Journal of Computer Applications
计算机应用,2014,34(7):2090－2092,2098
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2014-07-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2014)07-2090-03
doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.07.2090

不确定旅行商问题的鲁棒模型与算法

麻存瑞,马昌喜*
(兰州交通大学 交通运输学院,兰州 730070)
(*通信作者电子邮箱 mcx9815@163.com)

摘　要:考虑到不确定参数在旅行商问题(TSP)中广泛存在,在 Bertsimas 鲁棒离散优化理论的框架下,建立了不确定旅行商问题的鲁棒优化模型,并按转换规则将鲁棒模型转换为鲁棒对等模型。给出了一种求解旅行商问题的基于 Prufer 数编码的单亲遗传算法,与求解该类问题的传统遗传算法相比,该算法缩减了染色体长度,避免了传统交叉和变异操作破坏染色体可行解的缺陷。通过算例验证,表明该算法有较高的求解效率,所建立的鲁棒模型在不确定环境下能得到较好的鲁棒解。

关键词:不确定旅行商问题;鲁棒优化;遗传算法;Prufer 编码;鲁棒解
中图分类号:TP301.6　　**文献标志码**:A

Robust model and algorithms for uncertain traveling salesman problem

MA Cunrui, MA Changxi*
(*School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China*)

Abstract: Considering the fact that uncertain parameters were widespread in the Traveling Salesman Problem (TSP), this paper built a robust optimization model for traveling salesman problem under the frame of Bertsimas robust discrete optimization theory, and then transformed it into robust counterpart model according to transformational rule. In addition, a single parent genetic algorithm based on Prufer coding was designed to solve the traveling salesman problem. Compared with the traditional genetic algorithm, the method has shortened the length of the chromosome and prevented feasible solutions being destructed by the traditional crossover and mutation operators. According to the validation by numerical examples, the results show that the algorithm has a higher solving efficiency, and the robust model developed in the uncertain environment can get some better robust solutions.

Key words: uncertain traveling salesman problem; robust optimization; genetic algorithm; Prufer coding; robust solution

0　引言

旅行商问题(Traveling Salesman Problem,TSP)也称货郎担问题,是一个著名的 NP 难问题,具有广泛的应用背景和重要的理论价值[1]。它的表述形式很多,一般可描述为:一个货物推销员从其中一个城市出发,经过要推销的所有城市,最后回到出发城市,要求寻找一条经过所有城市且每个城市只经过一次的最短闭合路径。实际问题中两城市间的信息不仅指距离,也可能指时间、风险、天气等,而要准确地得到这类数据往往是不可能的,目前所得到的很多这类数据具有很大的不确定性。因此,研究不确定旅行商问题是必要的。

鲁棒优化是一种含有不确定输入的优化问题的建模方法,是针对灵敏度分析和传统不确定优化方法的不足而提出的更为有效的不确定优化方法。它采用事先分析的策略,突破了传统优化方法对不确定数据过多依赖先验知识以及服从概率分布的假定[2]。Soyster[3]首次提出了鲁棒优化思想,并给出了一种线性优化模型用于解决不确定线性规划实际问题。之后,Mulvey、Ben-Tal、Bertsimas 等对鲁棒优化理论做出了重要的突破和发展[2,4-8],特别是 Bertsimas 的优化方法有突出的优势。Bertsimas 的鲁棒优化理论对线性问题和离散型问题都能很好地适应,并且没有增加鲁棒对等问题的求解复杂度,同时还可以控制优化解的保守程度。

对于大规模旅行商问题,传统方法不能够较好地求解。由于遗传算法不受问题性质(线性、连续性、可微性、多峰性等)的限制,通过对一个种群并行地运算操作,能够生成优化问题的多个可行解,是求解大规模组合优化问题的一个有效手段[9]。基于以上考虑,本文将建立不确定旅行商问题的鲁棒优化模型,设计一种求解旅行商问题的基于 Prufer 数编码的单亲遗传算法,并进行算例验证。

1　不确定旅行商问题的数学模型

标准旅行商问题用图论的语言可描述为:给定 n 个节点无向完全图 $G=\langle V,E,r\rangle$,在 G 中求遍历所有节点的简单回路 C,使 C 上所有边的权值和最小,其中 $V=\{1,2,\cdots,n\}$ 是图的节点集,代表要访问的城市,E 是图的边集,r 是边的权值。则基于图论的旅行商问题数学模型定义如下:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} r_{ij}x_{ij} \tag{1}$$

