

基于车流量的信号灯及车道数智能调节系统设计

潘 涛¹, 卢明宇²

(1. 安徽三联交通应用科技股份有限公司, 合肥 230601;

2. 安徽三联学院 交通工程学院, 合肥 230601)

摘要: 针对城市道路交通流的不确定性和随机波动性, 应用基于 BP 神经网络算法和韦伯斯特模型来优化城市道路, 提高车辆通行效率。利用神经网络算法较高的预测精确度对交通流进行预测, 并以此预测结果为基础, 提前对导向可变车道进行变换, 由此提高了道路的空间利用率; 然后依据车道属性改变后的数据, 运用改进后的韦伯斯特模型计算信号灯配时参数, 并结合当前道路的具体状况来优化红绿灯配时, 由此提高了路口的时间利用率。以合肥市某交叉路口交通流量数据对提出的方法进行测试, 验证了该方法的有效性。

关键词: 可变导向车道; 信号灯; 车辆通行效率

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2020)03-0060-08

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2020.03.013

Design of Intelligent Regulation System for Traffic Lights and Lane Numbers Based on Traffic Volume

PAN Tao¹, LU Ming-yu²

(1. Anhui Sanlian Transportation Application Technology Co., Ltd, Hefei 230601, China;

2. Traffic Engineering College, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China)

Abstract: With the uncertainty and fluctuation of the traffic flow, a BP neural network algorithm and Webster model are applied to optimize urban roads and improve traffic effectiveness. In this method, the traffic volume is forecast with the high prediction accuracy of the neural network algorithm, and the variable direction lanes are switched based on the forecast data, which can improve the utilization ratio of the roads. According to the data of the changed lane attributes, the signal timing parameters are calculated through the improved Webster model and the signal timing dial is optimized with the specific conditions of the current road. In this way, the time utilization rate at the intersection is improved. With the traffic volume data at an intersection in Hefei as an example, this proposed method has been tested and it proves to be effective.

Key Words: variable direction lane; traffic light; traffic efficiency

0 引言

随着经济的发展, 汽车数量急速增长, 交通

拥堵成为普遍现象。传统的红绿灯和导向车道不能很好地缓解交通拥堵, 致使汽车尾气排放

作者简介: 潘涛(1968—), 男, 上海人, 工程师, 主要从事电厂热能动力研究。

量增加,造成环境污染。

在交通流预测方面,Brian L. Smith 和 Michale J. Demetsky 对比了交通流预测的历史平均、时间序列和非参数回归模型;Lee S 等使用实际数据实验和对比分析了多元回归、ARIMA、神经网络、卡尔曼滤波四种短时交通预测方法^[1];史其信、郑为中四种不同的道路网短时交通流预测方法进行了比较。英国运输与道路实验室(TRRL)成功开发出 TRANSYT (Traffic Network Study Tools)交通控制系统后,又在 TRANSYT 的基础上开发了 SE00T 系统;澳洲科学家研究出了实时交通配合方案,即有选择、阶段性地进行交通系统调整和控制 SCATM 系统^[2]。这些控制系统在欧美发达国家的道路网络中得到了广泛的应用。

仅依靠对交通流的预测并不能解决交通拥堵、道路时空利用率低的问题,而应以科学化、智能化的手段进行调配,提高通行效率,对缓解城市交通拥堵、减少资源浪费有着巨大的现实意义^[3]。因此本研究基于车流量设计了信号灯及车道数智能调节系统,拟解决上述问题。

1 数据收集及算法

1.1 数据收集

运用红外传感器对城市道路各流向交通流进行检测,得到路口各流向车流量,将获得的交通流数据运用 BP 神经网络和自适应网络组成的模糊神经推理系统进行处理,利用神经网络的自学习能力对所获得的每个周期参数进行计算,使计算的结果不断优化,快速得到最优解,从而获得短时交通流预测结果。通过对合肥市金寨路与汤口路交叉口交通流量进行调研,获得车流量数据如图 1 至图 4 所示。

