

低压空气辅助缸内直喷汽油机进气道设计*

胡春明¹ 武 珊¹ 詹樟松² 于 勇¹ 吕 永¹ 张 巍¹

(1. 天津大学内燃机研究所, 天津 300072; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400020)

【摘要】以 2.0 L 四气门进气道喷射汽油机为样机,设计低压空气辅助缸内直喷汽油机,运用 CFD 仿真技术与气道稳流试验相结合对其进气道进行设计。建立了原进气道喷射汽油机进气道的三维仿真模型并进行计算和分析,表明气道流通能力不够强,有强滚流运动;气道内部三维流场分析结果说明部分区域存在气体滞留现象,通过气道稳流试验台对仿真结果进行了验证。根据低压空气辅助直喷汽油机对缸内气流运动特性的要求,在 CFD 仿真软件中对进气道结构进行了优化,通过调整气门杆附近的截面积、削弱滚流强度,提高了进气道的流通能力,同时改善了局部气流滞留现象。

关键词: 汽油机 缸内直接喷射技术 进气道 设计

中图分类号: TK411.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0015-04

Intake Port Design for Low-pressure Air-assisted In-cylinder Direct Injection Gasoline Engine

Hu Chunming¹ Wu Shan¹ Zhan Zhangsong² Yu Yong¹ Lü Yong¹ Zhang Wei¹

(1. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 400020, China)

Abstract

Taking a 2.0 L four-valve port fuel injection gasoline engine as prototype, the low-pressure air-assisted direct injection gasoline engine and its intake ports were developed and optimized by using CFD simulation technology combined with steady flow test method. The 3-D simulation model of the intake port was built with CFD software, and calculation and analysis were carried out then. The calculation values were in a good agreement with the steady flow test results, and the data showed that the intake port provided low intake capacity and high tumble motion. Analysis of 3-D flow field showed that there was gas retention phenomenon in some areas. After structure optimization of the intake port with CFD software according to the requirements of air-flow motion characters inside the cylinder, the tumble motion was weakened by increasing the cross-sectional area nearby the valve stem to improve its intake capacity, which also reduced the gas retention phenomenon.

Key words Gasoline engine, In-cylinder direct injection technology, Intake port, Design

引言

汽油机缸内直接喷射技术 (gasoline direct injection, 简称 GDI) 以其较高的燃油经济性、良好的动力性和其在降低排放方面的优势,被认为是未来内燃机技术发展的主要方向之一^[1]。

以一款 2.0 L 四气门进气道喷射汽油机为样机,开发低压空气辅助缸内直喷汽油机。进气道喷射汽油机通常加强滚流以形成良好的混合气;低压空气辅助缸内直喷汽油机采用喷雾导向型燃烧系统,主要利用喷雾形成分层混合气,过强的滚流运动或是涡流运动反而会降低燃油经济性和提高排放

收稿日期: 2011-06-29 修回日期: 2011-08-11

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA11A114)和天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室资助项目

作者简介: 胡春明,研究员,主要从事内燃机电控技术的应用研究,E-mail: cmhu@tju.edu.cn

量^[2]。因此必须对进气道结构进行设计优化,以满足低压直喷对缸内气流运动的要求。

本文结合气道稳流试验台与气道 CFD 仿真计算分析原气道稳流特性,结合实际提出改进方案,并在仿真平台重新进行模拟计算以验证改进方案。

1 进气道设计方法

传统的进气道设计流程采用经验设计加上气道稳流试验,经多次修正、试验的方法进行设计,在设计开发中存在着较大的盲目性与局限性。同时,由于气道形状复杂,在二维图纸上难以精确表达,往往只能直接根据实物模型进行制造,气道精度难以保证。综上所述,传统设计方法不仅设计开发周期长,耗费大,而且较难得到理想的方案^[3]。

近年来,计算流体力学 (computational fluid dynamics,简称 CFD) 已经有了长足发展,开始从定性分析发展到定量计算,从探索研究逐步过渡到实用化阶段。通过对气道内气体流动的数值模拟,可获得气道内压力、流速等参数的空间分布,建立气道的形状结构参数、安装位置、配气系统结构设计参数与气体流动规律的关系,从而为发动机进、排气道的设计与改进提供依据。因此在进气道的设计与改进中,利用现代设计方法,应用以三维造型设计为基础、以气体流动数值模拟为核心的 CAD 系统,已成为发展的趋势^[4]。

