水进行对流传热，将外壳与海水之间的对流传热热阻，更改为肋片对流传热的热阻与肋片基部对流传热热阻的并联。从而增大了服务器外壳的对流传热面积，大大提高了集装箱的散热效率，并且计算得到 $Bi = 0.18 \leq 0.25$ ，这表示加肋是有利的。计算得到在这种情境下数据中心可以容纳955个服务器。相较第一问提高了32%。显著地提高了数据中心的服务器容纳量。

对于第三问，我们在第二问最佳外形的条件下综合考虑了成本，散热效果，耐腐蚀能力，耐压能力这四个方面，根据附件中所给出的材料，我们选取镍合金（Incoloy825）作为外壳材料。该材料有着良好的耐腐蚀性、抗压性和较好的导热性，广泛应用于热交换器上，并根据附件中所给出的材料力学性质根据其抗压强度计算出该数据中心在海水中所能放置的最深深度为29m，对数据中心的放置有指导意义

对于第四问，我们分析了一年中南海各海域水温变化特点，发现数据中心在冬季散热效果更好，夏季散热效果下降，春季高纬度海域更加适合散热工作，秋季在东部沿海至南海中部水域工作散热效果较好。我们通过分析近最大潮流分布图，认为可以将数据中心放置在北部湾琼州海峡附近，借助该处较大的潮流速度获得较大的散热量。

第五问最后，我们将自己的分析总结为了一封建议信，以帮助相关公司更好的设计制造海底数据中心
关键词：导热微分方程，肋片，海底数据中心，传热优化问题

目录

1	问题重述	3
1.1	题目背景	3
1.2	问题重述	3
2	模型假设与约定	3
3	符号说明及名词解释	4
4	模型建立与求解	4
4.0.1	导热系数为常数、无内热源、一维，稳态传热模型	4
4.0.2	导热系数为常数、一维、稳态传热模型	5
4.1	问题一的分析与求解	5
4.1.1	海水与外壳外壁之间的传热量	6
4.1.2	外壳内壁与外壳外壁之间的传热	6
4.1.3	外壳内壁与服务器外部的传热	7
4.1.4	服务器中心和服务器外部的热量传递	7
4.1.5	数据中心中所容纳服务器数量的计算	8
4.2	问题二的分析与求解	8
4.2.1	肋片传热的数学描写	9
4.2.2	肋片及肋片基部与海水之间的换热	9
4.2.3	外壳外侧与外壳内侧之间的换热	10
4.2.4	服务器外部与外壳外侧的换热	10
4.2.5	服务器中心处我温度的计算	10
4.2.6	数据中心所能容纳服务器数量的计算	10
4.2.7	容纳能力验证	11
4.3	问题三的分析与求解	11
4.3.1	外壳材料的选择	11
4.3.2	外壳材料的强度校核	12
4.4	问题四的分析与求解	12
4.4.1	季节与水温的关系	12
4.4.2	潮汐与流速的关系	13
4.5	问题五-建议信	14
5	结论	14
5.1	第一问	14
5.2	第二问	14
5.3	第三问	15
5.4	第四问	15

6	模型评价	15
6.1	模型缺点与不足	15
6.2	未来改进方向	15

1 问题重述

1.1 题目背景

数据中心是现代社会基础设施的重要部分，是全球协作的特定设备网络，承载着当今社会信息流量传输和储存，需要稳定而能够充分散热的环境来确保其正常工作。

然而，陆地上的数据中心需要占用大量土地，同时消耗大量能源保证散热，成本较为高昂。因此，众多企业已将目光投入水下，通过“海底数据中心项目”将服务器安装在具有先进冷却功能的压力容器中，利用巨量流动的海水进行热交换进行散热，能够有效节约能源，降低故障率，降低成本。

