

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.043

基于改进 A^* 算法的电动车能耗最优路径规划^{*}

顾青 豆凤铅 马飞

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种基于改进 A^* 算法的电动车能耗最优路径规划方法。根据车辆运行时的能耗, 考虑能量损失与回收等因素, 建立了运行能耗函数。设计了新的启发式能耗预估代价对 A^* 算法进行改进, 证明了所提出的启发式能耗预估代价满足可采纳性和一致性, 确保改进的 A^* 算法可获得能耗最优路径。针对电动车的里程焦虑问题, 基于改进的 A^* 算法, 建立了根据车载电池的剩余电量、充电站位置、终点位置来寻找可达的能耗最小路径方法。仿真实验表明, 提出的方法可以找到起点到终点的能耗最小路径, 当车载电池能量不足时, 可以找到经过充电站的可行最小能耗路径, 减少里程焦虑, 验证了所提方法的合理性和可行性。

关键词: 电动汽车 路径规划 A^* 算法

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0316-07

Energy Optimal Path Planning of Electric Vehicle Based on Improved A^* Algorithm

Gu Qing Dou Fengqian Ma Fei

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With energy supplies intense increasingly and environmental protection being concerned in particularly, electric vehicle gained great development in recent years with the characteristics of low exhaust emission, low noise and independent of petroleum. For electric vehicle, the onboard battery capacity is limited. Therefore, the technology of energy utilization improvement has become the research focus. An improved A^* algorithm based energy optimal path planning method for electric vehicle was proposed and verified. Energy consumption cost function was built with consideration of the energy loss and recuperation along the path. New heuristic estimated energy cost function was designed to improve A^* algorithm. The heuristic estimated energy cost function was proved to be admissible and consistent, which can ensure the optimality of the improved A^* algorithm. According to the range anxiety problem, a feasible energy optimal path planning method was proposed with consideration of the state of charge battery, the positions and altitudes of the charging stations and destination. Simulation experiments showed that the proposed method can find the energy optimal path between the origin and the destination. When the battery energy was low, the proposed path planning method can find the feasible energy optimal path with a charging station to reduce range anxiety, which verified the rationality and feasibility of the proposed method.

Key words: Electric vehicle Path planning A^* algorithm

引言

由于电动车的零排放、高能源利用率、噪声小等

优点, 近年来, 电动汽车作为一种替代当前基于化石燃料的运输设备得到了很大的发展。到2015年底, 我国电动汽车保有量将达到300万辆^[1]。但是, 电

收稿日期: 2015-08-18 修回日期: 2015-09-30

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAB02B07)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA060408)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-15-023A1)

作者简介: 顾青, 讲师, 主要从事智能车辆运行控制和智能交通系统研究, E-mail: qinggu@ustb.edu.cn

通讯作者: 马飞, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆动力学、车辆振动与噪声分析与控制研究, E-mail: yeke@ustb.edu.cn

动车技术还存在一定不足,例如:电池充电时间较长,由于电池容量的限制使车辆行驶里程较短,加之充电站和充电桩还没有广泛普及,经常会给司机造成里程焦虑问题等,这些因素都制约了电动车的进一步发展。为了加快电动车的普及和发展,合理的行车路径规划成为了迫切需求。

国内外对于路径规划问题已经开展了很多研究,开发了一系列有效的算法,包括人工势场法^[2]、遗传算法^[3-4]、蚁群算法^[5]、粒子群算法^[6]和 A^* 算法^[6-9]等,并在无人机航迹规划、无人车导航、机器人路径规划等领域广泛应用。目前,电动车路径规划主要是以电池电量为约束的行驶路径规划,以及最优的充电路径规划^[10-14]。

然而,由于不同的路径有不同的坡度,因此相同长度的路径也可能有不同的能耗。而且由于路口有信号灯的制约,车辆需要经常的制动和启动。同时,在车辆的实际运行过程中,经常出现由于起始的时候电池没有充满,当路程较长的时候需要在途中再次充电的情况;但是,目前的算法多以最短路径为目标,而根据电动车的起点位置、电池容量、当前充电电量、充电站的位置以及终点位置进行路径规划的研究较少。这主要是因为若是将最短行驶距离作为目标,不考虑能耗相关的参数(例如:再生制动回收能量和电池容量限制),则原问题与一般车辆的最短路径规划问题相同,而这类问题已经有了很多成熟的解法。文献[15]以能耗最小为目标研究了电动车路径规划问题,但是没有考虑车辆在交叉路口需要制动/启动的能耗,以及车辆运行中需要充电的情况。

