

考虑多编组方案的轨道交通车辆购置策略研究

戎亚萍*, 齐向春, 李 博, 刘 敏

(中国铁道科学研究院 运输及经济研究所, 北京 100081)

摘 要: 多编组运营是城市轨道交通系统网络化运营组织的重要方法之一. 本文针对轨道交通多编组方案下列车运能加强问题, 在线路通过能力一定的条件下, 以最大购置次数、最小购置间隔及年度最大购置辆数等为约束条件, 以广义费用最小为目标, 构建了多编组方案下的城市轨道交通车辆购置策略优化模型, 并设计两阶段遗传算法求解. 算例分析表明, 在给定需求和远期单一列车编组假设下, 初期和远期采用单一编组, 近期采用多编组的方案, 虽然司乘成本增加 18.6%, 但乘客出行费用和列车运行成本分别减少 16.48% 和 25.99%, 这较初、近、远期均采用单一编组方案效益更佳.

关键词: 城市交通; 运能加强; 车辆购置策略优化模型; 两阶段遗传算法; 多编组

Vehicle Purchase Strategy Considering Multi-group Train Operation for Urban Rail Transit

RONG Ya-ping, QI Xiang-chun, LI Bo, LIU Min

(Transportation and Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Multi-group train operation is one important part of the urban rail transit network operation technologies. In order to strengthen the transport capacity under the condition of certain line capacity. An optimization modal for vehicle purchase strategy of urban rail transit based on multi-group train is established, which is aimed to minimize the generalized cost. The constraints are maximum purchase frequency, minimum purchase interval, and the maximum purchase number of vehicles. And a two-phase mathematical programming algorithm is also proposed. The results indicate that under the certain passenger demand and single train formation in the future, the scheme of multi-group train is adopted in the near future and single train formation is adopted in initial stage and in the future can reduce the travel cost of passengers and the cost of operation by 16.48% and 25.99%, although it increases the driver cost by 18.6%. This is better than single train formation adopted in initial stage, the near future and future.

Keywords: urban traffic; transport capacity strength; vehicle purchase strategy optimization model; two-phase genetic algorithm; multi-group train

0 引 言

随着我国经济的增长和城市化进程的推进, 城市轨道交通建设进入蓬勃发展时期, 客流规模

日益扩大, 当运力不能完全满足客流需求时, 需要采取扩能措施缓解运能紧张的局面. 城市轨道交通系统的运输能力分为通过能力和输送能力, 在固

收稿日期: 2017-06-11

修回日期: 2017-09-13

录用日期: 2017-09-27

基金项目: 中国铁道科学研究院重大基金/China Academy of Railway Sciences Foundation Project (2016YJ100); 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71390332).

作者简介: 戎亚萍(1987-), 女, 河南郑州人, 助理研究员, 博士.

*通信作者: rongyp@rails.cn

定设施设备不变的情况下,通过能力不变,实际运营中轨道交通决策部门主要从购置车辆和增大列车编组两个方面研究合理的扩能方案.城市轨道交通车辆投资规模大、生产周期长,无计划的购车模式会导致轨道交通线路在一段时间内运能紧张,降低乘车舒适度;当小编组列车改为大编组时,行车间隔的加大会导致乘客等待时间过长,降低服务水平.

因此,已有部分学者研究了轨道交通系统能力加强问题.20世纪60年代初,苏联学者^[1]采用定期多阶段决策模型解决了固定扩能措施顺序下铁路系统的最佳投资年份问题.80年代初,中国学者朱松年^[2]提出结合定期与不定期多阶段决策过程并绘成有向图的方法求解运能加强方案.90年代,毛保华^[3]以规划期内投资、运营和延误费用之和最小为优化目标,从动态优化角度确定铁路系统运输设备的最迟改造时机和最优改造顺序.2000年以来,顾国林^[4]以总换算运营费用最小为优化目标,采用排队论和动态规划的方法求解编组站的合理投资年份.田亚明^[5]从路网车流组织和运营费用优化两个方面构建编组站分阶段协调发展的双层规划模型,从而确定编组站合理的发展阶段数和能力加强措施.张洪树^[6]应用运能—运量适应性分析法探讨了津滨轻轨采取扩能措施的时机,并提出津滨轻轨不同阶段的运能加强方案.上述研究多从固定设施设备角度研究铁路运输能力加强方案,也有少量学者从定性角度分析轨道交通运能加强措施,但从系统最优角度定量研究轨道交通运能加强方案的学者较少.

