

基于 STAR-CCM+ 的进气道优化设计

王东, 刘向东*

同济大学 汽车学院, 上海 200092

摘要:为提高进气道设计效率,缩短开发时间,基于 STAR-CCM+的进气道优化设计方法,建立汽油机进气道稳态参数化模型,利用 STAR-CCM+ Design Manager 中的 Sherpa 优化算法进行目标为 y 滚流比和进入燃烧室的新鲜空气质量流量最大化的多目标优化。仿真结果表明: y 滚流比和进入燃烧室的新鲜空气质量流量之间存在明显的 trade-off 竞争关系;与基准设计相比,最优设计的 y 滚流比提升了 15.6%,进入缸内的空气质量流量提升了 22.3%。该研究方法可以实现快速自动化的汽油机进气道优化设计,减少设计周期,提高设计效率。

关键词:进气道;STAR-CCM+; y 滚流比;空气质量流量

中图分类号:TK413.44

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)02-0030-06

引用格式:王东,刘向东.基于 STAR-CCM+的进气道优化设计[J].内燃机与动力装置,2023,40(2):30-35.

WANG Dong, LIU Xiangdong. Optimization of intake port based on STAR-CCM+[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(2):30-35.

0 引言

随着对环境和能源问题的日益重视,汽车制造行业应在确保质量和安全性的前提下提高性能,尽可能缩短开发时间,节约开发成本,降低排放。传统进气道设计采用经验设计和稳流试验相结合的方法,需进行大量试验,研发周期长,成本高且较难得到理想方案。因此,在开发的初期阶段,基于计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)的多目标优化设计得到了普遍应用。

程莎莉^[1]、张潇扬等^[2]利用 Fluent 搭建发动机进气道模型,通过手动修改气道模型,提高了滚流比和流量系数;苏舒^[3]利用 SC/Tetra 计算得到了 CG150 型发动机流量系数和涡流比,利用参数化设计方法改进发动机进气道参数,提高了进气道流通能力;刘猛等^[4]基于 AVL-Fire 创建了 LJ465Q 发动机进气道模型,提出了不同的气门倒角设计,改进后流量系数增大;胡德卿^[5]通过使用拉丁超立方采样、第二代非劣排序遗传算法提高了某汽油机进气道滚流比;孔小豪^[6]重新设计某 1.5 L 发动机进气道口,优化了气道的流量系数和滚流比;方天文等^[7]利用 AVL-Fire 分析了由 Creo 绘制的进气道模型,得到进气道关键几何参数,经过多轮参数匹配,得到了进气道优化方案;Qi 等^[8]利用 Kiva 和 STAR-CD 分别建立发动机模型,通过修改气道参数,得到了具有更高滚流比的方案;Tokuda 等^[9]、Sun 等^[10]分别利用伴随流求解器、人工神经网络和遗传算法对进气道进行仿真分析与优化;Verma 等^[11]利用 Fluent 建立了发动机气道的伴随流计算模型进行进气道分析与优化,大幅降低了压降,显著提升了滚流比和涡流比;Saw 等^[12]设置了气道倾角和缸盖顶角 2 个结构参数,利用均匀拉丁超立方采样、支持向量机以及 MOGA-II 算法对进气道进行优化,降低了指示燃油消耗率和排放。传统的进气道优化方法无法快速探索大型设计空间以及识别最佳

收稿日期:2023-01-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0104802)

第一作者简介:王东(1972—),男,上海人,工学博士,副教授,主要研究方向为汽车空气动力学、车辆热管理、气动噪声与计算流体力学,E-mail:wangdong@tongji.edu.cn。

*通信作者简介:刘向东(1988—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为内燃机 CFD 仿真分析与优化,E-mail:105207759@163.com。

解决方案,尤其是在处理多个相互竞争的目标问题时效率较低;需要手动调整优化参数,设计人员应具有丰富的专业知识;另外与计算机辅助设计(computer aided design, CAD)以及 CAE 工具的集成有限,无法做到在单一平台内实现无缝的设计探索和优化。

