

需求响应公交混合能源编队调度研究

于天翔, 梁士栋, 何胜学

上海理工大学 管理学院, 上海 200093

摘要:目的 探究在燃油车辆和电动车辆混合编队情况下的需求响应公交调度方式,旨在结合两种车型各自所具有的优势,从而在满足乘客个性化出行需求的同时尽可能降低运营成本。方法 提出了基于时空网络需求响应的公交调度模型,并设计了一种以总运营成本最小化为优化目标的网络进化算法,可以在满足运输需求的同时大幅优化企业运营成本。结果 以西班牙巴塞罗那数据作为实例进行研究,对实际情况下的车辆运营调度策略、电量变化情况进行了分析,并进行了敏感性分析,探究了充电功率、电池容量、用电价格等因素对总运营费用和车队规模的影响。实验表明:电动车辆的电池容量和充电效率对总运营费用影响较大,当充电功率为 180 kW,电池容量为 110 kWh,充电费用为 0.3 元/kWh 时,可得最小日均运营费用为 1 895 元。结论 燃油与电动车混合编队下的需求响应公交服务更加灵活,能够在降低运营成本的前提下满足更多样化的出行服务且降低服务所产生的碳排放。

关键词:需求响应公交;时空网络;进化算法;电动车辆;混合编队调度

中图分类号:U492.4+12 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0001.012

Scheduling of Hybrid-energy Platoons for Demand-responsive Buses

YU Tianxiang, LIANG Shidong, HE Shengxue

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective This study aims to explore the scheduling mode of demand-responsive buses in the case of a hybrid platoon of fuel-powered vehicles and electric vehicles. By combining the advantages of the two types of vehicles, it intends to meet the personalized travel needs of passengers while minimizing the operating costs. **Methods** A demand-responsive bus scheduling model based on the spatio-temporal network was proposed, and a network evolutionary algorithm with the goal of minimizing the total operating cost was designed. This algorithm significantly optimized the enterprise's operating costs while meeting the transportation demand. **Results** Taking the data of Barcelona, Spain as an example, the vehicle operation scheduling strategy and the change in electricity amount in the actual situation were analyzed, and a sensitivity analysis was conducted. The impacts of factors such as charging power, battery capacity, and electricity price on the total operating cost and the fleet size were explored. The experiment showed that the battery capacity and charging efficiency of electric vehicles have a relatively large impact on the total operating cost. When the charging power was 180 kW, the battery capacity was 110 kWh, and the charging cost was 0.3 yuan/kWh, the minimum average daily operating cost was 1,895 yuan. **Conclusion** The demand-responsive bus service under the hybrid platoon of fuel-powered and electric vehicles is more flexible. It can provide more diverse travel services and reduce the carbon emissions generated by the service on the premise of reducing the operating cost.

Keywords: demand-responsive bus; spatio-temporal network; evolutionary algorithm; electric vehicle; hybrid platoon scheduling

收稿日期:2024-02-19 修回日期:2024-06-23 文章编号:1672-058X(2026)01-0097-09

基金项目:教育部人文社会科学研究一般项目(23YJCZH120)资助。

作者简介:于天翔(1998—),男,硕士研究生,从事共享交通研究。

通信作者:梁士栋(1990—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,从事车辆优化调度研究。Email:sdliang@hotmail.com.

引用格式:于天翔,梁士栋,何胜学.需求响应公交混合能源编队调度研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(1):97-105.

YU Tianxiang, LIANG Shidong, HE Shengxue. Scheduling of hybrid-energy platoons for demand-responsive buses[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(1): 97-105.

随着人们出行需求的不断提升,对出行方式的选择也更趋于多样化。作为对传统公共交通的补充,需求响应式公交最早于 2013 年在我国部分城市进行推广。相比于传统公共交通,需求响应式公交可以为乘客提供更为舒适且高质量的点到点运输服务,且可以充分利用公交专用道,进一步缩短行程时间^[1]。在互联网和大数据技术的推动下,需求响应式公交不能再满足于固定的发车线路形式,而是能够对乘客出行需求的及时响应,灵活调动线路以接送乘客,这就要求从需求响应公交的调度层面进行优化。另一方面,虽然目前营运车辆已逐渐替换为电动车辆,但不可忽视电动车辆的续航里程会随环境、温度等因素发生变化,在某些情况下无法满足运营需求的可能性^[2]。因此,为了提供更稳定灵活的需求响应公交服务,有必要考虑燃油、电动车辆混合编队的需求响应公交调度问题。

当前针对需求响应式公交的研究主要可以分为两类,一是针对需求响应式公交调度模型的优化^[3-5],二是针对调度模型算法的改进^[6-8]。例如,Calabro 等^[4]提出了一个交通系统的连续近似模型,可以充分结合固定路线公交和响应式公交,从而通过大幅减少主要道路的行程时间,显著降低用户相关成本。高虹等^[5]针对模块化电动公交车提出了一种新的调度优化模型,该模型考虑了站点需求响应,成功降低了站点滞留乘客数量。类似地,高天洋等^[6]研究了模块化公交模式,他们构建了区域灵活接驳公交线路的优化模型,以最小化系统总成本为目标,结果显示:与固定容量的接驳公交相比,模块化车辆可以显著减少成本。胡凯等^[7]考虑了时变路网和碳排放等因素对车辆调度的影响,提出了自适应遗传-萤火虫算法以减少公交车运营造成的碳排放。李欣等^[8]针对常规公交线网资源利用失衡和乘客出行时间过长的问题,设计了一种双模式线网结构,从而降低乘客出行成本和公交运营成本。任婧璇等^[9]考虑了乘客对接驳服务全过程的需求以及城市道路特性,他们构建了车队规模配置和车辆路径联合优化模型,并通过引入候选站点减少了运营成本。杜恒等^[10]对需求响应式公交出行行为进行了分类研究,提出了需求响应式公交未来发展的重要方向。张汝华等^[11]从运行服务水平的维度提取了影响因素,构建了运行服务水平指标体系,推动了需求响应公交运营服务的优化。

