

DOI: 10.7652/xjtuxb201806022

相继增压柴油机废气再循环性能评估及最优决策

祖象欢, 杨传雷, 王贺春, 王银燕

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对增压柴油机废气再循环(EGR)性能评估及最佳 EGR 率确定问题,提出了一种基于优化多目标灰色决策的评估方法。该方法选取柴油机主要运行参数为决策目标,以不同 EGR 率下各性能参数的实验数据作为效果样本矩阵,构建初始多目标灰色决策模型;将 EGR 燃烧与排放性能之间的折衷问题转化为决策模型的目标权重问题,根据增压柴油机不同工况下的 EGR 特点,采用专家打分初步确定 NO_x 的排放量权重经验指数,通过灰关联分析法求解初始主观权重,并结合熵权法分析求解主客观综合权重,最终建立不等权多目标灰色局势决策优化模型。基于 Matlab Guide 设计并创建了增压柴油机 EGR 性能评估及决策仿真平台,仿真结果表明:优化后的模型及仿真平台可以实现不同工况下 EGR 率的性能评估及最优决策,且有效提高了仿真效率,决策结果较为合理,与目前普遍采用的确定原则基本保持一致,对增压柴油机 EGR 的优化研究及工程应用具有一定的参考意义。

关键词: 增压柴油机;废气再循环;性能评估;最优决策

中图分类号: TK42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)06-0150-07

Researches on Exhaust Gas Recirculation Performance Evaluation and Optimal Decision-Making of Sequential Turbocharged Diesel Engines

ZU Xianghuan, YANG Chuanlei, WANG Hechun, WANG Yinyan

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: An evaluation method based on optimizing multi-objective gray decision is proposed to study the EGR (exhaust gas recirculation) performance evaluation and the determination of optimal EGR rate of turbocharged diesel engines. An initial multi-objective grey decision model is built by selecting main operating parameters of diesel engines as the decision-making objects based on the experiment, and taking experimental data of each performance parameter under different EGR rates as the effect sample matrix. The trade-off problem between EGR combustion and emission performance is converted into an objective weight problem of the decision model. EGR characteristics under different operating conditions of diesel engines are considered, and initial NO_x weight indices are determined by expert scoring. An initial subjective weight vector is obtained by gray relational analysis, and then subjective and objective comprehensive weight vectors are obtained by entropy analysis. The multi-objective gray situation decision-making optimization model with unequal weights is finally established. A platform for the EGR performance evaluation and decision simulation of turbocharged diesel engines is designed and created based on Matlab Guide. Simulation results show that the optimized model and simulation

platform successfully achieve the EGR rate performance evaluation and the optimal decision under different operating conditions. The simulation efficiency is effectively improved and the decision-making result is more reasonable. The results basically keep the same as those of the commonly used determination principle and have some guidance and reference significances for the optimization research of EGR and engineering applications of turbocharged diesel engines.

Keywords: turbocharged diesel engine; exhaust gas recirculation; performance evaluation; optimum decision-making

随着排放法规的日益严格,国际海事组织在2008年出台了一项国际性防止船舶造成空气污染的法律法规,对船舶柴油机氮氧化物(NO_x)的排放进行了严格的限制。作为目前降低船舶柴油机 NO_x 排放的主要措施^[1],废气再循环(EGR)技术受到了越来越多的关注。EGR技术的关键在于克服柴油机高工况下增压压力高于排气压力导致的EGR废气回流困难的问题,以保证足够的废气回流到进气管并合理控制EGR率。目前公开的文献中关于EGR的研究主要包括EGR的实现方式^[2-3]、EGR仿真与建模^[4]、EGR特性实验^[5-6]以及EGR控制策略研究^[7-8]等方面,而关于增压柴油机EGR性能评估等方面的研究尚少。不同EGR率对柴油机的燃烧与排放性能影响不同,在确定最佳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的 NO_x ,又要尽可能小地影响颗粒等其他污染物的排放。

