

内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析及应用

陈燕辉¹, 韩永强¹, 张科超¹, 徐振波², 魏冲², 张岩²

(1. 吉林大学 内燃机系, 长春 130025; 2. 中国第一汽车集团有限公司, 长春 130000)

Analysis and application of "mass-quantity" process of fuel energy in internal combustion engine cycle

CHEN Yanhui¹, HAN Yongqiang¹, ZHANG Kechao¹, XU Zhenbo², WEI Chong², ZHANG Yan²

(1. Internal Combustion Engine Department, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. China FAW Group Co.,Ltd, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to reveal the source of energy quality loss and quantity dissipation during the whole cycle of converting chemical energy of internal combustion engine fuel into mechanical energy through thermodynamic energy of working medium, this paper started from the P-V and T-S diagrams of the cycle process, used the first law of thermodynamics and the second law of thermodynamics to obtain the enthalpy change of circulating working medium, and builded the "mass-quantity" process of circulating fuel energy of internal combustion engine. The main factors that affect the power performance of internal combustion engine are combustion work and exhaust loss. Through the comparative analysis of lean combustion and natural aspirated internal combustion engine, the intuitionistic and feasibility of analyzing the energy flow direction of working medium through the "quality-quantity" course of fuel energy in internal combustion engine cycle is verified, which provides a new intuitive way to analyze the thermal efficiency of internal combustion engine from the root.

摘要:为揭示内燃机燃料化学能通过工质热力学能转化为机械能整个循环中能量品质损降和数量耗散的根源, 本文从循环历程的P-V和T-S图出发, 利用热力学第一定律和热力学第二定律得出循环工质焓变情况, 构建内燃机循环燃料能量“质-量”历程, 分析影响内燃机动力性能的因素主要为燃烧做功情况和排气损失。并通过稀薄燃烧与自然吸气内燃机的对比分析, 验证通过内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析工质能量流向的直观性与可行性, 为分析内燃机热效率提供一种新的直观的从根源上分析的途径。

关键词: 工质焓变; 能量流向; “质-量”历程; 热效率

Key words: Enthalpy change of circulating working medium; Energy flow direction; "Quality-quantity" process; Thermal efficiency

中图分类号: TK464

文献标识码: A

0 概述

内燃机短期内应继续以提高内燃机热效率为重点, 实现减污降碳协同增效^[1]。碳达峰、碳中和国家重大战略目标达成已成为了我国能源动力、工程热物理领域科技工作者研发、创新的核心任务和重大需求。内燃机作为当前陆路交通车辆、海洋运输交通船舶等核心动力, 当前及相当长时期内仍将承

担较大的减碳、零碳职责。若内燃机有效热效率能达到60%, 即使燃用传统石化燃油也有望达到交通运输行业碳达峰目标。可见, 引入颠覆性理念和技术、充分提升内燃机热效率成为了突破交通运输尤其是海陆运输降低碳排放技术的瓶颈。

内燃机循环中工质能量的品质/P-数量/T关联特征因固有环节能量转换、传递约束机理不同, 必然存在衔接失调现象; 而换气过程残能释放亦会引

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976077)

作者简介: 陈燕辉(1999-), 女, 硕士生, 主要研究方向为内燃机高效清洁燃烧, E-mail:cyh21@mails.jlu.edu.cn;

发数量耗散。即循环能量的质-量失调（品质损降、数量耗散）是效率受限的根源。通过内燃机能量流研究，有助于研究该系统的能量传递与转换过程^[2]。前期理论分析和仿真研究表明循环历程的 T-S 图可用于热效率、能量质-量关联及燃烧模式优化的机制分析^[3]，本文提出的基于循环历程的 P-V 和 T-S 图的内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析可直观体现内燃机循环中能量传递过程品质的损降和换气过程引发的数量耗散，可作为热效率评价的落脚点和优化出发点。

本文基于循环历程的 P-V 和 T-S 图、热力学第一定律及热力学第二定律构建了内燃机循环燃料能量随曲轴转角的变化图，更直观的分析整个循环中能量品质损降和数量耗散的根源和循环工质能量流向的变动，更直观分析质-量演变机制且可直观表征、充要分析热效率要素及提升手段，更深入的探索发动机的极限做功潜力。并将其应用到稀薄燃烧工况的能量流向分析，验证了通过内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析工质能量流向的可行性与直观性。