因此,本文在线路通过能力一定的条件下,以最大购置次数、最小购置间隔等为约束条件,以规划期内广义费用最小为优化目标,建立了多编组方案下的轨道交通车辆购置策略优化模型,并设计两阶段遗传算法求解.最后,以某城市轨道交通线路的预测客流为例,验证了模型和算法的有效性.

1 问题描述

城市轨道交通线路不同发展阶段下,运能曲

线和客流需求关系如图1所示.轨道交通线路每一个发展阶段结束时,前一阶段的运能已不能满足客流需求,在线路通过能力、车型不变的条件下,运营部门主要通过增购列车和改变列车编组增强轨道交通运输能力.

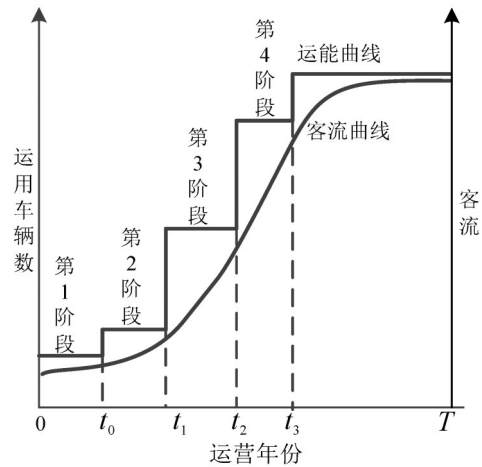


图1 轨道交通运能与客流需求关系图

Fig. 1 The relationship between transport capacity and passenger demand

本文针对某条轨道交通线路的车辆购置问题,令每年度为一个购车决策阶段,设其有 T 个阶段,车辆最终规模为 p_r ,如图2所示.每个阶段的购车方案为 $p_1^1, p_1^2, \dots, p_1^m$,不同的购车方案对应不同的经济效果 $c(t, p_1^1), c(t, p_1^2), \dots, c(t, p_1^m)$,通过确定各阶段的购车数量和编组方案形成运能加强策略,从而保证规划期内乘客服务水平和企业运营成本的整体效益最佳.

2 轨道交通运能加强策略优化模型

城市轨道交通线路每个阶段购车数量不同,会导致运用车辆数和编组方案的不同,进而影响列车最优开行方案的确定,最终导致企业运营成本和乘客出行费用的不同,而且前一阶段的决策不但影响该阶段的经济效果,还会影响后续阶段.因此,本文所研究的城市轨道交通运能加强策略不是每个阶段最优方案的简单叠加,而是从统筹全局的角度,优化规划期内各个阶段的“综合效益”.因此,本文采用现值法确定城市轨道交通车辆购置策略.

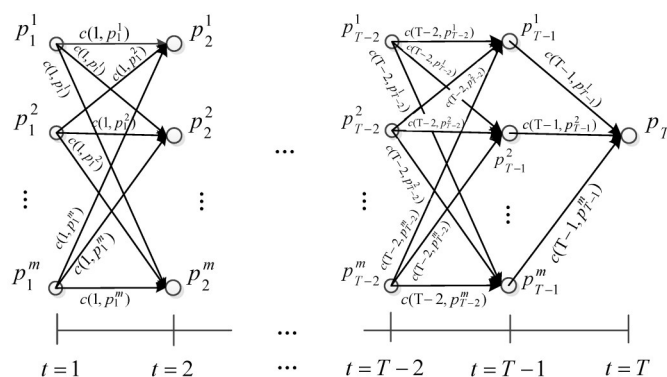


图2 轨道交通车辆购置策略示意图

Fig. 2 Vehicle purchase strategy of urban rail transit

2.1 基本假设

针对多编组方案下的运能加强策略优化问题,本文做出如下假设:

