

快递配送车辆路径优化研究

麻存瑞^a, 柏赞^{a,b}, 赵欣苗^a, 曾玮^a

(北京交通大学 a. 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室; b. 中国综合交通研究中心, 北京 100044)

摘要: 考虑到快递配送和物流配送的异同,在物流配送路径优化问题的基础上构建了符合快递配送路径优化问题的数学模型.设计了一种采用自然数编码,综合考虑快件数量、车辆载重、车辆容量等约束的解码方式的遗传算法.通过一个拥有20个配送点的快递配送案例,验证本文所构建模型和算法能够得到合理配送路径和各个配送点的服务时刻.最后通过灵敏度分析和四轮厢式货车算例验证表明:当前情况下,研究快递配送路径优化时,快件数量、快递员最长配送时间和各配送点的作业时间必须考虑;当前快递配送车辆的载重和容量满足当前需求,无需更换载重和容量更大的配送车辆.

关键词: 物流工程;路径优化;遗传算法;快递配送;物流配送

Vehicle Routing Optimization on Express Distribution

MA Cun-rui^a, BAI Yun^{a,b}, ZHAO Xin-miao^a, ZENG Wei^a

(a. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology; b. Integrated Transportation Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Given the differences between express distribution and logistics distribution, this paper establishes a mathematical model in line with routing optimization problem of express distribution. In order to solve the model, a genetic algorithm is designed that uses natural number coding and the decoding style fully considering express number constraint, vehicle load constraint, and vehicle capacity constraint. By validating an express distribution case with 20 customer points, the results show that: the model established and the algorithm designed in the paper can obtain reasonable distribution paths and service time for each customer distribution point. Finally, the results of sensitivity analysis and four-wheeled van example show that: in current actual situation, courier's maximum distribution time and express operated time each distribution point should be considered in studying on route optimization for express distribution; the existing vehicle load and capacity can meet requirement of express distribution in the current situation, and no need to replace distribution vehicle with a larger load and capacity.

Keywords: logistics engineering; routing optimization; genetic algorithm; express distribution; logistics distribution

0 引言

随着我国电子商务的快速发展,快递行业作为电子商务的重要支撑面临诸多挑战,尤其是“贴

近顾客”端的“末端物流”“最后一公里”等所突显的问题亟需解决,快递配送路径优化就是其中一个重要问题.快递配送属于物流配送的范畴,但是

收稿日期:2017-03-17

修回日期:2017-04-26

录用日期:2017-05-24

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (71390332, 71621001-3); 国家基础研究计划项目/National Basic Research Program of China(2012CB725406).

作者简介:麻存瑞(1986-),男,甘肃兰州人,博士生.

*通信作者:yunbai@bjtu.edu.cn

快递配送不同于常规意义上物流配送,相比物流,快递一般重量较轻、体积较小、时效要求更加严格。物流配送路径优化的核心问题是VRP(Vehicle Routing Problem)问题,国内外很多学者采用智能算法对其进行了大量的求解研究^[1-2],这些算法的求解效率都相对较高。

快递配送对配送车辆和快件的特征信息都有严格的要求,如百世汇通公司规定快递配送快件单边不超过2 m,三边之和不超过2.5 m,重量小于等于50 kg,体积小于等于0.25 m³,超过此规定的快件应进行物流配送,而当前研究大多对快递不同于物流的固有特征考虑不足。针对快递配送路径优化问题,姜艳^[3]在研究中考虑快件交付等待时间,将传统物流配送路径问题中的车辆载重约束改为车辆递送快件数约束。杨浩雄^[4]提出了移动仓库Milk-Run的快递派送模式,模型中考虑了车辆载重约束。刘恒宇^[5]在传统车辆路径问题研究的基础上,研究了考虑拥堵和工作量的一致性车辆路径问题,在模型构建中考虑了车辆容量约束。可以看出,这些研究对快递配送与物流配送的异同性欠考虑,在研究时鲜少综合考虑快件数量、车辆载重和容量、快递员的工作时长,以及当前情况下快递员到达配送点后进行简单地分拣作业等影响配送时长的因素等。

