

文章编号: 1002-0411(2000)05-0441-013

城市交通控制研究的新发展

欧海涛 张文渊 张卫东 许晓鸣

(上海交通大学自动化研究所 200030)

摘要: 本文首先对城市交通控制的发展进行了简要综述,在此基础上对国内外交通控制研究的新发展进行了全面详尽的分析,对彻底解决城市交通问题进行了研究,并提出一种新的智能交通控制模式——城市交通多智能体控制系统.*

关键词: 城市交通控制, 非线性大系统, UITS, 动态路由导航, 道路自动计费, 公共交通, 多智能体

中图分类号: TP13

文献标识码: B

1 引言

在即将进入的 21 世纪, 欧美等发达国家提出了塑造全新的数字化城市的设想, 其概念主要是以数字化信息通讯业务为基础建立起新的城市模型用来适应信息时代的发展和需求. 城市交通作为城市组成最重要的一部分, 建立城市智能交通系统(UITS)是数字化城市发展的必然. 随着计算机技术、网络技术、通讯技术的飞速发展, 这个世界已经步入信息时代, 人们的的生活方式也发生了巨大的变化, 作为社会的政治、经济、文化中心, 城市的节奏越来越快, 而原有交通模式下的交通系统已经形成城市发展中木桶理论的“短板效应”, 所以城市交通拥挤已日趋全球化, 目前美国每年因此导致的损失达 2370 亿美元^[1], 而我国国内百万人以上的大城市每年由交通拥塞造成的直接或间接经济损失约计 1600 亿元, 相当于国内生产总值的 3.2%^[2], 至于交通拥塞给社会带来的其它负面影响更是难以估量. 而在大城市新建和扩建道路的可能性受空间制约也越来越小. 因此从软件设施入手对交通流进行科学的组织与管控, 充分发挥现有交通网络的通行潜力, 最大程度上使交通流做到有序流动成为解决交通拥塞的主要方法, 城市智能交通系统正是这样发展的必然^[3].

2 传统的城市交通控制研究

传统的城市交通控制指的是区域交叉口信号灯控制, 对城市交通控制的研究也是从这方面进行的, 即区域交通控制系统.

2.1 区域交通控制系统

国外很早就开始进行城市区域交通控制的研究, 从 60 年代初期开始, 人们就不断对城市交通网络协调、控制问题进行研究, 发展到 70 年代, 随着大系统理论、系统工程理论的出现, 城市区域交通控制技术也有了一些大的发展. 这其中, M. G. Singh 的工作较为突出. 在 Singh 的研究基础上, 许多学者进行了改进. 一个城市交通系统是由道路系统、信号系统和具有较大随机性的交通流组成的对于交通流特征的了解, 人们除根据历史数据及经验估计以外, 还可以通

* 收稿日期: 1999-05-14
基金项目: 国家自然科学基金资助(基金号 69674023)

过埋设在道路系统中的车辆检测装置实时的采集数据来达到. 按照这样的思路, J. S. Baras 和 W. Levine 等人运用随机点过程理论进行了深入、细致的研究, 得到了一些新的结果^[4], 另外 Saradis 等在 Singh 提出的模型的基础上, 导出了更进一步的学习算法^[5]. Ginseppe 将 TRANSYT 方法引入自己的系统, 得出了一种分散递阶优化的控制方案^[6].

城市区域交通控制是通过对交叉口信号灯进行配时调节控制实现对交通流的平衡配流来解决交通拥挤和堵塞. 自交通信号灯控制在英国诞生, 交通网络控制系统在节点控制器和交通控制计算机之间采用的不是集中式控制结构就是分布式递阶控制结构^[7], 经历了几十年的发展主要有离线节点优化控制、在线节点优化控制、离线网络优化控制、在线网络优化控制四种控制模式.

2.2 离线节点优化控制

由老式的电子机械控制器调节绿灯信号时间形成固定的红绿灯信号序列. 首先通过确定最佳信号序列和持续时间来优化信号配时, 尽量减小信号过渡时间以获取最小的时间损失和最大的交通流容量. 考虑到交通流的变化以平均延时作为一个优化目标函数, 后来又将交通流作为动态随机过程对优化目标函数进行了改进; 另一个目标函数是交通流容量. 通过对信号组的控制容易实现对信号过渡期的优化, 在复杂的交叉口信号控制上有很大改善.

2.3 在线节点优化控制

是在信号灯控制中, 将车辆实际情况考虑进来, 实现不同时段动态分配绿灯信号以适应不同的要求, 即交通信号灯闭环反馈控制. 车辆信息由埋在道路下面的感应线圈传感器获取. 通过延长绿灯信号的形式体现车辆的实际情况, 当延长到最大绿信时间或传感器检测到绿信控制的车流中两车之间的时间间隔超过一定值则停止绿灯信号, 某些时段没有要求则可以忽略该时段. 但该方法未考虑到在其它交通流当前无绿灯信号时段上的损失代价. 由英国 TRRL 研究发展的一种控制算法 MOVA 克服了这个缺点^[8], 通过对切换时段代价的评估来确定时段是否变换. 其中代价函数定义成延时和停顿数的线形组合, 代价评估是基于检测数据和简化的决策交通模型. 当交通流负荷较重时 MOVA 采用最大交通流容量作为目标函数.

2.4 离线网络优化控制

在城市交通网络中, 相邻交叉口之间的距离一般都不足以使车流队列完全分开而不相互影响, 因此对网络中的交叉口进行网络协调控制是非常重要的. 最初的协调信号配时是基于绿信波的概念, 即在交通中的车队经过一条多个交叉口节点组成的路由时总是在绿灯开始时到达, 因此不需要停车等待. 在复杂的城市交通网络中在所有路由中都同时建立绿信波是不可能的. TRRL 研发的 TRANSYT 的控制算法离线优化交通网络信号配时^[9]. 系统的总延误时间和总停车次数的加权值作为目标函数. 优化时, 先将网络的几何尺寸, 流量, 初始配时等信息送入仿真模型, 通过仿真求得目标函数的值, 将此值输入优化部分进行优化, 然后返回仿真部分. 如此在二者之间反复迭代寻优, 以求得最佳信号配时. 优化部分采用不用导数的直接优化方法中的爬山搜索法.

