

文章编号:1005-0523(2025)02-0066-10



高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道 建设期碳排放研究

杨书生^{1,2},朱蔡亦伊¹,邓婷¹,王成栋²,何庆¹,王平¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 济青高速铁路有限公司, 山东 济南 250102)

摘要:近年来,高速铁路无砟轨道的研究发展迅速,但针对其建设期碳排放特征及其精细计算方法的研究仍然相对欠缺。因此仍需要对高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期的碳排放进行全面量化研究,明确碳排放计算的边界,构建相应碳排放计算模型;利用PROMETHEE-Ⅲ对碳排放因子方案进行排序,并借助MySQL语言构建了无砟轨道建设期碳数据库;采用所构建的碳排放计算模型对高速铁路建设中路基、桥梁和隧道3种典型路段的单公里碳排放进行了量化分析。混凝土碳排放占比为41.06%~43.52%,钢材碳排放占比为52.90%~54.53%,总体材料碳排放占比高达96.00%,结果表明路基段的单公里碳排放量显著高于隧道段和桥梁段;材料方面,混凝土和钢材的碳排放占据了主导地位;敏感性分析揭示了整体碳排放对钢材碳排放因子的敏感性最强,而混凝土的敏感性则次之。

关键词:高速铁路;CRTSⅢ型板式无砟轨道;建设期碳排放;数据库;碳排放计算

中图分类号:[U2-9];X32

文献标志码:A

本文引用格式:杨书生,朱蔡亦伊,邓婷,等. 高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(2): 66-75.

Carbon Emission Calculation for High-Speed Rail CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track

Yang Shusheng^{1,2}, Zhu Caiyiyi¹, Deng Ting¹, Wang Chendong², He Qing¹, Wang Ping¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Jinan-Qingdao High Speed Railway Co., Ltd., Jinan 250102, China)

Abstract: In recent years, ballastless track systems in high-speed railways have developed rapidly, but studies on carbon emission characteristics and precise calculation methods during the construction phase remain limited. This paper conducts a comprehensive quantitative analysis of carbon emissions during the construction phase of CRTSⅢ slab ballastless track in high-speed railways. The PROMETHEE-Ⅲ method is used to rank carbon emission factors, and a ballastless track construction carbon emission database is built using MySQL. The proposed models quantify the per-kilometer carbon emissions of embankment, bridge, and tunnel sections. Concrete accounts for 41.06%~43.52%, steel accounts for 52.90%~54.53%, with materials contributing up to 96.00% of total emissions. Results show that embankment sections produce significantly higher carbon emissions than bridge

收稿日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52372400);四川省自然科学基金创新研究群体项目(2023NSFSC1975);中央高校基本科研业务费专项资金资助(A0920502052301-369)

and tunnel sections. Concrete and steel are the dominant emission sources. Sensitivity analysis reveals that steel emission factors have the strongest impact on total emissions, followed by concrete.

Key words: high-speed railway; CRTS III type slab ballastless track; construction phase carbon emissions; database; carbon emission calculation

Citation format: YANG S S, ZHU C Y Y, DENG T, et al. Carbon emission calculation for high-speed rail CRTS III type slab ballastless track[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 66–75.

全球变暖已成为21世纪人类面临的主要环境问题之一,控制温室气体排放成为国际共识^[1]。在此背景下,准确、客观的碳排数据是制定减排路径的基础。交通运输业是温室气体排放的主要来源之一^[2],而高速铁路的节能减排作用尤为突出^[3]。无砟轨道是高速铁路的重要组成部分,对无砟轨道建设期碳排放数据的研究和计算有助于了解无砟轨道建设期的碳排放水平。CRTS III型板式无砟轨道技术作为我国拥有自主知识产权的技术,具有耐久性高,维修方便等优点,应用广泛且具有代表性^[4]。

目前国内外针对高速铁路碳排放研究较多的是其全生命周期碳排放与能耗计算以及对运维阶段用电情况研究。陈进杰等^[5]根据全生命周期理论,建立了高速铁路全生命周期碳排放数学模型,考虑碳排放因子时空动态变化对碳排放总量的影响并进行敏感性分析。郭鑫楠^[6]通过将铁路建设项目分为多个子项目的方法,计算得到整条铁路建设项目的二氧化碳总排放量。薛静^[7]确定城际铁路全生命周期的计算边界,设计了城际铁路全生命周期MySQL数据库,并对京津冀城际铁路进行能耗与碳排放预测。Chang等^[8]对旧金山至阿纳海姆高速铁路基础设施建设的生命周期温室气体清单进行了估算,结果表明其中材料生产占排放量的80%,建筑材料运输占16%。Kaewunruen等^[9]运用全生命周期理论分析并核算了我国京沪高铁西渑马一号隧道建造和运营过程中的CO₂排放和能源消耗。马晓元^[10]应用SQL对高速铁路基础数据进行管理,建立了高速铁路全生命周期能耗及碳排放分析系统。许劼^[11]证明施工阶段是全生命周期中资源消耗量和气体排放量最大的一环。

当前研究多聚焦于高速铁路全生命周期的碳排放研究,对高速铁路建设期碳排放的研究尚显不

足。相较于运营期,建设期显著表现为能源与资源的大量消耗^[12],因此本文聚焦于探讨高速铁路CRTS III型板式无砟轨道建设期所产生的碳排放问题。针对建设期的建材生产、建材运输以及现场施工等3个关键阶段,建立相应的碳排放计算模型;构建高速铁路CRTS III无砟轨道建设期数据库以及建设期碳排放因子数据库;应用所建模型对CRTS III型板式无砟轨道建设期的单公里路段进行精确的碳排放计算与深入分析。

