

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.002

缸内直喷式汽油机冷起动控制策略*

齐万强^{1,2} 于秀敏¹ 张允^{1,3} 麻忠文² 季兵飞² 赵雪峰¹

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 空军航空大学航空控制工程系, 长春 130022;
3. 长春工程学院电气与信息学院, 长春 130012)

【摘要】 根据直喷式汽油机(GDI)冷起动的特性和冷起动的基本要求,设计了相应的冷起动控制策略。以前期自主设计的 ECU 电控系统和试验台架为基础,编写了冷起动控制策略程序,搭建了 GDI 发动机冷起动试验平台,进行了发动机冷起动控制策略试验研究。结果表明:按照冷起动各阶段的最优参数控制策略起动发动机,3 个循环即可起动成功。发动机转速在 1 023 r/min 上下波动,转速波动率为 6%,催化剂的起燃时间为 38 s,起燃较快,且 HC 排放量较低,满足发动机冷起动过程的总体要求。

关键词: 直喷式汽油机 冷起动 控制策略

中图分类号: TK413.7⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0007-06

Cold Start Control Strategy of Gasoline Direct Injection Engine

Qi Wanqiang^{1,2} Yu Xiumin¹ Zhang Yun^{1,3} Ma Zhongwen² Ji Bingfei² Zhao Xuefeng¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Aviation Control Engineering Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China

3. School of Electrical and Information Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract

The control strategy, on the basis of features and demands of cold start conditions, was developed and illustrated thoroughly. The experimental platform was built up and the program of the cold start control strategy was written based on the preliminary work of electronic control system and test bench, and the research on cold start was made. The results show that the engine starts by three cycles successfully with the optimal control parameters for each stage to control cold start process. The engine speed fluctuated around 1 023 r/min and the speed fluctuation rate was only 6%. The light-off time of the catalyst was 38 s and HC emission was at lower lever. The control strategy can meet the general demands for GDI engine cold start.

Key words GDI engine, Cold start, Control strategy

引言

结合汽油机高功率和柴油机高热效率、低排放优势的缸内直喷式汽油机(GDI)相对传统进气道喷油式汽油机(PFI),其燃油经济性可以提高 15% 左右,HC 排放量减少 30%^[1~2],但核心技术被丰田、三菱、大众和 Bosch 等跨国公司控制。到目前为止,

国内的汽油机冷起动方面研究主要集中在 PFI 发动机的燃烧排放以及与三元催化转化器的匹配和快速起燃技术上^[3~6],而在 GDI 发动机冷起动控制策略和两级三元催化转化器起燃特性方面研究较少。本研究以课题组前期设计的 ECU 电控系统和试验台架为基础,搭建 GDI 发动机冷起动的试验平台,并进行发动机冷起动控制策略试验研究。

收稿日期:2012-03-21 修回日期:2012-04-17

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA110107)

作者简介: 齐万强,博士生,空军航空大学讲师,主要从事汽车电子控制研究,E-mail: qwqwall@yahoo.com.cn

通讯作者: 于秀敏,教授,博士生导师,主要从事内燃机电子控制研究,E-mail: yuxm@jlu.edu.cn

1 GDI 发动机台架试验系统

试验采用大众 EA888 系列的 1.8T SI 汽油直喷增压发动机,图 1 为发动机冷起动试验系统总体结构图^[7]。主要技术参数如表 1 所示。

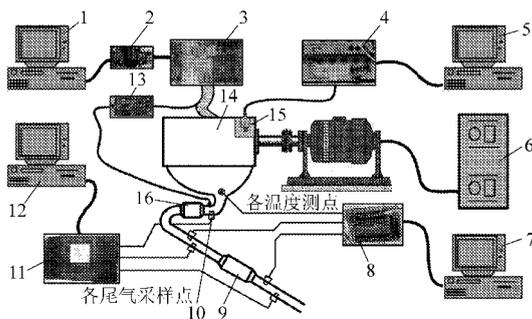


图 1 GDI 发动机冷起动试验系统总体结构图

Fig. 1 Diagram of cold start test system of GDI engine

1. 程序调试上位机 2. BDM 接口 3. 电子控制单元(ECU) 4. AVL 缸压信号处理装置 5. 缸压采集上位机 6. 测功机控制柜
7. 工控机 8. PCLD818HG 型高速数据采集卡 9. 主三元催化转化器 10. 宽频氧传感器 11. AVL DiGas 4000 型尾气分析仪
12. 尾气采集上位机 13. 宽频氧传感器处理电路 14. GDI 发动机 15. 1 号缸压传感器 16. 前级三元催化转化器

