

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.07.002

二次补气 and 配气相位对摩托车发动机怠速 稳定性和动力性的影响

张 力, 李祖成, 张 青, 周照强, 吕晓惠, 钟德妹

(重庆大学 汽车工程学院, 重庆 400044)

摘要:为分析一款摩托车发动机加装二次补气装置后怠速稳定性提升的原因,利用数值模拟方法建立原机仿真模型,通过对仿真模型标定表明该模型具有较高的模拟精度,在此模型基础上,建立二次补气发动机仿真模型。利用以上模型分析二次补气对怠速稳定性的影响,发现原机怠速不稳的主要原因是其残余废气系数过高。为解决原机怠速不稳问题,从配气相位出发,研究在对原机动力性影响较小的情况下降低残余废气系数的方法。结果表明:将排气相位整体提前可以将残余废气系数降至二次补气发动机的水平,且扭矩下降最大值不超过 2%。

关键词:摩托车发动机;二次补气;配气相位;残余废气系数;怠速稳定性

中图分类号:TK402

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)07-008-08

Effects of secondary air and valve timing on idle speed stability and power performance of motorcycle engine

ZHANG Li, LI Zucheng, ZHANG Qing, ZHOU Zhaoqiang, LYU Xiaohui, ZHONG Demei

(College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: In order to analyze the reason for the improvement of the idle stability for a motorcycle engine when equipped with a secondary air compensating device, a model for the original engine is set up by the method of numerical simulation. The validation results of this model reveal relatively high simulation accuracy, and a model for the secondary air engine is established based on the previous model. The influence of secondary air on idle stability analyzed by using those simulation models, and the research reveals the main cause of idle instability for the original engine is that the residual gas fraction is too high. Based on valve timing, this research aims at finding a way to reduce residual gas fraction with relatively low influence on power performance for the original engine. The results indicate that the residual gas fraction for the original engine drops to the level of secondary air engine by advancing exhaust valve timing and the torque maximum value falls no more than 2%.

Keywords: motorcycle engine; secondary air; valve timing; residual gas fraction; idle speed stability

收稿日期:2018-01-03

基金项目:重庆市应用开发计划重大项目(CSTC2015YYKFC60004)。

Supported by the Key Project of Application Development of Chongqing(CSTC2015YYKFC60004).

作者简介:张力(1968—)男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧测试与控制研究,(E-mail)cqucl@163.com。

发动机处于怠速工况时,由于进气节流大、转速低、缸内充量交换慢、混合气过浓、残余废气系数高、燃烧稳定性差等原因,常发生怠速、掉速甚至熄火现象^[1-8]。特别是大多数摩托车发动机,由于只有一个气缸工作,其怠速稳定性较多缸发动机更差。对摩托车发动机怠速稳定性的控制一直是国内外摩托车研究领域的关键,是研究难点之一,华国胜等^[9]通过研究喷油时刻与摩托车发动机怠速稳定性间的关系,得出了适当提前喷油可以提高发动机怠速稳定性的结论;刘昌文等^[10]运用 GT-power 软件研究摩托车发动机空燃比与怠速性能的关系,通过精确的空燃比控制获得良好的发动机怠速稳定性;邵千钧等^[11]根据点火提前角与摩托车发动机怠速转速之间的规律,并结合神经网络控制,提出了基于点火提前角的发动机怠速稳定性控制方法;Tsai 等^[12]提出根据曲轴动力学特点诊断摩托车发动机失火的方法,以解决摩托车发动机怠速熄火问题;Miki 等^[13]运用实验和仿真相结合的方法,研究摩托车发动机怠速异响及掉速等问题。

