

# 单缸摩托车发动机中低速性能优化

唐元斌<sup>1</sup>, 庞奎<sup>2</sup>, 廖寿昌<sup>2</sup>, 吴志畅<sup>2</sup>

(1.重庆理工大学, 重庆 400054; 2.力帆科技(集团)股份有限公司, 重庆 400707)

**摘要:** **目的** 解决某单缸摩托车发动机台架测试时中低速扭矩线性度差的问题。**方法** 基于CFD数值分析方法, 运用热力学仿真分析软件GT-Power对发动机进行建模和标定, 然后对原方案发动机进行摸底分析, 最后通过优化配气机构和进排气系统来实现改善中低速性能的目标。**结果** 优化后的发动机台架测试结果中, 发动机中低速扭矩线性度改善, 动力性和经济性及排放都达到项目预期目标, 峰值功率达到16 kW (9500 r/min), 峰值扭矩达到18.6 N·m (7000 r/min), 最低比油耗为183 g/(kW·h), CO、THC、NO<sub>x</sub>排放量分别为840、83、54 mg/km。配气机构运动学动力学性能与可靠性提升, 进排气凸轮丰满系数分别达到5.14、5.15。**结论** 原方案中低速扭矩线性度差的原因为此转速段充气效率较低。优化凸轮型线、空滤器、消声器、排气管道参数能更好地利用进排气管道谐振效应来提升发动机中低速动力性能。

**关键词:** 扭矩线性度; GT-Power; 充气效率; 凸轮型线; 进排气系统; 谐振效应

中图分类号: U464

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)07-0084-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.013

## Performance Optimization of Single-cylinder Motorcycle Engine in Low and Medium Speed

TANG Yuan-bin<sup>1</sup>, PANG Kui<sup>2</sup>, LIAO Shou-chang<sup>2</sup>, WU Zhi-chang<sup>2</sup>

(1.School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Lifan Technology (Group) Co., Ltd., Chongqing 400707, China)

**ABSTRACT:** This article aims at the problem of poor linearity of torque at low and medium speeds during bench testing of a single-cylinder motorcycle engine. With the CFD method, the thermodynamic simulation analysis software GT-power was used to build and calibrate the engine model, and then the original engine was conducted a thorough analysis. Finally, the goal of performance optimization at low and medium speeds was achieved by optimizing the valve train and intake and exhaust systems of the original plan. It was resulted that the linearity of torque was improved in low and medium speeds and the power performance, fuel economy and emission had reached the project's expected goals in the optimized engine bench test results. The peak power reached 16 kW (9500 r/min), peak torque reached 18.6 N·m(7000 r/min), the minimum specific fuel consumption was 183 g/(kW·h), and the emissions of CO, THC, NO<sub>x</sub> were 840,83,54 mg/km respectively. The dynamic performance and reliability of the valve train were improved, the fullness coefficient of intake and exhaust cams reached 5.14

收稿日期: 2021-02-01; 修订日期: 2021-02-23

Received: 2021-02-01; Revised: 2021-02-23

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目 (CYS20352)

Fund: Chongqing Postgraduate Research and Innovation Project (CYS20352)

作者简介: 唐元斌 (1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为发动机 NVH。

Biography: TANG Yuan-bin (1994—), Male, Master, Research focus: engine NVH.

引文格式: 唐元斌, 庞奎, 廖寿昌, 等. 单缸摩托车发动机中低速性能优化[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 084-093.

TANG Yuan-bin, PANG Kui, LIAO Shou-chang, et al. Performance optimization of single-cylinder motorcycle engine in low and medium speed[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 084-093.

and 5.15 respectively. The reason for the poor linearity of the low-speed torque in the original scheme engine was the low volumetric efficiency in this speed range. Optimizing the parameters of cam profile, air filter, muffler and exhaust pipe could make better use of the resonance effect of intake and exhaust pipes to improve the low and medium speed dynamic performance of engine.

**KEY WORDS:** linearity of torque; volumetric efficiency; cam profile; intake and exhaust system; resonance effect

单缸发动机通常作为摩托车的动力源,受摩托车整车结构的影响,进气管道长度远小于排气管道。发动机进排气系统与配气机构的匹配过程中,特别是进排气系统匹配时,为了平衡动力性能和消声性能,发动机在中低速段,外特性曲线中容易出现扭矩线性度差的现象。这将导致发动机在此转速段加速性能不足,而单缸发动机大多数时间工作中低速,故针对某些单缸发动机中低速扭矩线性度差的原因分析和解决方案研究非常必要。

国内外针对单缸发动机动力性能方面的研究主要集中在提升充气效率的方式上,主要方式为降低进排气系统阻力、减少对进气充量的加热、合理利用换气过程中的谐振效应<sup>[1]</sup>。

国内外学者针对发动机中低速扭矩线性度差的研究内容分为:优化凸轮型线来得到适合发动机的气门开启持续角、升程大小及气门正时<sup>[2-4]</sup>;优化空滤器和消声器结构形式<sup>[5-6]</sup>、管道结构及布置<sup>[7-8]</sup>来降低进排气系统阻力和利用换气过程中的动态效应来提高充气效率<sup>[9-10]</sup>;优化喷油量、喷油提前角、点火正时,提高燃烧效率<sup>[11-12]</sup>。前人的研究少有在改善发动机中低速扭矩的同时提升配气机构可靠性的成果。

文中针对某单缸大排量发动机中低速扭矩线性度差的问题,利用 GT-Power 搭建发动机仿真分析模型,分析扭矩线性度差的原因,并通过优化凸轮型线、进排气系统结构,使配气机构与进排气系统良好匹配,并验证了配气机构的可行性。最终改善发动机中低速扭矩线性度差的问题,并提升了峰值功率和扭矩。

## 1 发动机性能评估及分析

### 1.1 仿真模型建立

GT-Power 建立一维发动机模型的主要技术参数见表 1。

气门升程、节气门开度对应的流量系数分别通过节气门稳流实验、缸盖气道稳流实验测得<sup>[12]</sup>。进排气道流量系数及气门升程测试结果如图 1 所示。

空燃比、喷油量、进排气温度及压力、外特性、机械损失等<sup>[13]</sup>通过发动机台架测试测得。台架测试工况为发动机外特性工况,稳速测试转速区间为 3500~10 000 r/min,测试间隔为 500 r/min。

