

通行条件对公共汽车碳排放的影响

金 辉, 杨晓光, 滕 靖, 马万经
(同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对中国公共汽车能耗与碳排放水平高的现状, 基于车辆性能稳定的前提, 研究通行条件对碳排放的影响。首先, 对工况和通行条件进行划分。然后, 以上海市北安跨线为例, 在调研数据的基础上, 统计各种交通干扰对应的工况并计算其碳排放水平, 发现拥堵的作用效果最显著, 其次是交叉口。最后, 分析载客量对碳排放的影响, 空载、半载、满载情景下碳排放水平近似线性地轻微增加, 但人均碳排放量显著减少。

关键词: 公共汽车; 碳排放; 通行条件; 载客量; 工况划分; 优化决策

Impact of Traffic Conditions on Bus Carbon Emissions

Jin Hui, Yang Xiaoguang, Teng Jing, Ma Wanjin

(School of transportation engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Concerning the current high level of energy consumption and carbon emissions of buses in China, this paper investigates the impact of traffic conditions on bus carbon emissions given the stable performance of vehicles. The paper first classifies bus performance and traffic conditions into several groups. Taking Bei'an Line in Shanghai as an example, the paper further estimates the bus performance under different traffic impacts as well as the corresponding carbon emissions based on survey data. Results indicate that traffic congestion is the most significant affecting factor, followed by the intersection factor. Finally, through analyzing the impact of bus passenger load on carbon emissions, this paper concludes that carbon emission exhibits a slight linear increase from no-load, half-load to full-load scenarios, but the per capita carbon emission shows a significant decrease.

Keywords: bus; carbon emissions; traffic conditions; passenger load; classification of bus performance; optimal decision-making

收稿日期: 2014-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目“演变中的现代城市道路交通系统集成设计基础理论与方法”(51238008)

作者简介: 金辉(1991—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通信息工程及控制、交通设计等。E-mail: traffic_jinhui@163.com

国际公路运输联盟(International Road Transport Union, IRU)调查数据显示, 交通拥堵导致车辆停止次数增加, 相比畅通交通水平, 油耗与碳排放增加300%, 进而指出交通畅通是减少CO₂排放的前提条件^[1]。公共汽车运载量大、整车质量高, 通行条件造成的工况变化, 尤其是急加速工况将大大增加碳排放量。因此, 促进公共汽车交通平稳运行是中国当前发展绿色交通系统亟待解决的问题。

1 工况与碳排放的关系模型

影响公共汽车油耗的因素众多, 包括车辆行驶工况、燃油类型、环境压力与温度、发动机燃烧技术以及累计行驶里程与车龄等。行驶工况变化是通行条件的直接作用结果, 也是影响碳排放的关键因素。本文在公共汽车技术性能及自然环境特征相对稳定的假设下, 以行驶工况为媒介, 研究公交碳排放与运行条件的关系。

1.1 公共汽车行驶工况

1.1.1 单工况划分

单工况包括加速、匀速、减速和怠速，分别以加速度大于 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、绝对值不大于 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、小于 $-0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 和速度为0作为判断条件^[2]。各种工况的典型通行条件见表1。

1.1.2 组合工况划分

公共汽车行驶是连续过程，前一行驶状态对后一行驶状态有显著影响，如前一行驶状态的加速度、速度以及对应的发动机转速、节气门开度、燃烧温度和缸内废气比例及温度等。单工况划分不足以体现前工况对后工况的影响，尤其前后片段的单工况类型相同，但速度、加速度有明显差异，若不加区分，将导致工况速度与加速度变化区间过宽，无法识别高速和低速工况对公共汽车碳排放的影响。故依据前后工况的速度与加速度形成组合工况划分方法(见表2)。

1.2 公共汽车行驶工况与碳排放的关系

公共汽车的碳排放水平通过碳排放率和碳排放因子两个参数进行评价。碳排放率指单位时间内的碳排放量，碳排放因子指单位里程的碳排放量。不同行驶工况对应的碳排放率有显著差别，其中加速工况的碳排放率最大。减速工况对应的排放率虽然较低，但燃烧恶化导致空气污染物增加，而且行驶速度较低，对应的排放因子较大。怠速工况对应的行驶速度为零，但是喷油量和燃油量不为零，故排放因子为无穷大；随怠速时间增加，无效油耗与碳排放增加。

