

火花塞网格对缸内流动的影响研究

Research on Spark Plug Mesh Effect on Flow in Cylinder

杨洋, 丁宁, 李世伟, 张小矛, 陈明

(上海汽车集团股份有限公司乘用车 技术中心, 上海 201804)

摘 要: 为了深入研究火花塞网格对直喷发动机缸内流动的影响, 利用 STAR-CD 软件数值模拟了 1500r/min 全负荷工况。通过对火花塞处进行不同的网格处理, 对比分析了三种处理方法下缸内流动的滚流比、涡流比、湍动能和进气量。结果表明: 省略火花塞网格条件下的缸内流动与有火花塞网格条件下的缸内流动相比, 滚流比和湍动能较大, 涡流比较小, 进气量则基本一致; 而采用不同火花塞网格类型计算结果的几个对比值几乎没有差异。

关键词: 直喷汽油机、火花塞网格、缸内流动、湍动能

Abstract: In order to research on the spark plug mesh effect on flow in cylinder, STAR-CD code was used in the work condition of full load 1500 r/min. The tumble ratio, swirl ratio, TKE and intake air mass were comparatively analyzed under the condition of different mesh around the spark plug. The results show that the tumble ratio and TKE was higher, the swirl ratio was lower and the intake air mass was almost same under the condition of cylinder without spark plug mesh. The calculation result almost had no difference under the condition of different mesh type for spark plug.

Key words: GDI Engine, Spark Plug Mesh, Flow in Cylinder, TKE

1 前言

随着近年来计算机的快速发展, 应用 CFD 数值模拟方法对发动机的工作过程和缸内气流运动进行仿真模拟, 可以得到缸内的压力场、速度场和温度场等很多有用的数据, 使研究者清晰地了解缸内气流的变化过程, 为设计提供理论依据^[1,2]。在数值模拟过程中, 网格的种类和划分方法将直接影响到计算过程中的动量、能量等的数据传递。有资料表明, 在计算机数值模拟过程中, 网格的划分方法对于计算结果影响十分显著^[3]。

在缸内三维瞬态模拟方面, STAR-CD 软件的 Mapping 网格以其质量高的优点被用户广泛采用。但是由于火花塞处的特征比较小, 这对于应用 Mapping 方法在该处的处理来讲, 一直是个技术难点。本文采用 STAR-CD 的 ES-ICE 模块和 STAR-CCM+软件相结合的方式对缸内网格进行处理, 并且开展缸内流动过程的三维瞬态数值模拟。主要探究了火花塞处不同的网格处理方式对缸内气流运动的影响, 并对缸内的流动状况、滚流比、涡流比、进气质量和湍动能等结果进行了对比分析^[4,5]。

2 计算模型

本文模拟计算所采用的发动机原型为某公司研发的直列四缸 GDI 增压发动机，表 1 为其基本参数。对于瞬态的多维数值模拟，本文采用的 ES-ICE 模块生成的计算网格如下图 1 所示。其中，(a)模型忽略了火花塞和喷油器；(b)模型将火花塞和喷油器处生成多面体网格(Polyhedral Mesh)，再与气缸进行 Couple；(c)模型将火花塞和喷油器处生成切割体网格(Trimming Mesh)，再与气缸进行 Couple；并且所有模型的气缸顶和活塞顶都拉伸了边界层，边界层厚度为 0.2mm。

表 1 发动机的基本参数

型式	直喷、增压	缸径/mm	88
活塞行程/mm	74	连杆长度/mm	155.5
压缩比	10	总排量/L	1.8
进气门最大升程/mm	9	排气门最大升程/mm	9

