

# 直喷汽油机恒转速增转矩工况燃烧与排放

胡宗杰<sup>1</sup>, 李明龙<sup>1</sup>, 刘 婷<sup>1</sup>, 李理光<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 200092)

**摘要:** 在一台直喷汽油机(GDI)上,利用发动机瞬态控制和测试系统,研究恒转速增转矩工况下节气门切换幅度和切换耗时对发动机燃烧与排放动态响应的影响,并通过基于比例积分(PD)调节的过量空气系数( $\lambda$ )闭环控制和节气门超调策略优化瞬态工况的燃烧和排放。试验结果表明:在恒转速增转矩工况,发动机工作参数相对于节气门的变化有一定的滞后,切换时间越长各参数与节气门变化的跟随性越好;切换幅度较大时,各参数稳定性较差;进气的响应特性是影响发动机瞬态工况下燃烧与排放的主要因素。在所研究的工况下,过量空气系数闭环控制的最优 PI(比例值、积分值)组合为  $P=0.08/I=0.5$ ;节气门超调策略可以更有效地减小进气响应的滞后时间,使燃烧更充分,降低颗粒物数量浓度和碳氢(HC)排放。

**关键词:** 直喷汽油机;瞬变工况;节气门超调;颗粒物排放

**中图分类号:** TK417<sup>+</sup>.5

**文献标志码:** A

compared with throttle opening, and the longer switching duration would shorten the lags. The stabilities of the working parameters became worse when the switching amplitude was larger. The response characteristic of intake air was thought to be the major factor that affected the transient combustion and emissions. In this paper, the combination of  $P=0.08/I=0.5$  was the best to shorten the time lag with throttle opening and reduce the particulate number and hydrocarbon (HC) emissions. Compared with PI optimization strategy, the throttle overshoot strategy could be more efficient to shorten the intake response delay, making more fully combustion and reducing particulate number and HC emissions in the transient conditions.

**Key words:** gasoline direct injection engine; transient condition; throttle overshoot; particle emissions

## Combustion and Emissions of Direct Injection Gasoline Engine in Constant-speed and Increasing-torque Conditions

HU Zongjie<sup>1</sup>, LI Minglong<sup>1</sup>, LIU Ting<sup>1</sup>, LI Liguang<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Study, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinese Deutsches Hochschulkolleg, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The combustion and emissions of a gasoline direct injection (GDI) engine were studied during constant-speed and increasing-torque conditions by transient engine control and measuring system. The effects of transient throttle switching duration and amplitude were investigated. The close-loop  $\lambda$  proportion and integral (PI) control for fuel injection strategy and the throttle overshoot strategy were tried to show their potentials to improve the transient combustion and emissions. The results revealed there were different degrees of time lags for engine working parameters

在实际运行过程中,尤其是在城市工况下,汽车多处于起动、加速、减速等瞬态工况,这些工况下的发动机性能与稳态工况下有较大差别<sup>[1-2]</sup>。2016 年我国发布了国六排放标准,引入了全球轻型车统一测试循环(WLTC),也对汽油机颗粒物排放提出了更高的要求,并且增加了实际行驶排放测试(RDE)<sup>[3]</sup>。由于这两个测试循环具有更多的瞬态工况,而且近年来市场上配置直喷汽油机的汽车的占比也不断增加,因此研究直喷汽油机瞬态工况的燃烧与排放控制具有很重要的实际意义。

目前普遍研究的典型瞬态工况包括:冷起动机况、恒转矩增转速工况、恒转速增转矩工况和转速转矩均增加的工况<sup>[4]</sup>。王锐、赵世锋等研究了直喷汽油机冷起动机况下点火时刻和喷油时刻对颗粒物排放粒径和浓度的影响<sup>[5-6]</sup>。李岳林等<sup>[7]</sup>研究了进气管喷射汽油机在恒转矩增转速工况下的燃烧过程,并与稳态工况进行对比,发现瞬态工况下的最高燃烧压力和

收稿日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(51376139)

第一作者: 胡宗杰(1977—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为内燃机瞬态燃烧控制与电动化等。

E-mail: zongjie-hu@tongji.edu.cn

通信作者: 李理光(1962—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为内燃机燃烧诊断与控制。E-mail: liguang@tongji.edu.cn