表 1 技术参数

Tab.1 Technical parameter

名称	参数
发动机形式	单缸、四冲程
冷却方式	水冷
气门	4
凸轮轴形式	单顶置凸轮轴
进气方式	自然吸气
燃油供给形式	电喷
缸径×行程	65 mm×58 mm
压缩比	11
排量	200 mL
峰值扭矩	17.9 kW (8000 r/min)
峰值功率	15.3 N·m (9500 r/min)

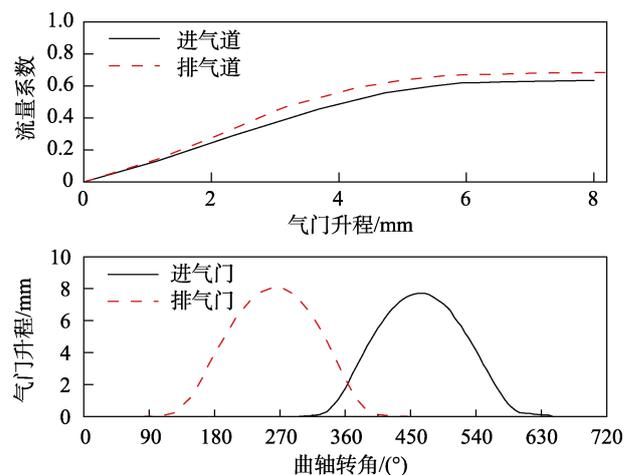


图 1 进排气门流量系数与气门升程

Fig.1 Intake and exhaust valve flow coefficient and valve lift

发动机燃烧模型采用点燃式 Wiebe 模型,模型通过 Wiebe 函数方程在发动机上加入燃烧速率,适用于各种类型的点燃式发动机。汽缸传热模型为 Woschni 模型,其换热系数与汽缸结构、活塞速度、缸内温度、进排气速度有关。进排气系统一维模型经过 GEM3D 软件离散成管道与接头连接得到,建立的发动机仿真模型如图 2 所示。

### 1.2 性能摸底分析

发动机模型建立后,仿真工况与台架测试工况一致,发动机模型通过缸压、机械损失、比油耗、外特性等进行模型标定。扭矩的仿真与测试结果对比如图 3 所示,试验与仿真的扭矩误差在 5% 以内,发动机模型的标定基本合格。

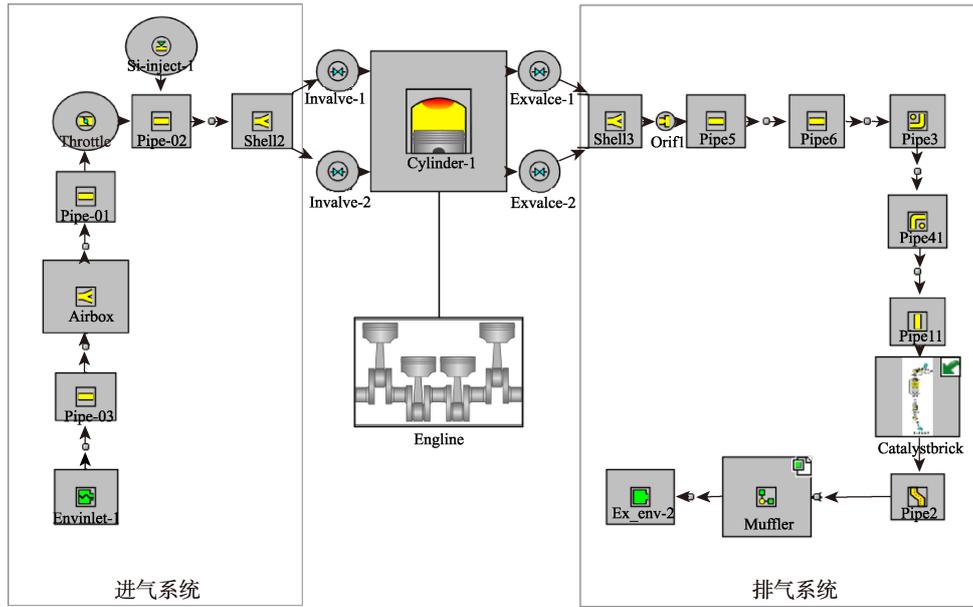


图2 发动机仿真模型  
Fig.2 Engine simulation model

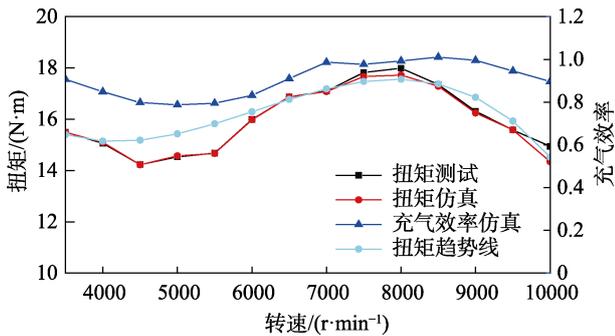


图3 模型标定结果  
Fig.3 Calibration results of model

图3中，原方案4500~5500 r/min转速段扭矩与通过多项式拟合此转速段外扭矩得到的扭矩趋势线对比，此转速段扭矩最大差值为1.14 N·m，线性度较差，充气效率曲线与扭矩曲线趋势基本一致，故充气效率低是中低速扭矩线性度差的主要原因。

充气效率定义为发动机每个工作循环内，实际吸入汽缸的空气质量与进气道状态下充满汽缸工作容积的理论空气质量之比，充气效率越高，发动机的性能越好，其表达式为：

$$\eta_v = \frac{m_1}{m_s} = \zeta \frac{P_g T_s}{P_s T_g} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon - 1 + \gamma_r} \quad (1)$$

式中： $\eta_v$ 为充气效率； $m_1$ 为实际进入汽缸的新鲜空气质量； $m_s$ 为进气状态下能充满汽缸工作容积的新鲜空气质量； $\zeta$ 为补充进气比； $\gamma_r$ 为残余废气系数； $\varepsilon$ 为压缩比； $P_g$ 、 $T_g$ 为进气过程结束时缸内压力和温度； $P_s$ 、 $T_s$ 为进气压力和进气温度<sup>[14]</sup>。

降低进气阻力，直接提高 $P_s$ ，排气阻力减小，则残余废气系数 $\gamma_r$ 减小，同时也减少了对进气充量的加热，最终缸内温度 $T_g$ 降低，充气效率 $\eta_v$ 增大。因此

