

基于蚁群算法的纯电动汽车路径规划研究

李佳燕,方存光,槐崇飞

(沈阳理工大学 汽车与交通学院,沈阳 110159)

摘要: 为了缓解纯电动汽车用户出行焦虑,提出一种考虑交通动态性及速度时变性的路径规划方法。根据道路节点位置、海拔高度、充电桩位置等信息建立沈阳市 20 km × 20 km 区域道路拓扑结构,基于车辆充电需求、行驶距离、行驶时间、行驶能耗、附件能耗建立纯电动汽车多目标路径函数,采用蚁群算法开展路径规划。仿真结果表明,本文提出的规划方法能够找到切合实际的目标路径。

关键词: 纯电动汽车;能耗模型;路径规划;蚁群算法

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.01.005

Research on Battery Electric Vehicle Path Planning Based on Ant Colony Algorithm

LI Jiayan, FANG Cunguang, HUI Chongfei

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In order to alleviate the anxiety of battery electric vehicle users in travel, a path planning method considering traffic dynamics and time-varying speed is proposed. A 20 km × 20 km regional road topology is established based on road node locations, altitude, charging pile locations, etc. A multi-objective path function for battery electric vehicles is established based on vehicle charging demand, driving distance, driving time, driving energy consumption, and accessory energy consumption, and an ant colony algorithm is used to carry out path planning. Simulation results show that with the proposed planning method a realistic target path.

Key words: battery electric vehicle; energy consumption model; path planning; ant colony algorithm

近年来,随着全球气候变暖,能源损耗和环境污染等问题不断加剧,零尾气排放的纯电动汽车成为绿色出行的最佳选择,然而,纯电动汽车在能量储存、充电时间、续航里程方面的短板将对用户的出行带来一定影响^[1]。因此,合理规划出行路径对缓解出行焦虑具有重要意义。

纯电动汽车的路径规划涉及电池容量、充电桩布局、车辆行驶能耗、出行时间、行驶里程等主观因素,许多国内外学者基于算法从降低出行成本及提高出行效率的角度出发开展路径规划。

文献[2]运用 A* 算法求解时间、能耗双变量最优充电路径,但其搜索时间随路径的复杂而增加;文献[3]提出了经典路径规划 Dijkstra 算法,但不能解决纯电动汽车能量回收时的负权边问题。文献[4]提出了一种基于蚁群算法的电动汽车路线优化问题的分布式算法,为电动车司机提供距离最短的充电路径;文献[5]采用蚁群算法求解双目标路径,验证了此算法易于修改以解决两个及以上的目标路径;文献[6]验证了蚁群算法具有较强鲁棒性、优良分布式计算等优点,并且在求解路径规

划问题时具有较强的全局搜索能力。因此,本文基于已知输入数据信息,采用离线蚁群算法开展路径规划。

文献[7]基于车辆负载、行驶距离和速度建立电能消耗模型并应用自适应粒子群优化算法进行路径规划,但是未考虑中途充电的情况。文献[8]基于“车-路-网”信息的融合对电动汽车充电路径进行了优化,但未考虑交通信息的动态特征。文献[4]考虑了节点坡度和海拔对电耗的影响,但忽略了交通拥堵情况下的路径规划。

综上所述,目前国内外对纯电动汽车路径规划的研究取得了一定成果,但未全面考虑电动汽车充电需求、交通状态、地形等因素的影响,所规划路径缺乏整体性和系统性。因此,本文根据路网节点位置、海拔高度、充电站位置等信息建立沈阳市 20 km × 20 km 区域内道路拓扑结构,考虑交通动态性及速度时变性,基于车辆充电需求、行驶距离、行驶时间、行驶能耗、空调等附件能耗建立纯电动汽车多目标路径函数,采用蚁群算法开展路径规划。

1 道路拓扑结构建模

通过网络地图选取实际道路,收集路网节点位置与海拔、充电站位置等重要信息,并对其进行数据统计及分析,采用图论分析法^[9]建立路网数学模型为

$$\begin{cases} G^T = \{V, E, W, S\} \\ V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\} \\ E = \{v_{ij} | v_i \in V, v_j \in V, i \neq j\} \\ W = \{w_{ij} | i, j \in V\} \\ S = \{S_a | a = 1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 表示路网; V 表示路网节点集合; n 表示路网中的节点总数; E 表示路网所有路段集合; W 表示路段权值集合,本文路段表示的权值为距离、时间和能耗; S 表示路网充电站节点的集合,且 $S \in V$; m 为充电站节点总数。

设图 G 有 n 个节点分布,则邻边权值矩阵^[10] $R = (r_{ij})_{n \times n}$,其中

$$r_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & v_i \in E \\ 0, & v_i = v_j \\ \infty, & v_i \notin E \end{cases} \quad (2)$$

