

文章编号: 1001-0920(2013)07-1046-05

面向长周期的交通状态反馈诱导策略

贺正冰, 关伟

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 受检测器和诱导信息板显示形式的限制, 诱导信息更新周期通常较长. 为此, 根据备选路径交通状态而非行驶时间制定诱导策略, 利用交通状态相对稳定的特点, 进一步提出状态反馈诱导策略; 为减少长周期与时变交通需求间的矛盾及其他误差, 提出了状态与时间反馈策略相结合的混合策略. 仿真实验表明, 面对长周期时, 状态反馈策略可以满足稳定性和准确性的双重要求, 混合策略则进一步提高了诱导的准确性.

关键词: 诱导策略; 交通状态; 反馈策略; 长诱导周期

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Traffic state feedback guidance strategy under long update intervals

HE Zheng-bing, GUAN Wei

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. Correspondent: GUAN Wei, E-mail: weig@bjtu.edu.cn)

Abstract: Update intervals for guidance strategies used in variable message signs have to be long due to limitations of detectors and display format of broadcasting guidance information. A guidance strategy is introduced based on the traffic state instead of travel time. A traffic state feedback guidance strategy is obtained by utilizing relative stability of traffic state. A hybrid strategy considering travel time and traffic state is proposed as a solution of conflict between time-varying demand and long intervals. Simulation results show that the traffic state feedback strategy is able to meet the practical requirement both in the stability and accuracy under long update intervals, and the hybrid strategy further improves the accuracy.

Key words: guidance strategy; traffic state; feedback strategy; long update interval

0 引言

随着交通压力日益增大, 我国许多大城市均在道路上布设了可变诱导信息板(VMS). 在硬件设施日渐完善的同时, 如何有效地发布信息已成为影响实际应用效果的重要因素.

目前的分散交通诱导策略大致可以分为以下两类^[1]:

1) 反馈策略. 根据上一周期的交通状态估计行驶时间, 从而制定本次诱导策略. 广泛采用的是PID等控制器, 该方法简单、效率高, 但存在稳定性差、考虑因素少等缺点.

2) 迭代策略. 通过迭代, 在交通模型中综合考虑多种因素, 确定最优诱导方案. 该方法综合多种因素进行优化, 效果过于依赖仿真, 计算负担重.

文献[2]首次将最优控制和反馈控制引入动态交通分配, 提出了路网建模和诱导策略生成的一般框架; 文献[3]将复杂路网引入控制工程, 首次将经典控制器(如P、state-feedback、output-feedback等)引入诱导策略; 文献[4]则系统地介绍了路网模型、驾驶员决策模型、预计与反应行驶时间等, 并在多种仿真情景下讨论了bang-bang、P和PI控制器的效果. 上述文献奠定了分散反馈诱导策略的基础. 文献[5]针对苏格兰城际高速公路研究了反馈框架下诱导策略的实际应用问题; 文献[6]使用METANET^[7]对简单路网建模, 比较了bang-bang、P、PI、LQI等4种控制器以及多种因素对诱导效果的影响; 文献[8]通过对比复杂路网仿真模型上的反馈策略和迭代策略, 确认了基于反应行驶时间的反馈策略具有与迭代控制策略相似的较好效果; 文献[9-11]将预计行驶时间引入反馈框

收稿日期: 2012-03-12; 修回日期: 2012-07-05.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2012CB725403); 国家自然科学基金重点项目(71131001); 中央高校基本科研业务费项目(2012JBM064).

作者简介: 贺正冰(1982-), 男, 博士, 从事智能交通系统、交通流理论等研究; 关伟(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通系统工程等研究.

架, 利用仿真确认了诱导效果的提升; 文献[12]通过对环形路网的仿真研究, 说明了反馈诱导策略可以有效地疏导并缓解严重的非常发交通拥堵. 此外, 文献[13-14]将超路径引入反馈控制策略, 即以均衡所有超路径上的行驶时间为目标进行反馈控制.

