

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.004

基于 Matlab/GUI 的汽油机缸内直接喷雾图像处理方法*

王兆文 李浩 黄都 黄荣华 丁红元

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要: 设计了基于 Matlab/GUI 的汽油机缸内直接喷雾图像实时处理程序, 实现了图像处理的可视化操作。由于汽油挥发性较强, 使得汽油机缸内直接喷雾图像相对柴油喷雾图像而言, 雾形边界相对模糊, 且喷雾图像信噪比较低。为准确提取汽油机缸内直接喷雾研究中所需的喷雾贯穿距、喷雾锥角、周长以及面积等参数, 需要在图像处理过程中精确地提取喷雾边界, 为此进行了精确的噪声滤波、边缘检测、形态学优化等图像处理。在确定雾形边界后, 进一步编写程序计算出喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷射速度等参数, 实现了喷雾特性参数的实时测量。

关键词: 缸内直喷 喷雾边界 图像处理 喷雾参数 Matlab/GUI

中图分类号: TK437 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0019-05

Digital Image Processing Method of Gasoline Direct Injection Spray Based on Matlab/GUI

Wang Zhaowen Li Hao Huang Du Huang Ronghua Ding Hongyuan

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An image processing program with good instantaneity for gasoline direct injection spray based on Matlab/GUI was designed and the program realized visual operation interface. As gasoline is fuel with great volatile, the spray boundary of GDI image is relative obscure and SNR of the spray image is not satisfied compared with that in diesel injection. To get the accurate spray penetration, cone angle, perimeter, area and other needed parameters, the spray boundary was precisely extracted in the image processing. Noise filtering, boundary detection, morphological analysis and other related methods have been used. After the spray boundary was obtained, program to calculate spray penetration, cone angle, injection velocity and other parameters was developed to realize real-time measurement of spray parameters.

Key words: Gasoline direct injection Spray boundary Digital image processing Spray parameters Matlab/GUI

引言

近年来,为提高汽油机的燃油经济性,越来越多的国内外研究者开始了汽油机缸内直喷(GDI)的研究^[1-3]。喷雾特性的好坏决定着缸内直喷汽油机的动力性、经济性及排放性能,致使汽油机缸内直喷喷雾特性的研究成为关键环节^[3-4],其中喷雾图像的精确处理,喷雾参数的准确测量则是汽油机缸

内直接喷雾特性研究的前提条件。

为优化某自主品牌缸内直喷汽油机的燃烧室^[4]设计,本文利用高速摄影仪采集该缸内直喷汽油机喷油器在不同喷射环境下的喷雾图像。相对柴油而言,汽油挥发性较强,使得汽油机缸内直接喷雾的雾形边界相对模糊,并且由汽油粘附石英镜片导致的图像背景噪声相对较大。通过大量调试验证,柴油喷雾图像处理中通用的图形处理方法^[5]在汽

收稿日期: 2012-06-11 修回日期: 2012-07-19

* 高等学校博士学科点新教师基金资助项目(20100142120047)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HUST2012TS056)

作者简介: 王兆文, 讲师, 主要从事喷雾、燃烧及代用燃料研究, E-mail: wangzhaowen@mail.hust.edu.cn

油机缸内直接喷雾中误差较大。为准确获得该喷雾器的喷雾特性,本文通过背景噪声类型分析、滤波算法及边界模糊类图像处理等方法研究,基于 Matlab/GUI^[6]平台,设计适合汽油机缸内直接喷雾的图像处理程序。

1 喷雾图像采集系统

利用阴影法原理采集喷雾图像,图像采集系统如图1所示。高速摄影仪型号为 Phantom v710,其拍摄频率为 20 000 f/s,图像分辨率为 480 像素 × 640 像素。为提高图像质量,采用新闻灯作为光源,并在光源和喷雾之间安装毛玻璃。新闻灯光照频率高、亮度大且光强稳定;用 HF 酸化学方法处理过的毛玻璃则可使通过的光线产生漫反射,从而使背景光更均匀。