- (1) 已知轨道交通线路初、近、远期OD客流需求和车辆最终规模;
- (2) 多编组方案下的大编组列车可由增购的小编组列车与既有小编组列车重联而成,且不考虑重联成本和耗时;
- (3) 不同编组列车的旅行速度、折返时间和周转时间相同;
- (4) 不考虑运营期间通货膨胀影响;
- (5) 不同时期的线路设计通过能力不变.

2.2 广义费用

轨道交通运营决策部门确切知道每种购车策略的广义费用,并选择广义费用最小的购车策略.在这种情况下,需要最小化列车购置成本、乘客出行费用和企业运营成本(列车运行成本和司机成本),即轨道交通线路的广义费用最小化.广义费用中各部分的计算方法如下:

(1) 车辆购置成本.

车辆作为地铁运行过程中的重要载体,其购置成本占工程总投资的12%~18%^[7],由购车数量和车辆单价决定,则第 t 年的车辆购置成本可以表示为

$$C_{veh}(t) = \omega_1 \cdot Pur(t) \quad (1)$$

$$Pur(t) = p_t - p_{t-1} \quad (2)$$

式中: $Pur(t)$ 表示第 t 年的购置车辆数; p_t 表示第 t 年的运用车辆数,且 $p_t \in (p_t^1, p_t^2, \dots, p_t^m), (p_{t-1}^1, p_{t-1}^2, \dots, p_{t-1}^m)$ 表示第 t 年可运用的车辆数集合.

(2) 乘客出行费用.

乘客出行费用由乘客在车时间费用和等待时间费用两部分组成,由于假定不同编组列车的旅行速度相同,乘客在车时间相同,因此乘客出行费用可由乘客等待时间表示,则第 t 年的乘客总等待时间 $W(t)$ 可以表示为

$$W(t) = \omega_2 \cdot 365 \cdot \sum_{q=1}^Q w(p_t, q) \quad (3)$$

式中: $w(p_t, q)$ 为第 t 年第 q 个时段各车站的乘客总等待时间,按照文献[8]的方法计算; Q 为全日运营时段总数.

(3) 企业运营成本.

企业运营成本由列车运行成本和司机成本组成,分别由车公里数和上线车组数表示.则第 t 年的车辆总走行公里数 $R(t)$ 和总上线车组数 $T_{veh}(t)$ 可以分别表示为

$$R(t) = 365 \cdot \sum_{q=1}^Q r(p_t, q) \quad (4)$$

$$T_{veh}(t) = 365 \cdot \sum_{q=1}^Q T_0(p_t, q) \quad (5)$$

式中: $r(p_t, q)$ 和 $T_0(p_t, q)$ 分别为第 t 年第 q 个时段的车辆走行公里数和上线车组数,各值均按照文献[8]的方法计算.

2.3 车辆购置策略优化模型

以广义费用最小为目标,购车年份和购车数量为决策变量,建立城市轨道交通车辆购置策略优化模型为

$$\min C = \sum_{t=1}^T [\omega_1 \cdot Pur(t) + \omega_2 \cdot W(t) + \omega_3 \cdot R(t) + \omega_4 \cdot T_{veh}(t)] (1+r)^{-t} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^T y(t) \leq M_1 \quad (7)$$

$$y(t) = \begin{cases} 0, & p_t - p_{t-1} = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$y(t) + y(t+1) + \dots + y(t+M_2 - 1) \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\text{Pur}(t, p_t - p_{t-1}) \leq M_3 \quad (10)$$

$$y(1) = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T p_t - p_{t-1} = M_4 \quad (12)$$

