

柴油机螺旋进气道三维数值模拟

3D Simulation for Helical Intake Port of Diesel Engine

罗马吉, 李忠照, 文醉

Luo Maji, Li Zhongzhao, Wen Zui

(武汉理工大学汽车工程学院)

(School of Automobile Engineering, Wuhan University of Technology)

摘要: 运用 CFD 软件 STAR-CD 对某柴油机螺旋进气道进行了三维数值模拟; 模拟计算的涡流比及流量系数与实验结果具有较好的一致性。通过模拟计算可以比较准确地得到直观的进气道和缸内流场。

关键词: 柴油机; CFD; 螺旋进气道; Star-CD

Abstract: The three-dimensional flow field in a diesel engine helical intake port was numerically simulated using STAR-CD, and the 3D flow field was obtained. The swirl ratio and flow coefficient obtained from the simulation is agreed well with the tested results from the steady flow test rig. The flow fields in the intake port and cylinder can be obtained accurately by simulation with Star-CD.

Key words: diesel engine; CFD; helical intake port; Star-CD

1 引言

螺旋进气道通常是由不规则曲面构成, 形状非常复杂, 是进气道设计的难点。传统的螺旋进气道设计采用经验设计和反复试验相结合, 气道形状须经多次修正。利用 CFD 方法分析进气道内气体流动, 可以为柴油机螺旋进气道改进设计提供依据。本文针对某非道路用柴油机的螺旋进气道进行了稳流试验和 CFD 数值模拟计算, 得到了气道的相关参数和气道内部的流场分布情况。

2 稳流试验

进气道性能试验通常在稳流试验装置上进行。进气道稳流试验装置如图1所示。气道稳流试验在常规情况下多采用气道定压差的方法。试验中, 选用直径为100mm的气缸套。叶片安放在距缸盖底面1.75倍缸径处。试验数据由计算机来采集。

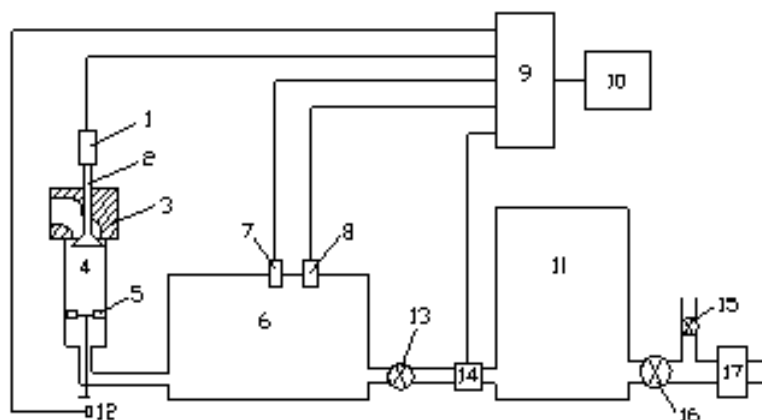


图1 进气道稳流试验装置示意图

1. 气门升程传感器 2. 气门 3. 气缸盖 4. 模拟气缸 5. 叶片 6. 稳压箱
7. 压力传感器 8. 温度传感器 9. 数据采集系统 10. 计算机 11. 稳压箱
12. 转速传感器 13. 流量计阀门 14. 流量计 15. 旁通阀 16. 流量调节阀 17. 泵

3 CFD三维数值模拟

3.1 几何模型的建立和网格划分

首先采用激光测量仪扫描获得气道点云，通过 UG 软件得到螺旋进气道的几何模型，并根据相关零件设计尺寸，运用 UG 建立气门、气门导管和气门座的几何模型。然后根据实际的装配关系，建立进气道-气门-气缸的整体三维几何模型（图 2）。模拟气缸的长度与试验台上模拟气缸的长度取值相同，采用了 AVL 推荐值，为原气缸直径的 2.5 倍。

网格划分的质量对流动数值仿真有决定性的影响，它不仅影响计算的时间和收敛的速度，而且还影响计算精度。STAR-CD 的 pro-am 模块可以生成以六面体为主的非结构化网格。模拟计算最终网格数约为 30 万。图 3 给出的是最大升程（11.64mm）下的网格。