2.5 在线网络优化控制

通过在安装于各路口每条车道最上游的车辆检测器所提供的信息, 实时调整控制参数, 作出控制决策. 英国的 SCOOT 系统, 悉尼的 SCAT 系统, 控制算法不需预测或只需极短时间的预测, 网络优化采用自寻最优控制方法^[10].

3 现代城市交通控制系统

现代城市交通控制系统不再单单是区域交叉口信号灯控制, 而是包括受交叉口信号灯调节的区域交通系统和城市高速公路交通系统(国内如上海的内环高架快速路), 二者通过出入口匝道耦合在一起, 城市高速公路正逐渐成为市内交通的重要载体, 目前世界许多大城市都建有完善的城市高速公路交通系统. 城市高速公路交通流和城市区域交通流的差别较大, 对城市区域交通控制主要是通过交叉口信号灯控制, 而城市高速公路交通控制主要是入口匝道控制. 对城市交通控制的研究是在这两方面展开, 其中区域交通控制系统的研究如上所述.

3.1 城市高速公路交通控制系统

高速公路对出行者的吸引力很大, 但大批车辆的涌入不仅会造成常发性交通拥挤, 还可能导致突发性交通拥挤. 入口匝道控制是解决这类问题的有效途径, 即根据高速公路主线流状况和入匝需求控制高速公路的入匝流量, 优化系统性能(出于安全考虑, 很少使用出口匝道控制). 实施匝道控制的前提是匝道上游的车流量小于上下游通行能力. 匝道控制能够提高高峰期主线流量和车速, 缩短旅行时间, 在一定程度上抑制车流扰动并减少交通事故. 静态匝道控制采用静态模型, 多归结为线形规划问题^[11], 适于解决常发性交通拥挤; 动态匝道控制采用动态模型, 多为最优控制问题, 用于解决突发性交通拥挤. 动态匝道控制问题可看成最优控制问题.

3.2 非线性开环最优控制

给定动态变量 $x(k)$ (速度, 密度及入匝排队长) 的初值和慢变扰动 $z(k)$ 的先验或预测信息, 确定一个最优控制序列(匝道调节律), $u^*(k)$ 使满足一些约束条件, 然后求取问题的闭环解析解和开环解^[12].

3.3 线形二次型反馈控制

开环解对外扰相当敏感, 若能通过求解问题(或其静态形式), 或通过交通观测得到系统的标称点(车流速度, 密度和入匝调节律的标称值), 并对问题作了简化, 则可得到一个线形二次型问题^[13]. 由此, 可以设计 LQ 匝道控制器. 将状态方程在标称点线形化, 得到关于状态偏差和控制增量的线性状态方程

$$\Delta x(k+1) = A \Delta x(k) + B \Delta u(k)$$

A, B 是标称点的函数. A 是一个非对称对角带阵, 起非对角项代表相邻路段间交通状况的相互影响. B 阵也有特殊结构. 定义的二次型性能指标是

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\Delta x^T(k) Q \Delta x(k) + u^T(k) R u(k)]$$

设计 LQ 反馈控制器需要求解 Riccati 方程, 计算量大, 实时性仍然难以保证. 由于 A, B 阵结构的特殊性, 通过 Riccati 方程求得的反馈增益阵具有交迭结构, 这表明入匝调节律主要取决于相应及邻近路段的实时车流状态.

3.4 模糊控制

模糊逻辑用于交通控制已有较长的历史, Pappis 和 Mamdani^[14]于 70 年代运用模糊控制技术设计的单路口信号灯模糊控制器. 80 年代, Sasaki 和 Chen^[15]曾研究孤立匝道口的模糊控制.

4 城市交通控制研究的新发展

随着信息技术与知识经济的飞速发展,城市的节奏越来越快,传统的交通控制方法不能有效解决交通问题,城市交通与经济矛盾的矛盾日趋尖锐,在对现代城市交通控制的研究也必须采用新的研究方法和手段.目前城市交通控制研究的新发展体现在城市交通网络的各个方面:区域交通信号灯和城市高速公路匝道的新的控制方法上;实现区域和高速路的集成控制;采用动态路由导航与交通网络控制结合;以实现先进车辆控制系统 AVCS 为主的智能运输系统 (ITS);以实现 ATMS 和 ATIS 为主的智能体交通控制系统;以及一些辅助的交通策略如道路自动计费、公共交通优先权等.

4.1 新的交叉口信号动态优化策略

车辆检测器检测得到的车辆到达与否的信息是一个随机点过程序列,也即观测值序列,以表示.路口处排队车辆的队长受 $n(t)$ 的影响,以 $x(t)$ 表示,则此两者的关系可表示为:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= E^{\beta_{t-1}}\{x(t+1)\} + [x(t+1) - E^{\beta_{t-1}}\{x(t+1)\}] \\ &= f(t, n^{t-1}, x^t) + u(t) \\ n(t) &= p_{r}\{n(t) = 1 | \beta_{t-1}\} + [n(t) - p_{r}\{n(t) = 1 | \beta_{t-1}\}] \\ &= a(t, n^{t-1}, x^t) + \omega(t) \end{aligned}$$

这里 $E^{\beta_{t-1}}\{\cdot\}$ 表示在 β_{t-1} 条件下的数学期望; S^t 为集合 $\{S(0), S(1), \dots, S(t)\}$; $\beta_{t-1} = \sigma\{n^{t-1}, x^t\}$ 表示由 n^{t-1}, x^t 所产生的 σ -代数.由 $u(t), \omega(t)$ 的性质,知它们是相对于 β_{t-1} 的差分鞅序列(Martingale Difference Sequences)^[16].

为了导出具体的城市区域交通网的模型,只需导出 $f(t, n^{t-1}, x^t), a(t, n^{t-1}, x^t)$ 的具体形式即可.为此,设

$$(i) x_i = \begin{cases} 1 & \text{车队队长为 } k, \\ 0 & \text{否则,} \end{cases}$$

$$x(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{N-1}(t)]^T$$

$$(ii) \lambda(k, t) = p_{r}\{n(t) = 1 | x_k(t) = 1\}$$

$$\lambda(t) = [\lambda(0, t), \lambda(1, t), \dots, \lambda(N-1, t)]^T;$$

$$(iii) Q_{ij} = p_{r}\{t+1 \text{ 时刻队长为 } i | t \text{ 时刻队长为 } j\}$$

$$Q(t) = \{Q_{ij}\}_{N \times N}, \text{ 其中 } N \text{ 为最大车队长度,}$$

则系统模型为

$$x^T(t+1) = Q^T(t) \cdot x(t) + u(t),$$

$$n(t) = \lambda^T(t) \cdot x(t) + \omega(t)$$

由 $\lambda(t)$ 的定义知它为整个网络的协调因子^[17].