其中,式(6)表示规划期 $[1, T]$ 内的广义费用值最小; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别表示轨道交通车辆购置单价、乘客候车时间价值、列车单位走行公里换算费用及单位列车司机工资; r 表示贴现率.式(7)表示最大购置次数约束, M_1 表示最大购置次数.式(8)中的 $y(t)$ 为0-1变量,表示第 t 年是否购车,若 $y(t)=0$ 表示不购车; $y(t)=1$ 表示购车.式(9)表示最小购置间隔约束, M_2 表示最小购置间隔.式(10)表示年度购置

新车数量约束, M_3 表示年度最大购置车数.式(11)和式(12)表示初始条件和终点条件约束, M_4 表示线路最终需要车辆数.

3 求解算法

本文运用遗传算法求解模型,由于决策变量 y_t 是0-1变量,每个阶段的备用车数由 p_t^l 到 p_t^m 不等,因此染色体采用实数编码和二进制编码结合方式,染色体长度为阶段数,基因编码对应购车决策和运用车数.然而,受约束条件的限制,大部分的购车策略是不可行的.例如,总购车次数过多或购车年份间隔过短,将难以满足式(7)~式(9).为提高求解效率,本文提出一种两阶段求解算法,具体流程如图3所示.在运用遗传算法优化前,阶段I首先产生一定数量的可行初始解,阶段II的遗传算法步骤按照文献[9-10]的方法优化.