图 2 计算域几何模型

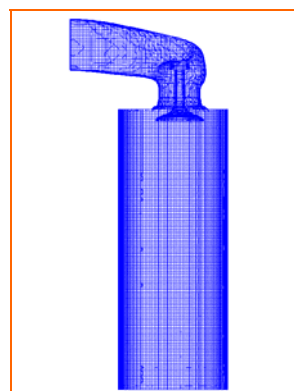


图 3 计算网格

3.2 边界条件

固定壁面边界绝热无滑移，固定壁温为 301K；采用湍流壁面函数对边界层进行处理。进出口边界采用稳流试验条件，给定压差 3500Pa（进口为大气环境压力，出口为气道出口压力）。

3.3 数学模型和数值求解

气体流经气道和气缸的过程应属于粘性流体的管内稳定流动过程。因此描述其流动状态的方程为时均化的 N-S 方程、连续方程和状态方程，湍流模型选用 RNG k- ϵ 模型。采用 SIMPLE 算法，残差设为 $5e-5$ 。在硬件条件为 Intel 1.86GHz CPU、2G 内存的计算机上进行计算，在各个升程迭代大约 1000 次收敛，用时大约 3 个小时。

3.4 计算结果分析

图 4 为气道压力分布图。从图中可以得出以下结论：（1）随着气门升程的逐渐增加，进气道内的平均压力逐渐变小。这主要是因为随着气门升程的变大，喉口位置进气流通截面积变大，进气越来越容易，进气量也越来越大，气体得以快速地进入气缸内，减少了气体之间的相互作用力，减少了气体的能量损失，气体的平均进气速度逐渐增大。反过来，平均进气速度随着升程的变大而增大，进气的平均动能也随着升程的变大而变大，而进气平均动能是由压力产生的势能转化而来的，那么随着气门升程的变大，外界环境和进气道内的压差应该越来越大，即进气道内的平均压力逐渐变小。（2）气门喉口位置随着气门升程的逐渐增加，平均压力逐渐变大。这就导致了气门喉口附近的压差随着气门升程的变大而变小，从而使气门喉口位置的平均进气速度随着气门升程的变大而变小。

