

增压柴油机文丘里管式 EGR 性能试验与评估

祖象欢¹ 杨传雷¹ 王银燕¹ 王贺春¹ 杜俊²

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 91458 部队, 三亚 572000)

摘要: 以某 V 型增压柴油机为研究对象, 选定原机额定工况为设计工况点, 设计并搭配了文丘里管式高压废气再循环 (Exhaust gas re-circulation, EGR) 系统。通过试验研究了不同工况下、不同 EGR 率对柴油机燃烧与排放性能的影响, 在此基础上, 针对不同工况下的 EGR 性能评估及最佳 EGR 率的确定问题, 提出了一种基于灰关联分析优化的多目标灰色决策评估方法。试验结果表明, 利用文丘里管可以达到废气的引射要求, 能够有效改善柴油机的排放性能。当 EGR 率升至 8% 左右时, 所有工况点的 NO_x 均能降低 25% 左右, 但烟度及油耗小幅增长; 同转速下, 柴油机在高负荷、高 EGR 率时烟度排放量更高, NO_x 的排放量基本随着 EGR 率的升高而直线降低; 通过优化评估方法可以获得各工况的最佳 EGR 率, 柴油机在低转速工况时, 小 EGR 率获得了更高的综合评估值, 因此宜采用小 EGR 率; 随着转速提升, 较高 EGR 率获得更高的评估值; 当柴油机转速过高时, 过高的 EGR 率取得的评估值反而下降, 因此不宜采取过高 EGR 率。

关键词: 柴油机; 废气再循环; 文丘里管; 灰关联分析; 最佳 EGR 率

中图分类号: TK421.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0389-08

EGR Performance Test and Evaluation of Turbocharged Diesel Engine with Venturi Tube Structure

ZU Xianghuan¹ YANG Chuanlei¹ WANG Yinyan¹ WANG Hechun¹ DU Jun²

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

2. Unit 91458, Sanya 572000, China)

Abstract: Taking a certain type of V-type supercharged diesel engine as the research object, and the original rated working point was selected as the design working point, the venturi tube structure (EGR) system was designed. The effects of different EGR rates on the combustion and emission performance of diesel engine under different working conditions were studied. On the basis of the experimental analysis, a multi-objective gray decision evaluation method based on gray relational analysis optimization was proposed to evaluate the EGR performance and the optimal EGR rate under different working conditions. The results showed that when the EGR rate was increased to about 8%, the NO_x of all the operating point can be reduced by 25%, while smoke and fuel consumption only had a small increase. At the same speed, the diesel engine smoke emission was higher when it was at high load and high EGR rate, and NO_x emission was decreased linearly with the increase of EGR rate. The optimal EGR rate can be obtained successfully by the optimized evaluation method and it was showed that a small EGR rate obtained a high comprehensive evaluation value when the diesel engine was in the low speed condition, therefore, a small EGR rate should be adopted. With the increase of diesel engine speed, the high EGR rate obtained a high evaluation value. However, when diesel engine speed was too high, the corresponding assessment value was reduced and it was not appropriate to take an excessive rate.

Key words: diesel engine; exhaust gas recirculation; venturi tube; gray correlation analysis; optimal EGR rate

收稿日期: 2017-10-30 修回日期: 2017-11-28

基金项目: 高技术船舶科研计划——船用低速工程(一期)研制经费项目(CDG01-KT0302)

作者简介: 祖象欢(1991—), 男, 博士生, 主要从事柴油机增压及人工智能技术研究, E-mail: zuhuan0815@163.com

通信作者: 王银燕(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机工作过程及增压技术研究, E-mail: wyyzxm@sina.com

0 引言

废气再循环(EGR)是目前降低柴油机 NO_x 排放量的主要措施^[1],其实现过程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^[2-3]。EGR 技术关键在于使足够的废气回流到进气管,克服增压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^[4-5],并根据发动机的不同工况给出最佳的 EGR 率。

EGR 的主要实施方式包括安装节气门^[6-8]或者文丘里管^[9-11],其中,安装节气门易于实现,但会对涡轮增压器造成一定负面影响,恶化柴油机扫气效果,影响柴油机正常运行,而安装文丘里管结构仅对进气压力产生较小影响,但不便于布置。

目前,关于最佳 EGR 率的确定问题,尚没有针对性的研究和统一标准。杨帅等^[12]在确定最佳 EGR 率时,以 13 个工况点颗粒不超过原机为原则;张振东等^[13]在 PM 不超过原机基础上,综合考虑油耗的增加程度、 NO_x 的改善程度等因素,低负荷时选择高 EGR 率,高负荷时选择低 EGR 率;文献[14-16]均采取类似方法。上述方法能够充分利用专家及技术人员的专业知识和经验,实现最佳 EGR 率的确定。但是评估结果仅依赖于决策者的主观判断和理解,不同的决策者在性能折衷取舍上的差异都会导致不同的决策结果。

本文针对一款 V 型增压柴油机的高压 EGR 系统进行研究,为柴油机设计并搭配文丘里管式高压废气再循环(Venturi tube EGR)系统,通过试验分析 EGR 对不同工况下柴油机性能的影响,并基于试验数据分析提出一种增压柴油机 EGR 性能评估及最佳 EGR 率决策优化方法。

1 试验设备及方法

以河柴重工生产的增压中冷型 TBD234V12 型柴油机为研究对象,柴油机主要技术参数如表 1 所示,主要测试仪器设备如表 2 所示。

表 1 TBD234V12 型柴油机主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of TBD234V12

参数	数值
标定功率/kW	444 (1 800 r/min)
缸径×行程/(mm×mm)	128×140
压缩比	15
气缸排列方式	V 型 12 缸 60°夹角
燃烧室型式	直喷 ω 型

表 2 主要测试仪器设备
Tab.2 Main instruments and equipments

测试仪器	测试参数
AVL 160 型废气分析仪	柴油机排气中的 NO_x 、 CO_2 、 CO 、 CH 等废气成分
Testo350 型烟气分析仪	柴油机进气 CO_2 成分
CPACIMETER439 型不透光式烟度计	烟度测量
FC2210 型智能油耗仪	柴油机燃油消耗率
SG880 型水力测功器	转矩