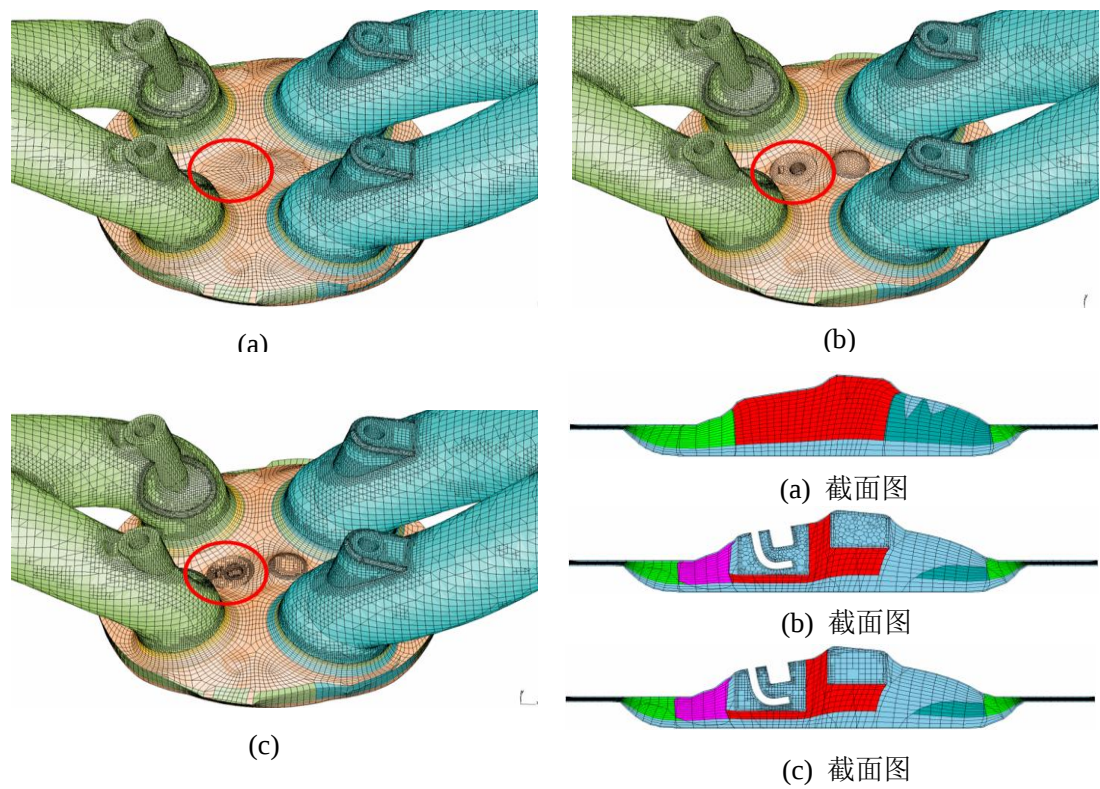


图 1 三维网格模型（TDC）

3 边界条件

计算的初始条件如表 2 所示；发动机进、排气的瞬态边界条件如图 2 所示。其中，进、排气瞬态的边界条件来自于一维软件的计算结果；而进气道、排气道和气缸的初始温度、压力则来自于发动机的台架试验结果。

表 2 计算的初始条件

	缸盖	缸壁	活塞	进气道	排气道	气缸
温度/K	500	430	560	323	720	720
压力/kPa	—	—	—	159	118	118

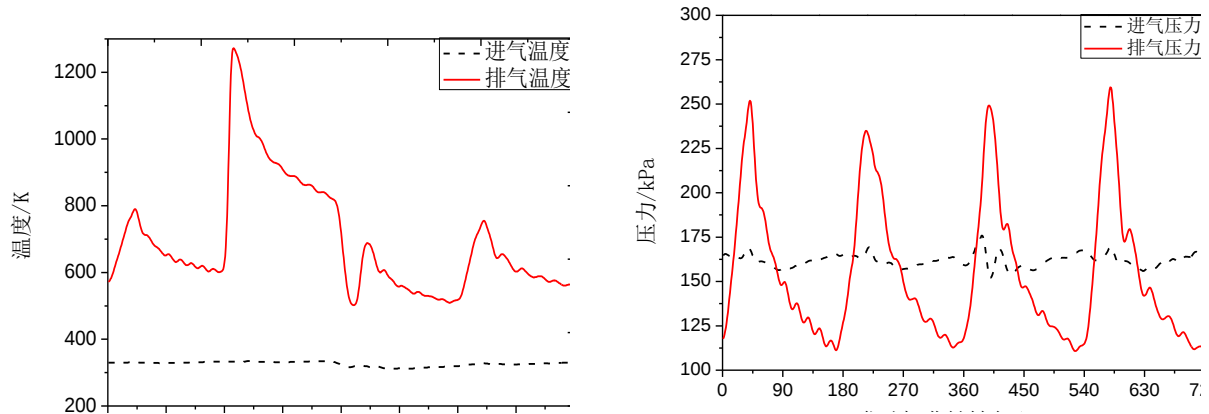


图 2 进、排气瞬态边界条件

4 结果与分析

为了更好的描述缸内的流动，选取了两个重要的特征截面，如图 3 所示。其中，A-A 截面代表过进气道中心的截面；B-B 截面为过喷油嘴和火花塞中心的截面。由于气缸模型采用的是对称结构，以上两个典型截面基本上可以反映缸内整体的流动情况。

