

船舶柴油机主轴承磨损热电监测技术应用研究

朱 军¹, 张先鹤¹, 高红亮¹, 杨建国²

(1. 湖北师范大学, 湖北 黄石 435002; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 从6DK20型船用中速柴油机结构特点出发, 研制了热电传感器, 测取了典型磨损状态下各负荷工况下的热点信号, 分析了热电信号的指向性, 比较了主轴承不同磨损量、不同负荷情况下, 柴油机发火时刻对应的热电信号峰值变化情况。结果表明: 热电信号真实地反映了主轴承的磨损及运行状况, 具有良好的故障指向性及瞬变性; 应用热电技术在线监测主轴承磨损具有很好的工程实用性。

关键词: 船舶柴油机; 热电传感器; 主轴承; 磨损; 监测

中图分类号: TK423.3⁺1; TK428 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)03-0010-05

Study on the Application of Thermoelectric Monitoring Technology for Main Journal Bearing Wear of Marine Diesel Engine

Zhu Jun¹, Zhang Xianhe¹, Gao Hongliang¹, Yang Jianguo²

(1. Hubei Normal University, Hubei Huangshi 435002;

2. Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: Based on the structural characteristics of 6DK20 type medium-speed marine diesel engines, a thermoelectric sensor was developed, the thermoelectric signals under typical wear states with varied load conditions were measured, and the thermoelectric signals' directivity was analyzed. Moreover, the different signal peaks corresponding to diesel ignition timing under different wear level of main bearing and different load conditions were compared. The results prove that the thermoelectric signal is a true reflection of the state of the main bearing wear and running condition, boasts good fault directivity and transient nature. The application of thermoelectric technology in online monitoring of main journal bearing wear has good engineering practicability.

Key words: marine diesel engine; thermoelectric sensor; main journal bearing; wear; monitoring

0 引 言

主轴承是柴油机曲轴的位置校准和支承部件, 其性能的优劣直接影响柴油机的正常安全运行。柴油机许多故障的产生及主要部件的损坏均与主轴承的不良状态息息相关。主轴承的不均匀磨损和损伤会造成缸套、活塞、活塞环的快速磨损, 导致燃烧室燃气窜气, 燃烧不完全和燃油消耗率上升, 以及引起敲缸和曲轴挠曲变形甚至折断等恶性事故的发生^[1-2]。因此, 研究主轴承磨损的机理和形式, 以及相应的在线监测及故障诊断方法, 对于减少主轴承故障的发生, 保障柴油机的安全运行具有十分重要的意义。

1 某船用中速柴油机技术参数及结构特点

以6DK20型船用中速柴油机为研究对象, 其主要参数如表1所示。该机主轴承为悬挂式结构,

收稿日期: 2016-10-8; 修回日期: 2016-12-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(51379169); 智能物流输送装备湖北省工程实验室开放基金。

作者简介: 朱军(1980-), 男, 讲师, 主要研究方向为柴油机电子监测、故障诊断, E-mail: mrdavidzhu1118@163.com。

用两个紧固螺栓和两个侧拉螺栓安装在铸铁机座上。曲轴由锻钢整体锻造而成，主轴颈及曲柄销轴颈处经淬火处理，飞轮装于功率输出端（后端），曲轴与凸轮轴相连的齿轮在其后端，与各种泵相连的齿轮在前端。主轴承和曲柄销轴承均由两片薄壁式轴瓦组成，主轴瓦由耐磨性高的铝合金加工而成，上下轴瓦由定位唇定位；止推瓦位于后端第一档主轴承两侧，主轴承盖通过液压力矩紧固在机身上^[3]。

表 1 6DK20 型柴油机主要参数

型号	6DK-20
机型	四冲程、直列式、直喷、涡轮增压加中冷
气缸数	6
缸径/mm	200
行程/mm	300
转速/ (r · min ⁻¹)	720
额定功率/kW	770
活塞平均速度 $C_{me}/(m \cdot s^{-1})$	9.00
平均有效压力 p_{me}/MPa	2.26
最高燃烧压力/MPa	15.7
转向（标准型）	从飞轮端看为顺时针方向

