考虑车数限制的城市轨道交通非对称时刻表优化

张京辉[1], 陈 曦[1†], 李博睿[2]

(1. 清华大学 自动化系，北京 100084；2. 国家高速列车青岛技术创新中心 技术研究部, 山东 青岛 266081)

摘 要: 在城市轨道交通中, 优化时刻表是提高能效、改善乘客体验的重要手段. 潮汐客流给时刻表的优化带来了较大的困难. 此外, 地铁建设期购置多少列车、运营期如何在有限车数下制定时刻表也是常常被忽视的问题. 针对这些问题, 本文以列车发车间隔为决策变量, 构建了列车运行模型、乘客行为模型, 考虑了车数限制条件, 设计了列车能效与乘客体验的优化目标, 建立了一个非线性多目标优化问题. 该问题采用 NSGA-II 算法进行求解. 本文以某城市某条地铁线路作为算例. 在该算例里, 通过放宽车数限制最多可以节能 11.1%, 同时增加车辆储备带来的边际效益递减; 通过设计非对称的时刻表, 可以在列车能效上最多得到 4.6% 的优化. 当客流具有潮汐特征时, 通过设计非对称时刻表可以带来显著的收益.

关键词: 城市轨道交通；列车调度；时刻表；车数限制；潮汐客流；进化算法

中图分类号: U292.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1807 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

引用格式 : 张京辉，陈曦，李博睿. 考虑车数限制的城市轨道交通非对称时刻表优化[J]. 控制与决策.

Optimization of Asymmetric Timetable in Urban Rail Transit Considering Train Quantity Restriction

ZHANG Jing-hui[1], CHEN Xi[1†],LI Bo-rui[2]

(1. Department of Automation ,Tsinghua University ,Beijing 100084,China;2. Technology Research and Development Department, National Innovation Center of High Speed Train,Qingdao 266081,China)

Abstract: Optimizing timetable is an important method to enhance energy efficiency and passenger experience in urban rail transit systems. Tidal passenger flow brings difficulties to the optimization of timetable.In the meantime, train quantity restriction is necessary but got little attention in previous studies. To solve these problems, a nonlinear multi-objective optimizing problem considering train quantity restriction is proposed in this paper. The decision variables are train headway at the origin station. Two optimization objectives,which are train energy efficiency and passenger experience, are designed based on train operation model and passenger behavior model. NSGA-II algorithm is used to solve this multi-objective problem. One case study is conducted to evaluate the performance of timetable given train quantity based on the real data. The results show that by relaxing the limit on the train quantity, the energy efficiency can be improved by up to 11.1 %, and that by designing an asymmetric timetable, the train efficiency can be improved by up to 4.6 %.When the passenger flow has tidal characteristics, significant benefits can be achieved by designing asymmetric timetable.

Keywords: Urban rail transit; Train Scheduling; Timetable; Train quantity restriction; Tidal passenger flow; Evolutionary algorithm

0 引 言

中国地铁的规模在稳步提升.2019 年底, 国内地铁运营里程合计 6882.13 公里、总客运量达 238.14 亿人次, 相比往年分别增加 17.5%、11.8%[1]. 然而, 根据地铁公司财务报告, 许多公司盈利水平较低, 部分公司净收入为负. 部分地铁存在高峰时期拥堵、平峰时期空车较多的现象. 运营里程与客流量的提升增加了管理者决策的难度, 但也意味着地铁存在更大的优化空间.

列车运行能耗为地铁能耗的一个重要组成部

收稿日期: 2021-10-20；**录用日期:** 2022-05-13.

基金项目: 国家高速列车技术创新中心研发项目: “新型高效能城市轨道交通系统建模与综合智能优化” (批准号 Grant No. CX/KJ-2020- 0006).

†通讯作者. E-mail: bjchenxi@mail.tsinghua.edu.cn.

分[2]. 目前, 学界提出了各种通过优化时刻表提高列车能效的办法. 冯瑜等[3] 假设列车运行分为牵引阶段、巡航阶段、惰性阶段、制动阶段, 通过优化时刻表使相邻列车的启动、制动区间重合, 达到提高再生制动能量利用率的目的.Xu 等[4] 通过优化时刻表对旅行时间、车站停靠时间进行调节, 同时改善了顾客体验和能量效率.Yin 等[5] 建立了一种近似动态规划方法, 避免了动态规划的维数灾难问题, 该算法取得了比遗传算法、差分进化算法更快的计算速度. 在另一个工作中,Yin 等[6] 协同考虑时刻表与列车最优运行曲线, 构建了两个具有线性形式的优化模型, 通过基于拉格朗日松弛的启发式算法, 将原始问题分解为两个子问题, 从而得到了较高的计算效率. 此外,Yin 等[7] 还建立了非线性马尔可夫转移过程的实时调度算法, 利用专家知识与强化学习方法对能耗、乘客舒适度、列车延误进行改善.

客流具有显著的时变性、周期性[8-9], 为了将时刻表与客流匹配, 学界对发车频率、快慢车等行车策略进行了优化. 针对客流事变需求与高峰期乘客滞留的问题, 陈维亚等[10] 提出了一种大小交路开行方案与多站联合限流相结合的运输组织协同优化方法, 在节省企业运营成本的同时, 提高了乘客出行公平性.Zhang 等[11] 考虑了地铁小交路运行与停车场结合的场景, 建立了混合整数非线性规划模型, 对发车数进行了优化.Canca 等[12] 建立了混合整数线性规划模型, 对折返位置、发车时刻等决策变量进行优化, 降低了乘客的等待时间.Wu 等[13] 对地铁网络的乘客旅行时间进行协调优化, 通过优化发车时刻、停靠时间、行驶时间等决策变量, 改善了最差旅行时间.

时刻表优化问题约束较多, 变量维度高, 优化目标复杂, 因此时刻表优化问题多为非线性问题. 针对非线性问题, 常用的解法包括遗传算法[1,3-4,13-15]、人工蜂群算法[10,16-17]、模拟退火算法[18]、禁忌搜索算法[19]. 通过引入中间变量、添加约束、划分子问题等方法, 也可以将非线性问题转化为整数规划问题[6]、混合整数线性规划问题[5-6,11-12] 进行求解. 为了应对动态客流变化, 可以根据列车、乘客状态转移方程建立近似动态规划问题, 通过强化学习[20] 等方法进行求解. 对于多目标问题, 采用的处理方法包括加权平均[1,4,10]、模糊线性规划[4]、ϵ 约束[16,17] 等.

