

减少天然气发动机后燃的改进优化

李晓东,游凯,许晓颖,马俊方

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

摘要:为解决某天然气发动机后燃问题,进行台架试验,分析点火角域电压、空燃比、缸压及主从两侧电子控制单元(electronic control unit,ECU)实际燃气质量流量,确定后燃的主要原因为从侧 ECU 采用速度密度法计算混合气质量迟滞,使瞬态工况实际空燃比偏小,燃气体积分数偏大。采用调整从侧充气效率、提高最小节气门限值减缓瞬态过程、将从侧 ECU 燃气质量流量由速度密度法改为节气门计算方法 3 种措施进行改进并进行验证试验,结果表明:3 种方法均能解决后燃问题;调整充气效率只适用于发动机卸去全部负荷,减缓瞬态过程导致转矩卸载时间增大,将从侧 ECU 燃气质量流量由速度密度法改为节气门计算方法效果最佳。

关键词:后燃;速度密度法;节气门计算;空燃比

中图分类号:TK432

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0045-06

引用格式:李晓东,游凯,许晓颖,等.减少天然气发动机后燃的改进优化[J].内燃机与动力装置,2025,42(1):45-50.

LI Xiaodong, YOU Kai, XU Xiaoying, et al. Improvement and optimization for eliminating post-combustion of a natural gas engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 45-50.

0 引言

甲烷(CH_4)是天然气的主要成分,其碳氢比较低,是碳质量分数最小的碳氢化合物燃料^[1]。相比汽油机和柴油机,天然气发动机具有排放低、经济性高等优点,受到广泛的关注和应用。但天然气辛烷值较高,燃点和活性较低,难以被直接压燃,需火花塞或外部燃料引燃^[2]。天然气在空气中的体积分数为 5%~15%时可以正常燃烧,当超出此范围不能正常燃烧。

天然气发动机点火系统出现故障或天然气体积分数超出着火范围时,燃烧室内未正常燃烧的混合气进入排气管后被燃气、增压器涡轮或氧传感器的高温引燃,俗称后燃^[2]。天然气发动机后燃会造成排气系统内的压力和温度突增,可能损坏增压器和排气管,具有很强的破坏性。许多学者从点火系统研究天然气发动机后燃放炮问题,但对燃烧角度的相关研究较少。

本文中基于后燃产生原理,通过燃烧分析仪、电流钳、KiBoxCockpit 软件等,对某 12 缸 V 型天然气发动机点火信号、空燃比、缸压、实际燃气质量流量进行检测,分析后燃原因,提出解决措施并进行验证,为解决天然气发动机后燃故障提供参考。

1 后燃主要原因

1.1 点火系统异常

点火系统一般由点火模块、线束、点火线圈、高压线和火花塞组成^[3]。点火模块定时为非智能点火线圈提供充电电流或为智能点火线圈提供充电信号,部分电子控制单元(electronic control unit,ECU)集成了点火模块,而不具备点火功能的 ECU 需要另外配备点火模块;线束将充电电流或充电信号传递至点火

收稿日期:2024-12-14

基金项目:泰山产业领军人才工程资助项目

第一作者简介:李晓东(1984—),男,山东荣成人,工程师,主要研究方向为气体机性能开发,E-mail:wclixd@163.com。

线圈;点火线圈将低压电转变成高压电,以便有足够高的电动势击穿混合气产生电弧;高压线将高压电传递给火花塞;火花塞产生电弧引燃混合气。

点火过程中电压跳变可能使点火模块充电时刻和充电电流计算错误,导致点火模块不能顺利提供点火电流;此外,线束短路或断路、接插件松脱、点火线圈故障、火花塞间隙不合适等故障都会导致缸内不能正常燃烧,发生后燃^[4-5]。

1.2 空燃比失调

ECU 首先根据转速、进气压力、进气温度、充气效率和节气门开度等参数计算理论进气量,然后结合理论空燃比计算理论燃气量,最后根据燃气压力和燃气密度计算理论燃气阀开度。对于带有氧传感器、空燃比闭环控制的发动机,ECU 根据实际空燃比与理论空燃比的偏差修正燃气量,使实际空燃比与理论空燃比一致^[6-7]。如果空气模型标定不准确、传感器测量不准确、燃气成分变动和燃气阀出现故障,都会导致空燃比失调。稳态工况通过修正因数修正空燃比,瞬态工况由于转速和负荷变化快,无法快速修正燃气量,导致实际空燃比与理论空燃比偏差较大,容易导致发动机失火和后燃^[8-9]。

