

基于交通流量自适应控制的路口子系统^①



李凤坤, 张 永

(大连东软信息学院 智能与电子工程学院, 大连 116023)

通讯作者: 李凤坤, E-mail: lifengkun@neusoft.edu.cn

摘 要: 在经济快速发展、道路建设不足等多重压力下, 城市交通负担越来越重. 在现有的资源条件下, 如何提高道路资源的利用效率和道路的通行效率是缓解交通问题的重要途径. 本文以设计一种基于交通流量自适应控制的路口子系统为目标, 首先分析、研究了交通管控系统的相关算法和相关信息系统的现状, 在综合现有系统的基础上, 设计了一个交通管控系统的体系结构, 系统包括路口子系统、区域中心和信息与控制中心等 3 部分. 通过路口子系统实现交通流数据的实时采集和路口本地的智能控制; 设计并实现了路口子系统的检测方案, 路口子系统的数据采集和本地的智能控制是云数据存储, 以及实时的交通信息平台发布的关键, 同时对于实现多个路口的协调管控具有重要的意义.

关键词: 交通流量控制; 路口子系统; 自适应控制; 智能控制

引用格式: 李凤坤, 张永. 基于交通流量自适应控制的路口子系统. 计算机系统应用, 2021, 30(12): 109-115. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8234.html>

Intersection Subsystem Based on Adaptive Traffic Flow Control

LI Feng-Kun, ZHANG Yong

(School of Intelligence and Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, China)

Abstract: Under the pressure of rapid economic development and insufficient road construction, the urban traffic burden becomes increasingly heavier. Under the existing resource conditions, how to improve the utilization efficiency and traffic efficiency of roads is an important way to alleviate traffic problems. In this study, with an intelligent signal intersection based on a traffic flow control subsystem as the goal, we firstly analyze the related algorithms of the traffic control system and the present situation of the information system. Based on the existing system, we design the architecture of the traffic control system, comprising the intersection subsystem, regional center, as well as information and control center. The intersection subsystem realizes the real-time acquisition of traffic flow data and the local intelligent control of the intersection. The detection scheme of the intersection subsystem is designed and implemented. The data acquisition and local intelligent control of the intersection subsystem are the keys to cloud data storage and real-time release from the traffic information platform, and it is of great significance to the coordinated control of multiple intersections.

Key words: traffic flow control; intersection subsystem; adaptive control; intelligent control

1 引言

近年来, 随着经济的快速发展, 交通拥堵问题日

趋严重. 各国政府纷纷通过加大对交通信息系统和公共交通投入来治理交通拥堵问题. 但在目前阶段多数

① 基金项目: 辽宁省自然科学基金 (20170520398); 辽宁省教育厅科学研究一般项目 (L2015041, L2012492)

Foundation item: Natural Science Foundation of Liaoning Province (20170520398); Scientific Research Program of Education Bureau, Liaoning Province (L2015041, L2012492)

收稿时间: 2021-02-20; 修改时间: 2021-03-18, 2021-04-01, 2021-04-13, 2021-04-16; 采用时间: 2021-04-20

城市依然采用繁忙时段收取拥堵费、控制小汽车保有量等政策性措施缓解各交通参与者的矛盾。许多研究表明,即使在交通高峰期,部分一、二线城市道路系统和高速公路系统仍然很畅通,所以实际上需要解决的问题是如何将车辆有效地分布在各道路网中,其关键是要解决好人与车、车与车、车与路的高效率交流问题。因此,为了促进交通参与者间高效的交流,最终需要一种新型、高效的智能交通管理系统解决交通拥堵问题。

大数据报告认为,智能交通管理系统应该从以下3个方面来着手:一是道路管理智能化;二是汽车本身更加智能化;三是出行方式智能化。交通管理依然处于非信息化时代或初级信息化时代,使得现有道路资源利用率不高是造成目前交通拥挤的一个重要因素。

