

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.009

汽油机进气歧管数值计算方法研究*

黎宏苗,刘震涛,孙 正,黄 瑞*

(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所,浙江 杭州 310027)

摘要:针对两种数值计算方法(四口全通、三闭一通)影响进气歧管的流场特性和进气均匀性计算结果的问题,分别采用这两种数值计算方法对某四缸汽油机的两款进气歧管进行了 CFD 计算,分析了两种数值方法获得的进气阻力和进气均匀性计算结果。同时,建立了相应的发动机试验台架,通过分析两款进气歧管对发动机的动力性、经济性及运行平稳性的试验数据来验证数值计算方法的可靠性。研究表明:采用“四口全通”和“三闭一通”这两种数值计算方法获得的进气阻力变化趋势一致,两者都适用于进气阻力仿真分析;两种数值计算方法的进气均匀性计算结果差异很大;“三闭一通”数值计算方法更加适用于进气歧管进气均匀性分析。

关键词:进气歧管;数值模拟;进气均匀性

中图分类号:TH122;U464.171

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1340-05

Numerical computed methods for intake manifolds in gasoline engine

LI Hong-miao, LIU Zhen-tao, SUN Zheng, HUANG Rui

(Institute of Power Machinery and Vehicular Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the effect of the results of two methods on flow field characteristics and air inlet uniformity of the intake manifold, two numerical calculation methods were used to simulate two models of intake manifold of a four-cylinder gasoline engine. Meanwhile, an engine test bench was established to verify the reliability of two numerical calculation methods on engine performance, fuel economy and running stability. The results indicate that the using “four all-pass” and the “three close” of these two kinds of numerical computing methods for air intake resistance change trend is consistent, both are suitable for air intake resistance simulation analysis; the results of air inlet uniformity vary widely; the “three close, one pass” numerical calculation method is more suitable intake manifold air intake uniformity analysis.

Key words: intake manifold; numerical simulation; intake uniformity

0 引 言

进气歧管是发动机的重要部件之一,是影响发动机进气阻力和各缸进气均匀性的关键因素^[1-2]。而汽油的进气阻力和进气均匀性对整机的经济性、动力性和工作过程的可靠性有着重要的影响。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟分析技术也被引入到发动机进气歧管的研究中,并发挥着愈来愈重要的作用。通过数值模拟计算,研究者能够更直观地观察管道内气

体的流场组织情况,更合理地指导进气歧管的研究及优化工作^[3]。

目前,四缸进气歧管稳态 CFD 仿真主要存在两种数值计算方法:①“四口全通”(下文简称方法 A),即 4 个支管全部设置成出口边界;②“三闭一通”(下文简称方法 B),即只有一个支管设置出口边界,其余 3 个支管设置成壁面。文献[4-6]采用方法 A 对进气歧管进行数值模拟,分析其流场特性、进气阻力及进气均匀性,进而对结构进行优化设计;而文献[7-10]则采用方法 B 对进气歧管进行数值模拟,分析其流场特性等。

收稿日期:2013-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51206141)

作者简介:黎宏苗(1988-),男,浙江台州人,主要从事发动机及车辆热管理方面的研究. E-mail:lihmmiao@163.com

通信联系人:黄 瑞,男,助理研究员. E-mail:hrss@zju.edu.cn

因此,本研究以某四缸汽油机的两款进气歧管为研究对象,研究方法 A、B 对进气歧管的进气阻力和进气均匀性计算结果的影响。此外,还建立相应的发动机试验台架,通过分析两款进气歧管对发动机的动力性、经济性 & 运行平稳性的试验数据来验证数值计算方法的可靠性。

1 模型建立

1.1 数学模型

发动机进气歧管曲线形状复杂,进气过程为可压、粘性、非定常的三维湍流流动,但它仍然满足质量、动量和能量守恒方程。各方程具体形式如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

式中: ρ —流体密度, t —时间, $\vec{v}$ —流体速度矢量, S_m —质量源项。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

式中: p —流体压力; $\vec{\tau}$ —作用在流体垂直方向上的应力; $\vec{g}$, $\vec{F}$ —重力及体积力。

本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。在 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型中, k 和 ε 是两个基本未知量,与之相对应的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{2\varepsilon} G_b \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - R_\varepsilon + S_\varepsilon \tag{4}$$