笔者运用数值模拟方法并结合实验测试,分析一款摩托车发动机怠速稳定性差的原因,最终找出了在对发动机动力性影响较小的情况下提高怠速稳定性的可行优化方案。

1 怠速不稳问题

针对同一款摩托车发动机,未加装二次补气装置的发动机出现怠速工况转速不稳,而加装二次补气装置的发动机怠速工况工作正常。如图 1 所示为未加装二次补气装置的发动机(原机)的怠速测试,该发动机怠速转速最高只能达到 1 040 r/min,此时进气负压只有 231 Pa,且在测试过程中多次发生发动机熄火现象,而这款发动机的目标怠速转速是 1 300 r/min,这显然达不到开发要求。图 2 为加装二次补气装置的发动机(二次补气发动机)的怠速测试,二次补气发动机的怠速转速可以达到 1 310 r/min,此时进气负压高达 270 Pa,且在测试过程中未出现发动机熄火现象,转速可长时间稳定在 1 300 r/min 左右。该摩托车厂家欲开发有、无二次补气配置的 2 种发动机,并使无二次补气配置的发动机也能运行稳定,无怠速熄火现象发生,对动力性影响较小。因此,一方面需要研究二次补气对怠速稳定性的影响;另一方面,需要研究发动机结构参数对怠速稳定性和全负荷动力性的影响,并找出最佳优化方案。



图 1 原机怠速测试

Fig.1 The test of original engine at idle



图 2 二次补气发动机怠速测试

Fig.2 The test of secondary air engine at idle

2 模型的建立及其标定

为分析上述测试结果的差异,笔者利用数值模拟方法根据发动机几何参数、机械损失测试数据、气门升程测试数据、气阀气道稳流测试数据、空燃比测试数据和空滤器阻力特性测试数据等作为边界条件建立了如图 3 所示的原机仿真模型,其中原机主要技术参数见表 1。为分析加装二次补气装置后对提高发动机怠速稳定性的作用,笔者基于原机仿真模型建立的二次补气发动机仿真模型如图 4 所示。图中,加装的二次补气装置通过外界环境进气,补气端与排气管相连,补气孔中心位置距排气管首端约 30 mm,补气阀由单向阀和负压控制阀组成,其原理是利用排气系统中的压力脉动产生的瞬时负压驱动单向阀打开,通过负压控制阀与进气负压的脉动关系控制其开度以实现单向阀的流量大小控制。二次补气发动机除加装二次补气装置外,其他结构与原机完全一致。

表 1 原机主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of original engine

形式	缸径×行程/(mm×mm)	排量/mL	压缩比	最大功率/kW	最大扭矩/(N·m)
单缸四冲程水冷	65.5×59	198	10:1	12.3(8 500 r/min)	16.4(6 500 r/min)

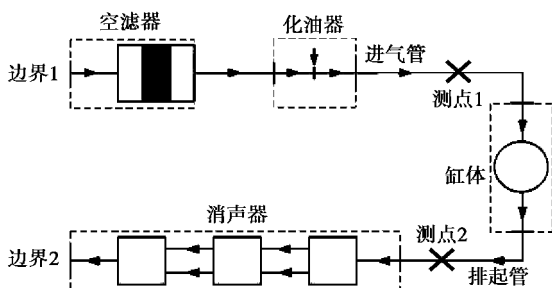


图 3 原机仿真模型

Fig.3 The model of original engine

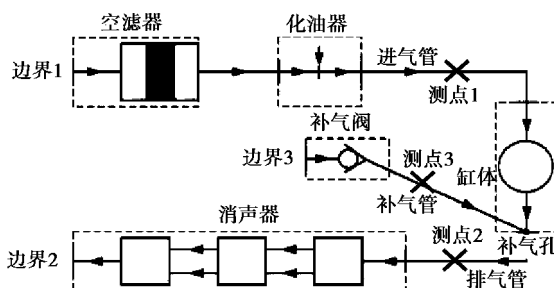
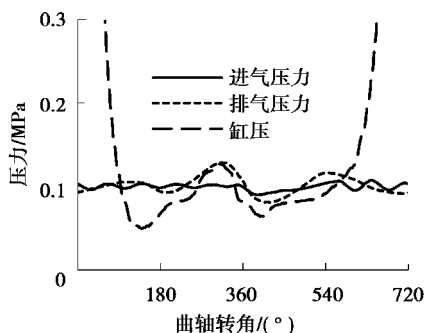


