

文章编号:1005-0523(2020)02-0129-06

超声相控阵在水下焊接中的应用研究

叶建雄¹, 李志刚², 程 群³

(1. 浙江机电职业技术学院, 浙江 杭州 310053;

2. 华东交通大学机电学院, 江西 南昌 330013; 3 江西省乐平市第一中学, 江西 乐平 333300)

摘要: 水下湿法焊接面临着缺少传感器的问题, 开展相关研究对于水下焊接自动化具有重要意义。超声波相控阵(Ultrasonic Phased Array-PA)可以直接应用于水下, 根据需要控制各阵元于特定时刻发出声波, 可以实现在空间特定点的聚焦, 与单体超声波传感器相比, PA 具有工作效率高、控制方便灵活的优点, 适合于作为焊缝检测用传感器。论文首先介绍了 PA 的声波干涉原理, 结合仿真软件揭示了声波的聚焦精度与 PA 的形状、阵元个数、阵元间距以及时间分辨率之间的关系, 并由此确定了 PA 的几何参数; 然后设计了 PA 工作中所需的多个电路, 基于 CPLD 实现了高分辨率的时钟, 给出了声波的发送与接收电路以及各通道的门控方法。利用 PA 能够实现焊接工件表面的快速扫描, 通过水下高精度的测距可以得到工件的表面形貌, 进而获得焊缝的具体位置, PA 应用于水下湿法焊接是可行的。

关键词: 水下湿法焊接; 超声波相控阵; 声波干涉; 电路设计

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.018

目前, 湿法焊接在焊接手段、工艺、焊接材料等方面已有不少成果, 实现了从“能焊”向“焊好”的转变。理论研究方面, Mazzaferro J A 等研究了不同深度的浅水条件下的电弧特性^[1], 石永华等利用 U-I 相平面图, 进一步分析了电弧稳定性与水深的关系, 以及不同水深时工艺参数组合^[2]; 高辉、焦向东等采用 Abaqus 有限元软件, 对摩擦螺柱焊的焊接过程进行了仿真研究, 比较了相同工艺参数分别在有水和干式环境下的焊接效果^[3]; 在湿法焊接材料研制方面, Hanover 大学开发了双层自保护药芯焊条, 美国研制了 7018S 和“Black Beauty”, 这些焊条的焊接质量均满足美国船级社 AWS D3.6 的标准, 并且英国的 Hydroweld FSTM 焊条在桥梁、船舶的维修中得到了实际应用; 在国内, 哈工大的郭宁等开发了一种药芯焊丝, 可以在 30 m 以内的水深完成 CCSE36 等级钢的焊接, 接头性能也达到了 AWS D3.6 的标准^[4]; 在焊接方法和工装方面, 魏康、李康等采用冷轧和退火处理工艺制备了异质层状结构的 316L 不锈钢, 然后采用 GTAW 焊接工艺对处理后的钢板实施单、双面焊接成型, 处理后的 316L 不锈钢内部形成明显的超细晶层状组织结构, 大幅提高了母材的抗拉强度^[5]。但在湿法焊接自动化领域, 目前遇到的最大问题是没有合适的传感器可用。众所周知, 在陆地焊接中最常用的传感器是 CCD 图像传感器和旋转电弧传感器^[6-7], 为了在湿法焊接中使用 CCD 传感器, 必须将它们封装在一个透明的防水盒子中, 且一般需要增加辅助光源以增强照明; 除此之外, 所采集的图像还经常受到弧光、气泡和水中悬浮物的影响, 难以采集到理想的焊缝图像; 而旋转电弧传感器在水下焊接中的应用, 主要集中于浅水以及电弧与水压的关系特性等方面, 已有研究表明, 电弧长度及稳定性受水压的影响很大, 水压越大电弧越短、电弧稳定性越差, 水压过大时会使电弧熄灭; 因而要将此传感器应用于水下湿法焊接中, 不但要解决电机在水下可靠安全工作的问題, 而且要考虑如何减少水压对焊接电弧所带来的不利影响。

湿法焊接自动化要求性能良好的传感器, 这促使人们开展水下传感特性的研究工作。前期研究成果表

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ180937); 国家自然科学基金(51665016); 江西省自然科学基金(20151BAB207047)

