

柴油机排温自动修正算法的研究

王文成^{1,2}, 杜 兵², 张 鹏², 吴庆林²

(1. 上海船舶设备研究所, 上海 200030; 2. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402160)

摘 要: 在 MATLAB/Simulink 环境下建立了柴油机排温自动修正算法仿真模型, 仿真结果表明该算法可使柴油机各缸排温在较小范围内波动, 并逐渐趋于一致。将该算法在实机上进行了试验验证, 并根据试验结果对其进行优化。结果表明: 在全工况范围内, 采用排温自动修正算法可使柴油机各缸排温一致性得到明显改善, 优化后排温温差最大值从 90 ℃ 下降到 29.4 ℃, 排温超差比从 15.2% 降至 4% 左右, 柴油机工作更加柔和, 噪声小。

关键词: 柴油机; 排温; 自动修正; 算法

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)02-0028-05

The Research on Exhaust Temperature Automatic Correction Algorithm of Diesel Engines

Wang Wencheng^{1,2}, Du Bing², Zhang Peng², Wu Qinglin²

(1. Shanghai Institute of Ship Equipment, Shanghai 200030;

2. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402160)

Abstract: A simulation model of exhaust temperature automatic correction algorithm was built up using MATLAB/Simulink, the simulation results prove that this algorithm could keep the diesel engine exhaust temperature of each cylinder fluctuating within a small range, and gradually converge. The algorithm was verified through tests on an engine and optimized according to the results. The results show that the conformity of exhaust temperatures of varied engine cylinders has been significantly improved by exhaust temperature automatic correction algorithm under all working conditions. The maximum exhaust temperature difference was reduced from 90 ℃ down to 29.4 ℃ and the ratio of temperature difference from 15.2% down to 4%, the diesel engine operated more gently, and with less noisy.

Key words: diesel engine; exhaust temperature; automatic correction; algorithm

0 引 言

排气温度是反映柴油机燃烧质量的一项重要指标, 其对判断气缸内燃烧过程的优劣具有很大帮助; 同时, 排气温度也能反映柴油机运行状况是否良好, 通常将其作为衡量各缸工作平衡性的主要依据之一。柴油机在工作过程中, 会因某些外部环境或内部因素导致整机或者某一缸的排温出现异常。排温异常是柴油机常见故障之一, 影响柴油机的工

作状况, 若处理不及时甚至会引发安全事故。柴油机运行过程中, 如某一缸排气温度突然降低, 偏离了允许的最大温差, 则势必导致其它各缸的排温明显上升。柴油机排温过高会导致柴油机热负荷增加, 使热应力增大, 降低材料的机械性能, 还会破坏柴油机的润滑条件, 加剧柴油机磨损, 降低柴油机的使用寿命^[1-2]。

已发表的诸多文献中已经详细介绍了引起排温异常的因素以及处理的方法。例如: 梁大龙等人研

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-10-19

作者简介: 王文成(1990-), 男, 研究生在读, 主要研究方向为电控高压共轨柴油机控制, E-mail: 283459291@qq.com。

究了柴油机排温异常故障诊断流程^[1];莫金飞研究了四冲程柴油机排温过高的原因和解决方法等^[2]。却少有涉及通过算法对排温进行自动修正的研究,本文针对如何使柴油机排温进行自动修正进行研究,着重介绍一种排温自动修正算法。

1 排温异常影响因素

柴油机排温异常现象可分为整机排温异常和个别缸排温异常,而引起柴油机排温异常的因素又可分为外部因素和内部因素。通常情况下,引起柴油机整机排温异常的主要因素是外部因素,如:燃油质量、进气量、进气温度等;而内部因素有:燃油系统缺陷、某个缸气密性不良等,引起的排温异常主要是个别缸排温异常。以下简单分析几种常见的引起排温异常的影响因素^[2]。

(1) 燃油质量。燃油品质不良,换油操作不当或燃油温度不当等都可能导致供油单元滤器脏堵,燃油黏度大等现象。燃油质量不过关,势必导致雾化质量差,混合不均匀,从而导致燃烧不充分,排温较高。

(2) 供油量。单体泵、喷油器故障等可能导致爆压或排温异常。而供油量是导致此现象的关键参数。

(3) 喷油提前角。喷油提前角过大,会使滞燃期延长,导致爆压高、敲缸等不良现象。气温较低,柴油机起动困难,若喷油提前角较小,会使后燃现象严重,导致爆压低、冒黑烟、热负荷增大,排气温度较高。因此,喷油提前角应与柴油机的运行工况相匹配。