因此,本文在考虑启动/制动能耗,以及运行中需要充电的情况,提出一种基于改进 A^* 算法的以能耗最小为目标的电动车路径规划方法。设计车辆运行能耗模型,并基于此设计启发式预估代价,并证明其具有可采纳性和一致性,进而可以得到最优解。

1 A^* 算法

A^* 算法是一种静态路网中求解最短路径最有效的直接搜索方法。算法采用启发式函数来寻找距离起点具有最小代价的终点,对于节点 n 的估计函数的一般形式为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中 $g(n)$ ——起始节点到当前节点的实际代价

$h(n)$ ——当前节点到目标节点的预估代价

预估代价 $h(n)$ 是启发式函数,用于指导搜索朝着最有希望的方向前进,估价值与实际值越接近,估价函数取得就越好,使得搜索过程中展开的节点数

尽量小,从而提高搜索效率。估价函数 $f(n)$ 的作用是估计 Open 表中各节点的重要性程度,决定它们在 Open 表中的次序。其中 $g(n)$ 决定搜索的横向趋势,它有利于搜索的完备性,但影响搜索的效率。在确定 $f(n)$ 时,需要权衡各种利弊得失,使 $g(n)$ 和 $h(n)$ 各占一定的比重。

A^* 算法通过两个条件来保证解的最优性。首先 $h(n)$ 必须满足可采纳性条件,也就是 $h(n)$ 不会超过当前节点到目标节点路径真实代价。更重要的是 $h(n)$ 必须具有一致性,也就是必须满足

$$h(n) \leq c(n, n') + h(n') \quad (2)$$

式中 $c(n, n')$ ——节点 n 到下一个节点 n' 的真实代价

$h(n')$ ——节点 n' 到终点的预估代价

如果 $h(n)$ 符合一致性条件,那么任何路径上的 $f(n)$ 都是单调非递减的^[16],同时也说明 $h(n)$ 具有可采纳性。证明如下:若 n' 是 n 的后一个节点,则有

$$g(n') = g(n) + c(n, n') \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f(n') &= g(n') + h(n') = g(n) + c(n, n') + h(n') \\ &\geq g(n) + h(n) \end{aligned} \quad (4)$$

对于路径规划问题,可以给定一个有向图 $G(V, E)$, $|V| = n$, $|E| = m$ 来描述路网。其中顶点 $v \in V$ 代表路口,边 $e \in E$ 代表路段,对于每个路口都给出了海拔高度 $a: V \rightarrow \mathbf{R}_0^+$, 每一段路段都给出了长度 $l: E \rightarrow \mathbf{R}^+$ 和限速 $S: E \rightarrow \mathbf{N}$ 。这样一条路径 P 就可以通过一系列定点和边来描述 (v_1, v_2, \dots, v_k) , 其中 $(v_i, v_{i+1}) \in E, i = 1, 2, \dots, k-1$ 。此外,还要定义如下参数: C_{\max} 为电池最大容量; J 为电池的充电电量, $J \leq C_{\max}$; U 为电池剩余容量, $U = C_{\max} - J$; Δ^k 为车辆走过这条路径所耗消耗或者获得的能量。通过对车辆在每条边行驶所消耗或者获得的能量的计算,可将有向图转换为带权有向图,权值代表能量,每条边的能量为 $c: E \rightarrow \mathbf{R}$ 。若在不考虑车载电池容量约束的情况下,本文首先在带权有向图 $G(V, E, c)$ 中寻找车辆从起点运行至终点具有最小能量消耗的路径。

2 车辆能耗

电动车辆行驶时,根据能量转换和守恒定律,电能转换为了车辆的动能和势能,并被摩擦阻力消耗掉。此外,由于很多电动车能回收制动动能,或者下坡时将势能转换为电能存储起来,所以还包括回收的能量。