2 文丘里管 EGR 系统设计

TBD234V12 型柴油机原机试验数据表明,增压后的进气压力明显高于排气压力,给实现废气再循环带来困难。因此本文考虑采用加装文丘里管来实现废气再循环混合。

在考虑柴油机台架空间布局 and 文丘里管尺寸后,决定选择串联的文丘里管系统,其示意图见图 1。新鲜空气经 2 个并联压气机压缩,经 1 个三叉管道汇合后流入文丘里管进口截面,然后空气流经收缩段,流速增加,压力减小。废气从排气管中引出,经废气中冷和 EGR 阀后与新鲜空气在喉口部位进行混合,随后在扩压段恢复压力,最后到达各缸进行燃烧。

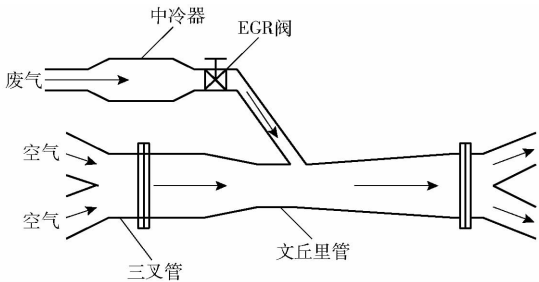


图 1 串联文丘里管系统示意图
Fig.1 Venturi tube system structure diagram

决定文丘里管性能的关键参数有喉部面积和扩压段锥角。喉部面积决定了文丘里管的引射能力,扩压段锥角决定了混合后气体压力的恢复状况。将管内流动简化为定常流,若柴油机在设计工况工作,调节 EGR 阀的开度从全闭到全开时,文丘里管均能起到降压引射的作用,达到试验需要的 EGR 率,并且当 EGR 阀全开时文丘里管喉口部位刚好不发生壅塞现象,因此,选取柴油机额定工况(1 800 r/min, 444 kW)为文丘里管设计工况。

根据气体动力学原理,首先计算确定喉口面积;在确定喉口面积后,根据经验公式来确定文丘里管喷嘴长度 L_1 、混合段长度 L_i 和扩压器长度 L_2 ,为了兼顾试验台架的空间布置,总长度 L 的选取需具备安装的可行性。经过计算,各主要参数如下:喉口直

径 $d_i = 54.84\text{ mm}$;收缩锥角 $\alpha = 24^\circ$,满足 $10^\circ < \alpha < 40^\circ$; $L_1 = 141.5\text{ mm}$; $L = 441.5\text{ mm}$, $L_i = 50\text{ mm}$, $L_2 = 245\text{ mm}$;扩压角 $\beta = 14^\circ$,满足 $11^\circ < \beta < 18^\circ$ ^[11],故设计的扩压段满足要求。

最终的文丘里管实物如图 2 所示,EGR 系统结构示意图如图 3 所示,试验台架实物如图 4 所示。



图 2 文丘里管实物图
Fig.2 Venturi physical map

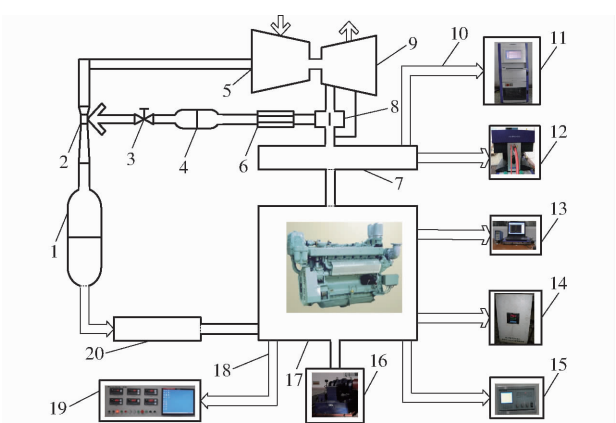


图 3 EGR 系统结构示意图
Fig.3 Physical map of EGR system structure

1. 中冷器 2. 文丘里管 3. EGR 阀 4. EGR 冷却管 5. 压气机
6. 过滤器 7. 排气管 8. 三通阀 9. 涡轮 10. 前置过滤器
11. 废气分析仪 12. 不透光式烟度计 13. 燃烧分析仪 14. 油耗仪
15. 发动机测控仪 16. 水力测功机 17. TBD234V12 型柴油机
18. 压力、转速传感器 19. 试验台架监测台 20. 进气歧管

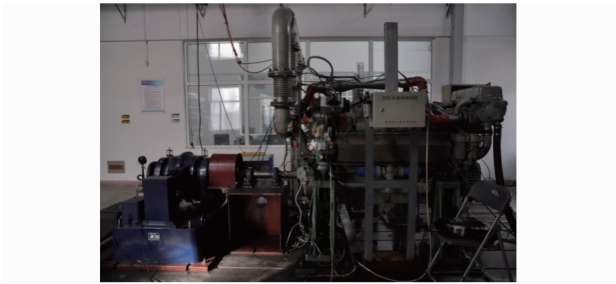


图 4 试验台架实物图
Fig.4 Test bench physical map

3 性能试验

3.1 EGR 率对缸内压力的影响

图 5 为不同工况下 EGR 率对缸内压力的影响曲线。由图 5 可知,同一工况下缸压曲线变化趋势基本相似,在中低转速下呈单峰,高转速下呈双峰,燃烧形成的波峰值基本都在刚过上止点后出现,随

着 EGR 率的增大,缸内压力峰值呈下降趋势。如图 5a 转速 900 r/min、25% 负荷工况点时,峰值下降了 0.63 MPa。其原因是由于 EGR 废气的引入导致进气压力和进气量的降低,同时混合气中氧浓度降低而惰性气体分子数增多,对燃烧的阻滞作用增强,从而导致缸内的初始压力和压力峰值的下降。缸内压力在低转速工况下呈单峰状,燃烧形成的波峰值基本在刚过上止点后 $2^\circ \sim 8^\circ$ 出现。图 5b 为 1 500 r/min、25% 负荷工况点,可以看出缸内压力呈双峰分布,第 1 峰在上止点后 2° 左右,燃烧发生在上止点前,主要是由于活塞上行引起的压缩峰,随着 EGR 率的增加第 1 峰值逐渐减小。第 2 峰出现在上止点后 8° 左右,当活塞到达上止点后开始下行,下行引起缸内压力降低,但燃烧造成的压力升高幅度大于活塞下行引起的压力下降幅度,所以出现了第 2 峰。随着 EGR 率的增大,进入气缸的废气成分增多,缸内气体的比热容升高,导致滞燃期时间延长,最终使燃烧始点相应延迟。因此 EGR 的引入使缸内压力曲线整体向上止点后偏移。

