

doi: 10.7690/bgzdh.2022.08.015

增程器发动机性能开发仿真分析

赵光勇

(绵阳新晨动力机械有限公司技术中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为开发增程专用发动机, 应用 GT-POWER 软件建立某 2.0 L 汽油发动机性能仿真模型。通过热力学仿真计算分析, 优化气门升程曲线和配气相位, 实现阿特金森循环; 预测发动机功率、扭矩、油耗等性能指标, 提出发动机配气相位推荐方案。结果表明, 该模型可为发动机正向开发及性能仿真分析提供技术支持。

关键词: 增程器; GT-POWER; 发动机性能; 阿特金森

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation Analysis on Performance Development of Range Extender Engine

Zhao Guangyong

(Technology Center, Mianyang Xincheng Power Engine Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to develop a special extended-range engine, the performance simulation model of a 2.0 L gasoline engine was established by using GT-power software. Through thermodynamic simulation calculation and analysis, the valve lift curve and valve timing are optimized to realize Atkinson cycle. The performance indexes such as engine power, torque and fuel consumption are predicted, and the recommended scheme of engine valve timing is put forward. The results show that the model can provide technical support for engine forward development and performance simulation analysis.

Keywords: range extender; GT-POWER; engine performance; ATKINSON

0 引言

随着新能源汽车的市场占有率不断提高, 内燃机在轻型汽车动力中的地位逐渐发生变化, 从内燃机单独驱动逐渐演变为内燃机和电机共同驱动, 混合动力系统更加充分利用发动机的高效区域, 特别是增程混合动力系统, 要求内燃机运行范围变窄。开发增程专用发动机, 进一步提高其热效率, 简化机构, 降低成本, 成为当今内燃机开发的重要方向之一。

阿特金森循环是近年来汽油机提高热效率措施的热门研究方向, 该技术已广泛运用在国外的混动发动机上, 得到了市场认可。笔者基于增程发动机的动力性和经济性需求, 结合发动机原理知识^[1-5], 在某 2.0 L 传统奥托循环发动机基础上, 应用高压压缩比、低压 EGR、阿特金森循环、低摩擦等降油耗技术措施, 建立增程发动机的仿真模型, 预测发动机功率、扭矩、油耗等性能指标, 提出热力学仿真的发动机配气相位推荐方案。

1 仿真分析模型

1.1 汽油机主要参数

笔者研究的是一款搭载 2.0 L 排量汽油发动机,

基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要参数

序号	发动机主要参数	参数值
1	排量/L	1.998
2	缸径 \times 行程/mm	86 \times 86
3	压缩比	10.5
4	最大功率/kW	100
5	最大扭矩/(N·m)	190
6	排放水平	国六 b+RDE
7	最低燃油消耗率/(g/kW·h)	240

1.2 模型介绍

GT-POWER 是由美国 Gamma Technologies 公司开发的多物理场仿真分析系列套装软件 GT-SUITE 中发动机性能仿真分析的专业模块。笔者在 GT-POWER 软件中建立发动机仿真模型, 包括进气管路、空滤、节气阀体、进气歧管、进排气门和气缸几何参数、排气歧管、催化器、排气管路等发动机系统的主要部件, 模型界面如图 1 所示。

1.3 模型校正

在模型建立完成后, 根据参考发动机的台架试验数据对模型进行校正, 通过对进气管内压力、缸内容积效率、排气背压、缸内压力、排气温度、摩擦损失等参数校正后, 发动机功率、扭矩、燃油消

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-08

作者简介: 赵光勇(1970—), 男, 四川人, 工程师, 从事汽车发动机性能开发及仿真分析研究。E-mail: Guangyong.zhao@xce.com.cn.