上述研究讨论了需求响应公交的评价方式和线路优化模型及算法,但仅考虑了单一车型编组的运营方

式。而对混合能源编队的研究仅在传统定线公交服务中有所涉及,例如 Boyer 等^[12]将混合整数线性规划模型与变邻域搜索算法相结合,以解决混合能源编队的车辆及人员调度问题。Amberg 等^[13]验证了在考虑鲁棒性和资源合理运用条件下的公共交通车辆及人员调度方法。Simoes 等^[14]提出了一种用于求解多站点车辆及人员调度问题的精确启发式算法。Andrade-Michael 等^[15]提出了考虑司机可靠性信息的公交车车辆及司机调度问题,以减少全天的非覆盖行程数量,从而提高用户满意度。Perumal 等^[16]介绍了一种在预定行程和充电站已知情况下的电动公交与燃油公交的综合调度问题。Wang 等^[17]充分考虑电动化进程和低碳运营理念,将燃油公交作为电动公交的补充,优先用于短途线路或站点较少的线路。对于更加复杂的混合编队车辆调度问题,Zhou 等^[18]提出了一种多目标双层优化模型来优化混合编队的车辆调度以及充电安排问题。将续航里程和充电限制考虑在内后,Li 等^[19]提出了一种整数线性规划模型,用于解决多站点多车型的调度问题。

综上所述,虽然目前针对需求响应公交调度模型的研究已较完备,但缺少对混合编队车型的相关研究。因此,本文针对这个问题,构建了以时空网络为基础的考虑油电混合编队的需求响应调度模型,并设计一种改进的网络进化算法进行求解,以实现需求响应公交混合能源编队调度。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

当有一定数量的出行需求订单提交至需求响应公交运营系统中时,系统会根据企业预设目标在订单池中筛选合适的订单生成运输任务,并分派车辆完成,一辆车完成的一次运输任务被称为一个车次。图 1 展示了两种不同能源类型的车辆在一个运营周期内的调度时刻表,由于燃油车辆具有续航长的优势,因此在一天的运营过程中无需进行加油操作,调度更加自由。而电动车辆由于电池容量限制,单次充电无法满足运营需求,因而需要在运输空闲间隙进行充电,且调度中也需要考虑车辆的剩余电量是否能满足后续运输任务,增加了调度的复杂程度。因此当运营公司车队中同时包含燃油车辆与电动车辆时,就需要确定运营车队的规模以及其中燃油车辆、电动车辆的比例,并在确保所有运输任务顺利完成的同时,降低公司的运营成本。

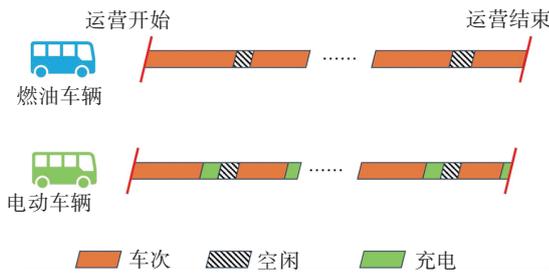


图 1 不同能源车辆调度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the scheduling of buses with different energy sources

为解决上述问题,本文采用时空网络对需求响应公交车次串联问题进行建模,生成若干个满足目标条件的车次链以待车辆分配,并在此基础之上引入多个决策变量和约束条件体现燃油车辆与电动车辆的运营特征区别,随后设计了一种基于网络的进化算法对其进行求解,得到满足目标的调度方式和车队配置。

1.2 模型构建

本文构建了一种基于时空网络的需求响应公交调度模型,该模型为混合整数线性规划模型。其目标函数为企业总运营费用,包含运营成本、能源、延误等多项指标。约束条件包含两部分,第一部分为站点、车次、流量等基本约束,用于保证需求响应公交服务的正常运行;第二部分主要为不同能源车辆续航约束,用于判断所选车型是否可以满足给定的运营任务,并加以优化。

首先定义车场 $d \in D$, 其中集合 D 表示车场集合; 车次 $p \in P$, P 为所有车次集合; 需求响应公交车辆 $k \in K$, K 为所有车辆集合; 连接集合 C ; 出场弧集合 P^O 以及入场弧集合 P^I 。 $(p, q) \in C$ 表示联接车次 p 与 q 的一个可行连接; $(d, p) \in P^O$ 表示联接车场 d 与车次 p 的车辆出场弧; $(p, d) \in P^I$ 表示联接车次 p 与车场 d 的车辆入场弧。图 2 展示了一辆需求响应公交车在一个完整的运营周期内的时空网络抽象图, 图中分别展示了车辆从驶出车场、运行多个车次最后回到车场的完整过程。可见运用时空网络的方式可以较好地描述需求响应公交的运营方式。

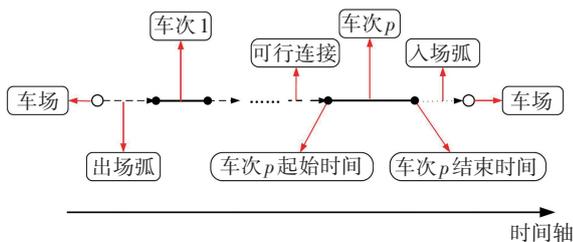


图 2 运营车辆时空网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spatio-temporal network of operating buses