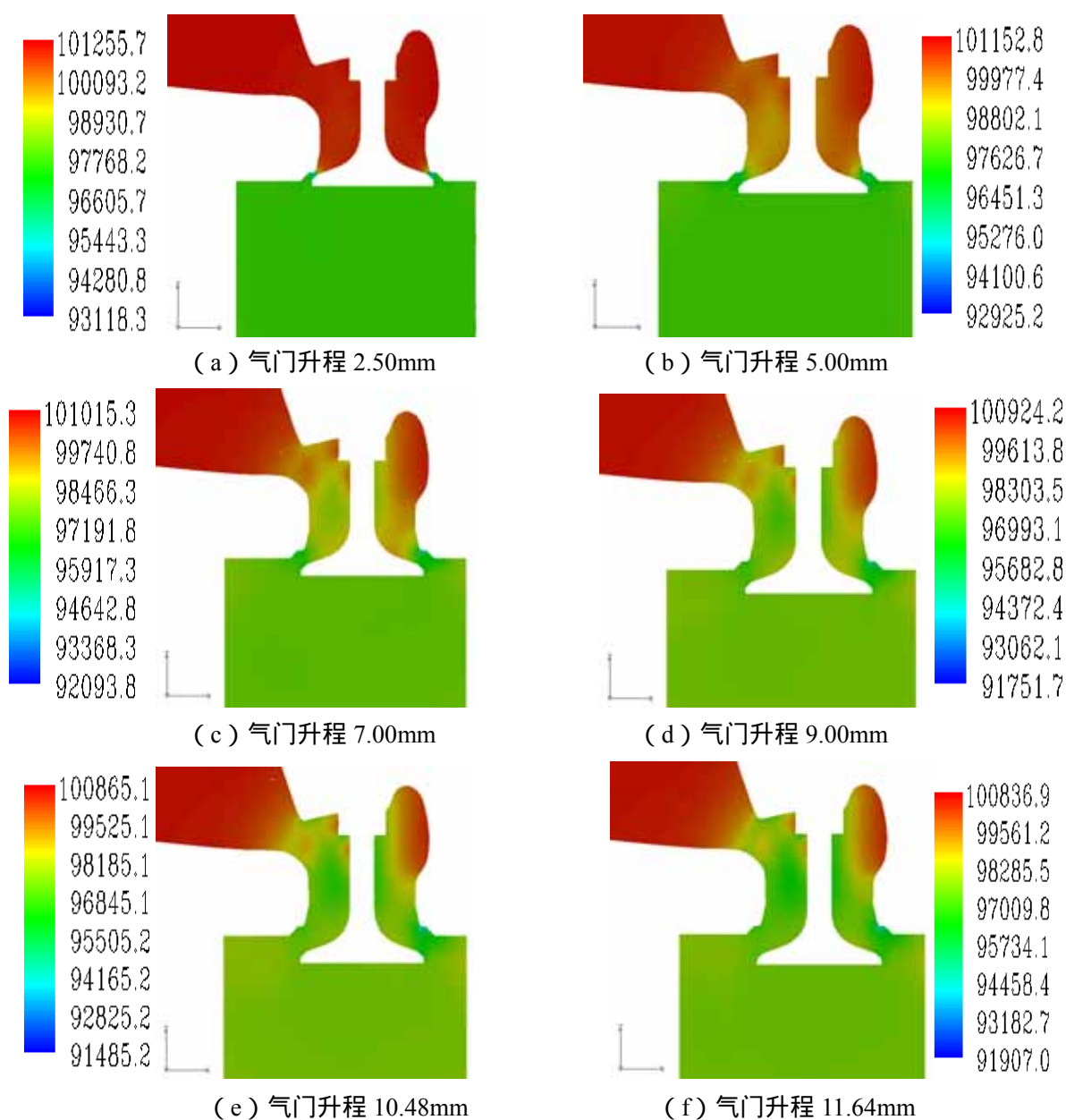


图 4 气道压力分布图

图 5 为气门升程 11.64mm 时气缸内流场。对不同升程下缸内不同截面的流场分析表明，在气体进入气缸后，形成两个较大的明显的涡漩及一些小的涡漩。这些涡漩在流动中逐步融合，形成单一的涡流。在进出口压差一定的情况下，融合过程与气门升程有关，气门升程越大形成单一涡流的位置离气缸盖底面距离越近；反之，距离越远。例如，气门升程为 7.00mm 时，在大约 1.5 倍的缸径处形成单一涡流，而在最大气门升程时，单一涡流在约 1 倍的缸径处形成。

图 6 为气道-气缸迹线分布。从图中可看出，气流进入螺旋气道后，可分为两部分：绝大部分气流沿螺旋段旋转后，沿着锥形气阀背流入气缸；部分气流未经螺旋段，直接进入气缸。两股气流在螺旋进气道中交汇，形成一个涡旋。图 7 为最大升程下的流场截面图（ Z 为气缸中心轴向坐标，缸盖底面以上为正，以下为负）。在这个交汇区域，动量变化剧烈，能量损失较大，是充气量减小的重要原因。螺旋进气道中的涡旋区域较大，有进一步优化的潜力。

