



城市拥堵收费最优费率设定

刘志远 教授

zhiyuanl@seu.edu.cn

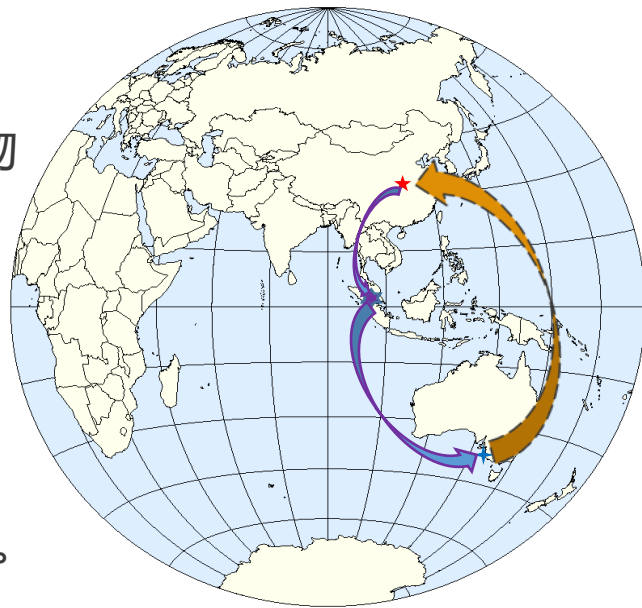


School of Transportation
SOUTHEAST UNIVERSITY



刘志远 博士，教授，博士生导师

- 本科毕业于**东南大学**交通工程专业，博士毕业于**新加坡国立大学**土木工程系，并随后留校进行博士后研究一年。
- 2012-2015年就职于**澳大利亚莫纳什大学**土木工程系，任讲师及交通系统工程硕士项目主任。
- 入选中组部第六批“**青年千人计划**”
- 2015年全职回到**东南大学**交通学院任教。
- **研究领域**：交通网络规划与管理，公共交通，多模式物流网络，智能交通系统，交通安全与控制。
- 迄今为止在这些领域中发表**学术论文70余篇**，其中被 Transportation Research (Part A to E), Transportation, Transportmetrica, Accident Analysis and Prevention等**SCI/SSCI期刊检索40余篇**。受邀撰写英文专著章节2篇。





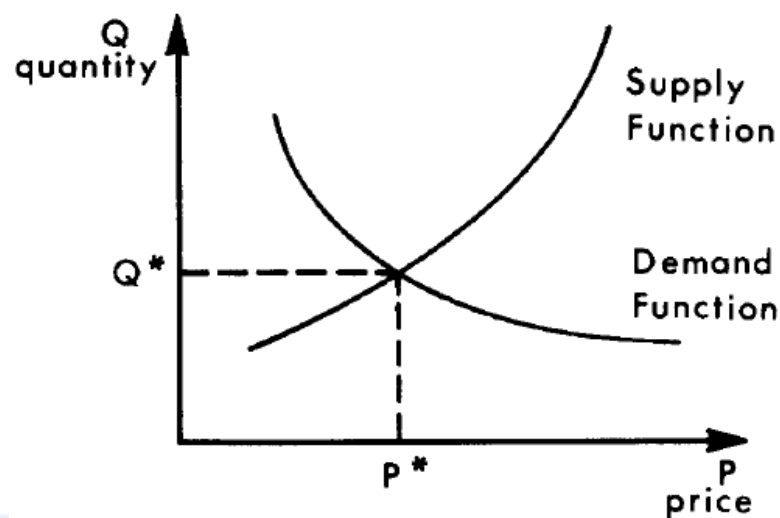
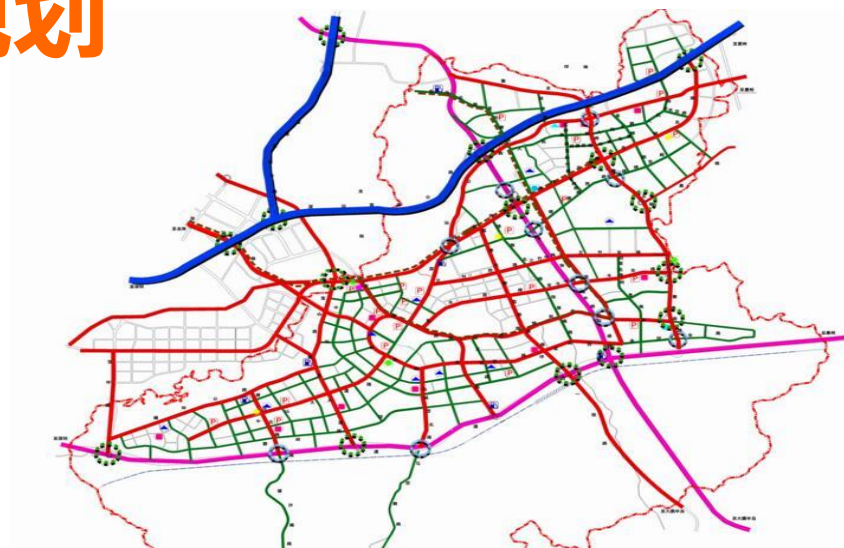
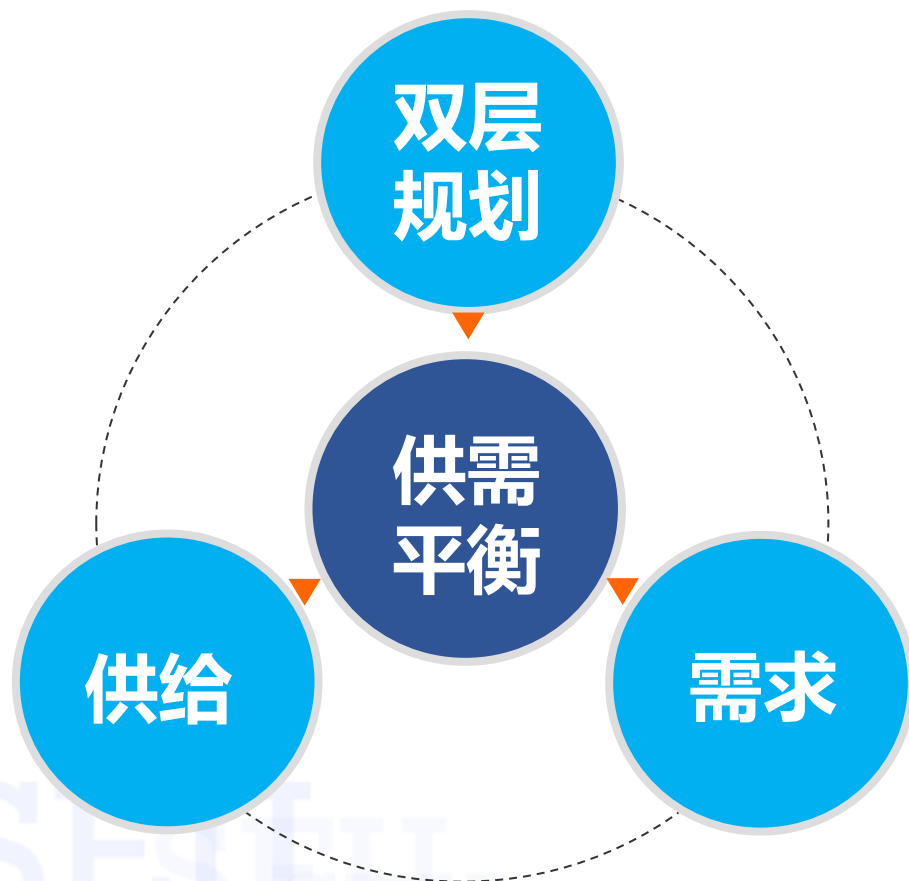
城市交通需求管理策略