尽管上述文献对反馈策略、控制器等进行了较为系统的研究, 但对诱导周期的考虑不够, 可能的原因如下: 国外VMS多布设于高速公路, 路网结构相对简单, 备选路径有限, 因此多以直接提供备选路径上的行驶时间为主(参见文献[1, 5, 12]), 而时间信息连续性强以及较短的刷新周期不会对驾驶员产生过大干扰. 我国大多将VMS布设于城市道路, 路网结构复杂, 备选路径多, 目前以在路网拓扑结构上显示离散的路段交通状态信息(如红、绿、黄3种颜色)为主, 因此较短的诱导周期很可能会影响驾驶员的判断, 而且目前我国城市(如北京市)路网检测器上传数据的周期为2 min, 这便决定了诱导周期必须大于2 min. 因此, 真正应用于我国城市实践的诱导策略必须在长诱导周期下同时满足稳定性和准确性的双重要求. 此外, 由于系统最优通常会牺牲一部分车辆利益, 在实际中令驾驶员难以接受, 并且一旦驾驶员意识到服从诱导信息反而可能造成利益损失, 诱导信息将因失去信任而失效^[15]. 因此, 本文以用户最优为目标, 在反馈策略框架下提出一种基于交通状态的反馈诱导策略和混合策略, 并通过仿真模型验证了其有效性.

1 基于交通状态的反馈诱导策略

相比路段行驶时间, 路段交通状态通常更稳定. 本文据此提出一种基于交通流状态的反馈诱导策略, 以期适应我国城市交通实践的需要. 所提出的方法只考虑备选路径上存在驶入路段的情况, 经过简单调整并不难扩展至更复杂的情景, 并假设两路段交通流入同一路段时因冲突而产生瓶颈.

1.1 符号说明

I : 备选路径所属路段集, 有路段号 $i \in I$, 同时以 I 标志备选路径;

R : 驶入路径 I 的路段集, 有路段号 $r \in R$, 同时用 R 标志此类路段;

$n(t)$: t 时刻离开VMS的车辆, 同时用 n 标志来自VMS处的交通流(简称VMS流);

τ_i : 路段 i 上自由流行驶时间;

$\pi_i(n(t))$: $n(t)$ 在路段 i 上的行驶时间, 显然 $\pi_i(n(t)) \geq \tau_i$;

$c_i(t)$: t 时刻路段 i 出口处的最大可能通过量, 由于 I 和 R 上交通流的时变性和竞争关系, 该值不固定;

$\mu_i(t)$: t 时刻离开路段 i 的交通流量;

$\lambda_i^R(t)$: t 时刻从 R 进入路段 i 的交通流量;

$\lambda_i^I(t)$: t 时刻从 I 进入路段 i 的交通流量;

$\mu_i^n(t)$: t 时刻离开路段 i 的VMS流流量;

$\lambda_i^n(t)$: t 时刻进入路段 i 的VMS流流量, 其中 $\lambda_0^n(t)$ 为到达VMS处的交通流量, 即待诱导流量;

$\rho_i(t)$: t 时刻路段 i 中VMS流占全部流量的比例, 有 $\rho_0(t) = 1$.

1.2 路段上交通流比例

假设不同源交通流在路段内各处比例不变, 如VMS流进入路段 i 的比例等于离开时的比例 $\rho_i(t) = \rho_i(t + \pi_i(n(t)))$. 简记车辆在路段1到 i 上的总行驶时间为 $\Pi_i = \sum_{k=1}^i \pi_k(n(t))$, 则车辆 $n(t)$ 经过 $t + \Pi_{i-1}$ 到达路段 i 时, 进入路段 i 的VMS流流量为

$$\lambda_i^n(t + \Pi_{i-1}) = \rho_{i-1}(t + \Pi_{i-2}) \lambda_i^I(t + \Pi_{i-1}), \quad (1)$$