影响充气效率的主要因素为进排气系统阻力大小，其阻力大小受凸轮型线和管道结构的影响较大。凸轮型线决定升程曲线，气门升程对进排气阻力、汽缸扫气过程的影响非常大。

仿真计算结果中，4000~5500 r/min进气门质量流量如图4所示。图4中两处实线圈位置，进气倒流较严重。这是由于原方案为利用气流惯性来提升扫气效率，所设计的进气持续角过大引起的。中低速时，进气门的开启和关闭均容易引起缸内部分气体充量倒流回进气道。进气门关闭时的倒流直接引起进气量不足，而进气门开启的倒流会增大缸内残余废气系数，导致进气充量温度升高。两者都会造成充气效率下降，进而影响中低速性能。

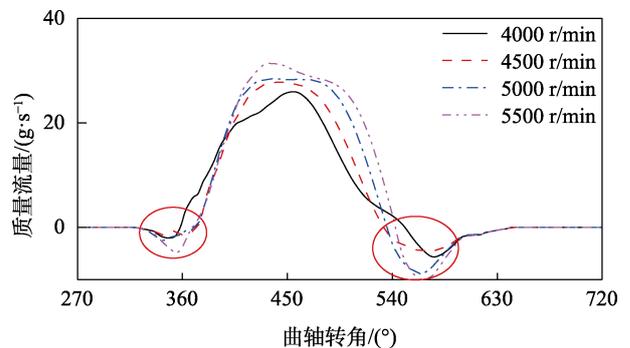


图4 进气门质量流量  
Fig.4 Mass flow of intake valve

单缸摩托车发动机转速一般保持在3000 r/min以上。4000~5500 r/min排气门质量流量仿真结果如图5所示，图中虚线圈位置，5000~5500 r/min转速下的排气倒流严重。这是气门重叠角较大，中低速下，排气管道压力大于汽缸压力，扫气系数低引

起的。此处排气倒流也是导致进气开始时气流倒流的重要原因，故重叠角过大是造成中低速排气倒流的重要原因。

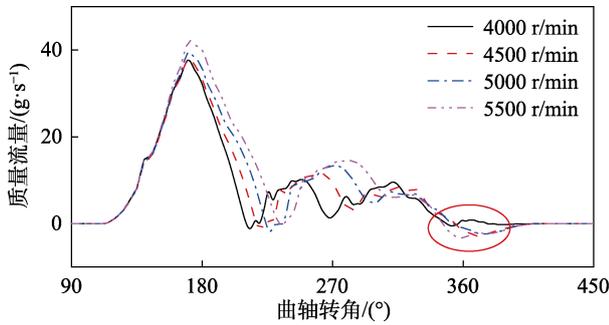


图 5 排气门质量流量  
Fig.5 Mass flow of exhaust valve

换气过程具有间歇性与周期性的特点，进排气管道内会产生压力波。此压力波在进排气系统内部传播和往复反射引发进排气管道中的动态效应，也称之为谐振效应。

缸压与排气道压力差仿真结果如图 6 所示，压力差由缸内压力与排气压力的差值计算得来。引发图 5 中虚线圈位置排气倒流的另一原因在于，此转速下，排气道内由正压力波与反射的负压力波合成的压力波，在排气后期未形成相对于缸压的负压力波。此负压力波未能利用得当，缸内残余废气被吸出至排气道内的量减小，排气管内废气倒流增多，进而导致的进气量减少，最终充气效率降低。

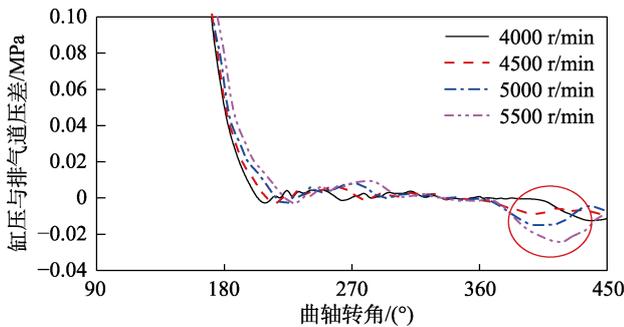


图 6 缸内与排气道压差  
Fig. 6 Pressure difference of cylinder and exhaust port

进排气管道的谐振关系式为：

$$\frac{2l_e}{a} = \frac{\varphi_s}{6n} \quad (2)$$

式中： $l_e$  为等效管长； $a$  为管内声速； $\varphi_s$  为气门有效开启角； $n$  为发动机转速<sup>[15]</sup>。根据式（2）计算得到进排气管道谐振效应利用率最佳的转速分别在 8200、3800 r/min 附近。仿真计算结果中，充气效率最大值和最小值分别在 5000、8500 r/min。

进排气管道与缸内压力仿真计算结果如图 7、8 所示。8500 r/min 实际进气起始点比 5000 r/min 靠前。图 7 中 8500 r/min 强制排气起始点靠后，泵气损失小，

且充分利用了进气管道的谐振效应。因此 8500 r/min 附近充气效率最高，而排气管道较长，导致排气谐振对应转速低于 4000 r/min。优化方案应提高排气谐振对应转速来充分利用进排气管道的谐振效应来提升中低速的充气效率。

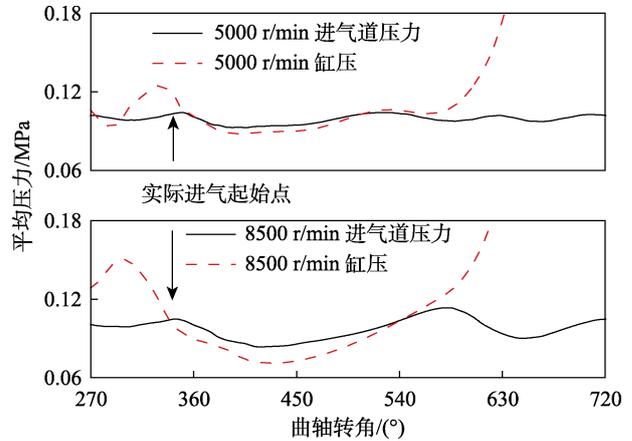


图 7 进气道与缸内压力  
Fig.7 Pressure of intake port and cylinder

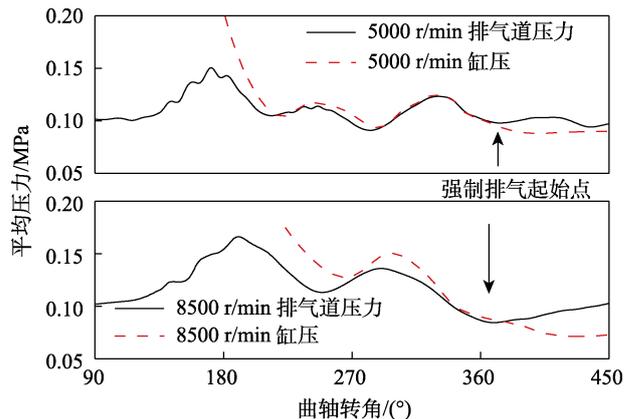


图 8 排气道与缸内压力  
Fig.8 Pressure of exhaust port and cylinder

排气背压影响动力性、经济性和排放指标。排气道出口位置的排气背压仿真结果如图 9 所示。6000~9500 r/min 排气背压呈非线性增大趋势，原因在于气体流速越高，排气消声器产生的阻力也越大。整个排气系统背压峰值达到 111.4 kPa，这是影响高转速段性能的重要原因。