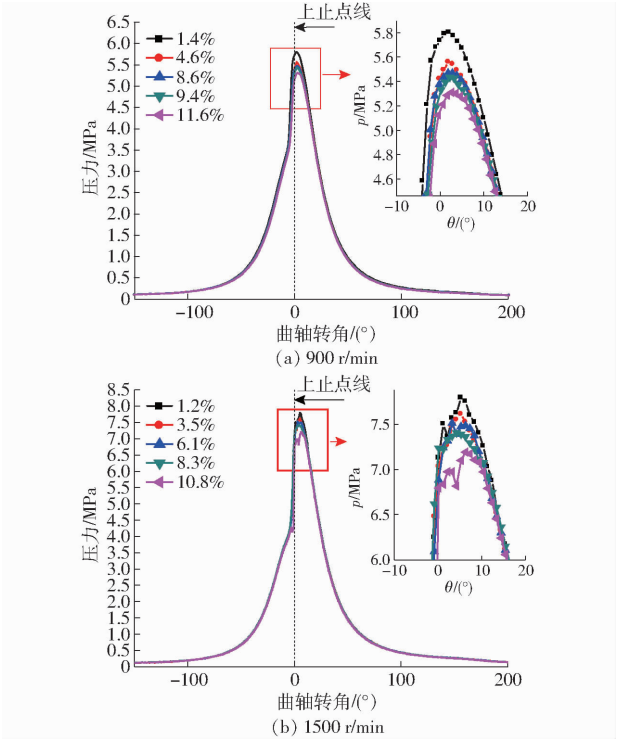


图 5 不同 EGR 率对缸压的影响
Fig.5 Effects of different EGR rates on cylinder pressure

3.2 EGR 率对油耗的影响

图 6 为 900 r/min 和 1 500 r/min 转速下,负荷分别为 25%、50%、75% 时油耗率随 EGR 率的变化曲线。由图 6 可知,在同等负荷下,随着 EGR 率增加,废气引入量的增多使得燃烧室内的燃烧恶化,燃烧不充分,故油耗基本与 EGR 率呈线性变化。小负荷时,由于空燃比大,进入气缸内的新鲜空气富余,废

气的增多对燃油消耗率影响不大,因此燃油消耗率变化缓慢,如 1 500 r/min 转速、25% 负荷时,当 EGR 率由 0 升至 10.8% 时,油耗率由 257.5 g/(kW·h) 上升至 268.1 g/(kW·h),增加了 4.12%。而在高负荷区,由于 EGR 引入使空燃比严重降低,导致缸内局部混合气浓度过高,并发生缺氧状况,因此,随着 EGR 率的增加混合气浓度继续升高,最终导致缸内燃烧恶化。随着后燃加重,在活塞下行阶段仍有部分燃油燃烧,放热率峰值后移,使对外做功能力减弱,所以大负荷区扭矩下降幅度大于小负荷扭矩下降幅度,试验中为了弥补功率的损失,唯有通过加大喷油量来维持足够的功率输出,故燃油消耗率随着 EGR 率增加而升高。如 1 500 r/min 转速、75% 负荷时,当 EGR 率由 0 上升至 10.8% 时,油耗率由 200.4 g/(kW·h) 上升至 212.2 g/(kW·h),增加了 5.89%;在小负荷区由于扭矩损失较小,故耗油上升较大负荷区更加平缓。

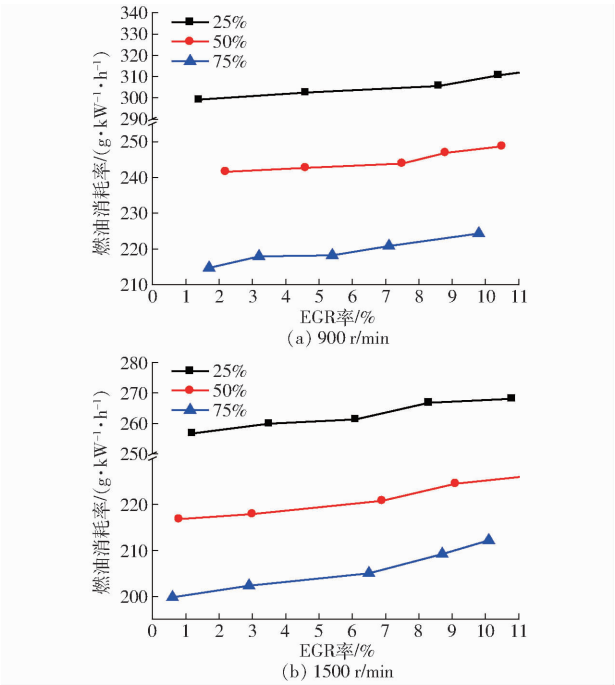


图6 不同 EGR 率对油耗率的影响
Fig.6 Effects of different EGR rates on fuel consumption rate

3.3 EGR 率对 NO_x 排放量的影响

图 7 为 900 r/min 和 1 500 r/min 转速下,负荷分别为 25%、50%、75% 时 NO_x 排放量随 EGR 率的变化曲线。由图 7 可知,EGR 废气的引入可以有效改善 NO_x 的排放,特别在高负荷时效果更加明显。对比试验结果发现,当 EGR 率升高至 8% 左右时,NO_x 排放量均能降低 25% 左右。

在 900 r/min 转速、25% 负荷时,随着 EGR 率的增加,NO_x 排放量开始呈下降趋势,从 3.7699×10^{-4} 下降至 2.512×10^{-4} ;当 EGR 率从 10.4% 继续增加

