

## 基于轨迹数据的货车自发编队节油潜力估计

谭二龙<sup>a</sup>, 李宏海<sup>a</sup>, 钟厚岳<sup>a</sup>, 霍恩泽<sup>a</sup>, 马晓磊<sup>\* a, b</sup>

(北京航空航天大学, a. 交通科学与工程学院; b. 大数据科学与脑机智能高精尖创新中心, 北京 100191)

**摘要:** 为探索最大编队长度和路网中行驶货车数目对自发编队的影响以及评估真实世界自发编队油耗节省潜力,提出了既可保证一定程度的搜索又能防止为过分追求更大编队长度而花费较长时间等待的动态时空搜索范围策略,利用辽宁省货车轨迹数据挖掘了多辆货车的最长公共子序列,并构建整数规划模型求解,获取最大节省油耗下的编队方案。结果显示:编队油耗节省会随着路网中行驶货车数目和最大编队长度的增加而增加,编队中车辆平均行驶距离和平均节省油耗最终分别收敛至一范围;编队行驶距离并不一定会随着允许最大编队长度的增加而增加,即自发编队最大油耗节省策略并非编队最大行驶距离策略;在不考虑时间搜索范围时,通过继续增大空间搜索范围可实现更多的燃油节省,但不考虑空间搜索范围时持续增加时间搜索范围却不能获得更多燃油节省;4000辆车的数据集进行自发编队时每天最多可节省燃油2026.21 L,最大允许编队长度为5辆比最大允许编队长度为2辆的车辆平均节省油耗最多可提升13.92%。将本文整套处理流程应用于更大规模的货车数据集,可组成自发编队的目标车辆将会显著增加,相应地也可减少更多的能源消耗和污染物的排放,具有很大的应用潜力。

**关键词:** 公路运输;节油潜力估计;整数规划;自发编队;最长公共子序列

## Estimating Truck Spontaneous Platoon Fuel-saving Potential Based on Trajectory Data

TAN Er-long<sup>a</sup>, LI Hong-hai<sup>a</sup>, ZHONG Hou-yue<sup>a</sup>, HUO En-ze<sup>a</sup>, MA Xiao-lei<sup>\* a, b</sup>

(a. School of Transportation Science and Engineering; b. Beijing Advanced Innovation Center for Big Data and Brain Computing, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** This study explores the influence of the maximum truck platoon size and the number of trucks on a spontaneous platoon and evaluates the fuel-saving potential in the real world. A dynamic spatiotemporal search scope was proposed to ensure a certain degree of exploration and prevent vehicles from spending much waiting time caused by the excessive pursuit of a larger-sized platoon. Moreover, we used the truck trajectory data of Liaoning Province to mine the Longest Common Subsequence (LCSS) of trucks, and an integer programming model was built to get the platoon schedule under the maximum fuel saving. The results show that: (a) The platoons' fuel-savings will increase with the increase of transportation missions and the maximum platoon length; the average driving distance and fuel-savings of vehicles in the platoons will eventually converge to a range; (b) The platoon traveled distance does not necessarily rise with the increase about maximum platoon length, i.e., the maximum fuel-saving strategy is not the maximum driving distance strategy for a spontaneous platoon; (c) More fuel-savings can be achieved by continuously increasing the spatial search scope without considering the temporal search scope; while increasing the temporal search scope cannot receive more fuel-savings when the spatial search scope is not considered; (d) 4000 trucks' missions could save up to 2026.21 L per day if they form platoons spontaneously; the average fuel-saving in the situation of platoons with five trucks can be improved by up to 13.92% compared with those of platoons with two trucks. Suppose this algorithm is applied to a larger-scale truck dataset, the number of spontaneous platoons will increase significantly, and correspondingly, more fuel consumption and pollutant emissions can be reduced, which has excellent application

收稿日期: 2021-07-30

修回日期: 2021-09-29

录用日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(52072017)。

作者简介: 谭二龙(1995-), 男, 陕西咸阳人, 博士生。

\*通信作者: xiaolei@buaa.edu.cn

potential.

**Keywords:** highway transportation; fuel-saving potential estimation; integer programming model; spontaneous platoon; longest common subsequence

## 0 引言

公路运输承担着我国绝大多数的货物运输任务,是促进区域间交流和推动我国经济建设的重要组成部分。近年来,随着公路路网里程的持续稳步增长,公路货运规模逐年提升并稳居运输行业主导地位。统计数据显示,2018年公路货运量接近400亿t,2018年和2017年分别占货运总量的76.79%和76.73%<sup>①</sup>。然而,公路运输在推动经济快速发展过程中也加剧了石油能源的消耗,对环境保护及节能减排造成较大压力,货车的排放对环境的影响尤其严重。2017年全国货车排放的氮氧化物及颗粒物约占汽车排放总量的68.3%和77.9%<sup>②</sup>。重型货车的保有量仅占所有民用车辆的3.05%<sup>①</sup>,但氮氧化物和颗粒物的排放量分别占所有汽车排放量的53.4%和59.9%<sup>②</sup>。另外,虽然我国公路网建设突飞猛进,截止2018年底,已达484.65万km,高速公路达到14.26万km,但拥堵状况持续不下。因此,探究诸如货车编队<sup>[1]</sup>和大货车生态驾驶<sup>[2]</sup>等新型交通形式,对提升公路利用效率,缓解交通拥堵,减少能源消耗和环境污染具有重要意义。

货车编队指公路上多个货车通过无线通信技术或自适应巡航控制系统实现较小间距下成排行驶,编队内部车辆跟随队首车辆实现控制和转向操作<sup>[1]</sup>,其目标为在考虑等待时间及额外支出费用的情况下最大化编队车辆数目和共同路径,使得燃油节省最多。在编队行驶过程中,由于车辆之间距离相对较小,车辆之间的空气流动也与单独行驶时有所不同,即跟随车辆相比编队中领头车辆承受更小的空气阻力<sup>[3]</sup>。另外,跟随车辆会对头车的尾迹造成影响,导致头车的车辆后部空气压力增大,相应地头车前后的压强差减小,导致头车的阻力也相对减小一些<sup>[4]</sup>。因此,相比车辆单独行驶,头车和跟随车辆为克服空气阻力所消耗的燃油更少,可实现节省燃油的目标。另外,车辆行驶中所排出的二氧化碳和氮氧化物也会随着消耗燃油量的减少而降低。近年来,互联网技术的迅猛发展及智能交通系统推动下的道路基础设施建设为实现货车编队提供了可靠基础;同时,货车定位系统的强制安装,使

得货车编队成为实现社会和货运公司双赢的新途径。目前,主要的卡车制造商都开发了车辆编队技术,并且世界范围内已经对此展开了积极研究,其中最具有代表性的是美国、日本、欧盟和瑞典。

