

结构与可靠性

活塞组件接触分析流程自动化及接触面设计研究

董超¹, 巫立民³, 王 一¹, 李 梅³, 李 佳³, 崔 毅^{1,2}(1. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240; 3. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 基于活塞销与活塞销座表面型线几何型线及刚度的差异, 在热载荷与机械载荷的作用下发生不协调形变, 产生较大的局部接触应力, 采用有限元法对某型船用柴油机活塞销孔结合面型线进行优化设计。通过对原活塞模型进行分析并与静载试验结果对比, 找出应力集中位置; 采用有限元软件和自行开发程序, 实现活塞销-孔接触副型面的自动优化设计; 最终从优化结果中选取最佳优化方案。优化后, 活塞销孔型面应力集中显著降低, 接触型面上最大 Mises 应力下降 55.5%。

关键词: 船用柴油机; 活塞组件; 型线; 应力集中

中图分类号: TK423.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)03-0015-05

Automation of Contact Analysis Process and Research on Design of
Contact Surfaces in Piston ComponentsDong Chao¹, Wu Limin³, Wang Yi¹, Li Mei³, Li Jia³, Cui Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240; 3. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Due to the differences of the geometric profile and stiffness between the piston pin and the piston pin seat surface, there will be uncoordinated deformation under the action of thermal and mechanical load, which might produce high local contact stress. To solve this problem, FEA method was used to carry out optimum design on the piston pin-hole contact surface profile of a marine diesel engine. The original piston model was analyzed, and the results were compared with the static load test to find out the stress concentration position. By using commercial finite element software and the self-developed program, the automatic optimization design of the contact surface profile of piston pin-hole was realized. The best optimal scheme was selected based on the optimization results. After optimization, the stress at the contact surface of piston pin-hole was reduced remarkably, and the biggest Mises stress was reduced by 55.5%.

Key words: marine diesel engine; piston component; profile; stress concentration

0 引 言

柴油机因其效率高、功率相对较大等一系列优点, 成为应用最为广泛的动力装置之一^[1]。柴油机活塞销与销孔接触副是活塞运动副中的一对重要接触副, 由于活塞销与活塞销座表面几何型线以及

刚度的差异, 在热载荷与机械载荷的共同作用下, 会发生不协调形变, 产生较大的局部接触应力^[2-5], 降低活塞组件的运行寿命。

销孔结合面型线一般采用椭圆形、锥形、双侧圆锥形等^[5,8]。其中, 锥形异形销孔结构简单且容易加工, 对活塞销孔棱缘的应力均匀分布改善效果

收稿日期: 2016-10-11

作者简介: 董超(1990-), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机结构设计与优化, E-mail: dclwh007@163.com。

比较显著, 活塞承载能力可以提高 20% ~ 30%, 是现阶段活塞异形销孔中较多采用的结构^[9]。

目前, 有限元软件如 ANSYS、ABAQUS 等已得到广泛应用, 并且已成为辅助设计的重要工具。但现阶段的设计过程仍然是: CAD 设计-CAE 分析-CAD 设计调整-CAE 再分析-CAD 再调整……整个设计过程低效、反复循环而且处处需要人工干预, 不能实现自动化, 导致研制费用上升, 设计效率与效果低下, 难以满足产品快速投入使用、产生效益的要求^[6-7]。

本文结合商用有限元软件, 自主开发了型面及网格自动修改、运行流程控制程序, 以实现活塞销与销座接触副参数化自动几何造型设计, 有限元网格自动化生成及型线自动优化等功能; 并采用曲率连续的多项式型面减小活塞销与销座接触副应力, 提高其运行寿命。

1 原活塞组件设计方案的有限元计算及试验验证

1.1 模型的网格划分及条件设置

考虑到活塞模型具有对称性, 且连杆大头对活塞销与活塞销孔的接触问题影响较为有限, 本文采用活塞的四分之一模型予以分析, 并将连杆大头截断。考虑到模型几何形状较为复杂, 采用修正的四面体二次单元, 这样可以较为准确地针对曲面进行单元划分, 提高分析精度。