2 后燃排查分析

采用某 12 缸 V 型天然气发动机进行台架试验,该发动机在转速为 1 800 r/min、转矩为 2 000 N·m 时稳定运行,突然卸载全部转矩(以下简称“突卸”),出现偶发后燃现象并伴随放炮声。该发动机配备主、从两个 ECU,主侧 ECU 接收理论转速信号,根据理论转速和实际转速控制节气门开度,主、从两侧 ECU 分别计算燃气质量并控制对应的燃气阀开度。

2.1 点火过程

点火异常可能使缸内混合气不燃烧或不完全燃烧造成后燃。点火检测方法为:使用电流钳监测充电电流,按照 10:1 的比例将电流信号转换为电压信号,将电压信号引入 Kistler 燃烧分析仪,采用角标仪将时域电压信号转换为角域电压信号,确定点火系统充、放电角度,分析点火过程是否异常。以第一缸压缩上止点为曲轴转角 0°,该天然气发动机点火角域电压信号及缸压信号如图 1 所示。

由图 1 可知:曲轴转角约为 -50°时,电压开始升高,点火线圈开始充电;曲轴转角约为 -25°时,电压瞬间降至 0,点火线圈开始放电,与设定的点火提前角一致,点火系统工作正常;曲轴转角约为 -5°时,缸压开始快速增加;曲轴转角约为 13°时,缸压达到最高,为 8.0 MPa,燃烧正常。将采集到的点火角域电压信号按照工作循环进行回放分析,发现一个工作循环内实际点火提前角与理论点火提前角一致,未出现点火信号异常现象。

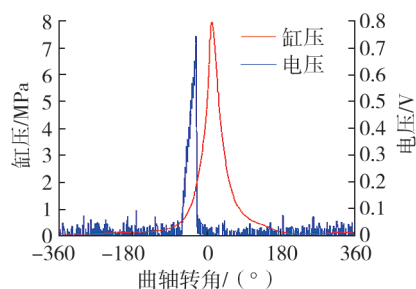


图 1 点火角域电压信号及缸压信号

2.2 空燃比

空燃比超出着火范围,缸内无法正常燃烧。空燃比在着火范围,但偏大,使火焰传播速度慢,缸内燃烧不完全。通过氧传感器测量该发动机突卸过程中主、从两侧 ECU 空燃比,如图 2 所示。

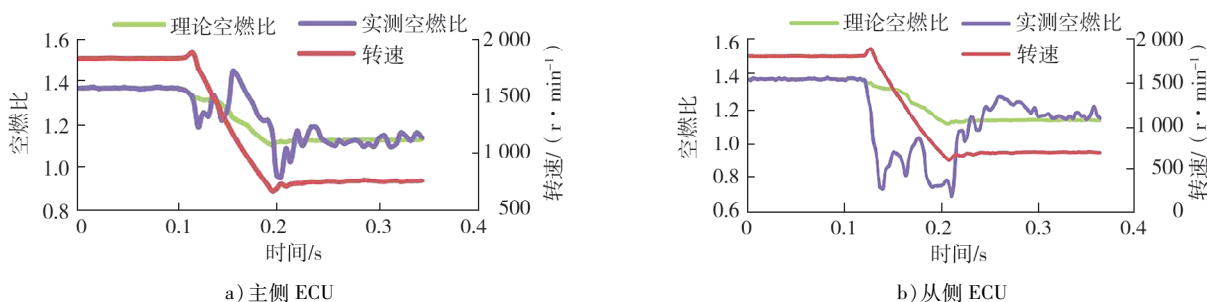


图 2 突卸过程中主、从两侧 ECU 空燃比

由图2可知:突卸过程中,主、从两侧 ECU 理论空燃比的变化趋势一致;主侧最小实际空燃比为 0.97,从侧最小实际空燃比为 0.70,从侧实际空燃比长时间内低于理论空燃比。原因可能为从侧空燃比过小,燃气未完全燃烧,进入排气管后导致发动机后燃。