上世纪末有学者通过风洞试验发现货车编队可提升编队中跟随车辆的空气动力学表现,通过编队规划可在提升道路运输燃油经济性的同时减少排放<sup>[4]</sup>。之后,LIANG等<sup>[5]</sup>通过真实数据分析发现自发形成的编队相对较少,所节省的燃油也有限,但是通过对车辆的协作距离进行较小调整之后,可显著增加编队率和燃油节省。ZHANG等<sup>[6]</sup>对旅途时间不确定性问题进行重点探究,发现当车辆组成编队的等待时间超过一定阈值时,单独行驶获得的收益更大,这时由时间延误造成的损失大于燃油节省。BHOOPALAM等<sup>[1]</sup>基于货车行程信息公布时间将编队规划分为3种:基于货运时刻表的编队、基于货运实时数据的编队及基于车载通信设备的自发编队。前两种主要由针对可提前公布行程的货运公司,现在已进行了较多的研究。对于第3种,就目标而言,其侧重于在临近时空区域内寻找其他可组成编队的目标车辆,并确定最佳汇合点,以最大程度地节省燃油;就对象而言,其更侧重于散户货运,也可应用于大规模的货运公司。LIANG等<sup>[5]</sup>发现在实现编队过程中需要很好地选择邻域搜索大小:选择的搜索区域过大会出现太多干扰目标,还需要进一步按照规则筛选目标对象;选择的搜索区域过小,可能无法搜索到可组成编队的目标车辆。这也意味着即使两辆货车的路径有很大重复,但由于他们之间的距离较远而可能错失形成编队行驶的机会。第3种相比前两种拥有更多的灵活性,但目前针对自发编队的研究相对较少<sup>[1]</sup>。目前,由于货车数量较多且GPS一般采样频率较高、数据类型多样,可获得大规模高分辨率、多类型的货车轨迹数据,为通过大规模数据挖掘实现编队油耗节省潜力估计创造了条件。

通常判别车辆跟随关系的步骤为:首先,在数据清洗之后基于车辆轨迹与道路网络的几何特征

① <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>

② <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/201806/P020180604354753261746.pdf>

比对或基于车辆定位点与候选道路点之间的概率关系进行地图匹配;然后,再使用近邻搜索法或密度聚类算法判别车辆的跟随关系。但由于车辆GPS数据点一般较多,地图匹配和修正往往需要更多的时间。并且,即使车辆在同一条路径上行驶,由于加减速导致相互之间的距离超出近邻搜索法和密度聚类算法的阈值而很可能不能将其划归为编队。车辆轨迹相似性度量方法可以在不需要了解道路几何特征的情况下对轨迹数据进行匹配<sup>[7]</sup>,为挖掘同行模式提供了新的思路。KIM等<sup>[8]</sup>采集美国纽约车辆大规模GPS数据,并基于LCSS(Longest Common SubSequence)对车辆路线完全重叠、合并、分离等情景进行测试,证明了LCSS对于GPS数据相似性路线判别的有效性。同时,李颖等<sup>[7]</sup>也论证了使用LCSS判别中国货车轨迹数据相似性的有效性。

当前对自发编队研究较少,大多数研究中在编队最大长度不同时搜索范围始终一致。虽然现有研究通过各种方法最大化参与编队的车辆数目,但实际上参与编队的车辆数目更多并不意味着能够获得更多的节省。而拥有更强灵活性、更关注在较小的时空范围内搜索目标车辆的自发编队将获得更大收益。另外,大多数编队研究主要基于模拟数据或较小规模真实世界数据。目前,数据驱动方法已经被成功应用于交通情景中,例如,交通流预测、行程时间预测、交通状态估计等。因此,基于数据驱动方法对真实世界较大规模货车数据在不同编

队长度和不同时空搜索阈值下的货车自发编队的油耗节省潜力研究具有现实意义。本文研究的自发编队车辆指距离较近,经过小范围的协调能够快速形成编队行驶的目标车辆。本文提出了动态时空搜索范围策略,并结合LCSS算法及整数规划探究自发编队油耗节省潜力。为了更好地研究动态时空搜索范围对车辆编队造成的影响,本文忽略季节、天气情况、风向等因素对车辆行驶和编队形成的影响。

## 1 问题描述

为获得编队最大收益,即使得油耗节省达到最大,通常需要最大化编队的重复路径或编队长度以实现此目标。而编队在道路行驶时,犹如一列“陆地火车”,会对道路交通造成影响,例如,较长编队行驶于高速公路最外侧车道时,会对出口匝道的交通流造成影响,甚至造成交通拥堵,因此,需要对车辆编队长度加以控制防止此类情况的出现。目前,对于自发编队研究较少且无相应法律规定货车编队的最大长度,因此,本文探究在不同编队最大长度下的油耗节省,为后续确定货车编队最大长度的研究提供参考。

在车辆编队建立之前,需要先确定多辆货车的最大公共行驶路径,4辆起讫点不同的货车A车、B车、C车和D车的公共行驶路径分布如图1所示,其中,a,b,...,l分别表示路网节点,两节点相连表示一个路段(如路段a-b,e-b),多个路段相连接表示一条路径(如a-b-c-d)。

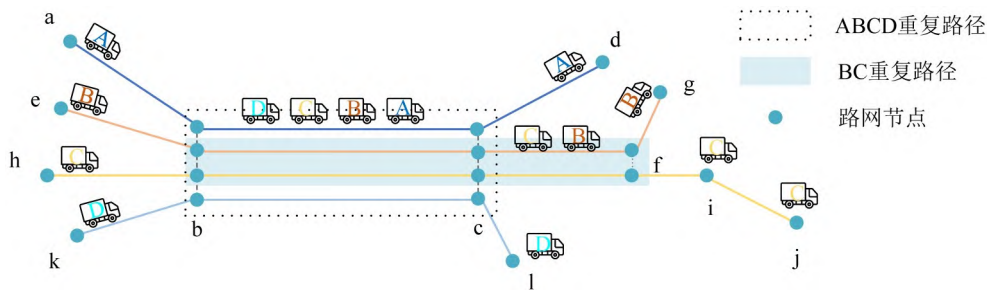


图1 4辆起讫点不同的货车的公共行驶路径分布情况

Fig. 1 Distribution of four trucks' public travel paths at different origin-destination pairs

A车、B车、C车、D车的路径分别为: $\{a-b-c-d\}$ 、 $\{e-b-c-f-g\}$ 、 $\{h-b-c-f-i-j\}$ 、 $\{k-b-c-l\}$ , A车、B车、C车、D车的公共路径为 $\{b-c\}$ ; B车、C车的公共路径为 $\{b-c-f\}$ 。当编队的最大长度为2时,由图1中各车辆的重复路径可知需要将A车和D车组成编队行驶路段 $\{b-c\}$ ,而B车和C车组成编队行驶路段 $\{b-c-f\}$ ;但是当编队最大长度为3时,如果A车、D车任

