

城市交通信号的 ANN 自校正预测控制

刘智勇, 李水友

(五邑大学 304 信箱, 广东 江门 529020)

摘要: 提出一种基于人工神经网络的城市交通信号的自校正预测控制方法. 充分考虑相邻交叉路口之间交通流的强耦合性, 在此基础上建立关于队长的交通模型; 其中, 受控路口下一周期到达的车辆数用人工神经网络(ANN)来预测; 通过该 ANN 还可获得确定最佳周期长度所需要的交通参量, 因此还可预测下一周期的长度; 上述预测值均用实测信息进行反馈校正, 在此基础上即可给出带约束的预测控制算法, 从而确定下一周期的控制策略. 仿真实例表明该方法具有较好的控制效果.

关键词: 智能交通控制; 自校正预测控制; 人工神经网络; 建模; 最优化

中图分类号: U491.5; TP273.2 **文献标识码:** A

Artificial neural networks self-tuning predictive control for traffic signals

LIU Zhi-yong, LI Shui-you

(Mailbox 304, Wuyi University, Guangdong Jiangmen 529020, China)

Abstract: A self-tuning predictive control method for traffic signals in urban area based on artificial neural networks (ANN) was proposed. The strong coupling between adjacent signaled intersections was fully considered, based on which a traffic model for queues was established. The number of approaching vehicles in the next cycle at this intersection was predicted by using ANN and the traffic parameters were obtained to decide the optimal cycle length. The feedback tuning method was used to process all the above prediction values by using real measured data. The constrained predictive control algorithm was given to determine the control tactics. Simulation results showed that the proposed method is effective.

Key words: traffic signal control; self-tuning predictive control; artificial neural networks; modeling; optimization

1 引言(Introduction)

城市交通控制技术作为智能交通系统(ITS)的主要研究方向之一, 已引起许多学者的关注. 一般来说, 为了行车安全, 交通控制中施加控制的间隔时间通常为一个周期 T , 并且事先要确定每个相位的最短和最长绿时, 当一个信号周期快要结束时, 目前有三种方法确定下一个周期的控制方案: 一是从每个相位的最短绿时开始, 根据停止线前是否检测到车辆或测得的队长来确定绿延时^[1~3]; 二是根据本周各相位的类饱和度来确定下周的各相位的绿时^[4]; 三是采用工业领域的最优控制方法^[5]. 方法一是典型的感应控制方法^[6], 一般情况下不能获得最优控制策略; 方法二用本周的类饱和度来确定下周的绿时显然不是实时控制方法; 方法三采用的状态方程通常假定停止线前车辆到达率为一常

数, 这显然不符合实际. 80 年代以来, 交通工程界对城市交通系统的实时自适应最优控制基本上持否定态度^[6]. 因此, 现在实际应用的交通控制系统大部分采用方法一和二. 近年来, 随着人工智能技术的发展, 人们尝试采用模糊控制、人工神经网络等方法进行交通控制, 计算机仿真结果已经显示出明显的优越性^[1~3, 7, 8]. 目前, 计算机技术、网络信息技术、车辆检测技术和人工智能技术已经取得了长足进步, 有学者对交通系统的实时自适应最优控制方法进行了反思^[9], 并指出: 改进和应用这种方法的条件已经成熟, 预计在未来的 5~10 年内会出现一种全新的实时自适应控制方法, 并有效地提高现有道路的服务水平.

