

文章编号: 1001-0920(2013)12-1907-05

主干道动态协调控制技术

沈国江, 钱晓杰

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 针对主干道信号协调控制问题, 提出一种新的动态分段协调控制技术. 首先分析路段长度、交通密度以及信号周期时间对关联度的影响, 设计了基于分层结构的关联度模糊计算方法和基于关联度的控制子区划分方法; 然后提出一种子区协调控制算法, 根据一段时间内交通流信息计算子区公共信号周期、上下行相位差和各路口的绿信比. 实际应用表明, 该控制技术能有效降低主干道交通流平均旅行时间和平均停车率, 效果令人满意.

关键词: 控制子区; 主干道; 交通流; 协调控制; 模糊逻辑

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Dynamic coordination control technique for trunk road

SHEN Guo-jiang, QIAN Xiao-jie

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: SHEN Guo-jiang, E-mail: gjshen1975@126.com)

Abstract: Aiming at the problem of the signal coordination control in trunk road, a novel dynamic subsection coordination control technique is proposed. Firstly, the influences of the intersection distance, the traffic density and the cycle time on the correlation degree between two neighboring intersections are analysed. The fuzzy computing method of correlation degree based on hierarchical structure and the division method of control subarea based on correlation degree are designed. Then the subarea coordination control algorithm is also designed by which the public cycle time of control subarea, up-run offset and down-run offset of section, and split of each intersection are obtained. The actual application shows that the proposed technique can decrease the average travel time and average stop rate effectively, and the application result is very satisfied.

Key words: control subarea; trunk road; traffic flow; coordination control; fuzzy logic

0 引言

主干道承担了市内主要交通负荷, 是城市内部交通大动脉. 将主干道上的交通控制器进行联网, 实现主干道路口交通信号的协调, 提高主干道的交通服务水平, 对于改善整个城市交通状况具有重大意义.

主干道交通协调控制是路网协调控制的特例, 国内外众多专家学者对其进行了深入研究. Lee 等^[1]提出了集散控制方法, 实现了对交叉口群内车辆的模糊协调控制; Little 等^[2]开发了最大绿波带交通信号设计优化程序, 通过最大化带宽与周期的比值来设定相位差, 提高了主干道的服务水平; Gartner 等^[3]在 Little 工作的基础上加以改进, 得到了多带宽交通信号设计优化程序; 孔祥杰等^[4]提出了一种城市交通干线动态双向绿波带智能协调控制策略, 以实现干线双向车流不停车地通行.

协调控制一般要求所有路口采用一致的信号周期时间, 而对整条主干道采取协调控制并不一定能提高车辆的通行效率. 为此, 本文提出一种新的主干道交通流动态分段协调控制技术. 首先计算主干道各相邻路口间的关联度, 并以此为依据将主干道划分为若干个控制子区; 然后以控制子区为单位对主干道的交通流进行协调; 最后通过实际应用验证了该技术的有效性.

1 系统结构

如图 1 所示, 整个控制算法包括控制子区划分模块和协调控制模块. 控制子区划分模块首先计算相邻路口关联度, 然后根据关联度的大小对主干道上的路口进行分区. 如果控制子区内只有一个路口, 则可采用单点自适应控制技术^[5], 否则子区内所有路口采用协调控制技术.

收稿日期: 2012-08-22; 修回日期: 2012-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174174); 浙江科技计划项目(2012C21071); 浙江自然科学基金项目(Y1090208).

作者简介: 沈国江(1975-), 男, 副教授, 博士, 从事智能控制理论、智能交通系统等研究; 钱晓杰(1988-), 男, 硕士生, 从事城市道路交通建模、优化和控制技术的研究.