本文中利用 STAR-CCM+自带的 Design Manager 工具,采用 Sherpa 优化算法,设计一个参数化的进气道优化流程,在较短时间内获得进气道的优化设计,同时优化过程中无需进行专业的优化参数调试,可实现快速自动化的进气道优化设计。

1 仿真模型

1.1 计算方法

优化过程中,利用大型商业计算流体力学软件 STAR-CCM+^[13-14]进行稳态气道计算,采用有限体积法求解质量与动量守恒方程(也称为纳维-斯托克斯方程):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) + \nabla \cdot \left[\nu \left\{ (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right\} \right], \quad (2)$$

式中: ∇ 为散度算子; \mathbf{u} 为流体速度, m/s; ν 为流体的运动黏度, m^2/s ; \mathbf{I} 为湍流强度。

湍流计算使用基于雷诺平均的 SST k - ω 湍流模型,求解湍动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程为:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta^* \omega k + S_k, \quad (3)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C_{D-k\omega} + S_\omega, \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; D_k 为湍动能的扩散系数, m^2/s ; G 为湍动能的生成项, m^2/s^3 ; β 、 β^* 、 γ 为模型常数; S_k 为湍动能源项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-3})$; D_ω 为比耗散率的扩散系数, m^2/s ; F_1 为混合函数; $C_{D-k\omega}$ 为交叉扩散系数, s^{-2} ; S_ω 为比耗散率源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^2)$ 。

湍流黏度

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S)}, \quad (5)$$

式中: a_1 、 b_1 为模型常数; F_{23} 为混合函数; S 为应变率, s^{-1} 。

SST k - ω 湍流模型默认常数如表 1 所示。

表 1 SST k - ω 湍流模型默认常数

α_{k1}	α_{k2}	$\alpha_{\omega 1}$	$\alpha_{\omega 2}$	β_1	β_2	γ_1	γ_2	β^*	a_1	b_1	c_1
0.85	1.0	0.5	0.856	0.075	0.082 8	5/9	0.44	0.09	0.31	1.0	10.0

1.2 计算条件

气道优化计算使用的 4 气门、4 冲程汽油发动机,缸径为 85 mm,行程为 88 mm,额定转速为 5 500 r/min。采用 STAR-CCM+的 3D-CAD 模块搭建进气道稳态参数化模型,利用草图、旋转、放样、镜像、倒角、拉伸等操作生成气道及稳压腔几何模型。

按照文献[15]进行多面体网格划分,进气道网格模型如图 1 所示。网格基准尺寸为 1 mm,气门升程固定在 10 mm 处。划分完成后,总网格大约为 300 万。

借鉴德国 FEV 的项目经验及文献[16]的研究结果设置边界条件:进口设置为 Stagnation Inlet,压力为 101.3 kPa;出口设置为 Pressure Outlet,出口背压为 -5 kPa;总的迭代步数为 5 000 步,计算过程中监控进入缸内的空气质量流量与 γ 滚流比。

y 滚流比

$$T_y = \frac{M_y}{\omega_c I_y} = \frac{\sum_N \rho_i u_i [(z_i - z_m) u_i - (x_i - x_m) w_i]}{\omega_c \sum_N \rho_i u_i [(x_i - x_m)^2 + (z_i - z_m)^2]}, \quad (6)$$

式中: M_y 为绕着 y 轴的角动量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; ω_c 为曲轴角速度, rad/s ; I_y 为绕着 y 轴的质量惯性矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; N 为网格总数; x_i, z_i 为网格的坐标, u_i, w_i 为网格的速度分量, m/s ; x_m, z_m 为气缸的质心坐标。

采用 STAR-CCM+ 计算时统计 y 滚流比的位置及坐标轴示意图如图 2 所示, 图中高亮红色区域为统计 y 滚流比的区域, 该区域厚度为 4.0 mm, 旋转轴为 y 轴。