1.2 问题重述

海底数据中心要求在有限的体积内存放最多的服务器，同时保证快速散热，题中所给有以下几个问题：

- 1 已知数据中心集装箱的尺寸与单个服务器尺寸，仅考虑在中国南海20摄氏度海域深度的散热需求，主要考虑对流传热，要求评估单个集装箱可放置的服务器最大数量。
- 2 已确定集装箱外壳最大尺寸，结合第一问设计集装箱外壳结构来实现最大化散热效果，以存放最多服务器。
- 3 考虑实际情况下的储存情况，评估各种材料的耐压能力，抗腐蚀性，成本等选择合适的材料和海水深度，降低成本，提高使用年限。
- 4 实际海域中的水位和温度会不断变化，考虑潮汐和季节变化对集装箱散热产生的影响
- 5 将自己的分析结果写成一封建议信给相关公司的海底数据中心散热设计部门。

2 模型假设与约定

- 1 忽视集装箱两侧端面的传热，变为一维传热模型。
- 2 传热过程为稳态
- 3 导热系数为常数
- 4 不计辐射换热

3 符号说明及名词解释

符号	符号说明
V_f	单个服务器体积
$\dot{\Phi}$	单位时间内单位体积中内热源的生成热
Φ	热通量
r_1	集装箱内半径
r_2	集装箱外半径
δ	肋片/圆筒外壳厚度
R	热阻
t	温度
h	表面传热系数
C	周长
H	肋片高度
n	服务器数量
s	肋片数量
λ	导热系数
l	集装箱长度
P	压强
L	存放深度

4 模型建立与求解

根据传热学及能量守恒定律，我们可以得出在柱坐标系中的导热微分方程

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

及Fourier定律：

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2)$$

根据题目所给情境，我们需要考虑其两种简化形式：

第一种为导热系数为常数、无内热源、稳态、一维的情况

第二种为导热系数为常数、稳态、一维的情况。

4.0.1 导热系数为常数、无内热源、一维，稳态传热模型

考察一个内外半径分别为 r_1, r_2 的圆筒壁，其内、外表面温度分别维持均匀恒定的温度 t_1 和 t_2 。导热微分方程与相应的边界条件为

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = 0 \quad (3)$$

$$r = r_1, t = t_1 \quad (4)$$

$$r = r_2, t = t_2 \quad (5)$$

对微分方程连续积分两次求解，并结合Fourier定律以及热阻的定义可以得到通过整个圆筒壁的导热热阻为

$$R = \frac{\Delta t}{\Phi} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda l} \quad (6)$$

4.0.2 导热系数为常数、一维、稳态传热模型

考虑半径为 r_1 的圆柱，具有均匀的内热源 $\dot{\Phi}$ ，导热系数 λ 为常数，外表面维持在均匀且恒定的温度 t_1 。圆柱坐标中的导热微分方程简化为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (7)$$

边界条件为

$$r = 0, \frac{dt}{dr} = 0; \quad r = r_1, t = t_1 \quad (8)$$

其中， $r = 0$ 处的边界条件是根据对称性而得出的。求解以上导热微分方程，可以得到

$$t - t_1 = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} (r_1^2 - r^2) \quad (9)$$

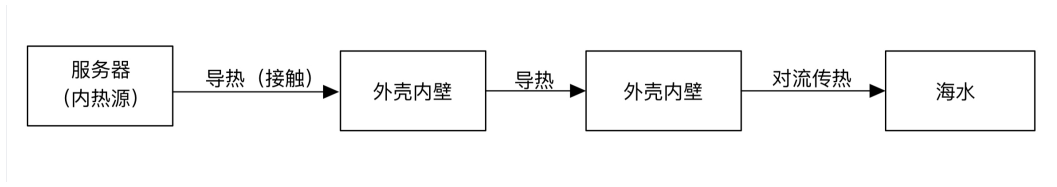
圆柱体中的最高温度出现在圆心处：

$$t_{max} = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi} r_1^2}{\lambda} + t_1 \quad (10)$$