因此,邻边矩阵 E 可表示为

$$E = \begin{pmatrix} 0 & w_{12} & w_{13} & \dots & \infty \\ w_{21} & 0 & w_{23} & \dots & \infty \\ w_{31} & w_{32} & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 ∞ 表示 v_i 和 v_j 之间不存在连接路段。

本文以沈阳市 20 km × 20 km 的某区域内实际交通路网作为研究对象并采集该区域路网信息,共取 60 个路网节点,三座充电站,即 S_1 、 S_2 、 S_3 ,所在位置为 v_{10} 、 v_{20} 、 v_{34} ,起点位于 v_{11} ,终点位于 v_{55} ,路网拓扑结构示意图如图 1 所示。

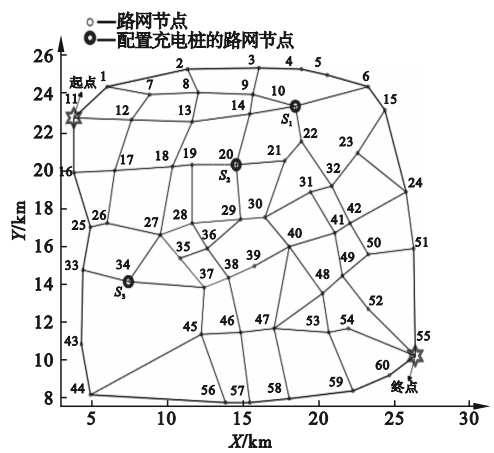


图 1 路网拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of road topological structure

研究时间选取沈阳市夏季下午两点,所选时刻存在三种交通拥堵情况,如图 2 所示。

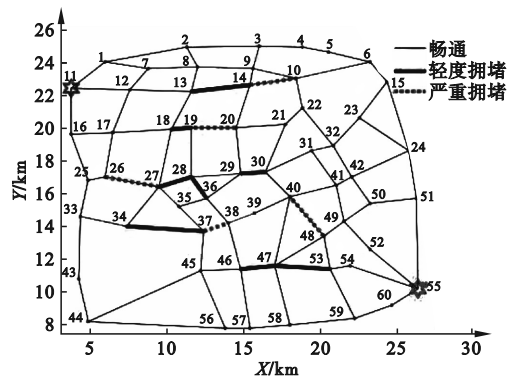


图 2 交通路况信息示意图

Fig. 2 Diagram of traffic conditions informations

所选路段为主干路,路段平均速度对应拥堵等级划分如表 1 所示,表中 1 级为交通畅通、2 级为轻度拥堵、3 级为严重拥堵。

表1 路段平均速度对应拥堵等级划分

Table 1 Average speed and congestion level of road section

等级	1	2	3
主干路速度/(km·h ⁻¹)	>35	(15,35]	≤15

根据图2中拥堵情况选取表1中对应的平均速度进行动态规划:畅通时取50 km/h;轻度拥堵时取30 km/h;严重拥堵时取10 km/h。

基于文献[11]中速度与坡度的关系式,本文考虑了速度随坡度动态变化的情况,即电动汽车的总功耗与道路倾角呈正相关,耗电量随着上坡的倾斜角增加而增加,随着下坡的倾斜角减少而减少。

在上述基础上以距离、时间及能耗作为出行的三个目标,并以此开展多目标路径规划研究。

2 多目标路径函数建模

建立多目标路径函数之前,首先根据电动汽车用户不同的出行需求建立对应函数模型。

2.1 行程距离目标建模

行程总距离函数为

$$L_d = \begin{cases} \sum_{i,j \in V} d_{ij} x_{ij} & \text{不充电} \\ \sum_{i,j \in V \cup S} d_{ij} x_{ij} & \text{充电} \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_{ij} 表示路段距离权值; x_{ij} 为0-1约束变量,若车辆经过路段 v_{ij} ,则 x_{ij} 值为1,否则 x_{ij} 值为0。

2.2 行程时间目标建模

考虑充电站充电车辆小于充电站充电设备,则无排队等待时间,由此电动汽车行程总时间 T_{all} 包含以下两个部分:起点至终点各路段的行驶时间 T_d 、充电时间 T_c 。计算公式为

$$T_{all} = \begin{cases} T_d, & \text{不充电} \\ T_d + T_c, & \text{充电} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_d = \sum_{i,j \in V \cup S} \frac{d_{ij}}{v'_{ij}} x_{ij} \quad (6)$$

$$T_c = \sum_{a=1}^m T_{c,S_a} \cdot x_{ij} \quad (7)$$

$$T_{c,S_a} = \frac{80\% E_b - E_{c,S_a}}{\eta_e P_{S_a}} \quad (8)$$

式中: v'_{ij} 表示从节点 i 行驶至节点 j 的速度; E_b 为电池容量; E_{c,S_a} 表示电动汽车在充电站 S_a ($a=1, 2, 3$)处开始充电的剩余电量; T_{c,S_a} 为电动汽车到达充电站补充电量时间,为保护电池,本文中的充