可看出网络优化问题被转化为典型的随机控制问题,较为成熟的随机控制问题,总是在分离定理的基础上,采用预测-控制的方式进行解决,但在过去的研究中由于交通问题的特殊性,分离定理此时并不成立. Marleod 等人将静态优化的方法动态化^[18],利用 Robertson 和 Bretherton 最先在 DYPIC 程序的反动态编程算法中提出离散时间周期性滚动优化的方法^[19],采用分散式控制结构以减少网络通信量、分布并行处理、将危险分散,同时,优化过程可以达到最少的约束条件.

它是基于对当前系统状态(主要是当前的队列长度)估计,在时间序列的周期性滚动区间

内获得信号优化策略. 只有策略的第一部分在周期性滚动之前实现, 接着利用随后的传感器测量数据求得信号优化策略, 其中, 滚动区间长度要使优化策略的第一步能单独决定. 在滚动区间结束时通过最终价值函数给系统状态赋值, 以避免优化策略在滚动区间内实现优化而随后变差的情况.

Cartner 改进了该方法后来形成了 OPAC 系统^[20], 已开始在美国一些地方试运行; 第一个离散时间区间滚动优化信号控制系统是最新改进的 UTOPIA 系统. 该系统决策间隔为 3s, 滚动区间长度为 120s, 系统控制结构是完全的分散式结构. 初始或缺省的信号策略由交通控制计算机提供给交叉口节点控制器, 然后各节点控制器用启发式优化过程根据自己的实际情况在滚动区间部分或全部修改信号策略. 作为优化的一部分, 各节点都将相邻节点当前信号优化策略上的开销考虑到自己的优化过程中, 通过这种方式节点之间可以在分散式结构中得到良好的协调, 从而局部对初始信号策略的优化可以使整个系统的性能得到提高. 在优化方法上, 可以将滚动区间内的所有决策系列以决策树的方式表示, 对滚动区间求取优化信号策略的问题就可转化为求解最短路径问题, 其中决策树里的连线长度与滚动水平线中相应的决策开销对应成比例. 因此, 有可能采用有效的最短路径算法代替常用的动态规划算法求解优化问题.

4.2 城市高速公路控制的新方法

4.2.1 智能控制软计算的方法在交通控制中的应用

智能控制软计算主要是指模糊控制、神经网络控制、遗传算法的研究方法. 智能控制软计算的方法具有较强的逼近非线性函数的能力, 不依赖于精确的数学模型, 这对于交通系统这样复杂难以建立较好数学模型的系统是一个有效方法. Parisini 利用 N 个串级神经网络实现一个反馈控制函数, 并利用类似方法设计匝道控制器, 取得了一些有价值的成果^[21]; Papageorgiou 则尝试利用神经网络去逼近匝道反馈控制律中的非线性项^[22]; Gallinari 运用神经网络对交通流模型进行建模, 并分析了交通流模型的稳定性^[23]. 在假设不考虑出入匝道口, 某一段的交通流模型中密度方程是:

$$k_i(n+1) = g_i(k_{i-1}(n), v_{i-1}(n), k_i(n), v_i(n), k_{i+1}(n), v_{i+1}(n))$$

其中, $k_i(n+1)$ 是在 $n+1$ 时间时第 i 段的平均密度, g_i 是一个未知的非线性函数, 不失一般性, 等式可以写成如下式子:

$$k_i(n+1) = ck_i(n) + f_i(k_{i-1}(n), v_{i-1}(n), k_i(n), v_i(n), k_{i+1}(n), v_{i+1}(n))$$

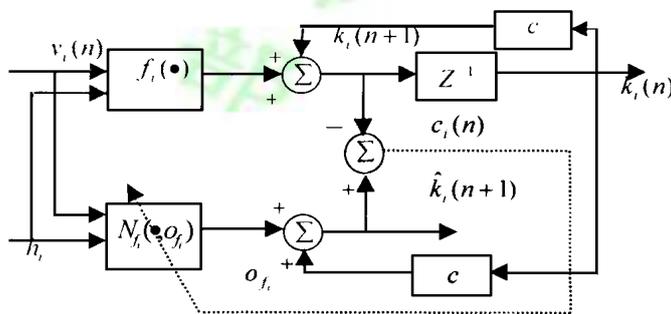


图1 神经网络对交通流的建模结构

其中, $f_i(n) = g_i(n) - ck_i(n)$ 即是非线性项, 用神经网络对非线性函数进行辨识, 使得产生的估计值尽量逼近测量值.

神经网络建模的结构如图1所示.

仿真表明, 在强扰作用下神经网络方法建模和其逆模型实现的神经网络控制器优于一般方法; 神经网络技术用于交通网络中交通事故的检测和拥塞判断上研究也越来越多. 虽然模糊控制用于交通控制较早, 但有关多路口或多匝道口模糊控制的文献还很少, 有经验的交警或匝道管理员可以熟练地完成孤立路口或匝道

的检测和拥塞判断上研究也越来越多. 虽然模糊控制用于交通控制较早, 但有关多路口或多匝道口模糊控制的文献还很少, 有经验的交警或匝道管理员可以熟练地完成孤立路口或匝道

口的灯色控制,但他们很难处理地域跨度很大的多路口或多匝道口的协同控制问题,因为他们不具备有关知识与经验.目前,在交通工程中多路口或多匝道口模糊控制的研究已经引起重视^[24].

4.2.2 分层递阶控制

测试与仿真表明,在强扰作用下基于线性化模型的 LQ 控制器的鲁棒性不够理想,难以镇定系统.为此, Papageorgiou 设计了递阶匝道控制系统^[25],试图将开环优化的计算可行性与闭环控制的鲁棒性分散控制的可靠性结合起来.该递阶结构包括适应层,优化层和控制层.优化层根据实时交通信息在线计算简化的问题,为控制层提供标称点,控制层负责将系统状态和匝道调节律保持在标称点的领域内,抑制适度随机扰动与模型误差的影响.具体实现时,多采用交迭分解方法设计分散次最优控制器^[26].为增强系统的鲁棒性,弥补模型简化带来的负面影响,系统在优化层上加设适应层,通过慢扰跟踪和模式识别决定是否启动在线优化.