2 传感器研制与选型

2.1 热电传感器

根据柴油机台架试验及船用柴油机应用研究的需要，研制了热电传感器。该热电传感器主要包括曲轴适配器、连接杆、弹性联轴器、编码器和水银滑环等，图 1 为其装配图。热电传感器的作用是引出由主轴颈与主轴承磨损产生的热电信号，以及曲轴转角信号。曲轴适配器与曲轴自由端相连接，其中心线与曲轴中心延长线应完全重合；连接杆承担与曲轴适配器的连接和延伸，要求对中性良好；弹性联轴器要求导电性和减振性能良好；孔式增量编码器用来测量上止点及曲轴转角信号，要求分辨力高和信号输出稳定；水银滑环将热电信号引出，要求信号通道阻抗小、转速范围宽、抗冲击及振动能力强^[4]。

图 2 为热电传感器的实机安装图。热电信号经过调理、放大以及 A/D 转换后，转化为数字信号并被保存。增量编码器记录的 TTL 电平经校零及曲柄转角化处理后，作为热电信号的定位参照。

2.2 其他传感器

试验采用 Kistler 7613C 压力传感器和 5037B 电荷放大器测量气缸压力，SZMB-5 型磁电式传感器

测量上止点和瞬时转速。传感器安装如图 3 所示。

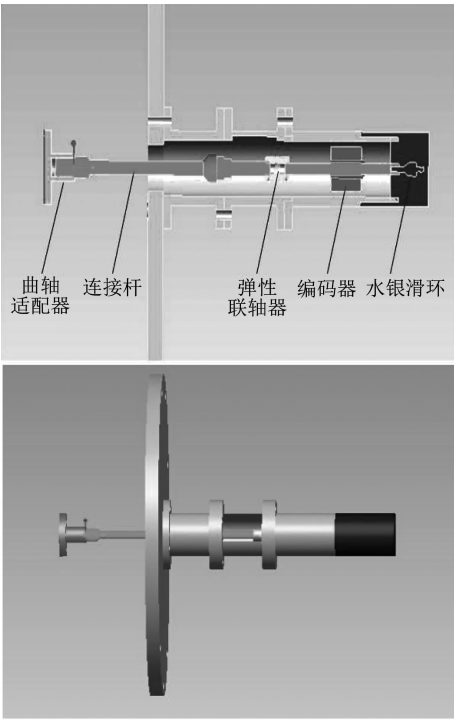


图 1 热电传感器装配图

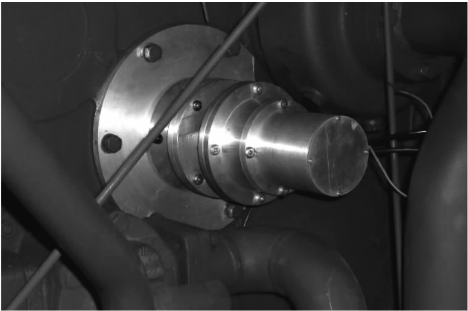


图 2 热电传感器实机安装图

3 主轴承磨损状态模拟

6DK20 柴油机主轴颈直径为 200 mm，主轴颈与主轴承装配间隙为 0.13 ~ 0.22 mm，极限磨损间隙为 0.3 mm，可调磨损余量为 0.17 mm。采用刮研主轴承至不同尺寸来模拟主轴承的不同磨损状态。用刮刀刮削上、下轴瓦合金层，刮削厚度略低于目标厚度的一半。常用的磨料有以 Al₂O₃ 为主要成分的各种刚玉、SiC 和 Cr₂O₃，将轴瓦与主轴颈的接触面（或类似曲面）贴合，接触面须达 80% 以上。通常，粗研时选用较粗的研磨剂、较高的压力和较低的速度进行；精研时选用较细的研磨剂、较小的压力和较快的速度进行，以获得精确的形状、尺寸和粗糙度等级^[5]。模拟的柴油机主轴承磨损量见表 2。

