

高压喷油器喷雾瞬态的喷雾角检测系统^①

吴 侠¹, 万 丽², 朱均超², 李建文^{1,2}

¹(浙江省瑞安市质量技术监督检测院, 瑞安 325204)

²(天津理工大学自动化学院, 天津市复杂工业系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 燃油喷油器是汽车发动机的关键部件, 其喷雾特性是影响其工作性能的重要因素. 喷油器的喷雾角是喷油器喷雾特性的重要参数之一, 检测喷油器性能时需要对其进行测量. 一般的测量方法是通过集油盘收集多次喷射的燃油量进行测定, 效率低、准确性差. 且对于喷雾时汽化损失较大的 GDI(汽油缸内直喷)喷油器, 液滴无法完全收集, 影响测量结果. 采用机器视觉技术即可检测喷油器的喷雾角, 用高速相机采集喷油器的瞬态喷雾图像, 微秒级的曝光时间可以有效消除高速喷雾的拖影, 提高图像质量, 然后进行图像预处理、图像分割、分析计算即可得出喷雾角. 实验结果表明, 该方法可以快速准确的检测喷油器的喷雾角, 已成功应用于课题组所研制的汽车发动机喷油器计量检测综合试验台上.

关键词: GDI 喷油器; 燃油喷雾特性; 喷雾角; 边缘检测; 霍夫变换

Detection Method of Spray Angle for Transient Fuel Sprays of GDI Fuel Injector

WU Xia¹, WAN Li², ZHU Jun-Chao², LI Jian-Wen^{1,2}

¹(Ruian Testing Institute of Quality Technical Supervision, Ruian 325204, China)

²(School of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Applications in Complicated Systems, Tianjin 300384, China)

Abstract: Fuel injector is the key part of automobile engine and its spray characteristic is an important factor influencing the performance of its work. The spray angle of fuel injectors is one of the most important parameters in the spray characteristic, and needed to measure in the detection of fuel injector performance. General method of measurement is collecting multiple injections of fuel by patternation, but it is poor accuracy and efficiency. And for gasoline-direct injection injectors, the mass lost to vapor can be very substantial, so lead to measurement errors for unable to collect fuel spray completely. Using machine vision technology can detect the spray angle, and using high-speed cameras to capture the injectors spray image, whose shadow can be eliminated by the microsecond exposures for ensuring the quality of spray image. Then the spray angle gets image preprocessing, image segmentation, and calculation. Experimental results show that this method can detect fuel injector spray angles quickly and accurately, and successfully applied to the injector measuring test-bed developed by research group.

Key words: Gasoline-Direct Injection Injectors; characteristics of fuel sprays; spray angle; edge detection; Hough transformation

汽车行业的发展引发了环境和能源的危机, 因此提高燃油的燃烧质量尤为重要. 喷油器作为发动机燃油供给系统的重要组成部分, 其喷雾特性的好坏很大程度上影响着燃烧的完善程度与排放质量.

课题组研制一套喷油器的综合检测计量系统, 对

喷油器的综合性能指标进行评定. 喷雾角是喷油器的一个重要指标, 一般的检测方法是通过多次喷射, 使用集油盘等包含一定数量的收集小孔的收集装置对喷射的燃油喷雾进行收集, 通过称量每个小孔的燃油质量来得出喷雾形态分布, 再根据这个分布特征来得出

① 基金项目: 浙江省级质监科研项目(20140251)

收稿时间: 2015-10-13; 收到修改稿时间: 2015-11-19 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005186]

喷雾锥角.但是,对于课题要求的GDI(汽油缸内直喷)喷油器并不适用,因为这种直喷式喷油器的汽化损失很大,在喷雾的过程中就会有多达40%的燃油汽化掉^[1],使得集油盘无法收集到完整的喷雾分布质量,且在称重过程中仍有很大一部分燃油汽化,传统方法测量存在较大误差.为此,本文采用高速相机拍摄喷雾瞬态图像,并对采集图像进行图像处理的方法来检测喷油器的喷雾角.