现有研究考虑了将时刻表与各个车站的客流匹配, 也考虑了安全、能耗等目标, 但车数限制的影响仍有待研究. 在规划建设期, 列车购置数过少会影响最大运能以及调度灵活性, 购置数过多会带来高昂的成本. 在运营期, 如何在车数有限的条件下制定时刻表是一个难题. 此外, 很多线路存在潮汐客流, 例如某时段上下行方向的客流强度有明显差别. 已有研究一般采用上下行方向相同的发车间隔, 或者假设列车到达终点站后立即折返行驶, 因此不能很好地应对潮汐客流.

本文建立了一个考虑列车车数限制、非对称时刻表优化问题. 首先建立列车、乘客的状态方程, 其次确定列车能耗、乘客体验的计算方法, 同时考虑车数限制条件, 最后应用遗传算法 NSGA-II 进行求解. 本文以某城市单条地铁线为例, 分析了车数限制、初始列车分配方案等因素对地铁运营的影响.

1 时刻表优化问题描述

1.1 场景描述

本文考虑单条地铁线路的场景. 列车运行方向分为上行、下行两个方向, 沿线设有若干个车站, 两端车站设置停车场. 列车编组方式固定, 即车厢数量固定. 列车到达终点站后, 可以在停车场前折返, 或者停在停车场中等待发车指令. 列车时刻表指上行、下行方向上, 各辆列车在各个车站的出发时刻.

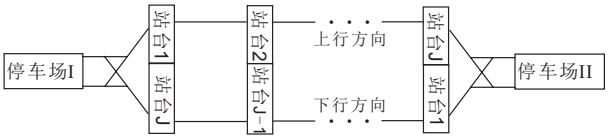


图 1 地铁线路示意图

1.2 情景假设

假设 1 先到乘客先接受服务. 车厢空间不足时, 后进站的乘客需等待下次列车.

假设 2 列车采用固定的运动方式. 列车在两个车站间先后进行匀加速、匀速、匀减速运动.

假设 3 列车总数固定.

假设 4 列车在沿途各站的停靠时间与上下车总人数有关.

假设 5 列车在沿途各站停靠, 不考虑列车越站.

假设 6 不考虑列车再生制动能量的回收利用.

2 考虑车数限制的时刻表优化模型

2.1 列车运行

本文各符号下标的含义如表 1 所示.

表 1 下标说明

符号	含义	取值	说明
d	运行方向	$1,2$	1 表示上行,2 表示下行.
k	发车序号	$1,2,\ldots,K_d$	d 方向发车总数为 K_d.
j	车站序号	$1,2,\ldots,J$	车站总数为 J, 上下行编号顺序相反.
g	停车场序号	$1,2$	首尾两端设置停车场.

列车在各个车站的出发时刻可由始发站首班车发车时刻、始发站发车间隔、站间行驶时间、站内停靠时间计算得到.

$$t_{d,k,j}=t_d^{\text{Begin}}+\sum_{i=2}^{k}t_{d,i}^{\text{Depart}}+\sum_{i=2}^{j}t_{d,i}^{\text{Trans}}. \tag{1}$$

式中 $t_{d,k,j}$ 指 d 方向上第 k 辆列车从车站 j 的发车时刻, t_d^{Begin} 指 d 方向上始发站首班车发车时刻, 由地铁运营时间确定. $t_{d,i}^{\text{Depart}}$ 指 d 方向上第 i 辆距前一辆车的发车间隔, 是本文的决策变量, 其下标 i 应大于等于 2. $t_{d,i}^{\text{Trans}}$ 指列车在 $i-1$ 车站出发时刻至 i 车站出发时刻的间隔, 为事先给定, 其下标 i 应大于等于 2.

$t_{d,i}^{\text{Trans}}$ 由两部分组成, 分别为列车在 $i-1$ 站至 i 站的行驶时间 $t_{d,k,i}^{\text{Head}}$(其下标 i 应大于等于 2), 在车站 i 的停靠时间 $t_{d,k,i}^{\text{Dwell}}$. 根据假设 4, 列车在车站的停靠时间与乘客上下车人数有关.

$$t_{d,k,j}^{\text{Dwell}}=\min\ \{\kappa p_{d,k,j}^{\text{OnOff}}+\tau^{\text{DwellMin}},\tau^{\text{DwellMax}}\}. \tag{2}$$

$$t_{d,k,j}^{\text{Head}}=t_{d,j}^{\text{Trans}}-t_{d,k,j}^{\text{Dwell}}. \tag{3}$$

式中 κ 为停靠时间比例系数,$p_{d,k,j}^{\text{OnOff}}$ 为 d 方向上列车 k 在车站 j 时上下车总人数,τ^{DwellMin} 表示开关门时间,τ^{DwellMax} 表示最长停靠时间.

为了对车数进行描述, 本文引入停车场这一概念. 列车除了在上行、下行方向行驶外, 还有可能在停车场内待命、或在折返区内运行.$C_g(t)$ 表示 t 时刻停车场 g 内的列车数,$V(t)$ 表示 t 时刻线路上的列车数,$R(t)$ 表示 t 时刻折返区的列车数. 当有列车驶入停车场时, 停车场列车数增加, 当有列车驶出时, 停车场列车数减少; 对于线路上、折返区内的车数同理. 下面的公式描述了停车场、线路上、折返区内列车数的变化.

$$\epsilon^{t_0}(t)=\begin{cases}0, t<t_0;\\ 1, t\geq t_0.\end{cases} \tag{4}$$

$$C_g(t)=c_g-\sum_{k=1}^{K_g}\epsilon^{t_{g,k,1}-\Delta t}(t)+\sum_{k=1}^{K_{3-g}}\epsilon^{t_{3-g,k,J}+\Delta t}(t). \tag{5}$$

$$V(t)=v-\sum_{d=1}^{2}\sum_{k=1}^{K_d}\left(\epsilon^{t_{d,k,1}}(t)-\epsilon^{t_{d,k,J}}(t)\right). \tag{6}$$

$$\begin{aligned}R(t)=r+\sum_{d=1}^{2}\sum_{k=1}^{K_d}(&\epsilon^{t_{d,k,1}-\Delta t}(t)-\epsilon^{t_{d,k,1}}(t)+\\ &\epsilon^{t_{d,k,J}}(t)-\epsilon^{t_{d,k,J}+\Delta t}(t)).\end{aligned} \tag{7}$$