1 内燃机循环燃料能量“质-量”历程构建及分析

本文通过 GT-Suite 构建一维仿真模型，并对一维仿真结果进行标准热力过程计算，得出内燃机循环工质焓随曲轴转角的变化情况，以此完成内燃机循环燃料能量“质-量”历程的构建与分析，使整个循环中能量品质损降和数量耗散的根源和循环工质能量流向的变动更直观。

1.1 一维仿真模型构建

仿真样机为一台四气门顶置凸轮轴的重型车用柴油发动机，仿真样机基本参数如下表 1 所示，图 1 为建立的发动机一维仿真模型。

表 1 仿真样机基本参数

项目	参数
缸径/mm×行程/mm	126.5×166
气缸数	6
压缩比	20.6
连杆长度/mm	261

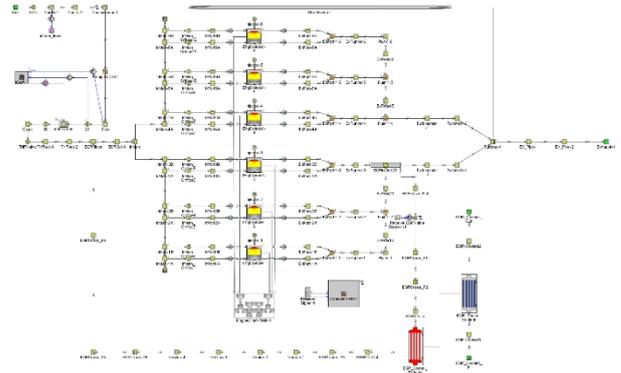


图 1 发动机一维仿真模型

1.2 内燃机循环燃料能量“质-量”历程构建

基于 GT-Suite 中后处理模块 GT-POST 中的仿真运算结果进行进一步的热力学计算处理。图 2 为进气压力为 1bar，进气温度为 20℃，转速为 1100r/min 工况下发动机一维仿真结果中的 P-V 图，图 3 为同一工况下发动机一维仿真结果中的 T-S 图。

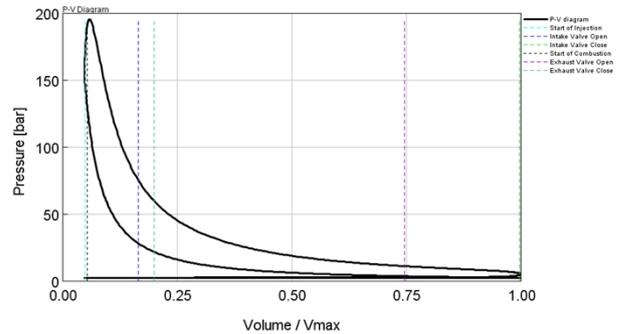


图 2 发动机一维仿真结果 P-V 图

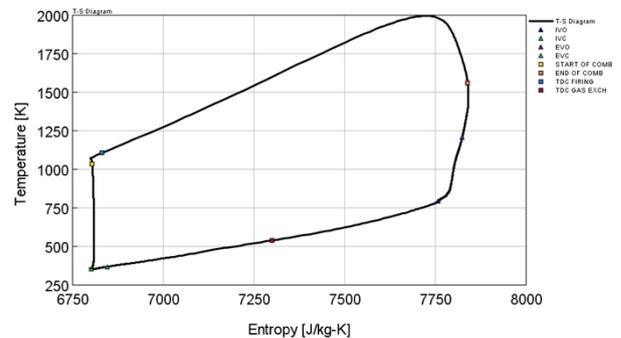


图 3 发动机一维仿真结果 T-S 图

P-V 图用于分析和评估发动机的性能，T-S 图用于描述内燃机热力循环过程，都可用于评估发动机热力性能和效率，但都不能直观的看出工质本身能量的变化。由此本文根据热力学第一定律和热力学第二定律进行进一步研究计算。