收稿日期:2014-01-21;**修回日期**:2014-03-12。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61364026,61164003);甘肃省科技计划项目(1308RJYA030)。
作者简介:麻存瑞(1986－),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向:物流系统优化与仿真;　马昌喜(1979－),男,湖北汉川人,副教授,博士,主要研究方向:交通运输系统优化。

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, i = 1,2,\cdots,n \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, j = 1,2,\cdots,n \tag{3}$$

$$\sum_{i,j\in S} x_{ij} \leqslant Q - 1, 2 \leqslant |Q| \leqslant n-2, Q \subset \{1,2,\cdots,n\} \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}; i,j = 1,2,\cdots,n \tag{5}$$

上述模型中，目标式(1)中的 r_{ij} 表示城市 i 到城市 j 的权值；约束式(2) 和约束式(3) 分别要求旅行商从城市 i 出来一次和从城市 j 走入一次，因此式(2) 和式(3) 合起来表示旅行商在每个城市恰好经过一次；约束式(4) 要求旅行商在任何一个城市真子集中不形成回路，其中 $|Q|$ 表示集合 Q 中元素个数。约束式(5) 表示决策变量的取值，若旅行商行走的路线包含从城市 i 到城市 j 的路径，则决策变量 $x_{ij} = 1$；否则 $x_{ij} = 0$。

对于不确定旅行商问题，采用区间值的形式表示各城市间的权值。这里记不确定数 $\tilde{r}_{ij} = [r_{ij} - \hat{r}_{ij}, r_{ij} + \hat{r}_{ij}]$，其中：$r_{ij}$ 为可变元素的标称值，$\hat{r}_{ij}(\hat{r}_{ij} > 0)$ 为可变元素相对于其标称值的偏差。引入参数 ψ 和参数 Γ，参数 ψ 表示不确定数据中不确定元素的集合，$|\psi|$ 表示不确定元素的个数，通过参数 Γ 来调整鲁棒优化模型的鲁棒性，控制优化解的保守程度，在这里令 Γ 取整数。

对于不确定旅行商问题来说，它的不确定性主要是指任意两城市间的数据信息不确定，在图 G 中表现为图 G 边上的权值不确定。因此对于一个有 n 个节点的旅行商问题最多有 n^2 个不确定元素，也就是要求 $\Psi = \{1,2,\cdots,n^2\}$，$0 \leqslant \Gamma \leqslant n^2$。令 $m = (i-1)n + j(1 \leqslant i \leqslant n, 1 \leqslant j \leqslant n)$，则决策变量 $x_{ij} = x_m$，不确定数据 $\tilde{r}_{ij} = [r_{ij} - \hat{r}_{ij}, r_{ij} + \hat{r}_{ij}]$ 可写为 $\tilde{r}_m = [r_m - \hat{r}_m, r_m + \hat{r}_m]$。为了问题分析的简便，模型中将不确定数据 $\tilde{r}_m$ 用 $\tilde{r}_m = [r_m, r_m + \hat{r}_m]$ 形式表示，其中 $\hat{r}_m \geqslant 0$。不失一般性，假设 $\hat{r}_m$ 随着 m 的增加而递减，且当 $m = (i-1)n + i(1 \leqslant i \leqslant n)$ 时，$\hat{r}_m = 0$。若将满足基于图论的旅行商问题数学模型的所有约束条件式(2)、(3)、(4)、(5)的所有可行解的集合记为 X，则可利用文献[2]中的鲁棒离散优化理论准则建立不确定旅行商问题的 Bertsimas 鲁棒优化模型：

$$\min T = \sum_{m=1}^{n^2} r_m x_m + \max_{\{S \mid S\subseteq\Psi, |S| \leqslant \Gamma\}} \sum_{m\in S} \hat{r}_m x_m \tag{6}$$