2.1 势能

当车辆在一条上坡路段 (n, n') 上行驶时,一部分电能会转换为势能,记为

$$C_c(n, n') = \frac{1}{\eta_1} mg(a(n') - a(n)) \quad (5)$$

式中 m ——车辆质量 g ——重力加速度
 η_1 ——能效因子 $\eta_1 \in [0, 1]$

记转换为势能所消耗电能为 Δ_c , $\Delta_c \geq 0$ 。则 C_c 的取值为

$$C_c(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta_c & (k>1) \end{cases} \quad (6)$$

当 (n, n') 是下坡路段时, 则势能会转换为电能存储起来, 因此, 得到的能量为

$$C_g(n, n') = \eta_2 mg(a(n') - a(n)) \quad (7)$$

式中 η_2 ——能量回收因子 $\eta_2 \in [0, 1]$

当制动能不被回收时 $\eta_2 = 0$, 当再生制动能量能够被完全回收时 $\eta_2 = 1$ 。一般来说, 这部分能量会被电池存储起来, 但当电池被充满的时候, 能量则不会继续回收。记由势能转为电能能量为 Δ_g , $\Delta_g < 0$, C_g 的取值为

$$C_g(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta_g & (k>1) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 空气和滚动摩擦阻力消耗的能耗

车辆行驶时, 为了克服滚动摩擦阻力和空气阻力会消耗掉一部分能量, 记为 C_r

$$C_r(n, n') = \frac{1}{\eta_1} (f_r mg \cos \theta l(n, n') + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S(n, n')^2 l(n, n')) \quad (9)$$

式中 f_r ——滚动摩擦因数
 ρ ——空气密度
 A ——车辆横截面积
 c_ω ——空气阻力系数
 S ——车辆在路段 (n, n') 上的平均速度
 θ ——坡道与水平面的夹角

当风的方向与车辆行驶的方向相同, 且风速不小于车辆运行速度时, 式(9)中空气动力阻力项的取值为0。记被消耗的能量为 Δ_r , $\Delta_r > 0$, C_r 的取值为

$$C_r(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta_r & (k>1) \end{cases} \quad (10)$$

2.3 牵引和制动的能耗

车辆在每个路段牵引到平均速度需要消耗一定电能, 记为 C_i ; 而在下一个路口前制动停车时则会回收制动能耗, 记为 C_b , 表达式为

$$C_i(n, n') = \frac{1}{2\eta_1} m S(n, n')^2 \quad (11)$$

$$C_b(n, n') = -\frac{\eta_2}{2} m S(n, n')^2 \quad (12)$$

记牵引加速和制动回收的电能分别为 Δ_i ($\Delta_i \geq 0$)、 Δ_b ($\Delta_b \leq 0$), C_i 、 C_b 的取值为

$$C_i(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta_i & (k>1) \end{cases} \quad (13)$$

$$C_b(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta_b & (k>1) \end{cases} \quad (14)$$

2.4 总体能量

根据 2.1~2.3 节的分析, 车辆在边 (n, n') 行驶时的能耗为各部分能耗之和, 记为 C_E 。另外, 考虑到车载设备需要消耗一部分电能, 所以在总能耗上乘以系数 η_3 , $\eta_3 \in (1, 2]$ (η_3 取值由不同的车辆生产厂商给出), 所以, 车辆在路段 (n, n') 行驶时的能耗为

$$C_E(n, n') = \eta_3 (C_c(n, n') + C_g(n, n') + C_{ar}(n, n') + C_{ac}(n, n') + C_{ab}(n, n')) \quad (15)$$

其中

$$C_E(n, n') = \begin{cases} 0 & (k=1) \\ \Delta^E & (k>1, \Delta^E < 0, |\Delta^E| < U) \\ -U & (k>1, \Delta^E < 0, |\Delta^E| \geq U) \\ \Delta^E & (k>1, \Delta^E > 0, |\Delta^E| \leq J) \\ \infty & (k>1, \Delta^E > 0, |\Delta^E| > J) \end{cases} \quad (16)$$