式中 Δt 表示列车入库或出库的时间,$\epsilon^{t_0}(t)$ 为阶跃函数,c_g, v, r 分别为停车场 g 内、线路上、折返段内列车初始数量. 不难验证, 线路上、停车场内、折返区内列车总数恒定.

$$V(t)+\sum_{g=1}^{2}C_g(t)+R(t)=v+\sum_{g=1}^{2}c_g+r. \tag{8}$$

2.2 乘客行为

本文对乘客进站、下车、上车三部分进行建模, 从而实现对站台、列车内乘客数的计算. 其中已到达目的地的乘客数不计入站台内乘客数.

记 t 时刻、d 方向, 车站 j 的客流进站强度由 $\lambda_{d,j}(t)$ 表示, 则从列车 k 出发至 $k+1$ 出发内进站乘客数 $p_{d,k,j}^{\text{In}}$ 的计算公式为

$$p_{d,k,j}^{\text{In}}=\int_{t_{d,k,j}}^{t_{d,k+1,j}}\lambda_{d,j}(t)dt. \tag{9}$$

下车的乘客数参考了文献[4] 中的方法. 通过比例系数与列车内乘客数来计算下车乘客数. 记 $p_{d,k,j}^{\text{Train}}$ 为 d 方向上, 列车 k 即将到达车站 j 时列车内乘客数. 记 $\eta_{d,j}^{\text{Sta}}$ 为 d 方向上, 列车到达车站 j 时, 车内乘客下车比例. 则 $\eta_{d,j}^{\text{Sta}}p_{d,k,j}^{\text{Train}}$ 为 d 方向上列车 k 在车站 j 处下车乘客数.

通过站台内乘客数与列车内剩余容量, 可以计算出上车的乘客数. 当站台内乘客数超过车内剩余空间时, 乘客无法全部上车, 部分乘客需等待下次列车. 记 $p_{d,k,j}^{\text{Sta}}$ 为 d 方向上列车 k 刚到达车站 j 时站内等待的乘客数.L 为列车设计容量, 则上车乘客数由下式计算.

$$p_{d,k,j}^{\text{On}}=\min\left(p_{d,k,j}^{\text{Sta}}, L-(1-\eta_{d,j}^{\text{Sta}})p_{d,k,j}^{\text{Train}}\right). \tag{10}$$

结合下车的乘客数与上车的乘客数, 可以得到乘客上下车的总数.

$$p_{d,k,j}^{\text{OnOff}}=p_{d,k,j}^{\text{On}}+\eta_{d,j}^{\text{Sta}}p_{d,k,j}^{\text{Train}}. \tag{11}$$

基于上述计算方法, 站台上和列车内的乘客数的状态方程分别为

$$p_{d,k+1,j}^{\text{Sta}}=p_{d,k,j}^{\text{Sta}}-p_{d,k,j}^{\text{On}}+p_{d,k,j}^{\text{In}}. \tag{12}$$

$$p_{d,k,j+1}^{\text{Train}}=\left(1-\eta_{d,j}^{\text{Sta}}\right)p_{d,k,j}^{\text{Train}}+p_{d,k,j}^{\text{On}}. \tag{13}$$

当给定站台、列车内乘客数的初始状态, 确定了上下行方向的时刻表, 便可通过求解上述状态方程得到各个时刻列车上、车站内乘客数. 特别地, 记 $p_{d,0,j}^{\text{Sta}}$ 为地铁开始运营时站台乘客数, 表示站台内乘客数的初始状态.

2.3 目标计算

2.3.1 人均等待时间

本文用人均等待时间代表乘客体验, 其包括滞留在站台上的乘客等待时间与新进站乘客的等待时

间.$h^{\text{Sta}}_{d,k,j}$ 表示 d 方向上车站 j 的滞留乘客在列车 $k-1$ 出发与列车 k 之间出发的等待时间. 为了便于表示, 记 $p^{\text{On}}_{d,0,j}=0$, 具体计算公式如下.

$$h^{\text{Sta}}_{d,k,j}=\left[p^{\text{Sta}}_{d,k-1,j}-p^{\text{On}}_{d,k-1,j}\right]t^{\text{Depart}}_{d,k}. \tag{14}$$

新进站乘客的等待时间记为 $h^{\text{New}}_{d,k,j}$, 可以通过积分得到. 为了便于表示, 记 $t_{d,0,j}=t^{\text{Begin}}$, 为地铁开始运营的时刻.

$$h^{\text{New}}_{d,k,j}=\int_{t_{d,k-1,j}}^{t_{d,k,j}}\lambda_{d,j}(t)(t_{d,k,j}-t)dt. \tag{15}$$

人均等待时间可由总的等待时间以及总乘客数得到.

$$T^{\text{Wait}}=\frac{\sum\limits_{d=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{J}\sum\limits_{k=1}^{K_d}(h^{\text{Sta}}_{d,k,j}+h^{\text{New}}_{d,k,j})}{\sum\limits_{d=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{J}\int_{t^{\text{Begin}}}^{t^{\text{End}}}\lambda_{d,j}(t)dt}. \tag{16}$$

式中 t^{Begin} 为地铁开始运营的时刻, t^{End} 为地铁结束运营的时刻.

