

6-6-2020

Research and Implementation of EGR performance Evaluation for Turbocharged Diesel Engine

Xianghuan Zu

1. Harbin Engineering University, College of Power and Energy Engineering, Harbin 150001, China;;

Yinyan Wang

1. Harbin Engineering University, College of Power and Energy Engineering, Harbin 150001, China;;

Chuanlei Yang

1. Harbin Engineering University, College of Power and Energy Engineering, Harbin 150001, China;;

Jianwei Du

2. China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research and Implementation of EGR performance Evaluation for Turbocharged Diesel Engine

Abstract

Abstract: To solve the optimization of turbocharged diesel engine combustion and emissions performance for different EGR rate under different working conditions, *the operation parameters of the diesel engine under different EGR rate was obtained through experiment at first; then the specific fuel consumption, NO_x, soot and cylinder pressure were selected as decision targets and the evaluation model for turbocharged diesel engine performance under different EGR rate was established based on multi-objective grey decision, finally optimum EGR scheme was achieved. A simulation platform for EGR performance evaluation was designed by MATLAB which simplifies the modeling process and improves the efficiency of simulation calculation.* The effectiveness and practicability of the simulation model and platform are verified by an example and the study is valuable as reference for optimizing the EGR performance.

Keywords

diesel engine, exhaust gas recirculation, multi-objective decision, performance evaluation

Authors

Xianghuan Zu, Yinyan Wang, Chuanlei Yang, Jianwei Du, and Jialun Wang

Recommended Citation

Zu Xianghuan, Wang Yinyan, Yang Chuanlei, Du Jianwei, Wang Jialun. Research and Implementation of EGR performance Evaluation for Turbocharged Diesel Engine[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3075-3081.

增压柴油机 EGR 性能评估研究与实现

祖象欢¹, 王银燕¹, 杨传雷¹, 杜剑维², 王佳伦³

(1.哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001; 2.中国舰船研究所, 北京 100192; 3.重庆潍柴发动机厂, 重庆 402262)

摘要: 为了解决增压柴油机不同工况不同 EGR 率下燃烧与排放优化问题, 通过试验获取不同 EGR 率下柴油机的运行参数, 选取燃油消耗率、 NO_x 、碳烟和缸内最高燃烧压力等指标为决策目标, 建立了基于多目标灰色决策的增压柴油机 EGR 性能评估模型, 进而决策出最优 EGR 方案。利用 MATLAB 设计了 EGR 性能评估仿真平台, 简化了建模过程, 提高了仿真计算效率。通过仿真实例表明了仿真模型及平台的有效性和实用性, 对 EGR 性能的优化具有一定的参考价值。

关键词: 柴油机; 废气再循环; 多目标决策; 性能评估

中图分类号: TK427 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 12-3075-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712019

Research and Implementation of EGR performance Evaluation for Turbocharged Diesel Engine

Zu Xianghuan¹, Wang Yinyan¹, Yang Chuanlei¹, Du Jianwei², Wang Jialun³

(1.Harbin Engineering University, College of Power and Energy Engineering, Harbin 150001, China;

2.China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China; 3.Chongqing Weichai Engine Factory, Chongqing 402262, China)

Abstract: To solve the optimization of turbocharged diesel engine combustion and emissions performance for different EGR rate under different working conditions, the operation parameters of the diesel engine under different EGR rate was obtained through experiment at first; then the specific fuel consumption, NO_x , soot and cylinder pressure were selected as decision targets and the evaluation model for turbocharged diesel engine performance under different EGR rate was established based on multi-objective grey decision, finally optimum EGR scheme was achieved. A simulation platform for EGR performance evaluation was designed by MATLAB which simplifies the modeling process and improves the efficiency of simulation calculation. The effectiveness and practicability of the simulation model and platform are verified by an example and the study is valuable as reference for optimizing the EGR performance.