(4) 进气质量。进气质量不高或空气含氧量较低将导致燃烧不充分,致使进、排气口脏堵,排温较高。另外进气温度过高,进气量不足也会导致排温较高。

(5) 气密性。燃烧室气密性不良,如:余隙容积过大、排气阀密封不良等,可能导致压缩压力降低、排温低等现象。

通过上述分析可知,影响柴油机排温异常的因素较多,这也导致了分析和处理柴油机排温异常问题较复杂。本文排除燃油质量、进气温度等外部因素,以及燃烧室气密性不良、燃油系统缺陷等内部因素,仅研究供油量对柴油机排温异常的影响。本文所研究的排温自动修正算法的核心即为通过修正循环供油量来使排温达到理想效果。

2 排温自动修正算法仿真研究

柴油机处于正常工作状态时,若排温过高,说

明其输出功率太大,即柴油机各缸排温与各缸的负荷成正比^[3]。则通过改变各缸的循环供油量,便可调整各缸排气温度的高低。基于此原理,根据试验用柴油机的参数,在 MATLAB/Simulink 环境下建立了一种排温自动修正算法模型^[4],如图 1 所示,对柴油机排温进行仿真研究。

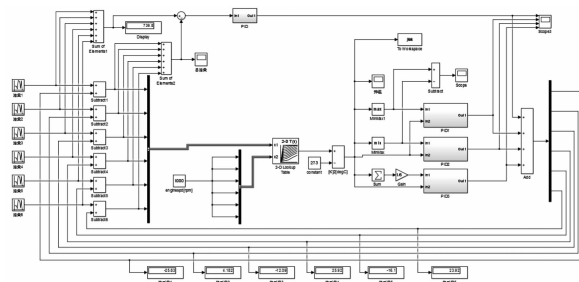


图1 排温自动修正算法模型

在此模型中,设定初始循环供油量,再与模型最后算出的修正油量相加得到每缸的实际循环供油量。由设定的初始循环供油量减去各缸实际循环供油量,对油量差值进行 PID 调节控制(图 1 中 PID 模块),得出循环供油量的修正量。通过查阅诸多文献并结合试验经验,制作了柴油机排气温度 MAP 图,如图 2 所示。

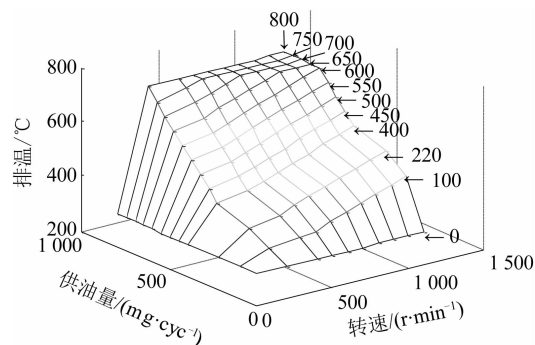


图2 柴油机排气温度 MAP 图

在排温 MAP 图中,横坐标为柴油机转速,纵坐标为柴油机循环供油量,竖坐标为与之对应的排气温度。可以根据柴油机特定工况下的转速和柴油机实际循环供油量查取各缸对应的排温。

在一个采样周期内,从 MAP 图中查取六缸排温 T_i ,求取排温的极大值 $T_{\max}$ 与极小值 $T_{\min}$,并计算出此周期内六缸排温的平均值 T_m ;再由排温极大值 $T_{\max}$ 、排温极小值 $T_{\min}$ 和排温平均值 T_m 分别与排温实时值 T_i 相减后进行 PID 调节控制(分别为图 1 中的 PID1、PID2、PID3 模块),得出各缸的循环供油量修正量;将得到的四种循环供油量的修正量相加,得出各个缸每个采样周期内的循环供油量的修正量。

在上述排温自动修正算法模型中,通过调节四个PID模块中的PID参数,来优化模型中的排温曲线,使之达到理想效果。在模型仿真中设定柴油机转速为 $1\,000\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$,每缸循环供油量为 $125\ (\text{mg} \cdot \text{cyc}^{-1})$,由每缸实际循环供油量和柴油机转速查MAP图,便可查取柴油机每缸排气温度,进而得到每缸的排温曲线,如图3所示。