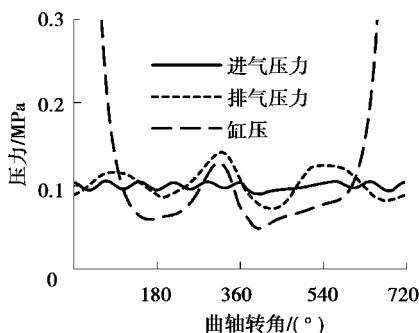
图 4 二次补气发动机仿真模型

Fig.4 The model of secondary air engine

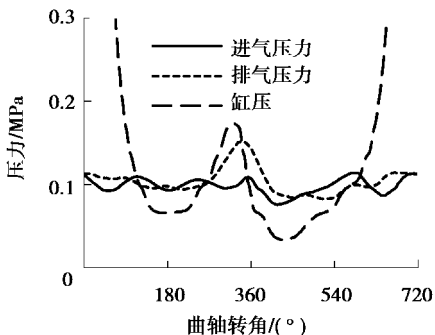
为保证模型能够较好地反映发动机缸内充量交换的趋势,同时校正模型参数设置的准确性,现通过测试进、排气压力波动和缸压对模型进行标定。发动机 4 000 r/min 和 7 000 r/min 时进、排气压力和缸压对比分别如图 5(a)~图 5(d)所示。从图中可以看出,模拟值与测试值总体趋势基本一致,表明仿真模型能够较好地反映该发动机进、排气和缸内的充量交换特性,可以用于工程计算。



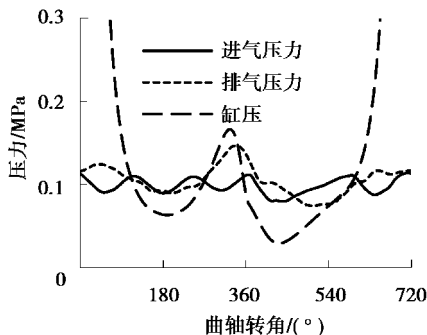
(a) 原机4 000r/min测试值



(b) 原机4 000r/min模拟值



(c) 原机7 000r/min测试值



(d) 原机7 000r/min模拟值

图 5 进、排气压力和缸压的测试与模拟

Fig.5 Comparison of experimental and calculational for pressure

3 二次补气对怠速稳定性的影响

由于 2 款发动机除有无二次补气装置不同外,其他结构是完全一致的,所以其怠速稳定性的差异是由二

次补气的有无引起的,而二次补气的加入直接改变了发动机的充量交换特性。为此,需对比2款发动机充量交换特性的差异。笔者基于2款发动机仿真模型对比了怠速工况同一节气门开度下2款机型的充量系数、循环进气量和残余废气系数。其中,残余废气系数是上一循环结束时残留在缸内的废气量与本循环缸内气体总量(本循环的新鲜充量与上一循环残留的废气量之和)的比值^[14]。

各部分对比分别如图6、图7和图8所示。从图6~图8可以看出,二次补气发动机充量系数和循环进气量有小幅提升,而残余废气系数下降明显,平均下降10%左右,最大下降12.2%(1200 r/min时)。为分析二次补气发动机怠速残余废气系数下降明显的原因,现以发动机转速1200 r/min为例对比2款发动机怠速时排气管压力、排气门流量和排气管流量,各部分对比分别如图9、图10和图11所示。其中,2款发动机排气管压力和流量监测点为图3和图4中的测点2,测点2在2款发动机中位置相同,都位于排气管首端480 mm处;补气管流量监测点为图4中的测点3,图11中的流量差为二次补气发动机排气管流量与原机排气管流量之差。从图9可看出,二次补气发动机排气管压力波传递略快于原机,说明二次空气引入后排气充量交换更迅速;从图10可看出,排气门(位于补气孔上游)快要关闭时2款发动机都出现了严重的倒流现象,且二次补气发动机倒流入排气门中的流量更多,而此时补气管流量出现了一个较大的波峰,说明多倒流入排气门中的流量是引入的二次空气;从图11可看出,二次补气发动机排气管流量大于原机,且倒流情况与排气门倒流情况相反,流量差大于补气管流量,由于排气管流量监测点(图4测点2)位于补气孔下游且远离补气孔,更接近实际排气情况,说明图10排气门倒流入气缸中的二次空气,并没有全部停留在气缸内,而是参与了缸内气体反应,且带走了更多的残余废气,减少了未燃混合气的相对量,加快了排气充量交换速度,使得实际排气时排气管中气体倒流减少,排气流量增加,从而降低了循环结束后留在缸内的残余废气量。总的说来,加装二次补气装置后改变了发动机的充量交换特性,大幅度降低了残余废气系数,提高了发动机怠速稳定性。

