

鲁棒交通网络设计方法

Robust Transportation Network Design under Demand Uncertainty

卞长志¹, 关敬辉², 陆化普³

(1.中国城市规划设计研究院,北京 100037;2.东莞市地理信息与规划编制研究中心,广东 东莞 523129;3.清华大学交通研究所,北京 100084)

BIAN Chang-zhi¹, GUAN Jing-hui², LU Hua-pu³

(1. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100037, China; 2. Dongguan Research Center of GIS & Urban Planning, Dongguan Guangdong 523129, China; 3. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 为了更好地指导交通规划实践、提高规划方案应对风险的能力,在分析交通需求预测不确定性的基础上引入鲁棒设计概念,阐述了交通需求预测与鲁棒规划方案的关系。采用随机需求假定,以随机规划理论和均值-方差模型为基础,建立OD需求不确定的鲁棒交通网络设计模型;以蒙特卡洛模拟和遗传算法为工具,设计求解随机双层组合优化问题的实用算法。最后,以Nguyen-Dupuis网络为例进行实际计算。结果表明,交通网络设计方案由需求不确定程度和决策者风险偏好联合决定,且基于不确定需求的网络规划方案具有更好的鲁棒性能,可有效降低规划风险。

Abstract: To better guide transport planning practice and improve the planning reliability against risks, this paper analyzes the uncertainty existed in traffic demand forecast, and then describes the relationship between demand forecasting and reliable transportation planning based on the robust design concept. The OD trip matrices are taken as random variables with a known probability distribution, and a robust network design model under stochastic demand is developed using stochastic programming theory and means-variance model. Based on Monte Carlo simulation and Genetic Algorithm, an algorithm is proposed to solve the stochastic bi-level combinatorial optimization problem. Finally, Numerical results from Nguyen Dupuis network show that the planning network is determined by demand uncertainty and decision-makers' preferences. Transportation network planning network is more reliable and less risky if demand uncertainty is considered in the modeling.

关键词: 交通规划;需求不确定性;鲁棒交通网络设计;双层规划;遗传算法

Keywords: transportation planning; demand uncertainty; robust transportation network design; bi-level programming; genetic algorithm

中图分类号: U491.1²

文献标识码: A

收稿日期: 2010-12-01

作者简介:卞长志(1983—),男,江苏连云港人,博士,工程师,主要研究方向:城市交通规划与设计。E-mail:bcz2001@hotmail.com

0 引言

交通网络设计是城市综合交通规划的核心工作,是体现规划主管部门决策意图的重要手段。交通需求预测是网络方案设计的基础,由于需求预测不确定性的广泛存在,将交通需求作为确定性输入的传统规划设计方法在实际应用中存在巨大风险。所以,有必要分析交通需求预测的不确定性,寻求新的规划设计方法,以提高交通规划方案对不确定性的适应能力。

鲁棒性是指系统在一定的参数摄动下维持某些性能的特性。鲁棒设计是在一定的参数摄动下对系统进行设计,从而得到对此类参数摄动不灵敏的系统。鲁棒设计的目的是优化系统性能的平均值、最小化由不确定因素引起的系统性能可变性。基于此,本文探索了交通需求预测不确定性条件下的鲁棒规划方法,通过将确定性需求的假定放松至随机变量,引入随机规划理论,使规划方案的制定突破了原有交通需求和规划方案间的一一对应关系,寻求所有需求情景实现条件下的最优解(该最优解是概率意义的最优),从而提高规划决策的鲁棒

性，更好地指导交通规划实践。

1 交通需求预测的不确定性

目前，常用的交通需求预测方法是以现状调查资料 and 未来发展情景为基础，使用数学模型确定目标年的交通需求状况。由于交通需求预测涉及因素众多，模型内在机理复杂，实际预测时不可避免地引入不确定性。