目前普遍采取的办法是通过大量实验获取柴油机的主要运行参数,对数据进行综合分析,主观制定相应的确定原则,从而得到实验工况下的最佳EGR率。由于不同学者研究的目的和侧重点不同,因此各自制定的原则也有所不同。杨帅等在确定最佳EGR率时采取13个工况点颗粒不超过原机为原则^[9];郑清平等建立带EGR率增压中冷柴油机Boost计算模型,首先以不过度降低扭矩、增加燃油消耗率和碳烟排放为原则选取较低EGR率,其次考虑13个工况排放实验中每一个工况的排放量占总实验工况的总排放量的比例,将总排放量降至最低水平作为最终目标,从而最终确定最佳EGR率^[10];王迎迎等通过分析功率、油耗和烟度随EGR率变化的趋势,综合判定给出不同工况点的最佳EGR率^[11];张振东等在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^[12];张振坤等以中高负荷选择较大EGR率、低负荷采取较低EGR率为基本原则,通过分析燃油消

耗率、烟度等参数随EGR率变化曲线的斜率来确定相应的最佳EGR率^[13];杜俊等通过实验研究柴油机主要运行参数随EGR率的变化情况,综合分析柴油机动力性、经济性和排放性,确定各个工况的最佳EGR率^[14]。

虽然上述方法可以成功解决最佳EGR率的决策问题,但是存在一些共同的缺点。例如:过于单纯依赖主观判断,缺乏客观性;过度依赖数据的完整性,不适用于“小样本、贫数据”等问题。鉴于多目标灰色局势决策理论在针对若干方案中选择最好方案的决策问题上的独特优势^[15-18],本文将引入到最佳EGR率的决策问题中,通过特定的数学模型来发掘柴油机主要运行参数之间的内在关联,从而对不同EGR率下柴油机的综合性能进行优劣评估。

综上所述,本文以TBD234V12相继增压柴油机为研究对象,以EGR性能评估及最佳EGR率决策问题为出发点,结合不同工况下EGR运行特点和优化要求,提出了一种基于主客观综合赋权优化的多目标灰色局势决策方法。该方法融合了传统灰色局势决策、灰关联分析法以及熵权法各自的优点,以不同评价指标对应的参数为输入,通过发掘各个参数指标之间内在的变化关系来建立主客观赋权优化权重的多目标灰色局势决策模型,通过该模型可以直接输出不同EGR方案对应的性能优劣排序,有助于解决目前主流方法中存在的过于依赖主观判断的问题,为增压柴油机EGR性能评估及进一步优化研究提供了一种新的研究思路。基于Matlab Guide设计和建立了增压柴油机EGR性能评估及决策仿真平台,提高了建模仿真效率。

1 EGR性能评估优化模型的建立

1.1 基本理论知识

考虑到不同工况EGR运行特点和要求的不同,在建模中分别引入了多目标灰色局势决策、灰关联分析法及熵权法。通过灰色局势决策建立的数学模型可定量计算不同方案的综合效果测度^[15,19];通

过灰关联分析法计算不同序列之间的关联系数和关联度,从而达到优化的目的^[15,19];通过熵权法能够有效反映数据隐含的信息,增强指标的差异性,达到全面反映各类信息的目的^[20]。

1.2 决策目标的选择

不同 EGR 率对柴油机燃烧与排放改善效果不同,如何取得二者之间的合理折衷是评价 EGR 性能的重点。评价指标的选取应该尽可能兼顾柴油机燃烧和排放性能,分别选取燃油消耗率、缸内爆压、NO_x 的排放量、烟度以及 CO 的排放量等 5 个参数作为决策目标。EGR 的主要实现目的在于降低 NO_x 污染物排放,因此定义 NO_x 的排放量为主要决策目标,其他 4 个参数为次要决策目标。

1.3 决策目标权重优化

最佳 EGR 率的确定实质上是寻求柴油机燃烧与排放性能之间的最佳折衷,而如何将这种折衷体现到优化模型中是首要考虑的问题。由于不同决策目标分别代表柴油机不同方面的性能,同时考虑到决策目标权重在决策模型中的作用,在优化模型中,通过调整目标权重 η_k ($k=1,2,3,4,5$) 来替代柴油机燃烧及排放性能之间的折衷关系,其对应的决策权重值分别为 η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 及 η_5 。