$$\text{s.t. } x = (x_m)_{1\leqslant m\leqslant n^2} \in X \tag{7}$$

上面不确定旅行商问题的鲁棒优化模型中，参数 $\Gamma(0 \leqslant \Gamma \leqslant n^2)$ 反映决策者的风险偏好等信息。当 $\Gamma = 0$ 时，$\max\limits_{\{S \mid S\subseteq\Psi, |S| \leqslant \Gamma\}} \sum\limits_{m\in S} \hat{r}_m x_m = 0$，以图 G 来说，则只考虑遍历图 G 所有节点所得到的简单回路 C 的权值和最小，此时模型对不确定信息最敏感，也就是当图 G 中某一边权变化时，模型所得到的最优解可能变成次优解，甚至不可接受。随着 Γ 增加，旅行时间不断变大，模型逐渐对不确定信息的敏感程度降低，得到的解有一定的鲁棒性。$\Gamma = n^2$ 时，模型对不确定信息最不敏感，所求得的解也最保守。

由于鲁棒模型的目标函数式(6)中含有 max 极值问题，不利于直观求解，因此还需要对含有 max 的表达式进行等价转化。Bertsimas 和 Sim 给出了转化定理并作了证明，于是可根据文献[2]中的鲁棒离散转换规则将鲁棒模型转变为至多求解 $n^2 + 1$ 个名义问题：

$$H(t) = \Gamma \hat{r}_t + \min\left(\sum_{m=1}^{n^2} r_m x_m + \sum_{m=1}^{t} (\hat{r}_m - \hat{r}_t) x_m\right) \tag{8}$$

$$\text{s.t. } x \in X \tag{9}$$

得到最优目标函数值 $T^* = \min\limits_{t=1,\cdots,n^2+1} H(t)$。

2　求解不确定 TSP 的一种改进的遗传算法

旅行商问题是著名的 NP 难问题，智能算法是求解该类组合优化问题的一种很好的方法。本文利用改进的遗传算法来求解旅行商问题。

2.1　染色体编码方法

可行解的编码方法是构造遗传算法时需要考虑的一个主要问题，也是设计遗传算法的关键步骤。对于旅行商问题，最常见的编码方式是自然数编码，这种编码方式将遍历各节点的次序排列作为染色体的编码。若有 n 个节点，那么染色体的编码长度就为 n。在图中，旅行商问题表现为经过所有节点的一条简单回路，若将实际遍历中最后一个节点到出发节点的边去掉，那么就可以将其看成是一棵出发节点为树根，所遍历的最后一个节点为叶子节点的单枝树（非叶子节点只有一个孩子节点）。因此，可以用树的思想对旅行商问题的染色体进行编码。

根据 Cayley 定理，已知在一个有 n 个节点的完全图中有 n^{n-2} 棵树，从而可用 $n-2$ 个数字的排列唯一表示一棵树，其中每个数字都是 1 和 n 之间的整数，通常将这个排列称为 Prufer 数[10]。对于一棵标号树，Prufer 数的编码思想是：找到标号最小的叶子节点，输出与该叶子节点相连的节点到 Prufer 数序列，并将该叶子节点删去，反复操作，直至剩余 2 个节点。Prufer 数序列中每个节点出现的次数显示节点度的信息，若这里的度是出度和入度的和，那么叶子节点的度就是 1，Prufer 数序列中度为 d 的节点恰好出现 $d-1$ 次。按 Prufer 数的思想，对含有 n 个节点的旅行商问题所对应的单枝树编码，形成的 Prufer 数序列一共有 $n-2$ 位，Prufer 数序列中每个节点只出现一次，其中 Prufer 数序列中没有出现的节点为度为 1 的两个节点。旅行商问题，一般出发节点是确定的，不同的是其余 $n-1$ 个节点的次序，因此这里可以使旅行商问题的染色体长度再减少一位，实际长度为 $n-3$。具体程序中的染色体（Prufer 数序列）根据节点个数和编号随机生成。如出发节点编号为 0 的含有 7 个节点的旅行商问题，其染色体编码为随机生成 1～6（包含 1 和 6）的 4 个不同自然数组成。

