DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.013　　文章编号：1000-128X(2023)04-0090-08

基于改进Canny算法的受电弓碳滑板边缘检测方法

杨　君，郭佑民，王建鑫，赵鸿亮
（兰州交通大学 机电技术研究所，甘肃 兰州　730000）

摘　要：针对传统边缘检测算法对碳滑板边缘进行检测时存在提取不准确、不连续和易受噪声影响等问题，文章提出一种基于改进Canny算法的受电弓碳滑板边缘检测方法。首先，使用各项异性扩散和双边滤波相结合的级联滤波器代替原算法中的高斯滤波器对图像进行去噪，提高算法对多种混合噪声的平滑能力，并采用伽马变换突出图像的边缘特征；采用Scharr算子确定边缘梯度幅值；引入Otsu算法改进原算法中高低阈值需人为设定的不足，使算法在确定双阈值时拥有更好的自适应性；最后利用形态学思想和Zhang-Suen细化算法对边缘轮廓进一步完善，消除边缘中可能出现的细微空洞。试验结果表明，改进后的算法相较于传统算法能更准确地提取碳滑板的边缘信息，并且具备较强的自适应性与抗干扰性，为受电弓碳滑板的后续检测提供了有效的理论支持。

关键词：受电弓碳滑板；Canny算法；级联滤波器；Scharr算子；Otsu算法；Zhang-Suen细化
中图分类号：TP391.7；U264.3^{+}4　　**文献标识码：**A

An edge detection method of pantograph carbon slide based on an improved Canny algorithm

YANG Jun, GUO Youmin, WANG Jianxin, ZHAO Hongliang

(Institute of Mechanical and Electrical Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Aiming at the problems of inaccurate extraction, discontinuity and being susceptible to noise when the edge of a carbon slide is detected by using a traditional edge detection algorithm, an edge detection method of pantograph carbon slide based on an improved Canny algorithm was proposed in the paper. Firstly, the cascade filter with a combination of anisotropic diffusion and bilateral filter was used instead of the Gaussian filter in the original algorithm to denoise the image and improved the algorithm's ability to smooth various mixed noises. Gamma transformation was used to highlight the edge features of the image. Scharr operator was used to determine the gradient magnitude of the edges. Otsu algorithm was introduced to overcome the drawback of manually setting the high and low thresholds in the original algorithm, making the algorithm have better adaptability in determining the dual thresholds. Finally, the edge contour was further improved with morphological ideas and the Zhang-Suen refinement algorithm to eliminate possible subtle voids in the edges. The experimental results show that the improved algorithm can extract the edge information of the carbon slide more accurately than the traditional algorithm, and has strong adaptability and anti-interference, which provides effective theoretical support for the subsequent detection of the pantograph carbon slides.

Keywords: pantograph carbon slide; Canny algorithm; cascaded filter; Scharr operator; Otsu algorithm; Zhang-Suen refinement

---

基金项目：国家自然科学基金资助项目（72061021）
通信作者：郭佑民（1968—），男，教授，硕士生导师，主要从事载运工具运用、车辆工程方面的研究；E-mail: 342995841@qq.com
引用格式：杨君, 郭佑民, 王建鑫, 等. 基于改进Canny算法的受电弓碳滑板边缘检测方法[J]. 机车电传动, 2023(4): 90-97.
Citation: YANG Jun, GUO Youmin, WANG Jianxin, et al. An edge detection method of pantograph carbon slide based on an improved Canny algorithm[J]. Electric drive for locomotives,2023(4): 90-97.

0　引言

“受电弓–接触网”系统是电气化铁路重要组成部分[1]，而受电弓碳滑板作为电力机车的核心受流部件，其状态直接影响着电力机车是否能够正常运行。本世纪初，国内外的专家学者对碳滑板的自动化检测做了大量的研究，先后提出光纤检测、激光检测和超声波检测等方法[2]，为受电弓碳滑板检修提供了更加高效的检测手段。随着技术的进步，上述方法的局限性越来越多，主要体现在精度不足、成本较高和鲁棒性差等问题。近年来，越来越多的学者开始尝试将计算机视觉技术引入到机车碳滑板检修行业中，文献[3]提出使用线激光与计算机视觉结合的方式去检测碳滑板厚度，该方法使用线激光扫描碳滑板，对激光条纹拼接后获取碳滑板轮廓，并结合相机标定最终计算出碳滑板磨耗度；文献[4]提出了一种基于仰拍受电弓碳滑板的图像检测系统，该方法使用小波边缘检测提取碳滑板的多像素边缘轮廓，再通过两步腐蚀算法对多像素边缘进行细化，进而得到较为理想的碳滑板边缘信息；文献[5]提出使用2个立体相机分别从2个不同角度对碳滑板进行拍摄，从而提取出碳滑板的边缘部分与基准点，再运用三角测量法计算出三维坐标，并以此为基准，根据与其拟合直线的差值，即可计算出误差小于1 mm的磨耗量。这些研究表明基于计算机视觉的边缘检测技术已经成为受电弓碳滑板状态检测的重要方法之一。目前使用最为广泛的边缘提取算法主要有Prewitt算法、Robert算法、Sobel算法、Canny算法等，其中Canny算法同时融合了图像抑噪、阈值筛选和边缘优化等思想，由于其优越的边缘检测性能从而成为了碳滑板边缘检测的首选方法。文献[6]提出使用Canny算法来提取碳滑板轮廓信息，在提取信息时首先使用灰度拉伸对原图像的对比度进行增强，引入灰度形态学运算消除图像中的极值噪声点，最后使用传统Canny算法提取碳滑板的边缘轮廓信息；文献[7]通过引入梯度幅值直方图的均方差，从而提出高低阈值可根据不同图像特点进行自主确定的自适应Canny算法，将其应用于碳滑板的边缘检测，并提取出了较为清晰的边缘轮廓；文献[8]对Canny算法进行了改进和简化，其引入y轴方向的偏导数增强了弱边缘的检测灵敏度，并取消了双阈值边缘连接，得到的碳滑板边缘轮廓较为完整，但检测结果容易受噪声影响。受限于现有算法的局限性，目前碳滑板边缘检测仍存在定位精度欠准现象。因此，本文提出一种改进的Canny算法，该算法在提取碳滑板边缘信息时有更高的定位精度、更强的抗噪能力，并可抑制无关的虚假边缘，进而提取出较为精确的碳滑板边缘，为电力机车受电弓碳滑板的实时状态监测提供有效的理论支撑。