Keywords: diesel engine; exhaust gas recirculation; multi-objective decision; performance evaluation

引言

柴油机废气再循环(EGR)主要是将排气中的一

部分废气引入到进气管, 同新鲜空气混合后进入气缸重新参与燃烧的过程。随着世界各国 NO_x 排放标准的不断严格, 对柴油机性能和排放要求也越来越高, 废气再循环(EGR)技术已越来越受到重视, 成为有效降柴油机 NO_x 排放的关键技术^[1-2]。EGR 技术关键在于使足够的废气回流到进气管, 并根据发动机的不同工况给出一个最佳的 EGR 率^[3-4]。

目前最佳 EGR 率的确定大多需要在试验台架



收稿日期: 2015-11-09 修回日期: 2016-01-31;
基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAG16B01);
作者简介: 祖象欢(1991-), 男, 陕西, 博士, 研究方向为柴油机性及控制; 王银燕(1961-), 女, 黑龙江, 博士, 教授, 研究方向为内燃机增压技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 3075 •

上进行, 通过大量试验获取发动机的运行参数, 通过对试验结果继续进行综合分析, 确定出试验工况下的最佳 EGR 率, 如杨帅^[3]等人在最佳 EGR 率的确定时, 采取 13 个工况点颗粒不超过原机为原则; 张振东^[4]等人在 PM 不超过原机的基础上, 考虑油耗的增加程度、NO_x 的改善程度等综合因素, 低负荷时选择高 EGR 率, 高负荷时选择低 EGR 率; 再如温永美^[5]、杜俊^[6]等人在对最佳 EGR 率的确定原则上均采取类似方法。虽然上述方法均能够实现最佳 EGR 率的确定, 但是仍存在一个共同的缺点, 那就是均无明确的理论指导, 不可避免的会因主观性判断而带来误差。

由于不同 EGR 率对柴油机的燃烧与排放性能影响不同, 因此在分析确定最佳 EGR 率时, 必须兼顾柴油机的动力性、经济性以及排放性能。既要尽可能地降低废气中 NO_x, 同时又能尽可能小的影响颗粒等其他污染物的排放。因此, 寻求适当的理论方法来提高最佳 EGR 率的决策可靠性成为了研究的难点。多目标灰色决策是灰色系统理论中的重要分支, 在针对若干方案中选择最好方案的决策问题上有着独特的优势, 因具有计算复杂度低, 识别效果高的特点而广泛应用于航空航天、电子电力等领域^[7-10]。

综上所述, 本文提出一种基于多目标灰色决策的 EGR 性能评估方法, 在通过试验设计的基础上, 以 EGR 为事件, 以燃油消耗率、NO_x、碳烟及缸内最高燃烧压力等指标为决策目标建立 EGR 性能评估模型, 决策出最佳的 EGR 方案, 并利用 MATLAB 设计与实现了 EGR 性能评估仿真平台, 对最佳 EGR 率的确立即 EGR 性能的改善具有一定的指导意义。

1 多目标灰色决策基本原理

根据灰色系统理论, 最佳 EGR 方案的决策问题是一个灰色系统, 在对其进行决策中, 各指标之间并不相互独立, 存在着灰色关系, 因此选择最优的 EGR 率是一个灰色多目标决策问题。决策模型的建立主要包括局势集、决策目标以及各目标相应的效

果样本矩阵、效果测度矩阵和综合效果测度矩阵。

1.1 局势集

首先, 根据事件集和对策集构造相应的局势集。设事件集 $A = \{a_1, a_2 \dots a_n\}$, a_n 代表决策事件, 本文中 $a_n = a_1 = \text{EGR 率}$; 对策集 $B = \{b_1, b_2 \dots b_m\}$, b_n 代表不同的 EGR 率方案; 则局势集为 $s = \{s_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B\}$, 局势 s_{ij} 在 k 目标下的效果值记为: $u_{ij}^{(k)} (i = 1, 2 \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 由 $u_{ij}^{(k)}$ 构成相应效果样本矩阵记为:

$$U^{(k)} = (u_{ij}^{(k)}) = \begin{bmatrix} u_{11}^{(k)} & u_{12}^{(k)} & \dots & u_{1m}^{(k)} \\ u_{21}^{(k)} & u_{22}^{(k)} & \dots & u_{2m}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1}^{(k)} & u_{n2}^{(k)} & \dots & u_{nm}^{(k)} \end{bmatrix}$$