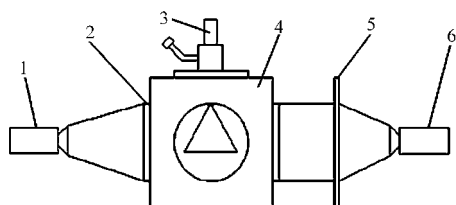


图1 GDI 喷雾图像采集系统原理图

Fig. 1 GDI spray images acquisition system

1. 高速摄影仪 2. 石英窗口 3. 喷雾器 4. 定容弹体 5. 毛玻璃 6. 光源

GDI 汽油机喷雾实验拍摄得到的喷雾原始图像如图2所示。该图像在高速摄影仪中存储为 8 位字节的无符号灰度数字图像。数字图像中,每个像素亮度用一个 0~255 之间的数值表示,0 表示黑、255 表示白,其它数值则表示其灰度。

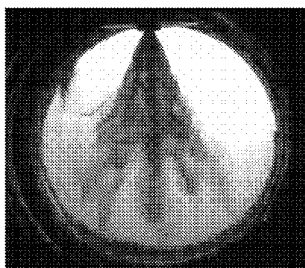


图2 喷雾原始图像

Fig. 2 Original spray image

2 喷雾图像的提取

通过并行通信,可实时地从高速摄影仪中提取采集的灰度数字图像,在计算机中得到一个代表该图像的数字矩阵。此时,可通过 Matlab 程序中的 imread 函数和 imshow 函数为该数字矩阵创建一个句柄图形图像对象,在计算机内实时显示出来。

由图2可知,喷雾原始图像中,包含有石英窗口

等原始背景信息,喷雾研究需要将这些原始背景分离出去,得到喷雾图像,可利用 Matlab 函数库中的 imsubtract 函数实现。由阴影法获得的喷雾图像,原始背景亮,喷雾暗,实际上喷雾区域图像是原始背景图像减去喷雾图像后的结果。

去除原始背景后的喷雾图像如图3所示。

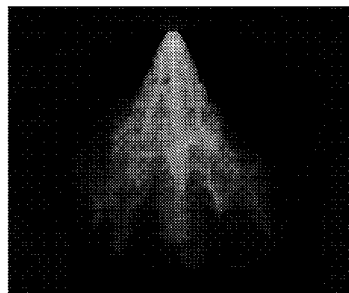


图3 去除原始背景后的喷雾图像

Fig. 3 Spray image after removal of the original background

3 喷雾图像的背景噪声滤除

去除原始背景信息后,需要进一步进行喷雾图像的噪声分析,滤除背景噪声。由图3可知,喷雾图像的背景噪声灰度较低,肉眼无法判别,此时需利用 adapthisteq 函数增强图像对比度,增强背景噪声的强度,增强对比度后的喷雾图像如图4所示。

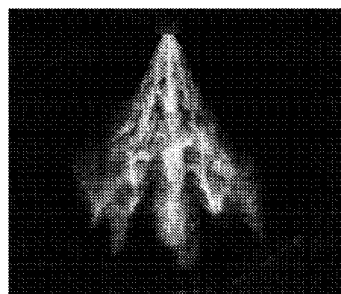


图4 增强对比度后的喷雾图像

Fig. 4 Spray image after enhance the contrast

分析增强对比度后的喷雾图像可知,在整个石英玻璃上,都存在着一定的背景噪声,在石英玻璃中部区域,背景噪声相对较浅,在石英玻璃边缘,背景噪声相对明显。这主要是由于汽油的挥发,汽油蒸汽在石英镜面及外缘形成粘附,使得光强发生变化,从而形成背景噪声。通过 Matlab 函数库中 gaussian、laplacian、log、prewitt 等函数进行调试,对粘附噪声的滤波效果都不好,有些还会产生新的噪声;利用形态学操作也能消除噪声,但膨胀和腐蚀运算将导致喷雾图像大小发生变化而失真;利用开运算和闭运算虽然可以保持目标形状不变,但距离喷雾本体位置较远的噪声,其消除效果较差。