表 1 发动机主要技术参数

Tab. 1 Engine specification

参数	数值
排量/L	1.798
缸径×冲程/mm×mm	82.5×84.2
压缩比	9.6
标定功率/kW	118
标定功率转速/ $r \cdot \min^{-1}$	5 000~6 200
最大扭矩/N·m	250
最大扭矩转速/ $r \cdot \min^{-1}$	1 500~4 200

ECU 电控系统硬件以前期设计的硬件电路^[8-9]为基础,外加自行设计的宽频氧传感器硬件电路;软件是以前期设计的发动机电控程序为基础^[10-11],加入了自行设计的宽频氧传感器闭环控制程序和二次喷油控制程序。

2 总体方案设计

发动机冷起动的基本要求包括:起动过程快速平稳,转速波动小,燃烧好排放低,满足国家机动车排放法规的要求。根据对发动机冷起动过程的基本要求和 GDI 发动机冷起动的优势,将冷起动过程设计为电动机拖动起动、起动、催化剂起燃和暖机 4 个阶段。

2.1 电动机拖动阶段控制策略

电动机拖动阶段是指在发动机点火开关闭合

后,电动机起动齿轮与 GDI 发动机双质量飞轮上的齿圈啮合拖动发动机从静止状态到发动机转速达到 300 r/min 的过程。此阶段包括了低压燃油泵的预控制、电子节气门的控制和宽频氧传感器的加热控制。

2.1.1 低压燃油泵的预控制

本研究 GDI 发动机有低压与高压两极燃油泵,使用一个受控于电控单元的 VWAG 控制器控制低压燃油泵的工作。当点火开关闭合发动机准备第一次起动时,即 GDI 发动机进入到电动机拖动阶段,VWAG 控制器单独控制燃油泵预工作一段时间建立起初始供油压力。经试验验证 VWAG 控制器输出 PWM 信号控制低压燃油泵,低压燃油泵的输出压力在 2 s 后稳定在 0.63 MPa,即电动机拖动阶段控制电动燃油泵预工作 2 s 即可满足对低压燃油泵的预控制。

2.1.2 电子节气门的控制

本研究 GDI 发动机使用的电子节气门平衡位置开度为 10%。根据起动阶段的要求,电动机拖动阶段的节气门初始相对位置开度确定为 6%,电控单元控制节气门的驱动机构驱动节气门运动到相应位置。低压燃油泵预控制结束后,发动机电控单元控制电子节气门达到初始开度,为了监测节气门是否达到预定的开度及满足怠速过程节气门闭环控制要求,由电子节气门相对位置开度传感器的输出电压得到此时的开度。

2.1.3 宽频氧传感器的加热控制

为了满足冷起动催化剂起燃阶段和暖机阶段对空燃比闭环控制的要求,需要在电动机拖动阶段完成对宽频氧传感器的加热控制。本研究 GDI 发动机匹配 Bosch 公司生产的 LSU4.2 型宽频氧传感器,为此传感器设计了相应的电源管理模块、信号转换模块、外部加热模块。ECU 输出的控制信号打开功率开关使得电源电压直接作用于宽频氧传感器内部的加热电阻。根据加热型宽频氧传感器的工作特性曲线可知,宽频氧传感器达到 200℃ 时就可以输出正常的空燃比信号。根据试验可知从 20℃ 环境温度加热到 200℃ 所需要的时间为 20 s,可以满足冷起动催化剂起燃阶段和暖机阶段对宽频氧传感器开始工作的要求。

2.2 起动阶段控制策略

当电动机拖动发动机转速达到 300 r/min 左右,GDI 发动机进入起动阶段。起动阶段要求火花塞附近的混合气浓度在着火浓度界限内,以稳定点火,实现快速起动的目的。查阅资料和多次试验可知,分层燃烧模式可以实现 1~2 个循环快速着火并稳定

