

doi: 10.12052/gdutxb.180045

基于滚流比的某汽油发动机进气道优化设计和研究

胡德卿¹, 熊锐¹, 吴坚^{1,2}, 谢火志¹, 潘浩坤¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州汽车集团有限公司
汽车工程研究院, 广东 广州 510640)

摘要: 为提高发动机燃油经济性, 首先通过部分负荷试验, 验证了滚流比对燃油经济性的影响; 再通过气道稳流试验, 验证了所建立的三维稳态计算模型的准确性以及气道评价参数之间的关系. 基于计算机液体动力学(CFD)分析影响气道流通特性的几何参数, 采用最优拉丁超立方抽样和响应面法(RSM)拟合出发动机进气道的近似模型, 应用第二代非劣排序遗传算法(NSGA-II)对气道中心线倾斜角和喉口下压角进行优化, 通过比较流量系数、滚流比等参数确定优化设计方案. 研究表明: 优化后的进气道模型能够在保证流量系数不变的情况下一定程度上提高滚流比, 最终获得了提升气道滚流比的优化设计结果.

关键词: 汽油机进气道; 计算流体动力学(CFD); 滚流比; 流量系数; 多目标优化(EMO)

中图分类号: U464.132

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2019)01-0087-06

Optimization Design and Research of a Gasoline Engine Inlet Port Based on Tumble Ratio

Hu De-qing¹, Xiong Rui¹, Wu Jian^{1,2}, Xie Huo-zhi¹, Pan Hao-kun¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology Guangzhou 510006, China;
2. Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy of the engine, the influence of tumble ratio on fuel economy is verified by partial load test; the accuracy of three-dimensional steady calculation model and the relationship between flow coefficient and tumble ratio is verified by ports steady test. The geometric parameters of affecting ports flow characteristics are analyzed based on CFD(Computation Fluid Dynamics), fitting out an approximate model with the Optimal Latin hypercube sampling and response surface method (RSM). Optimizing the tilt Angle and throat Angle via the Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), it confirms the optimized design scheme by comparing the flow coefficient and tumble ratio. The result shows that the optimized inlet model can improve the tumble ratio on the premise that the flow coefficient is constant, which can eventually get the optimal design result of improving the tumble ratio.

Key words: gasoline engine ports; CFD(Computation Fluid Dynamics); tumble ratio; flow coefficient; EMO(Evolution Multiobjective Optimization)

发动机进气道的设计布置对其经济性有重要的影响^[1-3]. 进气道结构非常复杂, 其关键部位的设计对其流动影响很大, 因此找到这些关键部位并进行一定的改进是进气道优化设计的重要工作^[4-6]. 传统的进气道设计工作是在进气道试验台上反复试验, 通过经验得出数据, 其时间周期长且具有一定的盲目性^[7].

本文先通过试验来验证滚流比对发动机性能的

影响, 然后采用计算流体动力学(CFD)数值模拟方法对其进气道进行仿真计算并验证, 再使用多目标优化(EMO)方法确定进气道优化后的几何参数, 最后通过仿真验证优化结果.

1 进气道流动特性的评价方法

为了比较不同几何参数的进气道的性能, 本文用无量纲流量系数来评价不同气门升程下进气道流

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 广东省科技厅省部产学研结合基金资助项目(2013B090400002)

作者简介: 胡德卿(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为内燃机进排气道CFD分析. Email: hudeqingcfd@163.com

通性能的好坏;用无量纲滚流比来评价不同气门升程下气道形成滚流的能力^[8-11],并采用AVL评价方法。

1.1 流量系数

在发动机进气道数值模拟计算中,无量纲流量系数 C_f 表示通过气道的实际流量与理论流量之比 $C_f = \frac{m_{\text{actual}}}{m_{\text{theo}}}$ 。本文采用出口边界流量作为实际质量流量 m_{actual} (kg/s)。理论质量流量为:

$$m_{\text{theo}} = A_v \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{\text{average}}}} \quad (1)$$

式(1)中, $A_v = \frac{\pi \cdot d_v^2 \cdot n}{4}$ 为进气门座圈面积, m^2 ; d_v 为进气门座圈内径, m ; $n=2$ 为进气门数; ρ 为缸内气体密度, kg/m^3 ; Δp 为气道进出口压差, Pa ; $\rho_{\text{average}} = \frac{\rho_0 + \rho}{2}$ 为平均密度, kg/m^3 ; ρ_0 为缸外大气密度, kg/m^3 。