□ 交通需求管理工具

- 强制性规定、政策 (北京单双号限行政策)
- 经济手段
 - 新车手续费 (购置税、上牌税)
 - 通过车牌拍卖控制汽车总量 (新加坡、上海)
 - 停车费 (墨尔本市中心繁忙时段停车费26美元/小时)
 - 拥堵收费



需求管理与城市交通规划



拥堵收费实践：区域通行证(1975-1998)

收费区域



不同类型的通行证





拥堵收费实践：电子道路收费(1998-)

1. 收费入口

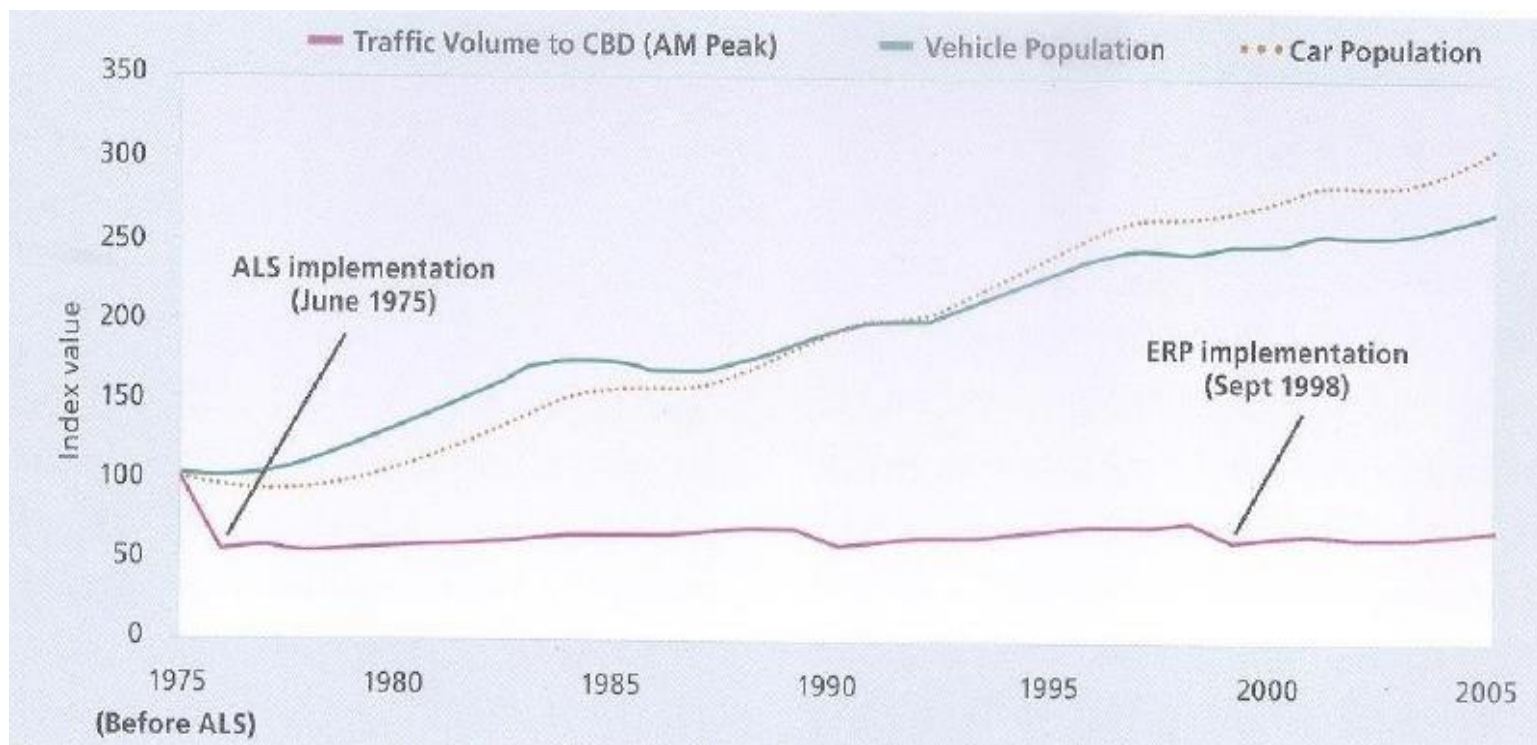


2. 车载单元

3. 控制中心



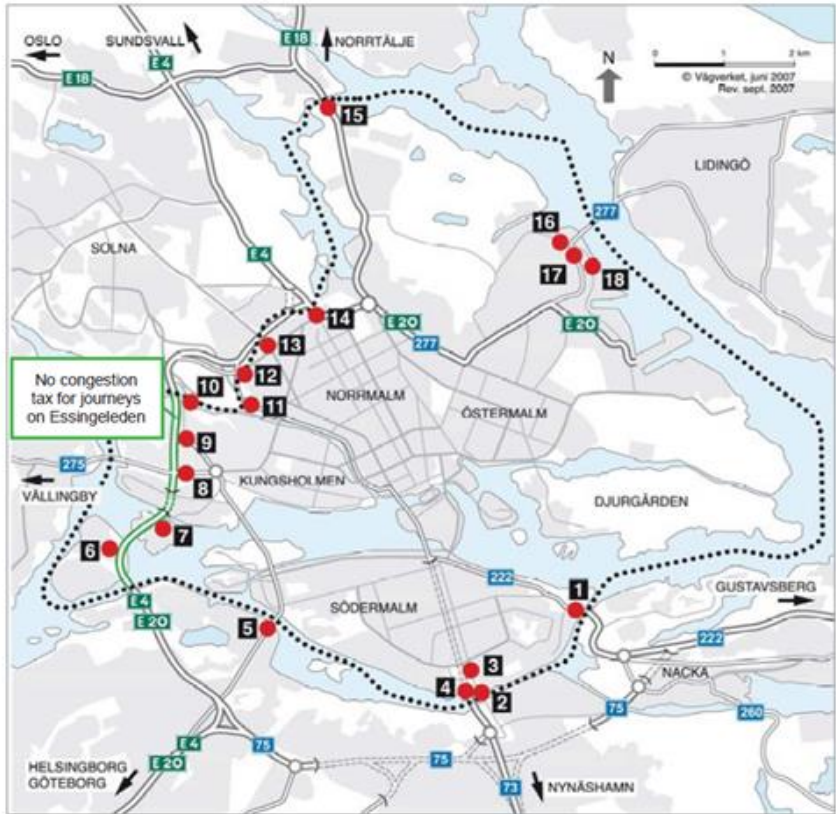
拥堵收费实践：新加坡实施效果



实施拥堵收费30年以来，进入CBD的
车辆基本保持不变



拥堵收费实践：瑞典斯德哥尔摩



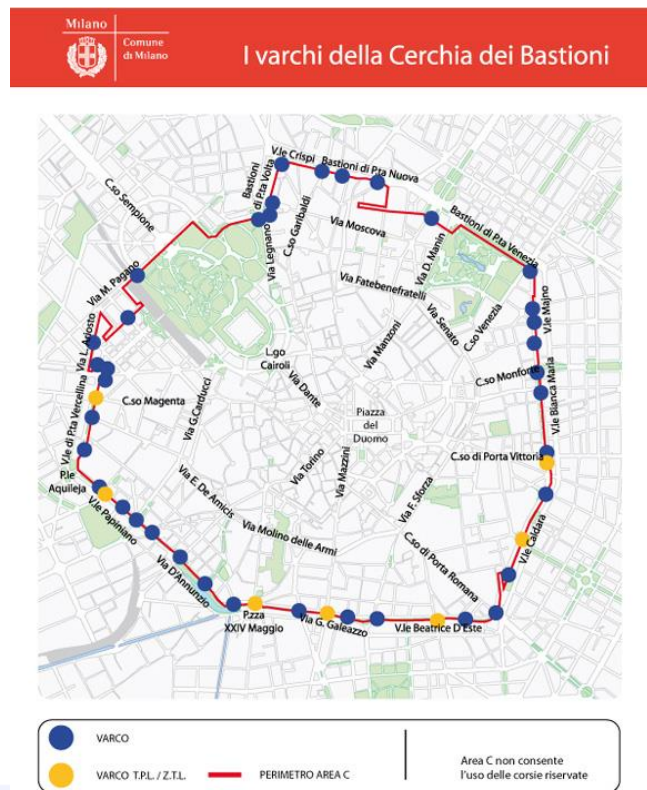
Time of day	Tax
00:00 – 06:29	0 SEK
06:30 – 06:59	10 SEK
07:00 – 07:29	15 SEK
07:30 – 08:29	20 SEK