建立在 CFD 基础上的多维数值模拟与试验有机结合,正在成为发动机进气道研究的主流方向。

2 进气道的三维数值模拟

2.1 进气道稳流试验

以一款 2.0 L 进气道喷射四缸水冷汽油发动机进气道为原型设计直喷进气道,原发动机技术参数如表 1。

试验平台为自主研发的气道稳流测试系统,能

表 1 发动机技术参数
Tab.1 Engine specifications

参数	数值
发动机排量/L	1.998
缸径/mm	86
活塞行程/mm	86
压缩比	10
最大进气门升程/mm	10
怠速转速/r·min ⁻¹	700~800
气门数/缸	4
进气门座圈内径/mm	33.1

够对缸内任意测试平面内的气流运动强度和矢量方向进行测量,能够较全面、准确地宏观反映缸内气流运动的真实情况^[5]。通过测量进气道出口处的气体流量,采用 AVL 评价方法得到进气道不同升程下的流量系数。试验过程采用等压差法,根据气门座圈直径选取气道压差 Δp 为 3.43 kPa,气门升程分别取 2、4、6、8、10 mm。试验结果如表 2 所示。

表 2 进气道流量试验结果
Tab.2 Experimental results of intake port test

气门升程 /mm	实际流量 /kg·s ⁻¹	理论流量 /kg·s ⁻¹	流量 系数
2	0.028 8	0.159	0.181
4	0.057 2	0.159	0.360
6	0.077 4	0.159	0.487
8	0.092 7	0.159	0.583
10	0.099 1	0.159	0.623

2.2 几何模型及网格划分

为了能准确地获得原型机的进气道 CAD 模型,采用逆向反求的方法。首先往原型机进气道内灌注液态硅胶,待硅胶凝固成型后取出,对硅胶进行激光扫描,间接得到进气道的点云。然后对点云进行切割、取点生成特征线,进而搭建出气道的空间线框模型,运用 UG 软件丰富的曲面功能得到气道曲面模型。最后将曲面封闭成实体并添加上燃烧室,完成进气道的 CAD 建模,结果如图 1。

考虑到计算的收敛性和气场的稳定性,代替气缸的圆柱体长度为 2.5D (D 为缸径),同时,避免在气道进口处产生湍流,气道入口处加一个 100 mm × 100 mm 的方形稳压箱。应用 FAME 的网格生成技术,在 FIRE 中生成的网格如图 2 所示,对气门附近的网格进行了细化,保证计算结果的可靠性。

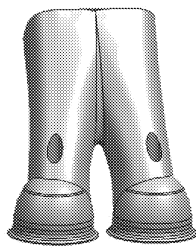


图 1 进气道模型
Fig.1 Intake port model

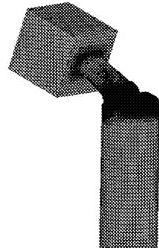


图 2 计算网格
Fig.2 Mesh of intake port

2.3 计算求解器设置

边界条件:进口总压 100 kPa 和固定温度 297 K,出口静压边界条件 96.57 kPa。这样就设定了进出口之间的压差 3.43 kPa,计算过程中压差大小与试验一致。初始条件:在这里设定参考压力和参考温

度分别为 100 kPa 和 297 K。初始模式设为势流模式,使收敛速度更快。湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型,收敛精度设为 0.000 1,设定二维输出结果流量系数、涡流比、滚流比。

2.4 仿真结果

仿真结果与试验值对比如图 3 所示。

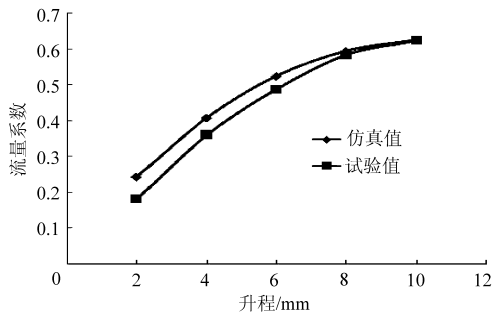


图 3 流量系数的仿真值与试验值对比图

Fig. 3 Comparison of flow coefficients between simulation results and the experiment

由图 3 可以看出,气门升程较大时试验值与仿真值基本接近。造成误差原因主要有:①当气门升程较小时,在气门座处局部流场梯度加大,湍流度增加,使得同样网格数下的仿真误差增大。②流通截面小时,流量很小,流量计读数也较小,不易读准^[6]。以上这些原因导致气门升程较小时仿真值与试验值有较大误差,属正常现象。总的来说,该仿真模型与试验值有较好的匹配,在气门升程较大的时候精度较高,用来评价进气道特性有一定的可信度。