4.3 集成控制

现代城市交通控制包括区域交通控制和城市高速公路交通控制,城市大交通网络构成了一个复杂的非线性大系统.大多数交通控制研究不是侧重于高速公路匝道控制器的优化设计,便是偏重于区域交通信号的配时调节,一般很少考虑二者的协调.因此,尽管匝道控制改善了高速公路系统的性能,但是匝道控制产生的入匝排队和引起向区域慢速系统的分流会直接造成到区域交通系统的拥塞,有时高速系统出现交通拥挤,但区域慢速线路上却存在过剩的通行能力,相反亦然.因此很有必要研究将城市区域交通系统和城市高速公路交通系统结合起来进行集成交通控制.集成交通控制大多针对理想的通道系统(corridor system).它既包括高速干道,也包括区域交通系统中与该高速干道具有相同 OD 特征的一条或几条慢速干道.集成控制问题可归结为一个非线性非凸两级规划问题^[27],即:

$$\begin{array}{l} \text{一级规划问题:} \\ \left. \begin{array}{l} \min_u F(u, v(u)) \\ G(u, v(u)) \leq 0 \end{array} \right\} v(u) \text{ 由下式决定:} \\ \text{二级规划问题:} \\ \left. \begin{array}{l} \min_v f(u, v) \\ g(u, v) \leq 0 \end{array} \right\} \end{array}$$

其中 F 是上层决策者(系统管理者)的目标函数, u 是上层决策者的决策矢量, G 是上层决策矢量的约束集, f 是下层决策者(用户出行者)的目标函数, v 是下层决策者的决策矢量, g 是下层决策矢量的约束集.

这实际上是系统管理者与用户出行者之间的一个 Stackelberg 博弈问题, Yang Hai 和 Yagar 提出一种有效的启发式算法^[28]. Payne 根据 Wardrop 网络均衡原理研究入匝排队对通道系统的影响,他通过动态规划给出一种稳态入匝分配策略,使长途出行者优先入匝^[29]. Papageorgiou 综合已有研究方法,从系统最优角度讨论集成交通控制系统的设计^[30].最近研究者以英国 Glasgow 市的 M8 通道为背景,通过仿真定量评估匝道控制,路由控制和交叉口信号灯控制的集成效果,该研究表明合理运用集成控制可以显著减少通道旅行时间^[31].

4.4 动态路由导航

路由导航优化的目标函数是交通网络给定区间内的所有被引导车辆的总出行时间,可由下式表示:

$$TPT = \sum_k \sum_m \sum_i [\rho_{m,j}(k) \delta_m \lambda_m T]$$

其中 TRT 表示总出行时间, $\rho_{m,i}(k)$ 表示在离散时间 k 时链路 m 处 i 段内每条车道的交通流密度, δ_m 是在链路处的段长, λ_m 是在链路处的车道数目, T 是离散时间间隔.

通过车际间通信和道路可变信标指示牌可以实现网络路由动态导航, 这是另一种提高交通网络效率的有效方法. 现在的各种交通控制系统基本上都是采用开环和被动式控制, 众所周知这种控制方法不可能得到最优解, 而引入动态路由导航控制则可以实现闭环反馈控制, 为交通网络控制提供新的控制模式从而实现真正意义上的网络优化控制.

通过与安装在各交叉口信号灯控制器之间的可变信标指示牌以及双向红外探测器进行通讯, 车辆测量出链路出行时间并经过指示牌传送到中央控制计算机中的车辆指示图, 这样在计算机上维护的一个链路出行时间数据库就可以在不同时刻不断更新. 通过由数据库得到的各节点到所有目的区域的预测链路出行时间, 就可以建立最快路径树. 接着这个路径图被送往每个区域中最合适的信标指示牌, 即该信标在物理上处于中心信标, 以减少网络通信量. 车辆又通过信标得到出行最快的路径信息, 车载计算机根据车辆的目的地信息从路径树中提取出相应的方向信息给驾驶员.

在欧洲研发的 EURO-SCOUT 系统中^[32], 数据库管理和计算优化路径是集中进行的, 然而如前所述, 分散式系统具有更多的优点, 每一个节点控制器可以直接通过车辆图或间接通过车辆传感器测量数据和信号优化的交通模型对相邻链路的链路出行时间进行监控, 经过相邻节点控制器之间的交互, 拥塞信息可以在网络中广播出去使路径图重新修正以达到理想状态.

网络路由动态导航与交通网络控制所需要的数据在很大程度上是相互重叠的^[33], 并且二者也是密切相关和相互作用的, 路由导航可以影响信号灯优化策略, 当信号灯策略的实施又将对路由导航产生作用, 因此二者的有效集成能够消除由于形成反馈造成的不稳定或不利影响从而提高整体性能. 上述的路由动态导航和交通网络控制器的集成框架如图 2 所示.

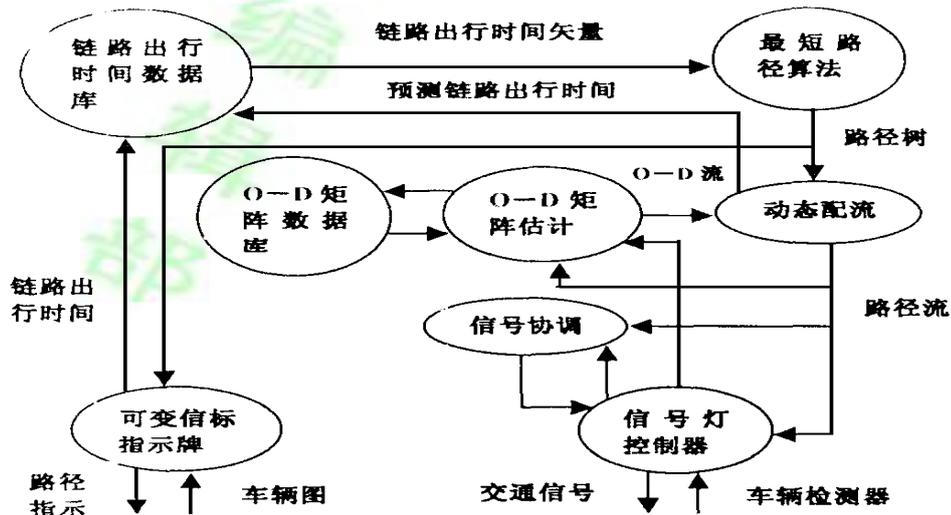


图 2 路由动态导航和交通网络控制器的集成

4.5 智能运输系统(ITS)