在学术上,近年来,众多学者针对拥塞辐射、信号周期和效率、实时状态评价等内容进行研究。昆明理工大学交通工程学院的胡立伟等人将毒气在有限空间内的泄漏扩散抽象为交通拥塞的辐射蔓延,对交通拥塞辐射扩散规律进行研究,同时,对拥塞对路网服务能力的损伤进行研究^[1]。上海理工大学交通系统工程系赵靖等人^[2]为了提高排阵式交叉口这一非常规信号交叉口的运行效率,对其延误和最佳周期进行分析:相较于传统信号控制交叉口,建议排阵式交叉口采用较小的周期时长,且当关键流量比大于0.6时尤为显著,分析中发现最佳周期减小14.53%~34.65%。重庆大学信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室的李华民等人^[3]为了给公交优先信号配时系统提供足够的“思考”时间和准确的控制依据,提出了一种采用自适应渐消卡尔曼滤波和小波神经网络组合模型动态预测公交行程时间的方法。西南交通大学交通运输与物流学院的刘澜等人^[4]认为在城市路网中,将较为拥挤的子路网从整个路网提取出来,通过边界控制调节拥堵区域的出入流,缓解拥挤区域的拥挤程度,是解决城市大范围拥堵的一个有效途径。

另外,城市交通管理系统(Urban Traffic Management System, UTMS)也是近年来的研究热点,有较多的文献针对UTMS进行探讨。Zheng等人^[5]研究了利用互连的车辆轨迹数据进行交通流量估算的方法,为交通管理算法提供了理论支撑。Liao^[6]研究了微观的交通流稳定性难以描述运行车辆之间的动态关系问题,

建立了描述动态关系交通模型。大多数文献研究表明交通管理的两个目标是:优化交通流量,减少交通密度,避免交通拥塞要在交叉路口做工作。

2 基本概念

综合现有的国内外智能交通管理系统研究发现,一个完善的能够改善交通状况的智能交通管控系统至少包括路口子系统、区域中心、信息与控制中心3个主要部分。其中,路口子系统安装有车辆检测装置(Vehicle Detection Device, VDD)和交通信号控制装置(Traffic Signal Control Device, TSCD)。这些装置能够对路口的交通流状况进行实时的测量,对交通信号进行控制。基于这些测量和控制功能,路口子系统能够完成对单一路口的管理,并为区域中心提供数据和控制链路。区域中心汇总相邻多个路口的数据,按照一定的策略,完成多个路口交通的协调或控制。信息与控制中心进一步汇总各个区域控制中心的数据,以整个城市的交通优化为目标,完成流量的预测、预警、多区域协调和交通信息实时发布等工作。本文研究的重点是:路口子系统的设计与实现。

为了对相关话题取得共识,下面给出一些定义:定义符号 L 表示交通信号时长, L^R 为红灯时长, L^G 为绿灯时长。设有 n ,那么,连续3个红灯表示为 $L_{n-1}^R, L_n^R, L_{n+1}^R$ 。需要注意,红绿灯的排列顺序为交叉的,如图1所示。

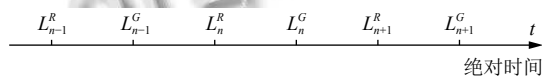


图1 红绿灯的排列顺序示意图

另外, L_{n-1}^{R+} 表示第 $n-1$ 个红灯开始的时刻, L_{n-1}^{R-} 表示第 $n-1$ 个红灯结束的时刻,因此,有如式(1)所示的等式成立。

$$\begin{cases} L_{n-1}^{R-} = L_{n-1}^{G+} \\ L_{n-1}^{G-} = L_n^{R+} \\ L_n^{R-} = L_n^{G+} \\ L_n^{G-} = L_{n+1}^{R+} \\ L_{n+1}^{R-} = L_{n+1}^{G+} \end{cases} \quad (1)$$

定义1. 候灯车队长度(Number of Waiting Vehicles, NWV),简称候灯长度,是指交叉路口某一方向上,某个时间点之前积累的等候绿灯的车辆数。用符号 $W(t)$ 表

示, $W_{NS}(t)$ 表示南北方向长度,称为 t 时间点之前的南北长度; $W_{EW}(t)$ 表示东西方向长度,称作 t 时间点之前的东西长度.

定义2. 交叉路口流量 (Quantity of Flow at Intersection, QFaI), 简称路口流量或流量, 是指交叉路口某一方向上, 某一段时间内通过的车辆数, 用符号 $F(t)$ 表示, $F_{NS}(t)$ 表示南北方向流量, 称作 t 时间南北流量, $F_{EW}(t)$ 表示东西方向流量, 称作 t 时间东西流量.