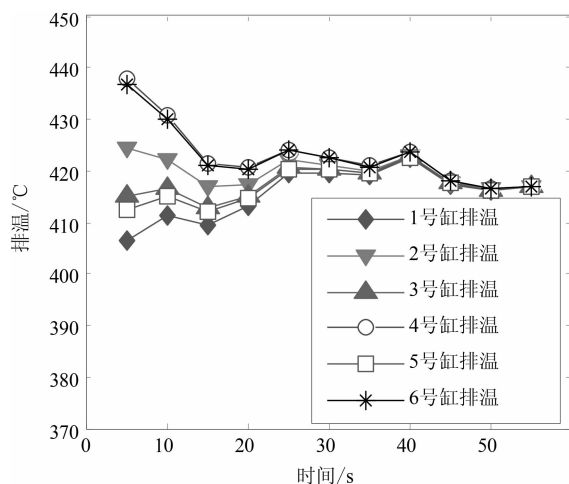


图3 六缸排气温度曲线

由图3可知:初始时各缸排温相差较大,排温极大值 $T_{\max}$ 与排温极小值 $T_{\min}$ 相差超过 $30\ ^\circ\text{C}$,随着时间推移,各缸排温在排温自动修正算法的修正下,逐渐趋于一致,在较小的范围内波动。排温趋于稳定的时间可通过调节PID控制模块中的PID参数来调节控制。图4为模型排温极大值 $T_{\max}$ 与极小值 $T_{\min}$ 的温差。由图4也可看出:一开始排气温度极大值 $T_{\max}$ 与极小值 $T_{\min}$ 相差超过 $30\ ^\circ\text{C}$,随着时间的推移,温差逐渐变小,最后趋于0,证明模型各缸排温趋于一致。

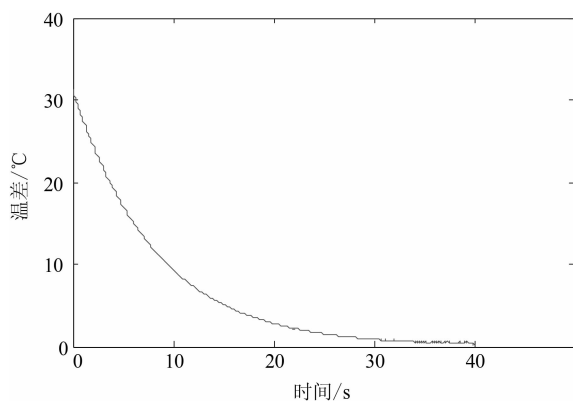


图4 排温极大值与极小值的差值

由模型仿真结果可知,排温自动修正算法可以应用于柴油机运行过程,通过修正各缸循环供油量使各缸排温达到理想的效果。

3 排温自动修正算法试验验证

3.1 排温自动修正算法改进

为了将排温自动修正算法应用于实际柴油机中,对上述的排温自动修正算法根据实际需求做进一步改进。改进后的排温修正算法流程如图5所示。该算法主要包括以下函数:标准排温计算函数、单缸是否需要调节判断函数、获取单缸喷油量修正比例函数、获取单缸喷油提前角函数、气缸控制时间片函数等。

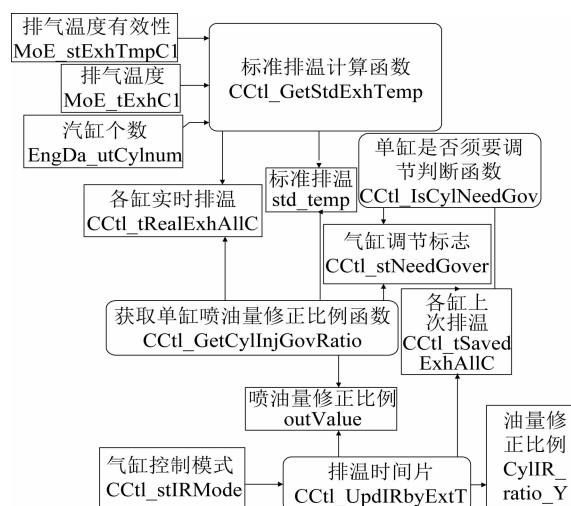


图5 排温自动修正算法

标准排温计算函数的主要功能是:根据气缸选择状态值判断各个气缸的排温是否有效,并获取有效的气缸缸号和个数以及各缸的排温,按照不同的气缸数选择极值滤波或平均值来计算实时排温的标准值。

