

# 面向交通能源融合的路侧单元传输控制优化策略

代亮<sup>1</sup>, 张金龙<sup>1</sup>, 秦雯<sup>2†</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064)

**摘要:** 针对如何提高自供电路侧单元服务满足数量的问题, 提出一种在自供电路侧单元平均能效约束下最大化满足车辆服务请求数量的传输控制策略. 该策略按照待服务车辆权重次序以车辆位置和能量队列长度为系统状态做出传输控制决策. 通过建立自供电路侧单元传输控制决策的马尔可夫链模型, 对服务过程中平均完成请求数和平均能效进行分析, 进而提出一个非线性优化问题并求解, 获得了最优传输控制策略及其调度参数. 仿真结果表明, 上述自供电路侧单元最优传输控制策略具有位置状态和能量状态的双门限结构, 相比于贪婪策略和 Q-learning 方法分别在能效方面平均提升了 20.55% 与 11.86%, 在服务稳定性方面, 相比于其他两种策略, 停电概率与不服务概率分别平均下降了 20.03% 与 15.14%, 具有能效和稳定性上的优势.

**关键词:** 交通能源融合; 路侧单元; 车路协同系统; 传输控制; 马尔可夫链

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0353

引用格式: 代亮, 张金龙, 秦雯. 面向交通能源融合的路侧单元传输控制优化策略 [J]. 控制与决策.

## Optimization strategy of roadside units' transmission control for transportation-energy integration

DAI Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jin-long<sup>1</sup>, QIN Wen<sup>2†</sup>

(1. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of how to improve the service satisfaction quantity of the self-powered roadside unit, a transmission control strategy to maximize the number of satisfied vehicle service requests under the constraint of average energy efficiency is proposed. The strategy makes the transmission scheduling decision with the vehicle position and the energy queue length of the self-powered roadside unit as the system state according to the weight order of the vehicles to be served. By establishing a Markov chain model for self-powered roadside unit transmission scheduling decisions, the average number of requests completed and the average energy efficiency in the service process are analyzed, and a nonlinear optimization problem is proposed and solved to reveal the optimal transmission control strategy and its scheduling parameters. The simulation results show that the obtained transmission control strategy of self-powered roadside unit has a double threshold structure with position state and energy state. It has the advantages of energy efficiency and stability. Compared with the greedy strategy and Q-learning algorithm, the energy efficiency is increased by 20.55% and 11.86% respectively. In terms of service stability, compared with the other two strategies, the outage probability and non service probability are reduced by 20.03% and 15.14% respectively.

**Keywords:** transportation-energy integration; roadside unit; cooperative vehicle infrastructure system; transmission control; Markov chain

## 0 引言

交通系统和能源系统一体化融合发展是实现“双碳”目标的有效途径之一<sup>[1]</sup>, 其最基本实现形式是交通系统和新能源供给网络在道路沿线实现融合. 美国交通部根据业务数据预计到 2050 年, 40% 的高

速公路路边基础设施将采用太阳能供电<sup>[2]</sup>. 不同于传统移动网络接入设备, 路侧单元服务的联网车辆具有移动速度快、接入车辆数量可预测、移动模型受限于道路拓扑等特点<sup>[3]</sup>. 此外, 由于在路侧单元覆盖范围内可能存在多辆车, 会出现车辆被服务的顺

收稿日期: 2022-03-08; 录用日期: 2022-07-06.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601401).

†通讯作者. E-mail: qinwen@chd.edu.cn.

序问题<sup>[4]</sup>. 在设计自供电侧单元传输控制策略时需要考虑能效与服务满足率之间的折衷关系, 其研究目标为设计有效的自供电侧单元传输控制策略, 在带有服务请求的车辆经过时, 决定如何在保障能量供给的前提下为车辆提供数据传输服务. 自供电侧单元传输控制策略一方面决定了路侧单元自身服务质量、吞吐量等性能, 另一方面, 也决定了为途经车辆服务产生的能量开销大小及其工作可持续性.

在上述背景下, 车辆高速移动性导致路侧单元与车辆连通性随距离变化, 通信能量成本也随距离而变化. 在文献 [5-6] 中, Luan 等人使用马尔可夫链模型将车辆位置与无线局域网建模相结合, 通过车辆位置变化来表示车辆的移动性, 进而得到车辆移动性与无线局域网吞吐量的关系. Zhou 等人考虑了车辆移动性和信道争用会使路侧单元服务性能下降, 研究了不同交通流状态下路侧单元覆盖范围内的最佳传输区域<sup>[7]</sup>. 文献 [5-7] 的研究表明, 路侧单元服务性能极大地受限于与被服务车辆之间的距离, 但上述研究主要侧重于数据传输, 而没有考虑传输过程中产生的能量开销与服务性能的平衡问题.

路侧单元向途经车辆提供交通信息服务过程中, 能量消耗主要由下行数据传输构成. Hammad 等人提出一种使用功率控制的最小化下行链路传输所需能量的调度方案, 来满足路侧单元无线覆盖内车辆通信请求<sup>[8]</sup>. 在文献 [9] 中, Hammad 等人通过预测路侧单元覆盖范围内车辆位置来降低路侧单元和车辆的下行链路通信能耗. Atallah 等提出一种基于强化学习的周期充电路侧单元节能自适应传输调度算法, 用于优化配备定期充电大电池的路侧单元下行链路业务调度, 以保证路侧单元在下一个充电周期前的运行, 同时满足最大数量车辆服务请求<sup>[10]</sup>. Khezrian 等研究了路段中存在多个自供电侧单元的场景, 提出多个在线调度算法以均衡多个路侧单元下行链路能量开销<sup>[11]</sup>. Atoui 等人从离线在线两个角度研究了多个自供电路边单元下行链路调度, 通过自供电侧单元功率控制, 使其下行链路通信适应剩余可用能量, 以实现路侧单元服务车辆数量最大化<sup>[12]</sup>. Ku 等人研究了由小型蜂窝基站和移动边缘计算服务器组成的自供电侧单元, 提出一种实时服务质量损失最小化算法, 以支持延迟敏感的车辆应用<sup>[13]</sup>. Wei 等人研究了多个路侧单元组成的车辆服务无线网络能量消耗最小化问题, 在平均丢包概率和平均系统时间约束下, 对部署的路侧单元数量、传输功率和存储空间进行联合优化<sup>[14]</sup>. Sethi 等人将路侧单

元收到的传入请求分为传统数据请求 (计算量小) 和智能请求 (计算量大), 分别提出两种需求计算方法以实现路侧单元能耗最小化和相邻路侧单元的能耗均衡<sup>[15]</sup>. Ku 等人提出了一种用于自供电侧单元的服务质量损失最小化算法, 该算法根据车辆关联性、任务卸载集合与路侧单元资源分配做出决策, 最大限度地减少路侧单元服务质量下降<sup>[16]</sup>. 以上研究通过从功率控制、车辆位置预测、多路侧单元协作等角度研究了路侧单元节能传输问题, 没有考虑由于可再生能源收集过程中不确定性导致的路侧单元蓄电池过充和过放问题, 及如何在能耗约束下使服务的请求数量最大化问题.