到 11.6% 时,NO_x 增加了 1.01×10^{-5} 。主要原因是因为在低转速工况点时,随着 EGR 废气的引入,一方面降低缸内总体氧浓度,另一方面使得缸内温度上升,相应高温持续时间也增加,此时氧浓度下降的效果会被抵消,故在此时 EGR 对 NO_x 产生负面效果,NO_x 排放量会略微升高。

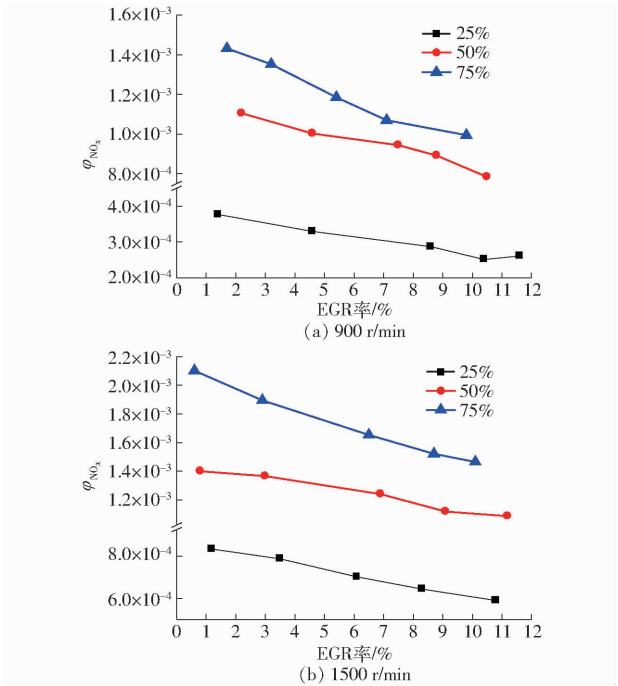


图7 不同 EGR 率对 NO_x 排放量的影响
Fig.7 Effects of different EGR rates on NO_x emission

当转速增加到 1 500 r/min 时,废气中的大量惰性气体开始凸显作用,阻碍燃烧的快速进行,缸内温度随之降低,由于 NO 的生成速度低于燃烧反应速度,故仅有少部分的 NO 产生于火焰的外沿区,并且随着转速的升高,高温持续时间缩短使 NO 达不到平衡含量,故 NO_x 生成量随着废气量的增多而下降。如在 1 500 r/min,75% 负荷工况,当 EGR 率从 0.6% 变化到 10.1% 时,NO_x 从 2.101×10^{-4} 降低到 1.465×10^{-4} ,共下降了 30.27%。

3.4 EGR 率对烟度的影响

图 8 为 900 r/min 和 1 500 r/min 转速下,负荷分别为 25%、50%、75% 时烟度随 EGR 率的变化曲线。由图 8 可知,烟度的变化趋势与 NO_x 排放量的变化趋势基本相反。小负荷时,烟度几乎不随着 EGR 率变化或变化很小。随着负荷的增加,烟度增大,同时随 EGR 率的增加,烟度的增幅也变大。同转速下,高烟度区向大负荷、高 EGR 率区域转移。变化的主要因素来源于空燃比和缸内局部的温度。

如 900 r/min,25% 负荷时,EGR 率变化初期烟度排放值基本保持不变,当 EGR 率增至约 9% 时,烟度才明显上升,此后随着 EGR 率的不断增大,烟

度基本呈指数曲线大幅度上升。随着 EGR 率不断增大,较之低负荷工况点,高负荷下烟度突变点也相应的提前,在 900 r/min、75% 负荷工况下,烟度在 EGR 率达到 5.4% 时发生突变,剧烈增加。这主要由于在相同转速下,负荷越高,空燃比越小,EGR 率对空燃比的影响对缸内燃烧作用就越敏感,产生的效果就越突出,同时缸内温度的上升,加剧了二次燃烧,致使该工况下烟度排放提高。在高负荷下,EGR 对烟度排放的负面影响越发明显,因此在高负荷工况点下,柴油机应控制 EGR 率避免过高。

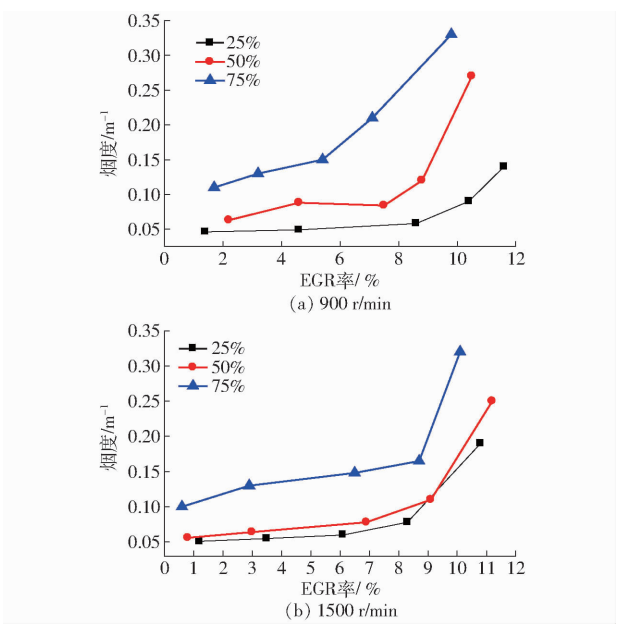


图 8 不同 EGR 率对烟度的影响

Fig. 8 Effects of different EGR rates on SOOT

4 最佳 EGR 率的确定

试验结果表明,不同 EGR 率对增压柴油机燃烧与排放改善效果是不同的。由于本试验条件的限制以及加工条件受限,导致在进排气混合的过程中,压力有一定损失,最高 EGR 率也被限制在 15%,获得的数据点也有限。考虑到多目标灰色决策理论在解决少数数据决策问题上的独特优势^[17-20],本文考虑引入多目标决策方法。

