

文章编号:1000-582X(2012)05-014-08

汽油机连续可变进气凸轮轴相位策略的数值模拟

张 力¹,尚会超¹,袁志强²,马 为²,付秋波²,陈明飞³

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044;2. 长安汽车工程研究院,重庆 401120;
3. 装甲兵技术学院 车辆工程系,长春 130117)

摘 要:针对 486Q 汽油机连续可变进气凸轮轴配气相位系统的研制,采用发动机循环模拟数值方法研究连续可变进气凸轮轴配气相位系统的相位策略。数值模拟表明 486Q 汽油机在高负荷中低转速工况通过进气相位提前抑制进气在气门关闭时刻向进气道的倒流可有效提高循环进气量,使中低转速工况动力输出性能提高 6%~8%,其结果与随后试验测试获得进气相位变化量一致。综合考虑燃油消耗率和有害排放物生成,数值模拟中等负荷工况进气相位参数的调节优化,通过进气相位提前,示例工况缸内残余废气系数可从 9%增加到 20%,NO 排放量低减约 80%,燃油消耗率降低 2%左右;通过试验测试确定中等负荷各工况进气相位最佳范围。探讨怠速低负荷工况改善燃烧稳定性、低减 HC 排放和改善低温起动性能的相位策略,数值模拟低负荷工况通过进气相位延迟抑制排气向进气道倒流以低减缸内残余废气量的效果;通过试验测试获取 486Q 汽油机怠速低负荷工况最佳相位器变化量。

关键词:汽车发动机;可变气门正时;控制策略;循环模拟;废气再循环

中图分类号:TK411

文献标志码:A

Numerical simulation on phasing strategy for a gasoline engine with continuously variable intake camshaft

ZHANG Li¹, SHANG Hui-chao¹, YUAN Zhi-qiang²,
MA Wei², FU Qiu-bo², CHEN Ming-fei³

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China; 2. Automobile Engineering Institute of
Chang'an Automobile Corporation Limited, Chongqing 401120, P. R. China;

3. Department of Vehicle Engineering, Institute of Armored Technique, Changchun 130117, P. R. China)

Abstract: Intake camshaft equipped with continuously adjustable cam phasing units is applied to a 486Q gasoline engine. Phasing strategies are researched through engine cycle simulation to achieve superior engine performance. The simulation results show that at high load and low and moderate speed of the engine, phasing adjustment can lead to 6% to 8% increase in power performance because phasing advance contributes to suppressing intake backflow at IVC (intake valve closed). Cam phases obtained from numerical optimization have good agreement with engine test. At moderate load, cycle simulations show that phasing advance can increase residual gas coefficient from 9% to 20%, and reduce NO emission by

收稿日期:2011-12-01

基金项目:重庆市科技攻关计划重点资助项目(CSTC,2008AC6024)

作者简介:张力(1968-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事内燃机工作过程的研究,(E-mail)zhangli20@cqu.edu.cn.

80%, BSFC (brake specific fuel consumption) by 2% at a demonstration operation. With regard to fuel economy and emissions, adjustment and optimization of intake phasing at moderate load are further verified by engine test. At low load, technical approaches to enhance combustion stability, reduce HC emission and improve cold start are investigated. The effectiveness of suppressing exhaust backflow into intake duct by phasing retard is testified by simulation. Phasing changes at the operating condition are optimally obtained by engine test for improvement of combustion stability.

Key words: automobile engine; variable valve timing; control strategy; cycle simulation; EGR (exhaust gas recirculation)

可变气门正时 (Variable Valve Timing) 改变了传统发动机配气相位固定不变的状态,能够在发动机运转工况范围内提供最佳的配气正时,对于提升发动机高速功率和低速扭矩、降低部分负荷油耗和尾气排放具有较好效果^[1-4]。

目前国内外可变气门正时的技术研究主要体现在:可变配气正时系统零部件的实验评价及设计的持续改进^[5-7];可变配气正时系统运行模式和控制策略及其对发动机性能的影响^[8-10]。所述研究多是采用发动机性能试验的实验研究途径,例如:测试分析进气相位的改变对汽油机冷启动过程首次循环缸内燃油供给的影响和 HC 排放的影响,从而制定可变配气相位系统冷启动相位策略^[8];以发动机性能试验大量测试数据为基础分析双可变凸轮轴配气相位汽油机在全负荷、部分负荷、启动及怠速工况下的运行模式,优化其进气相位和排气相位的控制策略^[10]。而采用数值方法优化可变配气相位系统相位控制策略的研究则很少。