作者简介: 叶建雄(1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为焊接自动化。

明,单体超声波传感器可以直接应用于水下,且对弧光、汽泡不敏感,利用相关系数法可以实现水下高精度测距,从而得到传感器与工件之间的距离,进而利用几何关系确定焊缝的准确位置^[8-9],但这种方法存在需要在水平方向移动传感器、检测效率低等不足之处。为此,在研究中引入了PA,它包含数十乃至上百个小阵元,在外形上常见的有直线型、圆形或其他特殊类型。所有的小阵元都具有独立的驱动电路,因而利用它进行焊缝形貌的检测,具有检测灵活方便和高效的优点。

论文首先介绍相控阵传感器的基本工作原理,然后在此基础上确定所用PA的物理参数,包括PA的形状、阵元数量及阵元间隔大小;最后给出PA工作时所需的多种电路,包括高精度时钟生成、声波发送和接收,以及带通滤波等电路。

1 PA的物理参数设计

PA是由众多排成不同形状的小阵元构成的,各阵元发出声波并在水中形成干涉,为了保证声波能够在工件表面聚焦,这些由不同阵元发出的声波必须满足惠更斯原理,即各声波具有相同的频率和稳定的相差,合成波的幅值在相角差为 π (180°)的偶数倍时最大,为 π 的奇数倍时最小,相角差为其他值时,幅值则介于最大与最小值之间,且幅值和相角差满足一定的函数关系。在图1(a)所示的湿法焊接环境中,PA置于工件正上方约30 cm处,相同频率的声波依次从选定的若干阵元发出,就可以实现在不同的空间点聚焦,但如何快速地聚焦于工件表面上的不同位置,属于场扫规划的内容,在此不再展开。本论文将从理论上分析PA聚焦于特定点的工作原理,进而分析PA的结构参数与定位精度的关系。

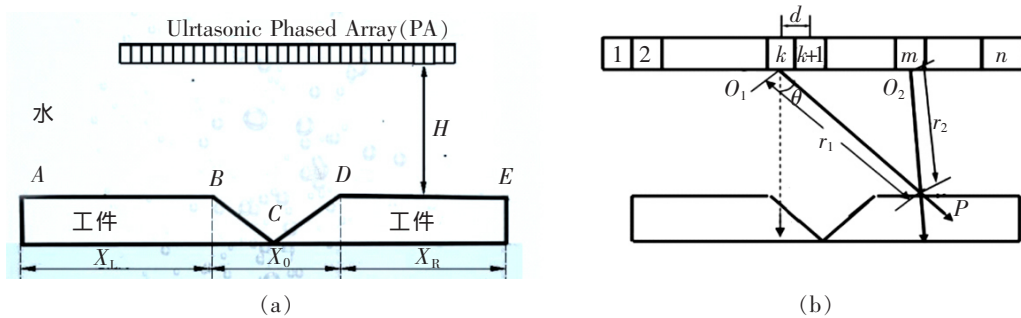


图1 PA在水下湿法焊接中的应用

Fig.1 Ultrasonic PA working method in underwater wet welding

与通过机械运动进行各点测距的单管传感器相比,PA的效率显著提高。PA的大小、阵元的数量及阵元的排列形式、间距对聚焦的效果都有很大影响,对于图1(b),当声波的焦点在图中P点时,为了使 O_1 和 O_2 点处的阵元所发声波能同时到达焦点,发出声波的时间差可以由余弦定理求得

$$r_2^2 = r_1^2 + [(m-k)d]^2 - 2r_1(m-k)d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = r_1^2 + (id)^2 - 2r_1id \sin\theta \quad (1)$$

式中: r_1, r_2 分别为二阵元 O_1, O_2 到焦点P的距离; d 为相邻阵元的间距; θ 为阵元、焦点连线与竖直垂线的夹角,因而由上式可得时间差如下

$$\Delta T_i = \Delta s / C = (r_1 - r_2) / C = \frac{r_1}{C} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{id}{r_1} \right)^2 - \frac{2id \sin\theta}{r_1} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