2.2　染色体解码方法

任何一个 Prufer 数序列可以唯一对应到一棵有标号的树，其解码过程是：首先标记所有节点为未删除；然后依次扫描 Prufer 数序列中的数，若当前扫描到第 m 个数 p，则说明有一个叶子节点连到 p，并在当前操作中被删除，找一个标号最小的未被标记为删除的且在 Prufer 数序列中第 m 个位置后未出现过的节点 q，在 p 和 q 间连边并将 q 删除，反复操作，直到最后剩两个节点未被标记为删除，在这两个节点之间连边，这样得到的含有 $n-1$ 条边的图则是一棵树。Prufer 数解码算法的时间复杂度大多为 $O(n \text{ lb } n)$[11]，这里对于按 Prufer 数编码的旅行商问题的染色体解码算法的时间复杂度为 $O(n)$。

图 1 为一个含有 7 个节点的旅行商问题的染色体（Prufer 数序列）的解码示意图，其解码是在 Prufer 序列中的当前节点与当前未删除的标号较小的叶子节点间连边，并将标号小的

叶子节点换为 Prufer 数序列中的当前节点，反复操作直到 Prufer 数序列中没有节点时，在当前未删除的两个叶子节点间连边，便得到了染色体的解码。若出发节点为 0，则图 1 中染色体对应的解码路径为：0-1-3-5-6-2-4-0。显然这样的操作，其时间复杂度为 $O(n)$。

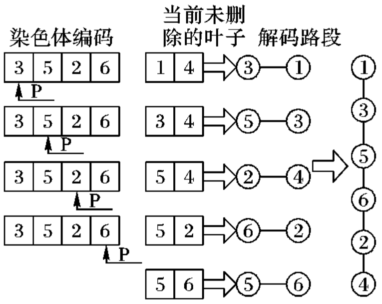

图 1 染色体（Prufer 数序列）解码过程

2.3 个体适应度评价函数设计

由于模型中的目标函数始终为正值，所以可以设定个体的适应度函数

$$f(x) = \begin{cases} M - F(x), & F(x) < M \\ 0, & F(x) \geqslant M \end{cases}$$

其中：$F(x)$ 为模型的目标函数值，M 为给定的一个较大的数。

2.4 遗传算子设计

一个好的遗传算子可以提高遗传算法搜索解的能力，防止早熟收敛。该遗传算法采用轮盘赌的选择策略完成选择操作。对于旅行商问题，传统交叉算子和变异算子容易破坏子代个体成为可行解的特性，容易产生大量的不可行解，降低了遗传算法的求解效率。为了提高遗传算法搜索解的效率和避免早熟收敛，这里设计了一种单亲换位算子和三种变异算子。

2.4.1 选择算子

采用轮盘赌的选择策略。实际操作中先根据染色体适应度函数值将染色体排序，然后根据种群的大小将轮盘分块，并按一定的分布标定其适应性分数，最后产生一个 0 到 1 之间的随机数，依据该随机数出现在上述的哪个概率区域来确定各个个体是否被选中。在选择完成后采用精英法则，强行将上一代的最优个体直接进入下一代。这样，每进化一代，下一代的最优个体一定不劣于上一代。

2.4.2 单亲换位算子

采用单亲换位法来代替传统的交叉操作。具体方法是将亲代的染色体（即 Prufer 数序列）随机选择两个位置进行对换。显然这样的换位操作不会产生不可行解。

2.4.3 变异算子

变异算子在一定程度上可以防止遗传算法早熟收敛，这里给出 3 种变异操作来增加解的多样性。程序执行时，在 3 种变异操作中随机选择 1 种操作对符合变异概率的染色体进行操作。

1）染色体邻位互换操作：首先，在染色体（Prufer 数序列）中随机选择两个不同的基因位置，根据这两个基因位置的先后顺序确定邻位互换段的起止位置；然后，若起止位置内基因数为偶数，则将该段内的所有奇数号基因与和它右邻的偶数号基因互换，若起止位置内基因数为奇数，则该段内的最后一位奇数号基因不变，其余该段内所有奇数号基因与和它右邻的偶数号基因互换。如图 2（a）所示，显然这样的变异操作不会产生不可行解。

2）染色体单位变异操作：在染色体（Prufer 数序列）中随机选择 1 位基因，将该基因变异为非出发节点且不在 Prufer 数序列中的 2 个节点中的任何 1 个的编号。如图 2（b）所示，显然这样的操作不会产生不可行解。