传统多目标灰色决策模型中普遍采用主观赋权法来确定决策目标权重,该方法虽然能够发挥专家或技术人员的专业知识及经验,具有一定的专业性,但是具有较大的主观性和随意性,会对评估决策结果造成影响。同时考虑到 EGR 性能评估问题的多因素性,无论主观赋权或者客观赋权均无法充分满足 EGR 性能评估问题的特点,因此考虑结合不同工况 EGR 性能的特点,采取主客观综合赋权法来对决策目标权重进行优化。

步骤 1 为了有效降低 NO_x 排放,船舶柴油机 EGR 率的控制原则大致如下:①在怠速、暖机时,不采用 EGR 循环,低负荷时,采用较小 EGR 率^[14];②柴油机在加速过渡过程中,宜采用较低 EGR 率,随着负荷的增加,EGR 率应相应地增加,但要控制在一定的范围内^[14];③高转速、高负荷时,宜采用较大 EGR 率^[13]。

基于上述原则,本文考虑根据柴油机不同负荷工况,通过专家经验打分来确定主要决策目标 NO_x 的排放量的权重值。首先假设 5 个决策目标均等重要,因此初始权值均为 0.2,得到初始决策结果,通过分析初始决策结果与 EGR 实际运行趋势和优化要求对比,从而逆推调整 η_3 的权值。最终,NO_x 的

权重的经验确定规则如下:①若柴油机处于低负荷工况(小于 25% 负荷),NO_x 排放浓度较低,EGR 降低 NO_x 排量的效果一般,为了保证柴油机工作的稳定性和经济性,宜采取较低 EGR 率,因此令 NO_x 权重 $\eta_3=0.3$;②若柴油机处于中高负荷(大于 75% 负荷),NO_x 排放浓度较高,EGR 降低 NO_x 排量的效果显著,为了有效降低柴油机 NO_x 排放污染物,宜采用较大 EGR 率,因此令 NO_x 权重 $\eta_3=0.5$;③柴油机负荷介于①、②两者之间时,令 $\eta_3=0.4$ 。

步骤 2 将不同 EGR 率(包括 EGR 率为 0)下对应的 NO_x 的排放量作为母序列,以其他 4 个评价指标对应的数值作为子序列,采用灰色关联分析法求解其他 4 个评价指标与 NO_x 的排放量指标之间的关联度 r'_i ($i=1,2,3,4$),从而得到主、次要决策目标之间的关联系数

$$r_i = \frac{r'_i}{\sum_{i=1}^4 r'_i} \quad (1)$$

该关联系数 r_i ($i=1,2,3,4$) 代表次要决策目标与主要决策目标 NO_x 的排放量的贴近程度。

步骤 3 已知 η_3 和 r_i ,由式 $r_i(1-\eta_3)$ 求解其他 4 个次要决策目标权重值 η_k ($k=1,2,4,5$),并构成初始主观权重 η_k ($k=1,2,3,4,5$)。

步骤 4 构建原始评价矩阵,通过熵权法求得客观权重 α_k ($k=1,2,3,4,5$),并最终求得综合权重

$$\beta_k (k=1,2,3,4,5) = \frac{\eta_k \alpha_k}{\sum_{k=1}^n \eta_k \alpha_k} \quad (2)$$

该优化方法结合 EGR 运行特点和要求,以 NO_x 权重为中心,通过灰关联分析法求得其他评价指标与 NO_x 的贴近程度,进而利用贴近程度来求解其他权重,并引入熵权法削弱主观赋权带来的主观误差,提高评价的客观合理性。

2 具体建模步骤

对于 EGR 性能评估及最优决策,事件集 $A=\{a_1\}$,即事件为最佳 EGR 率的决策;由 m 个待决策方案组成对策集 $B=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$,其中 b_m 代表不同 EGR 率;决策目标分别为燃油消耗率、缸内爆压、NO_x 的排放量、烟度及 CO 的排放量。各 EGR 率的局势决策方案是在同等实验条件下进行的, $u_{ij}^{(k)}$ 为不同工况不同 EGR 率下每个决策目标对应的测量值,即不同参数的实验值。对于 EGR 性能评估指标而言,燃油消耗率、缸内爆压、NO_x 的排放量、烟度及 CO 的排放量等均是越小越好,故选择下限

