

面的速度均匀性系数达到 0.9 以上的设计目标；同时控制中冷器前进气箱的压力损失处于较低的水平。

1 1D 热力学模型

中冷器瞬态流动 CFD 计算所需的边界条件由 1D 热力学模型提供。采用 AVL BOOST 软件搭建的某船用 16V 柴油机的 1D 热力学模型如图 1 所示。该柴油机配置 2 个废气涡轮增压器，共用一个中冷器，采用相继增压技术改善低负荷性能；燃油系统为高压共轨燃油喷射系统。

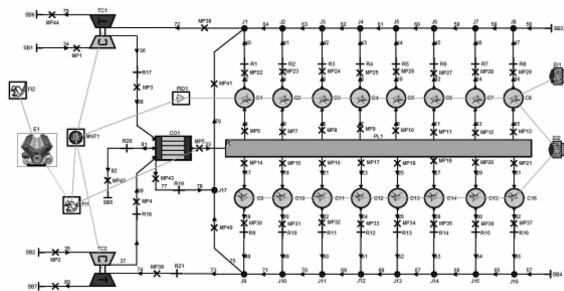


图 1 柴油机 1D 热力学模型

该柴油机 1D 热力学模型的燃烧模型采用台架测试得到的燃烧放热率曲线；传热模型采用 Woschni 模型；涡轮增压器采用 Full Model 计算模式；计算工况选择进气流量最大的点，即 100% 负荷，1 066 (r · min⁻¹)。

2 中冷器流场结构模型

中冷器的内部流场结构模型如图 2 所示。压气机出口的高温气体通过 2 根进气管汇入前进气箱，经中冷器冷却后进入后进气箱。后进气箱直接和 A 列、B 列各缸的进气道入口相连，新鲜气体最终直接流入各个气缸。

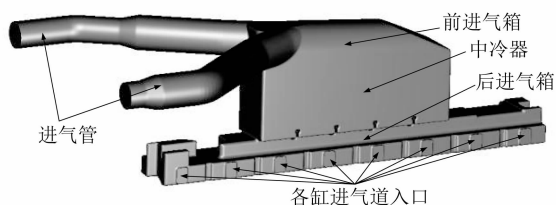


图 2 中冷器流场结构模型

3 中冷器瞬态流动 CFD 仿真

3.1 中冷器 CFD 计算模型

中冷器的 CFD 计算模型如图 3 所示。采用 AVL FIRE 软件对中冷器流场结构的计算网格进行划分，采用混合网格类型，其中 97% 为六面体网

格。最大网格尺寸为 8 mm，设置 2 层等厚度边界层，每一层厚度为 0.8 mm。为了提高计算的收敛性，将各个进气道入口的面向外拉伸 320 mm。最终网格总数约为 414 万。

采用完全结构化网格模拟中冷器，并设置这部分网格为多孔介质，孔径为 5 mm，模拟中冷器所造成的压力损失及冷却效果。

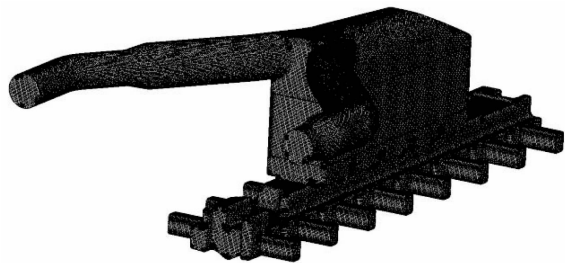


图 3 中冷器 CFD 计算模型

3.2 计算边界条件

采用 AVL FIRE 软件进行中冷器瞬态流动 CFD 分析，中冷器进口及出口边界条件定义的位置如图 4 所示。

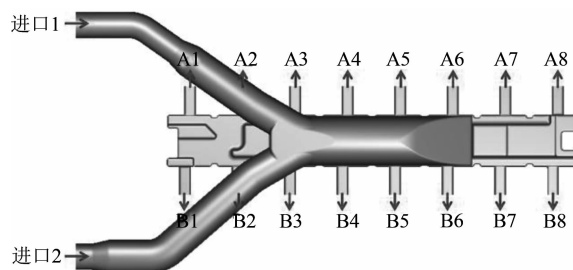


图 4 边界条件定义示意图

通过 1D 热力学模型输出中冷器瞬态流动计算所需的边界条件，其中进口为质量流量、温度边界，出口为静压边界，各个壁面设置温度边界。中冷器进口及出口的边界条件曲线如图 5 ~ 图 7 所示。

