文章编号：1003-1421(2026)05-0073-11
引用格式：蒋曦辕，苗丁洁，刘北胜，等. 基于列车牵引运行仿真的碳排放量预测方法[J]. 铁道运输与经济，2026，48(5)：73-83.
JIANG Xiyuan，MIAO Dingjie，LIU Beisheng，et al. Carbon Emission Prediction Method Based on Train Traction Operation Simulation[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：73-83.

基于列车牵引运行仿真的碳排放量预测方法

蒋曦辕[1]，苗丁洁[2]，刘北胜[3]，韩京芮[2]，聂梦凡[2]，李雅琪[2]，冉墨文[4]

(1.北京工业大学 北京-都柏林国际学院，北京 100124；2.北京交通大学 环境学院，北京 100044；3.中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京 100081；4.中国铁路经济规划研究院有限公司 经济与管理研究所，北京 100038)

摘 要：铁路运输碳排放主要来源于列车牵引运行碳排放，基于列车运行受力分析，构建动力牵引虚拟仿真软件，设置不同路况条件，建立牵引运行碳排放归一化预测模型。对比FXD1-J型动车组列车在案例线路LC上实际运行碳排放与虚拟仿真及预测模型测算碳排放的差距，发现在LC全线实际运行碳排放量为4.53 tCO_2e，仿真软件测算碳排放量较实际运行低1.7%，预测模型测算碳排放量较实际运行低6.5%。虚拟仿真和预测模型测算结果均表现出线路条件对碳排放量的影响与实际运行类似，说明2种测算方法均能较准确地测算牵引运行碳排放量，但仿真软件需要输入详细的线路及列车属性数据，适用于已建成铁路，而预测模型更适用于可研或初步设计。研究结果为铁路低碳线路优选提供方法支撑。

关键词：动力牵引；碳排放；能源消耗；虚拟仿真软件；归一化预测模型
中图分类号：U221 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250828003

Carbon Emission Prediction Method Based on Train Traction Operation Simulation

JIANG Xiyuan[1]，MIAO Dingjie[2]，LIU Beisheng[3]，HAN Jingrui[2]，NIE Mengfan[2]，LI Yaqi[2]，RAN Mowen[4]

(1. Beijing-Dublin International College, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 4. Institute of Economics and Management, China Railway Economic and Planning Research Institute Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The carbon emissions from railway transportation are primarily derived from carbon emissions during train traction operations. Based on the force analysis during train operation, a virtual simulation software for power traction was developed. By setting different road conditions, a normalized prediction model for carbon emissions during traction operation was established. The actual operation's carbon emissions of the FXD1-J type electric multiple unit train on the case line LC were compared with those calculated by the virtual simulation and prediction models. It was found that the actual operation's carbon emission of the FXD1-J type electric multiple unit train on the entire LC line was 4.53 tCO_2e; the carbon emission calculated by the simulation software was 1.7% lower than that

收稿日期：2025-08-28
通信作者：刘北胜(1984—)，男，北京人，中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所副研究员。
基金项目：国家自然科学基金铁路基础研究联合基金项目(U2268208)；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(J2024Z406)

of the actual operation, and the carbon emission calculated by the prediction model was 6.5% lower than that of the actual operation. The results obtained from both virtual simulation and prediction model indicate that the impact of line conditions on carbon emissions is consistent with that observed in actual operation, suggesting that both calculation methods can accurately calculate the carbon emissions from traction operation. However, the simulation software requires the input of detailed line and train attribute data, and it is applicable for completed railways, while the prediction model is more applicable for feasibility studies or preliminary design. The research results provide methodological support for the optimization of low-carbon railway lines.

Keywords: Power Traction; Carbon Emission; Energy Consumption; Virtual Simulation Software; Normalized Prediction Model

0　引言

2025年全国铁路营业里程达到16.5万km。对于较为繁忙的线路，例如京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)，在运营阶段牵引系统碳排放占比为89.2%[1]，动力牵引是铁路运输最主要的碳排放量贡献者[2-3]。

铁路运行能耗碳排放量的计算已有一定研究基础，Li等[4]针对可再生能源并网的直流牵引电力系统，基于碳排放流理论，提出了潮流追踪方法；Song等[5]基于动态电力碳排放因子，利用反向潮流追踪技术，分时段计算了高铁动力牵引碳排放量。列车牵引能耗及碳排放量与坡度、曲率半径、隧道暗线、停站次数、站间距等线路设计密切相关，在规划设计阶段，预测铁路牵引能耗及碳排放量有利于合理设置线路条件、优化运输组织方案、降低碳排放量，但简便准确预测牵引能耗和碳排放量的方法是铁路线路绿色低碳设计的难点问题。

国内外学者对牵引能耗的测算通常采取以下3种方法：①基于列车动力牵引运动学机理建立计算公式；②基于列车牵引运行能耗计算构建仿真系统；③基于历史数据或实验数据，建立多元回归方程，或应用机器学习预测牵引运行能耗。3种方法均可通过能源碳排放因子计算列车牵引运行碳排放量，但在输入条件、测算精度和繁琐程度上存在差异。基于运动学机理建立的计算公式，对能量消耗过程的刻画不够精准，核算精度有待进一步提高，如无法呈现供电系统内能量传输过程及列车牵引系统能量转换过程[6-8]。

以机车牵引力曲线和电流(燃油)曲线为必要条件，通过瞬时牵引计算，构建的列车牵引运行仿真软件，对于列车运行过程的刻画较为细致，同时建模过程中容易控制输入参数，得到的计算结果比较精确，是国内外学者常用的列车牵引运行能耗研究方法。张彦栋等[9]基于列车基本参数、线路数据等，建立了动力牵引计算数学模型，应用准点节能算法，构建了列车群牵引能耗仿真软件。杜振军等[10]依据牵引计算理论及电力机车运行受力和运动特性，分析了不同运行工况能耗特性，并对HXD1型电力机车运行能耗进行了仿真。Campo等[11]通过牵引运行软件分析发现，列车速度、停车次数等是影响碳排放量的关键。基于列车详细运行图的牵引运行仿真比较成熟，目前已商业化的仿真软件包括法国SYSTRA股份有限公司开发的Rail Simulator软件[12-13]、瑞士联邦研究院开发的OpenTrack软件[14-16]、美国工程科技联合公司开发的eTraX软件[17-18]、北京西交智众软件科技有限公司开发的多体系统动力学仿真平台等，均对线路数据、机车数据和行车组织数据的要求较为严格，不适用于新建线路的设计。