平均指示压力均大于与之对应的稳态工况;瞬态工况下的放热过程超前于对应的稳态工况,且放热率的最大值较高.张龙平等<sup>[8]</sup>在一台增压中冷柴油机上选取典型恒转速增转矩工况,研究瞬变时间对发动机燃烧与排放响应特性的影响,发现进气量延迟是导致瞬变过程燃烧与排放恶化的主要因素.何江涛<sup>[9]</sup>研究了自由加速工况下汽油机的燃烧规律,发现在自由加速瞬态工况下,最高燃烧压力和平均指示压力低于其相应的稳态工况.苗志慧等<sup>[10]</sup>针对某 1.4T GDI(汽油直喷)发动机低转速小负荷工况,分析了发动机瞬态工况下颗粒物数量浓度、质量浓度以及粒径分布特性.

目前针对直喷汽油机的瞬态工况研究较少,且多为瞬态工况下发动机的燃烧与排放特性的规律研究.本文针对某直喷汽油机,设计恒转速增转矩的瞬态工况,探究不同瞬变时间和不同转矩增量下各参数的动态响应,并提出基于比例积分(proportion and integral,PI)调节的过量空气系数( $\lambda$ )闭环控制和节气门超调两种策略,来优化瞬态工况的燃烧和排放特性.

## 1 试验平台与试验工况

### 1.1 试验平台

本文试验系统如图 1 所示,主要包含发动机及其自主控制和数据采集系统、测功机系统、冷却液和进气恒温系统等,试验系统设备见表 1.发动机为第二代 EA888 直喷汽油机,采用喷油器侧置式燃烧系

统,发动机的基本参数见表 2.

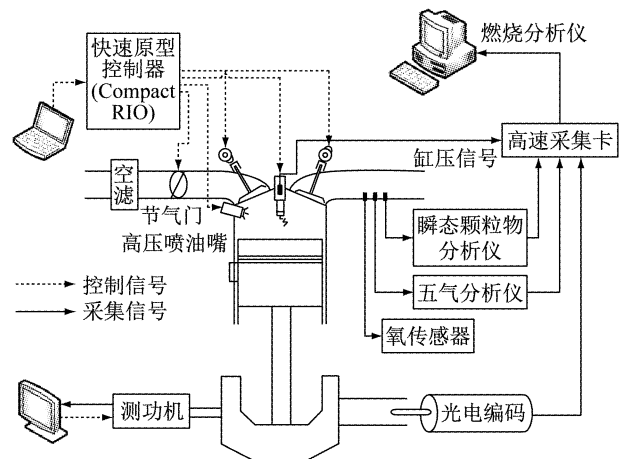


图 1 发动机台架试验系统示意图

Fig.1 Engine test system

本文发动机控制单元是基于 Compact RIO 和 LabVIEW 软件自行开发的,可以实现喷油次数、喷油脉宽、喷油正时、点火时刻、气门升程、气门正时、进气量等参数的实时控制.在发动机控制中,通常是根 据发动机转速、进气流量、氧传感器等信号,直接查表,根据发动机控制器(ECU)存储的标定数据调节喷油脉宽、点火时刻、喷油时刻等参数,而在本文的上位机控制模块中,首先进行基于进气歧管压力和发动机转速的基础喷油和点火提前角脉谱(MAP)的标定,满足过量空气系数 $\lambda=1.0$ ,点火时刻为最佳点火提前角,另外本文根据氧传感器、进气流量信号等对喷油脉宽进行比例积分(PI)调节,实现了 $\lambda$ 闭环控制(控制原理如图 2 所示),基础的 PI 值(比例值、积分值)分别为 $P=0.1/I=0.4$ .

表 1 试验系统设备

Tab.1 Experiment devices

	交流电力测功机	高速采集卡	瞬态颗粒物分析仪	五气分析仪
公司/设备型号	洛阳凯迈/CJ160	NI/PCI-6251	CAMBUSTION/DMS500	佛分/FGA-4100

表 2 试验发动机基本参数

Tab.2 Engine parameters

缸径/mm	行程/mm	压缩比	喷油压力/MPa	燃料	进气方式	进气温度/°C	冷却液温度/°C
82.5	92.8	11.5	10	92# 汽油	自然吸气	30	85