由 T-S 图可知气缸内工质在换气过程中熵变明显，为分析循环工质总体的能量走向，本文通过热力学计算公式得出进气过程进入气缸的工质与排气过程排出气缸的工质的熵变。计算公式如下：

$$\Delta S = C_p \cdot (\ln T_2 - \ln T_1) - R(\ln P_2 - \ln P_1) \quad (1)$$

$$R = C_p - C_v \quad (2)$$

式中: ΔS 为工质熵变; R 表示气体常数; C_p 为定压比热容; C_v 为定容比热容; T_1 和 T_2 分别表示初始和最终状态的温度, P_1 和 P_2 分别表示初始和最终状态的压力。图4为循环工质熵随曲轴转角变化图。

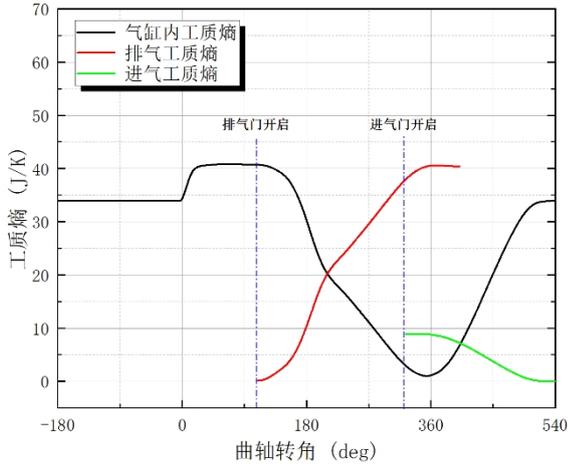


图4 循环工质熵随曲轴转角变化图

换气过程熵变较为明显, 主要是因为换气过程工质交换质量变化较为明显, 根据熵变可计算出循环工质热量与焓变化, 计算公式如下:

$$\Delta Q = T \cdot \Delta S \quad (3)$$

$$\Delta H = C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

$$\Delta H = Q + W \quad (5)$$

式中: ΔQ 为工质热量变化; ΔS 为工质熵变; ΔH 为工质焓变; T 表示气体温度; ΔT 为工质温度变化; C_p 为定压比热容; Q 为工质热量; W 为外界对工质做功。根据上述公式计算出各循环工质焓变化随曲轴转角变化如图5所示。

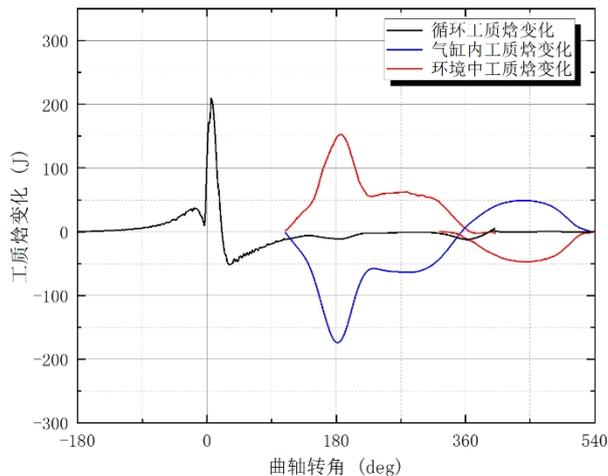


图5 循环工质焓变化随曲轴转角变化图

通过对GT-POST中一维仿真结果中的P-V图和T-S图进行热力学计算从而进一步处理, 最终得出

循环工质焓随曲轴转角的变化图, 由此构建内燃机循环燃料能量“质-量”历程。

1.3 内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析

图6为循环工质焓变化随曲轴转角变化分析图, 图中在内燃机的进气行程、压缩行程、膨胀做功行程和排气行程四个工作过程的基础上将内燃机循环燃料能量“质-量”历程曲线分为三大部分, 分别为压缩过程、做功过程和换气过程。其中进排气门开启和关闭时刻如图6所示。以此分析内燃机循环燃料能量“质-量”历程。