电时间指电动汽车到达充电站 S_a 后从剩余电量充至荷电状态为80%时所需时间; P_{S_a} 表示充电站的充电功率; η_e 为充电效率。

2.3 纯电动汽车能耗目标建模

在纯电动汽车能耗模型建立之前,首先根据能耗来源的不同将其分为三类^[12]:第一类为行驶能耗,即克服滚动、加速、坡度、空气四种阻力实现驱动行驶的能耗,同时考虑电动汽车制动能耗回收;第二类为空调能耗;第三类为其余附件能耗。基于上述分析,本文建立纯电动汽车模型为

$$E_{all} = \sum_{ij \in V} (E_{ij}^d + E_{ij}^{air} \cdot X_1 + E_{ij}^{media} \cdot X_2) x_{ij} \quad (9)$$

式中: X_1, X_2 为0-1约束变量,即对应耗电设备开启为1,否则为0; E_{all} 为总的能耗; E_{ij}^d 表示行驶能耗; E_{ij}^{air} 表示空调能耗; E_{ij}^{media} 表示其他附件的能耗。

2.3.1 行驶能耗建模

根据汽车理论^[13]可知,在水平路面上汽车行驶的总阻力为

$$F_t = F_f + F_i + F_w + F_j = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta + m \cdot g \cdot \sin \theta + \frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot v'^2 + m \cdot a \quad (10)$$

式中: F_f, F_i, F_w, F_j 分别为汽车行驶时的滚动阻力、坡度阻力、空气阻力、加速阻力; m 表示车辆总质量; C_D 表示空气阻力系数; ρ 为空气密度; A_f 为电动汽车迎风面积; θ 表示坡面角度; g 为重力加速度; v' 为行驶速度; f_r 为滚动阻力系数。

在汽车行驶过程中,由于汽车驱动力与行驶阻力为平衡力,由此汽车的行驶驱动功率为

$$P_m = F_t \cdot v' \quad (11)$$

考虑电机的输出功率经机械传动的过程中会造成损失,将上述功率改为

$$P_m = \frac{v'}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} F_t \quad (12)$$

式中: η_1 为机械传动效率; η_2 为电动机工作效率; η_3 为电池效率。考虑电动汽车的再生制动可以将部分电能恢复并存储至电池中,其再生制动功率为

$$P_{rb} = k \cdot v' \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot F_t \quad (13)$$

式中 k 是再生制动因子。

因此,整个路段包括电动汽车行驶电耗及再生制动回收电耗^[12],结合上述公式得到节点 i 行驶至节点 j 的行驶能耗为

$$E_{ij}^d = (P_m S_d - P_{rb} S_c) \cdot \frac{d_{ij}}{v'_{ij}} \quad (14)$$

式中 s_d 、 s_c 分别表示行驶能耗及制动回收的路段占比,且 $0 \leq s_d < 1, 0 \leq s_c < 1, s_d + s_c = 1$ 。

为了计算便捷,忽略加减速对能耗的影响,将节点 i 行驶至节点 j 经过路段的能耗简化为

$$E_{ij}^d = E1_{ij} + E2_{ij} \quad (15)$$

$$E1_{ij} = \left(\frac{\rho}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot v_{ij}'^2 \right) \left(\frac{s_d}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} - s_c \cdot k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \right) \cdot d_{ij} \quad (16)$$

$$E2_{ij} = (f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta + m \cdot g \cdot \sin \theta) \cdot \left(\frac{s_d}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} - s_c \cdot k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \right) \cdot d_{ij} \quad (17)$$

式中 $E1_{ij}$ 从车辆行驶速度和路网距离获取相关数据, $E2_{ij}$ 由地形所决定。

2.3.2 附件设备能耗建模

1) 空调能耗

电动汽车附件耗能设备的使用对续航里程带来较大的影响,而空调在附件设备能耗占比约 60%。因此,有必要建立空调模型以进一步探究车辆路径规划问题。首先基于空调的热负荷构成热平衡方程^[14]为

$$H = H_O + H_C + H_R + H_M + H_P + H_V \quad (18)$$

式中: H 为汽车整车热负荷; H_O 为车身不透明结构传入的热量; H_C 为玻璃以对流方式传入的热量; H_R 为玻璃以辐射方式传入的热量; H_P 为车内人员散发的热量; H_V 为车内泄漏及补充新风带入的热量; H_M 为空调电气设备造成的热量(取 50 W)。根据各类热负荷与设定温度的相关性简化公式为

$$\begin{cases} H = H_A + H_P + H_V + H_M \\ H_A = H_O + H_C + H_R = U \cdot A_b \cdot |T_{set} - T_{srd}| \\ H_P = 116 \cdot r \cdot \omega \\ H_V = \rho \cdot r \cdot Y \cdot \Delta h / 3.6 \\ H_M = 50 \text{ W} \end{cases} \quad (19)$$