4.1 基本模型

灰色决策是灰色理论的重要组成部分^[21],传统多目标灰色决策模型的主要构成部分包括事件集、对策集、局势集、决策目标以及决策权重等。

(1) 根据事件集和对策集构造相应的局势集。设 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为事件集,对策集为 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $s = \{s_{ij} = (a_i, b_j) \mid a_i \in A, b_j \in B\}$ 称为局势集, $u_{ij}^{(k)} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 为局势 s_{ij} 在 k 目标下的效果样本值。

(2) 选取决策目标,每个决策目标都需要确定

其效果测度,其中上限效果测度为

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

主要着眼于衡量白化值偏离最大白化值的程度。

下限效果测度为

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

主要着眼于白化值偏离下限的程度。

适中效果测度为

$$r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i_0j_0}^{(k)}}{u_{i_0j_0}^{(k)} + |u_{ij}^{(k)} - u_{i_0j_0}^{(k)}|} \tag{3}$$

式中 $u_{i_0j_0}^{(k)}$ —— k 目标下的指定效果适中值

这 3 种测度分别适用于不同场合: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。

(3) 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

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

式中 $r_{ij}^{(k)}$ 为局势 s_{ij} 的一致效果测量向量。

(4) 确立决策权重 $\eta_k (k = 1, 2, \dots, s)$, 其中

$\sum_{k=1}^s \eta_k = 1$; 求解局势 s_{ij} 的综合效果测度 r_{ij} 和综合效果测度矩阵为

$$R = [r_{ij}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中 $r_{ij} = \sum_{k=1}^s \eta_k r_{ij}^{(k)}$ (6)

(5) 若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{ij_0}$ 则称 b_{j_0} 为事件 a_i 的最优对策; 若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0j}$ 则称 a_{i_0} 为对策 b_j 相对应的最优事件, 若 $\max_{1 \leq j \leq m} \{r_{ij}\} = r_{i_0j_0}$ 则称 $s_{i_0j_0}$ 为最优局势。

4.2 模型优化

由上述原理可以看出,决策目标和对应的目标权重在传统决策模型中占据主要因素。考虑到 EGR 率对柴油机动力性、经济性及排放性的综合影响,本文选取燃油消耗率、CO、NO_x、烟度及缸内爆压作为决策目标,不同的决策目标代表着柴油机不同方面的性能,从而将不同性能之间的问题转换为决策目标权重问题。

通常,决策权重的分配都由决策者按照决策目标的重要程度予以赋值,虽然一定程度上可以充分发挥专业人士或专家的经验特长,但是,单纯依靠主观判断会使得最终的决策结果缺乏客观合理性。此外,不同于一般决策问题,最优 EGR 率的决策需要综合考虑柴油机动力性、经济性及排放性等因素,无论是单纯的主观赋值法还是客观赋权法,都无法满足 EGR 的实际特点。因此,本文考虑以最优 EGR 率的确定基本原则为优化背景,采用主客观综合赋权方法来实现决策模型的优化,并最终选择采用基于专家打分和灰关联分析的权重优化方法,从而更好地贴近 EGR 优化原则。

作为灰色系统理论中一个重要分支,灰色关联分析主要是通过动态过程发展态势的量化分析,完成对系统内序列几何关系的比较,求出参考数列与各比较数列之间的灰关联程度,与参考数列关联度越大的比较数列,与参考数列的关系越紧密。具体建模过程不再赘述,可参考文献[21-22]。

(1)EGR 的主要目的在于有效降低 NO_x 污染物的排放,考虑到不同工况 EGR 的不同运行特点,首先根据柴油机不同转速对决策目标 NO_x 进行赋值:若柴油机处于低转速工况 ($n \leq 900$ r/min),NO_x 排放浓度较低,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 $\eta_3 = 0.3$ 。若柴油机处于高转速工况 ($n > 1\,200$ r/min),NO_x 排放浓度较高,为了有效降低柴油机排放污染物,宜采用较大 EGR 率,因此令 NO_x 权重 $\eta_3 = 0.5$ 。若柴油机处于中等转速工况 (900 r/min $< n \leq 1\,200$ r/min),NO_x 排放浓度逐步升高,因此令 $\eta_3 = 0.4$ 。

(2)由于不同决策目标分别反映着柴油机不同方面的性能,因此各指标之间必然存在着一定的内在联系,笔者认为可以将这种关系看成一种特定的“灰关系”。在本研究中,主要考虑的因素是 NO_x 的改善情况,其次再去权衡其他性能指标的影响,因此本文考虑引入灰关联分析来计算 NO_x 与其他决策目标之间的灰关联系数,从而作为分配权重的依据。

将不同 EGR 率下对应的 NO_x 排放量(包括原机)作为母序列;以其他 4 个评价指标对应的数值(包括原机值)作为子序列;求解其他 4 个决策指标与 NO_x 指标之间的关联度, $r'_i (i = 1, 2, 3, 4)$,进而得到它们之间的关联系数为

$$r_i = \frac{r'_i}{\sum_{i=1}^4 r'_i} \tag{7}$$

已知 η_3 和 r_i ,由 $r_i (1 - \eta_3)$ 求解其他 4 个决策目标权重值 $\eta_k (k = 1, 2, 4, 5)$,并构成最终的优化权

重 $\eta_k (k = 1, 2, 3, 4, 5)$ 。

(3)将优化权重 $\eta_k (k = 1, 2, 3, 4, 5)$ 返回到决策模型中,重新得到优化后决策结果。

该方法以不同工况 EGR 运行特点为出发点,根据不同转速下 NO_x 排放量变化,通过专家打分来赋值 NO_x 指标权重,再利用灰关联分析求解其他决策目标与 NO_x 之间的紧密程度,从而求解所有决策目标的权重,再将优化后的权重向量代入决策模型中,对不同 EGR 率对应的性能程度进行综合评价。