1　传统Canny算法原理与分析

1.1　传统Canny算法原理

Canny边缘检测算法由John F. Canny于1986年提出，他在提出该算法的同时还提出了著名的边缘检测三原则[9]：低错误率原则、边缘定位高精度原则、单边缘响应原则。由于该算法优越的边缘提取能力，自提出以来就被广泛应用于数字图像处理领域，成为图像边缘检测时的标准流程。算法的检测流程主要包括4部分[10-11]：

①使用高斯滤波器对输入原图像进行降噪，滤除原图像中可能存在的高斯噪声，提高图像质量；

②使用2×2邻域内一阶偏导数的有限差分来确定像素点梯度幅值和方向；

③对上一步的计算结果进行非极大值抑制，以此筛选出边缘候选点；

④根据经验设定高、低双阈值，并对候选边缘点进行检测和边缘连接，从而得到最终的边缘轮廓图像[12]。

1.2　传统Canny算法局限性分析

现有Canny算法中的高斯滤波器对高斯噪声有较好的滤除效果，但若图像中存在混合噪声时，该滤波器去噪效果不佳。在计算图像梯度幅值时，原2×2模板对噪声较敏感，容易受噪声影响，从而造成漏检、误检真实边缘情况的发生。在进行双阈值检测和边缘连接时，需人为根据经验设定高低阈值，使得算法自适应性较差，往往不能达到理想的分割效果，并且边缘连接后还存在边缘缺口、毛刺等，从而影响最终边缘检测精度。

2　改进的Canny边缘检测算法

2.1　级联滤波器

为解决原算法中高斯滤波器对混合噪声去噪效果不佳以及易抹去真实边缘的缺陷，本文提出一种各项异性扩散方程（Perona-Malik Filter）和双边滤波（bilateral filter）相结合的级联滤波器对原算法中的滤波器进行改进，使滤波器拥有更好的去噪能力的同时兼顾更好的保边性能。各项异性扩散也称P-M扩散，是一种基于线性热传导方程推导而来的图像滤波器[13]，其特点是在图像的梯度突变较小的部分能够使函数均匀扩散，从而达到去噪目的，而在边缘或纹理等梯度突变较大的部分抑制扩散，从而保留图像边缘。设原始灰度图像为u，各项异性扩散的表达式如下所示：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial u}{\partial t}=\operatorname{div}\left[c\left(|\nabla u|\right)\nabla u\right]\\&u\left(x,y,0\right)=u_0\left(x,y\right)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：div( )为散度；$c(\ )$为扩散系数，是图像梯度模$|\nabla u|$的非负函数；$u_0(x,y)$为原始灰度图像。

扩散系数$c(\ )$常用的表现形式为

$$c\left(|\nabla u|\right)=\mathrm{e}^{-\left(\frac{|\nabla u|}{k}\right)^2} \tag{2}$$

式中：k为常数项，用于控制对边缘的灵敏度。

最终的各项异性扩散滤波公式为

$$u_{t+1}=u_t+\lambda[c_{\mathrm{N}}\cdot\nabla_{\mathrm{N}}(u)+c_{\mathrm{S}}\cdot\nabla_{\mathrm{S}}(u)+c_{\mathrm{E}}\cdot\nabla_{\mathrm{E}}(u)+c_{\mathrm{W}}\cdot\nabla_{\mathrm{W}}(u)] \tag{3}$$

式中：t为迭代次数；λ为平滑系数，其数值越大，平滑程度越高；$\nabla_{\mathrm{N}}(u)$、$\nabla_{\mathrm{S}}(u)$、$\nabla_{\mathrm{E}}(u)$、$\nabla_{\mathrm{W}}(u)$分别为中心点在4个方向上的梯度，其中N、S、E、W分别为中心点上方、下方、右方、左方。