本文针对自供电侧单元传输控制调度优化问题, 提出一种在不同能量到达率条件下能使路侧单元服务满足数最大的传输控制策略. 该策略根据自供电侧单元能量到达率和能量队列长度变化, 调整选择服务车辆的位置范围. 建立车辆位置模型, 用于反映车辆移动性与通信成本联系. 针对同时出现多辆待服务车辆的服务顺序问题, 建立车辆权重模型为待服务车辆进行排序. 建立马尔可夫决策框架对自供电侧单元传输控制过程及其能量队列状态转移进行分析, 推导平均满足车辆请求数与平均能效表达式. 最终通过与贪婪策略、Q-learning 方法仿真对比, 验证了所提优化策略能效以及稳定性优势.

## 1 系统模型

自供电侧单元为途经车辆提供交通信息服务的场景如图 1 所示, 自供电侧单元通过集成激光雷达、摄像头、毫米波雷达及大算力边缘计算节点等感知与计算装置获取实时路况、交通状态等信息提供给途经车辆.

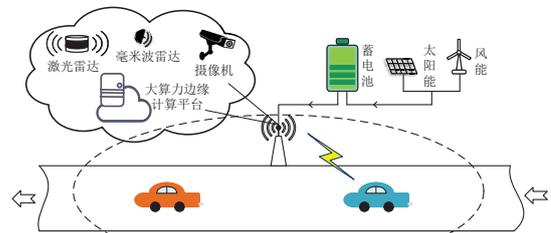


图 1 自供电侧单元服务场景

自供电侧单元通过将风能、太阳能等<sup>[3]</sup> 可再生能源收集装置收集能量存储入蓄电池中, 通过蓄电池为感知、计算和通信模块供电. 假设路侧单元只有一个无线收发器, 在任意时隙, 只能与一辆车进行通信<sup>[8-10]</sup>, 其通信能量开销主要由路侧单元与车辆的下行链路通信构成, 且由路侧单元与车辆的距离

决定<sup>[5-6]</sup>.

### 1.1 传输控制模型

自供电路侧单元的传输控制模型如图 2 所示, 路侧单元收集到的能量储存在蓄电池组中, 用于为车辆提供交通信息传输服务. 将系统时间离散为等长时隙, 在某个时隙开始时, 若路侧单元没有收到车辆服务请求, 则路侧单元没有通信能耗; 若收到一个或多个车辆服务请求, 则路侧单元按照权重顺序, 根据传输控制策略确定是否消耗能量为车辆提供服务. 从图 2 可知自供电路侧单元传输控制模型由时隙  $t$  路侧单元能量到达数  $a[t]$ 、能量队列长度  $q[t]$  和其覆盖范围内车辆  $i$  的速度  $v_i$ 、剩余请求数量  $r_i[t]$  和车辆位置状态  $z_i[t]$ , 以及调度决策结果  $b_{i,t}$  构成.

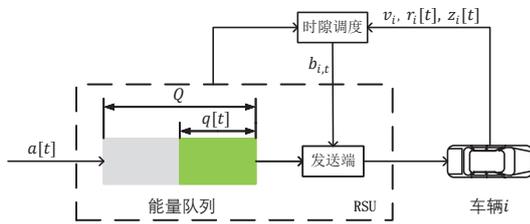


图 2 自供电路侧单元传输控制模型示意图

#### 1) 车辆速度模型

考虑自由流交通模型, 其适于建模一维线性路段上车流量较小、车辆行驶速度较高且车辆间互不影响交通场景, 则车辆到达过程服从泊松分布. 在自由流交通条件下, 任意 2 辆车到达路侧单元的时间间隔服从负指数分布<sup>[17]</sup>, 其概率密度函数为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} (t > 0), \quad (1)$$

推导可得其概率分布函数, 即在一个时隙内至少有一辆车出现的概率为

$$\xi = P(T \leq \tau) = 1 - e^{-\lambda \tau} (\tau > 0), \quad (2)$$

其中  $\lambda$  是车辆到达率,  $T$  表示车辆到达时间间隔,  $\tau$  表示系统时隙长度.

设  $I_v = \{1, \dots, I\}$  是所有途经车辆的集合. 路侧单元根据调度策略在第  $t$  个时隙为车辆  $i$  服务, 其中  $i \in I_v$ . 在自由流交通条件下, 任意到达车辆  $i$  的速度  $v_i$  是一个正态分布随机变量, 并且车速在行驶过程中可视为不变<sup>[18]</sup>, 其概率密度函数为

$$f_{v_i}(v_i) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{v_i - \bar{V}}{\sigma_v}\right)^2}, \quad (3)$$

其中  $\sigma_v$  是车速的标准差,  $\bar{V}$  是车速的均值.