快递配送相比物流配送其配送点更多,是一种大规模组合优化问题,很难快速、精确地找到全局最优解,智能算法是一种很好的求解方法。因此,本文将根据快递配送路径优化问题的特性构建符合快递配送路径优化问题的数学模型,并设计一种适宜的遗传算法对模型进行求解。

1 问题描述

快递配送路径优化属于物流配送路径优化的范畴,但是快递配送路径优化与物流配送路径优化又有很大的不同,主要体现在以下3点:

(1) 快件特征属性要求不同。

快递配送对快件的重量、大小、体积、属性等都有一定的规定,而物流配送一般并未规定货物的特征属性。

(2) 服务时效要求不同^[6]。

快递配送相比物流配送对时间的要求更加严

格,快递配送时间一般都在白天工作时间,根据各个配送点的特点又具有不同的服务时间,要求当天要配送的快件必须在当天规定时间内配送完成。然而,物流配送对时间的要求相对宽松,服务时间的灵活性更大。

(3) 配送点作业不同。

当前我国的城市快递配送并没有实现真正意义上的“门到门服务”,而是快递员到达某一配送点后,在一定的时间内由该配送点所服务的客户来配送点取件或者他人代签,并非由快递员上门配送,这使得快递员在一个配送点会服务多个客户,从而会在配送点进行简单的分货、拣货等作业,并需等待客户来取件,而物流配送研究通常不考虑分、拣货作业和等待客户取件等因素。

2 模型构建

2.1 参数定义

采用赋权网络图来描述配送网络,给定 n 个节点的简单无向完全图 $G = \langle V, E, t \rangle$,其中 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ 是图的节点集, E 是图的边集, t 是边的权值,指两节点间的车辆平均行驶时间。定义配送中心集合 $S_0 = \{v_0\}$,配送点集合 $S_1 = \{v_1, \dots, v_n\}$,节点集 $V = S_0 \cup S_1$, K 为配送车辆集合, $t_{ij}(i=0,1,\dots,n;j=0,1,\dots,n)$ 为配送网络图中任意两点间的快递配送车辆平均行驶时间; RS_i 为配送点任意子集合, $|RS_i|$ 表示任意配送点集合 RS_i 的配送点数量; $q_j(j=1,2,\dots,n)$ 为配送点 j 的快件数量, $m_j(j=1,2,\dots,n)$ 为配送点 j 的快件重量, $r_j(j=1,2,\dots,n)$ 为配送点 j 的快件体积; α 为每一个快件签收前快递员的平均准备时间, β 为每一个快件的快递员平均等待时间, w 为每一个快件的客户平均签收时间; $\gamma_j(j=1,2,\dots,n)$ 为配送点 j 的总签收准备时间, $\delta_j(j=1,2,\dots,n)$ 为配送点 j 的总等待时间, W_j 为配送点 j 的总签收时间, T_j 为快递员在配送点 j 的最长服务时间; Q 为最大配送快件数量, M 为车辆最大装载重量, R 为车辆最大装载体积, D 为车辆最长行驶时间, T 为每一快递配送车辆的最大配送时长; C_j 表示配送点 j , E_j 表示配送点 j 的最早服务时刻, L_j 表示配送点 j 的最晚服务时刻。

2.2 快递配送路径优化模型

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} \gamma_j x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} \delta_j x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} W_j x_{ijk} \quad (1)$$

s. t.