1 碳排放计算方法

1.1 计算方法介绍

鉴于不同场景下的计算需求差异,有3种常见的碳排放计算方法。碳排放实测法^[13]结果可靠,但是需要较高的成本,数据获取难度大;物料平衡法^[14]计算结果较为精确,但是适用性差;碳排放因子法是使用碳排放因子进行碳核算,其计算方法相对固定,因此容易形成计算规范,有助于比较和评估不同项目或活动的碳排放水平。因此,本文采用碳排放因子法作为CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放测算的方法。

1.2 计算边界确定

在计算CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放时,需明确3个核心边界:碳排放因子边界,生命周期阶段划分及系统运作边界。

首先,IPCC明确指出,特定能源在燃烧或使用过程中每单位能源量所释放的温室气体量是一个恒定的数值,这一数值转换为二氧化碳的当量即为该能源的碳排放因子。本文选择碳排放因子的范围为“从摇篮到大门”。其次,对于高速铁路全生命周期阶段,主要划分为建设阶段、运维阶段和报废回收阶段,其中本文选取建设阶段,并将其分为材料准备阶段,材料运输阶段和施工阶段进行研究。

最后,对于高速铁路系统的分类,主要分为轨道工程系统,路桥隧工程和电气化系统,轨道工程系统和线路相关工程等。综上,本文碳排放研究主要针对轨道工程系统中无砟轨道部分,研究的碳排放计算边

界之内包含高铁桥梁段、隧道段、路基段的CRTS III无砟轨道部分基础设施建设所需材料的生产,材料运输和施工建设3个阶段,碳排放边界示意图如图1所示。

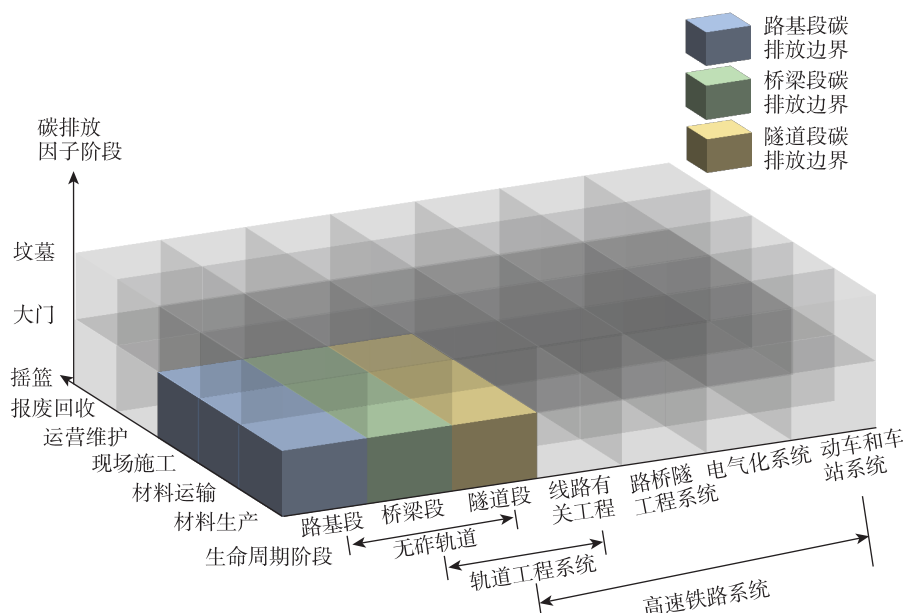


图1 CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放计算边界模型

Fig. 1 Calculation boundary model of carbon emissions during the construction period of CRTS III ballastless track

1.3 碳排放因子处理

现有文献中,各种材料的碳排放因子取值呈现出较大的差异性,这对于准确评估碳排放量构成了挑战。以钢材为例,图2直观展示了采用碳排放因子的不同取值时各类钢材和混凝土在总碳排放量中的占比,体现碳排放因子取值对碳排放总量的显著影响。由此可见,为确保碳排放计算结果的可靠性与准确性,选择一个数据质量高、具有

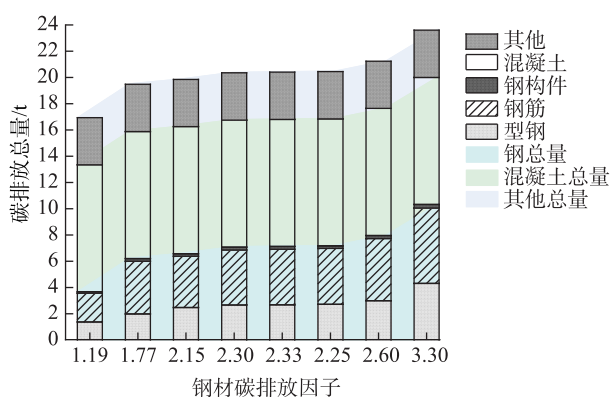


图2 钢材碳排放占比

Fig. 2 The proportion of carbon emissions from steel

代表性的钢材碳排放因子至关重要。

解决碳排放因子数据质量参差不齐问题的关键在于通过有效方法对备选方案进行排序。常用的排序方法包括TOPSIS、EDAS、VIKOR以及偏好顺序结构评估法(preference ranking organization method for enrichment evaluations, PROMETHEE), 这些方法能够辅助研究者系统地评估并排列不同方案。其中,PROMETHEE评价法为决策中的方案排序提供了一个独特而有效的工具。