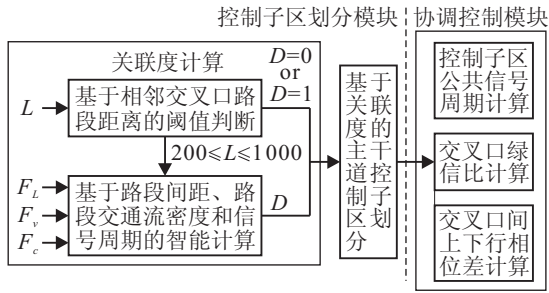


图 1 算法结构示意图

2 控制子区

2.1 关联度分析

相邻路口关联度是一个对相邻路口间交通流相关性进行定量描述的交通参数,综合反映了路段交通状态和信号控制方案差异对相邻路口间关联程度的客观影响.卢凯等^[6]研究发现,关联度的强弱主要与相邻路口间距离的远近、路段交通流量大小以及路口信号配时参数的优化程度有关.

1) 路段长度.随着路段长度的增加,相邻路口的关联度变弱,协调的必要性降低.定义路段长度影响系数 F_L 如下:

$$F_L = \begin{cases} 1, & L < 200; \\ \frac{1000 - L}{800}, & 200 \leq L \leq 1000; \\ 0, & L > 1000. \end{cases} \quad (1)$$

其中: L (单位: m) 为相邻路口之间的路段长度; $F_L \in [0, 1]$.

2) 路段交通流密度.路段交通流密度大小反映了路段拥挤状况,是判断相邻路口交通信号是否需要协调的一个主要因素.定义两个相邻路口 i 与 $i + 1$ 之间的路段交通流密度影响系数 F_ρ 为

$$\rho_{(i \rightarrow i+1)} = \frac{N_{E(i \rightarrow i+1)} + N_{P(i \rightarrow i+1)}}{n_{(i \rightarrow i+1)}L}, \quad (2)$$

$$F_\rho = \min \left(\max \left(\frac{\rho_{(i \rightarrow i+1)}}{\rho_{s,(i \rightarrow i+1)}}, \frac{\rho_{(i+1 \rightarrow i)}}{\rho_{s,(i+1 \rightarrow i)}} \right), 1 \right). \quad (3)$$

其中: $i \rightarrow i + 1$ 代表由路口 i 到路口 $i + 1$ 的交通流通行方向, $N_{E(i \rightarrow i+1)}$ (单位: PCU, Passenger Car Unit, 标准车当量数) 为相应方向路段上现有的车辆数, $N_{P(i \rightarrow i+1)}$ (单位: PCU) 为相应方向路段上下一个信号周期内的车辆预测增量^[7], $n_{(i \rightarrow i+1)}$ 为相应方向路段上的车道数, $\rho_{(i \rightarrow i+1)}$ (单位: PCU/m) 为相应方向上的路段交通流密度, $\rho_{s,(i \rightarrow i+1)}$ (单位: PCU/m) 为饱和状态下相应方向上的路段交通流密度.式(3)表示 F_ρ 取两个方向的交通流密度与饱和密度比的极大值且 $F_\rho \in [0, 1]$.

3) 信号周期时间.为了对相邻路口实施信号协调,要求它们的信号周期必须相等或成倍数关系.定义相邻路口间的信号周期影响系数 F_C 为

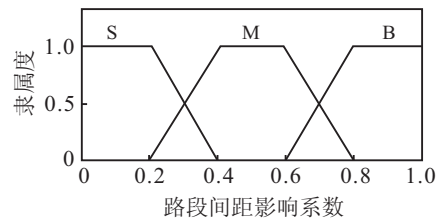
$$F_C = \left| \left(\frac{R + 1}{2} - \frac{T_b}{T_s} \right) \right| \times \frac{2}{R - 1}. \quad (4)$$

其中: T_b 和 T_s 分别为 2 个相邻路口信号周期中的较大值和较小值; R 为周期比例 T_b/T_s 的最大可能值,一般取 2,对于超过 2 的实际情况并不多见. $T_b/T_s \in [1, R]$, 因此 $F_C \in [0, 1]$.