根据试验模型和加载情况, 计算模型的边界及载荷设置如图 1 所示。其中, 边界条件包括: 模型关于 X-Y 平面对称, 模型关于 Y-Z 平面对称, 以及连杆切割面在 Y 方向位移约束。载荷条件包括: 在活塞顶静力加载, 以及连接活塞顶与活塞裙的螺栓上的预紧力。

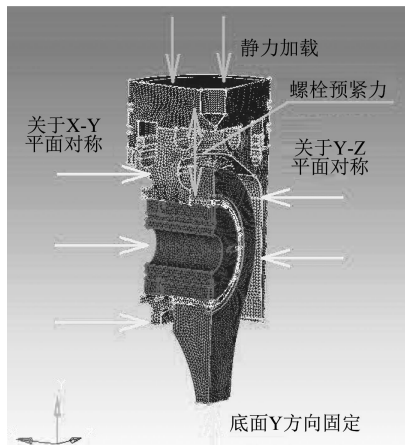


图1 原模型边界条件及载荷设置

接触设置时, 除将螺纹面、连杆衬垫与连杆小头之间设置为面面绑定约束外, 其余所有互相接触的面全部设为小滑移面接触, 并设置摩擦系数。

1.2 原模型试验结果与计算结果对比

试验台上的冷加载试验的测点位置及应变片粘贴方向如图 2 所示。

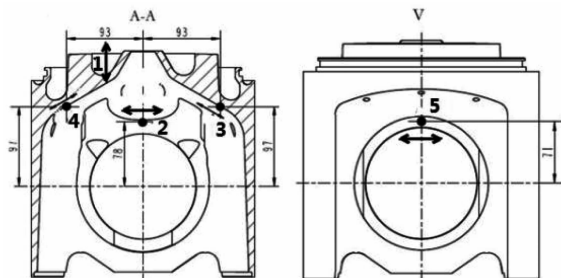


图2 试验台冷加载应变片测点分布

由于在有限元分析中仅取四分之一模型进行分析, 所以取距离优化区域较近的测点 2、测点 3 与测点 5 进行验证比较。所取测点的应变情况如图 3、图 4 所示。

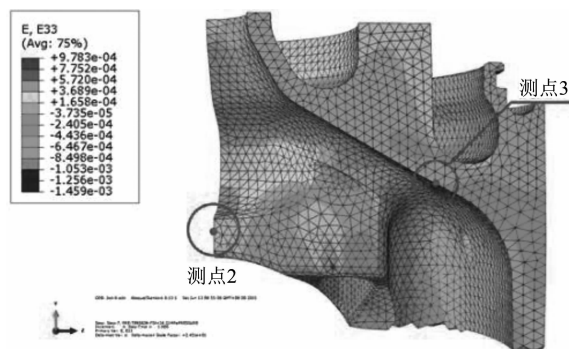


图3 测点2、3有限元应变分析结果

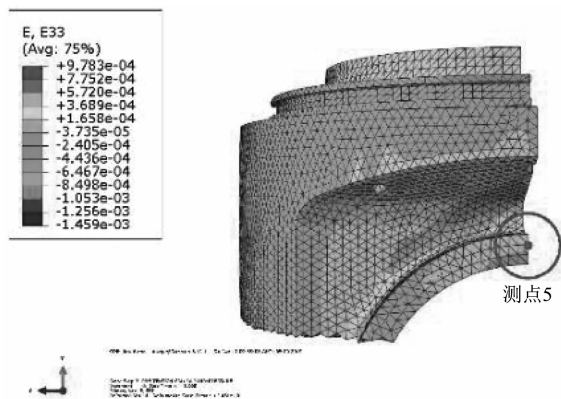


图4 测点5有限元应变分析结果

测点处沿应变片贴片方向上的应变及与计算值的对比如表 1 所示。通过表 1 可以看出: 在距离活塞裙上活塞销孔较近的测点 2、3、5 处, 沿贴片方向上的实测应变值大小与计算应变值大小相差较

小。表明: 针对试验模型的简化处理、边界条件设置、加载条件设置与接触条件设置较为合理, 可以作为后续型面改进设计模型的对比基础。

表1 试验与有限元计算对比

测点	2	3	5
实测应变	3.03E-4	-2.48E-4	3.27E-4
计算应变	3.25E-4	-2.58E-4	3.09E-4
误差	6.77%	4.03%	5.50%