本算法中标准排温的计算采用求取平均值的方法:

$$T_m = \text{Sum}(T_i)/n \quad (1)$$

式中: T_m 为标准排温; T_i 为各有效气缸的排温, $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$; n 为有效气缸个数(此处 n 为6)。

单缸是否须要调节判断函数的主要功能是:根据本次测量的排温以及上次测量的排温对调节效果进行判断,据此确定是否进行排温调节以及选择何种调节方法。通过对比本次测量的排温及上次测量的排温,将调节标志分为五种情况:0代表不须要调节;1代表排温偏高且上次调节无效;2代表排温偏高且上次调节有效;3代表排温偏低且上次调节无效;4代表排温偏低且上次调节有效。

获取单缸喷油量修正比例函数的功能为:获得喷油量修正的比例值,比例值由排温差值计算

得出。

各缸排温超差比：

$$\varepsilon = (T_i - T_m) / T_m \times 100\% \tag{2}$$

当 T_i 为当前各缸最高排温 $T_{\max}$ 或当前各缸最低排温 $T_{\min}$ 时, ε 称为各缸排温允差。各缸排温允差是一个相对值, 是对标准排温而言, 船用低速柴油机在额定工况下各缸排温允差为 $\leq \pm 5\%$ (高中速机允许 $\leq \pm 7\%$)。

气缸控制时间片函数的主要功能是: 根据排温调节模式变量值选择排温调节模式。排温调节模式主要分为不调节模式、手动调节模式和自动调节模式三种。在不调节模式中, 各缸喷油量修正比例为 1, 各缸喷油提前角修正量为 0; 手动调节模式主要是限制不合理的调节值, 如果手动调节超过调节限度时, 各缸喷油量修正比例值为 1, 此时为超限不调节; 自动调节模式主要对排温极高和极低的气缸进行调节。

3.2 柴油机试验验证

对排温自动修正算法做适当改进后, 在某型柴油机上对该算法进行试验验证。试验用柴油机相关参数如表 1 所示。

表 1 试验用柴油机相关参数

怠速转速/ (r · min ⁻¹)	400
缸数	6
额定转速/ (r · min ⁻¹)	1 000
额定喷油量 (单缸) / (mg · cyc ⁻¹)	1 111 (1 000 kW) 980 (882 kW)
停机转速/ (r · min ⁻¹)	1 200
报警转速/ (r · min ⁻¹)	1 100
进气温度停机值/℃	100
进气温度报警值/℃	90
单缸排温停机值/℃	490
单缸排温报警值/℃	470

在试验过程中, 不断对排温自动修正算法进行优化改进, 所以该试验其实包括排温自动修正算法优化前和排温自动修正算法优化后两部分。

初次将排温自动算法模型转化为可用在实际柴油机上的程序后, 按照上述排温自动修正算法在柴油机上上进行排温测试, 得出柴油机六缸排温曲线如图 6 所示。本次试验工况如下: 转速 800 (r · min⁻¹), 进气温度 38 ℃, 喷油提前角 10 °CA, 空气湿度 45.5%, 大气压力 99.9 kPa。

由图 6 可以看出: 在 200 s 前, 柴油机各缸排温温差比较大, 最大时达 100 ℃, 排温一致性很差; 200 s 之后, 在排温自动算法的作用下, 柴油

机各缸排温一致性得到明显的改善。由此可发现, 该算法对各缸温差修正的响应时间较长, 导致柴油机前期的排温不一致不能被修正, 须经过较长时间才能得到比较理想的排温一致性。表 2 为优化前算法不同时刻数据的分析。

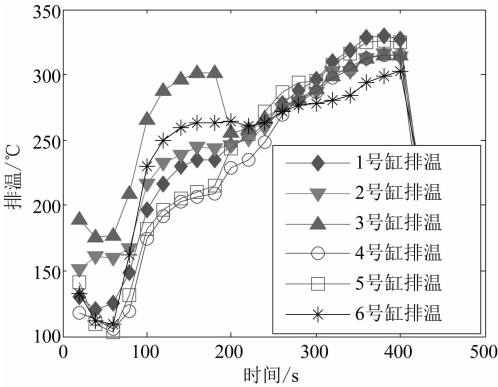


图 6 排温算法优化前排温曲线

表 2 优化前算法数据分析

时间/s	150	250
最高温度/℃	300	275
最低温度/℃	210	245
6 缸温差/℃	90	30
6 缸排温平均值/℃	243	262

由表 2 数据可知, 在时刻 150 s 时, 各缸排温中的排温极大值 $T_{\max}$ 与排温极小值 $T_{\min}$ 之间的差值 T_e 达到 90 ℃, 排温超差比 ε 为 15.2%, 严重超标, 不符合柴油机排温标准。在时刻为 250 s 时, T_e 为 30 ℃, ε 下降为 6.4%, 柴油机排温得到较大改善。