效果测度。具体决策建模步骤如下:

- 步骤 1** 由每个工况下不同 EGR 率对应的实验数据构成效果样本矩阵,即 $u_{ij}^{(k)}$,并求解 k 目标下一致效果测度矩阵 $r_{ij}^{(k)}$ 。
- 步骤 2** 根据柴油机不同工况,通过专家打分和灰关联分析法求解初始主观权重 $\eta_k(k=1,2,3,4,5)$,再通过熵权法求得客观权重 $\alpha_k(k=1,2,3,4,5)$,并最终求得综合权重 $\beta_k(k=1,2,3,4,5)$ 。
- 步骤 3** 求解相应的综合效果测度矩阵 R ,根据最优决策原则,对不同 EGR 方案进行优劣排序,并得到最佳 EGR 率。

3 基于 Guide 的仿真优化平台

图形用户接口开发环境(Guide)是 Matlab 软件中一个重要功能模块,主要用于快捷创立图形用户界面(GUI)对象,因其具有操作简单、易于实现的优点,已经被广泛应用于诸多领域的仿真研究。GUI 的创立大致分为 3 部分:构建基本功能框架、选择控件并设计 GUI 界面,以及最后的编写回调函数、激活相应控件。

为了避免建模过程中由编程带来的不便,同时提高建模仿真计算的效率,采用 Matlab/Guide 设计并实现了 EGR 的性能评估及决策 GUI,最终编译生成可以独立运行的 EGR 性能评估及决策仿真优化平台。用户只需要将 EGR 性能参数数据导入该平台,即可快速完成不同工况下的 EGR 性能评估及最优决策,并将结果输出至指定位置以方便后处理分析。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验数据的获取

研究对象为某型相继增压柴油机,柴油机主要技术参数见表 1。

表 1 TBD234V12 柴油机主要性能参数	
参数	数值
标定功率/kW	444
缸径×行程/mm×mm	128×140
压缩比	15:1
气缸排列方式	V 型 12 缸
燃烧室型式	直喷 w 型

本文实验原机为 V 型柴油机,通过对系统改造设计并建立了文丘里管式高压 EGR 系统。具体台架实物图如图 1 所示。

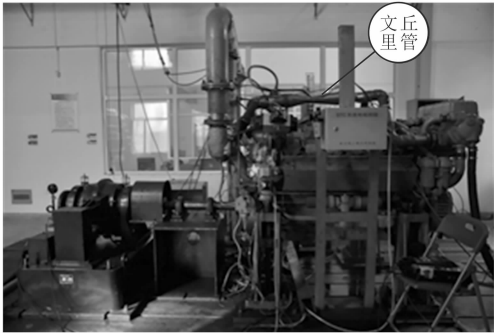


图 1 实验台架实物图

由于实验条件限制,为了保证柴油机稳定工作,最高 EGR 率限制在 15% 以内。实验选取低、中、高 3 个转速进行测试实验,每个转速依次选取 25%、50%、75% 负荷共计 9 个工况点,其中 6 个工况点的实验数据见表 2。

4.2 验证与结果分析

4.2.1 低负荷工况 在负荷不高的情况下,NO_x 排放量不高,应该更多兼顾柴油机动力性和经济性,因此宜采用较低 EGR 率。工况 1、2 分别表示不同转速下 25% 负荷工况。以工况 1 为例,EGR 率分别选取 2.4%、4.6%、8.6%、10.4% 及 11.6%,该工况下各指标参数的实验数据构成了效果样本矩阵

$$U = \begin{bmatrix} 299.20 & 302.50 & 305.60 & 310.60 & 313.10 \\ 5.800\ 1 & 5.558\ 3 & 5.467\ 1 & 5.431\ 8 & 5.309\ 4 \\ 376.99 & 329.65 & 287.32 & 251.20 & 231.30 \\ 0.046\ 0 & 0.049\ 0 & 0.058\ 0 & 0.090\ 0 & 0.140\ 0 \\ 336.37 & 354.73 & 395.36 & 504.82 & 633.94 \end{bmatrix}$$