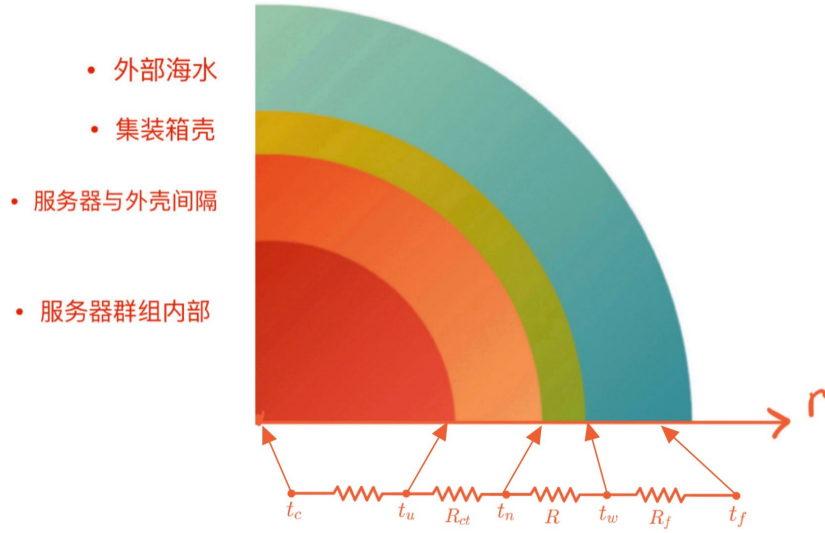
4.1 问题一的分析与求解

我们将数据处理中心简化为一个内部有内热源的圆柱，并在外层嵌套一个集装箱外壳，并忽视集装箱两端面的传热。由此，问题变为一个有内热源的一维稳态传热问题。

热量在各阶段的传递方式如下图所示



可以对传热阶段进行定性的热阻分析



微软水下数据中心外壳厚度确定

由于稳态，内部服务器产生的热量全部通过外壳，传递至海水中。

$$\Phi = n \cdot 500 (W) \quad (11)$$

4.1.1 海水与外壳外壁之间的传热量

海水与外壳外壁之间为对流传热，结合Newton冷却公式可以得到外壳外壁的温度。

$$\Phi = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{12\pi h_0}} \quad (12)$$

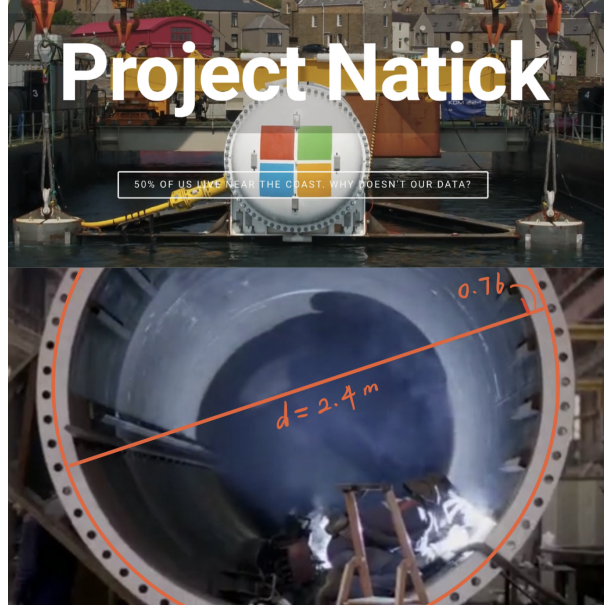
$$t_w = \frac{\Phi}{12\pi h_0} + t_f \quad (13)$$

4.1.2 外壳内壁与外壳外壁之间的传热

外壳内壁与外壳外壁之间的传热为热传导，根据（6）式可以得到

$$t_n = \frac{\ln(r_2/r_1)}{24\pi\lambda}\Phi + t_w = \Phi \left(\frac{\ln(r_2/r_1)}{24\pi\lambda} + \frac{1}{12\pi h_0} \right) + t_f \quad (14)$$

集装箱壁厚 δ_k 的确定



微软水下数据中心外壳厚度确定

根据Microsoft的 Natick 项目^[6]所采用的数据中心集装箱外壳壁厚，按比例换算得题目所给集装箱壁厚为0.03m, 即 $r_2 = 0.5m, r_1 = 0.47m$

4.1.3 外壳内壁与服务器外部的传热

外壳内壁与服务器外部存在接触热阻:

