

Numerical Study on the Temperature Field of an Oil Electric Heater

Mingtian Niu¹, Lin Cai², Dongmin Liu², Zhenguo Song²

¹Navy Military Delegate Room of Dalian Ship Building Industry Company, Dalian

²China Ship Development and Design Center, Wuhan

Email: cailin03313@163.com

Received: Jun. 6th, 2013; revised: Jun. 14th, 2013; accepted: Jul. 2nd, 2013

Copyright © 2013 Mingtian Niu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper investigates the Fuel-oil Electric Heater (FEH) flow field using CFD method. Both natural convection caused by buoyancy lift and forced convection caused by oil flow have been considered; the effects of equipment arrangement on temperature field distribution have been analysed. The results show that when inlet is located above, the outlet temperature is higher than other cases. At last, the unsteady flow field has also been calculated for preheating process, and the preheating time range and temperature sensors' location have been pointed out.

Keywords: Oil Electric Heater; Nature Convection; Transient Heat Transfer; CFD

燃油电加热器内部温度场数值模拟

牛明田¹, 蔡林², 刘东民², 宋振国²

¹海军驻大连船舶重工集团有限公司军事代表室, 大连

²中国舰船研究设计中心, 武汉

Email: cailin03313@163.com

收稿日期: 2013年6月6日; 修回日期: 2013年6月14日; 录用日期: 2013年7月2日

摘要: 本文利用计算流体力学(CFD)方法对某型燃油加热器进行了数值计算。考虑浮升力作用的自然对流换热及燃油流动带来的强制对流换热, 研究了不同布置方案对燃油加热器内部温度场分布的影响, 结果表明: 当进口在上方时, 出口温度要高于其他工况。最后进行了电加热器非稳态流场的计算, 分析了电加热器静态预热温度场, 给出了电加热器预热的时间范围, 并结合非稳态温度场结果分析了监测点布置方案。

关键词: 燃油电加热器; 自然对流; 非稳态换热; CFD

1. 引言

对燃油进行预测处理可以降低燃油粘度, 增加其流通特性并且减少燃油输送泵的功率, 而且增强燃油的雾化特性^[1,2]。燃油电加热器利用电加热管与燃油之间的热传导将电能转换成燃油的热能, 其换热由隔板与加热管之间的固体直接热传导、浮升力作用产生的自然对流换热以及燃油流动所产生强制对流换热组

成^[3]。电加热器的控制和起停由燃油温度决定, 如果监控点布置不合理会造成加热器局部温度过高, 使得燃油发生烧结并且带来安全隐患, 同时对加热管强度和寿命造成影响。此外, 换热器系统温度的滞后特性往往导致控制决策的失误, 出现响应缓慢、超调过大, 甚至“飞温”现象^[4], 因此需要对换热器内部温度场的分布及非稳态加热过程进行机理分析, 合理布置监控点。

某型电加热器在使用过程中由于监控点布置不合理出现了预热阶段局部超温而不能及时停机现象，而传统的一维设计计算不能完全反应其内部温度分布^[5,6]，并且无法预测流场细节，本文针对加热器内部流场、温度场分布问题进行了三维数值模拟，为加热器的布置和监控点设置提供理论基础。

2. 数学模型及边界条件

燃油电加热器结构示意图如图 1 所示，整个加热器共有 7 块隔板，24 根电加热管，燃油由燃油泵泵入加热器进口，受到隔板的限流阻碍作用，曲折流出加热器，燃油进口温度 20℃，按照出口温度要求在 70℃±5℃。燃油进入加热器后，受到内部隔板的整流作用，燃油绕过隔板并与电加热管发生对流换热，而在低速区域，浮升力产生的自然对流占据主导地位。传热学中衡量自然对流与强制对流相对强弱的判据为浮升力与惯性力的比值^[7]：

$$\frac{g\alpha\Delta T l^3}{\nu^2} \frac{\nu^2}{u^2 l^2} \equiv \frac{Gr}{Re}$$

式中 g 为重力加速度， α 为燃油线膨胀系数， ΔT 为燃油进出口平均温差， u 为燃油在加热器内部平均流速，取 0.01~0.03 m/s， l 为加热器长度，则：

$$\frac{Gr}{Re} = 3.5 \sim 14$$

一般认为， $\frac{Gr}{Re} \geq 0.1$ 时自然对流的影响不能忽略，

而 $\frac{Gr}{Re} \geq 10$ 时强制对流相对于自然对流可以忽略不计，可以看出，本文模拟的电加热器处于自然对流与强制对流混合换热区域。因此对加热器的内部流场模拟必须考虑浮升力作用。本文利用 CFD 软件 FLUENT，求解如下基本方程：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