式中: G_k —由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b —浮力而产生的湍流动能; Y_M —由于在可压缩湍流中,过渡的扩散产生的波动; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ —常量; α_k , α_ε — k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数; S_k , S_ε —自定义的值。

1.2 数值模型

本研究采用 UG 建立了两款进气歧管的几何模型,并采用 Hypermesh 软件对进气歧管的三维模型进行四面体网格的划分,并在出口和入口处进行网格加密。该发动机两款进气歧管(下文简称 I、II 型)的网格模型如图 1、图 2 所示。经网格无关性研究后,最终划分的 I、II 型进气歧管网格模型的网格数分别为 576 000 个和 803 000 个。进出口边界条件均采用压力边界条件,压力入口条件 $P = 101\,325\text{ Pa}$;压力出口条件 $P = 998\,25\text{ Pa}$,壁面温度为固定温度 293 K 。

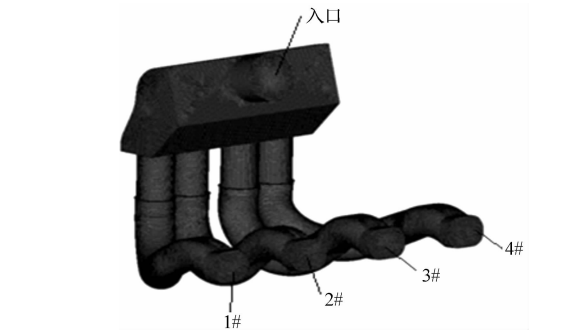


图 1 I 型进气歧管的网格模型

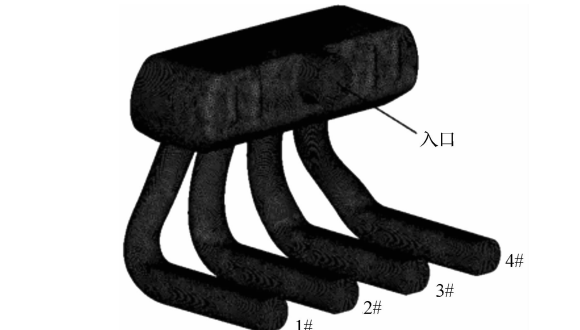


图 2 II 型进气歧管的网格模型

2 计算结果及分析

2.1 进气阻力分析

本研究采用方法 A、B 计算获得的 I、II 型歧管 XOZ 平面速度矢量迹线图如图 3、图 4 所示。比较图 3 和图 4,II 型歧管各支管的流速都较 I 型歧管大,也都未出现明显的回流现象。