1.2 效果测度

不同决策目标的物理意义不同, 无法进行直接比较, 需要对其进行规范化处理。本文根据不同决策目标的特点, 分别采取不同的效果测度, 式中:

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)}}{\max_i \max_j \{u_{ij}^{(k)}\}} \quad (1)$$

称为上限效果测度;

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)}}{\min_i \min_j \{u_{ij}^{(k)}\}} \quad (2)$$

称为下限效果测度;

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i_0 j_0}^{(k)}}{u_{i_0 j_0}^{(k)} + |u_{ij}^{(k)} - u_{i_0 j_0}^{(k)}|} \quad (3)$$

称为适中效果测度, $u_{i_0 j_0}^{(k)}$ 为 k 目标下的指定效果适中值。

这三种测度分别适用于不同的场合: 比如希望局势越大越好, 则可用上限效果测度; 希望局势损失越小越好, 则用下限效果测度, 希望效果是某个指定值的附近, 则用适中效果测度。

1.3 效果测度矩阵

根据每个决策目标的效果测度, 求解局势集在 k 目标下一致效果测度矩阵:

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)}) = \begin{bmatrix} r_{11}^{(k)} & r_{12}^{(k)} & \cdots & r_{1m}^{(k)} \\ r_{21}^{(k)} & r_{22}^{(k)} & \cdots & r_{2m}^{(k)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1}^{(k)} & r_{n2}^{(k)} & \cdots & r_{nm}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $\eta_k (k=1,2,\dots,s)$ 为目标 K 的决策权, 且 $\sum_{k=1}^s \eta_k = 1$.

1. 据决策权重求解局势 s_{ij} 的综合效果测度 r_{ij} :

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^s \eta_k \cdot r_{ij}^{(k)} \quad (5)$$

则综合效果测度矩阵为:

$$R = (r_{ij}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.4 最优决策

若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0 j_0}$ 则称 b_{j_0} 为事件 a_i 的最优对策;

若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0 j_0}$ 则称 a_{i_0} 为对策 b_j 相对应的最优事

件。若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0 j_0}$ 则称 $s_{i_0 j_0}$ 为最优局势。

1.5 多目标灰色决策步骤

(1) 确立事件集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 、对策集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 及局势集 $S = \{s_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B\}$

(2) 确定决策目标

(3) 求各目标对应的效果样本矩阵

(4) 求 k 目标下一致效果测度矩阵

(5) 确定各目标的决策权 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s$

(6) 由 $r_{ij} = \sum_{k=1}^s \eta_k \cdot r_{ij}^{(k)}$ 得综合效果测度矩阵;

(7) 确定最优局势 $s_{i_0 j_0}$ 。

2 EGR 性能评估仿真及实现

2.1 仿真模型的建立

(1) 决策目标的确立

确立最佳的 EGR 率需要综合考虑多种因素, 须在保证柴油机动力性和经济性的同时, 能够尽可能改善其排放性能。因此文中选取油耗率(K1)、

NO_x(K2)、碳烟(K3)及缸内最高燃烧压力(K4)等 4 个指标作为决策目标。

(2) 效果测度的确立

根据效果测度的定义, 确立决策目标的效果测度。如油耗率该目标要求越低越好, 因此选择下限效果测度, 同理 NO_x、碳烟及缸内最高燃烧压力选择下限效果测度。

(3) 决策权重的确立

目前决策权重通常按照各决策目标在事件中的实际物理意义确定。由于 EGR 的主要技术效果是降低 NO_x 的排放, 故在评估仿真模型中 NO_x 的权重设置为 0.5; 燃油消耗率反映着柴油机的经济性能, 设置为 0.2; 碳烟反映着柴油机的排放性能, 设置为 0.2; 缸内最高燃烧压力反映着柴油机的可靠性, 设置为 0.1;