所以, 车辆沿路径 $P^k(v_1, v_2, \dots, v_k)$ 行驶的总能耗为

$$C_E(P^k) = \sum_{j=1}^{k-1} C_E(v_j, v_{j+1}) \quad (17)$$

3 综合估价函数

根据第2节的分析可知, 带权有向图 $G(V, E, c)$ 中每条边的权值为 $c(n, n') = C_E(n, n')$ 。根据能量守恒定律, 带权有向图 $G(V, E, C_E)$ 中不含负权环。然而, 由于考虑了势能, 所以带权有向图 $G(V, E, C_E)$ 中有的边的权值有可能是负数。对于在含有负权值的有向图中寻找最短路径的问题, 可以通过 Bellman-Ford 算法解决, 但是时间复杂度过高。为了降低求解时间, 本文采用另一种方法, 文献[17]中证明, 定义一个势函数 Π , 当势函数满足条件 $\Pi(n) - \Pi(n') \leq C_E(n, n')$, 且权函数 c_Π 具有如下形式 $c_\Pi(n, n') = C_E(n, n') + \Pi(n) - \Pi(n')$ 时, 则可将有向图 (V, E, C_E) 转换为一个正的权值减小有向图 (V, E, c_Π) 。此时有向图 (V, E, c_Π) 中的最短路径问题的解也是有向图 (V, E, C_E) 中最短路径问题的解。

此时可以发现, 根据本文对权值的定义, 势函数 $\eta_3 C_c$ 、 $\eta_3 C_g$ 就是势函数 Π , 因此可以直接得到正减小权值 c_Π 。

定理 1: 势能函数 C_c 、 C_g 可将权值 C_E 转换为减小正权值 c_H 。

证明:

$$\begin{aligned} c_H(n, p) &= C_E(n, p) + \Pi(n) - \Pi(p) = \\ &\eta_3(C_c(n, p) + C_g(n, p) + C_r(n, p) + \\ &C_t(n, p) + C_b(n, p)) + \Pi(n) - \Pi(p) = \\ &\eta_3(C_r(n, p) + C_t(n, p) + C_b(n, p)) \end{aligned}$$

将式(11)、(12)代入上式可得

$$\begin{aligned} c_H(n, p) &= \\ \eta_3 C_r(n, p) + \frac{\eta_3}{2\eta_1} m S(n, p)^2 - \frac{\eta_3 \eta_2}{2} m S(n, p)^2 &= \\ \eta_3 C_r(n, p) + \frac{\eta_3}{2} m S(n, p)^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) \end{aligned}$$

由于 $\eta_1 \in [0, 1]$, $\eta_2 \in [0, 1]$, $\eta_3 \in (1, 2]$ 所以

$$\eta_3 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) > 0, \text{ 由此可知}$$

$$\begin{aligned} c_H(n, p) &= \\ C_r(n, p) + \frac{1}{2\eta_1} m S(n, p)^2 - \frac{\eta_2}{2} m S(n, p)^2 &= \\ \eta_3 C_r(n, p) + \frac{\eta_3}{2} m S(n, p)^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) > 0 \end{aligned}$$

在有向图 (V, E, ϵ_H) 中, 综合估价函数中的 $g(n)$ 为从起点到当前节点 n 的总能耗, 启发式估价函数 $h(n)$ 为当前节点 n 到终点的预估能耗, 如式(18)所示, 用当前节点到终点的到直线距离 l 和所有路段的最小速度 S_{\min} 进行计算。为了证明 $h(n)$ 具有一致性, 分别定义两个顶点 u 和 v 以及终点 t 。

定义如下启发式预估代价

$$h(u, t) = \eta_3(h_r(u, t) + h_t(u, t) + h_b(u, t)) \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} h_r(u, t) &= \frac{1}{\eta_1} \left(f_r m g \cos \theta l'(u, t) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l'(u, t) \right) \\ h_t(u, t) &= \frac{1}{2\eta_1} m S_{\min}^2 \quad h_b(u, t) = -\frac{\eta_2}{2} m S_{\min}^2 \end{aligned}$$

定理 2: $h(u, t)$ 在有向图 (V, E, ϵ_H) 中是一致的。

证明:

$$\begin{aligned} h(u, t) &= \eta_3(h_r(u, t) + h_t(u, t) + h_b(u, t)) = \\ \eta_3 \left(f_r m g \cos \theta l'(u, t) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l'(u, t) \right) &+ \\ \frac{\eta_3}{2} m S_{\min}^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{由于} \quad l'(u, t) \leq l(u, p) + l'(p, t) \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得

$$h(u, t) \leq \frac{\eta_3}{\eta_1} (f_r m g \cos \theta (l(u, p) + l'(p, t)) + \frac{\eta_3}{2} \rho A c_\omega$$

