

城市桥梁全生命周期碳排放研究及减碳策略

谌芳元, 顾民杰, 许树壮

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 城市桥梁作为城市交通基础设施的核心组成部分, 因其单位用材量大、单位碳排放指标高、建设环境位于城市的特点, 有必要对其开展专门的碳排放研究。基于排放因子法和全生命周期评价(Life-Cycle Assessment, LCA)方法, 构建了城市桥梁全生命周期碳排放计算模型。以上海S3沪奉高速公路工程项目(预制装配法)为案例, 计算了其全生命周期的碳排放, 最后根据计算结果提出了尽量延长使用寿命、提高钢材的回收率、应用预制装配技术、在运营养护阶段应用新技术与可再生能源等减碳策略, 为后续城市桥梁项目的低碳设计、施工、运营提供参考意见。

关键词: 城市桥梁; 全生命周期; 排放因子法; 碳排放模型; 减碳策略

中图分类号: U44; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0016-05

Research and Carbon Reduction Strategies on Life-cycle Carbon Emissions of Urban Bridges

CHEN Fangyuan, GU Minjie, XU Shuzhuang

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: As a core part of urban transportation infrastructure, it is necessary to conduct specialized research on the carbon emissions of urban bridges due to their high material consumption, high carbon emission indicators and urban construction environment. A life-cycle carbon emission calculation model is established for urban bridges based on the emission factor method and life-cycle assessment (LCA). Taking the Shanghai S3 Hufeng Expressway Engineering Project (prefabricated assembly method) as an example, the carbon emissions over its entire life cycle are calculated. Finally, based on the calculation results, the carbon reduction strategies are proposed, such as extending the service life as much as possible, improving the recovery rate of steel, applying the prefabricated assembly technology, applying the new technologies and renewable energy during operation and maintenance, providing reference for the low-carbon design, construction and operation of follow-up urban bridge projects.

Keywords: urban bridge; life cycle; emission factor method; carbon emission model; carbon reduction strategies

0 引言

据IPCC统计, 土木工程行业已成为全球温室气体主要排放源之一^[1]。桥梁作为一种高能耗、高碳排放和高资源消耗的交通基础设施, 是土木工程行业碳排放的重要来源。

在碳排放研究领域, 建筑业已建立一套基于国际主流的排放因子法^[2]和全生命周期评价(Life-Cycle Assessment, LCA)方法^[3]的碳排放计算基本框架, 并将其纳入国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB 51366-2019)^[4]中, 目前公路领域发布的标准^[5-6]也基本沿用了这一基本框架。一方面, 桥梁结构单

位用材量大、单位碳排放指标高, 建设环境、设计、施工和运维与建筑结构有很大的差异; 另一方面, 在城市桥梁建设中, 需要考虑节约用地、地面辅道的交通组织以及施工期间交通影响, 这些因素都会对城市桥梁的碳排放产生较大影响, 因此, 有必要对城市桥梁工程开展专门的碳排放研究。

碳排放的量化是进行碳排放研究的基础。目前桥梁领域碳排放研究主要集中在计算生命周期各阶段、各消耗建材、各结构构件的碳排放占比, 研究结果表明: 桥梁结构在材料生产与运营养护这2个阶段的碳排放占全生命周期碳排放总量的90%以上。同时研究结果^[7-8]表明: 钢材的回收率(Steel Recovery Rate, SRR)对材料生产阶段的碳排放有很大影响, 甚至会导致完全相反的对比结论。

桥梁施工阶段的活动数据(Activity Data, AD)涉

收稿日期: 2025-11-13

作者简介: 谌芳元(1993—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

及因素众多且复杂,且不同的施工工艺之间 AD 清单差异很大。建筑业现行规范^[4]仅考虑运输、施工机械的碳排放,可能导致城市桥梁施工阶段碳排放被系统性低估。

桥梁运营养护阶段的碳排放与建筑差异最大,除了考虑桥梁附属构件维修更换的方式和频率^[9],还需要考虑桥梁运营期间车辆交通产生的碳排放。

综上,基于排放因子法和全生命周期评价方法,建立城市桥梁全生命周期碳排放计算模型,对城市桥梁全生命周期碳排放进行量化计算,并根据计算结果提出了针对性的减碳策略,为后续城市桥梁项目的低碳设计、施工、运营提供参考意见。

1 建立碳排放计算模型

1.1 确定计算范围

土木工程中主要包括 CO₂, CH₄, N₂O 这 3 种温室气体。不同温室气体之间通过以 CO₂ 辐射强度为依据的通用换算方法表示变暖影响的程度,即全球变暖潜势 (GWP)。表 1 为温室气体全球变暖潜数值^[6]。

表 1 温室气体的当量因子潜力值

温室气体	全球变暖潜势 CO ₂ -eq/kgCO ₂ ·kg ⁻¹
CO ₂	1.0
CH ₄	25.0
N ₂ O	298.0

1.2 确定计算边界

基于 LCA 框架进行碳排放计算时,要注意计算边界的完整性和统一性。对于城市桥梁工程,其全生命周期可以分为材料生产、建造施工、运营养护和拆除 4 个阶段。确定计算边界对生命周期评估的深度、广度以及可行性有重要影响,拟定计算边界如下:

(1)材料生产阶段:主要考虑使用如水泥、钢材、沥青、砂石等建筑材料的碳排放。

(2)建造施工阶段:考虑相关运输、施工机械等使用过程中消耗的能源产生的碳排放,现场搅拌的混凝土和砂浆、现场制作的构件产生的碳排放,预制场消耗的能源产生的碳排放、模板及现场支架消耗产生的碳排放,现场人力产生的碳排放以及交通堵塞、中断或绕行引起汽车尾气排放。