还有学者基于大量历史数据或模型实验数据构建回归方程，或应用人工智能预测列车牵引能耗。周姗姗等[19]结合牵引运行仿真与支持向量回归(Support Vector Regression，SVR)模型，预测牵引能耗精度可达90%；陈垚等[20]基于旅客周转量等既有数据，输入SVR模型，预测线路牵引能耗；Martínez Fernández等[21]应用机器学习，预测并优化西班牙瓦伦西亚地铁网络的牵引能耗；Liang等[22]对比分析了不同数学模型预测机车牵引能耗的性能。这些方法综合刻画牵引能耗与影响因素之间的特征关系，可预测相似线路或已建成线路的运行能耗，但对于新线或线路条件、列车性能差异较大的路段，难以用简单的参数描述线路条件和列车属性对牵引运行耗能及碳排放量的影响。

我国铁路在列车动力牵引运行的各个环节均展

现出低能耗低碳演进特征[23-25]。目前常用的能耗与碳排放测算方法在输入条件、计算精度等方面存在一定差异。研究基于列车运行受力分析，以FXD1-J型动力集中型动车组列车(以下简称“FXD1-J型列车”)为对象，构建电力机车牵引运行虚拟仿真软件，研究明暗线、坡度、曲线、停站次数等条件与碳排放量之间的关系，建立列车牵引运行碳排放量归一化预测模型，并与实际运行碳排放量进行对比，旨在探寻列车牵引运行能耗及碳排放量快速准确的预测方法，为列车牵引运行节能及低碳选线设计提供方法支撑。

1　牵引运行能耗与碳排放量的虚拟仿真核算方法

分析列车牵引运行受力情况，计算不同运行工况下的合力，构建虚拟仿真软件，按时序积分或一定时间步长累积的方法计算列车行驶过程牵引能耗[26-27]。列车运行过程中所受的合力包括牵引力、阻力和制动力。

1.1　牵引力

根据不同型号机车的牵引特性曲线，采用拟合或线性插值法计算某速度下对应的牵引力。例如：牵引特性曲线上的两点$A(v_1,\ F_1)$和$B(v_2,\ F_2)$，点$C(v,\ F)$为该曲线上介于A，B点之间的待求插值点，牵引力和单位牵引力计算公式如下[26]。

$$F = F_1 + \frac{(F_2 - F_1)\times(v - v_1)}{v_2 - v_1} \tag{1}$$

$$f = \frac{F\cdot 10^3}{(M_P + M_T)\cdot g} \tag{2}$$

式中：F表示牵引特性曲线上某点的机车牵引力，kN；F_1，F_2表示牵引特性曲线上某两点的机车牵引力，kN；v表示牵引特性曲线上某点的速度，km/h，FXD1-J型列车设计速度160 km/h；v_1，v_2表示牵引特性曲线上A，B两点的速度，km/h；f表示牵引特性曲线上某点的单位牵引力，N/kN；M_P表示机车计算重量，t；M_T表示牵引计算重量，t，FXD1-J型列车牵引计算重量为504 t；g表示重力加速度，m/s^2。

1.2　运行阻力

列车运行所受阻力包括基本阻力和附加阻力，以单位阻力计，基本阻力与列车运行速度呈平方关系[26]。

$$w_0 = a + bv + cv^2 \tag{3}$$

式中：w_0表示单位基本阻力，N/kN；a，b，c表示单位基本阻力公式系数，FXD1-J型列车系数取a=1.02，b=0.003 5，c=0.000 426，无量纲[26]。

列车在坡道、曲线和隧道段运行均受到附加阻力。坡度对列车牵引能耗的影响实质上是列车重力势能的变化。当列车在上坡道上运行时，重力分力与列车牵引力方向相反，为保持列车匀速行驶，列车牵引耗能增加。当列车在下坡道行驶时，重力分力与牵引力方向一致，坡度较低时，较小的牵引力即可保持列车匀速运行，坡度较大时，需要采用制动力控制车速。再生制动能量回收实质是重力势能回收，是降低牵引能耗的手段之一[28]。列车在曲线地段上运行时，由于离心力的作用，车轮与轨道的摩擦力增大，附加阻力增大，牵引能耗增大。列车在隧道暗线上行驶，由于空气流动截面积的减小，空气流速增加，列车头部的空气被压缩，尾部的空气被稀释，使得空气阻力增大，列车风阻系数变化，附加阻力增大，牵引能耗增大。单位加算附加阻力(w_A)即单位坡道附加阻力(w_S)、单位曲线附加阻力(w_C)与单位隧道附加阻力(w_T)之和。单位坡道附加阻力可用坡道坡度表示，数值上等于坡道坡度千分数[26]。

$$w_A = w_S + w_C + w_T \tag{4}$$

$$w_S = j \tag{5}$$

$$w_C = \frac{600}{C_c} \tag{6}$$

$$w_T = 0.000\ 13L_T \tag{7}$$

式中：w_A表示单位加算附加阻力，N/kN；w_S表示单位坡道附加阻力，N/kN；w_C表示单位曲线附加阻力，N/kN；w_T表示单位隧道附加阻力，N/kN；j表示坡道坡度，其中上坡坡度为正，下坡坡度为负，‰；C_c表示曲线半径，m；L_T表示隧道长度，m。

以列车长度覆盖线段为计算步长，单位坡道附加阻力、单位曲线附加阻力和单位隧道附加阻力换算为加算坡度千分数，加算坡度千分数可按下式计算[26]。

$$w_A = j_A = \frac{1}{L_l}\times\left[\sum(j_j\times l_{Sj}) + 600\times\sum\frac{l_{Ci}}{R_i} + \sum(w_{Tr}\times l_{Tr})\right] \tag{8}$$

式中：j_A表示加算坡度千分数，‰；L_1表示列车长度，m，FXD1-J型列车长度为224 m；j_j表示列车覆盖的第j个坡道的坡度千分数，‰；l_{Sj}表示列车覆盖的第j个坡道的长度，m，未覆盖的部分计算长度除外；l_{Ci}表示列车覆盖的第i个曲线的长度，m，未覆盖的部分计算长度除外；R_i表示列车覆盖的第i个曲线的半径，m；w_{Tr}表示列车覆盖的第r个隧道的单位隧道附加阻力，N/kN；l_{Tr}表示列车覆盖的第r个隧道的长度，m，未覆盖的部分计算长度除外。

