

面向复杂道路环境的车道线快速检测方法

程文冬¹, 沈云波¹, 魏庆媛²

(1.西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710032; 2.哈尔滨石油学院 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要: 车道线检测时容易受到路面环境的干扰, 检测准确度与实时性不易保证。为此, 提出了基于稀疏网格和动态特征窗口(DFW)的车道线检测方法。首先在道路区域建立了稀疏网格区域, 然后提取了网格上的车道线灰度信息, 大幅度排除了冗余像素。利用车道线的方向特性, 提出了对称性六向梯度边缘检测方法, 进而采用椭圆膨胀元素建立了车道线 DFW。利用车道线方向和长度的显著特征, 提取了车道线特征边缘并对其进行了 Hough 直线拟合。在多样性的道路环境中进行了算法测试, 讨论了不同分辨率图像的车道线检测耗时。试验表明: 提出的算法简单、快速, 可以有效排除各类路面干扰像素, 能够鲁棒、准识别多种路面环境中的车道线。

关键词: 车道线检测; 稀疏网格; 动态特征窗口; 梯度边缘; Hough 变换

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2017)11-0187-04

A Fast Lane Detection Method Under Complex Road Environment

CHENG Wen-dong¹, SHEN Yun-bo¹, WEI Qing-yuan²

(1.School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Shaanxi Xi'an 710032, China;

2.School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Petroleum, Heilongjiang Harbin 150028, China)

Abstract: Lane detection would be interfered by road environment easily. The accuracy and the real-time performance of lane detection, as a result, is hard to be guaranteed. In this paper a robust lane detection method was proposed based on sparse grid and Dynamic Feature Window(DFW). The research purpose was to restrain the environment disturbance and to fulfill the real-time requirement. First of all a sparse grid was built up within the road region to extract lane information, and in the meanwhile, exclude the redundant pixels. Next a symmetrical six-direction gradient detection method, which takes advantage of the directional characteristics of lanes, was proposed to obtain DFW. Lane feature edges were then extracted by double threshold constraints of direction and length. Lane feature edges were finally modeled as straight lines by Hough transformation. The proposed algorithm was tested in various road environments, and moreover, the time consumption of different resolution images was discussed. Experimental results demonstrated that the algorithm could recognize the road lane robustly and rapidly. Most kinds of disturbance from road environment could also be excluded efficiently.

Key Words: Lane Detection; Sparse Grid; Dynamic Feature Window; Gradient Edge; Hough Transformation

1 引言

基于机器视觉的车道线检测是安全辅助驾驶、智能导航等领域的重要研究内容^[1]。由于各国结构化道路的建设法规不尽相同, 因此现有文献提出的车道线检测方法千差万别。道路环境干扰是制约车道线检测的一个共性问题, 如何在满足识别效率的前提下提升系统的抗干扰能力成为车道线检测研究的关键点。现有研究常从全局或局部 ROI(Region of Interest, 感兴趣区域)中获取像素的灰度、颜色、边缘梯度等特征信息^[2], 进而设定置信阈值来并排除环境干扰。在车道线边缘检测方面, 多运用基于灰度值梯度检测算子的方法获取车道线显著的梯度边缘, 进而将其描述为

数学模型。结合实际道路的曲率特征, 车道线模型主要包括直线模型^[3]、二次曲线模型^[4]和分段曲线拼接模型^[5]。非直线模型在曲率道路中具有更高的拟合精度, 但此类模型对车道线候选像素的需求量更大, 算法更复杂, 不利于提升系统检测的实时性。

无论在全局图像中还是 ROI 内, 冗余像素对车道线信息的初筛与模型拟合带来了很大的干扰和计算负担。传统的边缘检测算法没有考虑车道线在图像中的方向特征, 车道线边缘与环境边缘被作为等价目标同时进行检测, 增加了无意义信息的冗余性与干扰性。对此, 以抑制道路环境干扰、提升检测实时性为目标, 提出基于稀疏网格动态窗口(Dynamic Feature Window, DFW)的车

来稿日期: 2017-05-14

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1375); 西安工业大学校长基金项目(XAGDXJJ15006)

作者简介: 程文冬, (1981-), 男, 河北保定人, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 基于机器视觉的汽车安全辅助驾驶技术;