喷油器喷雾瞬态的喷雾角即为喷油器开始供油的瞬间喷雾边缘之间的角度^[1],本文使用高速相机以1 μ s的曝光时间采集瞬态图像,对图像进行滤波、增强等图像预处理,然后进行边缘检测和直线检测找出喷雾边缘,通过得到的直线位置确定直线夹角,即为喷雾角.

1 喷雾角检测系统

喷油器喷雾瞬态的喷雾角检测系统,主要由高压供油系统、油压油温调节器、喷油器、面阵光源、高速相机、控制计算机、集油盘、电子天平构成.

如图1所示为喷雾角的检测系统模块图,通过高压供油系统控制喷油器喷油,用油压油温调节器控制喷出燃油的压力与温度,在检测系统主支架上固定喷油器,通过喷油器驱动装置驱动喷油器喷油.将集油盘放置于喷油器下方,并使其轴线重合,根据集油盘收集到的燃油质量即可测算出燃油雾化损失.

然后,使用高速相机采集喷雾图像.高速相机垂直于喷油器轴线方向放置,调整距离、焦距,使其刚好采集到喷油器下方喷油器轴线所在平面的10cm \times 10cm区域.由于曝光时间极短,因此,需要在喷油器后方加入一面阵光源,为采集喷雾瞬态图像进行背景补光.采集到喷雾瞬态的图像后,即可应用图像处理的方法得出喷雾角和喷雾偏转角度.

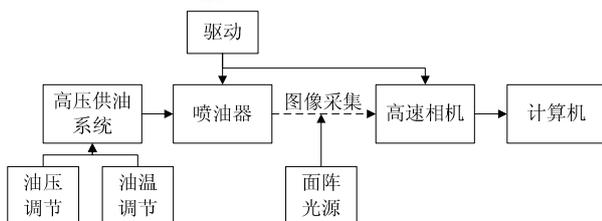
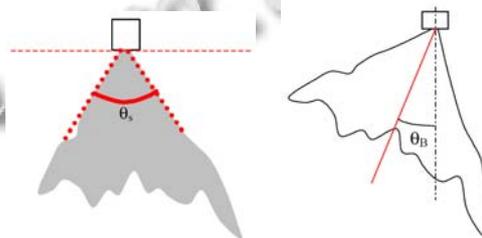


图1 喷雾角检测系统

2 喷雾角与喷雾偏转角度

喷雾角是测量瞬态燃油喷雾的夹角,它定义为在开始供油后一指定时刻在喷油器顶端附近一预先确定的位置的喷雾边缘之间的角度.这个角度用 θ_s 表示,如图2(a)所示.

喷雾偏转角度,用 θ_B 表示,通常与单油束的GDI喷雾有关,量化分析单油束与喷油器的角度偏差.如图2(b)所示,图像测试所确定的喷雾偏转角是喷雾边缘之间夹角的等分线与喷油器轴线(点划线)之间的角度.



(a) 喷雾角示意图 (b) 喷雾偏转角示意图

图2 喷雾角与喷雾偏转角度

3 喷雾角检测算法

本文应用基于霍夫变换的图像检测法检测瞬态燃油喷雾角,包括图像预处理,喷雾边缘检测,霍夫变换直线检测,计算喷雾角、喷雾偏转角度.这样定量的描述喷油嘴喷雾几何特性,有利于进行统计学数据分析,是喷油嘴性能测试的重要环节.

3.1 图像的预处理

在采集喷油器喷雾瞬态的图像时,由于光源常亮,喷油器喷雾速度较快,曝光时间应足够短以确保消除拖影现象.普通工业相机曝光时间较长无法满足实际采集要求,因此在实际测试时选用高速相机进行图像采集,曝光时间为1 μ s.此时会出现背光补光不足的现象,导致采集图像整体偏暗.

