

文章编号: 1674—8247(2023)06—0057—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.011

# 基于碳排放的西南地区高速铁路桥梁结构类型及施工工艺对比分析

龚颖 王锴

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**本文基于碳排放视角,选取西南地区重大干线铁路典型桥梁结构为研究对象,通过收集施工阶段清单数据,建模分析不同施工工艺桥梁结构碳排放量,筛选出碳排放贡献度累计超80%的清单数据,对比分析不同施工工艺对典型桥梁结构碳排放量的影响。本文研究丰富了西南地区高速铁路桥梁结构碳排放清单数据库,探索了建立绿色桥梁结构碳排放评价标准,为分析重大干线铁路设计、施工、运维及拆除全生命周期碳排放量,更好实现我国工程建设领域“双碳”目标打下基础。

**关键词:**碳排放;高速铁路桥梁;施工工艺

中图分类号:U44 文献标志码:A

## Comparison Analysis of Bridge Structure and Construction Technology Based on Carbon Emission for High-speed Railways in Southwest Region

GONG Ying WANG Kai

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Focusing on typical bridge structures on the trunk railways in the southwest region from the carbon emission perspective, the paper established the model of carbon emission for different construction technologies and bridge structures based on the list data collected in construction, among which the list data contributing cumulatively over 80% to carbon emission were selected, and the influence of different construction technology on carbon emission of typical bridge structure is analyzed. The results of this study enrich the database of carbon emission from high-speed railway bridge structures in the southwest region, make an exploration on the establishment of green bridge structure carbon emission evaluation standards, and lay the ground for analyzing the full lifecycle carbon emission for the design, construction, operation, and decommissioning of trunk railway, facilitating the better realization of the “double carbon” goals in China’s construction sector.

**Key words:** carbon emission; high-speed railway bridge; construction technology

我国建筑全过程的碳排放总量占全国碳排放的比重达50%以上<sup>[1]</sup>,结合国家发展改革委最新提出的

投资项目开展碳达峰、碳中和分析的相关要求<sup>[2]</sup>,铁路行业迫切需要改变目前在绿色低碳发展方面顶层设

收稿日期:2023-06-07

作者简介:龚颖(1990-),女,工程师。

引文格式:龚颖,王锴.基于碳排放的西南地区高速铁路桥梁结构类型及施工工艺对比分析[J].高速铁路技术,2023,14(6):57-61.

GONG Ying, WANG Kai. Comparison Analysis of Bridge Structure and Construction Technology Based on Carbon Emission for High-speed Railways in Southwest Region [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):57-61.

计不足、技术路线不清、示范应用不强的被动局面。

近年来,我国客运高速铁路为了减少占用耕地、控制路基工后沉降、提高运营期舒适度等<sup>[3]</sup>,多以桥代路。桥梁结构在施工阶段的原料生产、运输、浇筑或架设、废料处理等都将产生大量碳排放。研究高速铁路桥梁碳排放可以深挖设计及施工过程中存在的问题,促进桥梁技术的创新,推动高速铁路绿色低碳发展。

## 1 清单数据确定

桥梁施工是一个多模块、多进程的复杂过程,施工阶段清单数据数量庞大,来源复杂,清单数据收集是碳核查的关键步骤之一,须确保数据收集边界清晰准确,数据条目完整可靠,数据处理方法科学标准。

### 1.1 清单数据范围确定

为不失一般性,选取大、中、小3种跨度下常见的4类桥型共计10座,每种桥型按不同施工工艺选取1~2座符合设计规范<sup>[4]</sup>并具有代表性的施工阶段桥梁(下文桥梁名称以桥梁序号代称)的主梁进行建模计算。

本文选取的10座桥梁均位于西南地区境内,取自设计时速为350 km/h的4个高速铁路项目,分别为西渝、成宜、成渝中线及渝昆高速铁路,10座桥梁结构的基础参数如表1所示,除桥10外,其他均为双索面桥梁。

表1 桥梁结构参数表

跨度	桥梁结构	主梁跨度/m	施工工艺	所属项目	备注
小跨度	简支梁桥	32	预制架设	西渝高速铁路	-
			满堂支架现浇	西渝高速铁路	-
			移动模架现浇	西渝高速铁路	-
中跨度	连续梁桥	72 + 128 + 72	悬臂挂篮	西渝高速铁路	-
		68 + 128 + 68	现浇	渝昆高速铁路	-
	60 + 100 + 60	大节段支架现浇	成宜高速铁路	0号块大节段支架现浇,其余块悬臂挂篮现浇	
	连续刚构桥	84 + 156 + 84	悬臂挂篮	西渝高速铁路	-
		80 + 152 + 80	现浇	渝昆高速铁路	-
大跨度	斜拉桥	106 + 216 + 106	悬臂浇筑	西渝高速铁路	-
		63 + 325 + 63	悬臂拼装	成渝中线高速铁路	车站桥