对 C_f 按照AVL标准气门升程曲线进行积分计算,求得积分后的流量系数称为平均流量系数 C_{fm} :

$$C_{\text{fm}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{c_{\text{actual}}}{c_{\text{average}}} \right)^3 \frac{1}{(C_f)^2} d\alpha}} \quad (2)$$

式(2)中, c_{actual} 为活塞实际运动速度, m/s ; c_{average} 为活塞平均运动速度, m/s 。

1.2 滚流比

在数值模拟计算中,假定缸内流场平均轴向速度等于活塞平均速度,则滚流比TR为:

$$\text{TR} = \frac{n_{\text{padd}}}{n_{\text{mot}}} = \frac{\rho S A}{30m} n_{\text{padd}} \quad (3)$$

式(3)中, S 为活塞冲程, m ; $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ 为气缸截面积, m^2 ; m 为质量流量, kg/s ; D 为气缸内径, m ; n_{padd} 为叶片风速仪转数; n_{mot} 为假想发动机转数。

对TR按照AVL标准气门升程曲线进行积分计算,称为平均滚流比 TR_{fm} :

$$\text{TR}_{\text{fm}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{n_{\text{padd}}}{n_{\text{mot}}} \left(\frac{c_{\text{actual}}}{c_{\text{average}}} \right)^2 d\alpha \quad (4)$$

2 气道流通特性试验

2.1 气道稳流试验

稳流试验是用来评定气道的通流能力和形成滚流能力的主要方法。在使用CFD数值模拟之前,国内外研究者广泛采用进气道的稳流试验,以获得滚流比和流量系数等参数来评价气道的流动特性。

气道稳流试验台如图1所示,其测量原理是利用风机抽气在缸盖气道上下游形成一定的压差,通过测量气门升程、气道压差、气体流量和风速仪叶片转数等参数来计算出气道流动特性相关的评价参数。

在进气道稳流试验中,使用叶片风速仪的转速 n_{padd} 来代替气流转速,使用一个假想发动机转速 n_{mot} 来代替发动机转速。其中,流量是通过在连接管路内放置热线质量流量计,气体在缸内的滚流转数是通过在距离燃烧室0.5倍缸径的模拟缸套处放置叶片风速仪测量,测量原理是通过激光转速传感器测量缸内叶片转数。



(a) 气缸盖和缸套



(b) 抽风机和稳压箱



(c) 激光转速传感器

图1 气道稳流试验台

Fig.1 Intake port steady flow test bench

本文使用某1.5 TN汽油发动机气缸盖作为试验对象如图2所示,部分参数如表1所示。其中方案A采用低滚流比气道,方案B采用高滚流比气道,使用气道稳流试验台,试验目的是为了验证滚流比与流量系数之间的关系。分别测量各缸的气道评价参数,再取其平均值,试验测得各气道数据如表2所示。

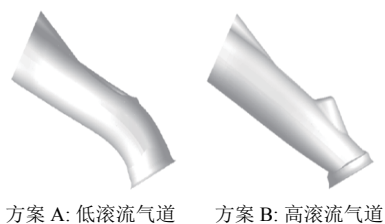


图2 发动机进气道
Fig.2 Engine ports

表1 部分参数
Tab.1 Some parameters

部件名称	参数	部件名称	参数
气缸数/个	4	进气门数/个	2
排气门数/个	2	活塞行程/mm	84.6
进气门直径/mm	27.6	排气门直径/mm	23.7
大气压力/kPa	101.325	环境温度/°C	25
气缸直径/mm	75		

表2 气道数据
Tab.2 Intake port data

各缸平均值	方案A	方案B	提高
流量系数	0.286 0	0.282 6	-1.19%
滚流比	2.133 2	2.200 2	3.14%

由表2可知,在提高滚流比的同时,流量系数会相应地下降,从而影响进气充量,降低功率输出。

2.2 部分负荷试验

同样使用某1.5 TN汽油发动机作为试验对象,选取整车常用的2 000 r/min进行负荷特性试验如图3所示。图4为不同滚流比下部分负荷特性的燃油消耗对比试验结果。