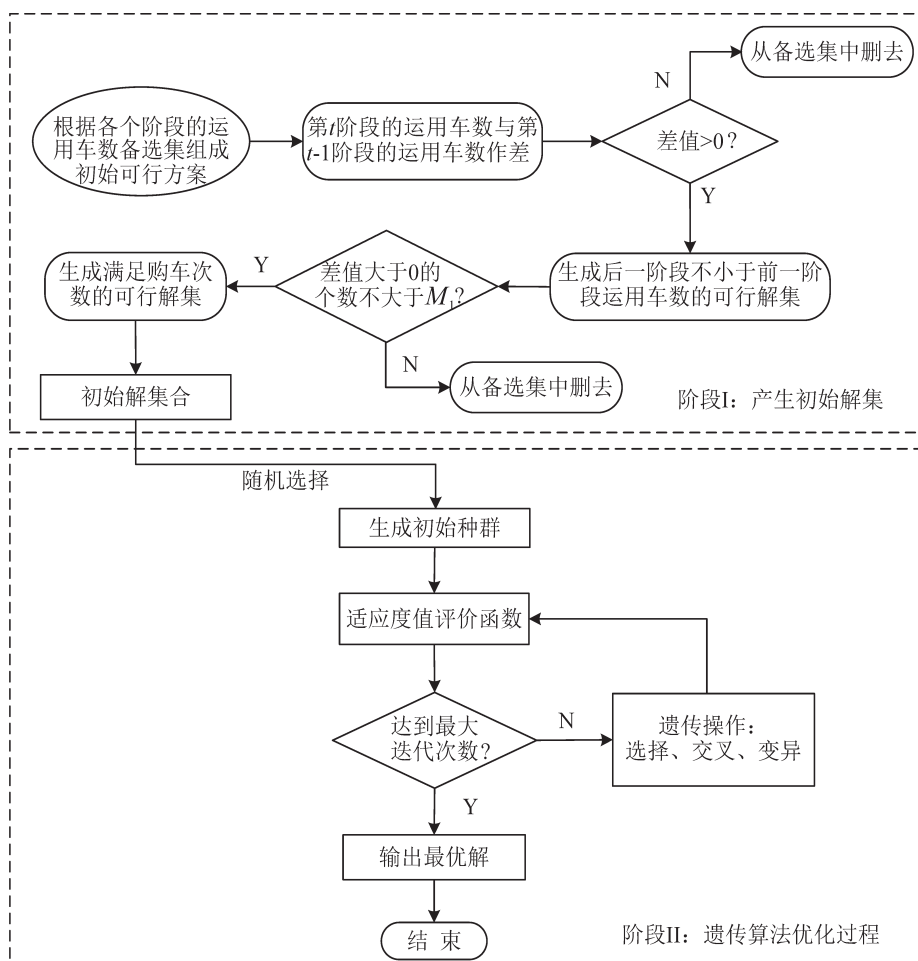


图3 两阶段遗传算法流程图

Fig. 3 Framework of two-stage genetic algorithm

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以某城市轨道交通线路为例进行说明.该线路全长26 km,共有20个车站,采取单一交路站停的运营组织模式,客流预测结果如表1所示.由表1可知,该线路在不同时期客流差别较大,为

提高已购车辆利用率和降低乘客等待时间,建议采用3-(3,6)-6编组方案,即运营企业初期采购3A列车,近期通过采购少量3A列车与既有列车扩编为6A,形成3,6编组混跑的运营组织模式.下面以3-(3,6)-6编组方案为例,求解规划期内的车辆购置策略.算例参数取值如表2和表3所示.

表1 客流预测结果汇总表

Table 1 Result of passenger flow forecasting

预测年份	全日最大断面流量/ (万人次/日)		高峰小时断面流量/ (万人次/h)		总客运量/ (万人次/日)	可行编组数
	上行	下行	上行	下行		
初期(第3年)	8.32	8.52	1.72	1.68	20.56	≥3A
近期(第10年)	17.65	17.84	2.68	2.54	54.32	≥4A
远期(第25年)	24.33	24.51	3.36	3.31	110.64	≥6A

表2 算例参数取值

Table 2 Value of the parameters in the case study

参数	含义	取值	单位
f_{min}	最小发车频率	10	对/h
f_{max}	最大发车频率	30	对/h
V	车辆定员	310	人/辆
α_{max}	列车最大满载率	120	%
T	规划期长度	25	年
ω_1	A型车车辆购置费用	1 025	万元/辆
ω_2	车辆单位走行公里换算费用	30	元/(辆·km)
ω_3	司机单位列车工资	66	元/列
ω_4	乘客候车时间价值	35	元/h
r	贴现率	0.1	—
M_1	最大购置次数	4	次
M_2	最小购置间隔	3	年
M_3	年度最大购置车辆数	20	列
M_5	车辆最终规模	120	辆

表3 遗传算法参数取值

Table 3 Value of the parameters in genetic algorithm

参数	含义	取值	参数	含义	取值
pop_size	种群规模	50	p_{c1}, p_{c2}	交叉概率	0.80
Max_generation	最大迭代次数	500	p_{m1}, p_{m2}	变异概率	0.06

4.2 优化结果及参数灵敏度分析

(1) 3-(3,6)-6编组方案优化结果.

根据表1的客流预测数据,运用插值法获得线路开通后各年份客流预测数据,如图4所示.根据上文提出的模型和算法,求解车辆购置策略和编组方案,结果如图5所示.

由图5可知,该线路的最佳购置策略为线路开通运营后第1、7、13、20年购车,购车数量分别为22

列、10列、3列和5列3编组列车(不含备用车数),各阶段分别采用3-(3,6)-(3,6)-6编组模式.这说明,当客流均匀增长时,企业决策部门应在允许的最大购车次数内等间隔购车.相同的购置策略下,对比3-6-6和3-(3,6)-6编组方案不同时期的列车运行指标,如表4所示.