燃烧。因此本研究 GDI 发动机起动阶段采用压缩冲程喷油起动策略。即控制燃油泵产生预定较高的燃油轨压力,并控制喷油器在发动机压缩冲程的后期喷入燃烧室形成分层混合气,并在适当时刻点燃混合气实现快速起动过程。此阶段包括低压燃油泵的控制、高压燃油泵的控制和喷油点火的控制。

2.2.1 低压燃油泵的控制

当进入起动阶段时,电控单元输出 PWM 信号经 VWAG 控制单元处理后控制低压燃油泵工作。通过试验验证,在 ECU 输出的 10 Hz、15 Hz 和 20 Hz 3 种 PWM 频率(占空比均为 50%)的压力曲线中,频率越高压力升高越快且都在 2 s 左右达到输出油压最大。本研究最终选取了 20 Hz 的 PWM 信号作为低压燃油泵正常工作的控制信号,且 2 s 后输出油压能够达到 0.5 MPa。

2.2.2 高压燃油泵的控制

本研究 GDI 发动机高压燃油泵的控制实质是对燃油压力调节阀的控制。燃油压力调节阀在开启时间相同的情况下,被激活的越早,进入共轨内的燃油量越多,最终的轨压会越高。在 GDI 发动机冷起动过程,油压应尽可能高,雾化才能更好,即要求高压燃油泵的柱塞在供油冲程的始点开始供油。但考虑到冷起动过程中转速较低,高压燃油泵的机械效率较低,难以产生较高的燃油压力,故将冷起动过程轨压设定为 5 MPa。当进入供油相位时,电控单元输出 1 kHz 的 PWM 信号激活燃油压力调节阀,持续时间为 6 ms。经过发动机 3~5 个循环,轨压可升高到 5 MPa 左右。

2.2.3 喷油系统的控制

喷油系统的控制实质是对高压喷油器电磁阀的控制。高压喷油阀要求在初始时刻迅速供给 12 A 大的控制电流开启喷油阀,之后需要 3 A 大的保持电流维持喷油阀的开启状态,直到喷油结束。具体控制的方法是通过低位和高位开关控制硬件电路中的大功率驱动器产生开启电流和保持电流。图 2 为高压喷油阀控制过程示意图, t_{q0} 、 t_{q1} 、 t_{q2} 、 t_{q3} 和 t_{q4} 为齿脉冲信号, t_{q1} 为低位开关开启时刻, t_{q2} 为高

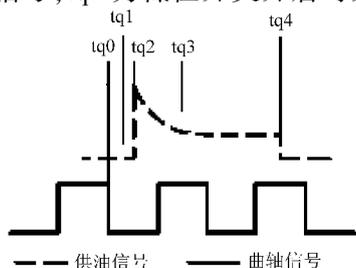


图 2 高压喷油阀控制过程示意图

Fig. 2 Control strategy of high pressure fuel pump

位开关开启时刻, t_{q3} 为高位开关关闭时刻, t_{q4} 为低位开关关闭时刻。

2.2.4 点火系统的控制

点火系统的控制实质是控制点火线圈中的初级线圈通断电,使次级线圈产生高压击穿火花塞电极放电的过程。点火提前角和线圈通电时间是点火控制的两个关键参数,最优点火提前角是根据发动机工况输出最大扭矩点标定得出,而线圈通电时间的确定则是根据通电时间与电源电压特性关系曲线查表得出。

2.3 催化剂起燃阶段控制策略

当发动机转速超过 1 200 r/min 时,起动阶段结束,进入催化剂起燃阶段。此阶段的目标主要是使三元催化转化器尽快达到起燃温度。该阶段的控制主要包括空燃比的控制、燃油轨压力的闭环控制及两次喷油的控制。

2.3.1 催化剂的起燃特性

催化剂的起燃特性由催化剂的起燃温度评价。起燃温度越低,起燃特性越好。本研究 GDI 发动机使用两极催化转化器。前级催化转化器安装位置靠近排气总管,可以吸收更多的排气热量;体积小、贵金属含量高使得起燃温度较低。由于前级催化转化器在冷起动过程中可以快速起燃,故本研究催化剂的起燃特性和相关控制策略的应用对象均指前级催化转化器。