$$\alpha q_j = \gamma_j, \quad \forall j \in S_1 \quad (2)$$

$$\beta q_j = \delta_j, \quad \forall j \in S_1 \quad (3)$$

$$w q_j = W_j, \quad \forall j \in S_1 \quad (4)$$

$$\gamma_j + \delta_j + W_j \leq T_j, \quad \forall j \in S_1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} x_{ijk} q_j \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} x_{ijk} m_j \leq M, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} x_{ijk} r_j \leq R, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} x_{ijk} t_j \leq D, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} \gamma_j x_{ijk} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} \delta_j x_{ijk} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in S_1} W_j x_{ijk} \leq T, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$E_j \leq C_j \leq L_j, \quad j \in S_1 \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} - \sum_{i \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K; \forall j \in V \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in S_1 \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in S_1 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in RS_1} \sum_{j \in RS_1} x_{ijk} \leq |RS_1| - 1, \quad \forall RS_1 \subset S_1; \forall k \in K \quad (15)$$

$$x_{ijk} \in \{1, 0\}, \quad \forall i \in V; \forall j \in V; \forall k \in K \quad (16)$$

式(1)为目标函数,表示最小化快递配送中心所服务车辆的总配送时间,包括车辆行驶时间、签收前准备时间、快递员等待时间、客户签收时间,其中车辆行驶时间指快递配送车辆在道路上的实际行驶时间,签收前准备时间指快递员到达客户配送点后为当前客户点进行分货、拣货等工作所花费的时间,快递员等待时间指快递员到达配送点并完成所有签收准备工作后等待客户到来取件的时间,客户签收时间指客户到达配送点后成功签收快件所花费的时间,包括快递员取件时间、核对客户信息时间、客户签名确认时间等。式(2)~式(4)分别为快递员在配送点 j 的快件签收前的准备时

间、等待时间和客户签收时间的计算式;式(5)为快递员在配送点 j 的服务时间约束;式(6)为任意配送车辆所配送快件的总数量约束,表示所配送快件数量不能超过配送人员所配送的最多快件数量;式(7)和式(8)分别为车辆载重约束和容量约束,表示每一辆配送车辆所配送的快件量都不能超过车辆的载重和容量;式(9)为车辆最长行驶时间约束,表示每条配送路径的长度不超过车辆一次配送的最长行驶时间;式(10)为每一配送车辆的最长配送时长约束,即快递员的最长工作时长;式(11)为时间窗约束,即各配送点的最早和最晚服务时刻;式(12)表示配送车辆 k 从配送中心出发,完成配送任务后需要最终回到原配送中心;式(13)和式(14)保证每一个配送点只有一辆车为其服务;式(15)保证配送点集合中不会形成子回路;式(16)定义了0-1整数变量, $x_{ijk} = 1$ 表示配送车辆 k 的配送路线包含从节点 i 到节点 j 的路径, $x_{ijk} = 0$ 表示不包含。

3 遗传算法求解

3.1 染色体编码与解码

采用自然数编码的方法,每一个自然数都表示其中一个配送点的编号,0表示配送中心。采用这种编码所得到的染色体还需要进行解码。使用基于贪心策略的染色体解码方法:将配送中心的编号0分别按照快递员配送快件数量约束、车辆载重约束、车辆体积约束插入到染色体基因排列中,若到某一配送点时,违背其中任意一个约束,就表明需要另一辆车为该配送点服务,满足所有约束的基因序列便为当前车辆的配送路径,采用同样方式依次为该染色体中其他基因解码,直到所有基因解码完成,所得到的所有基因序列便为该染色体的最终解码。

3.2 遗传算子设计

(1) 交叉算子,采用部分匹配交叉^[7]完成交叉操作。

① 在选定的两个染色体中随机选择一个交配区域,如 $A=0\ 5\ |3\ 2\ 1\ 4\ 7\ |6\ 8$, $B=0\ 1\ |2\ 3\ 4\ 5\ 6\ |7\ 8$;

② 将染色体 B 的交配区域加到染色体 A 中,将染色体 A 的交配区域加到染色体 B 中得到染色体 $A'=0\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ |5\ 3\ 2\ 1\ 4\ 7\ 6\ 8$, $B'=0\ 3\ 2\ 1\ 4\ 7\ |1\ 2\ 3$

4 5 6 7 8;

③ 分别在染色体A'和B'中自交配区域后依次删除与交配区域相同的客户需求点,得到子代染色体A''=0 2 3 4 5 6 1 7 8, B''=0 3 2 1 4 7 5 6 8.