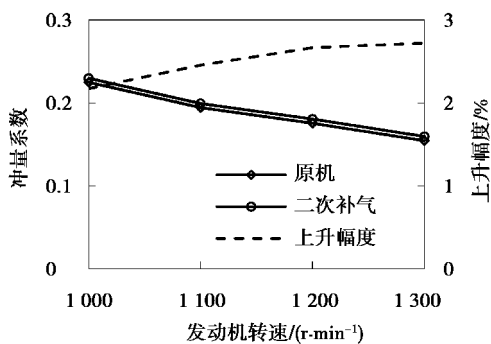


图6 2款机型怠速充量系数对比

Fig.6 Comparison of volumetric efficiency at idle

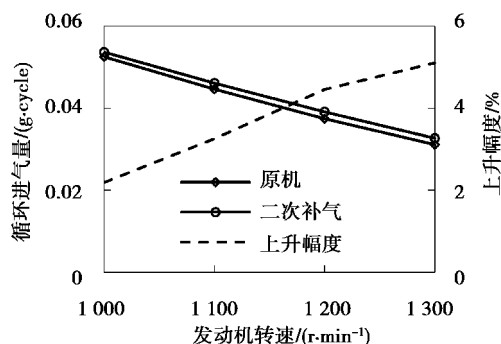


图7 2款机型怠速循环进气量对比

Fig.7 Comparison of circulating intake air mass at idle

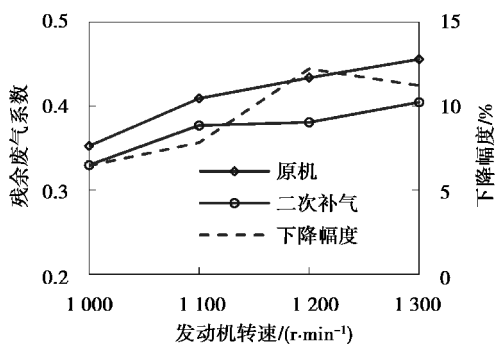


图8 2款机型怠速残余废气系数对比

Fig.8 Comparison of residual gas fraction at idle

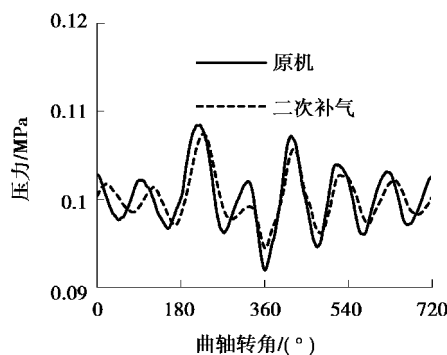


图9 2款机型1200 r/min排气管压力对比

Fig.9 Comparison of exhaust pipe pressure at 1200 r/min

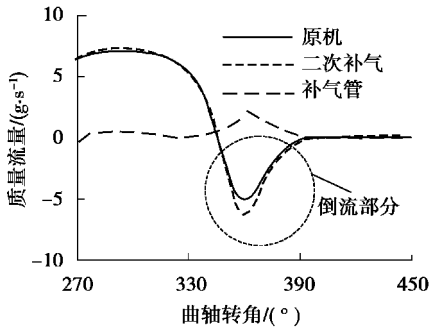


图10 2款机型1200 r/min 排气门流量对比

Fig.10 Comparison of exhaust valve mass flow at 1200 r/min

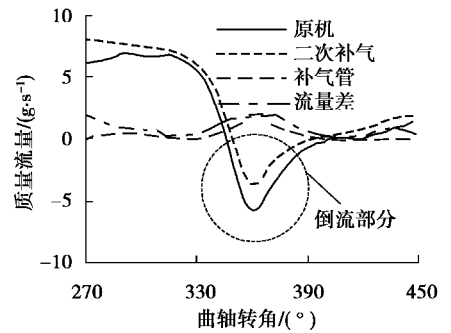


图11 2款机型1200 r/min 排气管流量对比

Fig.11 Comparison of exhaust pipe mass flow at 1200 r/min

4 提高原机怠速稳定性的合理方案