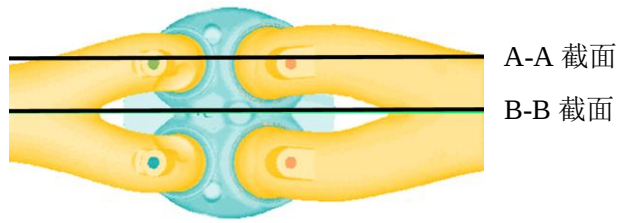


图 3 气缸分析截面示意图

4.1 缸内的涡流比、滚流比分析

图 4 为三种火花塞网格条件下的涡流比对比图。由图可知，无火花塞条件下的涡流比整体小于有火花塞条件下的涡流比，且涡流的方向相反；而火花塞处不同网格类型条件下，两者的涡流比值也基本相等，这说明火花塞处两种不同的网格类型对其涡流比的变化也几乎没有影响。

图 5 为三种火花塞网格条件下的滚流比对比图。由图可知，无火花塞条件下的滚流比整体大于有火花塞条件下的滚流比；而火花塞处不同网格类型条件下，两者的滚流比值基本相等，这说明火花塞处两种不同的网格类型对其滚流比的变化几乎没有影响。其中，当曲轴转角为 465°CA 时，三者的滚流比同时达到峰值，最大值与最小值之间的差异为 0.73，降幅达 42.7%；当曲轴转角为 540°CA （下止点）时，最大值与最小值之间的差异为 0.43，降幅为 43.9%。这主要是由于在进气过程中，火

花塞的凸起阻挡了部分气体的滚流运动,使得气体运动到此处时,流动方向发生了变化。到火花塞后部时,滚流运动明显减弱,而涡流却略有加强,这一点可以在图 6 中证实。

图 6 为三种火花塞网格条件下的缸内流速对比图。如图所示,火花塞的有无两种状态下的缸内流动有明显的不同,当曲轴转角为 465°CA 时,由于火花塞的阻挡,A-A 截面上的滚流漩涡中心更接近进气门侧,而无火花塞时的滚流漩涡中心则更接近排气门侧;B-B 截面中火花塞后部的速度明显减弱,而无火花塞时此区域的速度则更均匀。当曲轴转角为 540°CA 时,A-A 截面中火花塞的阻挡影响了滚流漩涡的扩大,无火花塞时的漩涡区域明显较大;B-B 截面中,与有火花塞时不同的是,无火花塞时截面左下角仍持续了一股高速气流。