接触热阻:

$$R_{A,ct} = 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

总面积接触热阻

$$R_{ct} = \frac{R_{A,ct}}{A_1} = \frac{10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}}{\pi \times 1 \times 12 \text{ m}^2} = 2.65 \times 10^{-5} \text{ K/W} \quad (15)$$

由此可以得到服务器外部温度

$$t_u = \Phi \left(\frac{\ln(r_2/r_1)}{24\pi\lambda} + \frac{1}{12\pi h_0} + R_{ct} \right) + t_f \quad (16)$$

4.1.4 服务器中心和服务器外部的热量传递

根据一维稳态有内热源的导热微分方程结合边界条件，可以得到服务器中心温度，也即服务器最高温度为

$$t_{max} = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi} r_1^2}{\lambda_f} + t_u = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi} r_1^2}{\lambda_f} + \Phi \left(\frac{\ln(r_2/r_1)}{24\pi\lambda_k} + \frac{1}{12\pi h_0} + R_{ct} \right) + 20 \leq 80 \quad (17)$$

内部服务器单位时间内单位体积产生的热量有以下两种计算方式

1. 按单个服务器计算

$$\dot{\phi}_1 = \frac{500}{V_f} (max) \quad (18)$$

2. 将热量均摊在整个集装箱外壳之内

$$\dot{\phi}_2 = \frac{500 V_f n}{V_f 3\pi} (min) = \frac{500n}{3\pi} \quad (19)$$

4.1.5 数据中心中所容纳服务器数量的计算

通过查阅文献资料我们获得了（17）式中的各类常数的数值：

服务器导热系数^[1]（按铝合金考虑） $\lambda_f = 150\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

集装箱外壳导热系数^[1]（按镍合金Incoloy825计算） $\lambda_k = 15.8\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

海水与集装箱外壳间的对流传热系数^[2] $h = 587.65\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 根据 $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$ 和（17）式，分别求得对应的数据中心中所容纳服务器数量 n_1, n_2 ,二者取平均并取整，得到服务器数量 n 。

$$n_1 = 706$$

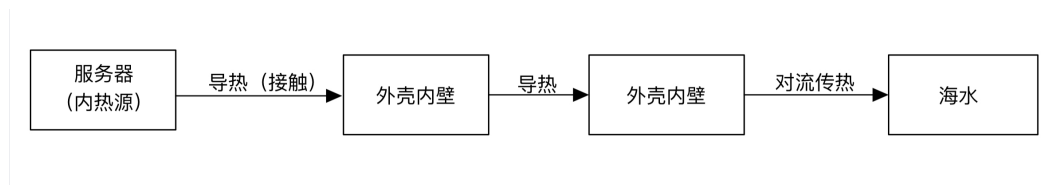
$$n_2 = 739$$

$$n = \left\lceil \frac{n_1 + n_2}{2} \right\rceil = 722 \quad (20)$$

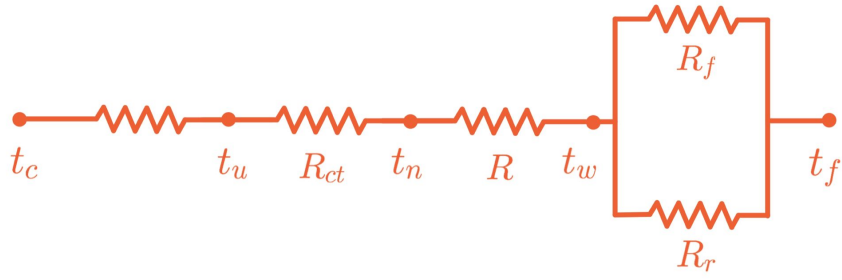
由此，我们得到了数据中心所能容纳的服务器的最大数目即为722。

4.2 问题二的分析与求解

在问题一的基础上，我们考虑缩小集装箱的半径以便于在集装箱外侧增加肋片（采用直肋），增大集装箱与海洋之间对流传热的面积，以便于增大换热量，以此来增加存放服务器的数量



传热过程中的热阻可以用以下图示表示



4.2.1 肋片传热的数学描写

直肋对流传热的导热微分方程可以表示为

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{hC(t - t_\infty)}{\lambda A_c} \quad (21)$$