用  $[V_{min}, V_{max}]$  表示该路段的限速区间, 则到达路侧单元的车辆速度截断概率密度函数为

$$\widehat{f}_{v_i}(v_i) = \frac{2f_{v_i}(v_i)}{\text{erf}\left(\frac{V_{max} - \bar{V}}{\sigma_v \sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(\frac{V_{min} - \bar{V}}{\sigma_v \sqrt{2}}\right)}, \quad (4)$$

将连续的车速离散为  $Y + 1$  个车速区间, 车速区间向量表示为  $\mathbf{V} = [V_1, \dots, V_{Y+1}]$ , 其中  $V_1 = V_{max}$  和  $V_Y = V_{min}$  分别表示限速区间的上下限, 且有  $V_y > V_{y+1}, y \in \{1, 2, \dots, Y-1\}$ . 进而车速状态表示为  $s_i = y$ , 即车速  $v_i \in [V_{y+1}, V_y]$ ; 特别地,  $s_i = Y + 1$  表示没有车辆到达. 出现一辆速度状态为  $y$  的车的概率表示为  $\delta_y$ , 其概率质量函数为

$$\delta_y = Pr\{s_i = y\} = \begin{cases} \xi \cdot \int_{V_{y+1}}^{V_y} \widehat{f}_{v_i}(v_i) dv_i, & 1 \leq y \leq Y, \\ 1 - \sum_{y=1}^Y Pr\{s_i = y\}, & y = Y + 1, \end{cases} \quad (5)$$

车辆一旦进入路侧单元覆盖范围, 会立即向路侧单元发送自身速度, 位置和数据请求<sup>[10]</sup>, 其中每辆车的请求数量是处于  $[0, R_{max}]$  之间的均匀分布随机整数变量.

#### 2) 车辆位置模型

为反映通信能耗动态变化, 如图 3 所示, 根据车辆到路侧单元的距离, 路侧单元覆盖范围被分为  $2M$  个区域<sup>[5-6]</sup>, 每个区域长度记为  $d_m (m = 1, \dots, M)$ . 根据其对称性, 使用集合  $\mathbf{Z} = \{z_1, \dots, z_M\}$  表示每侧的位置状态集合, 其中  $z_0$  表示覆盖范围以外的位置.

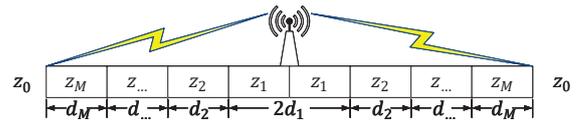


图 3 路侧单元覆盖区域位置模型

到达车辆的速度服从截断正态分布, 则由式 (5) 可得车辆在区域  $z_m$  的驻留时间概率密度函数为

$$f^m(t) = \frac{M \cdot d_m}{t^2 \sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{d_m - \bar{V}}{t \sigma_v}\right)^2}, \quad (6)$$

在上式中,  $t \in [d_m/V_{max}, d_m/V_{min}]$ , 参数  $M = 2/(\text{erf}((V_{max} - \bar{V})/\sigma_v \sqrt{2}) - \text{erf}((V_{min} - \bar{V})/\sigma_v \sqrt{2}))$ .

基于上述车辆驻留时间的概率密度函数, 可以得到在区域  $z_m$  内车辆平均驻留时间为

$$\begin{aligned} \bar{t}_m &= \int_{d_m/V_{max}}^{d_m/V_{min}} t f^m(t) dt \\ &= \int_{d_m/V_{max}}^{d_m/V_{min}} \frac{M \cdot d_m}{t \sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{d_m - \bar{V}}{t \sigma_v}\right)^2} dt. \end{aligned} \quad (7)$$

则在较小的持续时间  $\tau$  内, 车辆从区域  $z_m$  移动到下一个区域的概率是  $\tau/\bar{t}_m$ , 仍然处于当前区域  $z_m$

的概率是  $(1 - \tau/\bar{t}_m)$  [6], 因此只要时隙足够小, 车辆在一个时隙内只会出现在一个区域内. 则车辆  $i$  在时隙  $t$  以速度状态  $y$  出现在任意区域  $z_m$  的概率为

$$Pr\{z_i[t] = z_m\} = \delta_y \cdot \frac{d_m}{\sum_{i=1}^M d_i}, m = 1, \dots, M. \quad (8)$$

### 3) 路侧单元能量模型

假设自供电路侧单元蓄电池容量为  $E$  焦耳, 将其均匀划分为容量  $Q$  的能量队列, 队列中每个单位包含能量  $e = E/Q$  焦耳<sup>[9]</sup>, 将每个时隙开始时的能量队列长度记为  $q[t]$ . 通过可再生能源收集装置收集到的能量随机到达, 且在每个时隙独立同分布. 设  $a[t] = n$  表示在时隙  $t$  开始时有  $n$  单位能量到达的事件, 其中  $n \in \{0, 1, \dots, N\}$ . 能量到达过程的概率质量函数可以表示为

$$Pr\{a[t] = n\} = \theta_n, \quad (9)$$

其中  $\theta_n \in [0, 1]$  表示在时隙  $t$  收集到  $n$  单位能量的概率, 且  $\forall n > N, \theta_n = 0$ . 能量到达分布满足  $\sum_{n=0}^N \theta_n = 1$ . 如果路侧单元蓄电池容量已满, 则新到达的能量将溢出能量队列.

在一个时隙内路侧单元为覆盖范围内车辆  $i$  满足一个服务请求耗费的能量与距离正相关, 根据位置模型, 为不同距离的车辆服务耗费的能量也被分为  $M$  个状态, 即  $c_i[t] \in \{c_0, c_1, \dots, c_M\}$ , 分别表示在不同区域满足一个请求消耗的单位能量数. 不失一般性, 令  $c_0 = 0, c_1 = 1, \dots, c_M = M$ , 其中  $c_0 = 0$  表示没有收到车辆请求时不进行服务.

则在每个时隙开始时, 路侧单元能量队列长度更新表达式为:

$$q[t] = \max\{\min\{q[t-1] + a[t-1], Q\} - \sum_{i=1}^I b_{i,t-1} \cdot c_i[t-1], 0\}, \quad (10)$$

其中  $b_{i,t-1} \in \{0, 1\}$  是时隙  $t-1$  的决策结果,  $b_{i,t-1} = 1$  表示路侧单元在时隙  $t-1$  消耗能量为车辆  $i$  服务,  $b_{i,t-1} = 0$  表示路侧单元不为车辆  $i$  服务, 不消耗能量. 由于路侧单元每个时隙只服务于 1 辆车, 则有  $\sum_{i=1}^I b_{i,t} \leq 1, \forall t$ .