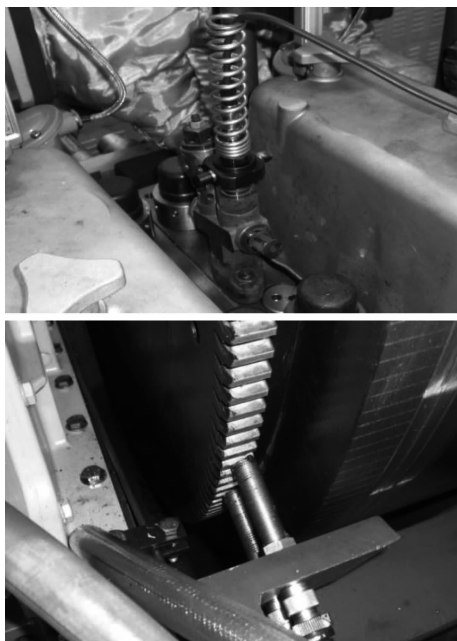


图 3 其他传感器安装

表 2 模拟的柴油机主轴承磨损量

序号	故障轴承号	磨损量/mm
1	各档主轴承	0.00
2	第 2 档主轴承	0.10
3	第 2 档主轴承	0.20

3.1 柴油机测量参数与试验工况

考虑现场工作情况, 主要测量上止点、瞬时转速、气缸压力、热-电以及热力等参数, 所测参数及采用的传感器如表 3 所示; 柴油机试验工况如表 4 所示。

表 3 柴油机主要测量参数

序号	测量参数	传感器型号
1	热力参数	机载传感器
2	上止点	磁电式转速传感器
3	瞬时转速	磁电式转速传感器
4	气缸压力	Kistler 7013C 缸压传感器
5	热电	热电传感器

表 4 6DK20 型柴油机试验工况

序号	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	负荷/kW	负荷
1	冷起动	0.0	0
2	720	0.0	0
3	720	192.5	25%
4	720	385.0	50%
5	720	577.5	75%
6	720	693.0	90%
7	720	770.0	100%
8	停车	0.0	0

3.2 特征信号分析研究

为确定磨损轴承的磨损程度, 将热电信号做周期平均、信号滤波等曲柄转角处理。处理后的柴油机不同负荷下主轴承不同磨损量的热电信号如图 4 ~ 图 18 所示。图中以第 2 缸发火上止点为起点, 按 2-4-1-5-3-6 发火顺序各缸依次发火, 各缸发火曲轴转角间隔为 120°CA , 共 2 个工作循环, 1440°CA 。

(1) 柴油机 0% 负荷工况

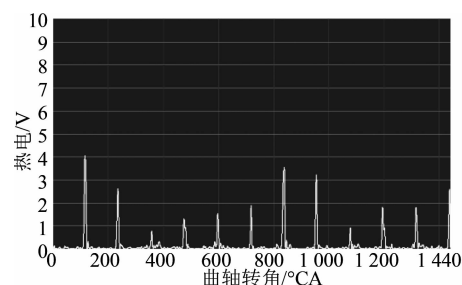


图 4 柴油机主轴承正常状态 (0.1 mm 间隙) 热电信号

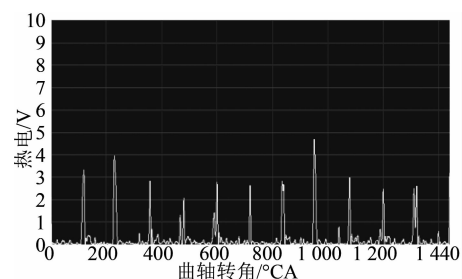


图 5 柴油机主轴承轻微磨损状态 (0.2 mm 间隙) 热电信号

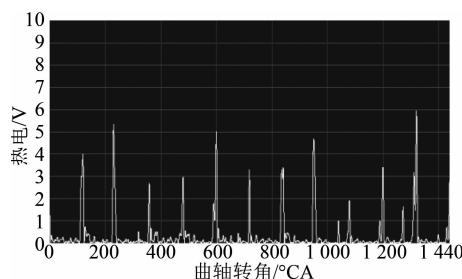


图 6 柴油机主轴承严重磨损状态 (0.3 mm 间隙) 热电信号

从图 4 ~ 图 6 可以看到: 热电信号在柴油机 2 个工作循环内呈现良好的重复性, 且在 120° 整数倍柴油机气缸发火点位置出现峰值, 柴油机负荷相同, 热电信号峰值随主轴承磨损量的增加呈增大趋势。