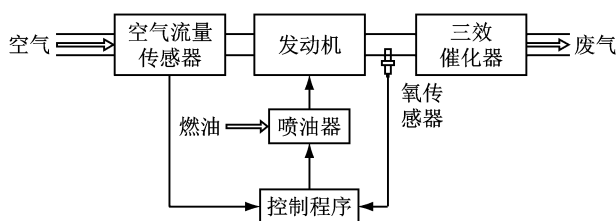


图 2  $\lambda$  的 PI 闭环控制原理图

Fig.2 Closed-loop PI control of lamda

### 1.2 试验工况

在瞬变工况下,由于发动机的进气和喷油都在发生变化,容易造成缸内燃烧的不稳定<sup>[11-12]</sup>,这主要是由于瞬变过程中进气和喷油的响应速度不同,导致燃烧条件变化较大<sup>[13-14]</sup>.

如表 3 所示,本文在 $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下选择了两个转矩增长工况:①节气门开度从 10% 增长到 20%,简称为 10→20 工况;②节气门开度从 6% 增长

表 3 瞬变过程试验工况点  
Tab.3 Transient conditions

发动机转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	节气门 切换幅度/%	节气门 切换耗时/s
1 500	6→20	3,5,7,10
	10→20	3,5,7,10

选择了 3、5、7、10 s 四个不同的瞬变时间. 在每种转矩增长工况下,节气门开度都匀速增加.