修正图像的灰度直方图可以增强图像的对比度.主要思路是将原始图像的直方图变换为均匀分布的形式,增加图像灰度的动态范围,从而增强对比度.其方法是以图像各灰度级概率的累积分布函数作为变换函数,依此变换关系即可得到一幅灰度概率密度均匀分布的图像,这样即可解决图像偏暗的问题.

因此,针对本文采集的图像,可以通过直方图均衡化的预处理方法来得到图像的增强,以保证后续边缘提取的准确性.

3.2 喷雾边缘提取

虽然 GDI 喷油器喷雾损失较大, 但其喷雾瞬态的喷雾边缘较为明显. 可以使用高速相机采集喷雾瞬态图像, 并进行边缘提取的方法来进行喷雾角的测量. 即计算图像中所有点的梯度幅值, 找出局部最大值点的集合, 并反映为一定形式. 根据 Canny 理论, 在计算图像的梯度前, 需对其进行平滑处理, 抑制噪声对检测结果的影响, 但一般的滤波器普遍存在图像的细节边缘缺失的现象, 且每种滤波器仅适用于特定种类的噪声, 不能很好的应用于 GDI 喷油器的喷雾图像边缘检测. 针对其喷雾高汽化现象, 噪声干扰的消除尤为重要, 因此, 本文提出一种自适应的滤波算法, 将图像的不同区域有区别的平滑滤波.

$$G(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中 σ 为高斯函数的标准差, 控制图像的平滑程度. σ 越小, 边缘的定位精度越高, 但信噪低; σ 越大, 精度越低, 但能更好的平滑噪声.

考虑尺度参数 σ 与邻域属性的关系, 设信号 $f(x)$ 经过高斯滤波后变为 $f_g(x)$, 则

$$F_g(x) = F(x) + \frac{F''(x)}{2} \sigma^2 + \dots + \frac{F^{(2m)}(x)}{\prod_{p=1}^m 2p} \sigma^{2m} + \dots \quad (2)$$

忽略高次项近似为:

$$F_g(x) \cong F(x) + \frac{F''(x)}{2} \sigma^2 \quad (3)$$

定义预处理误差为: $|F_g(x) - F(x)| \leq \varepsilon$, 因此自适应滤波器的方差为:

$$\sigma^2(x) = \frac{2\varepsilon}{|F''(x)|} \quad (4)$$

在滤除噪声时, 为了达到仅平滑噪声信号的效果, 噪声信号像素点对应的尺度参数 σ 应尽可能取大, 而平滑区和边缘区的 σ 尽可能趋于零. 设图像信号模型为 $S(x,y)=f(x,y)+n(x,y)$, 则

$$\hat{S}(x,y) = S(x,y) * G(x,y',\sigma) = \begin{cases} f(x,y) * G(x,y',\sigma) \\ n(x,y) * G(x,y',\sigma) \end{cases} = \begin{cases} f(x,y) + \frac{f''(x,y)}{2} \sigma_f^2 \\ n(x,y) + \frac{n''(x,y)}{2} \sigma_n^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中 σ_f 为原始信号的尺度参数, σ_n 为噪声信号的尺度参数. 这样求得每个像素点的尺度参数 σ , 用每个尺度参数构造基于单个像素点的一维高斯滤波器; 分别从

x 轴、 y 轴两个方向对图像进行滤波, 得到滤波后的图像.