式中: H_A 表示车身热传导负荷; U 表示车身综合的传热系数; A_b 表示车身面积; T_{set} 表示车内空调设定温度; T_{srd} 表示外部温度; r 表示车内人数; ω 表示群集系数,即(成年男子人数 + 成年女子人数 $\times 85\%$ + 小孩人数 $\times 75\%$) / 总人数,以成年男子散热量 116 W 为基础; Y 表示人均所需换气量,取每人 20 m³/h; Δh 表示车内外空气焓差,当车外 35 ℃、车内 25 ℃时, Δh 取 20。

综上,在空调热负荷状态下,维持当前车内温

度所需消耗空调功率 P_{air} 及能耗 E_{ij}^{air} 公式为

$$P_{air} = H \cdot \frac{\gamma}{\delta} \quad (20)$$

$$E_{ij}^{air} = P_{air} \cdot \frac{d_{ij}}{v_{ij}'} \quad (21)$$

式中 γ 为热负荷传递系数; δ 为压缩机效率。

2) 其余能耗附件

除空调耗能以外,附件耗电设备还有动力转向系统、导航系统、音响、喇叭、车灯等,计算能耗公式为

$$E_{ij}^{media} = p_{media} \cdot \frac{d_{ij}}{v_{ij}'} \quad (22)$$

式中 p_{media} 为其余附件功率。

2.4 多目标路径规划函数建模

2.4.1 目标函数

以上文各目标函数为基础建立多目标路径函数^[15]为

$$\min F(x) = (\alpha_0 \cdot L_d + \beta_0 \cdot T_{all} + \gamma_0 \cdot E_{all}) \quad (23)$$

式中 α_0 、 β_0 、 γ_0 为系数,分别代表出行用户对距离、时间及能耗需求的重要程度,其系数越大表示对应目标需求越高,且 $\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 1$ 。

此外,由于距离、时间及能耗三个研究目标具有不同的单位、量纲和数量级,当求解多目标问题时,若直接相加求和,会突出数值较大的因素在目标函数中的作用。因此对其采用标准化处理^[16]消除三者之间的量纲关系,构建目标函数为

$$\min F(x) = \left(\alpha_0 \frac{L_d - L_{d,\min}}{L_{d,\max} - L_{d,\min}} + \beta_0 \frac{T_{all} - T_{all,\min}}{T_{all,\max} - T_{all,\min}} + \gamma_0 \frac{E_{all} - E_{all,\min}}{E_{all,\max} - E_{all,\min}} \right) \quad (24)$$

式中 $L_{d,\min}$ 、 $L_{d,\max}$ 、 $T_{all,\min}$ 、 $T_{all,\max}$ 、 $E_{all,\min}$ 、 $E_{all,\max}$ 分别表示距离、时间、能耗的最小值和最大值。

2.4.2 约束条件

1) 路径选择约束

$$\sum_{\substack{j=O \\ i,j \in V}}^D x_{ij} - \sum_{\substack{j=O \\ i,j \in V}}^D x_{ji} = \begin{cases} 1, & i = O \\ 0, & i \neq O, D \\ -1, & i = D \end{cases} \quad (25)$$

式中: O 为起点; D 为目的地。路径选择约束在于规定电动汽车经过的节点,即当节点作为起点,则仅存在 $x_{ij} = 1, x_{ji} = 0$; 若 i 作为中间节点,则存在节点 j_1, j_2 , 使 $x_{ji_1} = 1, x_{ij_2} = 1$; 若 i 作为终点,则仅存在 $x_{ij} = 0, x_{ji} = 1$ 。

2) 剩余电量约束

到达充电站剩余电量 E_{c,s_d} 约束为

$$E_b b_0 - \sum_{i,j \in I} E_{all} \geq 10\% E_b \quad (26)$$

到达目的地剩余电量约束为

$$E_b \cdot 80\% - \sum_{i,j \in Z} E_{\text{all}} \geq 10\% E_b \quad (27)$$

式中: b_0 为电动汽车初始电量; I 表示车辆从起点至充电站途径节点的集合; Z 表示车辆从充电站至终点途径节点的集合, 且 $I, Z \in V$ 。为防止车辆中途抛锚, 在抵达充电站及终点时, 其剩余电量须高于电动汽车电池电量下限, 本文中约束(26)和(27)下限设置为 10%。

3) 车辆充电站充电约束

当车辆抵达充电站时 E_{c,s_a} 小于 80% E_b 的情况下将会有充电需求, 否则无充电需求。

3 基于蚁群算法的路径规划

蚁群算法在搜索最优路径问题上具有较强能力, 且运算效率较高, 其过程如下。

1) 初始化

N 表示迭代次数, 初始化 $N=0$; N_{max} 表示最大迭代次数; M 表示蚂蚁数量。以等量信息素赋值在各个路段上, 并将所有蚂蚁放于起点处, 编入二维禁忌表, 初始化为空, 保证在正常行驶过程中电动汽车不会重复遍历节点。