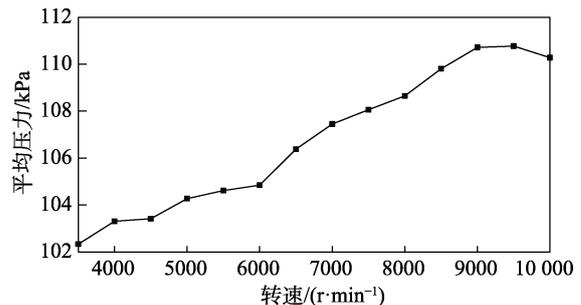


图 9 原方案排气背压  
Fig.9 Exhaust back pressure of original

针对排气系统的优化,应促使排气谐振发生在中低速区域和减小消声器与触媒高速状态下的阻力,进而改善中低速扭矩线性度差的现状,并提升高速工况的动力性能。

## 2 性能优化措施

中低速段扭矩线性度差的主要原因是充气效率低,由于凸轮型线设计不合理,排气谐振对应转速过低。进排气系统与配气机构在开发阶段需要进行匹配设计,在改善中低速扭矩线性度差的同时,使得峰值功率与扭矩不低于原方案。

优化要求:排气管直径变化小于 5 mm,长度变化小于 100 mm;空滤器容积变化小于原容积的 40%;配气机构优化后,应保证其运动学和动力学性能,凸轮型线丰满系数大于 0.5;发动机经济性不低于原方案,且排放指标通过国家法规标准。

根据优化目标和性能摸底分析的结论,故针对凸

轮型线和进排气系统进行优化。

### 2.1 凸轮型线优化

配气机构的要求是其结构形式对减少进排气阻力有利,气门升程恰当,使得进排气充分,以获得较大的功率和排放性能<sup>[16]</sup>。气门升程是凸轮型线经过配气机构的几何运算,反映到气门上的运动规律,气门升程与凸轮型线一一对应。

在考虑性能摸底分析结果的基础上,使用 EXCITE Timing Drive 软件建立配气机构动力学模型,模型包含摇臂、气门杆、凸轮、气阀、气门、弹簧。采用转速驱动,气门上添加实测缸压载荷<sup>[17]</sup>,配气机构模型如图 10 所示。

通过重新设计的配气机构仿真模型计算得到的气门升程曲线如图 11 所示。优化后进气持续角减小 20°CA,进气门开启时刻延后 7°CA,最大升程对应曲轴转角不变,排气门持续角减小 9°CA,排气门开启时刻提前 8°CA,最大升程对应曲轴转角提前 13°CA。

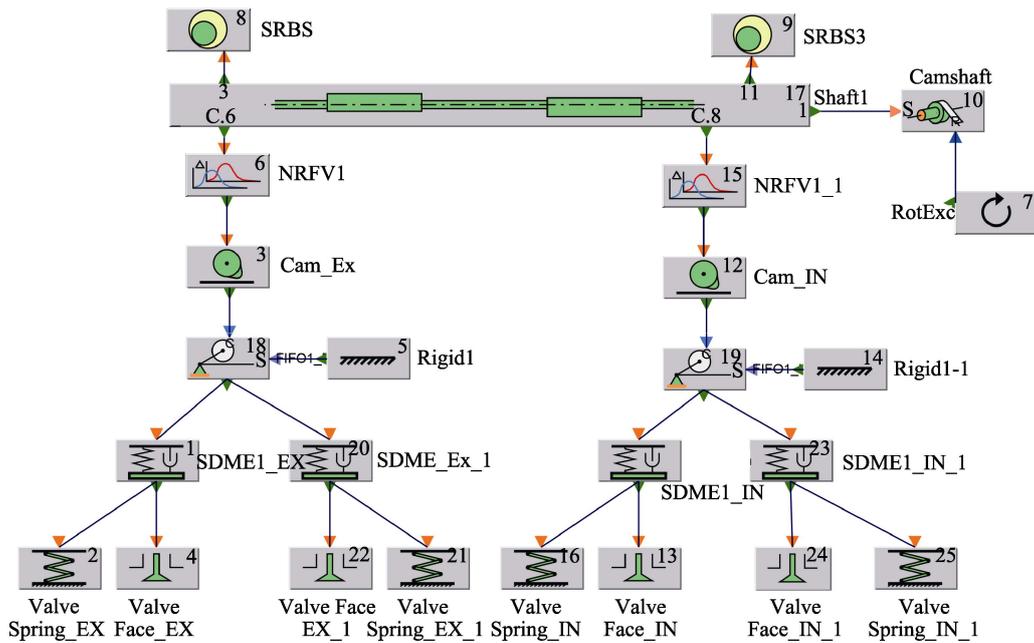


图 10 配气机构模型  
Fig.10 Valve train model

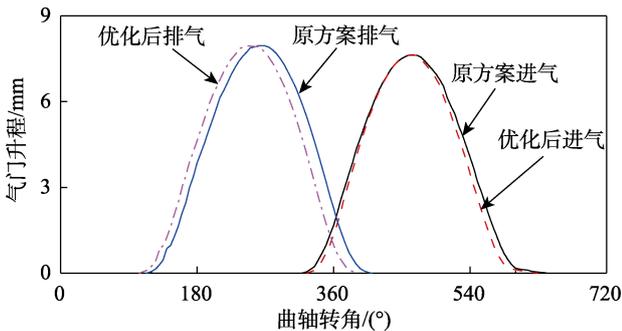


图 11 原方案与优化后的气门升程  
Fig.11 Valve lift of original and Optimization

重新设计新的凸轮型线后,新的配气机构必须进行运动学与动力学性能验证。主要通过分析气门速度、加速度、气门落座力、气门与从动件受力等来评估配气机构运动学和动力学性能是否符合实际工作要求<sup>[18]</sup>。