根据三元催化转化器的结构特性可知,过量空气系数对起燃特性有很大的影响。从图 3 可以看到,过量空气系数为 0.9 时,CO 和 HC 起燃温度均最高,分别达到了 135℃ 和 380℃。而随着过量空气系数逐渐增大,CO 和 HC 起燃温度逐渐降低,在过量空气系数为 1.3 时,CO 和 HC 起燃温度分别为 105℃ 和 290℃。但较低的过量空气系数对发动机的排气温度即催化剂的入口温度有较大的影响。经试验验证,过量空气系数为 0.9 时,催化剂入口温度达到最大的 550℃。而随着过量空气系数的增大,催化剂入口温度快速降低,并在过量空气系数为 1.3 时,达到 250℃ 的最低值。

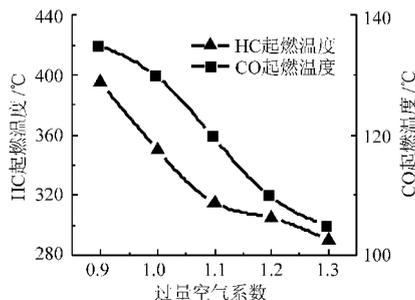


图 3 过量空气系数对 HC 和 CO 起燃特性的影响曲线

Fig. 3 Effect of lambda on light-off features of HC and CO

2.3.2 空燃比的控制

根据催化剂的起燃特性可知,使催化剂快速起燃的两个条件为较高的催化剂入口温度和较低的起燃温度。经试验验证,随着过量空气系数逐渐增大,CO和HC起燃温度逐渐降低,催化剂入口温度快速降低,综合考虑,确定此时的过量空气系数为1.1。

首先通过调节节气门的相对位置开度和相应的喷油量使得过量空气系数维持在0.9附近,形成稍浓的混合气以便于发动机起动成功。在发动机处在催化剂起燃阶段,过量空气系数维持在1.1附近。当催化剂已经达到起燃温度,催化剂起燃阶段结束而进入到发动机暖机阶段,考虑到前置三元催化转化器已经正常工作,综合暖机加浓的要求,此时过量空气系数控制在1.0附近。

2.3.3 燃油轨压力闭环控制

当发动机经过3~5个循环的高压油泵开环控制后,轨压迅速升高到5 MPa以上。由于轨压的波动对喷油量和喷油时刻的计算精度以及燃油雾化水平有较大的负面影响,故本研究燃油轨压力闭环控制采用模糊PID控制策略。经实测,设计的轨压控制器使轨压调整迅速,超调小,抗干扰能力较强,可以满足实际对轨压闭环控制的要求。

2.3.4 两次喷油的控制

经实测,GDI发动机的两次喷油控制策略可以显著提高稀燃的稳定性,即推迟点火能力更强,排气温度更高,可以快速加热三元催化转化器。在进气冲程早期第一次喷油,在压缩冲程后期第二次喷油,可在火花塞附近形成较浓的可燃混合气,使点火较晚且发动机燃烧稳定和平稳运转。

2.4 暖机阶段控制策略

当催化剂达到正常工作温度,即催化剂起燃阶段结束,发动机进入暖机控制阶段。暖机阶段的主要目标是使发动机的冷却液温度尽快达到正常温度(90℃)。此阶段的主要控制策略是通过均质燃烧模式,以较高的燃烧热效率加快缸内高温气体与冷却液的热交换,使发动机冷却液温度快速升高。此阶段主要是通过控制电子节气门开度、喷油正时以及点火提前角来实现均质燃烧模式。

2.4.1 冷却液温度的测量

暖机阶段关注的参数是冷却液的温度,为了准确测量发动机的冷却液温度,采用高精度NTC冷却液温度传感器并安装在发动机的出水口。本研究用三阶数学表达式拟合出冷却液温度传感器特性曲线,根据该公式即可计算得出此时的冷却液温度,用于监测发动机状态和冷起动过程喷油点火等关键控制信号的修正。