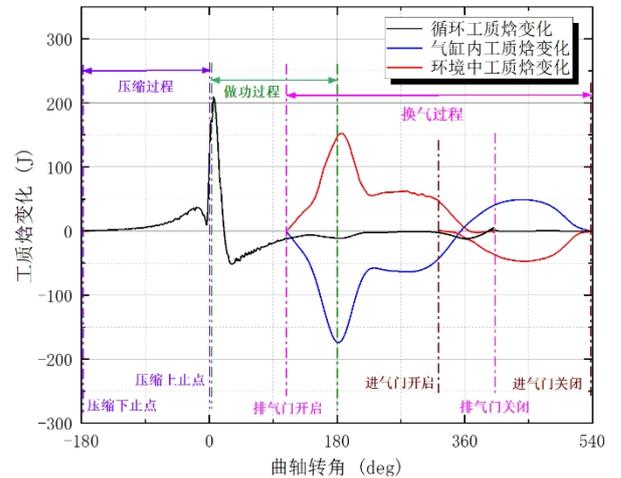


图6 循环工质焓变化随曲轴转角变化分析图

由公式(5)可知工质焓的变化是工质吸放热与外界对工质做功情况共同作用的结果。因此图6中压缩过程的工质焓上升主要因为活塞压缩工质进而对工质做功。

图6中做功过程工质焓先增大后减小, 主要因为在做功行程刚开始时, 工质燃烧将工质本身的化学能释放为热力学能使工质焓极速上升, 做功过程焓增大的程度反应出参与反应的工质数量及其燃烧完全程度。当活塞开始向下止点运动时工质的内能开始转化为功输出, 并且伴有向工质外其他组分传热, 使得工质焓增大速度变慢减小, 而向工质外其他组分传热会导致整个循环能量数量的耗散。做功过程工质焓减小程度上可反应出工质对外做功多少及做功能力大小。要想提高内燃机的热效率, 应使工质的焓尽可能的转化为功输出。

换气过程包括排气过程和进气过程, 排气损失在总损失中的占比最大, 换气过程包含气缸内工质的焓变化和环境中的工质焓变化, 由图6可知排气过程的能量损失几乎都是由排出气缸的废气带走的, 做功后的高温高压工质开放式排出产生的排气损失会导致循环能量数量上的耗散。可以充分利用

尾气余热，也可通过稀薄燃烧等技术降低总体燃烧温度，进而降低排气温度，降低排气损失。为提高内燃机热效率应尽量减少排气工质的能量损失。

图6充分直观的体现了循环工质能量的流向，更直观的分析整个循环中能量品质损降和数量耗散的根源为：因固有环节能量转换、传递约束和换气过程残能释放。通过分析内燃机循环燃料能量“质-量”演变机制可以更直观的比较不同发动机不同工况下的燃烧、做功和排气等过程的差异，进而比较出不同发动机不同工况下的热效率大小；可直观表征、充要分析影响热效率的要素及提升手段，更深入的探索发动机的极限做功潜力。

2 内燃机循环燃料能量“质-量”历程应用

2.1 稀薄燃烧循环燃料能量“质-量”历程构建

稀薄燃烧使得发动机低负荷时进气压力更高，有利于降低泵气损失；高负荷时降低缸内充量燃烧温度，有利于降低传热损失和提高充量绝热指数，从而提高热效率^[4-5]。本文通过增大进气压力实现稀薄燃烧，在图1所示的仿真模型进气模块中设置进气压力为2bar，并按照内燃机循环燃料能量“质-量”历程构建过程对GT-POST中的一维仿真结果进行进一步分析，得出进气压力为2bar，进气温度为20℃，转速为1100r/min工况下的工质焓变随曲轴转角变化图如图7所示。

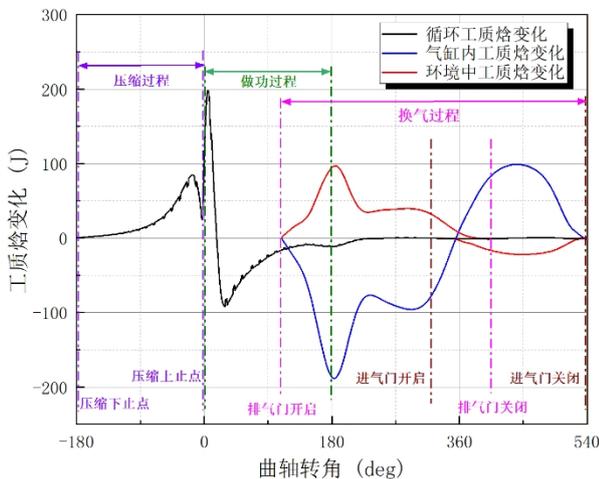


图7 进气压力2bar循环工质焓变化随曲轴转角变化分析图

2.2 稀薄燃烧循环燃料能量“质-量”历程分析

下表2为两种工况下的相关一维仿真结果，由表1可知进气压力为2bar的内燃机具有较大的扭矩、功率和热效率，且比油耗较小。通过上述两种工况的内燃机循环燃料能量“质-量”历程的分析及构