4.3 评估及决策结果分析

任意选取试验中 3 个工况点,分别对应低、中、高转速工况。其中部分工况点试验数据详见表 3。

表 3 部分工况点试验数据
Tab.3 Part of test data

工况	EGR 率/%	燃油消耗率/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	φ _{CO}	φ _{NO_x}	烟度/ m ⁻¹	缸内爆 压/MPa
工况 1	0	236.3	3.090 0 × 10 ⁻⁴	1.093 0 × 10 ⁻³	0.045	7.646 2
	2.2	241.6	3.165 7 × 10 ⁻⁴	1.104 5 × 10 ⁻³	0.063	7.254 5
	4.6	242.7	3.355 3 × 10 ⁻⁴	1.002 6 × 10 ⁻³	0.088	7.210 8
	7.5	243.9	3.667 0 × 10 ⁻⁴	9.435 0 × 10 ⁻⁴	0.084	7.139 3
	8.8	246.9	4.278 4 × 10 ⁻⁴	8.906 5 × 10 ⁻⁴	0.120	7.016 7
	10.5	248.7	5.036 2 × 10 ⁻⁴	7.836 0 × 10 ⁻⁴	0.270	6.956 8
工况 2	0	230.1	1.880 × 10 ⁻⁴	8.250 × 10 ⁻⁴	0.035	6.685 9
	0.5	230.5	1.962 × 10 ⁻⁴	7.832 × 10 ⁻⁴	0.041	6.542 8
	3.5	234.6	2.113 × 10 ⁻⁴	7.432 × 10 ⁻⁴	0.049	6.359 5
	6.8	236.1	2.294 × 10 ⁻⁴	6.691 × 10 ⁻⁴	0.053	6.305 2
	9.5	242.9	2.735 × 10 ⁻⁴	5.435 × 10 ⁻⁴	0.090	6.048 5
	12.6	244.3	3.806 × 10 ⁻⁴	4.974 × 10 ⁻⁴	0.270	5.927 4
工况 3	0	257.5	1.800 × 10 ⁻⁴	8.100 × 10 ⁻⁴	0.035	8.250 4
	1.2	256.7	1.962 × 10 ⁻⁴	8.324 5 × 10 ⁻⁴	0.051	7.799 6
	3.5	259.9	2.113 × 10 ⁻⁴	7.863 0 × 10 ⁻⁴	0.055	7.617 6
	6.1	261.3	2.294 × 10 ⁻⁴	7.016 0 × 10 ⁻⁴	0.060	7.517 1
	8.3	266.8	2.735 × 10 ⁻⁴	6.435 0 × 10 ⁻⁴	0.078	7.410 5
	10.8	268.1	3.806 × 10 ⁻⁴	5.897 0 × 10 ⁻⁴	0.190	7.196 5

(1)工况 1

EGR 率分别选取 2.2%、4.6%、7.5%、8.8% 和 10.5%;不同 EGR 率下各指标参数的试验数据构成了效果样本矩阵为

$$u_{ij}^{(5)} = \begin{bmatrix} 241.6 & 316.57 & 1\,104.5 & 0.063 & 7.254\,5 \\ 242.7 & 335.53 & 1\,002.6 & 0.088 & 7.210\,8 \\ 243.9 & 366.70 & 943.50 & 0.084 & 7.139\,3 \\ 246.9 & 427.84 & 890.65 & 0.120 & 7.016\,7 \\ 248.7 & 503.62 & 783.60 & 0.270 & 6.956\,8 \end{bmatrix}$$

其中,矩阵中行向量 i 代表依次代表燃油消耗率、CO 排放量、NO_x 排放量、烟度和缸内爆压,列向量 j 代表不同 EGR 率。

首先,求得 k 目标下一致效果测度矩阵为

$$r_{ij}^{(5)} = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.995\ 5 & 0.990\ 6 & 0.978\ 5 & 0.971\ 5 \\ 0.959\ 0 & 0.964\ 8 & 0.974\ 4 & 0.991\ 5 & 1.000\ 0 \\ 0.709\ 5 & 0.781\ 6 & 0.830\ 5 & 0.879\ 8 & 1.000\ 0 \\ 1.000\ 0 & 0.715\ 9 & 0.750\ 0 & 0.525\ 0 & 0.233\ 3 \\ 1.000\ 0 & 0.943\ 5 & 0.863\ 3 & 0.739\ 9 & 0.628\ 6 \end{bmatrix}$$

构建灰色关联序列：
母序列
 $X_0 = [1\ 093\ 1\ 104.5\ 1\ 002.6\ 943.5\ 890.65\ 783.6]$

子序列
 $X_1 = [236.3\ 241.6\ 242.7\ 243.9\ 246.9\ 248.7]$
 $X_2 = [316.57\ 335.53\ 366.7\ 427.84\ 503.62]$
 $X_3 = [0.045\ 0.063\ 0.088\ 0.084\ 0.12\ 0.27]$
 $X_4 = [7.254\ 5\ 7.210\ 8\ 7.139\ 3\ 7.016\ 7\ 6.956\ 8]$

通过计算可得燃油消耗率、缸内爆压、烟度及 CO 与 NO_x 的关联系数为

$$r_i = [0.282\ 4\ 0.287\ 9\ 0.209\ 5\ 0.220\ 2]$$

因该工况属于低转速工况,因此 $\eta_3 = 0.3$, 则可得到优化后综合权重向量 η_k 为

$$\eta_k = [0.197\ 7\ 0.201\ 5\ 0.300\ 0\ 0.146\ 6\ 0.154\ 2]$$

最后求得综合效果测度矩阵,并根据最优原则进行优劣排序

$$R = [0.904\ 6\ 0.876\ 1\ 0.884\ 4\ 0.848\ 2\ 0.824\ 7]$$

根据最优决策原则可知,该工况下不同 EGR 率对应的性能影响由大到小为 2.2%、7.5%、4.6%、8.8%、10.5%, 即该工况最佳 EGR 率为 2.2%。

由结果可以看出,较低 EGR 率对应的综合评估值较高,随着 EGR 率的增大,相应的综合评估值下降较为明显,因此宜采用较小 EGR 率。分析其原因,当柴油机处于低速工况时,NO_x 排放量较低,为了保证充分的动力经济性,不宜采取 EGR 或者较低 EGR 率。