图1给出了交通需求预测不确定性的来源和传播过程，并将其概括为模型选择、现状数据和未来情景三个模块，据此推断预测结果不确定性的原因可能有：1)模型选择时，由于并不完全了解交通系统运行的实际机理，只能利用简单的模型近似比较复杂的系统，此过程必然存在不确定性。2)现状数据是需求预测的基础，一般通过抽样调查获得，由于在数据收集和处理过程中存在误差，同时使用抽样数据表示系统的整体性能是一种近似行为，因此该过程不可避免地存在不确定性。3)目标年的交通需求预测依赖于特定外生变量的预测值，如必须使用未来城市和区域发展的人口、土地利用和社会经济发展指标等数据，而城市的实际发展路径会在某种程度上有所偏离，由此导致需求预测的不确定性。这些不确定性在预测过程中不断传播，导致最终预测结果的不确定性。

2 需求预测与鲁棒规划方案的关系

图2是鲁棒设计概念示意图，其中 ΔZ_1 是环境变化时使用鲁棒设计变量的目标函数的变化值； ΔZ_2 是环境变化时使用最优设计变量的目标函数的变化值。鲁棒设计不在于寻找对象性能指标最优解 $X_{最优设计}$ ，而是寻找比较接近目标值且其系统性能对环境变量不敏感的设计点^[1]。

传统交通规划方法中，方案设计依赖于特定的交通需求预测结果，而此结果只是不确定性需求的一种情景。当实际情况发生较大变化时，根据特定需求预测进行的交通网络建设会与实际状况有较大差距，从而给交通投资带来巨大风险。

图3对比了交通需求预测与网络规划方案的关系在传统方法和鲁棒网络设计方法中的不同。

3 鲁棒交通网络设计模型及算法

交通网络设计问题可表述为给定资金预算和网络约束条件，选择新建或改善路段，使交通网络性能最优化。该问题是一个典型的领导者—追随者对策问题，通常采用双层规划模型进行描述^[2]。当交通需求不确定时，网络设计问题的主要建模方法有随机规划理论和鲁棒优化理论^[3-6]。为了能够对需求不确定性进行前摄处理，必须在建模阶段引入变量的不确定性。本文基于随机规划理论^[7]，并以均值-方差模型为基础，建立OD需求不确定的鲁棒交通网络设计模型，针对双层规划和组合优化问题的求解特性，提出基于模拟