(2) 变异算子,通过对染色体中的基因逆序排列完成变异操作.

(3) 选择算子,采用轮盘赌的选择策略^[7].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.

4 算例研究

某快递配送中心服务周围20个配送点,该配送中心有足够的快递员和配送车辆,快递员每天

的工作时间最长为480 min,配送车辆的载重均为300 kg,容量均为1.5 m³,一次配送的最多快件个数为60件,配送车辆最长行驶时间为300 min,各配送点的服务时间为9:00-18:00.经过对以往数据进行分析得到快递员配送一个快件的签收前平均准备时间、平均等待时间、客户平均签收时间分别为2.5 min、2 min、1.5 min.配送中心到各配送点,以及配送点之间的快递配送车辆平均行驶时间如表1所示,各配送点的快件数量、重量和体积如表2所示,为了便于说明,文中称为算例1.求解算法采用C语言编写代码实现,分别设置算法种群大小为100、进化代数为100、部分匹配交叉率为0.95、逆转率为0.1.

表1 配送中心到配送点及配送点相互之间的车辆平均行驶时间

Table 1 Vehicle average travelling time from distribution center to delivery points and between delivery points (min)

配送点	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	20	43	27	53	43	39	34	56	53	50	27	55	49	41	32	20	23	34	26	26
1	20	0	60	38	24	20	20	35	41	43	44	44	26	47	38	34	22	44	52	52	41
2	43	60	0	32	55	49	59	57	42	25	38	29	55	28	51	54	60	60	45	36	30
3	27	38	32	0	32	54	20	35	23	47	22	20	57	31	31	44	48	54	49	39	28
4	53	24	55	32	0	50	39	38	58	50	24	44	35	50	44	43	34	26	29	37	52
5	43	20	49	54	50	0	41	60	50	34	26	46	40	22	48	40	26	58	25	57	48
6	39	20	59	20	39	41	0	32	37	22	59	48	26	55	53	43	27	27	53	39	26
7	34	35	57	35	38	60	32	0	40	50	36	31	43	47	50	49	39	25	35	54	21
8	56	41	42	23	58	50	37	40	0	41	47	37	24	58	57	42	34	39	35	54	32
9	53	43	25	47	50	34	22	50	41	0	38	31	60	32	50	43	28	51	54	36	40
10	50	44	38	22	24	26	59	36	47	38	0	56	21	60	43	22	41	27	54	45	46
11	27	44	29	20	44	46	48	31	37	31	56	0	28	54	25	24	50	32	58	31	33
12	55	26	55	57	35	40	26	43	24	60	21	28	0	25	50	54	49	44	50	30	25
13	49	47	28	31	50	22	55	47	58	32	60	54	25	0	20	22	53	54	28	24	42
14	41	38	51	31	44	48	53	50	57	50	43	25	50	20	0	20	24	38	50	48	42
15	32	34	54	44	43	40	43	49	42	43	22	24	54	22	20	0	23	37	28	48	31
16	20	22	60	48	34	26	27	39	34	28	41	50	49	53	24	23	0	37	29	43	41
17	23	44	60	54	26	58	27	25	39	51	27	32	44	54	38	37	37	0	45	26	40
18	34	52	45	49	29	25	53	35	35	54	54	58	50	28	50	28	29	45	0	59	48
19	26	52	36	39	37	57	39	54	54	36	45	31	30	24	48	48	43	26	59	0	57
20	26	41	30	28	52	48	26	21	32	40	46	33	25	42	42	31	41	40	48	57	0