2) 选择前往节点策略

蚂蚁的任务是从起点出发经过若干个路口到达终点搜索出一条路径, 因此将 M 只蚂蚁均置于起点处按概率函数进行各自搜索任务, 并逐步获得目标路径。设当前蚂蚁 k 由点 i 向点 j 不断移动, 用 l_k 表示未访问节点集合, 若集合为空则终止此次搜索, 否则按以下概率选择前往下一节点。

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\prod_{b=1}^B (\tau_{ij}^b(N))^\alpha] (\varphi_{ij}(N))^\beta}{\sum_{q \in l_k} \{ [\prod_{b=1}^B (\tau_{iq}^b(N))^\alpha] (\varphi_{iq}(N))^\beta \}}, & j \in l_k \\ 0, & j \notin l_k \end{cases} \quad (28)$$

式中: P_{ij}^k 表示当前节点 i 的蚂蚁 k 下一步选择节点 j 的概率; B 表示优化的目标个数, 本文 B 为 3; $\tau_{ij}^b(N)$ 表示不同优化目标 b 在第 N 轮中蚂蚁将要由节点 i 到下一个相邻节点 j 的时刻该路段上已有的信息素浓度; α 表示信息启发式因子, 反映蚂蚁之间在选择路段时相互影响的程度; β 为期望启发式因子, 反映信息启发式因子的重要程度; $\varphi_{ij}(N)$ 为启发函数, 距离、时间及能耗目标的启发函数表达式为

$$\varphi_{ij}(N) = \frac{1}{\alpha_0 \cdot L_d(v_{ij}) + \beta_0 \cdot T_{\text{all}}(v_{ij}) + \gamma_0 \cdot E_{\text{all}}(v_{ij})} \quad (29)$$

按照式(28)、式(29)前往下一相邻节点 j , 若该节点满足约束条件则将其添加至禁忌表, 若不满足则重新选择下一节点。

3) 信息素浓度的更新

信息素更新是为了更快搜索出目标路径, 加强当前所搜索最优路径上的信息素浓度, 同时减弱其他路径上的信息素浓度, 信息素按以下规则更新。

$$\tau_{ij}(N+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(N) + \Delta\tau_{ij}(N) \quad (30)$$

$$\Delta\tau_{ij}(N) = \sum_{k=1}^M \Delta\tau_{ij}^k(N) \quad (31)$$

式中: ρ 表示信息素挥发系数, 取值范围为 $(0, 1)$, 则 $1-\rho$ 为挥发后留下来的变量; 各路段 $\tau_{ij}(0)$ 均一致, $\Delta\tau_{ij}(N)$ 表示本次迭代中在路段 v_{ij} 上增加的信息素值, $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$; $\Delta\tau_{ij}^k(N)$ 表示本次迭代中的第 k 只蚂蚁在路段 v_{ij} 上增加的信息素, 若第 k 只蚂蚁在本次循环中经过路段 v_{ij} , 则 $\Delta\tau_{ij}^k(N) = Q/C_k$, 否则为 0, 其中 Q 表示信息素强度, C_k 表示本次循环中第 k 只蚂蚁搜索路径搜索成本, 即距离、时间或综合因素下的成本。

综上所述, 蚁群算法解决电动汽车路径规划问题的流程如图 3 所示。

4 数值仿真

4.1 仿真条件

4.1.1 纯电动汽车相关参数确定

空调能耗参数设置: 研究时间选取沈阳市夏季下午的两点, 测得 T_{set} 为 25 °C, T_{std} 为 35 °C, 车内 2 名成年男人、2 名成年女人、1 名小孩, ω 为 0.89。同时, 根据所研究车型 A_b 取 16.17 m², U 取 5.39, γ 取 0.6, δ 取 0.89, 得到 p_{air} 为 1.4 kW。 p_{media} 由以下主要附件功率组成, 具体数值为: 电动助力转向器 200 W; 单只大灯(远/近光) 60 W; 喇叭 5~10 W; 导航 70 W; 音响 100 W; 雨刮 50 W。 车辆相关参数见表 2 所示。

此外, 本文车辆电池容量 E_b 为 30 kWh, 由前文约束可知 E_{c,s_a} 不能小于 10% E_b , 即 3 kW, 假设 b_0 为 50% E_b , 可到达三个充电站。中途充电均选择快充模式, 其 p_{s_a} 为 60 kW, η_c 为 0.9。