08:30 – 08:59	15 SEK
09:00 – 15:29	10 SEK
15:30 – 15:59	15 SEK
16:00 – 17:29	20 SEK
17:30 – 17:59	15 SEK
18:00 – 18:29	10 SEK
18:30 – 23:59	0 SEK



斯德哥尔摩

2006年试行，2007年8月开始永久实施

拥堵收费实践：意大利米兰



收费区域: 8km² 收费时间: 7:30 ~ 19:30 费率: €5
从2012年1月开始实施

拥堵收费实践：英国杜伦



- 2002年开始对部分路段收费(Saddler Street)
- 星期一至星期六，上午10点至下午4点，通行车辆收费£2



拥堵收费实践：失败案例

城市	提出时间	否决时间
香港	1983年	1985年
剑桥	1989年	90年代初期
爱丁堡	2004年	2005年
纽约	2007年	2008年
曼彻斯特	2008年	2008年



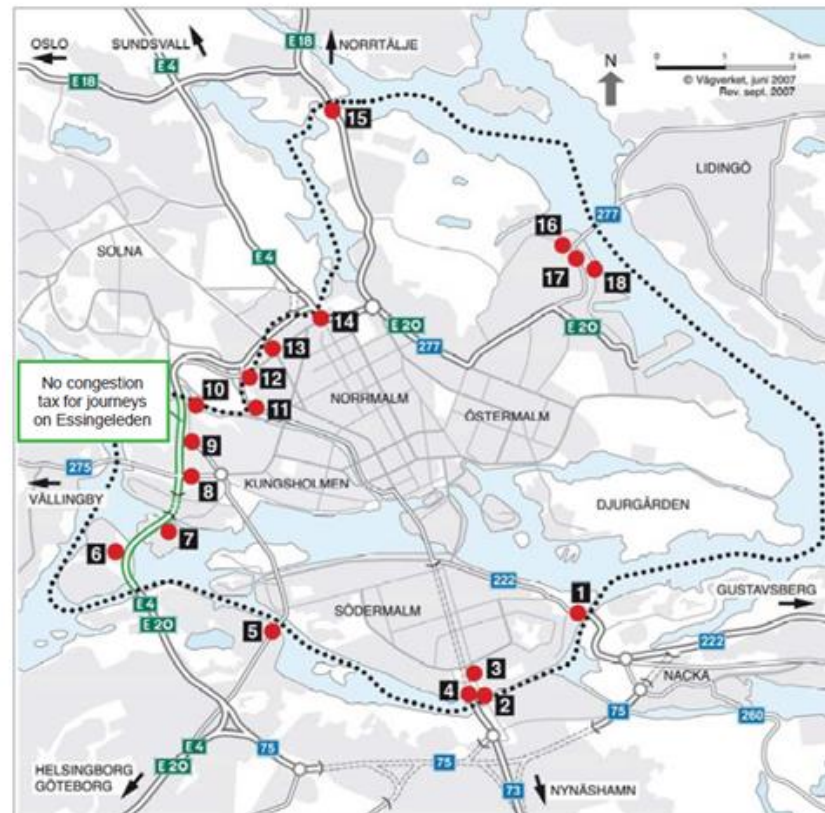
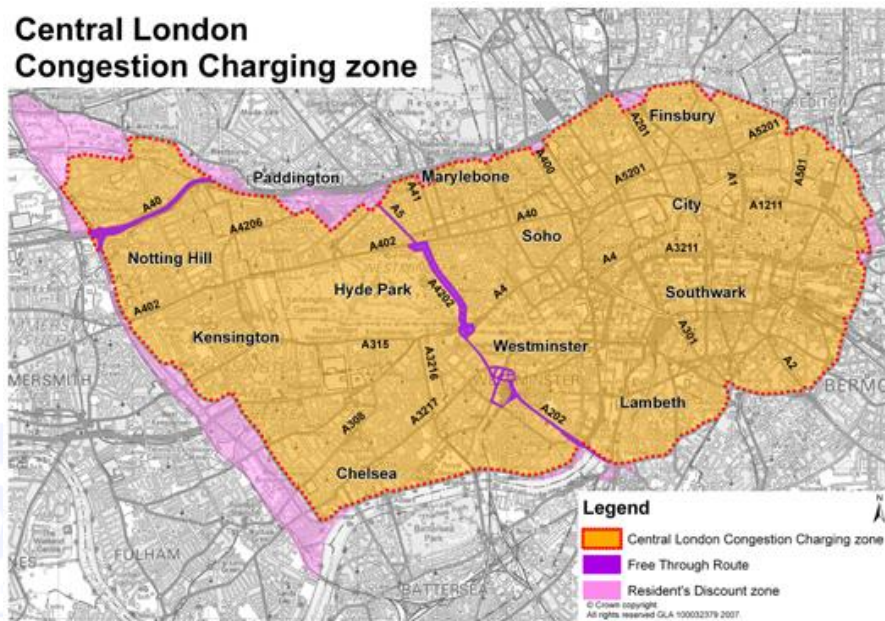
城市拥堵收费最优费率设定