2.4.2 均质燃烧模式的控制策略

均质燃烧模式是指在进气冲程早期将燃油喷入气缸内,燃油和空气充分混合形成过量空气系数为1.0的均质混合气而点火燃烧的模式。考虑到暖机后的怠速控制,节气门开度要根据冷却液温度进行实时控制。本研究在冷却液温度达到60℃以前,节气门开度维持在6%,而在冷却液温度为60℃、75℃、85℃、90℃时,节气门相对位置开度分别降低1%,并最终维持在2%的开度。

3 试验验证

设计的冷起动总体控制策略如图4所示,ECU上电后进入电动机拖动阶段,当起动电动机工作时间 T_d 大于2 s后,发动机进入起动阶段。当发动机转速超过1 200 r/min时,起动成功进入到催化剂起燃阶段。当催化剂起燃阶段运行的时间 T 超过了基本起燃时间 T_c 的1.2倍(为了降低HC排放量,保证进入暖机阶段前达到催化剂起燃的条件,故将 T 设定为 T_c 的1.2倍),发动机进入到暖机阶段,执行暖机阶段的控制策略。

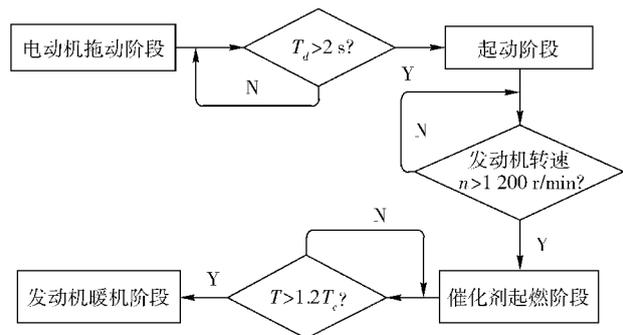


图4 总体控制流程图

Fig. 4 Flow diagram of overall design

在发动机起动阶段试验中确定出最优的喷油正时和相应的点火提前角,由GDI发动机起动阶段试验发现喷油正时与点火提前角两个因素对起动阶段的影响较大。在节气门开度为6%、轨压为0.5 MPa、过量空气系数0.9条件下,喷油正时为90°BTDC、点火提前角为30°BTDC时,与其他几种情况相比,缸内压力最大,发动机在2个着火循环即可起动成功,且排放较低。通过GDI发动机催化剂起燃阶段的相关试验发现,两次喷油策略可以使发动机在稀燃状态下稳定燃烧。鉴于GDI发动机两次喷油策略的复杂性,仅研究了第1次与第2次喷油脉宽比例对催化剂起燃阶段的影响。在节气门相对位置开度为6%、轨压为5 MPa、过量空气系数1.1条件下,第1次喷油正时为300°BTDC,第2次喷油结束相位为70°BTDC,点火提前角为15°ATDC,与

其他几种情况相比,第1次与第2次喷油脉宽比为5:5的情况下燃烧状态最好、缸压最大、排温达到最高370℃,HC排放量最低以及达到CO和HC的起燃温度时间均最短,分别为28s和36s。并且CO的快速起燃可以显著缩短HC的起燃时间。通过GDI发动机暖机阶段的试验发现,点火提前角对发动机冷却液温度变化的影响较大。在节气门开度为6%、轨压为5MPa和过量空气系数为1.0以及喷油正时设定为260°BTDC条件下,随着点火提前角的加大,发动机冷却液温度随之快速升高而后升高速度减慢。与其它情况相比,点火提前角为25°BTDC情况下,暖机20s后冷却液温度达到最大,为46℃。在温度17℃、压力99.7kPa和湿球温度14.5℃的大气环境下,蓄电池电压12.359V、冷却液温度20℃和机油温度19℃的发动机冷启动状态下,进行了冷启动过程的总体试验,获得了发动机转速变化曲线和HC排放曲线。

图5为发动机转速变化曲线,并选取了两段有代表性的循环区间。由前10个循环的发动机转速变化曲线可以看出,发动机转速达到294r/min时进入起动机阶段,即起动机达到294r/min时,脱离起动机拖拽阶段,开始第1次喷油,并在第3个循环