鉴于本文中方案性能评估中可能存在的不确定性,为了有效选择可靠的碳排放因子,本文引入PROMETHEE-III评价法,对碳排放因子方案进行排序,并选出最优结果。

1) 偏好函数。假设评价方案集合为: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 方案的属性值为 $k_1, k_2, \dots, k_j$ 。为了确定PROMETHEE-III中偏好函数的值,首先得到了下述的备选方案之间的差异。

$$d_j(A_i, A_{i'}) = f_j(A_i) - f_j(A_{i'}), \quad j \in \{1, \dots, m\} \quad (1)$$

$$P_j(A_i, A_{i'}) = f_j[d_j(A_i, A_{i'})], \quad i, i' \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

式中: P 为偏好函数, $P_j(A_i, A_{i'})$ 为方案 A_i 相对于

方案 A_i 在属性值 k_j 上的偏好函数。为了更好地观察无差异区域,本文将采用 Hsu-Shih 等偏好差异函数^[15-16]。该函数以 $\alpha=\beta=0.880, \lambda=2.250$ 为原值,通过参考点的值函数为不对称的s形,损失的幅度是增益的2.25倍。Abdellaoui等^[17]建议 $\alpha=0.725, \beta=0.717$ 和 $\lambda=2.040$ 。为了模拟原甲基偏好差异函数中的不对称效应,本文采用公式如下

$$P(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } d > p \\ \left(\frac{d-q}{p-q}\right)^\alpha, & \text{if } q < d \leq p \\ 0, & \text{if } -q/\lambda \leq d \leq q \\ -\left(\frac{d+(q/\lambda)}{(-p+q)/\lambda}\right)^\beta, & \text{if } -p/\lambda \leq d < -q/\lambda \\ -1, & \text{if } d < -p/\lambda \end{cases} \quad (3)$$

$$d=f(A_i)-f(A_{i'}), i, i' \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

式中: $\alpha=0.725, \beta=0.717$ 和 $\lambda=2.040$, 偏好指数 $p=0.300$, 差异指数 $q=0.100$ 。

2) 总体偏好指数。

$$\pi(A_i, A_{i'}) = \sum_{j=1}^n \varphi_j P_j(A_i, A_{i'}), i, i' \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

式中: φ_j 为评价指标权重。

3) 计算净流量 $\phi(x)$ 。

$$\phi^+(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{A_{i'} \in A} \pi(A_i, A_{i'}), i, i' \in \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$\phi^-(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{A_{i'} \in A} \pi(A_{i'}, A_i), i, i' \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

$$\phi(A_i) = \phi^+(A_i) - \phi^-(A_i), i = 1, \dots, n \quad (8)$$

式中: $\phi^+(A_i)$ 和 $\phi^-(A_i)$ 分别为正流量、负流量; $\phi(A_i)$ 为净流量。

4) 备选方案的区间计算。

$$\begin{cases} X_{A_i} = \bar{\phi}(A_i) - \gamma \sigma_{A_i} \\ Y_{A_i} = \bar{\phi}(A_i) + \gamma \sigma_{A_i} \end{cases}, i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$\begin{cases} \bar{\phi}(A_i) = \frac{1}{n} \sum_{A_{i'} \in A} [\pi(A_i, A_{i'}) - \pi(A_{i'}, A_i)] = \frac{1}{n} \phi(A_i) \\ \sigma_{A_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{A_{i'} \in A} [\pi(A_i, A_{i'}) - \pi(A_{i'}, A_i) - \bar{\phi}(A_i)]^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{\phi}(A_i)$ 是备选方案的净流量均值; σ_{A_i} 是备选方案净流量的标准差; γ 为系数,根据方案应用取值,本文采用 $\gamma=0.15$ ^[18]。 γ 的值越大,其范围就会越宽。在对方案进行排序时,通常是按照偏好函数值的大小来进行排序,值越大表示方案越受偏好。

本文利用 PROMETHEE-III 对收集的钢材碳排放因子方案进行处理,将每个候选方案的性能指标转换为偏好函数值,并通过偏好函数值的比较来确定它们的相对优劣关系。对碳排放因子方案设置 6 种不同的性能指标如表 1 所示。决策组对这 6 个指标的权重分配是 0.15, 0.15, 0.20, 0.15, 0.20, 0.15。

表 1 钢材碳排放因子方案的 6 个性能指标

Tab.1 Six performance indicators of steel carbon emission factor scheme

钢碳排放因子/ (kg CO ₂ /单位)	对应 方案	性能指标					
		来源可 靠性	数据代 表性	周期完 整性	时间 范围	地理 范围	技术 范围
1.197	A	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6
1.770	B	0.6	0.2	0.6	0.1	0.6	0.1
2.309	C	0.8	0.6	0.1	0.4	0.6	0.6
2.327	D	0.8	0.4	0.2	0.2	0.6	0.6
2.252	E	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.4
2.600	F	0.6	0.2	0.2	0.4	0.6	0.4
2.147	G	0.8	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6
3.300	H	0.7	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4

通过 PROMETHEE-III 评价法,计算得到了每个备选方案对应的偏好函数值区间,如图 3 所示。这些数值直观地反映了每个方案相对于其他方案的优势或劣势程度。排序的依据主要是偏好函数值的大小,数值越大,表明该方案越受偏好。综合评估的结果和图 3 所展示的方案区间信息,本文最终选择了第 7 个方案 G 作为钢材碳排放因子的最优方案。以下是各方案的最终排名顺序:G>E>C>D>A>F>H>B。