基于上述时空网络相关变量,可以总结本文模型中对应的各变量及其含义如表 1 所示。

表 1 模型变量及参数

Table 1 Model variables and parameters

变量名	描述
p, q	车次, $p, q = 1, 2, \dots$
k	车辆编号, $k = 1, 2, \dots$
d	车场编号, $d = 1, 2, \dots$
P	车次集合, $p \in P$
K	车辆集合, $k \in K$
C	连接集合, $(p, q) \in C$
P^O	出场弧集合, $(d, p) \in P^O$
P^I	入场弧集合, $(p, d) \in P^I$
$t_{p, start}, t_{p, end}$	车次 p 的开始时刻和结束时刻, min
t_p	车次 p 的行程时间, min
T	总运营时间, min
C_p^M	车次 p 的排放费用, 元
$C_{C(p,q)}^E$	车次 p 和 q 之间充电费用, 元
C_p^F	车次 p 的燃油费用, 元
$C^{B,E}$	电动车辆日均用车成本, 元
$C^{B,F}$	燃油车辆日均用车成本, 元
c^M	CO ₂ 排放单价, 元/g
c^E	充电电价, 元/kWh
c^F	燃油价格, 元/L
S_p	车次 p 所驶过的路段集合
s	子路段, $s \in S_p$
L_s	子路段长度 s , m
v_s	车辆在路段 s 上的平均速度, m/s
$x_{k, (p,q)} \in \{0, 1\}$	0, 1 变量, 当车辆 k 选择连接 (p, q) 时为 1
$x_{k, (d,q)} \in \{0, 1\}$	0, 1 变量, 当车辆 k 选择出场弧 (d, q) 时为 1
$x_{k, (p,d)} \in \{0, 1\}$	0, 1 变量, 当车辆 k 选择入场弧 (p, d) 时为 1
$x_k^E \in \{0, 1\}$	0, 1 变量, 当车辆 k 为电动车时为 1
$x_k^F \in \{0, 1\}$	0, 1 变量, 当车辆 k 为燃油车时为 1

1.3 目标函数

根据上述的超级时空网络以及各参变量,可以构建以综合费用最优为目标的需求响应公交调度模型如下:

$$\min f(x) = \sum_{k \in K} \sum_{(p,q) \in C, (p,d) \in P^I} x_{k, (p,q)} (C_p^M (1 + x_{k, (p,d)}) + x_k^E (C_{C(p,q)}^E + C^{B,E}) + x_k^F (C_p^F (1 + x_{k, (p,d)}) + C^{B,F})) \quad (1)$$

式(1)中,优化目标 $f(x)$ 表示所有接续的综合费用,由车辆运行时的碳排放等价费用、电动车辆充电费用、燃油车辆加油费用以及日均用车成本 4 部分构成。主要决策变量有五个,其中 $x_{k, (p,q)} \in \{0, 1\}$ 为接续是否被利用的指示变量,当车辆 k 利用接续 (p, q) 时,其值为 1。同理, $x_{k, (d,q)} \in \{0, 1\}$ 和 $x_{k, (p,d)} \in \{0, 1\}$ 分别为出场

弧、入场弧是否被利用的指示变量,当车辆利用该弧时,其值为 1。 $x_k^E \in \{0,1\}$ 为电动车辆指示变量,当车辆 k 为电动车辆时,其值为 1。 $x_k^F \in \{0,1\}$ 为燃油车辆指示变量,当车辆 k 为燃油车辆时,其值为 1。 C_p^M 为车次 p 从起始点运行至终止点所产生的碳排放经过系数转化后的费用。 $C_{(p,q)}^E$ 为接续 (p,q) 之间电动车辆充电产生的充电费用,电动车辆可以在服务完车次 p 回到场站而车次 q 尚未开始的这段时间内进行充电,充电时长等于 $t_{(p,q)}$ 。 C_p^F 为车次 p 从起始点运行至终止点所消耗的燃油经转化后得到的燃油费用,在本研究中,认为一辆需求响应式公交车所携带燃油可以满足一天的运行需求,因此可以忽略燃油车辆油量不够的问题以及加油所需的时间。 $C^{B,E}$ 和 $C^{B,F}$ 分别表示电动车辆和燃油车辆的日均用车成本。

1.4 约束条件

本节对约束条件进行介绍。由于本文采用了时空网络框架,因此首要考虑的是在网络中车辆及车次服务的规则,保证时空网络是联通的,且任意一辆车都可从网络中最左侧的车场出发,并在服务完若干车次后回到网络中最右侧的车场如式(2)一式(5):

$$\sum_{(q,p) \in C} x_{k,(q,p)} + \sum_{(d,p) \in P^0} x_{k,(d,p)} = \sum_{(p,d) \in P^I} x_{k,(p,d)} + \sum_{(p,q) \in C} x_{k,(p,q)}, \quad (2)$$

$$\forall k \in K, p \in P, q \in P$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{(d,p) \in P^0} x_{k,(d,p)} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{(p,d) \in P^I} x_{k,(p,d)} = 1, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{q \in O_p} x_{k,(p,q)} = 1, \forall p \in P \quad (5)$$

其中,约束条件式(2)表示流经任意车次 p 的网络流量守恒,即流入量等于流出量,从而保证了网络的连通性和方向性。式(3)表示流出所有车场的各类网络流量之和等于 1,即车辆总是从车场出发,避免出现孤立车辆的情况。式(4)表示流入所有车厂的各类网络流量之和等于 1,即车辆最终总是回到车场,保证了在整个运营周期内总车辆数保持恒定。式(5)表示一个车次都由且只由一辆车服务,从而避免了重复服务的可能性。