笔者结合 486Q 汽油机连续可变进气凸轮轴配气相位系统的研制,采用发动机循环模拟数值方法研究连续可变进气凸轮轴配气相位系统与发动机整机合理匹配的运行模式及相位控制策略。优化发动机高负荷工况提高进气充气效率的配气正时相位参数;分析中低负荷工况提高燃油经济性和抑制排放的相位策略机理并确定其部分负荷工况进气相位最优的运行区域;探讨低温启动、怠速和轻负荷工况改善燃烧稳定性和提高燃油经济性的途径,通过试验获得该工况不同转速下最优的相位器变化角度。试验测试表明所形成相位策略能够明显改善 486Q 汽油机动力性、燃油经济性和排放性能,能够充分发挥连续可变进气凸轮轴配气相位系统的潜在效能。

1 发动机循环模拟数值原理及模型验证

发动机循环模拟即通过数值方法计算进排气系统的不稳定流动,再与描述缸内燃烧、传热等过程的多维或零维热动力学模型相连,采用数值分析方法

模拟发动机热力循环工作过程。发动机缸内过程控制方程利用热力学第一定律得到

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = -p_c \cdot \frac{dV_c}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_B \cdot \frac{dm_B}{d\alpha}, \quad (1)$$

式中: m_c 为缸内工质质量; u 为比内能; α 为曲轴转角; p_c 为气缸内工质压力; V_c 为气缸工作容积; Q_F 为燃料在气缸内燃烧放出的热量; Q_w 为壁面热量损失; h_B 为漏气焓; m_B 为漏气质量。进排气系统一维流体动力学方程的数学描述为

连续方程

$$\frac{dm}{dt} = \sum_b m_f \cdot l_x, \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{d(me)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \sum_b (m_f l_x H) - h_t A (A_{\text{gas}} - T_{\text{wall}}), \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{d(m_f l_x)}{dt} = \left[dpA + \sum_b (m_f l_x u) - 4C_f \frac{\rho u^2}{2} \frac{dxA}{D} - C_p \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) A \right] / dx, \quad (4)$$

式中: m 为控制体积质量; V 为控制体积体积; p 为控制体积压力; ρ 为控制体积密度; A 为流通面积; e 为内能; H 为总焓; h_g 为传热系数; D 为当量直径; u 为控制体积边界速度; C_f 为表面摩擦系数; C_p 为压力损失系数; m_f 为单位面积质量流量; l_x 为管道横截面积。

气门重叠角是影响内部 EGR 的主要原因。根据残余废气的 FOX 模型^[11],缸内残余废气系数的展开式可以表示为

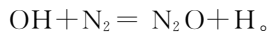
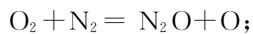
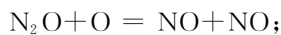
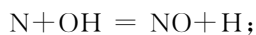
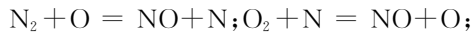
$$f_r = 1.266 \frac{f_{ov}}{n} \left(\frac{P_s}{P_{ex}} \right)^{-0.87} \sqrt{|P_{ex} - P_s|} + 0.632 \frac{\phi \left(\frac{P_s}{P_{ex}} \right)^{-0.74}}{\varepsilon}, \quad (5)$$

其中重叠角因子展开式为

$$f_{ov} = \frac{1.45}{D_c} (107 + 7.8\phi + \Delta\phi^2) \frac{L_{v,\max} D_v}{D_c^2}, \quad (6)$$

式中: P_s 为进气压力; P_{ex} 为排气压力; n 为发动机转速; ε 为压缩比; Φ 为空燃比; D_c 为气缸直径; ϕ 为气门重叠角; $\Delta\phi$ 为气门重叠角增量; $L_{v,\max}$ 为最大气门升程的平均值; D_v 为气门座内径的平均值。

缸内有害排放物 NO_x 的生成主要考虑以下化学总反应方程:



未燃 HC 的生成机理主要涉及下列多种因素, 主要有狭隙效应, 润滑油膜的吸附与解吸, 部分燃烧以及 HC 的氧化等。其中计算油膜中燃油质量分数径向分布的扩散方程为