1.4 碳排放计算模型

在确定了高速铁路 CRTS III 型板式无砟轨道

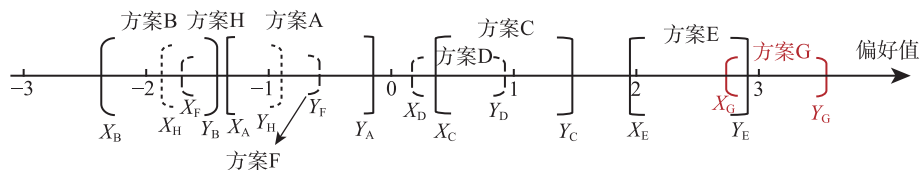


图 3 备选方案的偏好函数值区间

Fig. 3 The preference function value interval for alternative solutions

碳排放计算边界的前提下,碳排放计算模型可以分为桥梁、路基和隧道3种路段之和。建设期碳排放阶段可分为材料生产阶段,材料运输阶段和施工阶段3阶段,其中材料运输和施工阶段合并为设备碳排放。

$$C = \sum_{i=1}^n (C_{bi} + C_{si} + C_{ti}) \quad (11)$$

式中: C 为高速铁路CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放; C_{bi} 为桥梁段碳排放; C_{si} 为路基段碳排放; C_{ti} 为隧道段碳排放; n 取3; $i=1$ 为该段建材生产碳排放; $i=2$ 为该段运输设备碳排放; $i=3$ 为该段施工设备碳排放。

1) 材料碳排放。高速铁路CRTS III型板式无砟轨道施工采用的材料种类繁多,考虑量小的材料部分不易计算且不影响总体计算,本文只将典型且需求大的材料的消耗量计入碳排放量。建材生产阶段碳排放主要是指材料从摇篮到大门阶段所产生的碳排放

$$C_1 = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n q_{ij} / (1 - \lambda_{ij}) f_{ij} \right) \quad (12)$$

式中: C_1 为建材生产阶段碳排放; λ_{ij} 为建材在生产、运输和使用过程中的损耗率,%; q_{ij} 为高速铁路无砟轨道第 j 个施工工序中所使用的第 i 种建材的需求量; f_{ij} 为建材对应的碳排放因子; n 为建材品种数量; m 为施工工序数量。

2) 设备碳排放。高速铁路施工建设阶段的碳排放包括两部分:一是运输设备将材料从生产地运输到施工现场的碳排放;二是施工过程中施工设备作业所产生的碳排放。针对第一部分,本文仅讨论公路运输方式产生的碳排放。本文根据CRTS III型板式无砟轨道建设项目施工日志内容可统计出施工过程中施工设备台班数,结合施工设备台班碳排放因子可计算出施工建设阶段产生的碳排放量,计算公式如下

$$C_2 = \sum_{h=1}^d \sum_{i=1}^n (1 + \alpha_i) p_{hi} S_{hi} \quad (13)$$

$$C_3 = \sum_{h=1}^d \sum_{i=1}^n p_{hi} S_{hi} t_{hi} \quad (14)$$

式中: C_2 为运输设备碳排放; C_3 为施工设备碳排放; α_i 为运输设备空载率,%; p_{hi} 为施工第 h 天第 i 种施工设备额定功率下的台班碳排放因子, $\text{kg CO}_2/\text{台班}$; S_{hi} 为施工第 h 天第 i 种设备的数量,台; t_{hi} 为第 h 天第 i 种设备当天施工时长; d 是施工天数; n 为

设备种类数量。

2 基于实例的数据库建立与计算分析

2.1 工程概况

本文基于某地高速铁路建设期施工蓝图资料建立CRTS III型板式无砟轨道建设期数据库。该线路路基总长70.27 km,占线路总长29.6%;梁式桥长度为158.59 km/88座,占新建正线线路长度237.33 km的66.8%;双线隧道8.47 km/8座,最长隧道长度1 981 m。无砟轨道范围一般地段采用CRTS III型板式无砟轨道。

2.2 主要工程数量

为了使CRTS III型板式无砟轨道建设期间的施工流程和数据更加清晰且易于管理,并更好地计算和分析其碳排放情况,本文以我国东部某高速铁路施工蓝图为基础,建立了CRTS III型板式无砟轨道建设期的碳排放数据库。进一步完善了CRTS III型板式无砟轨道在桥梁段,路基段和隧道段每公里施工的详细数据,这些数据涵盖施工工序,相应的施工材料种类和数量,并在桥梁段和路基段区分了直线段与曲线段。

CRTS III型板式无砟轨道结构包括钢轨,弹性扣件,预制轨道板,自密实混凝土层,隔离层和具有限位结构的钢筋混凝土底座等部分,桥隧路基无砟轨道部分的区分具体如下。

1) 桥梁段。CRTS III型无砟轨道结构高度为738 mm,曲线段的混凝土用量比直线段增加41.91%,钢筋用量增加22.90%。标准轨道板有P5600, P4925和P4856三种,底座宽度为2 900 mm,厚度为200 mm,混凝土等级为C40。底座板施工:直线段混凝土用量为551.02 m^3 ,钢筋用量为10.13 t;曲线段混凝土用量为781.96 m^3 ,钢筋用量为12.45 t。聚乙烯泡沫塑料板用量分别为106.42 m^2 (直线段)和153.25 m^2 (曲线段)。梁面预埋件与拉毛:梁面拉毛面积为2 700 m^2 ,预埋钢筋用量为5.82 t。隔离层铺设:土工布用量为2 611.93 m^2 , A3型弹性垫板和A4型弹性垫板各为734块,泡沫板用量为60.48 m^2 。自密实混凝土层浇筑:自密实混凝土用量为249.62 m^3 ,灌浆孔混凝土用量为1.96 m^3 ,钢筋焊网用量为27.66 t,钢筋用量为7.72 t。轨道板粗精调、钢轨、扣件安装:钢轨用量为1 km,扣件用量为3 180套, P5600轨道板用量为122块, P4925轨道板用量为61块。