耗率、气体流量等指标与试验数据很接近，误差控制在 3%以内，满足后续仿真优化分析的精度要求。

校正完成后，根据发动机的硬件配置状态，在模型中增加 EGR 管路和流量控制器。

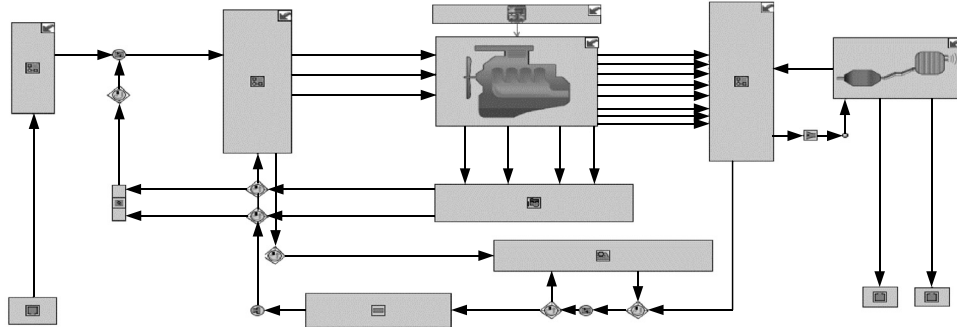


图 1 发动机仿真模型

2 仿真分析

基础发动机采用传统奥托循环，最低燃油消耗率为 240 g/kW·h。项目计划开发的增程器专用发动机最低燃油消耗率的目标为 220 g/kW·h。由于增程器运行转速和负荷范围很窄，主要工作在最低燃油消耗率附近工况；因此，开发的重点在于降低发动机最低燃油消耗率。

在不改变基础发动机重大结构前提下，降低燃油消耗率主要有低压 EGR、低摩擦、高压压缩比、阿特金森循环等技术措施。低压 EGR 及低摩擦措施在完成校正的仿真模型中已配置，阿特金森循环^[6-8]通过改变发动机正时，延缓进气门关闭时间的方法，实现了膨胀比大于压缩比的效果。阿特金森发动机具有高压压缩比、大进气门包角、进气门晚关等主要特征。笔者分析的重点是优化气门升程曲线、配气

相位和压缩比，实现阿特金森循环，降低发动机的燃油消耗率。

2.1 进排气门升程曲线优化

2.1.1 模型优化设置

进排气门升程曲线优化选取 2 800r/min 8 bar，2 400 r/min 6 bar，2 400 r/min 4 bar，2 000 rpm 2 bar 4 个常用部分负荷工况。同时改变模型中进排气门升程系数、包角系数和相位，运用软件自带的高级优化遗传算法，以最小燃油消耗率为优化目标，根据本项目作为增程器发动机的运行特点，4 个工况权重系数分别设定为 0.5、0.2、0.2、0.1。为保证优化结果数据收敛，需增加平均有效压力 (brake mean-effective pressure, BMEP) 和内部 EGR 率控制条件。软件设置的自变量界面如图 2 所示。

Attribute	Unit	1	2	3	4	5	6
Parameter to be Varied		VVT_int...	VVT_exh...	INT-ANG-MUL...	ex_angle_mul...	ex_lift_mul...	INT-LIFT-MUL...
Case Handling		Independent	Independent	Sweep	Sweep	Sweep	Sweep
Parameter Range							
Lower Value of the Range		-50.0	-30.0	0.999	0.88	0.8	0.926
Upper Value of the Range		10.0	20.0	1.18	1.001	1.001	1.028

图 2 气门升程曲线优化软件界面

2.1.2 优化结果分析

优化工具通过调整进气相位、排气相位、进气包角系数、排气包角系数、排气升程系数、进气升程系数 6 个自变量，经过 200 多次迭代计算后，加权的发动机燃油消耗率逐渐趋于最小值，如图 3 所示；4 个仿真工况燃油消耗率逐渐稳定，如图 4 所示；限制条件 BMEP 也逐渐趋于稳定，如图 5 所示；内部 EGR 率达到小于 20%的限制条件，如图 6 所示。上述各项指标逐渐收敛，满足优化计算的设定