(a) 电力测功机



(b) 操作台及电气控制系统

图3 负荷特性试验台

Fig.3 Load characteristic test

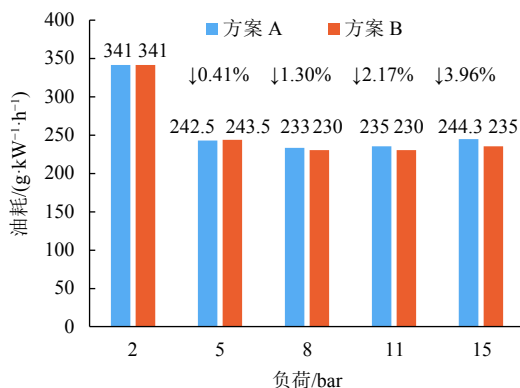


图4 部分负荷试验
Fig.4 Partial power test

由图4可知,在中低负荷区域,由于发动机机械效率较低,高滚流比对燃油经济性的改善并不明显,各方案的燃油消耗率基本一致,但在中高负荷区域,高滚流比优势逐渐显现,其中15 bar负荷工况下,高滚流比比低滚流比减少3.96%的油耗。

由于滚流比的提高增加了湍流强度,火焰前锋发生褶皱从而增加火焰传播面积,有效地缩短燃烧期,提高放热率,进而改善发动机的燃油经济性。

根据气道稳流试验与部分负荷试验可知,滚流比的提高能改善发动机燃油经济性,滚流比提高的同时会对流量系数产生一定的影响。本文研究目标基于EMO优化进气道几何参数,在提升滚流比的同时,使流量系数下降尽可能减小甚至不变。

3 数值模拟与试验验证

3.1 建立数值模拟模型

使用1.5 TN发动机第3缸高滚流进气道建立计算模型如图5所示。为了模拟进气道入口连接大气压的试验情况,使入口压力分布更接近于真实值,在进气道入口处建立一个边长为100 mm的方形稳压腔,并考虑在出口边界处气流的扰动,需要保持一定的收敛性,因此将气缸拉伸为2.5倍缸径。

将所建立的三维数模导入STAR-ccm+进行网格划分及边界条件设置,网格参数设定最大网格尺寸为4 mm,最小网格尺寸为1 mm,考虑到实际气流黏度对于结果收敛性,设置边界层数为4,边界层厚度为0.5 mm。网格类型选择棱柱层网格和多面体网格并选择表面修复功能,表面网格和体网格均采用同一网格类型。由于实际气道气体流速小于1马赫数,物理模型选择耦合流,考虑到计算精度及收敛性,选择默认的K-Epsilon湍流模型。

根据AVL气道评价标准,在给定边界条件与初

始条件的情况下,对进气道在不同升程下进行稳流数值模拟计算。

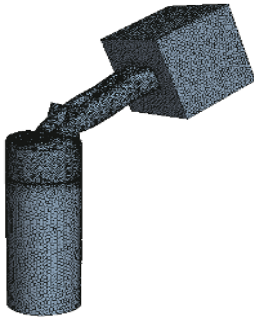
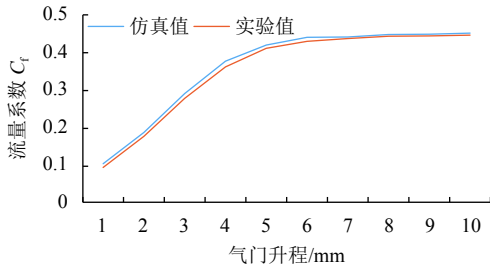


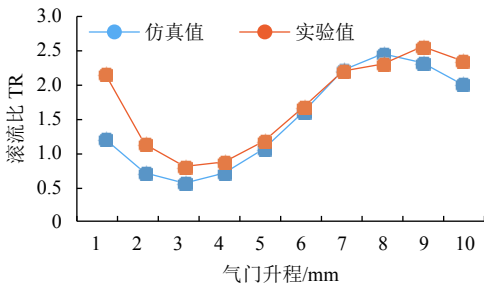
图5 生成的网格单元
Fig.5 Grid cells

3.2 计算结果与试验验证

计算气缸在不同升程下($h_v=1\sim 10\text{ mm}$)的进气道性能. 图6给出了在不同气门升程下三维气道稳态仿真结果与试验结果的对比. 表3给出了积分流量系数与积分滚流比仿真与试验的误差值. 由此可知,所建立的三维稳态仿真模型与试验拟合较好,流量系数误差值为2.32%,滚流比误差值为3.72%。