式中: Δs 为 r_1 和 r_2 的差; C 为声波在水中的传播速度; d 为二点间的阵元间隔数量。

根据式(2)确定各阵元所发出声波的时间差,同时借助软件ArrayCalcis可以进行声波干涉效果的仿真,这是一款可以进行立体干涉效果仿真的软件,设置好PA的形状和阵元参数后,其可以算出在空间各点波的合成效果并用三维图形进行表示,从而为PA的选择和工作参数的设定提供依据,图2给出了有8个阵元的线性PA在主瓣偏转角度为 10° 时的2D和3D干涉效果。

与圆形、面型相控阵相比,线性PA更易于在工件表面获得直线型的焦点。利用ArrayCalcis分析不同阵元参数的线性PA聚焦效果,通过计算焦点至各阵元的距离及角度,可以获得直观的干涉效果。图3给出了

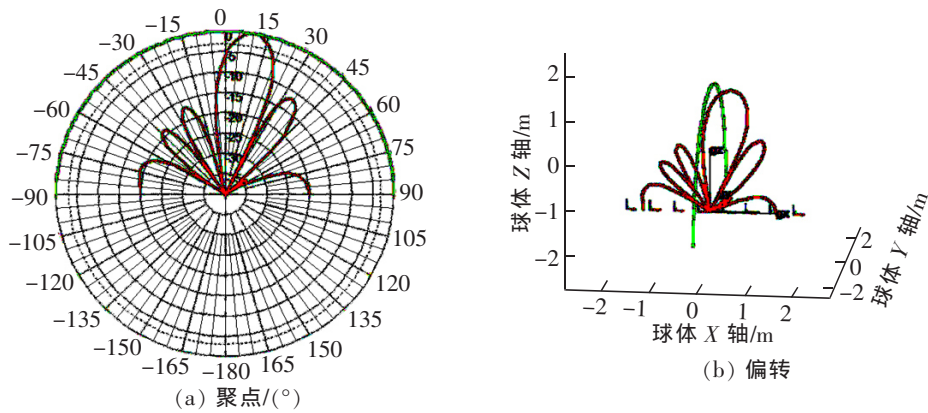


图 2 PA 声波的聚焦与偏转

Fig.2 PA focusing and flection results

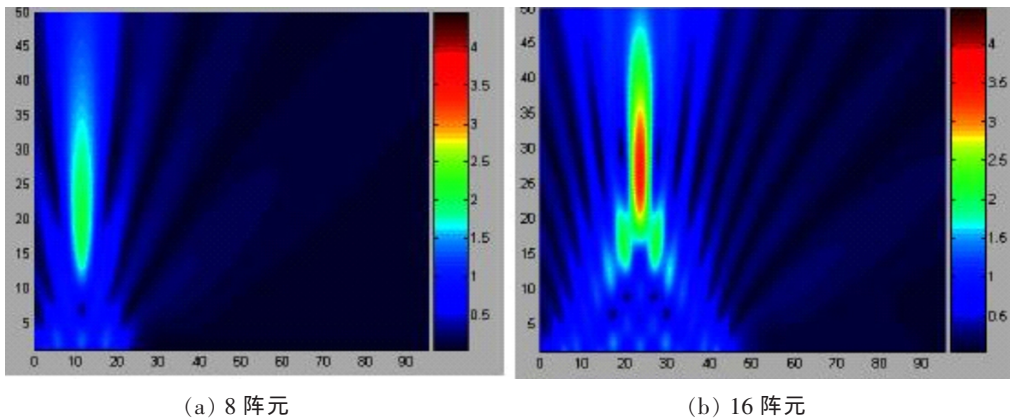


图 3 聚焦精度与阵元数量的关系仿真

Fig.3 Relationship between number of PA units and focusing precision

阵元本体宽度为 $b=2\text{ mm}$, 阵元间距 $d=3\text{ mm}$ 时, 阵元个数分别为 8 和 16 时, 各阵元依次相隔 $0.2\ \mu\text{s}$ 发出声波时的干涉效果, 其中暖色调比冷色调所代表的能量高, 深色比浅色所代表的能量高。