其中，

$$\left.\begin{aligned}\nabla_{\mathrm{N}}(u)&=u_{x,y-1}-u_{x,y}\\ \nabla_{\mathrm{S}}(u)&=u_{x,y+1}-u_{x,y}\\ \nabla_{\mathrm{E}}(u)&=u_{x-1,y}-u_{x,y}\\ \nabla_{\mathrm{W}}(u)&=u_{x+1,y}-u_{x,y}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

经过各项异性扩散滤波后，原始灰度图像中的噪声得到了初步滤除，并且图像中的边缘信息得以保留，使得滤波后的图像在后续边缘提取中相较于原始图像具有更大的优势。根据各项异性扩散的原理可知，在滤波时各项异性扩散模型的扩散系数只考虑了反映图像中相邻像素点灰度特征的梯度信息，并未考虑到各像素间几何邻近关系上的关联性。非线性的双边滤波器在相邻像素灰度特征的基础上考虑了像素空间域的影响，即双边滤波器同时考虑各像素值之间的几何邻近关系和灰度上的相似性。空间邻近度因子和灰度相似度因子的乘积构成双边滤波的权重，其表达式如下所示：

$$\left.\begin{aligned}U(i,j)&=\frac{\sum\limits_{(i,j)\in\Gamma}\left[\omega_{\mathrm{s}}(i,j)\cdot\omega_{\mathrm{r}}(i,j)\cdot u(i,j)\right]}{\theta}\\ \theta&=\sum_{(i,j)\in\Gamma}\left[\omega_{\mathrm{s}}(i,j)\omega_{\mathrm{r}}(i,j)\right]\\ \omega_{\mathrm{s}}(i,j)&=\mathrm{e}^{-\frac{(i-x)^2+(j-y)^2}{2\sigma_{\mathrm{s}}^2}}\\ \omega_{\mathrm{r}}(i,j)&=\mathrm{e}^{-\frac{[u(i,j)-u(x,y)]^2}{2\sigma_{\mathrm{r}}^2}}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：Γ为中心领域内像素的坐标集合；$U(i,j)$为输出图像；$u(i,j)$为当前位置像素点(i,j)的像素值；$u(x,y)$为中心点(x,y)的像素值；θ为归一化因子；$\omega_{\mathrm{s}}(i,j)$，$\omega_{\mathrm{r}}(i,j)$分别为像素点(i,j)处的邻近度系数和灰度相似度系数；σ_{s}和σ_{r}分别为邻近域标准差和灰度域标准差。

通过将各项异性扩散和双边滤波相结合组成级联滤波器，从而确保在对受电弓碳滑板原始图像进行滤波时，离中心像素点空间距离越近、灰度值差异越小的邻域像素对最终的滤波结果的贡献越大，使得级联滤波器具备更强的“去噪保边”能力。此外，本文还引入了伽马变换进一步增强图像的整体细节，使得图像的边缘信息更加突出，伽马变换公式为

$$G(x,y)=cU(x,y)^{\gamma} \tag{6}$$

式中：$U(x,y)$为输入图像；$G(x,y)$为输出图像；c为灰度伸缩系数，一般设为1；γ为伽马因子。

对于伽马变换，当$\gamma>1$时，可提高原图像中灰度较高部分的对比度；当$\gamma<1$时，可提高原图像中灰度较低部分的对比度。变换示意图如图1所示。

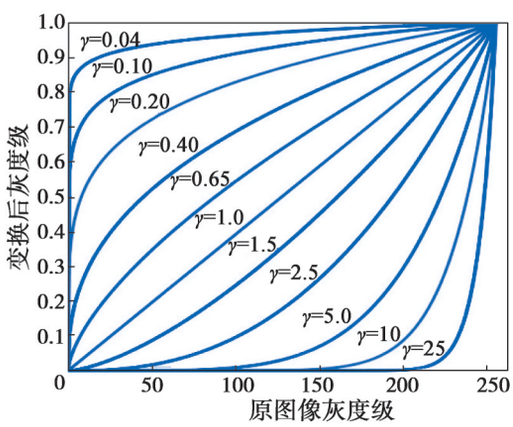


图1 伽马变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gamma transformation

经伽马变换函数处理后的碳滑板图像灰度层级更加明显，边缘特征得以加强，更利于后期边缘提取。

2.2 梯度幅值算子的改进

原算法中使用2×2大小的模板来计算图像的梯度幅值与方向，此方法能提取较为细小的边缘，但对可能未滤除的噪声点极为敏感。文献[14]引入Sobel算子的模板代替原算法中使用的2×2模板，使得算法抗噪能力提升、运算速度提高，但Sobel算子对弱边缘提取效果不佳，容易造成弱边缘的漏检。本文将3×3的Scharr算子作为梯度计算模板，Scharr算子是对Sobel算子的改进，主要是通过放大模板的权重系数来提高各像素间的差异性。通过引入Scharr算子使梯度计算兼顾了较好的抑噪能力、较高的弱边缘检测能力，同时提升运算速度。Scharr算子的内核如下所示：