2.3.2 列车能耗水平

本文通过列车能耗水平表示列车能效. 根据假设 2 列车的运行方式为匀加速、匀速、匀减速. 记列车加速阶段加速度为 a_1, 减速阶段加速度为 a_2, 记 $x^{\text{Sta}}_{d,j}$ 为 d 方向上车站 j 的位置, 根据公式 (3) 可以得到车站间的行驶时间 $t^{\text{Head}}_{d,k,j}$, 继而列车的最大速度 $v_{d,k,j}$、加速阶段用时 $\alpha_{d,k,j}$、匀速阶段用时 $\beta_{d,k,j}$、减速阶段用时 $\gamma_{d,k,j}$ 可分别按 (17)-(20) 式确定.

$$v_{d,k,j}=\frac{2\left(x^{\text{Sta}}_{d,j}-x^{\text{Sta}}_{d,j-1}\right)}{t^{\text{Head}}_{d,k,j}+\sqrt{t^{\text{Head}^2}_{d,k,j}-2(x^{\text{Sta}}_{d,j}-x^{\text{Sta}}_{d,j-1})(\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a_2})}}. \tag{17}$$

$$\alpha_{d,k,j}=\frac{v_{d,k,j}}{a_1}. \tag{18}$$

$$\beta_{d,k,j}=t^{\text{Head}}_{d,k,j}-\alpha_{d,k,j}-\gamma_{d,k,j}. \tag{19}$$

$$\gamma_{d,k,j}=\frac{v_{d,k,j}}{a_2}. \tag{20}$$

列车质量可由列车净重与乘客质量确定. 记 d 方向上, 列车 k 在离开车站 $j-1$ 与到达车站 j 之间的质量为 $m^{\text{Train}}_{d,k}(j)$, 列车净重为 m_0, 乘客平均质量为 m_1, 则列车质量可由下式计算.

$$m^{\text{Train}}_{d,k,j}=m_0+p^{\text{Train}}_{d,k,j}m_1. \tag{21}$$

假设 η^{Eng} 为电机能量效率,η^{Line} 为牵引网传输电能的效率, 则列车 k 从车站 $j-1$ 到车站 j 消耗的能量 $E^{\text{Train}}_{d,k,j}$ 的计算公式如下.

$$E^{\text{Train}}_{d,k,j}=\frac{1}{2\eta^{\text{Line}}\eta^{\text{Eng}}}m_{d,k,j}v^2_{d,k,j}. \tag{22}$$

列车能耗水平用所有列车消耗的总能量与列车运载的人公里数的比值表示.

$$E^{\text{Metro}}=\frac{\sum\limits_{d=1}^{2}\sum\limits_{j=2}^{J}\sum\limits_{k=1}^{K_d}E^{\text{Train}}_{d,k,j}}{\sum\limits_{d=1}^{2}\sum\limits_{j=2}^{J}\sum\limits_{k=1}^{K_d}\left(x^{\text{Sta}}_{d,j}-x^{\text{Sta}}_{d,j-1}\right)p^{\text{Train}}_{d,k,j}}. \tag{23}$$

2.4 约束条件

1) 线路上、停车场内、折返区车数不能为负值.

$$V(t)\geq 0. \tag{24}$$

$$C_g(t)\geq 0, g\in\{1,2\}. \tag{25}$$

$$R(t)\geq 0. \tag{26}$$

2) 各个车站乘客数的数量应为 0.

$$p^{\text{Sta}}_{d,0,j}=0, d\in\{1,2\}, j\in\{1,2,...,J\}. \tag{27}$$

3) 各辆列车乘客数的初始状态应为 0.

$$p^{\text{Train}}_{d,k,1}=0, d\in\{1,2\}, k\in\{1,2,...,K_d\}. \tag{28}$$

4) 首班车不需要考虑发车间隔. 对于其它车辆, 从安全的角度, 为了防止追尾, 列车发车间隔应当不小于 t^{LB}; 为了避免乘客等待时间过长, 列车发车间隔应当不大于 t^{UB}.

$$t^{\text{Depart}}_{d,k}\in[t^{\text{LB}},t^{\text{UB}}], d\in\{1,2\}, k\in\{2,3,...,K_d\}. \tag{29}$$

5) 上下行方向列车应当覆盖地铁运营时间, 保证最后一位进入地铁乘客也能乘坐列车.

$$t^{\text{Begin}}_{d}+\sum_{i=1}^{K_d}t^{\text{Depart}}_{d,i}\geq t^{\text{End}}, d\in\{1,2\}. \tag{30}$$

2.5 优化问题模型

根据上述分析, 考虑车数限制的轨道交通非对称时刻表问题可描述为如下的以乘客等待时间和列车能耗水平为目标的双目标优化问题. 该问题的决策变量为上下行列车的发车间隔 $t^{\text{Depart}}_{d,k}$.

$$\begin{aligned}
&\min_{t^{\text{Depart}}_{d,k}} T^{\text{Wait}}, E^{\text{Metro}}\\
&s.t.\ t^{\text{Begin}}\leq t\leq t^{\text{End}};\\
&\quad V(t)\geq 0;\\
&\quad C_g(t)\geq 0, g\in\{1,2\};\\
&\quad R(t)\geq 0;\\
&\quad p^{\text{Sta}}_{d,0,j}=0, d\in\{1,2\}, j\in\{1,2,...,J\};\\
&\quad p^{\text{Train}}_{d,k,1}=0, d\in\{1,2\}, k\in\{1,2,...,K_d\};\\
&\quad t^{\text{Depart}}_{d,k}\in[t^{\text{LB}},t^{\text{UB}}], d\in\{1,2\}, k\in\{2,3,...,K_d\};\\
&\quad t^{\text{Begin}}_{d}+\sum_{i=1}^{K_d}t^{\text{Depart}}_{d,i}\geq t^{\text{End}}, d\in\{1,2\}.
\end{aligned} \tag{31}$$