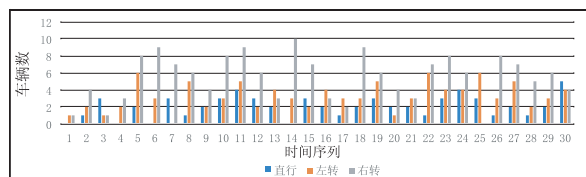


图1 汤口路西进口车流量数据

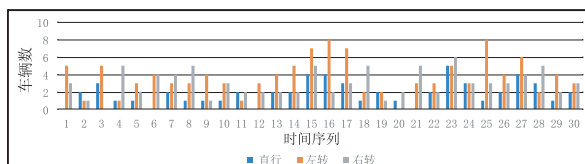


图2 汤口路东进口车流量数据

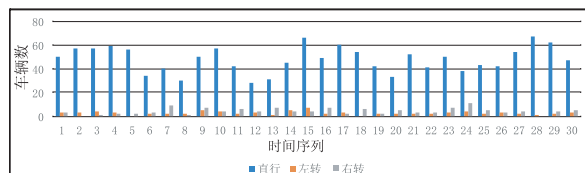


图3 金寨路北进口车流量数据

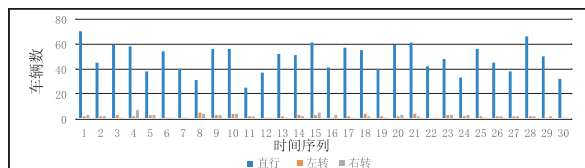


图4 金寨路南进口车流量数据

1.2 BP 神经网络算法

神经网络算法作为一种模拟人脑神经网络的数学模型,其本质是反映输入如何转化为输出的一种数学表达式,而数学表达式取决于由具体的问题和数据训练及设计的神经网络结构。神经网络算法具有并行计算能力、非线性全局作用、联想记忆能力、容错能力、强大的自适应和学习能力等特点,它的基本处理单元和人脑神经一致,即神经元,一般是一个具有多输入、单输出的非线性单元^[4],因此,其构成包括输入区、处理区以及输出区。神经网络算法应用最为广泛的算法模型为 BP 神经网络算法(多层前馈网络的误差反向传播算法),模型主要结构是分层网络,即将神经网络分为输入层、隐含层和输出层。其中,输入层的作用是接收外部信号,并将接收的外部信号通过层与层之间的神经元传递至中间层,而隐含层是神经网络的内部处理单元,根据处理问题的不同,隐含层可以有多层,也可以没有多层。系统的输入变量和输出变量个数主要由神经网络输入和输出的节点数体现,输入变量和输出变量越多,节点数越多。需要说明的是,在 BP 神经网络的每一层中都有独立的神经元数、权重值、偏差和激活函数,

层与层互不影响。BP 神经网络模型见图 5。

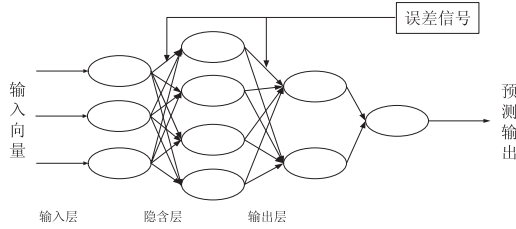


图 5 BP 神经网络模型

将收集到的数据通过 BP 神经网络算法对交通流进行预测,依据预测的交通流,对车道的属性进行改变。车道的属性改变后车道数也会发生相应的改变,运用改变后的车道数结合改进后的韦伯斯特模型对交通信号灯配时进行优化。

2 模型建立

基于以上设计方案,利用神经网络预测 4 个方向直行、左转的交通流,建立基于改变车道直行、左转方式的韦伯斯特模型,其主要实现方式如下。

(a)假设根据神经网络预测 4 个方向直行与左转的交通流分别为 $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8$,且选择其中对向车道中的较大交通流分别为 q_i, q_j, q_k, q_l ,其中 q_i, q_j 分别代表南北直行、左转方向上主要的交通流; q_k, q_l 分别代表东西直行、左转方向上主要的交通流。

(b)确定交通流后,因相同车流方向的交通流在某一路段内的交通量变化不大,所以使用双向车道同步改变车道指示方向的方式,即分为 a_1 南北对向直行、 a_2 南北对向左转、 a_3 东西对向直行、 a_4 东西对向左转这 4 种变换方式来对车辆的道路通行权进行重新划分。变换状态后的车道使用韦伯斯特模型来对其进行信号灯