路段 i 上, VMS流所占比例为

$$\rho_i(t + \Pi_{i-1}) = \frac{\lambda_i^n(t + \Pi_{i-1})}{\lambda_i^R(t + \Pi_{i-1}) + \lambda_i^I(t + \Pi_{i-1})}, \quad (2)$$

车辆 $n(t)$ 经过 $t + \Pi_i$ 离开路段 i 时, VMS流流量为

$$\mu_i^n(t + \Pi_i) = \rho_i(t + \Pi_{i-1}) \mu_i(t + \Pi_i). \quad (3)$$

1.3 路径上VMS流的最大可能通过量

定义 t 时刻VMS流将要在路径上经历的最大可能通过量为 $c_{i^*}^n(t + \Pi_{i^*})$, 其中

$$i^* = \arg \min_{i \in I} \{ \rho_i(t + \Pi_{i-1}) c_i(t + \Pi_i) \}, \quad (4)$$

同时记 $r^* \in R$ 为与 i^* 连接的驶入路段.

注1 i^* 不一定是路径上最大可能通过量最小的路段.

1.4 路径状态组合及相应诱导策略

不失一般性, 以两备选路径为例, 分别用A、B代表自由流行驶时间较短和较长的路径, a 、 b 为其中路段, 以诱导至路径A的交通流占全部交通需求的比例表示诱导率, 划分 $n(t)$ 将要在路径上经历的交通流状态为自由流状态, 即 $n(t)$ 在整个路径上均处于自由流状态, 否则为拥堵状态. 据此制定如下3种类型的应对策略.

类型1: 两路径均处于自由流状态. 显然, 由于路径A行驶时间短于路径B, 设置诱导率为1, 即

$$\beta_1(t) = 1. \quad (5)$$

类型2: 两路径均未同时处于自由流或拥堵状态. 以保持路径A处于自由流状态为目标, 将多于 $c_{a^*}(t + \Pi_{a^*})$ 的流量诱导至路径B, 即

$$\beta_2(t) = \frac{c_{a^*}(t + \Pi_{a^*})}{\lambda_0^n(t)}. \quad (6)$$

如果 $c_{a^*}(t + \Pi_{a^*}) > \lambda_0^n(t)$, 则令 $\beta_2(t) = 1$.

类型3: 两路径均处于拥堵状态. 根据文献[16]

的结论,按备选路径最大可能通过量比例分配.考虑从VMS下游驶入路径的交通流,有

$$\frac{\beta_3(t)\lambda_0^n(t) + \lambda_{a^*}^R(t + \Pi_{a^*-1})}{[1 - \beta_3(t)]\lambda_0^n(t) + \lambda_{b^*}^R(t + \Pi_{b^*-1})} = \frac{c_{a^*}(t + \Pi_{a^*})}{c_{b^*}(t + \Pi_{b^*})}, \quad (7)$$

不难解得 $\beta_3(t)$. 当 $c_{b^*}(t + \Pi_{b^*})\lambda_{a^*}^R(t + \Pi_{a^*-1})$ 相对较大时,可能有 $\beta_3(t) < 0$, 所以令 $\beta_3(t) = 0$.

1.5 反馈框架下的诱导策略

基于交通状态的诱导策略涉及到多路段交通需求和状态的预测值,这在实际中不易准确估计.由于交通状态的相对稳定性,不妨使用当前时刻的交通状态近似代替预测时刻值状态,形成基于交通状态的反馈诱导策略(简记为状态反馈策略,见图1),即省略所有关于 Π_i 的部分,得到 $\beta_2(t)$ 和 $\beta_3(t)$ 的近似策略

$$\hat{\beta}_2(t) = \frac{c_{a^*}(t)}{\lambda_0^n(t)}, \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_3(t) = \frac{c_{a^*}(t)\lambda_0^n(t) + c_{a^*}(t)\lambda_{b^*}^R(t) - c_{b^*}(t)\lambda_{a^*}^R(t)}{\lambda_0^n(t)[c_{a^*}(t) + c_{b^*}(t)]}. \quad (9)$$