2.3 缸压

天然气发动机燃烧过程中若失火,缸压曲线呈压缩形态,曲轴转角约为 0° 时缸压最大。采用燃烧分析仪按工作循环分析发动机突卸过程燃烧信号,发现突卸过程中从侧 ECU 有持续 5~6 个循环的失火状态。卸载过程由于负荷和转速的降低,缸压越来越低,为了便于分析,截取曲轴转角为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ 的对称缸压进行局部放大分析。突卸前、后缸压变化曲线如图3所示。

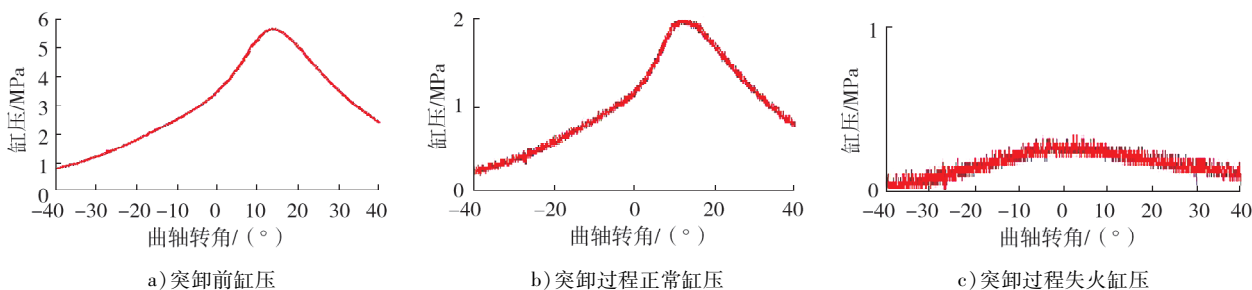


图3 突卸前、后缸压变化曲线

由图3可知:发动机突卸前最大缸压为 5.7 MPa,在上止点后曲轴转角 12° 附近,燃烧正常;突卸过程中燃烧正常时最大缸压为 2.0 MPa,在上止点后曲轴转角 12° 附近;突卸过程中缸压曲线呈压缩形态,此时燃烧不正常,最大失火缸压为 0.4 MPa,在曲轴转角 0° 附近,失火缸压以曲轴转角 0° 为中心线对称分布。

2.4 实际燃气质量流量

由第2.2节可知,突卸过程从侧空燃比偏小,由第2.3节缸压分析结果可知,突卸过程后期,怠速工况时缸压逐渐减小,即出现连续失火循环。结合以上分析,怠速(700 r/min)工况时从侧空燃比过小,燃气体积分数过高,发生连续失火,导致后燃放炮。

突卸过程主、从两侧 ECU 实际燃气质量流量如图4所示。由图4可知:突卸前的稳态工况下,主、从两侧 ECU 燃气质量流量基本一致,突卸后从侧燃气质量流量明显高于主侧。由于实际燃气质量根据进入气缸的混合气质量和空燃比计算,主、从两侧 ECU 理论空燃比相同,燃气质量流量的差异可能来自混合气质量流量计算方法的不同,主侧混合气质量流量采用节气门法计算,从侧混合气质量流量采用速度密度法计算,计算方法不同导致瞬态工况计算的燃气质量流量不同^[10]。

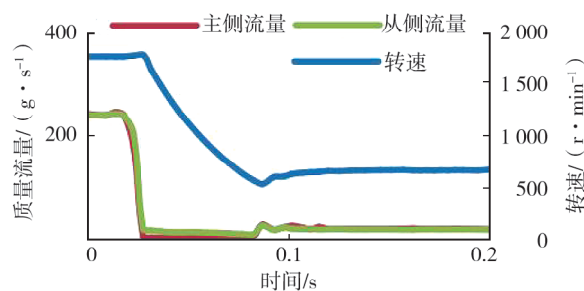


图4 突卸过程主、从两侧 ECU 实际燃气质量流量

2.5 原因分析

2.5.1 主侧 ECU 节气门计算

节气门示意图如图5所示,图中0、1、2分别为节气门上游、喉口、下游,对应的压力分别为 p_s 、 p_h 、 p_x ,下、上游混合气的压力比 $r = p_x/p_s$ 。 $r > 0.5283$ 表示混合气亚音速状态, $r < 0.5283$ 表示混合气超音速状态, $r = 0.5283$ 表示混合气临界音速状态^[11]。