3 案例分析

3.1 求解方法

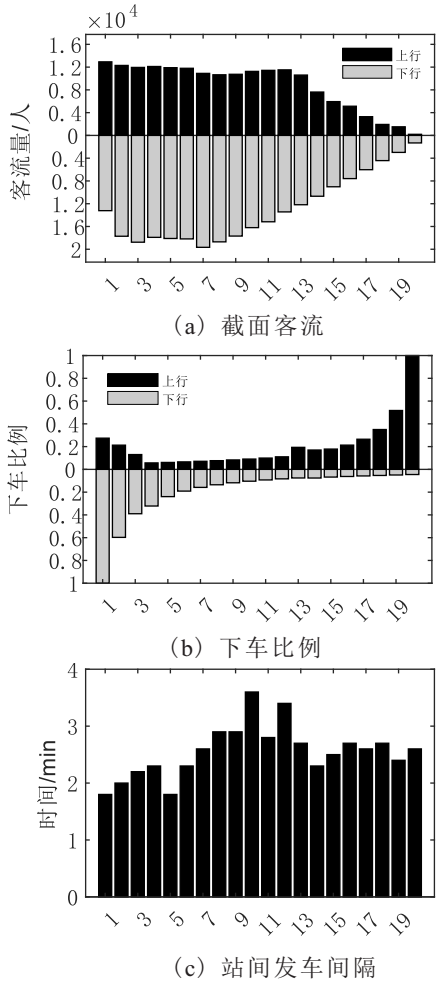
本文建立了一个包含不等式约束的非线性多目标优化问题. 该问题可以通过若干推导得到简化. 首先, 可以忽略约束条件 (24).$V(t)$ 的初始值为 0, 此时约束条件满足. 在地铁运行过程中, 列车先在始发站驶出停车场, 再在终点站驶入停车场, 根据公式 (6) 可知 $V(t)$ 恒大于等于 0. 其次, 可以忽略约束条件 (26).$R(t)$ 的初始值为 0, 此时约束条件满足. 在地铁运行过程中, 列车先进入折返区, 再离开折返区, 根据公式 (7) 可知 $R(t)$ 恒大于等于 0.

本文采用多目标遗传算法 NSGA-II[21] 进行求解. 相较传统的遗传算法,NSGA-II 引入了快速非支配排序与拥挤度计算, 同时改善了精英策略, 使得计算效率更高, 解的多样性更好, 因此被学界广泛采用. 为了提高搜索效率, 同时考虑到发车间隔的小数位数一般不超过两位, 本文采用了二进制编码方式.

最后, 本文基于 platEMO 平台[22] 实现了该算法.

3.2 案例介绍

本文以某市某条地铁线路为例进行计算. 该线路全长 58.35 千米, 全程设置 21 个车站. 其中车站 1、车站 21 处设置停车场, 记为停车场 I 、停车场 II. 客流进站截面客流、乘客下车比例、列车站间发车间隔参考历史数据, 如图 2 所示 (上下行截面编号统一). 其它参数如表 2 中所示.



(a) 截面客流　(b) 下车比例　(c) 站间发车间隔

图 2　地铁线路数据

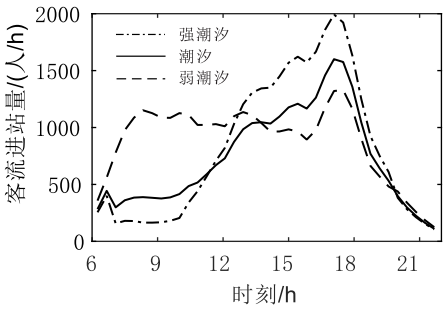
表 2　模型参数

符号	含义	数值	符号	含义	数值	符号	含义	数值
Δt	列车入库或出库用时,s	145	v	线路上列车初始数量	0	r	折返区内列车初始数量	0
t^{LB}	最短发车间隔,min	4	t^{UB}	最长发车间隔,min	10	K^{d}	d 方向上发车数	<300
t_1^{Begin}	列车始发时刻 (上行)	6:15	t_2^{Begin}	列车始发时刻 (下行)	6:15	τ^{DwellMin}	列车开关门时间,s	10
t^{Begin}	地铁开始运营的时刻	6:15	t^{End}	地铁结束运营的时刻	22:00	τ^{DwellMax}	列车最长停靠时间,s	45
a_1	列车加速度,m/s^2	1	a_2	列车减速度,m/s^2	1	η^{Line}	牵引网传输电能效率	0.95
m_0	列车空车净重,t	100	m_1	乘客平均质量,kg	60	η^{Eng}	电机能量效率	0.5
κ	停靠时间系数,s/人	0.0016	L	列车设计容量, 人	500			

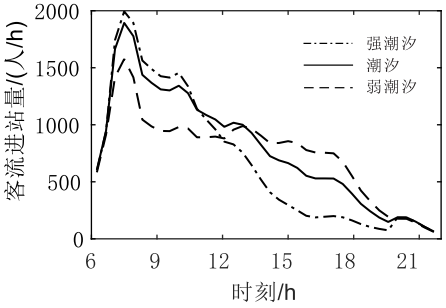
3.3 不同客流下的时刻表方案比较

本文考虑了三种客流运输场景, 即 “弱潮汐客流”“潮汐客流”“强潮汐客流”, 如图 3 所示. 其中 “潮汐客流” 场景参考了历史数据, 有明显的早晚客流高峰, 例如 8:00 时下行方向约是上行方向的 4 倍,17:45 时上行方向约是下行方向的 3 倍. “弱潮汐客流” “强潮汐客流” 则是在历史数据的基础上, 通过保持客流 OD 结构不变、调整乘客出行时间生成. 例如对某位乘客而言, 其上车位置、目的地保持不变, 但出行时间从高峰期调整到平峰期 (弱潮汐客流)、或从平峰期调整到高峰期 (强潮汐客流).

本节对 “弱潮汐客流” “潮汐客流” “强潮汐客流” 客流场景的时刻表分别进行优化, 并限制车数不超过 22. 作为对比, 本文设计了一个分时段的调度策略作为基准方案, 取 6：30-8：00 与 16：00-19：00 两个时段的发车间隔为 5min30s, 其余时段为 8min, 此时最少需要配备 22 辆车. 在优化过程中, 种群数量设为 100, 并进行 500 次迭代.



(a) 上行方向



(b) 下行方向

图 3 某工作日上下行进站客流总量

各场景的基准方案、优化方案的性能表现如图 4 所示. 该图的横纵坐标分别表示人均等待时间与列车能耗水平这两个优化目标, 不同线形代表不同场景, 图中的每个点代表一个完整的时刻表方案 (全天上下行方向所有列车的发车间隔).

