

# 小型柴油机 EGR+富氧燃烧排放特性模拟分析

王芳<sup>1</sup>, 雷菊阳<sup>1</sup>, 丁长委<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 运用了三维仿真软件 AVL FIRE v2014 中的 ESE 模块, 建立了小型单缸直喷式柴油机的几何模型和计算网格; 通过设定合适的边界条件、初始条件以及计算步长, 选取喷雾、燃烧、排放等模型, 并在此基础上调整各参数, 构建了合适的模拟平台; 研究了小型柴油机在富氧, 富氧+EGR (进气中掺入 CO<sub>2</sub>) 以及单独使用 EGR 3 种情况下的排放特性, 得出了 EGR 协同富氧燃烧有利于尾气排放的控制; 综合考虑颗粒物和 NO<sub>x</sub> 两种有害物的排放, 21% EGR (CO<sub>2</sub>) + 23% 富氧含量是改善小型柴油机排放的理想匹配, 并从发动机缸内燃烧情况对其进行分析。

**关键词:** 小型单缸柴油机; EGR; 富氧燃烧; 数值模拟

## Numerical Simulation of Emission Characteristics for Single-cylinder Diesel Engine

Wang Fang<sup>1</sup>, Lei Juyang<sup>1</sup>, Ding Changwei<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. College of Vehicle Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** To build the geometry model and the calculation mesh of single-cylinder direct injection Diesel engine, using ESE module of the 3D simulation software AVL FIRE; setting appropriate boundary condition, initial condition and calculating step length, and selecting spray, burning, emission model and on the basis of adjusting the parameters, build a scientific and reasonable simulation platform. To study emission characteristics of single-cylinder Diesel engines in oxygen-enriched, oxygen-enriched + EGR (inlet adding CO<sub>2</sub>), and separately using EGR. It is concluded that EGR synergy oxygen-enriched combustion is beneficial to exhaust treatment. It synthetically considers emissions of the particulate and NO<sub>x</sub>, further obtained 21% CO<sub>2</sub> + 23% oxygen content is the optimal matching to improve diesel engine exhaust emissions.

**Keywords:** single-cylinder diesel engine; EGR; oxygen-enriched combustion; numerical simulation

## 0 引言

柴油机是所有内燃机中效率最高的一种动力装置, 它凭借着良好的动力性、经济性以及耐久性而越来越广泛地应用于各种车辆和动力装置<sup>[1]</sup>。由于各种先进技术在柴油机上的使用, 它也逐渐从传统的给人以笨重、冒黑烟及噪音大的印象改变为效率高且节能的发动机。然而随着人们环保意识的增强和排放法规的日益严格, 控制其有害排放物技术已成为柴油机实际推广应用的关键<sup>[2]</sup>。特别是小型单缸柴油机, 目前还缺少十分行之有效的方法控制其排放<sup>[3]</sup>。目前, 富氧燃烧是一种减少柴油机颗粒物排放的方法, 但同时也会带来负面影响, 比如说 NO<sub>x</sub> 的排放将会增加, 富氧, 高温时氮氧化物产生的必要条件, 因此富氧燃烧并不能从根本上解决柴油机排放问题; 废气再循环技术 (EGR) 目前被广泛应用到机动车中, 但也有一定的问题存在, 这项技术的使用不可避免的将会导致动力性的下降, 这对柴油机来说是致命的, 同时也使燃油不能充分的燃烧, 导致颗粒物的增加, 限制了柴油机的排放控制; 三元催化

技术能有效的解决 NO<sub>x</sub> 和颗粒物的排放, 由于它的特殊要求, 目前很少应用到柴油机上, 特别是单缸柴油机上。综合目前排放控制技术的优缺点, 本文提出了一种 EGR+富氧燃烧的新方法, 既强化燃烧又减少小型柴油机有害物的排放, 进一步满足排放法规的要求。

## 1 计算的主要模型

FIRE 软件对压燃式发动机数值模拟的过程主要包括根据发动机的结构参数建立燃烧室的几何模型, 对燃烧室的几何模型进行划分网格, 根据实验数据及经验设置发动机燃烧初始条件、边界条件等, 以及选择合适的缸内气体流动, 燃烧及排放模型。