$$S_{\min}^2 (l(u, p) + l'(p, t)) + \frac{\eta_3}{2} m S_{\min}^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) \leq$$

$$\frac{\eta_3}{\eta_1} \left(f_r m g \cos \theta l(u, p) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l(u, p) \right) +$$

$$\frac{\eta_3}{\eta_1} \left(f_r m g \cos \theta l'(p, t) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l'(p, t) \right) +$$

$$\frac{\eta_3}{2} m S_{\min}^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) \leq$$

$$\frac{\eta_3}{\eta_1} \left(f_r m g \cos \theta l(u, p) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l(u, p) \right) +$$

$$\frac{\eta_3}{2} m S_{\min}^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) +$$

$$\frac{\eta_3}{\eta_1} \left(f_r m g \cos \theta l'(p, t) + \frac{1}{2} \rho A c_\omega S_{\min}^2 l'(p, t) \right) +$$

$$\frac{\eta_3}{2} m S_{\min}^2 \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{\eta_2}{2} \right) =$$

$$c_H(u, p) + h(p, t)$$

因此 $h(u, t)$ 在有向图 (V, E, ϵ_H) 中是一致的。

也就是说在有向图 (V, E, ϵ_H) 中采用 A* 算法可以找到最优解。

4 考虑中途充电的能耗最优路径规划方法

根据第 3 节分析可知, 通过本文所设计的启发式预估代价式(18), 可以找到从起点到终点的最小能耗的路径, 记为 P_{O-D}^k 。然而, 若起始时电池充电量不足, 即 $E^{\min} > J$, 车辆也无法行驶完整旅程。因此, 应当考虑充电站的位置, 设计合理的方法找到使车辆运行至终点能耗最小的路径。本文主要考虑中短途路径规划, 考虑如下情况: 一次充满车载电池, 就能保证车辆驶完全程, 也就是起点到终点的路径长度不超过车辆的续航里程, 在这种情况下 $E^{\min} < C_{\max}$ 。

当车辆出发时, 首先利用本文提出的改进的 A* 算法得到起点到终点的最小能耗路径 $P^k(v_1, v_2, \dots, v_k)$, 并记能耗为 E^{\min} 。比较 E^{\min} 和 J 的关系。

(1) 若 $E^{\min} \leq J$, 则车辆就按照路径 $P^k(v_1, v_2, \dots, v_k)$ 行驶。

(2) 若 $E^{\min} > J$, 则说明电池目前的电量不能支持车辆沿路径 $P^k(v_1, v_2, \dots, v_k)$ 行驶到终点。需要重新规划路径。

记从起点续航里程半径内的充电站为 CS_i , 其中 i 为充电站编号, $i \in \mathbf{Z}$ 。车辆需要先行驶到一个可达的充电站进行充电, 然后再行驶至终点。具体方法如下: 记起点为 O , 终点为 D 。计算从起点 O 到每

个充电站 CS_i 的能耗最小路径,记路径为 $P_{O-CS_i}^k$,能耗为 $E_{O-CS_i}^{\min}$,选择 $E_{O-CS_i}^{\min} < J$ 的充电站,记为可达充电站 ACS_i 。再计算每个可达充电站 ACS_i 到终点 D 的最小能耗路径,记路径为 $P_{ACS_i-D}^k$,相应的能耗为 $E_{ACS_i-D}^{\min}$ 。记 $E_{O-ACS_i-D}^{\min} = E_{O-ACS_i}^{\min} + E_{ACS_i-D}^{\min}$,记相应的路径为 $P_{O-ACS_i-D}^k$ 。查找 $E_{O-ACS_i-D}^{\min}$ 中的最小值,记为 $E_{O-ACS_i-D}^{\min}$,并记起相应的路径为 $P_{O-ACS_i-D}^{k-\min}$,可知 $P_{O-ACS_i-D}^{k-\min}$ 就是满足从起点 O 到终点 D 的能耗最优路径。图1为本算法的流程图。