□ 收费位置 + 收费费率

□ 最优费率设定的两个关键问题

- 流量预测 → 方案评估
- 优化模型 → 最优方案

Central London
Congestion Charging zone



关键问题1：流量预测

□ 交通战略规划 (始于1870年)

➤ 城市规划的重要组成部分

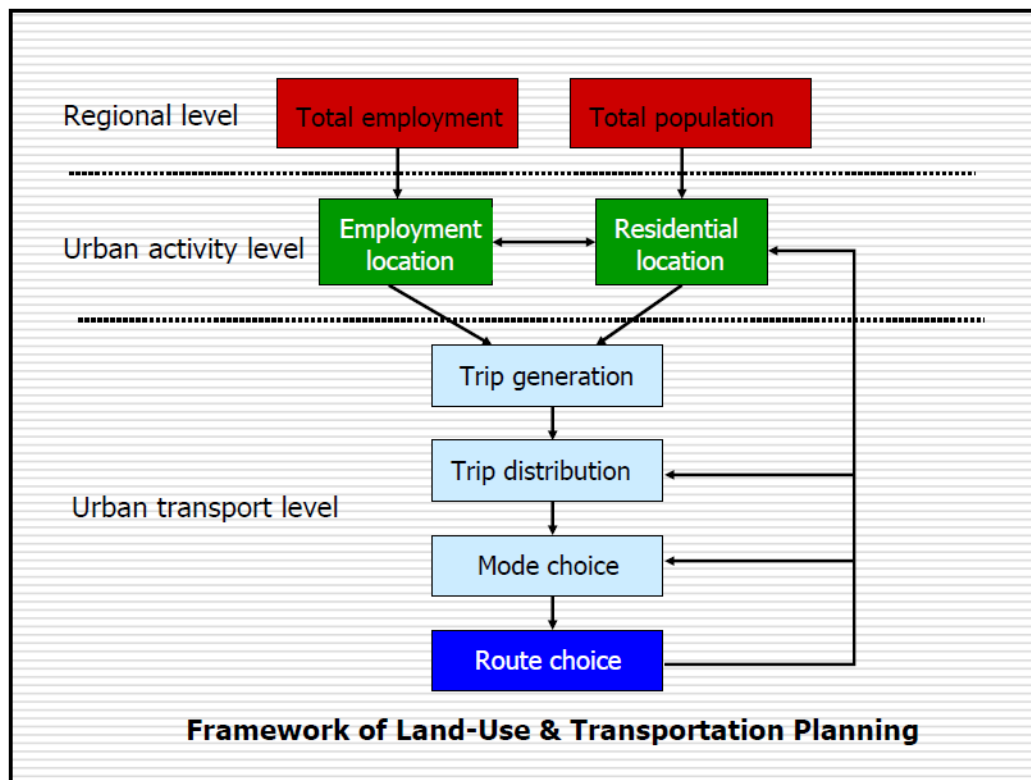
➤ 四阶段模型

- 土地利用
- 需求预测
- 出行行为

➤ 路网评估

➤ 常用软件

- TransCAD
- EMME
- VISUM
- CUBE
- ...



关键问题1：流量预测

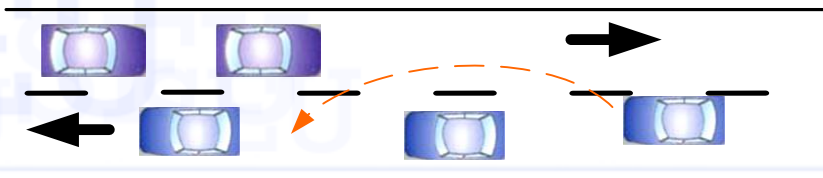
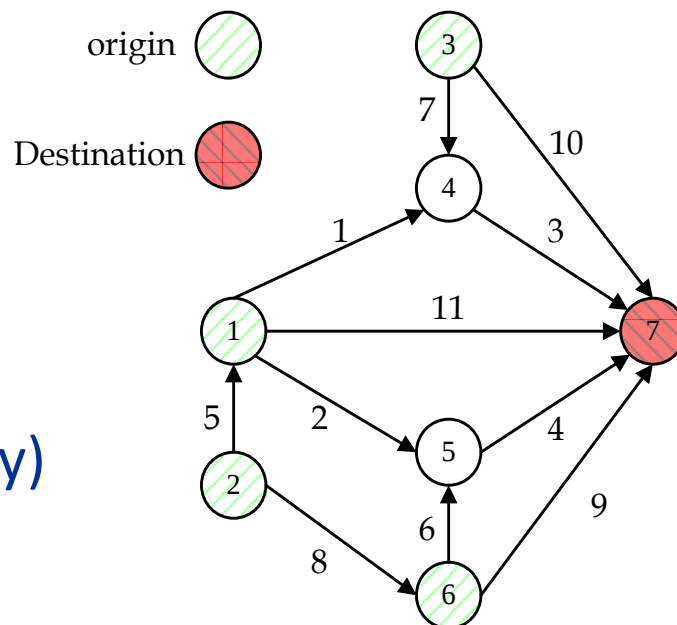
□ 新兴研究成果——四阶段模型拓展