(2) 工况 2
同理可知,工况 2 属于中等转速工况,故 $\eta_3 = 0.4$, 最终求解优化后权重为

$$\eta_k = [0.160\ 8\ 0.166\ 1\ 0.400\ 0\ 0.133\ 1\ 0.140\ 0]$$

最终的加权综合评估值

$$R = [0.828\ 4\ 0.821\ 9\ 0.833\ 2\ 0.842\ 5\ 0.810\ 2]$$

则该工况下不同 EGR 率对应的性能影响由大到小为:9.8%、6.8%、0.8%、3.1%、12.3%, 该工况下最佳 EGR 率为 9.8%。

由结果可以看出,当 EGR 率小于 9.5% 时,随着 EGR 率的增大,不同 EGR 率对应的综合评估值呈增大趋势,当 EGR 率增大至 12.3% 时,对应的综合评估值反而下降。原因为:当柴油机处于中等速度工况时,NO_x 排放量逐渐升高,较低 EGR 率已经无法满足降低 NO_x 污染物的要求,因此应该适当增

大 EGR 率,但是为了同时保证柴油机良好的加速性能,EGR 率增大的不宜过大。

(3) 工况 3
工况 3 属于高转速工况,因此 $\eta_3 = 0.5$, 最终求解优化后权重为

$$\eta_k = [0.138\ 9\ 0.140\ 9\ 0.500\ 0\ 0.104\ 9\ 0.115\ 2]$$

最终的加权综合评估值

$$R = [0.843\ 3\ 0.849\ 6\ 0.879\ 4\ 0.880\ 0\ 0.861\ 5]$$

则该工况下不同 EGR 率对应的性能影响由大到小为:8.3%、6.1%、10.8%、3.5%、1.2%, 该工况对应的最佳 EGR 率为 8.3%。

由结果可知,当 EGR 率小于 3.5% 时,不同 EGR 率对应的评估值比较接近,当 EGR 率大于 3.5% 时,综合评估值呈明显增大趋势,当 EGR 率增至 10.8% 时,综合评估值呈现出下降趋势。分析其原因,当柴油机处于高速工况时,NO_x 排放量较高,必须采取较大 EGR 率才能有效降低 NO_x 污染物,但是当 EGR 率过高时,过量 EGR 废气的引入可能会对柴油机动力性能造成损失,因此,在上述仿真结果中,过高 EGR 率对应的综合评估值反而下降。

对比分析工况 2 和工况 3 可以看出,当柴油机处于中、高速工况时,较高 EGR 率都获得了更高的评估值,而过高的 EGR 率的评估值反而下降,但是,区别于工况 2,在工况 3 中较低 EGR 率获得的评估值最低,而工况 2 中则是过高 EGR 率获得评估值最低。分析其原因为:当柴油机处于中等速度工况时,为了保证柴油机的加速性能,通常不宜采用过高 EGR 率,因此,相比与过高 EGR 率,中低 EGR 率对应的评估值相对较高;而当柴油机处于高速工况时,降低排放的需求相对更高更严格,较低 EGR 率对柴油机的改善效果较差,因此对应的评估值也最小,而较高 EGR 率对柴油机的改善效果更佳,也就获得更高的评估值。

5 结论

(1) 以 TDB234V12 型柴油机为研究对象,选定原机的额定工况点为设计点,计算出匹配柴油机的文丘里管结构,可以满足废气的引射要求,有效改善柴油机的排放性能。

(2) 当柴油机按负荷特性稳定运行时,采用 EGR 循环,可以有效地降低 NO_x 的排放量,特别是在高转速时效果更为明显,NO_x 的排放量随着 EGR 率的升高而明显降低,当 EGR 率升高到 8% 左右,NO_x 均能降低 25% 左右,而烟度及油耗等小幅增长。

(3) EGR 率的增加导致燃烧始点和终点都有不

同程度的延迟。低负荷时,油耗呈小幅度升高,同一转速下,油耗在高负荷工况点升高较负荷明显;低负荷时 EGR 率对烟度的影响效果不大;当 EGR 率增大到 9% 左右时,随着 EGR 率的增加,烟度基本呈指数曲线上升;较之低负荷工况点,高负荷下烟度值突变点相应提前。

(4) 基于灰关联分析优化的多目标灰色决策方

法实现了不同 EGR 率性能综合评估。低转速工况宜采用较小 EGR 率,随着柴油机转速提升,较高 EGR 率取得更好的评估值,但是当转速过高时,过高的 EGR 率对应的评估值反而下降。该方法实现过程简单,有助于解决目前最佳 EGR 率确定过程中对主观判断的单一依赖,提高了决策结果的合理性,为 EGR 的优化研究提供了一种研究思路。

参 考 文 献

- 1 蔡忆昔,郑益,施蕴曦,等. 空气源 NTP 喷射系统再生 EGR 冷却器试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):349-354.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160148&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.048.
CAI Yixi,ZHENG Yi,SHI Yunxi,et al. Experimental study of EGR cooler regeneration by air-fed NTP injection system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):349-354. (in Chinese)
- 2 赵洋,王忠,刘帅,等. 废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):280-285.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150740&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.040.
ZHAO Yang,WANG Zhong,LIU Shuai,et al. Effect of gas composition in exhaust gas recirculation on structural feature of particulates from diesel engine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):280-285. (in Chinese)
- 3 LUJÁN J M, GALINDO J, VERA F, et al. Characterization and dynamic response of an exhaust gas recirculation venturi for internal combustion engines [J]. Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(4):497-509.
- 4 董天普,张付军,刘波澜,等. EGR 对涡轮增压柴油机瞬态特性的影响[J]. 内燃机学报,2017,35(2):118-124.
DONG Tianpu,ZHANG Fujun,LIU Bolan,et al. Effect of EGR on transient characteristics of turbocharged diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2017,35(2):118-124. (in Chinese)
- 5 ASAD U, ZHENG Ming. Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles [J]. Applied Energy,2014,123:242-252.
- 6 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,2012,33(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. (in Chinese)
- 7 陈贵升,吴伟,沈颖钢,等. 不同 EGR 循环方式对重型柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 内燃机工程,2014,35(2):20-26.
CHEN Guisheng, WU Wei, SHEN Yinggang, et al. Influence of different EGR cycle modes on combustion and emission characteristics of heavy-duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(2):20-26. (in Chinese)
- 8 吴君华,黄震,乔信起,等. 废气再循环对增压二甲醚发动机性能和排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报,2008,26(2):147-152.
WU Junhua, HUANG Zhen, QIAO Xinqi,et al. Experimental study of EGR on performance and emissions of a turbocharged DME engine[J]. Transactions of CSICE, 2008,26(2):147-152. (in Chinese)
- 9 倪计民,刘越,石秀勇,等. 可变喷嘴涡轮增压及废气再循环系统改善柴油机排放性能[J]. 农业工程学报,2016,32(16):82-88.
NI Jimin, LIU Yue, SHI Xiuyong, et al. Variable nozzle turbine combined with venturi exhaust gas recirculation system improving emission performance of diesel engines[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(16):82-88. (in Chinese)
- 10 郭鹏江,王天灵,李德刚,等. 利用文丘里管和 VNT 提高柴油机 EGR 率的研究[J]. 内燃机学报,2009,27(2):140-145.
GUO Pengjiang,WANG Tianling,LI Degang, et al. Study on increasing EGR rate of diesel engine with venturi pipe and VNT[J]. Transactions of CSICE, 2009,27(2):140-145. (in Chinese)
- 11 王琦玮,倪计民,陈泓,等. 文丘里管废气再循环系统对涡轮增压柴油机性能影响的研究[J]. 机械工程学报,2016,52(4):157-164.
WANG Qiwei, NI Jimin, CHEN Hong, et al. Study on the effects of Venturi-EGR system on turbo-charged diesel engine performance[J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(4):157-164. (in Chinese)
- 12 杨帅,李秀元,应启夏,等. EGR 率对柴油机排放特性影响的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(5):29-33.
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 for Agricultural Machinery, 2006,37(5):29-33. (in Chinese)
- 13 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 Yiho, 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. (in Chinese)
- 14 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.
ZHANG Zhenkun. Study on NO_x displacement of marine diesel engine with EGR[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)