2.2 仿真平台的 MATLAB 实现

GUIDE(图形用户接口开发环境)是 MATLAB 中快速创建可视化人机交互界面 GUI 的主要方式。用户只需要按照预定的实现功能布置各个控件, 同时编写各个控件对应的回调函数即可实现 GUI 界面的创建。因其设计简单、操作方便被广泛应用于航空航天、电子等领域仿真及优化平台的设计。如祖象欢^[11]将 GUI 成功应用到相继增压柴油机性能预测研究中; 等秦辉^[12]等利用 MATLAB 的图形用户界面环境设计了预测控制仿真平台; 曹万科^[13]等采用 MATLAB/GUI 设计了某汽车 CAN 总线信息离线实时性分析软件; 刘旭旺^[14]等利用 Matlab GUI 平台实现评标行为仿真分析系统。

为提高建模和仿真计算的效率, 采用 MATLAB 语言编写了多目标灰色决策程序, 在此基础上通过 GUIDE 设计了 EGR 性能评估仿真 GUI, 最终通过编译生成可单独运行的 .exe 文件, 即 EGR 性能评估仿真平台, 仿真平台的主界面见图 1。

仿真平台的主要功能包括绘图功能以及评估决策功能, 其中, 绘图功能能够直观的观察不同 EGR 率对柴油机缸内最高燃烧压力、燃油消耗率、NO_x 及碳烟等运行参数的影响, 评估决策功能则主要实现不同 EGR 方案的性能评估及最优决策。



图 1 EGR 性能评估仿 GUI 主界面

Fig. 1 Main interface of EGR performance evaluation GUI

3 试验及仿真结果分析

基于 TBD234V12 柴油机试验台架上进行了 EGR 系统试验, 根据需要对柴油机的燃烧与排放参数进行测量, 从而作为评估仿真模型的输入。

3.1 试验方案

在试验中, EGR 率的计算是分析 EGR 对发动机性能的影响和控制 EGR 系统的关键。由于在实际试验中, 进入缸内的废气和新鲜空气的质量难以精确的测量, 因此选用计算方法来确定 EGR 率—CO₂ 示踪法, 即分别在进排气端连续检测 CO₂ 的浓度和大气环境中的 CO₂ 浓度, 用它们的体积分数来表示 EGR 率, 公式如下:

$$\eta_{EGR} = \frac{\phi_{CO_{2in}} - \phi_{CO_{2atm}}}{\phi_{CO_{2out}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $\phi_{CO_{2in}}$ 为进气总管中 CO₂ 的浓度, ppm; $\phi_{CO_{2out}}$ 为排气总管中的 CO₂ 的浓度, ppm; $\phi_{CO_{2atm}}$ 为大气环境中的 CO₂ 的浓度, ppm。

试验选取工况点为: 某转速下 25% 负荷

(G1)、50% 负荷(G2)和 75% 负荷(G3); 手动调节 4 个 EGR 阀门开度, 即 EGR 率分别为 3.5%、6.8%、9.8%、11.6%, 获取相应 EGR 率下柴油机的运行参数, 主要包括 NO_x(ppm)、燃油消耗率((g/kW.h)、碳烟(1/m)及缸内最高燃烧压力压力(Mpa)。表 1 所示为各工况点的试验数据, 其中 D1-D4 分别代表 EGR 率为 3.5%、6.8%、9.8% 及 11.6%, K 代表决策目标, G 代表不同工况。

表 1 试验数据

Tab. 1 Experimental data

| G | K | b1 | b2 | b3 | b4 |
|----|----|---------|---------|---------|---------|
| G1 | K1 | 234.6 | 236.1 | 242.9 | 244.3 |
| | K2 | 743.2 | 669.1 | 543.5 | 497.4 |
| | K3 | 0.049 | 0.053 | 0.09 | 0.27 |
| | K4 | 6.524 3 | 6.445 6 | 6.347 5 | 6.310 9 |
| G2 | K1 | 214.6 | 216.8 | 222.9 | 224.6 |
| | K2 | 1 408.6 | 1 343.4 | 1 221.9 | 1 113.4 |
| | K3 | 0.103 | 0.148 | 0.184 | 0.42 |
| | K4 | 7.367 8 | 7.310 8 | 7.366 3 | 7.296 1 |
| G3 | K1 | 198.3 | 203.1 | 203.8 | 208.9 |
| | K2 | 1 853.8 | 1 711.6 | 1 534.6 | 1 399.7 |
| | K3 | 0.152 | 0.207 | 0.28 | 0.51 |
| | K4 | 8.546 2 | 8.652 3 | 8.589 6 | 8.503 6 |