### 1.1 建立燃烧室几何模型

本文以某小型单缸柴油发动机为研究对象, 其基本参数及边界条件见表 1。

单缸小型柴油机活塞上的燃烧室形状为 ω 型, 凹坑中心偏离气缸中心稍许, 将其简化成以气缸中心为对称的燃烧室。为缩短计算时间, 将燃烧室根据喷油器喷孔的个数简化燃烧室, 只计算了单个喷孔对应的燃烧室。通过 FIRE 软件中 ESE 模块, 对此发动机的燃烧室结构形状进行简化处理, 利用 ESE 模块中预设的活塞和喷油器的几何模型建立了发动机燃烧室几何仿真模型。图 1 为燃烧室形状示意图。

### 1.2 计算网格划分

对于柴油机缸内过程的多维数值模拟, 因存在活塞的往复

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2017-07-22。

基金项目: 上海市研究生科研创新项目 (16KY0123)。

作者简介: 王芳 (1991-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事机器学习方向的研究。

雷菊阳 (1966-), 男, 上海人, 硕士研究生导师, 主要从事贝叶斯网络、动态贝叶斯网络、贝叶斯非参数及分布式系统方向的研究。

表 1 柴油机主要结构和运行参数

名称	单位	参数
气缸直径	mm	105
连杆长度	mm	200
活塞行程	mm	120
喷孔数及孔径	mm	7×0.216
喷油时刻	deg	714—734
燃油喷射温度	K	330.15
初始进气温度	K	386
初始缸内压力	MPa	0.256
气缸壁温度	K	470
气缸盖温度	K	570
活塞表面温度	K	570
压缩比	—	16:1
每循环喷油量	kg	1.7286e-5
发动机转速	r/min	2000
湍流模型	—	K-ZETA-F
喷嘴类型	—	针孔式

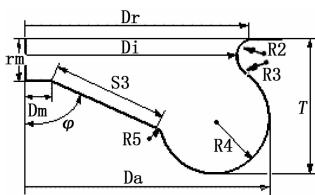


图 1 燃烧室形状示意图

运动。应用动网格可以真实地反映柴油机实际工作情况。为了缩短计算时间, 本文通过 FIRE 软件中的 ESE 模块, 建立了从进气门关闭到排气门打开, 这段时间燃烧室的动网格; 计算采用六面体网格, 对七分之一燃烧室进行网格划分, 在整个模拟计算过程中活塞顶部燃烧室内部的网格大小和数目是固定不变的, 只随活塞一起运动, 网格数为 1496, 特殊位置(上下止点)网格如图 2 所示。

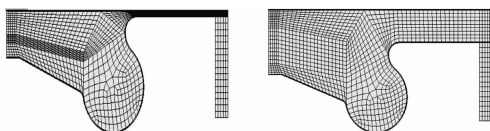


图 2 燃烧室网格模型

### 1.3 其他仿真参数及模型的选取

本文中 EGR 率以进气中模拟气  $\text{CO}_2$  的含量表示, EGR 温度与进气温度相同, 缸内气体流动根据求解质量守恒、动量守恒和能量守恒方程组来实现, 为使方程组封闭, 需要建立完整的仿真模型及合适的运行参数。相关模型选取<sup>[4]</sup>如下: 燃烧模型选用 Coherent Flame Model,  $\text{NO}_x$  生成模型选用 Extend zeldovich, Soot 生成模型选用 Kinetic Model, 喷油子模型采用 Turbulent dispersion model, 蒸发模型采用 Dukowicz, 破碎模型选用 Wave; 相关运行参数选取如表 1 所示。

### 1.4 数值计算模型验证

图 3 是该型号柴油机燃用柴油时(2000 r/min 全负荷工况)缸内压力数值模拟结果与实验测量值的对比图。从图中可以看出, 数值模拟计算得到的缸内压力与实际测量的缸内压力趋势相同, 吻合度较好。同时也可以看出, 数值模拟计算结果

与发动机台架试验实际测试的结果不尽一致, 两者存在差别的原因主要是本文建立几何模型以燃烧室为主, 进气结束时的湍流强度通过经验公式求得。同时一些边界条件也采用经验估计值, 如缸盖、缸壁、活塞初始平均温度值。而且数值模拟的喷油规律与实际的喷油规律存在一定的差异。但总的看来, 选取的数值模型比较合理。