预测控制采用模型预测、滚动优化和模型误差反馈校正, 因此, 其控制精度高且鲁棒性强, 近 20 年

来已在许多工业部门得到广泛应用^[10].神经网络因其具有较强的非线性映射能力正引起控制界的极大兴趣,神经网络与预测控制相结合是解决非线性系统控制问题的一种方法.由于交叉路口的信号控制系统具有较强的非线性、随机性、模糊性和不确定性,因而适合采用上述方法.本文给出一种新的车流量检测方式,在此基础上建立了队长交通模型,其中,下一周期到达的车辆数用一人工神经网络(ANN)来预测,而 ANN 的输入采用某时刻前上游出口的车流量和车速数据;通过该 ANN 还可获得确定最佳周期长度所需要的交通参量,因此可预测下一周期的长度;本周期结束时,用到达车辆数的实测值和本周期预测值的差对下周期的预测值进行反馈校正,于是队长模型被确定,在此基础上即可给出控制变量带有约束的预测控制方法,从而确定下一周期该路口的控制方案.由于控制方案的求解最终被归结为一个典型的二次凸规划问题,如何求解该优化问题成为解决问题的关键.本文利用该二次规划问题的特点,用一种等价的线性规划问题进行求解,大大提高了计算速度,从而满足了交通控制的实时性要求.仿真结果表明该算法是有效的.

2 基于 ANN 的平面交叉口交通模型(ANN based intersection traffic model)

单交叉口的信号控制方案通常由相位、周期和绿信比组成.相位数的确定通常要从交通需求和交通安全两方面考虑,本文不作研究.文[6]把交叉口车辆总延误最小作为目标,获得最佳周期长度表达式:

$$T_{\text{opt}} = (1.5t_L + 5)/(1 - Y). \quad (1)$$

其中, T_{opt} 表示最佳周期长度(s); t_L 为信号控制的总损失时间(s); $Y = \sum_{i=1}^n Y_i$, Y_i 为第 i 相信号临界车道的交通流量比, $Y_i = q_i/s_i$, q_i 是第 i 相信号临界车道的交通流量, s_i 为第 i 相信号临界车道的饱和流量,本文的交通流量均指标准小客车当量(PCU)^[6].文[1]通过研究发现,当周期在 $0.75T_{\text{opt}} \sim 1.5T_{\text{opt}}$ 范围内变动时,车辆延误没有明显变化,这说明,交通系统对周期参数的变化不是非常敏感,这就给方案选择带来了方便.

考虑一平面交叉路口的控制问题,如图1所示,该路口与上游路口之间的距离为 d ,两路口之间的路段可以是多车道的.现设计一种新的交通量检测方式,即:在路口 I 的各停止线前每个车道均安装两个环形线圈(相距 80 ~ 300 m),可检测车流量及排队长度;在上游路口的出口处安装两个环形线圈(相距 3 m),用于测量车流量和车速.

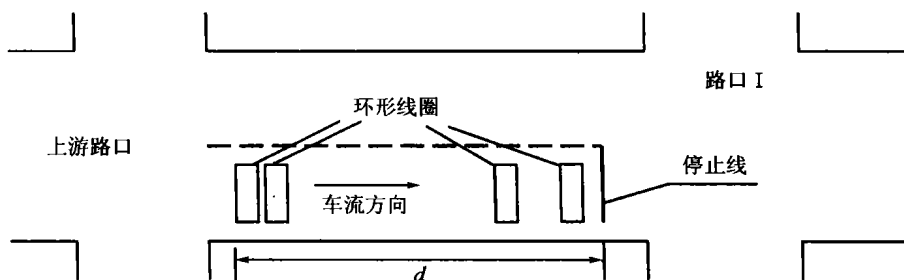


图1 平面交叉路口检测器安装位置
Fig. 1 Installing position of loop detector

显然,上游路口驶来车队的车速被测出后,可以算出该车队达到路口 I 的旅行时间 t_d , 于是,路口 I 相位 i 现时刻起 T 时段内到达的车辆数 $p_i(k)$ 满足下列关系式

$$p_i(k) = NN_{1i}(p_T(k_d, T)). \quad (2)$$

其中, k 为周期时刻 T_k 的下标, NN_{1i} 表示神经网络映射, $p_T(k_d, T)$ 表示 k_d 时刻前的 T 时段内上游路口流出的车辆数, $k_d = T_k - t_d$. 为了确定下一个周期的长度,可取 $T = 100$ s, 这样就可利用式(1)确定最佳的周期长度 T_{opt} .