相应的两个边界条件为

$$r = 0, t = t_0; \quad x = H, \frac{dt}{dx} = 0 \quad (22)$$

构成了肋片温度场完整的数学描写。

其中， C 为参与换热的截面周长， A_c 为沿肋高方向的横截面积。

对传热微分方程求解，并结合Fourier定律以及热阻的定义可以得到等截面直肋的导热热阻

$$R_f = \frac{t_0 - t_f}{\Phi} = \frac{1}{(\lambda A_c h C)^{1/2} \text{th}(mH)} \quad (23)$$

其中，

$$m = \left(\frac{hC}{\lambda A_c} \right)^{1/2} \quad (24)$$

4.2.2 肋片及肋片基部与海水之间的换热

s 个肋片的热阻为并联关系，大小为

$$R_{f(s)} = \frac{t_0 - t_f}{\Phi} = \frac{1}{(\lambda A_c h C)^{1/2} \text{th}(mH) s} \quad (25)$$

肋片基部面积的散热热阻为

$$R_r = \frac{1}{h(\pi - s\delta_l)l} \quad (26)$$

肋片基部与肋片的等效热阻为

$$R_{eq} = \left(R_{f(s)}^{-1} + R_r^{-1} \right)^{-1} \quad (27)$$

外壳外侧（肋片基部）的温度为

$$t_w = \Phi R_{eq} + t_f \quad (28)$$

4.2.3 外壳外侧与外壳内侧之间的换热

外壳外侧与外壳内侧之间的热阻

$$R = \frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda_k} \quad (29)$$

外壳内侧的温度可以表示为

$$t_n = \frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda} \Phi + t_w = \Phi \left(\frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda} + R_{eq} \right) + t_f \quad (30)$$

其中，

$$r'_1 = \frac{1 - 2H - 2\delta_k}{2} \quad (31)$$

$$r'_2 = \frac{1 - 2H}{2} \quad (32)$$

4.2.4 服务器外部与外壳外侧的换热

考虑接触热阻，可以得到服务器外侧的温度

$$t_u = \Phi \left(\frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda} + R_{eq} + R_{ct} \right) + t_f \quad (33)$$

4.2.5 服务器中心处我温度的计算

根据有内热源的稳态的导热微分方程，可以计算得到服务器中心的温度

$$t_{max} = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi} r_1^2}{\lambda_f} + t_u = \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi} r_1^2}{\lambda_f} + \Phi \left(\frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda_k} + \frac{1}{(\lambda A_c h C)^{1/2} \text{th}(mH) s + h(\pi - s\delta_l) l} + R_{ct} \right) + 20 \leq 80 \quad (34)$$

4.2.6 数据中心所能容纳服务器数量的计算

根据（11）式及（34）式，经过整理可以得到数据中心所能容纳服务器数量的表达式

$$n = \frac{60 - \frac{1}{4} \frac{\dot{\Phi}}{\lambda_f} r^2}{500 \left(\frac{\ln(r'_2/r'_1)}{24\pi\lambda_k} + \frac{1}{(\lambda A_c h C)^{1/2} \text{th}(mH) s + h(\pi - s\delta_l) l} + R_{ct} \right)} \quad (35)$$

为了让肋片能够较好的提高散热效率，肋片的高度不宜过低。考虑到结构的稳定性，肋片的高度也不宜过大。为此，取肋片高度为3cm。

是否采用在基础表面上增加肋片取决于加肋片后总的传热阻力是增加还是减小：增加肋片加大了对流传热面积，有利于减少总面积热阻，但是肋片增加了固体导热阻力。因此，增及肋片是否有利取决于肋片的导热阻力(用 $\frac{\delta}{\lambda_f}$ 表示)与表面对流传热阻力(用 $\frac{1}{h}$ 表示)之比。这一比值 $\frac{h\delta}{\lambda_f}$ 构成一个无量纲数，成为Biot数，记为 Bi 。对等截面的直肋，当 $Bi \leq 0.25$ 时，加肋总是有利的。在 H 确定后，（35）式为随着肋板