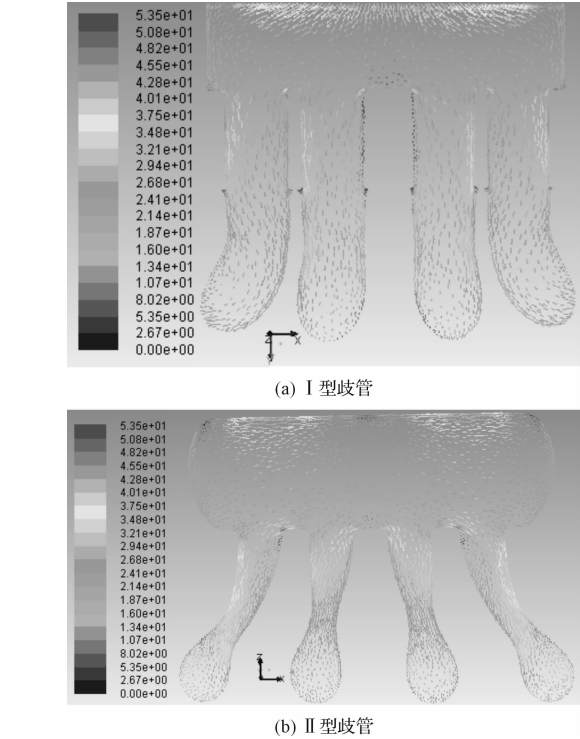


图 3 采用方法 A 的 XOZ 平面速度矢量图

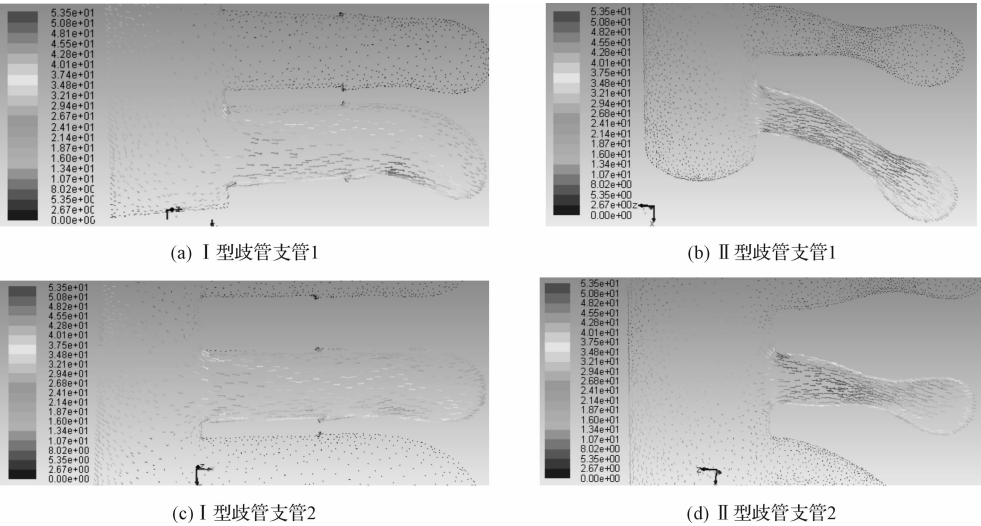


图 4 采用方法 B 的 XOZ 平面速度矢量图

本研究采用方法 A、B 计算获的 I、II 型歧管 XOZ 平面压力云图如图 5、图 6 所示。如图 5 所示, II 型歧管的支管 2、3 在 XOZ 平面的末端平均压力较 I 型歧管大 150 Pa, 支管 1、4 则只大于 I 型歧管 50 Pa; 而如图 6 所示, II 型歧管 4 支管都较 I 型大 170 Pa 左右。

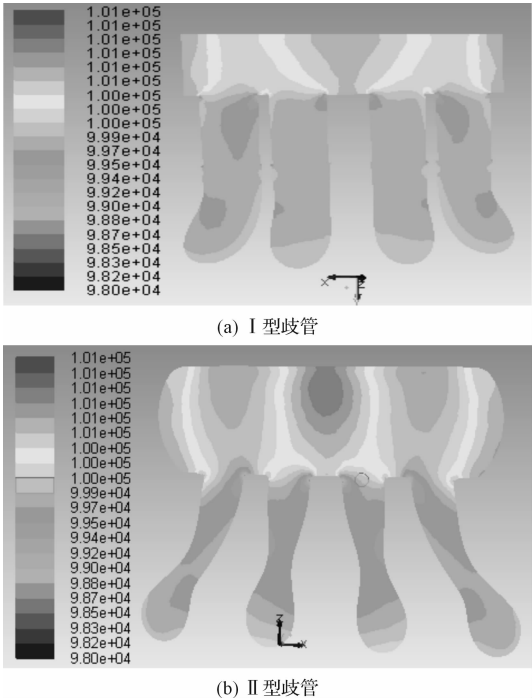


图 5 采用方法 A 的 XOZ 平面压力云图

采用 2 种数值计算方法获得的两型歧管总各个分支管出口的总压损失如表 1、表 2 所示。由表中数据可知, II 型歧管各支管的总压损失都较 I 型少。其中, 方法 B 获得的两型歧管各支管总压损失变化较均匀, 而方法 A 则中间支管 2、3 压损变化较大, 支管 1、4 压损变化较小。可见, 方法 A 获得的两型歧管进气阻力变化和方法 B 获得的趋势一致, 即 II 型歧管进气阻力