- 调查人的行为
- 考虑出行时间预测的随机性

$$C_{wk}(\mathbf{f}) = c_{wk}(\mathbf{f}) + \zeta_{wk}, k \in R_w, w \in W$$

- Logit模型; Probit模型

- 弹性需求
- 交通流的相互影响
- 动态网络 (within day; day-to-day)
- 容量限制





关键问题1：流量预测

□ UE拓展的数学表达式

$$f_{wk} = q_w p_{wk}(\mathbf{c}_w(\mathbf{f}) + \lambda_w^*), k \in R_w, w \in W \quad q_w = D_w \left[S_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{f}) + \lambda_w^*) \right]$$

□ 固定点模型与变分不等式模型

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_w} \left[D_w(S_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \tau_w)) \times p_{wk}(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \tau_w) \delta_{ak}^w \right], a \in A$$

$$\Phi(\mathbf{u}^*)^T (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) \geq 0, \forall \mathbf{u} \in \mathcal{R}_+^{|\bar{A}|} \quad \Phi(\mathbf{u}) = \mathbf{H} - \mathbf{v}_{\bar{A}}(\mathbf{u}) = (H_a - v_a(\mathbf{u}), a \in \bar{A})^T$$

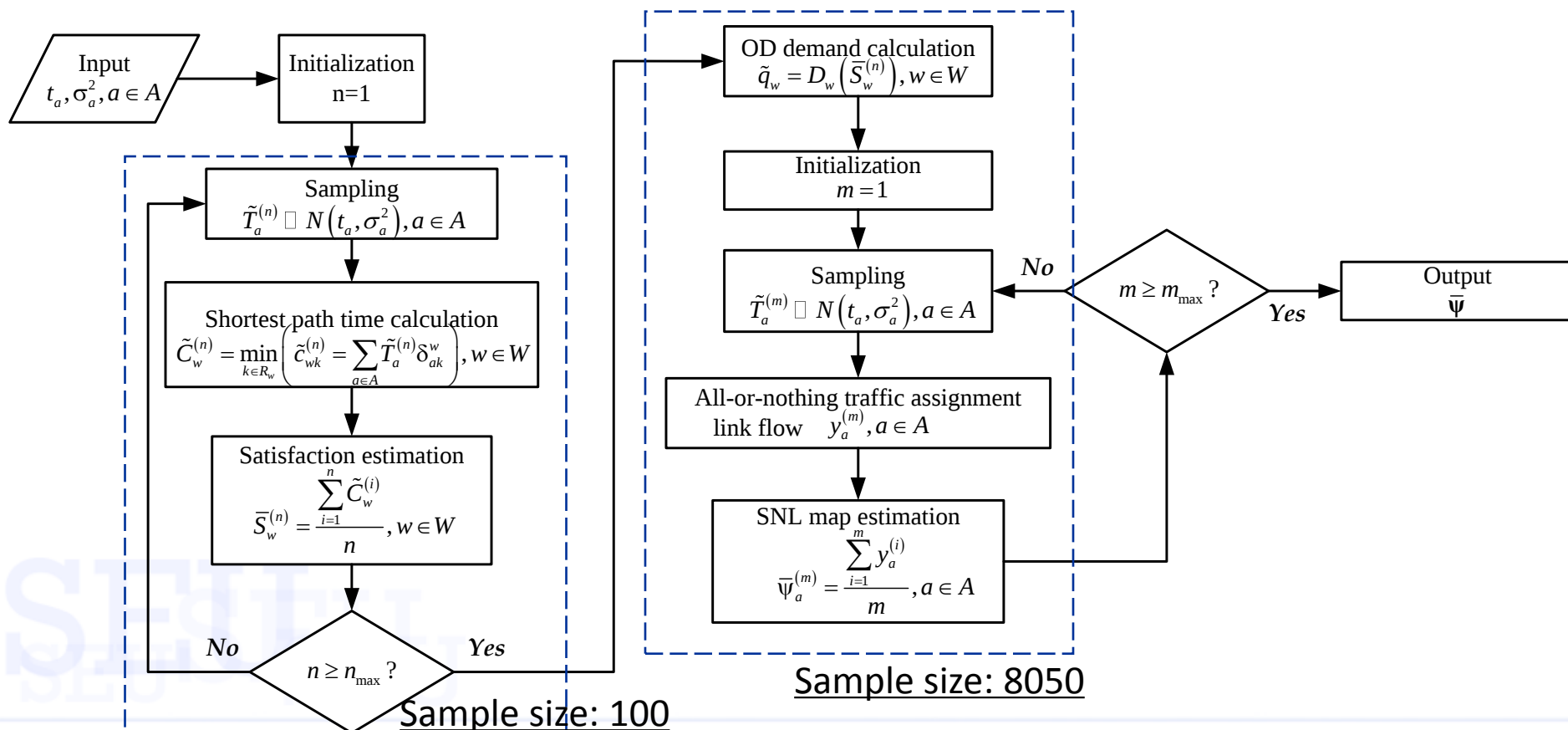
□ 模型特性的严格证明，如：

- 变分不等式的单调性
- 变分不等式的Lipschitz连续性
- 变分不等式解的存在性

$$\frac{\partial (S_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \tau_w(\phi)))}{\partial \mathbf{c}_{wk}(\mathbf{v})} = p_{wk}(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \tau_w(\phi)) \quad S_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}'), \tau_w(\phi)) - (\mathbf{c}_w(\mathbf{v}'')^T, \tau_w(\phi)) \leq \mathbf{p}_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}''), \tau_w(\phi))^T (\mathbf{c}_w(\mathbf{v}') - \mathbf{c}_w(\mathbf{v}'')), \forall \mathbf{v}', \mathbf{v}'' \in \Omega_v$$