(2) 柴油机 25% 负荷工况

从图 7 ~ 图 9 可以看到: 主轴承间隙为 0.1、0.2、0.3 mm 时, 热电信号峰值相比 0% 负荷的热电信号峰值呈上升趋势; 柴油机相同负荷时, 热电

信号峰值随主轴承磨损量增加呈增大趋势。

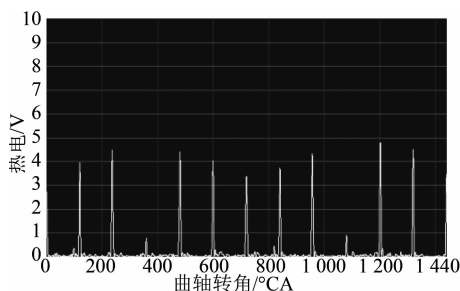


图 7 25% 负荷下柴油机主轴承正常状态
(0.1 mm 间隙) 热电信号

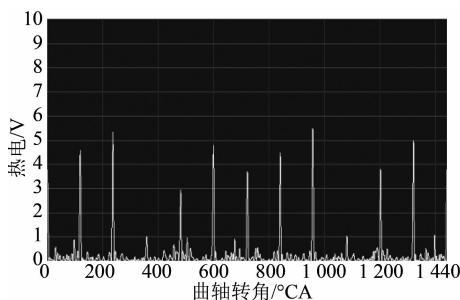


图 8 25% 负荷下柴油机主轴承轻微磨损状态
(0.2 mm 间隙) 热电信号

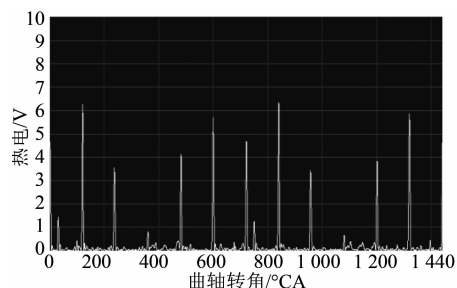


图 9 25% 负荷下柴油机主轴承严重磨损状态
(0.3 mm 间隙) 热电信号

(3) 柴油机 50% 负荷工况

从图 10 ~ 图 12 可以看到：柴油机主轴承间隙为 0.1、0.2、0.3 mm 时，热电信号峰值相比柴油机 25% 负荷时呈上升趋势；柴油机相同负荷时，热电信号峰值随主轴承磨损量的增加呈增大趋势。

(4) 柴油机 75% 负荷工况：

从图 13 ~ 图 15 可以看到：与柴油机 50% 负荷热电信号相比，75% 负荷其热电信号峰值呈整体下降趋势；且热电信号峰值随主轴承磨损量增加呈增大趋势。

(5) 柴油机 100% 负荷工况

从图 16 ~ 图 18 可以看到：与柴油机 75% 的热电信号峰值相比，100% 负荷其热电信号峰值呈整体下降趋势；且热电信号峰值随主轴承磨损量增加呈增大趋势。