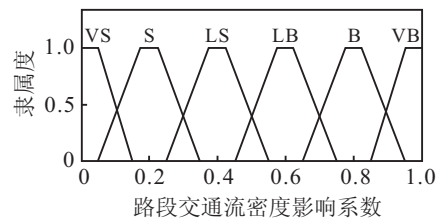
2.2 关联度计算

如图 1 所示,采用两层结构来实现相邻路口关联度的计算.上层基于相邻路口间距长短对关联度进行阈值判断,也就是说,如果相邻路口路段长度 $L < 200$ m,则关联度 D 为最大,即 $D = 1$;如果 $L > 1000$ m,则关联度 D 为最小,即 $D = 0$;只有 $L \in [200, 1000]$ m 时,才需进入下层计算.下层采用一种三输入单输出的模糊模块实现关联度的计算.

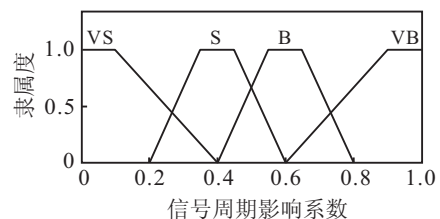
F_L 、 F_ρ 、 F_C 和 D 的模糊子集定义如下: F_L 的语言值为 S(小)、M(中)、B(大),隶属度划分如图 2(a) 所示; F_ρ 的语言值为 VS(很小)、S(小)、LS(略小)、LB(略大)、B(大)、VB(很大),隶属度划分如图 2(b) 所示; F_C 的语言值为 VS(很小)、S(小)、B(大)、VB(很大),隶属度划分如图 2(c) 所示; D 的论域为 $D \in [0, 1]$,语言值为 VW(很弱)、W(弱)、M(中)、S(强)、VS(很强),隶属度划分如图 2(d) 所示.



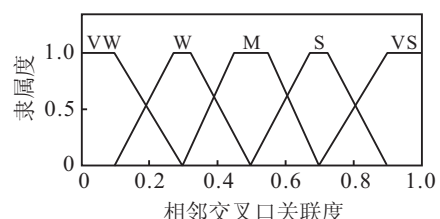
(a) 路段长度影响系数模糊集定义



(b) 路段交通流密度影响系数模糊集定义



(c) 信号周期时间影响系数模糊集定义



(d) 相邻交叉口关联度模糊集定义

图 2 F_L 、 F_ρ 、 F_C 和 D 的模糊集定义

模糊规则如下: D 正比于 F_L 、 F_ρ 和 F_C . 也就是说, 如果相邻路口路段长度越小, 相邻路口间路段上单位距离单位车道上车辆很多, 且相邻路口的周期时间很一致, 则这两个相邻路口的关联度越强. 该模块有 72 条模糊规则, 表 1 列举了部分规则.

表 1 部分模糊规则

规则	F_L	F_ρ	F_C	D
1	B	VS	VB	S
2	B	S	VB	VS
3	B	LS	VB	VS
4	B	LB	VB	VS
5	B	B	VB	VS
6	B	VB	VB	VS
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.3 控制子区划分

对关联度设定两个阈值 D' 和 D'' , $D' < D''$, 譬如 $D' = 0.4$, $D'' = 0.6$. 如果 $D \leq D'$, 则这两个相邻路口不属于同一个控制子区; 如果 $D \geq D''$, 则划分在同一个子区; 如果 $D \in (D', D'')$, 则根据实际情况确定这两个相邻路口是否属于同一个控制子区. 一种情况是: 为了提高协调效果, 适当限定控制子区规模, 一般一个子区所含路口不多于 10 个, 当包含路口过多时, 即使 $D \in (D', D'')$, 这两个路口也不能分在同一个子区. 阈值 D' 和 D'' 的选择必须谨慎, 它直接影响子区的划分结果. 根据经验: 如果主干道位于市中心, 则由于非机动车和行人较多, 对机动车影响较大, 机动车很难连续通过多个路口, 建议 D' 和 D'' 适当取大一些; 如果主干道位于郊区, 则为了提高机动车通行效率, D' 和 D'' 可适当取小一些.

3 协调控制算法

对于某城市主干道, 假定东西向为主干道, 南北向为次干道或支路, 由西往东为主干道上行方向, 由东往西为下行方向. 定义: 相位 1 为西向左转、直行和右转, 即上行相位; 相位 2 为东向左转、直行和右转, 即下行相位; 相位 3 为南北向左转、直行和右转. 在实际应用中, 如果某路口南北向交通流量较大, 则可以对相位 3 进一步细化.