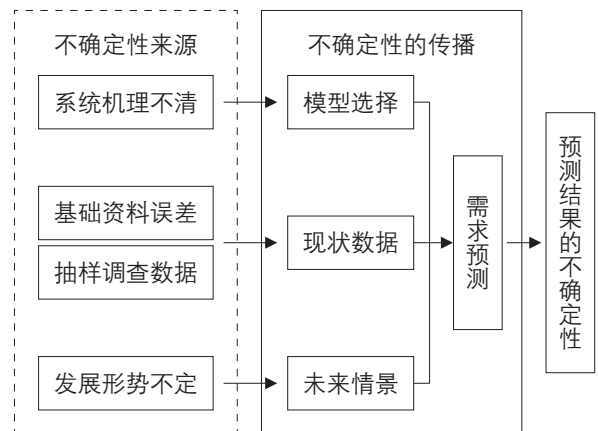


图1 交通需求预测不确定性的来源与传播过程
Fig.1 Source and propagation of travel demand uncertainty

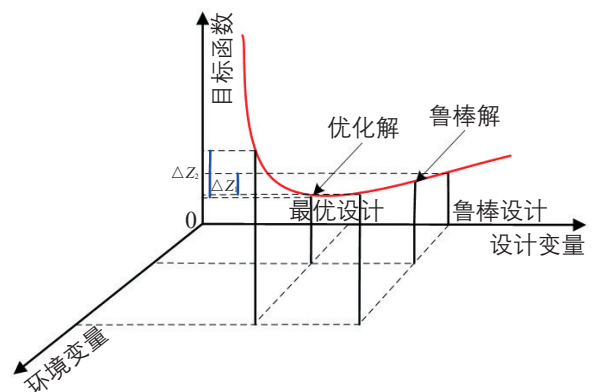


图2 鲁棒设计概念示意图
Fig.2 Schematic diagram of robust design

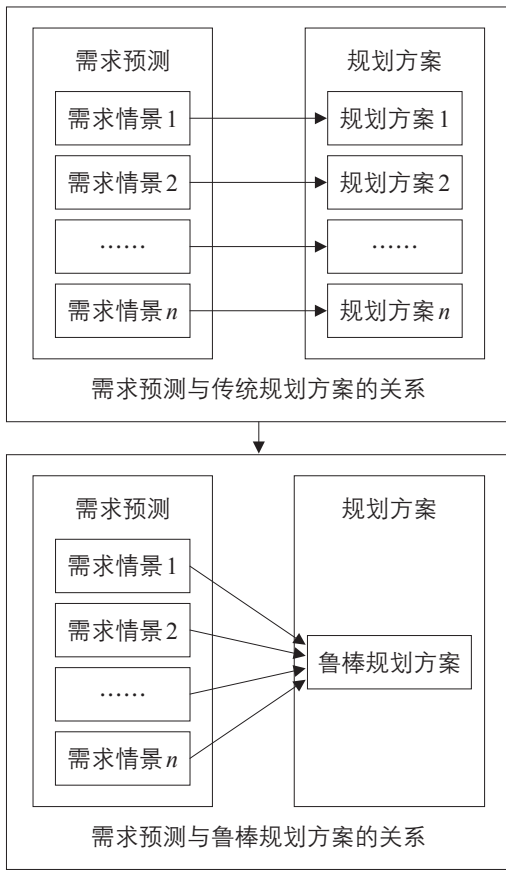


图3 交通需求预测与网络规划方案的关系
Fig.3 Relationships between planning proposals and forecasted travel demands

的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)。

3.1 模型

基于随机需求的鲁棒交通网络设计模型由上层模型(1)和下层模型(2)共同组成, 并通过网络改进决策变量 y (为改进决策变量 y_a 的向量表示)和路段流量 x (为路段流量 x_a 的向量表示)相互联系。上层模型(1)是预算约束下路网期望最小总出行时间与总出行时间标准差的加权和; 下层模型(2)是路网改进决策下实现每种需求时对应的用户均衡。假定OD需求是服从给定概率分布的随机变量, 在实际操作中, 可利用随机抽样形成需求情景集合 Ω , 其中任一需求情景 ω 对应的OD需求量为 q^ω , 发生概率为 p^ω 。同时设定: x_a^ω 为情景 ω 下路段 a 的流量; t_a^ω 为情景 ω 下路段 a 的走行时间; $f_k^{rs,\omega}$ 为情景 ω 下OD对 rs 间路径 k 的流量; A 为网络路段集合; \bar{A} 为新建和扩建备选路段集合; y_a 为规划路段 a 的0-1变量, 0表示维持现状, 1表示新建或扩建; $G_a(y_a)$ 为路段 a 的建设成本; B 是预算总量; $\rho \in [0, 1]$, 反应规划决策者对于不确定性的偏好程度。则