计算涡流比及滚流比如图 4 所示。计算获得的平均涡流数接近于零,在各升程下计算的涡流比都很小,且气流速度出现了正反方向的变化,说明气流转向不稳定,气缸内没有形成大尺度涡流。这是由于双进气道的对称结构导致的,即对称结构使绕气缸轴心沿壁面运动的两股气流相互抵消,气流切向速度的积分值几乎等于零,因此涡流比很小。分析图 4 所示不同升程下的滚流比可知,设计的进气道能够在缸内形成较强的滚流运动。缸内滚流的形成有助于油气混合,并加速燃烧。从缸内滚流的形成来看,原机的气道、气门和燃烧室的设计及匹配是比较合理的。

3 进气道设计优化

3.1 低压空气辅助缸内直喷汽油机对缸内流场的要求

澳必托发动机公司开发的低压空气辅助缸内直喷系统采用低压夹气喷射技术与喷雾导向型燃烧系统相结合,具有碳氢排放低、燃烧效率高、分层燃烧

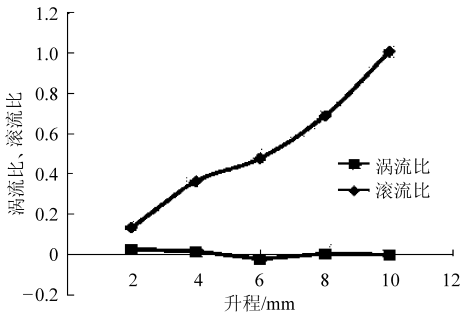


图 4 不同升程下的计算涡流比与滚流比

Fig. 4 Swirl and tumble ratios with lift

工作区域大等特点,使之成为直喷汽油机的重要发展方向之一^[7]。

低压夹气喷射即在经计量后的燃油中掺入一定容积的压缩空气,经喷射器一起直接喷出,形成具有良好雾化效果、低贯穿率、较大锥角的燃油与空气混合喷雾。低压空气辅助缸内直喷采用喷雾导向型燃烧系统,喷雾直接喷向火花塞附近,依靠低贯穿率的喷雾形成分层混合气。因此,要求缸内气体具有较高的流速,不要求缸内的强滚流或是强涡流运动。相反,缸内强滚流存在会对低压空气辅助缸内直喷系统产生不利影响,造成油耗和碳氢排放量的提高。

3.2 进气道设计优化

根据低压空气辅助缸内直喷对缸内气流运动的要求进行进气道设计优化,以提高缸内气体流速,降低滚流运动强度。

以最大气门升程 10 mm 为例分析原进气道喷射发动机的缸内流场。图 5 为进气道流速分布图,最大流速 90.2 m/s,分析可知,进气道内流速随着截面积减小而加大,尤其是在气门杆附近前侧出现剧烈增大,而气门杆后部有一个低速区。这主要是因为气门杆附近的截面减小,角度过于倾斜,导致气门杆前后侧出现极大反差,不利于气体的流通;同时气门杆后侧的凸台设计不合理(圆圈处),此处气体滞留严重,影响气道的流通能力。

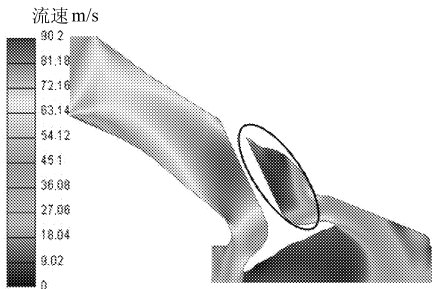


图 5 原气道流速分布图

Fig. 5 Flow velocity distribution of origin model

为了得到低滚流的缸内气流运动,可以增加气门座附近的直径,使更多的气体流向气门后侧^[8]。进气道优化前后结构对比如图 6 所示,改进后的进

气道气门杆附近的截面面积增加,同时,气门角度与燃烧室形状也做了改进。

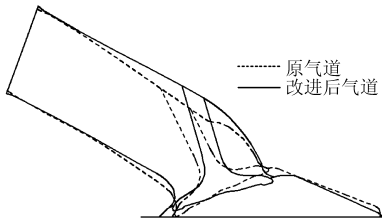


图 6 气道结构优化前后对比图

Fig. 6 Comparison of intake structure between origin model and modified model

3.3 设计优化结果

表 3 所示为 CFD 计算验证优化前后的气门升程 10 mm 下的流量系数与滚流比对比。变化率是指改进值与原值之差与原值之比。

表 3 气道改进前后流量系数和滚流比对比
Tab.3 Comparison of flow coefficients and tumble ratio between origin model and modified model