梯度幅值和方向可由高斯平滑后图像的 2×2 邻域对角线差分求得. 其中沿 x 和 y 方向的偏导数 $f_x(i,j)$ 和 $f_y(i,j)$ 分别为:

$$f_x(i,j) = (I(i,j+1) - I(i,j) + I(i+1,j+1) - I(i+1,j))/2$$

$$f_y(i,j) = (I(i,j) - I(i+1,j) + I(i,j+1) - I(i+1,j+1))/2$$

则每个像素点的梯度幅值 $M(i,j)$ 和梯度方向 $H(i,j)$ 为:

$$M(i,j) = \sqrt{f_x(i,j)^2 + f_y(i,j)^2} \quad (6)$$

$$H(x,y) = \arctan\left(\frac{f_y(i,j)}{f_x(i,j)}\right) \quad (7)$$

为了兼顾梯度幅值计算中准确的边缘定位和噪声抑制的要求, 选取在像素 8 邻域内通过计算 x 方向、 y 方向、 45° 方向、 135° 方向一阶偏导数有限差分来确定像素梯度幅值. 对应一个 3×3 的模板, 对 $M(i,j)$ 的所有元素沿梯度方向进行梯度幅值的插值, 对每个像素点, 将邻域中心元素 $M(i,j)$ 与沿梯度方向的两个梯度幅值插值结果进行比较, 如果 $M(i,j)$ 的值小于梯度方向上的两个插值结果, 则将 $M(i,j)$ 对应的边缘点标志位赋零值. 用高阈值 Hth 和低阈值 Lth 对经过非极大值抑制的梯度幅值进行处理, 将梯度值小于阈值的像素灰度值赋为零. 分割得到两个阈值边缘图像 $H(i,j)$ 和 $L(i,j)$, 在图像 $H(i,j)$ 中连接边缘轮廓, 连接到端点时, 在 $L(i,j)$ 中寻找弱边缘点, 填补图像 $H(i,j)$ 的边缘空隙. 这样, 就能准确的提取出采集图像的喷雾边缘.

3.3 喷雾边缘直线检测

提取喷雾边缘后, 需要得到喷雾边缘直线, 再根据直线位置、端点坐标等求得喷雾边缘直线夹角, 即为喷雾角. 为了得到喷雾边缘直线参数, 本文给出一种改进的霍夫变换的算法来高效的得到喷雾瞬态的喷雾边缘直线.

如图 3 所示, 在标准参数化方式下, 图像空间中的直线 1 表达为

$$d = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (d \geq 0, 0 \leq \theta < \pi) \quad (8)$$

式中: d 为 1 相对于原点的距离; θ 为 1 与 x 轴的交角. 根据式(8), 直线 1 上不同的点 (x,y) 在参数空间中被变换为一簇相交于 p 点的正弦曲线. 确定参数空间中的 p 点(局部最大值), 即实现了直线检测. 参数空间中, θ 在 $[0,\pi)$ 间均匀地取 M 个离散值, d 的采样个数为 Q , 则直线检测中的标准霍夫变换可表示为:

$$H(d_q, \theta_m) = \sum_{i,j=0}^{N-1} I(x_i, y_j) \Big|_{d_q - \frac{1}{2} \leq x_i \cos \theta_m + y_j \sin \theta_m < d_q + \frac{1}{2}} \quad (9)$$

(M=0,1,...,M-1; q=0,1,...,Q-1)

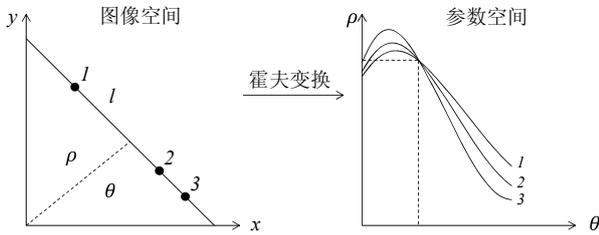


图 3 直线检测中的霍夫变换

由于喷雾下端会产生明显的汽化拖影和阴影，导致模糊和虚边的现象，因此我们只选取与喷嘴最近的两条直线进行喷雾角的计算。这样就需要对检测出的直线进行筛选，首先根据边缘提取结果确定喷嘴位置中心，选取与其距离最近的两个端点，找到这两个端点所在直线即可找出另外两个端点，并进行标记。由此，即可准确、快速的得到喷雾边缘的直线位置、直线端点坐标等参数，根据这些参数即可计算出喷雾角和喷雾偏转角度。