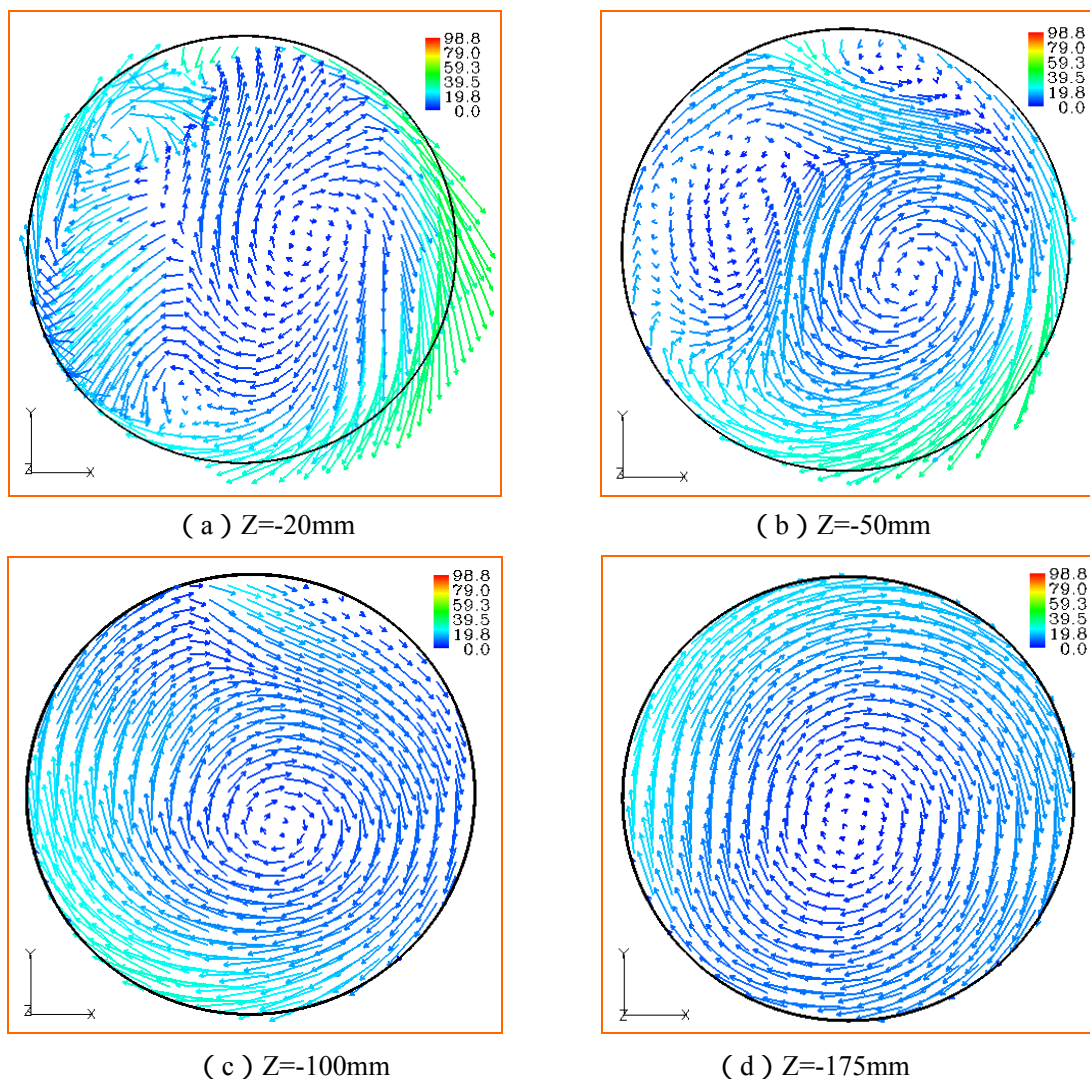


图 5 缸内流场 (单位 m/s)