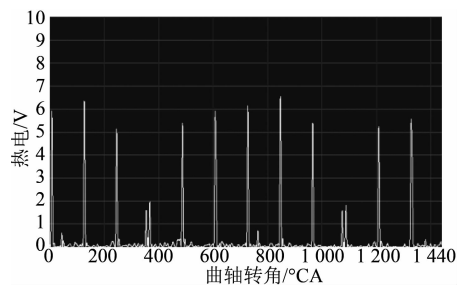


图 10 50% 负荷下柴油机主轴承正常状态
(0.1 mm 间隙) 热电信号

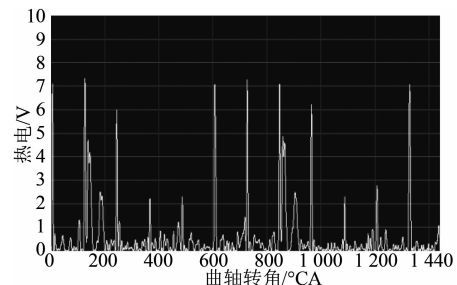


图 11 50% 负荷下柴油机主轴承轻微磨损状态
(0.2 mm 间隙) 热电信号

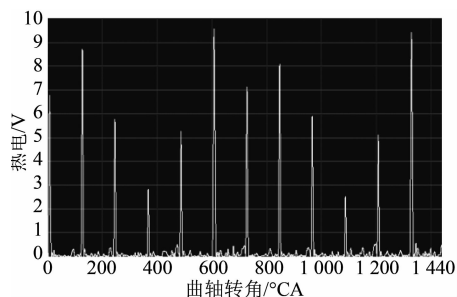


图 12 50% 负荷下柴油机主轴承严重磨损状态
(0.3 mm 间隙) 热电信号

从图 19 可以看出：6DK20 型柴油机各磨损工况热电信号的波动峰值普遍较大；同工况下，主轴承磨损越大，信号峰值越高，这与间隙越大时主轴承颈对主轴承的冲击越大有关，加速了主轴承的疲劳损坏；50% 负荷时热电峰值出现拐点，低于 50% 负荷时，热电信号峰值随负荷升高依次增大，高于 50% 负荷时，热电信号峰值随负荷升高依次减小。

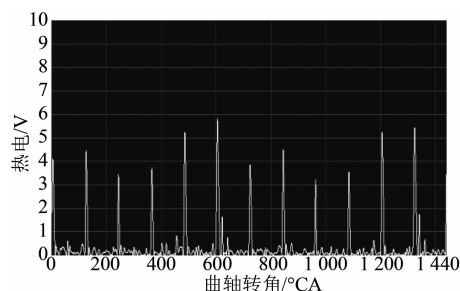


图 13 75% 负荷下柴油机主轴承正常状态
(0.1 mm 间隙) 热电信号

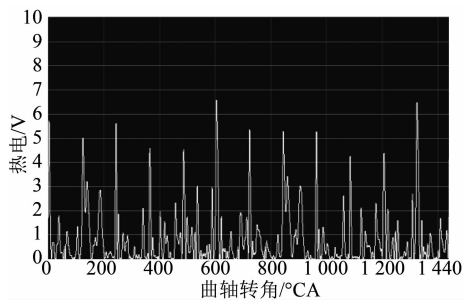


图 14 75% 负荷下柴油机主轴承轻微磨损状态
(0.2 mm 间隙) 热电信号

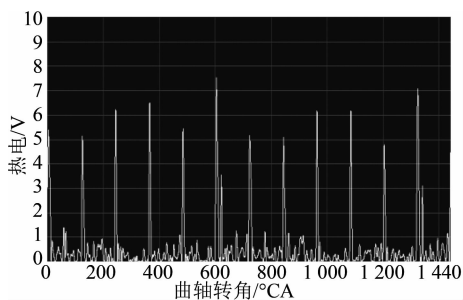


图 15 75% 负荷下柴油机主轴承严重磨损状态
(0.3 mm 间隙) 热电信号

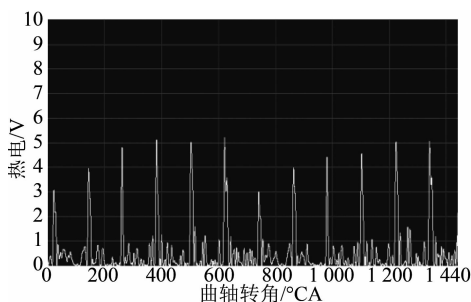


图 16 100% 负荷下柴油机主轴承正常状态
(0.1 mm 间隙) 热电信号

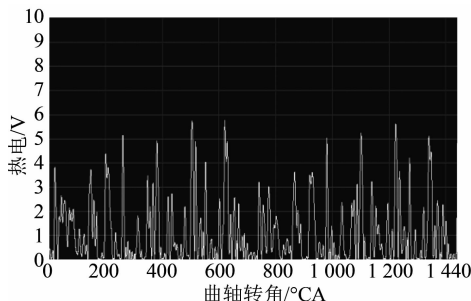


图 17 100% 负荷下柴油机主轴承轻微磨损状态
(0.2 mm 间隙) 热电信号

产生上述现象的原因分析：在实机负荷特性试验中发现：柴油机在 50% 负荷临近区域运行时，共振非常明显，导致主轴承的瞬时磨损增大，热点

信号的幅值升高。另外，柴油机 50% 负荷前的热电信号锯齿形不明显，而 50% 负荷后的热电信号锯齿形明显，这主要是由于随着柴油机负荷的增加，单缸功率逐渐加大，其主轴承受到的主颈的撞击作用加大，而且在重载下撞击持续时间更长，同时也导致相邻缸主轴承发生振动磨损，这种情形削弱了原先热电信号主瓣的突出性，造成许多锯齿形的旁瓣信号。