魏庆媛, (1983-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向: 机械设计与计算机集成技术

道线快速检测方法,主体思想是由全局范围像素逐级抽取目标特征,最终表达为车道线数学模型。

2 车道线 DFW

结构化道路监测图像中主要包括道路、天空和路边环境物,这三部分在检测图像中具有较强的分布规则性。可通过设置 ROI 来排除这些冗余像素信息。ROI 划分方案,如图 1 所示。图中: C 和 R —检测图像横纵方向的像素数量。在此基础上进行网格划分、边缘梯度检测,进而生成基于方向约束的 DFW。

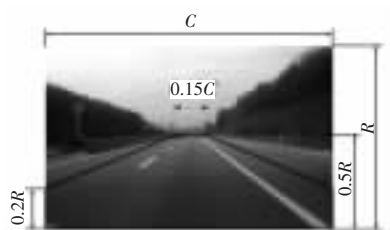


图 1 道路 ROI
Fig.1 Road ROI

2.1 稀疏网格

在路面 ROI 之上建立线宽为 6 pixels 的正方形稀疏网格掩膜图像,同时将网格平均划分为左右两部分:Region-l 和 Region-r。网格图像既要保证获取的特征点数量合适,又要尽量减小冗余的像素信息,因此在设置网格单元大小与网线时要充分考虑监测图像的分辨率问题。对于高分辨率图像,网格单元尺寸也应随之放大,否则会导致后续提取的车道线特征点过多,降低处理速度。而过于稀疏的网格也会导致捕获的车道线特征点过少,不足以创建完整的车道线窗口。捕获网格掩膜图像与 ROI 背景图像的像素交集,剔除掉网格线以外的图像信息,如图 2 所示。此方法从全局意义上能够大幅减少冗余计算。另一方面,网格能够排除大量的道路环境干扰,而车道线像素及其灰度分布特性又能够得到充分保留。

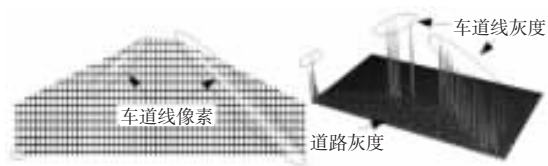


图 2 网格像素信息及其 3D 分布
Fig.2 Pixel Information on Grid and the 3D Distribution

2.2 基于边缘梯度的车道线特征点集

车道线与道路灰度分布的差异性明显,因此车道线的边缘特征显著,另外车道线的斜率总是存在于一定范围之内,且左右方向近似对称。文献^[9]采用恒定灰度阈值方法提取稀疏网格上的车道线特征点,网格线宽度默认为 1 pixel,故该方法无法全面获取网格线上的边缘梯度信息,易导致车道线特征点的误检和漏检。提出一种改进的 Sobel 算子边缘检测方法来提取车道线特征点集。Sobel 算子^[9]将接近模板中心的像素点作为检测重点并引入局部平均,对噪声具有较好的平滑作用,速度快,精度好。Sobel 算子在图像空间 $f(x, y)$ 中运用 (3×3) 的水平与垂直方向模板与目标像素进行邻域卷积,定义如下:

$$G_x = [f(i+1, j-1) - f(i-1, j-1)] + 2[f(i+1, j) - f(i-1, j)] + [f(i+1, j+1) - f(i-1, j+1)] \quad (1)$$

$$G_y = [f(i-1, j+1) - f(i-1, j-1)] + 2[f(i, j+1) - f(i, j-1)] + [f(i+1, j+1) - f(i+1, j-1)] \quad (2)$$

传统 Sobel 算子仅提供了水平和垂直方向梯度模板,因此对倾斜的车道线边缘不具有针对性。考虑车道线显著边缘的方向特征,提出了一种对称性六向双梯度模板,将传统二向边缘检测增加为六向,并且针对左右两侧车道线分别建立对称性的六向梯度模板,由此强化 Sobel 算子对车道线边缘的检测能力,同时抑制干扰边缘的检测。