同时有组合符号, $W_{NS}(L_n^R)$ 表示第 n 个红灯时南北方向候灯车队长度; $F_{EW}(L_{n-1}^G)$ 表示第 $n-1$ 个绿灯时东西方向的路口流量.

路口流量 $F(t)$ 是实时数值, 实际中该值随时间是变化的. 但是, 该值具有统计特征, 因此, 理论上我们使用 \bar{F} 表示. \bar{F} 定义为 $F(t)$ 的数学期望, 即式(2).

$$\bar{F} = E(F(t)) \quad (2)$$

定义3. 剩余候灯车队长度 (the number of the left vehicles after last green light), 简称剩余长度, 是指某个时间点式(3)的值. 记为 R . R_{NS} 表示南北方向剩余长度, 称作南北剩余, R_{EW} 表示东西方向剩余长度, 称作东西剩余.

$$R(L_n^{R+}) = W(L_{n-1}^R + L_{n-1}^G) - F(L_{n-1}^G) \quad (3)$$

定义4. 在留次数 (number of staying in waiting vehicles queue), 是指某一车辆在剩余候灯车队中经历的红灯个数. 记作 $S(t)$. 在留次数是等待时间的抽象表示.

定义5. 交通拥塞 (Traffic Congestion, TC), 是指在某一交叉路口的某一方向上, 某一时刻的候灯车队全部通过路口需要的信号灯个数. 记作, $C(t)$. 即式(4).

$$C(t) = R(t)\bar{F} \quad (4)$$

3 系统的体系结构

一个完善的智能交通管控系统的功能模块及支撑关系如图2所示, 其中路口子系统用于完成交通信息数据收集. 为路口本地处理和多路口协同处理提供数据支持. 路口子系统之间及其与区域中心之间通过无线技术进行通信.

多路口协同处理由区域中心来完成, 区域中心与路口子系统之间是多对多的关系, 区域中心同时也是路口子系统的上级节点. 路口子系统通过区域中心接入主干网, 将路口的某一方向当前的剩余长度上传到

云数据存储. 云数据存储来完成大量交通数据的存储.

应用服务器来完成实时交通信息的发布. 应用服务器从云数据存储上获取数据, 进行数据汇总、计算、与地图融合等处理, 然后, 通过短信、微信、开放接口等3个形式向外提供服务.

4 路口子系统

4.1 检测方案设计

候动车队长度和路口流量是做出交通控制决策的重要参数. 实时检测这两个参量能够实现交通信号灯的实时控制和调整. 积累这两个参数, 进行一段时间的统计分析, 能够对相应路段的交通流量进行预测. 因此, 设计有效的检测方案很重要. 这一节来对这两个参量的检测方案进行详细设计.

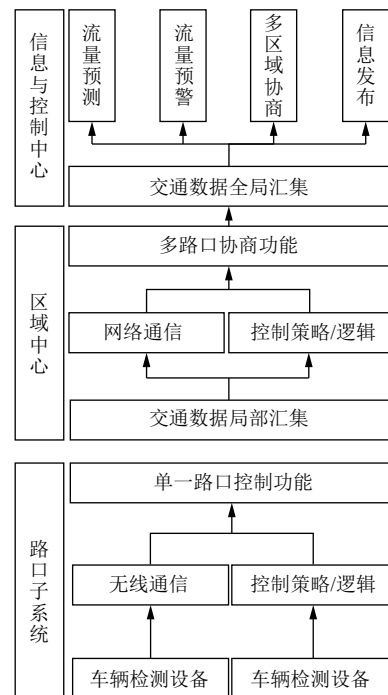


图2 系统功能模块及支撑关系

(1) 基于地感线圈的检测方案

基于地感线圈的检测方案使用车检器和车流量计两类器件来完成数据采集. 车检器采集当前位置有无车辆的数据, 一般用0或1表示. 0表示无, 1表示有. 车流量计在车检器的基础上由车辆有无的数据进行数量的统计. 检测方案的硬件配置示意如图3所示.