协调控制需优化设计的参数有: 控制子区内公共信号周期时间 C , 路口各相位绿信比 λ 和相邻路口间相位差时间 t_o .

3.1 协调控制算法

首先, 控制子区内各路口以车辆总延误时间最小为目标, 采用如下所示的 Webster 最佳周期时间计算方法确定各自的信号周期时间:

$$C_o = \frac{1.5L_o + 5}{1 - Y} \quad (5)$$

其中: L_o 为路口一个信号周期内的损失时间, Y 为路

口交通流量比. 然后, 取控制子区内各路口信号周期时间 C_o 的最大值作为公共信号周期时间 C , 对应的路口为该控制子区的关键路口, 该子区内所有路口统一采用公共信号周期时间. 由于我国城市混合交通现象非常突出, 而式 (5) 中并没有考虑非机动车、行人和机动车的相互影响, 在实际应用中一般将式 (5) 确定的公共信号周期放大 10% ~ 15%.

3.2 绿信比和绿灯时间

绿信比和绿灯时间由各路口根据交通信息各自确定, 具体计算过程如下.

1) 计算各相位的校正流量

$$\bar{Q}_i(k) = \alpha Q_i(k-1) + \beta Q_i(k) + \gamma Q_i'(k+1) \quad (6)$$

其中: i 代表某一相位, $i \in \{1, 2, 3\}$; $\bar{Q}_i(k)$ 为相位 i 在第 k 个信号周期内的校正流量; $Q_i(k)$ 为相位 i 在第 k 个信号周期内的实际流量; $Q_i'(k+1)$ 为相位 i 在第 $k+1$ 个信号周期内的预测流量^[7]; 正系数 α 、 β 、 γ 满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, β 越大, 实时性越好, α 和 γ 越大, 稳定性越好, 一般取 $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.2$.

2) 计算绿信比

$$\lambda_i = \frac{\bar{Q}_i(k)}{\sum_{i=1}^3 \bar{Q}_i(k)} \quad (7)$$

其中 λ_i 为相位 i 的绿信比.

3) 计算绿灯时间

$$t_i = \lambda_i(C - Y_{all} - R_{all}) \quad (8)$$

其中: t_i 为相位 i 的绿灯时间, Y_{all} 和 R_{all} 分别为一个信号周期内所有的黄灯时间和全红时间. 如果 $t_i < t_{i,min}$, 则 $t_i = t_{i,min}$, $t_{i,min}$ 为相位 i 的最小绿灯时间, 不足的绿灯时间由其他相位按比例补充, 其他相位 j 需减少的绿灯时间为

$$t_{j,s} = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1,2,3;k \neq i} \lambda_k} (t_{i,min} - t_i) \quad (9)$$

如果 $t_i > t_{i,max}$, 则 $t_i = t_{i,max}$, $t_{i,max}$ 为相位 i 的最大绿灯时间, 多余的绿灯时间按比例分配给其他相位, 其他相位 j 额外获得的绿灯时间为

$$t_{j,a} = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1,2,3;k \neq i} \lambda_k} (t_{i,max} - t_i) \quad (10)$$

3.3 相位差与启动时刻

对于主干道协调控制, 相位差分为上行相位差 $t_o^{i,i+1}$ 和下行相位差 $t_o^{i+1,i}$, 即

$$t_o^{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{v_{i,i+1}} \quad (11)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n-1$, n 为控制子区内路口数目; $d_{i,i+1}$ 和 $v_{i,i+1}$ 为路口 i 与 $i+1$ 之间上行方向的路段长度和平均速度.

设控制子区内上行方向 1 号路口以相位 1 开始, 且启动时间为第 1 s. 为了达到协调效果, 控制子区内其他路口相位 1 的启动时间 t_u^i 依次按相位差错开, 即

$$\begin{cases} t_u^1 = 1; \\ t_u^i = t_u^{i-1} + t_o^{i-1,i}, i = 2, 3, \dots, n. \end{cases} \quad (12)$$

如果 $t_u^i > C$, 则 $t_u^i = t_u^i - mC, m = 1, 2, \dots$, 使得 $t_u^i \in [1, C]$.