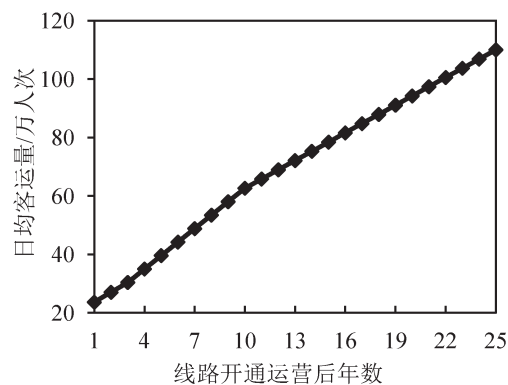


图4 客流变化趋势

Fig. 4 Passenger flow trends

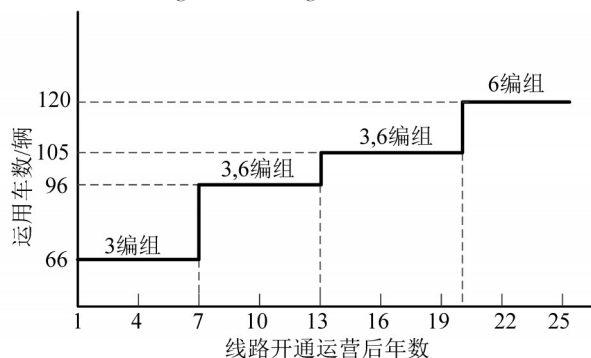


图5 3-(3,6)-6编组方案购车策略

Fig. 5 Vehicle purchase strategy of 3-(3,6)-6 scheme

表4 相同购置策略下不同编组方案列车运行指标比较

Table 4 Comparison of train operation indices with different train formation scheme

购车年份	运用车辆数/辆	编组方案	乘客等待时间/10 ⁷ h	上线车组数/10 ⁵ 列	车公里数/10 ⁷ 车公里	广义费用现值/10 ⁹ 元	乘客等待时间变化率/%	上线车组数变化率/%	车公里数变化率/%	广义费用变化率/%
1	66	3编组	2.01	2.49	2.21	1.26	—	—	—	—
		3,6编组	2.01	2.49	2.21	1.26	0	0	0	0
7	96	6编组	3.11	2.11	2.96	1.35	—	—	—	—
		3,6编组	2.25	2.74	2.46	1.06	-27.59	29.88	-16.90	-21.60
13	105	6编组	4.89	2.72	4.84	1.56	—	—	—	—
		3,6编组	3.48	3.80	3.55	1.13	-28.59	39.73	-26.64	-27.55
20	120	6编组	16.20	9.87	17.60	2.52	—	—	—	—
		6编组	16.20	9.87	17.60	2.52	0	0	0	0
1~25	120	3-6-6	26.20	17.20	27.60	7.65	—	—	—	—
		3-(3,6)-6	21.90	20.40	20.40	6.37	-16.48	18.60	-25.99	-16.71

由表4可知,在相同的购置策略和车辆最终规模下,相对于3-6-6编组方案,整个规划期内3-(3,6)-6编组方案的乘客等待时间和车公里数分别减少16.48%和25.99%,上线车组数增加18.6%,广义费用减少16.71%。结果表明,在远期单一列车编组假设下,给定需求时,初期和远期采用单一编组,近期采用多编组的方案虽然增加了司乘成