假设到达的能量可以被立即使用, 因此不用区分新到达的能量和已经储存在能量队列中的能量. 时隙  $t$  的能量状态可以表示为  $x[t] = q[t] + a[t]$ , 由式 (10) 可以得到能量状态的更新表达式为

$$x[t+1] = x[t] - \sum_{i=1}^I b_{i,t} \cdot c_i[t] + a[t+1]. \quad (11)$$

### 4) 待服务车辆权重模型

每个时隙路侧单元覆盖范围内可能存在多辆车, 路侧单元根据车辆权重  $w_i$  顺序依次决策是否服务. 论文旨在最大化满足车辆请求, 因此权重的计算基于影响路侧单元服务车辆数量的指标. 第一个指标是车速  $v_i$ , 车速越快权重越大, 速度快的车辆会更快接近与远离路侧单元, 与慢速车辆相比, 快速车辆在覆盖范围内的驻留时间较短, 首先服务于快速车辆可以增加服务的车辆数<sup>[20]</sup>. 第二个指标是车辆剩余请求大小  $r_i[t]$ <sup>[10]</sup>, 剩余请求越少权重越大, 服务于剩余请求数多的车辆需要更多时隙数, 不利于服务更多车辆. 将以上指标标准化后可得车速指标:

$$L_v = \frac{v_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}, \quad (12)$$

剩余请求数指标:

$$L_r = \frac{r_i[t]}{R_{max}}, \quad (13)$$

车辆权重计算如下:

$$w_i = A \cdot L_v + B \cdot L_r, \quad (14)$$

其中  $A + B = 1$ ,  $A, B$  用于调整两项指标对权重的影响程度.

## 1.2 自供电路侧单元传输控制策略

在时隙  $t$  开始时, 自供电路侧单元计算覆盖范围内待服务车辆权重, 按照权重次序, 根据能量状态  $x[t]$  和车辆位置状态  $z_i[t]$  决定是否服务于车辆  $i$ . 为最大化满足覆盖范围内的车辆请求, 路侧单元应频繁进行服务, 进而不可避免地消耗更多能量; 若要以更少能耗满足车辆请求, 需要等待车辆靠近, 容易导致服务次数下降. 可知路侧单元满足的请求数与其能效之间存在折衷关系, 提出一种概率调度策略来优化上述确定性调度方案, 基于当前系统状态进行传输控制决策.

为此, 使用  $f_{m,k}(b)$  表示在时隙  $t$ , 能量队列状态  $x[t] = k$  时, 路侧单元为位于区域  $z_m$  的车辆  $i$  做出调度结果为  $b_{i,t} = b$  的概率,

$$Pr\{b_{i,t} = b \mid z_i[t] = z_m, x[t] = k\} = f_{m,k}(b), \quad (15)$$

其中,  $b \in \{0, 1\}$ ,  $z_m \in \mathbf{Z}$ ,  $k \in \{0, 1, \dots, Q\}$ ,  $m \in \{0, 1, \dots, M\}$ . 定义  $2 \times (M+1) \times (Q+1)$  的三维矩阵  $\mathbf{F}$ ,  $f_{m,k}(b)$  是该三维矩阵中的概率参数. 并且有

$$\sum_{b=0}^1 f_{m,k}(b) = 1, \quad (16)$$

特别地, 如果路侧单元能量队列为空,  $f_{m,0}(0) = 1$ ,  $f_{m,0}(1) = 0$ , 表示不能服务于任意车辆. 同样, 当路侧单元没有收到服务请求, 或者覆盖范围内没有车

辆时,  $f_{0,k}(0) = 1, f_{0,k}(1) = 0$ . 因此, 每种特定调度策略可以由一组固定参数  $\{f_{m,k}(b)\}$  表征. 通过优化概率参数  $\{f_{m,k}(b)\}$ , 可以在自供电路侧单元能量随机到达背景下实现满足的车辆请求数最大化.

## 2 马尔可夫决策

马尔可夫决策是基于马尔可夫过程理论的随机动态系统最优决策过程, 用于不确定条件下的随机过程建模<sup>[21]</sup>. 论文中, 自供电路侧单元能量到达和其覆盖范围内车辆位置状态具有随机性, 通过建立马尔可夫决策框架对路侧单元服务过程中的请求满足数量和平均能效进行分析, 建立在能效约束下最大化路侧单元请求满足数为目标的优化问题.

马尔可夫决策过程可以表示为 5 元组  $(X, W, B, P(\cdot, \cdot), \bar{\Phi})$ . 其中  $X$  表示路侧单元蓄电池中可用能量状态  $x[t]$  的集合.  $W$  表示能量到达状态  $a[t]$  和车辆位置状态  $z_m$  的组合, 表示系统随机性.  $B$  表示路侧单元行动集合  $b \in \{0, 1\}$ , 即服务与不服务, 路侧单元将根据每个时隙的能量状态  $x[t]$  和车辆位置状态  $z_m$  做出行动决策.  $P(i, j) = Pr\{x[t] = j \mid x[t-1] = i\}$  表示从路侧单元能量状态由  $i$  转变为  $j$  的一步转移概率.  $\bar{\Phi}$  表示平均请求满足数, 代表马尔可夫决策框架报酬函数.

### 2.1 马尔可夫链模型

将自供电路侧单元能量队列一步转移概率记为  $\omega_{k,l} = Pr\{x[t] = l \mid x[t-1] = k\}$ , 表示能量状态从  $k$  转移到  $l$  的概率. 由于每时隙最多有  $N$  单位能量到达,  $M$  单位能量消耗, 能量队列满时多余能量溢出, 能量队列一步转移概率分为增加、减少与不变三种场景讨论, 如图 4-5 所示.

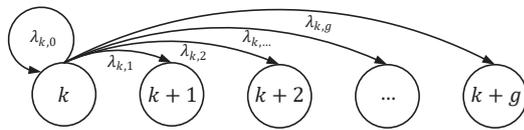


图 4 能量队列增加场景

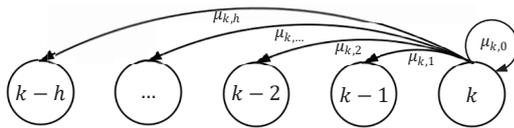


图 5 能量队列减少场景

能量队列增加的场景, 如图 4 自供电路侧单元初始能量状态为  $k$  单位, 在下一时隙增加  $g$  单位能量, 将其一步转移概率记为  $\lambda_{k,g} = \omega_{k,k+g}$ ; 能量队列减少的场景, 如图 5 自供电路侧单元根据当前能量

队列状态和车辆位置状态进行服务减少了  $h$  单位能量, 其一步转移概率记为  $\mu_{k,h} = \omega_{k,k-h}$ , 与队列增加相比, 不需要考虑溢出; 最后是能量队列没有变化的场景. 详细推导过程见附录 A.