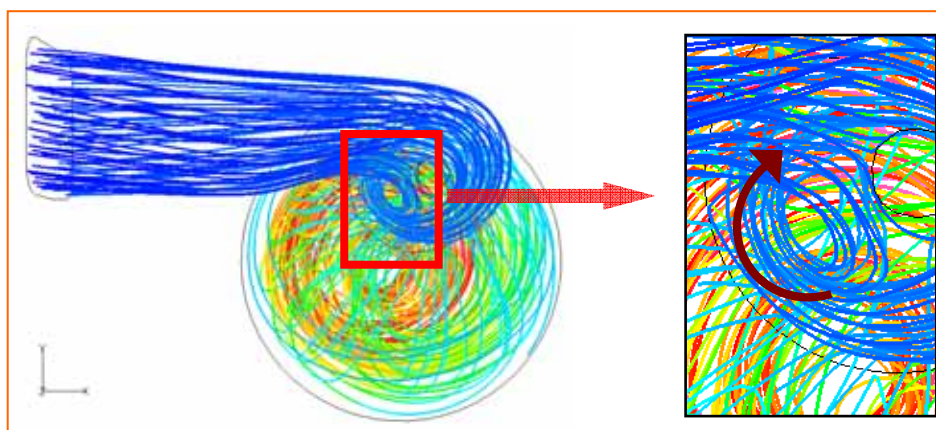


图 6 迹线图

图 8 为流道沿程不同截面总压分布。从图中可以看出，在气道入口部分和气缸内，气体的总压分布变化很小。在气道的螺旋区域，特别是在交汇区域气体总压显著下降。可见，能量损失主要集中在这些区域，这与前文流场分析结论是一致的。

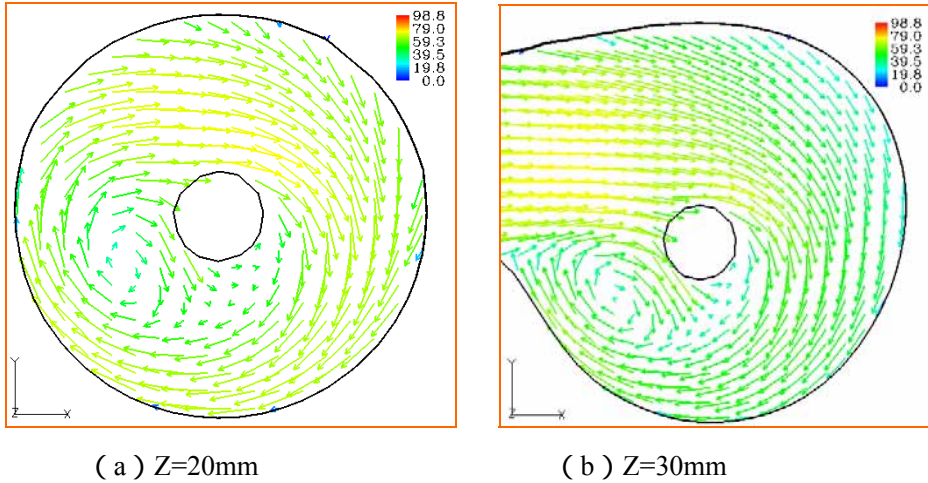


图 7 交汇区域流场 (单位 m/s)