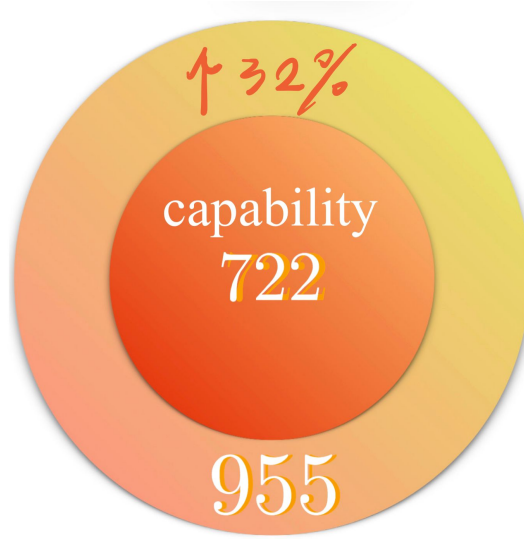
厚度 δ_l 增大而减小的函数。因此， δ_l 越小，越有利于散热。但是，考虑到若 δ_l 过小，肋片结构将不够稳定，容易被破坏，因此取 $\delta_l = 5\text{mm}$ 。

此时肋片数量 s 最多为

$$s = \left\lfloor \frac{\pi}{\delta_l} \right\rfloor = 628 \quad (36)$$

此时， $Bi = 0.18$,对散热有利。将肋片的高度与厚度带入（35）式，可以计算得到

$$n = 955 \quad (37)$$



相比第一问，可容纳服务器数量增加了32%。

4.2.7 容纳能力验证

$$nV_f = 10.76 < 12\pi \quad (38)$$

在不考虑服务器之间缝隙的情况下，集装箱足以容纳955个服务器。同理，问题一的解也满足集装箱容纳能力。

4.3 问题三的分析与求解

4.3.1 外壳材料的选择

为了使外壳处于温度更低的海水中，以获得更好的散热效果，需要将外壳放入更深的海水中。因此，材料的选择需要考虑外壳的耐压能力，在材料力学中体现在材料的杨氏模量 E 上。同时，海水是一种强的腐蚀介质，其中含有大量的氯离子，因此材料的选择同样需要考虑其耐腐蚀性。

根据附件*Some Commonly Use Marine Materials*，我们在其中综合考虑以上各点要求，挑选出镍合金中的Incoloy825，用于集装箱外壳。其杨氏模量为 $1.93 \times 10^{11}\text{Pa}$ 。在所给材料中属于杨氏模量较大的材料，拥

有较好的抗压性。同时，该材料拥有抵抗氯化物腐蚀的特性，具有较好的耐腐蚀性。并且，该材料广泛的应用于海水淡化厂和热交换器的部件，拥有较好的导热性，是用作数据中心外壳的理想材料。

4.3.2 外壳材料的强度校核

集装箱主体圆筒的惯性矩为

$$I_{z1} = \frac{\pi D^3}{64} (1 - \alpha^4) = 0.009455 \text{m}^4, \alpha = \frac{d}{D} \quad (39)$$

肋片的惯性矩为

$$I_{z2} = 628 \times \left[\frac{1}{12} \delta H^3 + \frac{1}{4} (D + H)^2 \delta H \right] = 0.0942 \text{m}^4 \quad (40)$$

其中， $D = 2r_1, d = 2r_2$ 。

总惯性矩为

$$I_z = I_{z1} + I_{z2} = 0.103655 \quad (41)$$

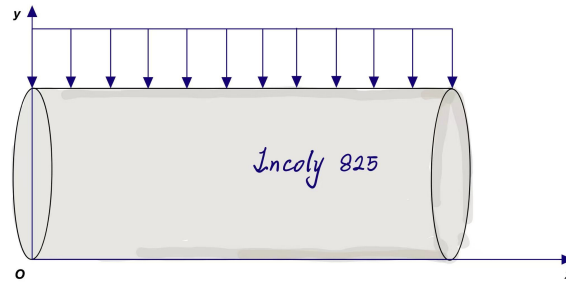
$$p = \rho g L \quad (42)$$

建立直角坐标系如图所示，设轴上某点到原点距离为x。

$$M = \frac{1}{2} p x^2 \quad (43)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} y_{max}}{I_z} \quad (44)$$

$$\sigma_{max} \leq [\sigma] \quad (45)$$



圆筒受力分析示意图

联立（41）-（45）方程可以得到 $p \leq 0.29 \text{MPa}, h \leq 29 \text{m}$ 。经校核，圆筒最深可置于水下29m。