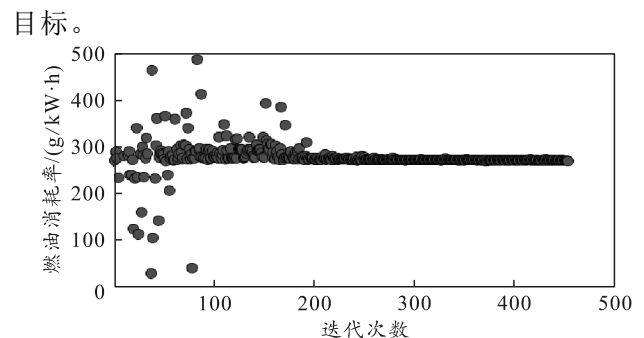


图 3 加权发动机燃油消耗率

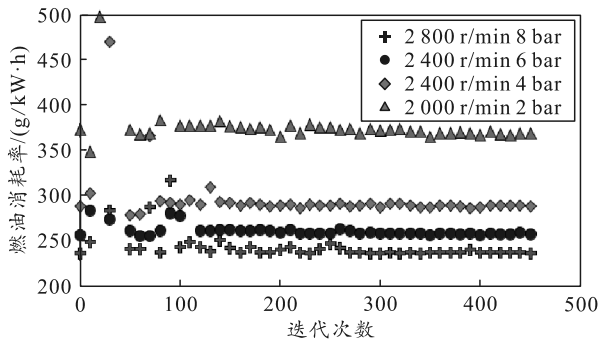


图 4 工况燃油消耗率

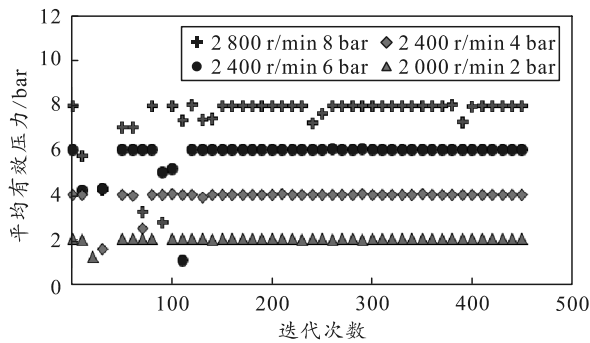


图 5 工况 BMEP

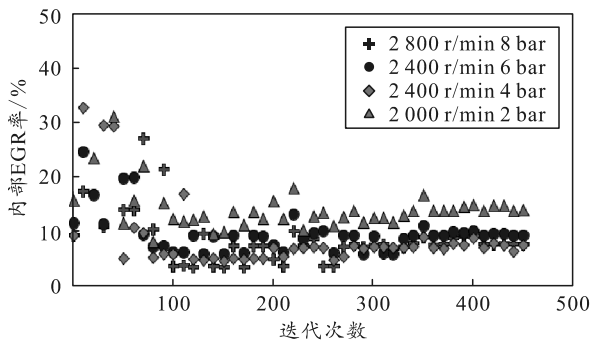
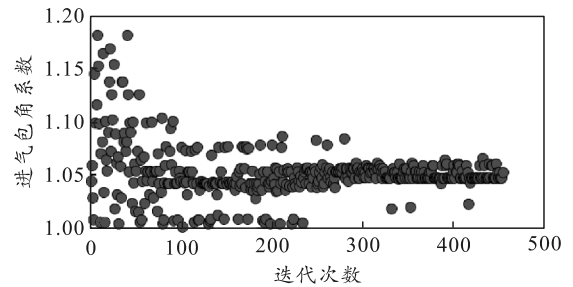
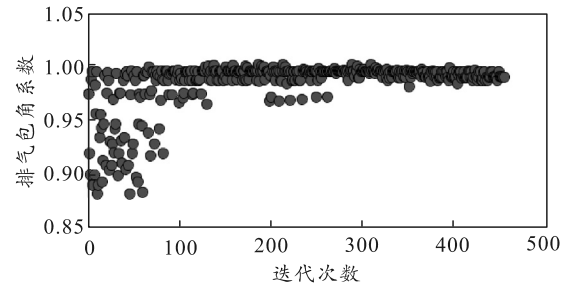


图 6 内部 EGR 率

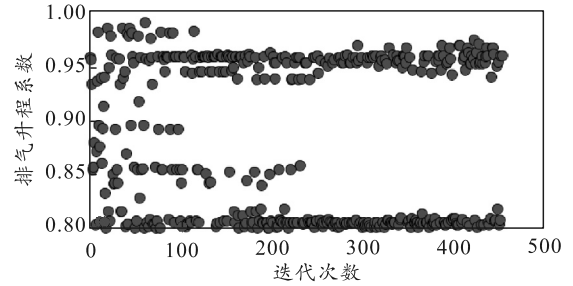
气门升程和包角系数优化结果如图 7 所示。根据最小的燃油消耗率优化目标，选取相对应的发动机气门升程和包角系数，生成优化后的气门升程曲线，如图 8 所示。