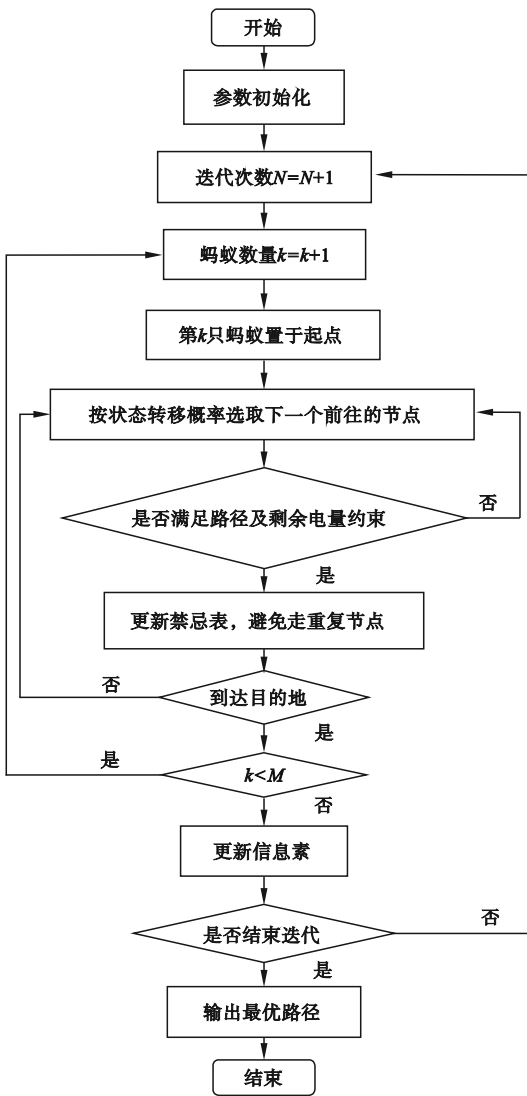


图 3 电动汽车路径规划的流程图

Fig. 3 Flowchart of EV charging path planning

表 2 纯电动汽车参数表

Table 2 Electric vehicle parameters

基本参数	数值	基本参数	数值
车辆质量 m/kg	1 580	迎风面积 A_f/m^2	2
空气阻力系数 C_d	0.40	滚动摩擦系数 f_r	0.015
机械传动效率 η_1	0.92	制动回收因子 k	0.2
电机工作效率 η_2	0.8	电池效率 η_3	0.8

4.1.2 蚁群算法参数确定

相关参数设置如下:信息启发因子 $\alpha = 2$ 、期望启发因子 $\beta = 3$ 、信息挥发因子 $\rho = 0.2$ 、信息素常量 $Q = 10$ 、蚂蚁数量 $M = 90$ 、最大迭代次数 $N = 200$ 。

4.2 路径规划分析

情况 1:在考虑交通畅通和行驶速度时变性的情况下,根据不同电动汽车用户的出行需求不

同,对文中式(23)中 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 三个权重赋值,赋值数据如表 3 所示,其中三个目标 A1、A2、A3 分别为目标距离最短、目标时间最少、目标能耗最少。

表 3 三种目标参数设置

Table 3 Three target parameters settings

目标	α_0	β_0	γ_0
距离最短(A1)	0.6	0.1	0.3
时间最短(A2)	0	1	0
能耗最少(A3)	0.2	0.1	0.5

本文还考虑了交通拥堵情况^[17]及电动汽车的充电需求。因此在上述仿真条件基础上再分三种情况进行讨论:

情况 2:不考虑电动汽车充电需求,考虑道路拥堵状况;情况 3:考虑电动汽车充电需求,不考虑道路拥堵状况;情况 4:考虑电动汽车充电需求,同时也考虑道路拥堵状况。

考虑道路拥堵情况下对时间目标路径影响较大,因此针对情况 2 和情况 4 仅规划时间最短目标路径。将情况 2 条件下,仍选择情况 1 规划的时间路径结果记为 B2,将情况 2 条件下重新规划出最短时间记为 B2';在情况 4 条件下仍选择情况 3 对应时间路径记为 C2,重新规划后记为 C2'。

4.3 多目标路径规划结果分析

基于蚁群算法并利用 Matlab 软件进行数值仿真,从而得到各目标规划路径。

1)情况 1 规划结果:仿真结果对比如表 4 所示,距离最短为 30.7 km,时间最短为 0.616 6 h,能耗最少为 5.305 6 kWh,对应不同出行路径如图 4 所示。

表 4 情况 1 路径规划结果对比

Table 4 Comparison of path planning results in case 1

目标	距离/km	时间/h	能耗/kWh
A1	30.70	0.624 0	5.320 2
A2	30.80	0.616 6	5.349 7
A3	30.80	0.619 7	5.305 6

2)情况 2 规划结果:在交通拥堵情况下若仍选择上述图 4 中的时间最短路径,得到结果如表 5 所示,其中目标耗时 1.092 4 h,相比情况 1 的 A2 目标增加了 0.475 8 h,因此重新规划出目标,耗时为 0.665 4 h,相比 B2 时间缩短了 0.427 h。情况 2 重新规划的优选时间路径与情况 1 道路畅通条件下的 A2 目标对比如图 5 所示,可见,动态交通对路径规划影响较大。

