

航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量研究

伍文锋, 吴建华, 钟柳花, 游 江
(成都航利(集团)实业有限公司, 成都 610000)

摘要: 喷雾锥角的大小直接影响到燃料在燃烧室空间的分布特性。为解决传统的人工测量喷雾锥角方法的精度较低、重复性较差等难题, 拟采用基于计算机视觉与图像处理技术, 运用 MATLAB/GUI 软件的强大图像处理功能设计出航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量系统, 实现可视化界面操作。结果表明: 该系统处理速度较快、精度较高, 可减轻人工判读的繁琐工作量, 对于质量较差的图像, 可通过人工判读, 减弱系统读取误差对试验结果的影响。

关键词: 航空发动机; 燃油喷嘴; 喷雾锥角; 计算机图像视觉

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.012

Research on Aeroengine Fuel Nozzle Spray Angle Measurement

WU Wen-feng, WU Jian-hua, ZHONG Liu-hua, YOU Jiang
(Chengdu HOLY (Group) Industrial Co., Ltd, Chengdu 610000, China)

Abstract: The spray cone angle size directly affects the distribution characteristics of fuel in the combustion space. In order to solve the problem of the traditional manual detection methods with low precision, poor repeatability, powerful image processing function of MATLAB/GUI software were used to design aircraft engine fuel nozzle spray angle measurement system with computer vision and image processing technology, and realize the visual interface of the program. The results show that the faster processing speed and high intensive reading of the system can reduce the onerous workload of manual interpretation. The influence of system read errors on the result of the experiment is reduced by artificial interpretation when the image quality is poor.

Key words: aeroengine; fuel nozzle; spray coneangle; digital image processing

0 引言

喷雾锥角的大小将影响燃料与空气混合、燃烧性能、火焰形状等。在航空发动机中, 喷雾锥角主要根据火焰筒的结构尺寸确定, 不但影响燃烧效率, 而且关系到火焰筒的使用寿命, 其角度过大, 喷雾会喷溅至火焰筒壁上, 在高温下逐渐聚积为垢状积炭, 使火焰筒局部过热损坏^[1]。其角度太小, 则导致燃烧不充分。因此必须提高喷嘴雾化角度的测试精度。

随着图形图像处理技术^[2-4]的应用以及可视化技术的发展, 精准的现代检测方法已逐渐取代依靠传统目测方法, 其不仅能够降低试验者的劳动强度、提高喷嘴锥角的检测效率, 也提高检测结果的精确度。张

恒敢等将图像处理的方法运用于检测小麦的外观, 黄晓峰等将图像处理技术初步运用在喷嘴检测上。

本文提出基于计算机图像视觉方法, 运用 MATLAB/GUI 软件强大图像处理功能设计出航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量系统。

1 现有的雾化角度测量方法

喷雾锥角与产品的光洁度、外形尺寸密切相关, 因此, 经常使用图像法和机械式探针法检测。图像法指通过数码相机采集喷雾图像, 然后利用计算机对拍摄图像进行测量计算, 求得其角度值。机械式探针法(如图 1 所示)是在雾锥轴平面距离喷口的一定距离处, 在雾锥的两旁分别设置 1 根探针, 探针位于同一

收稿日期: 2016-12-07

作者简介: 伍文锋(1982)男, 工程师, 主要从事航空发动机燃油喷嘴类产品的研制工作; E-mail:wuwenfeng@sccdholly.com。

引用格式: 伍文锋, 吴建华, 钟柳花, 等. 航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 69-73. WU Wenfeng, WU Jianhua, ZHONG Liuhua, et al. Research on aircraft engine fuel nozzle spray angle measurement[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 69-73.

水平面内,测试时将探针以直线方式移向雾流的中心线直至探针刚好接触到雾锥外围,由于测试是在雾锥轴平面进行的,可以将雾锥视为 1 个 2 维平面,其测量的数据既可以是角度和倾斜度,也可以是距离中心线的直线距离。图像法指的是在所拍摄的照片上通过约定的某点做两切线,由两切线的夹角求得雾化锥角^[5];或者在 2 条边界上对应选取 4 个点,单侧 2 点做 1 条直线,两直线夹角即为雾化锥角^[6]。该方法具有较大的主观性和局部性,不能根据喷雾的实际情况,最优逼近喷雾角的真实值。