中冷器前进气箱壁面温度设置为 225 °C，中冷器后进气箱壁面温度设置为 45 °C。

3.3 中冷器压损及传热特性标定

在进行中冷器瞬态流动 CFD 计算之前，须采用稳态 CFD 计算对中冷器多孔介质的压损及传热模型进行标定。其中，采用 Forcheimer 模型计算中冷器体的压降^[2]：

$$\frac{dp}{dx} = -\alpha\mu v - \zeta \frac{\rho}{2} v^2 \quad (1)$$

式中： $\frac{dp}{dx}$ 为沿多孔介质厚度方向的压损，(N · m⁻³)； α 为黏性损失系数，(1 · m⁻²)； μ 为气体黏度，

$((\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-2})$; v 为气体速度, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; ζ 为惯性损失系数, $(\text{l} \cdot \text{m}^{-1})$; ρ 为流体密度; $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

中冷器换热量的计算公式为:

$$\Delta Q_{\text{CAC}} = h_v V (T - T_{\text{coolant}}) \quad (2)$$

式中: h_v 为中冷器的换热系数, $(\text{W} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{K})^{-1})$; V 为多孔介质的容积, m^3 ; T 为气体的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{coolant} 为冷却介质的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

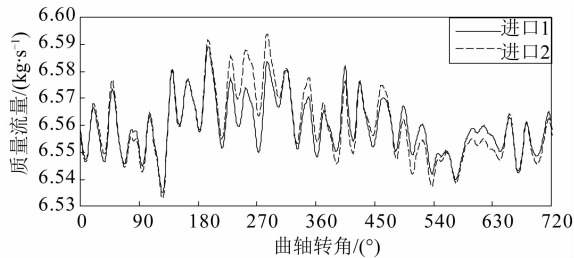


图5 中冷器进口质量流量

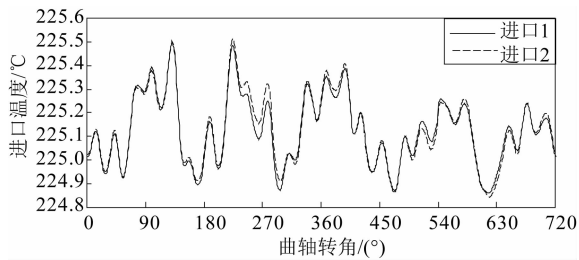


图6 中冷器进口温度

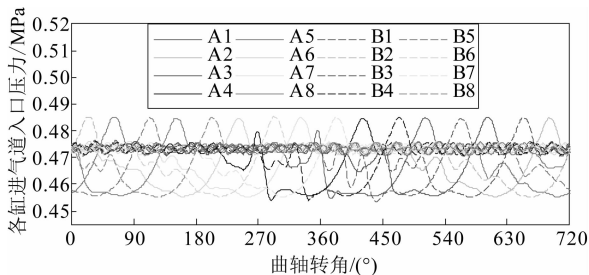


图7 中冷器各出口压力

进行中冷器压损及传热标定时, 计算域为多孔介质这部分网格, 并在多孔介质的入口设置均匀分布的流量及温度边界 (瞬态曲线的循环平均值); 在多孔介质出口设置静压边界 (瞬态曲线的循环平均值)。模型标定好后最终的计算结果如图8、图9所示, 中冷器进出口压差为2.5 kPa, 中冷器出口温度为45 $^{\circ}\text{C}$, 和设计值相同。

3.4 中冷器瞬态流动速度均匀性分析

根据中冷器的进出口瞬态边界条件以及标定好的多孔介质压损及传热模型, 进行中冷器瞬态流动CFD计算。计算多个发动机工作循环, 直到循环间变动小于3%; 计算步长为1 $^{\circ}\text{CA}$ 。