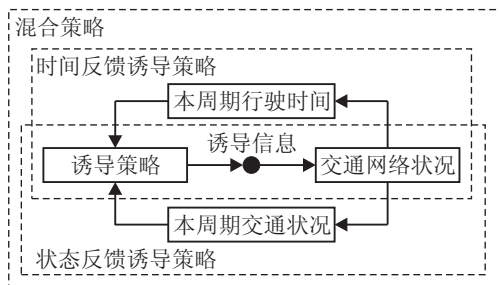


图1 时间反馈策略、状态反馈策略以及混合策略示意图

2 时变的交通需求与长周期的矛盾及解决方案

当交通需求变化较快或诱导周期相对较长时,上一周期中的交通需求与状态仍然难以准确代表本周期值.

例1 记 Δ 为诱导周期,假设线性增长的交通需求及固定的路径A上的最大可能通过量 $c_{a^*}(t) = C$, 则类型2策略为 $\hat{\beta}_2(t) = C/\lambda_0^n(t)$. 显然,需求 $\lambda_0^n(t') > \lambda_0^n(t), t' \in (t, t + \Delta]$, 因此路径A在 $(t, t + \Delta]$ 时刻内将超过 C , 与诱导目标矛盾. 由于状态反馈策略不具备偏差发生后的调节能力,该偏差将持续到路径恢复畅通. 除交通需求外, $c_{a^*}(t)$ 也存在同一问题.

解决方案1: 预测本周期内可能的 $c_{a^*}(t)$ 和 $\lambda_0^n(t)$, 并制定分配方案. 除预测本身的难度外,为保持路径上近似的行驶时间,该方案牺牲了一部分车辆的利益. 如例1,使用 $(t, t + \Delta]$ 中的交通需求制定诱导方案 $\beta_2(t) = C/\lambda_0^n(t + \Delta)$. 因此在 t 与 $t + \Delta$ 之间,不必要的车辆被诱导至路径B,而路径A在 $t + \Delta$ 前一直处于自由流状态,不但造成了时间上的浪费,而且可

能降低驾驶员对VMS的信任.

解决方案2: 制定状态与时间反馈策略相结合的混合策略,即使用状态反馈策略提供诱导信息区间,使用时间反馈策略在区间内确定具体诱导方案(见图1). 令 $\beta_T(t)$ 和 $\beta_S(t)$ 分别为由时间和状态反馈策略得到的诱导方案,则混合策略为

$$\beta(t) = \begin{cases} \bar{\beta}_S(t), & \beta_T(t) > \bar{\beta}_S(t); \\ \underline{\beta}_S(t), & \beta_T(t) < \underline{\beta}_S(t); \\ \beta_T(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\bar{\beta}_S(t) = \beta_S(t) + \Delta\beta, \underline{\beta}_S(t) = \beta_S(t) - \Delta\beta, \Delta\beta \in [0, 1]$ 为给定常数; $\Delta\beta$ 越大,越趋于时间反馈策略,反之则越趋于状态反馈策略.

注2 $\bar{\beta}_S(t), \underline{\beta}_S(t)$ 均应限制在 $[0, 1]$ 内. 另外,该混合策略有助于消除状态反馈策略中用当前状态代替预测状态以及其他不确定扰动所产生的误差,增强了策略的鲁棒性.

3 仿真实验

这里设计仿真情景如图2所示. 使用物理队列模型^[17-18]和Daganzo-Newell入匝道模型^[19-20]建立路网仿真模型. 路段R的时变需求及路段A₂上可能的交通流溢出均增加了交通状态的复杂性. 使用累计车辆曲线方法^[21-22]确定模型中车辆预计行驶时间,假设车辆完全服从诱导.