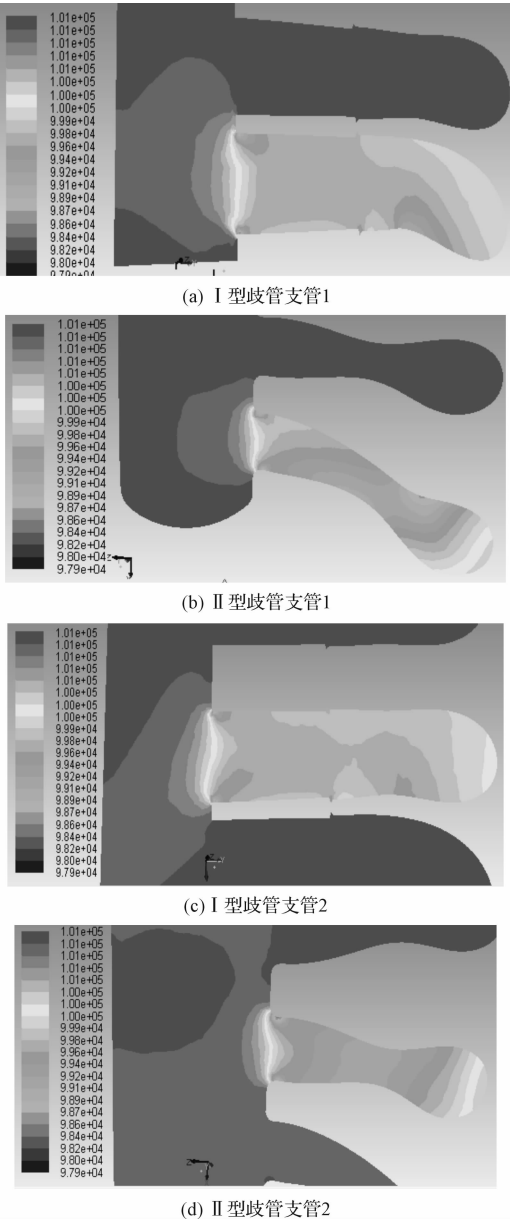


图 6 采用方法 B 的 XOZ 平面压力云图

相较于 I 型歧管更小,但采用方法 B 获得的各支管进气阻力变化较均匀。

表 1 采用方法 A 的两型歧管总压损失

	出口一	出口二	出口三	出口四
I 型总压损失/Pa	1 329	1 334	1 331	1 331
II 型总压损失/Pa	1 267	1 159	1 170	1 257

表 2 采用方法 B 的两型歧管总压损失

	出口一	出口二	出口三	出口四
I 型总压损失/Pa	1 066	1 091	1 095	1 075
II 型总压损失/Pa	858	823	828	846

2.2 进气均匀性计算结果比较

发动机进气的最大不均匀度为 $\sigma_{\max}$:

$$\sigma_{\max} = (Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_m \tag{5}$$

式中: $Q_{\max}$ —分支管最大出口质量流量,kg/s; $Q_{\min}$ —分支管最小出口质量流量,kg/s; Q_m —平均质量流量,kg/s。

I、II 型歧管采用方法 A、B 获得的各个分支管出口的质量流量如表 3、表 4 所示。由表 3 可得,I 型歧管各支管的最大的不均匀度 $\sigma_{\max}$ 为 2.44%,而 II 型歧管中间两根支管的气流流量与两端支管相差很大,各支管的最大不均匀度 $\sigma_{\max}$ 达到了 28.68%,说明 II 型歧管的进气均匀性很差,将会导致燃烧恶化、各缸工作不均匀等后果,从而出现游车及转速波动数值较大等现象。

从表 4 可知,I 型歧管各支管的最大的不均匀度 $\sigma_{\max}$ 为 1.71%、II 型歧管中各支管的最大不均匀度 $\sigma_{\max}$ 仅为 1.23%。由此可知,不同数值计算方法的进气均匀性计算结果有很大的差异且两型歧管采用方法 B 得到的均匀度结果都不同程度的好于采用方法 A 计算获得的。

表 3 采用方法 A 的两型歧管气流流量

	出口一	出口二	出口三	出口四
I 型气流流量/(g·s ⁻¹)	22.097	22.205	22.319	21.779
I 型平均流量/(g·s ⁻¹)	22.1	22.1	22.1	22.1
II 型气流流量/(g·s ⁻¹)	23.332	31.178	30.744	24.158
II 型平均流量/(g·s ⁻¹)	27.353	27.353	27.353	27.353