中冷器的流动均匀性用中冷器入口截面的速度均匀性系数 γ 来评价^[3]。该评价指标是 Weltens^[1]等建立的一种流场速度均匀性评价标准, 基于统计偏差定义, 能够反映通流截面的流体速度分布特性。 γ 的数值在0~1之间, $\gamma=0$ 表示流体仅从一个测点通过; $\gamma=1$ 表示最理想的流动情况, 即截面的速度完全均匀分布^[4]。 γ 的计算公式如下:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum \frac{\sqrt{(v_{\text{local}} - v_{\text{mean}})^2}}{v_{\text{mean}}} \quad (3)$$

式中: γ 为速度均匀性系数; n 为入口截面单元个数; v_{mean} 为入口截面平均速度, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; v_{local} 为入口截面各单元平均速度, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

在模拟中冷器的多孔介质内部时, 速度方向均沿多孔介质的厚度方向, 流动为层流, 如图10所示。速度均匀性系数可以用来评价中冷器入口截面的流量分布均匀性。

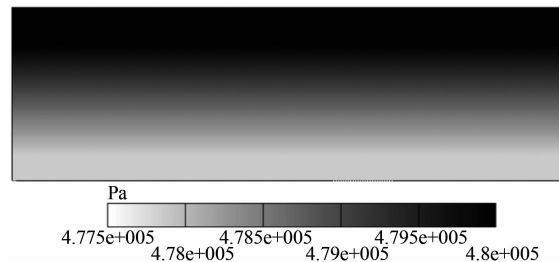


图8 中冷器压力分布云图

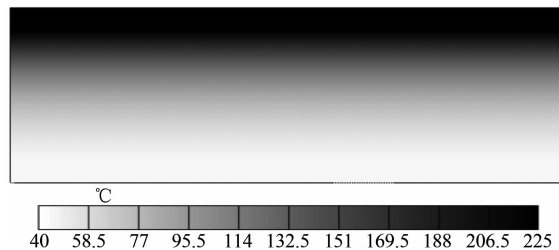


图9 中冷器温度场分布云图

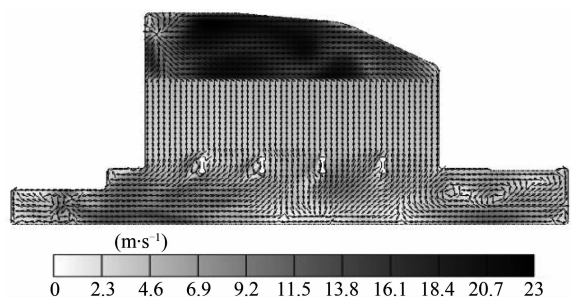


图10 中冷器内部速度场分布

多孔介质第一层网格的截面输出速度均匀性系数如图11所示。速度均匀性系数的最小值为0.883 (设计目标值为0.9), 出现在1650 $^{\circ}\text{CA}$, 循环平均值为0.942, 不完全满足设计目标的要求。

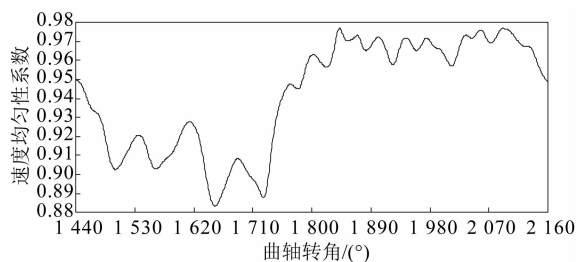


图 11 中冷器入口速度均匀性系数

在 1 650 °CA，中冷器内部截面的速度分布云图如图 12 所示。从速度分布云图可知：由于当前时刻 A6、B6、A7 和 B7 各缸均处于进气过程，从 2 根进气管进入的气流较大量地流入前进气箱的后端，使得中冷器后部的速度值较大，即通过中冷器后部的空气流量较大，截面的速度均匀性较差。