图5为销孔接触面顶部接触线沿销孔轴向 Mises 应力的变化规律。如图5所示, 在活塞销孔接触面上, 应力集中现象发生在活塞销孔接触面前端, 最大应力达 473 MPa, 比第二高应力值大 100 MPa 左右, 存在较为严重的应力集中现象。该应力集中的位置在几何上为原活塞销孔的锥形型面与圆柱型面的交界处。该交界处存在尖锐边缘, 在活塞销受载时较易发生应力集中现象。在型线的改进设计中应着重注意该处的型线设计, 使型面与圆柱面交界处平滑过渡, 并保持曲率连续, 以降低应力集中现象。

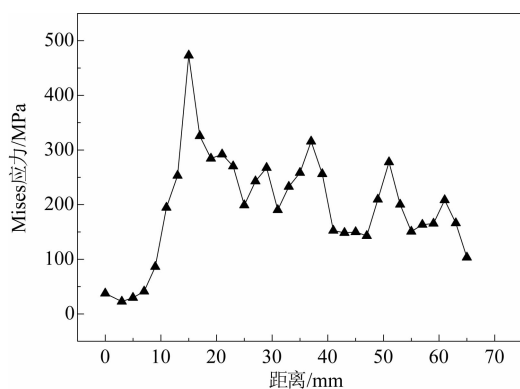


图5 原模型活塞销接触表面应力

2 活塞销座接触面型线设计

目前活塞销接触副设计一般采用锥形、椭圆形等传统异形销孔。这些销孔在制造上相对比较容易, 但是不能保证在型面与圆柱面相接触处曲率连续, 会造成曲率突变处应力集中。本文采用高次曲线作为型面设计的型线方程, 并通过公式推导, 得到型面与销孔圆柱面相接触处曲率连续的高阶方程。考虑到制造问题, 本文中的高阶方程的最高次数可取 4、5、6 阶。活塞销孔型线示意如图6所示。

如图6所示, 型线的曲线部分与型线的直线部分交点处易形成曲率不连续, 导致曲率突变点, 即 B 点, 产生应力集中。本文中, 活塞销孔型线采用高阶函数曲线:

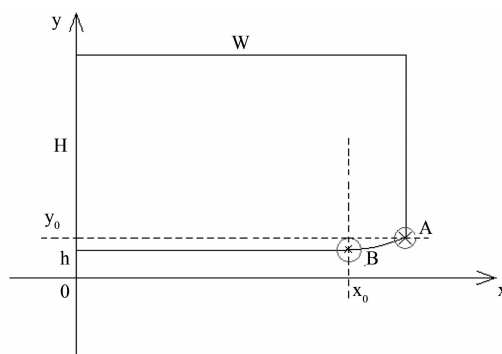


图6 活塞销孔型线示意图

$$y = ax^n + bx^{(n-1)} + cx^{(n-2)} \quad (1)$$

为使 B 点处曲率连续, 设 B 点 (x_0, h) 曲率为零:

$$k = \left| \frac{y''}{[1 + (y')^2]^{\frac{3}{2}}} \right| = 0 \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中: h 为自设常数, 与零件回转半径有关; a 为高阶函数的最高次项系数, 作为设计变量; n 为高阶函数的最高次, 用户自设, 为常量。

由式 (2) 得到参数 b 、 c 关于 a 的表达式:

$$\begin{cases} b = -\frac{2an}{(n-1)}x_0 \\ c = \frac{an}{(n-2)}x_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

点 A (w, y_0) 与点 B (x_0, h) 的未知坐标 x_0 与 y_0 表达式为:

$$\begin{cases} x_0 = \sqrt[n]{\frac{h(n-1)(n-2)}{2a}} \\ y_0 = a(w)^n - \frac{2an}{(n-1)}(w)^{(n-1)} \\ \quad \cdot \sqrt[n]{\frac{h(n-1)(n-2)}{2a}} + \frac{an}{(n-2)}(w)^{(n-2)} \\ \quad \cdot \sqrt[n]{\frac{h(n-1)(n-2)}{2a}} \end{cases} \quad (4)$$