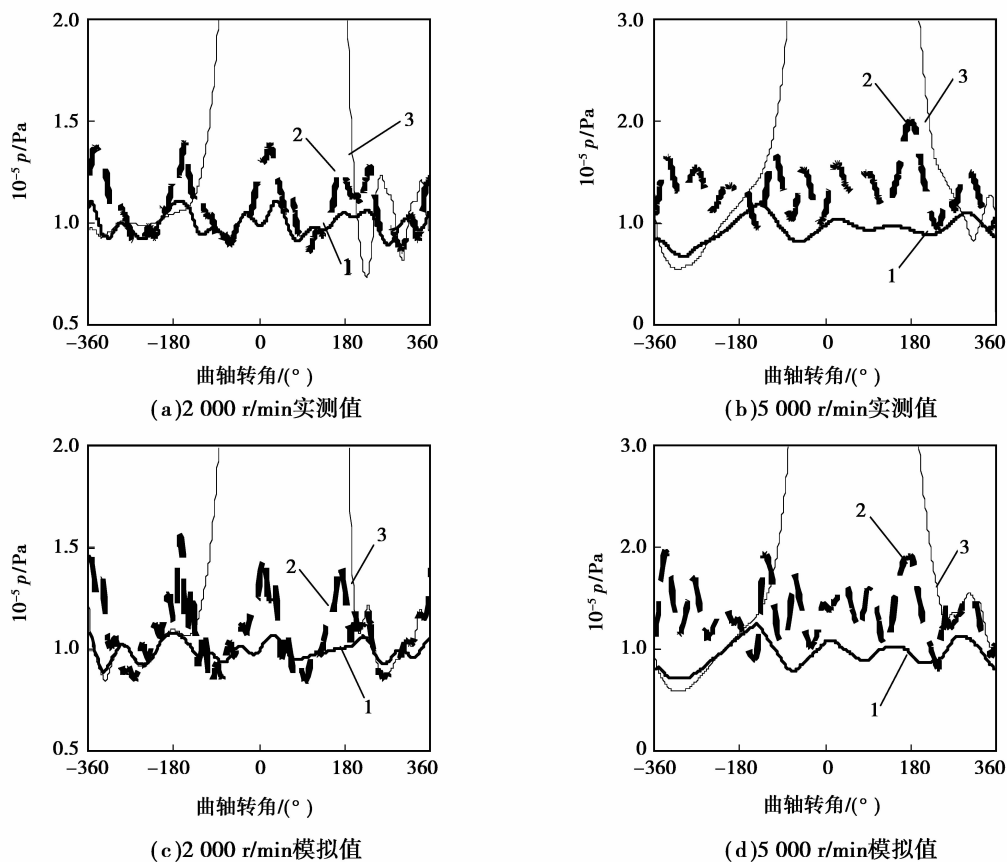
$$\frac{\partial W_F}{\partial t} - D_{\text{dif}} \frac{\partial^2 W_F}{\partial r^2} = 0, \quad (7)$$

其中扩散系数的计算公式为

$$D_{\text{dif}} = 7.4 \cdot 10^{-8} \cdot M^{0.5} \cdot T \cdot v_f^{-0.6} \cdot \mu^{-1}, \quad (8)$$

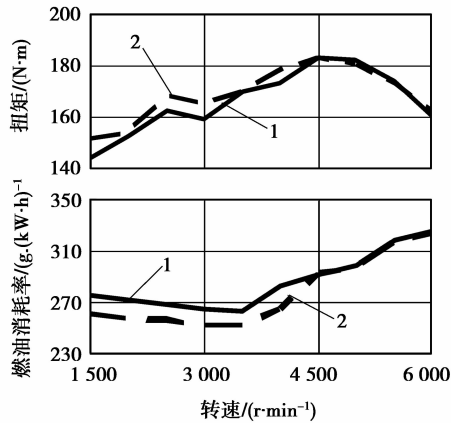
式中: W_F 为油膜中燃油质量分数; t 为时间; r 为与壁面之间的距离; M 为燃油的摩尔质量; T 为燃油的温度; v_f 为燃油在标准沸腾条件下的摩尔体积; μ 为燃油的黏度。

486Q 汽油机基本参数为: 标定功率 101.2 kW, 标定转速 6 000 r/min, 缸径 86 mm, 冲程 86 mm, 压缩比 10。采用 BOOST 软件建立循环模拟数值模型。模型建立及其验证试验包括: 空滤器特性试验、气道稳流特性试验、热反拖机械损失试验、台架性能试验、活塞漏气量测试、空燃比测试、等速排放性能试验、缸内燃烧诊断和进排气道动态压力测量等。图 1 示例机充量交换过程进排气道及缸内动态压力的测试值和模拟值, 证实数值模型能够充分表征进排气道及缸内气体流动动态特征。图 2 为外特性输出扭矩和燃油消耗率曲线, 证实数值模型能准确预估发动机主要性能特征。