2) 路基段: CRTSⅢ型无砟轨道结构高度为838 mm, 曲线段混凝土用量比直线段增加27.81%, 钢筋用量增加19.16%。采用P5600轨道板, 底座宽度为3 100 mm, 厚度为300 mm, 混凝土等级为C35。底座板施工: 直线段混凝土用量为891.60 m³, 钢筋用量为12.07 t; 曲线段混凝土用量为1 139.60 m³, 钢筋用量为14.38 t。聚乙烯泡沫塑料板用量分别为65.61 m²(直线段)和83.10 m²(曲线段)。隔离层铺设: 土工布用量为2 600 m², A1型弹性垫板和A2型弹性垫板各为705块。自密实混凝土层浇筑: 自密实混凝土用量为261.97 m³, 灌浆孔混凝土用量为1.89 m³, 钢筋焊网用量为27.75 t, 钢筋用量为7.86 t。轨道板粗精调、钢轨、扣件安装: 钢轨用量为1 km, 扣件用量为3 175套, P5600轨道板用量为176块。

3) 隧道段: CRTSⅢ型无砟轨道结构高度为738 mm, 混凝土等级为C60; 底座宽度为2 900 mm, 厚度为200 mm, 混凝土等级为C35。底座板施工: 混凝土用量为764.45 m³, 钢筋用量为10.53 t, 聚乙烯泡沫塑料板用量为46.16 m²。隔离层铺设: 土工布用量为2 613.49 m², A3型弹性垫板和A4型弹性垫板各为708块, 泡沫板用量为58.30 m²。自密实混凝土层浇筑: 自密实混凝土用量为251.72 m³, 灌浆孔混凝土用量为1.89 m³, 钢筋焊网用量为29.63 t, 钢筋用量为7.50 t。轨道板粗精调、钢轨、扣件安装: 钢轨用量为1 km, 扣件用量为3 175套, P5600轨道板用量为172块, P4925轨道板用量为5块。

2.3 碳排放数据库

高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放计算涉及的装备、建材种类繁多, 碳排放环节复杂, 需要巨大的基础数据作为基础, 因此建立一套完善的建材基础碳排放数据库十分必要。在本研究中, 针对高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期的碳排放特征, 构建了基于MySQL的碳排放数据库。该数据库能够系统性地存储和管理材料生产、材料运输、现场施工等多个环节的碳排放数据, 通过制定统一的数据标准与格式, 确保了不同阶段数据的准确性和一致性。此外, 数据库的集中化管理有助于数据的高效整合与清洗, 提升了数据质量, 从而为定量分析碳排放提供了可靠的基础。

2.3.1 材料碳排放因子

通过质量指标评估法对其他碳排放因子进行可靠度评估, 得出本文采用的高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期建材碳排放因子(忽略碳排放贡献占比少于0.10%的材料), 如表2所示。

表2 高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期部分建材碳排放因子

Tab.2 Carbon emission factors of building materials during the construction period of CRTSⅢ ballastless tracks in high-speed railways

材料	类别	碳排放因子/(kg CO ₂ /单位)
混凝土	C35	292.55
	C40	322.05
	C60	450.54
钢材	型钢	2.147
	CRB600H 钢筋	2.357
	钢构件	1.960

2.3.2 设备碳排放因子

本文设备碳排放因子采用了计算得到的单位台班的施工设备对各类能源消耗量与对应能源的碳排放因子乘积之和。由于施工设备具有重复使用的性质, 设备在参与了某条铁路与无砟轨道的施工之后还能投入其他使用, 因此在本文的台班碳排放因子计算时不考虑设备本体建造所产生的碳排放, 只考虑设备在作业过程中消耗的燃料所产生的碳排放。

利用上文所计算的汽油、柴油以及电力等主要能源的碳排放因子, 先计算出每种机械台班消耗能源数量, 再与能源对应碳排放因子相乘得到台班碳排放因子。施工设备台班碳排放因子如表3所示。

2.3.3 数据库构建

根据依托工程项目信息以及搜集文献信息, 采用基于MySQL数据库的高速铁路CRTSⅢ型无砟轨道施工数据管理方案并创建数据库。本数据库存储的数据表主要有碳排放因子、施工项目、路段种类、工程项目信息、施工项目流程、施工材料参数、施工设备参数、碳排放因子和用户信息等。

建设期碳排放项目表有5张表, 分别对应5种

表3 部分施工设备台班碳排放因子
Tab.3 Partial construction equipment shift carbon emission factor

机械与规格	汽油/ kg	柴油/ kg	电/ (kW·h)	施工机械碳 排放因子/ (kg CO ₂ /台班)
平板运输车(<60 t)	—	69.66	—	259.831 8 ^[13]
25 t随车吊(199 kW)	—	119.52	—	115.619 0 ^[13]
铺轨龙门架(25 m)	54.00	—	—	191.700 0 ^[13]
三一重工混凝土泵车	—	84.00	—	313.320 0 ^[13]
振捣棒	—	—	600	348.600 0 ^[19]
砼罐车	—	25.00	—	93.250 0 ^[13]
洒水车(<9 600 L)	—	33.00	—	123.090 0 ^[19]