根据前面的分析可知,降低原机怠速残余废气系数是提高其怠速稳定性的关键,而发动机的残余废气系数主要与其压缩比、进气压力、配气相位等有关^[14]。考虑到整车布置情况和修改的难易程度,笔者主要研究配气相位对怠速残余废气系数的影响,最终找出降低怠速残余废气系数以提高原机怠速稳定性的可行方案。

4.1 配气相位对怠速残余废气系数的影响

配气相位对残余废气系数的影响可以从气门重叠角体现,气门重叠角过大,残余废气系数高,特别是发动机处于小负荷和怠速工况时,过大的气门重叠角会增加残余废气量,使燃烧不稳定,引起发动机剧烈震动甚至熄火^[15-18]。为降低原机怠速残余废气系数,笔者采用减小气门重叠角的配气相位方案,具体方案为:单独推迟进气早开相位、进气相位整体推迟(进气早开相位与晚关相位一起推迟)、单独提前排气晚关相位和排气相位整体提前(排气早开相位与晚关相位一起提前),这4种方案相位每移动 1° CA 对应的气门重叠角都减小 1° CA。

其中,图12为减小气门重叠角的配气相位方案,各种方案对怠速残余废气系数的影响如图13所示。从图13可以看出:4种方案怠速残余废气系数都随着气门重叠角的减小而降低,且气门重叠角减小度数越大怠速残余废气系数下降幅度越大。当进气早开相位单独推迟 10° CA、进气相位整体推迟 10° CA、排气晚关相位单独提前 10° CA 和排气相位整体提前 10° CA 时发动机怠速残余废气系数均降至二次补气发动机水平,且这几种情况对应的气门重叠角都减小了 10° CA。

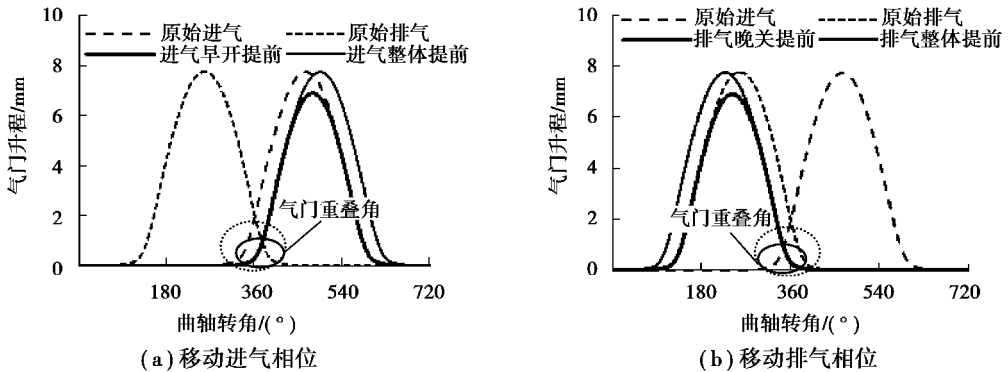
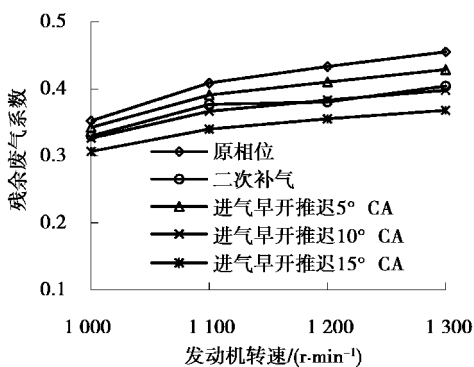
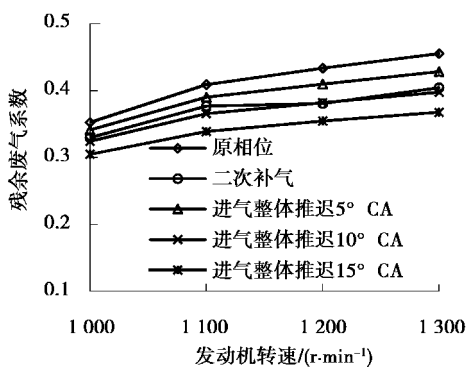