表 1 给出了更多参数时的仿真结果, 从结果可以看出, 阵元数量越多, 聚焦精度越高, 同时主瓣能量比重也越高, 但阵元数量的增加, 会导致通道数量的增加和控制电路、驱动电路的增加, 使整体电路复杂度增加。

表 1 不同阵元时的聚焦精度

Tab.1 Focusing accuracy under various units number

阵元数量	理想焦点/(mm,mm)	实际焦点/(mm,mm)	偏差 MSE/mm ²
4	(5.5,30)	(5.2,16)	98.045
8	(11.5,30)	(11.1,20)	50.080
16	(23.5,30)	(23.3,27)	4.520
24	(32,30)	(31.8,28)	2.020
32	(47.5,30)	(47.5,29)	0.50

聚焦精度除了与以上参数相关外, 还与时钟分辨率密切相关。声波的不同时延影响各声波干涉时的相位, 并形成声波的偏转。Erhard A 等分析了时钟的量化误差与旁瓣离散化之间的关系, 旁瓣的能量与主瓣能量的比例可用下式表示^[10]

$$S = \left(\frac{1 - \text{sinc}(1/\mu)}{N \text{sinc}(1/\mu)} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\pi}{\mu(6N)^{\frac{1}{2}}} \text{ (while } \mu \gg 1 \text{)} \quad (3)$$

式中: N 表示阵元个数; μ 表示脉冲周期相对于最小时钟量化误差的比值。 S 越小表示能量越集中、聚焦精度对于确定的 N ,通过增加 μ 值可以获得理想的 S 值,但 μ 的增加是以硬件开销为代价的,也就是说,时钟分辨率越高,聚焦效果越好,但对硬件的要求也会越高。因而需要在性能需求和硬件成本二者之间确定一个平衡点。

针对水下焊接的实际,水中声速约为 1 340 m/s,PA 一般在工件上方 40 cm 左右,焦距不会超过 50 cm,因而可确定所用 PA 的参数见表 2。

表 2 PA 的工作参数
Tab.2 Working parameters of PA

阵元数量	中心频率/MHz	激励电压/V	阵元间隔/mm	阵元宽度/mm	阵元厚度/mm	阵元高度/mm
16	2	120	1.7	1.5	1.1	10

2 控制及驱动电路设计

电路从功能上划分为控制电路、激励信号产生及放大电路、带宽滤波器、声波发送和接收放大电路等部分,此外,为了灵活准确地控制焦点的变化,还设计了高精度时钟发生器,以精确控制各阵元所发出声波的时间差。具体如图 4 所示,其中,控制电路包括 16 路独立的通道,每个通道均由与门电路 74HCT11 控制,仅当启动信号 Start signal、时钟输出信号 Out 均为高电平时,相应通道的激励信号 Excitation 才能通过与门电路送往后面的阵元放大及激励电路,驱动阵元发出所需的声波。