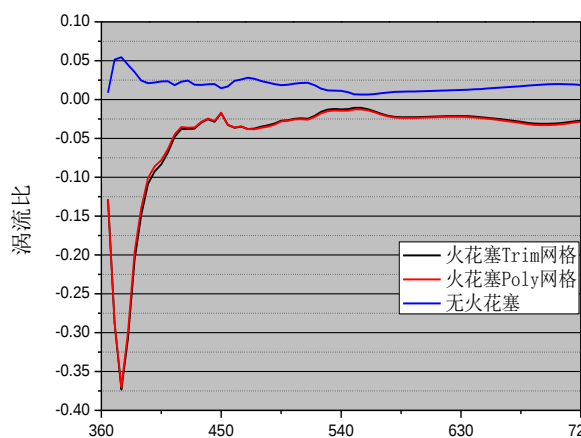


图 4 三种火花塞网格条件下的涡流比

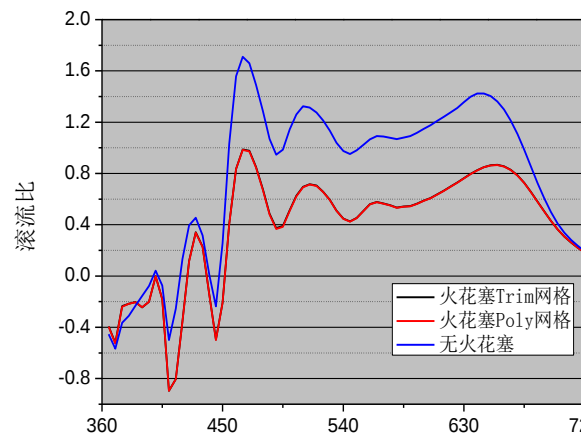
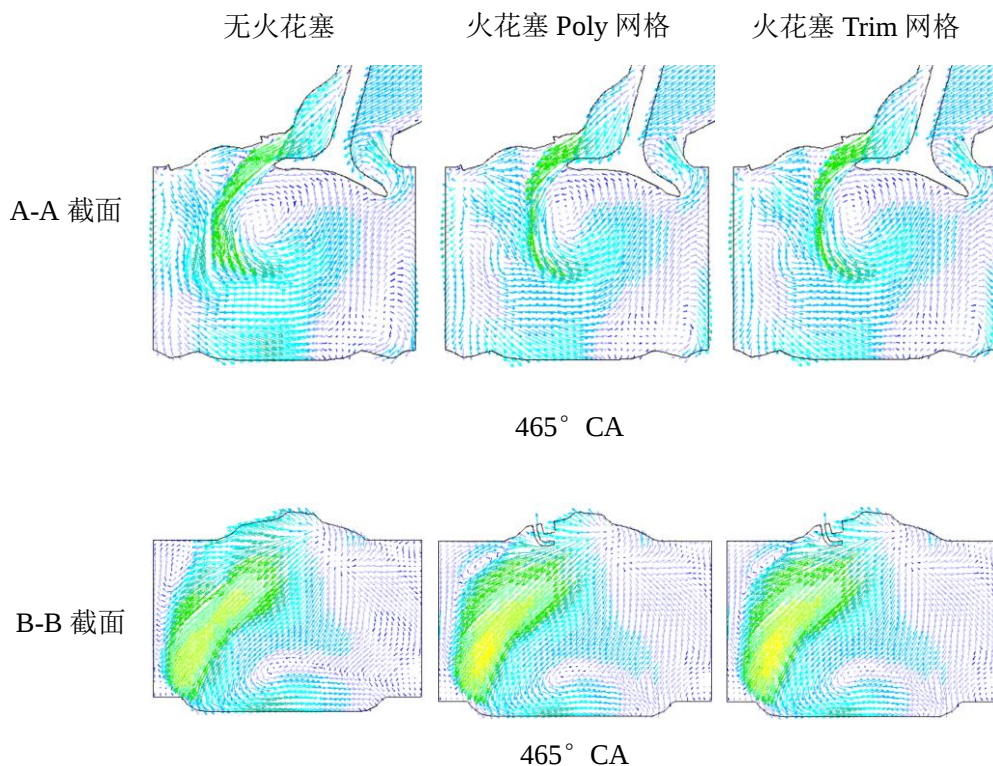