1.3　制动力

列车制动力与列车运动方向相反，分为紧急制动力、常用制动力和电制动力。列车单位紧急制动力计算公式如下[26]。

$$B = \varphi_H(\sum K'_H + \sum K''_H) \tag{9}$$

$$b = \frac{B \cdot 10^3}{(M_P + M_T)\cdot g} \tag{10}$$

式中：B表示列车紧急制动力，kN；φ_H表示换算摩擦系数，FXD1-J型列车取值0.35[26]，无量纲；$\sum K'_H$表示列车中所有机车的总换算闸瓦压力，kN；$\sum K''_H$表示列车中所有车辆的总换算闸瓦压力，kN；b表示列车单位紧急制动力，N/kN。

列车单位常用制动力计算公式如下。

$$b_C = \beta_C \cdot b \tag{11}$$

式中：b_C表示列车单位常用制动力，N/kN；β_C表示常用制动系数，FXD1-J型列车取值0.6[26]，无量纲。

机车单位电制动力计算公式如下。

$$b_D = \frac{B_D \cdot 10^3}{(M_P + M_T)\cdot g} \tag{12}$$

式中：b_D表示机车单位电制动力，N/kN；B_D表示机车电制动力，kN。

1.4　列车运行所受合力

列车匀速运行时合力为0，亦即巡航工况，但由于线路条件的影响，很难保持任意时刻合力为0，一般采取惰行、牵引或制动工况相结合的动态平衡操纵策略，以实现动态匀速运行。结合列车运行的不同工况计算单位合力[26]，列车在牵引运行、电制动、空气紧急制动、空气常用制动和空气常用制动加电制动5种不同工况下列车单位合力计算公式如下。

$$c = \begin{cases} f - (w_0 + j_A) \\ -(w_0 + b_D + j_A) \\ -(w_0 + b + j_A) \\ -(w_0 + b_C + j_A) \\ -(w_0 + b_C + b_D + j_A) \end{cases} \tag{13}$$

式中：c表示列车单位合力，N/kN。

当单位合力$c\neq 0$时，按一定速度间隔(v_4-v_3)，取其平均速度的单位合力计算该速度间隔的运行时间。

$$t = \sum \frac{v_4 - v_3}{2c} \tag{14}$$

式中：t表示列车运行时间，s；v_4表示速度间隔的终速，km/h；v_3表示速度间隔的初速，km/h。

1.5　列车运行能耗与碳排放量

依据上述不同运行工况下列车受力分析，以第一个运行工况为牵引工况，最后则为制动工况，中间工况基于线路和限速条件产生巡航工况，采用节能运行模式，亦即尽可能少采用制动工况，用惰行工况使列车减速。将第一个工况转换点的公里标为0，即列车启动点，第二个工况转换点公里标大于2 km，为列车启动至加速至限速过程必需的运行距离，最后一个工况转换点公里标距离列车运行终点2 km以上，为列车靠站停车必需的制动距离。构建仿真软件，按时序积分或一定时间步长累积的方法计算列车运行时间内的牵引运行能耗[26]。

$$E_M = \int_0^T \left(u_t(t) f_t(v) v(t)/\eta\right) \mathrm{d}t \tag{15}$$

式中：E_M表示列车虚拟仿真单次运行能源消耗量，kW·h；$u_t(t)$表示t时刻的牵引力系数，也称牵引力使用系数，主要用于协调多台机车同步作业时的牵引力分配，重联操纵时，每台机车牵引力系数均取1，分别操纵时，第二台及后续机车牵引力系数取0.98；推送补机时，牵引力系数取0.95[26]；$f_t(v)$表示t时刻的列车牵引力，N；$v(t)$表示t时刻的列车运行速度，km/h；η表示列车综合效率，一般取值为0.85[27]。

应用仿真软件计算牵引运行能耗需要输入线路详细横纵断面数据(坡道、曲线、明线、暗线、站间距、停站次数等)，以及机车类型、机车牵引及制动特性曲线等信息，再应用能源碳排放因子可计算牵引运行碳排放量，如式(16)所示。虚拟仿真法

计算列车动力牵引能耗及碳排放量的流程如图1所示。

$$C_S = E_S \times EF_e \tag{16}$$

式中：C_S为虚拟仿真法测算列车单次牵引运行的碳排放量，$kgCO_2e$/次；E_S为应用虚拟仿真法测算出的列车单次牵引运行能耗，kW·h；EF_e为电力碳排放因子，取2022年全国平均值0.570 3[29]，$kgCO_2e$/(kW·h)。

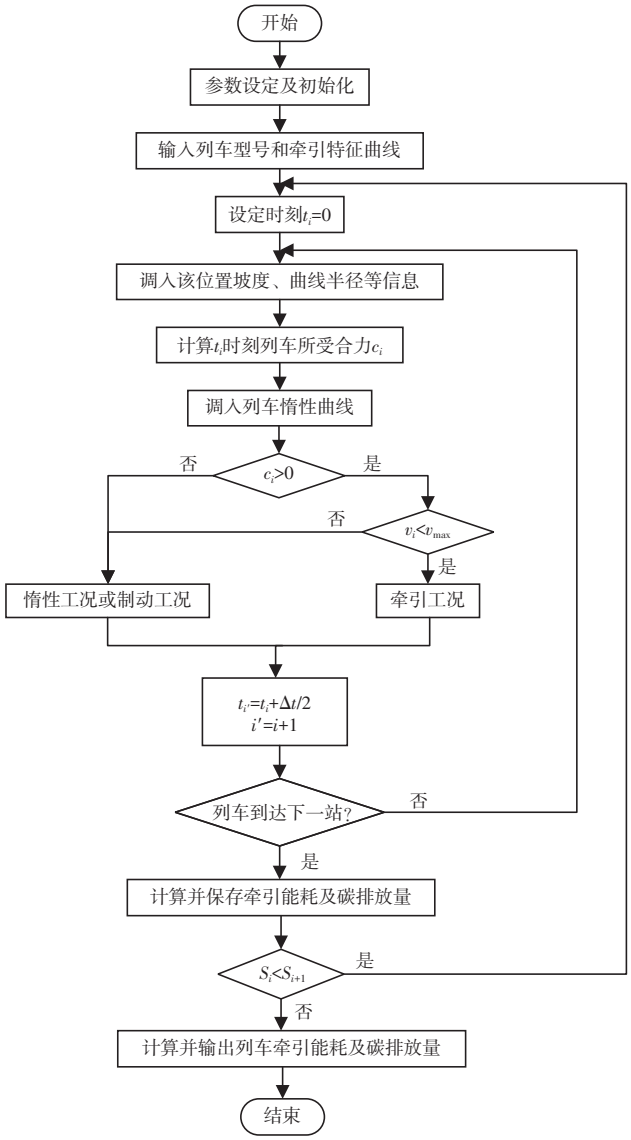


图1　虚拟仿真法计算列车动力牵引能耗及碳排放量的流程

Fig.1　Process of calculating energy consumption and carbon emissions of train power traction by virtual