4 系统实验分析

4.1 汽化损失检测

系统上电后，使用 GDI 喷油器喷射汽油，设置喷射脉宽为 1.5ms，周期为 1000ms，使用流量计测出喷雾流量为 187.5mg/pulse。喷雾 5min，脉冲 300 次，得到喷出燃油总质量为 56.25g。

将集油盘放置于喷油器正下方，距离 100mm，收集喷射出的燃油，用电子天平称重得到质量为 34.7g，因此可以得出喷雾汽化损失为 21.55g，损失率约为 38.31%。

4.2 喷雾图像处理

选用 Phantom Miro M / LC120 的高速相机由背光照相机采集喷油器喷雾瞬态图像，选用 30×30cm 的 LED 面阵光源进行背光补光。设置曝光时间为 1μs，采集图像分辨率为 640×480，如图 4(a)所示。预处理后的图像如图 4(b)所示。

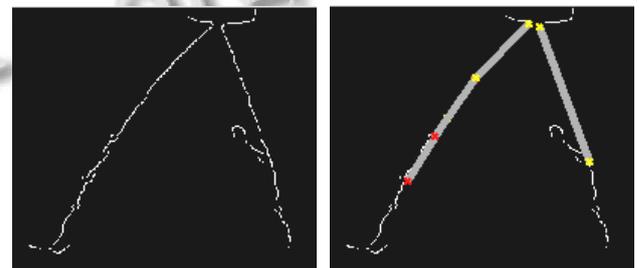
边缘提取、霍夫变换直线检测的结果如图 5 所示(仅喷雾区域)。选取距离喷雾嘴最近的两条直线，即以黄色标记点为端点的直线，测得黄色标记点坐标分别为(330,48)、(365,12)、(372,14)、(405,104)，这样即可计算出左右两条直线的斜率分别为 k1=1.029,

k2=2.717，由此可以得出喷油器喷雾角 $\theta_s = 64.33^\circ$ ，喷雾偏转角度 $\theta_B = 12.03^\circ$ 。



(a) 喷雾瞬态图 (b) 预处理后的喷雾瞬态图

图 4 喷雾图像处理



(a) 边缘提取 (b) 直线检测

图 5 边缘提取、霍夫变换直线检测的结果

在同温同压下，进行 10 次喷雾瞬态图像采集，并计算喷雾角、喷雾偏转角，如表 1 所示。根据表 1 测得的数据绘制曲线图，如图 6 所示，可以看出数据浮动很小，则此检测方法可行。

表 1 喷雾角与偏转角检测数据

喷雾角与偏转角检测(环境压力 100KPa±5KPa, 环境温度 21°C±2.0°C)					
次数	1	2	3	4	5
$\theta_s / ^\circ$	64.33	64.17	64.62	63.97	64.46
$\theta_B / ^\circ$	12.03	12.14	12.33	12.18	12.57
次数	6	7	8	9	10
$\theta_s / ^\circ$	64.73	64.17	64.38	64.29	64.86
$\theta_B / ^\circ$	11.89	12.42	11.81	12.01	12.13