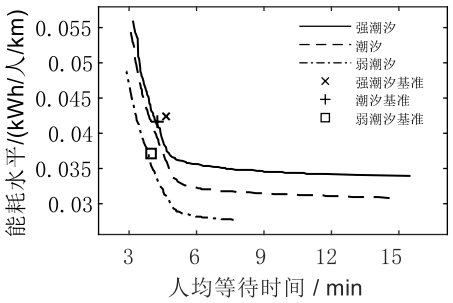


图 4 各场景的最优时刻表方案

相比于基准方案, 在保证人均等待时间不增加的前提下, “弱潮汐客流” “潮汐客流” “强潮汐客流” 场景的能耗水平分别减少了 3.8%、5.3%、10.4%. 由于基准方案采用了对称调度策略, 因此在 “弱潮汐客流” 场景下表现较好, 优化时刻表带来的收益较小. 当客流潮汐特征明显时, 通过设计非对称时刻表可以带来显著收益.

对这三个场景进行比较, 可以看到在同样的列车能耗水平下, 潮汐特征越显著, 乘客人均等待时间越长. 这是因为客流高峰期出现列车运能不足的情况; 潮汐特征越显著, 滞留的乘客数越多, 这显著增加了乘客等待时间.

3.4 不同车数下的时刻表方案比较

为了评价车数限制对时刻表制定的影响, 本文设计了五个不同的场景, 具体列车的总数以及初始分配如表 3 中所示. 基准 1、基准 2 代表了常见的调度策略. 基准 1 考虑了等间隔的调度策略, 每 6min40s 发一辆车, 最少需要配备 18 辆车; 基准 2 考虑了分时段的调度策略, 根据客流进站数据, 取 6：30-8：00 与 16：00-19：00 两个时段的发车间隔为 5min30s, 其余时段为 8min, 最少需要配备 22 辆车. 其余三个场景代表不同车数限制下的调度优化问题. 优化 1、优化 2 的车数限制分别与场景 1、场景 2 保持一致, 优化 3 代表不考虑车数限制下的场景. 在优化 1、优化 2、优化 3 的计算中, 每个场景的种群数量设为 100, 并进行 500 次迭代.

表 3 各场景列车的总数以及初始分配

	基准 1	基准 2	优化 1	优化 2	优化 3
停车场 I 初始列车数	9	11	9	11	不限
停车场 II 初始列车数	9	11	9	11	不限
列车总数量	18	22	18	22	不限

当给定车数限制后, 减少乘客等待时间意味着增加列车能耗. 当车数限制为 18 辆时, 在人均等待时间大于 5min30s 时, 通过增加较少的能耗便可以明显改善乘客体验; 当人均等待时间小于 5min30s 时, 改善乘客体验的成本会明显提高. 可以认为 5min30s 的人均等待时间为 “拐点” . 对于其它场景, 这一 “拐点” 大约在 5min 处取得. 相比于基准情形, 在限制车数 18 辆、保证等待时间不变长的情况下, 优化后的时刻表相比于等间隔方案最多节能 2.1%; 在限制车数 22 辆、保证等待时间不变长的情况下, 优化后的时刻表相比于分时段方案最多节能 6.5%.

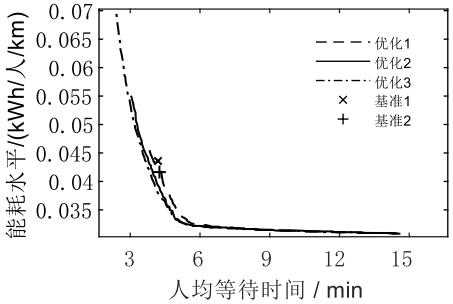


图 5 各场景的最优时刻表方案

对比不同的场景, 车数增加有利于提升地铁能效, 但这种效益是边际递减的. 当车数从 18 提升至 22 辆时, 地铁最多可以节能 7.8%; 当从 18 辆提升到足够多时, 地铁最多可以额外节能 11.1%. 当车数较少时增加车辆储备才会有比较明显的收益. 这是因

为车数较少时, 难以有富裕的列车用于调度. 图 6 为优化 1、优化 2 下某个方案停车场内列车数随时间的变化. 优化 1 中停车场大部分时间没有列车储备, 列车的调度非常紧张. 只有当线路上正在行驶的列车到达终点站, 才可以发出下一辆车. 优化 2 中停车场大部分时间都有列车可供调度, 只在短期内会出现没有列车的情况, 因此可以有更灵活的调度方式.

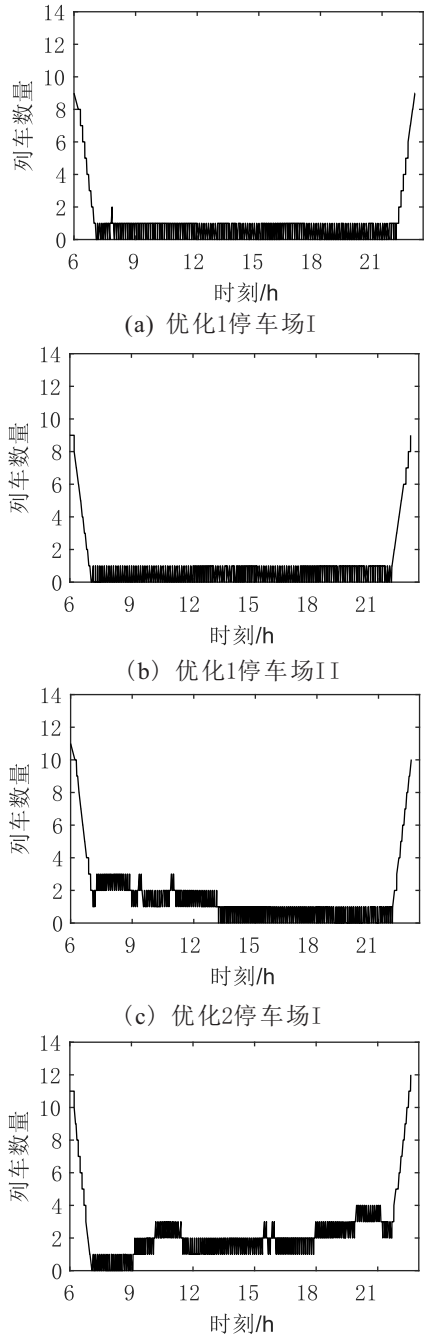


图 6 优化 1 与优化 2 中停车场内车数变化

不同场景的统计分析结果如表 4 所示. 随着车数增加, 发车总数、人均等待时间、能耗水平、总能耗的范围增大. 这里冗余车数是指已配备的车数与执行时刻表需要的最少车数之差. 从冗余车数比例来看, 当车数增加时, 会有更高比例的车辆停在停车场中等待调度, 这意味着可以有更灵活的调度方式.