$$S_x=\begin{bmatrix}3&10&3\\0&0&0\\-3&-10&-3\end{bmatrix}$$

$$S_y=\begin{bmatrix}3&0&-3\\10&0&-10\\3&0&-3\end{bmatrix}$$

为防止因模板权重系数增大而导致的梯度幅值范围过大，本文在计算梯度分量时通过加入梯度抑制因子来缩小梯度范围。经卷积运算后分别得到水平方向的梯度分量V_x与垂直方向分量V_y，具体如下式所示：

$$V_x=\eta\{[3U(i-1,j)+10U(i-1,j+1)+3U(i-1,j+1)]-[3U(i+1,j-1)+10U(i+1,j)+3U(i+1,j+1)]\} \tag{7}$$

$$V_y=\eta\{[3U(i-1,j-1)+10U(i,j-1)+3U(i+1,j-1)]-[3U(i-1,j+1)+10U(i,j+1)+3U(i+1,j+1)]\} \tag{8}$$

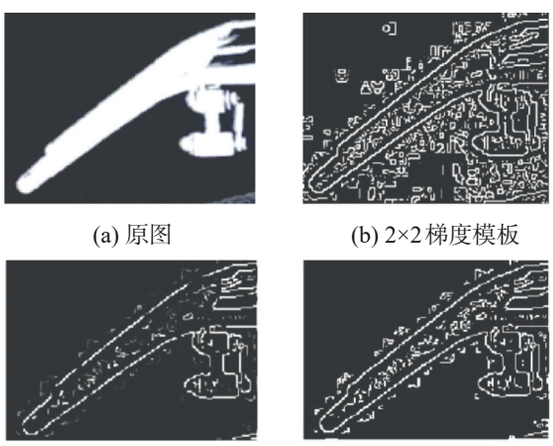
式中：U为输入图像；η为梯度抑制因子，$\eta\in(0,1)$。

根据式(7)和式(8)，可得到梯度幅值V和方向θ：

$$V=\sqrt{V_x^2+V_y^2} \tag{9}$$

$$\theta=\arctan(V_y^2/V_x^2) \tag{10}$$

选取部分左弓角图像对本文算法进行验证，对比结果如图2所示。由图2可知，本文所提方法更能真实反映左弓角实际情况。



(a) 原图　(b) 2×2梯度模板　(c) 文献[14]方法　(d) 本文方法

图2　梯度计算对比

Fig. 2　Comparison of gradient calculations

2.3　Otsu算法确定双阈值

Otsu算法又称大津阈值分割法[15]，在运算时可根据图像的灰度分布特点自主确定灰度分割阈值，并将图像分为灰度差异较大的2部分，其中小于灰度阈值的被称为图像前景，大于灰度阈值的被称为图像背景。灰度阈值由2部分图像的类间方差确定，当类间方差达到最大值时，图像的分割效果最佳，此时的最大类间方差被视为最佳分割阈值。碳滑板边缘信息主要表现为灰度和梯度与图片背景信息的较大差异，依此特点，运用Otsu算法可以将碳滑板边缘信息从原图像中很好地分割出来。

将经过非极大值抑制的梯度图像作为输入图像，设其尺寸为$M\times N$，其灰度级为0~(t−1)，将图像按灰度值分为Q0类和Q1类，其中灰度级为[0, k]，为Q0类，灰度级为[k+1, t−1]，为Q1类，则有：

$$p_i=\frac{n_i}{M\times N} \tag{11}$$

$$P_0=\sum_{i=0}^{k}p_i \tag{12}$$

$$P_1=1-P_0 \tag{13}$$

$$u_0=\sum_{i=0}^{k}\left(\frac{p_i\cdot i}{P_0}\right) \tag{14}$$

$$u_1=\sum_{i=k+1}^{t-1}\left(\frac{p_i\cdot i}{P_1}\right) \tag{15}$$

式中：n_i为灰度级i的像素点数；p_i为灰度级i的概率；P_0、P_1分别为Q0类和Q1类出现概率；u_0、u_1分别为Q0类和Q1类的平均灰度级。

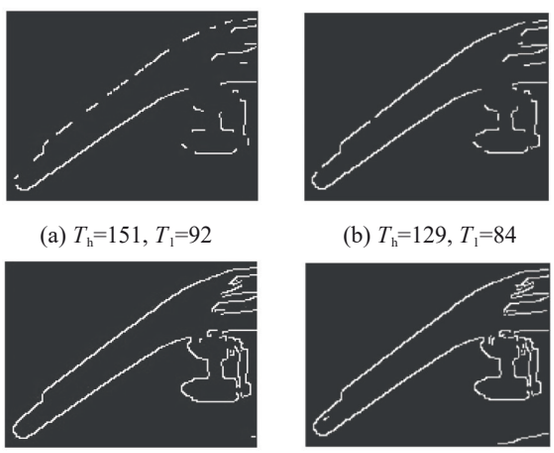
图像的平均灰度级u可表示为

$$u=\sum_{i=1}^{t}\left(p_i\cdot i\right)=P_0u_0+P_1u_1 \tag{16}$$

图像的类间方差δ_b^2为

$$\delta_b^2=P_0(u_0-u)^2+P_1(u_1-u)^2 \tag{17}$$

遍历整个图像后得到最大类间方差$\max\{\delta_b^2\}$即为最佳分割阈值，并将此作为高阈值T_h，低阈值T_l为$0.5T_h$。本文选取部分左弓角图像对算法性能进行对比验证，对比结果如图3所示。