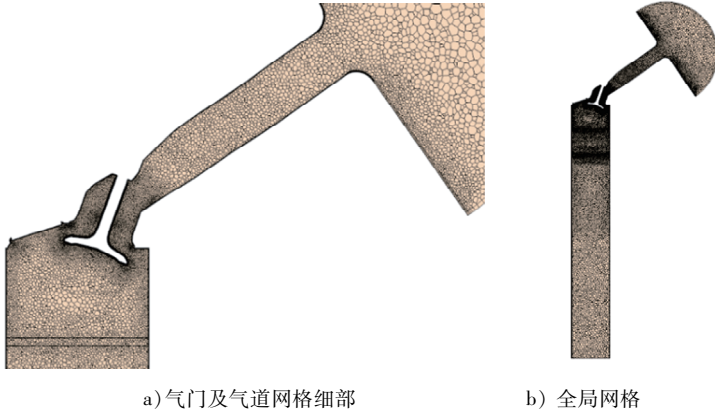


图 1 进气道网格模型

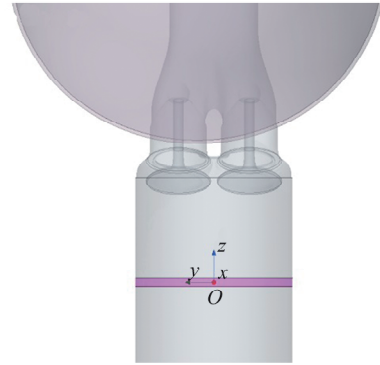
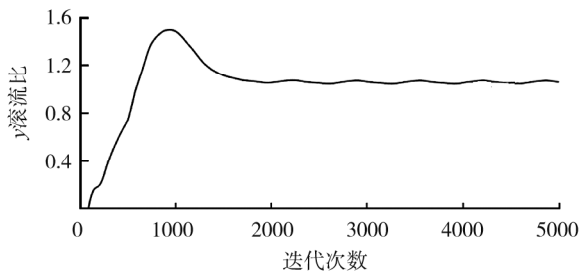
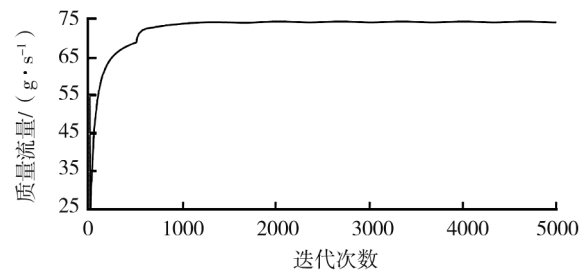


图 2 统计 y 滚流比位置及坐标轴示意图

基准设计方案的气门室高度为 5.1 mm, 进气道倾角为 8.8° , 进气道截面高度为 3.8 mm, 截面宽度为 0。基准设计的计算收敛过程如图 3 所示。由图 3 可知, 大约经过 1 000 次迭代后计算收敛, 模型可行有效。



a) y 滚流比收敛过程



b) 空气质量流量收敛过程

图 3 基准设计的计算收敛过程

2 优化方法

2.1 参数化模型

本文中 choice 对气门室高度 H 、进气道倾角 θ 、进气道横截面型线进行参数化。气门室高度和进气道倾角如图 4 所示。在进气道处选取 2 个截面, 利用截面高度 h 和截面宽度 d 定义这 2 个气道的截面型线, 对这 2 个截面型线进行 Loft 放样操作生成气道曲面。进气道截面及截面尺寸的具体定义如图 5 所示。

