

考虑轮胎移动载荷的沥青路面动力响应分析^{*}

王国盛¹, 郭敏锐², 吴启斌¹, 石 鹏³

(1. 河南工学院 车辆与交通工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 黄淮学院 能源工程学院, 河南 驻马店 463003;

3. 黄淮学院 智能制造学院, 河南 驻马店 463003)

摘要: 为了分析路面结构在轮胎移动载荷作用下的动力响应, 采用 Abaqus 有限元软件建立轮胎-路面三维模型, 研究沥青路面面层的竖向、横向、纵向的应力应变、剪应力、剪应变的变化规律。结果表明, 路面载荷区竖向应力最大值出现在上面层, 横向应力、纵向应力、剪应力的最大值出现在中面层。竖向应力最大, 纵向应力和横向应力相当, 剪应力最小。路面的竖向、横向、纵向应变最大值出现在中面层, 剪应变最大值出现在中面层和下面层交界处。纵向方向的拉压应变反复作用, 导致剪应变出现正负交替变化, 加剧了路面疲劳破坏和车辙破坏。

关键词: 轮胎; 移动载荷; 路面; 动力响应; 应力; 应变

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 2096-7772(2023)05-0028-06

0 引言

汽车在行驶过程中, 通过轮胎作为传力媒介与路面接触, 在路面产生相应的动力响应。根据我国现行的路面设计规范(JTG D50-2017), 轮胎的接地压强为 0.7 MPa, 路面的设计轴载为 100 kN, 作用区域为双圆均布静态载荷, 并采用多层弹性体为假设条件。尽管采用静态载荷可以解决很多工程问题, 但是其没有考虑移动载荷导致的应力应变方向的变化, 应力与应变响应的速度不同, 以及轮胎的接地压强呈现不均匀分布并不断移动的特征; 另外, 路面还受到水平方向的移动载荷, 包括沿轮胎行驶方向的纵向应力以及垂直于行驶方向的横向应力。因此, 为了更加真实地反应路面受到的动力响应情况, 考虑轮胎与路面接触应力的不均匀分布以及移动特征是十分必要的。

1 轮胎移动载荷作用形式

1.1 接触应力的不均匀分布特征

为满足不同路面行驶工况下附着力的需求, 不同的轮胎胎面位置被加工出了不同的花纹。但是胎面花纹的不同使得路面与轮胎之间的相互作用出现

不均匀分布的特征, 随着轮胎的高速旋转, 不同的轮胎与路面发生的动力响应也有了较大差别。参考国内外文献^[1-2], 选用某品牌 275/80R22.5 型号轮胎, 轮胎胎面有 4 条纵向沟槽, 将轮胎胎面处分为 5 条纵向凸起。如图 1 可看出轮胎模型及其胎面接地印记的形状。

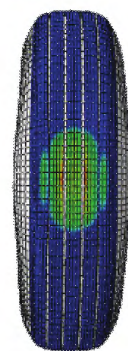


图 1 轮胎接地印记

纵向接地应力取值为竖向接地应力的 0.16 倍, 横向接地应力取值为竖向接地应力的 0.20 倍^[3-4], 轮胎荷载的作用形式如表 1 所示。

^{*} 收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划(23B460004, 22A460008); 河南省科技攻关项目(222102240108)

第一作者简介: 王国盛(1986—), 男, 河南新乡人, 讲师, 硕士, 主要从事车辆底盘系统仿真与优化研究。

表 1 单轴双轮接地应力参数表

参数	Rib1	Rib2	Rib3	Rib4	Rib5
竖向应力(kPa)	500	850	960	850	500
纵向应力(kPa)	80	136	154	136	80
横向应力(kPa)	100	170	192	170	100
接地长度(mm)	168	192	192	192	168
接地宽度(mm)	35	30	30	30	35

注:Rib 表示轮胎的纵向凸起,两纵向凸起之间的间距为 10mm。

1.2 轮胎移动载荷的施加

为了模拟单轴双轮车辆对路面施加移动载荷时的作用对象,在利用有限元软件 Abaqus 建立模型时,在轮胎前进方向上设置了两个载荷作用面。采用 Fortran 语言翻译器编写 Utracload 和 Dload 程序,以进行二次开发,其中 Dload 子程序用来施加竖向接触应力,Utracload 用来施加纵向应力和横向应力,以实现轮胎载荷的向前移动^[5]。