交通信号的控制通常是以交叉口附近交通流特

征为依据的.现以停止线前第 i 相位的队长为状态变量,考察状态方程

$$l_i(k+1) = l_i(k) + B_i r_i(k) + a_i(k), \quad (3)$$

$$0 \leq l_i(k+1) \leq l_{i\max}.$$

其中, $l_i(k+1)$ 为第 k 周期结束时的队长, r_i 为控制变量绿信比, $B_i = -T_{\text{opt}}s_i$, s_i 为第 i 相轨道的饱和流量, a_i 为相位 i 第 k 周期 T_{opt} 内到达的车辆数(交通负荷)的预测值; $l_{i\max}$ 为第 i 相的最大排队长度,它是由道路的几何尺寸和检测器的安装位置决定的.由于已经预知下周期的周期长度为 T_{opt} , 则 a_i 与上游路口的出口的 k_d 时刻前 T_{opt} 时段内的交通量 $p_T(k_d,$

T_{opt} 有关. 于是利用式(4) 可得 $a_i(k)$ 的预测值

$$a_i(k) = NN_{2i}(p_T(k_d, T_{\text{opt}})). \quad (4)$$

3 控制器设计(Design of controller)

根据交通控制系统的特点,滚动优化性能指标函数可简化成如下形式

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^P \{ \alpha_i \| l_i(k+1) \|^2 + \beta_i \| r_i(k-1) \|^2 \}, \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^P r_i(k) = 1 - t_T/T_{\text{opt}}, \\ & l_i(k+1) = l_i(k) + B_i r_i(k) + a_i(k), \\ & r_i(k) \geq r_{i \min}, i = 1, \dots, P. \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $r_{i \min}$ 为第 i 相最小绿信比; $r_{i \min} = t_{i \min}/T_{\text{opt}}$, $t_{i \min}$ 为第 i 相最小绿灯时间(s),为了安全起见,其值一般不小于 15 s; t_T 为一个信号周期内总的过渡过程时间,如黄灯、全红等时间的总和;目标函数的第一项是队长的指标,第二项指标试图抑制控制量的剧烈变化,避免对交通流产生不利影响; α_i , $\beta_i > 0$, 分别为加权因子,根据各相位对控制量变化的敏感程度及道路几何尺寸选取.

对于最优化问题式(5),需要预测第 k 周期的周期长度和车辆到达数. 取 $T = 100$, 由式(2) 预测下一周期 k 各相位车道在 100 s 内的车辆到达数,于是获得各相位临界车道的交通量 $\hat{p}_i(k)$. 利用式(1) 获得下一周期 k 的最佳周期长度 T_{opt} , 利用式(4) 预测下一周期 k 各相车道的车辆到达数 $\hat{a}_i(k)$. 为了进一步改善模型失配和外界干扰的影响,提高控制器的鲁棒性,有必要用实测数据来校正各相未来的车辆到达数及其临界车道的交通量的预测值,从而构成闭环预测. 本文采用一种最简单的校正方法,即

$$p_i(k) = \hat{p}_i(k) + (\bar{p}_i(k-1) - \hat{p}_i(k-1)), \quad (6)$$

$$a_i(k) = \hat{a}_i(k) + (\bar{a}_i(k-1) - \hat{a}_i(k-1)). \quad (7)$$

其中, $\bar{a}_i(k-1)$, $\bar{p}_i(k-1)$ 分别为相位 i 第 $k-1$ 周期实测的车辆到达数和临界车道交通量. 因此,式(5)中的交通模型被确定下来.

综上所述,可归纳交通系统的 ANN 自校正预测控制算法如下

Step 1 按照交通负荷和交通安全的要求确定相位数 P , 并测得各相车道的饱和流量 s_i , $i = 1, 2, \dots, P$; 利用交通量检测器获得的数据对神经网络(2)进行训练,并获得训练好的神经网络 NN_{1i} , $i = 1, 2, \dots, P$. 设 k 表示下一周期时刻,现为 $k-1$ 周期(本周期)结束时刻.

Step 2 利用(2)、(6)及式(1)获得周期 k 的最

佳周期长度预测校正值 T_{opt} .