图 5 三种火花塞网格条件下的滚流比



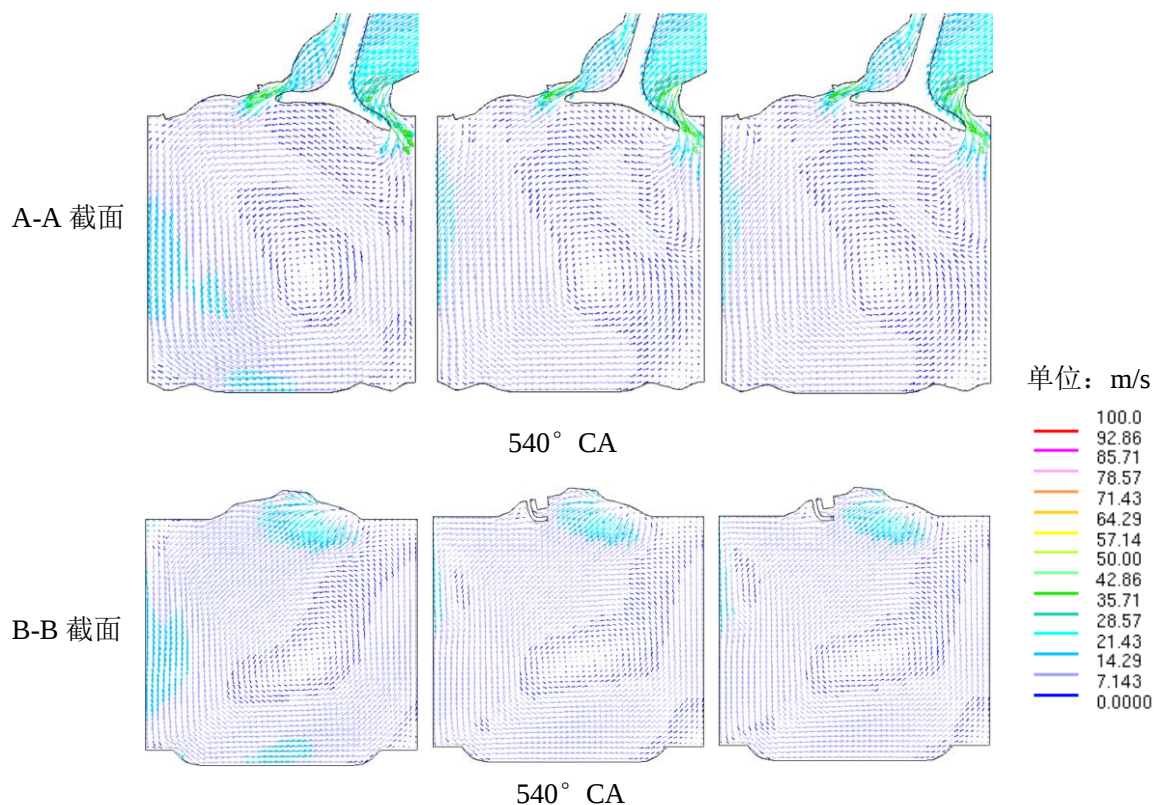


图6 三种火花塞网格条件下的缸内流速对比

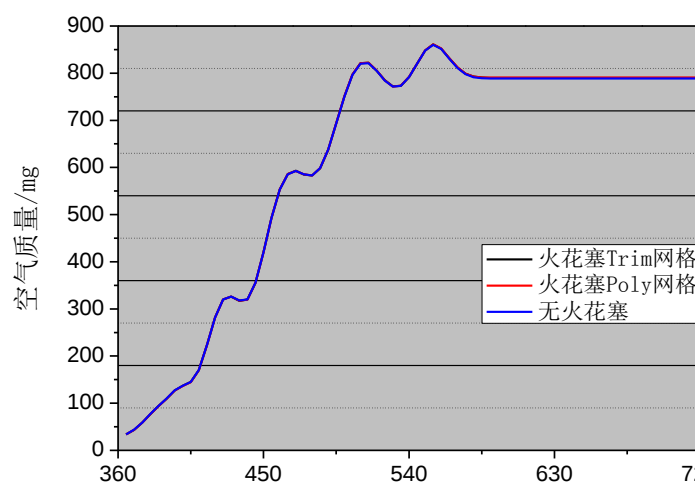


图7 三种火花塞网格条件下的进气空气质量

发动机的缸内进气质量是评价其燃烧系统设计的重要标准之一，图7为三种火花塞网格条件下的进气空气质量。由图可知，三种情况下的进气空气质量之间几乎没有差异，在1500rpm全负荷工况下均为789mg左右，这说明火花塞的有无或者火花塞处不同的网格类型对发动机的进气空气质量几乎没有影响。

4.2 缸内的湍动能分析

图 8 为三种火花塞网格条件下的湍动能对比图。由图可知，无火花塞条件下的湍动能整体略高于有火花塞条件下的湍动能；而火花塞处不同网格处理条件下，两者的湍动能值几乎没有差异，这说明火花塞处两种不同的网格类型对其湍动能的变化几乎没有影响。其中，曲轴转角大于 670°CA 之后，无火花塞和有火花塞的湍动能相差比较明显，当曲轴转角为 690°CA 时，差值最大，达到 $5.7\text{ m}^2/\text{s}^2$ ；当曲轴转角为 710°CA （点火时刻）时，有火花塞的缸内平均湍动能为 $13.0\text{ m}^2/\text{s}^2$ ，无火花塞的缸内平均湍动能为 $16.1\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。图 9 为三种火花塞网格条件下 710°CA 时 B-B 截面的湍动能分布图。由图可知，缸内中心区域的湍动能较大，而周边区域的湍动能较小；在有火花塞的情况下，除了湍动能整体较小之外，火花塞一侧区域的湍动能分布也比较稀疏。并且，火花塞两电极之间区域的湍动能差别也较大，有火花塞时电极之间的湍动能为 $10.5\text{ m}^2/\text{s}^2$ ，而无火花塞时相同位置的湍动能为 $31.2\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。火花塞减弱了其周边的滚流强度，进而影响了此区域乃至整个缸内的湍动能，致使有火花塞时的平均湍动能小于无火花塞时的平均湍动能。