### 1.2 清单数据源确定

为提供桥梁选型方案比选及优化施工工艺,本文

主要研究桥梁施工阶段碳排放,不考虑设计、运营、维护及拆除阶段。清单数据收集边界包括桥梁结构施工阶段所有能产生碳排放的原料与能源的生产、运输、台班输入。

碳排放根据来源分为3个范围<sup>[5]</sup>,为兼顾清单数据的相关性与全面性,本次收集直接排放范围及间接能源排放范围。清单数据按对应碳排放因子类型分为建筑材料消耗量及能源消耗量两大类。本次研究按桥梁上部结构及下部结构收集了实际施工过程中产生的清单数据300余项,表2仅列举碳排放量输入超过 $10^3$ 的部分清单数据。

表2 主要清单数据表

桥梁结构	消耗类型	清单数据名称
上部结构	材料消耗	带肋钢筋(HRB400) $\phi < 18, \geq 28$ 、普通水泥42.5级(高性能混凝土)、普通水泥52.5级(高性能混凝土)、预应力钢绞线、聚羧酸系减水剂、定型钢模板、悬浇挂篮、粉煤灰、梁部碎石、钢板(Q235-A $\delta = 7 \sim 40$ 、钢箱梁Q345qD(含油漆)、液压爬模、压浆剂(AGM500)、电焊条钢、土工布、钢模板、减水剂
	能源消耗	柴油、电力、混凝土搅拌运输车 $\leq 10 \text{ m}^3$ 、多级离心清水泵 $\leq 155 \text{ m}^3/\text{h} - 150 \text{ m}$ 、爬升式塔式起重机 $\leq 320 \text{ tm}$ 、轴流通风机 $\leq 11 \text{ kW} - 225 \text{ m}^3/\text{min}$ 、汽车起重机 $\leq 25 \text{ t}$
下部结构	材料消耗	普通水泥42.5级(高性能混凝土)、带肋钢筋(HRB400) $\phi 18 \sim 25$ 、护筒 $\leq 2 \text{ m}$ 、带肋钢筋(HRB400) $\phi < 18, \geq 28$ 、碎石40以内(高性能混凝土)、膨润土、焊接钢管、合金刀头、光圆钢筋(HPB300) $\phi \geq 10$ 、角钢Q235-A
	能源消耗	柴油、电力、电动空气压缩机 $\leq 30 \text{ m}^3/\text{min}$ 、离心式泥浆泵 $\leq 280 \text{ m}^3/\text{h} - 26 \text{ m}$ 、单级离心清水泵 $\leq 170 \text{ m}^3/\text{h} - 26 \text{ m}$ 、电动空气压缩机 $\leq 20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、转盘钻孔机 $\leq 80 \text{ kNm}$

一些原始数据需要二次处理达到清单数据标准,此外还需根据数据的可得性,在保证研究结果精度要求范围内,做一些取舍。本次研究重点对以下几类数据进行了二次处理<sup>[6]</sup>:

(1)对可重复利用的材料碳排放已按摊销次数(包含本次损耗)折算,如定型钢模板、悬浇挂篮等。

(2)对碳排放量小且过程数据获取困难的清单数据已进行简化处理,如光电测距仪在桥位放样时由于耗电量非常小,故产生的碳排放量非常少;桥基础开挖永久占地面积相对小、临时占地时间短且后期有复垦措施等,故产生的土壤碳排放量少,以上清单数据的简化处理符合Cut-off原则。

(3)考虑了运输过程碳排放,按实际运距计算了所有建筑材料从工厂运输至施工区域或材料堆放区的运输过程碳排放。电、柴油等清单数据已含施工机械从

制梁场等临时场地至施工区域及土石方从开挖工点至填埋场的运输碳排放,故该部分碳排放不另计。

(4)工人呼吸产生的碳排放视为消耗食物中的碳,该部分清单数据不纳入数据收集范围。

(5)本次未考虑建材废弃回收清单数据。

### 1.3 碳排放因子确定

碳排放因子清单数据主要采用国家或行业标准数据<sup>[7-9]</sup>,无标准数据的采用 CLCD<sup>[10]</sup>等数据库或权威文献中的数据。