动量方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

能量方程：

$$\rho \frac{d}{dt} \left(e + \frac{v^2}{2} \right) = \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q \quad (4)$$

式中 ρ 为滑油密度， v 为速度， t 为时间， k 为导热系数， q 为热源， e 为内能， g 为重力加速度， F 为体积力作用项。

本文分别考虑四种布置方案，来论述重力因素对加热器内部流场的影响，如图 2 所示。对换热器流场采用六面体棱柱配合四面体非结构化网格的方案，全场共划分网格约 920,000 网格单元，由于加热管附近温度梯度较大，因此在其壁面处划分边界层，如图 3

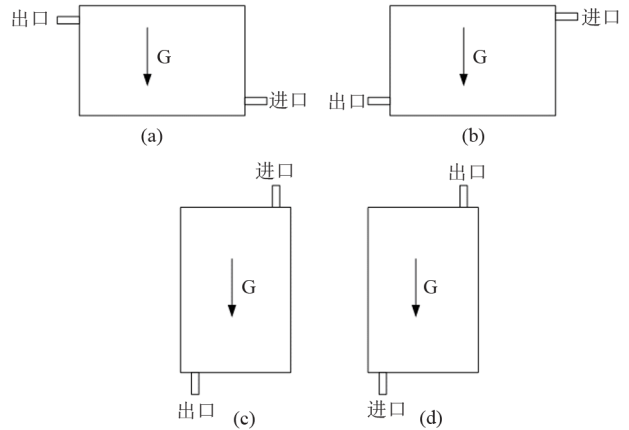


Figure 2. The different arrangement calculated of FEH
图 2. 布置方案示意图

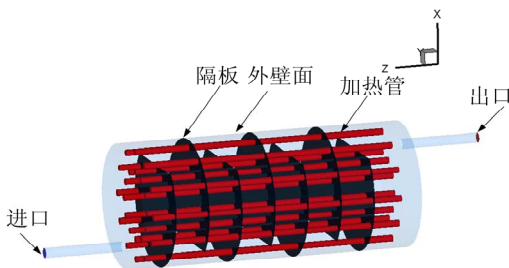


Figure 1. The structure picture of FEH
图 1. 电加热器结构示意图

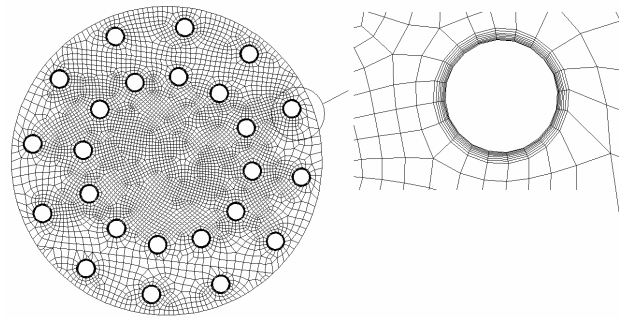


Figure 3. The grid scheme used in this paper
图 3. 电加热器中截面网格图

所示。加热器进口采用质量流量进口，给定进口流量和温度，出口采用压力出口，加热管壁面给定恒定热流密度，外壁面假设绝热，对于隔板采用无厚度“壳”传热模型，即忽略隔板厚度对燃油流动的影响，但是考虑其厚度方向对热传导的影响。本文分别求解描述电加热器流场及温度场的连续方程、动量方程和能量方程，并考虑燃油的粘温特性。在分析布置方案对温度分布等参数影响时，求解稳态流场；在分析加热时间和监测点布置时，求解非稳态流场。