表2 各配送点的快件信息

Table 2 Express information of all delivery points

配送点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
快件数量/件	11	12	8	9	6	10	26	5	8	1	14	12	13	13	9	11	23	31	14	19
快件重量/kg	37	28	30	10	10	15	30	36	15	12	40	46	32	30	45	35	38	50	48	40
快件体积/m ³	0.50	0.20	0.25	0.25	0.33	0.35	0.25	0.25	0.33	0.03	0.45	0.35	0.40	0.36	0.36	0.40	0.50	0.50	0.45	0.48

算例1中快递员的配送路径和全部配送完成后回到配送中心的时刻信息如表3所示。从表3可知,该配送中心需要6个快递员,快递员完成配送任务回到配送中心的最早时刻为13:57,最迟为16:00。表4为各配送点的服务时刻和其具体归属配送路径信息,可以看出本文的模型和算法能够求解得到各个配送点的服务时刻,可以为快递配送部门制定配送时刻表和提前通知客户收取快件提供有力支撑。

为了体现配送车辆载重和容量,以及最大配送快件数量对快递配送路径的影响,分别作了仅车辆载重变化、仅车辆容量变化、最大配送快件数量变化和载重、容量及最大快递配送数量均变化等4组实验,结果如表5所示。由表5可以看出,单纯地增大车辆载重和容量及最大配送快件数量对配送路径的影响不是很大,这说明现阶段除了车辆载重和容量,最大配送快件数量也是制约配送

路径的主要因素,这主要是由于快件数量与快递员到达配送点后分拣货作业、等待客户签收等时间长短有关。此外,由表5可知,当车辆载重、容量及最大快递配送数量均变化时,配送路径数和总配送时长变化很大,但是此时平均配送时长已不满足快递必须当天配送完成的时限要求。为了更详细地体现快递配送路径信息,表3给出了普通4轮厢式货车的路径结果,文中称算例2,其中车辆的载重、容量及一次配送的最多快件个数分别为1 000 kg、6 m³和150件,其他参数不变。从表3中算例2可以看出,虽然4轮厢式货车的配送路径只有2条,但是最短的一条配送路径的配送时长907 min已超出了快递员的最大工作时长,当天已不能够完成配送任务,这说明当前状况下无需更换载重和容量更大的配送车辆。图1为求解案例和算例1与算例2的种群进化过程曲线,看出算法能够较快的找到最优解达到收敛。

表3 配送路径信息

Table 3 Distribution routing information

算例	路径编号	配送路径	到达配送中心时刻	配送时长/min	路径编号	配送路径	到达配送中心时刻	配送时长/min
算例1	1	0→6→8→12→10→4→0	16:00	420	4	0→3→11→14→15→0	15:28	388
	2	0→19→17→0	13:57	297	5	0→13→2→9→16→0	15:54	414
	3	0→18→5→1→0	15:27	387	6	0→20→7→0	14:51	351
算例2	1	0→16→15→14→13→5→18→8→3→6→12→10→4→1→0	—	1 157	2	0→19→17→7→20→2→9→11→0	—	907

表4 算例1配送点的服务时刻及其归属配送路径

Table 4 Serviced time and belonged delivery path of delivery points of example 1

配送点	服务时刻	归属路径	配送点	服务时刻	归属路径	配送点	服务时刻	归属路径	配送点	服务时刻	归属路径
1	14:01-15:07	3	6	9:39-10:39	1	11	10:35-11:59	4	16	14:28-15:34	5
2	11:35-12:47	5	7	11:41-14:17	6	12	12:10-13:22	1	17	11:16-13:34	2
3	9:27-10:15	4	8	11:16-11:46	1	13	9:49-11:07	5	18	9:34-12:40	3
4	14:13-15:07	1	9	13:12-14:00	5	14	12:24-13:42	4	19	9:26-10:50	2
5	13:05-13:41	3	10	13:43-13:49	1	15	14:02-14:57	4	20	9:26-11:20	6

表5 车辆载重和容量及最大快件配送数量对配送路径的影响

Table 5 The impact of vehicle load and capacity as well as the maximum number of express on distribution path