经过对排温自动修正算法的分析研究后, 对此算法做了进一步的改进。主要有两点: 一是原来的排温自动修正算法在自动调节模式中只对排温极高和极低的气缸进行调节, 改进后, 该算法会对每一缸的排温都进行自动修正, 使各缸排温更趋于一致; 二是在各缸排温超差比的定义中增加了排温超差调节强度系数 r , 定义如下: $\varepsilon = r(T_i - T_m) / T_m \times 100\%$, 使之可依据超差程度计算调节量, 对超差比例进行输出限制。

对排温自动修正算法进行优化后在柴油机上上进行排温测试, 得到如图 7 所示的柴油机各缸排温曲线。该试验工况如下: 转速 1 000 (r · min⁻¹), 进气温度 50 ℃, 喷油提前角 11 °CA, 空气湿度 45.5%, 大气压力 99.9 kPa。

由图 7 可以看出, 柴油机正常运行时, 各缸排温从一开始就比较一致, 都在某一较小的范围内波

动, 且各缸间的温差不大。表 3 为优化后算法某一区间数据的分析。

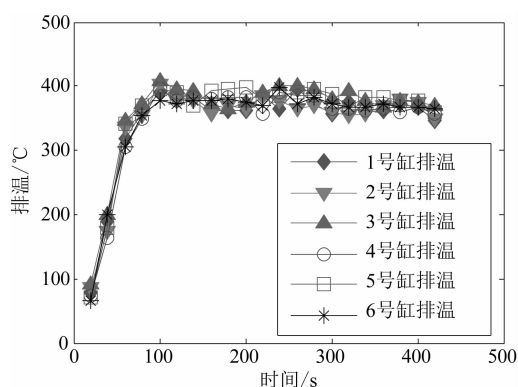


图 7 排温算法优化后排温曲线

表 3 优化后算法数据分析

时间/s	200
最高温度/℃	371.193 1
最低温度/℃	341.697 7
6 缸温差/℃	29.480 8
6 缸排温平均值/℃	355.695 4

由表 3 数据可知, 排温极大值 $T_{\max}$ 与排温极小值 $T_{\min}$ 温差为 29.4 ℃, 排温超差比 ε 为 4.4%, 满足柴油机对排温的要求, 柴油机工作过程柔和, 噪声小。

从排温修正算法优化前后的两次试验数据中可以看出: 算法修正优化后, 对各缸排温的调节更加迅速, 并且各缸排温温差明显缩小, 温差最大值从 90 ℃ 下降到 29.4 ℃, 排温超差比从 15.2% 降至 4% 左右。

4 结 论

本文提出一种排温自动修正算法, 且该算法并不局限于对排温极高和极低的气缸进行调节, 而是对每一缸的排温都进行自动修正, 从而使各缸在较短时间排温趋于一致, 可大大提高柴油机起动性能。

参考文献

- [1] 梁大龙, 赵俊豪, 黄连忠. 柴油机排温异常故障诊断流程 [J]. 航海技术, 2013 (4): 44-47.
- [2] 莫金飞. 浅谈四冲程柴油机排温过高的原因和解决方法 [J]. 中国水运月刊, 2014, 14 (2): 146-147.
- [3] 方式辉. 船用柴油机排温的调整 [J]. 内燃机, 1993 (3): 43-45.
- [4] 王帅, 吴志军, 邓俊, 等. 发动机排气温度的预测模型研究 [C]. 中国汽车工程学会年会论文集, 2011.

(上接第 27 页)

参考文献

- [1] 段福松, 杨建国, 厉成恩, 等. 高速柴油机气阀组件振动监测诊断技术试验研究 [J]. 柴油机, 2011, 33 (5): 31-35.
- [2] 蔡一杰. 柴油机气阀漏气故障振动诊断方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [3] 周平, 林瑞霖. 基于 Hilbert-Huang 变换的柴油机气门漏气故障诊断研究 [J]. 船海工程, 2007 (6): 52-55.
- [4] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A confi-

dence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert analysis [J]. Proceeding of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459: 2317-2324.

- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. Proceeding: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [6] 张浩敏, 王睿. 测试信号处理技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.