矩阵中行向量依次代表燃油消耗率、缸内爆压、NO_x 的排放量、烟度和 CO 的排放量;列向量代表不同 EGR 率。

步骤 1 求得 k 目标下一致效果测度矩阵

$$V = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.989\ 1 & 0.979\ 1 & 0.963\ 3 & 0.955\ 6 \\ 0.915\ 4 & 0.955\ 2 & 0.971\ 2 & 0.977\ 5 & 1.000\ 0 \\ 0.666\ 3 & 0.762\ 0 & 0.874\ 3 & 1.000\ 0 & 0.961\ 3 \\ 1.000\ 0 & 0.938\ 8 & 0.793\ 1 & 0.511\ 1 & 0.328\ 6 \\ 1.000\ 0 & 0.948\ 2 & 0.850\ 8 & 0.666\ 3 & 0.530\ 6 \end{bmatrix}$$

步骤 2 求解初始主观权重。由于工况 1 处于低工况点,故 $\eta_3=0.3$ 。构建灰色关联序列如下:

$$\begin{aligned} \text{母序列 } X_0 &= (423\ 376.99\ 329.65\ 287.32\ 251.2\ 231.3) \\ \text{子序列} \\ X_1 &= (297.4\ 299.2\ 302.5\ 305.6\ 310.6\ 313.1) \end{aligned}$$

$$X_2 = (5.954 \quad 7 \quad 5.800 \quad 1 \quad 5.558 \quad 3 \quad 5.467$$

1 5.431 8 5.309 4)

表 2 部分工况点实验数据

工况点	EGR 率/%	燃油消耗率 /g · kW ⁻¹ · h ⁻¹	缸内爆压 /MPa	NO _x 体积分数 /10 ⁻⁶	烟度 /m ⁻¹	CO 体积分数 /10 ⁻⁶
1	0	297.4	5.954 7	423	0.034	324
	2.4	299.2	5.800 1	376.99	0.046	336.37
	4.6	302.5	5.558 3	329.65	0.049	354.73
	8.6	305.6	5.467 1	287.32	0.058	395.36
	10.4	310.6	5.431 8	251.2	0.09	504.82
	11.6	313.1	5.309 4	231.3	0.14	633.94
2	0	230.1	6.685 9	825	0.035	188
	1.5	230.5	6.542 8	783.2	0.041	196.2
	4.5	234.6	6.359 5	743.2	0.049	211.3
	7.8	236.1	6.305 2	669.1	0.053	229.4
	9.5	242.9	6.048 5	543.5	0.09	273.5
	12.6	244.3	5.927 4	497.4	0.27	380.6
3	0	196.7	9.206 0	2 012	0.125	149
	2	196.9	8.848 2	1 929.8	0.13	156.4
	4.1	198.3	8.610 9	1 853.8	0.152	164.2
	7.9	203.1	8.563 4	1 711.6	0.207	172.2
	9.7	203.8	8.423 6	1 534.6	0.28	206
	11.6	208.9	8.159 6	1 399.7	0.51	312.3
4	0	200.4	10.8	2 186	0.093	160
	1.6	199.8	10.550 5	2 101	0.1	156.4
	3.9	202.3	10.416 5	1 894	0.13	164.2
	7.5	205	10.225 6	1 653	0.148	172.2
	9.7	209.2	10.058 4	1 521	0.165	206
	11.1	212.2	9.856 8	1 465	0.32	312.3
5	0	236.3	7.646 2	1 093	0.045	309
	2.2	241.6	7.254 5	1 104.5	0.063	316.57
	4.6	242.7	7.210 8	1 002.6	0.088	335.53
	7.5	243.9	7.139 3	943.5	0.084	366.7
	9.8	246.9	7.016 7	890.65	0.12	427.84
	11.5	248.7	6.956 8	783.6	0.27	503.62
6	0	215.8	9.243 0	1 430	0.05	184
	1.8	216.8	9.083 5	1 399.8	0.056	164.3
	4	217.9	9.0154 9	1 365.4	0.064	169.9
	7.9	220.8	8.845 2	1 240.6	0.078	176.9
	9.1	224.5	8.726 3	1 119	0.11	190.4
	11.2	226.1	8.521 6	1 086.4	0.25	280.5