车辆载重/kg	仅车辆载重变化		仅车辆容量变化		仅最大配送快件数量变化			载重、容量、最大快件配送数量均变化		
	配送路径数	配送总时长/min	车辆容量/m ³	配送路径数	配送总时长/min	最大配送快递数/件	配送路径数	配送总时长/min	配送路径数	配送总时长/min
300	6	2 257	1.5	6	2 257	60	6	2 257	6	2 257
500	5	2 231	2.0	5	2 206	80	4	2 146	4	2 170
700	5	2 231	3.0	5	2 191	100	3	2 119	3	2 105
1 000	5	2 231	4.0	5	2 191	150	3	2 077	2	2 064
1 500	5	2 231	5.0	5	2 191	200	3	2 077	2	2 064
2 000	5	2 231	6.0	5	2 191	300	2	2 066	1	2 039

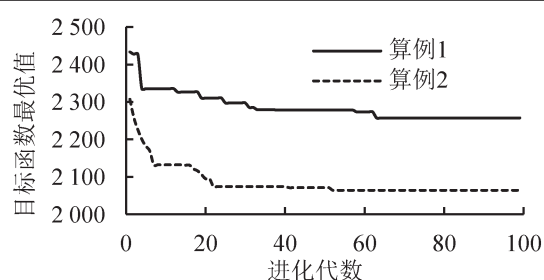


图1 染色体种群进化过程

Fig. 1 Chromosome population evolution procedure

5 结论

本文以我国当前快递行业所面临的问题为背景,通过对快递配送和物流配送进行比较分析,构建了快递配送车辆路径优化模型并设计了求解算法.通过算例求解表明本文所设计的遗传算法能够有效地求解文中所构建的快递配送路径优化模型,可以为快递配送部门根据快递量合理安排快递员及其配送路径和制定配送点的服务时刻具有现实意义,且得到如下结论:

(1) 对于快递配送路径优化,除了像物流配送路径优化一样考虑车辆载重和容量约束外,各个配送点的快件数量约束也是一个必不可少的约束,且快递员在各个配送点的作业时间和每日最大配送时间在研究快递配送路径优化时必须得考虑.

(2) 采用电动三轮车作为快递配送车辆,其载重和容量可以满足快递员一天的一次完整配送,当前情况下无需更换载重和容量更大的配送车辆.

参考文献:

- [1] BAKER B M, AYECHHEW M A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(5): 787-800.
- [2] 高鹏, 徐瑞华. 物流配送线路优化的改进遗传算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(6): 120-124. [GAO P, XU R H. A study of modified genetic algorithm for vehicle routing problem[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(6):120-124.]
- [3] 姜艳, 关雪. 快递路径优化模型研究[J]. 物流技术, 2008, 27(3): 39-41. [JIANG Y, GUAN X. Study on vehicle routing problem of express business[J]. Logistics Technology, 2008, 27(3): 39-41.]
- [4] 杨浩雄, 刘彤. 商业区快递车辆路径优化及仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(8): 443-446. [YANG H X, LIU T. Optimization and simulation of express's vehicle routing in commercial district[J]. Computer Simulation, 2014, 31(8): 443-446.]
- [5] 刘恒宇, 汝宜红. 考虑交通拥堵及工作量平衡性的一致性车辆路径问题[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 931-937. [LIU H Y, RU Y H. Consistent vehicle routing problem considering traffic congestion and workload balance[J]. Journal of Southeast Jiaotong University, 2016, 51(5): 931-937.]
- [6] 黄建华, 党延忠. 基于时间阈值的多标准快递超网络优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(12): 2129-2136. [HUANG J H, DANG Y Z. Optimization method of multi-criteria express super-network based on time threshold[J]. Systems Engineering- Theory & Practice, 2010, 30(12): 2129-2136.]
- [7] POTTS J C, GIDDENS T D, YADAV S B. The development and evaluation of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1994, 24(1): 73-86.