发动机转速达到了1350r/min,启动成功。之后进入了催化剂起燃阶段,由于采用了稀燃和两次喷油控制策略,受进气温度和发动机冷却液温度较低等不利条件的影响,导致发动机不完全燃烧和失火率较高,转速波动较大。随着催化剂起燃阶段的继续,燃烧条件得到改善,发动机转速在1000r/min附近上下波动。循环区间为401~800内的400个发动机循环, n_{max} 为1063r/min, n_{min} 为995r/min。计算出平均转速 n_m 为1023r/min,计算出循环变动率为6%,波动较小。从图5还可以看到,在1435~1445循环范围内转速波动较大,表明此时发动机从催化剂起燃阶段进入到暖机阶段,阶段转化过程使发动机转速波动较大。由发动机循环数计算出此时的催化剂起燃阶段的时间为42.04s,与程序设计的42s控制时间吻合。

图6为HC排放量曲线,从图中可以看到HC排放量最大值为 2.489×10^{-3} ,稳定后在 6.85×10^{-4} 左右波动。与课题组前期冷启动试验获得的HC排放量数据相同^[10],总体的HC排放量降低19%。从图6还可以看到催化剂的实际起燃时间为38s,起燃迅速,小于程序设计的催化剂起燃阶段时间42s,保证了发动机进入暖机阶段前三元催化转化器必须起燃的要求。

