

# 海底数据中心的散热优化设计

陈子行<sup>1</sup> 秦梓杰<sup>2</sup> 冀俊凯<sup>3</sup>

1. 华北理工大学人工智能学院 河北 唐山 063210

2. 华北理工大学电气工程学院 河北 唐山 063210

3. 华北理工大学材料科学与工程学院 河北 唐山 063210

**【摘要】** 本文主要研究海水对流和集装箱的形状对海底数据中心散热效率的影响，建立了热对流传热模型和热传导方程的模型。通过海水的参数判断出海水的对流方式，集装箱的散热效率由自然对流和强制对流的共同散热所决定。服务器的分布为以圆柱形状均匀分布。用热传导方程与筒壁温度与海水建立关系，求出集装箱的散热效率，进而求出满足散热的最大承载数。

**【关键词】** 热对流方程；牛顿冷却方程；数据中心散热；热传导方程

## 0 引言

海底数据中心利用大量流动的海水，通过与海水的换热将互联网设施的热量消散，有效地节约能源。潜艇数据中心占用的陆地很少，没有冷却塔，也不需要消耗淡水。它不仅容纳海洋牧场、渔业网箱等生态活动，还可以与海洋风力发电、海洋石油平台等工业活动相互服务。我们将对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进行优化设计。

## 1 问题分析处理

通过海水的性质求出海水的瑞利数 (Ra)，通过瑞利数 (Ra) 判断出海水的对流方式，由瑞利数 (Ra) 和对流方式可求出努塞尔数 (Nu)，再通过努塞尔数 (Nu) 可求出海水与集装箱的换热系数 h 和  $h_1$ 。

通过分析集装箱的对称性形状，可以知道集装箱的中心不超过 80 摄氏度时，不会有服务器超过 80 度，且服务器的分布为以圆柱形状均匀分布。假设集装箱中心为 80 摄氏度，通过热传导方程与筒壁温度建立关系，再通过集装箱与海水的热传导方程，可求出集装箱的散热效率，通过散热效率可求出服务器的满足散热的最大承载数  $X$ 。在通过求出集装箱的体积与集装箱的有效空间占有率的乘积除以服务器的体积求出  $X_1$ ，通过比较  $X$  和  $X_1$  的大小，选取最小的  $X$  为服务器的最大承载数，得出服务器的最大承载数由散热效率所控制。

## 2 模型的建立与求解

### 2.1 模型的准备

#### 2.1.1 传热方式

热力学过程有三种基本传热方式：

热传导：微观粒子热运动而产生的热能传递，固、液、气内部传热均存在热传导，主要基于傅里叶定律计算；

热对流：由流体宏观运动引起的热量传递过程，主要考虑流体与物体接触面的热交换，基于牛顿冷却公式计算；

热辐射：物体通过电磁波传递能量，可发生在任何物体中。

#### 2.2.2 边界条件

导热问题常见边界条件有三类，令  $T(x, y, z, t)$  为物体的温度分布函数， $\Gamma$  为物体的边界曲面。

(1) 第一类边界条件：规定边界上的温度值：

$$T(x, y, z, t)|_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z, t)$$

(2) 第二类边界条件：规定边界上的热流密度：

$$\frac{\partial T}{\partial n}|_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z, t)$$

(3) 第三类边界条件：规定边界上物体与周围流体间对流传热系数及周围流体温度。

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} + \sigma T \right) |_{(x, y, z) \in \Gamma} = f(x, y, z, t)$$

#### 2.2.3 自然对流和强制对流

热对流是一种扩散过程。从宏观上看，这种扩散是流体内部压强、浮力、重力等相互作用的结果。有时扩散进行得较快，有时则进行得非常缓慢。大气中低处温度高、高处温度低时，很容易形成对流。有时候，自然对流不足，可以采用搅拌、鼓风等方式使流体对流，这就是强制对流。自然对流传热系数：

$$h = - \frac{k}{t_1 - t_0} \frac{d_r}{d_y} |_{y=0}$$

### 2.2 模型的建立

动粘度：

$$\nu = \mu / \rho$$

$\mu$  表征液体粘性的内摩擦系数。不同流体的粘度差别很大，在压强为 101.325kPa、温度为 20℃ 的条件下，水： $\mu = 1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ， $\nu = 1.19 \times 10^{-6}$ ；