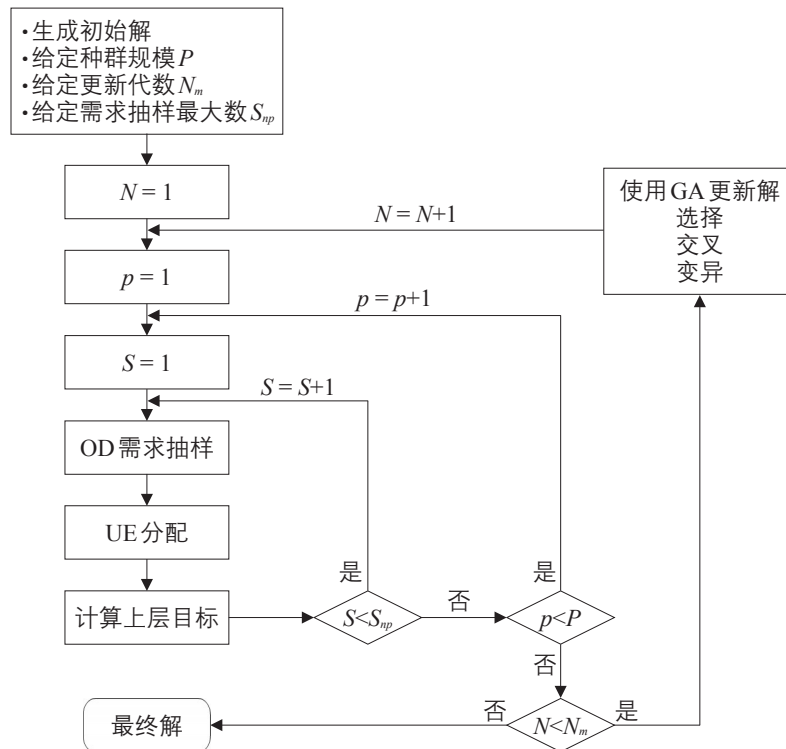


图4 基于模拟的遗传算法求解流程
Fig.4 Algorithm of GA based on simulation

$$\begin{aligned} \min Z(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \rho \sum_{\omega} p^{\omega} [\sum_a x_a^{\omega} t_a^{\omega}] + (1-\rho) \{ \sum_{\omega} p^{\omega} [\sum_a x_a^{\omega} t_a^{\omega} - \sum_{\omega} p^{\omega} (\sum_a x_a^{\omega} t_a^{\omega})]^2 \}^{\frac{1}{2}}, \\ &s.t. \sum_{a \in \bar{A}} G_a(\mathbf{y}_a) \leq B, \\ &\mathbf{y}_a \in \{0, 1\}, \forall a \in \bar{A}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{x}=\mathbf{x}(\mathbf{y})$ 是 \mathbf{y} 的隐函数，由下层模型(2)决定：

$$\begin{aligned} \min T(\mathbf{x}) &= \sum_{a \in A \cup \bar{A}} \int_0^{x_a^{\omega}} t_a^{\omega}(w, \mathbf{y}_a) dw, \\ &s.t. \sum_{k \in P_a} f_k^{rs, \omega} = q_{rs}^{\omega}, \forall rs, \omega \in \Omega, \\ &f_k^{rs, \omega} \geq 0, \forall rs, \forall k, \omega \in \Omega, \\ &x_a^{\omega} = \sum_{rs \in RS} \sum_{k \in P_a} f_k^{rs, \omega} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a, \omega \in \Omega. \end{aligned} \quad (2)$$

路段 a 的出行时间 t_a^{ω} 可用BPR函数表示为

$$t_a^{\omega}(x_a^{\omega}, \mathbf{y}_a) = t_{a0} [1 + 0.15 (\frac{x_a^{\omega}}{C_a})^4], \quad (3)$$

式中： C_a 为路段 a 的通行能力。

3.2 算法

双层规划问题是NP完全问题，且上层优化是组合优化问题，难以应用一般算法。结合OD需求的随机特性，本文采用基于模拟的遗传算法求解上述双层规划模型，并采用蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟实现随机OD需求变量。算法流程见图4。具体步骤为：

- 1) 定义主要参数，包括：种群规模、交叉概率、变异概率、种群进化代数、OD需求抽样规模，并生成初始种群。在产生初始种群解时，执行预算约束判断，直到获得足够数量的初始可行解。
- 2) 对每一代种群中的每个个体，使用蒙特卡洛模拟进行OD需求随机抽样，并对每个随机需求进行UE交通分配，计算上层目标函数。
- 3) 执行遗传算法选择、交叉和变异操作更新种群；每次种群更新过程中执行预算约束判断，