本,但可获得乘客出行费用和列车运行成本的显著节省,这较初、近、远期均采用单一编组方案效益更佳。

(2) 不同车辆购置价格对应的优化结果。

轨道交通车辆购置价格是购置策略的重要影响因素。因此,固定其他参数不变,研究最优购置策略随轨道交通车辆单价变化的情况,如图6所示。

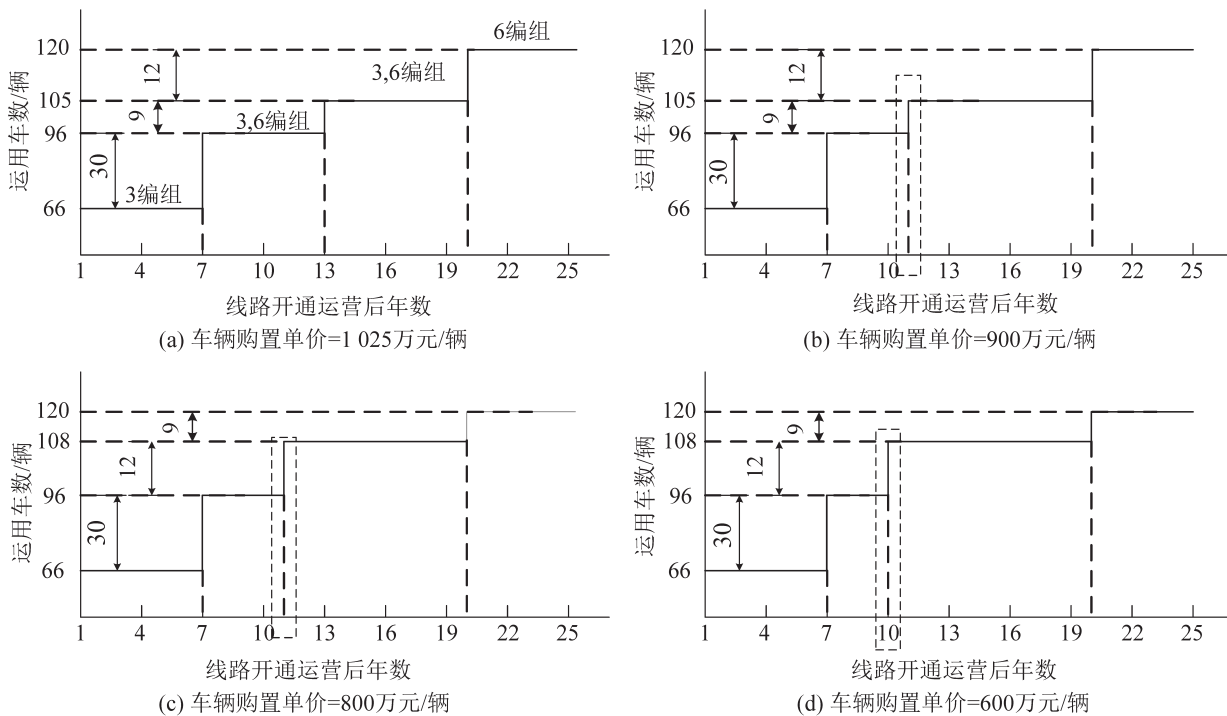


图6 购车策略随轨道交通车辆单价的变化情况

Fig. 6 Vehicle purchase strategy with different vehicle unit price

由图6可知,当车辆单价由1 025万元/辆下降为900万元/辆时,每次购车数量不变,第3次购车时机由第13年提前为第11年;当车辆单价下降为

800万元/辆时,车辆最佳购置年份不变,第3次购车数量由9辆增加为12辆;当车辆单价下降为600万元/辆时,每次购车数量不变,第3次购车时机再

次提前1年.结果表明,随着车辆单价的下降,轨道交通车辆购置策略呈现最佳购置年份提前,购置数量不变;购置数量增加,最佳购置年份不变的循环往复特征.这说明,随着国产化率的增高,轨道交通车辆单价逐渐下降,提前购车和加大购车数量能够降低轨道交通广义费用.

4.3 客流增长模式对结果的影响

轨道交通车辆购置策略除受相关参数影响外,还与客流增长规律相关.在规划期首末年客流量不变的条件下,分别按照 Logistic 增长和对数增长曲线拟合各年度客流量,得到不同客流增长规律下的轨道交通车辆购置策略,结果如图7所示.