- the principle of its motion decoupling[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 108: 27 – 40.
- 15 李秦川, 柴馨雪, 陈巧红, 等. 2 – UPR – SPR 并联机构转轴分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 62 – 69.
LI Qinchuan, CHAI Xinxue, CHEN Qiaohong, et al. Analysis of rotational axes of 2 – UPR – SPR parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 62 – 69. (in Chinese)
 - 16 张东胜, 许允斗, 姚建涛, 等. 五自由度混联机器人逆动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 384 – 390. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170949&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.049.
ZHANG Dongsheng, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Inverse dynamic analysis of a novel 5-DOF hybrid manipulator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 384 – 390. (in Chinese)
 - 17 解则晓, 商大伟, 任凭. 基于 Lamé 曲线的 Delta 并联机器人拾放操作轨迹的优化与试验验证[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 52 – 59.
XIE Zexiao, SHANG Dawei, REN Ping. Optimization and experimental verification of pick-and place trajectory for a Delta parallel robot based on Lamé curves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 52 – 59. (in Chinese)
 - 18 WANG P, HUO X, WANG Z. Topology design and kinematic optimization of cyclical 5-DOF parallel manipulator with proper constrained limb[J]. Advanced Robotics, 2017, 31(4): 204 – 219.
 - 19 朱大昌, 冯文结, 安梓铭. 整体式平面三自由度全柔顺并联机构构型拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 30 – 36.
ZHU Dachang, FENG Wenjie, AN Ziming. Topology optimization integrated design of 3-DOF fully compliant planar parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 30 – 36. (in Chinese)
 - 20 WANG Hao, ZHANG Linsong, CHEN Genliang, et al. Parameter optimization of heavy-load parallel manipulator by introducing stiffness distribution evaluation index[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 108: 244 – 259.
 - 21 XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Jinsong, et al. Kinematic optimization of a five degrees-of-freedom spatial parallel mechanism with large orientational workspace[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 9(5): 051005.
 - 22 LIU X J, WANG L P, XIE F, et al. Design of a three-axis articulated tool head with parallel kinematics achieving desired motion/force transmission characteristics[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(2): 021009.
 - 23 郭希娟, 耿清甲. 串联机器人加速度性能指标分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 56 – 60.
GUO Xijuan, GENG Qingjia. Analysis for acceleration performance indices of serial robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 56 – 60. (in Chinese)
 - 24 TANG Tengfei, ZHANG Jun. Conceptual design and comparative stiffness analysis of an Exechon-like parallel kinematic machine with lockable spherical joints[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(4): 1 – 13.

(上接第 396 页)

- 15 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.
WEN Yongmei. The simulation analysis of EGR on the combustion and emission characteristics of diesel engine[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2012. (in Chinese)
- 16 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.
DU Jun. Calculation and experimental research with EGR system for V type diesel engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2013. (in Chinese)
- 17 ALONSO S, HERRERA-VIEDMA E, CHICLAN F, et al. A web based consensus support system for group decision making problems and incomplete preferences[J]. Information Sciences,2010,180(23): 4477 – 4495.
- 18 梅年峰, 罗学东, 蒋楠, 等. 基坑支护方案灰色多目标决策优选模型的建立与应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013, 44(5):1982 – 1987.
MEI Nianfeng, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. Establishment and application of grey multi-objective decision-making optimization model for foundation pit supporting schemes[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(5):1982 – 1987. (in Chinese)
- 19 WANG Yinyan, DU Jianwei, WANG Hechun, et al. Grey decision making theory approach to the turbocharged diesel engine[C]// Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services,2007:784 – 788.
- 20 顾雪平, 赵宝斌, 刘文轩. 结合多目标优化与灰色关联决策的负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(9): 6 – 13.
GU Xueping, ZHAO Baobin, LIU Wenxuan. Load restoration based on multi-objective optimization and grey incidence decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9): 6 – 13. (in Chinese)
- 21 LIU S F, LIN Y. Grey information: theory and practical applications[M]. Springer-Verlag, London,2006.
- 22 宁小磊, 吴颖霞, 于天朋, 等. 基于改进灰色关联分析的仿真模型综合验证方法[J]. 兵工学报,2016, 37(2):338 – 347.
NING Xiaolei, WU Yingxia, YU Tianpeng, et al. Research on comprehensive validation of simulation models based on improved grey relational analysis[J]. Acta Armamentarii, 2016,37(2):338 – 347. (in Chinese)