根据能量状态一步转移概率得到  $(Q+1) \times (Q+1)$  的矩阵  $\mathbf{A}$ , 其元素为能量状态转移概率. 设  $\pi_k$  是能量状态为  $k$  时的稳态概率, 则平稳分布可表示为向量  $\pi = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_Q]^T$ . 根据公式 (15-16), 当三维参数矩阵中的调度概率参数  $f_{m,k}(b)$  确定时, 平稳分布可以通过全局平衡方程与归一化方程解得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{1} \\ \mathbf{1}^T \end{bmatrix} \pi = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中  $\mathbf{1}$  是单位矩阵. 可知每个稳态概率  $\pi_k$  都是三维参数矩阵  $\mathbf{F}$  的函数, 记为  $\pi_k(\mathbf{F})$ .

马尔可夫链的局部平衡方程表示为

$$\sum_{i=k}^{0 \wedge (k-N+1)} \pi_i \sum_{j=i-k+1}^N \lambda_{i,j} = \sum_{i=k+1}^{Q \wedge (k+M)} \pi_i \sum_{j=i-k}^M \mu_{i,j}, \quad (18)$$

其中  $0 \leq k \leq (Q-1)$ .

### 2.2 优化问题

设在时隙  $t$  能量队列中有  $x[t] = k$  能量可被使用, 当车辆位置状态为  $z_m$  时, 根据公式 (15-16) 可得平均满足的车辆请求数为  $\sum_{b=0}^1 f_{m,k}(b) \cdot b$ , 则自供电路侧单元平均能耗为  $\sum_{b=0}^1 f_{m,k}(b) \cdot b \cdot m$ . 通过对公式 (17) 求解, 获得马尔可夫链平稳分布后, 路侧单元根据调度策略在每个时隙为以公式 (8) 的概率出现在覆盖范围内随机位置的车辆提供服务, 其所能满足的车辆请求数均值可表示为

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= \sum_{m=0}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\delta_y d_m}{\sum_{s=1}^M d_s} \left( \sum_{k=0}^Q \pi_k \sum_{b=0}^1 f_{m,k}(b) \cdot b \right) \\ &= \sum_{m=0}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\delta_y d_m}{\sum_{s=1}^M d_s} \left( \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{m,k}(1) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

能效定义为单位能量所能满足的车辆请求数, 根据公式 (19), 每个时隙的能效均值可以表示为

$$\bar{E} = \frac{\sum_{m=0}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\delta_y d_m}{\sum_{s=1}^M d_s} \left( \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{m,k}(1) \right)}{\sum_{m=0}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\delta_y d_m}{\sum_{s=1}^M d_s} \left( \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{m,k}(1) \cdot m \right)}. \quad (20)$$

研究目标是使满足的车辆请求数最大化, 优化问题可归结为寻找使每时隙所能满足的平均请求数最大化的最优参数  $\{f_{m,k}(b)\}$ . 为实现上述目标, 将自

供电路侧单元传输控制优化问题建模为在能效约束下,使其平均满足的车辆请求数最大的优化模型:

$$\max_{f_{m,k}(b)} \bar{\Phi} = \sum_{m=0}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\delta_y d_m}{\sum_{s=1}^M d_s} \left( \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{m,k}(1) \right), \quad (21)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{E} \geq E_{aver}, \\ \mathbf{A}\pi = \pi, \\ \sum_{b=0}^1 f_{m,k}(b) = 1, \forall m, k, \\ f_{m,k}(b) \in \{0, 1\}, \forall m, k, b, \\ \sum_{i=k}^{0 \wedge (k-N+1)} \pi_i \sum_{j=i-k+1}^N \lambda_{i,j} = \sum_{i=k+1}^{Q \wedge (k+M)} \pi_i \sum_{j=i-k}^M \mu_{i,j} \end{cases}$$

首先第一个约束是能效约束,自供电路侧单元使用可再生能源供电,需要有效利用能量,使能效不低于给定阈值  $E_{aver}$ ;其次是概率矩阵与稳态概率的函数约束;第三和第四个约束控制概率变量  $f_{m,k}(b)$  的取值;最后一个约束是马尔可夫链局部平衡方程。

使用 LINGO 软件对优化问题 (21) 进行描述求解, LINGO 将其识别为混合整数非线性规划问题 (MINLP), 自动匹配分支定界法为其求解出全局最优解  $\bar{\Phi}^*$ , 对应的最优稳态概率  $\pi_k^*$  与最优调度参数  $f_{m,k}(b)^*$ . 最优调度参数的结果表明,若路侧单元要为任何给定位置状态为  $z_m$  的车辆服务,能量队列都需要达到某个能量阈值  $k_m$ , 该阈值满足以下条件

$$k_{m_1} \leq k_{m_2}, \quad \text{if } z_{m_1} < z_{m_2}. \quad (22)$$

同理,若在能量队列状态为  $k$  时,车辆位置状态需要在某个位置阈值  $z_m^k$  内,该阈值满足以下条件

$$z_m^{k_1} \leq z_m^{k_2}, \quad \text{if } k_1 < k_2. \quad (23)$$

因此,所提最优调度策略存在双门限结构。

### 3 仿真实验与结果分析

首先在不同平均能量到达率下,改变优化问题的能效约束,求解优化问题 (21), 研究平均请求满足数与平均能效约束的变化趋势,分析在不同平均能量到达率下,两者的折衷关系;其次,验证所提路侧单元传输控制随机优化策略的双门限结构;最后,将提出的优化策略与贪婪策略和 Q-learning 方法在不同平均能量到达率下进行仿真,从平均车辆请求满足率、平均能效和稳定性分布三方面对比分析它们的服务性能。

仿真参数设置中,路侧单元覆盖半径  $R$  为 200m, 将其离散为  $2M + 1 = 11$  个位置状态<sup>[5-7]</sup>. 根据公式 (8), 可计算获得车辆到达路侧单元覆盖范围内并且处于不同位置状态的概率取值为  $[Pr_{z_1}, Pr_{z_2}, Pr_{z_3}, Pr_{z_4}, Pr_{z_5}] =$