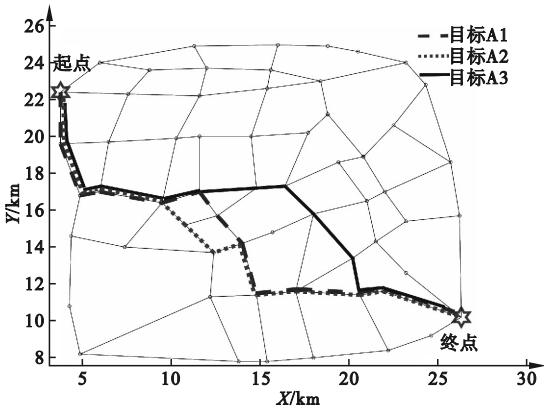


图4 道路畅通优选路径

Fig. 4 Preferred path for road accessibility

表5 情况2 路径规划结果对比

Table 5 Comparison of path planning results in case 2

目标	距离/km	时间/h	能耗/kWh
B2	30.80	1.092 4	6.218 9
B2'	34.00	0.665 4	5.692 0

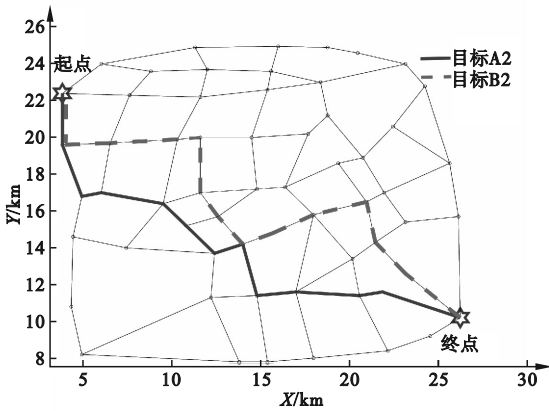


图5 道路畅通与拥堵优选路径对比

Fig. 5 Comparison of preferred paths for smooth roads and the congestion

3) 情况3 规划结果: 仿真结果对比如表6所示, 经过充电站 S_2 距离最短为 31.30 km, 经过充电站 S_3 时间最短为 0.793 5 h, 经过充电站 S_1 能耗最少为 5.346 5 kWh, 对应不同出行路径如图6所示。

4) 情况4 规划结果: 在交通拥堵情况下若仍选择上述图6中的时间最短充电路径, 得到结果如表7中 C2 所示, 耗时均增加。因此在拥堵路况下重新规划出经过三个充电站的时间最短充电路径, 对应数据见表7中目标 C2' 所示。以经过充电站 S_3 的路径为例, 其对应目标耗时为 1.092 4 h, 相比情况3的 A2 目标增加了 0.266 4 h, 因此重

表6 情况3 充电路径规划结果对比

Table 6 Comparison of charging path planning results in case 3

目标	充电站	距离/km	充电时间/h	总耗时/h	能耗/kWh
A1	S_2	31.30	0.170 2	0.800 4	5.421 0
A2	S_3	32.40	0.163 2	0.793 5	5.597 0
A3	S_1	31.90	0.171 9	0.798 6	5.346 5

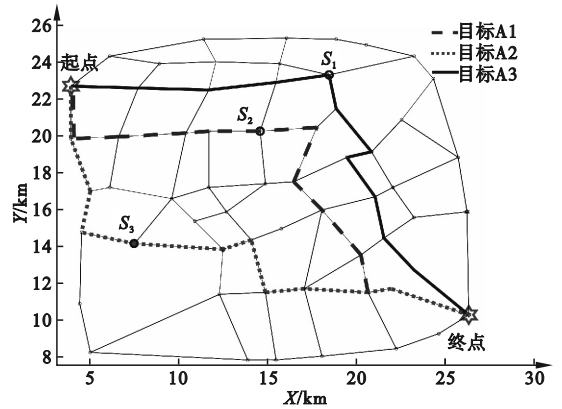


图6 道路畅通优选充电路径

Fig. 6 Preferred charging path with smooth road access

表7 充电路径规划结果对比

Table 7 Comparison of charging path planning results

目标	充电站	距离/km	充电时间/h	总耗时/h	能耗/kWh
C2	S_3	32.40	0.163 2	1.059 9	6.098 6
C2	S_2	31.30	0.177 5	1.353 4	6.456 0
C2	S_1	31.90	0.178 9	1.055 2	5.816 7
C2'	S_3	35.80	0.163 2	0.870 4	6.202 0
C2'	S_2	34.90	0.176 4	0.861 2	5.862 7
C2'	S_1	33.40	0.175 8	0.832 9	5.608 2