4.4 问题四的分析与求解

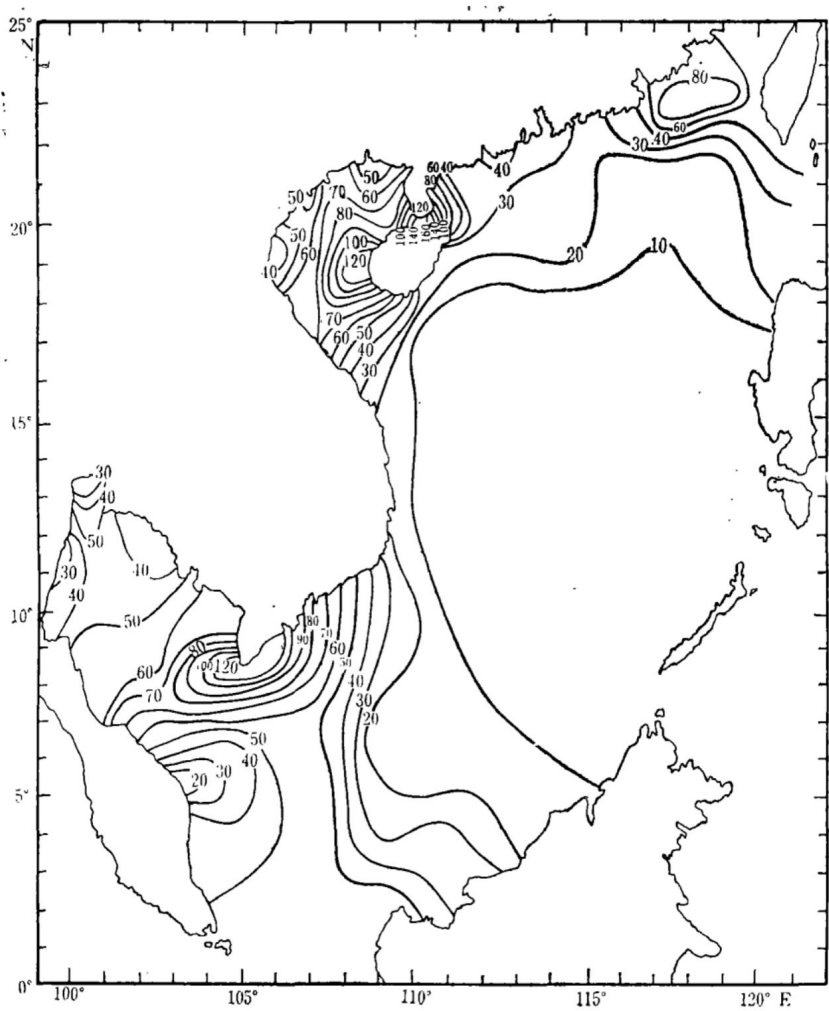
4.4.1 季节与水温的关系

一年中随着太阳直射位置由南向北的挺进及由北向南的撤回，温区发生相应的变化。总体来说，南海海温全年变化不大，在10~12°C之间。但在不同的季节，会存在不同的暖水区。1月南海海水温度随纬

度升高递减快。4月，整个海区的表层海温都开始上升，且低纬海区升温明显。南海中部和南部海温均升至 28°C 以上。7月， 28°C 等值线已北伸到 30°N 左右，整个海区南北海温差异很小。9月，海温开始下降，但不十分显著。到10月，中国东部沿海至南海中部的狭长海域的海温已降至 28°C 以下，比同纬的深海区海温要低。