Step 3 利用式(4)和(7)获得下周期 k 内车辆到达数预测校正值 $a_i(k)$.

Step 4 求解式(5)给出的最优化问题,得到最优控制值 $r_i^*(k)$, $i = 1, 2, \dots, P$.

Step 5 将 T_{opt} , $r_i^*(k)$ ($i = 1, 2, \dots, P$) 作为控制方案加入交通系统.

Step 6 令 $k \leftarrow k+1$ 返回 Step 2.

每隔一段时间(如一天),用新的实际测量值训练并更新神经网络. 实际实施交通控制时,还应考虑交通安全和司机的心理承受能力(即周期不能太长),因此,上述 Step 2 应按如下方式计算:

Step 2.1 利用式(2)、(6)获得 T 秒内各临界车道的交通量 $p_i(k)$.

Step 2.2 利用式 $Y = \sum_{i=1}^P p_i/Ts_i$ 获得 Y 的值.

Step 2.3 判断 Y 是否大于或等于 0.9,若是,则取 $T_{\text{opt}} = 15t_L + 50$, 并转 Step 3.

Step 2.4 利用式(1)获得周期 k 的最佳周期长度预测校正值 T_{opt} , 并取

$$T_{\text{opt}} = \max \left\{ \sum_{i=1}^P t_{i \min} + t_T, T_{\text{opt}} \right\} \quad (8)$$

为第 k 周期的最佳周期长度预测校正值 T_{opt} .

另外,考虑到排队长度的实际意义,应有 $0 \leq l_i(k+1) \leq l_{i \max}$, 上述 Step 4 得到的最优解 $r_i^*(k)$, $i = 1, 2, \dots, P$, 若使 $l_i(k+1) < 0$, 则只表示最优周期相对偏大,并不代表实际排队长度小于 0; 若使 $l_i(k+1) > l_{i \max}$, 则表示已出现交通拥塞,并不代表实际排队长度大于 $l_{i \max}$. 具体地,上述 Step 4 可按如下方式进行:

Step 4.1 判断 $l_i(k) + B_i r_{i \min} + a_i(k)$ 是否小于或等于零,若是,则该相位的绿信比为 $r_i^*(k) = r_{i \min}$, 且 $l_i(k+1) = 0$, 并记下尚未确定绿信比的相位数 n .

Step 4.2 判断尚未确定绿信比的相位数 n 是否为 0 或等于 1, 若为 0, 则转 Step 4.5; 若等于 1, 则尚未确定绿信比的相位 i 的绿信比取为

$$r_i^*(k) = 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^P r_j^*(k) - t_T/T_{\text{opt}},$$

第 k 周期结束时的队长取为

$$l_i(k+1) = \min \{ l_i(k) + B_i r_i^*(k) + a_i(k), l_{i \max} \},$$

并转 Step 4.4.

Step 4.3 求解式(5)给出的最优化问题,得到

尚未确定绿信比的相位的最优控制值 $r_i^*(k)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 并取

$$l_i(k+1) = \min \{l_i(k) + B_i r_i(k) + a_i(k), l_{i \max}\},$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Step 4.4 若 $l_i(k+1)$ 小于 0, 则取

$$r_i^*(k) = -(l_i(k) + a_i(k))/B_i, l_i(k+1) = 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Step 4.5 若 $\sum_{i=1}^P r_i^*(k) < 1 - t_T/T_{\text{opt}}$, 则令

$$t_{\text{over}} = (1 - \sum_{i=1}^P r_i^*(k)) T_{\text{opt}} - t_T,$$

取

$$T_{\text{opt}} = T_{\text{opt}} - t_{\text{over}},$$

$$r_i^*(k) = (T_{\text{opt}} + t_{\text{over}}) r_i^*(k) / T_{\text{opt}},$$

$$i = 1, 2, \dots, P.$$

由以上算法看出:问题的关键在于优化问题的求解.在交通控制中,周期通常是从一个通行相开始的,无论如何实施信号控制,必须先运行一个通行相的最短绿时(一般应不小于 15 s),因此,可由信号机或上位机在线计算式(5).