表 4 采用方法 B 的两型歧管气流流量

	出口一	出口二	出口三	出口四
I 型气流流量/(g·s ⁻¹)	34.678	34.706	34.436	33.848
I 型平均流量/(g·s ⁻¹)	34.417	34.417	34.417	34.417
II 型气流流量/(g·s ⁻¹)	43.903	44.260	44.448	43.972
II 型平均流量/(g·s ⁻¹)	44.146	44.146	44.146	44.146

3 发动机性能试验

3.1 试验设备

台架试验系统结构如图 7 所示,II 型歧管试验测试台架如图 8 所示。

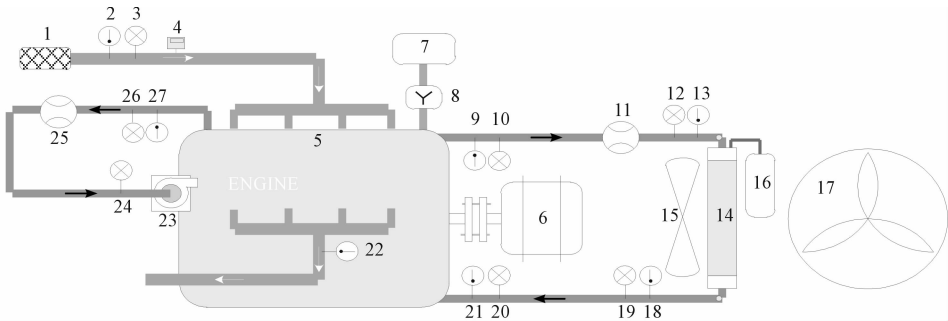


图 7 台架试验系统结构示意图

1—空气滤清器;2,9,13,18,21,22,27—温度传感器;3,10,12,19,20,24,26—压力传感器;4—空气质量流量计;5—发动机;6—测功器;7—燃油箱;8—油耗仪;11,25—冷却液体积流量计;14—冷却水箱;15—电子风扇;16—膨胀水箱;17—变频调速风机;23—原机水泵



图 8 II 型歧管试验测试台架

3.2 试验结果及分析

本研究通过对两款进气歧管进行台架试验,测试两款歧管的运行平稳性并获得两款进气歧管外特性下的扭矩、油耗数据。

I、II 型进气歧管动力性(功率)对比图如图 9 所示。试验结果表明,在 1 800 r/min ~ 3 600 r/min 区间内,II 型歧管功率平均提升 4.21%。I、II 型进气歧管经济性(油耗率)对比图如图 10 所示。从图中可以得到,在 1 800 r/min ~ 3 600 r/min 区间内,II 型进气歧管

相较 I 型,油耗平均下降 2.99%;除转速在 1 800 r/min 左右外,II 型歧管其他转速下的外特性油耗均有下降。表明 II 型歧管相较于 I 型对发动机性能有较大的提

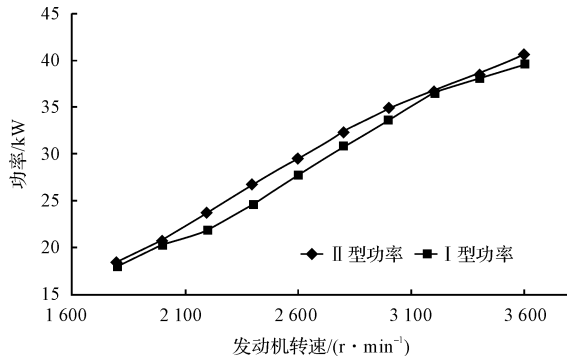


图 9 I、II 型进气歧管动力性 (功率) 对比图

I、II 型进气歧管在转速 2 000 r/s 下 30 s 内的速度波动对比图如图 11 所示。研究结果表明,发动机工作时转速波动幅值都只接近 6 r/s,没有出现由于进气不均匀导致的转速波动数值较大现象,说明两型歧管的进气均匀性都较好。由于发动机实际工作过程中是按进气行程、压缩行程、作功行程和排气行程的顺序不断循环反复的,在同一时刻中只有一缸是处于进气行程。因此,采用方法 B 得到的进气均匀性结果更加符合实际。