建，将两种工况下的循环工质焓变化随曲轴转角变化分析图进行对比，验证通过对循环燃料能量“质-量”历程分析能量流向的可行性、合理性及直观性。如下图8所示为进气压力为1bar与进气压力为2bar的两种工况下循环工质焓变化随曲轴转角变化对比分析图。

表2 不同工况下内燃机相关结果对比

项目	进气压力 1bar	进气压力 2bar
扭矩/N·m	2004.55	2240.51
功率/kW	230.90	258.08
比油耗/g/kW·h	180.07	161.10
热效率/%	48.11	53.59

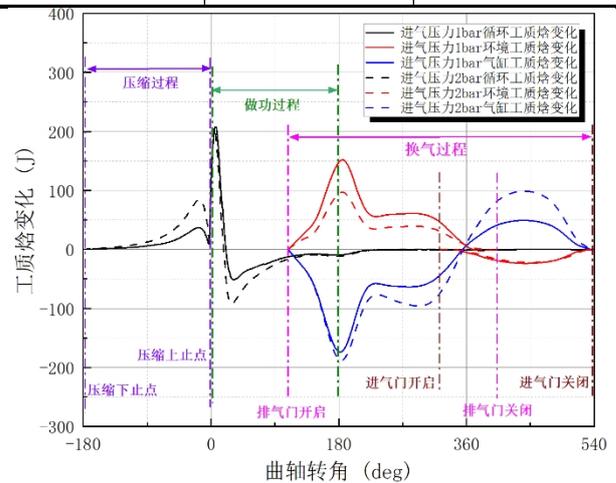


图8 循环工质焓变化随曲轴转角变化对比分析图

由图8可知压缩过程进气压力为2bar的循环工质焓变曲线在进气压力为1bar的循环工质焓变曲线上方，表示进气压力为2bar的循环工质焓增更多，由公式(5)可知工质焓变是由工质吸收的热量及外界对工质做功共同决定的。图9为循环工质向气缸壁传热变化对比分析图，由图可知压缩过程进气压力为2bar的工质向气缸壁的放热量比进气压力为1bar的工质向气缸壁的放热量多。但压缩过程进气压力为2bar的工质焓增比进气压力为1bar的工质焓增大，可认为是压缩过程进气压力为2bar的内燃机活塞对工质做功大于进气压力为1bar的内燃机活塞对工质做的功。

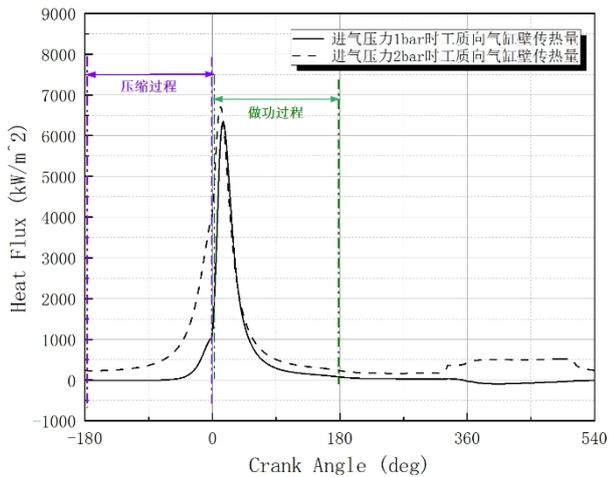


图9 循环工质向气缸壁传热变化对比分析图

由图8可知做功过程进气压力为2bar的循环工质与进气压力为1bar的循环工质焓变的最大值及出现的相位基本相同,因为一维仿真模型中燃烧模块的设置参数相同且参与燃烧反应的燃料质量相同。进气压力为2bar的循环工质焓变的最小值小于进气压力为1bar的循环工质焓变的最小值,即工质焓减少的更多。由图9可知,做功过程进气压力为2bar的工质向气缸壁传热量较多,结合图8可看出进气压力为2bar的工质向外界做功量也比进气压力为1bar工质多,因此进气压力为2bar的内燃机功率较高。因此通过对循环燃料能量“质-量”历程中做功过程的分析可得出参与燃烧的燃料放热情况、燃烧相位及对外做功传热的情况。