理论上,完整的灰度梯度模板方向应为 $(0 \sim 360)^\circ$,但过多增加模板方向会产生较大的计算负担,而检测精度的提升有限。在 ROI 中左侧车道线的斜率恒为正值,且在 $(45 \sim 225)^\circ$ 的方向范围内不具有显著边缘梯度。因此在 Region-l 区域内建立 0° 、 90° 、 135° 、 180° 、 270° 与 315° 六向模板。同理在 Region-r 区域内建立与之对称的六向模板,检测方向分别为 0° 、 45° 、 90° 、 180° 、 225° 与 270° 。这些方向的卷积模板设定如下:

$$\begin{array}{cccc} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ 0^\circ \text{方向} & 45^\circ \text{方向} & 90^\circ \text{方向} & 135^\circ \text{方向} \\ \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ 180^\circ \text{方向} & 225^\circ \text{方向} & 270^\circ \text{方向} & 315^\circ \text{方向} \end{array}$$

为强化车道线边缘,建立梯度幅值 ∇G 的计算方法,见式(3)和式(4)。式中 M^l 和 M^r 是针对左右车道线方向特性的权重因子,见式(5)。

$$\nabla G^l = (|G_0| + |G_{90}| + |G_{135}| + |G_{180}| + |G_{270}| + |G_{315}|) M^l \quad (3)$$

$$\nabla G^r = (|G_0| + |G_{45}| + |G_{90}| + |G_{180}| + |G_{225}| + |G_{370}|) M^r \quad (4)$$

$$M^l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, M^r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

算法检测的车道线边缘梯度,如图 3 所示。图中:A~D—四处车道线边界处像素的梯度幅值 ∇G ,灰度越高,边缘特征越显著。E 则表示几处不存在车道线的道路区域,其均匀的低灰度(近黑色)分布表示不存在显著边缘。显著梯度边缘的判断法则,如式(6)所示。其中, $T_{\text{threshold}}$ —判别阈值,通过大量实验取 50。

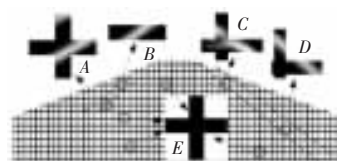


图 3 车道线边缘梯度
Fig.3 Lane Edge Gradient

$$Edge = \begin{cases} Edge, \nabla G \geq T_{threshold} \\ 0, \nabla G < T_{threshold} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 车道线区域膨胀窗口

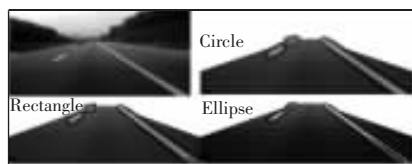
为获得完整的车道线区域,对车道线边缘特征点集进行膨胀与连通。膨胀的原则是在确保完整包含车道线区域的前提下尽量减少噪声区域,这就要求在选择膨胀结构元素时充分考虑被检测对象的几何特征。根据车道线宽度和斜率特点,针对左右道路区域 Region-l 和 Region-r 分别运用椭圆形结构元素进行膨胀,生成车道线 DFW。左右两侧结构元素参数方程 $f_l(x_l, y_l)$ 和 $f_r(x_r, y_r)$ 分别为式(7)和式(8):

$$\begin{cases} x_l = A \cos t \cos \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} A \sin t \sin \frac{\pi}{4} \\ y_l = A \cos t \sin \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} A \sin t \cos \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (7)$$

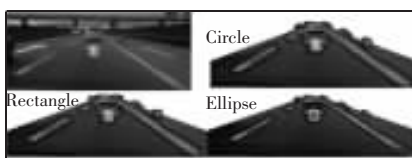
$$\begin{cases} x_r = A \cos t \cos \frac{3\pi}{4} - \frac{1}{2} A \sin t \sin \frac{3\pi}{4} \\ y_r = A \cos t \sin \frac{3\pi}{4} + \frac{1}{2} A \sin t \cos \frac{3\pi}{4} \end{cases} \quad (8)$$