接着,由于模型中涉及多个决策措施,因此本文给出 5 个 01 决策变量如式(6)一式(11),具体含义已在目标函数中进行介绍。

$$x_{k,(p,q)} \in \{0,1\}, \forall k \in K, p, q \in P \quad (6)$$

$$x_{k,(d,q)} \in \{0,1\}, \forall k \in K, d \in D, q \in P \quad (7)$$

$$x_{k,(p,d)} \in \{0,1\}, \forall k \in K, p \in P, d \in D \quad (8)$$

$$x_k^E \in \{0,1\}, \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_k^F \in \{0,1\}, \forall k \in K \quad (10)$$

最后,给出模型中各部分费用计算方法如式(11)一(13)所示:

$$C_p^M = c^M \sum_{s \in S} \left(\frac{\alpha \times v_s^2 + \beta \times v_s + \gamma + \delta/v_s}{\varepsilon \times v_s^2 + \zeta \times v_s + \eta} * L_s \right) \quad (11)$$

$$C_{(p,q)}^E = c^E * t_{(p,q)} \quad (12)$$

$$C_p^F = c^F \sum_{s \in S_p} \lambda^F L_s \quad (13)$$

式(11)为车次 p 的碳排放量计算方式,其中 c^{Em} 为碳排放价格(元/g), S_p 为车次 p 中路段集合, $s \in S_p$ 表示其中一个路段, L_s 为该路段长度, v_s 为该路段平均速度, $\alpha, \beta, \lambda, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$ 等为 COPERT 碳排放计算模型中的系数。式(12)表示电动车在接续上的充电费用,其中 c^E 为充电单价(元/(kWh))。式(13)表示燃油车辆的油耗费用,其中 c^F 为燃油单价(元/L), λ^F 为平均每公里油耗(L/km)。

2 算法设计

一般来说,需求响应公交调度问题可以有两种方式求解,分别为精确算法和启发式算法。其中精确算法适用于数据量较小的问题,而启发式算法则多用于接近实际情况的大规模问题求解。考虑到本文所研究问题的需要满足实际运用需求,因此本文选择启发式算法中的遗传算法进行求解。

然而,由于本文引入了时空网络对问题进行描述,考虑到车次链在网络中的拓扑特征,遗传算法在执行变异、进化等操作后可能会产生较多的不可行车次链,从而减少可行解的数量,进而导致求解效率低下,难以求得最优结果。为此,本文设计了一种基于网络的进化算法(Network-based Genetic Algorithm, NGA),该算法在经典进化算法的基础上,对变异过程进行改进,从而保证所生成的解均为可行解。下文将对该算法进行详细介绍。

步骤 1 可行解生成:将所有车次按起始时间升序排列,并逐一启用一辆空闲车辆按顺序覆盖车次直至到达运营结束时间,重复上述步骤即可获得覆盖所有车次的若干条车次链,每条车次链代表着一辆需求响应公交的运营时刻表,即为一个可行解。

步骤 2 交叉:考虑到车次链连续性的重要性,传统的互换交叉方式容易在一个车次中插入无法满足的需求订单,造成该车次无法运行,导致不可行解的生成,因此本文对交叉方式进行改进。当选中若干条车次链

进行交叉时,首先将车次链中已选择的出、入场弧和连接设为高优先级,在随后的重新组合中,以一定概率优先选择高优先级的元素,并与原可行解进行对比,若产生的新解与原可行解相同,则重复以上步骤直至产生新的不同可行解,这种方法能保证插入的新需求满足车次的运行要求。

步骤 3 变异:与交叉相同,传统的变异方式容易生成较多的不可行解,因此本文也对其进行改进,具体方式如图 3 所示。带数字标示的圆圈表示具有相应序号的车次;带箭头的实线表示被当前车次链集合所采用的接续,其中接续(1,3)假设为当前被选中的接续;带箭头的虚线表示未被采用的接续。对一个给定的可行车次链进行变异操作就是逐一对其实际采用的出场弧、入场弧和接续进行是否实施变异操作的判断并在需要变异时进行合理的改变。以对图 2 中接续(1,3)的变异操作为例,首先以车次 1 为起始车次,在超级时空网络中找出与后续相接的其他车次,即车次 4 和 5;然后在上述车次中任取一个,如车次 5,在当前可行车次链集合中找到与该车次前向相连的车次 2;最后判断车次 2 与接续(1,3)的终止车次 3 之间是否存在可行的接续,这里存在可行接续(2,3),于是结束上述对具有回路特征的接续的搜索与判断,并用新的接续(2,3)和(1,5)替换原来的接续(1,3)和(2,5)。当在上述操作中,未发现连通的具有回路特征的接续时,需返回前面步骤重新选择可能的路线,如在第 2 步选择车次 4,而不是车次 5 继续进行分析。