意一辆与B车、C车组成编队行驶,节省油耗大于两两编队行驶,那么则会形成A车、D车其中1辆与B车、C车编队行驶路段 $\{b-c-f\}$ ,剩余的另外1辆单独行驶。在此过程中,需要确定哪3辆车组成编队行驶节省的油耗更多,再安排剩余的单独行驶,即实现了燃油节省的最大化。



## 2 模型构建

### 2.1 框架

本文使用GPS轨迹数据获取自发编队最大节省油耗,研究框架分为3部分:数据预处理、轨迹相似性度量 and 编队方案优化。

数据预处理包括:去除原始数据中的异常数据、设置路径切分阈值将车辆路径切分成多个行程段。

轨迹相似性度量通过两两对比不同车辆轨迹

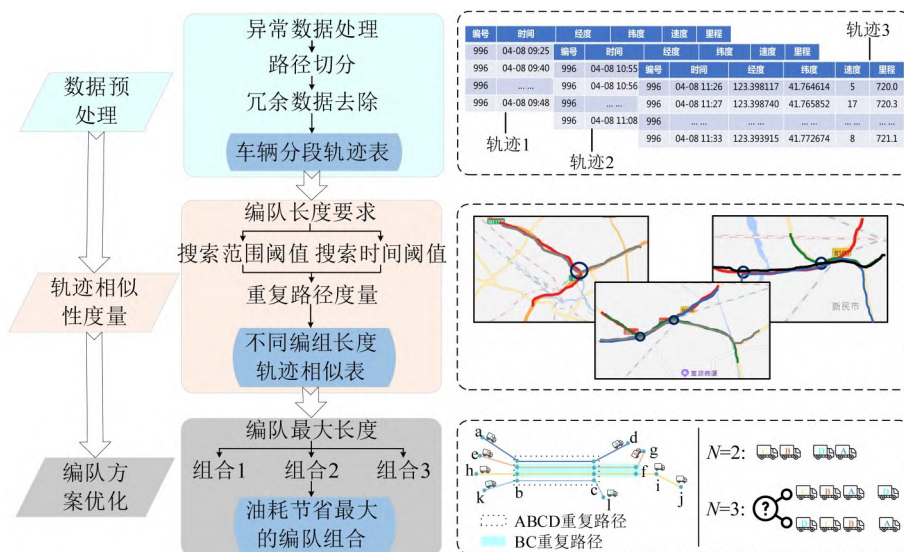


图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

### 2.2 数据预处理

本文数据预处理的目的是获得每辆货车的行程轨迹分段表。货车的每条行程轨迹用集合  $R$  表示,即  $R = \{z_0, z_1, \dots, z_m\}$ , 每个元素  $z_i, i = 1, 2, \dots, m$  表示行程中 1 条数据,第  $m$  条数据为  $z_m = (m_{id}, m_t, m_{lon}, m_{lat}, m_M)$ , 其中,所包含的元素分别为车辆编号、采样时间、经度、纬度和里程。通过数据处理后,最终得到的结果为一系列  $R$  组成的集合。

数据处理步骤为:首先,删除相邻GPS点速度异常的数据以及定位时间、经纬度存在众多丢失的数据,并删除同一时间下由于网络信号等因素多次上传的重复数据,保证数据的准确性、完整性和单一性。之后,切分货车轨迹数据,保证在每条路径内货车都在行驶途中,切分阈值的大小关系着货车行驶轨迹的长短也影响着轨迹之间的相似性。若切分阈值设定过大,可能会将不同的行程轨迹合并

的相似性,确定每一车辆可能存在的多种编队方案。如某一辆车既可形成两辆车的编队,也可形成更多车辆的编队,通过此步骤形成多辆货车轨迹相似表。

编队方案优化是当最大编队长度确定时,每辆车可能存在多种编队组合方案,而每一种组合方案对应于不同的油耗节省。为了使所有车辆油耗节省总量最大,需要对每辆存在多种编队组合方案的车辆行程进行评估,最终形成全局最优的编队组合方案。图2为研究框架,  $N$  表示编队中货车数目。

为一个行程轨迹;若切分阈值设定过小,会将货车的短暂停车或无信号阶段视为行程结束,导致切分的行程持续时间小于真实行程持续时间。李颖等<sup>[7]</sup>基于国内货运数据设置 5, 10, 15, 30, 60 min 的切分阈值,通过对阈值进行敏感性分析以及人工识别得出 15 min 时间间隔为货车 GPS 数据的最佳切分阈值,因此,本文使用 15 min 作为切分阈值,将所有数据分割为不同的行程轨迹。

### 2.3 最大重复轨迹度量

最大重复轨迹是指两个不同车辆行程的最大重叠子行程,具体地,假设给定两个行程  $R_1$  和  $R_2$ , 如果存在 1 个子行程  $r_i \in R_1$  且  $r_i \in R_2$ , 并且再找不出任意一个长度大于  $r_i$  的  $r_j \in R_1$  且  $r_j \in R_2$ , 则称  $r_i$  为  $R_1$  和  $R_2$  的最大重复路径。

本文基于 LCSS 算法度量两条行程之间的最大重复轨迹。对于两条轨迹  $U$  和  $V$  根据文献[7]列出本文计算 LCSS 的公式为

$$Q_{\varepsilon, \delta}^{(LCSS)} = \begin{cases} 0, & U \text{ 或 } V \text{ 为空} \\ 1 + Q_{\varepsilon, \delta}^{(LCSS)}[H(U_i), H(V_j)], & d(U_{i, t_i, p_i}, V_{j, t_j, p_j}) \leq \varepsilon \text{ 且 } |U_{i, t_i} - V_{j, t_j}| \leq \delta \\ \max\{Q_{\varepsilon, \delta}^{(LCSS)}[H(U_i), V_j], Q_{\varepsilon, \delta}^{(LCSS)}[U_i, H(V_j)]\}, & d(U_{i, t_i, p_i}, V_{j, t_j, p_j}) > \varepsilon \text{ 或 } |U_{i, t_i} - V_{j, t_j}| > \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_i$  和  $V_j$  分别为轨迹  $U$  和  $V$  的第  $i$  个点和第  $j$  个点;  $H(U_i)$  为轨迹  $U$  第  $i$  个点之前所有点组成的序列;  $H(V_j)$  为轨迹  $B$  第  $j$  个点之前所有点组成的序列;  $\delta$  为匹配点的时间阈值, 通过将计算的  $U_i$  和  $V_j$  的时间差  $|U_{i, t_i} - V_{j, t_j}|$  与  $\delta$  比较确定其是否满足时间搜索范围的条件;  $\varepsilon$  为匹配点的距离阈值, 通过将计算的  $U_i$  和  $V_j$  两点分别在  $t_i$  和  $t_j$  时刻下的经纬度距离  $d(U_{i, t_i, p_i}, V_{j, t_j, p_j})$  与  $\varepsilon$  比较确定其是否满足空间搜索范围的条件。通常使用 LCSS 算法匹配的相似点的数量与两条行程中最短行程的数目比值作为两条行程的相似度, 即

$$S_Q(U, V) = \frac{Q_{\varepsilon, \delta}^{(LCSS)}(U, V)}{l_{\min}(U, V)} \quad (2)$$