路段:桥梁直线段,桥梁曲线段,路基直线段,路基曲线段以及隧道段。表内数据由3组数据构成。

① 施工材料碳排放表内包括:施工材料种类,型号,数量,对应的碳排放因子。② 运输设备碳排放表内包括:施工单元信息以及对应所需运输施工设备类别,名称,型号,驱动方式,功率,台班碳排放等。③ 施工设备碳排放表内包括:施工组织信息,例如建设单位、设计单位、施工单位信息等;施工单元信息,例如拌合站、钢筋加工场、轨道板存放站等施工条件、施工步骤顺序、施工进度要求、施工工艺方法等信息;施工数据:例如起始里程、终止里程、施工时间、施工方法、单次施工前进米数、对应耗材数量、对应设备数量、对应工人工种和数量等。

为提升数据查询和调用效率,本文引入唯一标识码作为每个数据类目的索引ID。路段ID用于标

记5种施工路段;对施工项目表中存储的无砟轨道施工单元引入标识码单元ID,并附上其所属的路段ID;施工材料、设备碳排放因子表引入标识码碳排放ID,并标注对应施工单元ID,以便进行数据表的关联查找和数据串联索引。该数据库结构如图4所示。

2.4 碳排放计算

根据本文所建立的CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放计算模型,结合对应碳排放数据库,桥梁段和路基段按直线段计算,计算出单公里的路基段、桥梁段和隧道段的CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放量,单公里CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放明细如表4所示。

分析可得,在路基、桥梁和隧道3种路段中,路基段的碳排放量最高,其次为隧道段,桥梁段最低。该结果主要归因于路基段底座板的横截面尺

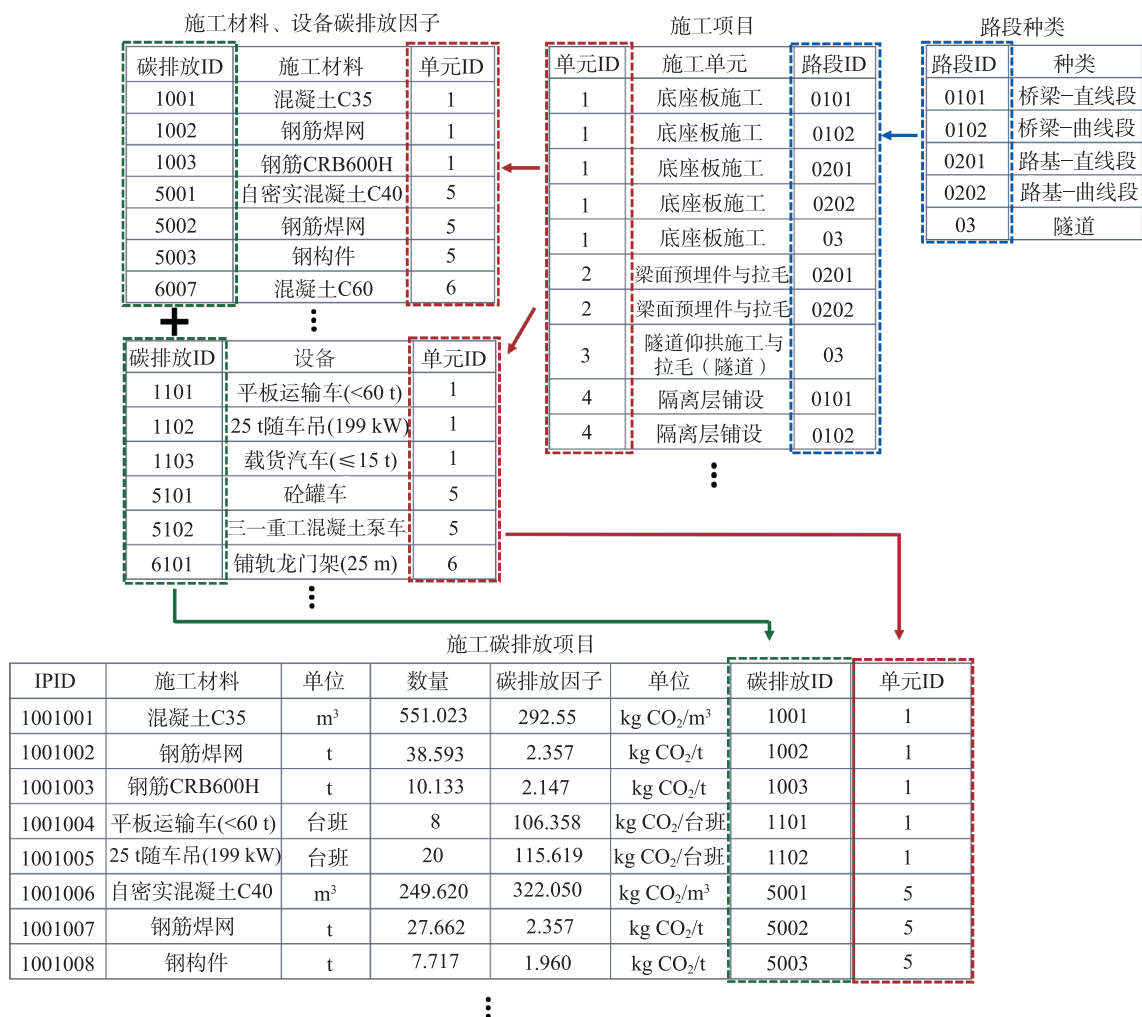


图4 碳排放数据库结构

Fig. 4 Carbon emission database structure

表4 单公里无砟轨道建设期碳排放明细表

Tab.4 Carbon emission details during the construction period of single kilometer ballastless track t