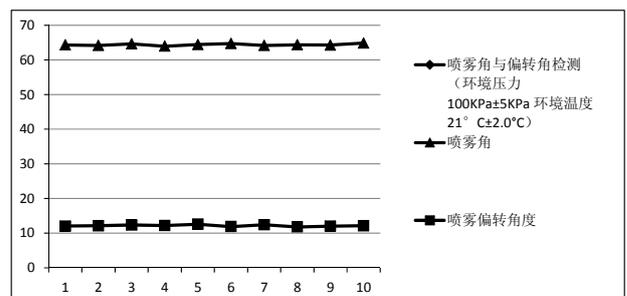


图 6 数据分布曲线图

由此可以得出结论,在喷油器喷雾损失较大的情况下,可以采用本文提出的喷雾角检测方法来进行检测,检测数据稳定、可靠。

5 结语

本文提出一种 GDI 喷油器喷雾瞬态的喷雾角检测方法,并根据此方法搭建喷雾角检测系统,对汽化损失进行测量,并在汽化损失较大的情况下进行喷雾角的检测。在同温同压下进行十次测量所得结果稳定、可靠。由此,本系统可以应用于喷雾汽化损失较大的喷油器喷雾角的检测。

对于 GDI 这类汽化损失较大的喷油器来说,一般的机械式分布器检测方法是无法准确的检测到其喷雾角的。但是其喷雾雾化效果更好,喷雾的瞬间可以生成一个明显的喷雾边界,因此可以采用图像法对喷雾角进行检测。霍夫变换是图像处理中从图像中识别几何形状的基本方法之一,应用广泛。本文应用霍夫变换来从喷雾瞬态图像中分离出喷雾边缘的几何形状,将检测到的边缘表示为直线形式。再根据检测到的直线、端点坐标等参数求得喷雾边缘直线所成的夹角角度,这个角度即为喷雾角,这样再由喷雾偏转角度的定义即可同时得到喷雾偏转角。

使用本系统检测 GDI 喷油器喷雾瞬态的喷雾角,方便快捷、准确度高,可实际应用于喷油器喷雾特性的检测,是喷油嘴对于燃油燃烧质量的鉴定依据。

参考文献

- 1 Sae J. 2715-2007, Gasoline fuel injector spray measurement and characterization. Surface Vehicle Recommended Practice, SAE International. 2007.3.
- 2 Reitz RD, Bracco FB. On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions. SAE Technical Paper, 1979.
- 3 Hiroyasu H, Arai M. Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines. Trans. JSAE, 1980, 21(5): 11.
- 4 Ilavsky J, Allen A J, Long GG, et al. Influence of spray angle on the pore and crack microstructure of plasma-sprayed deposits. J. Am. Ceram. Soc., 1997, 80(3): 733-742.
- 5 陈永亮.灰度图像的直方图均衡化处理研究[学位论文].合肥:安徽大学,2014.
- 6 陈文飞,许雪峰,苗作华,李康顺.亮度自适应的保熵直方图均衡化方法.计算机工程与应用,2012,16:157-161.
- 7 罗颖昕.雾天低对比度图像增强方法的研究[学位论文].天津:天津大学,2003.
- 8 李锦,王俊平,万国挺,李紫阳,许丹,曹洪花,张广燕.一种结合直方图均衡化和 MSRCR 的图像增强新算法.西安电子科技大学学报,2014,3:103-109.
- 9 王贵彬.基于 Canny 算子与形态学融合的边缘检测算法[学位论文].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- 10 何新英,王家忠,孙晨霞,常淑惠,周桂红.基于数学形态学和 Canny 算子的边缘提取方法.计算机应用,2008,2:477-478,483.
- 11 周晓明,马秋禾,肖蓉.基于 Canny 算子的改进的图像边缘检测方法.影像技术,2008,4:17-20.
- 12 王小俊,刘旭敏,关永.基于改进 Canny 算子的图像边缘检测算法.计算机工程,2012,14:196-198,202.
- 13 许宏科,秦严严,陈会茹.一种基于改进 Canny 的边缘检测算法.红外技术,2014,3:210-214.
- 14 张英涛,黄剑华,唐降龙,刘家锋.一种基于精简粒子群优化的霍夫变换算法.天津大学学报,2011,2:162-167.
- 15 邱桑敏,夏雨人.一种快速霍夫变换算法.计算机工程,2004,2:148-150.
- 16 张会章,张利霞,郭雷.用霍夫变换来提取目标边界.计算机应用,2003,S1:117-119.