需要说明的是,钢筋、混凝土等材料消耗按生产工艺过程计算得到相应碳排放因子,暂不分片区。而电力则不同,受经济发展、能源资源结构和政策等多种因素影响,区域电力比例构成不同。根据国家统计局发布的数据,2021年中国电力构成比例为煤电59%,水电18%,核电6%,其他(风、气、太阳能、生物质能)17%。其中,西南地区电力构成比例为水电68%,煤电22%,其他为可再生能源电力,华北片区电力构成比例为火电73%,水电和风电分别为15%和9%。可见不同区域电力碳排放因子差异巨大,本文电力碳排放因子选取的0.5810 tCO<sub>2</sub>/MWh为全国标准,很可能高于西南区域实际电力碳排放因子,区域电力碳排放因子有待进一步细化研究。

## 2 碳排放模型

### 2.1 建模

本文将桥梁结构施工阶段简化为上、下部结构2个子模块,将生产、运输各过程数据无差别输入。上部

结构包括主梁、桥面铺装、索塔、护栏等,下部结构包括桥墩、墩台及基础,连接及附属结构清单数据按所属上、下部分别输入。在2个子模块中分别输入材料及能源消耗清单数据,各项清单数据乘以相应的碳排放因子,得到子模块的总碳排放量<sup>[11]</sup>。将各子模块总碳相加可得到桥梁结构的总碳排放量。

上部结构子模块主要反映桥型及施工工艺的差别,为本文重点研究的模块。下部结构子模块在高速铁路桥梁中结构与施工工艺差别不大,本文不做详细研究。

### 2.2 计算

总碳排放量计算公式为:

$$E = \sum_{i,j} (M_i \times \lambda_i + P_j \times \eta_j) \quad (1)$$

式中:  $E$ ——总碳排放量(kgCO<sub>2</sub>e);

$i$ ——建筑材料的种类;

$M$ ——建筑材料的耗用量;

$\lambda$ ——建筑材料  $i$  的碳排放因子;

$j$ ——能源种类;

$P$ ——能源的消耗量;

$\eta$ ——能源  $j$  的碳排放因子。

总碳排放量除以跨度得到桥梁结构每延米碳排放量。

## 3 结果分析

### 3.1 总碳排放量对比分析

桥梁结构总碳排放量如表3所示。

表3 桥梁结构总碳排放量表(×10<sup>5</sup> kgCO<sub>2</sub>e)

桥梁结构	小跨度			中跨度				大跨度		
	简支梁桥			连续梁桥			连续刚构桥		斜拉桥	
	桥1	桥2	桥3	桥4	桥5	桥6	桥7	桥8	桥9	桥10
上部结构碳排放量	4.49	4.26	4.75	71.00	67.52	59.97	127.79	301.98	291.04	710.57
下部结构碳排放量	6.13	6.13	6.13	52.17	33.96	26.92	148.02	33.96	274.35	351.02

(1)在小跨度桥梁结构中,桥1、桥2、桥3上部结构碳排放总量排序为桥3>桥1>桥2。通常,预制架设式桥梁施工工艺被认为是一种高质量、高效率的环境友好型桥梁建造工艺,而本文研究发现,在相同跨度及墩高下,预制架设式工艺相较于传统满堂支架现浇,尽管使用更少的钢材、混凝土搅拌机,但由于预制梁在预制过程中需要搭建制梁场(含存梁场),用到预制材料如PVC硬塑管、氯丁橡胶条等,运输及架设过程中使用更重吨位的运输车、起重机及更多的交流弧焊机、铁件等,导致总碳排放量会略高于后者,并非更加“环境友好”。而移动模架现浇工艺由于模架

的抬升、搭建和调整中大面积使用起重机、大功率交流弧焊机等,机器所消耗的油和电造成了更多的碳排放。

(2)在中跨度桥梁结构中,连续梁桥4与连续刚构桥7跨度接近,且都为双索面桥,桥7上部结构总碳排放量与每延米碳排放量分别为桥7的1.8倍与1.5倍,这是由于连续刚构桥墩固结,相同截面及跨度下,材料耗及能耗高于连续梁所致。连续梁常见工艺为悬臂挂篮浇筑,需要缩短工期且地质场地条件允许下采用大节段支架现浇工艺。桥6每延米碳排放量分别为桥4与桥5的1.04倍和1.07倍,这是由于桥6