2　牵引运行能耗与碳排放量的归一化预测模型

归一化预测模型依据牵引运行工况，分起步加速($C_{N,1}$)、中间行驶($C_{N,2}$)和减速停站($C_{N,3}$)3个过程测算列车牵引运行碳排放量。

2.1　起步加速阶段

假设起步加速在平直的线路上，以FXD1-J型列车为例，设计速度160 km/h，牵引功率8 000 kW，自重约500 t，应用所建仿真软件进行多次实验，计算起步加速至设计时速，所需距离平均为4 km，平均运行能耗为198.74 kW·h。

2.2　中间行驶过程

列车中间行驶过程以线路坡度和曲线半径为变量，按照明线和隧道暗线设置220段线路区段(暗线110段，明线110段，每段2 km)，不同条件线路区段设置如表1所示。分别进行列车牵引运行仿真实验，绘制牵引能耗与路况关系图，并进行数值拟合，列车动力牵引能耗与线路条件的关系如图2所示，拟合公式中y为应变量单位公里动力牵引能耗，x为自变量，分别为线路坡度千分数及曲线半径，R^2为线性拟合优度。发现明线与暗线上列车牵引能耗随路况变化趋势相近，在其他路况条件一定时，单位公里能耗与坡度的关系近似为一次函数(此结果与文献[30]一致)，而曲线对能耗的影响低于坡度。对列车在明线和暗线上牵引运行的仿真结果分别进行拟合及归一化处理，得到牵引运行碳排放量归一化预测模型，如式(17)—(19)所示。

$$C_{N,2} = C_{VL} + C_{HL} \tag{17}$$

$$C_{VL} = [\sum_{i=1}^{m}(L_{ic} \times C_{ic} \times 5.06 \times 10^{-6} + 18.21 \times L_{ic}) + \sum_{j=1}^{n}(L_{js} \times S_{js} \times 1.36 + 17.86 \times L_{js})] \times EF_e \tag{18}$$

$$C_{HL} = [\sum_{k=1}^{p}(L_{kc} \times C_{kc} \times 1.33 \times 10^{-6} + 18.60 \times L_{kc}) + \sum_{l=1}^{q}(L_{ls} \times S_{ls} \times 1.37 + 17.88 \times L_{ls})] \times EF_e \tag{19}$$

式中：$C_{N,2}$为归一化预测模型测算列车中间行驶阶段碳排放量，$kgCO_2e$；C_{VL}为列车在明线上行驶的碳排放量，$kgCO_2e$；C_{HL}为列车在暗线上行驶的碳排放量，$kgCO_2e$；m为明线上曲线数量，条；n为明线上坡道数量，条；p为暗线上曲线数量，条；q为暗线上坡道数量，条；L_{ic}为明线第i条曲线的长度，km；C_{ic}为明线第i条曲线的半径，m；L_{js}为明线第j条坡道的长度，km；S_{js}为明线第j条坡道的坡

表1　不同条件线路区段设置

Tab.1　Setting of different condition line sections

曲线半径/m	坡度/‰	曲线半径/m	坡度/‰	曲线半径/m	坡度/‰	曲线半径/m	坡度/‰	曲线半径/m	坡度/‰
	−12		−12		−12		−12		−12
	−10		−10		−10		−10		−10
	−8		−8		−8		−8		−8
	−5		−5		−5		−5		−5
	−3		−3		−3		−3		−3
直线	0	1 000	0	1 600	0	2 000	0	2 500	0
	3		3		3		3		3
	5		5		5		5		5
	8		8		8		8		8
	10		10		10		10		10
	12		12		12		12		12
	−12		−12		−12		−12		−12
	−10		−10		−10		−10		−10
	−8		−8		−8		−8		−8
	−5		−5		−5		−5		−5
	−3		−3		−3		−3		−3
3 000	0	3 500	0	4 000	0	4 500	0	5 000	0
	3		3		3		3		3
	5		5		5		5		5
	8		8		8		8		8
	10		10		10		10		10
	12		12		12		12		12

度千分数，‰；L_{kc}为暗线第k条曲线的长度，km；C_{kc}为暗线第k条曲线的半径，m；L_{ls}为暗线第l条坡道的长度，km；S_{ls}为暗线第l条坡道的坡度千分数，‰。