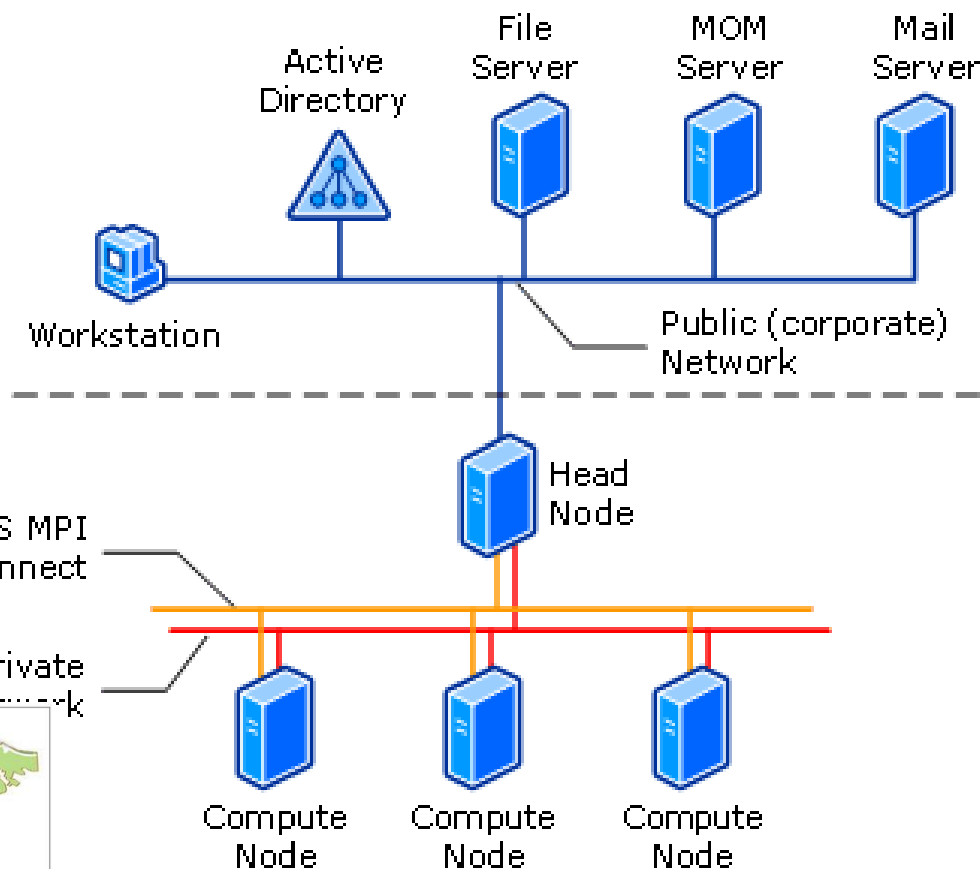
关键问题1：流量预测

- 新方法: 投影算法 + 蒙特卡洛仿真
- 仿真次数（样本量）: 8000+

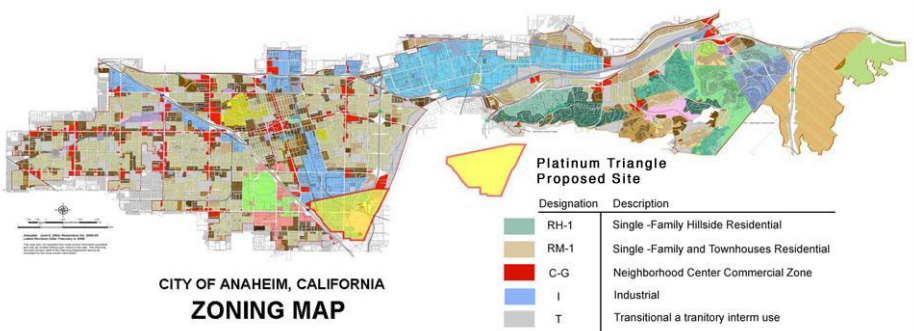


关键问题1：流量预测

- 分布式并行计算
- MPI, Hadoop, Spark
- 大数据存储与分析

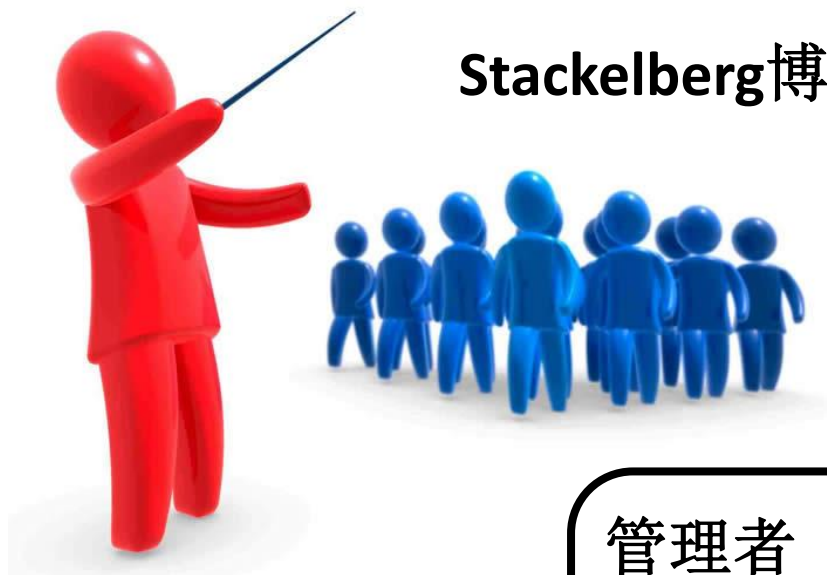


No. of processors	CPU time (Hours)	Speed-Up
1	77.403	1.000
2	70.710	1.095
4	35.380	2.188
8	17.932	4.317
16	8.952	8.647
32	4.560	16.976
64	2.321	33.353
128	1.209	64.015



关键问题2：优化模型

Stackelberg博弈：管理者和被管理者之间的博弈



交通领域
的博弈

管理者

制定交通政策
的道路交通管
理部门

被管理者

交通网络使用
者/机动车驾
驶人员，只能
遵守管理者制
定的政策



关键问题2：双层规划模型

□ 上层模型

- 道路决策者: 设定收费费率及收费区域
- 目标: 希望整个路网得到充分利用（优化系统指标，如使系统总出行时间最小，使总社会效益最大等）
- 缺陷: 知道出行者的行为规则，但是不能强制出行者遵守系统最优的出行规则

□ 下层模型

- 道路使用者: 选择自己的出行路线
- 目标: 使自己的出行费用最小
- 缺陷: 未考虑与其他出行者之间的协作



关键问题2：优化模型

□ 总社会效用函数

$$Z_1(\boldsymbol{\tau}) = \sum_{w \in W} \int_0^{q_w(\boldsymbol{\tau})} D_w^{-1}(x) dx - \sum_{w \in W} q_w(\boldsymbol{\tau}) S_w(\mathbf{c}_w, \boldsymbol{\tau}_w) + \sum_{a \in \bar{A}} v_a(\boldsymbol{\tau}) \tau_a / \mu$$

□ 收费问题的双层规划模型

➤ 上层: $\max_{\boldsymbol{\tau} \in \Omega} Z_1(\boldsymbol{\tau})$

➤ 下层: 交通分配（流量预测）问题

$$v_a(\boldsymbol{\tau}) = \sum_{w \in W} \sum_{k \in R_w} \left[D_w(S_w(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \boldsymbol{\tau}_w)) \times p_{wk}(\mathbf{c}_w(\mathbf{v}), \boldsymbol{\tau}_w) \delta_{ak}^w \right], a \in A$$

$$\Phi(\mathbf{u}^*)^T (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) \geq 0, \forall \mathbf{u} \in \mathcal{R}_+^{|\bar{A}|} \quad \Phi(\mathbf{u}) = \mathbf{H} - \mathbf{v}_{\bar{A}}(\mathbf{u}) = (H_a - v_a(\mathbf{u}), a \in \bar{A})^T$$