图12 减小气门重叠角的配气相位方案

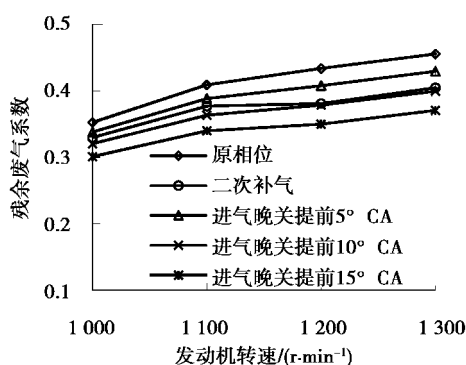
Fig.12 The scheme of reducing valve overlap angle based on valve timing



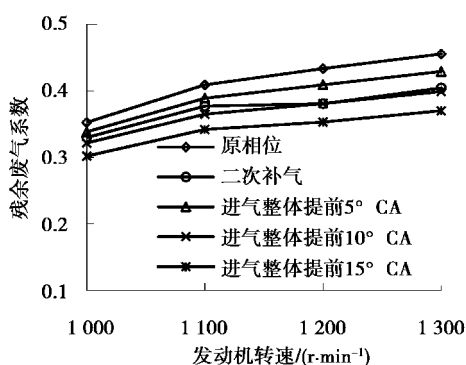
(a)单独推迟进气早开相位



(b)进气相位整体推迟



(c)单独提前排气晚关相位



(d)排气相位整体提前

图 13 移动配气相位对怠速残余废气系数的影响

Fig.13 The effect of the valve timing on residual gas fraction at idle

4.2 配气相位方案对动力性的影响

本次优化的目的是降低原机怠速残余废气系数以解决其怠速不稳的问题,同时不能过大地影响发动机的动力性。为此,需要对不同配气相位方案的动力性进行评价。考虑到气门重叠角减小 5° CA对降低残余废气系数的效果达不到二次补气发动机的水平,故不将这种方案进行动力性评价。

图 14 为移动配气相位对全负荷扭矩的影响。其中,扭矩变化幅度为不同配气相位方案的扭矩值与原机扭矩值之差相对于原机扭矩值的百分比,单独推迟进气早开相位、进气相位整体推迟、单独提前排气晚关相位和排气相位整体提前对全负荷扭矩的影响分别如图 14 所示。从图 14(a)和图 14(b)可以看出,单独推迟进气早开相位和进气相位整体推迟,原机全负荷扭矩大幅度下降;从图 14(c)可以看出,单独提前排气晚关相位原机中、高速扭矩下降明显,这 3 个方案都不可选。而从图 14(d)中可以看出,排气相位整体提前对原机扭矩影响很小,且部分转速点还有小幅度提升,所以从模拟结果来看排气相位整体提前可以作为优化方案。为保证降低残余废气系数的效果足够明显,现将排气相位整体提前 15° CA 作为优化方案。

4.3 实验验证

首先,对优化后的发动机进行了怠速测试,测试过程中发动机运转稳定且无熄火现象发生,达到了开发要求。其次对优化后的发动机进行台架测试,图 15 为优化后全负荷扭矩变化幅度,从图中看出优化后发动机实测扭矩最大下降不超过 2% ,对动力性影响很小,与模拟情况基本一致。