减速靠站停车过程中牵引力不做功，归一化预测模型中$C_{\mathrm{N},3}$取值为0，仿真实验显示平均制动距离值为3 km。

2.3　牵引运行能耗与碳排放量归一化预测模型

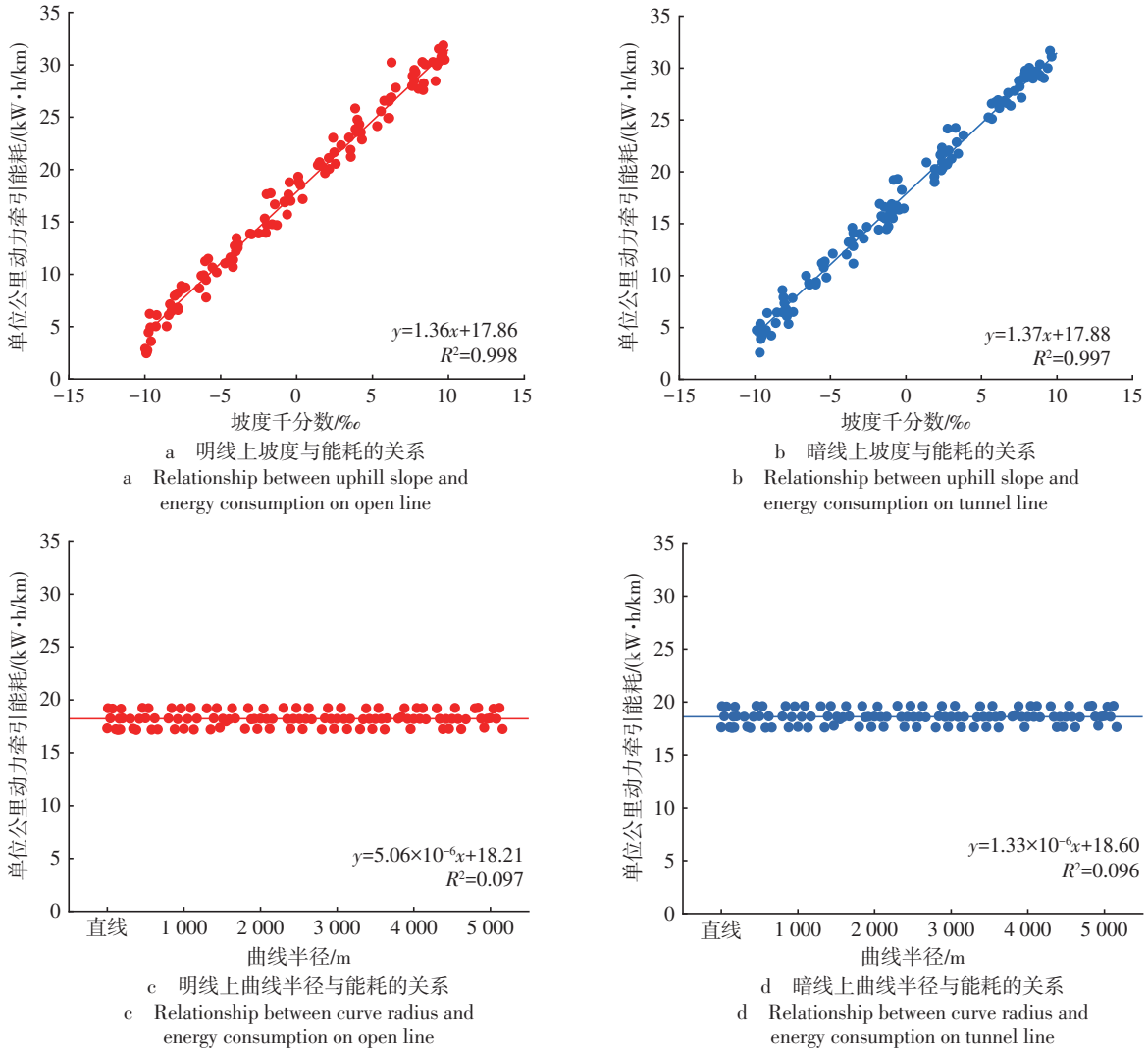
综上，列车加速启动及减速停站过程均发生在明线平直线路上，FXD1−J型列车在某线路上的牵引运行碳排放量如式(20)所示，归一化预测模型计算列车动力牵引能耗及碳排放量的流程如图3所示。对于不同型号列车，重新输入列车型号及对应的牵引和制动特征曲线于仿真软件，同时更新牵引力、阻力和制动力计算公式系数，例如单位基本阻力公式系数a，b，c等，按照图3流程，构建归一化预测模型，代入不同线路，可进行线路比选，同时也可进行机车类型优选。

$$\begin{aligned} C_{\mathrm{N}} = C_{\mathrm{N},1} + C_{\mathrm{N},2} + C_{\mathrm{N},3} = & [198.74 \times (z-1) + \\ & \sum_{i=1}^{m}(L_{ic} \times C_{ic} \times 5.06 \times 10^{-6} + 18.21 \times L_{ic}) + \\ & \sum_{j=1}^{n}(L_{js} \times S_{js} \times 1.36 + 17.86 \times L_{js}) + \\ & \sum_{k=1}^{p}(L_{kc} \times C_{kc} \times 1.33 \times 10^{-6} + 18.60 \times L_{kc}) + \\ & \sum_{l=1}^{q}(L_{ls} \times S_{ls} \times 1.37 + 17.88 \times L_{ls})] \times \mathrm{EF}_{\mathrm{e}} \end{aligned} \tag{20}$$

式中：C_{N}为归一化预测模型测算列车牵引运行碳排放量，kgCO_2e；$C_{\mathrm{N},1}$为归一化预测模型测算列车起步加速过程碳排放量，kgCO_2e；$C_{\mathrm{N},3}$为归一化预测模型测算列车减速停站过程碳排放量，kgCO_2e；z为线路内车站数量，座。

3　案例分析

所选铁路案例线路LC长度约400 km，最大坡度为12‰，最小曲线半径一般地段为2 000 m，困难地段为1 600 m，采集施工图阶段线路平面及纵断面设计数据。线路所在区域地势地形复杂，其中



a　明线上坡度与能耗的关系
a　Relationship between uphill slope and energy consumption on open line

b　暗线上坡度与能耗的关系
b　Relationship between uphill slope and energy consumption on tunnel line

c　明线上曲线半径与能耗的关系
c　Relationship between curve radius and energy consumption on open line

d　暗线上曲线半径与能耗的关系
d　Relationship between curve radius and energy consumption on tunnel line

图2　列车动力牵引能耗与线路条件的关系

Fig.2　Relationship between train power traction energy consumption and line conditions

隧道占50%以上，曲线路段占40%左右，海拔高差较大，按照9座中间站的分布，将案例线路LC分为8段，命名为A—H段。运行列车为FXD1-J型列车，设计速度160 km/h，列车编组为12节，定员约760人。

3.1　列车实际运行碳排放量

依据沿线牵引变电站月度用电量统计表(未区分上、下行)，动车组月度运行班次，客运列车通常只在中间站停靠等，计算动车组单次往返牵引运行平均耗电量，应用式(16)计算平均碳排放量，电力碳排放因子取2022年全国平均值0.570 3 $kgCO_2e/kW·h$[29]，案例线路LC上FXD1-J型列车单次实际牵引运行平均碳排放量如图4所示。

电表数据显示，FXD1-J型列车在案例线路LC上的单次牵引运行平均能耗为7.94 MW·h，平均碳排放量为4.53 tCO_2e，单位公里单位座位碳排放强度约14.79 gCO_2e/座公里，与京沪高速列车2013—2016年平均碳排放强度(16.9~37.8 gCO_2e/座公里)相比略低，主要原因可能在于列车行驶速度，京沪高速列车设计速度350 km/h，案例FXD1-J型列车设计速度160 km/h，速度越大，牵引能耗越高，牵引碳排放量越大。在列车运行的8个区段中，G段运行能耗和碳排放量最大，分别为3.34 MW·h和1.90 tCO_2e，原因在于此区段的站间距(127 km)最长，路况复杂，曲线路段约占98%，隧道暗线约占92%，由线路带来的附加阻力较大，碳排放量较大，单位公里碳排放强度也较大，为15.04 $kgCO_2e$/km。D段站间距仅为28 km，列车起步加速碳排放量较大，单