(a) T_h=151, T_l=92　(b) T_h=129, T_l=84　(c) T_h=74 , T_l=37　(d) Otsu分割效果

图3　阈值分割效果对比

Fig. 3　Comparison of threshold segmentation effects

图3(a)~图3(c)为多次人工选取阈值时的部分结果，由这些图片可以看出，图3(c)的边缘分割效果最理想；图3(d)为Otsu算法分割效果，其结果最接近理想的分割效果。综上，引入Otsu算法后使改进后的Canny算法具备了双阈值设定的自适应性，从而使算法能以更高的效率提取更加准确的边缘。

2.4　改进的边缘连接

初步提取到的受电弓碳滑板边缘由于前期滤波影响还存在少许细微空洞，因此利用形态学膨胀算法对边缘进行膨胀，以连接细微空洞。形态学运算是一种基于集合论分析图像特征的图像处理方法[16]，本文使用形态学思想中的灰度膨胀运算对初始边缘进行膨胀，膨胀运算定义式为

$$U(x,y)=\mathrm{dilate}[g(x,y),B]=\max\{g(x-x',y-y')+B(x',y')|(x',y')\in D_B\} \tag{18}$$

式中：$U(x,y)$为膨胀后图像；$g(x,y)$为输入图像；B为膨胀结构元素。

本文使用3×3大小的结构元素，其结构如图4所示。

0	1	0
1	1	1
0	1	0

图4　膨胀结构元素

Fig. 4　Expansion structure elements

经膨胀运算后原边缘的细微空洞被填补形成完整的多像素边缘线条，还需要对多像素边缘进行细化得到单像素边缘轮廓，本文使用Z-S（Zhang-Suen）细化算法对边缘轮廓进行细化[17-19]。待输入图像为二值图像，算法每一次迭代对中心像素八邻域内所有“1”值像素进行运算，八邻域像素排列次序见图5。

m9	m2	m3
m8	m1	m4
m7	m6	m5

图5　八领域像素次序图

Fig. 5　Eight domain pixel order diagram

定义A(m1)为从m2开始依照像素排列次序顺时针记录像素值从“0”到“1”的转换次数，具体顺序为m1→m2→m3→m4→m5→m6→m7→m8→m9→m2；定义B(m1)为像素m1邻域内像素值为0的像素点数。