(a) 流量系数



(b) 滚流比

图6 仿真结果与试验结果

Fig.6 Simulation results and test results

表3 积分流量系数与积分滚流比

Tab.3 The integral flow coefficient and the integral tumble ratio

积分值	仿真结果	试验结果	误差值
流量系数	0.309 1	0.302 1	2.32%
滚流比	2.290 2	2.378 6	3.72%

4 多目标设计参数优化

4.1 进气道优化方案设计

气道中心线偏转角影响着气流与气门盘接触时动量矩的大小^[12]. 主要是当气道中心线偏转角变大时,由于导向作用,增加了气门盘处流向排气门方向的气流,从而增加滚流强度. 喉口下压角^[12]能够减少气流在喉口处的动量损失,提高流通性能,但也会使得气流在切向段导向能力减弱,使气流产生“撞壁现象”,降低滚流比,如图7所示。

综上所述,气道中心线偏转角和喉口下压角的选择对进入缸体内气体的流动状态影响较大,故本文主要对气道中心线偏转角 α 与喉口下压角 β 进行优化,如图8所示。

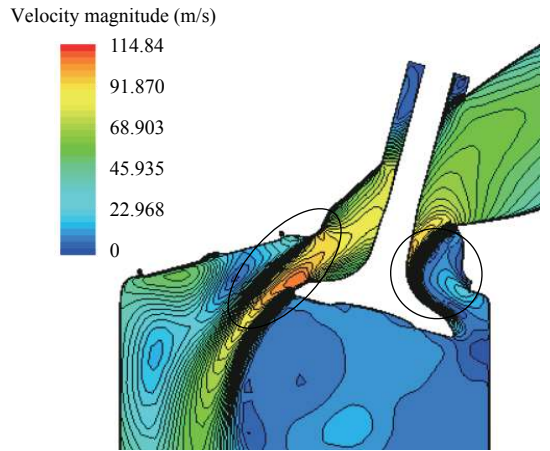


图7 气道流速标量图

Fig.7 Flow chart

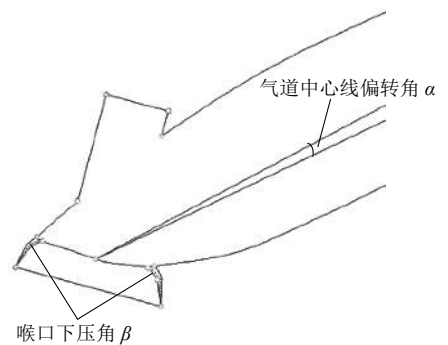


图8 优化参数

Fig.8 Parameter optimization

根据表4变量取值范围,得出设计数组为36组,基于最优拉丁超立方设计选取6组作为处理对象,如表5所示。

最优拉丁超立方设计改进了随机拉丁超立方设计的均匀性,使所有试验点尽量均匀地分布在设计空间,具有非常好的空间填充性和均衡性^[13-14]。

表 4 优化设计方案

Tab.4 Optimization design scheme

设计参数	取值范围
气道中心线倾斜角 $\alpha(^{\circ})$	1、3、5、7、9、11
喉口下压角 $\beta(^{\circ})$	1、3、5、7、9、11

表 5 最优拉丁超立方抽样

Tab.5 Optimal Latin hypercube sampling

气道中心线倾斜角 $\alpha(^{\circ})$	喉口下压角 $\beta(^{\circ})$				
	1	3	5	7	9
1					⑤
3			③		
5	①				
7					⑥
9				④	
11		②			

4.2 近似模型的拟合及验证

根据初始设计方案建立三维稳态计算模型,将 α 和 β 作为变量,在三维稳态气道模型进行计算并得出结果如表6.