表 4 各场景能耗分析结果

	基准 1	基准 2	优化 1	优化 2	优化 3
发车总数	248	266	188-300	188-362	188-466
冗余车数比例	0.00	0.00	0.00-0.27	0.00-0.38	-
人均等待时间 min	4.2	4.3	3.8-14.5	3.0-14.6	2.4-14.4
能耗 Wh/人/km	44	42	31-46	31-55	31-70
总能耗 MWh	57	54	40-60	40-71	40-90

3.5 不同列车分配方案下的时刻表比较

3.4 节中讨论了车数限制对时刻表的影响, 但所有场景中列车都是均匀分到两个停车场中. 为了探究列车初始分配的影响, 此处设置了四个场景, 并进行了讨论. 各场景的具体初始分配方案如表 5 所示. 在优化计算中, 各个场景的种群数量均为 100, 并进行 500 次迭代, 结果如表 6 所示.

表 5 各场景停车场初始列车数

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
停车场 I 初始列车数	15	11	9	7
停车场 II 初始列车数	7	11	13	15
列车总数量	22	22	22	22

一方面, 在停车场 II 配置更多的列车有利于降低列车能耗水平, 例如将 [11,11] 方案调整为 [9,13] 方案会带来 2% 左右的节能效果. 这是因为该线路存在潮汐客流, 上午下行方向客流较多, 将列车分配到停车场 II 有助于降低下行方向发车间隔. 但另一方面, 不对称的分配方式会限制最大运力. 当平均分配列车时, 人均等待时间最低可达 3.1min, 相比之下 [9,13] 方案最低达 3.7min、[7,15] 方案最低达 5.2min、[15,7] 方案最低达 5.8min. 这是因为列车分配不均匀时, 停车场中储备的列车不能及时得到补充, 无法长时间维持较短的发车间隔. 最优初始分配方案应当综合考虑能效与人均等待时间.

表 6 各场景停车场初始列车数

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
最低人均等待时间 min	5.8	3.1	3.7	5.2
能耗水平 Wh/人/km(T^{Wait} =5min)	-	33.4	32.8	-
能耗水平 Wh/人/km(T^{Wait} =6min)	33.2	32.3	32.0	31.9

3.6 非对称时刻表的优势

本节对比了对称时刻表方案与非对称时刻表方案的性能. 非对称时刻表方案是指上下行方向的发车间隔不完全相同. 此处取总车数 22 辆, 初始状态下停车场 I 放置 11 辆列车, 停车场 II 放置 11 辆列车.

在优化计算中, 两种场景的种群数量均为 100, 并进行 500 次迭代, 结果如图 7 所示.

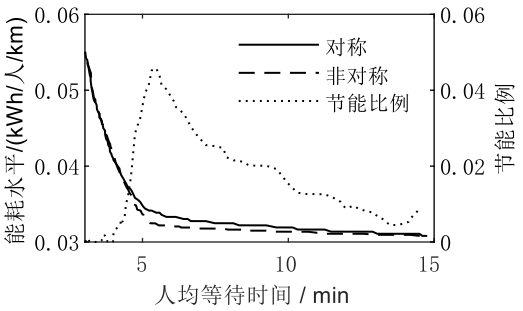


图 7 对称与非对称时刻表方案对比

非对称方案的能效优于对称方案, 在人均等待时间为 5.5min 处达到 4.6% 的峰值. 当人均等待时间低于或高于 5.5min 时, 节能比例呈现逐渐降低的趋势; 当人均等待时间低于 4.4min 或高于 11.8min 时, 两种方案的差别小于 1%. 这是因为当人均等待时间较短时, 上下行方向都会尽可能地取最短发车间隔; 当人均等待时间较长时, 上下行方向都会尽可能地取最长发车间隔. 这两种情况下非对称方案退化为对称方案, 因此在优化目标上的差别不大. 当人均等待时间在 5.5min 附近时, 时刻表的制定更加灵活, 优化空间更大, 因此具有明显的优化效果.

最后, 本文给出了非对称场景下的某个时刻表方案在 6：00-10：00 之间的部分, 如图 8 所示. 该方案的列车能耗为 0.046kWh/人/km, 乘客等待时间为 3.4min. 可以看到下行方向 7：00 前后的发车间隔较短, 因为此时正值下行方向客流高峰期.

4 结论

在给定车数限制的情况下, 为了提高地铁列车运行能效, 解决地铁潮汐客流问题, 本文建立了基于状态方程的非对称时刻表优化模型, 并对车数限制、列车初始分布、非对称时刻表进行了实验. 当客流具有潮汐特征时, 对称时刻表与客流的匹配较差, 通过设计非对称时刻表可以带来显著的收益. 当车数较少时, 增加车辆储备会有比较明显的节能效果, 例如将车数从 18 辆提升至 22 辆时最多可以节能 7.8%, 从 18 辆提升至足够多时最多节能 11.1%. 在考虑车数限制时, 最优决策方案中存在一个 “拐点”, 当乘客等待时间低于该 “拐点” 时, 改善乘客体验会明显增加列车能耗. 非对称的列车初始分布有助于降低列车能耗水平, 但同时会限制最大运力. 通过设计非对称的时刻表可以带来 4.6% 的节能效果.