	分类	路基碳排放(占比)	桥梁碳排放(占比)	隧道碳排放(占比)
混凝土	C60(轨道板)	222.030(16.46%)	221.570(18.98%)	222.530(18.37%)
	C40(自密实)	84.970(6.30%)	80.390(6.88%)	81.070(6.69%)
	C35(底座板)	260.840(19.34%)	177.460(15.20%)	223.640(18.46%)
钢材	型钢	260.820(19.34%)	260.820(22.34%)	260.820(21.53%)
	CRB600H 钢筋	452.680(33.56%)	366.640(31.40%)	370.670(30.60%)
	钢构件	9.260(0.69%)	9.280(0.79%)	9.270(0.77%)
	聚乙烯泡沫塑料板	0.150(0.01%)	0.250(0.02%)	0.190(0.02%)
	土工布	6.630(0.49%)	6.660(0.57%)	6.660(0.55%)
材料运输	运板车	3.718(0.28%)	4.508(0.39%)	5.580(0.46%)
	砼罐车	16.890(1.25%)	15.912(1.36%)	16.950(1.40%)
施工机械	随车吊	3.033(0.22%)	4.923(0.42%)	2.043(0.17%)
	振捣棒	13.301(0.99%)	2.552(0.22%)	0.314(0.03%)
	龙门吊	6.400(0.47%)	9.201(0.79%)	3.763(0.31%)
	泵车	7.985(0.59%)	7.519(0.64%)	8.010(0.66%)
总计		1 348.707	1 167.685	1 211.510

寸为3.1×0.3 m²,而桥梁和隧道段底座板尺寸为2.9×0.2 m²,导致路基段混凝土和钢筋的使用量更大,从而显著增加了碳排放。具体数据显示,桥梁段CRTS III型板式无砟轨道曲线段的底座板混凝土用量较直线段增加了41.91%,钢筋用量增加了22.90%;路基段曲线段的底座板混凝土用量较直线段增加了27.81%,钢筋用量则增加了19.16%。从建设期碳排放的整体构成来看,混凝土碳排放量占总体碳排放量的41.06%~43.52%,钢材碳排放量占比达到52.90%~54.53%,而材料运输碳排放占比仅为1.53%~1.86%,施工机械碳排放占比仅为1.17%~2.27%。这些数据突出表明,材料环节在高速铁路CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放中占据主导地位,其碳排放比例高达96.00%。这意味着在材料领域存在巨大的节能减排潜力。为降低碳排放,未来研究可重点关注对更环保的混凝土、钢材替代材料,如低碳混凝土和可再生钢材,这有望显著减少材料生产环节的碳排放。同时,加强建筑材料的回收与二次利用技术研究,通过减少新材料的消耗进一步降低整体碳排放。

2.5 敏感性分析

高速铁路CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放计算模型中包括材料碳排放因子等数据,这些数据基于已有数据库进行分析计算。但实际CRTS III型板式无砟轨道施工建设碳排放涉及众多材料与设

备,因此需要进行敏感性分析,找出对CRTS III型板式无砟轨道建设期总体碳排放量影响较大的敏感性因素,便于后期采取恰当措施进行分析控制。

本文敏感性分析主要针对碳排放计算模型中主要施工材料和燃料能源的碳排放因子进行,考虑了碳排放占比大于11.00%的材料和柴油、汽油两种燃料的碳排放因子上升或下降10.00%,20.00%对总碳排放量影响程度,计算分析结果如图5、6所示。对采用不同碳排放因子计算所得的碳排放变化量和变化的占比进行分析,模拟混凝土碳排放因子减少或增加20.00%时,高速铁路CRTS III型板式无砟轨道建设期碳排放量将减少或增加2.4万t,变化幅