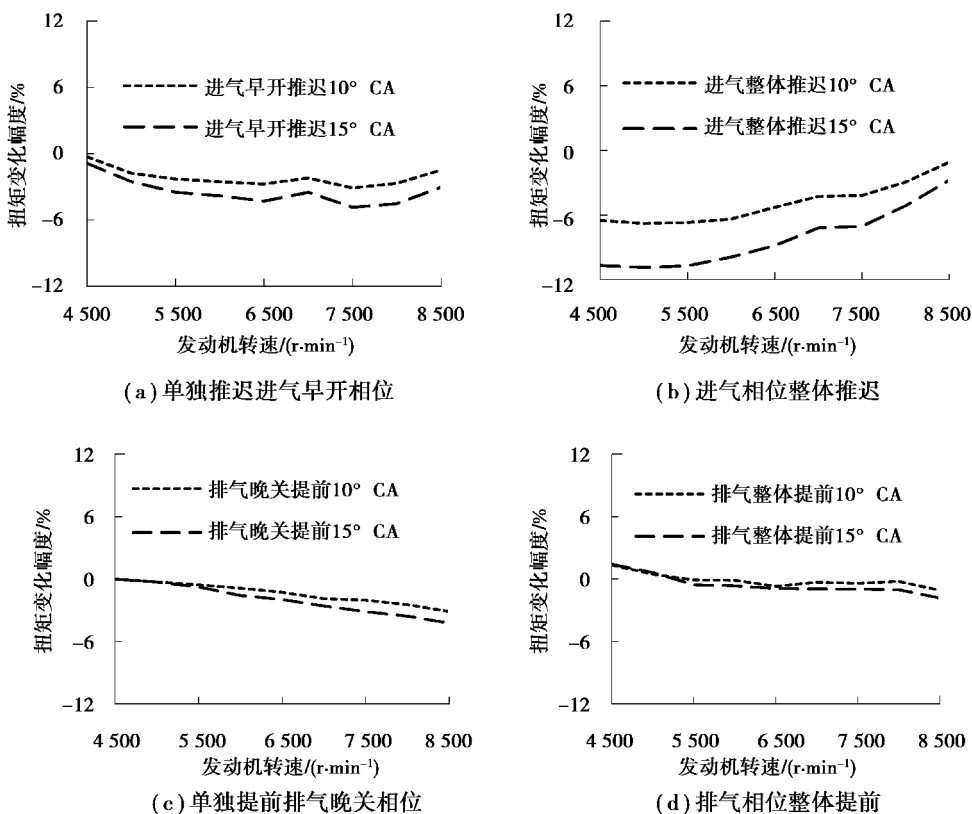


图 14 移动配气相位对全负荷扭矩的影响

Fig.14 The effect of changing the valve timing on torque performance at full load

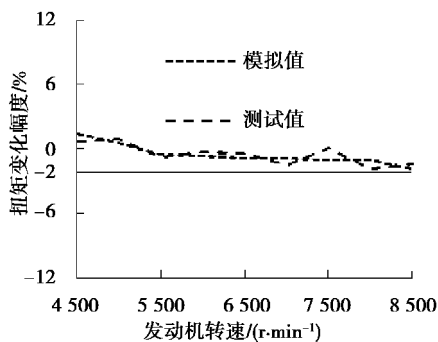


图 15 优化后全负荷扭矩变化幅度

Fig.15 Comparison of torque performance after optimization

5 结 论

1)通过分析二次补气对怠速稳定性的影响发现:摩托车发动机怠速时排气倒流严重,残余废气系数高,引入二次空气后可改善排气充量交换特性,降低残余废气系数,提高发动机怠速稳定性。为此,二次补气可作为提高摩托车发动机怠速稳定性的手段之一。

2)从配气相位对怠速残余废气系数的影响来看,怠速残余废气系数随着气门重叠角的减小而降低,当气门重叠角减小 10° CA 时降低残余废气系数的效果可以达到二次补气发动机的水平。

3)从移动配气相位对动力性的影响来看,单独推迟进气早开相位和进气相位整体推迟原机扭矩大幅度下降,单独提前排气晚关相位原机中、高速扭矩下降明显,这几种方案都不可选。而排气相位整体提前既达到了降低怠速残余废气系数的目的,又对发动机动力性影响较小,可作为优化方案。