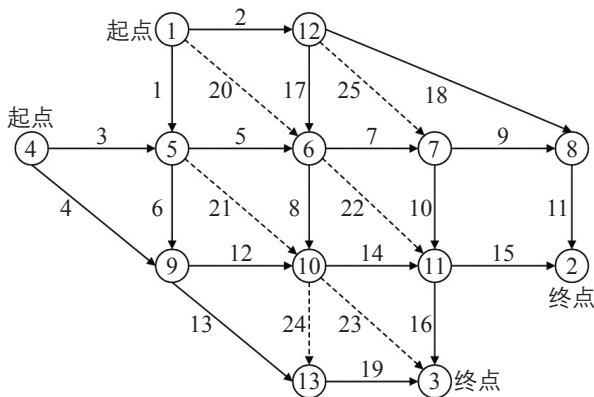
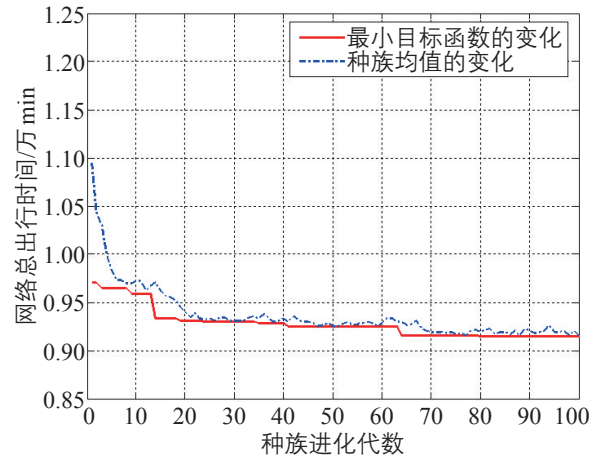


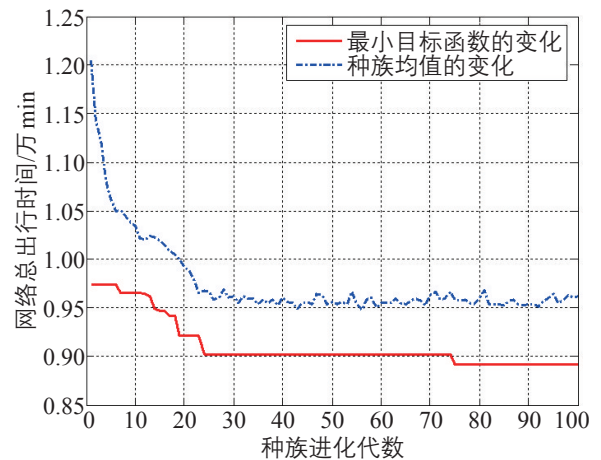
图5 Nguyen-Dupuis 案例网络
Fig.5 Nguyen-Dupuis test network