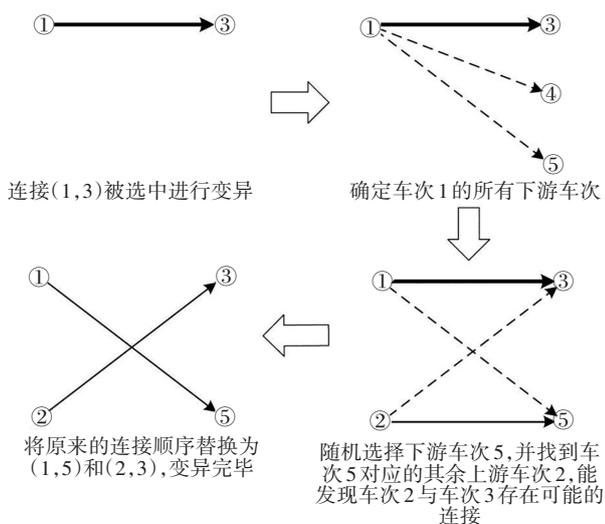


图 3 变异步骤示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mutation steps

步骤 4 可行解检验及适应度函数计算:在进行上述操作时,首先默认执行所有车次链的车辆均为电动车辆。在完成操作后,首先计算当采用电动车辆运营

车次链对应的运输任务时,是否存在续航不足的情况,若存在,则将对对应车次链的车辆替换为燃油车辆,执行完此步骤后,计算适应度函数并继续迭代直至达到迭代次数上限。

3 仿真实验与结果分析

3.1 实验数据说明

本文采用 Satori 等^[20]提供的巴塞罗那运输任务数据,该数据包含上车地点、下车地点、时间窗、各坐标点之间的行程时间矩阵等,随后本文利用 Satori 等提出的 PDPTW 求解算法对其进行计算,获得一天内由上午 7:00 至晚上 9:00 之间共 50 个运营车次,其中最短运营时间为 33 min,最长运营时间为 102 min。部分车次数据如表 2 所示。

表 2 实验数据

Table 2 Experimental data

车次编号	开始时间/点/min	结束时间/点/min	服务乘客数	服务时间/min	服务距离/km
1	112	222	14	66	28
2	251	319	8	41	13
3	365	577	12	67	28

3.2 算法对比

本文将经典遗传算法(GA)与本文所设计的基于网络的进化算法进行对比实验,其迭代收敛图及目标函数对比如图 4 所示。从图 4(a)可以看到 NGA 算法在初始值上明显优于遗传算法。这表明 NGA 算法从一开始就在目标函数上取得了更好的性能,具有更低的初始值。此外,NGA 算法的迭代曲线呈现出更快的下降速度,这意味着它在每次迭代中都能够更快地逼近最优解,表明其具有更快的收敛性能,由于其独特的成长过程,具有更强的寻优能力,能够更快地找到最优解或者接近最优解,而 GA 算法无法较好地处理车次链的顺序问题,会生成较多不可行车次链污染群体,因此导致收敛速度较慢。

图 4(b)中的目标函数箱型图由两种算法各实验 50 次所得,显示了 NGA 算法和 GA 算法的目标函数值分布情况。从箱型图中可以清楚地看出,NGA 算法的目标函数值分布更为集中,箱体较小,而 GA 算法的箱体相对较大且分布更为分散,NGA 算法所得最差目标函数相比 GA 算法所得最优目标函数仍小 3.2%,这表明 GA 在多次迭代中能够产生更为稳定且相对优越的结果,与图 4(a)中观察到的迭代速度更快的现象相一致,证明了本文所设计算法的有效性。

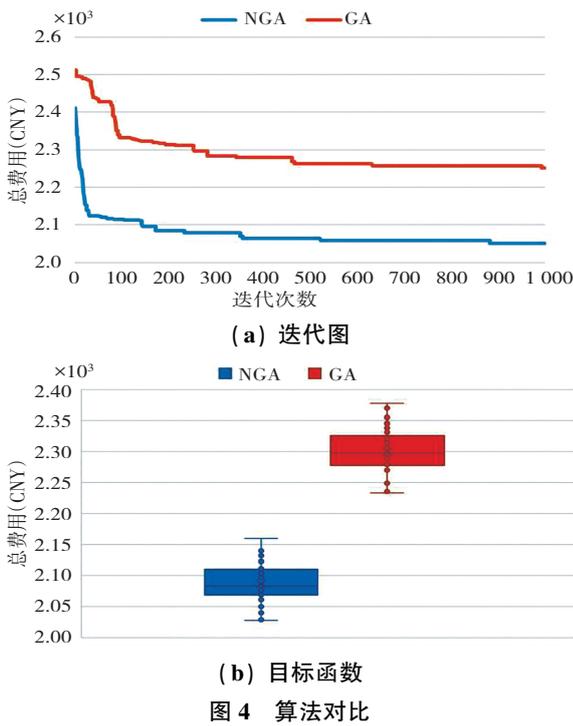


图 4 算法对比

Fig. 4 Comparison of algorithms

3.3 实验结果分析

以上述数据为基础,并设定各参数 $c^{Em} = 57$ 、 $c^E = 0.45$ 、 $c^F = 6.82$ 、 $C^{B,E} = 136.98$ 、 $C^{B,F} = 78.77$,基准电池容量 110 kWh,充电功率 120 kW。利用 python 编程对本文所提出的模型进行求解,相关实验在一台采用 i7-

12700H 处理器,16 G 内存的电脑上完成,耗时 389 s。最优总费用为 1 956.4 元,具体结果如表 3 所示,而调度过程以及电动车辆 SOC 曲线可见图 4。

由表 3 可以看出,上述 50 个车次的运输任务可由 7 辆需求响应公交车辆完成,其中编号为 6、7 的车辆能源类型为燃油,其余均为电动车辆。两辆燃油车辆所服务的车次数分别为 8 次和 9 次,均高于电动车辆的服务车次数,而从总费用角度上来看,燃油车辆所需费用相比电动车辆所需费用平均增加了 37.4%,该部分主要是由于柴油加油费用以及燃油车辆排放费用所产生的。相比之下,尽管电动车辆的费用显著低于燃油车辆,但其成本组成中近一半为车辆购置费用,且对比燃油车辆可以发现,电动车辆的购置成本高 42.5%,同时,还需考虑到电动车电池容量限制导致其无法承担高密度频繁的运输任务,因此车队中需要保留一定数量的燃油车辆。