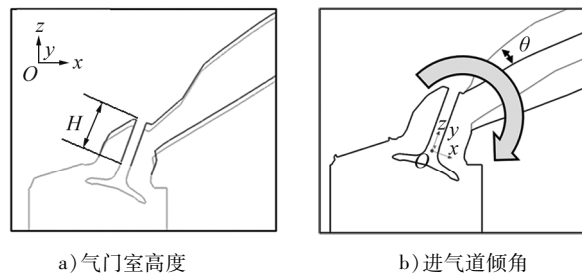


图 4 气门室高度、进气道倾角示意图

变量的类型、变化范围以及解析度如表 2 所示。

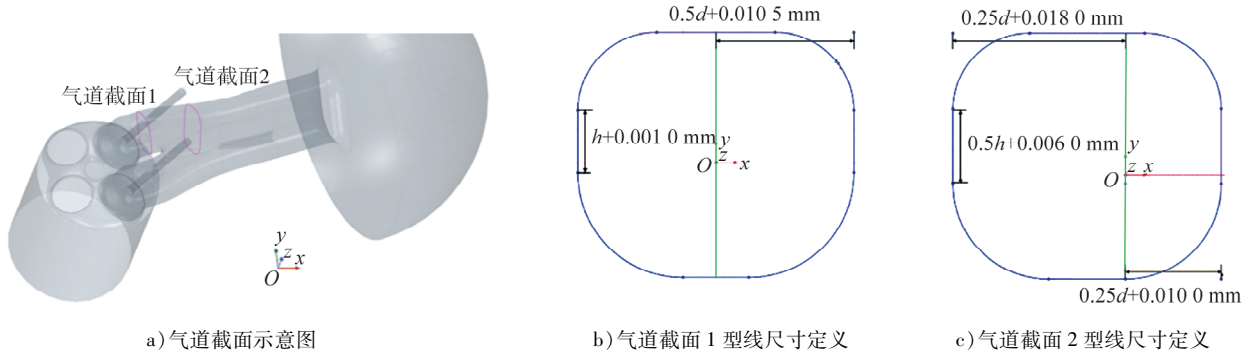


图 5 进气道截面截面尺寸的具体定义

表 2 变量的类型、变化范围及解析度

项目	气门室高度/mm	进气道倾角/(°)	截面高度/mm	截面宽度/mm
变量范围	[0,8.0]	[0,12.0]	[0,6.0]	[0,8.0]
增量	0.1	0.1	0.1	0.1
解析度	81	121	61	81
参数类型	连续型	连续型	连续型	连续型

2.2 目标函数与优化算法

选取 y 滚流比和进入缸内的空气质量流量为决策变量,基于 2 个准则进行决策:1)保证进入发动机缸内的新鲜空气质量流量能够满足发动机达到最大功率;2)在新鲜空气质量流量得到充分保证的情况下,选择 y 滚流比大的方案,以利燃烧。这是一个多目标优化问题,即求帕累托最优解。

采用 Design Manager 内置的 Sherpa 优化算法进行计算。该算法具有 2 个特点:1)综合性。可以同时使用各种查找策略,同步进行全局和局部搜索,综合利用各种算法的长处。2)自适应。对于极其复杂的设计空间,可自动进行算法调整,搜索方法简单高效,对复杂问题的求解极为有利。

3 结果分析

3.1 y 滚流比与空气质量流量的关系

设置总计算次数为 50 次,连续进行 50 个进气道设计方案的计算,各方案的设计参数由 Sherpa 优化算法自动给出。 y 滚流比与进入缸内的空气质量流量的关系如图 6 所示。由图 6 可知, y 滚流比和进入缸内的空气质量流量存在明显的 trade-off 竞争关系。

各设计方案的参数与目标函数的平行图如图 7 所示。由图 7 可知:优化过程中,4 个参数的取值分布较均匀,未集中在某一个数值区间,亦可由图中得出 y 滚流比与空气质量流量为 Trade-off 关系。