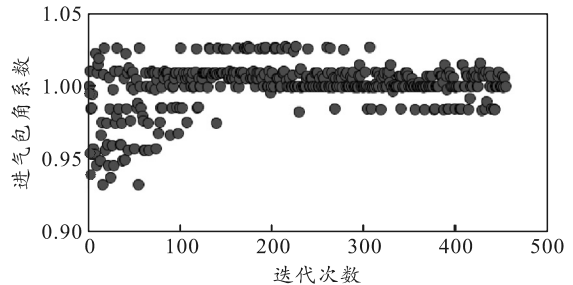
(a) 进气包角系数



(b) 排气包角系数



(c) 排气升程系数



(d) 进气升程系数

图 7 气门升程和包角系数

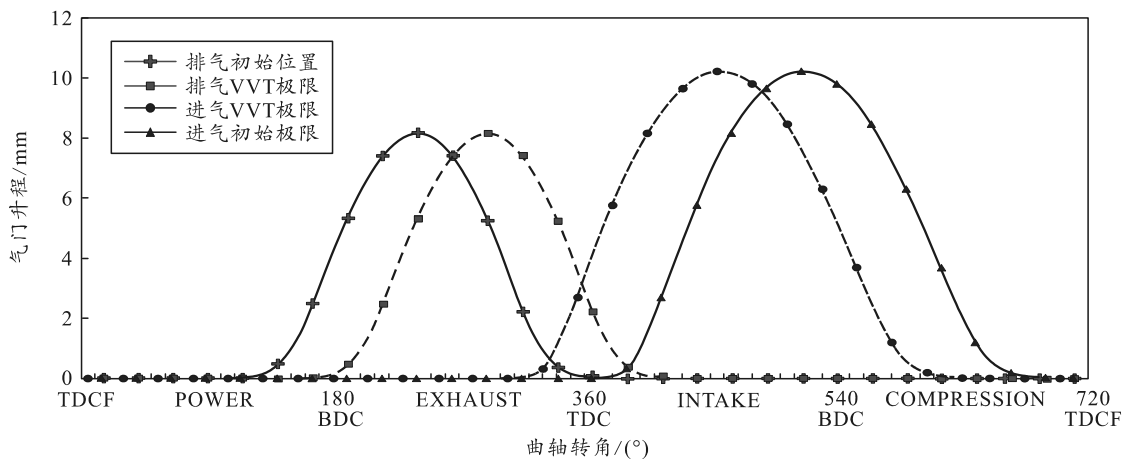


图 8 优化后气门升程曲线

2.2 发动机压缩比分析

压缩比是影响发动机燃油消耗率的重要参数。笔者运用软件自带的试验设计 (design of experiment, DOE) 分析工具, 选取 2 800 r/min 8 bar 工况点, 对不同压缩比与燃油消耗率的关系进行了仿真分析, 结果如图 9 所示。

从上图可看出, 随着压缩比增加, 燃油消耗率逐渐降低。根据燃油消耗率的开发目标和机械结构设计因素综合考虑后, 选择推荐压缩比为 13.5。

2.3 进排气门相位优化

确定气门升程曲线和压缩比后, 因仿真发动机万有特性图的需要, 对外特性和更多的部分负荷工况进行配气相位 (variable valve timing, VVT) 优化分析。外特性工况以最大 BMEP 为优化目标, 部分

负荷工况以最小燃油消耗率 (brake specific fuel consumption, BSFC) 为优化目标, 同时限制内部和外部 EGR 率, 运用软件自带的直接优化工具, 确定模型中所有工况的最佳进排气相位, 仿真结果如图 10、11 所示。