新配气机构的进排气门在工作过程中的加速度与速度曲线如图 12、13 所示。气门加速度与气门速度曲线大部分区域过渡平稳,波动较小。进气门最大加速度为 10 583 m/s<sup>2</sup>,最大速度为 5.39 m/s;排气门最大加速度为 11 486 m/s<sup>2</sup>,最大速度为 5.29 m/s。

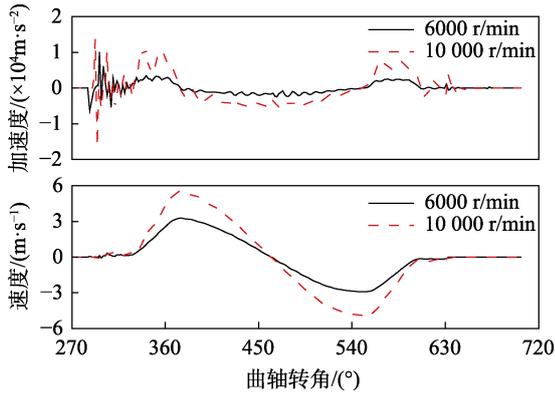


图 12 进气门速度与加速度  
Fig.12 Speed and acceleration of intake valve

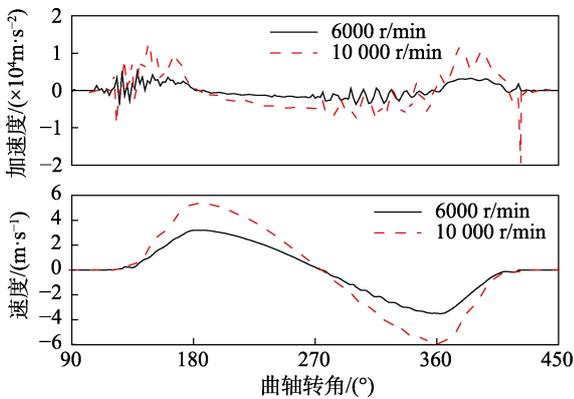


图 13 排气门速度与加速度  
Fig.13 Speed and acceleration of exhaust valve

新配气机构的气门反跳和从动件飞脱评估，主要通过对比气门各转速气门升程和气门与从动件受力进行分析<sup>[19]</sup>。进排气门与从动件受力曲线、气门升程如图 14、15 所示。进排气门及各从动件受力均大于 0，即从动件未出现飞脱现象，气门升程在气门开启和关闭位置无反跳。从图 16 可以看出，进排气门落座力最大值分别为 480、420 N，符合气门设计要求。新配气机构的进排气凸轮丰满系数分别为 5.14 与 5.15，凸轮丰满系数较好，配气结构符合运动学和动力学性能要求。

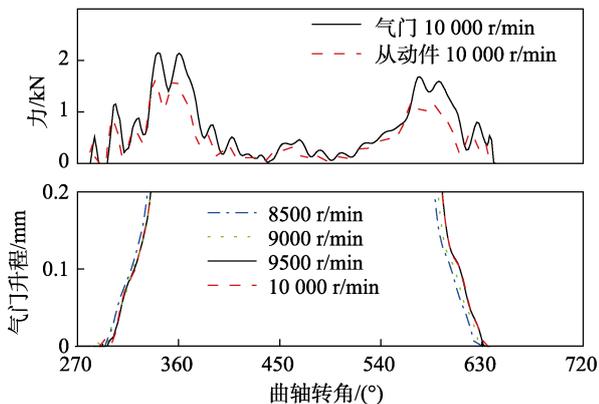


图 14 进气门及从动件受力和气门升程  
Fig.14 Force of intake valve and follower valve lift

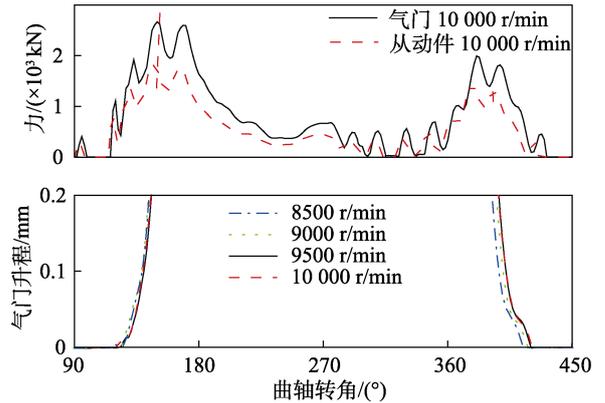


图 15 排气门及从动件受力和气门升程  
Fig.15 Force of exhaust valve and follower valve lift

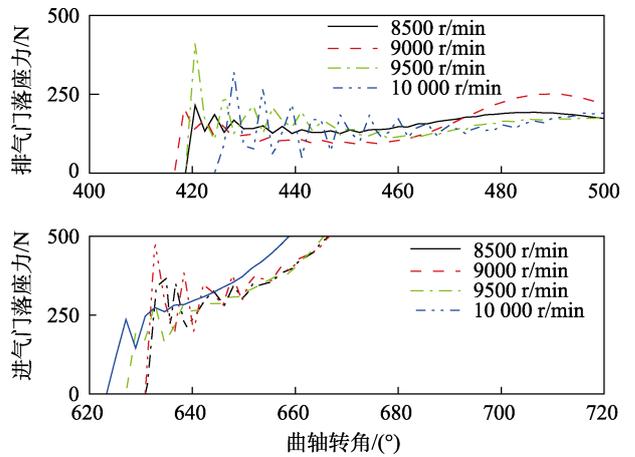


图 16 气门落座力  
Fig.16 Seat force of valve

原方案与气门升程优化后的发动机仿真模型，燃油供给与点火时刻等参数保持不变，仅气门升程变化。优化后进气门质量流量仿真结果如图 17 所示。由于进气门升程对应曲轴转角对峰值扭矩对应转速有较大影响，而原始方案最大扭矩位置符合开发要求，故优化后进气门最大升程对应的曲轴转角不变，进气门开启持续角减小，使得中低速工况下，进气门晚关导致的进气充量回流情况好转，进气量得到提升，最终提升中低速动力性能。