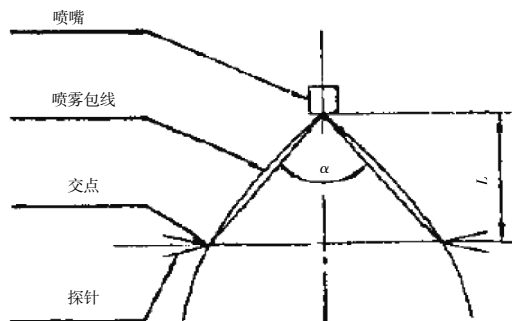


图 1 机械式探针法

2 基于 matlab 雾化角度测量方法

提出基于计算机图像视觉技术,运用 MATLAB/GUI 软件强大图像处理功能设计出航空发动机燃油喷嘴雾化角度测量系统(如图 2 所示),对航空发动机燃油喷嘴喷雾图像进行降噪滤波、二值化等预处理,并提取其边缘图像,再基于最小二乘法原理对边缘图像进行边界拟合,拟合的 2 条射流夹角即为喷雾锥角。依据最小二乘拟合原理,该方法所求得直线误差平方和最小,从而大大提高雾化锥角的确定精度。

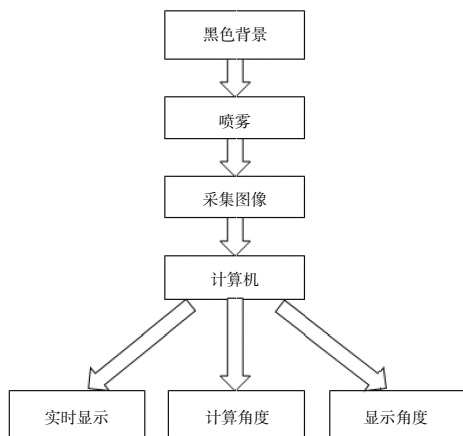


图 2 喷雾锥角测量系统

2.1 图像采集

常用的图像采集方法有以下 3 类:

(1) 数码相机获取静态图像

该方法操作简易,获得的图像质量清晰度高,可移动性较强;缺点是可能会因光照的不均匀使得图像产生阴影,或因人工操作导致图像倾斜等现象。

(2) 扫描仪获取图像法

该方法获得的图像光照均匀,分辨率高;缺点是过高的分辨率会影响图像处理速度,且对于估计形态参数并无帮助。

(3) 摄像机采集动态图像

通常是将摄像机固定在试验箱支架上,通过图像采集卡将数字影像传入计算机中,操作者通过计算机来观察动态的图像,根据情况采集所需的静态图像。该方法图像传输速度和采集速度都比较快,图像所占内存小。但是该方法的缺点是存在光照不均匀问题,且还需要图像尺寸来作为参照标准。

可根据这 3 类图像采集方法的特点以及实际应用需求来选择合适的图像采集方式^[7]。本文根据试验台状况选用数码相机法。

2.2 图像预处理

图像预处理主要包括图像的降噪滤波、图像的分割、边界提取等,通过图像的预处理能够获得高质量的图像,为喷雾图像角度的检测做好准备。如图 3~5 所示。

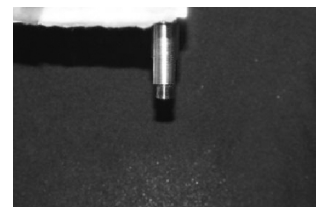


图 3 背景图像

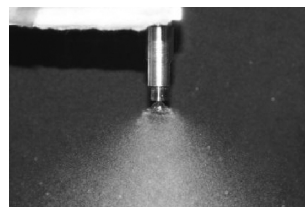


图 4 原喷雾图像

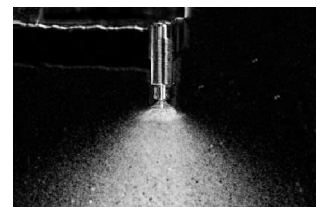


图 5 开运算去除背景

2.2.1 开运算去除背景

在拍摄喷雾瞬间图像时,光线经过背景板与油滴粒子时会因反射作用使图像产生亮度不均匀现象,这对图像分割影响很大。因此,采用开运算减去背景法来消除亮度不均,以利于图像后续处理。假设原图像函数为 $f(x,y)$,背景图像函数为 $h(x,y)$,则减去背景图像后的图像函数为 $g(x,y)=f(x,y)-h(x,y)$ 。

2.2.2 降噪滤波

图像的降噪滤波(如图 6 所示)主要有均值滤波和中值滤波 2 类。均值滤波是典型的线性滤波算法,是指在图像上对目标像素给 1 个模板,该模板包括了其周围的临近像素,再用模板中的全体像素的平均值来代替原来像素值。中值滤波的基本原理是把数字序列中 1 个点的值用该点的 1 个领域中各点的中值代替,让周围的像素值接近真实值,从而消除孤立的噪声点。