进入 90 年代, 欧美提出智能运输系统 ITS 这一全新的交通模式以彻底改善城市交通状况^[34]. ITS 主要包括先进交通管理系统 ATMS, 先进驾驶员信息系统 ATIS 和先进车辆控制系统 AVCS. ATMS 是通过自适应交通信号配时调整路网需求的发生时间, 实现交通需求和通行能力的时间匹配. ATIS 则通过可变信标指示牌, 车载导航系统和近年采用的全球卫星定位系统 GPS 对车辆进行实时路由导航, 实现交通需求和通行能力的空间匹配. AVCS 主要包括纵向控制器和偏航控制器. 并在 ITS 基础上派生出自动高速公路系统 AHS, 它主要由 AVCS 和相关的道路自动化系统(ATMS 和 ATIS 的一部分) 构成一个高度智能化的系统.

总的来说, 目前无论对 ITS 还是 AHS 的研究重点都是在单车和多车的控制上, 取得的成果也主要体现在 AVCS 中^[35]. AVCS 实际上就是车辆自动驾驶系统, 单车的行驶由摄像头进行视觉检测和识别道路信息来与车辆智能控制器(纵向控制器和偏航控制器)配合进行. 纵向控制器的控制模型可简化为一个 5 状态(油门角度位置 α , 动态多支管输入 m_α , 引擎转速 ω , 车辆纵向位置 x_i , 刹车扭矩 T_b) 模型^[36]:

油门角度位置方程: $\tau \dot{\alpha} + \alpha = \alpha_c$

多支管输入的质量连续方程: $\dot{m}_\alpha = m_{\alpha i} - m_{\alpha o}$

引擎转速动态方程: $J_e \dot{\omega} = T_{net}(\omega, P_m) - T_{load}$

车辆纵向位置: $\Delta_i = x_{i-1} - x_i - l_{i-1}$

刹车扭矩方程: $\tau T_b + T_b = T_{bc}$

其中 $m_{\alpha i}$ 是流经油门的气流速率, $m_{\alpha o}$ 是流经气缸的气流速率, T_{net} 是纯燃烧扭矩, J_e 是一个合成引擎惯性系数, T_{load} 是合成负载扭矩, P_m 是多支管压力, T_{bc} 是控制给出的刹车扭矩.

偏航控制器的控制模型^[37]是一个前轮和方向组成的系统方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \Delta \epsilon \\ \dot{\Delta \epsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{A_1}{V} & -A_1 & \frac{A_2}{V} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_3}{V} & -A_3 & \frac{A_4}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_r \\ \dot{y}_r \\ \Delta \epsilon \\ \dot{\Delta \epsilon} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ A_1 - V^2 \\ 0 \\ A_4 \end{bmatrix} \frac{1}{\rho}$$

其中 y_r 是车辆与所在车道中心线的偏向距离, $\Delta \epsilon = \epsilon - \epsilon_d$, ϵ 是车身的偏航角, ϵ_d 是车道设定的理想偏航角, δ 是前轮转向角, ρ 是车道的曲率半径, A_i 和 B_i 定义如下:

$$A_1 = \frac{-2(C_{sf} + C_{sr})}{m}; \quad A_2 = \frac{2(C_{sr}l_2 - C_{sf}l_1)}{m}; \quad B_1 = \frac{2C_{sf}}{m};$$

$$A_3 = \frac{2(C_{sr}l_2 - C_{sf}l_1)}{I_z}; \quad A_4 = \frac{-2(C_{sf}l_1^2 + C_{sr}l_2^2)}{I_z}; \quad B_2 = \frac{-2l_1C_{sf}}{I_z}$$

l_1 和 l_2 分别是车辆的中心到前后轴线的距离, C_{sf} 和 C_{sr} 分别是前后轮交叉支撑的刚度.

纵向控制器是负责保持车辆运行的设定速度和间距; 偏航控制器是使车辆的行进轨迹与车道轴线保持一致, 特别是在当某段道路曲率半径较大时对车辆队列控制具有很大意义. 对 AVCS 的研究工作主要就是对上述模型进行控制设计, 在紧急情况下的快速纵向控制和快速偏航控制是问题的难点, 设计可采用的方法很多, 有鲁棒控制、非线性自适应控制、自学习控制、模糊控制、神经网络控制等^[38].

在 AHS 中的另一个重要研究方向是多车组成车队的行驶控制, 其模型是车辆跟随模型:

$d^2x_{n+1}(t+T)/dt^2 = g[dx_n(t)/dt - dx_{n+1}(t)/dt]$, 其中 $x_n(t)$ 是在 t 时刻道路上第 n 辆车所处的位置, T 是由人车复杂特性决定的反应滞后时间, g 是同样依赖于这个复杂特性的比例因子. 后来 kishi 将车辆跟随问题看作是一个采用控制问题, 对模型进行了改进, 即: $d^2x_{n+1, j+1}/dt^2 = g[dx_{n, j}/dt - dx_{n+1, j}(t)/dt]$, 其中 j 指的是特定的采样间隔. 车队运动的稳定取决于比例因子和采样间隔的长度. 车队在行驶中的操作由事先定义好的协议进行规范, 最近伯克利大学和日本交通厅相继进行了 4 车协同的自动驾驶的实验系统^[39], 其中日本在实验中四车之间以 25m 的间距行驶, 进行了主从车引导与跟踪、合队、裂队、离队、单车换道、车队自稳定、出入匝等操作.

在 AVCS 中车辆控制是需要道路系统的支持, 而在欧美国家, 即使失去了道路支持系统也能根据环境自主协调运行的 smart car 的概念也已经得到广泛承认^[40], 研究工作取得了较大进展, 国内我们已经在进行不依赖于道路支持系统的主动性驾驶的研究, 并取得了一些阶段性成果.