式中: A —椭圆长轴半径,由图像分辨率决定。例如在(480×640)分辨率图像中 $A=15$ pixels。

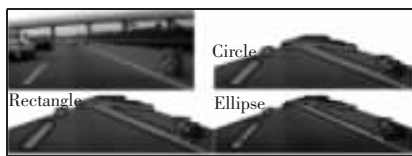
车道线 DFW 检测实例,如图 4 所示。每个实例采用圆形(Circle)、矩形(Rectangle)及所提出的椭圆(Ellipse)结构元素进行对比测试。相比于圆形和矩形结构元素,椭圆结构元素充分考虑了车道线的几何特征,DFW 中所引入的干扰像素最少,这样势必提高后续的车道线拟合速度与精度。圆形结构元素生成的 DFW 包含的干扰像素最多。在对称六向双 Sobel 算子以及椭圆形膨胀算法的作用下,DFW 对连续与间断的车道线、模糊与破损的车道线均具有鲁棒的检测能力,同时大幅度缩减道路中的各种噪声干扰。另外,稀疏网格线上的其它边缘也被检测入 DFW,例如道路上的白色箭头、前方车辆以及路边障碍物等。而这些干扰的像素特征(如颜色、面积与二维尺度)与车道线存在较大差异,可在后续处理中进行剔除。



(a) 示例 1



(b) 示例 2



(c) 示例 3

图 4 车道线检测

Fig.4 Lane DFW Detection

3 车道线检测

虽然 DFW 包含完整的车道线区域,但是在 DFW 中直接检测车道线仍具有一定的盲目性。首先通过双重阈值约束提取 DFW 内的车道线特征边缘,然后采用 Hough 变换对车道线特征边缘进行直线拟合。

3.1 特征边缘提取方法

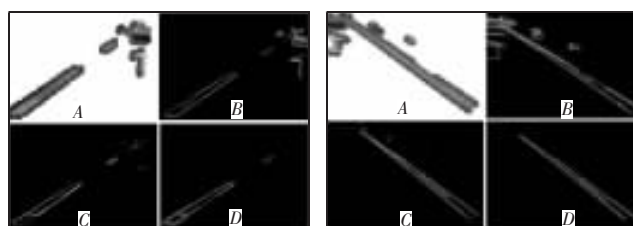
DFW 中的干扰主要包括周围车辆、路面指示标志和路边障碍物。从像素级层面上看,单纯依靠像灰度与颜色不易实现车道线的有效分离,而在特征级层面上车道线的特异性显著,例如车道线方向、长度等,由此可以建立车道线特征边缘提取方法。

(1)将左右特征窗口的 RGB 图像转换至 HSI 色彩空间,提取明度 I 通道分量。其目的在于凸显像素的灰度特性,抑制动态光照的干扰以及色度畸变带来的识别误差。

(2)采用 2.2 节提出的六向 Sobel 梯度算子,在 I 通道图像中计算像素灰度值梯度,分别获取左右 DFW 的显著边缘。

(3)采用文献^[1]提出的方法,对左右窗口分别设置斜率阈值 S_{left} 与 S_{right} ,再设置长度阈值 Tlength 获取车道线特征边缘。

左右车道线特征边缘的提取过程,如图 5 所示。图中: A —DFW 的 I 通道分量; B —Sobel 梯度边缘; C —斜率阈值 S_{left} 与 S_{right} 约束后的初选边缘特征; D —长度阈值 T_{length} 约束后最终的车道线特征边缘。



(a) 左侧

(b) 右侧

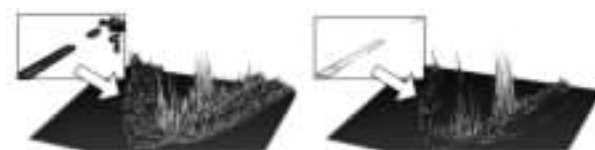
图 5 车道线边缘特征检测

Fig.5 Lane Edge Feature Detection

3.2 车道线直线拟合

车道线拟合模型多采用直线、二次曲线或分段接合曲线。考虑到目标检测的实时性与拟合误差的容忍度,采用 Hough 直线变换模型描述车道线。

Hough 变换是一种基于像素聚类方法的图像边缘参数化拟合方法。它利用图像参数空间的点-线对偶性,遍历所有的特征像素点并映射到 Hough 参数空间,通过累加器进行投票并搜索累加器峰值来检测目标。图 6 是 Hough 变换累加参数的 3D 空间,其中图 6(a)和图 6(c)是 DFW 内所有像素的参数累加,而图 6(b)和图 6(d)是仅针对车道线特征边缘像素的参数累加。可见基于特征边缘的 Hough 变换不仅完整保留了累加参数峰值区域,而且提升了空间的聚类效应,降低了数据搜索负担。