同样, 设控制子区内下行方向 n 号路口相位 2 的启动时间为 t_d^n s, 其他路口相位 2 的启动时间 t_d^i 也应按相位差错开, 即

$$\begin{cases} t_d^n = t; \\ t_d^i = t_d^{i+1} + t_o^{i+1,i}, i = n-1, \dots, 2, 1. \end{cases} \quad (13)$$

由于相邻路口间的路段长度和车流平均速度不同, 在协调控制过程中相位 1 和相位 2 的关系会出现 3 种情况: 1) 连续; 2) 重合; 3) 离散. 第 1) 种情况下, 相位 1 (或相位 2) 运行完毕后刚好是相位 2 (或相位 1) 的启动时刻到, 这种情况的效果最理想, 但由于路口间路段长度和车速的不均匀, 这种情况出现的可能性不大. 第 2) 种情况下, 相位 1 (或相位 2) 尚未运行完毕相位 2 (或相位 1) 的启动时刻就到了, 由于相位 1 与相位 2 重合, 导致两个相位间左转和直行冲突, 且会出现多余的绿灯时间. 第 3) 种情况下, 相位 1 (或相位 2) 运行完毕后相位 2 (或相位 1) 的启动时刻还未到, 且这段时间差小于相位 3 的绿灯时间, 导致信号周期内没有合适时间段放行相位 3. 控制方案的优化目标是尽量避免第 3) 种情况发生, 同时使第 2) 种情况重合的绿灯时间较小.

设控制子区内第 n 个路口相位 2 的启动时间为 $t_d^n = t$, 根据上述分析, 优化目标是子区内各路口相位 1 和相位 2 尽可能连续且不重合. 为此, 寻求一个最优的控制参数 t , 在约束条件 $t \in [1, C]$ 下, 满足优化性能指标 J_1 时尽可能满足性能指标 J_2 , 即

$$J_1 = \min \left(\sum_{i=1}^n (|t_u^i - t_d^i| > a^i ? 1 : 0) \right), \quad (14)$$

$$J_2 = \max \left(\sum_{i=1}^n |t_u^i - t_d^i| \right). \quad (15)$$

其中

$$a^i = \begin{cases} t_1^i, & t_d^i > t_u^i; \\ t_2^i, & \text{other.} \end{cases}$$

t_1^i 和 t_2^i 分别为路口 i 相位 1 和相位 2 的绿灯时间. 一旦 t 确定后, 根据式 (13) 即可以计算子区内其他路口相位 2 的启动时间 t_d^i . 如果 $t_d^i > C$, 则 $t_d^i = t_d^i - mC, m = 1, 2, \dots$, 使得 $t_d^i \in [1, C]$.

在实际应用时, 相位 1 与相位 2 重合或离散的情况是不可避免的. 如果出现相位 1 与相位 2 重合, 则可采取如下两种方法: 1) 适当提前终止相位 1 运行或

延后相位 2 启动, 这样可能会牺牲上行或下行通过带宽; 2) 通过“早断”相位 1 左转和“迟起”相位 2 左转来避免左转车辆与对向直行车辆的冲突, 也就是在相位 1 与相位 2 中间插入一个临时相位, 即东西向直行和右转. 具体采用那种方法需根据实际情况确定. 如果出现相位 1 与相位 2 离散, 则可采取如下两种方法: 1) 当间隔时间较大时, 可适当延迟相位 2 的启动, 让相位 3 先于相位 2 运行; 2) 当间隔时间较小时, 可适当提前相位 2 的启动. 但这两种方法都会稍微牺牲相位 2 的通过带宽.

4 应用案例

本文的控制技术已经用 C 语言编制成软件模块并嵌入某公司的 TCMS 交通控制软件平台和 ACS-3 集中协调式信号控制机中, 已于 2011 年下半年应用于某市城区的中兴路动态协调控制系统.