目前，中国的公共汽车仍以传统柴油发动机为主。柴油动力公共汽车的燃油消耗率和碳排放量可通过公式(1)至(5)进行计算^[3-4]。

$$FR = \left(KNV + \frac{P}{\eta} \right) \cdot \frac{1}{43.2} \cdot [1 + b_1(N - N_0)^2], \quad (1)$$

$$K = K_0 [1 + C(N - N_0)], \quad (2)$$

$$P = \frac{P_{tract}}{\epsilon} + P_{acc}, \quad (3)$$

$$N_0 = 30 \sqrt{\frac{3.0}{V}}, \quad (4)$$

$$M_{CO_2} = 3.10 \cdot FR, \quad (5)$$

式中， FR 为燃油消耗率/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ； K ， K_0 为发动机摩擦系数； N 为发动机转速/ $\text{转}\cdot\text{s}^{-1}$ ； N_0 为怠速时发动机转速/ $\text{转}\cdot\text{s}^{-1}$ ； V 为发动机排量/L； P 为发动机输出功率/ kW ； η 为发动机效率，约为0.45； $b_1 \approx 10^{-4}$ ， $C \approx 0.00125$ ； P_{tract} 为发动机对外输出功率/ kW ； ϵ 为公共汽车传动系效率； P_{acc} 为公共汽车附件功率/ kW ； M_{CO_2} 为碳排放量/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2 通行条件对行驶工况的影响

通行条件包括两类：一类为交通环境因素，包括道路特征、车站设计、管控方案、交通状态、事故瓶颈等；另一类为车辆负载因素，即载客量，该因素横向作用于所有工况对应的输出功率，载客量越大，各种工况下的输出功率越大，碳排放量越高。

2.1 交通环境

本研究主要针对以下四种交通环境展开分析，以涵盖基础设施以及实时交通流两个方面对公共汽车碳排放的影响^[5]。

2.1.1 道路

道路是公交运行的载体。道路线形、坡度、路面质量等因素直接影响公共汽车的运行速度、运行阻力和输出功率。道路平直、纵曲线缓和，公共汽车易于平稳运行；道路拐弯处，公共汽车须减至安全速度以满足离心力约束；路面质量不佳、坡度较大或频繁变化，均会增加公共汽车的运行阻力，增加油耗及碳排放。道路对公共汽车行驶工况的影响具有时空稳定性，并作用于交通流状态，影响交通拥堵疏散的效率和作用范围。

2.1.2 交叉口

交叉口(本文提及的交叉口均为信号控

表1 单工况对应的通行条件

Tab.1 Traffic conditions corresponding to the single performance

单工况	典型通行条件
加速	出站，或红灯、拥堵、弯道、交通事件减速或怠速之后，或爬坡初始
匀速	道路平直，交通条件相对稳定，通常发生在相邻交叉口之间较长的路段
减速	进站，或遇到红灯、拥堵、弯道或交通事件，或爬坡(坡度较大、较长)初始
怠速	暖车，或站内停靠、等待红灯、拥堵(或交通事故引发的)排队

制交叉口)是道路网络的重要节点。其布设位置、平均间距与密度、控制方案以及进出口道的设计均影响公共汽车行驶工况与效率。交叉口同时具有通行、转向、分流、合流等功能,交通冲突集中,时空资源少于路段,是交通拥堵的常发点。

2.1.3 车站

车站是公共汽车交通区别于社会车辆行驶状态的重要因素,是有效扩大公交服务范围并使公交线路交织成网的基础。同时,车站增加公共汽车的停驶次数和停靠延误,加剧工况波动,是公共汽车碳排放优化的重点。

2.1.4 交通拥堵

公共汽车通常与其他社会车辆共享道路通行权,交通流状态受道路、交叉口以及车站的干扰,交通波动直接影响公共汽车行驶工况。

交通状态是影响公共汽车行驶工况的重要因素。公共汽车通常运行于非自由交通流环境,尤其在拥堵(含因交通事故导致车行道效率降低或功能丧失而引起的交通拥堵)状态下,车辆频繁加速减速、长时间怠速,油耗与碳排放量显著增加。

上述各类交通环境对公共汽车油耗的影响通常没有显著的分隔,如交叉口和车站是交通拥堵的常发点。故将公共汽车(驶出停靠站后)不排队或者一次排队经过交叉口时的工况变化归为交叉口影响,车站附近因公共汽车队列的头车阻挡或者乘客上车引发的延误归为车站影响,其他工况的变化(包括交通事件)则归为交通拥堵的影响。因此,在其他条件基本相同且未发生交通事故时,基本可以认定高峰与平峰时段交通环境的主要区别在于交通拥堵的作用时间和影响程度。