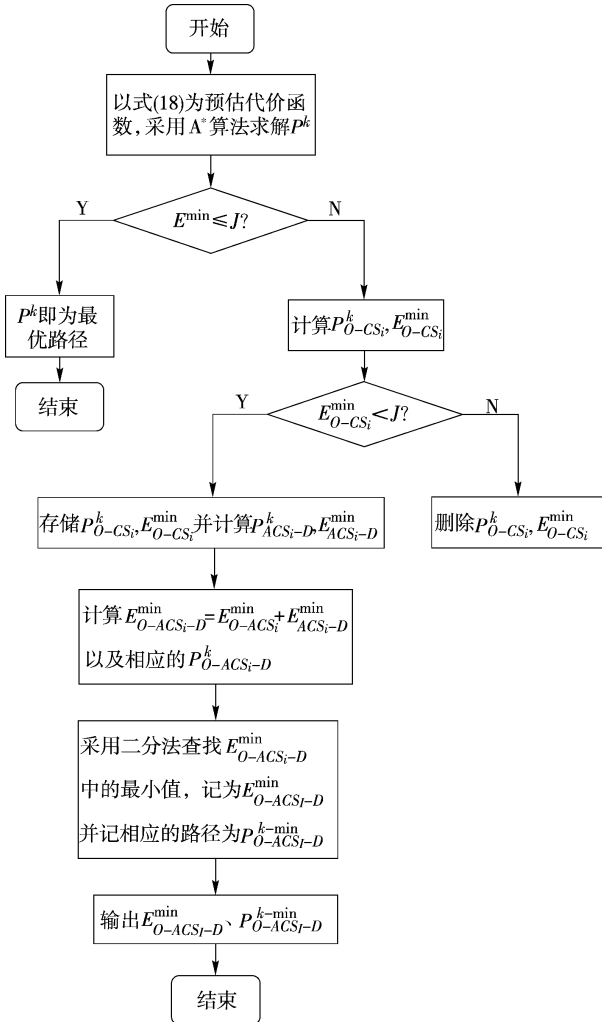


图1 考虑中途充电的能耗最优路径规划方法流程图

Fig.1 Flow chart of energy optimal path planning methods

5 仿真分析

采用仿真实验来验证算法的合理性和有效性。图2为路网结构的水平面图,其中每个节点代表一个路口,节点间的连线代表路段。图3为路网结构三维图,可以看出每个节点还具有一定的海拔高度。在路网中总共有65个节点,包括3个充电站,标记为*。起点标注为○,终点为△。仿真参数如表1所示。基于一辆可以部分回收再生制动能的电动车

(能量回收效率为20%)采用2个仿真实验来验证算法的合理性和有效性。

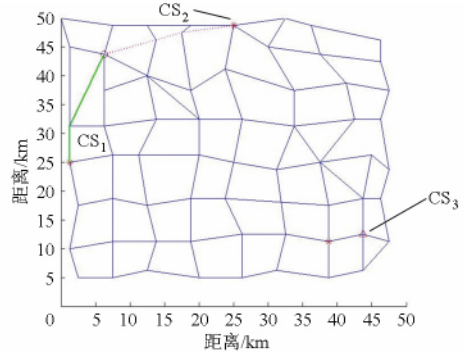


图2 路网平面图-能耗最优充电路径

Fig.2 2D road network-energy optimal path

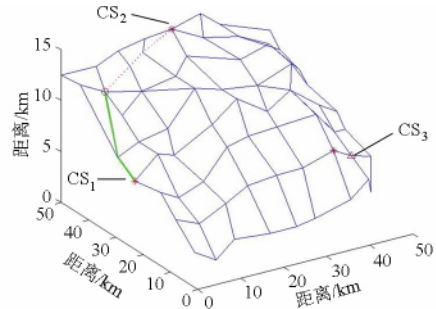


图3 路网三维图-能耗最优充电路径

Fig.3 3D road network-energy optimal path

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
车辆质量 m/kg	1 000
能效因子 η_1	0.8
能量回收因子 η_2	0.2
车载设备能耗因子 η_3	1.1
空气阻力系数 c_w	0.45
车辆横截面积 A/m^2	2
电池最大容量 $C_{\max}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	25
空气密度系数 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2
平均速度 $S/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	50
滚动摩擦因数 f_r	0.01
重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	10

(1) 仿真实验1,寻找从起点出发的最小代价充电路径。

从起点到充电站 CS_1 的能耗最优路径的长度为15.77 km,由绿色实线标出。从起点到充电站 CS_2 的能耗最优路径的长度为15.56 km,通过红色虚线标出。因此可知 CS_2 距起点较近。通过图3可以看到,从起点开始向 CS_1 行驶为下坡,向 CS_2 行驶为上坡,且行驶至 CS_2 需要经过多个路口。由于车辆下坡时能回收一部分能耗,且在形式的过程中避免了多次的启动和制动,能耗为1.49 kW·h,起点到 CS_2 的能耗为1.58 kW·h。因此