3）染色体双位变异操作：在染色体（Prufer 数序列）中随机选择 2 位基因，根据选择的先后顺序将这 2 位基因分别变异为非出发节点且不在 Prufer 数序列中的 2 个节点的编号。如图 2（c）所示，显然这样的操作也不会产生不可行解。

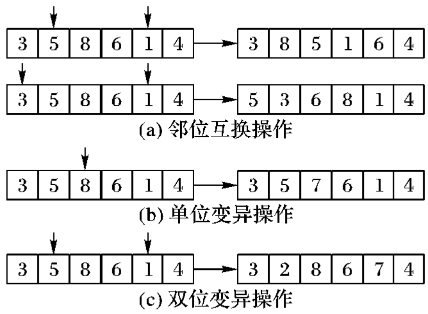

图 2 三种变异操作

3 算例应用

在 Core2 Duo CPU T6670 2 GB 内存的计算机配置环境下，以 Visual Studio6.0 为平台编写代码实现求解不确定旅行商问题的遗传算法。在 TSPLIB 中取 EIL51、ST70、EIL76、RAT99 四个算例[12]，并在每个算例的基础上随机生成偏差 $\hat{r}_m (0 < \hat{r}_m < 0.5 r_m)$ 来产生本文中的四个测试算例，记为算例 1、算例 2、算例 3、算例 4。设置算法种群大小 $PopSize = 1000$、进化代数 $MaxGen = 1000$、单亲换位率 $ExchangeRate = 0.95$、变异率 $MutationRate = 0.4$，来对四个算例进行计算。

表 1 为算法对算例 1、算例 2、算例 3 和算例 4 所求得的实验结果。表中，鲁棒性控制参数 $\Gamma = 0$ 时，算法所求得的最优值实际分别为算法对算例 EIL51、ST70 和 EIL76、RAT99 所求得的最优值。从表中可以看出，该算法能够得到不同鲁棒性控制参数下的不确定旅行商问题的鲁棒解，且随着 Γ 值增大，算法所求得的最优值也在不断增大，说明所对应的鲁棒解也更稳健。

表 1 4 个算例的实验结果

Γ 值	算例 1			算例 2			算例 3			算例 4		
	最优值	平均值	时间/s	最优值	平均值	时间/s	最优值	平均值	时间/s	最优值	平均值	时间/s
0	426.0	426.0	4	675.0	681.6	6	538.0	538.0	6	1211.0	1276.6	9
10	536.4	536.4	4	743.3	749.4	6	672.6	580.4	6	1867.3	1877.4	9
50	697.1	513.7	4	833.8	850.6	6	867.4	875.3	6	2120.6	2138.9	9
100	813.5	570.9	4	1021.6	1039.1	6	1003.3	1011.6	6	2689.1	2693.5	9

4 结语

本文建立了不确定旅行商问题的 Bertsimas 鲁棒优化模型，并设计了一种求解该问题的改进的遗传算法。该算法采用Prufer数的编码方式，与传统的以遍历各节点的次序作为

（下转第 2098 页）

束力；MSTI发布有助于提高出行质量及路网运行效率，使路径实时流量分配有向 Wordrop 平衡状态发展的趋势，但在出行者不完全理性决策行为影响下路径流量很难达到真正平衡。因此信息技术引进、可靠的交通管理规则制定等均要基于对出行者心理研究。

参考文献:

[1] AXHAUSEN K W, GARLING T. Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems [J]. Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal, 1992, 12(4): 323 - 341.

[2] CAPLICE C, MAHMASSANI H S. Aspects of commuting behavior: preferred arrival time, use of information and switching propensity [J]. Transportation Research Part A, 1992, 26(5): 409 - 418.

[3] KHATTAK A, POLYDOROPOULOU A, BEN-AKIVA M. Modeling revealed and stated en-route travel response to advanced traveler information systems[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1537(1): 46 - 54.

[4] MAHMASSANI H S, LIU Y H. Dynamics of commuting decision behavior under advanced traveler information systems[J]. Transportation Research C, 1999, 7(23): 91 - 107.

[5] SRINIVASAN K, MAHMASSANI S H. Modeling inertia and compliance mechanism in route choice behavior under real-time information[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1725(1): 45 - 53.