表 6 部分计算结果

Tab.6 Partial calculation result

编号	流量系数	滚流比
①	0.318 5	2.391 9
②	0.325 6	2.266 5
③	0.312 0	2.439 5
④	0.322 5	2.306 2
⑤	0.300 1	2.469 7
⑥	0.317 5	2.356 9

将 α 和 β 作为输入,将计算结果作为输出,应用4阶响应面模型^[15],建立 α 和 β 关于流量系数和滚流比的近似模型.在设计参数取值范围中随机选择4组设计数组进行计算,并将计算结果与近似模型预测结果进行对比,对比结果如表7所示,由计算结果可知,近似模型输出变量的误差都能控制在2%左右,说明该近似模型有较高的精确度,可以用该近似模型进行设计参数的优化.

4.3 多目标参数优化

应用带精英策略的非支配排序遗传算法^[16-18](NSGA-II)对气道中心线倾斜角 α 和喉口下压角 β 进行优化,设置流量系数不变,滚流比为最大值.其中,种群规模为100,代数为200,交叉率为0.9,交叉分布指数为10,变异分布指数为20.优化得出Pareto前沿如图9所示,本文在保持一定流量系数的同时,尽可能提高滚流比,据此确定Pareto最优拟合解如表8所示.

表 7 计算结果与近似模型预测结果对比

Tab.7 The calculated results are compared with the predicted results

设计参数		计算结果		近似模型预测结果		误差/%	
α	β	流量系数	滚流比	流量系数	滚流比	流量系数	滚流比
3	3	0.313 7	2.455 1	0.311 4	2.433 4	0.74	0.89
5	5	0.316 8	2.438 4	0.314 5	2.392 3	0.73	1.93
7	7	0.319 4	2.397 8	0.317 6	2.351 3	0.57	1.98
9	9	0.324 2	2.262 1	0.320 7	2.310 2	1.09	2.13

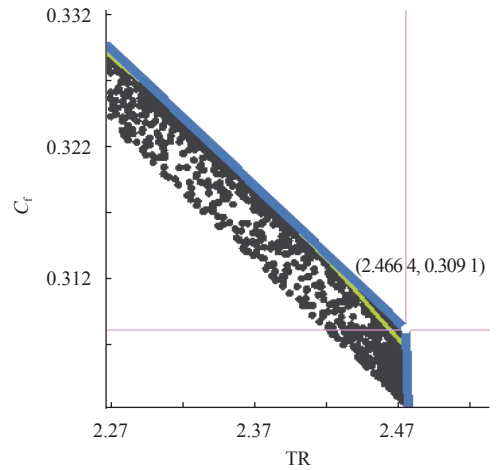


图 9 Pareto前沿

Fig.9 Pareto

表 8 Pareto最优拟合解

Tab.8 Pareto fitting solution

α	β	流量系数 C_f	滚流比TR
1.388 5	1	0.309 1	2.466 4

根据优化参数重新对气道进行设计,并建立三维稳态仿真模型,计算得出优化后结果如图10所示,可知在流量系数不变的情况下,滚流比提高了5.82%.

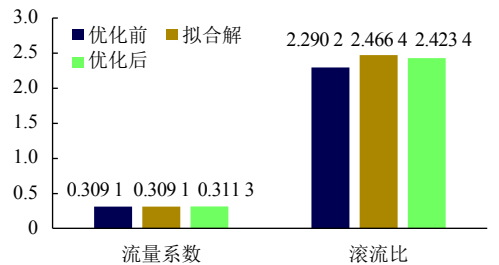


图 10 优化结果

Fig.10 The optimization results

优化后的气道在流量系数不变的前提下,一定程度地提高了滚流比,有利于在不降低发动机功率输出的同时降低发动机的油耗,其优化结果为发动机改善燃油经济性提供了一定的思路.

5 结论

本文通过气道特性试验验证了滚流比对燃油经济性的影响。滚流比的提高能够改善发动机的燃油经济性,但同时也会对流量系数产生影响。

通过CFD数值模拟方法对发动机进气道进行仿真计算,所建立的三维稳态计算模型能够较准确地模拟进气道的流量系数和滚流比,其仿真结果为发动机进气道的优化设计提供了依据。

气道中心线偏转角 α 影响着气流与气门盘接触时动量矩的大小;喉口下压角 β 直接影响管道内气流速度大小、方向的变化速率。气道中心线偏转角 α 与喉口下压角 β 对气道流通特性影响较大。

折衷流量系数与滚流比之间的影响,对汽油发动机进气道进行了设计,结果显示在保证流量系数不变的情况下,滚流比提高了5.82%,最终获得了提升气道滚流比的优化设计结果。