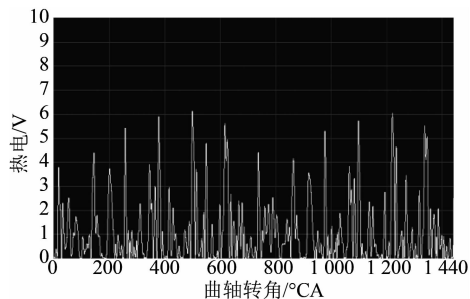


图 18 100% 负荷下柴油机主轴承严重磨损状态
(0.3 mm 间隙) 热电信号

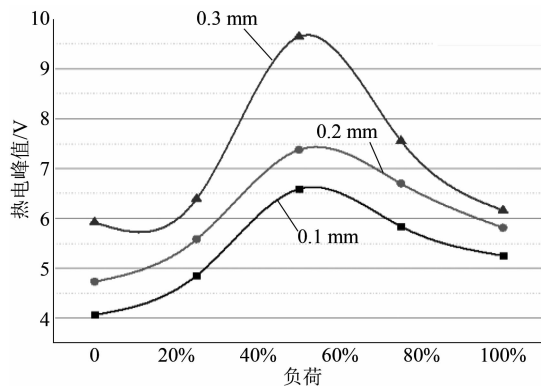


图 19 6DK20 型柴油机热电峰值随负荷与
主轴承磨损量的变化曲线

4 结束语

船用中速柴油机不同主轴承磨损量的故障模拟试验表明：在柴油机 2 个工作循环内热电信号重复性良好，且热电信号的峰值变化规律大致相同；柴油机 50% 负荷时热电峰值出现拐点；低于 50% 负荷时，热电信号峰值随负荷升高依次增大，高于 50% 负荷时，热电信号峰值随负荷升高依次减小；在相同的柴油机负荷条件下，热电信号峰值随主轴承磨损量增加呈增大趋势。该试验研究证实了采用热电技术监测船用中速柴油机主轴承磨损量的有效性。

(下转第 24 页)

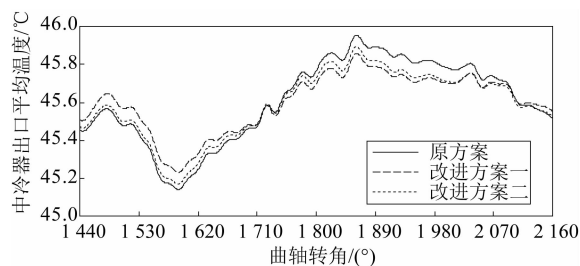


图 16 中冷器出口温度对比

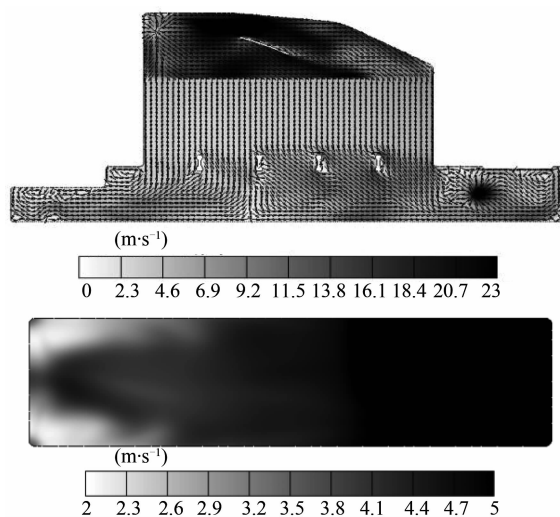


图 17 中冷器内部截面速度分布云图

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.