基于小孔投影面积的平面栅极间距测量方法 *

陶翰中，方 宇，杨 皓，张汝枭，宁业衍

（上海工程技术大学 机械与汽车工程学院，上海 201620）

摘 要：栅极间距是影响推力器离子束流的发散角、推力大小的关键参数，为了解决栅极组件在装配过程中栅极间距自动检测的技术难题，针对栅极孔径的特殊结构和光线传播的特性，建立了栅极间距和小孔面积的数学模型，提出了基于机器视觉的非接触式平面栅极间距检测方法并搭建试验平台。选取栅极中心孔位进行35次重复试验，该方法的标准差为12μm，具有较高的重复精度。精度验证试验结果表明，该系统精度高于±20μm，满足离子推力器装配过程中的栅极间距测量要求，在实际应用中有望替代现有人工检测方法。

关键词：离子推力器；栅极间距；机器视觉；间距测量；非接触式测量

中图分类号：TN206 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2022）06-210063-06

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 210063

Measurement Method of Plane Grid Gap Based on Hole Projection Area

TAO Han-zhong，FANG Yu，YANG Hao，ZHANG Ru-xiao，NING Ye-yan

（School of Mechanical and Automotive Engineering，Shanghai University of Engineering Science，Shanghai 201620，China）

Abstract：The grid gap is a key parameter affecting the dispersion angle and power of the thruster. In order to solve the technical problem of automatic grid gap detection in the grid assembly process，the mathematical model of grid gap and small aperture area was established for the special structure of grid aperture and the characteristics of light propagation. The non-contact plane grid gap detection method based on machine vision was proposed and a test platform was built. The center hole of grid was selected for 35 repeated tests. The standard deviation of the method is 12μm，which has a high repeatability. The accuracy verification test results show that the accuracy of the system is higher than ±20μm，which meets the requirements of grid gap measurement during the assembly of ion thrusters and is expected to replace the existing manual inspection methods in practical applications.

Key words：Ion thruster；Grid gap；Machine vision；Spacing measurement；Non-contact measurement

1 引 言

离子推力器作为先进的大型桁架式卫星平台的电推器，主要应用于通信卫星的位置保持和轨道转移、深空探测航天器推进等任务中[1]。栅极组件是离子推力器产品的核心部件，其功能是引出并加速放电室离子产生推力，栅极间距直接决定了离子推力器性能、寿命及可靠性的核心组件。栅极组件主要

* **收稿日期**：2021-01-29；**修订日期**：2021-03-04。

基金项目：上海市松江区科技攻关项目（20SJKJGG08C）；上海市高水平应用技术大学创新平台建设项目。

作者简介：陶翰中，硕士生，研究领域为精密检测。

通讯作者：方 宇，博士，教授，研究领域为智能装备与精密检测。

引用格式：陶翰中，方 宇，杨 皓，等. 基于小孔投影面积的平面栅极间距测量方法[J]. 推进技术，2022，43(6)：210063.（TAO Han-zhong，FANG Yu，YANG Hao，et al. Measurement Method of Plane Grid Gap Based on Hole Projection Area[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2022，43(6)：210063.）

由屏栅极、加速栅极及其它结构件组成，栅极间距减小将影响离子束流的发散角、推力大小，增大电子返流阈值、加重栅极腐蚀，更严重的是会增大栅极打火概率，甚至接触短路导致推力器关机，所以栅极组件在装配时进行间距检测具有十分重要的意义[2-4]。