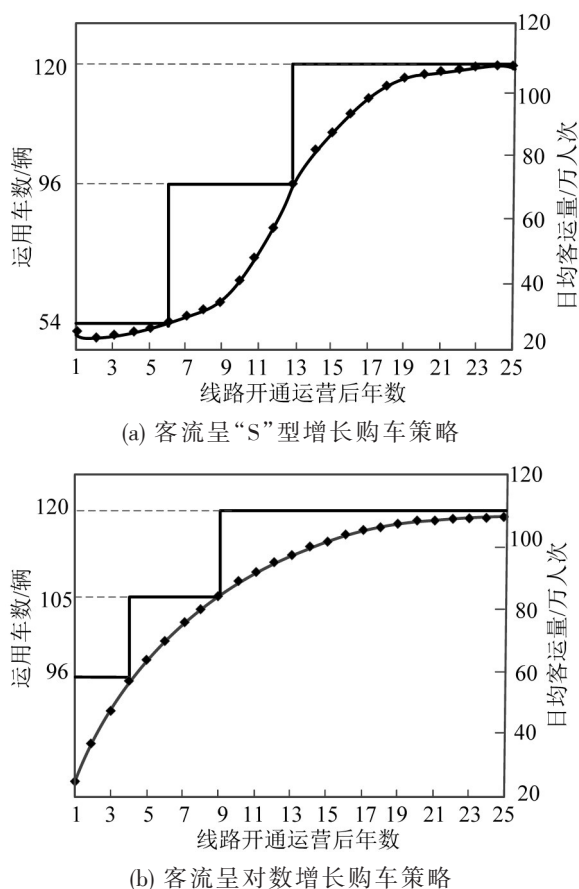


图7 不同客流增长规律下的轨道交通车辆购置策略

Fig. 7 Vehicle purchase strategy with different passenger growth rule

由图7可知,当客流呈“S”型增长时,第2、3次购车年份出现在“拐点”处,即客流量增长最大的点和客流增长率最大的点,客流量分别为平稳期客流的25%和50%;当客流呈对数增长时,第2、3

次购车年份对应的客流量分别为平稳期客流的50%和80%.因此,轨道交通运营决策部门应根据客流增长规律制定不同的车辆购置策略.

5 结论

针对城市轨道交通线路运能加强问题,在线路通过能力一定的条件下,以最大购置次数、最小购置间隔及最大购置辆数等为约束条件,以多阶段设备购置为决策变量,以广义费用最小为优化目标,建立了多编组方案下的轨道交通车辆购置策略优化模型,并设计两阶段遗传算法求解.结合算例分析,得到以下结论:

(1) 相同的购置策略下,与传统3-6-6编组方案相比,3-(3,6)-6编组方案的乘客等待时间和车公里数分别减少16.48%和25.99%,上线车组数增加18.6%,广义费用减少16.71%.这说明,在远期单一编组假设和给定客流需求时,初期和远期采用单一编组,近期采用多编组的方案虽然增加了司乘成本,但可获得乘客出行费用和列车运行成本的显著节省,这较初、近、远期均采用单一编组方案效益更佳.

(2) 参数取值和客流增长规律均影响轨道交通车辆购置策略.随着车辆单价的下降,提前购车和加大购车数量能够降低广义费用;当客流呈“S”型增长和对数增长时,第2、3次购车年份对应的客流量分别为平稳期客流的25%和50%、50%和80%,城市轨道交通决策部门应该根据车辆单价和客流规律制定不同的购车策略.

参考文献:

- [1] 崔云洪, 胡安洲. 线路运输能力发展优化的不定期动态规划方法[J]. 北方交通大学学报, 1988(4): 20-25. [CUI Y H, HU A Z. A method of non-periodic dynamic programming for railroad capacity development optimization[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1988(4): 20-25.]
- [2] 朱松年. 加强铁路通过能力的动态规划法[J]. 铁道运输与经济, 1982(1): 6-8. [ZHU S N. Dynamic programming method for strengthening railway carrying capacity[J]. Railway Transport and Economy, 1982(1): 6-8.]