而在 ATMS 和 ATIS 的研究还处于起步阶段, 对于 ATMS 和 ATIS 的研究则很大程度还停留在概念上^[41], 美国、欧洲和日本都有相应的研究计划. 我们正在研究的城市交通多智能体控制系统即是主要从 ATMS 和 ATIS 出发的.

4.6 城市交通网络多智能体控制系统

作为城市交通控制系统在 ITS 中主要是 ATMS 和 ATIS 的合成, 从城市交通控制的发展历史和未来社会对城市交通的要求来看实现城市整体交通网络智能化控制将是发展的必然. 城市交通系统是一个大的复杂的网络系统, 要实现整个交通流的合理优化需要网络中所有的区域交叉口控制节点和匝道口控制节点彼此相互通讯, 能协调地采取行动解决问题, 某一个节点或几个节点的优化控制并不能保证全局的最优, 很多时候会以局部优化损害整体的利益, 因此在城市大交通系统中引入多智能体技术将是实现 ITS 中 ATMS 和 ATIS 的重要途径, 我们提出建立城市多智能体控制系统, 它是将区域交叉口信号灯控制、城市高速公路匝道口控制、动态路由导航结合起来的集成智能控制.

在 ITS 中城市交通系统中既要实现单个交叉口或匝道口对交通流的智能控制即每个交叉口和匝道口都是一个智能体, 作为一个自治的控制系统, 而城市网络中交通流之间又充满各种冲突即资源冲突、目标冲突和结果冲突, 单一智能体没有足够的知识、资源和信息去解决一个复杂的问题^[42], 因此要在网络中所有交叉口与匝道口之间亦即多智能体之间实现相互协调、相互合作, 以解决大规模的复杂协调控制问题.

现有的城市交通集成控制方法为避免交通配流和区域交通网络的过于复杂, 绝大多数都将问题假设为简化的由两条路由组成的理想网络, 一条代表高速路, 另一条代表区域网络所有具有相同 O-D 的网络路由组合, 然后基于这样的网络采用动态规划的方法求解系统的最优解. 这对实际应用来说显然还不够. 而在已有的一些分布式交通网络控制中, 都是采用递阶结构形式这种形式的特点是: 控制递阶、功能递阶; 设备分档, 线路分级, 危险分散. 这种结构形式由于系统结构经济性较好, 局部控制器、协调器, 可用微型计算机、工作站、小型计算机等组成规模优化的分级、分布式网络系统, 但是结构形式受协调器的性能、工作状况、通讯带宽的限制, 并且各局部智能控制器间的协作完全依赖协调器而进行, 自主性较差^[43]. 在 UITS 中显然这种控制结构由于信息传输量太大, 各交叉口与匝道口控制器本身之间不存在协作问题, 本质上也不具有智能并且上层全局协调器的计算量过重效率太低, 不能适应实时智能交通控制的

需要. 而采用多智能体技术则可以实现控制分散、信息分散、功能分散^[44], 从而满足 UITS 实时智能控制的需要. 因此, 建立城市交通多智能体控制系统是实现城市智能交通的主要手段, 将为塑造全新的数字化城市提供重要的技术支持.

城市多智能体控制系统的思想主要是首先在城市交通网络中按网络拓扑结构的特点和交通网络的交通流量情况确定一系列重要节点作为单个智能体, 其确定准则是该节点在网络中首先是若干区域主干线交叉口或城市高速公路的匝道口, 其二该交叉口或匝道口在其所属的局部交通网络中处于中心位置, 其三该节点的网络交通是该局部交通网络的瓶颈, 对周围的道路流量影响较大. 所有智能体的作用域集合组成整个城市交通网络, 在局部交通网络中的交通控制由该区域的智能体全权负责, 其职责范围是对所属的网络实现信号灯控制或匝道口控制并具有相当的智能, 在这个局部网络的控制结构是采用分布式智能控制中的集中控制结构, 每个智能体只需具有本区域内的信息而不具备全局或邻近网络的信息; 在上层则是这些多智能体之间通过通讯层在由通信风范、通信内容和通信协议组成的通信机制下进行信息(包括路由信息、交通流量信息、控制信息等)传递解决单个智能体信息不完整性, 通过协调层的协商法、FA/C 法、多智能体规划法和联合责任法等协调机制以解决目标协调^[45], 并通过合同网、多阶段协商和认知模型协商策略等冲突消解策略来解决交通网络中的资源冲突、目标冲突和结果冲突. 在这个层面上的控制结构采用的是分布式智能控制中的分散式控制结构以实现交通网络的多任务多目标的协调控制问题.

4.7 一些辅助的新交通策略

(1) 道路自动计费系统

在城市交通网络中, 具有相同 O-D 特征的路由既有环城高速公路、区域主干线又有区域慢速路, 从实际交通的统计情况来看经常出现由于驾驶员基于用户最优都趋于选择最短的路由, 就造成了某一路由上的拥塞而其它具有相同 O-D 特征的路由闲置的情况. 交通控制的目的是最大程度上去解决这个问题, 近来道路自动计费系统的出现为解决这个问题提供了新的思路.

在整个交通控制系统中引入道路自动计费系统, 对交通网络中所有的路由进行计费加权, 以实现各路由之间距离费用乘积趋于平衡, 即可以从用户最优的角度使交通流在网络中均匀分布以避免拥塞, 从而将出行时间和出行费用结合起来作为用户目标优化函数^[46]. 这种方法既可以在静态的情况下对交通网络进行重新配流, 又可以在动态的情况下由网络控制系统提供最新交通路由拥塞信息来对道路计费动态调整以影响交通流的分布. 特别是在交通流高峰时期, 引入道路计费的控制模式具有特别意义, 这种方法在电力系统的电力使用上已有类似的策略并取得了较好的效果. 交通控制的研究人员都了解这样一个事实, 在交通控制中因为控制的最终对象是人即驾驶员, 在大多数情况下交通控制不能对驾驶员形成足够的约束, 造成驾驶员的个人行为对交通产生很大的影响, 对控制系统来说即是形成大量不确定性的干扰, 而在交通控制中引入道路自动计费作为一种约束条件则可以在很大程度上减少个人行为对交通的影响^[47]. 在目前道路自动计费系统和车际通信(尤其是全球卫星定位系统 GPS 的广泛应用)的发展为实现这种新的交通控制模式提供了技术保证, 新加坡已经在 1998 年正式启用了一套道路自动计费系统, 国内的华中理工大学也正在进行自动计费系统的研究.