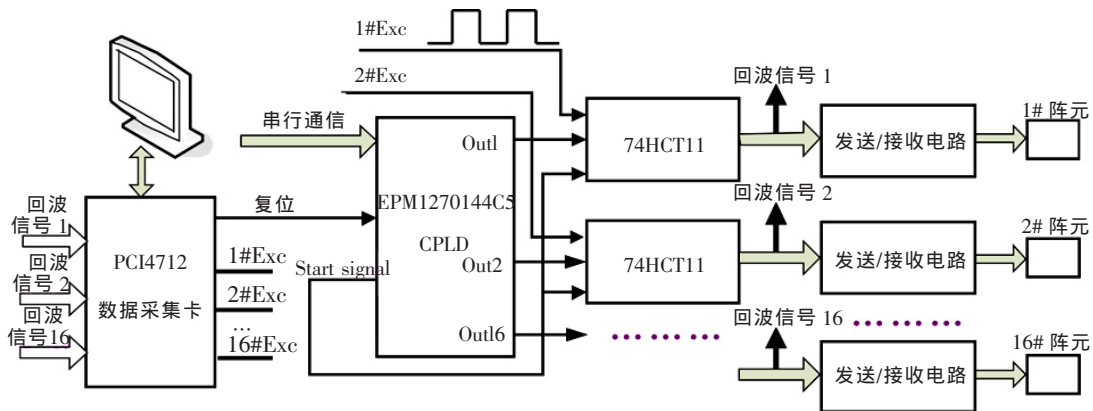


图 4 控制电路结构

Fig.4 Structure of control circuit

根据预先设计好的扫描路径,计算出各阵元间的时间差,并将这些值存储在计算机中,工作时按一定的步序依次将这些值送往 CPLD(complex programmable logic device);高精度时钟信号由 CPLD 器件 EPM1270144C5 实现,它集成有 1 270 个逻辑单元、近千个宏单元及 8 KB flash 单元,各通道的触发过程如下:

* EPM1270144C5 每次接收一组由计算机通过串口送来的时间序列值,并依次存储在长度为 8 bit 的 16 个寄存器中,每个寄存器对应一个阵元。

* CPLD 完成时序信号的接收后,启动其内部的高速硬件累加器开始计数,并将累加值与各通道的时间序列值进行实时比较,在匹配的瞬间将对应的信号从 OUT 口送出,从而确保时序的准确性。

* 利用高速三输入与门电路 74HCT11,确保只有当激励信号、时钟信号和启动信号均为高电平时,对应的阵元才能被激励并发出声波。

PA 工作中,位于工件上方约 30 cm,由式(2)可知,所需的最小延时为 26.97 ns,最大延时约为 1 799.69 ns,将 EPM1270144C5 的工作频率确定为 100 MHz 时,8 位的累加器可以实现的最小延时和最大延时分别为 10 ns 和 2 550 ns,完全满足上述的使用要求。但需要注意的是,各通道的初始时刻,以及各阵元所发声波

的频率和初相位必须相同,为满足这些要求,由 CPLD 发出的起始信号同时送往各通道的门器件,并且时序输出越高,信号所用的时钟比较器为同一累加器,由于 CPLD 芯片内各通道所具有的时延特性是相同的,因而可以认为各通道的起始时刻是完全相同的。

图 5(a)所示为声波发射电路,激励信号被高频变压器 EE1302 放大,最高电压可达 130 V;图 5(b)是声波接收电路,回波被阵元接收后,首先利用高频三极管 NPN9013 放大,然后通过由 M33078 构成的有源带通滤波器进行滤波,滤波后的信号最后由高速信号采集卡 PCI4712 所采样。

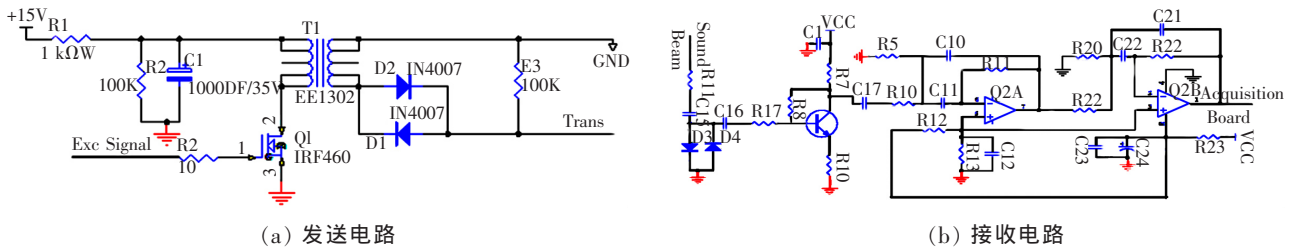


图 5 声波发送和接收电路
Fig.5 Sound wave emitting and receiving circuit

3 结论

PA 可以方便地实现声波的偏转和聚焦,影响其精度的因素主要有阵元数量、阵元间隔大小以及时钟精度,通过研究得到以下结论:

- 1) 聚焦精度受 PA 的物理参数影响,阵元数量越多,聚焦精度越高,但相应的硬件电路越复杂。同时,PA 使用的环境对电路参数的选择也有影响,电路要能完成最小及最大延时时间的精确计量。
- 2) 干涉波的相位差由激励波的延时决定,而延时的准确性与时钟精度密切相关,即聚焦精度也取决于时钟精度,时钟精度越高,聚集精度也越高。
- 3) 工作频率的增加可以提高时钟精度,通过 CPLD 而不是选用微处理器产生时钟脉冲,可以显著提高工作频率。