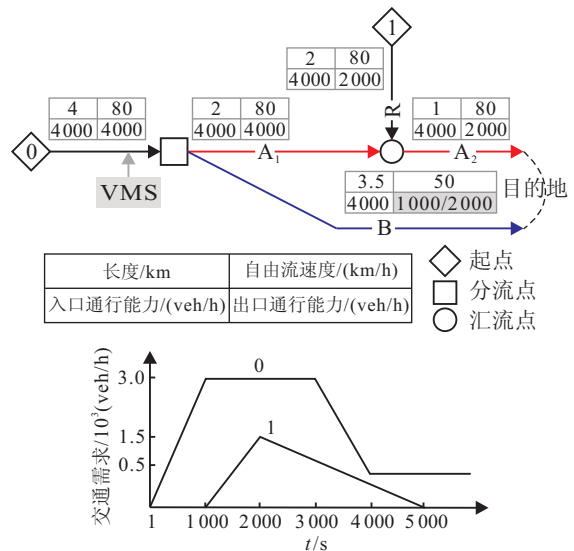
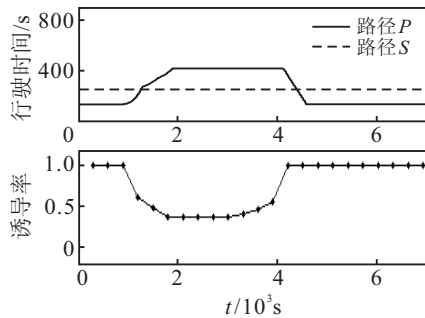
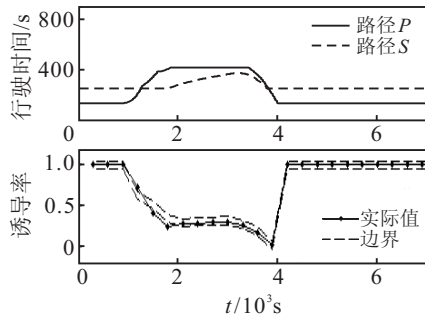


图2 仿真路网及交通需求

针对类型2和类型3分别设路径B出口通行能力为2000和1000 veh/h(仿真结果显示,2000 veh/h时整个诱导过程基本使用类型2,1000 veh/h时为类型3). 类型2实验结果如图3所示,尽管状态反馈策略存在一定误差,但混合策略减小了该误差. 为解释该误差,调整周期为1s,并在同等条件下实验,实验结果如图4所示. 由图4可以看出效果较好,表明了策略本身的准确性,可以认为误差主要源自第2节中的时



(a) 状态反馈策略仿真结果



(b) 混合策略仿真结果(Δβ=0.05)

图 3 针对类型 2 的实验结果 (诱导周期为 300 s)

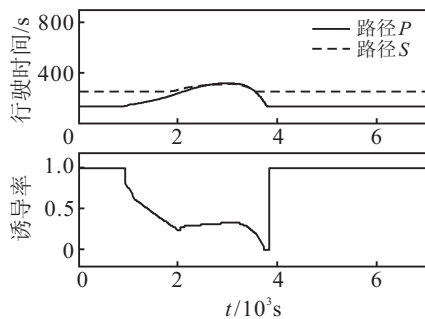
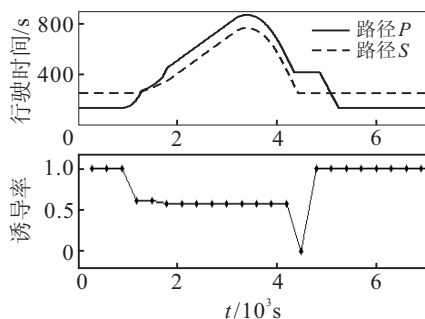
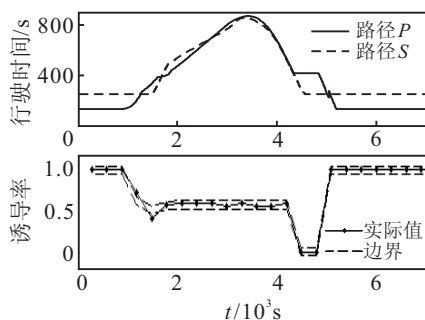