表2 组合工况片段划分

Tab.2 Division of combined performance

序号	前工况	后工况	序号	前工况	后工况
1	高速 (速度高于 60 km·h ⁻¹)	加速	11	低速 (速度低于 40 km·h ⁻¹)	加速
2		轻缓	12		轻缓
3		减速	13		加速
4		轻缓	14		轻缓
5		匀速	15		匀速
6	经济速度 (速度为 40~60 km·h ⁻¹)	加速	16	怠速 (速度为0)	加速
7		轻缓	17		轻缓
8		减速	18		长时间
9		轻缓	19		短时间
10		匀速			

2.2 载客量

公共汽车行驶中客流变化显著,主要产生两个方面的影响:一是增加车站处乘客上下车的延误,可纳入车站对工况(怠速)的影响;二是影响车辆的总质量,导致功率变化。按照15人为1 000 kg的国家安全行车标准,随客流变化,公共汽车负载将产生数以吨计的差异。因此,运量将对公共汽车的碳排放水平产生一定程度的影响。

3 实验数据分析

实验基于上海市公交线路“北安跨线”的早晚高峰运行工况,统计工况变化与通行条件的对应关系,通过公共汽车的燃油消耗率和碳排放量计算公式探寻通行条件对碳排放的影响规律。北安跨线属于市郊线路,全程近40 km经过近百个交叉口(见图1),共设29个车站。

3.1 交通环境对碳排放的影响

基于实际调查获取的车辆行驶工况,统计不同交通环境的作用时间以及对应的碳排放量,从而分析其对碳排放的影响程度。

3.1.1 交通环境对车辆行驶工况的作用时间

1) 交通环境的累计作用时间。

北安跨线全程行驶于沥青路面,故不区分路面质量对碳排放的影响。由于未获取道路坡度数据,仅将上海市道路平均坡度纳入计算。早晚高峰时段,交通流基本全程处于大范围拥堵状态,但调查过程中无交通事件干扰,故交通流的实质影响来自交通拥堵的

影响。图2所示为车站、交叉口、交通拥堵、弯道以及无干扰状态的累计时间比例。其中，交通拥堵的作用时间最长，达到40%。而弯道的作用时间最短，仅为2%，这一方面与弯道的数量较少有关，另一方面由于公共汽车行驶速度较低，通过弯道时降速幅度小，故假设车辆平稳通过。车站与交叉口的作用时间相近，分别为18%和24%。无干扰平稳运行的状态约占16%。

2) 交通环境对单工况的作用特征。

图3对比了各种交通干扰作用于公共汽车不同工况的累计时间与平均时间。无干扰状态的平均作用时间相对最长，超过20s；但无干扰状态的累计作用时间相对较短。稳定工况需要相对较长的时空范围，而在城市交通环境下，工况一旦受到影响，不易恢复。调查显示，弯道对应的平均作用时间最短，为15s，但该结果受到调查精度的影响。交通拥堵导致工况变化的累计作用时间显著长于车站、交叉口的影响，但平均作用时间却明显较小，说明交通拥堵时公共汽车频繁加速、减速；交通拥堵导致的怠速工况累计作用时间比例最高，是高峰时段造成无效碳排放的主要原因。

3) 交通环境干扰对应的组合工况作用时间。

不同交通干扰引发的工况变化规律不同，对工况的作用时间亦有显著区别。其中，长怠速工况的累计作用时间显著高于高速、经济速度与短怠速工况(见图4)。以下对应不同组合工况及其持续时间，分析不同类型交通环境对公共汽车运行工况的影响。

① 车站：以低速急加速和怠速缓加速为主，其次短怠速时间较多，其余则为高速缓减速、经济缓减速、低速缓减速，共计6种工况。减速进站始终属于缓减速，即驾驶员能提前响应车站刺激，有充分时间减速。

公交驻站过程全部为短怠速，出站通常以怠速缓加速离站，然后通过低速急加速提速。

② 交叉口：主要包括高速急加速、高速缓加速、高速匀速、经济匀速、怠速急加速、怠速缓加速、长怠速和短怠速8种工况。高速急加速与高速缓加速工况出现于信号灯由绿转红之前的过渡状态，此时公共汽车为及时通过交叉口，进入高速加速状态，并在通过交叉口之后，保持高速运行。因此，在一定程度上，无公交优先信号控制的交叉口不利于公共汽车交通减排。