$[0.055, 0.09625, 0.11, 0.12375, 0.165]$ . 路侧单元能量队列容量  $Q$  为 50, 每时隙最大能量到达  $N$  为 5 个<sup>[12]</sup>;速度区间取  $[22.22, 33.33]$  米/秒,即  $[80, 120]$  千米/时,则通过计算可得车速标准差  $\sigma$  为 5.56, 车辆到达率取 0.55 辆/秒<sup>[18]</sup>;为方便分析,取  $R_{max} = 2$ , 即到达路侧单元的车辆最多携带有 2 个数据请求。

#### 3.1 平均请求满足数与平均能效的折衷验证

在优化问题 (21) 中,不同平均能量到达率下取不同定值改变能效约束,代入优化问题中求最优解  $f_{m,k}(b)^*$ , 可得到对应平均请求满足数  $\bar{\Phi}^*$ , 相应变化曲线如图 6 所示。

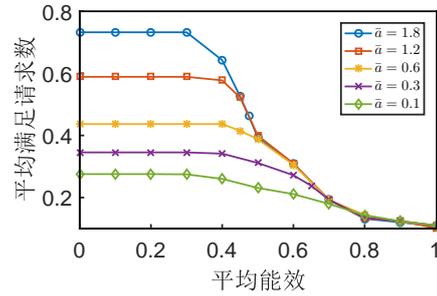


图 6 平均请求满足数随能效约束的变化曲线

在图 6 中,随能效约束增大,平均请求满足数曲线经历了先不变后下降的过程.当平均能量到达率较低时,平均请求满足数曲线下降趋势较为平缓.在平均能量到达率较高时,平均请求满足数的变化显著,尤其当平均能效大于某个点时,平均请求满足数开始快速下降.在该能效点左侧,路侧单元平均请求满足率不随能效变化,即不能通过降低能效而使平均请求满足数上升;在该点右侧,路侧单元平均请求满足数随能效的增大而急剧下降,则在该点处路侧单元有较高的平均请求满足数和能效,可将其记为对应能量到达率下平均请求满足数与平均能效的折衷点,验证了折衷点的存在性。

#### 3.2 门限结构验证

根据不同平均能量到达率  $\bar{a}$  分为 5 组方案进行仿真,方案的具体取值如表 1 所示。

表 1 能量到达参数

能量到达概率	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\bar{a}$
方案 1	0.3	0.2	0.15	0.1	0.05	1.8
方案 2	0.2	0.13	0.1	0.07	0.03	1.2
方案 3	0.1	0.07	0.05	0.03	0.02	0.6
方案 4	0.05	0.03	0.03	0.01	0.01	0.3
方案 5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.003	0.1

在 5 组方案中,分别应用了对应能量到达率折衷点能效约束,其中第一组增加了过高能量约束时

的门限结构用于说明过高能效约束的影响. 每组参数的优化问题求解结果如图 7 所示.

由图 7 可知, 调度策略是基于所选车辆位置状态  $z_m$  和能量队列长度  $k$  的双门限结构. 在图 7(b) 中, 高能量到达率和过高能效约束相耦合会使自供电路侧单元能量状态稳态概率集中在高能量状态, 因此路侧单元在高能量状态时仅能服务于附近区域车辆以满足高能效约束. 在图 7(a) 中, 当位置状态为  $z_5$  时,  $k_5^* = 27$ , 优化策略可以表示为

$$\begin{cases} f_{5,k}^*(0) = 1 - f_{5,k}^*(1), & 1 \leq k \leq Q, \\ f_{5,k}^*(1) = 0, & 1 \leq k < 27, \\ f_{5,k}^*(1) = 1, & k \geq 27. \end{cases} \quad (24)$$

当  $1 \leq k < 27$  时, 路侧单元满足位置状态为  $z_5$  的车辆的 0 个请求, 即不服务; 当  $k \geq 27$  时, 路侧单元满足位置状态为  $z_5$  的车辆的 1 个请求. 因此在位置状态相同情况下, 能量队列长度小于门限值时路侧单元不服务车辆请求以节省能量; 当能量队列长

度超过门限值时, 路侧单元会开始服务车辆请求, 以增加服务的车辆请求数和防止能量溢出.

在图 7(a) 中, 当  $k = 16$  时,  $m_{16}^* = 4$ , 优化策略可以表示为

$$\begin{cases} f_{m,16}^*(0) = 1 - f_{m,16}^*(1), & 1 \leq m \leq M, \\ f_{m,16}^*(1) = 1, & 1 \leq m \leq m_{16}^*, \\ f_{m,16}^*(1) = 0, & m > m_{16}^*. \end{cases} \quad (25)$$

当  $1 \leq m \leq 4$  时, 路侧单元满足车辆的一个服务请求; 当位置超过门限值时, 路侧单元选择不服务车辆请求以节约能量和满足能效约束.

图 7(c) 至图 7(f) 分别表示其余四种不同能量到达率下自供电路侧单元能量队列状态和车辆位置状态的门限结构.

对比以上 5 种方案, 位置状态的最大门限值分别出现在位置状态 5, 4, 3, 2, 和 1 处, 说明随着平均能量到达率的下降, 调度策略为提高能效会逐渐放弃服务距离较远的车辆.