(2) 公共交通优先权

通过车辆自动定位监控系统可以实现对车辆形态的区分, 它为实现公共交通优先权提供

了技术保证. 在交通网络中公共交通是处于最重要最优先服务的等级, 公共交通优先权在交通控制中的体现将对供求矛盾的解决起到关键作用^[48].

当车辆到达检测器位置, 由检测信号中识别出公交车并提供给信号灯控制系统在绿灯信号时段中为其加入优先权, 其中车辆检测点必须在上游合适的位置以给信号控制系统足够的时间在信号策略中产生响应. 通过车辆定位系统和车载通信系统, 车辆当前位置、状态和操作信息都可以及时得到, 再加上与信号灯控制系统的交互, 在信号控制策略中就可以实现公共交通优先. 在实际操作中, 由优先权引起的在信号控制策略中的变化必须是限制在一定程度上. 如果在当前时段上只需一个较小的时间就能满足公交车通过交叉口而实现优先权, 则在当前时段上的时延就可体现出或将当前时段长度缩短并进入为公交车提供绿信的时段. 当然优先权引起的时段变化对无优先权时也造成一定的损失, 因此优先权引起的时段变化太过频繁在信号控制系统中也是不能接受的, 如果出现这种情况则需要信号控制算法中加入另外的规则予以控制^[49]. 即在优先权引起的时段频繁变化相对与损失来说是绝对必要的话, 就在优化算法中体现, 反之亦然.

实际系统中体现公共交通优先权的只有最新的 UTOPIA 改进系统, 其中的有轨电车监控系统中每个交叉口控制器都提前 120s 获得即将到达交叉口的有轨电车的信息, 信号优化策略进行了调整以适应有轨电车尽量无停顿的通过交叉口.

5 结论

城市交通的发展历史表明传统的交通控制方法不能有效解决交通问题, 在进入 21 世纪这个数字化时代, 城市交通控制也必将是采用崭新的模式才能符合时代的需要, 因此必须积极探索新方法. 研究表明单一的控制模式和方法都不能满足要求, 只有采用上述的各种新方法并集成起来实现城市智能交通系统才能为城市交通控制开辟新的广阔思路, 从而真正解决城市交通与经济发展日趋尖锐的矛盾. 欧美和日本等发达国家都在积极的进行智能交通控制的研究, UITS 的发展势必带动一大批相关产业将会成为下一世纪带动经济增长的热点, 近来我国在这方面的研究也正在重视起来. 我们目前进行的城市交通多智能体控制系统研究正是要将计算机技术、网络技术、通讯技术、现场总线技术和智能控制结合起来, 并考虑上述多种交通控制新方法的集成来实现城市智能控制系统, 希望能为我国在智能交通控制领域跟踪和超过世界先进水平提供有益的探索.

参 考 文 献

- 1 Guguang H E, Noth G. Urban Traffic Control System - A General Analysis from the Point of View of Control Theory. *Transportation systems* 1997, **2**: 503~ 506
- 2 王亦兵等. 城市高速公路交通控制综述. *自动化学报*, 1998, **24**(4): 484~ 496
- 3 Guoguang H E, Bao L iu, Baichuan Lu. An Intelligent Real-time Traffic Control System Suited to Chinese Cities. *Proceeding of 2nd International Conference: Advanced technique application on transportation systems*, 1991, : 253~ 257
- 4 贺国光等. 一种新型的自学习智能式城市交通实时控制系统. *自动化学报*, 1995, **21**(4): 424~ 430
- 5 Papageorgiou M. Dynamic Modeling, Assignment, and Route Guidance in Traffic Network. *Transpn. Res. - B*, 1990, **24**(6): 471~ 495
- 6 Chien C C, Youping Z H. Traffic Density Control for Automated Highway Systems. *Automatic*, **33**(7): 1273~ 1285
- 7 Ioannou P, Chien C C. Autonomous Intelligent Cruise Control. *IEEE Trans. Vehicular Technol.* 1993, **42**: 657~ 752