拥堵收费相关课题研究

□ 已完成拥堵收费课题

- 基于速度的收费方式
- 基于距离的收费方式
- 基于距离和时间的联合收费方式
- 同时考虑停车收费和拥堵收费
- 以拥堵收费促进公共交通分担率
- 单边约束拥堵收费方式
- 拥堵收费的替代收费
- 拥堵收费的公众认可度研究

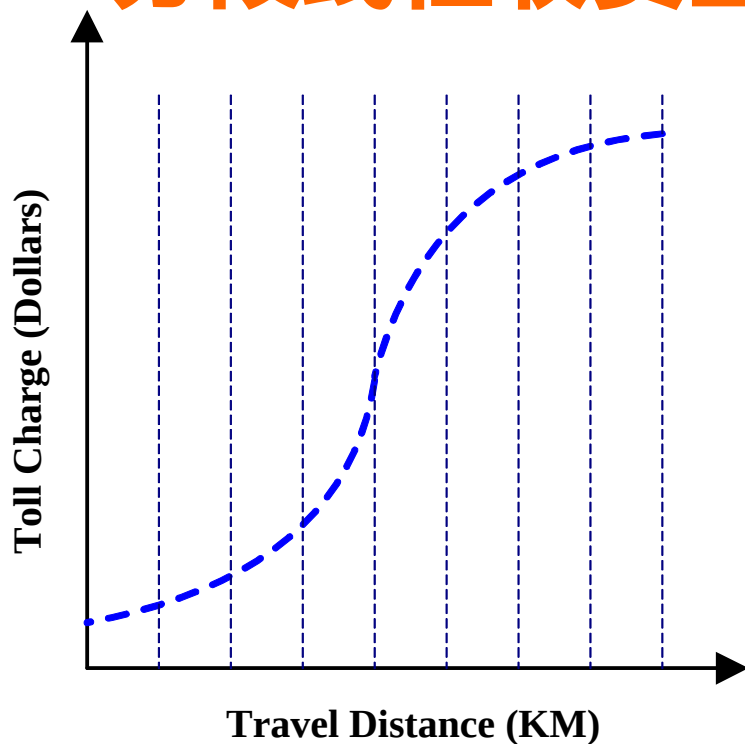
8年深入研究经验，15+篇高质量SCI论文，10+次大会报告；
旨在提高拥堵收费的实用性和效率



THANK YOU

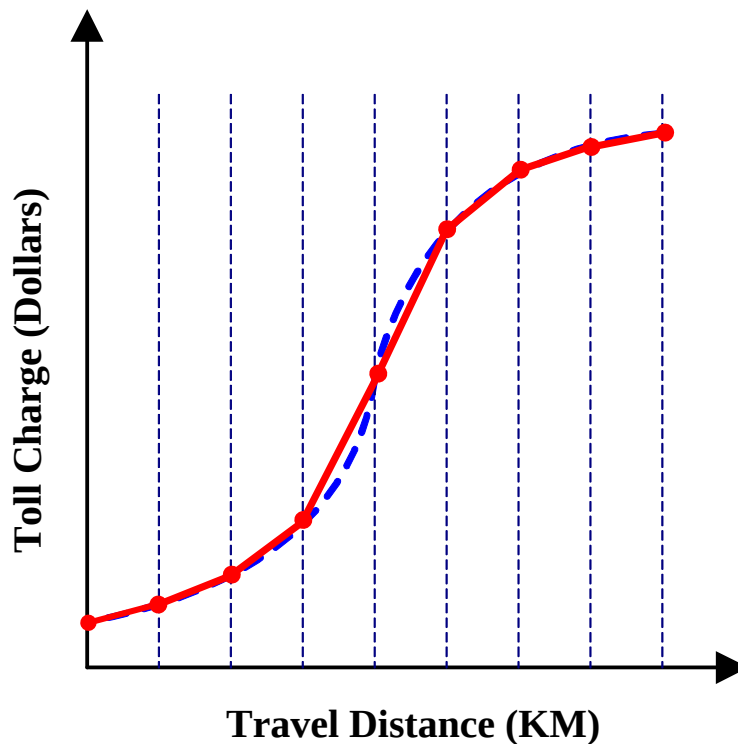
SEU
SEU
SEU

分段线性收费函数



$$\phi(d)$$

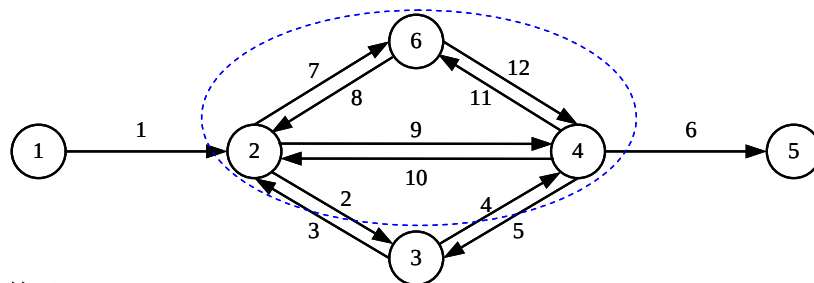
“未知函数类型”



$$\bar{\phi}_n(d, \mathbf{y}) = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{d_{i+1} - d_i} (d - d_i), d_i \leq d < d_{i+1}$$

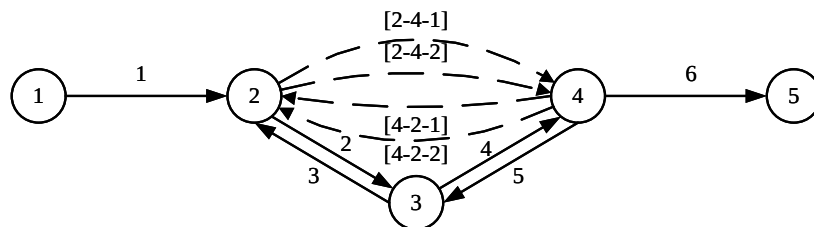
$$n \in [n_{\min}, n_{\max}], \text{ and } n \text{ is an integer}$$