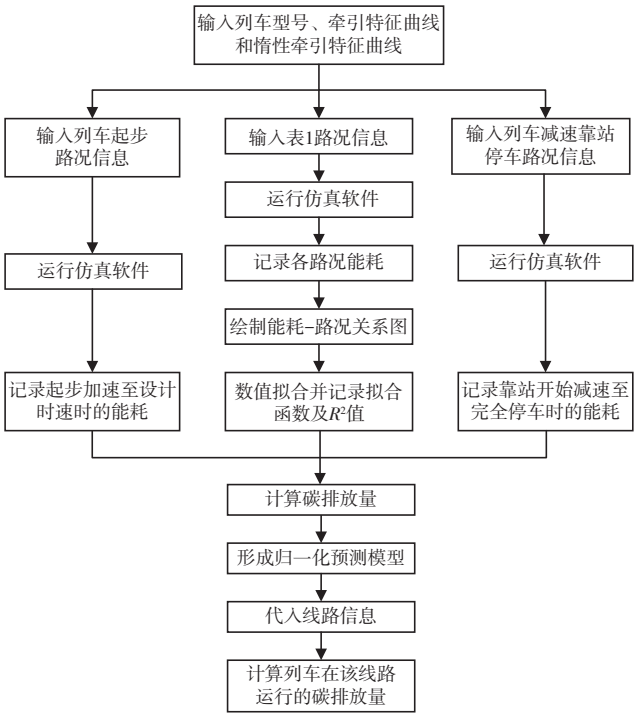


图3　归一化预测模型计算列车动力牵引能耗及碳排放量的流程

Fig.3　Process of calculating train traction energy consumption and carbon emissions by normalized prediction model

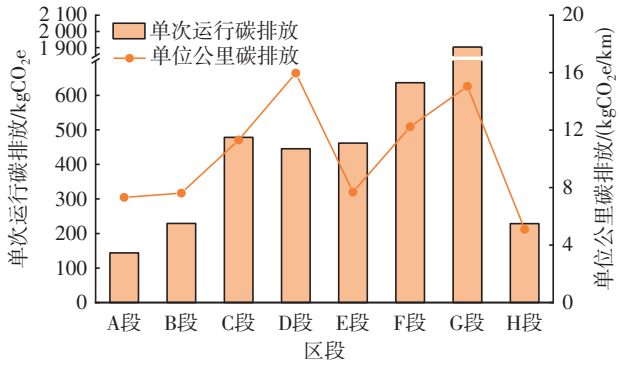


图4　案例线路LC上FXD1-J型列车单次实际牵引运行平均碳排放量

Fig.4　Average carbon emissions from a single actual traction operation of FXD1-J type electric multiple unit train on case line LC

位公里碳排放强度为15.97 $kgCO_2e/km$。A，B，E和H段碳排放强度较低，低于全线平均碳排放强度(11.24 $kgCO_2e/km$)31.6%~54.6%。案例不同区段条件差别很大，列车运行碳排放强度差距也很大。

3.2　虚拟仿真碳排放量

应用本研究构建的仿真软件，输入FXD1-J型列车属性参数，包括列车长度224 m，牵引质量504 t，基本阻力系数a=1.02，b=0.003 5，c=0.000 426，牵引/制动发挥系数0.98等，以及FXD1-J型列车的牵引和制动特性曲线，以1 s为计算步长，计算列车牵引运行能耗和碳排放量，仿真软件计算FXD1-J型列车在案例线路LC上的上行和下行牵引运行碳排放量如图5所示。动车单次牵引运行能耗分别为上行8.10 MW·h和下行7.51 MW·h，碳排放量分别为4.62 tCO_2e和4.28 tCO_2e，平均值4.45 tCO_2e与实际列车运行平均碳排放量4.53 tCO_2e相比，略低(约1.7%)。仿真软件基于力学物理定律计算列车动力牵引能耗，高度依赖机车参数及路况信息，然而相同型号不同车辆、不同操纵司机，不同时间段供电网压、载客量等存在着个体差异，因此计算出的理论能耗与实际值之间存在一定误差。由于线路海拔落差大，上、下行产生的制动能量分别为1.09 MW·h和0.90 MW·h，分别占牵引能耗的13.5%和11.0%。海拔落差最大的区段为E和F段，上行单位公里碳排放强度较高，而下行碳排放强度较低。G段长度最长，路况最复杂，碳排放量最大，上下行平均单位公里碳排放强度为15.06 $kgCO_2e/km$，比全线实际运行碳排放强度高34%，同时上行产生的制动碳排放量较高。D段站间距短，碳排放量低，但上下行平均单位公里碳排放强度较高，约为15.96 $kgCO_2e/km$，比全线碳排放强度高42%。虚拟仿真法核算结果与实际运行结果相近，但在铁路设计的预可研与可研阶段，很难获得准确的车辆与线路数据，因此仿真软件更适用于已建成运行或施工图阶段列车牵引运行节能降碳措施的比选。

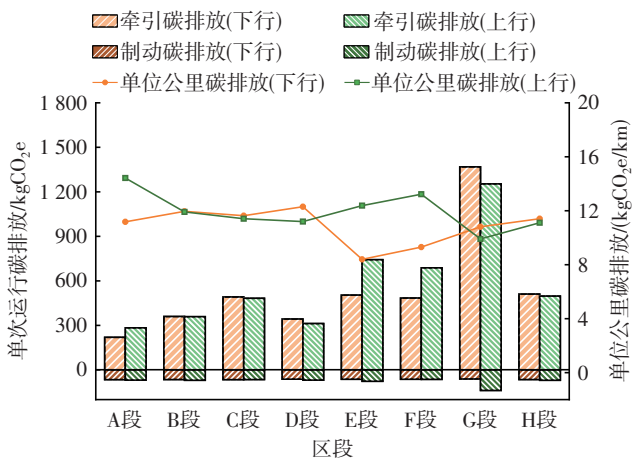


图5　仿真软件计算FXD1-J型列车在案例线路LC上的上行和下行牵引运行碳排放量

Fig.5　Carbon emissions from upward and downward traction operations of FXD1-J type train on case line LC calculated by simulation software