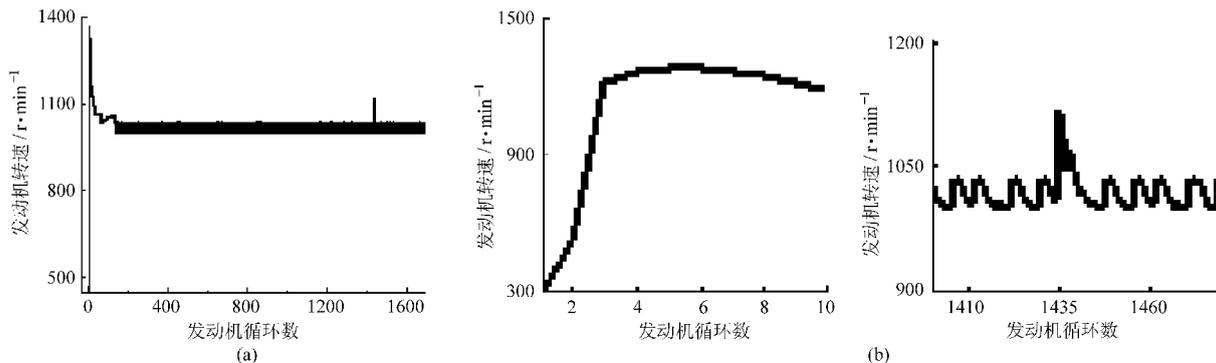


图5 启动转速变化曲线
Fig.5 Start speed curve
(a) 整体图 (b) 局部放大图

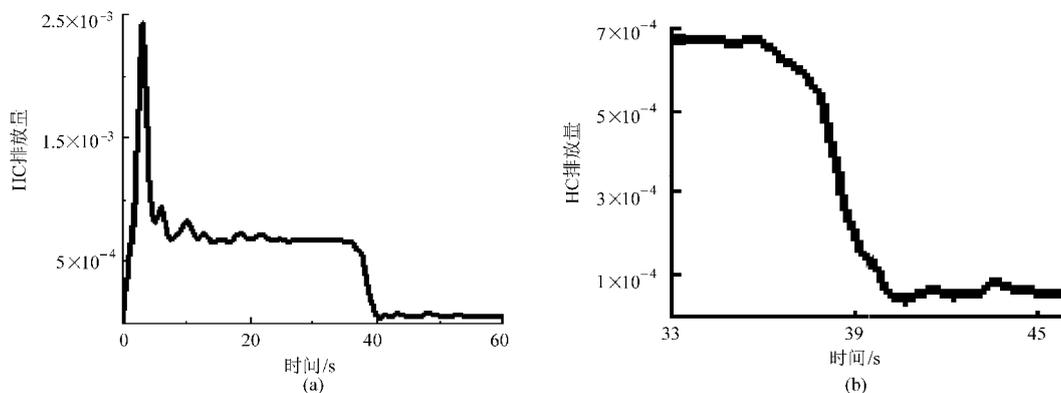


图6 HC排放量曲线
Fig.6 HC emission curve
(a) 整体图 (b) 局部放大图

4 结束语

设计的 GDI 发动机冷起动控制策略控制发动机冷起动过程, 起动电动机达到 294 r/min 时, 发动机第一次喷油点火后 3 个循环发动机转速超过 1 200 r/min。进入催化剂起燃阶段, 1.2 倍的基准起

燃时间能够保证发动机进入暖机阶段前催化剂正常工作的要求, 且催化剂实际起燃时间为 38 s, 起燃迅速, 而且在 60 s 测试采样中, HC 排放量较低。综上所述, 设计的冷起动控制策略能够满足冷起动过程起动迅速、转速波动较小、催化剂快速起燃和较低 HC 排放的总体要求。

参 考 文 献

- Anderson R W, Brehob D D, Yang J, et al. A new direct injection spark ignition (DISI) combustion system for low emissions [C]//Proceedings of FISITA 96, Congress No. P0201, 1996.
- Byron Thomas Shaw. Modeling and control of automotive cold start hydrocarbon emissions [D]. Berkeley: University of California, 2002.
- 黄佐华, 庞俊国, 潘克煜, 等. 冷起动和怠速时火花点火发动机缸内未燃碳氢生成过程的研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997(4):406~411.
Huang Zuohua, Pang Junguo, Pan Keyu, et al. Study on formation process of in cylinder unburned hydrocarbons during cold start and idling periods in SI engines[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997(4):406~411. (in Chinese)
- 程勇, 王建昕, 庄人隽, 等. 电控汽油机起动及暖机工况燃烧状况的分析统计[J]. 内燃机学报, 2002, 20(1):62~66.
Cheng Yong, Wang Jianxin, Zhuang Renjun, et al. Analysis of indicator diagram under cold-start and warm-up conditions of SI gasoline engine[J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1):62~66. (in Chinese)
- 程勇, 王建昕, 吴宁, 等. 降低汽油机起动及暖机过程中 HC 排放的探讨[J]. 内燃机学报, 2002, 20(4):292~296.
Cheng Yong, Wang Jianxin, Wu Ning, et al. Investigation on reducing HC emissions during cold-start and warm-up periods of gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(4):292~296. (in Chinese)
- 周毅, 刘新宇, 高卫民. 三元催化器冷起动研究分析[J]. 内燃机工程, 2002, 23(3):43~49.
Zhou Yi, Liu Xinyu, Gao Weimin. Experimental research on performance of three-way catalytic converter in engine cold start phase[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23(3):43~49. (in Chinese)
- 于秀敏, 董伟, 稽全喜. 直喷式汽油机催化器快速起燃的试验研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(10):865~868.
Yu Xiumin, Dong Wei, Ji Quanxi. An experimental study on the fast light off of catalytic converter in a gasoline direct injection engine[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(10):865~868. (in Chinese)
- 于秀敏, 谭兴闻, 马君, 等. 缸内直喷汽油机起动控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(6):1 554~1 558.
Yu Xiumin, Tan Xingwen, Ma Jun, et al. Gasoline direct injection engine start control[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6):1 554~1 558. (in Chinese)
- 赵雪峰, 于秀敏, 周骥, 等. 基于直喷式汽油机电控系统硬件开发与试验研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(2):39~42.
Zhao Xuefeng, Yu Xiumin, Zhou Ji, et al. Development and experiment research on hardware of electronic control system for GDI engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(2):39~42. (in Chinese)
- 马君. 直喷汽油机试验用电控单元开发及起动控制的研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
Ma Jun. Development of ECU for bench experiment and research of engine start control for gasoline direct injection engine [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 周骥. 直喷汽油机电控系统设计及稀薄燃烧试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
Zhou Ji. Electronic control system design and experiment research on lean combustion characteristics of gasoline direct injection engine[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)