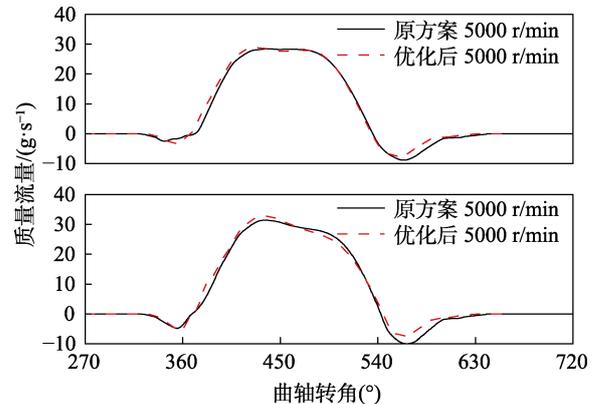


图 17 进气门质量流量对比  
Fig.17 Comparison of intake valve mass flow

排气门升程受气门重叠角影响较大,排气持续角减小,最大升程对应曲轴转角提前,气门重叠角减小 $25^{\circ}\text{CA}$ 。原方案与优化后排气门质量流量如图 18 所示。气门重叠角的减小能改善原方案中低速进排气门倒流问题,进而提升中低速性能。

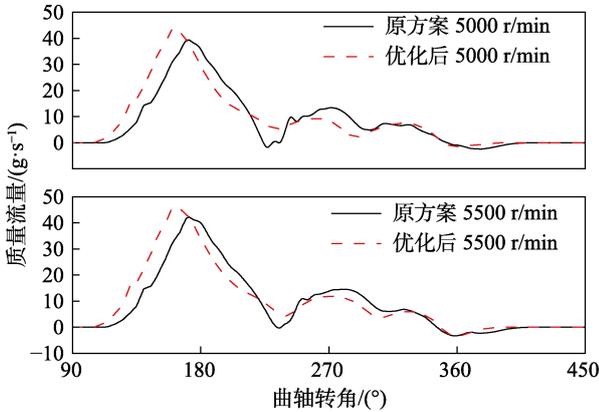


图 18 排气门质量流量对比  
Fig.18 Comparison of exhaust valve mass flow

## 2.2 进排气系统优化

原方案排气背压高和排气谐振发生在 3800 r/min 以下是影响中低速充气效率的主要原因之一。通过优化排气管道长度、触媒位置、消声器,使得优化后的排气系统能充分利用排气谐振效应,高速工况下的阻力小,良好适配优化后的配气机构。

优化对象为排气管道长度与直径、空滤器容积、触媒位置及直径。优化目标为高速低阻和利用排气谐振效应,通过仿真计算以及考虑到排气管道实际布置情况,排气管道最终的优化结果为排气管剪短 40 mm,管道直径增大 12.5%,触媒位置往排气入口端前移 50 mm,直径增大 15%,消声器前腔容积增大 10%。排气系统优化前后对比如图 19 所示。

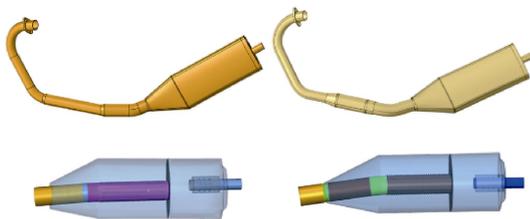


图 19 排气系统对比  
Fig.19 Comparison of exhaust system optimization

排气管道长度减小,能引起管道内部压力波的幅值与相位变化,使得发动机充气系数的峰值往中低速段一侧移动<sup>[20]</sup>。空滤器容积增大、排气管直径增大和触媒位置前移能减小高速工况的阻力,进而提升峰值功率。优化后的进排气系统和配气机构既改善中低速扭矩线性度差的问题,提升中高速段的功率。优化后排气背压与原方案对比如图 20 所示。优化后的排气

系统较原方案在中高速段排气背压下降,最大降幅为 16%。排气背压曲线基本呈线性增加,排气阻力在高转速段明显下降,有利于提升峰值功率。

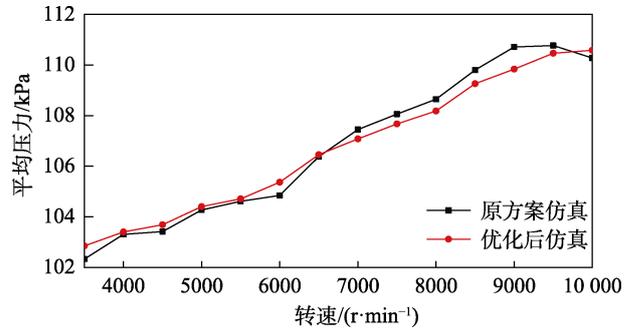


图 20 排气背压对比  
Fig.20 Comparison of exhaust back pressure

## 2.3 优化结果

经过优化凸轮型线和进排气系统后,发动机的充气效率全转速段大于 0.85 (见图 21)。说明整个发动机的进排气系统与配气机构匹配度良好,并且中高速区域充气效率过渡平稳,进排气管道中的谐振效应得到了良好的利用。

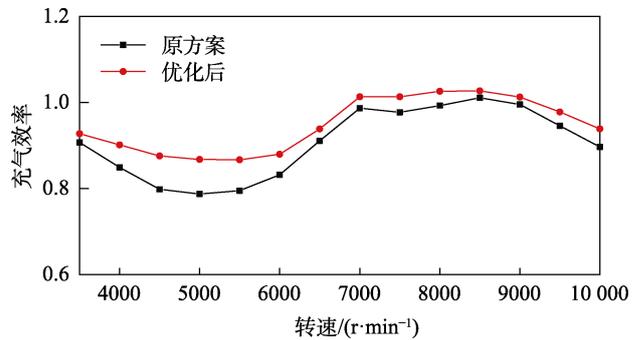


图 21 充气效率对比  
Fig.21 Comparison of volumetric efficiency

优化后的扭矩仿真结果如图 22 所示。4000~4500 r/min 的扭矩增长率由原方案的 $-5.78\%$ 变为 $-2.72\%$ ,此转速段扭矩线性度差的现象明显改善,全转速段扭矩提升明显。3500~6500 r/min 扭矩较原方