3. 计算结果及分析

3.1. 布置对温度分布的影响

分别考虑四种布置方案，如图 2 所示，A、B 方案为加热器卧式布置，燃油沿加热器本体水平方向进出，C、D 为加热器立式，燃油沿加热器本体方向竖直进出。如图 4、图 5 所示，采用卧室布置时，当进口在下方时(A)，由于燃油流入加热器后，首先要克服重力作用绕过第一道隔板，而当进口在上方时，燃油绕过第一道隔板时流动方向与重力相同，这使得方案 A 相对于 B 在加热器左上角出现了一个相对高温区。采用立式布置时，温度场总体分布相差不大，四种方案的中心线温度分布对比如图 6 所示，可以看出，在第三层隔板至进口之间，四种方案温度分布基本相同，而在第三层隔板以后，温度分布略有差别，其中在同一位置立式方案 C 的温度最高，而卧室方案 B 在最后六层隔板附近温度上升幅度最大。总体上方方案 C 出口温度最高，比方案 A 高 5.3%(图 7)，方案 B 和 C 出口

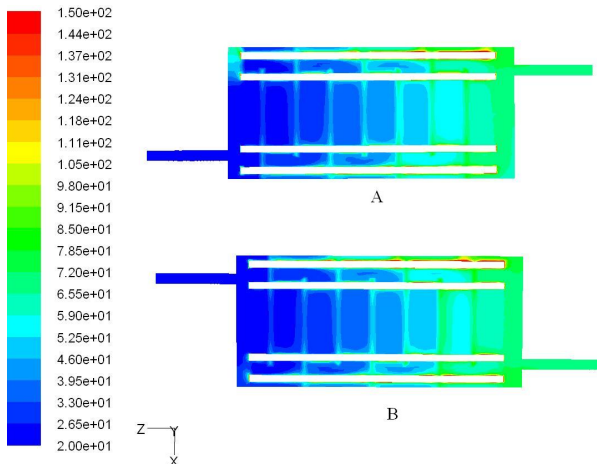


Figure 4. Temperature distribution of typical horizontal type
图 4. 立式结构温度中截面温度分布

温度均满足 $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围，说明该加热器满足设计要求。

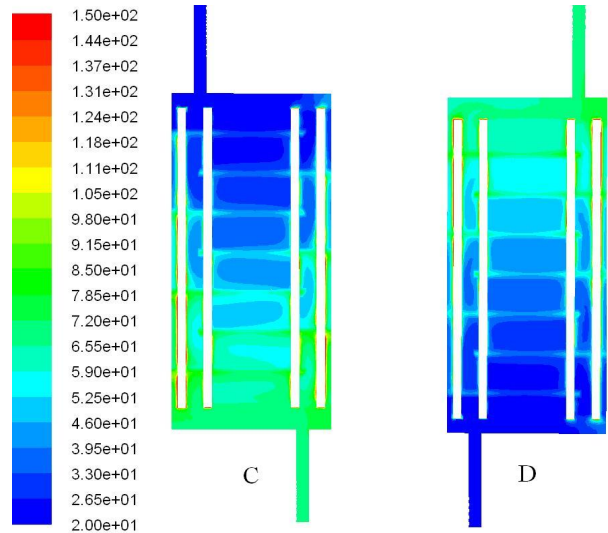


Figure 5. Temperature distribution of typical vertical type
图 5. 卧室结构中截面温度分布

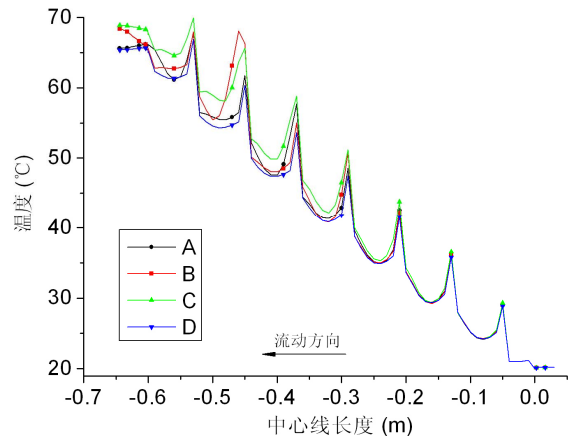


Figure 6. Temperature distribution along the center line
图 6. 中心线燃油温度分布

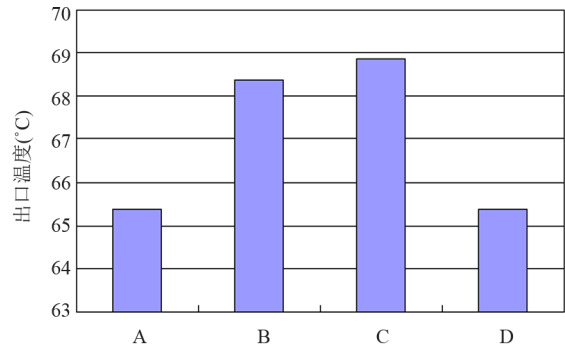


Figure 7. The outlet temperature value of different arrangement
图 7. 不同布置方案燃油出口温度对比