由图 5 可以看出,车辆编号 6、7 的燃油车辆所服务的车次存在单次运营时长较长,运营频次高,运营间隔短的特点。对其进行分析认为,燃油车辆优势在于续航里程较长,相邻车次之间无需补充燃油,因此分派燃油汽车服务于部分里程较长且发车相对密集的车次,能有效解决电动车辆的续航和充电问题。而车辆编号 1 至 5 的电动车辆所服务的车次平均运行时长较短,且车次之间间隔较长,能够满足电动车辆的充电需求。

表 3 部分实验结果

Table 3 Partial experimental results

车辆编号	能源类型	服务车次数量/个	剩余电量/(kWh)	剩余油量/L	充电费用/(CNY)	燃油费用/(CNY)	排放费用/(CNY)	车辆成本/(CNY)	总费用/(CNY)
1	电动	7	15.7		89.6		23.5	136.9	246
2	电动	6	26.8		75.9		18.1	136.9	230.9
3	电动	7	22.4		87.2		17.4	136.9	241.5
4	电动	7	19.7		84.5		15.5	136.9	236.9
5	电动	6	28.5		82.1		19.2	136.9	238.2
6	燃油	8		54		259.1	73.3	78.7	411.1
7	燃油	9		61		211.4	61.7	78.7	351.8

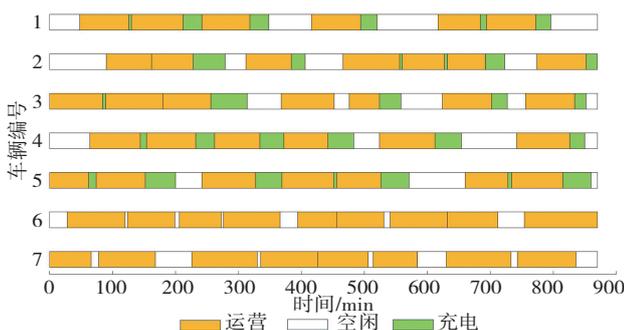


图 5 需求响应公交运营调度表

Fig. 5 Operation and scheduling table of demand-responsive buses

3.4 敏感性分析

在上述实验的基础之上,本文通过改变电动车辆续航里程、充电功率及用电费用 3 个指标进行求解,分析不同变量对于需求响应公交车队总体规模以及其中电动车辆规模的影响。

图 6 展示了在不同电池容量和充电功率条件下,燃油和电动车辆混合编队车队调度的结果,从总运营费用的角度来看,充电功率和电池容量对其有显著影响。当充电功率保持不变时,分析电池容量与总运营

费用的关系可以看出:总费用随电池容量减小逐渐增大,呈现先下降后上升的趋势。当电池容量为 110 kWh 至 130 kWh 范围内,总费用有最小值,均在 2 000 元以下。显然,当电池容量过小时,由于车辆续航较短无法满足运营需求,因此更多的车辆导致了费用升高。而当电池容量高于 130 kWh 时,此时影响总费用的因素则包含了充电时间、用车成本和车重。从充电时间来说,较大容量的电池通常需要更长的充电时间。虽然技术正在不断改进,但充电时间仍然是一个重要的考虑因素,这可能对公交车的日常运营时间产生影响,造成电动车辆利用率较低,从而需要采购更多车辆应对运输任务。从用车成本来说,电池是电动公交车最昂贵的部件之一,电池容量会直接影响车辆的制造成本。较大的电池通常成本更高,导致车辆的购买成本增加,也就增加了用车成本。从车重角度来说,更大容量的电池通常意味着更高的重量。车辆的重量对能源效率、悬挂系统、制动系统和整体性能都有影响。较大的电池容量可能会增加车辆的重量,从而影响其能耗和性能,最终降低电动车辆利用效率,导致运营企业不得不购买更多车辆。

量进行分析可以发现,当充电功率为 180 kW,电池容量为 110 kWh 时,总费用最低,为 1 895 元。而当充电功率为 70 kW,电池容量为 50 kWh 时,总费用最高,为 4 322 元。同时,随着电池容量和充电功率的减小,总费用逐渐上升。

综合图 7 中电动车辆规模和车队总规模进行分析,我们发现,在电池容量和充电功率较小时,由于电动车辆无法满足运营需求,需要增加车队总体规模至 12 辆车,其中包括 8 辆电动车辆和 4 辆燃油车辆,以保证最小化运营费用的同时保证运营质量。然而,保持电池容量不变,充电功率提升时,车队中电动车辆的占比逐渐增加。这表明虽然电动车辆无法胜任连续长距离运输任务,但由于较高的充电功率,即使运输任务间隔较短,车辆仍能充入足够的电量完成任务。而保持充电功率不变,逐渐增加电动车辆的电池容量时,车队完全由电动车辆组成。这说明当电动车辆续航能力足够长时,它们可以与燃油车辆相媲美,并且由于电动车辆的低运营成本特性,由电动车辆组成的车队足以在降低运营费用的同时完成所有运输任务。