把满足约束的解作为中间种群。

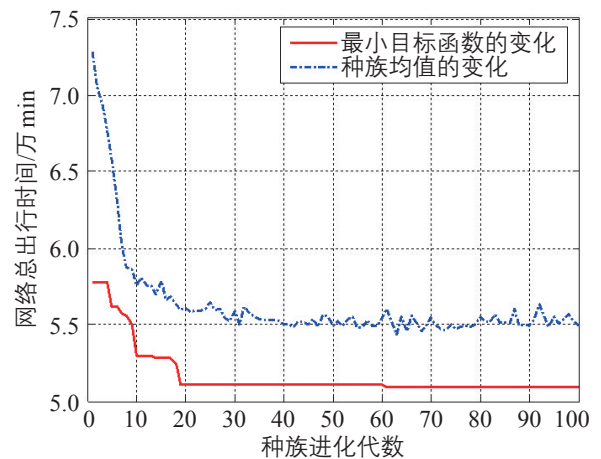
4) 算法终止，生成最优解。



a 情景1



b 情景2



c 情景3

图6 100次迭代最优解的变化
Fig.6 Optimal solution in 100 iterations

4 案例研究

以 Nguyen-Dupuis 网络为例进行研究, 见图 5。该网络有 13 个节点、19 条路段、4 个 OD 对, 其中实线表示现状路段(所有现状路段都可以扩建), 虚线表示待建路段。路段 4, 13 和 18 的现状通行能力为 150, 扩建为 250; 其他路段现状通行能力为 250, 扩建为 500; 新建路段 24 的通行能力为 500, 其他新建路段的通行能力为 250。路段 4 和 13 的自由流走行时间为 24 min, 路段 18 为 36 min, 其他路段为 12 min; 扩建路段 4, 13, 18, 24 的自由流走行时间为 12 min, 新建路段的自由流走行时间为 24 min, 其他维持不变。各路段建设成本为 100, 预算总额为 1 000。假定 OD 需求矩阵的每个元素服从正态分布, 各 OD 需求的均值均为 350, OD 需求标准差为均值的 k 倍。

染色体采用二进制编码, 每条路段采用 1 位 0-1 代码表示, 0 表示维持现状, 1 表示新建或扩建。染色体长度为 25, 前 6 位代表新建道路, 后

19 位对应扩建道路, 按照道路编号顺序排列。解空间总规模为 2^{25} , 利用遗传算法可寻找到最优解。算法基本参数设定为: 种群规模 40, 种群更新代数 100, 种群代沟 0.9, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.01, OD 需求抽样数量 50。为分析需求不确定程度和决策者偏好对优化结果的影响, 考察三种假定情景。

情景 1: $k = 0$, 即不考虑需求不确定性。如图 6a 所示, 种群进化到 100 代时, 最优解为: 新建路段 20, 21, 22 和 23; 扩建路段 2, 3, 4, 13, 14 和 15; 网络总出行时间为 91 540 min。

情景 2: $k = 0.2, \rho = 1$, 即需求不确定条件下仅考虑网络最小出行时间期望。如图 6b 所示, 种群进化到 100 代时, 最优解为: 新建路段 20, 21, 23 和 25; 扩建路段 3, 4, 9, 11, 14 和 16; 网络总出行时间为 89 210 min。

情景 3: $k = 0.2, \rho = 0.5$, 即需求不确定条件下同时考虑网络最小出行时间期望和方差。如图 6c 所示, 种群进化到 100 代时最优解为: 新建路

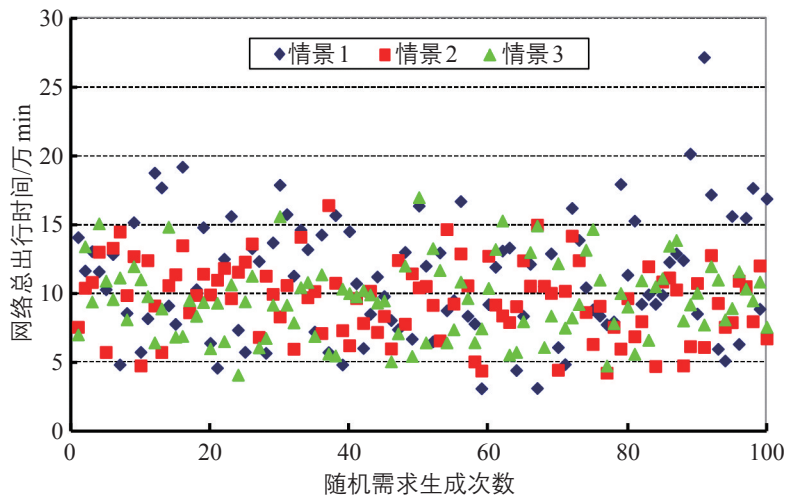


图 7 100 次随机需求下网络总出行时间

Fig.7 Total network travel time in 100 random transportation demand scenes

表 1 100 次随机需求下网络总出行时间指标

Tab.1 Indicators of total network travel time in 100 random transportation demand scenes min