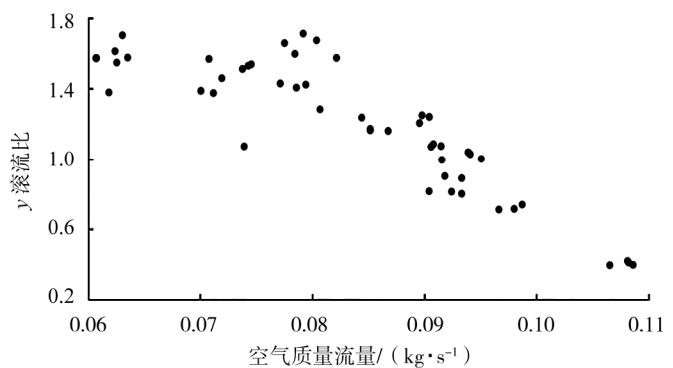


图 6 y 滚流比与进入缸内的空气质量流量的关系

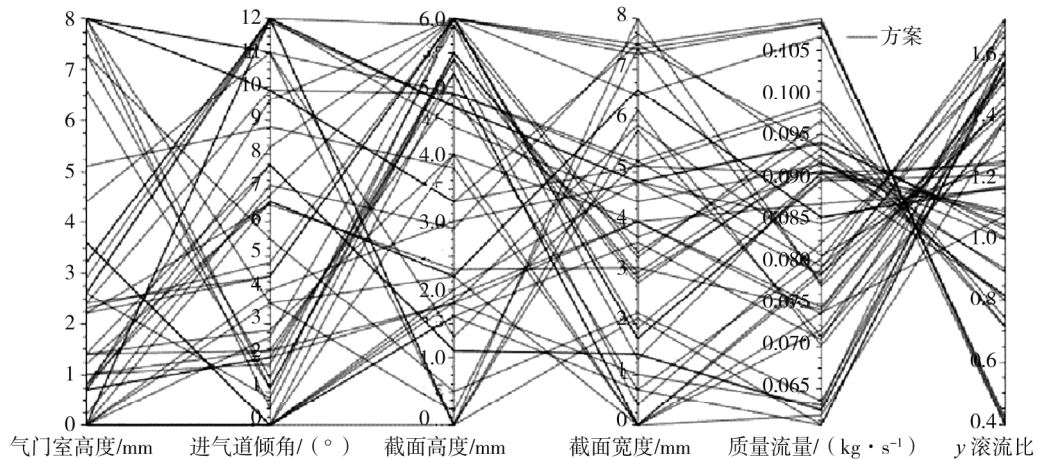


图7 各方案的参数与目标函数的平行图

3.2 帕累托锋面

从 Design Manager 中提取到的帕累托锋面如图 8 所示。针对此类多目标优化设计,最优解是一个解集,帕累托锋面上所有的点都是最优设计。

图 8 中,红色方框内的点为进入缸内的空气质量流量最大的方案,空气质量流量为 0.108 564 kg/s, y 滚流比为 0.395 273;蓝色方框中的点为 y 滚流比最大设计方案,空气质量流量为 0.079 149 kg/s, y 滚流比为 1.713 390。基于前述决策准则,绿色方框中的点为最终方案,气体质量流量为 0.090 386 kg/s, y 滚流比为 1.241 180。进气道基准设计方案的空气质量流量为 0.073 905 kg/s, y 滚流比为 1.073 685。与基准方案相比,最终方案的 y 滚流比提升了 15.6%,空气质量流量提升了 22.3%。

不同方案的各参数计算结果如表 3 所示。

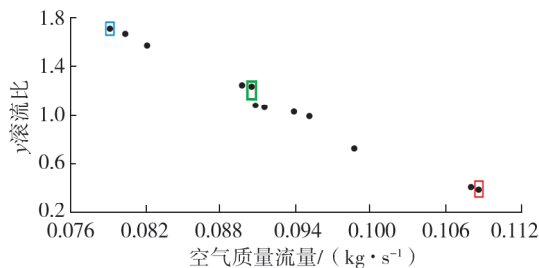


图8 帕累托锋面

表3 不同方案的各参数计算结果

方案	气门室高度/mm	进气道倾角/(°)	截面高度/mm	截面宽度/mm
基准	5.1	8.8	3.8	0
最大空气质量流量	2.4	4.4	6.0	7.5
最大 y 滚流比	0.7	2.0	5.2	0
最终	0.7	9.6	6.0	1.9