本文根据汽油蒸汽粘附的实际情况,采用改进

后的中值滤波算法来实现汽油机缸内直接喷雾图像的噪声滤波。对于非线性噪声的滤除,中值滤波算法仍然是最重要算法^[7-8],但中值滤波算法存在无法自动识别噪声、中值搜寻耗时长的缺点,本文借鉴 NR(噪声概率)估计算法^[9],对不同噪声情况自适应调整窗口,并采用 T-S 模糊模型融合滤波来完成喷雾区域的滤波。

依据该方法,编写具体的函数算法,将图片分区,在不同区域内快速估算其 NR 值,再根据 NR 值,采用变尺度滑动窗口技术,同时在窗口中采用融合 T-S 模糊模型融合滤波。滤波的具体算法如下:

首先对各窗口中像素 $f(i, j)$ 进行检测,如果符合判断标准: $\min < f(i, j) < \max$, 则该像素不是噪声污染像素,当前操作像素滤波后的估计值 $f'(i, j)$ 则为 $f'(i, j) = f(i, j)$, 然后进行下一个像素 $f(i, j+1)$ 的滤波操作;否则重新再对该滤波模式下的滤波窗口的像素逐个检测,统计非噪声污染像素个数 n 。

若 $n \neq 0$, 则噪声像素估计输出为 $\sum_M^R \sum_M^R \omega_{m \times n} \cdot$

$f(m, n) / \sum_M^R \sum_M^R \omega_{m \times n}$; 如果 $n = 0$, 将像素的检测范围逐步扩展,直至最大许用窗口范围,若此时 $n \neq 0$,

则噪声像素的估计输出为 $\sum_M^R \sum_M^R \omega_{m \times n} f(m, n) /$

$\sum_M^R \sum_M^R \omega_{m \times n}$, 否则,噪声像素的估计为 $f'(i, j) = \text{med}(W_{ij})$ 。

上述中 $f(i, j)$ 为当前窗口 $W_{ij}(R \times R, R$ 为奇数)的中心像素, \min 和 \max 分别为椒盐噪声的两个判断阈值, $\text{med}(W_{ij})$ 表示取窗口内像素的中值, $\omega_{m \times n}$ 是对非污染像素的加权,取值为 $1/(x^4 + y^4)$, x 和 y 分别是像素 $f(m, n)$ 到中心像素 $f(i, j)$ 的横向和纵向像素距离。

基于以上算法,滤除背景噪声后的喷雾图像如图 5 所示。

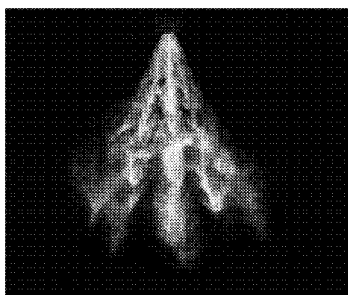


图 5 滤除噪声后的喷雾图像

Fig. 5 Spray image after filter out the noise

4 SUSAN 算子边界检测

准确的喷雾特性分析,需要检测出准确的喷雾边界,喷雾图像边界提取的好坏直接影响喷雾特性参数测量的准确性。通过对大量分割程序的调试, Matlab 程序库中的图像分割算子 Canny、Sobel、Robert 等抗噪能力差,对噪声非常敏感,微小噪声就会使图像边界产生较大偏差,还会在检测边界的同时加强局部噪声,对本文的喷雾图像分割效果都不很理想。

本文引入较先进的 SUSAN (Small univalue segment assimilating nucleus) 思想,来实现 GDI 汽油机喷雾图像的分割和边界提取。