燃油电加热器的隔板起到交叉阻碍燃油流动的作用,使得燃油受热更均匀,在隔板两侧燃油流动方向相反,而且在靠近隔板处速度较低,使得隔板两侧主要以热传导为主,而电加热管的热量会直接传递至隔板中,因此隔板也是一个间接热源,可以起到扩大加热面积和增强加热均匀性的目的。由于隔板与加热管之间的直接热传导,使得图6中在隔板附近出现较大温度梯度。

3.2. 电加热器预热及监控点布置分析

由于加热器在启机时滑油温度较低,为了保证流出的滑油满足要求,需要进行预热,即不开启燃油泵加热燃油,其预热时间是一个重要参数,如果时间过短则燃油达不到规定温度,如果时间过长,则会出现加热器内部局部温度过高造成危险,加热器在预热阶段的内部流场为非稳态传热问题。

以卧式方案为例(重力竖直向下,图8,右侧进口),在加热器内部存在非稳态热传导和浮升力引起的自然对流换热。由于滑油在不同温度下密度不同,在重力作用下,相对高温低密度流体向上流动,相对低温高密度流体向下流动,使得加热器上部分温度高于下部分温度,结合稳态计算结果,选取了三个中截面上典型未知作为监测点,分别是外侧加热管近壁面处,内侧加热管进壁面处,和出口管中心线处某点。图9给出了加热器在启动预热过程中三个监测点温度随时间变化规律。监测点3温度上升最快,其次是监测点2,监测点1温度上升最慢,监测点1是布置在燃

油出口管上的测点,其监测值为燃油出口温度,即直接反映了加热器的工作性能,但是在预热阶段,由于燃油进口流量为0,因此出口管内流速很低,其温度上升十分缓慢,若仅仅依靠监测点1来作为预热控制的测点,则会造成加热器内局部温度过高现象。

假设燃油在加热器内允许的最高温度为 150°C ,由图9可以看出,在电加热器预热燃油阶段,应该以监测点3作为控制信号反馈点,当此处的温度高于 150°C 后,如果不开启燃油泵则应该立即关闭加热电源,当监测点3的温度接近 150°C 时,监测点2的温度约为 80°C ,而监控点1的温度约为 26°C ,以出口监测点1作为预热阶段的控制信号反馈点是不正确的。此外,由图9可以推测出燃油电加热器的预热工作时间,当监控点3达到 150°C 时,时间约为6分钟,此时间即为电加热器的预热时间,当预热监控点3的温度达到 150°C 后,开启燃油泵,燃油逐渐流出出口。由于预热阶段没有燃油流动,此时电加热器内的换热仅为自然对流换热,其特点是加热器下部分温度较高,上部分相温度相对较低(因此将监测点3布置在下加热管近壁面处),水平方向温度分布比较均匀,图10给出了 $t = 480\text{ s}$ 时中心线温度分布,可以看出中心线上各个隔板之间的燃油温度分布基本相同,最高接近 80°C ,并且在隔板附近出现温度梯度。综上所述,可以在电加热器内设置两个监测点,第一个为下部分加热管近壁面处,用来监测预热阶段的温度以及在稳定工作时加热器内部燃油最高温度,第二个监控点设置在出口管内,用来监测燃油出口平均温度。