式中:  $l_{\min}(U, V)$  为  $U$  和  $V$  的最小轨迹长度。根据定义,  $S_Q(U, V)$  取值在 0~1 之间, 数值越接近 1, 表明两个轨迹越相似。本文以 GPS 点在某一时空阈值范围内的重叠行程表示两条行程的重复轨迹。

为保证结果准确性和轨迹连续性, 当两条行程的重复 GPS 数量  $N_{Q(U, V)}$  超过阈值  $N_{\text{GPS}}$ , 重复子行程相邻 GPS 点之间的时间间隔小于阈值  $T_{\text{GPS}}$ , 两车至少共同行驶  $T_{\text{tra}}$  时间段及重复子行程的长度  $L_{Q(U, V)}$  大于  $L_{\text{GPS}}$  时, 则认为此两条行程存在重复轨迹。

$$N_{Q(U, V)} \geq N_{\text{GPS}} \quad (3)$$

$$T_{Q(U, V), n+1} - T_{Q(U, V), n} \leq T_{\text{GPS}}, n \in \mathbb{Z}, 1 \leq n < N_{Q(U, V)} \quad (4)$$

$$T_{Q(U, V), N_{Q(U, V)}} - T_{Q(U, V), 1} \geq T_{\text{tra}} \quad (5)$$

$$L_{Q(U, V)} \geq L_{\text{GPS}} \quad (6)$$

式中:  $T_{Q(U, V), n+1}$  和  $T_{Q(U, V), n}$  分别为轨迹  $U$  和  $V$  的重复轨迹中第  $n+1$  个点和第  $n$  个点所处的时刻, 他们之间的差值  $T_{Q(U, V), n+1} - T_{Q(U, V), n}$  即为重复轨迹相邻 GPS 点的时间差。相应地,  $T_{Q(U, V), N_{Q(U, V)}} - T_{Q(U, V), 1}$  为重复子行程的时间长度。

对于多辆货车重复轨迹也使用 LCSS 进行计算, 不同的是距离阈值和时间阈值不再相同。已有对类似问题的研究都是在确定的协调距离和协调时间下计算重复轨迹<sup>[5]</sup>, 编队长度的增大自然为编队带来更多的燃油节省, 但往往也对应着更长的等待时间, 会缩减自发编队带来的收益。

在编队长度较小时, 为了增加更多的燃油节省则需要增加编队长度, 因此, 通过快速扩大时空搜索范围增加可加入编队的目标车辆; 当编队长度较大时, 为了强行组成更长编队的花费可能大于燃油节省, 因此, 通过限制时空搜索范围以减少更多车辆加入。本文设定时空搜索范围与最大编队长度相关。当最大编队长度较小时, 时空搜索范围快速扩大以增加自发编队的车辆数目; 当最大编队数目增加到一定程度时, 时空搜索范围缓慢增加以减少为刻意寻求最大编队长度而产生的等待时间。这样在一定程度上保证了足够的探索, 又满足了在等待成本较大时主动放弃搜索。时空搜索范围计算式为

$$t_F(N) = t_{F,0} + \frac{K_{t_F}}{1 + \exp[-(N - N_0)]} \quad (7)$$

$$d_F(N) = d_{F,0} + \frac{K_{d_F}}{1 + \exp[-(N - N_0)]} \quad (8)$$

式中:  $d_F(N)$  和  $t_F(N)$  分别为编队长度为  $N$  时的最大搜索距离和最大搜索时间阈值;  $K_{d_F}$  和  $K_{t_F}$  分别为协作形成自发编队的最大搜索距离和最大搜索时间阈值;  $N_0$  为编队最小长度, 本文最小长度为 2;  $t_{F,0}$  和  $d_{F,0}$  分别为常数, 表示车辆非常容易缩短车辆之间的距离而形成编队的时空范围。随着编队长度的增加,  $d_F(N)$  和  $t_F(N)$  快速增加, 当编队长度增加到 5 时, 搜索范围和搜索时间阈值增幅变小, 这样即平衡了编队长度增加带来的油耗节省和形成编队的等待时间。

## 2.4 编队方案优化

本文编队行驶是指一组车辆在重复轨迹上共同行驶, 具体地, 假设货车 A 和货车 B 的两个行程  $R_1$  和  $R_2$  存在一条满足式(3)~式(5)约束条件的长为  $q$  的重复轨迹  $r_i$  为  $r_i = \{z_{m+1}, z_{m+2}, \dots, z_{m+q}\}$ , 则可认为 A 和 B 在子行程  $r_i$  上编队行驶。由于在编队行驶时可能存在不同编队方案, 因此, 需要在多种编队方案中选择最多节省油耗的方案作为最终编队方案。已有研究中编队成本函数主要有线性型、凹型和常数型这 3 种, 其中, 凹型成本函数刻画了油耗节省随着编队数目的不断增大最终趋于收敛状态, 即编队中每加入 1 辆车, 每一车辆在编队中行驶的

成本都不同,因此,需要衡量每个加入编队的车辆的成本,但通常是难以逐个量化的。常数型成本函数表示组成编队的成本与编队长度相关且不同长度下的成本虽也呈递增趋势,但每一编队长度下的编队成本为一常量,即需要衡量每一编队长度下的编队成本。因此,本文研究使用方便计算和能足够反映编队油耗节省情况的线性型函数,其中,编队中跟随车辆的油耗节省为固定值,头车由于承受更多的风阻,它的油耗节省相比跟随车辆更低一些,这样的结果也符合流体力学模拟结果<sup>[4]</sup>。线性型节省为

$$R_p^{(\text{Saved})} = R_1^{(\text{Saved})} + (N_p - 1) \times R_f^{(\text{Saved})} \quad (9)$$