SUSAN 法(最小吸收核同值区法)是一种直接利用图像灰度进行边缘检测的分割方法,由牛津大学 Smith 等^[10]于 1997 年提出,该方法定位准确、抗噪能力强。SUSAN 算子的模板不同于常规卷积算法的正方形模板,它使用一种近似圆形的模板。用圆形模板在图像中移动,比较模板内部每个图像像素点的灰度和模板中心像素的灰度,若模板内某个像素的灰度与模板中心像素的灰度差值小于一定阈值 t ^[11],则认为该点与模板中心具有相同灰度。

由与模板中心具有相同灰度的像素组成的区域称为吸收核同值区 (Univalue segment assimilating nucleus, USAN)。USAN 区含有图像在某个局部区域的结构信息。同值核的大小反映了图像局部特征的强度,计算式为

$$n(r_0) = \sum_{r_0 \neq r} c(r, r_0) \quad (1)$$

$$\text{其中 } c(r, r_0) = \begin{cases} 1 & (|I(r) - I(r_0)| \leq t) \\ 0 & (|I(r) - I(r_0)| > t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 r_0, r ——核心与模板中其它点的坐标
 I ——灰度

t ——区分特征目标与背景的一个重要阈值
 t 的选取要根据图像中目标与背景的对比程度来确定。

本文以图 6 所示的半径为 3 或 4 个像素的圆形区域(覆盖 37 个像素位置)为掩膜,当圆形模板完全在背景中或完全在目标中时,如图 7 中的模板 e, USAN 区面积最大,而当模板移向目标边缘时,其 USAN 区面积逐渐减小,当圆心处在目标边缘时, USAN 区很小,当圆心在目标角点处时,如图 7 中的模板 a, USAN 区最小,以在图像每点上的 USAN 区大小作为该处特征的显著性度量,则 USAN 区越小的点特征越显著,该点越接近边缘区域。

		1	2	3		
	4	5	6	7	8	
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
		30	31	32	33	34
			35	36	37	

图6 SUSAN算子的圆形模板

Fig. 6 SUSAN operators circular template

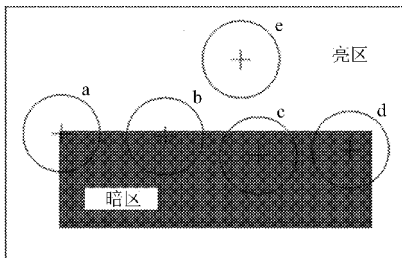


图7 一张简单图上的5种不同的圆形模板

Fig. 7 Four different circular template on a simple graph

SUSAN 法图像分割步骤:

(1) 计算出喷雾图像中灰度最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} , 计算出区分特征目标与背景的阈值 $t = (I_{\max} - I_{\min})/10$ 。

本文计算得出的喷雾图像阈值 $t = 20$ 。

(2) 圆形模板在图像中移动, 按照式(1)、(2)计算出 USAN 区的大小。

(3) 设定阈值 T_{USAN} 为 26, 当计算出的 USAN 区大小大于 T_{USAN} 时认为不是边界, 将模板中心对应的图像像素点的灰度改为 0, 反之设为 255。

(4) 对喷雾图像进行遍历, 实现喷雾图像与边界分割。

USAN 区域是由模板内与模板中心像素灰度具有相似灰度的像素累加而得, 实际上是一个积分过程, 这对于高斯噪声具有很好的抑制作用。另外, USAN 特征检测不依赖于前期图像分割的结果, 这些都使 SUSAN 思想具有定位准确、对局部噪声不敏感等优点。本文基于 SUSAN 思想, 进行了具体的 Matlab 程序编写, 完成了 GDI 汽油机喷雾图像边界的准确提取, 提取后的边界图像如图 8 所示。

5 边界的形态学优化

对比喷雾边界图(图 8)和喷雾原图(图 5)可知, SUSAN 算子提取出来的喷雾边界图与原喷雾图具有较好的匹配性, 但仍存在一些边界附近的椒盐噪声以及远离喷雾边界的亮点, 并且边界较粗, 要提高图像处理的精确性, 必须消除这些干扰, 细化边界曲线。本文借助形态学^[12]工具来优化边界图像。