在栅极组件间距检测的理论上研究方面，兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室建立了 LIPS-300 离子推力器有限元分析热模型和等效无孔平板模型，对栅极边缘有约束和无约束两种情况下的栅极热变形进行了仿真，并对 30cm 离子推力器三栅极组件工作时的热变形量进行了模拟计算[5-7]。在技术开发方面，NASA（National Aeronautics and Space Administration）利用带探头的高精度步进电机，通过接触测量了双栅极的栅极间距变形，测量精度为 25μm，该方法假设栅极组件间距满足预设，主要目的在于测量栅极组件热变形情况[8]。美国喷气试验室设计的氦氖激光检测系统对环境要求极为严苛[9]。美国航天航空航天公司（The Aerospace Corporation）的 Pollard 在推力器侧前方放置镜子，通过远距显微镜拍摄镜子的反射成像，测量 T5 离子推力器栅极的热变形量，通过角度计算，测量精度较低[10]。NASA 对上述问题进行了改进，使用远距显微镜配合固定的探针进行测量[11]，将检测结果对比分析其精度不超过 25μm，而且无法测量三栅极组件的间距[12]。国防科技大学和兰州空间技术物理研究所改进了探针法，提出可检测三栅极组件热态间距的探针安装方案，基于摄像测量原理，利用亚像素定位方法提高了测量精度，开发了栅极组件中心位置热态间距的高精度、接触式在线测量系统[13]。兰州空间技术物理研究所针对栅极组件装配过程中的栅极间距检测设计了用导电金属材料制成的台阶轴塞规，基于栅极孔径的特殊性，通过塞规的前端面是否接触到加速栅极来判断被测栅极组件的栅间距是否满足精度范围[14]。

上述方法的主要研究对象是热变形产生的热态间距变化值，主要用于单一孔位高精度的在线测量，不适用于检验栅极组件装配过程中栅间距指标的自动化检测。目前缺少测量一致性高的、能够快速遍历全部栅极孔的非接触式栅极间距检测方法。本文提出一种面向装配过程中的栅极组件平面间距测量方法，基于栅极孔径尺寸特殊性，建立光学模型，得到栅极间距和小孔投影面积的数学关系，通过机器视觉方法实现投影面积的轮廓检测，从而得出栅极间距。

2　测量方法

2.1　平面栅极测量原理

图 1 为离子推力器示意图，图 2 为剖视图。双栅极离子推力器栅极组件由屏栅极（S）和加速栅极（A）组成，其中双层栅极间距为 l_g，屏栅极厚度为 l_s，加速栅极厚度为 l_a，屏栅极孔直径为 d_s，加速栅极孔直径为 d_a。

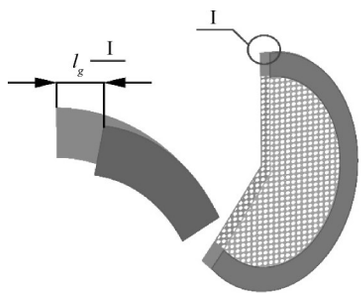


Fig. 1　3D Schematic diagram of the grid gap

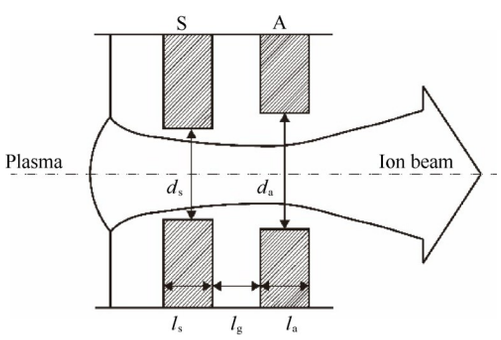


Fig. 2　Schematic diagram of the grid component

测量原理如图 3 所示，该方法主要原理基于加速栅极和屏栅极存在孔径差的特殊性，通过平行光源将栅极孔投影到成像屏中，继而通过对小孔投影的形态变化来计算栅极间距的尺寸。

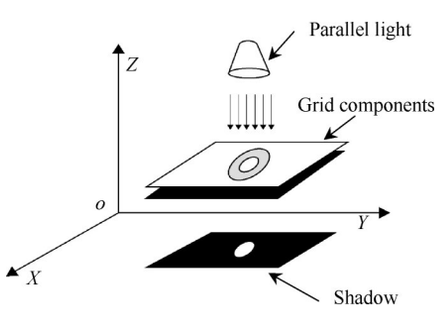


Fig. 3　Measurement schematic diagram

该原理的光学模型基本假设如下：投射光源为无穷远，投射光束可被视为彼此之间平行；不考虑漫射、反射以及折射。基于以上假设，在投射光源的照

射下，仅有不被上下两层栅极遮挡的小孔空间能够形成投影区域。两层栅极孔在切平面垂直光源方向存在重叠空间，通过电动旋转滑台控制栅极平面垂线和平行光源入射光线的夹角θ，当θ=0°时平行光线与栅极表面垂直为检测初始角度，如图4(a)所示。当0°<θ<θ_{max}时，小孔投影面积由加速栅极孔决定，如图4(b)所示。当θ_{max}<θ时，加速栅极形成的投影形态将被屏栅极遮挡，小孔投影如图4(c)所示。当栅极表面中垂线与平行光线夹角θ=θ_{max}时可得出栅间距l_g如式(1)所示。