编队相关集合、参数和变量的定义如表1所示。

表1 模型涉及变量及其类型  
Table 1 Variables and types in model

类型	符号	定义
集合	$C$	货车集合
	$P$	货车编队集合
	$S$	时段集合
	$p_c$	编队 $p$ 中包含的货车集合
参数	$p$	编队
	$N_p$	编队 $p$ 包含的货车数量
	$N_{\max}$	编队最大长度
	$s$	一天中第 $s$ 个时段
	$d_{n,p,s}$	$n$ 辆车的编队 $p$ 在时段 $k$ 内共同行驶的距离
	$R_1^{(\text{Saved})}$	头车节省油耗比例
	$R_f^{(\text{Saved})}$	跟随车辆节省油耗比例
	$F^{(\text{Cost})}$	货车行驶 1 km 所需油耗
	$\gamma$	燃油节省折损因子,理想情况下 $\gamma = 1$
	$\gamma$	燃油节省折损因子,理想情况下 $\gamma = 1$
决策变量	$x_{n,p,s}$	在 $s$ 时段存在 $n$ 辆车的编队 $p$ 为 1; 否则,为 0
过程变量	$c_{i,n,p,s}$	车辆 $i$ 在 $s$ 时段内属于 $n$ 辆车的编队 $p$ 为 1; 否则,为 0

在进行编队时需要考虑每辆货车在同一时段内只能属于一个编队,即

$$\sum_{p \in P} x_{n,p,s} c_{i,n,p,s} \leq 1, \forall n \leq N_{\max}; s \in S; i \in C \quad (10)$$

由于在编队建立之后才可考虑单个车辆  $i$  在时段  $k$  是否属于编队  $p$  的问题,式(10)所表示的问题可分为4种情况:

(1)  $x_{n,p,s} = 1, c_{i,n,p,s} = 1$ , 车辆  $i$  属于在时段  $s$  建立的  $n$  辆编队  $p$  中;

(2)  $x_{n,p,s} = 1, c_{i,n,p,s} = 0$ , 车辆  $i$  不属于在时段  $s$  建立的  $n$  辆编队  $p$  中;

(3)  $x_{n,p,s} = 0, c_{i,n,p,s} = 0$ , 此种情况下表示在时段  $s$  并未组建  $n$  辆车的编队  $p$ ;

(4)  $x_{n,p,s} = 0, c_{i,n,p,s} = 1$ , 车辆  $i$  属于未建立的编队  $p$ , 这种情况是不会存在的,因为,在未组建  $n$  辆车的编队  $p$  的情况下,车辆  $i$  也是不可能属于此编队的。

具体地,在本文油耗节省计算中并不需要考虑  $n$  辆车在  $s$  时段组成编队  $p$  但车辆  $i$  不属于此编队的约束情况,因此,通过归纳剩余(1)和(3)两种情况的数值关系,将式(10)转化为

$$x_{n,p,s} - c_{i,n,p,s} = 0, \forall n \leq N_{\max}; p \in P; s \in S; i \in C \quad (11)$$

汇总所有约束条件之后形成的整数型线性规划编队方案优化模型为

$$\max \sum_{n=2}^{N_{\max}} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} d_{n,p,s} x_{n,p,s} \gamma F^{(\text{Cost})} [R_1^{(\text{Saved})} + (N_p - 1) \cdot R_f^{(\text{Saved})}] \quad (12)$$

$$\text{s.t. } x_{n,p,s} - c_{i,n,p,s} = 0, \forall n \leq N_{\max}; p \in P; s \in S; i \in C \quad (13)$$

$$\sum_{i \in P_c} c_{i,n,p,s} \leq N_{\max}, \forall n \leq N_{\max}; p \in P; s \in S \quad (14)$$

$$x_{n,p,s} \in \{0, 1\}, \forall n \leq N_{\max}; p \in P; s \in S \quad (15)$$

$$c_{i,n,p,s} \in \{0, 1\}, \forall i \in C; n \leq N_{\max}; p \in P; s \in S \quad (16)$$

$$0 < \gamma \leq 1 \quad (17)$$

$$N_{\max} \in \{2, 3, 4, 5\} \quad (18)$$

目标函数式(12)为货车自发编队行驶总共节省油耗;式(13)确保任一货车在同一时段  $k$  内只能属于一个编队;式(14)保证组成编队的车辆数目在最大允许编队长度之内;式(15)和式(16)分别为编队  $p$  是否建立和车辆  $i$  是否参与了编队  $p$ ;式(17)燃油节省折损因子  $\gamma$  为季节、天气情况、风向等因素对编队油耗节省的影响程度;式(18)为最大允许编队长度需要在 2~5 之间。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例数据

本文使用的货车 GPS 数据来自于 2018 年 4 月 8 日辽宁省注册的危险货物运输车辆全天上报的定位数据,去除异常数据之后,剩余 20217 辆轨迹数据,其中包含的字段较多,本文主要选取车辆终端定位时间、经度、纬度、方向、里程字段进行研究。为研究不同规模大、小货车数据集下车辆编队的油耗节省情况,随机选取了包含 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 辆行程切分的数据进行研究,同时,为保证实验结果的合理性,本文进行了 w1, w2 和 w3 这 3 组采样。由于 3 组采样数据中



行程长度分布趋于一致,本文仅展示w1组采样数据的车辆行程分布,其中,行程小于200 km的接近90%,即研究中的行程大部分为中、短行程,也可能包含因中途休息而被分割的长途旅程。行程长度分布如图3所示。