形态学操作可以用来简化图像数据, 保持图像

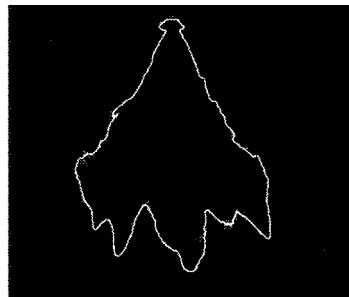


图8 由 SUSAN 方法分割出来的喷雾边界

Fig. 8 Spray border segmented by SUSAN method

的基本形状特征, 同时去掉图像中与研究目的无关的部分。使用形态学操作可以完成增强对比度、消除噪声、骨架化、填充和分割等常用图像处理任务。

具体流程如下:

(1) 利用 BW_{morph} 函数中的“lean”操作去除背景噪声中的孤立亮点, 结果如图 9 所示。

(2) 利用形态学操作中的闭运算, 将喷雾边界的椒盐噪声融入边界, 结果如图 10 所示。

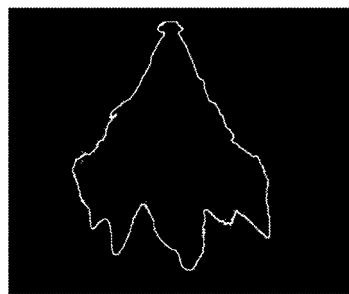


图9 消除背景亮点后的喷雾边界图

Fig. 9 Spray boundary figure eliminate background highlight

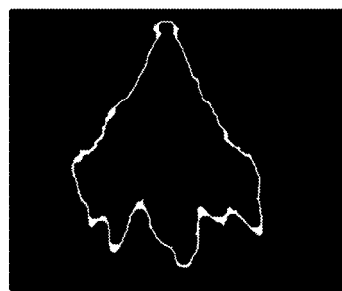


图10 闭运算后的喷雾边界图

Fig. 10 Spray boundary figure after closing operation

(3) 由图 10 可知, 闭运算后的喷雾边界图与原图相比, 边界明显粗了很多, 需要进行一次细化操作; 细化操作后图像如图 11 所示。

(4) 由图 11 可知, 边界上存在一些短枝, 此时需要使用 BW_{morph} 函数中的“spur”操作将短枝去掉, 最终获得的喷雾边界图如图 12 所示。