气道评价参数	流量系数	滚流比
原气道	0. 624	1. 00
改进后气道	0. 67	0. 637
变化率/%	7. 37	- 36. 3

由表 3 可知,相同气门升程下,流量系数提高了 7. 37%,说明进气道流通能力得到一定提高,同时滚流比下降了 36. 3%。图 7 是不同气门升程下改进前后进气道的缸内气流流速分布图,左侧图为改进前,右侧图为改进后。由图可知优化后进气道内气体流速与改进前相比分布更加均匀,气道内的气流流速加快,气道的流通能力得到提高。同时改进前气门杆后侧气体滞留现象得到明显改善。综上所述,改进后的气道能够满足低压空气辅助缸内直喷汽油机对缸内气流运动的要求,而且进气道进气效率提高,气道内流场得到优化。

4 结论

(1)在气门升程较大时,仿真结果与试验结果

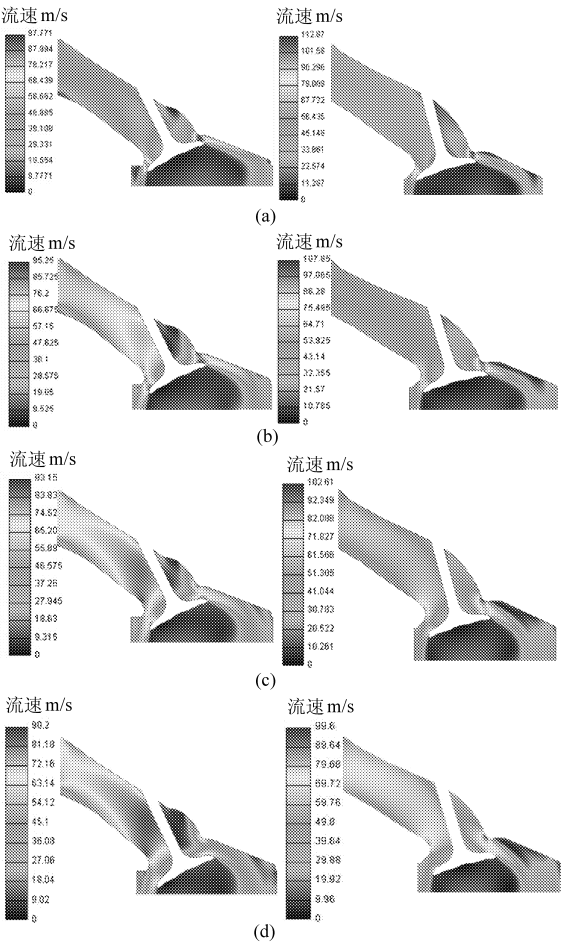


图 7 不同升程下改进前后气道流速分布图

Fig. 7 Flow velocity distribution of origin and modified model under different valve lifts

(a) 气门升程为 4 mm (b) 气门升程为 6 mm
(c) 气门升程为 8 mm (d) 气门升程为 10 mm

具有良好的一致性,以该模型为参照进行进气道优化,优化的结构具有一定的可信度。

(2)低压空气辅助缸内直喷依靠喷雾本身在缸内形成分层混合气,要求高的缸内气体流速以及低的滚流运动。分析原气道流场分布及气道结构,调整气门杆附近的进气道半径,计算表明,滚流强度得到削弱,同时流量系数有小幅提高,局部气流滞留现象也有明显改善,达到预期优化目标。