相位配时。

设南、北、东、西车道总数分别为 n_1, n_2, n_3, n_4 ,每个进口道处设置一条可变车道。南进口直行车道数为 n_{z1} ,南进口左转车道数为 n_{z2} ;北进口直行车道数为 n_{z3} ,北进口左转车道数为 n_{z4} ;东进口直行车道数为 n_{z5} ,东进口左转车道数为 n_{z6} ;西进口直行车道数为 n_{z7} ,西进口左转车道数为 n_{z8} 。

将每个方向的可变车道直行、左转状态分别用 $w_i = 0$ 或 1 来表示,则车道转换方式可表示为:

$$\text{各进口道直行车道状态} = \begin{cases} n_{z1} + 1 (w_1 = 0) \\ n_{z3} + 1 (w_1 = 0) \\ n_{z5} + 1 (w_2 = 0) \\ n_{z7} + 1 (w_2 = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{各进口道左转车道状态} = \begin{cases} n_{z2} + 1 (w_3 = 1) \\ n_{z4} + 1 (w_3 = 1) \\ n_{z6} + 1 (w_4 = 1) \\ n_{z8} + 1 (w_4 = 1) \end{cases} \quad (2)$$

经过实地调研后得出该路口每相位每辆车的停车延误与启动延误为 3 s。可计算出每种不同组合状态下的交叉路口信号灯优化配时,又因为车启动与停车延误时间与黄灯时间相同,则各相位有效绿灯时间即为绿灯显示时间。

根据收集的数据,通过车道宽度校正、坡度及大车校正可以计算出南北、东西直行和左转车道的饱和车流率分别为 s_1, s_2, s_3, s_4 ,且把车辆到达进入每个车道的概率当成等可能事件,则车辆行驶在每条车道上的概率相同。

建立基于优化车道后的信号灯优化配时模型,可列如下 4 种情况。

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z1}}(n_{z1} + 1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}(n_{z5} + 1)} + \frac{q_l}{s_4} (w_1 = 0, w_2 = 0 \text{ 且 } q_1 \geq q_3, q_5 \geq q_7) \\ Y_2 = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z1}}(n_{z1} + 1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z7}}(n_{z7} + 1)} + \frac{q_l}{s_4} (w_1 = 0, w_2 = 0 \text{ 且 } q_1 \geq q_3, q_5 \leq q_7) \\ Y_3 = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z3}}(n_{z3} + 1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}(n_{z5} + 1)} + \frac{q_l}{s_4} (w_1 = 0, w_2 = 0 \text{ 且 } q_1 \leq q_3, q_5 \geq q_7) \\ Y_4 = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z3}}(n_{z3} + 1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z7}}(n_{z7} + 1)} + \frac{q_l}{s_4} (w_1 = 0, w_2 = 0 \text{ 且 } q_1 \leq q_3, q_5 \leq q_7) \end{cases} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_5 = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z2}}(n_{z2}+1)} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}(n_{z5}+1)} + \frac{q_l}{s_4} (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 且 } q_2 \geq q_4, q_5 \geq q_7) \\ Y_6 = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z2}}(n_{z2}+1)} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z7}}(n_{z7}+1)} + \frac{q_l}{s_4} (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 且 } q_2 \geq q_4, q_5 \leq q_7) \\ Y_7 = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z4}}(n_{z4}+1)} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}g(n_{z5}+1)} + \frac{q_l}{s_4} (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 且 } q_2 \leq q_4, q_5 \geq q_7) \\ Y_8 = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z4}}g(n_{z4}+1)} + \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}(n_{z7}+1)} + \frac{q_l}{s_4} (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 且 } q_2 \leq q_4, q_5 \leq q_7) \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_9 = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z2}}(n_{z2}+1)} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z6}}(n_{z6}+1)} (\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \geq q_4, q_6 \geq q_8) \\ Y_{10} = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z2}}(n_{z2}+1)} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z8}}(n_{z8}+1)} (\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \geq q_4, q_6 \leq q_8) \\ Y_{11} = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z4}}(n_{z4}+1)} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z6}}(n_{z6}+1)} (\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \leq q_4, q_6 \geq q_8) \\ Y_{12} = \frac{q_i}{s_1} + \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z4}}(n_{z4}+1)} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z8}}(n_{z8}+1)} (\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \leq q_4, q_6 \leq q_8) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{13} = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z1}}(n_{z1}+1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z6}}(n_{z6}+1)} (\omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \geq q_3, q_6 \geq q_8) \\ Y_{14} = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z1}}(n_{z1}+1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z8}}(n_{z8}+1)} (\omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \geq q_3, q_6 \leq q_8) \\ Y_{15} = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z3}}(n_{z3}+1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z6}}(n_{z6}+1)} (\omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \leq q_3, q_6 \geq q_8) \\ Y_{16} = \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z3}}(n_{z3}+1)} + \frac{q_j}{s_2} + \frac{q_k}{s_3} + \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z8}}(n_{z8}+1)} (\omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \leq q_3, q_6 \leq q_8) \end{array} \right. \quad (6)$$