③ 交通拥堵：主要作用于长怠速工况。交通拥堵导致公共汽车运行车速显著降低，基本不进入高速区间，以低速与怠速工况为主；交通干扰频繁，发动机供油不稳定，混合气燃烧恶化，不仅增加无效油耗与碳排放，而且释放大量空气污染物。

④ 弯道：数据采集量少，代表性较低。

3.1.2 交通环境干扰的碳排放比例

1) 组合工况的碳排放率。

假设减速与怠速过程发动机均不向外输出功率，仅满足自身运转需求，其碳排放率相同。图5对比了组合工况的碳排放率，其中高速急加速工况的碳排放率最高，达到 $60\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ；经济急加速次之，为 $36.9\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ；高速缓加速约为 $28\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，经济缓加速接近 $20\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ；而高速匀速、低速急加速和经济匀速的碳排放量相近，均为 $15\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。由此可推知，急剧加速显著增加碳排放量，并且高速区间的加速与匀速工况的碳排放量均显著高于经济速度区间。低速工况增加公共汽车运行时间，虽然碳排放率较小，但总里程对应的碳排放量高于经济速度区间的碳排放量。

2) 交通环境干扰的累计碳排放比例。

将调查统计数据带入碳排放量计算公式，获取与各种交通干扰对应的累计碳排放



图1 北安跨线路线布局

Fig.1 Layout of Bei'an Line

资料来源：百度地图。

比例(见图6)。其中,交通拥堵相关碳排放比例最高,达到36%;其次是交叉口,相关碳排放比例达到33%;无干扰状态对应的碳排放比例仅为21%;而车站、弯道的影响较小,分别为9%和1%。

图7以无干扰状态的碳排放率与碳排放因子为参考对象,计算有交通环境干扰条件下的碳排放率比和碳排放因子比。其中,碳排放率是从时间维度计量单位时间内的碳排放量;碳排放因子是从空间维度计量单位行

驶距离内的碳排放量。交通干扰虽然可以减小碳排放率,但碳排放因子显著提升,尤其交叉口与交通拥堵的碳排放因子分别为无干扰状态的3.02倍和3.80倍,车站的碳排放因子比则为1.99。此参数表现了各种交通干扰的空间尺度对碳排放量的影响:车站影响的行驶里程每增加0.99%,碳排放量增加1%;交叉口和交通拥堵影响的行驶里程每增加1%,碳排放量分别增加2.02%和2.80%。

3.2 运载量对碳排放的影响

前述碳排放量为公共汽车空载条件下的计算结果。被调研公共汽车属于中型车,假定半载与满载条件下分别承载30人、60人。则公共汽车的整车质量变化为

$$m = m_0 + \frac{n}{15}, \quad (6)$$

式中, m 为载客时的总重/t; m_0 为公共汽车的装备质量/t; n 为载客人数/人。

由于实验数据未统计上下车人数,在此仅对比公共汽车满载(60人)、半载(30人)情形下的碳排放水平,其他数据均为空载条件下的碳排放。图8所示为基于空载的公共汽车排放量,计算半载与满载条件下不同交通干扰的累计碳排放量比^[6]。显然,随着客运量的增加,公共汽车的碳排放量增加,并且增加量基本与运载量呈线性关系。虽然客运量增加导致公共汽车的碳排放量增加,但是公共汽车的人均碳排放量减少。

4 结语

本文研究了不同通行条件对公共汽车碳排放的影响,对交通干扰做了详细的划分和作用范围界定,将高峰与平峰时段交通环境的主要区别限定于交通拥堵的影响上。进而在交通干扰作用时间不变的条件下,对比了空载、半载和满载情形中公共汽车碳排放量的变化规律。

研究结果表明,高峰时段交通拥堵无论在累计作用时间上,还是累计碳排放量上,对公共汽车的碳排放影响均为最大,这与该种干扰下公共汽车的频繁加速密切相关。因此,交通拥堵不仅造成通行效率降低,同时影响了公共汽车低能耗、低排放的特性,不利于进一步提升公共汽车在城市交通结构中的竞争力。故而应将治理交通拥堵作为公共汽车服务品质优化与提升的关键。