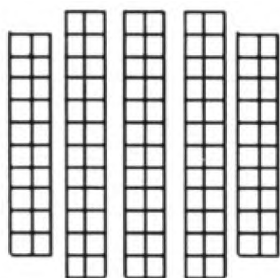


图 2 路面载荷区网格模型

图 2 给出了路面载荷区网格模型,在轮胎与路面接触区域进行了网格细化,把轮胎的接地印记从左到右依次划分为 Rib1、Rib2、Rib3、Rib4 和 Rib5 5 个纵向凸起带,其中 Rib2、Rib3、Rib4 的接地长度相同,为 192mm; Rib1 和 Rib5 接地长度相同,为 168mm;相邻两纵向凸起之间距离为 10mm。假设

轮胎行驶速度为 45km/h,轮胎滚动半径 489.17mm,轮胎 0.24 秒行驶完一个周期,移动距离 3072mm。

2 路面三维有限元模型

2.1 有限元模型

利用 Abaqus 有限元软件建立路面结构模型,该模型为三维层状路面,长宽高分别为 6000mm、6000mm 和 3760mm,其中 X 轴为道路的宽度方向(横向),Y 轴为道路的深度方向(竖向),Z 轴为轮胎前进的方向(纵向)。根据实际情况,在道路横向两侧、底面、纵向两侧分别限制 X 方向、Y 方向、Z 方向的位移,作为该模型的施加的边界条件^[6-7]。对轮胎载荷作用区进行网格细化,选用软件中的 C3D8R 模型,该模型共有 47656 个单元,然后对网格分析检查,发现错误警告为 0,如图 3 所示。

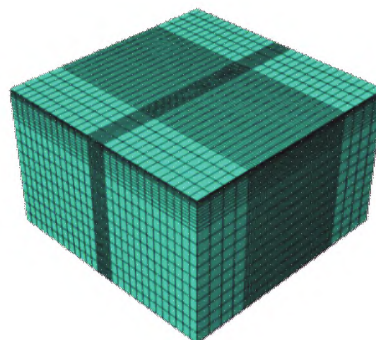


图 3 路面三维有限元模型

2.2 路面结构和材料参数

为了研究轮胎移动载荷作用下路面的三向动力响应,须采用路面设计时实际采用的结构材料参数,如表 2 所示。

表 2 路面结构材料参数

材料	层位	厚度(mm)	杨氏模量(MPa)	泊松比	密度(kg/m ³)	阻尼
AC-13C	上面层	40	1159	0.3	2300	0.9
Sup-20	中面层	60	1454	0.3	2300	0.9
Sup-25	下面层	80	1592	0.3	2300	0.9
CSM	基层	380	1500	0.2	2300	0.4
GM	底基层	200	450	0.3	2100	0.8
SG	土基	3000	45	0.4	1850	0.4

为表示沥青路面的动力响应与温度和时间关系,本文采用剪切模量的 Prony 级数表示材料对时间的依赖性^[8]。沥青路面材料模型 Prony 级数基本表达式如下列方程所示。级数的参数如表 3 和表 4 所示。

$$g(t) = g_0 \left[\alpha_\infty^g + \sum_{i=1}^{ng} \alpha_i^g \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^g}\right) \right] \quad (1)$$

$$k(t) = k_0 \left[\alpha_\infty^k + \sum_{i=1}^{nk} \alpha_i^k \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^k}\right) \right] \quad (2)$$