根据建模要求, 燃油消耗率、NO_x、碳烟及缸内最高燃烧压力均选择下限效果测度, 则可得到 G1 的一致效果测度, 详见表 2。

表 2 G1 一致效果测度
Tab. 2 Consistent effect measure of G1

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|----|---------|---------|---------|---------|
| K1 | 1 | 0.993 7 | 0.965 8 | 0.960 3 |
| K2 | 0.669 3 | 0.743 4 | 0.918 2 | 1 |
| K3 | 1 | 0.924 5 | 0.544 4 | 0.181 5 |
| K4 | 0.967 3 | 0.979 1 | 0.994 2 | 1 |

同理可得到 G2、G3 的一致效果测度, 如表 3、表 4 所示。由 2.3 可知, 决策权重为(0.2, 0.5, 0.2, 0.1), 则可得到 G1 的综合效果测度, 如表 5 所示。

由表 5 可以看出, G1 的综合效果测度排序为: $b_3 > b_2 > b_1 > b_4$, 根据最优决策准则, 说明在该事件中最优的对策为 b_3 , 即该工况下 4 种 EGR 方案的最佳 EGR 率为 9.8%, 且综合评价顺序为: EGR 率 9.8% > EGR 率 6.8% > EGR 率 3.5% > EGR

率 11.6%。上述过程均可在仿真平台中实现, 图 2 所示为 G1 工况的仿真结果。

表 3 G2 一致效果测度
Tab. 3 Consistent effect measure of G2

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|----|---------|---------|---------|---------|
| K1 | 1 | 0.989 9 | 0.962 8 | 0.955 5 |
| K2 | 0.790 4 | 0.828 8 | 0.911 2 | 1 |
| K3 | 1 | 0.696 0 | 0.559 8 | 0.245 2 |
| K4 | 0.990 3 | 0.998 0 | 0.990 5 | 1 |

表 4 G3 一致效果测度
Tab. 4 Consistent effect measure of G3

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|----|---------|---------|---------|---------|
| K1 | 1 | 0.976 4 | 0.973 0 | 0.949 3 |
| K2 | 0.755 0 | 0.817 8 | 0.912 1 | 1 |
| K3 | 1 | 0.734 3 | 0.542 9 | 0.298 0 |
| K4 | 0.995 0 | 0.982 8 | 0.990 0 | 1 |

表 5 G1 综合效果测度
Tab. 5 Integrated effect measure of G1

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| r | 0.831 36 | 0.853 24 | 0.859 07 | 0.828 35 |