1—进气道; 2—排气道; 3—气缸

图 1 进排气道及缸内动态压力的测试与模拟

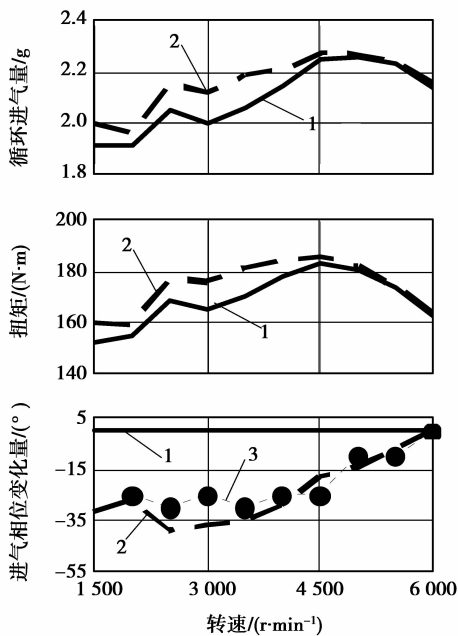


1—模拟;2—测试

图 2 外特性的数值模拟与测试验证

2 高负荷相位策略与相位参数优化

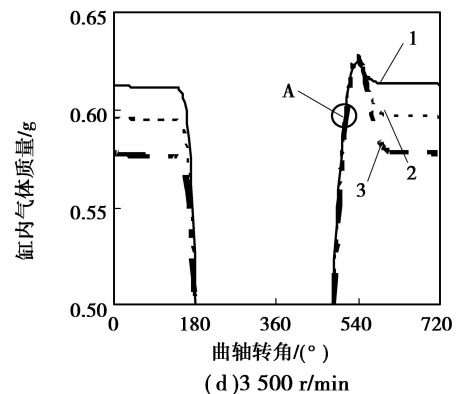
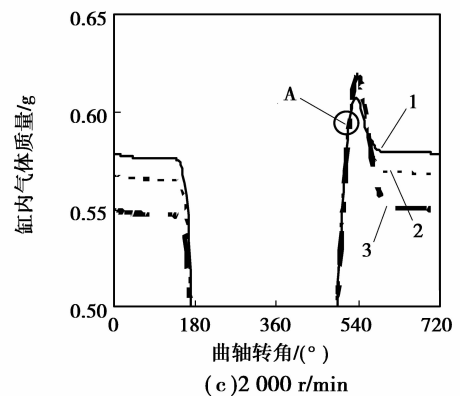
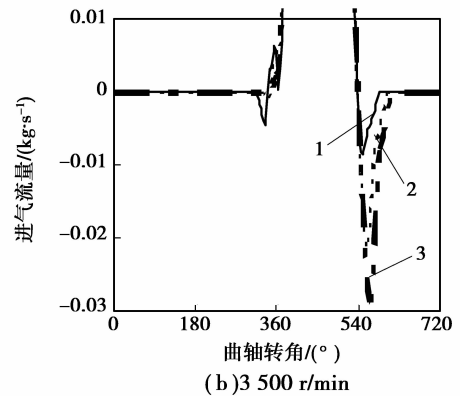
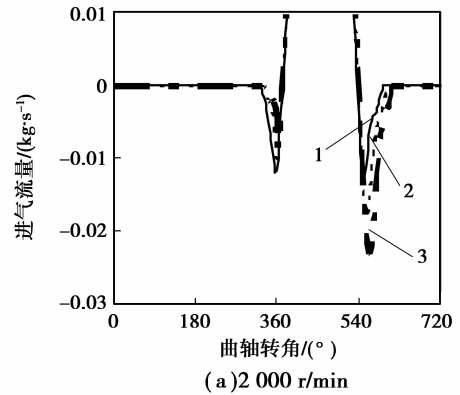
高负荷工况连续可变进气凸轮轴配气正时系统的相位策略以提高动力性能为目的^[12]。利用循环模拟数值模型以最大扭矩为目标函数,对 486Q 汽油机全负荷各转速工况进气相位参数进行数值优化。如图 3 所示,优化进气相位后 486Q 汽油机外特性扭矩有明显的改善,中低转速工况扭矩动力输出性能提高 6%~8%,其循环进气量相对于高速工况循环进气量增加效果更加明显。图 3 可见,数值模拟结果与随后 486Q 汽油机台架性能试验确定的最佳进气相位变化量基本一致。



1—原机;2—模拟;3—测试

图 3 全负荷相位参数优化

通过循环模拟可获得 486Q 汽油机中低转速工况最佳进气相位、原始进气相位和中间状态进气相位的进气流量和缸内累积气体质量。如图 4 所示。



1—最佳进气相位;2—中间进气相位;3—原始相位

图 4 优化进气相位前后进气流量对比

进气门开启和关闭期间均存在气缸工质气体向进气道倒流的现象。气门开启期间缸内部分气体会因缸内较高排气压力倒流入进气道内,随进气相位的提前,倒流现象越明显。但观察图中缸内气体质量,因进气相位提前所产生的倒流现象对进气门开始关闭前缸内气体质量的影响甚微。图中,由于缸内动态压力和进气道动态压力的综合作用,采用最佳进气相位、原始进气相位和中间状态进气相位的缸内气体质量在进气门开始关闭前(图中 A 标识)几乎完全相同。