$$l_g = \frac{(d_a - d_s)\mathrm{ctan}\theta_{max}}{2} - l_a \tag{1}$$

由式(1)可知判定θ_{max}为确定栅极间距l_g的关键。分别将加速栅极和栅极组件固定于Z轴高精度旋转滑台，记录小孔投影面积S和栅极旋转角度θ，得到映射关系$f:S\rightarrow\theta$。通过直方图二分法设定面积差阈值，加速栅极与栅极组件投影面积差值大于阈值时，得到待测组件的旋转角度θ_{max}，从而建立小孔投影面积与栅极间距的数学关系。

实际测量时，相机采集图像序列实时传送到计算机，光斑边缘轮廓使用Canny算法检测提取，重叠空间形成的面积通过最小二乘法进行拟合，提取高精度测量对照组和测量组的实时面积，对图像进行矫正和放大系数进行标定。本文开发的数字图像处理软件集成了图像处理和计算功能，可实现栅极间距的实时和自动化在线检测和输出。

2.2 小孔投影图像处理

根据图像采集系统的参数性能及测量对象，选取合适的边缘轮廓提取算子。首先进行滤波处理和图像二值化，然后对像素级边缘进行准确检测，提取小孔投影像素面积。

2.2.1 图像分割

考虑到栅极组件图像的特点和处理的便利性，将采集到的小孔图像转化为二值图像。为得到更好的阈值分割效果，在二值化图像之前对图像进行光模式移除背景。本文使用过滤器创建背景模式，使用大内核尺寸的模糊技术，对图像中的光模式进行近似，式(2)中threshold函数通过直方图二分法选取最佳阈值为(60,255)[15]，背景移除和阈值处理的结果如图5所示。

$$I(x,y) = \begin{cases} 0, \text{ if } I(x,y) < \text{threshold} \\ 1, \text{ if } I(x,y) > \text{threshold} \end{cases} \tag{2}$$

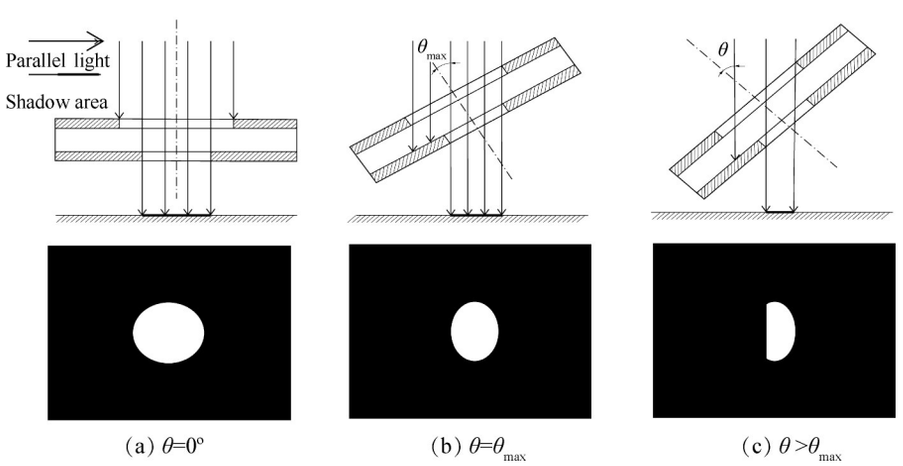
2.2.2 小孔轮廓抽取和像素面积测量

为了精确测量小孔投影面积，需要对图像分割后进行轮廓抽取。在二值图像处理后，对于投影成像的圆形、椭圆形和被栅极表面遮挡形成的不规则图形，使用连通组件和查找轮廓技术从图像中提取出现目标的对象区域。基于拟合的亚像素定位法抗干扰性强、检测精度高，最重要的一点是该算法适用于简单边缘的处理。在本文中采用三次多项式拟合亚像素提取，根据图像边缘梯度方向的灰度值，利用三次多项式$f(x)=ax^3+bx^2+cx+d$，进行最小二乘法拟合，并根据拟合出的曲线来确定亚像素点的位置，在小孔边缘取4个梯度取向进行三次多项式拟合[16]。检测到对象后，在黑色零值图像上绘制白色对象，用1值绘制掩膜图像，从而可通过对轮廓内所有值求和来计算像素面积。