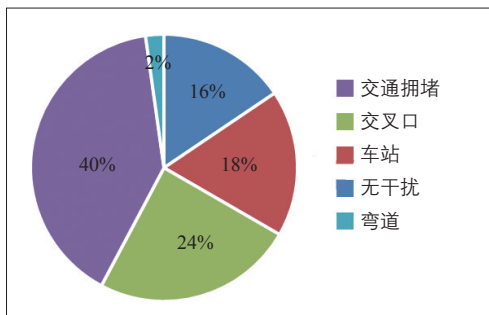


图2 各种交通干扰的作用时间对比

Fig.2 Comparison of the impact time for different traffic interferences

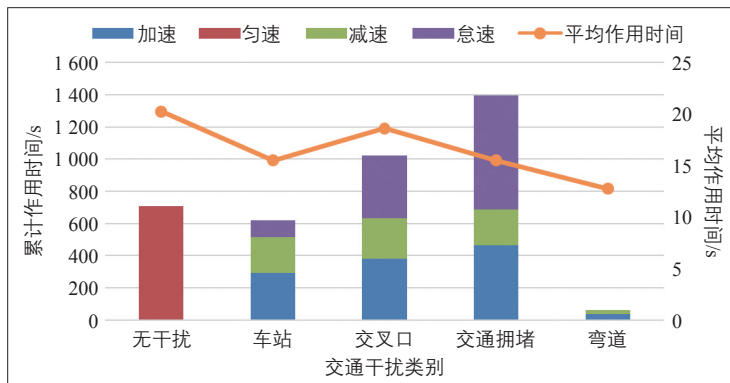


图3 各种交通干扰与单工况的对应关系

Fig.3 Relationship between different traffic impacts and single performance

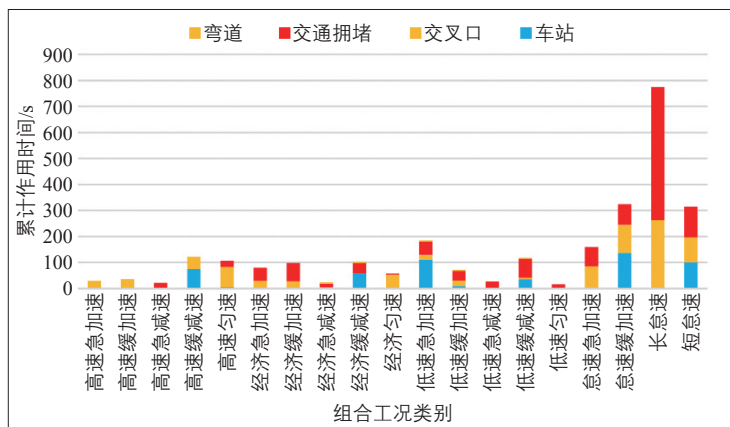


图4 交通干扰对应的组合工况累计作用时间

Fig.4 Accumulated time of combined performance corresponding to different traffic impacts

交叉口对公共汽车碳排放的影响较大，对应的累计碳排放量仅次于交通拥堵。交叉口范围内长时间怠速、高速加速等高油耗、高碳排放工况的时间比例较高，这既不利于提升通行效率，又不利于节能减排。因此，基于通行效率与节能减排的多目标优化相比于仅包含通行效率的单目标优化，更适用于交叉口设计与管理。

最后，基于空载、半载与满载的数值分析表明，公共汽车碳排放量随着乘客数量的增加，基本呈线性变化，但人均出行碳排放量则随着乘客数量的增加而显著降低。因此，公共汽车真正实现其低能耗、低排放的优势，不仅需要良好匹配的交通环境，更需要广泛的乘客基础，保证实现人均层面的低能耗与低排放。

参考文献：

References:

- [1] International Road Transport Union. Traffic Congestion Increases CO₂ Emissions by 300% [EB/OL]. 2014[2014-04-06]. http://www.iru.org/en_policy_co2_response_flowintraffic.
- [2] 黄定华. 车辆行驶工况与排放率关系及其数据库研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Huang Dinghua. Study on Database of Vehicle Driving Cycles and Emission rate relation [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [3] Matthew Barth, Feng An, Theodore Younglove, George Scora, Carrie Levine. Development of a Comprehensive Modal Emissions Model[R/OL]. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2000[2014-04-01]. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp-w122.pdf>.
- [4] Hickman A J, Hassel D, Joumard R, Samaras Z and Sorenson S. Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption [R]. Crowthorne, United Kingdom: Transport and Road Research Laboratory, 1999.
- [5] 宋晓梅, 于雷. 影响公交运行可靠性的因素分析及改善措施[J]. 综合运输, 2009(3): 59-61.
- [6] 邵利民, 常汉宝, 安士杰. MWM TBD620 柴油机加载过渡工况的性能研究[J]. 车用发动机, 2005(1): 8-11.
Shao Limin, Chang Hanbao, An Shijie. Research on the Performance of MWM TBD620 Diesel Engine under Increasing Power