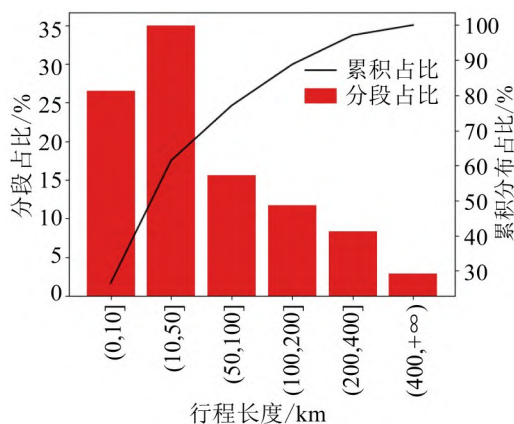


图3 货车行程长度分布

Fig. 3 Distribution of trucks' travel lengths

### 3.2 实验参数

通常当货车之间的时空距离小于某个阈值时非常容易缩短车辆之间的差距而形成编队,本文设置  $d_{E,0} = 0.1 \text{ km}$ ,  $t_{E,0} = 5 \text{ min}$ , 即两辆车需要同时满足在5 min之内两车之间的距离始终小于0.1 km。并且两车的重复轨迹还需满足式(3)~式(6)的约束条件。另外,考虑到本文的主要研究对象为经过小幅度协调可在短时间内组成编队行驶的目标车辆,因此,设置  $K_{d_r} = 1 \text{ km}$ ,  $K_{t_r} = 5 \text{ min}$ 。然后,通过LCSS算法获取不同最大编队长度下的重复轨迹,为保证通过轨迹判定车辆编队的合理性,本文分别设定  $N_{\text{GPS}} = 2$ ,  $T_{\text{GPS}} = 3 \text{ min}$ ,  $T_{\text{tra}} = 5 \text{ min}$ ,  $L_{\text{GPS}} = 1 \text{ km}$ , 即只有当1条重复轨迹需要满足4个条件:①至少包含2个GPS数据点;②轨迹中连续两个GPS数据点的时间差小于3 min;③共同轨迹持续时间至少为5 min;④重复轨迹的长度至少为1 km时,才会被认定为重复轨迹。条件①是为保证两车或多车存在共同的子行程起始点和子行程终点,且避免将中途短暂停车或无信号的路段识别为非编队行驶路段;条件②设定是为了避免时间间隔过长造成较大误差;条件③和条件④是为了保证编队行驶的经济性。仅满足1个条件时的重复轨迹可能会产生一定的误差,但是,当同时满足4个条件时,特殊情况下,例如,上、下匝道的车辆和不同主线行驶的车辆,车辆行驶被判断为重复轨迹的概率将会变得

极小。本文暂不考虑其他因素对油耗节省的折损影响,因此,设定  $\gamma = 1$ 。

### 3.3 结果分析

本文在构建编队方案优化模型和获得不同数据集下各组车辆重复轨迹之后,基于python和Gurobi建模进行求解,w1、w2和w3这3组不同数据集下不同编队长度的模型平均计算时间如表2所示。

表2 不同数据集下Gurobi软件计算时间  
Table 2 Computation time of Gurobi under different datasets

数据集大小	最大编队长度			
	2辆	3辆	4辆	5辆
500辆	0.01	0.01	0.01	0.01
1000辆	0.03	0.04	0.04	0.04
1500辆	0.06	0.05	0.06	0.06
2000辆	0.06	0.07	0.08	0.08
2500辆	0.10	0.11	0.12	0.12
3000辆	0.13	0.15	0.16	0.17
3500辆	0.18	0.22	0.23	0.24
4000辆	0.20	0.25	0.26	0.28

由表2可知,在最大编队长度确定的情况下,模型求解时间随着数据集增大平稳增加,即使在4000辆数据集下实现5辆货车编队优化时间也不超过0.3 s;数据集小于2500辆时,同一数据集下不同编队长度求解时间差异在0.02 s以内;同一数据集下不同编队长度求解时间差异最大时为0.08 s(4000辆数据集)。

通过参与编队车辆数目、编队行驶距离、编队节省油耗以及时空搜索范围灵敏度分析估计自发编队油耗节省潜力。

#### 3.3.1 参与编队车辆数目

参与编队车辆数目是指整个行驶过程中在编队中行驶的车辆数目,本文分析不同组别的大小数据集下参与编队车辆数目和每一时段中参与编队的车辆数目。

w1、w2和w3这3组采样数据在不同数据集下的参与编队车辆数目变化情况如图4所示。

由图4可知,3组采样数据中参与编队车辆数目增长趋势趋于一致,参与编队的车辆数目随着数据集的增大稳步增加,当数据集达到4000辆时,全天参与编队车辆数目都超过了1400辆,说明组成编队的机会伴随着数据集的增大迅速扩大。另外,与LIANG等<sup>[9]</sup>的研究中(包含1773辆车)时间间隔为10 min的结果(编队率为22.41%)相比,本

文研究在1500辆和2000辆车数据集下的平均编队率分别为23.53%和27.45%,与已有研究结果较为接近。

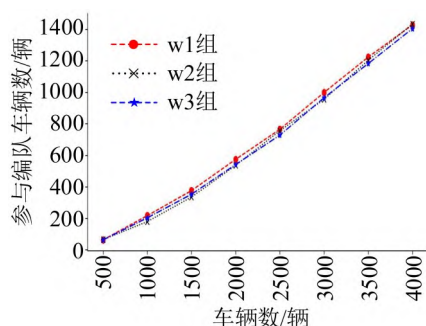
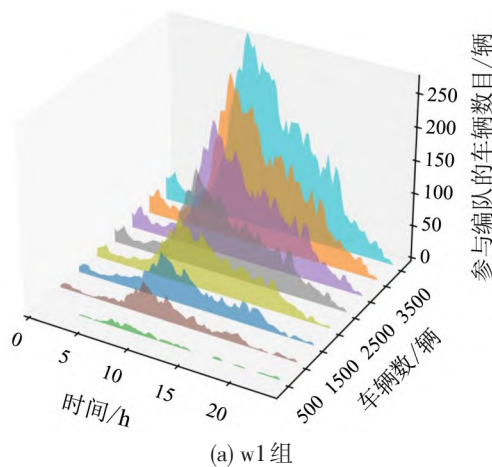


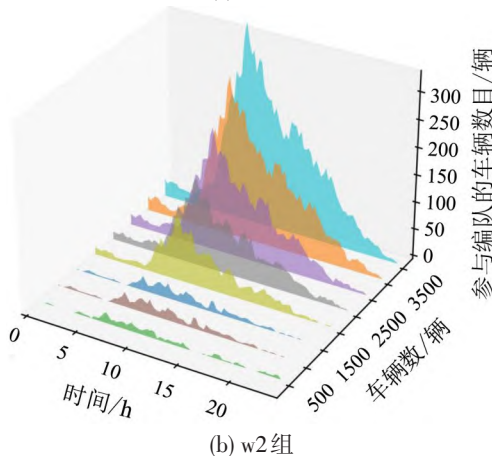
图4 最大编队长度为3时3组采样数据在不同大小数据集下参与编队车辆数目情况

Fig. 4 Number of platooning trucks under different datasets in three groups with varying sampled sizes when maximum platoon size is 3

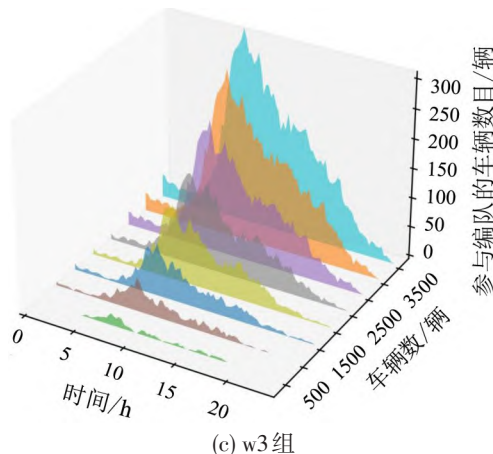
由于500辆车数据集中无4辆货车同行情况,且当货车编队长度达到3辆之后其参与编队车辆数目变化很小,因此,本文仅展示3组采样数据在编队最大长度为3、间隔时段为15 min时不同数据集中参与编队的车辆数目,如图5所示。