3 平面栅极间距检测试验

3.1 试验平台搭建

针对本文提出的方法搭建的试验平台如图6示意所示，平行光源用于背光照明，提高边缘轮廓对比



(a) θ=0° (b) $\theta=\theta_{max}$ (c) $\theta>\theta_{max}$

Fig. 4 Shadow effect of grid components at different angles

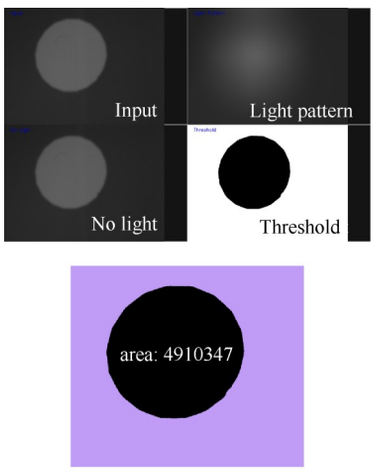


Fig. 5　Image preprocessing and area measurement

度，消除边界效应，待检测工件通过夹具固定于高精度伺服滑台，成像屏幕固定在栅极件后方，屏幕采用白色半透明材质便于相机采集数据，远心镜头配合平行光源使用，在一定物距范围内降低镜头畸变，可保证测量精度[17]。根据投影面积调整栅极组件的位置和角度，使平行光源射入方向和成像的屏幕平面垂直，试验平台实物图如图 7 所示。测量软件基于 QT 平台开发，由标定模块、在线测量模块、离线测量模块及数据显示保存模块构成。

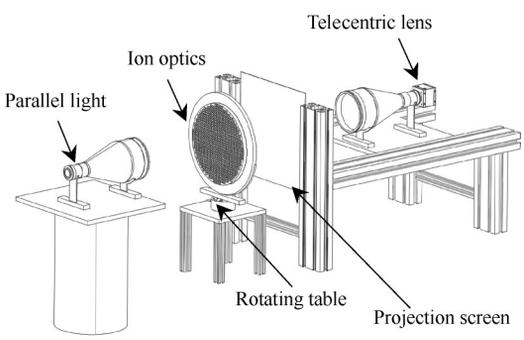


Fig. 6　Ion optics gap measurement system

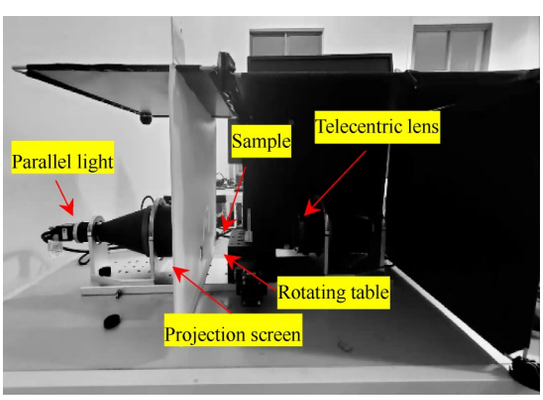


Fig. 7　Detecting distance assembly

3.2　对比性试验

栅极组件的平面间距检测标准为：每个栅极孔对应的屏栅极和加速栅极间距测量范围为 0~1mm，Z 向测量精度不低于 10μm，栅极间距计算结果精度不低于 20μm。本文选取栅极中心孔位进行试验验证，且该方法可适用全部栅极孔位的栅极间距测量。

为验证测量系统的精确性和测试数据的可靠性，本文设计了两组对比试验：(1)选用规格为 10μm 的针规，与利用本文研究的方法进行栅极孔径测量对比试验。(2)确认孔径精度可靠后，再选用 Z 轴精度为 4μm 的高精度线激光传感器进行栅间距测量，并与本文方法进行对比。两组对比试验均随机抽取 35 个栅极孔位进行试验数据采集。

3.3　试验数据分析

选取结构尺寸满足测量要求的零件作为待测件，使用针规检测 35 次，再利用本文搭建的试验系统对该样零件测量 35 次，测量值的散点如图 8 所示，基于样本大小的均值图和误差图如图 9 所示。