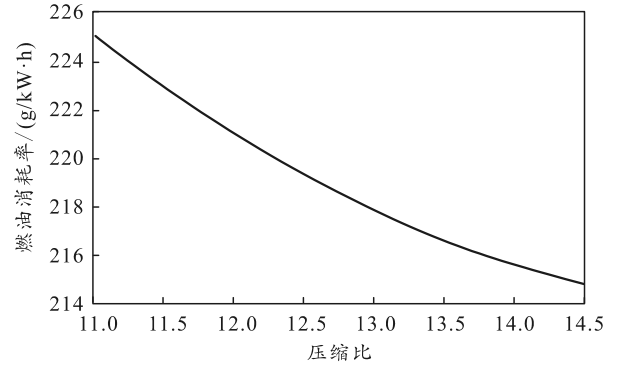


图 9 压缩比对油耗率的影响

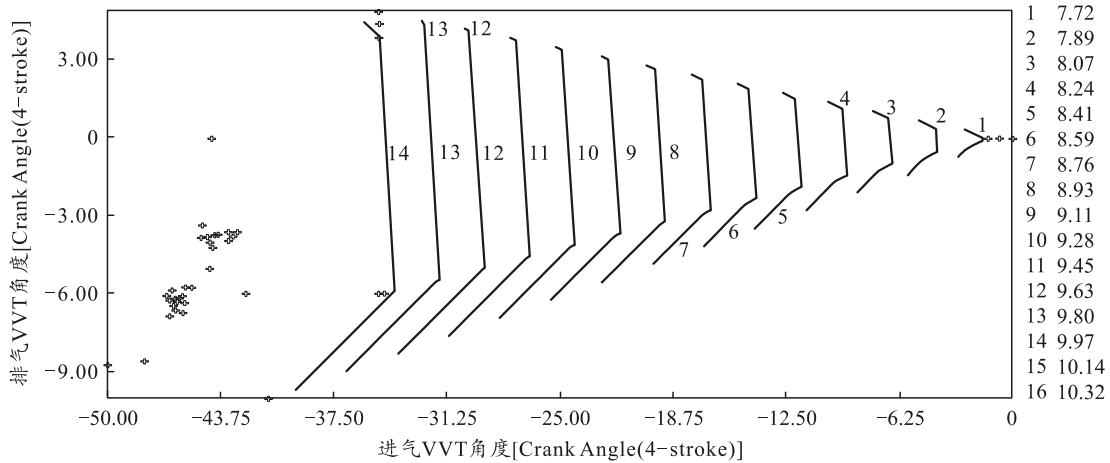


图 10 外特性工况 (2 800 r/min) 优化结果

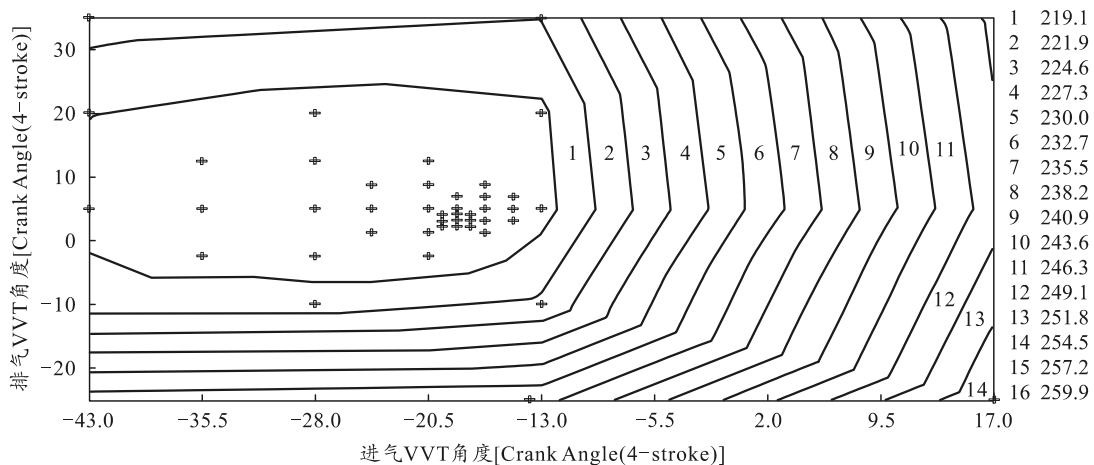


图 11 部分负荷工况 (3 200 r/min 8 bar) 优化结果

3 发动机性能仿真分析

通过上述仿真分析流程后, 确定了发动机进排气门升程曲线和压缩比, 并找到了各工况最佳的配 VVT, 然后进行发动机万有特性工况的仿真计算,

预测出发动机功率、扭矩、燃油消耗率等性能指标。仿真模型共设置 60 个工况点, 结果显示发动机最低燃油消耗率为 218.2 g/kW·h, 比基础机型下降 9.08%, 达到了预期目标。仿真结果如图 12 所示。