网络变换



“不可加的路段费用”

topology of the toy example



network representation with dummy links

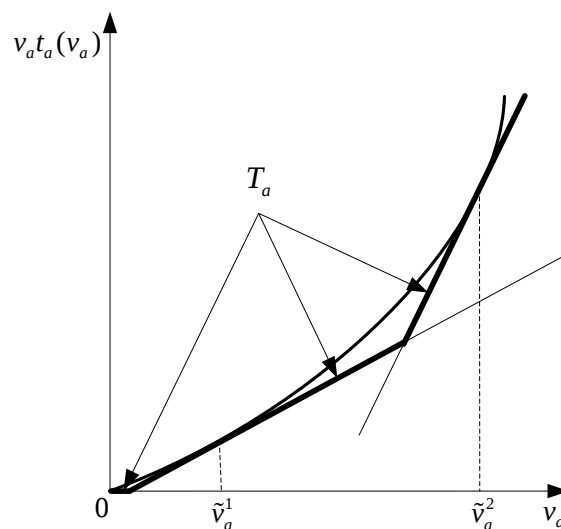
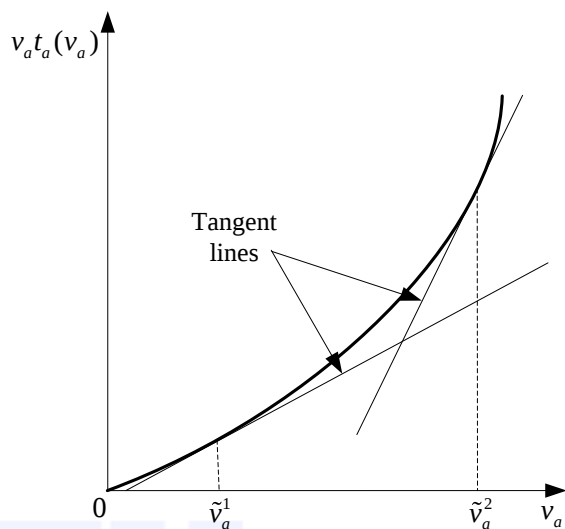
Entry-exit pairs	Simple paths	Represented by dummy link
2 → 4	2 → 4	[2 - 4 - 1]
	2 → 6 → 4	[2 - 4 - 2]
4 → 2	4 → 2	[4 - 2 - 1]
	4 → 6 → 2	[4 - 2 - 2]

$$\bar{C}_{wk}(\mathbf{v}, \boldsymbol{\tau}_w(\phi)) = c_{wk}(\mathbf{v}) + \tau_{wk}(\phi) / \mu + \zeta_{wk}$$

收敛的求解算法

□ 增量约束法

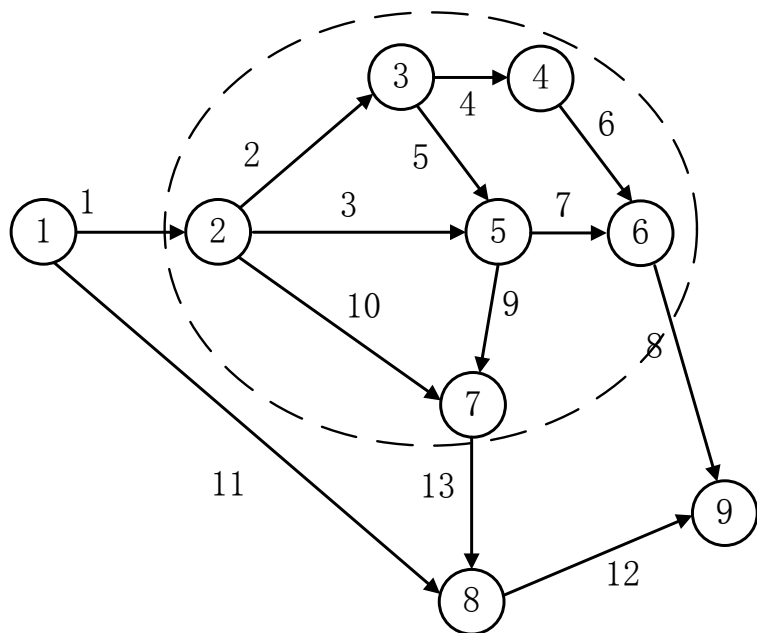
- 将下层问题转化成一个半无限规划问题
- 交换法求解半无限规划问题



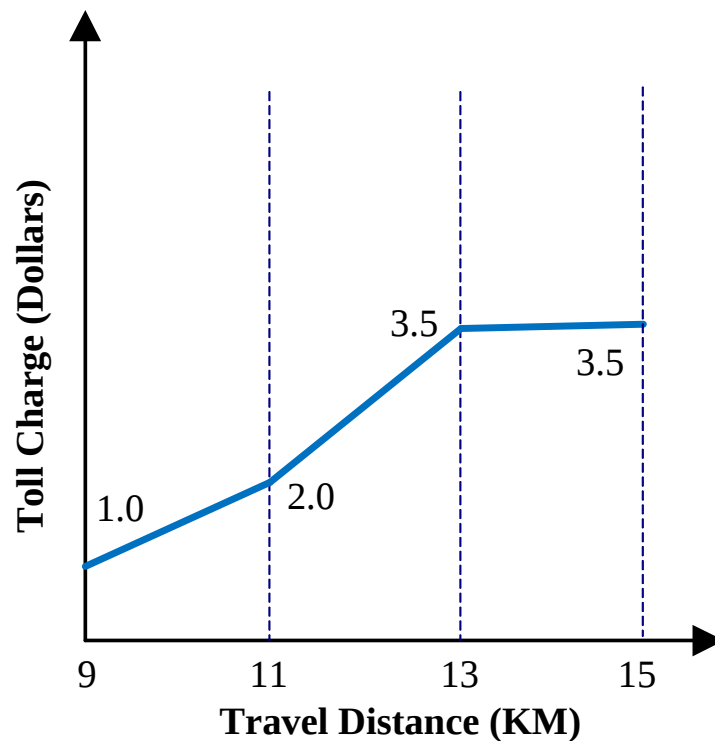
切线、切平面逼近

Liu, Z.*, Wang, S., Meng, Q., 2014. Optimal Joint Distance and Time Toll for Cordon-based Congestion Pricing, *Transportation Research Part B*, 69, 81-97.

算例分析



网络结构



最优距离收费



拥堵收费4.0：距离和拥堵联合收费

□ 基于行驶距离的收费方式

□ 基于拥堵水平的收费方式

➤ 延误时间
$$\Delta t_k^w = \sum_{a \in \bar{A}} ((t_a(v_a) - t_0) \delta_{ak}^w)$$

➤ 收费
$$\hat{t}_k^w = \varphi(\Delta t_k^w) = \beta \Delta t_k^w = \beta \sum_{a \in \bar{A}} (t_a(v_a) - t_0) \delta_{ak}^w$$

□ 距离和拥堵联合收费

$$\tau_k^w(\mathbf{y}, \beta) = \lambda_1 \tilde{\tau}_k^w + \lambda_2 \hat{t}_k^w = \lambda_1 \phi(d_k^w) + \lambda_2 \varphi(\Delta t_k^w)$$