以上公式中, q 为交通流, n 为车道数, w 为车道状态, s 为饱和车流率, Y 为交叉路口交通流率。

根据得到的每周期内不同车流率的组合状态, 可以利用以下改进的韦伯斯特算法进行

计算。

$$c_0 = \frac{1.5l+5}{1-Y_i'}, \quad (7)$$

式中, c_0 为总周期, l 为车辆延误。

有效绿灯时间: $c_1 = c_0 - l$ 。

南北直行绿灯时间:

$$G_{e1} = \begin{cases} \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z1}}(n_{z1}+1)} c_1 (\omega_1=0, \omega_2=0 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \geq q_3, i=1, 2, 13, 14) \\ \frac{q_i}{\frac{s_1}{n_{z3}}(n_{z3}+1)} c_1 (\omega_1=0, \omega_2=0 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_1 \leq q_3, i=3, 4, 15, 16) 。 \\ \frac{q_i}{\frac{s_1}{Y_i}} c_1 (\omega_2=0, \omega_3=1, i=5, 6, 7, 8) \\ \frac{q_i}{\frac{s_1}{Y_i}} c_1 (\omega_3=1, \omega_4=1, i=9, 10, 11, 12) \end{cases} \quad (8)$$

南北左转绿灯时间:

$$G_{e2} = \begin{cases} \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z2}}(n_{z2}+1)} c_1 (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 或 } \omega_1=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \geq q_4, i=5, 6, 7, 8) \\ \frac{q_j}{\frac{s_2}{n_{z4}}(n_{z4}+1)} c_1 (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 或 } \omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 且 } q_2 \leq q_4, i=9, 10, 11, 12) 。 \\ \frac{q_j}{\frac{s_2}{Y_i}} c_1 (\omega_1=0, \omega_2=0, i=1, 2, 3, 4) \\ \frac{q_j}{\frac{s_2}{Y_i}} c_1 (\omega_1=1, \omega_4=1, i=13, 14, 15, 16) \end{cases} \quad (9)$$

东西直行绿灯时间:

$$G_{e3} = \begin{cases} \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z5}}(n_{z5}+1)} c_1 (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_2=0 \text{ 且 } q_5 \geq q_7, i=1, 3, 5, 7) \\ \frac{q_k}{\frac{s_3}{n_{z7}}(n_{z7}+1)} c_1 (\omega_2=0, \omega_3=1 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_2=0 \text{ 且 } q_5 \leq q_7, i=2, 4, 6, 8) 。 \\ \frac{q_k}{\frac{s_3}{Y_i}} c_1 (\omega_3=1, \omega_4=1, i=9, 10, 11, 12) \\ \frac{q_k}{\frac{s_3}{Y_i}} c_1 (\omega_1=1, \omega_4=1, i=13, 14, 15, 16) \end{cases} \quad (10)$$

东西左转绿灯时间:

$$G_{e4} = \begin{cases} \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z6}}(n_{z6}+1)} - c_1(\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_6 \geq q_8, i=9, 11, 13, 15) \\ \frac{q_l}{\frac{s_4}{n_{z8}}(n_{z8}+1)} - c_1(\omega_3=1, \omega_4=1 \text{ 或 } \omega_1=0, \omega_4=1 \text{ 且 } q_6 \leq q_8, i=10, 12, 14, 16) \\ \frac{q_l}{\frac{s_4}{Y_i}} c_1(\omega_1=0, \omega_2=0, i=1, 2, 3, 4) \\ \frac{q_l}{\frac{s_4}{Y_i}} c_1(\omega_2=0, \omega_3=1, i=5, 6, 7, 8) \end{cases} \quad (11)$$