[6] PEETA S, GEDELA S. Real-time variable message sign-based route guidance consistent with driver behavior[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1752(1): 117 - 125.

[7] SRINIVASAN K K, MAHMASSANI H S. Analyzing heterogeneity and unobserved structural effects in route-switching behavior under atis: a dynamic kernel logit formulation[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(9): 793 - 814.

[8] PEETA S, JEONG W Y. A hybrid model for driver route choice incorporating en-route attributes and real-time information effects[J]. Networks and Spatial Economics, 2005, 5(1): 21 - 40.

[9] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decisions under risk[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1979, 47(2): 263 - 291.

[10] ZHONG Y. Principles of information science[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1996.（钟义信. 信息科学原理[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1996.）

[11] WANG S, WANG A. Cognitive psychology[M]. Beijing: Peking University Press, 2006.（王甦，汪安圣. 认知心理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.）

[12] GAO X. Basic psychology series. Perceptual psychology[M]. Beijing: People's Education Press, 2011.（高湘萍. 基础心理学书系: 知觉心理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 2011.）

[13] GAO X. Fuzzy cluster analysis and its applications[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.（高新波. 模糊聚类分析及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.）

[14] SIMON H A. How big is a chunk? [J]. Seience, 1974, 183(4124): 482 - 488.

[15] GUO H, HAN X, LIU L, *et al*. Study on measuring of drivers' traffic safety behavior reliability risks[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 103 - 109.（郭洪洋，韩雪松，刘澜，等. 驾驶员交通安全行为可靠性风险度量研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 103 - 109.）

[16] LOU X, LI J, LIU H. Improved fuzzy C-means clustering algorithm based on distance correction[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(3): 646 - 648.（楼晓俊，李隽颖，刘海涛. 距离修正的模糊C均值聚类算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(3): 646 - 648.）

（上接第2092页）

染色体编码的方式相比，缩减了染色体长度，而且其解码算法没有增加解码求解目标值的时间复杂度。设计了1种单亲换位操作和3种变异操作来搜索问题的解，避免了传统的交叉和变异操作破坏染色体可行解的缺陷，在一定程度上也阻止了早熟收敛现象的发生。通过算例验证，可以看到所建立的鲁棒模型在不确定环境下能得到较好的鲁棒解。在后续的研究中，将研究带有复杂约束的车辆路径问题的鲁棒模型及其求解方法。

参考文献:

[1] ZHANG J, TIAN B, LI X. Solving TSP with improved multi-Agent genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(4): 954 - 956.（张继军，田宝国，李萧. 用改进的多智能体遗传算法求解旅行商问题[J]. 计算机应用, 2008, 28(4): 954 - 956.）

[2] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness[J]. Operations Research, 2004, 52(1): 35 - 53.

[3] SOYSTER A L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming [J]. Operations Research, 1973, 21(5): 1154 - 1157.

[4] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust convex optimization[J]. Mathematics of Operations Research, 1998, 23(4): 769 - 805.

[5] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust solutions to uncertain linear programs[J]. Operations Research Letters, 1999, 25(1): 1 - 13.

[6] BEN-TAL A, GORYASHKO A, GUSLITZER E, *et al*. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs[J]. Mathematical Programming, 2004, 99(2): 351 - 376.

[7] MULVEY J M, VANDERBEI R J, ZENIOS S A. Robust optimization of large-scale systems[J]. Operational Research, 1995, 43(2): 264 - 281.

[8] MULVEY J M, RUSZCZYNSKI A. A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization[J]. Operational Research, 1995, 43(3): 477 - 490.

[9] MA C. Optimization of emergency transportation and logistics system [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2014.（马昌喜. 应急交通与物流系统优化[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2014.）

[10] SONG H. A partheno-genetic algorithm for solving the degree-constrained minimum spanning tree problem[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2005, 29(4): 61 - 66.（宋海洲. 求解度约束最小生成树的单亲遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 29(4): 61 - 66.）

[11] WANGX, WUY. OptimalalgorithmforcodinganddecodingPrufercodes [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(4): 687 - 690.（王晓东，吴英杰. Prufer编解码的最优算法[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(4): 687 - 690.）

[12] TSPLIB[EB/OL]. [2014-03-11]. http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/tsp/.