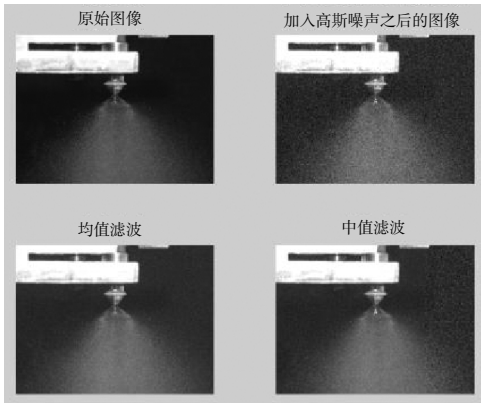


图 6 滤波去噪

Matlab 系统自带的滤波函数可有效抑制加性噪声,但容易引起图像模糊。因此,通过对自带的滤波函数进行改进,避开对喷雾图像边缘的平滑处理。经过比较,均值滤波效果优于中值滤波效果,因此,本系统选用自己编制的均值滤波函数进行滤波处理。

均值滤波部分关键代码

```
function d=avgfilter(x,n)
A(1:n,1:n)=1;
[height,width]=size(x);
x1=double(x);
x2=x1;
for i=1:height-n+1
for j=1:width-n+1
C=x1(i:i+(n-1),j:j+(n-1)).*A;
S=sum(sum(C));
x2(i+(n-1)/2,j+(n-1)/2)=S/(n*n);
end
end
D=uint8(x2)。
```

2.2.3 图像分割

喷雾图像的分割(如图 7 所示)^[8-9]指的是把背

景和液滴区别开来。常用的图像分割原理是将图像灰度分成多个不同等级,通过设置阈值来确定有意义的区域。

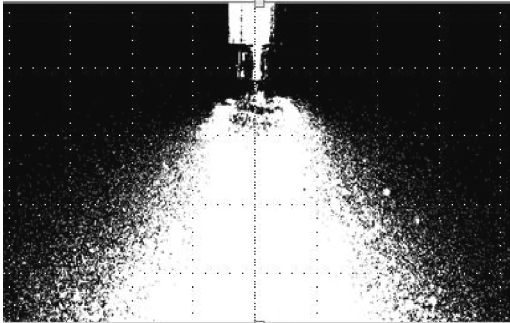


图 7 图像分割

图像阈值化处理的变换函数表达式为

$$g(x,y)=\begin{cases} 0, f(x,y)\geq T \\ 255f(x,y)<T \end{cases} \tag{1}$$

根据喷雾图像中油滴与背景灰度的分布规律,基于误差率最小原则计算得到边界分割的最优阈值。

2.2.4 边缘提取

通过对二值化处理后的喷雾图像进行边缘检测来求得雾化边界线。常用的边缘检测算法主要有:Canny 算子、Sobel 算子(如图 8 所示)、Robert 算子(如图 9 所示)以及 Prewitt 算子(如图 10 所示)等。

1	0	-1	1	1	1
1	0	-1	0	0	0
1	0	-1	-1	-1	-1

图 8 Sobel 算子模板

1	0	0	1
0	-1	-1	0

图 9 Robert 算子模板

1	2	1	1	0	1
0	0	0	2	0	-2
-1	-2	-1	1	-1	-1

图 10 Prewitt 算子模板

Robert 边缘检测算子是 1 种利用局部差分算子寻找边缘算子。

$$\begin{aligned} & \{[\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{(f(x+1,y+1))}]^2 + \\ & [\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{(f(x+1,y+1))}]^2\}/(1/2) \end{aligned} \tag{2}$$

Prewitt 通过加大边缘检测算子的模板来计算差分算子,使得其在检测边缘的同时还能够抑制噪声带来的影响。Sobel 算子采用带权的方法计算差分算子,

既能检测边缘数据点,也可以进一步抑制噪声影响,但其检测边缘比较宽。

Canny 算子是基于寻找图像梯度的局部极大值来进行边缘检测,梯度是通过计算高斯滤波的倒数求得。该方式选用 2 个阈值分别检测强、弱边缘,当强弱边缘相连时,弱边缘才会被包含在输出当中。此方法能够检测到真正的弱边缘。如图 11 所示。

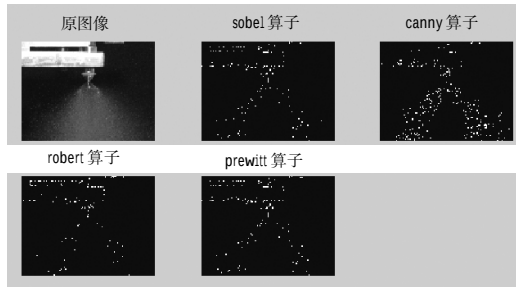


图 11 边缘检测

综合比较,Canny 算子的处理效果优于其他算子,因此,选用 Canny 算子对喷雾图像进行边缘处理。

2.3 边界拟合及雾化锥角求解

2.3.1 基于最小二乘法拟合

采用最小二乘法原理实现喷雾锥角的边界拟合,其原理是通过求得最小化误差的平方和寻找数据最佳函数匹配。分别对左右边界(x_i-y_i), $i=1,2,3,\dots,n$,直线 $y=ax+b$ 做回归分析。确定回归系数 a,b 需采用最小二乘法,即 Q 最小。