## 2 发动机燃烧、排放的动态变化

到 20%,简称为 6→20 工况. 同时借鉴文献[8],本文

图 3a和图 3b所示分别为两种转矩增长工况

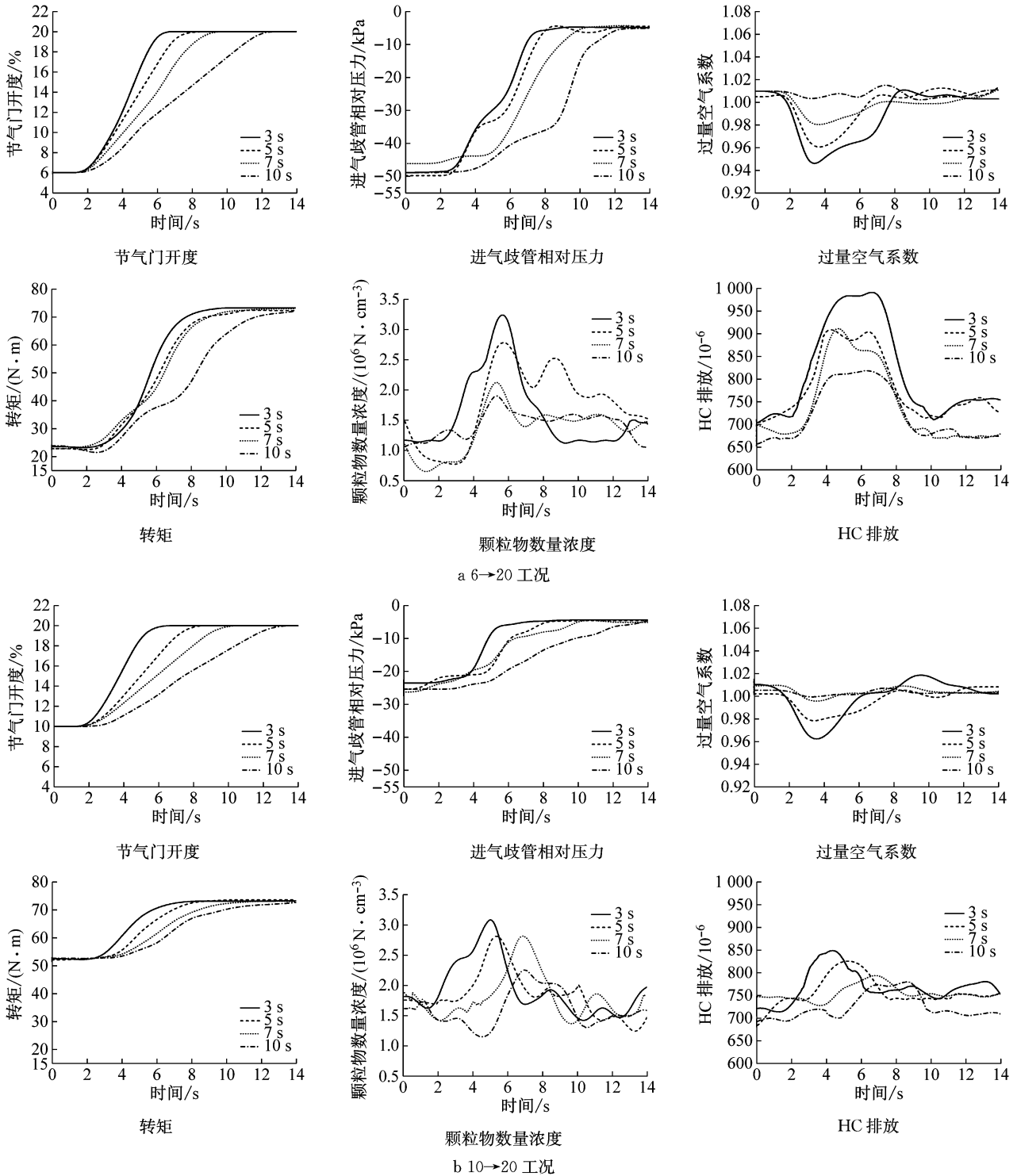


图 3 1 500 r · min<sup>-1</sup>不同节气门切换耗时和切换幅度下发动机参数的响应特性  
Fig.3 Response characteristics of engine parameters with different throttle switch-duration and switch-amplitude rates at 1 500 r · min<sup>-1</sup>

下,发动机节气门开度、进气歧管相对压力、过量空气系数、发动机转矩、颗粒物数量浓度和碳氢(HC)排放的响应历程。

从图 3a 和图 3b 中可以看出,在瞬变过程中节气门开度均近似呈线性变化.与节气门开度相比,进气歧管相对压力的响应有些滞后,这是气体流动比机电机构响应慢而导致的.随着切换耗时增加,进气歧管相对压力的滞后程度减小.由于进气歧管相对压力响应滞后,导致过量空气系数首先急速降低,而后逐渐恢复到  $\lambda=1.0$ .切换耗时越短,过量空气系数降低幅度越大,波动越剧烈。

发动机转矩响应也略有滞后,但与进气歧管相对压力相比,滞后程度较小.分析认为虽然进气有所滞后,但是喷油器可以实现循环级的响应速度,可以随节气门开度增加而迅速加大循环喷油量,使缸内燃烧做功的响应比较快,但毕竟存在进气延迟,转矩输出的响应仍略有滞后.在切换过程中,颗粒物数量浓度和 HC 排放均先增加,然后逐渐降低,最后趋于稳定.切换耗时越短,颗粒物数量浓度和 HC 排放的峰值越大.这是由于切换耗时越短,进气的滞后越明显,缸内混合气处于较为严重的缺氧状态,造成燃烧恶化。

对于不同的节气门切换幅度,对比图 3a 和图 3b 可以发现:在切换耗时相同时,6 $\rightarrow$ 20 工况下过量空气系数的波动更为剧烈,转矩的增长过程的波动也较大,HC 排放的浓度较高.在两种转矩增长幅度的工况下,颗粒物数量浓度的峰值差异不是很大,但 6 $\rightarrow$ 20 工况下的累积颗粒排放量略高.分析认为,切换耗时相同时,在 6 $\rightarrow$ 20 工况下,节气门开度的变化率较大,进气的滞后现象更加明显,使得缸内燃烧进一步恶化。

### 3 瞬态工况的控制策略优化

本文试验也发现,在恒转速增转矩工况下,进气量响应滞后是导致过量空气系数减小、排放恶化的主要因素,因此加快进气响应具有较为重要的意义。

为此本文尝试两种控制策略来优化进气响应:基于 PI 调节的  $\lambda$  闭环控制策略和节气门超调策略。

#### 3.1 基于 PI 调节的 $\lambda$ 闭环控制策略

本文已经设计了基于 PI 调节的过量空气系数闭环控制功能(图 2),可通过调整喷油控制策略改变瞬态工况的燃烧和排放.本试验选择发动机转速 1 500 r $\cdot$ min $^{-1}$ ,切换耗时 5 s,节气门切换幅度 6% $\rightarrow$ 20%,设计了 6 组 PI 值,如表 4 所示(其中组合 1 为基准工况)。