路口流量的统计较为直观, 可以直接由车流量计直接读出. 候动车队长度, 尤其是剩余长度, 需要前端

流量计与后端流量计配置来完成。

由第2节中的定义1和定义3容易得出定理1。

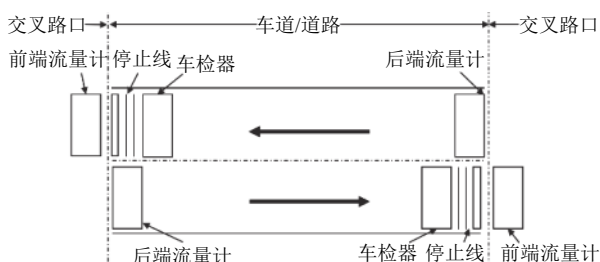


图3 基于地感的车检/流量检测路口配置示意图

定理1. 有等式 $F_{前端}(L_{n-1}^{G-}) = F_{前端}(L_n^{R+}) = F_{前端}(L_n^{R-})$

成立。

证明: 由交通规则可知:

红灯时间无车辆通过前端流量计位置, 请参照图4所示. 即: 从第 $n-1$ 个绿灯结束时开始, 经过第 n 个红灯开始时间, 直到第 n 个红灯结束, 路口流量都是相等的。

$$\therefore F_{前端}(L_{n-1}^{G-}) = F_{前端}(L_n^{R+}) = F_{前端}(L_n^{R-})$$

证毕。

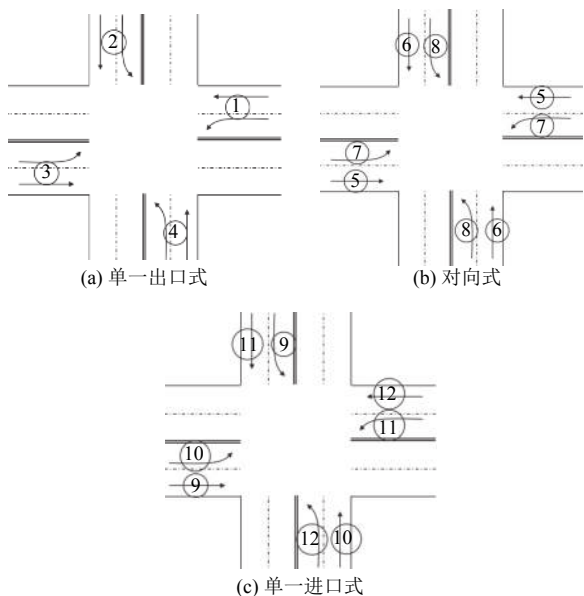


图4 交通信号灯基本通行信号

定理2. L_n^R 时, 也即 L_n^{R-} 时刻的候灯车队长度 $W(L_n^R)$ 与 L_n^{R+} 时剩余候灯车队长度有式(5)所示的关系, 其中, $F_{后端}(L_{n-1}^{G+})$ 表示第 $n-1$ 个红灯时流入该车道的车辆数. 其中, L_n^R 表示第 n 个红灯结束时与 L_n^{R-} 相同的含义。

$$W(L_n^R) = W(L_n^{R-}) = R(L_n^{R+}) + F_{后端}(L_n^{R-}) - F_{前端}(L_n^{R-}) \quad (5)$$

证明: $W(L_n^{R-})$ 为第 n 个红灯结束时车道的候灯车队长度. 根据一般逻辑可知, 它应该等于第 n 个红灯开始时的剩余长度与当前时刻后前两个流量计的差的和。

$$\therefore W(L_n^{R-}) = R(L_n^{R+}) + F_{后端}(L_n^{R-})$$

证毕。

理论上 $R(L_n^{R+})$ 是一个迭代求值的过程. 实际中, $W(L_n^R)$ 可以用式(6)来计算。

$$W(L_n^R) = W(L_n^{R-}) = F_{后端}(L_n^{R-}) - F_{前端}(L_n^{R-}) \quad (6)$$

但是, 为了保证式(6)正确, 需要有等式(7)成立, 其中 $t_0 = 0$ 为系统的启动时间。

$$R(t_0) = R(L_1^{R+}) = 0 \quad (7)$$

如果不能保证式(7)成立, 那么, 误差会一直传递, 有定理3为证。

定理3. 设 $R(t_0) = R(L_1^{R+}) = \Delta$, 则有 $F_{前端}(L_n^{R-}) + R(L_n^{R-}) > F_{后端}(L_n^{R-})$