情景	均值	标准差	最大值	最小值
1	109 087	43 181	271 944	31 098
2	90 063	27 097	164 269	42 002
3	95 318	27 545	170 085	40 999

段 22 和 23; 扩建路段 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13 和 18; 网络总出行时间为 50 890 min。

基于上述计算结果, 可得到如下基本结论: 1)OD 需求不确定条件下的交通网络设计方案明显不同于确定性需求下的设计方案; 2)决策者风险偏好对网络设计方案具有显著影响, 方差作为量化随机变量相对于平均性能散布程度的重要指标, 与网络总出行时间期望指标一样, 是不确定环境中影响决策者行为的重要因素; 3)设计方案取决于均值-方差之间的权衡。在网络设计模型的上层规划目标中同时考虑系统均值和方差, 可更好地描述需求不确定条件下的网络设计过程。

为了进一步考察情景 1, 2, 3 对应的交通网络设计方案的鲁棒性, 随机生成 100 种交通需求, 并以随机生成的需求计算 3 个网络的总出行时间与相关统计指标。计算结果见图 7 和表 1, 情景 1 总出行时间分布的离散程度显著大于情景 2 和 3, 且其具有最大和最小总出行时间, 同时其总出行时间的标准差显著大于情景 2 和 3。此计算结果表明, 在规划实践中, 基于随机规划理论设计的交通网络虽然不能保证获得最优的网络性能(总出行时间最小), 但其相对于确定性网络具有明显的鲁棒性, 因而能更好地规避决策风险。

5 结语

鲁棒交通网络设计是一个新的研究方向, 本文提出了初步的分析框架和基本的模型、算法。为了更好地指导规划实践, 提高规划方案的风险应对能力, 需要深入研究的问题仍然很多, 包括网络规划中不确定性的来源和传播机制、鲁棒性

网络的基本特征、网络鲁棒性的产生机理、更切合实际的模型、更强大的算法等。

参考文献:

References:

- [1] Taguchi G. On Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering up Stream[M]. New York: ASME Press, 1993.
- [2] YANG H, Bell M G H. Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and some New Developments[J]. Transport Review, 1998, 18(3): 257-278.
- [3] CHEN A, Subprasom K, Chootinan P. Assessing Financial Feasibility of a Build-operate-transfer Project under Uncertain Demand[J]. Transportation Research Record, 2001(1771): 124-131.
- [4] Ukkusui S V, Mathew T V, Waller S T. Robust Transportation Network Design under Demand Uncertainty[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007(22): 6-18.
- [5] SUN Yao, Turnquist M A. Investment in Transportation Network Capacity under Uncertainty: A Simulated Annealing Approach[J]. Transportation Research Record, 2007(2039): 67-74.
- [6] YIN Ya-feng, Siriphong Lawphongpanich. Estimating Highway Investment Requirements with Uncertain Demands[J]. Transportation Research Record, 2007 (1993): 16-22.
- [7] CHEN A, Subprasom K, Ji Zhao-wang. Mean-variance Model for the Build-operate-transfer Scheme under Demand Uncertainty[J]. Transportation Research Record, 2003(1857): 93-10.

(上接第 3 页)

References:

- [1] 新闻中心-中国网. 2010 年中国城镇人口近 6.66 亿 城镇化率 49.68%[EB/OL]. 2011[2011-11-16]. http://www.china.com.cn/news/txt/2011-08/03/content_23135253.htm.

- [2] 王尔德, 李宁远. 相比 2008 年, 2015 年交通能耗强度有望下降 12%[EB/OL]. 2011[2011-11-16]. http://www.china.com.cn/news/txt/2011-08/03/content_23135253.htm.
- [3] GBJ 137-90 城市用地分类与规划建设用地标准[S].