(a) 窗口区域(左车道线)

(b) 特征边缘(左车道线)

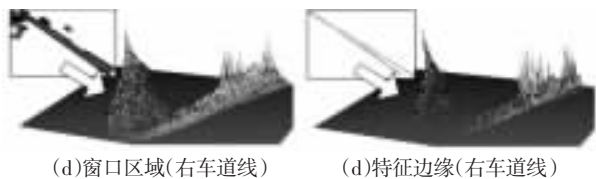


图 6 Hough 参数累加空间
Fig.6 Accumulation Space of Hough Parameters

4 多场景道路实验

4.1 实验方案

实验车辆选用某紧凑级轿车,前视摄像装置(型号为NIKON-S8100,帧率 15 fps)居中安装在挡风玻璃上部,距地面高度约为 1.4m,图像采集范围为车前 2.2m 至无穷远。道路环境为西安市绕城高速以及市内快速干道。在良好路况下的车速为 60~100km/h,市区或车辆较多的路况下车速为(20~60)km/h。光照条件包括晴天、多云、阴天和傍晚。图像按照四种分辨率进行采集,分别为(320×480)、(480×640)、(720×1080)和(1080×1920)。运行平台参数:CPU I3-4150(3.5GHz),4G 内存。各类图像所设定的网格单元尺寸、椭圆结构元素的长轴 A 和长度阈值 T_{length} 如表 1 所示。

表 1 系统参数设定(pixel)

Tab.1 Parameter Calibration of the System

分辨率	(320×480)	(480×640)	(720×1080)	(1080×1920)
网格单元	(12×12)	(15×15)	(22×22)	(30×30)
A	12	15	20	35
T_{length}	20~200	35~300	50~400	80~600

4.2 多场景测试

多种场景下的车道线检测示例,其中黑色封闭曲线圈定的区域表示 DFW,红色直线是拟合出的车道线,如图 7 所示。由图 7 可见在复杂的道路环境中 DFW 均可以完整包含车道线区域,与此同时排除掉大部分冗余像素信息。算法能够稳定识别单实线、单虚线、双黄线等,对多样光照、局部阴影、路上车辆等干扰具有较强的鲁棒性。算法也能够有效克服路面上的井盖、裂纹、刹车印记的干扰,见图 7(a)和图 7(f)。算法对路边台阶边界也具有较强烈的抑制作用,见图 7(k)~图 7(m)。在图 7(n)中右侧的换道车辆侵入 DFW 并产生了较多的干扰边缘,导致右侧车道线拟合误差明显,而图 7(o)中左侧路面潮湿,光照出现漫反射,左车道线与路面的梯度边缘过于弱小,导致左车道线检测失败。

4.3 实时性测试

选取四类不同分辨率图像分别进行耗时测试,每种分辨率图像各 100 张,各项子算法的平均耗时,如表 2 所示。表 3 列举了近期相关研究中的图像分辨率、车道线模型和算法耗时。相对于直线模型,曲线模型或曲线拼接模型耗时较大,而这里方法在直线模型研究当中同样具有实时性优势。

表 2 子算法平均耗时(ms)

Tab.2 Average Time Consuming of Each Sub-Algorithm

子算法	图像分辨率			
	(320×480)	(480×640)	(720×1080)	(1080×1920)
ROI 稀疏网格	6.2	7.3	9.0	11.9
边缘特征点检测	11.9	12.8	19.0	23.8
DFW	6.1	9.6	12.5	15.2
特征边缘提取	13.9	15.8	21.8	27.0
Hough 直线变换	16.8	18.7	23.5	27.6
总耗时	57.9	69.3	90.5	113.4

表 3 算法耗时比较
Tab.3 Time Consuming Comparison

	图像分辨率	拟合模型	耗时(ms)
金辉 ^[9]	(480×640)	直线	90
初雪梅 ^[9]	—	分段直线	<150
赵颖 ^[9]	(480×640)	直线	85
徐后杰 ^[9]	(240×360)	直线	80
Wang ^[10]	(240×320)	直线	71.4
郭磊 ^[11]	—	直线(近)+二次曲线(远)	75.1 ^①
Wang ^[12]	(240×256)	B-Snake 曲线	<4000
这里方法	(480×640)	直线	69.3