证明: 采用不完全归纳法:

当 $t=L_1^R$ 时, 得:

$F_{后端}(L_1^{R-}) = F_{前端}(L_1^R) + F(L_1^R)$, $F(L_1^R)$ 表示第1个红灯内流入的车辆。

由定理1可知, $F_{前端}(L_1^{R-}) = F_{前端}(L_0^{G-})$

$\therefore L_1^R$ 为系统启动后第一个灯

$$\therefore F_{前端}(L_0^{G-}) = 0$$

$$\therefore F_{后端}(L_1^{R-}) = F(L_1^R)$$

$$\therefore R(t_0) = R(L_1^{R+}) \neq 0$$

$$\therefore R(L_n^{R-}) = F(L_1^R) + R(L_1^{R+})$$

$$\therefore \text{实际车道上车辆为 } F_{前端}(L_n^{R+}) + F(L_1^R) + R(L_1^{R+}) >$$

$$F_{前端}(L_1^{R+}) + F(L_1^R)$$

$$\text{即 } F_{前端}(L_1^{R-}) + R(L_1^{R-}) > F_{后端}(L_1^{R-})$$

当 $t=L_n^R$ 时, 有 $F_{前端}(L_n^{R-}) + R(L_n^{R-}) > F_{后端}(L_n^{R-})$

那么, $t=L_{n+1}^R$ 时, $F_{后端}(L_{n+1}^{R-}) = F_{前端}(L_{n+1}^{R-}) + F(L_{n+1}^R)$

得: $F_{前端}(L_{n+1}^{R-}) + R(L_{n+1}^{R-}) > F_{后端}(L_{n+1}^{R-})$

证毕。

所以, 为了不让误差传递, 要保证式(7)成立。

在如图4所示的路口配置中, 引入车检器就是为了来消除误差的. 其算法如图5所示. 由前面的分析可知, 误差来源于前后端两个流量计不一致的各种情况. 误差可能原因如下: 一是系统运行初期由于两个流量计工作时, 道路上有车辆; 二是前后端两个流量计工作

精度引入的计数不一致;三是前后端两个流量计的工作故障导致的. 无论哪种原因,都要调整前后端两个流量计在车道无车时,数值相等.

具体的过程是这样的:首先,判定车检器是否有车,如果有车,那么不能进行任何调整.为了及时能够处理误差,需要不停地问询车检器.如果车检器反馈无车,读取前后端流量计的数值;其次,判断两个数值是否相同,相同的话,不做任何处理,不同的话,意味着引入误差了,因此就进行误差调整.再次,采用前端流量计优先的策略来纠正误差,即将前端流量计的值赋给后端流量计.最后,记录修改时间并判定误差引入的频度,过频的话,例如小于12小时,就上报检修.

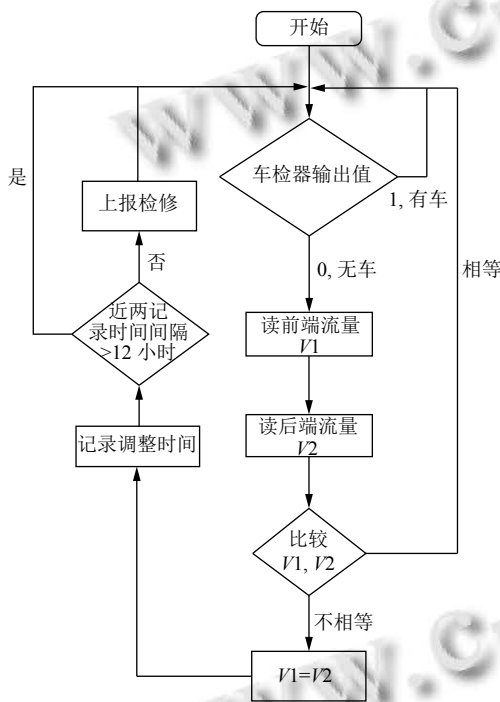


图5 消除误差算法

4.2 路口网络设计

根据路口的面积大小,可以有不同的通信方案.从低能耗和数量比较小这两个角度来考虑,主要可以选择的通信技术有 ZigBee 和 LoRa 两种.