由图8可知换气过程中,相比于进气压力为1bar的工质,进气压力为2bar的排气工质焓变更小,气缸内工质进气过程焓变更大。下图10为不同进气压力下内燃机排气温度对比图,由图可知,进气压力为2bar的排气温度更低,这是因为稀薄燃烧导致的最高燃烧温度降低,进而导致排气温度降低,进而导致排气工质焓变减小。由于进气压力的增大,进气质量变大,导致进气过程中气缸内工质焓变增大。因此通过对循环燃料能量“质-量”历程中换气过程的分析可得出排出废气带走的能量及进气过程气缸内工质增加的能量情况。

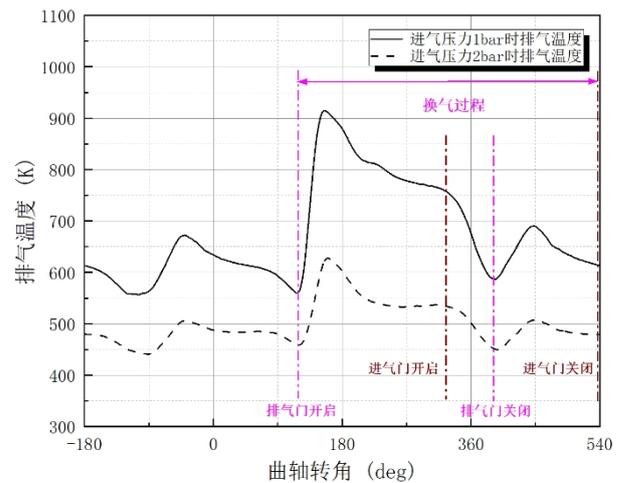


图10 排气温度对比分析图

通过以上两种工况下的内燃机循环燃料能量“质-量”历程的对比分析可得出燃料燃烧、做功、排气及进气过程的能量流向及差异,通过对比做功过程焓变及排气工质焓变可分析内燃机功率及热效率大小,验证了通过对循环燃料能量“质-量”历程分析能量流向的可行性、合理性及直观性。

3 结论

(1) 基于循环历程的P-V和T-S图可构建循环工质焓变随曲轴转角的变化图,以此可表示内燃机循环燃料能量“质-量”历程。

(2) 通过对循环工质压缩、燃烧和换气过程焓变的分析,可得出工质燃烧完全情况、燃烧相位、参与反应的工质质量及排气损失情况,以此可分析循环工质的能量流向。

(3) 采用稀薄燃烧技术,可提高内燃机热效率,并且通过分析可验证通过内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析能量流向和热效率的可行性,可直观发现采用稀薄燃烧技术可提高内燃机热效率的原因:提高内燃机做功能力,减小排气损失。

(4) 通过对内燃机循环燃料能量“质-量”历程分析对比研究,可以直观体现内燃机循环工质的能量流向、燃烧情况、做功能力、排气损失等,进而为提高内燃机热效率提供一种新的直观的从根源上分析的途径。

参考文献:

- [1] 贺泓.关于交通运输行业实现碳达峰碳中和目标的建议[J].前进论坛,2022,(09):25.

-
- [2] 付建勤, 刘敬平, 徐政欣等. 乘用车汽油机能量流试验研究及 MAP 分析. 中国内燃机学会燃烧节能净化分会 2011 年学术年会, 天津, 2011.
- [3] 韩永强, 放热率对效率的影响及对 HCCI 燃烧负荷限值评测[J], 内燃机学报, 2008. No. 2.
- [4] 陆海峰, 汪阳, 梁敬, 等. 新型两阶段点火系统对稀燃效率的影响[J]. 内燃机学报, 2017, 35(6):530-537. LUH F, WANG Y, LIANG J, et al. Effect of innovative two-stage ignition system on lean burn efficiency[J]. Transactions of CSICE, 2017, 35(6):530-537.
- [5] 裴普成, 刘书亮, 范永健, 等. 进气道燃油喷射汽油机稀燃优化技术[J]. 内燃机工程, 2002, 23(3):36-38.