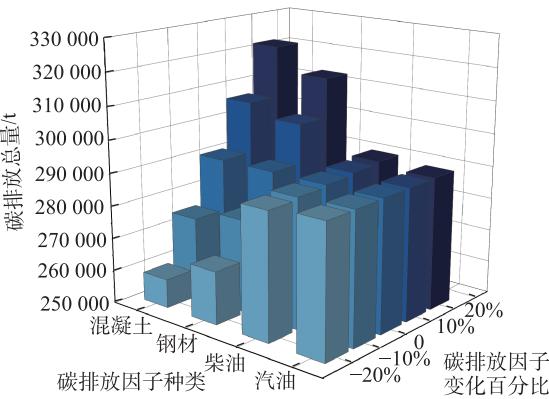


图5 不同碳排放因子的碳排放总量

Fig. 5 The total carbon emissions of different carbon emission factors

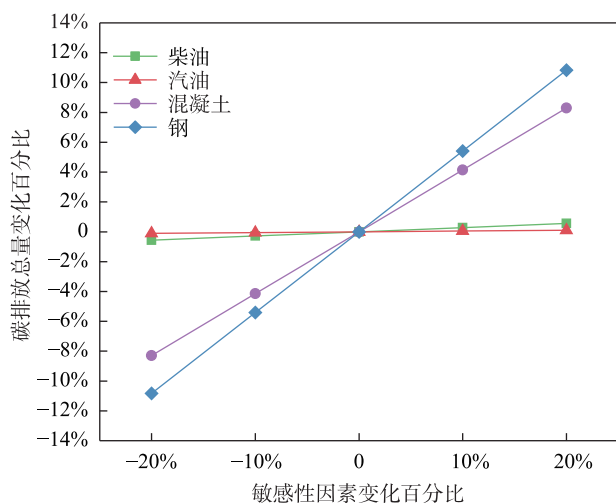


图6 碳排放因子变化引起的碳排放总量变化

Fig. 6 The carbon emission changes caused by changes in carbon emission factors

度占比为12.20%；钢材的碳排放因子减少或增加20.00%时，碳排放量将减少或增加3.1万t，变化幅度占比为11.02%。相比之下，柴油、汽油和电力的碳排放因子减少20.00%时，只会引起碳排放总量0.18%至0.20%之间的变化，表明CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放对柴油、汽油和电力的敏感性较低。因此可以得出结论，钢材和混凝土的碳排放因子对于高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道建设期碳排放的影响最为显著。

3 结论

1) 建材生产阶段是碳排放的主要来源，该阶段的碳排放占比约为96.00%，因此，降低建材生产过程中的碳排放对于实现整体碳减排具有至关重要的意义。

2) 运输和施工阶段碳排放较低：建材运输和现场施工阶段的碳排放占比分别为1.53%~1.94%和1.17%~2.28%，相对较小，但仍有优化空间。

3) 钢材和混凝土碳排放占主导地位：钢材的碳排放占比为53.20%~55.28%，混凝土为41.62%~43.77%，两者在整体碳排放中的比例较高，且对碳排放的敏感性显著。

参考文献：

- [1] 刘宽, 白云, 王创, 等. 交通基础设施项目的综合碳排放评估探究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(10): 185-190.
LIU K, BAI Y, WANG C, et al. Study on the comprehen-

sive carbon-emission assessment of infrastructure projects [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(10): 185-190.

- [2] 吴雪妍, 毛保华, 周琪, 等. 交通运输业不同方式碳排放因子水平比较研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 41-47.

WU X Y, MAO B H, ZHOU Q, et al. Comparative of carbon emission factor levels in different modes of transportation industry[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 41-47.

- [3] LIN Y T, QIN Y, WU J, et al. Impact of high-speed rail on road traffic and greenhouse gas emissions[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(11): 952-957.

- [4] 姚坤锋. CRTSⅢ型板式无砟轨道智能化施工设备研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(7): 125-129.

YAO K F. Study on intelligent construction equipment of CRTSⅢ slab ballastless track[J]. Railway Construction Technology, 2022(7): 125-129.

- [5] 陈进杰, 王兴举, 王祥琴, 等. 高速铁路全生命周期碳排放计算[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 47-55.

CHEN J J, WANG X J, WANG X Q, et al. Calculation of carbon dioxide emissions in the life cycle of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12): 47-55.

- [6] 郭鑫楠. 基于生命周期评价的铁路建设项目二氧化碳排放评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

GUO X N. Study on railway construction project carbon dioxide emission assessment based on life cycle assessment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

- [7] 薛静. 京津冀城际铁路全生命周期能耗、碳排放及节能减排研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.

XUE J. Study of Beijing-Tianjin-Hebei inter-city railway life cycle energy consumption, carbon emissions and energy saving and emission reduction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.

- [8] CHANG B, KENDALL A. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(6): 429-434.

- [9] KAEWUNRUEN S, SRESAKOOLCHAI J, YU S N. Global warming potentials due to railway tunnel construction and maintenance[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6459.

- [10] 马晓元. 高速铁路全生命周期能耗及碳排放研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.

MA X Y. Model for whole life-cycle energy consump-

- tion and carbon emission of high-speed railway[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [11] 许劼. 基于BIM的施工过程低碳管理数据建模[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- XU J. Data modeling of BIM-based low-carbon management in construction progress[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [12] 付延冰, 刘恒斌, 张素芬. 高速铁路生命周期碳排放计算方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 140-144.
- FU Y B, LIU H B, ZHANG S F. Calculation method for carbon dioxide emission in the life cycle of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 140-144.
- [13] 汪慧颖. 广西高速公路建设期碳排放计算及预测研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- WANG H Y. Study on carbon emission calculation and prediction of Guangxi expressway construction period[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [14] 黄秋兰. 基于LCA的装配式建筑碳排放测算与减排策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- HUANG Q L. Research on carbon emission calculation and emission reduction measures of prefabricated building based on life-cycle assessment[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [15] SEIKH M R, MANDAL U. Interval-valued Fermatean fuzzy Dombi aggregation operators and SWARA based PROMETHEE II method to bio-medical waste management[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 226: 120082.
- [16] SHIH H S, CHANG Y T, CHENG C P. A generalized PROMETHEE III with risk preferences on losses and gains[J]. International Journal of Information and Management Sciences, 2016, 27(2): 117-127.
- [17] ABDELLAOUI M, BLEICHRODT H, PARASCHIV C. Loss aversion under prospect theory: a parameterfree measurement[J]. Management Science, 2007, 53(10): 1659-1674.
- [18] TZENG G H, HUANG J J. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. Boca Raton: CRC press, 2011.
- [19] 潘美萍. 基于LCA的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- PAN M P. The methodology research and application on energy consumption and carbon emissions of highway based on the life cycle assessment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.



第一作者: 杨书生(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为铁路无砟轨道施工组织。E-mail: 63898497@qq.com。



通信作者: 何庆(1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为铁路大数据智能选线与交通运输规划。E-mail: qhe@swjtu.edu.cn。

(责任编辑: 熊玲玲)