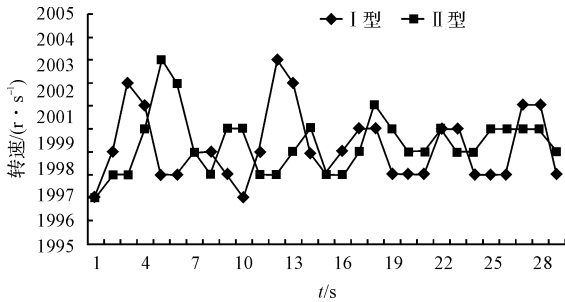


图 11 I、II 型进气歧管速度波动对比图

4 结束语

(1) 本研究采用“四口全通”和“三闭一通”这两种数值计算方法获得的进气阻力变化趋势一致且与发动机经济性、动力性试验结果吻合。因此,两者均适用进气歧管流场特性分析。

(2) 不同数值计算方法的进气均匀性计算结果有很大的差异且采用“三闭一通”数值计算方法获得的均匀度不同程度的好于“四口全通”计算结果。

(3) 发动机运行平稳性试验结果表明,“三闭一通”

高。由此可见,采用方法 A、B 这两种数值计算方法分析获得的进气阻力变化趋势与实验结果一致。因此,两者均适用于进气歧管流场特性的分析。

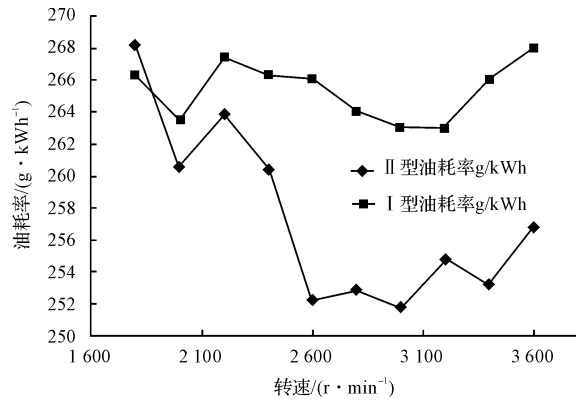


图 10 I、II 型进气歧管经济性 (油耗率) 对比图

数值计算方法更加适用进气歧管进气均匀性分析。

参考文献 (References):

- [1] BRENNAN S L, KEE R J, KENNY R G, et al. A Theoretical and Experimental Study of Resonance in a High Performance Engine Intake System: Part2 [N]. SAE Paper, 2007-01-1399.
- [2] HAMILTON L J, ROZICH J, COWART J. The Effects of Intake Geometry on SI Engine Performance [N]. SAE Paper, 2009-01-0302.
- [3] 胡景彦, 苏圣洪. 某缸内直喷发动机进气歧管 CFD 模拟分析 [J]. 液压气动与密封, 2009(9): 25-28.
- [4] 张强, 李娜. 沼气发动机进气均匀性数值分析 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 145-149.
- [5] 王哈, 蔡忆昔, 毛笑平. 发动机进气系统不均匀性的三维数值模拟 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, 36(3): 41-44.
- [6] 韩同群, 马祥宁. 应用 CFD/CAD 技术对柴油机进气歧管进行优化设计 [J]. 内燃机, 2007(1): 13-16.
- [7] 许元默, 帅金石, 王建昕. 电喷汽油机进气歧管的 CAD/CFD 设计 [J]. 汽车工程, 2002, 24(4): 314-321.
- [8] 张继春, 李兴虎, 杨建国, 等. 壁面函数对进气歧管 CFD 计算结果的影响 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 47-50.
- [9] 江国华, 温苗苗. EQD180N-20 型发动机进气不均匀性分析 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(6): 1008-1011.
- [10] 黄泽好, 杨超, 黄一桃, 等. 发动机进气歧管流场的数值分析 [J]. 机械设计与制造, 2012(2): 156-158.

[编辑: 张翔]

本文引用格式:

黎宏苗, 刘震涛, 孙正, 等. 汽油机进气歧管数值计算方法研究 [J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1340-1334.

LI Hong-miao, LIU Zhen-tao, SUN Zheng, et al. Numerical computed methods for intake manifolds in gasoline engine [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11): 1340-1334.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>