试验结果如图 4 所示,可见不同的 PI 值组合会影响节气门开度的响应过程,进而直接影响过量空气系数的响应特性,改变转矩响应、颗粒物数量浓度和 HC 排放变化过程.通过综合对比可以发现,在  $P=0.08/I=0.5$  的组合下,进气歧管相对压力响应较快,过量空气系数变化幅度较小(变化幅度为 3%),颗粒物数量和 HC 排放较低.但总体来说,表 4 中的 PI 组合所带来的差异不甚明显。

表 4 PI 组合

Tab.4 Values of PI

	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6
<i>P</i>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.08
<i>I</i>	0.4	0.45	0.5	0.55	0.45	0.5

#### 3.2 节气门超调策略

本试验先使节气门开度实际设定值大于目标值,然后再迅速回到目标值,研究该策略优化瞬态工况燃烧和排放的能力。

本试验也选择发动机转速为 1 500 r $\cdot$ min $^{-1}$ ,切换耗时为 5 s,节气门切换幅度 6% $\rightarrow$ 20%,过量空气系数闭环控制的 PI 值也选择表 3 中的组合 1(基准工况).本试验设计了两种节气门超调模式,如下表 5 所示,其中第一种作为基础模式,其瞬变过程与 3.1 节的基准工况相同。

图 5 是不同节气门超调策略下节气门开度的设定变化和实际变化曲线.进气歧管相对压力、过量空气系数、发动机转矩、颗粒物数量浓度和 HC 排放的响应历程如图 6 所示。

由图 6 可见,节气门超调可以有效地缩短进气歧管相对压力、转矩的响应时间,同时降低颗粒物和 HC 的排放.而且随着超调幅度的增加,响应时间缩短,颗粒物数量和 HC 排放更低.分析认为,超调幅度越大,节气门提前开启的角度越大,进气响应加快,过量空气系数甚至略微大于 1.0,使得燃烧更为充分,改善了发动机的燃烧与瞬态排放性能。