$$X_3 = (0.034 \quad 0.046 \quad 0.049 \quad 0.058 \quad 0.09 \quad 0.14)$$

$$X_4 = (324 \quad 336.37 \quad 354.73 \quad 395.36 \quad 504.82$$

633.94)

求得次要决策目标燃油消耗率、缸内爆压、烟度及 CO 的排放量与主要决策目标 NO_x 排放量的关联系数

$$r_i = (0.267 \quad 8 \quad 0.293 \quad 7 \quad 0.209 \quad 1 \quad 0.229 \quad 4)$$

初始主观权重

$$\eta_k = (0.187 \quad 4 \quad 0.205 \quad 6 \quad 0.300 \quad 0 \quad 0.146 \quad 3 \quad 0.160 \quad 6)$$

步骤 3 求解综合权重。利用熵权法求得客观权重 $\alpha_k = (0.254 \quad 7 \quad 0.180 \quad 5 \quad 0.198 \quad 8 \quad 0.177 \quad 3 \quad 0.188 \quad 7)$ 综合权重为

$$\beta_k = (0.237 \quad 8 \quad 0.184 \quad 9 \quad 0.297 \quad 1 \quad 0.129 \quad 3 \quad 0.151 \quad 0)$$

步骤 4 求解综合效果测度矩阵

$$R^1 = [0.885 \quad 2 \quad 0.902 \quad 7 \quad 0.900 \quad 1 \quad 0.873 \quad 5 \quad 0.820 \quad 3]$$

由结果可知,工况 1 下当 EGR 率为 4.6%时取得的综合效果测度值最高,EGR 率为 11.6%时最低。同时可以看出,当 EGR 率低于 10%左右时,对应的综合性能评估值相差不是很大,当 EGR 率升高至 10%左右时,随着 EGR 率的升高综合性能评估值下降较为明显,说明该工况下较高 EGR 率会对柴油机的综合性能造成较为明显的不良影响,因此宜采用较小 EGR 率。

同理,可得工况 2 下综合效果测度矩阵

$$R^2 = [0.849 \quad 2 \quad 0.847 \quad 4 \quad 0.839 \quad 4 \quad 0.834 \quad 3 \quad 0.832 \quad 6]$$

当 EGR 率为 1.5%时取得的综合效果测度值最高,EGR 率为 12.6%时最低。由结果可以看出:当 EGR 率小于 7.8%左右时,不同 EGR 率对应的综合评估值差别不大;随 EGR 率的不断升高对应的综合评估值相应地呈减小趋势,特别地,当 EGR 率大于 9.5%时,随着 EGR 率的升高,对应的综合性能评估值下降的较为明显。

4.2.2 高负荷工况 在高负荷工况下,NO_x 排放量较高,为了满足船用柴油机 NO_x 排放要求,宜采用较高 EGR 率,达到有效降低 NO_x 的目的。工况 3、4 分别代表不同转速下 75%负荷工况。在确定初始主观权重时,令 $\eta_3 = 0.5$ 。通过仿真计算可得工况 3 和工况 4 优化后的综合效果测度矩阵分别为

$$R^3 = [0.826 \quad 0 \quad 0.831 \quad 2 \quad 0.845 \quad 6 \quad 0.878 \quad 8 \quad 0.895 \quad 4]$$

$$R^4 = [0.837 \quad 1 \quad 0.851 \quad 5 \quad 0.897 \quad 1 \quad 0.915 \quad 9 \quad 0.887 \quad 1]$$