的0号块在采用大节段支架现浇工艺平整场地及搭建满堂支架时需要用到的配件和机械,如工字钢、槽钢、原木、电动空气压缩机 $\leq 3\text{ m}^3/\text{min}$ 、履带式液压单斗挖掘机 $\leq 2.0\text{ m}^3$ 、立式钻床 $d \leq 50$ 等造成了更多的碳排放。此外,3座连续梁桥总碳排放量呈现随着跨度增大而增加的总体趋势,下一步研究应将上部结构子模块根据时空进程及组成部件拆解为更多的子模块,以进行一步分析桥型与工艺的差异。连续刚构桥中,桥8总碳排放量为桥7的2.36倍,每延米碳排放量为桥7的2.45倍,因为桥8为车站桥,桥7为双索面桥,桥面宽度与承重要求导致建筑材料用量的倍数增多,从而导致总碳排放量的倍数差异。

(3)在大跨度桥梁结构中,桥10上部结构的碳排放量为桥9的2.44倍,每延米碳排放量为桥9的2.32倍。这是由于桥10为钢-混组合梁桥,贡献度最大的清单数据整体节点钢桁梁Q370qE(含油漆)的用量约为桥9的贡献度最大清单数据带肋钢筋(HRB400)的3.24倍,而碳排放因子是后者的0.76倍,累加上其余清单因子的倍数差异造成了总碳的倍数差异。

(4)对于各桥梁下部结构来说,桥墩直观体量越大,总碳排放量越多。

### 3.2 贡献度分析

将清单数据单项碳排放量除以总碳排放量得到清单数据的碳排放量贡献度,将贡献度从高到低逐项累加,筛选出累计贡献度之和大于80%的清单数据项目,如表4所示。

分析最大贡献度清单数据得知,除桥10为钢-混组合梁桥,贡献度最高的为整体节点钢桁梁Q370qE(含油漆)外,其余9座桥贡献度最高的均为带肋钢筋(HRB400) $\phi < 18, \geq 28$ 。桥梁施工阶段所消耗钢材的碳排放的贡献度普遍高于其他清单数据的贡献度,这与桥梁行业中钢材因其自重轻、力学性能好、跨越能力强、可回收等特性,因此比混凝土更为环保的普遍认知不同。我国钢铁制造行业中冶炼铁水和钢水环节需要消耗大量的煤炭、焦炭等燃料,产生大量直接碳排放。生产单位带肋钢筋(HRB400) $\phi < 18, \geq 28$ 碳排放因子为生产单位普通水泥52.5级(高性能混凝土)的3.52倍,为生产单位普通水泥42.5级(高性能混凝土)的3.98倍。

其他贡献度较高的依次为普通水泥52.5级(高性能混凝土)、普通水泥42.5级(高性能混凝土)、预应力钢绞线、定型钢模板、悬浇挂篮、柴油、电力等。而桥10贡献度较高的依次为带肋钢筋(HRB400) $\phi 18 \sim 25$ 、带肋钢筋(HRB400) $\phi < 18, \geq 28$ 、普

通水泥42.5级(高性能混凝土)、电力、钢板Q235-A $\delta = 7 \sim 40$ 、钢箱梁Q345qD(含油漆)、柴油、普通水泥52.5级(高性能混凝土)、液压爬模等。由贡献度排序可知,建材消耗产生的碳排放量普遍远高于能量消耗产生的碳排放量。随着重型机械使用规模的增加,柴油在能耗的总碳排放量中的贡献度可达50%~70%。

### 3.3 研究结论

相同跨度下,不同施工工艺的单座主梁在相同应用情境中,总碳排放量无数量级差别,但如在重大干线重复出现时,在满足工期与概算情况下,则建议考虑采用总碳排放量较小的桥型和工艺。如小跨度在地质条件满足时,采用满堂支架现浇简支梁桥;中等跨度采用悬臂挂篮浇筑连续梁桥;大跨度桥梁减少钢材用量;尽量减小桥梁下部结构体量等。

西南地区高速铁路桥梁普遍采用了高强钢筋及高性能混凝土,从减少建材消耗量的层面减少了碳排放量。除了进一步提高钢筋及混凝土强度,还应该关注施工机械“油改电”、提高制梁场节地技术、增加部分耗材可重复利用次数等工艺改进方向。