图 4 针对类型 2 的实验结果 (诱导周期为 1 s)



(a) 状态反馈策略仿真结果



(b) 混合策略仿真结果(Δβ=0.05)

图 5 针对类型 3 的实验结果 (诱导周期为 300 s)

变需求与长周期期间的矛盾. 尽管存在误差, 但考虑到实际应用中诱导信息稳定性的要求大于准确性, 以及该方法仅使用当前交通流数据而未涉及预测值, 因此可认为类型 2 策略是可行的. 增大 $\Delta\beta$ 值, 可以进一步减小这种误差, 但同时可能带来一定的振荡. 类型 3 的结果 (见图 5) 较为理想, 使用带调整能力的混合策略不但消除了状态反馈策略中存在的误差, 而且保持了诱导信息的稳定性.

4 结 论

受我国城市现有检测器设备和 VMS 显示形式的限制, 诱导策略更新周期通常较长, 一般为 2 ~ 15 min. 然而, 采用现有策略 (如时间反馈诱导策略) 在长周期下稳定性较差, 无法满足需要. 为研究长诱导周期下兼具稳定性和准确性的诱导策略, 本文将车辆将要经历的交通状态划分为 3 种组合, 分别制定诱导策略; 利用交通状态相对稳定的特点, 使用当前状态代替预测值形成反馈环路, 得到状态反馈策略; 随后分析了时变需求与长周期期间难以有效调和的矛盾, 提出了时间与状态反馈策略相结合的混合策略, 以减小误差. 最后, 通过仿真实验表明了状态反馈策略在面对长诱导周期时仍具有很好的稳定性和较高的准确性, 而混合策略则在保持策略稳定性的同时进一步提高了其准确性. 本文提出了适用于我国城市实践的诱导策略, 为相关诱导策略的制定提供了科学理论依据. 尽管文中仿真实验已考虑了交通流竞争、溢出等复杂条件, 但在更复杂路网结构 (带有交叉口的城市路网) 和更微观的仿真环境 (如 Paramics 等) 中进行验证仍需进一步展开.

参考文献(References)

- [1] Papageorgiou M, Diakaki C, Dinopolou V, et al. Review of road traffic control strategies[J]. Proc of the IEEE, 2003, 91(12): 2043-2067.
- [2] Papageorgiou M. Dynamic modeling, assignment, and route guidance in traffic networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1990, 24(6): 471-495.
- [3] Messmer A, Papageorgiou M. Automatic control methods applied to freeway network traffic[J]. Automatica, 1994, 30(4): 691-702.
- [4] Pavlis Y, Papageorgiou M. Simple decentralized feedback strategies for route guidance in traffic networks[J]. Transportation Science, 1999, 33(3): 264-278.
- [5] Messmer A, Papageorgiou M, Mackenzie N. Automatic control of variable message signs in the interurban Scottish highway network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1998, 6(3): 173-187.