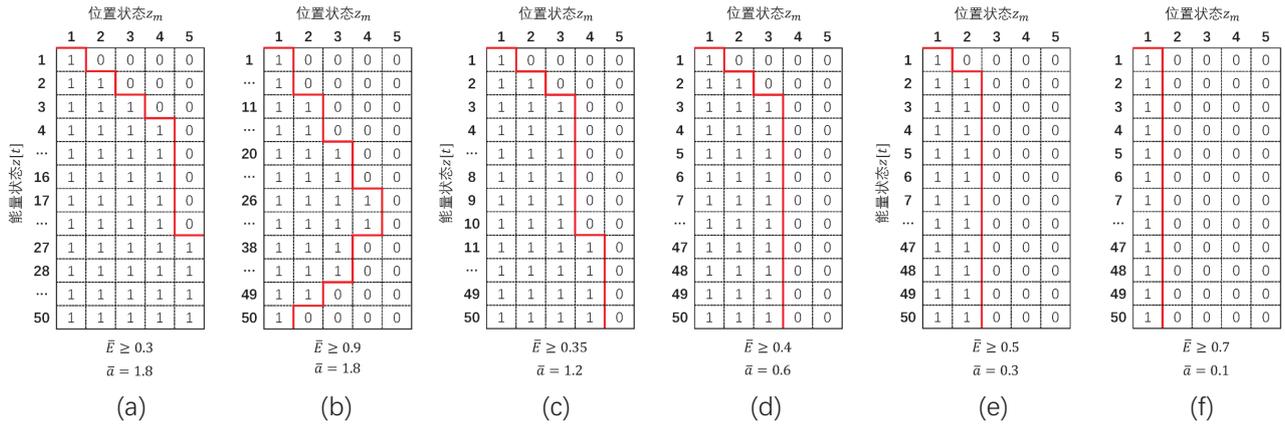


图 7 门限结构

### 3.3 传输控制策略性能对比分析

优化策略、贪婪策略和 Q-learning 方法的平均请求满足率、平均能效和稳态概率的仿真结果如图 8-14 所示. 其中贪婪策略与 Q-learning 方法的分析及算法流程见附录 B.

在图 8 和图 9 中, 随着平均能量到达率  $\bar{a}$  的增大, 三种策略的平均请求满足率均呈上升趋势, 能效均呈下降趋势. 当能量到达率较小时, 为防止路侧单元能量队列耗尽而无法服务, 优化策略会提升能效约束, 只为距离较近的车辆提供服务, 以减少能量的消耗, 如图 9 所示. 随着能量到达率的增大, 优化策略能不断调整服务的范围大小, 使得平均请求满足率最大化. 在能效方面与其他两种策略相比, 优化策略总体能效分别平均提升了 20.55% 与 11.86%,

在能量到达率较小时 ( $[0.1, 0.3]$ ), 优化策略能效分别平均提升了 35.34% 与 20.69%, 在能量到达率较大时 ( $[0.6, 1.8]$ ), 优化策略能效分别平均提升了 10.69% 与 5.97%, 可见能量到达率越低, 优化策略相比于其他两种策略的能效优势越大, 更适用于可再生能源收集具有高度随机性的场景.

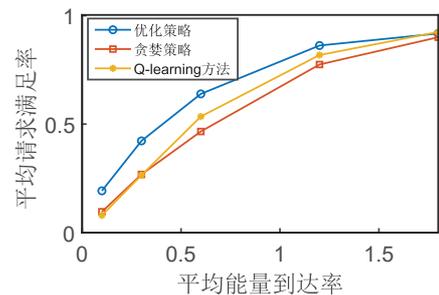
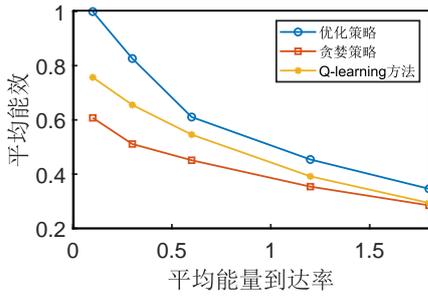
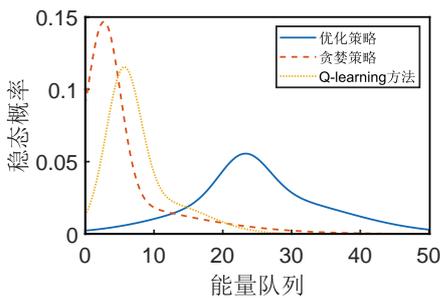
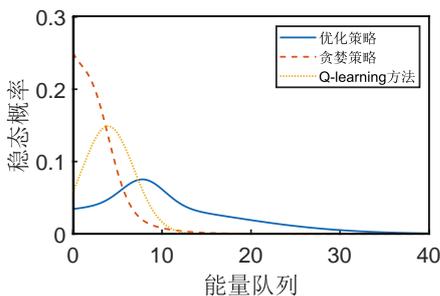
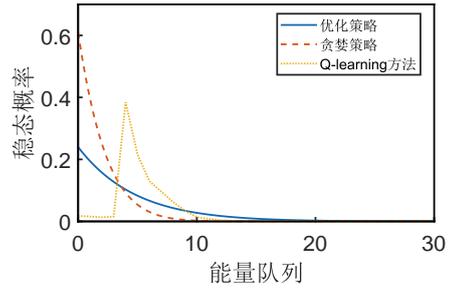
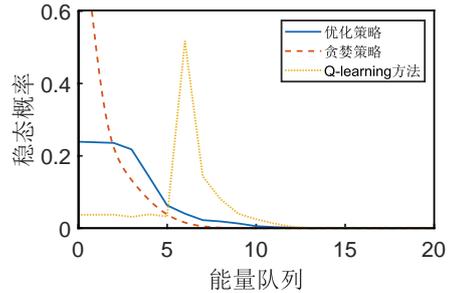
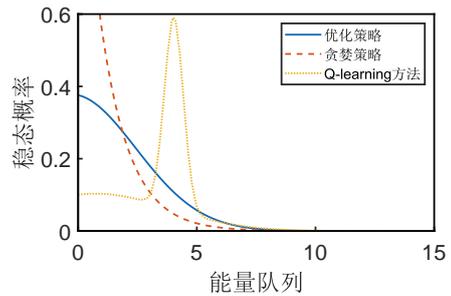


图 8 平均请求满足率随  $\bar{a}$  的变化曲线

图9 平均能效随  $\bar{a}$  的变化曲线

在图10-14中,分别绘制了五种能量到达率时三种策略的稳态概率,其中贪婪策略的稳态概率始终集中在低能量区域,可知贪婪策略会有较高的停电概率和经常无法服务的情况.类似地,Q-learning方法的稳态概率同样集中在低能量区域,在能量到达率非常低时,如图12-14,Q-learning方法在大于某个能量阈值时才开始服务,通过这种策略防止了能量队列耗尽情况的发生,但仍有较高的不服务概率.相比于其他两种策略,优化策略的停电概率与不服务概率分别平均下降了20.03%与15.14%,在能量到达率较小时([0.1,0.3]),分别平均降低了24.48%与26.71%,在能量到达率较大时([0.6,1.8]),分别平均降低了17.06%与7.42%,可知相比于其他两种策略,所提优化策略在能量到达率较低时能大幅降低自供电路侧单元的停电概率与不服务概率,具有稳定性上的优势,使自供电路侧单元的工作可持续性得到了提升.