边缘轮廓细化分为2个步骤：

步骤1：当同时满足下面4个条件时，则将m1视为可剔除点：

① A(m1)的值为“1”；

② 2≤B(m1)≤6；

③ m2、m4和m6中至少存在1个像素值为“1”的像素点；

④ m4、m6和m8中至少存在1个像素值为“1”的像素点。

步骤2：当同时满足下面4个条件时，则将m1视为可剔除点：

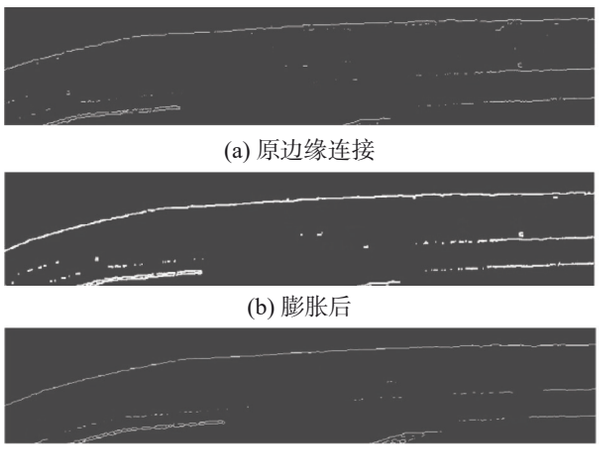
① A(m1)的值为“1”；

② 2≤B(m1)≤6；

③ m2、m4和m8中至少存在1个像素值为“1”的像素点；

④ m2、m6和m8中至少存在1个像素值为“1”的像素点。

通过对输入二值图像反复运行步骤1和步骤2，直到图像不再发生变化时计算终止，本文选取部分碳滑板边缘进行边缘连接验证，试验结果如图6所示。



(a) 原边缘连接

(b) 膨胀后

(c) Z-S细化后

图6　边缘连接对比

Fig. 6　Comparison of edge connections

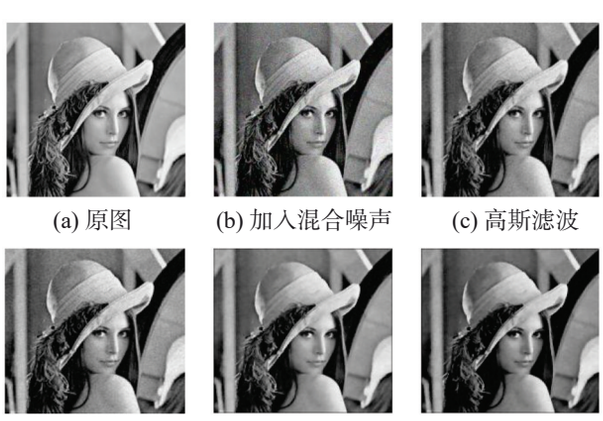
由试验结果可得，相较于原边缘连接算法，经Z-S算法细化后得到的受电弓碳滑板轮廓为连续的、准确的单像素边缘轮廓。

3　试验结果及分析

为验证改进的Canny算法在受电弓碳滑板边缘检测方面的抗噪性与边缘提取效果，试验选取现场采集的部分真实数据，并在MATLAB2021b的环境下进行试验仿真分析。

3.1　滤波器平滑试验

试验选取经典的Lena图对各算法的抑噪性能进行对比，在试验前首先对原图像添加方差$\sigma=0.03$的高斯噪声与噪声密度$d=0.01$的椒盐噪声，然后使用滤波核边长$h=5$、$\sigma_S=0.5$的高斯滤波器和最常用的中值滤波器对加噪图像进行滤波，并与本文提出的级联滤波器作对比，如图7所示。



(a) 原图　(b) 加入混合噪声　(c) 高斯滤波

(d) 中值滤波　(e) 级联滤波器　(f) 伽马变换

图7　噪声平滑试验

Fig. 7　Noise smoothing experiment

由图7可知，高斯滤波器对高斯噪声去噪效果较好，但无法去除其他噪声，整体去噪效果仍然欠佳；中值滤波对椒盐噪声抑噪效果较好，但对高斯噪声滤

除效果较差；本文提出的级联滤波器对原图像中的混合噪声具有较好的去噪效果，并且在去噪后很好地保留了原图像中的边缘特征，具备较强的去噪保边能力；对去噪图像进行伽马系数$\gamma=1.5$的伽马变换后，相较于原图像，变换后的新图像对比度提高，图中细节信息更加突出。

本文使用峰值信噪比（PSNR）对上述滤波效果进行评估。PSNR越大，则代表去噪后的图像所保留的信息量较大，图像中的噪声较少，算法的滤波性能越好，具体对比结果如表1所示。

表1　各算法PSNR值分析

Table 1　PSNR value analysis of each algorithm

参数项目	滤波方法				
	混合噪声	高斯滤波	均值滤波	级联滤波	伽马变换
PSNR(dB)	18.498 8	20.476 7	22.910 6	26.194 2	28.170 1
PSNR提高率/%		10.69	23.85	41.60	52.28

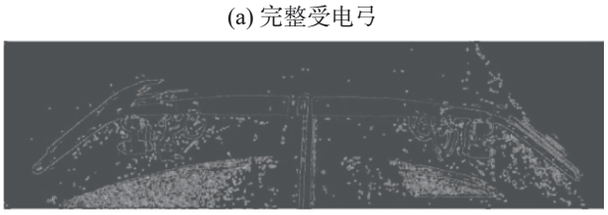
3.2　受电弓碳滑板边缘检测试验

本文依次选取完整受电弓、左半受电弓和右半受电弓3种图像对算法的边缘提取效果进行验证。

①完整受电弓试验结果对比如图8所示。



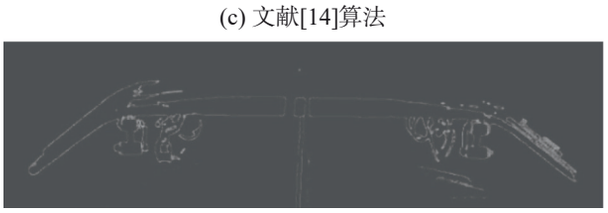
(a) 完整受电弓



(b) 传统Canny算法检测



(c) 文献[14]算法



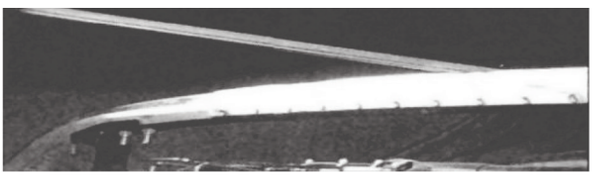
(d) 本文算法检测

图8　整体边缘检测对比

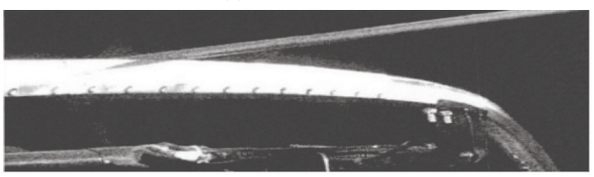
Fig. 8　Overall edge detection comparison