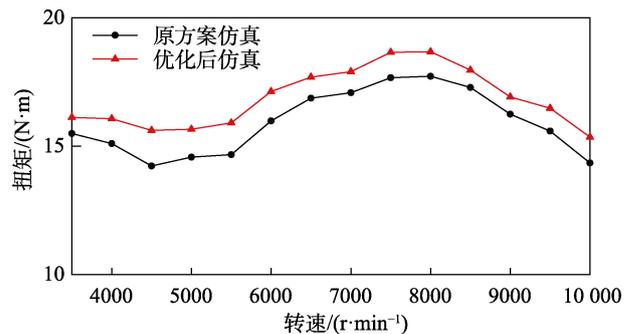


图 22 发动机扭矩对比  
Fig.22 Comparison of Engine torque

案提升 10% 以上，扭矩整体过渡趋势平缓，峰值扭矩提升 1.17 N·m，中低速扭矩线性度差的问题得到改善。同时峰值扭矩提升，使得发动机扭矩在全转速段提升。

优化后的功率仿真结果如图 23 所示。全转速段功率提升，峰值功率提升 5%，峰值功率对应转速为 9500 r/min。较原方案，峰值功率提升 1.1 kW，达到了高速功率提升的目标。

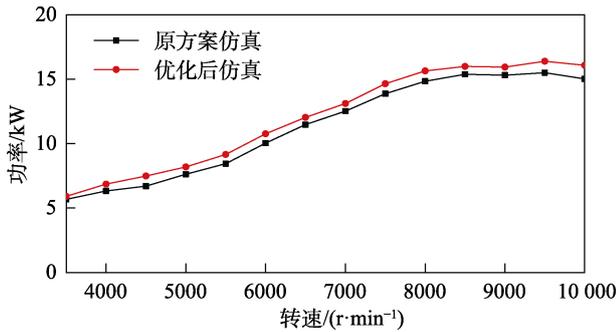


图 23 发动机功率对比  
Fig.23 Comparison of Engine Power

### 3 优化结果验证

首先对优化后的发动机进行台架测试，测试工况与前文原方案台架测试工况一致，都为外特性工况<sup>[21]</sup>。发动机台架测试系统如图 24 所示。



图 24 发动机台架测试系统  
Fig.24 Engine bench test system

仿真与测试结果对比如图 25 所示。优化后的发动机中低速扭矩线性度提升明显，高速段功率提升，实验与仿真趋势上一致性良好。峰值扭矩前移，主要是由于 GT-Power 为一维流体仿真软件，缺乏对高速状态下管道内流场中湍流的模拟能力。转速越高，进排气阻力越大。转速在 9500 r/min 后，由于进排气阻力的损失大于谐振效应的增加，发动机的功率反而下降。

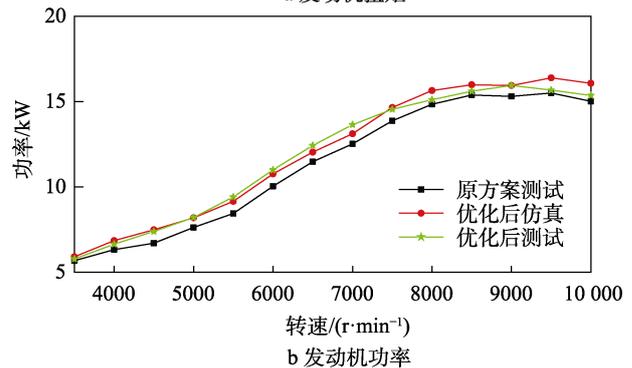
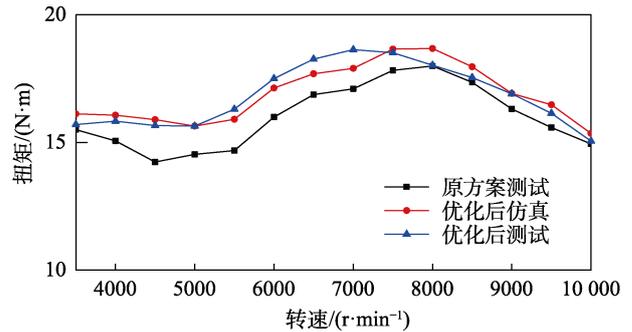


图 25 发动机优化结果验证  
Fig.25 Verification of optimization results: a) engine torque; b) engine Power

原方案与优化后的发动机比油耗测试对比如图 26 所示。由于充气效率较原方案已提升，发动机缸内燃烧更加充分，优化后比油耗下降，最低比油耗为 183 g/(kW·h)，发动机经济性能较好。

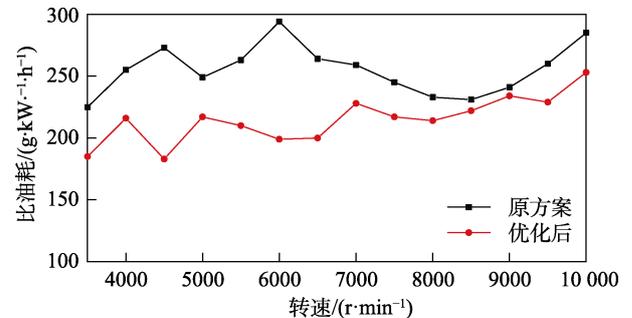


图 26 比油耗结果对比  
Fig.26 Comparison of specific fuel consumption

发动机台架测试验证了发动机的动力性与经济性能，再对搭载此发动机的摩托车整车进行排放测试，测试工况为世界摩托车测试循环 (WMTC class2-1)。排放测试结果见表 2，其中 CO、THC、

**表 2 排放结果**  
Tab.2 Emission results

组分	限值	结果	判定
CO	1140	840	合格
THC	380	83	合格
NO <sub>x</sub>	70	54	合格
THC+NO <sub>x</sub>	450	137	合格

NO<sub>x</sub>、THC+No<sub>x</sub> 分别小于 GB 14622—2016《摩托车污染物排放限值及测量方法》中的限值,说明此发动机排放性能达标<sup>[22]</sup>。

### 4 结论

文中针对某单缸四冲程水冷发动机,存在中低速扭矩线性度差的问题进行摸底分析,并基于分析结果,优化配气机构与进排气机构,成功解决了中低速扭矩线性度差的问题,通过全文研究得出以下结论。

1) 气门重叠角、气门开启持续角以及气门最大升程对应曲轴转角对发动机性能影响较大,合理减小重叠角和气门开启持续角,并根据进排气倒流情况,调整气门最大升程对应曲轴转角,能提升中低速动力性能。

2) 排气管长度剪短和直径增大能提高排气谐振对应的转速,空滤容积、消声器前腔容积增大和触媒位置前移有利于减小高速工况下进排气阻力,进而保证中低速性能改善的同时,发动机高速工况性能提升。

3) 配气机构设计,必须通过检查飞脱反跳、落座力等来评估其运动学与动力学性能,检查通过后才能用于实际的样件试制。

4) 从建立仿真模型到优化改进设计的整套方法对发动机中低速性能优化提供了可靠且有效的指导。建议进行发动机模型建立时,考虑进排气系统三维流动和缸内三维燃烧对发动机性能的影响,对此课题做更精确深入的研究。

### 参考文献:

[1] 任翠翠. 某摩托车用高速汽油机性能优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
REN Cui-cui. Research on performance optimization for one high-speed motorcycle gasoline engine[D]. Hunan: Hunan University, 2018ty.