式中, $g_\infty = g_0 \alpha_\infty^g$ 和 $g_i = g_0 \alpha_i^g$ 为剪切模量, $k_\infty = k_0 \alpha_\infty^k$ 和 $k_i = k_0 \alpha_i^k$ 为体积模量, g_0 、 k_0 对应材料的瞬时模量。瞬时模量公式如下:

$$g_0 = g_\infty + \sum_{i=1}^{ng} g_i \quad (3)$$

$$k_0 = k_\infty + \sum_{i=1}^{nk} k_i \quad (4)$$

表 3 上面层材料 AC-13C 的 Prony 级数参数

τ_i	k_i	g_i
0.85	0	0.673
10.34	0	0.285
1259.53	0	0.031
17500	0	0.01

表 4 中面层和下面层材料的 Prony 级数参数

τ_i	g_i	
	Sup-20	Sup-25
2E-006	0.0933	0.1024
2E-005	0.15075	0.15681
0.0002	0.21561	0.21202
0.002	0.23601	0.23541
0.02	0.17426	0.16681
0.2	0.08328	0.08494
2	0.02902	0.03022
20	0.00929	0.00756
200	0.00325	0.00248
2000	0.00128	0.00083
20000	0.00059	0.00032
200000	0.00017	0.00016
2000000	0.00048	3E-5

通常采用松弛变量 WLF 方程来表示路面材料与温度的关系,其方程如下:

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (5)$$

式中, α_T 为时温位移因子, T_{ref} 为参考温度, T 为实际温度。

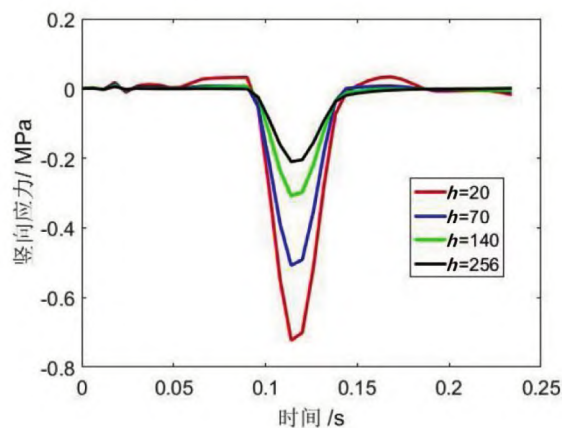
3 路面动力响应分析

选取合适的特征点作为研究分析对象,以获取路面各层在轮胎移动载荷作用下的动力响应^[9]。由于有限元模型和轮胎载荷左右对称,这里选取右侧轮胎载荷中心线不同深度方向 $h = 20\text{mm}$ 、 70mm 、 140mm 、 256mm 处作为特征点,分别研究路面不同层位的竖向、横向、纵向的应力应变响应、剪应力和剪应变的响应规律^[10]。

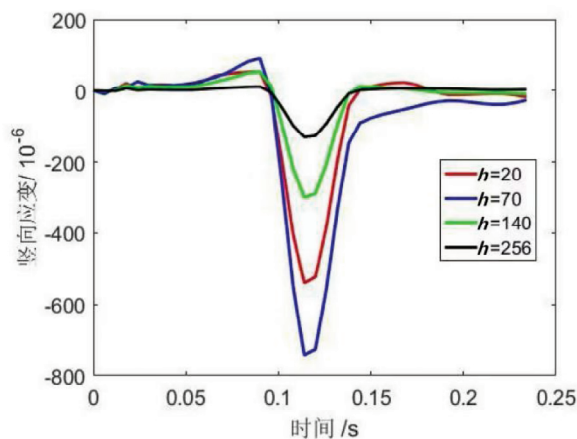
3.1 路面竖向应力应变响应

图 4 为特征点的竖向应力和应变时程变化曲线。可以看出在经过一个加载周期时间段内,随着路面深度的增加,路面的竖向应力逐渐减小,在上面层的竖向应力呈现最大值,而竖向应变的最大值却出现在中面层。在轮胎前进的 0 到 0.09 秒范围内,

面层结构的竖向应变为较小的正值,表示刚开始是竖向拉应变,在外观上的表现为较小幅度的隆起。在 0.09 秒到 0.14 秒范围内,竖向应变为较大的负值,表示为竖向压应变。在 0.14 秒到 0.24 秒范围内,轮胎载荷驶离过后,竖向应变并没有马上回零,存在着一定程度的残余应变。可以看出在 0.09 秒到 0.14 秒范围内,轮胎加载下方的面层,基层上方出现竖向应力、竖向应变集中。