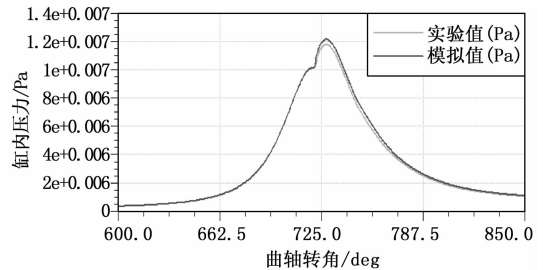


图 3 计算结果与实验值对比

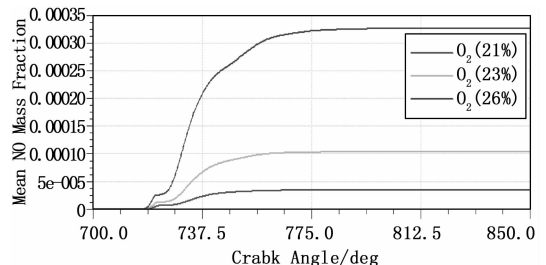
## 2 模拟结果与分析

柴油机尾气排放中, 颗粒物和氮氧化物是主要的污染物, 故以二者的排放情况, 作为该小型单缸柴油机排放好坏的指标。

### 2.1 $\text{NO}_x$ 排放特性

氮氧化物是大气主要污染物之一, 它主要包括一氧化氮( $\text{NO}$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、亚硝酸酐( $\text{N}_2\text{O}_3$ )、四氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}^4$ )、硝酸酐( $\text{N}_2\text{O}_5$ )。其中  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  (统称为  $\text{NO}_x$ ) 所占比例最大, 达 98% 以上<sup>[5]</sup>。柴油车排放的  $\text{NO}_x$  主要是  $\text{NO}$ , 约占 95%, 其次是  $\text{NO}_2$ , 约占 5%, 由于  $\text{NO}$  所占的比例较大, 故选取  $\text{NO}$  作为主要的研究对象。

由图 4 可知, 随着氧含量的增加, 排气中  $\text{NO}$  的平均质量分数也相应的增加, 这是由于  $\text{NO}$  产生条件决定的, 高温富氧有利于  $\text{NO}$  的产生, 当氧含量为 26% 时,  $\text{NO}$  显著上升, 如果再增加氧气的含量, 将产生大量的  $\text{NO}$ , 不利于排放气体中  $\text{NO}$  的减少; 图 5 (a) 显示在富氧条件(氧含量 23%)下, 当  $\text{CO}_2$  加入量不多的情况时,  $\text{NO}$  平均质量分数随着  $\text{CO}_2$  的加入而减少, 这是由于  $\text{CO}_2$  的比热容高, 能降低燃烧室内的温度, 防止  $\text{NO}$  的增加<sup>[6]</sup>, 由 (b) 可知, 当  $\text{CO}_2$  的含量大于 21% 时,  $\text{NO}$  平均质量分数将进一步上升, 并且  $\text{CO}_2$  加入量很多时,  $\text{NO}$  急剧上升, 表明在  $\text{CO}_2$  加入量达到一定时,  $\text{CO}_2$  高温分解产生的  $\text{O}_2$  浓度显著提高,  $\text{CO}_2$  降温变得次要了; 图 7 表明在相同  $\text{CO}_2$  (21%) 加入量条件下, 增加氧含量将促进  $\text{NO}$  的产生。由此可知, 加入过量的  $\text{CO}_2$  以及氧含量过多都将使  $\text{NO}$  产生增加, 适量的  $\text{CO}_2$  以及氧含量将有利于控制排放中的  $\text{NO}$  含量。

图 4 不同氧含量  $\text{NO}$  质量分数与曲轴转角关系

### 2.2 soot 排放

颗粒物 (PM) 是柴油机尾气排放中, 又一主要的污染

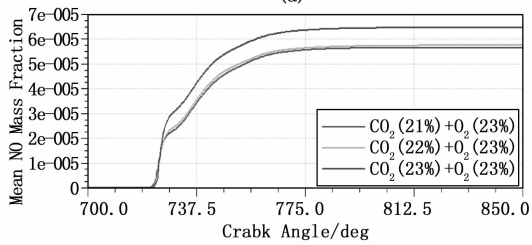
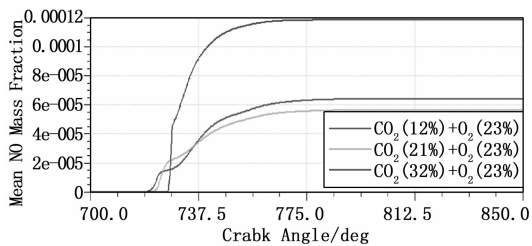