通过以上模型可以计算得到每个相位的信号灯优化配时, 这样便可以与未经优化的信号灯周期配时进行对比分析。

3 实例验证

以合肥市金寨路与汤口路的交叉路口为例对信号灯优化配时进行验证。其交叉路口简图如图6所示。

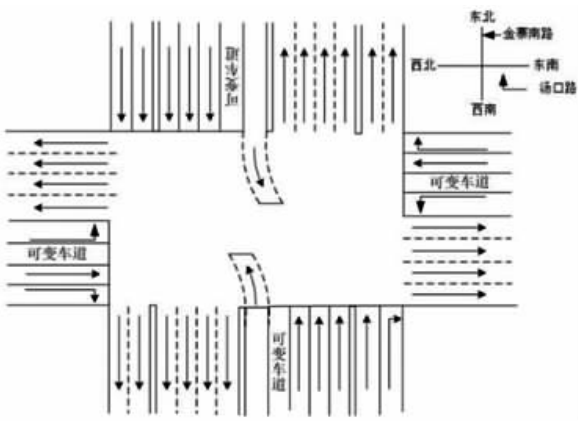


图6 合肥市金寨路与汤口路交叉路口简图

基于改变车道后信号灯配时的优化图如图7所示。

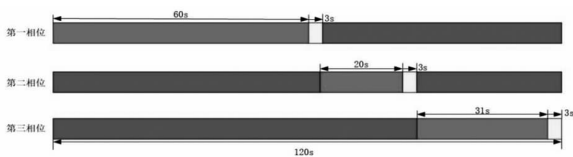


图7 信号灯优化配时图

经计算得到, 南北直行方向的平均绝对误差(MAE)为11.184, 10.923, 均方误差(MSE)为217.553, 195.787; 南北左转方向的平均绝对误差(MAE)为3.182, 2.502, 均方误差(MSE)为13.673, 9.741。通过对比可知, 本设计比正在使用的线性、非线性或者单一预测的精度高, 能够较好地拟合交通流的变化, 为后期设置可变车道提供了较好的预测基础, 并为信号灯配时提供了理论基础。

4 系统设计

4.1 设计流程

将高精度的BP神经网络算法应用到交通流预测中, 通过预测的交通流在道路合适的位置设置检测器检测车流量, 并通过设置导向信号灯来对车辆进行合理的疏导, 结合优化过的信号灯配时, 可较大程度缓解交通拥堵。设计流程图见图8。

4.2 相位内交通流分析

就上述的金寨路与汤口路交叉路口而言, 通过对其道路进行分析, 将其分为以下三个相位, 如图9所示。

4.3 可变导向车道的选择

设置可变导向车道在一定程度上可以缓解城市交通拥堵的问题^[5]。其实现的方法是对所



图 8 设计流程图

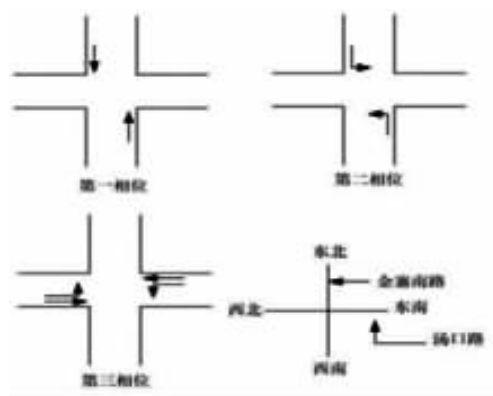


图 9 交叉路口相位图

获得的车流量数据进行定量分析,再得出固定时段相应的车道改变方案。通过对交通流的预测,结合延误模型对比分析车道两种属性的延误结果,并以此为改变车道属性的变换条件,得到可变导向车道的最优状态。

4.4 可变导向车道与信号灯配时相结合的分析

结合以上分析,在道路中设置一条可变车道,当车道属性发生改变后对信号灯进行重新配时。基于此,提出如下方案。

选取交通信息中的交通量、占有率和饱和度等多个指标,构建短时交通状态神经网络预测模型,对后续时刻的交通状态进行预测,从而形成车道变换的预决策,为形成真正的车道实时变换决策作准备。对设置可变车道的交叉路口进行交通运行仿真,分析左转和直行车道交通拥堵状态,并对可变车道转变控制前后的交通延误进行对比,以转变后交通总延误减小为原则来定义车道变换的组合条件。