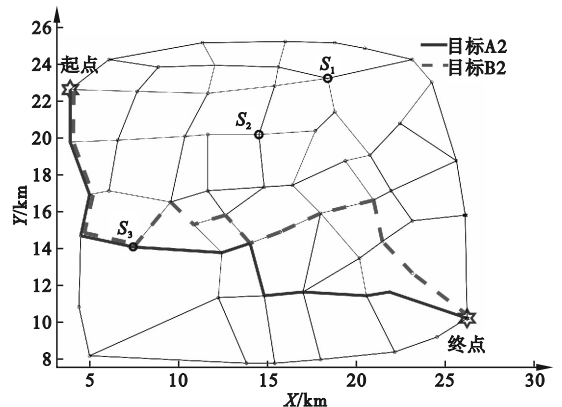


图7 道路畅通与拥堵优选充电路径对比

Fig. 7 Comparison of preferred charging paths for smooth roads and the congestion

新规划出目标,耗时为 0.870 4 h,相比时间缩短了 0.189 5 h,情况 3 的 A2 目标与情况 4 重新规划路径对比如图 7 所示。通过表 7 的数据对比可知,在拥堵情况下经过 S_1 充电站的充电耗时最短,耗时为 0.832 9 h。

5 结论

1) 现实的交通环境是动态变化的复杂系统,静态路网研究并不能真实反映路网的实况,因此本文提出了一种综合考虑交通动态性及速度时变性的纯电动汽车路径规划方法。

2) 全面考虑了纯电动汽车行驶能耗、制动能量回收、空调及其它附件设备能耗,建立了电动汽车路径规划的能耗模型,同时结合时间、距离函数模型建立了多目标路径函数模型。

3) 根据电动汽车用户不同的出行目标,基于蚁群算法规划出对应目标的优选路径,结果表明,所提路径规划方法可为纯电动汽车用户提供合理且多样性的出行选择,缓解出行焦虑。

参考文献 (References):

- [1] 张必达,闫强,张琳,等. 基于实时交通信息的电动汽车充电电路径规划方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(10):2333-2342.
ZHANG B D, YAN Q, ZHANG L, et al. Charging and battery swapping route planning for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2333-2342. (in Chinese)
- [2] 林歆悠,周斌豪,夏玉田. 融合动态能耗与路网信息的电动汽车充电电路径规划策略[J]. 中国机械工程,2021,32(6):705-713.
LIN X Y, ZHOU B H, XIA Y T. Charging path planning strategy of electric vehicles with integrating dynamic energy consumption and network information[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(6): 705-713. (in Chinese)
- [3] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [4] 严弈遥,罗禹贡,朱陶,等. 融合电网和交通网信息的电动汽车最优充电电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 310-318.
YAN Y Y, LUO Y G, ZHU T, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318. (in Chinese)
- [5] GHOSEIRI K, NADJARI B. An ant colony optimization algorithm for the bi-objective shortest path problem[J]. Applied

- Soft Computing, 2010, 10(4): 1237-1246.
- [6] 冯智泉,黄亦翔,李杰,等. 蚁群算法求电动汽车最优行驶路径与充电方案[J]. 机电一体化, 2013, 19(8): 43-48.
FENG Z Q, HUANG Y X, LI J, et al. Ant colony algorithm for EV path and charging optimization[J]. Mechatronics, 2013, 19(8): 43-48. (in Chinese)
- [7] DING N, YANG J S, HAN Z B, et al. Electric-vehicle routing planning based on the law of electric energy consumption[J]. Mathematics, 2022, 10(17): 3099.
- [8] ELGAREJ M, KHALIFA M, YOUSSEFI M. Optimized path planning for electric vehicle routing and charging station navigation systems[J]. International Journal of Applied Metaheuristic Computing, 2020, 11(3): 58-78.
- [9] 胡林,周登辉,黄晶,等. 考虑信号灯和能耗的电动车最优路径规划[J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 641-649, 666.
HU L, ZHOU D H, HUANG J, et al. Optimal path planning for electric vehicle with consideration of traffic light and energy consumption[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(5): 641-649, 666. (in Chinese)
- [10] 邢强,陈中,冷钊莹,等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 534-550.
XING Q, CHEN Z, LENG Z Y, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-550. (in Chinese)
- [11] YANG S C, LI M, LIN Y, et al. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 402: 41-48.
- [12] 路鹏伟. 车联网协同下的电动汽车充电电路径规划研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.
- [13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [14] 徐丹,苏林,兰娇,等. 电动汽车空调负荷特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(8): 74-77.
XU D, SU L, LAN J, et al. A study on load characteristics of EVs[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(8): 74-77. (in Chinese)
- [15] 张辉,徐玮,王朝辉. 计及行驶工况的多目标纯电动汽车路径规划[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 83-89.
ZHANG H, XU W, WANG C H. Path planning of multi-objective pure electric vehicle considering driving conditions[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(5): 83-89. (in Chinese)
- [16] 苏粟,杨恬恬,李玉璟,等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电电路径规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 136-143.
SU S, YANG T T, LI Y J, et al. Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 136-143. (in Chinese)
- [17] KOBAYASHI Y, KIYAMA N, AOSHIMA H, et al. A route search method for electric vehicles in consideration of range and locations of charging stations[C]//2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Baden-Baden, Germany: IEEE, 2011: 920-925.

(责任编辑:和晓军)