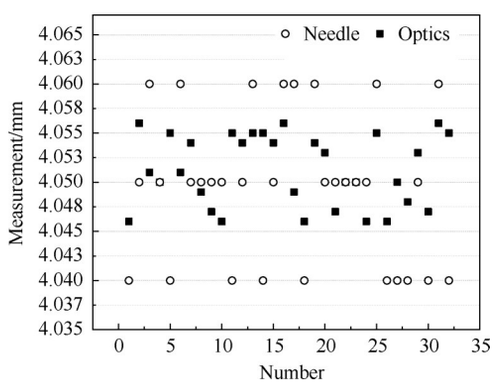


Fig. 8　Satter plot of grid aperture measurements

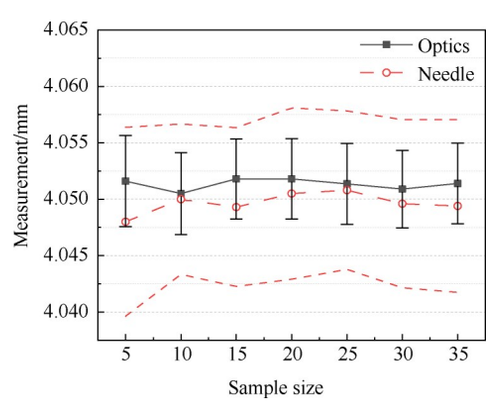


Fig. 9　Mean and error maps of grid apeture based on sample size

由图 9 可知，本文所使用的图像处理算法得到孔径值的平均值和误差值均低于使用针规的人工检验

方法。

在栅极间距检测试验部分，选取上下层间距为 1 mm 的检测样件，使用线激光扫描仪在 35 个孔位进行检测，再利用上述系统对该样品测量，栅极间距测量值的散点图如图 10 所示，测量数据的均值图和误差如图 11 所示。

基于视觉测量的数据全部处于±20μm 偏差范围之内，其标准差约为 12μm，避免了人为主观性影响，在 20μm 的要求阈值条件下，本文的测量方法与线激光的检测结果一致（见表 1）。基于视觉的检测精度不低于 20μm，能够满足栅极组件的检验要求，试验结果可靠，该系统检测效率高于人工塞规检测方法和线激光检测方法。

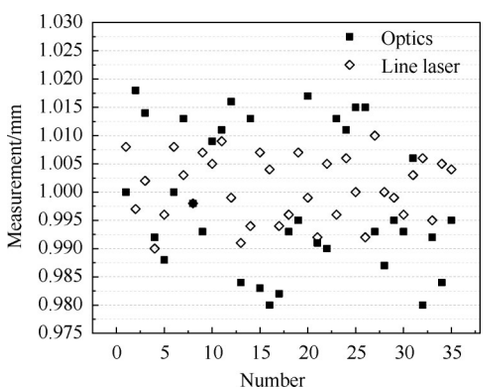


Fig. 10　Satter plot of grid gap measurements

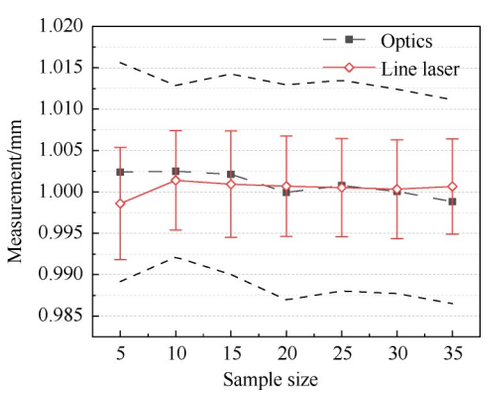


Fig. 11　Mean and error maps of grid gap based on sample size

Table 1　Main measurements parameters of ion grid gap

Parameter	Optics	Laser
Sample size	35	35
Average measurement/mm	0.998	1.000
Minimum measurement/mm	0.98	0.99
Median measurement/mm	0.995	1.000
Max measurement/mm	1.018	1.010

4　结　论

本文提出了一种基于标定小孔投影面积的离子推力器栅极间距自动测量方法并开展了相关试验平台的搭建工作，得到结论如下：

（1）本文通过平行光源和栅极孔径特殊的结构特性，将上下两层栅极孔重叠空间投影为阴影面积，建立栅极间距和小孔投影面积的数学模型，结合机器视觉对小孔形态进行测量，实现了非接触式栅极间距测量。