该市中兴路是贯穿整个城区的南北向主干道, 全长约 15.9 km, 路口间距最长 1.71 km, 最短 0.15 km, 双向 6 车道. 中兴路目前共有路口 26 个, 其中“T”型路口 3 个. 据 2011 年 3 月份统计, 高峰时期交通流量情况如下: 干线最大流量约为 1 767 veh/h, 最小流量约为 789 veh/h, 平均流量约为 1 230 veh/h; 支路最大流量约为 1 048 veh/h, 最小流量约为 124 veh/h, 平均流量约为 411 veh/h. 平峰时期交通流量情况如下: 干线最大流量约为 1 420 veh/h, 最小流量约为 325 veh/h, 平均流量约为 839 veh/h; 支路最大流量约为 836 veh/h, 最小流量约为 78 veh/h, 平均流量约为 315 veh/h.

系统在各个路口每个车道安装感应线圈车辆检测器, 在其中关键的 13 个路段安装视频车辆检测器, 对相关交通信息进行实时检测. 采用短时交通流综合预测模型对整个干道流量进行短时预测^[7]. 为了安全起见, 中兴路全程限速通行, 其中二环北路以北路段限速 80 km/h, 二环北路以南路段限速 50 km/h.

表 2 列举了系统改造前后实际使用效果, 改造前的统计是在 2011 年 6 月 12 日~18 日进行的, 改造后的是在 2011 年 11 月 20 日~26 日进行的, 统计时间各为 7 天, 性能指标取均值. 与系统实施前采用的单路口多时段定时控制相比, 各项性能指标都得到了很大提升.

表 2 实际应用效果

性能指标	改造前	改造后	改进率/%
平均通行时间/min	39	24	39
平均通行速度/(km/h)	25	38	52
平均停车率/(次/辆)	18.4	6.1	67

5 结 论

本文提出了全新的主干道分段协调控制技术. 该项技术能根据实时的交通状况, 动态更新控制子区,

动态确定协调控制参数. 在控制子区划分和协调控制中均将短期交通流预测结果作为一个重要输入, 根据未来交通状态的变化提前作出相应调整. 实际的应用效果表明, 该控制技术可以有效提高主干道通行效率, 效果十分明显.

需要强调的是, 如果主干道上的交通流已趋于饱和和状态, 或较多支路的车流量较长一段时间内接近主干道上的车流量时, 本文提出的控制技术的效果则不明显, 此时可以考虑采用区域协调控制技术.

参考文献(References)

- [1] Lee J H, Lee H K. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 1999, 29(2): 263-271.
- [2] Little J D C. The synchronization of traffic signals by mixed integer linear programming[J]. *Operations Research*, 1966, 14(1): 568-594.
- [3] Gartner N H, Stamatiadis C. Progression optimization featuring arterial and route based priori signal networks[J]. *Intelligent Transportation System*, 2004, 8(2): 77-86.
- [4] Kong X J, Shen G J, Xia F, et al. Urban arterial traffic two-direction green wave intelligent coordination control technique and its application[J]. *Int J of Control, Automation, and Systems*, 2011, 9(1): 60-68.
- [5] 沈国江, 孙优贤. 基于相序优化的多相位模糊交通控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(增): 654-658. (Shen G J, Sun Y X. Multi-phase fuzzy traffic control based on phase sequencer[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(S): 654-658.)
- [6] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴. 相邻交叉口关联度分析及其应用[J]. *华南理工大学学报*, 2009, 37(11): 37-42. (Lu K, Xu J M, Zheng S J. Correlation degree analysis of neighboring intersection and its application[J]. *J of South China University of Technology*, 2009, 37(11): 37-42.)
- [7] 任沙浦, 沈国江. 短时交通流智能混合预测技术[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2010, 44(8): 1473-1478. (Ren S P, Shen G J. Intelligent hybrid forecasting technique for short-term traffic flow[J]. *J of Zhejiang University: Engineering Science Edition*, 2010, 44(8): 1473-1478.)