进气门关闭期间倒流则是因为进气行程后期缸内压力高于进气道压力而出现较明显的缸内气体倒流入进气道的现象。进气相位提前意味着进气门关闭时刻提前,观察最佳进气相位、原始进气相位和中间状态进气相位缸内气体质量变化曲线可以看出,最佳进气相位能够最大程度减少进气充量从缸内向进气道的倒流,从而获得最大循环进气量。通过进气相位提前抑制进气向进气道的倒流是高负荷中低转速工况进气相位调节优化的决定性因素。

3 中等负荷相位策略与相位参数优化

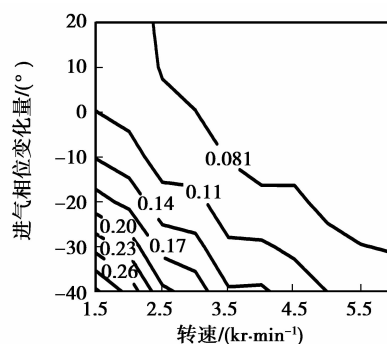
中等负荷工况可变进气凸轮轴配气正时系统利用进气相位提前增加气门重叠角,可提高内部 EGR 率,增加缸内残余废气量,有效控制 NO_x 生成量,促进 HC 再燃烧;同时进气相位提前有助于减少泵气损失,提高燃油经济性。循环模拟数值方法提供了中等负荷进气相位参数调节优化的技术途径。图 5 示例进气相位参数对 486Q 汽油机 50% 负荷工况性能的影响。

图 5(a) 和 (b) 可见,相同转速下随进气相位的提前缸内残余废气系数增大, NO 排放量越少。图中, 2 500 r/min 转速下进气相位提前 40° , 缸内残余废气系数从 9% 增加到 20%, NO 排放量从 1×10^{-3} 下降到 2×10^{-4} 。进气相位的提前,使缸内残余废气系数增加,残余废气量的增加阻碍燃烧快速进行,同时增大混合气比热容,使最高燃烧温度下降,从而抑制 NO 排放。随着转速升高,缸内残余废气系数下降, NO 排放量升高,其原因在于转速升高后以时间计的气门重叠角减小。

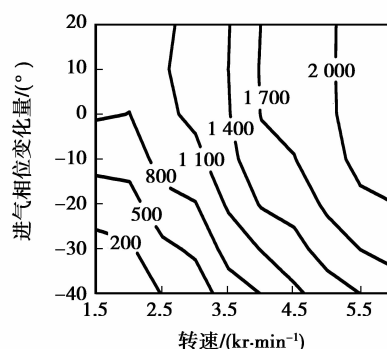
图 5(c) 可见,在中低转速下随进气相位提前 HC 生成量增多。2 000 r/min 转速下进气相位提前 40° 时, HC 含量增加幅度超过 30%, 缸内残余废气量的增加可导致燃烧速度降低,燃烧不稳定性增加。在中高速下,随着进气相位提前 HC 增加幅度相比较小,在 4 000 ~ 5 000 r/min 转速范围,还出现先降后升的趋势,其原因在于高速下缸内残余废气系数较低,对缸内燃烧的影响较小。同时,残余废气量增加有助于促进 HC 的再燃烧。

图 5(d) 可见,进气相位提前量小于 30° 时, IMEP 变化量都不超过 20 kPa。在低转速工况,如 2 000 r/min, 进气相位提前 40° 时, IMEP 呈现变化较大,其原因在于缸内过量高温残余废气使进气温度升高,导致充气效率下降;同时大量残余废气影响缸内燃烧状态。在高转速工况,如 6 000 r/min, 进气相位提前 40° 时 IMEP 降低明显,其原因在于进气迟闭角的减小导致充气效率下降。

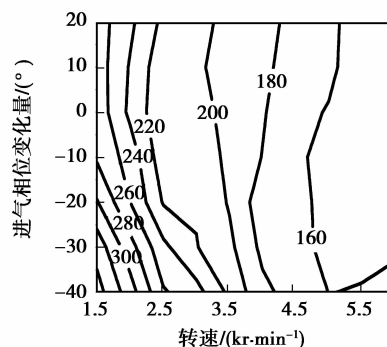
图 5(e) 可见,随着进气相位提前,泵气损失逐渐减小。由于进气门开启时刻提前,在进气行程活塞处于上止点开始向下运动时,进气门的有效流通面积相对于原相位时的流通面积要大,使泵气损失减小。同时,随着进气相位提前,可在进气行程中将进气门提早关闭,达到米勒循环效应。泵气损失的降低促进燃油消耗的降低。从图 5(f) 中可见,随进气相位提前燃油消耗率在中低转速下有一定程度的降低,不过降低幅度较小,一般在 2% 左右。