由图8可知，传统Canny算法提取的边缘受图像噪声影响严重，文献[14]算法检测出了部分无关虚假边缘，改进后的算法对图像中多种混合噪声具备有效的抑制作用，检测出的边缘更加完整清晰。

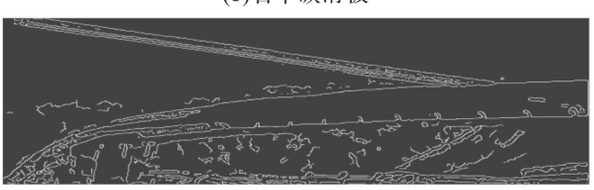
②左、右半碳滑板试验结果对比如图9所示。



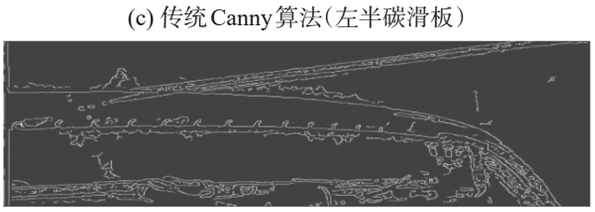
(a) 左半碳滑板



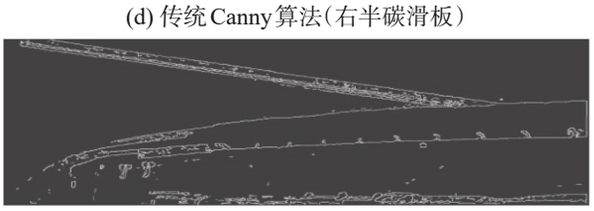
(b)右半碳滑板



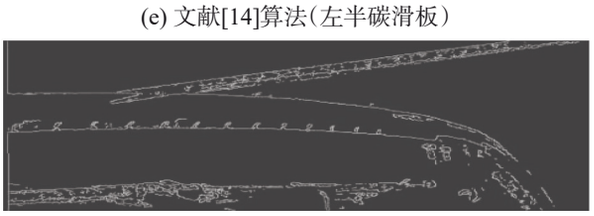
(c) 传统Canny算法（左半碳滑板）



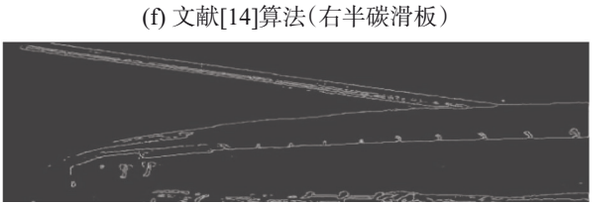
(d) 传统Canny算法（右半碳滑板）



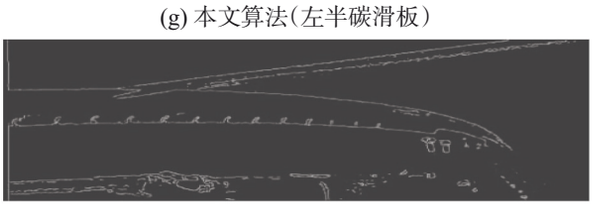
(e) 文献[14]算法（左半碳滑板）



(f) 文献[14]算法（右半碳滑板）



(g) 本文算法（左半碳滑板）



(h) 本文算法（右半碳滑板）

图9　左右半碳滑板边缘检测对比

Fig. 9　Comparison of edge detection for left/right carbon slider

从图9可知，相较于传统Canny算法，本文提出的改进型算法具备更强的抗噪性与更精准的边缘定位能力，有效克服传统算法因抑噪性能单一而导致的边缘信息定位不准确，易造成边缘误检的不足。

4 结束语

针对传统Canny算法在受电弓碳滑板边缘检测中存在的局限性，本文从噪声抑制、梯度幅值计算、双阈值自主确定、边缘连接等角度对原算法进行优化改进。试验结果分析表明，改进后的算法在噪声平滑和提高边缘定位精度方面相较于原算法均有明显提升，并且针对不同属性的图像都具有较强的自适应性，有效去除了检测结果中无关虚假边缘，从而实现对碳滑板边缘的准确定位；针对原算法无法连接边缘轮廓中细微空洞的不足，本文引入形态学膨胀算法和Z-S细化算法，从而填充了边缘中的细微空洞，使得最终检测出的边缘信息更加清晰且连续。

在后续研究中，笔者将在保证上述算法性能的基础上进一步简化算法构架，以提高算法的运行效率。

参考文献：

[1] 聂箫, 王锋, 王涛, 等. 霍夫变换在接触线磨耗检测算法中的应用[J]. 机车电传动, 2022(4): 140-145.
NIE Xiao, WANG Feng, WANG Tao, et al. Application of Hough transform in contact wire wear detection algorithm [J]. Electric drive for locomotives, 2022(4): 140-145.

[2] 韩志伟, 刘志刚, 张桂南, 等. 非接触式弓网图像检测技术研究综述[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 40-47.
HAN Zhiwei, LIU Zhigang, ZHANG Guinan, et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph-catenary monitoring[J]. Journal of the China railway society, 2013, 35(6): 40-47.