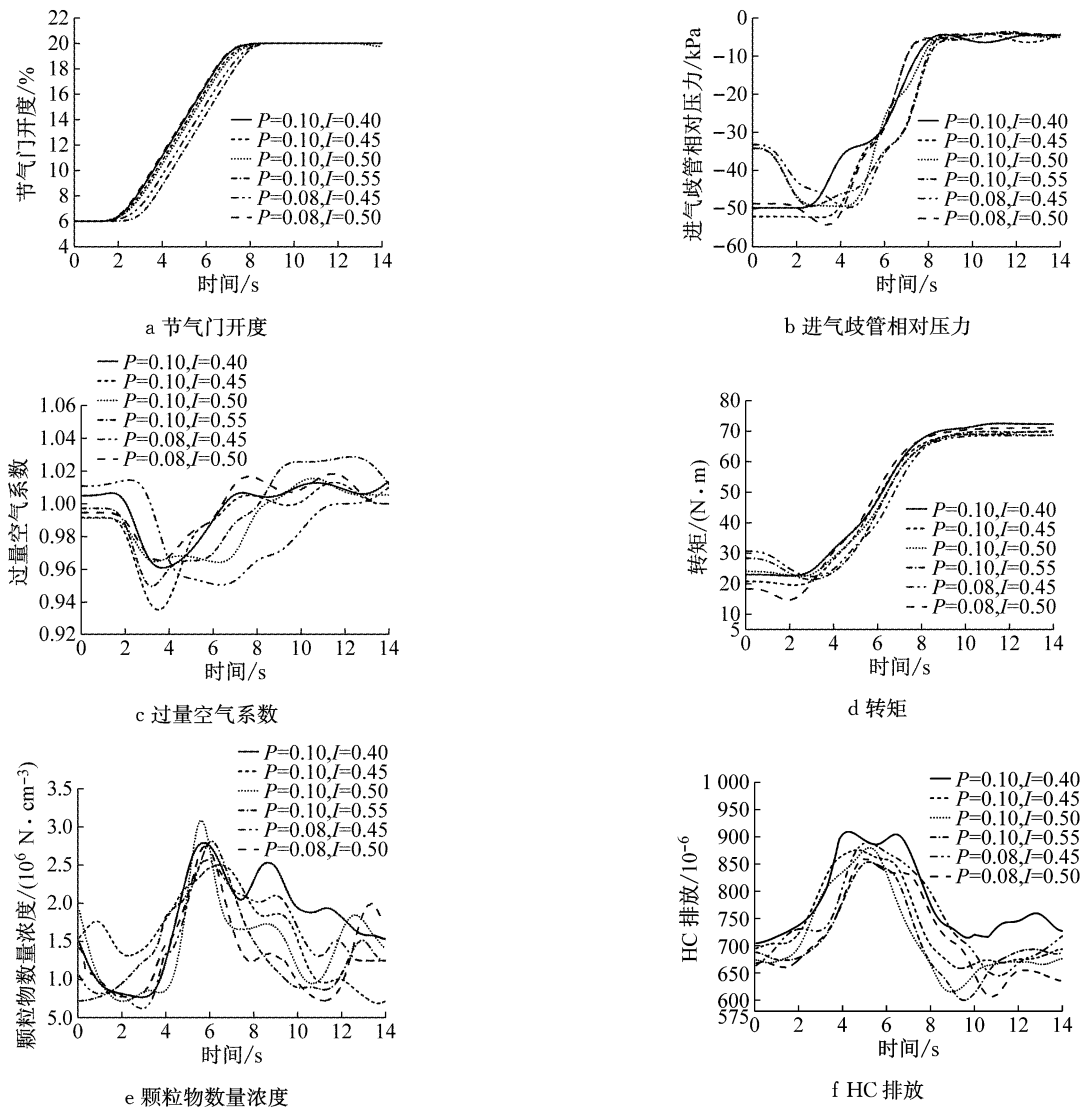


图 4  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 切换耗时 5 s 不同 PI 组合下发动参数的响应特性

Fig. 4 Response characteristics of engine-parameter with different PI at  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and 5 s switch duration

表 5 节气门超调工况

Tab.5 Conditions of throttle-overshoot

	阶段 1 (节气门开度, 稳定时间)	阶段 2 (节气门开度, 瞬变时间)	阶段 3 (节气门开度, 瞬变时间)	阶段 4 (节气门开度, 稳定时间)
基础模式	6%, 2 s		20%, 5 s	20%, 6 s
超调模式 1	6%, 2 s	40%, 1 s	20%, 4 s	20%, 6 s
超调模式 2	6%, 2 s	30%, 1 s	20%, 4 s	20%, 6 s