为了自动生成如式 (1) 的高阶函数型面, 须采用样条曲线。按照式 (5) 生成样条曲线的特征点。

$$\begin{cases} x_i = x_0 + \frac{i}{100}(w - x_0) \\ y_i = a(w)^n + \frac{2an}{(n-1)}(w)^{(n-1)}x_i \quad (i = 1, \dots, 100) \\ \quad + \frac{an}{(n-2)}(w)^{(n-2)}x_i^2 \end{cases} \quad (5)$$

用程序生成特征点, 并使用样条曲线连接这些特征点, 经回转处理, 即可得到销孔处的型面。图7所示为程序生成的高次曲线型面。

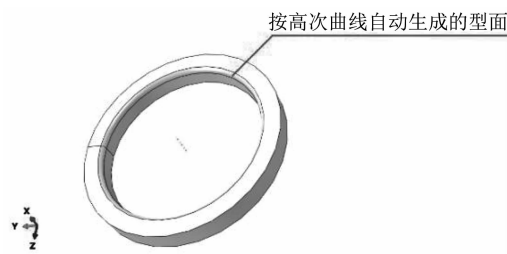


图 7 活塞销孔接触部分生成图

3 型面优化程序设计

优化程序基于 Python 语言设计, 在 ABAQUS 平台下运行^[10]。设计思路如图 8 所示。

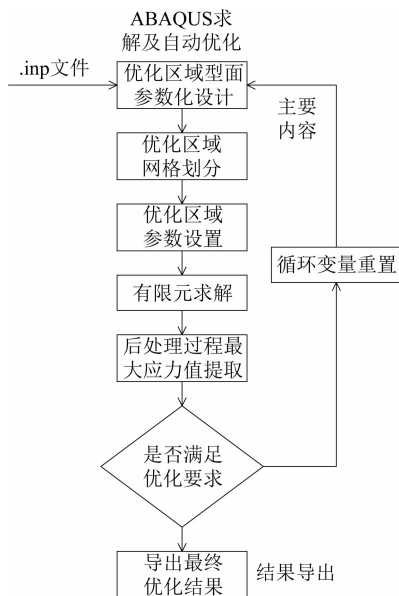


图 8 程序设计思路

如图 8, 本文在程序编写中, 首先将形体较为复杂的非自动优化区域在其他实体造型与有限元前处理软件中进行前处理, 然后将处理结果生成 ABAQUS 计算的输入文件 (.inp 文件) 并导入程序中。此处的非自动优化区域与自动优化区域的划分依据是: 销孔上应力集中区域为自动优化区域, 装配体上其余部分为非自动优化区域, 如图 9 所示。

在程序中使用 Python 语言编写循环, 在每一次循环过程中自动生成自动优化区域的实体, 并自动进行相同密度的网格划分, 同等条件赋值等工作, 最后将其与活塞裙上非自动优化区域绑定。由于除型面几何形状有区别之外, 其余分析条件完全相同, 故经有限元计算分析得到的活塞销孔接触面上应力分布差异的原因即为活塞销孔型面的几何形状变化。

在每一循环中, 程序会自动对经过计算得到的结果文件进行后处理, 提取型面上的最大应力值,

并将该应力值与上一循环过程的应力值进行比较, 决定下一循环中的优化变量 α 的赋值情况。这样, 通过这个连续不断的计算过程, 即可最终达到最优的型面几何优化方案。

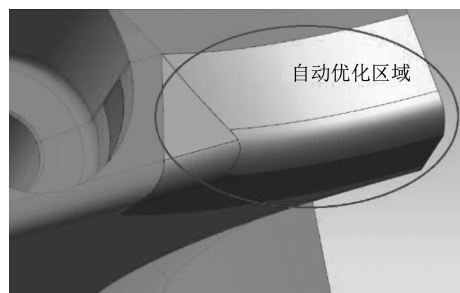


图 9 自动优化区域示意图

4 活塞销孔型面自动优化结果分析

4.1 自动优化结果提取

运用型面优化程序计算的结果如图 10 所示; 提取位置如图 11 高亮框内粗线标注所示。以节点距离销孔端面在 X 方向上的投影距离为横坐标, Mises 应力值为纵坐标。