由结果可知,在工况 3、4 下,最佳 EGR 率分别为 11.6%和 9.7%。小 EGR 率对应的评估值最低,说明该工况小 EGR 率对柴油机的改善情况最差。随着 EGR 率的升高,二者综合评估值呈增大趋势,

且当 EGR 率大于 8% 时,评估值增大较为明显。其中,工况 4 下 EGR 率升高至 11.1% 时,综合评估值反而减小,分析其原因为:该工况属于高转速、高负荷工况,过高的 EGR 率可能会对柴油机的动力性造成不良影响,因此导致综合评估值下降。综上所述,在高负荷工况下宜采用较高 EGR 率,而过高 EGR 率会对柴油机产生负面影响。

4.2.3 中等负荷 随着负荷的增加, NO_x 排放也逐渐升高,宜适当提高 EGR 率。工况 5、6 分别表示不同转速下 50% 负荷工况。同理,仿真计算可得工况 5、6 优化后的综合效果测度矩阵分别为: $\mathbf{R}^5 = [0.876\ 8\ 0.872\ 7\ 0.887\ 1\ 0.873\ 0\ 0.870\ 9]$; $\mathbf{R}^6 = [0.883\ 7\ 0.879\ 9\ 0.901\ 9\ 0.922\ 6\ 0.892\ 0]$ 。

由结果可知,在工况 5 和工况 6 下最佳 EGR 率分别为 7.5% 和 9.1%,随着 EGR 率的升高,综合评估值大致呈先增大后减小的趋势,分析其原因为:工况 5、6 分别代表不同转速下中等负荷,该负荷下 NO_x 排放量随着转速的不断提升而增加,过低的 EGR 率并不能满足有效降低 NO_x 的要求,因此有必要适当提高 EGR 率,但是为了保证 EGR 率的增加不会对柴油机的动力性能造成过多损失,应该控制 EGR 率在一定范围内,因此在综合评估值方面,当 EGR 率过高时,评估值反而下降。

综上所述,通过优化评估及决策结果可以看出:在低负荷工况下,由于 NO_x 排放浓度较低,应该更多兼顾柴油机的动力及经济性,因此宜采用较小 EGR 率;随着转速和负荷的增加,宜适当增加 EGR 率。在高负荷工况下, NO_x 排放浓度较高,为了尽最大可能降低排放性能,宜采用较高的 EGR 率。这与目前增压柴油机 EGR 性能特点基本保持一致,也说明了该优化模型及方法的有效性,对增压柴油机 EGR 性能评估及最优决策具有一定的参考意义。

由于实验条件的限制,本文实验中最高 EGR 率被限制在 15% 之内,但是这不影响本文研究的核心思想,本文主要目的是基于实验数据探索一种同时适用于“大数据”和“小数据”场合的优化决策方法,以缓解目前主流方法中对主观判断的依赖,为船舶柴油机 EGR 性能的评估及最佳 EGR 率的确定提供一种新的研究思路。

5 结 论

针对增压柴油机 EGR 性能评估及最优决策问题,提出了一种基于优化多目标灰色决策的评估方

法,并设计实现了仿真优化平台,具体结论如下:

(1)多目标灰色局势决策可以成功应用于船舶增压柴油机 EGR 性能评估及最佳 EGR 率的决策问题。柴油机燃烧与排放性能之间的最佳折衷可以转化为模型评价指标之间的权重问题;通过灰色关联分析法及熵权权重优化方法,既可以发挥主观赋权和客观赋权的优点,又能将增压柴油机 EGR 运行特点融入到优化模型中,使得最终的决策结果更合理。

(2)当增压柴油机处于低负荷时,低 EGR 率对应的综合评估值较高,且 EGR 率低于 10% 时,不同 EGR 率的综合评估值相差不大;当 EGR 率大于 10% 左右时,综合评估值下降较快,因此宜采用较低 EGR 率。当柴油机处于高负荷时,随着 EGR 率的增大,其对应的综合评估值也随之增大,当 EGR 率增加至 8% 左右时,不同 EGR 率对应的综合评估值增大较为明显,但是过高的 EGR 率会造成综合评估值减小,因此宜适当采用较高 EGR 率,但不宜过高。当柴油机处于中等负荷时,随着 EGR 率的增加,对应的综合评估值基本呈先上升后减小的趋势,但是变化较为缓和,因此宜适当增加 EGR 率。