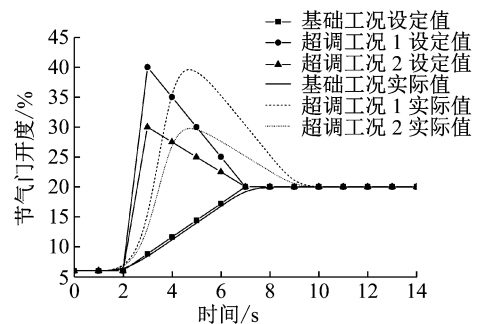


图 5 不同节气门超调策略下节气门的开度变化曲线

Fig. 5 Throttle opening with different throttle-overshoot strategies

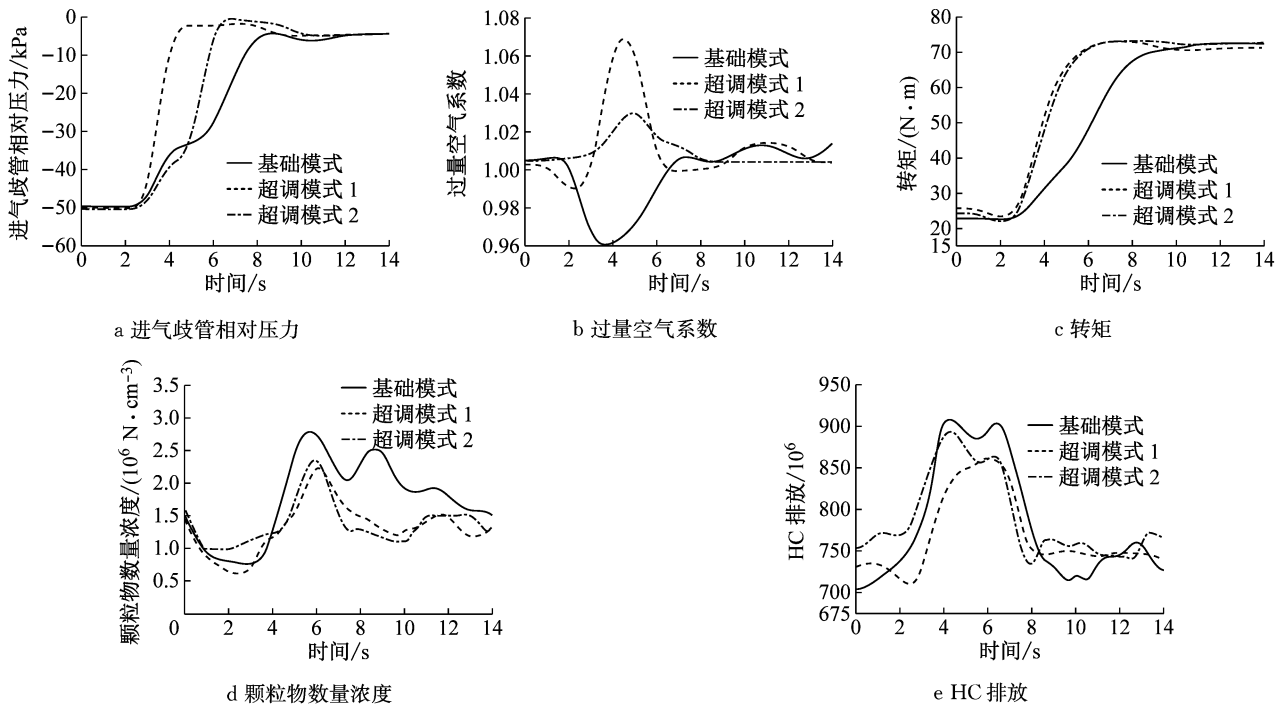


图 6  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  切换耗时 5s 不同超调工况下发动机参数的动态响应特性

Fig. 6 Response characteristics of engine-parameter with different throttle overshoot strategies at  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and 5s switch duration

## 4 结论

本文围绕恒转速增转矩工况,研究直喷汽油机在瞬态变化过程中的燃烧与排放特性,并研究了两种燃烧和排放优化策略,主要结论如下:

(1) 在恒转速增转矩的工况下,切换耗时越长,进气歧管相对压力、发动机转矩相对节气门开度的滞后越小,过量空气系数的波动、颗粒物数量浓度和 HC 排放的恶化程度得到改善。

(2) 在相同切换耗时情况下,转矩小幅度增长时,发动机各参数的响应滞后缩短,颗粒物数量浓度和 HC 排放较好。

(3) 进气的响应特性是影响发动机瞬态工况下燃烧与排放的主要因素。

(4) 通过优化  $\lambda$  闭环控制的 PI 值来提高喷油量的响应,可以改善发动机燃烧和排放,但效果不明显。

(5) 进气门超调策略可以有效地减小进气响应的滞后时间,甚至可以使得混合气浓度在瞬变初期处于偏稀的水平,使燃烧更充分,降低颗粒物数量浓度和 HC 排放。

## 参考文献:

- [1] 冯国胜,杨绍普. 车辆现代设计方法[M]. 北京:科学出版社,2006.  
FENG Guosheng, YANG Shaopu. Modern design method of vehicles[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] DIEU F. Structural optimization of a vehicle using finite element techniques [C/CD]// SAE Paper. Shanghai: SAE International, 1988. 885135.
- [3] 吴春玲,赵亮,刘双喜,等. 中国轻型车第六阶段排放标准解读[J]. 内燃机与配件,2017(7):28.  
WU Chunling, ZHAO Liang, LIU Shuangxi, et al. Introduction to China VI limit and measurement methods for emissions from light-duty vehicles[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2017(7):28.
- [4] 刘忠长,王忠恕,李骏,等. CA6DE1-21K 柴油机瞬态工况下的烟度排放特性[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(6):484.  
LIU Zhongchang, WANG Zhongsu, LI Jun, et al. Smoke emission behavior of CA6DE1-21K diesel engine under transient operating conditions[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(6):484.
- [5] 王锐. 直喷汽油机启动及暖机过程微粒排放特性研究[D]. 长春:吉林大学,2014.  
WANG Rui. Research on the particle emission characteristic during the start and warm up processes of GDI engine[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [6] 赵世峰. 直喷汽油机冷启动工况壁面油膜特性及其对碳烟排放的影响研究[D]. 太原:中北大学,2016.