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (3)$$

2.3.2 雾化锥角求解

由上求得 a,b 后,根据方程

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

可求得两侧射流线夹角

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2}{n-2}} \quad (5)$$

最小二乘法部分关键代码

```
function data=function_slope(x,y)
xy_mean=mean(x.*y);
x_mean=mean(x);
y_mean=mean(y);
x2_mean=mean(x.^2);
```

```
y0=y(1);
x0=x(1);
k=(xy_mean-y0*x_mean-x0*y_mean+x0*y0)/
(x2_mean-2*x0*x_mean+x0^2);
a=k;
b=y0-k*x0;
data=[a,b];
end
```

雾化锥角求解如图 12 所示。

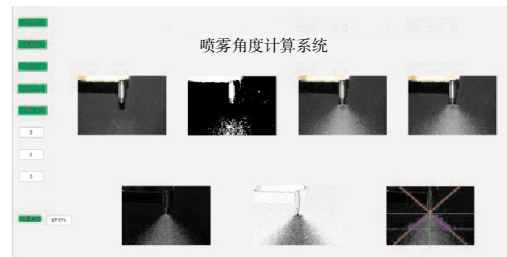


图 12 雾化锥角求解

3 结论

航空发动机燃油喷嘴雾化角度是衡量雾化质量的 1 项重要指标,因此,必须提高其雾化锥角的检测精度。本文就以往的雾化角检测方法中较难测定其测试精度的问题,提出基于计算机视觉技术测量喷雾锥角,利用 MATLAB 强大的图形处理功能对喷雾图像进行滤波去噪、图像分割边缘提取,基于最小二乘法原理对喷雾边界进行拟合,得到最逼近喷雾实际射流边界的 2 条直线,最终得到误差平方和最小的雾化锥角,使得雾化锥角的检测精度大大提高。

参考文献:

- [1] 张春霞.航空燃气涡轮发动机喷嘴制造工艺[M].北京:国防工业出版社,1965:116-175.
ZHANG Chunxia. Aviation gas turbine engine nozzle manufacturing process[M].Beijing:National Defence Industry Press,1965:116-175. (in Chinese)
- [2] 黄晓峰,周子民,彭伟,等.图像处理在发动机喷嘴性能检测中的应用[J].计算机测量与控制,2006,14(7):861-863.
HUANG Xiaofeng, ZHOU Jiemin, PENG Wei, et al. The application of image processing in the engine nozzle performance [J].The Computer Measurement and Control, 2006, 14(7): 861-863. (in Chinese)
- [3] 孔德英.发动机燃烧室喷嘴油雾角度的图像仿真实验研究[D].西安:西北工业大学,2007.
KONG Deying. The engine combustion chamber nozzle angle of Oilmist image simulation experment research [D].Xi'an:Northwestern Polytech-

- nical university,2007. (in Chinese)
- [4] Gandhi A H, Meinhart M A.A comparison of cone angle measurement techniques for the fuel spray from a port fuel injector[C]//Triennial Annual Conference on Liquid Atomization and spray Systems, Vail, Colorado Associated University Press, USA,2009:443-449.
- [5] 陈熙. 环形出口截面的离心喷嘴的简单分析[J]. 力学学报, 1978(4): 332-339.
CHEN Xi. The simple analysis of centrifugal nozzle exit in a circle[J]. Journal of Mechanics,1978(4):332-339.(in Chinese)
- [6] 胡传胜,熊洪亮,虞先煌. 喷嘴液滴雾化细度和喷雾角测量装置的研究[J]. 能源研究与信息,2001,17(4):225-231.
HU Chuansheng,XIONG Hongliang,YU Xianhuang. Nozzle droplets atomization fineness and spray angle measuring device [J].Energy Research and Information,2001,17(4):225-231. (in Chinese)
- [7] 张恒敢,杨四军,顾克军. 应用数字图像处理获得小麦籽粒外观特征参数的方法及其 Matlab 实现[J]. 江苏农业科学,2005,33(1):28-30.
ZHANG Henggan,YANG Sijun,GU kejun. Application of digital image processing for the grain appearance characteristic parameter method and Matlab [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2005,33 (1):28-30. (in Chinese)
- [8] 谢凤英,赵丹培. VisualC++ 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008:9.
XIE Fengying,ZHAO Danpei. VisualC++ digital image processing[M]. Beijing:Electronic Industry Press,2008:9. (in Chinese)
- [9] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. 数字图像处理[M]. 2 版. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007:8.
Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. Digital image processing [M]. 2 ed. RUAN Qiuqi,YUAN Yuzhi translation, et al, tra Beijing:Electronic Industry Press,2007:8. (in Chinese)
- (编辑:张宝玲)