以 g/s 为单位的混合气亚音速状态对应的的质量流量 $q_{m,1}$ 的数值^[11]

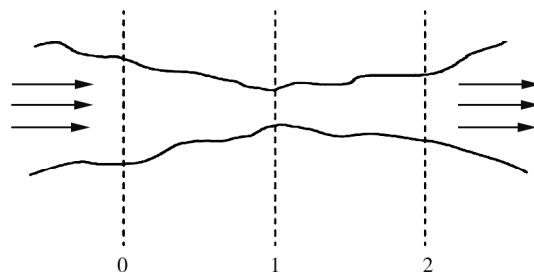


图5 节气门示意图

$$\{q_{m,1}\} = \{A\} \sqrt{k\{R\}\{T_s\}} \frac{\{p_s\}}{\{R\}\{T_s\}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p_x}{p_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_x}{p_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

式中: $\{A\}$ 为以 m^2 为单位的节气门面积 A 的数值; $\{R\}$ 为以 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为单位的理想气体常数 R 的数值, $\{R\} = 8.314$; $\{T_s\}$ 为以 K 为单位的节气门上游气体温度 T_s 的数值; $\{p_s\}$ 为以 kPa 为单位的节气门上游压力 p_s 的数值; k 为气体属性常数, 空气为 1.4。

以 g/s 为单位的混合气超音速状态对应的质量流量 $q_{m,2}$ 的数值

$$\{q_{m,2}\} = \{A\} \sqrt{k\{R\}\{T_s\}} \frac{\{p_s\}}{\{R\}\{T_s\}} \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (2)$$

由于负荷突卸时节气门快速关闭, p_x 突然下降, 混合气进入超音速状态, 同时节气门面积减小, 由式 (2) 计算主侧 ECU 混合气质量流量减小, 响应性较好。

2.5.2 从侧 ECU 速度密度法计算

根据气缸容积、进气总管压力、充气效率和进气歧管温度, 采用速度密度法计算混合气体积流量, 并转换为标准状态 (环境温度 T_h 为 298.15 K 、外界压力 p_w 为 101.3 kPa) 以 L/s 为单位的混合气体积流量 q_v 的数值

$$\{q_v\} = \frac{\{n\}\{V\}\{p_z\}\eta}{2 \times 60 \times \{T_j\}} \times \frac{\{T_h\}}{\{p_w\}}, \quad (3)$$

式中: $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的发动机转速 n 的数值, $\{V\}$ 为以 L 为单位的发动机排量 V 的数值, $\{p_z\}$ 为以 kPa 为单位的进气总管压力 p_z 的数值, η 为充气效率, $\{T_j\}$ 为以 K 为单位的进气歧管温度 T_j 的数值, $\{T_h\}$ 为以 K 为单位的环境温度 T_h 的数值, $\{p_w\}$ 为以 kPa 为单位的外界压力 p_w 的数值。

由于进气总管压力传感器安装在空气和燃气混合位置的下游, ECU 监测到压力变化后, 调整燃气量变化, 导致瞬态工况下混合气气流变化显著延迟, 燃气量调整跟随性较差^[12-13]。

综上所述, 产生后燃的根本原因是瞬态工况主、从两侧混合气计算方法不同, 从侧 ECU 采用速度密度法计算混合气质量流量时迟滞, 燃气质量分数过大, 导致缸内失火, 未燃混合气在排气尾管处引燃产生放炮。

3 改进及验证

3.1 改进措施

采用以下措施进行优化改进: 1) 由式 (3) 可知, 速度密度法的影响因素有转速、进气歧管温度、排量和充气效率, 发动机转速、进气歧管温度为实际测量, 排量为发动机固定属性, 只能调整充气效率; 发动机进气总管压力在额定空载工况约为 40 kPa , 怠速空载工况约为 35 kPa , 瞬态突卸工况节气门快速关闭, 进气总管压力降至 10 kPa 左右, 因此 $p_z < 30 \text{ kPa}$ 时, 减小充气效率只影响瞬态工况进气质量流量, 且不影响发动机正常运行^[7]。2) 稳态工况下, 速度密度法与节气门法计算理论燃气质量流量近似一致, 延长突卸过程转矩速度变化率, 将瞬态过程变为稳态过程, 可减小燃气质量流量偏差。3) 通过修改软件计算方法将从侧进气量计算由速度密度法改为节气门计算, 但此过程需要软件升级和验证。