(3)基于 Matlab Guide 实现增压柴油机 EGR 性能评估及决策仿真平台的设计和建立,具有方便快捷的优点,可以有效提高建模仿真效率,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] ASAD U, ZHENG Ming. Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles [J]. Applied Energy, 2014, 123: 242-252.
- [2] SHEN Kai, LI Fangbo, ZHANG Zhendong, et al. Effects of LP and HP cooling EGR on performance and emissions in turbocharged GDI engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 746-755.
- [3] 赵昌普,朱云尧,李艳丽,等. 增压中冷柴油机 EGR 系统文丘里管的设计与实验 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 49-56.
ZHAO Changpu, ZHU Yunyao, LI Yanli, et al. Design and experimental of venturi in EGR system of turbocharged intercooled diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 49-56.
- [4] 安晓辉,刘波澜,张付军,等. 基于氧浓度的 EGR 对柴油机性能影响的仿真 [J]. 内燃机学报, 2013, 31(2): 115-119.
AN Xiaohui, LIU Bola, ZHANG Fujun, et al. Simu-

- lation of the effect of intake charge oxygen concentration based EGR on diesel engine performance [J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(2): 115-119.
- [5] PARK Y, BAE C. Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine [J]. Applied Energy, 2014, 133: 308-316.
- [6] SHI Xiaochen, LIU Bolan, ZHANG Chao, et al. A study on combined effect of high EGR rate and biodiesel on combustion and emission performance of a diesel engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 1272-1279.
- [7] 韩晓梅, 田威, 林学东, 等. 废气再循环瞬态修正控制策略对重型柴油机排放性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(3): 1-6.
- HAN Xiaomei, TIAN Wei, LIN Xuedong, et al. Influence of EGR transient correction strategy on emission performance of heavy duty diesel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 1-6.
- [8] NISHI M, KANEHARA M, LIDA N. Assessment for innovative combustion on HCCI engine by controlling EGR ratio and engine speed [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 42-60.
- [9] 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.
- [10] 郑清平, 黎苏, 郎晓姣, 等. 增压中冷柴油机 EGR 数值模拟与试验研究 [J]. 内燃机工程, 2012(2): 33-37.
- ZHENG Qingping, LI Su, LANG Xiaojiao, et al. Simulation and experimental study on turbocharged inter-cooled diesel engine with exhaust gas recirculation [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2): 33-37.
- [11] 王迎迎. 大功率柴油机 EGR 模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 36-41.
- [12] 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, 37(5): 30-33.
- [13] 张振坤. EGR 技术降低某船用柴油机 NO_x 排放的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015: 58-60.
- [14] 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: 5-7.
- [15] LIU S F, LIN F. Grey information: theory and practical applications [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006: 315-318.
- [16] ZHOU Huan, WANG Jianqiang, ZHANG Hongyu. Grey stochastic multi-criteria decision-making approach based on prospect theory and distance measures [J]. Journal of Grey System, 2017, 29(1): 15-33.
- [17] CHEN Ding, FANG Zhigeng, LIU Xiaqing, et al. Research on multiple-objective weighted grey target reliability optimization model of complex product [J]. Journal of Grey System, 2015, 27(3): 11-22.
- [18] 王正新, 党耀国, 宋传平. 基于区间数的多目标灰色局势决策模型 [J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 388-392.
- WANG Zhengxin, DANG Yaoguo, SONG Chuanping. Multi-objective decision model of grey situation based on interval number [J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 388-392.
- [19] WU L F, WANG Y N, LIU S F. Grey convex relation and its properties [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2012, 32(7): 1501-1506.
- [20] 郭金维, 蒲绪强, 高祥, 等. 一种改进的多目标决策指标权重计算方法 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 135-142.
- GUO Jinwei, PU Xuqiang, GAO Xiang, et al. Improved method on weights determination of indexes in multi-objective decision [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(6): 135-142.

(编辑 武红江)