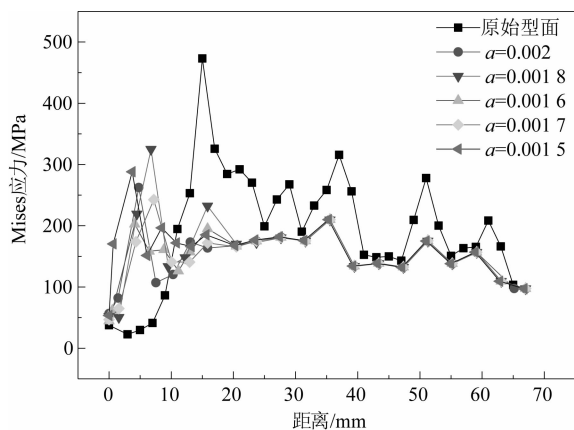


图 10 不同参数下活塞销面上应力分布对比

可以看出, 所有经过修改的型面上的应力集中位置与原型面上的应力集中位置相近; 并且在该区域处的最大应力均远远小于原接触面上的应力。观察优化后的型面上的应力分布, 可以发现: 最大应力位置上的应力大小与型面上其余区域上的应力大小相近, 说明通过型面的优化可以有效减小应力集中现象。

4.2 自动优化结果分析

将修改后的活塞销孔型面与修改前的原活塞销孔型面进行对比。原型面为锥型面, 在该锥形面与活塞销孔的圆柱型面的交线处存在尖锐边缘, 并且曲率、斜率均不连续, 该交线在距离端面 15 mm 的地方。如图 10 所示, 在该处存在明显的应力集

中现象。

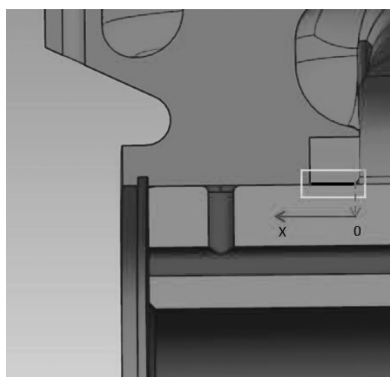


图 11 应力结果提取位置

对比修改前的接触型面, 可以发现: 优化后的型面应力集中现象得到了很大改善。如图 10 所示, 修改后的型线应力最大处均集中在 5 mm 左右, 该处恰好是高次曲线与圆柱面的交线处。而该处的应力要远远小于原型面上的最大应力, 同时, 其余接触面上应力相差也较小, 表明应力分布相对较为平均。这说明通过改善型线及解决曲率连续问题来降低应力集中的做法是有成效的。

为了进一步减小销孔结合面的应力集中, 对销孔型面进行了优化设计, 优化变量为型线参数 a , 优化目标为接触面最大应力。优化计算过程及计算结果见表 2。

表 2 应力最大值对比表

计算顺序	循环变量 a/mm	最大应力值/MPa	降低幅度
0	原型面	473	—
1	0.001 5	288.07	39.1%
2	0.002 0	262.41	44.5%
3	0.001 6	210.14	55.5%
4	0.001 8	324.78	31.3%
5	0.001 7	242.44	48.7%

由表 2 可以明显看出: 相较于原活塞孔型面上的最大应力值, 优化的设计方案其 Mises 应力的最大值降低幅度为 55.5%, 说明采用高阶曲线方程作为活塞销面的型线优化方程是切实有效的。

5 结 论

(1) 建立活塞接触分析模型, 并通过试验验

证, 计算获得销孔结合面的应力集中区域。

(2) 用 n 阶高次型面曲线表示销孔型面, 得到销孔型面与销孔圆柱面相接触曲率连续的型线表达式, 可显著降低结合面应力集中现象。

(3) 结合 ABAQUS 平台, 自行开发型面优化设计程序, 实现初始参数修改、自动实体生成、自动有限元前处理、自动后处理与设计参数自动优化等功能, 提高了设计效率。