3.3　预测模型碳排放量

应用归一化预测模型核算FXD1-J型列车在案例线路LC上的上行和下行牵引运行碳排放量如图6所示，上行5.33 tCO_2e和下行4.32 tCO_2e，与单次实际牵引运行平均碳排放量相比低6.5%。E段海拔落差最大，下行单位公里碳排放强度最低为8.03 $kgCO_2e/km$，上行碳排放强度最高为15.44 $kgCO_2e/km$，描述出线路坡度对碳排放量的影响。D段站间距最短，线路平缓，上、下行单位公里碳排放强度接近且较大，反映路况及列车启动对碳排放量的影响。G段长度最长，路线复杂，上、下行碳排放量均最大，分别为1.52 tCO_2e和1.26 tCO_2e，单位公里碳排放强度分别为12.05 $kgCO_2e/km$和9.98 $kgCO_2e/km$，单位公里碳排放强度差距虽低于E段，但也存在一定差距。归一化预测模型综合考虑列车启动、靠站停车，以及坡道、曲线、隧道暗线、停车次数等中间运行工况，预测的动力牵引碳排放特征与列车实际运行相符。预测模型是在仿真实验基础上，经过归一化数值模拟得到的，经过了数据的二次处理加工，与仿真软件计算结果相比，与实际运行计算结果差距稍大。误差主要体现在线性拟合公式与具体坡度、曲线半径、不同工况线路长度等造成的个性差异。但是，预测模型只需代入线路曲线、坡道、车站设置、隧道长度、启停次数等信息，即可测算列车动力牵引碳排放量。在铁路规划设计阶段，还未形成详细的线路数据和牵引机车数据时，预测模型为低碳线路设计和机车选型提供了方法支撑。

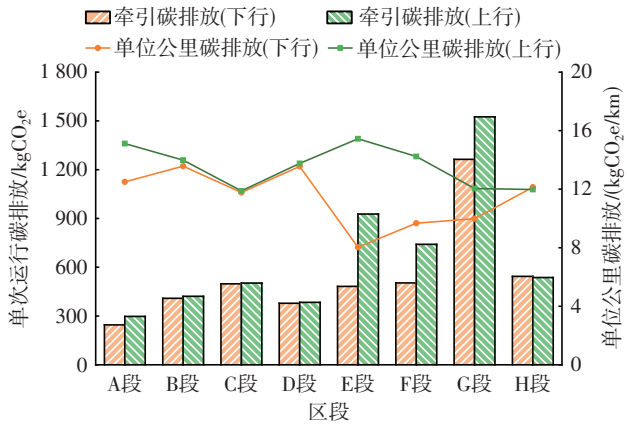


图6　归一化预测模型核算FXD1-J型列车在案例线路LC上的上行和下行牵引运行碳排放量

Fig.6　Carbon emissions from upward and downward traction operations of FXD1-J type train on case line LC calculated by normalized prediction model

4　结论

基于列车运行受力分析构建了动力牵引碳排放量测算虚拟仿真软件，通过设置不同路况建立碳排放归一化预测模型，对比分析FXD1-J型列车在案例线路LC，实际运行、虚拟仿真及预测模型测算碳排放的差距，研究形成如下结论。

（1）FXD1-J型列车在线路LC上的单次实际运行碳排放量为4.53 tCO_2e，虚拟仿真测算上、下行碳排放平均值为4.45 tCO_2e，较实际运行略低(约1.7%)。线路LC的8个区段中，D段站间距最短，上、下行平均单位公里碳排放强度大，较实际运行高42%；G段路况复杂，测算碳排放强度为15.06 $kgCO_2e/km$，比实际运行高34%；E和F段海拔落差最大，上行和下行碳排放强度相差较大；虚拟仿真测算结果表现出线路条件对碳排放量的影响与实际运行一致。虽然虚拟仿真测算方法能够相对细致和准确地刻画路况及列车与动力牵引碳排放之间关系，但需要输入详细的线路数据和机车特征，适于描述已建成运行或施工图阶段列车动力牵引能耗和碳排放特征，未来应考虑不同时期客流量、网压不同，以及司机操纵水平、新旧机车等因素，构建更加精准的虚拟仿真软件。

（2）应用归一化预测模型测算FXD1-J型列车在线路LC上、下行牵引运行碳排放分别为5.33 tCO_2e和4.32 tCO_2e，平均值4.82 tCO_2e较实际运行碳排放低约6.5%，但线路条件对碳排放量的影响与实际运行类似。D段站间距短且相对平缓，上、下行单位公里碳排放强度接近且较大；E段海拔落差最大，上、下行碳排放强度差距高达7.41 $kgCO_2e/km$；G段线路复杂，上、下行碳排放强度相差2.07 $kgCO_2e/km$。预测模型测算牵引运行碳排放量只需输入线路曲线、坡道、车站设置、启停次数等数据，适用于可研及初步设计阶段的线路比选及机车类型优选。但与虚拟仿真法相比，预测精度略低，未来应引入遗传算法、深度学习等智慧技术，使预测结果更接近实际运行。

本研究建立的列车牵引运行能耗与碳排放量虚拟仿真核算软件及预测模型均基于单机牵引列车运行，对于多机牵引列车、动力分散型动车组列车的

运输组织优化，以及高落差线路制动能量再利用等节能降碳潜力分析有待进一步研究，以推进绿色低碳电气化铁路的持续发展。

参考文献：

[1] 彭　程，冯　佳，刘　爽，等. “双碳”目标下高速铁路运营阶段碳排放测算及评价指标体系研究[J]. 交通运输研究，2023，9(6)：132-140.
PENG Cheng，FENG Jia，LIU Shuang，et al. Study on Carbon Emission Calculation and Evaluation Index System during Operation Phase of High Speed Railway under “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” Goals[J]. Transport Research，2023，9(6)：132-140.

[2] 赵　锐，赵祎杰，熊　欣，等. 基于SBM-Malmquist-Tobit模型的铁路运输企业碳排放效率测度及影响因素分析[J]. 铁道运输与经济，2025，47(6)：11-23.
ZHAO Rui，ZHAO Yijie，XIONG Xin，et al. Measurement of Carbon Emission Efficiency and Analysis of Influencing Factors in Railway Transportation Enterprise Based on SBM-Malmquist-Tobit Model[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(6)：11-23.

[3] 曹　猛，袁振洲，杨　洋，等. 京雄城际铁路全生命周期能耗及碳排放研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(5)：37-44，55.
CAO Meng，YUAN Zhenzhou，YANG Yang，et al. Research on Energy Consumption and Carbon Emissions in the Whole Life Cycle of Beijing-Xiongan Intercity Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(5)：37-44，55.

[4] LI Z H，LI X Q，LU C，et al. Carbon Emission Responsibility Accounting in Renewable Energy-Integrated DC Traction Power Systems[J]. Applied Energy，2024，355：122191.