（2）精度验证试验结果表明，该方法满足在±20μm 精度条件的检验要求，测量精度可达 5μm，标准误差为 12μm，检验结果可避免人工因素干扰。

（3）该方法配合相应的自动化装置则可以提高离子推力器栅极组件的装配检测效率，有望替代现有栅极组件装配过程中的栅极间距人工检验方法。

本文目前只针对面向装配过程中的平面双层栅极间距检测进行了理论和试验研究，后续将针对拱面栅极组件和三层栅极组件的数学模型开展进一步研究。

致　谢：感谢上海市松江区科技攻关项目、上海市高水平应用技术大学创新平台建设项目的资助。

参考文献

[1] 毛根旺，韩先伟，杨　涓，等. 电推进研究的技术状态和发展前景[J]. 推进技术，2000，21(5)：1-5.（MAO Gen-wang，HAN Xian-wei，YANG Juan，et al. Research State of Electric Propulsion and its Development Prospect[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2020，21(5)：1-5.）

[2] 梁　栋，袁杰红，周仕明，等. 离子推力器栅极热变形的摄像测量方法[J]. 推进技术，2019，40(4)：953-960.（LIANG Dong，YUAN Jie-hong，ZHOU Shi-ming，et al. Videometrics Measurement Method of Grid Thermal Deformation of Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2019，40(4)：953-960.）

[3] Wirz R E，Katz I，Goebel D M，et al. Electron Back Streaming Determination for Ion Thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*，2011，27(1)：206-210.

[4] Farnell C C. Performance and Lifetime Simulation of Ion Thruster Optics[D]. *Colorado*：*Colorado State University*，2007.

[5] 孙明明，张天平，王　亮. 30cm 口径离子推力器热特性模拟分析[J]. 真空与低温，2014，20(3)：158-162.

[6] SUN Ming-ming，JIA Yan-hui，HUANG Yong-jie，et al. Study on the Influence of Three-Grid Assembly Ther-

mal Deformation on Breakdown Times and an Ion Extraction Process[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(6): 138-147.

[7] 孙明明, 张天平, 贾艳辉. 30cm离子推力器栅极组件热形变位移分析研究[J]. 真空与低温, 2017, 23(6): 349-354.

[8] MacRae G S, Zavesky R J, Gooder S T. Structural and Thermal Response of 30cm Diameter Ion Thruster Optics [C]. *Monterey*: *Proceedings of* 25*th Joint Propulsion Conference*, 1989.

[9] Trava-Airoldi V J, Garner C E, Pivirotto T J, et al. An Optical Technique to Measure Ion Engine Grid Distortion due to Differential Thermal Expansion [C]. *Orlando*: *Proceedings of* 21*st International Electric Propulsion Conference*, 1990.

[10] Pollard J, Welle R. Thrust Vector Measurements with the T5 Ion Engine[C]. *San Diego*: *Proceedings of* 31*st Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1995.

[11] Soulas G C, Frandina M M. Ion Engine Grid Gap Measurements[C]. *Florida*: *Proceedings of* 40*th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.

[12] Diaz E M, Soulas G C. Grid gap Measurement for an NSTAR Ion Thruster[C]. *Princeton*: *Proceedings of* 29*th International Electric Propulsion Conference*, 2005.

[13] 袁杰红, 梁　栋, 周仕明, 等. 离子推力器栅极组件热态间距测量系统研制[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 51-58.

[14] 唐福俊. 一种用于离子推力器栅极组件的栅间距测量方法和测量具[P]. 中国专利: 201410449605.9, 2014-12-24.

[15] 张　军, 张治恒, 朱新山. 基于极坐标系下二维直方图的图像分割算法[J]. 天津大学学报, 2018, 51(6): 658-665.

[16] 段能全, 曾志强, 张川川, 等. 小尺寸传火孔直径图像精确测量技术研究[J]. 包装工程, 2014, 35(19): 88-92.

[17] 孙国栋, 徐　昀, 徐　亮, 等. 不均匀光照和重影的仪表图像二值化方法[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 74-78.

(编辑:梅　瑛)