(a) 竖向应力时程曲线



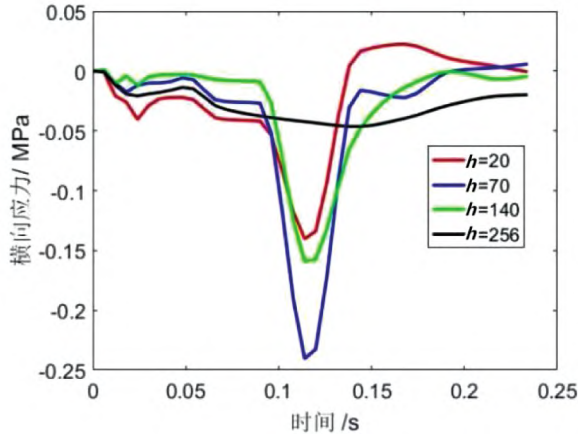
(b) 竖向应变时程曲线

图 4 竖向应力应变时程曲线

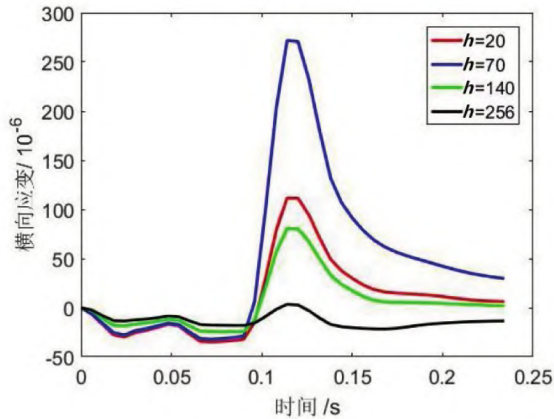
3.2 路面横向应力应变响应

图 5 为特征点的横向应力和应变时程变化曲线。可以看出横向应力出现了和竖向应力类似的变化趋势,在轮胎作用范围的上、中、下三个面层均出现了横向应力集中现象,在中面层的横向应力最大,上面层的横向应力最大值小于下面层横向应力最大值。在基层上方的横向应力很小。横向应变的最大值同样出现在中面层,当中面层的横向应变达到最大值后再次衰减,在 0.14 秒到 0.24 秒范围内,横向应变也存在着残余应变,而且要大于纵向应变的残余

余应变。横向应变集中在上面层和中面层,表现为横向拉应变,导致轮胎胎冠接地处周围路面出现车辙等变形。比较图 5(a)和图 5(b),最大横向应力的最大值出现在 0.11627 秒,最大横向应变的最大值出现在 0.14187 秒,最大横向应变响应比最大横向应力响应晚 0.0256 秒。