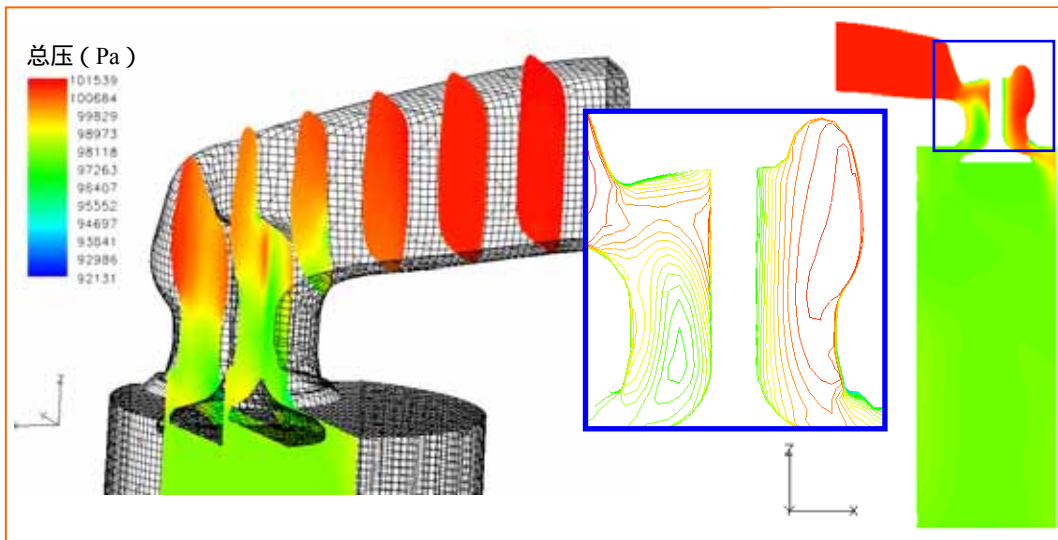


图 8 不同截面总压分布

3.5 计算结果与试验结果对比

为了与试验结果对比,各升程下的模拟计算的流量系数和涡流比均按照AVL方法求取。具体数值见表1。图9为流量系数与涡流比曲线。

表 1 流量系数、流量系数试验值与计算值

气门升程 (mm)		2.50	5.00	7.00	9.00	10.48	11.64
流量系数	试验值	0.2236	0.3844	0.4943	0.5667	0.5947	0.6103
	计算值	0.2253	0.3822	0.4942	0.5670	0.6062	0.6277
	偏差	0.76%	-0.57%	-0.02%	0.05%	1.93%	2.85%
涡流比	试验值	0	0.6686	1.0512	1.386	1.4883	1.5296
	计算值	0	0.6935	1.0315	1.4135	1.5188	1.5540
	偏差	0	3.72%	-1.87%	1.98%	2.05%	1.60%

从图表可以看出,评价参数的计算值与试验值的趋势吻合良好,且误差均在 5%以内,达到了预期的目的。

误差产生的原因有如下几点:

(1) 计算模型的偏差。由于气道的三维模型是通过气道芯盒反求获得的,因此,在由点云生成

实体的过程中,为了保证生成的模型与实际模型有一定偏差。另外,为了提高计算速度,减少计算网格,计算模型没有设置稳压腔,对计算结果会有一定影响。

(2) 计算结果处理的偏差。求取计算结果时,计算动量矩和转动惯量的区域与实际叶片的区域有一定差异。

(3) 计算中假设条件带来的误差。如缸体绝热等。

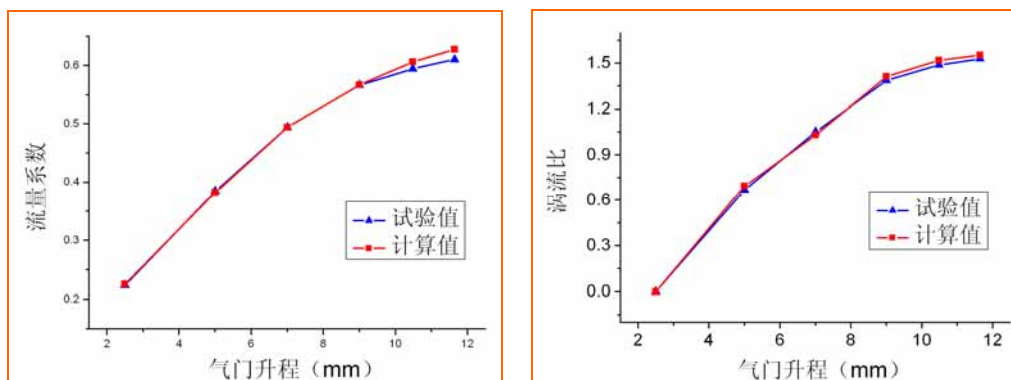


图 9 流量系数与涡流比曲线

5 结论

(1) 通过气道稳流试验的验证,得到 CFD 三维数值模拟的结果与试验值吻合良好的结论,通过流场分析全面评价螺旋进气道性能是可行的。

(2) 气道 CFD 计算能得到在气道稳流试验台上无法得到的大量三维流场的详尽信息,为发动机设计提供理论依据。在进气道的设计和改进阶段,通过模拟计算准确找出气道不合理的部位,进行优化改进,从而避免传统设计中的盲目性与局限性。

6 参考文献:

- [1] 王 志,黄荣华.4BTAA 柴油机螺旋进气道三维数值模拟[J]. 燃烧科学与技术. 2004, 10 (2):176-180.
- [2] 夏兴兰,杨 雄,朱忠伟,董尧清.数值模拟方法在柴油机进气道改进中的应用[J]. 内燃机学报. 2002, 20 (5):424-428.
- [3] 付经伦,李向荣,杜 巍.切向/螺旋进气道稳流实验与数值仿真[J]. 北京理工大学学报. 2005, 25 (12):1039-1042.