4)通过对优化方案的验证发现:优化后发动机运转稳定且无熄火现象发生,达到了开发要求;优化后发动机扭矩下降最大值不超过2%,对动力性影响很小。

参考文献:

- [1] Wong P K, Tam L M, Li K, et al. Engine idle-speed system modelling and control optimization using artificial intelligence[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(1):55-72.
- [2] Kim D S, Cho Y S. Idle performance of an SI engine with variations in engine control parameters[J]. International Journal of Automotive Technology, 2006, 7(7):763-768.
- [3] Kolodziej C, Ciatti S A, Kodavasal J, et al. Achieving stable engine operation of gasoline compression ignition using 87 AKI gasoline down to idle[C]// SAE 2015 World Congress & Exhibition, Detroit, USA: SAE International, 2015.
- [4] Xue J, Gao Q, Ju W. Reinforcement learning for engine idle speed control[C]// International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, March 13-14, 2010. Changsha, China: IEEE, 2010:1008-1011.
- [5] Patrick B, Oivind A, Per T, et al. The low load limit of gasoline partially premixed combustion using negative valve overlap[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(6): 1-7.
- [6] Pielecha I, Cieslik W. Thermodynamic analysis of indexes of operation of the engine with direct fuel injection for idle speed and acceleration[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2016, 126(2):815-827.
- [7] Ji C, Wang S. Strategies for improving the idle performance of a spark-ignited gasoline engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(4):3938-3944.
- [8] Pinazzi P M, Foucher F. Influence of injection parameters, ozone seeding and residual NO on a Gasoline Compression Ignition (GCI) engine at low load[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2016, 36(3):3659-3668.
- [9] 华国胜,何博.喷油时刻对摩托车发动机怠速稳定性影响的试验研究[J].小型内燃机与车辆技术, 2017, 46(2):43-45.
HUA Guosheng, HE Bo. Research on the relationship between injection timing and motorcycle engine idle stability[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2017, 46(2):43-45. (in Chinese)
- [10] Liu C W, Ma E L, Yang Y X. Accurate control of air-fuel ratio for gasoline engine under idle speed condition[J]. Advanced Materials Research, 2012, 588-589:303-308.
- [11] 邵千钧,何文华,熊树生.基于CMAC的点火提前角控制怠速稳定性的研究[J].内燃机学报, 2005, 23(4):376-379.
SHAO Qianjun, HE Wenhua, XIONG Shusheng. Study on idling speed stability by spark advance angle controlling based on CMAC[J]. Transactions of Csice, 2005, 23(4):376-379. (in Chinese)
- [12] Tsai H, Gao B Y, Chiang M H, et al. Misfire diagnostic strategy for motorcycles [J]. Papers; Automotive Sector, 2013.
- [13] Miki H, Kuwahara H. Approach combined numerical and experimental analysis for motorcycle engine radiation noise[C]//Small Engine Technology Conference & Exposition, United States: SAE International, 2006.
- [14] 周龙保.内燃机学[M].北京:机械工业出版社, 2011.
ZHOU Longbao. Internal combustion engine fundamentals[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [15] Wu Y, Shen T, Bae C. Control design for residual gas fraction in engine based on stochastic logical dynamics[C]// Society of Instrument and Control Engineers of Japan, July 28-30, 2015. Hangzhou, China: IEEE, 2015:1271-1275.
- [16] Kodavasal J, Lavoie G A, Assanis D N, et al. Reaction-space analysis of homogeneous charge compression ignition combustion with varying levels of fuel stratification under positive and negative valve overlap conditions[J]. International Journal of Engine Research, 2015, 17(7):1-19.
- [17] Graf S, Linb T. Modeling fresh air charge and residual gas fraction on a dual independent variable valve timing SI engine[J]. Sae International Journal of Engines, 2008, 1(1):627-635.
- [18] 吴颖军,黄丽娜,马文亮,等.气门重叠角对乘用车怠速抖动的影响[J].机械研究与应用, 2013, 26(3):79-82.
WU Yingjun, HUANG Lina, MA Wenliang, et al. Effect of valve overlap angle on idling wobble of passenger car[J]. Mechanical Research & Application, 2013, 26(3):79-82. (in Chinese)