(a) 缸内残余废气系数



(b) NO 排放量 ($\times 10^{-6}$)



(c) HC 排放量 ($\times 10^{-6}$)

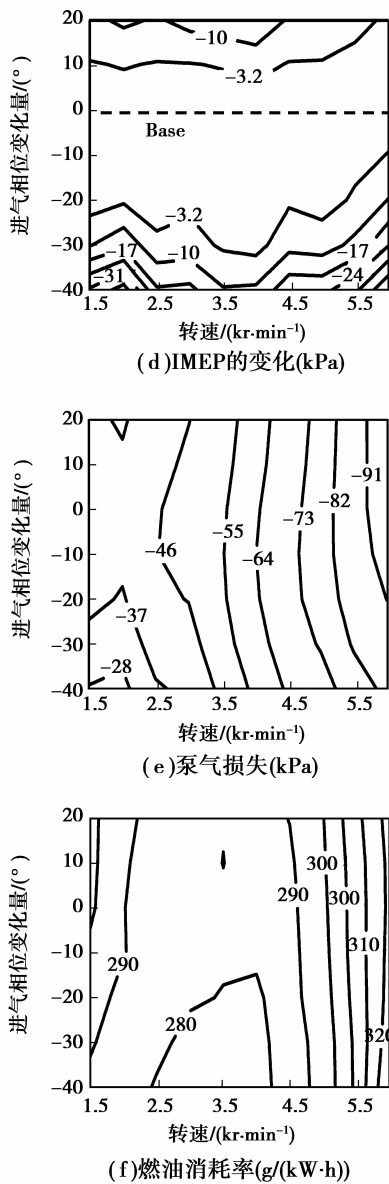


图5 进气相位参数对50%负荷工况性能的影响

基于中等负荷进气相位调节的数值优化,综合考虑486Q汽油机燃油经济性和排放性能因素,通过试验测试确定中等负荷各工况进气相位最佳范围,部分测试数据整理如图6所示。

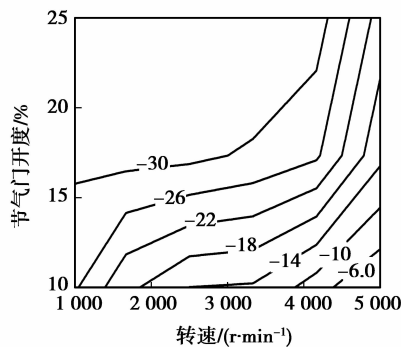
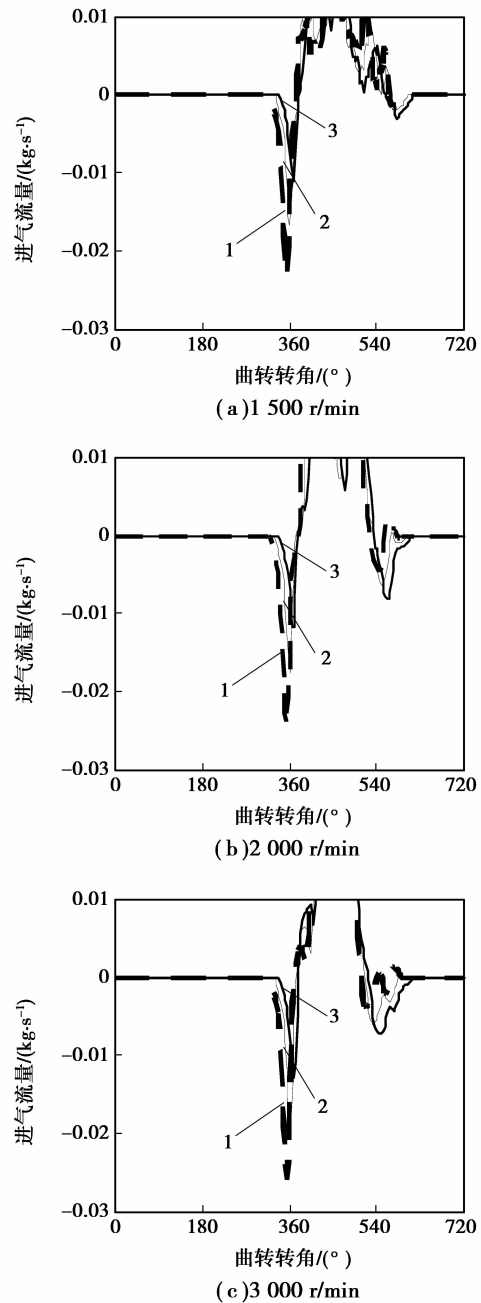
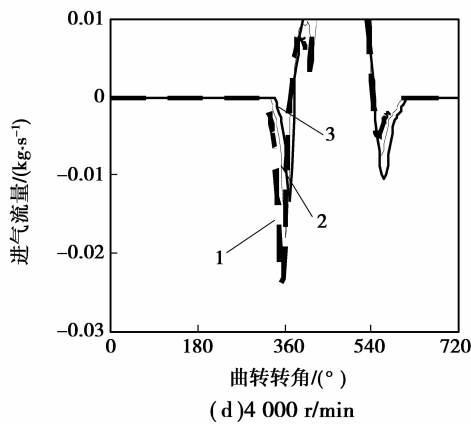