尽管起点距离 CS_2 较近, 车辆到 CS_2 的能耗要高于到 CS_1 的能耗, 所以, 最优充电路径为起点到 CS_1 的最小能耗路径, 由绿色标出。从仿真实验 1 中可以看出, 并不是距离近能耗就小, 因此, 根据能耗选择行驶路径更为合理。

(2) 仿真实验 2, 寻找从起点出发到终点的能耗最优路径。

根据本文提出的算法可知, 终点的能耗最优路径为图 4、图 5 中红色虚线所示(图 4 为平面图, 图 5 为三维图), 路径长度 42.22 km, 能耗为 4.64 $kW \cdot h$, 但是若车载电池的初始充电量为 3 $kW \cdot h$, 则若中途不充电的话, 则无法行驶完整个路程就会耗尽电池电量。通过应用本文提出的算法计算, 得到可达的能耗最优路径为图 6、图 7 绿色实线所示(图 6 为平面图, 图 7 为三维图), 路径长度为 57.33 km, 能耗为 6.2 $kW \cdot h$ 。可以看出, 车辆先运行到 CS_2 充电, 再运行至终点, 而并不是先去 CS_1 充电。这是由于尽管车辆到 CS_1 的能耗小于到 CS_2 的能耗, 但是 CS_1 到终点的

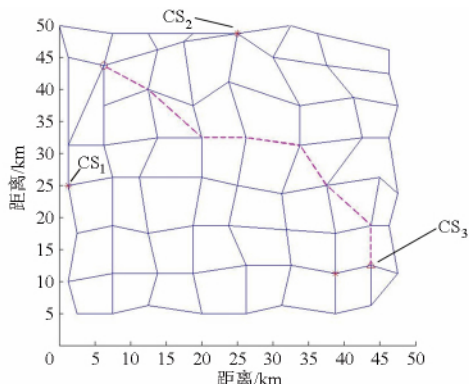


图 4 路网平面图-能耗最优路径

Fig. 4 2D road network-energy optimal path

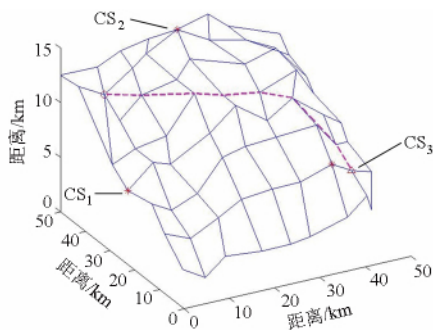


图 5 路网三维图-能耗最优路径

Fig. 5 3D road network-energy optimal path

能耗要高于 CS_2 到终点的能耗(CS_1 到终点的能耗为 4.76 $kW \cdot h$, CS_2 到终点的能耗为 4.62 $kW \cdot h$), 所以先去 CS_2 充电的路径总能耗最小, 即绿色路径。

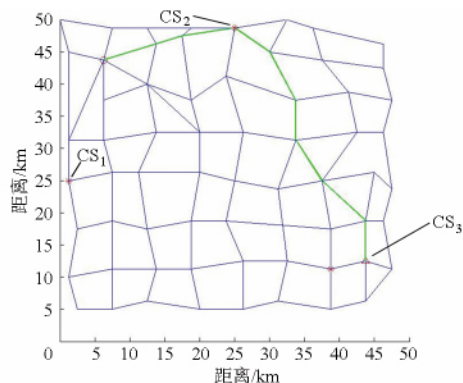


图 6 路网平面图-可达能耗最优路径

Fig. 6 2D reachable energy optimal path

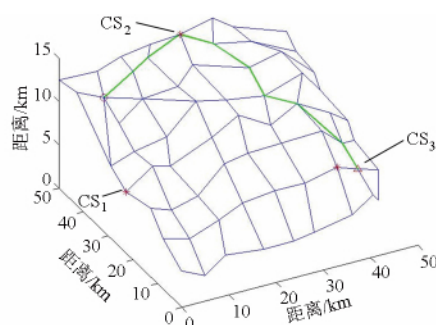


图 7 路网三维图-可达能耗最优路径

Fig. 7 3D reachable energy optimal path

6 结论

(1) 根据车辆运行时的能耗情况, 建立了运行能耗函数, 设计了新的启发式能耗预估代价对 A^* 算法进行改进, 提出一种考虑中途充电的电动车能耗最优路径规划方法。