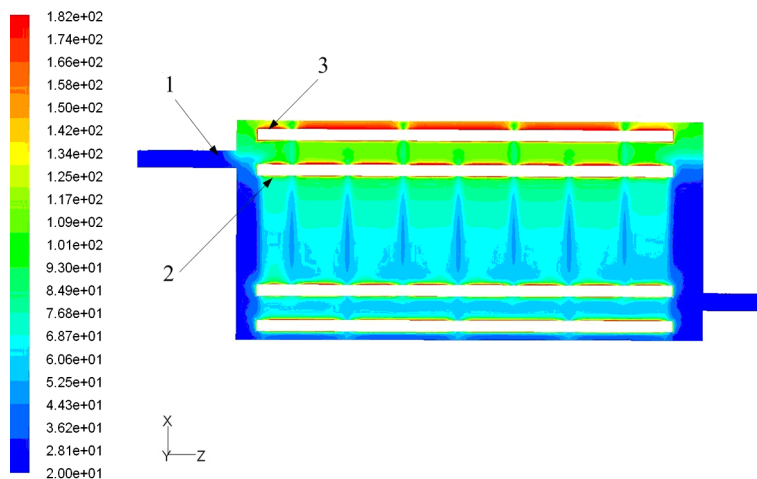


Figure 8. The temperature distribution at $t = 480\text{ s}$ and monitoring points location
图8. 燃油电加热器温度分布($t = 480\text{ s}$)及监测点布置

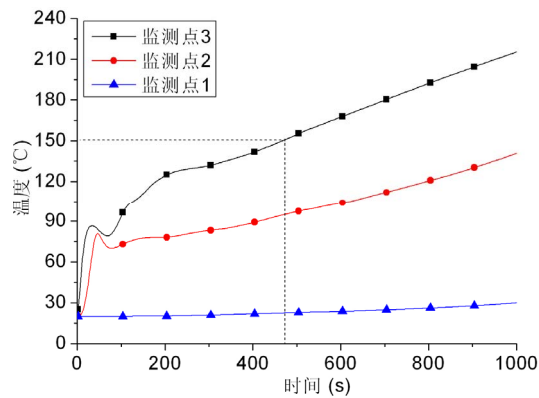


Figure 9. The monitoring points temperature against local time
图 9. 监测点温度随时间变化曲线

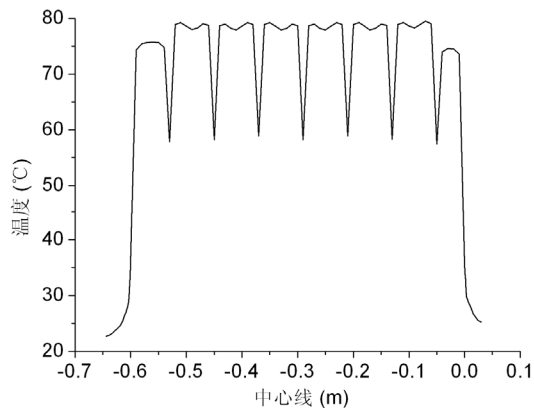


Figure 10. Temperature distribution along the center line at $t = 480$ s
图 10. 中心线燃油温度分布($t = 480$ s)

4. 总结

针对燃油电加热器布置方案及测点布局问题, 本文利用 CFD 方法计算了某型燃油电加热器的内部温

度场, 讨论了布置方案对加热器燃油出口温度的影响, 并分析了预热阶段的非稳态换热流场, 最终给出了加热器预热时间范围及监控点布置方案, 具体总结如下:

1) 当电加热器进口在上方时, 出口温度要高于进口布置在下方, 对于本文模拟的电加热器, 温度约高 5.3%。

2) 换热器内部应该具有两个温度信号反馈点, 第一个位于下方加热管近壁面处, 用来监测燃油最高温度并控制预热时间; 第二个位于燃油加热器出口, 用来判断燃油电加热器工作性能。

3) 对于本文模拟的燃油电加热器, 预热时间应小于 6 分钟。

参考文献 (References)

- [1] 穆勇, 郑洪涛. 增压锅炉烟气发生器燃烧流场与污染排放数值分析[J]. 机械设计与制造, 2010, 3: 190-192.
- [2] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [4] 平洋, 罗雄麟. 电加热器温度仿人智能多模型控制[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(8): 30-33.
- [5] D. Sahray, H. Shmueli, G. Ziskind and R. Letan. Study and optimization of horizontal-base pin-fin heat sinks in natural convection and radiation. Journal of Heat Transfer, 2012, 132(1): 1-11.
- [6] A. Trombe, A. Suleiman and Y. Le Mao. Use of an inverse method to determine natural convection heat transfer coefficients in unsteady state. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(6): 1017-1025.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.