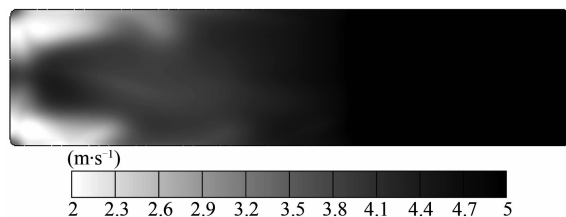


图 12 中冷器内部截面速度分布云图

3.5 中冷器前进气箱结构优化

根据前面 CFD 计算结果分析可知：在某些曲轴转角，由于大量的气流流入中冷器的后端，中冷器前端入口截面的流量就较小，从而造成中冷器入口截面的速度均匀性系数小于 0.9 的设计目标。因此，改进设计方案在前进气箱中添加了一道导流板，引导部分气流进入中冷器的前部区域，如图 13 所示。图中的两条白线分别代表中冷器的入口和出口截面。改进方案一的导流板的上沿处于前进气箱的轴线位置，导流板的下沿处于中冷器的前后中心位置；改进方案二相比方案一将导流板的位置向左平移了约 200 mm。

3.6 计算结果对比

3.6.1 中冷器速度均匀性对比

原方案、改进方案一和改进方案二中冷器入口的速度均匀性系数对比如图 14 所示。改进方案一速度均匀性系数最小值为 0.906，循环平均值为 0.95；改进方案二速度均匀性系数最小值为 0.898，循环平均值为 0.947。改进方案一在一个工作循环内中冷器入口的速度均匀性都达到 0.9 以上，完全满足设计目标的要求。

3.6.2 前进气管及进气箱压损对比

原方案及改进方案前进气管及进气箱的压损曲线如图 15 所示。其中，原方案与改进方案一、

二，进口 1 与中冷器入口间压损的循环平均值分别为 730、788、776 Pa；原方案与改进方案一、二进口 2 与中冷器入口间压损的循环平均值分别为 544、604、599 Pa。改进方案一在前进气箱添加导流板后，前进气箱的压损相对原方案增加了 60 Pa 左右，但增加的量较小，经过 1D 模型计算评估，对整机的性能影响可以忽略。

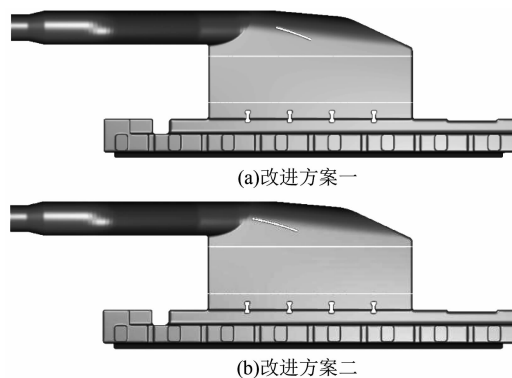


图 13 前进气箱导流板设计方案

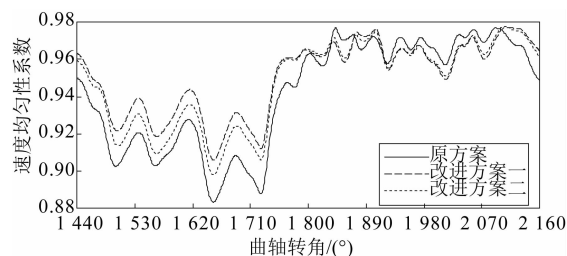


图 14 中冷器入口速度均匀性系数对比

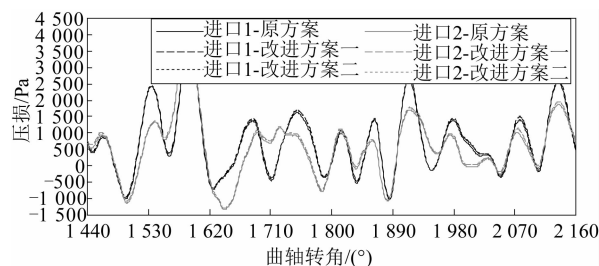


图 15 前进气管及进气箱压损

3.6.3 中冷器出口温度对比

原方案和改进方案中冷器出口截面面平均温度曲线对比如图 16 所示。3 个方案的循环平均值均为 45.6 °C，但改进方案一在一个循环内的温度分布更加均匀。

3.6.4 中冷器内部截面速度分布云图对比

改进方案一在速度均匀性最差时刻 (1 650 °CA) 内部流场分布及截面速度分布如图 17 所示。由于 2 根进气管中的气流在前进气箱中相撞，造成中冷器的左上角和左下角的气流速度较小，即此处的气流流量较小。