图6 部分负荷相位器变化角度的测试

4 怠速低负荷相位策略与相位参数优化

在怠速低负荷工况下燃烧稳定性受气缸内残余废气的影响。图7所示为低负荷各转速工况下数值模拟得到进气流量曲线。如图所示,在低负荷工况,486Q汽油机进气门开启时刻存在明显的缸内排气向进气道倒流的现象,排气倒流现象会使缸内残余废气量增加;随进气相位提前,缸内排气向进气道倒流的现象更加严重。在怠速低负荷工况下,可以通过进气相位延迟减小气门重叠,抑制气门开启时刻排气向进气道倒流,从而降低缸内残余废气,改善燃烧稳定性。





1—进气相位 -20° ;2—进气相位 -10° ;3—原始相位

图 7 数值模拟 5% 负荷工况的进气流量曲线

在怠速低负荷工况,进气相位延迟还存在有利于缸内燃烧的其他因素。低负荷工况缸内涡流强度减弱导致燃烧速度不足,通过推迟进气相位至活塞具有较高向下运行速度,可以提高进气速度,加强进气涡流,提高燃烧速率;推迟进气相位后缸内初始低压也有利于燃油蒸发;同时,因压力平衡过程中进气管与缸内的压差对气流做功,可使缸内进气充量温度有所提高^[13]。

但怠速低负荷工况的进气相位延迟受到低温启动和 HC 排放的限制。为了确保发动机低温启动,进气门关闭时刻不能太晚,否则会导致有效压缩比降低。将气门重叠角增大,即进气相位提前,在进气门打开时,可使缸内上循环残余废气回流,促进气道壁面油膜的蒸发以及燃油液滴的雾化和蒸发,还有利于前一循环 HC 的再燃烧^[14-16]。

基于以上因素,试验标定怠速和低负荷工况进气相位参数。图 8 所示为通过试验测试获得低负荷各转速工况燃烧稳定性极限进气相位器变化角度(图中虚线示意燃烧稳定性极限)。相位器开始工作时刻处于进气相位最滞后的位置,相位器工作时变化角度越大,则进气相位越提前。从图中可以看出,节气门开度越小,相位器变化角度应越小,即负荷越低,进气相位应越推迟。所示试验测试与数值模拟结果揭示了相似的现象和规律,即通过延迟进气相位可以有效控制缸内残余废气量,提高低负荷工况燃烧稳定性。同时,试验证实延迟进气相位可明显改善低温启动与暖机过程中的循环变动。

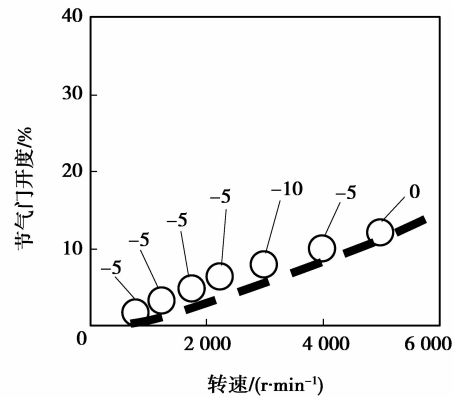


图 8 各转速工况燃烧稳定性极限进气相位的测试

5 结 论

循环模拟数值模型能够准确反映 486Q 汽油机的动力性、燃油经济性和有害排放物生成。采用数值模拟方法对 486Q 汽油机高负荷、中等负荷及怠速低负荷工况下进气相位连续可变运行模式进行了研究。所形成相位策略能够明显改善 486Q 汽油机动力性、燃油经济性和排放性能,能够充分发挥连续可变进气凸轮轴配气正时系统的潜在效能。发动机循环模拟数值方法为优化连续可变进气凸轮轴配气相位系统的相位控制策略提供有效途径。