4.5 可变导向车道的控制与仿真实验

图 10 为车均延误结果比较,图 11 为道路总延误结果比较。

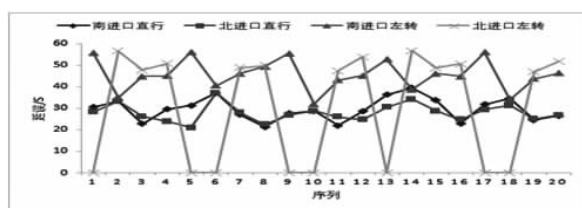


图 10 车均延误结果比较

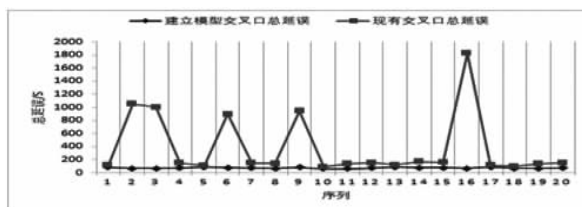


图 11 道路总延误结果比较

图 11 是在设置一条可变导向车道之后对南北进口的延误建立模型并计算出的相应的延误,即利用改进后的韦伯斯特模型计算相关变量,再通过延误公式计算结果作出该图。由该图可知,在一定情况下可以实现可变车道的转换,且通过可变车道最佳状态的设置,该交叉路口的车辆延误得到一定程度的减少。

5 结论

遵循传统的道路交叉口渠化原则,将可变导向车道和常规车道组合设置在城市干道,支持常规的交通控制设施和信号控制技术,在可变导向车道行驶方向标识的协同作用下,根据车辆通行情况自动调整可变导向车道的规定行

车方向。机动车通行高峰时段的仿真实验结果显示,与动态连续车道管理方法和静态车道管理方法相比,复合动态车道管理方法能够改善道路交叉路口的整体性能,能够更加均衡地利用干道双向的道路空间,这种性能优势随着交叉路口机动车交通负荷的提高而愈发显著,而且结合现有道路上的直行待行区,可以增加车辆的通行效率,缓解交通拥堵。

参考文献:

- [1] 张卓然. BP神经网络和自适应模糊推理系统在多传感器信息融合系统中的研究[D]. 武汉:武汉工业学院,2012.
- [2] 韩鹏. 基于短时交通流预测交叉口优化配时研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [3] 唐凡. 基于神经网络的城市交通流预测研究[J]. 四川水泥,2019(4):335.
- [4] 胡枫. 基于马尔科夫模型的短时交通流预测研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.
- [5] 杨慧慧. 城市交通流短时预测模型研究[D]. 焦作:河南理工大学,2015.
- (责任编辑:夏玉玲)
- (上接第26页)
- [4] 薛雅丽. 基于STM32W108的粮食储备系统粮情监测[J]. 唐山学院学报,2016,29(3):35-37.
- [5] 任丽棉. 基于STM32的电力谐波测试仪的设计[J]. 唐山学院学报,2014,27(6):67-68.
- [6] 范大勇. 基于STM32的低成本高精度电能测量装置设计[J]. 传感器与微系统,2019(10):85-89.
- [7] 戴捷,胡晓吉. 基于光传输的USB键盘鼠标一体化设计[J]. 计算机工程与设计,2012,33(7):2620-2627.
- [8] 刘春林. 基于USB协议键盘信息快捷输入技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [9] 滕鹏,姜昌华,王春慧,等. 基于HID类的USB手势输入系统设计与实现[J]. 数字技术与应用,2017(2):180-181.
- (责任编辑:李秀荣)
- (上接第41页)
- [8] XU G, CHENG Y, LIU F et al. A water level prediction model based on ARIMA-RNN[C]. 2019 IEEE Fifth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), Newark, CA, USA,2019:221-226.
- [9] 韩敏,王亚楠. 基于储备池主成分分析的多元时间序列预测研究[J]. 控制与决策,2009,24(10):1526-1530.
- [10] JAEGER H. The "echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks with an Erratum note [R]. Bonn: German National Research Center for Information Technology,2001.
- (责任编辑:李秀荣)