参考文献:

- [1] URUSHIHAR A, MURAYAMA T, LEE K H, *et al.* Turbulence and cycle variation of mean velocity generated by swirl and tumble flow, and their effects on combustion [J]. Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers, 1995, 60(580): 4280-4286.
- [2] KYRIAKIDES S C, GLOVER A R. A study of the correlation between in-cylinder air motion and combustion in gasoline engines [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 1989, 203(34): 185-192.
- [3] ERDIL A, KODAL A, AYDIN K. Decomposition of turbulent velocity fields in an SI engine [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2002, 68(2): 91.
- [4] 赵春明, 吴志新, 马宁, 等. 气道稳流模拟试验系统开发与评价方法数值处理分析[J]. *内燃机工程*, 2004, 25(5): 1-4. ZHAO C M, WU Z X, MA N, *et al.* Development of port stationary test system and analysis of numerical disposing of evaluation method [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2004, 25(5): 1-4.
- [5] 陈巍, 杜发荣, 吴健, 等. 内燃机进气道流场的CFD计算[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(6): 22-24. CHEN W, DU F R, WU J, *et al.* CFD calculation of internal combustion engine inlet flow field [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 26(6): 22-24.
- [6] 周松, 戴景民. 切向进气道内燃机进气系统流场的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 50-55. ZHOU S, DAI J M. Numerical simulation of flow field in intake system in internal combustion engine with tangent intake duct [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(1): 50-55.
- [7] 杜巍, 向继红, 李向荣. 用RES3D—II程序对12150ZL柴油机燃烧过程进行数值模拟的研究[J]. *内燃机工程*, 2000, 21(3): 44-49.
- [8] DU W, XIANG J H, LI X R. A study on numerical simulation of model 12150ZL diesel engine combustion process with RES3D-II program [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2000, 21(3): 44-49.
- [9] 罗马吉, 黄震, 陈国华, 等. 发动机进气流场三维瞬态数值模拟研究[J]. *空气动力学学报*, 2005, 23(1): 74-78. LUO M J, HUANG Z, CHEN G H, *et al.* Three-dimensional transient numerical simulation of engine intake flow [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2005, 23(1): 74-78.
- [10] 王志, 黄荣华, 王必, 等. 基于CAD/CAM/CFD的发动机气道研究[J]. *内燃机工程*, 2002, 23(3): 26-29. WANG Z, HUANG R H, WANG B, *et al.* Research based on CAD/CAM/CFD for engine port development [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2002, 23(3): 26-29.
- [11] 刘福水, 康宁, 徐洋, 等. 增压柴油机气道流量系数评价与稳流特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 341-348. LIU F S, KANG N, XU Y, *et al.* Discharge coefficient evaluation and steady flow characteristics for intake port of turbocharged diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2017, 48(6): 341-348.
- [12] 朱忠攀, 林瑞, 杜爱民, 等. 汽油机PIV稳态进气试验及滚流比计算[J]. *内燃机工程*, 2017, 38(4): 121-127. ZHU Z P, LIN R, DU A M, *et al.* PIV steady state air intake experiment and tumble ratio calculation of gasoline engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2017, 38(4): 121-127.
- [13] 冯彪. 发动机进气道参数化CFD分析及其平台开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学汽车工程学院. 2015:6.
- [14] PARK J S. Optimal latin-hypercube designs for computer experiments [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 1994, 39(1): 95-111.
- [15] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. *Technometrics*, 1979, 42(1): 55-61.
- [16] DERRINGER D. Simultaneous optimization of several response variables [J]. *Journal of Quality Technology*, 1980, 12(4): 214-219.
- [17] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [18] 李云, 王志红, 王琦, 等. 改进NSGA-II算法在水质监测点多目标优化研究中的应用[J]. *广东工业大学学报*, 2018(2): 35-40. LI Y, WANG Z H, WANG Q, *et al.* A study of multi objective optimal placement of water quality monitoring stations based on improved NSGA-algorithm [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2018(2): 35-40.
- [19] 徐焕芬, 刘伟, 谢月珊. 双种群烟花算法[J]. *广东工业大学学报*, 2017, 34(5): 65-72. XU H F, LIU W, XIE Y S. Fireworks algorithm based on dual population for optimization problems [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2017, 34(5): 65-72.