6 数字图像的实时化

通过上述图像处理方法, GDI 喷雾图像的边界

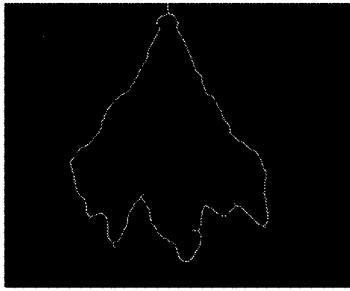


图 11 细化边界后的喷雾边界图

Fig. 11 Spray boundary figure after refine the boundary

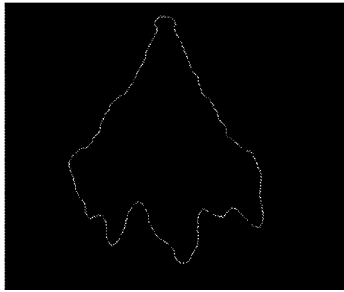


图 12 图像处理后最终喷雾边界图

Fig. 12 Final spray boundary figure after image processing

就可以较精确好地提取出来,将这些算法编写成 Matlab/Gui 程序,可以快速进行图像的数字处理。

用 USB 接口将图像处理用便携式计算机与高速摄影仪连接,通过实时数据采集程序,将高速摄影仪的数据实时导入计算机,即可实现图像的实时处

理。图 13 为设计的喷雾图像实时处理软件界面。由图可知,喷雾实体照片与边界检测照片能同时显示。再通过图像测量函数,即可以直接测量出喷雾参数。

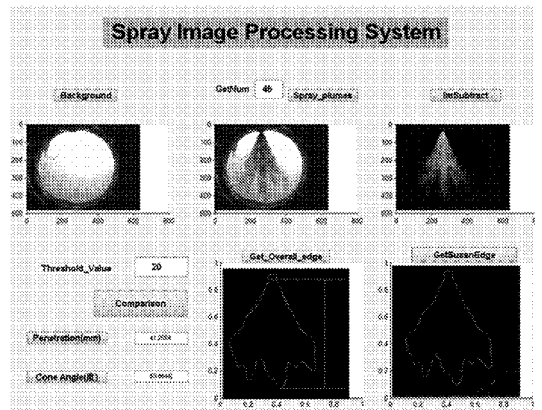


图 13 喷雾图像实时处理软件界面

Fig. 13 Spray image real-time processing software interface

7 结束语

基于 Matlab/GUI 程序平台,开发了 GDI 汽油机喷雾图像实时处理程序,通过噪声滤波、边缘检测以及形态学分析等方法精确提取喷雾图像边界,解决了汽油挥发性较强带来的喷雾图像边界相对模糊,以及汽油蒸汽壁面粘附导致的背景噪声较大等图像处理问题,具有良好的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Park Cheolwoong, Kim Sungdae, Kim Hongsuk, et al. Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine[J]. Energy, 2012, 41(1): 401 ~ 407.
- 2 Costa Michela, Sorge Ugo, Allocca Luigi. Increasing energy efficiency of a gasoline direct injection engine through optimal synchronization of single or double injection strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60(10): 77 ~ 86.
- 3 李波, 李云清, 王德福. GDI 发动机喷雾特性的数值模拟和试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(1): 10 ~ 12.
Li Bo, Li Yunqing, Wang Defu. Numerical simulation and experiment on spray characteristics of GDI engines[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(1): 10 ~ 12. (in Chinese)
- 4 叶伊苏, 王伟民, 王兆文, 等. 基于仿真的缸内直喷汽油机燃烧系统的开发与改进[J]. 汽车工程, 2011, 33(10): 838 ~ 844.
Ye Yisu, Wang Weimin, Wang Zhaowen, et al. The development and improvement of combustion system in a GDI engine based on simulation[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(10): 838 ~ 844. (in Chinese)
- 5 庄严. 柴油-生物柴油混合燃料喷雾图形处理的研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Zhuang Yan. Study on spray image processing of diesel-bio diesel blend fuel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- 6 孙祥, 徐流美, 吴清. MATLAB 7.0 基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 7 Sorin Zoican. Improved median filter for impulse noise removal [C]//IEEE, 6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003, 2: 681 ~ 684.
- 8 Forouzan A R, Araabi B N. Iterative median filtering for restoration of images with impulsive noise [C]. Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2003, 1: 232 ~ 235.
- 9 徐冠雷, 王孝通, 徐晓刚, 等. 噪声概率快速估计的自适应椒盐噪声消除算法[J]. 光电工程, 2005, 32(12): 34 ~ 38.
Xu Guanlei, Wang Xiaotong, Xu Xiaogang, et al. Adaptive removal of salt-pepper noises through fast noise ratio estimation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(12): 34 ~ 38. (in Chinese)
- 10 Smith S, Brady M. A new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45 ~ 78.
- 11 钟顺虹, 何建农. 基于自适应双阈值的 SUSAN 算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 206 ~ 211.
Zhong Shunhong, He Jiannong. SUSAN algorithm based on adaptive dual-threshold[J]. Computer Engineering, 2012, 38(3): 206 ~ 211. (in Chinese)
- 12 Zhao Y Q, Gui W H, Chen Z C. Edge detection based on multistructure elements morphology [C]//Proceeding of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, 2: 9 795 ~ 9 798.