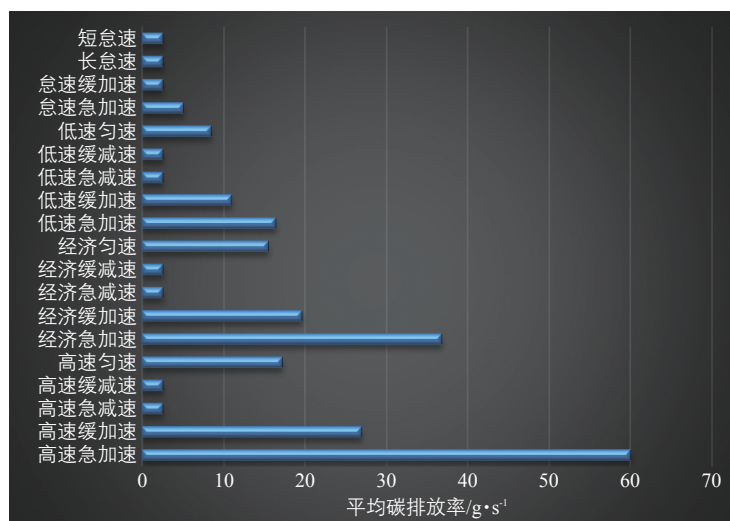


图5 组合工况的平均碳排放率对比

Fig.5 Comparison of average carbon emission rates under different combined performance

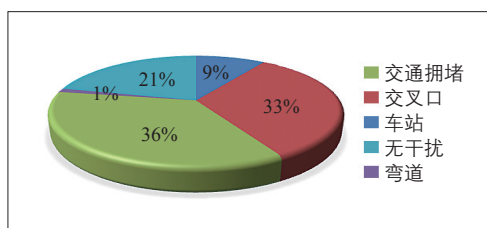


图6 交通环境干扰的累计碳排放比例

Fig.6 Percentage of accumulated carbon emission under different traffic impacts

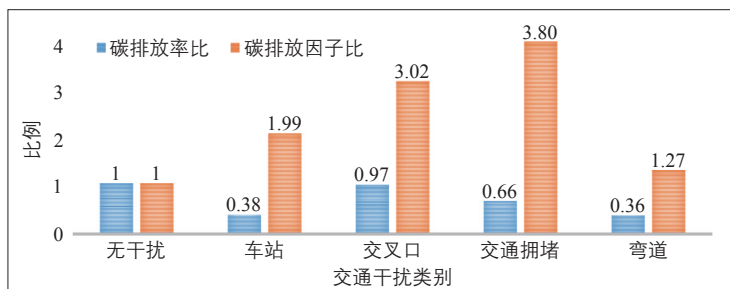


图7 不同交通干扰的碳排放率比与碳排放因子比

Fig.7 Carbon emission ratio and carbon emission factor ratio under different traffic impacts

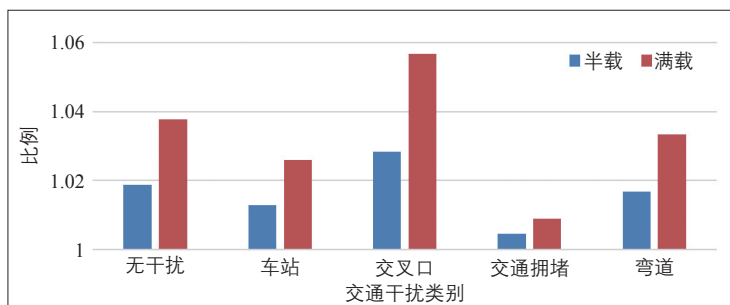


图8 基于空载数据的不同交通干扰的碳排放量比

Fig.8 No-load-based carbon emission ratio under different traffic impacts

Transient Operating Condition[J]. Vehicle Engine, 2005(1): 8-11.