4 仿真研究(Simulation study)

如果记

$$x_i = r_i(k) - r_{i \min},$$

$$g_i = 2\alpha_i B_i^2 + 2\beta_i > 0,$$

$$h_i = 2\alpha_i B_i (l_i(k) + a_i(k) + B_i r_{i \min}) +$$

$$2\beta_i (r_{i \min} - r_i(k-1)),$$

$$d = 1 - t_T/T_{\text{opt}} - \sum_{i=1}^P r_{i \min} \geq 0,$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \{ \alpha_i (l_i(k) + a_i(k) + B_i r_{i \min})^2 +$$

$$\beta_i (r_{i \min} - r_i(k-1))^2 \}.$$

则式(5)可以化为如下形式

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n \{ 1/2 g_i x_i^2 + h_i x_i \} + \delta, \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_i = d, x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

其中, δ 在确定绿信比时可以看作常数,对求解最优化问题(5)无任何影响.

很明显,最优化问题(9)是一个典型的二次凸规划问题,库恩-塔克条件是极值点存在的充要条件.由库恩-塔克条件得

$$\begin{cases} -g_i x_i + u + v_i = h_i, \sum_{i=1}^n x_i = d, \\ x_i v_i = 0, v_i \geq 0, x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (10)$$

注意到线性规划问题的非基变量取值为 0,若添加适当数量的人工变量,且规定 x_i, v_i 不可以同时作为基变量,则 $x_i v_i = 0$ 自然满足;并作变换 $u = y_1 - y_2 (y_1, y_2 \geq 0)$, 则可以将问题(9)化为一个等价的线性规划问题:

$$\min \sum_{i=1}^{n+1} z_i,$$

$$\text{s.t. } -g_i x_i + y_1 - y_2 + v_i + \text{sgn}(h_i) z_i = h_i,$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^n x_i + z_{n+1} = d, y_1, y_2 \geq 0,$$

$$v_i \geq 0, x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n,$$

$$z_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (11)$$

本文用 MS-FORTRAN5.1 编写了 ANN 自校正预测控制的计算机仿真程序,并在 PIII-800 微机上调试通过.为了使仿真更切合实际,采用二项分布随机数描述拥挤的交通流,即交叉路口停止线前车辆到达数服从二项分布.采用输入层、隐含层和输出层分别为 1 个、8 个和 2 个神经元的 3 层 BP 神经网络来预测各相位的车辆到达数及其临界车道的车辆到达数.采用修正单纯形法求解最优化问题(11).不失一般性,本文只研究一个交叉路口的交通控制,4 相位信号,仿真 10000 个周期,队长取平均值.取饱和流量为 $s = 3600$ (PCU/h),最大队长为 50 (PCU),取 $\alpha_i = 0.8, \beta_i = 0.2, i = 1, 2, 3, 4$, 仿真结果如表 1 所示.神经网络每次训练时间大约需要 2 min,但由于不必频繁更新神经网络(若干小时或一天一次即可),因此可以满足交通控制的实时性要求.

表 1 新算法与定时控制方法比较

Tabel 1 Comparison between new algorithm and timing control algorithm

交通量 (PCU/h)	平均排队长(PCU)	
	新算法	定时控制
720	0.000	<0.05
792	0.000	0.56
864	0.000	0.14
936	0.000	0.64
1008	0.000	1.11
1080	0.004	1.66
1152	0.011	3.41
1224	0.050	4.33
1296	0.197	6.53
1368	0.680	16.35
1440	2.849	47.07
1512	29.296	*
1584	47.572	*
1656	49.350	*

5 结论(Conclusion)

从仿真结果可以看出,当交通量小于 1296 (PCU/h)时,采用新方法基本没有排队现象;而采用定时控制方法,当交通量大于 1008 (PCU/h)时开始发生排队现象;当交通量大于 1368 (PCU/h)时,定时控制方法会产生堵塞,此时新方法仍可以疏导交通。当交通量大于 1512 (PCU/h)时,任何控制方法都无能为力,交通堵塞现象已不可避免。上述结果表明:新方法具有较好的控制效果。