- 8 Messmer A, Papageorgiou M. Automatic Control Method Applied to Freeway Network Traffic. *Automatic*, 1994, **30**(4): 691~ 702
- 9 Messmer A, Papageorgiou M. Route Diversion Control in Motorway Networks Via nonlinear Optimization. *IEEE Control System Technology*, 1995, **3**(1): 144~ 154
- 10 Patel M I. An Intelligent System Architecture for Urban Traffic Control Applications. *Proc. Of the 8th IEEE Symp. On Parallel and Distributed Processing*, 1996: 10~ 17
- 11 Diakaki C. Simulation Studies of Integrated Corridors Control in Glasgow. *Transpn. Res. - C*, 1997, **5**(3/4): 211~ 224
- 12 Chen O J. Development and Evaluation of a Dynamic Ramp Metering Control Model. *The 8th IFAC/IFORS Symp. On Transpn Syst.*, Chania Greece, 1997: 1162~ 1168
- 13 Yogodah n. The Dynamic Control of Automotive Traffic at a Freeway Entrance Ramp. *Automatic*, 1970, **6**(2): 385~ 393
- 14 Newell G F. Comments on Traffic Dynamics. *Transpn. Res. - B*, 1989, **23**(5): 386~ 389
- 15 Chen L L. Freeway Ramp Control using Fuzzy Set Theory for Inexact Reasoning. *Transpn. Res. - B*, 1990, **24**(1): 377~ 395
- 16 Ran B, Royce D E, LeBlanc L J. A New Class of Instantaneous Dynamic user-optimal Traffic Assignment Models. *Oper. Res.*, 1992, **41**(2): 192~ 202
- 17 Weymann J. Optimization of Traffic Dynamic Route Guidance with Drivers' Reactions in a Queue-base Model. *IEEE Trans. On SMC*, 1995, **25**(7): 1161~ 1165
- 18 Ngo C Y. Freeway Traffic Control using Fuzzy Logic Controllers. *Information Science*. 1994, **1**: 59~ 76
- 19 Folorio L. Neural Network Classification and Forecasting of Freeway Traffic Flow Stability. *The 7th IFAC/IFORS Symp. On Transp System s: Theory and Applications of Advanced Technology*, 1994: 1122~ 1133
- 20 李立源, 曹大铸. 道路交通流最优预测与交叉口最优控制. *控制理论与应用*, 1993, **10**(1): 67~ 72
- 21 Parisini R, Zoppoli T. Neural Network for Minimization of Traveling Time on Freeway Systems. *The 7th IFAC/IFORS Symp. On Transp System s: Theory and Applications of Advanced Technology*, 1994: 803~ 808
- 22 Papageorgiou, M. Dynamic Modeling, Assignment, and Route Guidance in Traffic network. *Transpn. Res.* 1990, **24B**, 471~ 495
- 23 Gallinari P. On the use of Neural Network Techniques for Traffic Flow Modeling. *The 2nd World Congress on Intelligent Transport System*, 1995, vol. IV: 1915~ 1919
- 24 姜紫峰. 高速公路动态交通流建模于控制策略. *信息与控制*, 1996, **25**(4): 224~ 232
- 25 Meoreno J C, Papageorgiou M. Integrated Optimal flow Control in Traffic Networks. *European Journal of Operational Research*, 1993, **71**(2): 317~ 323
- 26 罗方述, 万百五等. 西安-临潼高速公路递阶控制方法研究. *自动化学报*, 1991, **17**(3)
- 27 黄海军. 城市交通网络平衡分析原理与实践. 人民交通出版社, 1994
- 28 Hai Yang, Sam Yagar. Traffic Assignment and Traffic Control in General Freeway-arterial Corridor Systems
- 29 Stem ven W B. Automated Highway System s Program s: Progress Report. *IFAC World Congress*, 1996
- 30 Papageorgiou M. An Integrated Control Approach for Traffic Corridors. *Transpn. Res. - C*, 1995, **3**(1)
- 31 Diakaki C. Simulation Studies of Integrated Corridors Control in Glasgow. *Transpn. Res. - C*, 1997, **5**(3/4): 211~ 224
- 32 Bender J G. An Overview of System Studies of Automated Highway System s. *IEEE Trans on Vehicle Technology*, 1991, **40**(1): 82~ 99
- 33 Hedrick A K. Control Issues in Automated Highway System s. *IEEE Control System s*, 1994, **14**(6): 21~ 32
- 34 Fetou R E. IVHS/AHS: Driving into the future. *IEEE Control System s*, 1994, **14**(6): 13~ 20
- 35 Varaiya P. Smart Cars on Smart Roads: Problem s of Control. *IEEE Trans on AC*, 1993, **38**(2): 195~ 207
- 36 Ann Hsu. Protocol Design for an Automated Highway System. *Discrete Event Dynamic System: Theory and Applications*, 1993, **2**: 183~ 206

- 37 Varaiya P. An Automated Highway System Simulator. *Transp Res- C*, 1995, **3**(1): 1~ 17
- 38 Karaaslan U, Varaiya P. Two Proposals to Improve Freeway Traffic Flow. *IEEE Proc of American Control Conf*, 1991
- 39 Rao. Roadside Intelligence for Flow Control in an Intelligence Vehicle and Highway System. *Transp Res- C*, 1994, **2**(1): 49~ 72
- 40 G Vernazza, R Zunino. A Distributed Intelligent Methodology for Railway Traffic Control. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 1990, **39**(3): 263~ 270
- 41 Huang G Q. An Agent-based Framework for Cooperating Expert Systems in Concurrent Engineering. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 1994, **7**(6): 685~ 693
- 42 梁 泉. 多智能体分散式协调控制的研究. 上海交通大学博士论文, 1996
- 43 张钟俊, 蔡自兴. 智能控制与智能控制系统. *信息与控制*, 1989, **5**: 30~ 39
- 44 许晓鸣, 杨煜普. 智能控制理论的新发展. *电子学报*, 1995, **23**(10): 25~ 31
- 45 Findler N U. Multiagent Coordination and Cooperation in a Distributed Dynamic Environment with Limited Resources. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1995, **9**: 229~ 238
- 46 Fenton R E, Mayhan R J. Automated Highway Studies at The Ohio State University-An Overview. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, **40**: 100~ 113
- 47 Weymann J. Optimization of Traffic Dynamic Route Guidance with Drivers' Reactions in a Queue-base Model. *IEEE Trans. On SMC*, 1995, **25**(7): 1161~ 1165
- 48 J K Hedrick, M Tomizuka and P Varaiya. Control Issues in Automated Highway Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, December 1994
- 49 Patel M I. An Intelligent System Architecture for urban Traffic Control Applications. *Proc. Of the 8th IEEE Symp. On Parallel and Distributed Processing*, 1996: 10~ 17

NEW TREND TOWARD OF URBAN TRAFFIC CONTROL

OU Hai-tao ZHANG Wen-yuan ZHANG Wei-dong XU Xiao-ming

(Shanghai Jiao Tong University 200030)

Abstract: In this paper the development of urban traffic control is reviewed briefly, The latest technologies and methods of urban traffic control have been introduced in details. Based on the analysis, how this problem is solved is discussed and a new mode of urban intelligent traffic control, i.e. urban multiagent traffic control system is proposed.

Keywords: urban traffic control, nonlinear large-scale systems, UITS, dynamic routing navigation, road automatic debiting, public transportation, multiagent

《最优滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法》出版

邓自立教授著的新书《最优滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法》, 2000年8月已由哈尔滨工业大学出版社出版。这是一部最优滤波、反卷积和状态估计方面的专著。它系统地阐述了由著者提出的最优滤波新的方法论——现代时间序列分析方法及其在信号估计与反卷积中的应用。书中用该方法论提出了最优滤波的一系列新理论、新方法和新算法, 其中包括白噪声估计理论、统一的稳态 Kalman 滤波理论和现代时域 Wiener 滤波理论等。该书内容新颖, 理论严谨, 方法独具特色, 深入浅出, 含有大量仿真例子、算例和应用实例, 且每章末附有参考文献。

该书对在信息与控制领域从事研究的科技工作者, 大专院校教师、研究生和高年级大学生有较大参考价值, 适合作为信号处理类和控制类有关专业研究生教材。

该书大 32 开本, 31.8 万字, 378 页, 共 8 章, 定价每册 18 元。欲购者请与哈尔滨工业大学出版社尹继荣同志联系。

地址: 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编: 150006 电话: 0451- 6414349 传真: 0451- 6414749