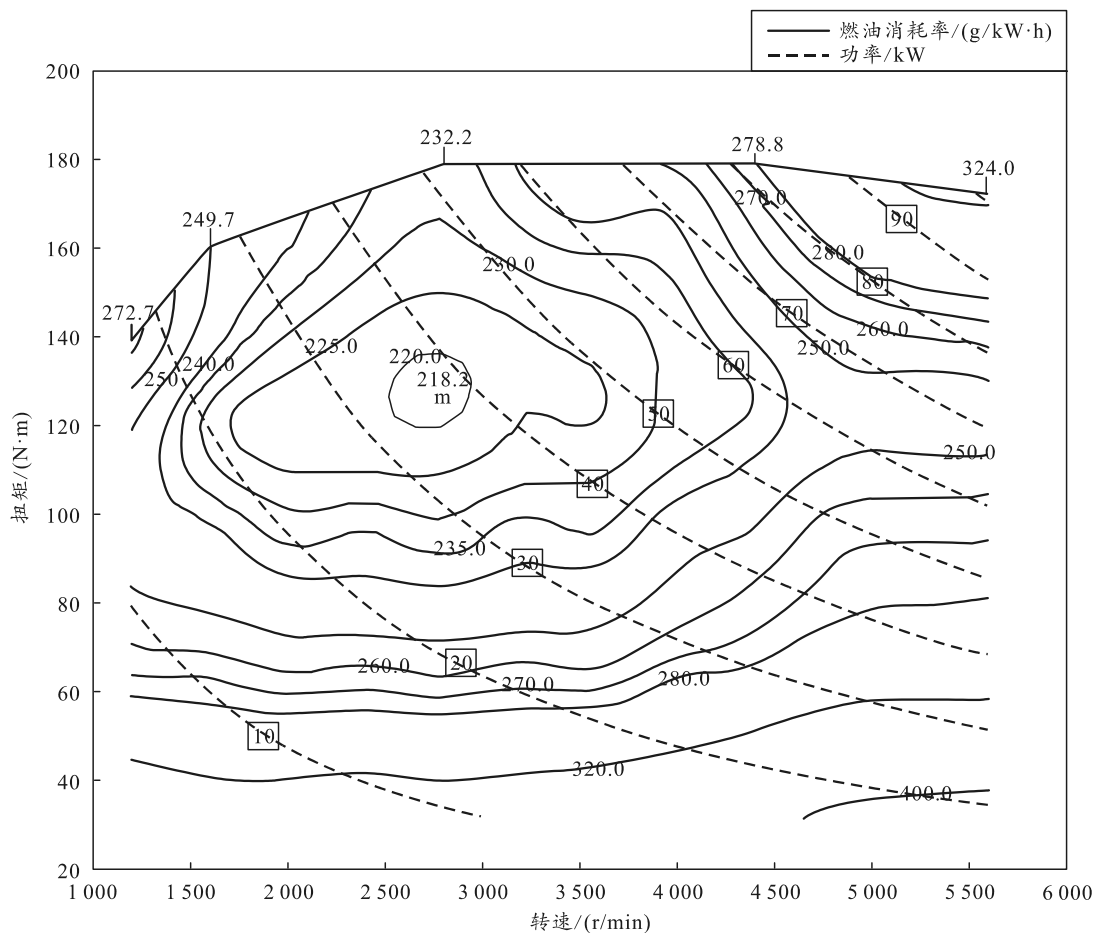


图 12 发动机燃油消耗率、功率万有特性

4 结束语

笔者运用 GT-Power 软件建立了发动机性能仿真模型,通过计算分析,预测了发动机功率、扭矩、燃油消耗率等性能指标。根据热力学仿真计算结果,推荐了发动机的气门升程曲线、配气相位、压缩比等核心设计参数,为发动机正向开发和性能仿真分析提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 吴建华. 汽车发动机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 59-63
- [2] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:

39-44.

- [3] 贺鹏程. 面向发动机故障诊断精度的深度随机森林优化研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(12): 58-61.
- [4] 吴斌, 曲鹏, 甘辉. 基于虚拟余度的发动机伺服传感器故障检测[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 25-27.
- [5] 贺鹏程. 面向发动机故障诊断精度的深度随机森林优化研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(12): 58-61.
- [6] 邓康烟, 方适应, 朱义伦. 汽油机进气结构参数对换气过程的影响研究[J]. 内燃机工程, 2000, 21(4): 1-5.
- [7] 范巍, 吴健, 李云龙, 等. 米勒循环汽油机部分负荷燃油经济性研究[J]. 车用发动机, 2014(2): 46-50.
- [8] 李云龙. Otto-Atkinson 循环发动机的工作过程优化及燃油经济性研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.