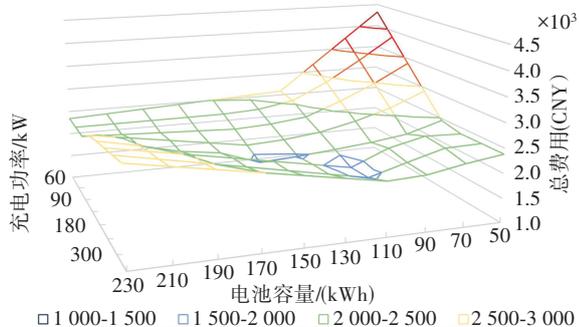
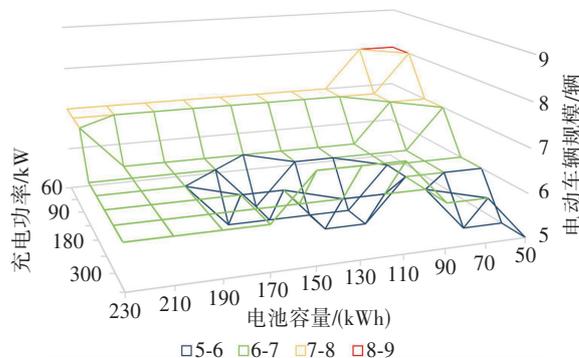


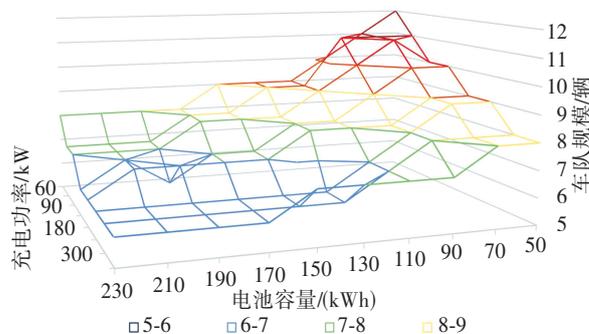
图 6 充电功率和电池容量对费用的影响

Fig. 6 Impact of charging power and battery capacity on cost

从充电功率的角度来看,影响总费用的因素主要包括充电时间、设备成本、电池寿命、能源效率、运营策略等。从充电时间角度来说,充电功率直接影响电动公交车的充电时间。更高的充电功率意味着车辆可以更快地获得所需的充电量,从而减少车辆充电时间。这对于公交车运营来说非常关键,因为较短的充电时间可以提高车辆的运营时间和可用性,从而减少在充电站停留的时间。从设备成本角度来说,较高的充电功率通常需要更强大的充电设备,这可能会增加充电基础设施的建设和维护成本。结合充电功率及电池容



(a) 充电功率和电池容量对电动车辆规模的影响



(b) 充电功率和电池容量对车队规模的影响

图 7 充电功率和电池容量对电车规模和总规模的影响
Fig. 7 Impact of charging power and battery capacity on the size of electric vehicles and total vehicle size

图 8 分析了用电价格以及充电功率对运营费用的影响。充电价格是电动公交车运营中至关重要的经济因素,直接影响着车辆的运营成本。充电价格的高低不仅决定着能源成本的结构,还影响着运营成本的可预测性,稳定的价格有助于预算和规划。此外,充电价格也会影响车辆的充电策略和电池管理方式,低成本的充电可能鼓励更频繁充电以降低每次充电成本,并促使更好的电池管理。然而,高波动的充电价格可能增加运营不确定性,影响投资回报率,甚至影响电动公交车在市场上的竞争力。因此,充电价格在制定电动公交车运营策略时扮演着至关重要的角色。从图 8 可以看出,当电池容量相同时,总费用总是在充电价格最低时达到最小值,并随着充电价格升高而升高。

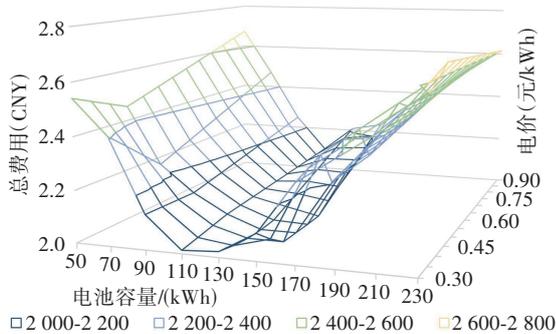


图 8 充电功率和电价对总费用的影响

Fig. 8 Impact of charging power and price of electricity on the total cost

4 结论与讨论

本文基于 Satori 等^[20]提供的西班牙巴塞罗那运输数据,构建了超级时空网络框架,并对需求响应公交车次串联问题进行建模,在考虑燃油、电动公交车混合编队的背景下,以总运营费用最优为优化目标构建模型。并在经典遗传算法难以求解此问题的背景下,提出了改进的网络进化算法,分别对车辆的运营调度, SOC 变化情况进行了分析,深入探讨了充电功率、电池容量、用电价格等对总运营费用的影响,具体结论如下。

实验表明:以电动车辆为主、燃油车辆为辅的编队策略能够更为有效地提升运营效益。从运营角度考虑,全电动车辆编队加大了充电调度的困难,难以满足长距离运输需求,且电动车购置、维护成本较高,显著增加运营企业成本。而全燃油车辆编队则会显著增加碳排放,与低碳环保理念不符,且燃油费用远高于充电费用,同样会增加成本。在编队中,两种能

源类型车辆所服务对象也有所不同,燃油车辆主要服务于较长路线,且可以满足更为频繁的运营需求。而电动车辆主要服务于较短路线,并且需要合理的间隔时间以进行充电。

根据敏感性分析可知,相比于燃油车辆,电动车辆相关费用对运营总成本的影响更大,其中电动车辆的电池容量以及充电功率的影响尤为显著。电池容量影响着车辆的续航里程,较小的电池容量会导致运输需求无法满足,必须通过增加车辆数以弥补;而较大的电池容量会增加车辆购置、维护的成本,增加的重量也会影响车辆能耗和性能。充电功率决定了车辆的充电时长,与电池容量类似,较小的充电功率会增加充电时长,而较大的功率对充电设备要求也较高,因而导致成本的增加。实验结果显示:当充电功率为 180 kW,电池容量为 110 kWh,充电费用为 0.3 元/kWh 时,可得最小运营费用为 1 895 元。