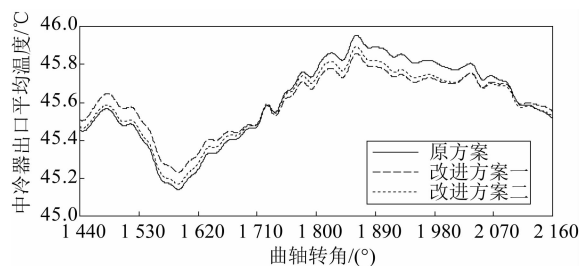


图 16 中冷器出口温度对比

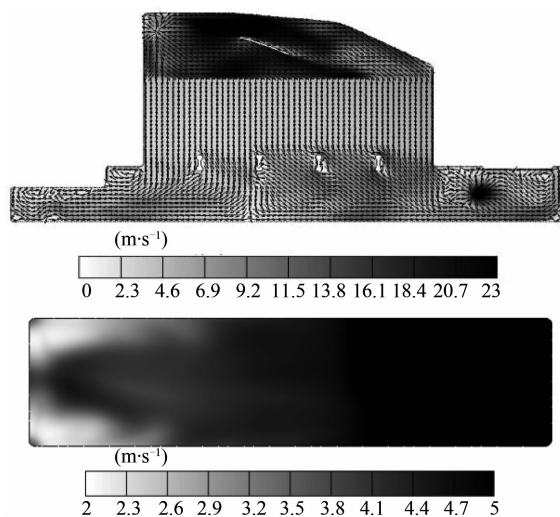


图 17 中冷器内部截面速度分布云图

4 结 论

基于瞬态 CFD 计算, 以速度均匀性系数和压损为评价指标, 对某船用柴油机的中冷器流动均匀性进行了分析与评价。基于对中冷器基本方案的分析结果, 提出了两种前进气箱导流板设计方案。经瞬态 CFD 计算评估: 改进方案一中冷器入口截面速度均匀性系数在一个工作循环内均大于 0.9, 且进气压损仍处于较低水平, 满足设计要求。

参考文献

- [1] WELTENS H, BRESSLER H, TERRES F, et al. Optimization of catalytic converters gas flow distribution by CFD prediction. SAE Technical Paper, 1993, 930780.
- [2] 闫斌. 车用柴油机相继增压系统研究及中冷器流场计算 [D]. 大连: 大连交通大学, 2009.
- [3] 陶红歌, 陈焕新, 谢军龙, 等. 基于面积加权平均速度和质量加权平均速度的流动均匀性指标探讨 [J]. 化工学报, 2010 (S2): 116-120.
- [4] WU G J, TAN S. CFD simulation of the effect of upstream flow distribution on the light-off performance of a catalyst converter [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 2010-2031.
- [5] CHENG M, LIU G R. Approach for improving airflow uniformity in unidirectional flow cleanrooms [J]. Building and Environment, 1999, 34: 275-284.

(上接第 14 页)

参考文献

- [1] 朱军, 杨建国, 孙波, 等. 监测柴油机主轴承磨损状态的热电法试验研究 [J]. 内燃机工程, 2014, 35 (4): 79-84.
- [2] 孙波. 热电监测柴油机主轴承磨损状态的计算与试验 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [3] CSSC Anqing Marine Diesel Engine Plant. Anqing-Daihatsu Diesel Engine [R]. 2010.
- [4] 杨建国, 朱军, 余永华. 船用柴油机滑动主轴承磨损监测装置及方法: 201210276727.3 [P]. 2015-04-08.
- [5] 满一新. 轮机工程材料 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2008.