图 5 NO 质量分数与曲轴转角关系

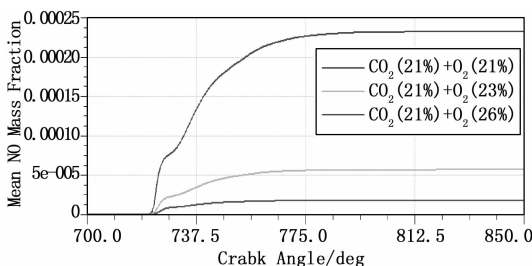


图 6 NO 质量分数与曲轴转角的关系 (CO<sub>2</sub> 下不同 O<sub>2</sub> 比例)

物<sup>[7]</sup>, 有四部分组成: 碳烟 (soot)、硫酸盐、可溶性有机物 (SOF) 以及来自润滑油和燃烧室表面脱落的金属成分, 其中 soot 占主要部分。

图 7 显示的是在无 CO<sub>2</sub> 加入下, 随着氧含量的增加, soot 的含量呈下降趋势, 这是由于增加氧气 (稀燃) 将使多余的颗粒物进一步燃烧, 从而减少颗粒物的排放; 图 8 表明在富氧条件下, 加入少量的 CO<sub>2</sub> 对 soot 的产生影响不大<sup>[8]</sup>, 随着 CO<sub>2</sub> 的增加, soot 的排放逐渐降低, 当 CO<sub>2</sub> 达到 32% 时, 降低幅度很明显; 图 9 在相同的 CO<sub>2</sub> 加入量下, 增加氧含量将有利于减少 soot 的排放。由此可知, 富氧燃烧能减少 soot 的排放, 用 EGR 方式的 CO<sub>2</sub> 取代 N<sub>2</sub>, 当 CO<sub>2</sub> 达到一定量时, 也将降低 soot 的排放。

综上所述, 适当的 CO<sub>2</sub> 加入量 (21%) 以及合适氧含量 (23%) 将有利于小型柴油机尾气的排放。

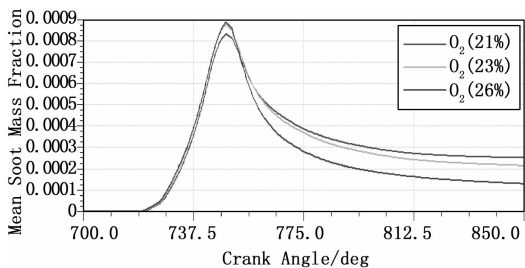


图 7 不同氧含量 soot 质量分数与曲轴转角的关系

### 2.3 燃烧特性

以上可知, 适当加入 CO<sub>2</sub> 以及合适的氧气含量有利于小

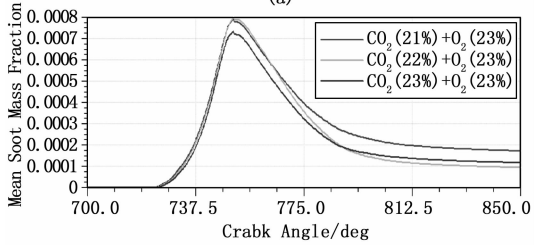
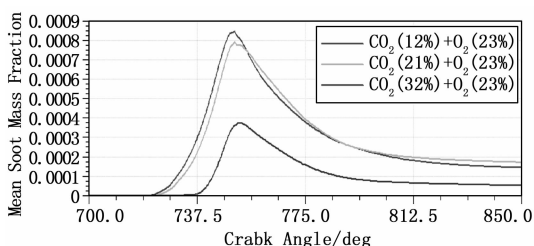


图 8 soot 质量分数与曲轴转角的关系 (富氧下不同 CO<sub>2</sub> 比例)

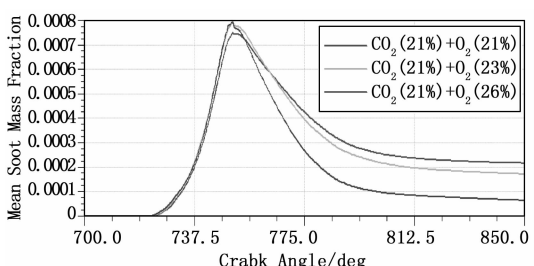


图 9 soot 质量分数与曲轴转角的关系 (CO<sub>2</sub> 下不同 O<sub>2</sub> 比例)