4 结论

利用 STAR-CCM+对某汽油机进气道进行了优化分析,选用 y 滚流比和进入燃烧室的空气质量流率作为目标函数;采用了 Design Manager 内置的多目标优化算法 Sherpa,连续进行 50 个进气道设计方案的计算。优化结果显示,与基准设计相比,最终优化设计方案的 y 滚流比提升了 15.6%,质量流量提升了 22.3%,优化后进气道的性能得到显著提升。

参考文献:

- [1] 程莎莉. 发动机气道三维流动特性的研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [2] 张潇扬,任洪娟,孙裴,等. 浅谈节能赛车发动机进气道优化方法[J]. 中国设备工程,2019(13):184-185.
- [3] 苏舒. 基于三维流动模拟和一维动力性能模拟的发动机气道参数化设计的研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [4] 刘猛,祖炳锋,徐玉梁,等. 基于有限元分析的汽油机进气歧管设计[J]. 内燃机与动力装置,2021,39(5):11-14.

- [5] 胡德卿. 基于 CFD 的某型汽油机进气道优化设计和研究[D]. 广州:广东工业大学,2018.
- [6] 孔小豪. 基于 AVL-Fire 的某 1.5 L 发动机进气道优化设计[J]. 装备制造技术,2021(2):67-70.
- [7] 方天文,刘强,肖翔,等. 一种小排量自然吸气汽油发动机进气道的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2022,51(3):24-27.
- [8] QI Y L, DONG L C, LIU H, et al. Optimization of intake port design for SI engine[J]. International Journal of Automotive Technology,2012,13(6):861-872.
- [9] TOKUDA S, KUBOTA M, NOGUCHI Y. Development of CFD shape optimization technology using the adjoint method and its application to engine intake port design[J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(2):833-842.
- [10] SUN Y, WANG T, ZHEN L, et al. The optimization of intake port using genetic algorithm and artificial neural network for gasoline engines[C]//Proceedings of SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2015.
- [11] VERMA I, HILL C, MIN X. Multi-objective adjoint optimization of flow-bench port geometry [C]//Proceedings of 2018WCX World Congress Experience. Detroit, USA: SAE International, 2018.
- [12] SAW O P, ADDEPALLI S K, MALLIKARJUNA J M. Optimization of intake port and pentroof angle for simultaneous reduction of fuel consumption and exhaust emissions in a GDI engine[J]. SAE International Journal of Engines,2020,13(3):293-309.
- [13] 史方凯,张峰昌,罗乐生,等. 基于 STAR-CCM+的进气道气体流动的优化计算[J]. 内燃机与配件,2017(14):14-16.
- [14] 张珊珊. 汽油发动机进气道优化[C]//中国汽车工程学会. 2018 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2018:1448-1450.
- [15] OBERHUMER K. Steady state port flow simulations[M]. Nuremberg, Germany: Siemens Industry Software GmbH,2019.
- [16] 张彧宁,李伟. 汽油机进气道参数化设计与研究[C]//中国汽车工程学会. 面向未来的汽车与交通:2013 中国汽车工程学会年会论文集精选. 北京:北京理工大学出版社,2013:11-17.

Optimization of intake port based on STAR-CCM+

WANG Dong, LIU Xiangdong*

School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to improve the efficiency of intake port design and shorten development time, a steady-state parameterized model of gasoline engine intake ports is established based on the STAR-CCM+ intake port optimization design method. The Sherpa optimization algorithm in STAR-CCM+ Design Manager is used for multi-objective optimization with the goal of maximizing the γ -tumble ratio and the mass flow rate of fresh air entering the combustion chamber. The simulation results of the optimization scheme indicate that there is a clear trade-off competition relationship between the γ -tumble ratio and the fresh air mass flow rate entering the combustion chamber. Compared with the benchmark design, the optimal design has an increase of 15.6% in γ -tumble flow ratio and an increase of 22.3% in air mass flow into the cylinder. This research method could achieve automated optimization design of gasoline engine intake ports, reduce design cycles, and improve design efficiency.

Keywords: intake port; STAR-CCM+; γ -tumble; air mass flow

(责任编辑:郎伟锋)