参 考 文 献

1 Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5):537 ~ 562.
2 Geoffrey Cathcart, Christian Xavier. Fundamental characteristics of an air-assisted direct injection combustion system as applied to 4-stroke automotive gasoline engines [C]. SAE Paper 2000-01-0256, 2000.
3 常思勤,刘雪洪,何小明. 现代设计方法在螺旋进气道设计中的应用[J]. 内燃机学报,1999,17(4):365 ~ 369.
Chang Siqin, Liu Xuehong, He Xiaoming. Application of modern design method for helical intake ports [J]. Transactions of CSICE, 1999, 17(4):365 ~ 369. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 周龙保,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 2 刘巽俊,陈群,李骏,等. 车用柴油机冷却系统的 CFD 分析[J]. 内燃机学报,2003,21(2): 125 ~ 129.
Liu Xunjun, Chen Qun, Li Jun, et al. Automotive diesel engine water jacket CFD analysis [J]. Transactions of CSICE, 2003,21(2): 125 ~ 129. (in Chinese)
- 3 Kruger M, Poulsen Kessler M, Mendes A S, et al. Numerical analysis of flow at water jacket of an internal combustion engine [C]. SAE Paper 2008-01-0393,2008.
- 4 Cavali M G, Subbarao A V, Marathe N V. Optimization of water jacket using CFD for effective cooling of water-cooled diesel engines [C]. SAE Paper 2007-26-049,2007.
- 5 傅松,胡玉平,李新才,等. 柴油机缸盖水腔流动与沸腾传热的流固耦合数值模拟[J]. 农业机械学报,2010,41(4):26 ~ 30.
Fu Song, Hu Yuping, Li Xincal, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation on flow and boiling heat transfer of cooling water-jacket in cylinder head of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):26 ~ 30. (in Chinese)
- 6 申立中,雷基林,颜文胜,等. 单双缸卧式柴油机强制冷却结构:中国,ZL200720104721.2[P]. 2008-04-09.
Shen Lizhong, Lei Jilin, Yan Wensheng, et al. A cooling water jacket structure with forced-cooling system for a horizontal single or double cylinders diesel engine: CN, ZL200720104721.2[P]. 2008-04-09. (in Chinese)
- 7 申立中,雷基林,颜文胜,等. 卧式柴油机冷却进水腔:中国,ZL200820080962.2[P]. 2008-12-31.
Shen Lizhong, Lei Jilin, Yan Wensheng, et al. A cooling water chamber structure of a horizontal diesel engine: CN, ZL200820080962.2 [P]. 2008-12-31. (in Chinese)
- 8 周光炯,严宗毅,许世雄,等. 流体力学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2000.
- 9 傅德薰,马延文. 计算流体力学[M]. 1 版. 北京:高等教育出版社,2002.
- 10 梁晓瑜. 增压中冷柴油机冷却水套内流场的 CFD 分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.
Liang Xiaoyu. A CFD analysis of cooling water jacket in turbocharged inter-cooling diesel engine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 11 陈群. 车用柴油机冷却水套的计算流体力学分析[D]. 长春:吉林大学,2003.
Chen Qun. The computational fluid dynamics analysis of cooling water jacket in automotive diesel engine[D]. Changchun: Jilin University, 2003. (in Chinese)
- 12 Matsutani T, Nakada T, Shinpo Y, et al. Water jacket spacer for improvement of cylinder bore temperature distribution [C]. SAE Paper 2005-01-1156,2005.

(上接第 18 页)

- 4 蒋炎坤. CFD 辅助发动机工程的理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- 5 胡春明,郑振鑫. 汽油机缸内滚流运动的评价研究[J]. 车用发动机,2009(3):15 ~ 19.
Hu Chunming, Zheng Zhenxin. Evaluation of gasoline engine in 2-cylinder tumble motion [J]. Vehicle Engine, 2009(3): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 6 赵长禄,周磊,岳玉嵩,等. 通过进气道优化改进柴油机性能[J]. 内燃机学报,2003,21(4):244 ~ 248.
Zhao Changlu, Zhou Lei, Yue Yusong, et al. Improvement of diesel engine by intake system optimization [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(4):244 ~ 248. (in Chinese)
- 7 杨嘉琳. 车用汽油发动机燃烧系统的开发[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- 8 Yi Jianwen, Steven Wooldridge, Gray Coulson, et al. Development and optimization of the ford 3.5 L V6 ecoboost combustion [C]. SAE Paper 2009-01-1494, 2009.
- 9 王建,刘德新. 四气门汽油机进气道流动特性的稳流试验研究[J]. 内燃机学报,2004,22(2):182 ~ 186.
Wang Jian, Liu Dexin. Study of steady measurements on intake port flow characteristics in a four-valve gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(2):182 ~ 186. (in Chinese)
- 10 刘志恩,蒋炎坤,陈国华,等. CFD 辅助发动机进气道设计方法研究[J]. 内燃机工程,2006,27(6):6 ~ 10.
Liu Zhien, Jiang Yankun, Chen Guohua, et al. Research based on CFD for gasoline engine intake port design [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(6): 6 ~ 10. (in Chinese)
- 11 刘书亮,冯洪庆,王天友. 四气门火花点火发动机气缸内的滚流运动[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(2):11 ~ 18.
Liu Shuliang, Feng Hongqing, Wang Tianyou. Tumble motion in the cylinder of the 4-valve spark ignition engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004, 10(2):11 ~ 18. (in Chinese)