格拉晓夫数：

$$Gr_d = \frac{g\alpha(t_w - t_w)D^3}{\nu^2}$$

表示由温度差引力的浮力与粘性力之比，不同情况  $Gr$  数不同。

体膨胀系数：

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_p \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_w - \rho}{t_w - t}$$

因为理想气体为： $P = \frac{RT}{\rho} \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT}$ ，因此：

$$\alpha = \frac{1}{T}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

其中， $\nu$  为运动粘度， $\lambda$  为热扩散率， $c_p$  为等压比热容， $\mu$  为液体粘性内摩擦系数。

瑞利数 (Ra)：

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

当  $Ra < 10^9$  时，是层流；当  $Ra > 10^9$  时，是湍流。

努塞尔数 (Nu)：

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n = CRa^n$$

它是一个无量纲数，表达了对流换热过程的强弱程度，同时也反映了流场的导热能量与换热能力的对比关系， $h$  为对流换热系数， $D$  为特征长度， $\lambda$  为流体导热系数。

### 2.3 模型的求解

经过文献查找，我们可以知道海水在 20 摄氏度时，海水导热系数  $\lambda = 0.6037 W / (m \cdot K)$ ，内摩擦系数  $\mu = 1.0451 \times 1.056 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ，运动粘度  $\nu = 1.056 \times 10^{-6} m^2 / s$ ，海水等压比热容为 4096  $J / (kg \cdot K)$ 。

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{c_p \mu}{\lambda} Pr \approx 7.4270$$

$$Gr_d = \frac{g\alpha(t_w - t_w)D^3}{\nu^2} \approx 1.4937 \times 10^{12}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = 7.19705 \times 10^8 < 10^9$$

故对流方式为湍流。在下式中  $n$  取 1/3,  $C$  取 0.10.

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n = CRa^n$$

$$Nu = 0.53 = 0.53 Ra^{1/3}$$

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \approx 44.4171 W / (m^2 \cdot K)$$

$$Nu_1 = C(Re \cdot Pr)^n$$

$$h_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda}{D} = 114.939 W / (m^2 \cdot K)$$

根据热传导方程有

$$Q = Ah(T_f - T_w) + Ah_1(T_f - T_w)$$

其中集装箱面积  $A = 12.5\pi$ 。因为要保持服务器

温度不超过 80 摄氏度，每个服务器的产热功率为 500W，且长时间工作后集装箱内部保持传热平衡即温度不再发生变化。故  $Q = 500x$ ， $x$  为服务器的安装个数。

由于集装箱是圆筒状，具有一定的对称性，故服务器的最佳安放位置也有对称性。如图，且易得，集装箱的中心为温度最高点，由题意得我们需保持服务器最高温度不超过 80 摄氏度，故我们假设集装箱中心温度为 80 摄氏度，以此来求出集装箱所能承载的最多服务器数。

集装箱内部的传热方式满足傅里叶方程：

$$q = -k\nabla T - k \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

其中， $k = c_p \rho \lambda$ 。通过，内部傅里叶方程和外壳的热对流传热，可以求出  $x$  的取值大约为 465。考虑到是否容器体积能否承载这么多的服务器数，我们计算出集装箱体积  $V_1 = 3\pi m^3$ ，每一个小服务器的体积  $V_2 \approx 0.01126 m^3$ 。根据空间最大占有率  $z$  的分析可以得出  $\frac{V_1 \cdot z}{V_2} = x_1$ ，易得， $x_1 > x$ 。故所能承载的最大服务器数由集装箱的散热效率所控制。

### 3 结束语

本文主要分析海底数据想的散热效率，根据集装箱所具有的对称性，采用热对流方程，牛顿冷却方程和热传导方程求出集装箱的散热效率和集装箱内服务器的最大个数。

#### 【参考文献】

- [1] 敬文娟. 矩形翅片和开缝翅片自然对流换热模拟研究\_敬文娟 [D]. 郑州大学, 2012.
- [2] 黄晓明, 师春雨, 孙佳伟, 杜阳, 朱一萍, 许国良. 翅片式热管散热器自然对流换热特性分析与多目标结构优化 [J]. 热科学与技术, 2018, 17(05): 359-365.
- [3] 刘志华, 刘瑞金. 牛顿冷却定律的冷却规律研究 [J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2005, 19(6): 23-27.