在水下湿法焊接中,利用 PA 进行焊缝信息检测,相比于单管超声波传感器具有灵活、高效的特点,但水下焊接环境恶劣,信号受到的干扰大,如何实现 PA 信号的高速、有效处理,需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] MAZZAFERRO J A, MACHADO I G. Study of arc stability in underwater shielded metal arc welding at shallow depths[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 233(3): 699-709.
- [2] 石永华, 郑泽培, 黄晋. 浅水湿法和常压空气中焊接的电弧稳定性[J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(7): 67-71.
- [3] 高辉, 焦向东, 周灿丰, 等. 基于 Abaqus 的水下摩擦螺柱焊焊接过程仿真[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 50-54.
- [4] 郭宁, 王美荣, 郭伟, 等. 水下湿法自保护药芯焊丝[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 13-16.
- [5] 魏康, 李康, 李建生, 等. 冷轧退火不锈钢焊接接头的组织及性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2): 97-102.
- [6] 张晨曙, 叶建雄, 尹懿, 等. 焊接自动化中传感器的应用[J]. 南昌工程学院学报, 2012, 31(6): 58-62.
- [7] 贾剑平, 刘云龙, 陈建平, 等. 基于旋转电弧 TIG 焊的信号处理研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(5): 168-170.
- [8] 张晨曙, 叶建雄. 超声波在焊缝跟踪中的应用[J]. 焊接技术, 2009, 38(4): 1-3.
- [9] 刘朝阳, 张晨曙, 叶建雄, 等. 基于互相关的超声传感水下焊接测距[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 183-185.
- [10] ERHARD A, BERTUS N, MONTAG H J, et al. Ultrasonic phased array system for railroad axle examination[J]. E Journal of Nondestructive Testing, 2003, 8(3): 274-277.

Application Research of Ultrasonic Phased Array in Underwater Wet Welding

Ye Jianxiong¹, Li Zhigang², Chen Qun³

(1. Zhejiang Insitution of Mechanic & Electric Engineering, Hangzhou 310053, China;

2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Leping No.1 Middle School of Jiangxi Province, Leping 333300, China)

Abstract: The popular sensors used in land welding automation are faced with lot of difficulties while they are used in water. It is meaningful to find a new kind of sensor which is suitable for wet welding. Ultrasonic Phased Array (PA) can work in water conveniently, which controls each element to send out required sound beam separately and focus on specific points. Compared with single ultrasonic sensor, PA works fast and effectively. Interference principle of acoustic beam is analyzed at first, and then the relationship between focusing precision and the shape of PA, the number of sensor element, gap distance between adjacent units and time resolution is revealed with simulation. Then, proper physical parameters of PA are determined. Finally, high time-resolution circuit based on CPLD is given out, which works together with sound emitting and receiving circuits to realize fast scan on welding workpiece, so that the seam line could be deduced with underwater distance detection. Researches manifest that PA is effective for wet welding.

Key words: underwater wet welding; ultrasonic phased array; sound interference; circuit design

(上接第 104 页)

Study on Left-Turn Waiting Area Setting Considering Traffic Saturation

Chen Yiheng¹, Zheng Changjiang¹, Ma Genghua²

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A reasonable left-turn waiting area setting can greatly improve the capacity of the left-turn lane. Firstly, the conditions and effects of left-turn waiting area setting are explored under different traffic saturation of left-turn lanes. Secondly, the capacity model of left-turn lane is modified considering the factors such as the capacity of waiting area, change interval and the microscopic characteristics of the vehicles. Finally, the above modified model is verified by traffic survey and VISSIM simulation. The results show: 1) The left-turning waiting area channelization is beneficial to the improvement of the left-turn lane capacity, but with the increase of traffic saturation, the effect is smaller and the maximum queue length is larger; 2) Through VISSIM simulation, the error of the capacity model can be controlled below 2% considering the influence of factors such as the waiting area capacity.

Key words: left-turn waiting area; the capacity of left-turn lane; traffic saturation; VISSIM simulation