ZigBee 主要用于距离短、功耗低且传输速率不高的各种电子设备之间进行数据传输以及典型的有周期性数据、间歇性数据和低反应时间数据传输的应用.

LoRa 改变了以往关于传输距离与功耗的折衷考虑方式,为用户提供一种简单的能实现远距离、长电

池寿命、大容量的系统,进而扩展传感网络.即: ZigBee 与 LoRa 的主要差别还是通信距离和对障碍物的穿透性.

分析路口的实际情况,我们可以得到如图6所示的配置图.当车道小于3 km时,应该采用图6所示的配置.当车道距离大于3 km时,应当采用图7所示配置.

后端流量计的长度选择为3倍的剩余长度即可.综上所述,前、后端流量计之间的距离比较大,一般会超过 ZigBee 的通信距离,因此,选择 LoRa 作为无线通信技术比较合适.

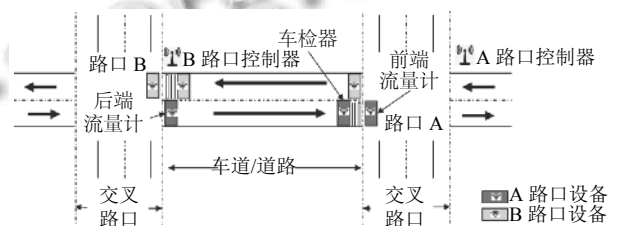


图6 车道小于3 km时单一车道配置示意图

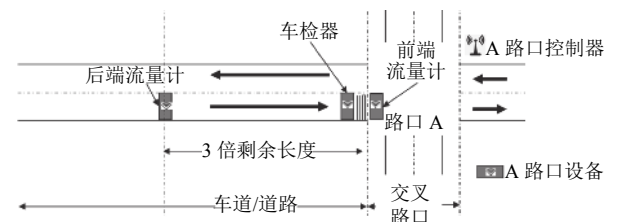


图7 车道大于3 km时单一车道配置示意图

5 路口子系统的实现

5.1 通信设备选择

感知设备端的 LoRa 通信设备选择为济南有人物联网技术有限公司的USR-LG206-L-C.之所以选择USR-LG206-L-C,是因为它具有如下的特点:支持集中器通信协议;支持主动上报/被动轮询发送模式;支持数据加密传输;RS232接口;2000 m传输距离;硬件看门狗,可靠性强;ESD保护,安全性高.

区域中心端的 LoRa 通信设备选择济南有人物联网技术有限公司的USR-LG220-L数据集中器.之所以选择USR-LG220-L数据集中器,是因为它具有如下的特点:LoRa私有协议,简单、安全、可靠;智能自组网;采用时分复用,多通道挂载,减小干扰;支持挂载200个节点,最多可达500个;支持主动上报、被动轮询、双向传输;支持网口、4G,联网方式丰富;支持1个WLAN

无线局域网, 网口支持 10 Mb/s–100 Mb/s 速率; 支持 VPN (PPTP/L2TP), PPPOE, DHCP, 静态 IP 等功能; 支持 MQTT/socket 服务器连接, 云服务及开发; 远距离传输, 空旷地带传输距离可达 2000 m; 可设置对应节点模块为低功耗; 数据加密、校验处理, 提高数据传输的安全性、可靠性。

5.2 感知设备选择

车检器用于检测停止线附近是否有车辆, 如果没有车辆就认为整个车道没有车辆。车检器原理上有两种, 一种是地感线圈, 利用金属会影响磁通量的变化来检测是否有车辆; 另一种是地磁, 利用本地的金属对地球磁场的影响来检测是否有车辆。两种技术的安装方式不同, 地磁设备小, 不需要破土, 更易于安装。所以系统选择地磁设备。

车流量计是在车检器的基础上通过 MCU 检测信号变化来实现。也就是通过计算一个信号的上升沿和一个下降沿的组合来进行计数。

5.3 软件功能实现

系统的软件功能很多, 原型系统进行了验证性地实现。下面按照操作的过程将实现的效果展示一下。

首先, 路口控制器要进行网络配置, 将本地的通信设备调到合适的状态。实现的功能如图 8 所示。这个连接是初始化连接。连接后就可以进行详细的配置了, 以便对 LoRa 设备进行精确的控制。如图 9 所示。