(2) 证明了所提出的启发式能耗预估代价满足可采纳性和一致性, 可以根据 A^* 算法得到能耗最优路径。

(3) 本方法可以用于充电站的选择, 仿真表明并不是路程短能耗就低, 因此, 按照最小能耗选择最优路径更符合实际, 验证了本文所提方法的合理性。

(4) 在电池电量不足时, 采用本方法可以得到经过充电站的能耗最优充电路径, 节约能耗并减少里程焦虑。

参 考 文 献

- 王瑞妙, 陈涛, 刘永相. 弹性系数法和千人保有量法预测电动汽车保有量[J], 农业装备与车辆工程, 2011(6): 40-48.
Wang Ruimiao, Chen Tao, Liu Yongxiang. Electric vehicle holdings prediction using elasticity and thousand holding methods [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2011(6): 40-48. (in Chinese)
- 张建英, 赵志萍, 刘墩. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1306-1309.
Zhang Jianying, Zhao Zhiping, Liu Dun. A path planning method for mobile robot based on artificial potential field [J]. Journal of

- Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1306–1309. (in Chinese)
- 3 李擎, 谢四江, 童新海, 等. 一种用于车辆最短路径规划的自适应遗传算法及其与 Dijkstra 和 A* 算法的比较[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11): 1082–1086.
Li Qing, Xie Sijiang, Tong Xinhai, et al. A self-adaptive genetic algorithm for the shortest path planning of vehicles and its comparison with Dijkstra and A* algorithms [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(11): 1082–1086. (in Chinese)
 - 4 史恩秀, 陈敏敏, 李俊, 等. 基于蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 53–57.
Shi Enxiu, Chen Minmin, Li Jun, et al. Research on method of global path-planning for mobile robot based on ant-colony algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 53–57. (in Chinese)
 - 5 李擎, 徐银梅, 张德政, 等. 基于粒子群算法的移动机器人全局路径规划策略[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(3): 397–402.
Li Qing, Xu Yinmei, Zhang Dezheng, et al. Global path planning method for mobile robots based on the particle swarm algorithm [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 397–402. (in Chinese)
 - 6 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109–115.
Jia Qingxuan, Chen Gang, Sun Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109–115. (in Chinese)
 - 7 Giuseppe C, Marcello F, Giacomo L. A network flow based heuristic approach for optimising AGV [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(2): 405–419.
 - 8 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(8): 1085–1089.
Wang Dianjun. Indoor mobile-robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(8): 1085–1089. (in Chinese)
 - 9 李季, 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(7): 788–792.
Li Ji, Sun Xiuxia. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved A-Star algorithm [J]. Introducing Journal of China Ordnance, 2008, 29(7): 788–792. (in Chinese)
 - 10 苏舒. 电动汽车智能充电导航[J]. 中国机电工程学报, 2013, 33(增刊1): 59–67.
Su Shu. Electric vehicle smart charging navigation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(Supp. 1): 59–67. (in Chinese)
 - 11 Guo Qinglai, Wang Yao, Sun Hongbin, et al. Research on architecture of ITS based smart charging guide system [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1–5.
 - 12 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]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2011: 920–925.
 - 13 罗禹贡, 严弈遥, 朱陶, 等. 智能电动车辆最优充电电路径规划方法[J]. 工程研究, 2014, 6(1): 92–98.
 - 14 严弈遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电电路径推荐策略[J]. 中国机电工程学报, 2015, 35(2): 310–318.
 - 15 Sachembacher M, Leucker M, Artmeier A, et al. Efficient energy-optimal routing for electric vehicles [C]//Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2011: 1402–1407.
 - 16 Stuart J, Russell, Peter Norvig. Artificial intelligence: a morden approach [M]. 3rd Ed. New Jersey: Pearson Education Inc., 2010.
 - 17 Mehlhorn K, Sanders P. Data structures and algorithms: the basic toolbox [M]. New York: Springer, 2008.