## 4 结束语

引导铁路建设上下游产业协同降碳,推动铁路行业向绿色低碳转型升级,本文更多意义在于探索“双碳”在高速铁路桥梁施工中的突出影响。2021年,中国人民银行设立碳减排支持工具,引导金融资源流向绿色低碳产业。此工具主要支持领域包括清洁能源、节能环保和碳减排技术等。然而,占全国碳排放比重高达50%的建筑行业却鲜有涉及,其主要原因就在于其低碳评价标准尚未明确。因此,建立一套科学、标准且操作性强的施工项目人材机碳足迹台账管理系统,做好工程全生命周期的碳核查,早日编制出台相应评价指标,打造节能、环保、低碳的高速铁路项目,争取相应国家低息金融政策支持,是目前的重要发展方向。

## 参考文献:

- [1] 重庆大学. 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
Chongqing University. Research Report of China Building Energy Consumption and Carbon Emissions [R]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [2] 发改投资规[2023]304号,投资项目可行性研究报告编写大纲及说明[S].  
Fa Gai Tou Zi Gui [2023]No. 304, Outline and Instructions for

- Preparation of Feasibility Study Report of Investment Projects [S].
- [3] 周勇政,陈良江,高策. 我国高速铁路桥梁设计技术及探索[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 11-15.  
ZHOU Yongzheng, CHEN Liangjiang, GAO Ce. Design Techniques and Exploration of High-speed Railway Bridges in China [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 11-15.
- [4] 铁建设〔2010〕241号,高速铁路桥涵工程施工技术指南[S].  
Tie Jian She〔2010〕No. 241, Construction Technology Guidelines for High-speed Railway Bridge and Tunnel Projects [S].
- [5] WRI, WBCSD. The Greenhouse Gas Protocol [S].
- [6] BSI, PAS 2050: 2008 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Service [S].
- [7] GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准[S].  
GB/T 51366-2019 Building Carbon Emission Standards [S].
- [8] 环办气候函〔2022〕111号,关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作通知[S].  
Huan Ban Qi Hou Han〔2022〕No. 111, Work Notice Related to Management of Enterprise Greenhouse Gas Emissions Report in 2022 [S].
- [9] T/CECA-G 0219-2023 企业碳达峰行动方案编制指南[S].  
T/CECA-G 0219-2023 Guidance for Compiling Plan of Enterprise Carbon Dioxide Peaking [S].
- [10] 银发〔2021〕96号,绿色债券支持项目目录(2021年版)[S].  
Yin Fa〔2021〕No. 96, Catalogue of Green Bond-supported Projects (2021 Edition) [S].
- [11] 谢毅,肖杰. 高速铁路发展现状及趋势研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 23-26.  
XIE Yi, XIAO Jie. Research on High-speed Railway Development Status and Trend [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 23-26.

(上接第38页)

力,消除故障风险。

四个设计方向:第一,建立健全环境、试验数据,建设有电气化专业特色的观测试验站点基地;第二,深化基础理论研究,建立RAMS指标体系;第三,采用建维一体化的设计方案,合理提高标准,科学优化,优配材料及装备,实现全生命周期设计理念;第四,逐步完善并丰富标准规范和造价体系。

## 参考文献:

- [1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高地震烈度复杂山区接触网抗震设计技术研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2018.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Research on Seismic Design Technology of Catenary System in High Seismic Intensity Complex Mountain Area [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2018.
- [2] 杨佳,陈奋飞,陈可,等. 电气化铁路接触网系统抗震设防策略探讨[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(10): 85-89.  
YANG Jia, CHEN Fenfei, CHEN Ke, et al. Discussion on the Seismic Fortification Strategy for Overhead Contact System in Electrified Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 85-89.
- [3] 中铁二院工程集团有限责任公司. 严寒环境下接触网零部件的适应性研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2018.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Study on Adaptability of Catenary Components in Cold Environment [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2018.
- [4] TB 10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范[S].  
TB 10009-2016 Code for Design of Railway Traction Power Supply [S].
- [5] 陈可,陈奋飞,梁婧文,等. 拉林铁路隧道内接触网腕臂结构研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(S1): 180-181.  
CHEN Ke, Chen Fenfei, Liang Jingwen, et al. Study on Bracket Structure of OCS in Lalin Railway Tunnel [J]. Electric Railway, 2021, 32(S1): 180-181.
- [6] 杨佳. 复杂艰险山区电气化铁路接触网关键技术问题及应对措施[J]. 铁道标准设计, 2021, 64(5): 149-152.  
YANG Jia. Key Technical Problems and Corresponding Solutions of the Overhead Contact System of Electrified Railway in Complicated and Dangerous Mountainous Areas [J]. Railway Standard Design, 2021, 64(5): 149-152.