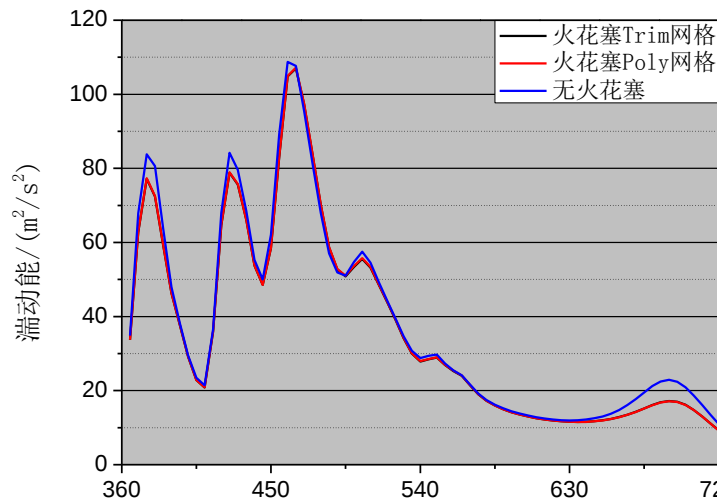


图 8 三种火花塞网格条件下的湍动能对比

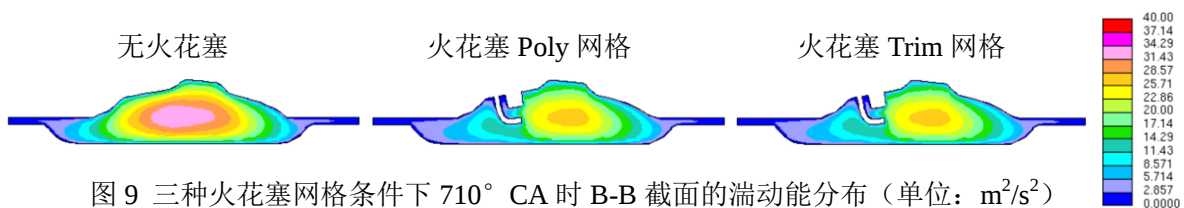


图 9 三种火花塞网格条件下 710°CA 时 B-B 截面的湍动能分布（单位： m^2/s^2 ）

通过以上分析可知，虽然无火花塞时缸内表现出较好的湍动能值和分布，有火花塞时的湍动能表现与其有一定的差距，但是实际情况下火花塞是存在的，正是这些差别可以得出结论：在进行缸内流动计算时，必须考虑火花塞对缸内气流运动的影响，在做几何处理时，最好保留住火花塞，以接近实际的情况，进而保证计算的准确性。

5 结论

(1) 无火花塞条件下缸内流动与有火花塞条件下的缸内流动相比, 滚流比和湍动能较大, 涡流比较小, 进气量则基本一致。

(2) 有火花塞条件下不同网格类型的缸内流动相比, 滚流比、涡流比、湍动能和进气量都基本一致, 这说明火花塞处不同的网格类型对缸内流动的数值计算几乎没有影响。

(3) 有无火花塞的计算结果差异表明: 在进行缸内流动计算时, 必须考虑火花塞对缸内气流运动的影响, 在做几何处理时, 最好保留住火花塞, 以接近实际的情况, 进而保证计算的准确性。

6 参考文献

- [1] 李顶根, 邓杰. GDI 汽油机缸内流动数值模拟分析[J]. 内燃机科技论文集, 2009: 433-438
- [2] 范钱旺, 李理光 等. GDI 发动机缸内气流运动及油气混合过程的数值分析[J]. 内燃机科技论文集, 2009: 532-539
- [3] 刘金武, 龚金科 等. 内燃机缸内复杂空间三维动态网格生成技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, Vol. 18: 487-492
- [4] 丁宁, 高卫民 等. 喷雾引导型直喷汽油机燃油喷射对缸内流动特性影响的数值研究[J]. 内燃机工程, 2010, Vol. 31 No. 5: 16-20, 24
- [5] 张小矛, 陈明 等. 进气道对缸内直喷增压汽油机油气混合影响研究[J]. 2010 年 CDAJ-China 中国用户论文集, 2010: 191-198