表中:①—初始检测时间 55 ms,跟踪时间 20.1 ms。

5 结论

(1)以抑制道路环境干扰、提高检测实时性为目标,运用稀疏网格与六向双梯度模板获取车道线特征点集,进而运用椭圆结构元素生成车道线 DFW。此方法充分考虑了车道线方向特性,确保 DFW 的完整性,极大程度上大幅排除了道路干扰像素,减少冗余计算。

(2)在 DFW 内运用六向双梯度模板检测梯度边缘,通过斜率、长度双重阈值约束提取车道线特征边缘,对其进行 Hough 直线拟合。该方法进一步排除干扰信息,实现车道线检测的完整性与准确性。

(3)针对多样性道路环境进行了算法测试,并讨论了不同分辨率图像的检测耗时。试验证明算法能够充分强化车道线信息,有效排除道路中各类干扰,提升了车道线检测的准确性与实时性。



图 7 多场景下的车道线识别

Fig.7 Lane Detection in Multi-Scenario

参考文献

- [1] 戎辉,张明路,张小俊.基于跨道时间的车道偏离报警方法[J].机械设计与制造,2016(5):175-177. (下转第 194 页)

顺序为 $B(\text{周率}) > A(\text{电流}) > D(\text{间隙电压}) > C(\text{效率})$ 。电火花成型加工工艺参数在电流为 4A, 周率为 200 μs , 效率为 20%, 间隙电压为 20V 的情况下可以得到较小的电极损耗。

4 结论

(1) 影响 Inconel 718 合金去除率的主要因素依次为 $A(\text{电流}) > C(\text{效率}) > D(\text{间隙电压}) > B(\text{周率})$, 材料去除率随着加工电流和效率的增大而增大。

(2) 影响电极损耗的主要因素依次为 $B(\text{周率}) > A(\text{电流}) > D(\text{间隙电压}) > C(\text{效率})$, 其中周率对电极损耗具有显著性影响。

(3) 电火花成型加工工艺参数在电流为 10A, 周率为 100 μs , 效率为 80%, 间隙电压为 20V 时可以获得最大的材料去除率。当电流参数为 4A, 周率为 200 μs , 效率为 20%, 间隙电压为 20V 的情况下可以得到较小的电极损耗。