(4) 通过自动优化, 活塞销孔型面上的应力集中现象显著降低, 接触型面上最大 Mises 应力下降 55.5%。

参考文献

- [1] 袁兆成. 内燃机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] FLORES P. Modeling and simulation of wear in revolute clearance joints in multibody systems [J]. Mechanism and machine theory, 2009, 44 (6): 1211-1222.
- [3] 杨英, 康建明, 周湘晔, 等. 240/275 系列柴油机新结构钢顶铝裙活塞的研制 [J]. 内燃机工程, 2005, 26 (5): 66-68.
- [4] 白峭峰, 樊文欣, 梁海龙, 等. 发动机活塞销孔结构强度分析及改善对策研究 [J]. 机械制造与自动化, 2012, 41 (1): 38-42.
- [5] 赵斌. 采用异形活塞销孔解决大型组合活塞裙部裂损问题的探讨 [J]. 内燃机, 2004 (4): 14-16.
- [6] 梁刚, 陈志忠, 杨志祥. 中速大功率柴油机活塞设计技术的新发展 [J]. 柴油机, 2007, 29 (2): 36-40.
- [7] 刘子强, 冯明志, 李丽婷, 等. 数字化设计技术在船用柴油机设计中的应用 [J]. 柴油机, 2007, 28 (6): 8-10.
- [8] 刘畅, 张卫正, 刘雨薇. 高强度柴油机活塞异型销孔结构设计与试验研究 [J]. 车用发动机, 2011 (5): 18-23.
- [9] BARKEY M E, SOCIE D F, HSIA K J. A yield surface approach to the estimation of notch strains for proportional and nonproportional cyclic loading [J]. Journal of engineering materials and technology, 1994, 116 (2): 173-180.
- [10] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

结构与可靠性

基于 CFD 仿真的柴油机中冷器流动均匀性优化

马天帅¹, 毛金龙², 张文正², 平 涛²

(1. 海军装备部装备采购中心, 北京 100036; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 基于某船用柴油机 1D 热力学模型提供的计算边界条件, 采用 3D CFD 对该柴油机匹配的中冷器的瞬态流动及换热过程进行仿真模拟, 计算分析中冷器入口截面的速度均匀性以及前进气箱压力损失。结果表明: 中冷器入口截面的速度均匀性系数未完全达到设计目标。对中冷器前进气箱的结构进行优化设计, 优化后的中冷器入口截面的速度均匀性系数有所提高, 满足设计要求, 同时中冷器前进气箱的压力损失处于较低水平。

关键词: 中冷器; 结构; 速度均匀性系数; CFD; 压力损失

中图分类号: TK423.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)03-0020-05

Optimization of Charge Air Cooler Flow Uniformity of Diesel Engine
Based on CFD SimulationMa Tianshuai¹, Mao Jinlong², Zhang Wenzheng², Ping Tao²

(1. Equipment Purchasing Center, Naval Equipment Department, Beijing 100036;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: With the boundary conditions calculated with a marine diesel engine 1D thermodynamic model, the transient flow and heat exchange process of the charge air cooler matching the diesel engine was simulated with 3D CFD calculation. The velocity uniformity of the inlet section and the pressure loss of the inlet plenum were calculated. The results showed that the velocity uniformity coefficient at the inlet section of the charge air cooler had not reached the design objective. Based on the calculated results, the structure of the inlet plenum of the charge air cooler was optimized, which improved the velocity uniformity coefficient at the inlet section of the charge air cooler and met with the design requirements, and kept the pressure loss of the inlet plenum at low value as well.

Key words: charge air cooler; structure; velocity uniformity coefficient; CFD; pressure loss

0 引 言

为提升柴油机的功率密度, 普遍采用废气涡轮增压, 提高进入气缸的空气密度以增加进气量; 同时为增强增压效果, 对压气机出口的气体采用中间冷却措施, 即采用中冷器, 不但可以提高充气密度, 还可以相应降低排气温度, 对降低发动机热负荷有利。

增压中冷对提高柴油机性能有明显优势, 但增

压空气流过中冷器会产生压力损失, 抵消一部分增压作用。为降低压损, 中冷器的流通截面积一般较大, 这就要求中冷器入口截面的气流速度分布要比较均匀, 否则会影响中冷器的冷却效果, 甚至不满足设计要求^[1]。

本文基于某船用柴油机的 1D 热力学模型及 CFD 仿真技术, 对中冷器的瞬态流动过程和换热过程进行模拟; 并根据计算结果对中冷器前进气箱的结构设计进行优化, 使一个循环内中冷器入口截

收稿日期: 2016-11-04

作者简介: 马天帅(1980-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机机电设备, E-mail: mts00001@163.com。