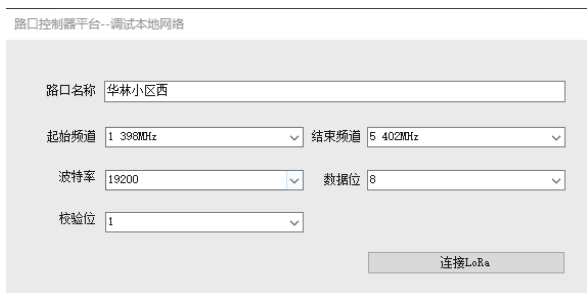


图 8 本地网络配置功能界面

LoRa 的配置中, 空中速率比较重要, 需要谨慎选择。速率共有 10 个等级, 对应关系如表 1 所示, 本文中的系统采用的是第 6 等级。

通信信道共 128 个, 即 0–127。LoRa 模块默认使用 47 信道。工作频段与信道的转化关系为: 工作频段=(398+ch) MHz。

通信模块设备配置后, 工作正常, 就可以进行后续

的配置。最重要的配置就是对本地路口交通流的管控配置。如图 10 所示, 是为管控策略配置基本的参数。

这些参数是基本参数, 为策略的正常运行提供限制作用, 也就是策略可以在这个限制内进行适当地调整, 但是不能超出这些参数设定的范围。



图 9 LoRa 设备的详细配置

表 1 空中速率与等级对应关系

等级	速率 (b/s)	等级	速率 (b/s)
0	146	6	1758
1	268	7	3125
2	488	8	62500
3	537	9	10937
4	878	10	21875
5	977		

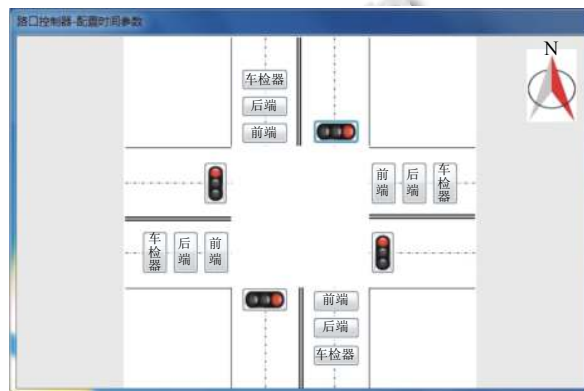


图 10 路口交通流管控策略基本参数

6 结论

本文对智能交通管控系统国内外的发展现状进行了综述, 并对主要的管控方案进行了分析与研究。本文给出了系统整体的体系结构及路口子系统的具体设计。设计了路口子系统的交通流检测方案, 通过前、后端流量计, 给出路口流量、路口剩余长度两个参数的实

时值,并据此计算平均路口流量、平均路口剩余长度参量;通过车检器检测路口有无车辆,进行交通信号的智能控制,设计了路口网络.对路口使用的无线网络技术进行了对比选型.明确了单一路口中各设备安装位置及具体的设备配置.每个车道需要3个设备,前端流量计、后端流量计和车检器.路口子系统检测方案的设计与实现证明本文提出的方案能够在—现有的道路资源条件下,提升道路资源利用率,在一定程度上缓解交通压力,也在一定程度上提高了交通管理的信息化水平.

参考文献

- 1 胡立伟,杨锦青,何越人,等.城市交通拥塞辐射模型及其对路网服务能力损伤研究.中国公路学报,2019,32(3):145-154.
- 2 赵靖,郑喆,韩印.排阵式交叉口延误及最佳周期模型.中国公路学报,2019,32(3):135-144.
- 3 李华民,吴俊美,孙棣华,等.基于RFID电子车牌数据的公交行程时间预测方法.中国公路学报,2019,32(8):165-173,182.
- 4 刘澜,卢维科,胡国静,等.面向边界控制的路网小区划分.中国公路学报,2018,31(11):186-196.[doi:10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.020]
- 5 Zheng JF, Liu HX. Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 79: 347-362. [doi:10.1016/j.trc.2017.03.007]
- 6 Liao XY, Chen QY, Sun DH, *et al.* Fuzzy evaluation of traffic flow stability based on the discreteness of traffic parameters. *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference*. Chongqing: IEEE, 2017. 3613-3618.