[3] 孙晓丽. 基于图像处理的机车受电弓滑板厚度检测系统研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
SUN Xiaoli. Research on the thickness detection system of pantograph slide plate based on image processing[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.

[4] 师鹏燕, 王黎, 高晓蓉, 等. 基于仰拍方式的受电弓滑板图像检测[J]. 机车电传动, 2010(1): 57-59.
SHI Pengyan, WANG Li, GAO Xiaorong, et al. The image detection of pantograph slide based on yang-shot mode[J]. Electric drive for locomotives, 2010(1): 57-59.

[5] 酒井雄人, 彭惠民. 受电弓滑板图像式测量装置的开发[J]. 国外机车车辆工艺, 2019(5): 18-21.
SAKAI T, PENG Huimin. Development of image measuring device for pantograph slide[J]. Foreign locomotive & rolling stock technology, 2019(5): 18-21.

[6] 黄艳红, 高晓蓉, 王黎, 等. 受电弓滑板磨耗检测图像处理算法的研究及实现[J]. 现代电子技术, 2009, 32(11): 191-194.
HUANG Yanhong, GAO Xiaorong, WANG Li, et al. Research and realization of image processing algorithm in pantograph slide abrasion detection[J]. Modern electronics technique, 2009, 32(11): 191-194.

[7] 胡雪冰. 基于图像处理的受电弓故障在线检测系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
HU Xuebing. Research on online detection system of pantograph fault based on image processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.

[8] 李永光, 李晨亮, 李立照, 等. 受电弓碳滑板病害边缘检测技术研究[J]. 中国铁路, 2018(6): 76-81.
LI Yongguang, LI Chenliang, LI Lizhao, et al. The study on the disease edge detection technology of pantograph carbon contact strip[J]. China railway, 2018(6): 76-81.

[9] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986, 8(6): 679-698.

[10] 徐灿, 张秋菊. 基于改进Canny算子的葵花籽边缘检测方法[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 36-38.
XU Can, ZHANG Qiuju. An edge detection for sunflower seeds based on improved Canny algorithm[J]. Food & machinery, 2015, 31(5): 36-38.

[11] 陈顺, 李登峰. 融合Canny算子和形态学的齿轮图像边缘检测研究[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 821-825.
CHEN Shun, LI Dengfeng. Edge detection of gear image based on Canny operator and morphology[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2020, 37(7): 821-825.

[12] 刘成刚, 刘二林, 姜香菊. 改进Canny算子的列车轮对踏面边缘检测算法[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 22-25.
LIU Chenggang, LIU Erlin, JIANG Xiangju. Edge detection algorithm of wheelset tread based on improved Canny operator[J]. Railway locomotive & car, 2021, 41(1): 22-25.

[13] 张心如, 周先春, 汪志飞, 等. 基于改进各向异性扩散的图像去噪算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 113-119.
ZHANG Xinru, ZHOU Xianchun, WANG Zhifei, et al. An improved anisotropic diffusion algorithm for the research of image denoising[J]. Electronic measurement technology, 2022, 45(17): 113-119.

[14] 王军, 林宇航, 贾玉彤, 等. 一种改进Canny算子的图像边缘检测算法[J/OL]. 小型微型计算机系统: 1-6. (2023-02-27) [2023-04-12]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/21.1106.TP.20230224.1729.017.html.
WANG Jun, LIN Yuhang, JIA Yutong, et al. An improved Canny operator based image edge detection algorithm[J/OL]. Journal of Chinese computer systems: 1-6. (2023-02-27) [2023-04-12]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/21.1106.TP.20230224.1729.017.html.

[15] 张鹏帆, 席剑辉, 朱琳琳. 基于梯度极值Otsu算法的Canny边缘检测改进[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(5): 58-65.

ZHANG Pengfan, XI Jianhui, ZHU Linlin. Improved Canny edge detection based on Otsu algorithm of gradient extremum[J]. Journal of Shenyang aerospace university, 2021, 38 (5): 58-65.

[16] 曹风云, 李东兴, 张华强, 等. 自适应多方向灰度形态学图像边缘检测算法[J]. 光学技术, 2016, 42(3): 234-238.
CAO Fengyun, LI Dongxing, ZHANG Huaqiang, et al. An algorithm of image edge detection based on adaptive multi-directions gray scale morphology[J]. Optical technique, 2016, 42(3): 234-238.

[17] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236-239.

[18] ARANA J. Angiografia digital[J]. Arquivos brasileiros de oftalmologia, 1995, 58(5): 381-383.

[19] 常庆贺, 吴敏华, 骆力明. 基于改进ZS细化算法的手写体汉字骨架提取[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(7): 107-113.
CHANG Qinghe, WU Minhua, LUO Liming. Handwritten Chinese character skeleton extraction based on improved ZS thinning algorithm[J]. Computer applications and software, 2020, 37(7): 107-113.

收稿日期：2023-05-21
修回日期：2023-06-29