- [6] Wang Y, Papageorgiou M. Feedback routing control strategies for freeway networks: A comparative study[C]. Proc of the 2nd Int Conf on Traffic and Transportation Studies. Beijing, 2000: 642-649.
- [7] Messner A. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks[J]. Traffic Engineering and Control, 1990, 31(9): 466-470.
- [8] Wang Y, Papageorgiou M, Messmer A. Feedback and iterative routing strategies for freeway networks[C]. Proc of the IEEE Int Conf. Mexico City, 2001: 1162-1167.
- [9] Sawaya O, Doan D. Predictive time-based feedback control approach for managing freeway incidents[J]. J of Transportation Research Board, 2000, 1710: 79-84.
- [10] Wang Y, Papageorgiou M, Messmer A. A predictive feedback routing control strategy for freeway network traffic[C]. Proc of the American Control Conf. Anchorage, 2002: 3606-3611.
- [11] Wang Y, Papageorgiou M, Messmer A. Performance evaluation of predictive feedback routing for freeway networks[C]. IFAC World Congress on Automatic Control. Barcelona, 2002: 365-378.
- [12] Wang Y, Papageorgiou M. Real-time route guidance for large-scale express ring-roads[C]. Proc of Intelligent Transportation System Conf. Beijing, 2006: 224-229.
- [13] Deflorio F. A routing feedback strategy for urban road networks[C]. Proc of 7th World Congress on ITS. Turin, 2000: 1-8.
- [14] Deflorio F. Evaluation of a reactive dynamic route guidance strategy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2003, 11(5): 375-388.
- [15] Barnhart C, Laporte G. Handbook in operation research and management science[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007: 637-677.
- [16] Laval J. Graphical solution and continuum approximation for the single destination dynamic user equilibrium problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009, 43(1): 108-118.
- [17] Daganzo C. Fundamentals of transportation and traffic operations[M]. Amsterdam: Pergamon-Elsevier, 1997: 25-46.
- [18] Yu N, Ma J, Zhang H. A polymorphic dynamic network loading model[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure, 2008, 23(2): 86-103.
- [19] Daganzo C. The cell transmission model, Part II: Network traffic[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1995, 29(2): 79-93.
- [20] Jin W, Zhang H. On the distribution schemes for determining flows through a merge[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(6): 521-540.
- [21] Newell G. Applications of queueing theory[M]. London: Chapman and Hall, 1982: 1-98.
- [22] Lago A, Daganzo C. Spillovers, merging traffic and the morning commute[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 41(6): 670-683.

第 25 届中国控制与决策会议在贵阳召开

第 25 届中国控制与决策会议 (2013 CCDC) 于 5 月 25 日~27 日在贵州省贵阳市胜利召开。会议由东北大学、IEEE 新加坡工业电子分会和 IEEE 哈尔滨控制系统分会联合主办, 贵州大学具体承办。来自国内外高等院校和科研机构的 650 多位代表参加了会议, 其中国外代表 20 余人。这是一次国际学术盛会, 大家齐聚一堂, 交流学术思想, 讨论学术问题, 充满了浓厚的学术气氛。

5 月 25 日上午举行了大会开幕式。大会总主席、东北大学杨光红教授主持开幕式, 东北大学副校长王福利教授致开幕词, 贵州大学党委书记姚小泉教授致欢迎词, 国际程序委员会主席 Changyun Wen 教授介绍会议程序, 贵州省教育厅副厅长周保英女士到会并讲话。

大会邀请了美国波士顿大学 John Baillieul 教授、中国科学院陈翰馥院士等 12 位著名教授, 就当前控

制与决策领域的热点问题和最新研究成果作了专题大会报告和杰出讲座。这些报告对当前前沿学科的一些热点问题进行了阐述和评论, 受到了代表们的普遍欢迎。

大会发行了《第 25 届中国控制与决策会议论文集》光盘。光盘中的 1000 篇论文将进入 IEEE Xplore Data Base, 被 Ei 检索。

本届会议在评选张嗣赢 (CCDC) 优秀青年论文奖的过程中, 有 5 位青年学者获得提名。最终, 清华大学的王薇凭借其优秀的论文和出色的报告赢得此奖项。

湖南工业大学副校长张昌凡教授代表下届承办单位介绍了将于 2014 年在长沙举办的第 26 届中国控制与决策会议 (2014 CCDC) 的筹备情况, 并欢迎各位代表积极参加会议。

CCDC 组织委员会