数值模拟和试验测试表明 486Q 汽油机在高负荷中低转速工况通过进气相位提前抑制进气在气门关闭期间向进气道的倒流可有效提高循环进气量,使中低转速工况动力输出性能提高 6%~8%。通过数值模拟方法对中等负荷工况进气相位参数进行调节优化,综合考虑燃油经济性和排放性能因素,测试 486Q 汽油机中等负荷进气相位的最佳运行范围和参数,取得了降低燃油经济性和有害排放物减排的良好效果。数值模拟表明怠速、低负荷和低温启动工况可通过进气相位延迟,抑制排气向进气道倒流以达到低减缸内残余废气量的效果;试验测试 486Q 汽油机低负荷各转速工况燃烧稳定性极限最佳相位器变化量,证实推迟进气相位可有效改善低负荷工况燃烧稳定性。

参考文献:

- [1] VERHELST S, DEMUYNCK J, SIERENS R, et al. Impact of variable valve timing on power, emissions and backfire of bi-fuel hydrogen/gasoline engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(9):4399-4408.

- [2] FONTANA G, GALLONI E. Variable valve timing for fuel economy improvement in a small spark-ignition engine[J]. Applied Energy, 2009, 86(1):96-105.
- [3] LEROY T, CHAUVIN J, PETIT N. Motion planning for experimental air path control of a variable-valve-timing spark ignition engine[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(12):1432-1439.
- [4] 王迎, 郑朝蕾, 何祖威, 等. NO对CH₄氧化化学影响分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(12):42-47.
WANG YING, ZHENG ZHAO-LEI, HE ZU-WEI, et al. Chemical effect of NO on oxidation of CH₄ [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(12):42-47.
- [5] OJEDA-NAVISTAR W D. Effect of variable valve timing on diesel combustion characteristics [C] // Proceedings of the SAE 2010 World Congress & Exhibition, April 13-15, 2010, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International Technical Papers, 2010: 2010-01-1124.
- [6] 谈秉乾, 王天友, 王刚德, 等. 可变气门升程对4气门直喷汽油机缸内气流运动特性的影响[J]. 内燃机学报, 2011, 29(2):112-118.
TAN BING-QIAN, WANG TIAN-YOU, WANG GANG-DE, et al. Experiment of VVL influence on airflow in a 4-valve GDI engine [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(2):112-118.
- [7] 林灵, 詹樟松, 闵龙, 等. VVA发动机润滑系统CAE优化[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010, 24(12):44-50.
LIN LING, ZHAN ZHANG-SONG, MIN LONG, et al. Lubrication system CAE analysis of VVT&VVL engine [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology; Natural Science Edition, 2010, 24(12):44-50.
- [8] LANG K R, CHENG W K, BORLAND M, et al. Effect of intake cam phasing on first cycle fuel delivery and HC emissions in an SI engine [C] // Proceedings of the 2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, June 8-10, 2004, Toulouse, France. [S. l.]: SAE International Technical Papers, 2004: 2004-01-1852.
- [9] 赵昌普, 李艳丽, 孙强, 等. 天然气发动机可变气门定时的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2009, 30(6):1-4.
ZHAO CHANG-PU, LI YAN-LI, SUN QIANG, et al. Simulation research on variable valve timing of compressed natural gas engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6):1-4.
- [10] KRAMER U, PHILIPS P. Phasing strategy for an engine with twin variable cam timing [C] // Proceedings of the SAE 2002 World Congress, March 4-7, 2002, Detroit, Michigan, USA. [S. l.]: SAE International Technical Papers, 2002: 2002-01-1101.
- [11] 张桐山. 基于可变气门正时技术的汽油机排放性能研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2008.
- [12] 苏进辉, 张力, 徐宗俊, 等. 摩托车发动机VVT系统控制策略的分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(9):10-13.
SU JIN-HUI, ZHANG LI, XU ZONG-JUN, et al. Analysis and research on VVT system control strategy for motorcycle engine [J]. Journal of Chongqing University; Natural Science Edition, 2006, 29(9):10-13.
- [13] ROBERTS C E, STANGLMAIER R H. Investigation of intake timing effects on the cold start behavior of a spark ignition engine [C] // Proceedings of the International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, October 25-28, 1999, Toronto, ON, Canada. [S. l.]: SAE International Technical Papers, 1999: 1999-01-3622.
- [14] KIDOKORO T, HOSHI K, HIRAKU K, et al. Development of PZEV exhaust emission control system [C] // Proceedings of the SAE 2003 World Congress & Exhibition, March 3-6, 2003, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International Technical Papers, 2003: 2003-01-0817.
- [15] 张庆峰, 何祖威, 王迎. 甲醇发动机缸内燃烧过程的多维数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(12):1451-1455.
ZHANG QING-FENG, HE ZU-WEI, WANG YING. Multi-dimensional numerical simulation of the combustion process on methanol-fueled engine [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(12):1451-1455.
- [16] 张永恒. 汽油机油气混合过程数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

(编辑 张 苹)