(a) 横向应力时程曲线



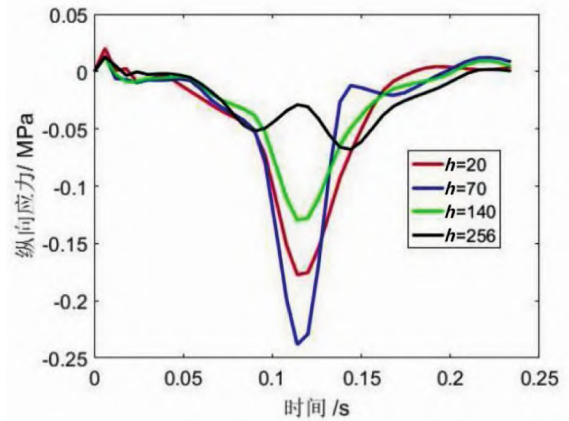
(b) 横向应变时程曲线

图 5 横向应力应变时程曲线

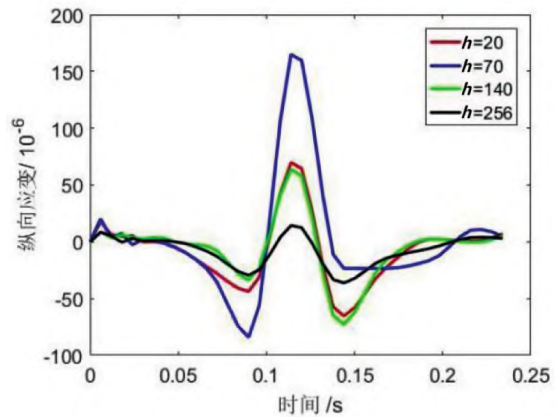
3.3 路面纵向应力应变响应

图 6 为特征点的纵向应力和应变时程变化曲线。由图 6(a)可知,在轮胎前进过程中,随着轮胎载荷的增加,上面层、中面层、下面层的纵向应力逐渐变大,达到最大值后逐渐减小。但在基层上方,由于接地印记范围内路面的黏弹性,纵向应力表现出了一定程度的波动。在 0.09 秒到 0.15 秒范围内,轮胎经过特征点正上方,纵向应力在中面层出现最大值。当轮胎驶离过后,在 0.15 秒到 0.24 秒范围内,存在一定的残余应力。由 6(b)可知,在轮胎移动的整个周期内,纵向应变的正值和负值交替出现,表示纵向拉应变和纵向压应变在路面结构中交替出现。纵向拉伸应变的最大值出现在中面层,上面层

和下面层的纵向应变值基本相同。这种在路面上反复出现的纵向拉伸和压缩应变容易导致疲劳损伤。如果路面反复碾压,则表明轮胎的载荷带出现从上到下的开裂。



(a) 纵向应力时程曲线

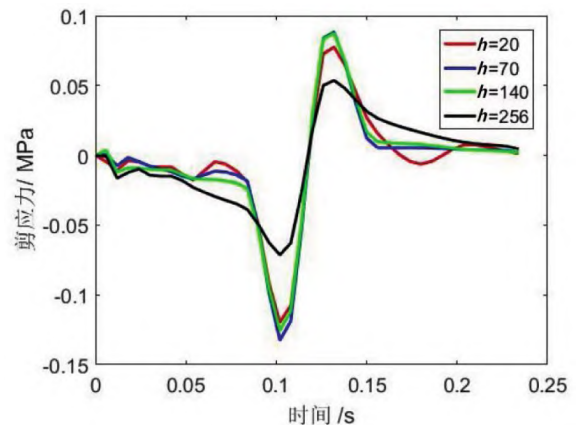


(b) 纵向应变时程曲线

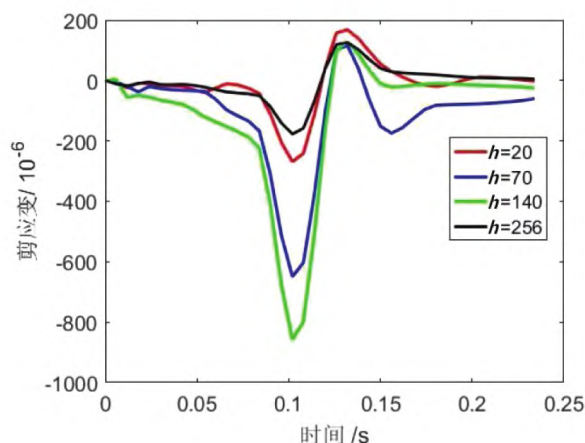
图 6 纵向应力应变时程曲线

3.4 剪应力和剪应变响应

图 7 为特征点的剪应力和剪应变时程变化曲线。在轮胎载荷经过前后,剪应力和剪应变都出现了正负值交替变化。剪应力正值和负值的绝对值比



(a) 剪应力时程曲线



(b)剪应变时程曲线

图7 剪应力和剪应变时程曲线

较接近,在路面的面层结构各层内部剪应力的大小基本相等,在基层上方剪应力要小于面层结构的剪应力。剪应变的最大值出现在下面层,剪应变集中在中面层和下面层,轮胎载荷作用时间也相应增大,在0.065秒到0.183秒范围内,正负剪应力和正负剪应变反复作用,这加剧了路面材料疲劳破坏和车辙破坏。

4 结论

(1)在轮胎移动载荷作用的整个周期内,路面载荷区竖向应力最大值出现在上面层,横纵向应力、剪应力的最大值出现在中面层。相同特征点处,竖向应力的幅值最大,纵向应力和横向应力幅值相当,剪应力幅值最小。

(2)在轮胎移动载荷作用的整个周期内,路面的竖向、横向、纵向应变最大值出现在中面层,剪应变最大值出现在中面层和下面层交界处。相同特征点处,横向应变幅值大于纵向应变幅值,竖向应变幅值大于横向应变幅值,剪应变的幅值略大于竖向应变幅值。纵向应变变化规律在不同的特征点处类似,