3.2 分析与验证

3.2.1 调整从侧充气效率

将发动机进气总管压力为 20 kPa 时的充气效率由 0.8 改为 0.2, 其余进气总管压力 (30 、 40 、 50 、 60 、 70 kPa) 的充气效率不变, 为 0.8, 改进充气效率后突卸过程从侧 ECU 空燃比如图 6 所示。

由图 6 可知: 充气效率调整后, 最小实际空燃比为 0.84; 实际空燃比下降至 0.84 后, 快速升高至 2.10

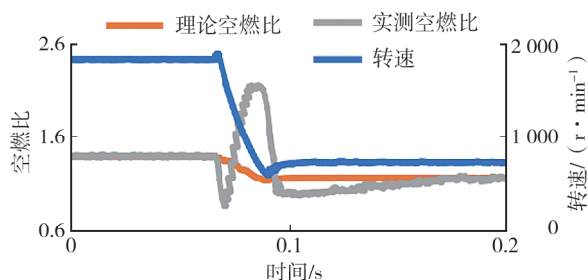


图 6 改进充气效率后的从侧空燃比

后逐渐下降,当发动机转速约 700 r/min 时实际空燃比约为 1.00,并逐渐与理论空燃比一致。原因为突卸初期,ECU 计算迟滞,过量燃气进入气缸,燃气体积分数偏大,空燃比迅速下降;节气门关闭后,气缸压力下降,小于 20 kPa,充气效率为 0.2,所需燃气量为理论燃气量的 25%,空燃比快速增大;随着进气总管压力增大,充气效率为 0.8,所需燃气量增大,空燃比下降至 1.00,此方法有效抑制了突卸过程燃气体积分数过大造成的后燃。但该方法有两个不足:1) 充气效率越小,最大空燃比越大,转速下降速度越快;2) 只能修改发动机非正常工作区域的充气效率,适用于发动机全部负荷卸载,不适用于部分负荷卸载。

3.2.2 减缓瞬态过程

减缓突卸过程转速变化率有两种方法:1) 降低设定转速变化率。该方法会影响发动机升速速率和降速速率,影响加速性。2) 提高各转速下最小节气门限值。由于节气门开度随转速的增加而增加,提高最小节气门限值可减缓降速过程。为了不影响加速性,采用第二种方法。

发动机转速为 700、1 000、1 200、1 600、1 800 r/min 时,调整前最小节气门开度均为 10%,调整后最小节气门开度依次为 10%、12%、14%、16%、18%。节气门调整后突卸过程从侧 ECU 空燃比如图 7 所示。

由图 7 可知:突卸初期实际空燃比下降至 0.85 为突卸前过量燃气进入气缸导致,随后空燃比逐渐升高,未再出现空燃比下降现象。同时监测燃烧循环数据未发现失火循环;转速约为 700 r/min 时最小实际空燃比为 0.93,与主侧最小实际空燃比 0.97 基本一致。节气门开度调节可解决后燃问题,但增加了突卸时间,与调整前相比,卸载时间增加约 5 s。

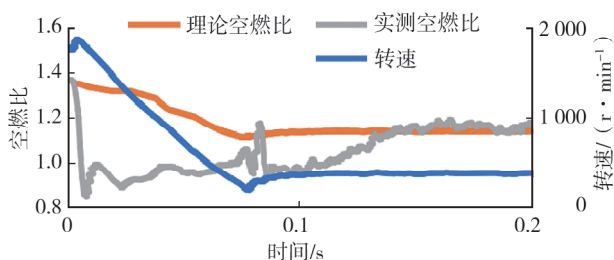


图7 节气门调整后的从侧空燃比

3.2.3 修改计算方法

更换软件版本,将从侧进气量计算方法由速度密度法改为节气门算法,修改算法后突卸过程从侧 ECU 空燃比如图 8 所示。由图 8 可知:改变计算方法后,从侧 ECU 实际最小空燃比为 0.92,与主侧最小实际空燃比 0.97 基本一致,说明速度密度法导致从侧空燃比计算偏小,造成后燃;瞬态工况采用节气门计算优于速度密度法。