型柴油机尾气的排放, 本文针对 21% EGR (CO<sub>2</sub>) + 23% 富氧的发动机缸内燃烧情况进行分析。

图 10 是此单缸直喷柴油机 2000 r/min 时, 不同曲轴转角下缸内温度场切片图。在 724°CA 时, 燃料喷入燃烧室, 燃油温度较低, 此时燃烧室内温度和压力较高, 燃油喷入缸内后快速蒸发, 并与周围的空气迅速发生氧化反应。在 735°CA 时, 在油束周围温度已有较大的升高, 特别是油束末端温度升高较快; 同时可以看到, 由于缸内气体运动, 油束偏离喷入的方向, 在油束喷雾末端周围出现明显的着火燃烧现象。随着油束向前运动, 在缸内气流作用下位于喷雾浓侧的高温区温度逐渐升高。随着油束向前运动以及油滴不断的分裂、破碎, 缸内最高温度不断升高, 在接近 750°CA 时刻, 高温火焰碰到壁面。同时可看到, 在这段曲轴转角范围内, 柴油燃烧的高温区主要分布在喷雾一侧略靠近中间位置, 且在缸内气流作用下沿垂直于喷雾方向朝单侧扩散。在燃烧后期, 由于燃烧涡流和逆挤流的作用, 燃烧布满整个燃烧室, 使燃烧逐渐向气缸壁靠近, 此时的高温区域也主要出现在燃烧室的侧壁上。

压燃式发动机的燃料经喷油器喷入燃烧室后, 在喷射压力的作用下燃料急速分散成很细小的燃料颗粒, 燃料迅速与燃烧室内的气流进行混合。燃料与燃烧室气流混合质量的好坏对后续的燃烧有重大影响, 进而影响到发动机的性能指标及排放指标。此小型单缸柴油机喷油器的喷油起始点为 724°CA, 结束点为 744°CA。模拟计算了期间喷油器喷射的燃料进入燃烧室后的雾化过程。由图 11 可以看出, 燃料在喷入燃烧室的初期, 由于受到较高喷油压力的影响, 燃料喷射速度比较大, 远远高

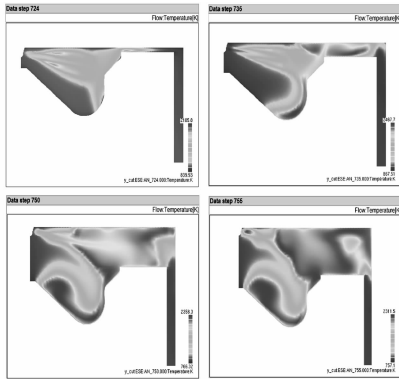


图 10 不同曲轴转角下的缸内温度切片图

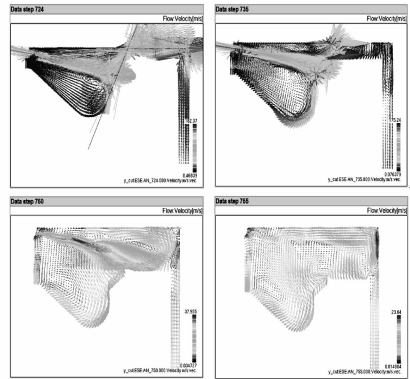


图 11 不同曲轴转角下的喷雾流场切片图

于燃烧室中的热空气气流的流动速度。喷入燃烧室的燃料碰到燃烧室壁面后, 大部分沿着燃烧室壁面向下运动, 形成明显受制于燃烧室形状的顺时针涡流运动。而一小部分燃料则向上发散, 随着压缩过程的进行, 活塞继续上行, 在活塞边缘顶部和气缸盖底面之间形成的气流(即挤流)向燃烧室中心运动, 与向上发散的小部分燃料混合形成较小的流速相对较低的逆时针涡流, 但这个小的逆时针涡流很快就被流速较高的大涡流削弱并消失。与此同时由于受到后续燃料喷入和活塞上行的作用, 大部分燃料与空气混合后形成的顺时针大涡流得以进一步加强。随着喷油的结束, 活塞由上止点向下运动, 膨胀过程开始, 在 740°C 时气缸容积有所增大, 但气流形成更大的顺时针流动; 到 750°C 的时候, 燃烧室中气流的涡流强仍然较高, 与膨胀过程开始时相比涡流的中心位置有所下移, 更贴近燃烧室壁面, 这对于后期的燃烧十分有利。