[2] 文君竹. CG125 摩托车发动机循环模拟与性能优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
WEN Jun-zhu. A study on cycle simulation and performance optimization for CG125 motorcycle engine[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.

[3] MOHIUDDIN A K M, ASHOUR A A I S, SHIN Y H. Design optimization of valve timing at various engine speeds using multi-objective genetic algorithm[Z]. International Conference on Modelling and Simulation, 2008, 41-46.

[4] 王超, 翁中华, 杨陈, 等. 基于气门升程曲线的发动机性能优化[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014, 43(4): 64-68.  
WANG Chao, WENG Zhong-hua, YANG Chen, et al. Engine performance optimization through valve profile

modification[J]. Small internal combustion engine and vehicle technology, 2014, 43(4): 64-68.

[5] 冯博学, 任小中. 某小排量摩托车发动机动力性能提升的试验研究[J]. 内燃机与配件, 2019(23): 14-17.  
FENG Bo-xue, REN Xiao-zhong. Experimental study on the improvement of engine power performance of a small displacement motorcycle[J]. Internal combustion engine & parts, 2019(23): 14-17.

[6] 刘蛟龙. 汽车排气消声器性能的实验与仿真研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2014.  
LIU Jiao-long. Study on the performance experiment and simulation of automotive exhaust muffler[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2014.

[7] 褚超美, 陈家琪, 张振东, 等. 进排气管结构与配气系统匹配对汽油机性能的影响研究[J]. 内燃机工程, 2003, 24(5): 55-58.  
CHU Chao-mei, CHEN Jia-qi, ZHANG Zhen-dong, et al. Influence of inlet and exhaust pipes design and matching them with valve-train on performances of gasoline engines[J]. Chinese internal combustion engine engineering, 2003, 24(5): 55-58.

[8] 潘芝桂. 天然气发动机进排气系统及配气相位优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.  
PAN Zhi-gui. Optimization research on intake and exhaust systems and valve timing of CNG engine[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.

[9] 刘慧杰, 毕玉华, 申立中, 等. 两缸增压中冷柴油机排气压力波动与影响因素研究[J]. 机械设计, 2016, 33(6): 30-36.  
LIU Hui-jie, BI Yu-hua, SHEN Li-zhong, et al. Exhaust pressure fluctuations and the influence factors study of two cylinders turbo charged inter-cooled diesel engine[J]. Journal of machine design, 2016, 33(6): 30-36.

[10] 余国核, 阎祥安, 冯淑杰, 等. 进气谐振对单缸发动机动力性能影响的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科版), 2007, 39(3): 166-169.  
YU Guo-he, YAN Xiang-an, FENG Shu-jie, et al. The influence of resonance in inlet pipe on dynamic performance of single-cylinder engine[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2007, 39(3): 166-169.

[11] CHALET D, CHESSE P. Fluid dynamic modeling of junctions in internal combustion engine inlet and exhaust systems[J]. Journal of thermal science, 2010, 19(5): 410-417.

[12] 罗贤芳. 基于可调参数的某发动机性能优化研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.  
LUO Xian-fang. Research on performance optimization of an engine based on adjustable parameters[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.

[13] 骆富贵. 进气状态对自然吸气汽油发动机性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2014. 63-68.  
LUO Fu-gui. The Influence of Engine Performance Cause By Gas Exchange Status[D]. Changsha: Hunan Univer-

- sity, 2014. 63-68.
- [14] 刘永长. 内燃机原理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 58-69.  
LIU Yong-chang. Theory of internal-combustion engine[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000: 58-69.
- [15] 韦思航, 张袁元. 基于一维模型的高速汽油发动机充气效率的多参数分析[J]. 机电工程技术, 2019, 48(11): 64-67.  
WEI Si-hang, ZHANG Yuan-yuan. Multi-parameter analysis of inflatable efficiency of high-speed gasoline engine based on one-dimensional model[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2019, 48(11): 64-67.
- [16] 张力, 李祖成, 张青, 等. 二次补气和配气相位对摩托车发动机怠速稳定性和动力性的影响[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(7): 8-15.  
ZHANG Li, LI Zu-cheng, ZHANG Qing, et al. Effects of secondary air and valve timing on idle speed stability and power performance of motorcycle engine[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(7): 8-15.
- [17] 王一, 李春书, 张士强, 等. 四缸汽油机配气机构进气凸轮型线的改进设计[J]. 机械设计, 2019, 36(3): 36-41.  
WANG Yi, LI Chun-shu, ZHANG Shi-qiang, et al. Improvement design on intake cam profile of the four-cylinder gasoline engine's valve-train[J]. Journal of machine design, 2019, 36(3): 36-41.
- [18] 凌红芳, 罗文水, 许莹莹. 发动机配气机构环境适应性及可靠性新技术——凸轮型线 DoE 优化设计[J]. 环境技术, 2012(6): 39-44.  
LING Hong-fang, LUO Wen-shui, XU Ying-ying. The environmental worthiness and reliability new technology of vehicle engine valve train: The cam profile DoE optimization design[J]. Environmental technology, 2012(6): 39-44.
- [19] 杨大成. 小排量增压发动机配气机构设计[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.  
YANG Da-chen. The design of valve train for 1.5 L Turbo engine[D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [20] 刘敬平, 冯仁华, 杨靖, 等. 摩托车发动机性能优化[J]. 内燃机工程, 2012, 33(1): 67-71.  
LIU Jing-ping, FENG Ren-hua, YANG Jing, et al. Optimization of motorcycle engine performance[J]. Chinese internal combustion engine engineering, 2012, 33(1): 67-71.
- [21] 罗亚妮. 摩托车用高速汽油机性能仿真及优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
LUO Ya-ni. High-speed motorcycle gasoline engine performance simulation and optimization research[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [22] 王建超. 摩托车排放标准评估与研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
WANG Jian-chao. Evaluation and study of motorcycle emission standard[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.