本文也同样存在一些局限性,如假设电动车辆电池容量为定值,且车辆行驶功率恒定不变,然而实际中电池容量受环境温度影响较大,车辆行驶功率也同样随着交通情况、环境温度改变而改变,这直接影响了电动车辆的续航里程,从而对车辆调度提出新的挑战,这部分内容有待后续进行研究。

参考文献(References):

- [1] 宋翠颖, 王鹤玲, 田泽尚, 等. 需求响应式公交车车辆调度模型和算法研究综述[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(4): 31-44.
SONG Cui-ying, WANG He-ling, TIAN Ze-shang, et al. Review of demand-responsive transit vehicle scheduling models and algorithms[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(4): 31-44.
- [2] VEHVILÄINEN M, LAVIKKA R, RANTALA S, et al. Setting up and operating electric city buses in harsh winter conditions[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2762.
- [3] GONG M, HU Y, CHEN Z, et al. Transfer-based customized modular bus system design with passenger-route assignment optimization[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 153: 102422.
- [4] CALABRÒ G, ARALDO A, OH S, et al. Adaptive transit design: Optimizing fixed and demand responsive multi-modal transportation via continuous approximation[J]. Transportation

- Research Part A: Policy and Practice, 2023, 171: 103643.
- [5] 高虹, 刘锴, 姚恩建. 站点需求响应的电动模块公交车重组调度优化[J]. 中国公路学报, 2024, 3: 1-20.
GAO Hong, LIU Kai, YAO En-jian. Formation and scheduling optimization of electric modular buses with station-based demand responsive[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 3: 1-20.
- [6] 高天洋, 胡大伟, 姜瑞森, 等. 基于模块化车辆的区域灵活接驳公交线路优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 2: 1-9.
GAO Tian-yang, HU Da-wei, JIANG Rui-sen, et al. Optimization of regional flexible bus lines based on modular vehicles[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2024, 2: 1-9.
- [7] 胡凯, 袁鹏程, 李佑霖. 时变路网下考虑碳排放的需求响应型公交调度优化模型[J]. 计算机应用研究, 2024, 2: 1-14.
HU Kai, YUAN Peng-cheng, LI Ji-lin. Demand-responsive bus dispatching optimization model considering carbon emissions under time-varying road network[J]. Computer Application Research, 2024, 2: 1-14.
- [8] 李欣, 林小敬, 许航, 等. 需求响应公交网络化运营优化模型[J]. 计算机应用, 2023, 43(S1): 288-92.
LI Xin, LIN Xiao-jing, XU Hang, et al. Demand response bus network operation optimization model [J]. Computer Applications, 2023, 43(S1): 288-292.
- [9] 任婧璇, 常孝亭, 巫威眺, 等. 考虑候选站点和全服务过程的需求响应接驳公交调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 202-214.
REN Jing-xuan, CHANG Xiao-ting, WU Wei-tiao, et al. Demand responsive feeder transit scheduling considering candidate stops and full-service process[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 202-214.
- [10] 杜恒, 王宇, 张亚坤, 等. 需求响应式公交出行特征分析[J]. 综合运输, 2022, 44(8): 54-62, 91.
DU Heng, WANG Yu, ZHANG Ya-kun, et al. Analysis on resident travel characteristics of demand-responsive public transport[J]. China Transportation Review, 2022, 44(8): 54-62, 91.
- [11] 张汝华, 赵冰. 需求响应式公交运行服务水平指标体系构建与测度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(11): 41-51.
ZHANG Ru-hua, ZHAO Bing. Establishment and measurement of demand responsive transit operation service level index system[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(11): 41-51.
- [12] BOYER V, IBARRA-ROJAS O J, RÍOS-SOLÍS Y Á. Vehicle and crew scheduling for flexible bus transportation systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 112: 216-229.
- [13] AMBERG B, AMBERG B, KLIEWER N. Robust efficiency in urban public transportation: Minimizing delay propagation in cost-efficient bus and driver schedules[J]. Transportation Science, 2019, 53(1): 89-112.
- [14] SIMÕES E M L, DE SOUZA BATISTA L, SOUZA M J F. A matheuristic algorithm for the multiple-depot vehicle and crew scheduling problem[J]. IEEE Access, 2021, (9): 155897-155923.
- [15] ANDRADE-MICHEL A, RÍOS-SOLÍS Y A, BOYER V. Vehicle and reliable driver scheduling for public bus transportation systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 145: 290-301.
- [16] PERUMAL S S G, DOLLEVOET T, HUISMAN D, et al. Solution approaches for integrated vehicle and crew scheduling with electric buses[J]. Computers & Operations Research, 2021, 132: 105268.
- [17] WANG J, WANG H, CHANG A, et al. Collaborative optimization of vehicle and crew scheduling for a mixed fleet with electric and conventional buses[J]. Sustainability, 2022, 14(6): 3627.
- [18] ZHOU G J, XIE D F, ZHAO X M, et al. Collaborative optimization of vehicle and charging scheduling for a bus fleet mixed with electric and traditional buses [J]. IEEE Access, 2020, 8: 8056-8072.
- [19] LI L, LO H K, XIAO F. Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 104: 443-462.
- [20] SARTORI C S, BURIOL L S. A study on the pickup and delivery problem with time windows: Matheuristics and new instances[J]. Computers & Operations Research, 2020, 124: 105065.

责任编辑:陈芳