(a) w1组



(b) w2组



(c) w3组

图5 最大编队长度为3时参与编队车辆数目

Fig. 5 Number of platooning trucks when maximum platoon size is 3

在数据集大小方面,参与编队的车辆数目随着数据集的增大迅速增加,在4000辆时15 min内参与编队的车辆甚至超过300辆,这可以解释为当车辆数目增加时,相应地,道路中货车密度增加,货车组成编队的对象也随之增多;当数据集到达4000辆车时,在7:00-14:00时段内,每15 min参与编队的货车超过160辆。在时间维度方面,3组采样数据结果显示,在0:00-5:00,由于货车运输任务相对较少,因此,参与编队的车辆很少;编队中货车数目约在9:00达到最大,约在14:00出现1个小高峰,白天范围内参与编队车辆较多主要分布在7:00-14:00,因此,想要获取更大的油耗节省,应该选择在此时段内执行运输任务。

### 3.3.2 编队行驶距离

编队行驶距离指编队中所有车辆编队行驶的距离总和,平均行驶距离指参与编队车辆的平均行驶距离。由于3组数据展示了类似的编队特征,因此,仅展示w1组数据。编队行驶距离如表3所示。

表3 货车编队行驶距离

Table 3 Travel distance of trucks platoons (km)

数据集大小	最大编队长度			
	2辆	3辆	4辆	5辆
500辆	888.66	887.83	887.83	887.83
1000辆	4402.47	4229.49	4229.49	4229.49
1500辆	7847.17	7569.57	7468.28	7465.28
2000辆	12775.25	12412.11	12231.11	12228.61
2500辆	17619.10	17114.98	16938.88	16931.17
3000辆	23793.86	22994.61	22787.69	22764.27
3500辆	28617.72	27683.18	27534.12	27424.20
4000辆	35170.09	34080.24	33670.53	33532.98



由表3可知,随着数据集的增大即运输任务的增多,共同行驶距离快速增大,最终会随着最大编队长度的增加收敛到一定范围(由表3中最大编队长度为4和最大编队长度为5时的共同行驶距离可得)。值得注意的是,共同行驶距离最大值都发生在2辆编队中,并且随着最大编队长度的增加保持或减小。可以解释为在较小编队长度下虽然共同行驶了较长距离,但是其油耗节省通常会小于更大编队长度的情况。平均行驶距离如图6所示。

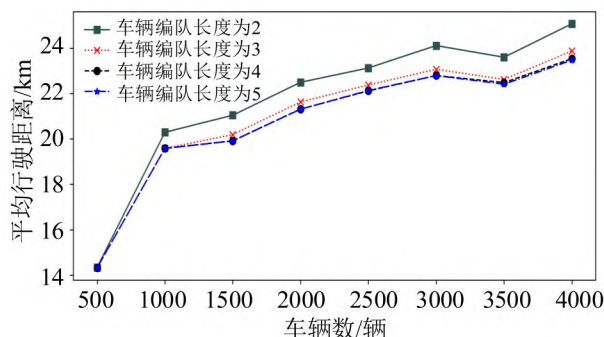


图6 w1组数据集平均行驶距离

Fig. 6 Average travel distance of group w1

由图6可知,在数据集方面,在数据集较小时任何编队长度下的车辆平均行驶距离都会迅速增大,当数据集超过1000时,增幅逐渐变缓,在24 km左右震荡变化;在最大编队长度方面,平均行驶距离随着最大编队长度的增大而快速减小,当编队长度增大到4时趋于收敛,可能是由当最大编队长度超过2时的共同行驶距离较短造成的。

### 3.3.3 编队节省油耗

编队节省油耗是指编队中所有货车由编队行驶节省的油耗总和,编队平均节省油耗指参与编队车辆的平均节省油耗。中国汽车技术研究中心(China Automotive Technology and Research Center, CATARC)得出不同载重下牵引车的油耗处于 $35\sim 59 \text{ L}\cdot(100 \text{ km})^{-1}$ ,通过平均所有测试活动结果,得出燃油消耗率为 $43.5 \text{ L}\cdot(100 \text{ km})^{-1}$ [9],由于本文中所有距离都是以km为单位进行计算,因此, $F^{(\text{Cost})}=0.435 \text{ L}\cdot\text{km}^{-1}$ 。许多学者对编队的燃油节省进行研究,油耗节省在不同条件下可达到2.7%~18%的节省[9]。本文分别设置 $R_1^{(\text{Saved})}=0.02$ , $R_f^{(\text{Saved})}=0.10$ ,即实验中头车和跟随车辆分别节省2%和10%的油耗。

本文主要探究编队节省总油耗以及参与编队

车辆平均节省油耗,w1组数据结果如图7和图8所示。

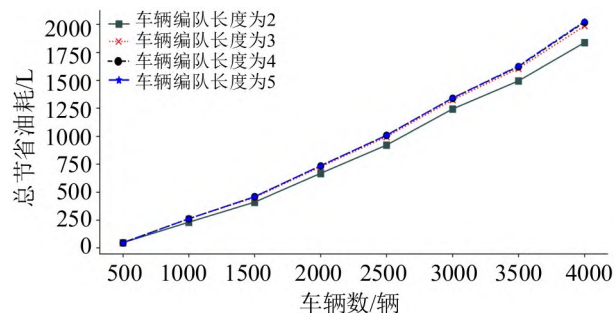


图7 编队总节省油耗

Fig. 7 Total fuel-savings of platoons

由图7可知,针对本文中研究数据,编队油耗节省会随着车辆数据集的增大快速增加,总油耗节省开始会随着最大编队长度增加,增加到3辆之后趋势会逐渐变慢,这可以解释为自发编队主要以2辆和3辆为主。