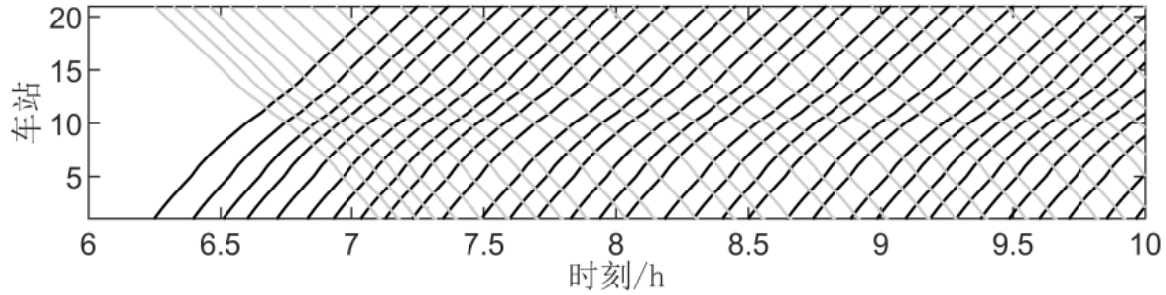


图 8 优化后的时刻表

从决策的角度上看, 车数的影响主要体现在 “拐点” 位置以及最大运能上. 当乘客等待时间高于拐点时, 不同车数场景下的能效差别不大, 多数列车并没有投入使用, 此时增加列车储备也不会带来明显的收益. 当乘客等待时间低于拐点时, 继续降低乘客等待时间会造成成本的明显增加. 此时增加车数不仅可以延缓 “拐点” 的出现, 同时可以通过更灵活的调度方式到达节能效果, 然而这种效益是边际递减的. 从运能的角度上看, 列车越多, 能够达到的最低乘客等待时间就越短, 这意味着更大的运能. 由于列车购置、维护成本的成本较高, 因此在决策列车购置数量时, 应当综合考虑成本与乘客体验.

本文考虑了线路两端设置停车场的情况, 在今后可以考虑更多的停车场设置场景, 同时加入快慢车、大小交路等调度策略. 未来可以考虑多条线路的时刻表协同优化, 以及与公交车等交通系统的接驳问题. 本文对停车场进行了建模, 如果将车数限制转变为车厢数限制, 本文工作可用于进一步探究列车动态编组问题.

参考文献 (References)

[1] 王慧. 城市轨道交通大小交路开行方案优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学,2020:1-3.
(Wang H. Optimization for Train Service Plan with Full-length and Short-turn Routes on a metro line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020:1-3.)

[2] 唐飞龙, 韩庆军. 地铁车辆能耗分析及节能措施研究 [J]. 机车电传动, 2020:142-145.

(Tang F L, Han Q J. Research on Energy Consumption and Energy Saving Measures of Metro Vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020:142-145.)

[3] 冯瑜, 陈绍宽, 冉昕晨. 考虑再生制动能利用的城市轨道交通列车节能运行优化方法研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40(2):15-22.
(Feng Y, Chen S K, Ran X C. Energy Saving Operation Optimization of Urban Rail Transit Trains Through the Use of Regenerative Braking Energy[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(2):15-22.)

[4] Xu X M, Li K P, Li X . A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(1):69-95.

[5] Yin J T, Wang Y H, Tang T. Metro train rescheduling by adding backup trains under disrupted scenarios[J]. Frontiers of Engineering Management, 2017, 4(4):418-427.

[6] Yin J T, Yang L X, Tang T. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 97:182-213.

[7] Yin J T, Chen D W, Yang L X. Efficient Real-Time Train Operation Algorithms With Uncertain Passenger Demands[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(9):2600-2612.

[8] 龙小强, 李捷, 陈彦如. 基于深度学习的城市轨道交通短时客流量预测 [J]. 控制与决策, 2019, 34(8):1589-1600.
(Long X Q, Li J, Chen Y R. Metro short-term traffic flow prediction with deep learning[J]. Control and Decision, 2019, 34(8):1589-1600.)

[9] 王秋雯, 陈彦如, 刘媛春. 基于卷积长短时记忆神经网络的城市轨道交通短时客流预测 [J]. 控制与决策, 2021, 5: 1-10.
(Wang Q w, Chen Y R, Liu Y C. Metro short-term traffic flow prediction with ConvLSTM[J]. Control and Decision, 2021, 5: 1-10.)

[10] 陈维亚, 章雍, 陈鑫. 城市轨道交通大小交路开行方案与多站联合限流协同优化研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5):177-184.
(Chen W Y, Zhang Y, Chen X. Collaborative Full-length and Short-turning Plan and Joint Multi-station Control of Passenger Flow in Urban Rail Transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(5):177-184.)

[11] Zhang M , Wang Y , Su S , et al. A Short Turning Strategy for Train Scheduling Optimization in an Urban Rail Transit Line: The Case of Beijing Subway Line 4[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018:1-19.

[12] D Canca, Barrena E , Laporte G , et al. A short-turning policy for the management of demand disruptions in rapid transit systems[J]. Annals of Operations Research, 2016, 246 (1-2):145-166.

[13] Wu J J, Liu M H, Sun H J. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015, 51: 1-18.

[14] Yang S, Liao F, Wu J, et al. A bi-objective timetable optimization model incorporating energy allocation and passenger assignment in an energy-regenerative metro system[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 133: 85-113.

[15] Yang X, Li X, Gao Z Y. A cooperative scheduling model for timetable optimization in subway systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 14(1): 438-447.

[16] Liu H J, Lv J D , Chai M . A dual-objective integrated optimization problem for energy conservation in subway systems[C]. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Auckland:IEEE, 2019: 2166-2171.

[17] Liu H J, Tang T , Lv J D , et al. A Dual-Objective Substation Energy Consumption Optimization Problem in Subway Systems[J]. Energies, 2019, 12(10): 1876-1903.

[18] Le Z , Li K P, Ye J J. Optimizing the train timetable for a subway system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2015, 229(8):2532-2542.

[19] Liu P , Yang L X, Gao Z Y. Energy-Efficient Train Timetable Optimization in the Subway System with Energy Storage Devices[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(12): 3947-3963.

[20] Yin J T, Chen D W, Zhao W T. Online adjusting subway timetable by Q-learning to save energy consumption in uncertain passenger demand[C]. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Qingdao: IEEE, 2014: 2743-2748.

[21] K Deb,A Pratap, S Agarwal. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.

[22] Ye Tian, Ran Cheng, Xingyi Zhang, and Yaochu Jin, PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization[educational forum][J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 73-87.

作者简介

张京辉(1997−), 男, 硕士, 从事智能优化算法等研究, E-mail: jinghui-15@qq.com;

陈曦(1965−), 女, 副研究员, 博士, 从事智能优化算法、马尔可夫过程、随机控制与优化的研究, E-mail: bjchenxi@tsinghua.edu.cn;

李博睿(1989−), 男, 工程师, 博士, 从事轨道交通综合系统与自动化控制等相关研究, E-mail: liborui@innohst.com.