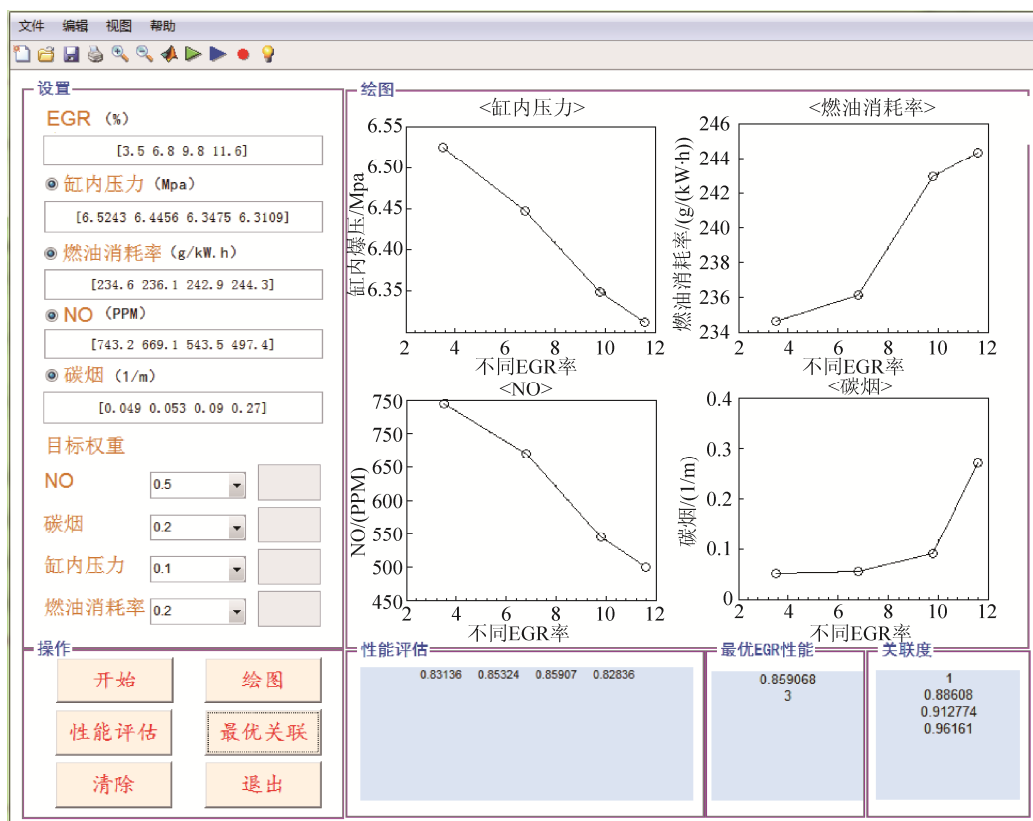


图 2 G1 工况仿真结果输出
Fig. 2 Simulation result of G1

同理可得到 G2、G3 的综合效果测度, 分别如表 6、表 7 所示。由表 6 可以看出, G2 的综合效果测度排序为: $b_1 > b_3 > b_2 > b_4$, 即在该工况下 4 种 EGR 方案中最佳 EGR 率为 3.5%, 且综合效果评价顺序为: EGR 率 3.5% > EGR 率 9.8% > EGR 率 6.8% > EGR 率 11.6%。

表 6 G2 综合效果测度
Tab. 6 Integrated effect measure of G2

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| r | 0.894 24 | 0.851 35 | 0.859 16 | 0.840 14 |

表 7 G3 综合效果测度
Tab. 7 Integrated effect measure of G3

| | b1 | b2 | b3 | b4 |
|---|----------|---------|----------|----------|
| r | 0.877 02 | 0.849 3 | 0.858 22 | 0.849 46 |

由表 7 可以看出, G3 的综合效果测度排序为: $b_1 > b_3 > b_4 > b_2$, 即在该工况下四种 EGR 方案中最佳 EGR 率为 3.5%, 且综合效果评价顺序为: EGR 率 3.5% > EGR 率 9.8% > EGR 率 6.8% > EGR 率 11.6%。

通过上述 3 个不同工况下的试验和仿真结果说明, 该模型及仿真平台可以有效实现增压柴油机 EGR 性能评估。

4 结论

本文针对增压柴油机 EGR 性能评估展开了研究, 以 EGR 为事件、不同 EGR 方案为对策集, 以燃油消耗率、NO_x、碳烟和缸内最高燃烧压力等 4 个参数为决策目标, 建立了 EGR 性能评估仿真模型, 对不同 EGR 方案对柴油机性能改善效果进行评估并得出最优方案, 为增压柴油机 EGR 性能优化提供了一种新的研究方法。同时设计并实现了 EGR 性能评估仿真平台, 简化了仿真建模过程, 为下一步 EGR 性能优化研究提供了便捷。

虽然本文成功实现增压柴油机 EGR 性能的评估及决策, 但仍存在需要改进的问题, 也是本文需要进一步研究的工作。比如虽然相比于目前的最佳 EGR 方案确定方法减弱了主观性判断带来的误

差, 更具有理论支持, 但是决策权重的确定带来了新的主观性问题, 仍需要进一步寻求优化; 再如考虑引入更多的决策目标来提高模型的准确性。

参考文献:

- [1] 隋菱歌, 刘忠长, 韩永强, 等. 增压柴油机瞬态 EGR 控制策略[J]. 内燃机学报, 2013, 31(4): 303-308.
Sui Lingge, Liu Zhongchang, Han Yongqiang, et al. EGR Control Strategy of Turbocharged Diesel Engine Under Transient Operations[J]. Transactions of SCICE, 2013, 31 (4): 303-308.
- [2] Timothy V Johnson. Review of diesel emissions and control[C]. SAE Paper 2010-01-0301, 2010.
- [3] 杨帅, 李秀元, 应启夏, 等. EGR 率对柴油机排放特性影响的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 30-33.
Yang Shuai, Li Xiuyuan Ying Qijia, et al. EGR Rates Optimization Rule and Experimental Study about Influence of EGR Rates on Diesel Engine[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 30-33.
- [4] 张振东, 方毅博, 陈振天. 增压直喷式柴油机 EGR 率测试及优化研究[J]. 内燃机工程, 2006, 27(2): 81-84.
Zhang Zhendong, Fang Yibo, Chen Zhentian. Research and Experiments of EGR Rates Effect on a Turbocharged Diesel Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(2): 81-84.
- [5] 温永美. EGR 率对柴油机燃烧排放性能影响仿真分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012: 36-49.
Wen Yongmei. The Simulation Analysis of EGR on the Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine[D]. Chongqing, Chongqing Jiaotong University, 2012: 36-49
- [6] 杜俊. V 型柴油机采用 EGR 系统系统的计算与试验研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工程大学, 2013: 5-11.
Du Jun. Calculation and Experimental Research with EGR System for V Type Diesel Engine[D]. Harbin, Harbin Engineering University, 2013: 5-11
- [7] 欧建军, 张安, 钟麟. 基于多目标优化决策的飞机维护计划研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1347-1350.
Ou Jianjun, Zhang An, Zhong Lin. Maintenance scheduling of aircrafts based on multi -criteria optimization and preference programming[J]. Systems Engineering -Theory & Practice, 2015, 35(5): 1347-1350.
- [8] Yinyan Wang, Jianwei Du, Hechun Wang et al. Grey decision making theory approach to the turbocharged

- diesel engine[C]. p 784-788, 2007, Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services.
- [9] 陈德军, 张曙红, 陈绵云. 灰色一般局势决策及其应用研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(4): 424-428. Chen Dejun Zhang Shuhong, Chen Mianyun. Research of gray situation decision and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(4): 424-428.
- [10] 康世崴, 彭建春, 何禹清. 模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 114-118. Kang Shiwei, Peng Jianchun, He Yuqing. Comprehensive Evaluation of Power Quality Based on the Integration of Fuzzy Analytic Hierarchy Process With Multi-Objective Decision-Making[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 114-118.
- [11] 祖象欢, 杨传雷, 王银燕. 基于 GM(1, 1)模型和 MATLAB GUI 的相继增压柴油机性能预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(11): 1-5. Zu Xianghuan, Yang Chuanlei, Wang Yinyan. Performance prediction of a sequential turbocharging diesel engine based on GM (1,1) model and MATLAB GUI[J]. Journal of Harbin Engineering University. 2015, 36(11): 1-5.
- [12] 秦辉, 席裕庚. 基于 Matlab GUI 的预测控制仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2778-2781. Qin Hui, Xi Yugeng. Matlab GUI-Based Simulation Platform Design of Predictive Control[J]. Journal of System Simulation. 2006, 18(10): 2778-2781.
- [13] 曹万科, 张天侠, 张霖霖, 等. 汽车 CAN 总线可视化实时性分析研究及仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2345-2348. Cao Wanke, Zhang Tianxia, Zhang Linlin, et al. Research on Visual Real-time Analysis and Simulation for Automotive Controller Area Network (CAN)[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2345-2348.
- [14] 刘旭旺, 汪定伟. 基于 Multi-Agent 的多属性拍卖评标机制的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 15(10): 2367-2372. Liu Xuang, Wang Dingwei. Simulation Research of Bidding Evaluation Mechanism in Multi-Attribute Auction Based on Multi-Agent[J]. Journal of System Simulation, 2013, 15(10): 2367-2372.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10% 为国际影响力品牌学术期刊。TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10% 之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。