对于散热器的工作效果而言，总体来说，在每个季节里，随着纬度的升高水温都会降低，散热效果随之提高。但在冬季，海区内温度普遍较低，散热效果显著；而夏季与之相反，海区温度普遍较高，散热效果有所下降；春季，随着温度上升，低纬地区海温升高幅度更加明显，此时高纬度更适合散热器工作；秋季对于东部沿海至南海中部的海域而言，比同纬深海区温度低，散热器工作效果较好。

4.4.2 潮汐与流速的关系



近最大潮流分布图

该图为近最大潮流分布图^[7]，根据该图可以得到潮流流速大小信息，在北部湾琼州海峡附近，潮流流速较大。根据Newton冷却公式，

$$\Phi = hA\Delta t \quad (46)$$

可知，海水流速越大，对流传热系数越大，热通量越大，导致散热器散热效率会有较大的提升。所以，基于图像分析，可以选择将数据中心放置在北部湾琼州海峡附近。在此处可以拥有较大的散热能力。

4.5 问题五-建议信

建议信

致海底数据中心散热设计部门：
你们好！

为了解决贵公司“如何在有限的体积内存放更多的服务器且保证服务过程中正常散热”这一问题，我们综合考虑器件尺寸、散热效果、材料选择等多个方面，提出以下建议：

1、建议在集装箱外壳加装散热肋片。我们经过建模分析出加装肋片（直肋）相比于不加装肋片可以大幅度增加（32%）内部所能容纳的服务器数量。

2、建议数据中心集装箱外壳采用镍合金（Incoloy825），该材料具有良好的抗压性、耐腐蚀性和较好的导热性，能够满足海底数据中心的工作要求。

3、建议将数据中心放置在北部湾琼州海峡附近，依托该处较大的潮流流速获得更大的散热量。
希望贵公司能够采纳我们的建议。

参赛选手
2021年4月18日

5 结论

5.1 第一问

通过建立一维稳态有内热源的导热微分方程，利用边界条件并使用热阻分析的方法计算得到数据中心中可容纳服务器的最大数量为722个。

5.2 第二问

在第一问的基础上，通过将集装箱外壳直接与海水进行对流换热改为通过肋片与肋片基部与海水进行对流换热，增大了传热效率，可以容纳更多服务器，计算得到改进散热方式后数据中心可以容纳922个服务器，较第一问计算得到的数量提高了32%。

5.3 第三问

综合考虑抗压性，抗腐蚀性和导热性，选用镍合金（Incoloy825）作为集装箱外壳材料。并通过给出的抗压强度计算出该数据中心最深可在29m深的海洋中工作。

5.4 第四问

通过分析南海海域季节与水温的关系，我们发现在冬季散热效果更好，夏季散热效果下降，春季高纬度海域更加适合散热器工作，秋季在东部沿海至南海中部水域工作散热效果较好。

通过查看南海近最大潮流分布图，可以得到数据中心应放置在北部湾和琼州海峡附近，在该处潮流流速大，有利于散热。

6 模型评价

6.1 模型缺点与不足

- 1 将系统压缩为一维，忽略集装箱端面的散热
- 2 将服务器集群看做一体，忽视了服务器之间存在的空隙
- 3 将服务器理想化的视为均匀内热源，忽视了服务器组件产热的不均匀性
- 4 将传热过程理想化的视为稳态，忽视了内部温度随时间的波动

6.2 未来改进方向

- 1 可以更改肋片形状为导热效率更高的形状，如环肋、叶状肋片等。

参考文献

- [1] 陶文铨. 传热学(第五版)[M].北京: 高等教育出版社, 2019.P1-80
- [2] 李晓辰. 低温海水外掠圆管流动与换热规律研究[D].中国石油大学(华东),2017.
- [3] 李浩麟,项有法. 河口汊道不恒定流有限元数值计算[J].水利学报.1983(04)
- [4] 厉良辅. 用实验方法测定压力管道不稳定流的阻力[J].水郑州大学学报. 1963(02)
- [5] 钱宁. 泥沙运动力学[M].科学出版社,1983
- [6] Microsoft <https://natick.azurewebsites.net/>
- [7] 丁文兰.. 南海潮汐和潮流的分布特征[J].海洋与湖沼,1986(06):468-480.