拉-压应变的反复作用导致产生正剪应变和负剪应变交变变化,加剧了路面材料疲劳破坏和车辙破坏。因此,在路面设计过程中,不仅要考虑现有指标,而且要考虑应变指标。

(3)采用二次开发 Abaqus 软件的 Dload 和 Utracload 子程序,模拟轮胎实际移动载荷作用下的路面动力响应,结果出现正-负交变变化,应变响应略微慢于应力响应。这是传统静力分析无法做到的,所以路面动力响应应该考虑轮胎移动载荷的作用。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

- [1] 李明松. 典型轮胎非均匀接触应力获取及其作用下的路面 TDC 开裂分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] 郑仲浪. 重载车辆作用下沥青路面层间力学行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 45-48.
- [3] 刘美丽. 轮胎路面交互作用数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [4] SIDDHARTHAN R V, KRISHNAMENON N, EI-MOUSLY M. Investigation of tire contact stress distributions on pavement respons[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128 (2): 136-144.
- [5] 张兰峰, 汪海年. 考虑横向接地应力的沥青路面剪应力分析[J]. 江苏大学学报, 2018, 39(2): 236-241.
- [6] 董泽蛟, 谭忆秋, 欧进萍. 三向非均匀移动荷载作用下沥青路面动力响应分析[J]. 土木工程学报, 2013(6): 122-130.
- [7] 胡小弟, 孙立军. 沥青路面车辆超载定义分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 1612-1616.
- [8] YU M, WU G X, KONG L Y, et al. Tire-pavement friction characteristics with elastic properties of asphalt pavements[J]. Applied Sciences, 2017, 7(11): 1-16.
- [9] 姚占勇, 田腾辉. 不同轮压分布形式对半刚性路面结构力学响应的有限元分析[J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39(6): 105-110.
- [10] CHEN B, ZHANG X, YU J, et al. Impact of contact stress distribution on skid resistance of asphalt pavements[J]. Constr. Build. Mater, 2017, 133: 330-339.

Analysis of Asphalt Road Dynamic Response Considering Tire Moving Load

WANG Guosheng¹, GUO Minrui², WU Qibin¹, SHI Peng³

(1. School of Vehicle and Traffic Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. College of Energy Engineering, Huang huai University, Zhumadian 463003, China;

3. Intelligent Manufacturing College, Huang huai University, Zhumadian 463003, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic response of the pavement structure under the action of the tire moving load, the Abaqus finite element software is used to establish the tire-pavement 3D model,

study the vertical, horizontal and vertical stress strain, shear stress and strain changes of the asphalt pavement surface layer. The results show that the maximum value of vertical stress in the pavement load area appears in the upper layer, and the maximum value of transverse stress, longitudinal stress and shear stress appears in the middle surface layer. The vertical stress is the maximum, longitudinal stress is about the same size as transverse stress, and shear stress is minimal. The maximum strain of the vertical, transverse and longitudinal of the pavement appears in the middle layer, and the maximum shear strain appears at the junction of the middle surface layer and the lower layers. The repeated action of the tensile and compressive strains in the longitudinal direction leads to the alternating change of the positive and negative shear strain, which aggravates the pavement fatigue damage and rut damage.

Key words: tires; moving load; road surface; dynamic response; stress; strain

(上接第 27 页)

Detection and Recognition of Countdown Traffic Lights

CUI Shuaihua¹, ZHANG-YANG Lizhu², CHI Minglu¹

(1. School of Intelligent Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Department of Science, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The detection and recognition of countdown traffic lights are of great significance for both assisted driving and unmanned driving. Currently, Although the object detection algorithm based on deep learning is currently the mainstream algorithm in the field of traffic lights detection and recognition, However, due to the fact that the countdown time of digital lights is generally over 100 seconds, it is difficult to simply use deep learning to train the detection model, for this reason, designed two countdown digital light recognition methods: the first is based on a combination of traditional image processing and OCR, and the second is based on YOLOv5, image processing, and OCR. The second method performs well and can effectively extract the ROI of digital lights and filter out noise. with a recognition accuracy of 95.6% on the test dataset.

Key words: countdown traffic lights; YOLOv5; image processing; OCR; ROI