图10  $\bar{a} = 1.8$  时的稳态概率图11  $\bar{a} = 1.2$  时的稳态概率图12  $\bar{a} = 0.6$  时的稳态概率图13  $\bar{a} = 0.3$  时的稳态概率图14  $\bar{a} = 0.1$  时的稳态概率

## 4 结论

本文研究高速公路车路协同系统中面向交通能源融合的自供电路侧单元传输控制问题,提出一种能使自供电路侧单元服务满足率最大化的随机优化策略.具体结论如下:1)考虑了不同能量到达率下车辆位置对自供电路侧单元服务能耗的影响,将自供电路侧单元的覆盖范围根据距离远近划分为不同位置状态反映自供电路侧单元为不同距离车辆服务能耗成本的动态变化.针对在同一时隙自供电路侧单元覆盖范围内同时出现多辆带有服务请求车辆的服务顺序问题,通过选取影响自供电路侧单元服务车辆数量的指标计算待服务车辆权重,按照权重排序依次对车辆进行服务决策.2)利用马尔可夫决策过程对目标参数与优化问题进行分析,获得了自供电路侧单元传输控制优化策略,验证了能效与车辆请求满足率的折衷关系,以及最优策略关于车辆位置状态与能量队列状态的双门限结构.

研究表明,所提优化策略能根据系统状态变化及时调整自供电路侧单元服务范围大小,从而

保证能量的有效利用和自供电路侧单元的可持续运行, 实现车辆请求的服务满足率最大化. 研究成果适用于目前“双碳”战略下的交通能源一体化发展目标, 以及自然禀赋的太阳能、风能等可再生能源供能形式下的高速公路路侧设备的能量自恰运行场景. 后续研究将进一步拓展到多个自供电路侧单元相互协作的分布式场景, 并设计有效的调度策略以均衡各个路侧单元的能量开销, 研究高速公路路侧设备负载功能有效发挥与可再生能源供给经时平衡机制及协同方法.

#### 参考文献 (References)

- [1] Wang X, Ning Z, Hu X, et al. Future communications and energy management in the Internet of vehicles: Toward intelligent energy-harvesting[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6): 87-93.
- [2] Atallah R, Khabbaz M, Assi C. Energy harvesting in vehicular networks: A contemporary survey[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 70-77.
- [3] 郭戈, 许阳光, 徐涛, 等. 网联共享车路协同智能交通系统综述 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(11): 2375-2389. (GUO G, XU Y G, XU T, et al. A survey of connected shared vehicle-road cooperative intelligent transportation systems[J]. *Control & Decision*, 2019, 34(11): 2375-2389.)
- [4] Su Z, Hui Y, Luan T H, et al. Engineering a game theoretic access for urban vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(6): 4602-4615.
- [5] Luan T H, Ling X, Shen X. MAC performance analysis for vehicle-to-infrastructure communication[C]. 2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. IEEE, 2010: 1-6.
- [6] Luan T H, Ling X, Shen X. MAC in motion: Impact of mobility on the MAC of drive-thru Internet[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 11(2): 305-319.
- [7] Zhou H, Liu B, Hou F, et al. Spatial coordinated medium sharing: Optimal access control management in drive-thru Internet[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(5): 2673-2686.
- [8] Hammad A A, Badawy G H, Todd T D, et al. Traffic scheduling for energy sustainable vehicular infrastructure[C]. 2010 IEEE global telecommunications conference GLOBECOM 2010. IEEE, 2010: 1-6.
- [9] Hammad A A, Todd T D, Karakostas G, et al. Downlink traffic scheduling in green vehicular roadside infrastructure[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 62(3): 1289-1302.
- [10] Atallah R F, Assi C M, Yu J Y. A reinforcement learning technique for optimizing downlink scheduling in an energy-limited vehicular network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(6): 4592-4601.
- [11] Khezrian A, Todd T D, Karakostas G, et al. Energy-efficient scheduling in green vehicular infrastructure with multiple roadside units[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 64(5): 1942-1957.
- [12] Atoui W S, Ajib W, Boukadoum M. Offline and online scheduling algorithms for energy harvesting RSUs in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 6370-6382.
- [13] Ku Y J, Chiang P H, Dey S. Real-time QoS optimization for vehicular edge computing with off-grid roadside units[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 11975-11991.
- [14] Wei Q, Wang L, Fei A. Energy minimization for infrastructure-to-vehicle communications with multiple roadside units[C]. 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2019: 1-5.
- [15] Sethi V, Pal S, Vyas A. Online Energy-efficient Scheduling Algorithm for Renewable Energy-powered Roadside units in VANETs[C]. 2020 IEEE 17th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). IEEE, 2020: 506-514.
- [16] Ku Y J, Dey S. Sustainable vehicular edge computing using local and solar-powered roadside unit resources[C]. 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). IEEE, 2019: 1-7.
- [17] Khabbaz M J, Fawaz W F, Assi C M. A simple free-flow traffic model for vehicular intermittently connected networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1312-1326.
- [18] 代亮, 张亚楠, 钱超, 等. 基于车辆载带中继的路边单元突发业务分组调度最优策略 [J]. *自动化学报*, 2021, 47(5): 1098-1110. (DAI L, ZHANG Y N, QIAN C, et al. Optimal Packet Scheduling Strategy for Roadside Units' Bursty Traffic Based on Relaying Vehicles[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(5): 1312-1326.)
- [19] Wu J, Chen W. Low-Latency and Energy-Efficient Wireless Communications with Energy Harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021.
- [20] Bondok A H, Lee W, Kim T. Efficient Scheduling for VANET Considering Renewable Energy[C]. 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2020: 217-221.
- [21] HUANG C, ZHOU S, XU J, NIU Z S, ZHANG R, CUI S. Energy Harvesting Wireless Communications[M/OL]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2019.

#### 作者简介

代亮(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事车联网理论与应用研究, E-mail: ldai@chd.edu.cn;

张金龙(1996—), 男, 硕士研究生, 从事车联网理论与应用研究, E-mail: 2019132075@chd.edu.cn;

秦雯(1982—), 女, 讲师, 博士, 从事公路交通能源融合理论与应用研究, E-mail: qinwen@chd.edu.cn.