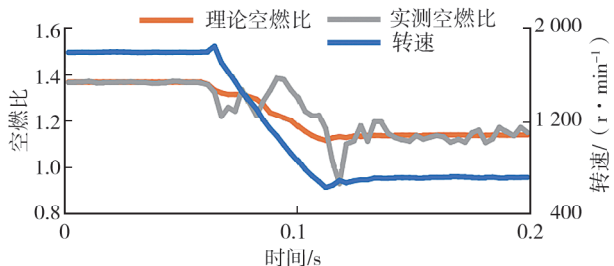


图8 修改算法后的从侧空燃比

4 结论

1) 瞬态工况主侧 ECU 最小实际空燃比为 0.97,从侧最小实际空燃比为 0.70,原因为从侧 ECU 采用速度密度法计算混合气质量偏高,从侧空燃比过小,燃气未完全燃烧,进入排气管后导致发动机后燃。

2) 将发动机进气总管压力 20 kPa 时的充气效率由 0.8 改为 0.2,实际空燃比先下降后快速升高,再下降至与理论空燃比一致,最低空燃比从 0.70 提高至 0.84,转速约为 700 r/min 时实际空燃比约为 1.00,但该方法仅适用于突卸全部负荷。

3) 调整不同转速下最小节气门开度,最小实际空燃比从 0.70 提高至 0.85,转速约为 700 r/min 时最小实际空燃比为 0.93,但该方法延长突卸时间。

4) 将从侧 ECU 燃气量计算方法由速度密度法改为节气门算法,从侧空燃比曲线与主侧基本一致,最小实际空燃比为 0.92,为最优改进方案。

参考文献:

- [1] 张帆. 燃气成分对高压缩比天然气发动机燃烧性能影响机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.

- [2] 郭浩. 船用双燃料低速机预燃室富燃反应机理及性能优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [3] 贾云龙. 车辆发动机点火系统电磁敏感度评估[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [4] 张喆. 燃烧分析中参数估计及其运算方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [5] 周伟健. 天然气/柴油双燃料发动机低温燃烧负荷拓展及燃烧过程控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [6] 刘津津. 低负荷工况下天然气发动机燃烧不稳定性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [7] 李玉帅, 赵令辉, 潘永传, 等. 天然气发动机燃烧影响因素分析[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(4): 20-27.
- [8] 丁顺良, 耿海棠, 高建设, 等. 稀燃工况下天然气发动机燃烧不稳定性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(5): 45-51.
- [9] 李晓东, 邵鲁建, 史艳军, 等. 预喷持续期对预燃室式天然气发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(5): 27-31.
- [10] 徐鹏, 韩雨, 潘永传, 等. 大气湿度对天然气发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(4): 7-13.
- [11] PURSIFULL R, KOTWICKI A J, HONG S. Throttle flow characterization[C]//Proceedings of SAE 2000 World Congress. Detroit, USA; SAE International, 2000.
- [12] 徐清祥, 孙永亮, 孔龙, 等. 预燃室式火花塞在大缸径气体机上的试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(2): 13-17.
- [13] 曹林, 吴顺清, 杨显利, 等. 国六重型天然气汽车失火标定研究[J]. 汽车文摘, 2023(8): 36-41.

Improvement and optimization for eliminating post-combustion of a natural gas engine

LI Xiaodong, YOU Kai, XU Xiaoying, MA Junfang

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to solve the post-combustion problem of a natural engine, the bench test is carried out to analyze the ignition angle domain voltage, air-fuel ratio, cylinder pressure and actual gas mass flow rate of the main side and slave side electronic control unit (ECU), it is determined that the reason for post-combustion is that the slave side ECU calculate the delay by using the speed density method, which makes the transient air-fuel ratio being too small and the gas volume fraction being too large under transient conditions. Three measures are taken to improve and verify: adjusting the slave side charging efficiency, increasing the minimum throttle threshold to slow down the transient process, changing the gas mass flow rate of the slave side ECU from the speed density method to the throttle calculation method. The results show that the three methods can solve the post-combustion, adjusting the charging efficiency is only suitable for unloading all loads, slowing down the transient process leads to an increase in the torque unloading time, and changing the gas flow rate of the slave side ECU from the speed density method to the throttle calculation method is the best.

Keywords: post-combustion; speed density method; throttle calculation; air-fuel ratio

(责任编辑: 胡晓燕)