[5] SONG J W，CHEN X，LU C X，et al. High Speed Rail Electric Traction Carbon Emission Calculation Method Based on Carbon Flow Theory[J]. IEEE Access，2024，12：102096-102110.

[6] 冯旭杰. 基于生命周期的高速铁路能源消耗和碳排放建模方法[D]. 北京：北京交通大学，2014.

[7] 薛艳冰，马大炜，王　烈. 列车牵引能耗计算方法[J]. 中国铁道科学，2007，28(3)：84-87.
XUE Yanbing，MA Dawei，WANG Lie. Calculation Method of Energy Consumption in Train Traction[J]. China Railway Science，2007，28(3)：84-87.

[8] JANIĆ M. Estimation of Direct Energy Consumption and CO_2 Emission by High Speed Rail，Transrapid Maglev and Hyperloop Passenger Transport Systems[J]. International Journal of Sustainable Transportation，2021，15(9)：696-717.

[9] 张彦栋，王利军. 节能评估及能源消耗分析软件的开发与验证[J]. 电脑知识与技术，2023，19(23)：64-66，70.

[10] 杜振军，刘文海，许根才，等. 计及线路条件和行车操纵的HXD1型电力机车能耗评估[J]. 电气化铁道，2024，35(1)：94-100.
DU Zhenjun，LIU Wenhai，XU Gencai，et al. Assessment of Energy Consumption of HXD1 Electric Locomotive with Consideration of Line Conditions and Train Operation Manipulation[J]. Electric Railway，2024，35(1)：94-100.

[11] CAMPOS J，DE RUS G. Some Stylized Facts about High Speed Rail：A Review of HSR Experiences around the World[J]. Transport Policy，2009，16(1)：19-28.

[12] WANG J H，GHANEM A，RAKHA H，et al. A Rail Transit Simulation System for Multi-Modal Energy-Efficient Routing Applications[J]. International Journal of Sustainable Transportation，2021，15(3)：187-202.

[13] KADDOURA I，UNTERFINGER M，HETTINGER T，et al. A Large-Scale Hybrid Micro- and Mesoscopic Simulation Approach for Railway Operation[J]. Procedia Computer Science，2024，238：714-721.

[14] CHEN Z，HAN B M. Simulation Study Based on OpenTrack on Carrying Capacity in District of Beijing-Shanghai High Speed Railway[J]. Applied Mechanics and Materials，2014，505-506：567-570.

[15] COVIELLO N，MEDEOSSI G，NASH A，et al. Multi-Objective Timetable Development Tool for Railway Strategic Planning in Norway[J]. Transportation Research Record：Journal of the Transportation Research Board，2023，2677(1)：720-729.

[16] 杨　坚. 长大下坡道区段限速对有轨电车旅行时间影响的计算与仿真研究[J]. 城市轨道交通研究，2023，26(8)：100-104，109.
YANG Jian. Calculation and Simulation of Segment Speed Limit Influencing Tram Travel Time on Long-Large Downhill Ramp[J]. Urban Mass Transit，2023，26(8)：100-104，109.

[17] TAN Z H，CHUA K H，LIM Y S，et al. Optimal Operations of Transformers in Railway Systems with Different Transformer Operation Modes and Different Headway Intervals[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2021，127：

106631.

[18] SHEVLYUGIN M，PLETNEV D，BELOV M. Simulation of Electric Rolling Stock Movement 81-775/776/777 《Moscow-2020》 on the Sokolnicheskaya Line of the Moscow Metro，Taking into Account the Modes of Regenerative Braking[C]// The 6th International Conference on Energy，Environment，Epidemiology and Information System (Icenis) 2021：Topic of Energy，Environment，Epidemiology，and Information System. New York：American Institute of Physics，2023：020063.

[19] 周姗姗，柏　赟，袁　博，等. 基于列车运行仿真和SVR组合的地铁新线牵引能耗预测方法[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(10)：2733-2740.
ZHOU Shanshan，BAI Yun，YUAN Bo，et al. Traction Energy Consumption Prediction of New Metro Lines Based on Simulation Combining Support Vector Regression[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(10)：2733-2740.

[20] 陈　垚，毛保华，柏　赟，等. 基于支持向量回归的地铁牵引能耗预测[J]. 系统工程理论与实践，2016，36(8)：2101-2107.
CHEN Yao，MAO Baohua，BAI Yun，et al. Forecasting Traction Energy Consumption of Metro Based on Support Vector Regression[J]. Systems Engineering-Theory & Practice，2016，36(8)：2101-2107.

[21] MARTÍNEZ FERNÁNDEZ P，SALVADOR ZURIAGA P，VILLALBA SANCHÍS I，et al. Neural Networks for Modelling the Energy Consumption of Metro Trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part F：Journal of Rail and Rapid Transit，2020，234(7)：722-733.

[22] LIANG H Z，ZHANG Y Y，YANG P Y，et al. Comparison and Analysis of Prediction Models for Locomotive Traction Energy Consumption Based on the Machine Learning[J]. IEEE Access，2023，11：38502-38513.

[23] LI X，ZHU C K，LIU Y Z. Traction Power Supply System of China High Speed Railway under Low-Carbon Target：Form Evolution and Operation Control[J]. Electric Power Systems Research，2023，223：109682.

[24] 杨　洋，王雪纯，袁振洲，等. 基于碳回收期理论的城市轨道交通碳减排效应测算[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(5)：1-11，23.
YANG Yang，WANG Xuechun，YUAN Zhenzhou，et al. Calculation for Carbon Emission Reduction Effect of Urban Rail Transit Based on Carbon Recovery Period Theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2023，23(5)：1-11，23.

[25] 袁振洲，袁晓敬，杨　洋，等. 城市轨道交通低碳效应研究综述[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：8-23，57.
YUAN Zhenzhou，YUAN Xiaojing，YANG Yang，et al. Review on Research of Low-Carbon Effects in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：8-23，57.

[26] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程：TB/T 1407—1998[S]. 北京：中国铁道出版社，1999：14-17，30-33.

[27] 中国工程建设标准化协会. 铁路工程碳排放核算标准：T/CECS 1730—2024[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2024：17-19，33-36.

[28] WANG J H，RAKHA H A. Electric Train Energy Consumption Modeling[J]. Applied Energy，2017，193：346-355.

[29] 生态环境部办公厅. 关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[Z]. 北京：生态环境部办公厅，2023.

[30] 夏子又. 基于列车牵引能耗分析的山区铁路线路方案优选方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2023.

(责任编辑　金　晶)