### 3 结论

本文通过数值模拟的方法, 研究了小型单缸柴油机在富氧, 富氧+EGR(进气中掺入 CO<sub>2</sub>) 以及单独 EGR 3 种情况下的排放特性及燃烧情况。结果可知, EGR 协同富氧有利于尾气排放, 综合考虑颗粒物中 soot 和 NO<sub>x</sub> 排放, 得出了 21% EGR(CO<sub>2</sub>)+23% 富氧含量是最理想的匹配。富氧燃烧虽然能使缸内燃料强化燃烧, 但当氧气充分时, 氧气浓度提高, 缸内温度上升, 会导致更多 NO 生成, 进而 NO<sub>x</sub> 排放增多, 此

(上接第 207 页)  
当信噪比为 0.5 时, 传统方法车辆碰撞漏报数为 15, 改进方法车辆碰撞漏报数为 11, 且获取的检测率比传统方法检测率高出 38.01%, 由此可看出, 改进研究方法车辆碰撞识别跟踪效果较好。

### 3 结束语

使用基于 Cesium 平台的积分图方法加速车辆碰撞特征提取, 可减少图像处理时间, 该算法具有实效性, 利用该特征和分类器结合方式能够对车辆碰撞进行识别, 具有较高识别性能。通过实验设计, 得出实验结论, 由结果可知, 该方法对车辆碰撞识别和跟踪具有良好效果, 可为对车辆碰撞距离测量和预警的研究提供参考。

#### 参考文献:

[1] 张秋霞, 王凌云. 基于 GPS/GSM 汽车跟踪定位系统的设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (7): 27-30.

时通过适当加入大比热容的 CO<sub>2</sub>, 能够控制 NO<sub>x</sub> 和 soot 的排放。EGR+富氧燃烧可以作为小型单缸柴油机强化燃烧和控制排放的一种新方法。

#### 参考文献:

[1] 徐金林. 可编程程序控制器 (PLC) 的实际应用 [M]. 宁夏: 宁夏机械出版社, 2005.  
 [2] Bunker B. International Symposium of the Vehicle Emission Regulations [R]. [S. I.], 2004: 4.  
 [3] Johnson T. Diesel Emission Control in Review [J]. SAE Paper 2006-01-0030: 9-10.  
 [4] CFD-Solver\_v2014\_05\_CFD-Solver [Z]. AVL FIRE User Guide. v2014.  
 [5] 朱建军, 王 铁. 4100 柴油机燃烧及排放的数值模拟 [A]. 中国内燃机学会燃烧节能净化分会学术年会暨 973 项目年度工作会议 [C]. 2011.  
 [6] Edwards S P. The potential of a combined miller cycle and internal EGR engine for future heavy duty truck applications [J]. SAE Transactions, 1998.  
 [7] Rahman Md. Montajir, Hideyuki Tsunemoto, et al. A new combustion chamber concept for low emissions in small DI diesel engines [J]. SAE, 2001.  
 [8] 赵二丽, 张 玉. 不同 EGR 率对高密度一低温柴油机燃烧的数值模拟 [J]. 汽车科技, 2012 (1).  
 [2] 刘 军, 高雪婷, 王利明, 等. 基于 OpenCV 的前方车辆检测和碰撞预警算法研究 [J]. 汽车技术, 2017, 38 (6): 11-16.  
 [3] 王 鑫, 贾庆轩, 高 欣, 等. 基于位图构建的 RFID 自适应 N 树防碰撞算法 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49 (2): 150-157.  
 [4] 刘 敏, 熊岳山, 谭 珂, 等. 基于改进碰撞检测算法的肝门静脉结扎仿真 [J]. 计算机工程与科学, 2017, 39 (1): 151-157.  
 [5] 张文胜, 解 骞, 钟 瑾, 等. 基于八叉树邻域分析的光线跟踪加速算法 [J]. 图学学报, 2015, 36 (3): 339-344.  
 [6] 李志坚, 肖熠琳. 一种基于二进制码调制的射频识别防碰撞算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (2): 308-312.  
 [7] 梁秀满, 付董帅, 牛福生, 等. 基于 Otsu 图像分割的颗粒与气泡碰撞检测方法 [J]. 中国矿业, 2017, 26 (6): 127-130.  
 [8] 张启彬, 王 鹏, 陈宗海. 基于速度空间的移动机器人同时避障和轨迹跟踪方法 [J]. 控制与决策, 2017, 32 (2): 358-362.  
 [9] 黄于欣. 基于 openCV 的视频路径船舶检测与跟踪 [J]. 舰船科学技术, 2017, 15 (16): 28-30.  
 [10] 马 飞, 杨焱岫, 顾 青, 等. 基于改进 A\* 算法的地下无人铲运机导航路径规划 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (7): 303-309.