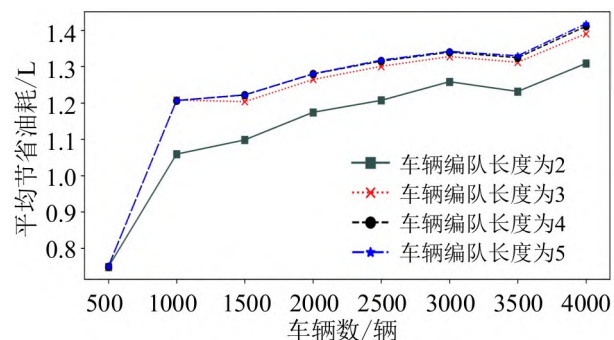


图8 编队车辆平均节省油耗

Fig. 8 Average fuel-saving of trucks in platoons

由图8可知,运输任务的大小和编队最大长度会影响车辆平均节省油耗。随着车辆数据集的增大,最大平均节省油耗增速变慢,最终将收敛至1.3~1.4 L范围内;最大允许编队长度为5辆时,数据集为1000,2000,3000,4000辆的车辆平均节省油耗分别比最大允许编队长度为2辆时提升13.92%、9.03%、6.62%和8.36%。需要注意的是,当数据集从1000辆增加到1500辆时最大编队长度为3时的平均节省油耗略微下降,这可能是由于增大搜索范围之后更多的车辆加入编队,但编队共同行驶距离较短(拥有重复路径的多辆编队的重复路径长度大多在10 km以内)导致的。

### 3.3.4 时空搜索范围灵敏度分析

为进一步比较时空搜索范围对编队节省油耗的影响,本文分别进行了最大编队长度为3时的编

队节省油耗随时间搜索范围和空间搜索范围变化下的灵敏度分析,如图9和图10所示,其中 $t_F(N)$ 和 $d_F(N)$ 分别由式(7)和式(8)计算得到。

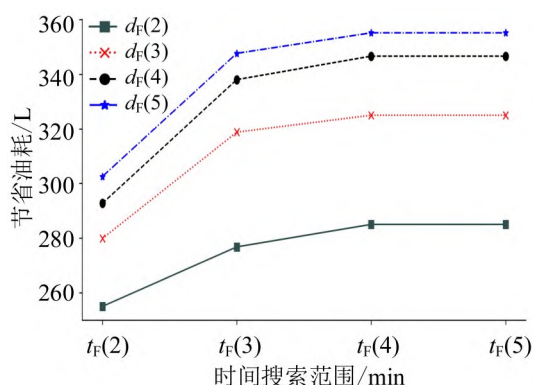


图9 编队节省油耗随时间搜索范围变化情况

Fig. 9 Variation of fuel-saving of platoons over temporal search scope

随着时间搜索范围的增大,编队燃油节省经历了“快速增长-缓慢增长-保持不变”3个阶段,分别对应 $t_F(2)-t_F(3)$ 、 $t_F(3)-t_F(4)$ 和 $t_F(4)-t_F(5)$ 这3个阶段。这说明当时间搜索范围超过一定范围时几乎不会再带来额外的收益。

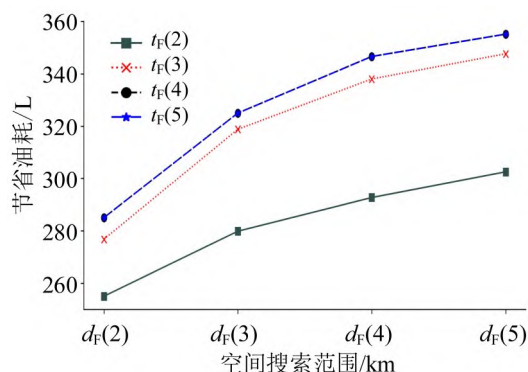


图10 编队节省油耗随空间搜索范围变化情况

Fig. 10 Variation of fuel-saving of platoons over spatial search scope

随着空间搜索范围的增大,编队燃油节省持续增长,但增长速度逐渐变慢。表明在不考虑时间搜索范围时,通过继续增大空间搜索范围可实现更多的燃油节省,但不考虑空间搜索范围时一味地增加搜索时间却不能。在这种情况下,仅增加空间搜索范围可能会使得上、下匝道的车辆和不同主线上行驶的车辆视为轨迹相似,从而带来误判。但是,当同时考虑多个约束条件,例如,同时考虑时空搜索范围、重复轨迹GPS数量、重复子行程相邻GPS点之间的时间间隔、重复子轨迹的时间长度及重复子

行程的长度时,可以避免这些问题。

## 4 结论

本文基于货车轨迹数据探索自发编队燃油节省潜力,与其他相关研究相比,本文的独特性主要体现在:

(1) 提出能够获得更大燃油节省的动态时空范围搜索策略。在编队数目较小时,时空搜索范围迅速增大,当编队长度增加到一定程度时,时空搜索范围最终收敛于一个常数。这既保证了一定程度的探索,又防止了车辆为形成更长的编队而长时间等待。

(2) 基于较大规模真实数据进行探究。以往研究中大多使用模拟数据进行研究,或者使用较少的真实数据探究。本文基于辽宁省真实货车轨迹数据探索了3组500~4000辆数据集在2、3、4、5最大编队长度下的编队行驶车辆数目、编队行驶距离和编队节省油耗情况。

受制于本文研究目标和文章篇幅,本文暂未考虑季节、天气情况及风速等对编队油耗节省造成的影响,关于 $\gamma$ 在不同情况下的具体取值将会在未来研究中进行探究。

## 参考文献

- [1] BHOOPALAM A K, AGATZ N, ZUIDWIJK R. Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 107: 212-228.
- [2] 程颖, 张佳乐, 张少君, 等. 大型货运车辆生态驾驶及节油潜力评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(6): 253-258. [CHENG Y, ZHANG J L, ZHANG S J, et al. Evaluation of eco-driving behavior and fuel-saving potential of large freight vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(6): 253-258.]
- [3] VAN DE HOEF S, JOHANSSON K H, DIMAROGONAS D V. Fuel-efficient en route formation of truck platoons [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(1): 102-112.
- [4] ASSAD A, BART B, VALERIO T, et al. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 35(6): 34-56.
- [5] LIANG K Y, MARTENSSON J, JOHANSSON K H. Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data[C]// IEEE Intelligent

- Vehicles Symposium Proceedings, Dearborn: IEEE, 2014.
- [6] ZHANG W, JENELIUS E, MA X. Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 98: 1–23.
- [7] 李颖, 赵莉, 赵祥模, 等. 基于大货车GPS数据的轨迹相似性度量有效性研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 146–157. [LI Y, ZHAO L, ZHAO X M, et al. Effectiveness of trajectory similarity measures based on truck GPS data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 146–157.]
- [8] KIM J, MAHMASSANI H S. Trajectory clustering for discovering spatial traffic flow patterns in road networks [C]// Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington DC: SAGE, 2015.
- [9] LUO F, LARSON J, MUNSON T. Coordinated platooning with multiple speeds[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 213–225.

---

上接第56页

- [9] SOCHOR J, JURANEK R, SPANHEL J, et al. Comprehensive data set for automatic single camera visual speed measurement[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1633–1643.
- [10] BEWLEY A, GE Z, OTT L, et al. Simple online and realtime tracking[C]. The IEEE International Conference on Image Processing, Phoenix, 2016: 3464–3468.
- [11] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, 2016: 779–788.