参考文献

- [1] Schwant R C, Thamboo S V, Anderson A F. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives [C]. Warrendale, PA: TMS, 1997: 141.
- [2] Reed R C. The Superalloys Fundamentals and Applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006(217).
- [3] 郑富强, 陈康华, 李詠侠. 基于正交试验的硬质合金电火花加工实验分析 [J]. 模具制造, 2016(2): 68-70.
(Zheng Fu-qiang, Chen Kang-Hua, Li Yong-xia. The orthogonal test and research in cemented carbides by EDM [J]. Mold Manufacturing, 2016(2): 68-70.)
- [4] 秦勇, 王霖, 张建华. 电火花成形加工技术的现状与发展趋势 [J]. 工具技术, 2002(1): 21-26.
(Qin Yong, Wang Lin, Zhang Jian-hua. Present status and development trends of EDM [J]. Tool Engineering, 2002(1): 21-26.)
- [5] 管琪明, 郭锐, 赵万生. 特种加工技术的最新进展和研究热点 [J]. 电加工与模具, 2005(3): 14-18.
(Guan Qi-Ming, Guo Rui, Zhao Wan-Sheng. The recent progress and research focuses of non-traditional machining technology [J]. Electromachining & Mould, 2005(3): 14-18.)
- [6] 蒋亨顺, 刘杰, 刘薇娜. 电火花加工技术在现代制造业中的应用 [J]. 金属加工 (冷加工) 冷加工, 2004(2): 9-10.
(Jiang Heng-Shun, Liu Jie, Liu Wei-na. Application of EDM technology in modern manufacturing industry [J]. Metal Workin, 2004(2): 9-10.)
- [7] 卢存伟. 电火花加工工艺学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
(Lu Cun-Wei. EDM processing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.)
- [8] 魏引焕, 孙立新. 电火花线切割加工中难加工材料及复杂件常见问题分析及应对措施 [J]. 机械设计与制造, 2009(10): 261-263.
(Wei Yin-huan, Sun Li-xin. Analysis and measures on machining difficulty processing materials and complicated workpiece in wire electrical-discharge machining [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(10): 261-263.)
- [9] 邓鹏, 董长双. 钛合金 Ti-6Al-4V 的电火花线切割参数试验研究 [J]. 机械设计与制造, 2017(1): 69-71.
(Deng Peng, Dong Chang-shuang. Experimental research on parameters of The WEDM cutting ti-6al-4v titanium alloy [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(1): 69-71.)
- [10] 瞿德梅, 段维峰. 基于正交试验的电火花加工工艺效果试验分析 [J]. 电加工与模具, 2004(s1): 73-76.
(Qu De-mei, Duan Wei-feng. Experimental analysis of edm process effect based on orthogonal test [J]. Electromachining & Mould, 2004, (s1): 73-76.)
- (上接第 190 页)
- (Rong Hui, Zhang Ming-lu, Zhang Xiao-jun. Lane departure warning algorithm based on the time across road [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5): 175-177.)
- [2] 龚建伟, 王安帅, 熊光明. 一种自适应动态窗口车道线高速检测方法 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(6): 486-490.
(Gong Jian-wei, Wang An-shuai, Xiong Guang-ming. A self-adaptive dynamic window method for high speed lane detection [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(6): 486-490.)
- [3] Jung C R, Kelber C R. Lane following and lane departure using a linear-parabolic model [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(13): 1192-1202.
- [4] 金辉, 吴乐林, 陈慧岩. 结构化道路车道线识别的一种改进算法 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(6): 501-505.
(Jin Hui, Wu Le-lin, Chen Hui-yan. An improved algorithm for the lane recognition of structured road [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(6): 501-505.)
- [5] 初雪梅, 王珂娜, 张维刚. 基于分段直线模型的弯道识别算法的研究 [J]. 汽车工程, 2013(12): 1141-1144.
(Chu Xue-mei, Wang Ke-na, Zhang Wei-gang. A study on a recognition algorithm of curved lane based on piecewise straightline model [J]. Automotive Engineering, 2013(12): 1141-1144.)
- [6] 郭磊, 李富强, 王建强. 应用方向可调滤波器的车道线识别方法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 214-218.
(Guo Lei, Li Ke-qiang, Wang Jian-qiang, et al. Lane detection method by using steerable filters [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 214-218.)
- [7] 魏庆媛, 程文冬, 沈云波. 车道线图像检测与车辆偏航预警模型构建 [J]. 西安工业大学学报, 2015(6): 500-505.
(Wei Qing-yuan, Cheng Wen-dong, Shen Yun-bo. Research of lane-mark recognition and vehicle departure pre-warning [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2015(6): 500-505.)
- [8] 赵颖, 王书茂, 陈兵旗. 基于改进 Hough 变换的公路车道线快速检测算法 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(3): 104-108.
(Zhao Ying, Wang Shu-mao, Chen Bing-qi. Fast detection of lines on highway based on improved Hough transform [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(3): 104-108.)
- [9] 徐后杰, 李会方, 缪国锋. 基于单目视觉的车道线分离警告算法研究 [J]. 微处理机, 2011, 32(3): 72-74.
(Xu Hou-jie, Li Hui-fang, Miao Guo-feng. Study on Lane departure Warning Algorithm Based on Monocular Vision [J]. Microprocessors, 2011, 32(3): 72-74.)
- [10] Wang J G, Lin C J, Chen S M. Applying fuzzy method to vision-based lane detection and departure warning system [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 113-126.
- [11] 郭磊, 王建强, 李富强. 存在车辆干扰的车道线识别 [J]. 汽车工程, 2007, 29(5): 372-376.
(Guo Lei, Wang Jian-qiang, Li Ke-qiang. Lane detection under vehicles disturbance [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(5): 372-376.)
- [12] Wang Y, Teoh E K, Shen D. Lane detection and tracking using B-Snake [J]. Image and Vision computing, 2004, 22(4): 269-280.