参考文献(References):

- [1] 刘智勇,朱劲,李秀平等.单交叉口的多相位模糊控制[J].信息与控制,1999,28(6):453-458.
(LIU Zhiyong, ZHU Jin, LI Xiuping, et al. A multi-phase fuzzy control method for the single intersection [J]. *Information and Control*, 1999, 28(6):453-458.)
- [2] 刘智勇,尹征琦,朱劲,等.基于模糊控制的多功能交通控制系统[J].中国公路学报,1999,19(2):84-89.
(LIU Zhiyong, YIN Zhengqi, ZHU Jin, et al. A multifunctional traffic control system based on fuzzy control [J]. *China J of Highway and Transport*, 1999, 19(2):84-89.)
- [3] 徐冬玲,方建安,邵世煌.交通系统的模糊控制及其神经网络实现[J].信息与控制,1992,21(2):74-78.
(XU Dongling, FANG Jian'an, SHAO Shihuang. Fuzzy controller of traffic systems and its neural network implementation [J]. *Information and Control*, 1992, 21(2):74-78.)
- [4] 段里仁.道路交通自动控制[M].北京:中国人民大学出版社,1991.
(DUAN Liren. *Automatic Control for Road Traffic* [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1991.)
- [5] 荆便顺.道路交通控制工程[M].北京:人民交通出版社,1995.
(JING Bianshun. *Road Traffic Control Engineering* [M]. Beijing: China Communications Press, 1995.)
- [6] 乐寿长.道路交通控制工程[M].长沙:湖南科学技术出版社,1995.
(LE Shouchang. *Road Traffic Control Engineering* [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1995.)
- [7] HENRY J J, FARGES J L, GALLEGOS J L. Neuro-fuzzy techniques for traffic control [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(6): 755-761.
- [8] MOHAMED B T, MOHAMED S K, MURALI A. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals [J]. *Transportation Research Part C*, 1999, 7(6):353-367.
- [9] VINCE P. Real-time remedy [J]. *Traffic Technology Int*, 2001, 7(6):61-63.
- [10] 舒迪前.预测控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社,1996.
(SHU Diqian. *Predictive Control System and Its Appliances* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1996.)

作者简介:

刘智勇 (1961—),男,博士,教授。分别于1983年、1986年、1989年在西安交通大学获学士、硕士、博士学位。研究领域为大系统理论,智能控制,智能交通。E-mail: zliu@wyu.edu.cn;
李水友 (1978—),男,硕士生。研究领域为智能控制,城市交通控制系统。

(上接第932页)

- [3] JIANG J. Optimal gain scheduling controller for a diesel engine [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1994, 14(4):42-48.
- [4] APKARIAN P, ADAMS R J. Advanced gain-scheduling techniques for uncertain systems [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 1997, 6(1):21-32.
- [5] PACKARD A. Gain scheduling via linear fractional transformations [J]. *Systems and Control Letters*, 1994, 22:79-92.
- [6] APKARIAN P, GAHINET P, BECKER G. Self-scheduled H_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example [J]. *Automatica*, 1995, 31(9):1251-1261.
- [7] CHILALI M, GAHINET P. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(3):358-367.
- [8] YU Zhongwei. *Planning and control for direct driving robot* [D]. Shanghai: Tongji University, 1999.
- [9] GAHINET P, ARKADII N, LAIB A J, et al. The LMI control toolbox [A]. *Proc of 33th Conf on Decision and Control* [C]. Lake Buena Vista, FL, 1994:2038-2041.

作者简介:

虞忠伟 (1973—),男,1999年于同济大学电气工程系获硕士学位,2002年于同济大学信息与控制工程系获博士学位。主要研究方向为机器人变增益鲁棒控制,学习控制;
陈辉堂 (1933—),男,1953年毕业于上海交通大学,1956年研究生毕业于上海交通大学工业企业电气化专业,现为同济大学信息与控制工程系教授,博士生导师。研究方向为机器人控制与智能控制。