(3)运营养护阶段:在桥梁 100 年使用寿命期间,考虑照明、监控系统的碳排放量,桥梁结构与附属构件的养护与更换造成的碳排放量,行驶于桥梁上的车辆交通产生的碳排放。

(4)拆除阶段:主要考虑拆除时相关运输、施工机械等使用过程中消耗的能源产生的碳排放。

1.3 建立计算模型

排放因子法是指物质的碳排放因子与活动数据的乘积,IPCC 提供的碳核算基本方程为:温室气体排放=活动数据 (AD)×排放因子 (EF)。

1.3.1 材料生产阶段

主要考虑使用如水泥、钢材、沥青、砂石等建筑材料的碳排放。根据碳排放因子法,材料生产阶段的碳排放模型为:

$$C_{CO_2-sc} = \sum_i \left[M_i \times \left(\sum_j \lambda_{j,i} \times GWP_j \right) \right]$$

式中: M_i 为建筑材料的耗用量; i 为建筑材料的种类; $\lambda_{j,i}$ 为建筑材料 i 温室气体 j 的排放因子; GWP_j 为温室气体 j 的全球变暖潜势。

1.3.2 建造施工阶段

考虑相关运输与施工机械等使用过程中消耗的能源、预制场消耗的能源、现场人力消耗的能源产生的碳排放,根据碳排放因子法得到的碳排放模型为:

$$C_{CO_2-ys} = \sum_{mn} \left[T_{mn} \times \left(\sum_j \lambda_{j,mn} \times GWP_j \right) \right]$$
$$C_{CO_2-sg} = \sum_a \left[E_a \times \left(\sum_j \lambda_{j,a} \times GWP_j \right) \right] + P \times \eta$$

式中: T 为交通运输的能源消耗量 (统计施工过程所有运输活动); m 为车辆类型; n 为车辆所用能源类型; $\lambda_{j,mn}$ 为车辆 m 所用燃烧源 n 的温室气体 j 的排放因子; E_a 为施工设备的能源消耗量, kg; a 为燃料类别; $\lambda_{j,a}$ 为燃料 a 温室气体 j 的排放因子; P 为耗电量, kW·h; η 为电力平均碳排放系数, kgCO₂-eq/kW·h。

考虑现场搅拌的混凝土和砂浆、现场制作的构件和部品、模板及现场支架消耗产生的碳排放,碳排放模型与材料生产阶段一致。

考虑由于施工引起交通堵塞、中断或绕行产生的汽车尾气排放,根据文献^[10],基于碳排放因子法建立的碳排放模型为:

$$C_{CO_2-jt} = n \times t \times \left(\sum_j \lambda_j \times GWP_j \right)$$

式中: n 为施工占用车道数; t 为车道占用天数; λ_j 为占用单根车道引起交通堵塞、中断或绕行产生的日碳排放量增量; GWP_j 为温室气体 j 的全球变暖潜势。

1.3.3 运营养护阶段

桥梁运营养护阶段的碳排放主要来源于三部

分,其一是在桥梁运营期,照明、监控、电梯系统产生的碳排放,考虑可再生能源,根据碳排放因子法建立的碳排放模型为:

$$C_{CO_2-yy} = \left\{ \sum_a \left[E_a \times \left(\sum_j \lambda_{j,a} \times GWP_j \right) \right] + P \times \eta \right\} \times Y$$
$$E_a = \sum_{k=1}^n E_{a,k} - R_{a,k}$$

式中: E_a 为运营设备的能源年消耗量,kg; a 为燃料类别; $E_{a,k}$ 为运营设备 k 第 a 类能源的年消耗量,kg; $R_{a,k}$ 为运营设备 k 由可再生能源系统提供的第 a 类能源的年消耗量,kg; P 为耗电量,kW·h; η 为电力平均碳排放系数,kgCO₂-eq/kW·h; Y 为桥梁使用寿命,按100年计。

其二是在维修养护过程中桥梁结构与附属构件的养护与更换造成的碳排放量,此过程的碳排放模型与材料生产阶段、建造施工阶段模型一致。

其三是行驶于桥梁上的车辆交通产生的碳排放,结合给定的交通量资料,计算不同类型车辆交通在桥梁使用寿命期间产生的碳排放,碳排放模型为:

$$C_{CO_2-cl} = \sum_k \left\{ \left[\sum_y AADT (1 + \omega)^y + AADT_y (Y - y) \right] \times \left(\sum_j \lambda_{j,k} \times GWP_j \right) \right\} \times L$$

式中: $AADT$ 为竣工年的年平均日交通量,辆/d; ω 为预计交通量增长率,%; y 为桥梁交通量预测年限,年; $AADT_y$ 为预测的第 y 年的年平均日交通量,辆/d; k 为交通车辆的种类; L 为桥梁长度,km。

1.3.4 拆除阶段

主要考虑拆除时相关运输、施工机械等消耗的能源产生的碳排放,此过程的碳排放模型与建造施工阶段模型一致。

1.4 清单分析

根据生命周期的各个阶段建立适用于桥梁工程的清单分析数据,清单分析应注意碳排放计算输入数据的全面性和合理性。

1.4.1 能源碳排放因子

城市桥梁全生命周期消耗的化石能源主要有汽油和柴油,碳排放因子分别为汽油 2.93 kgCO₂/kg,柴油 3.1 kgCO₂/kg。电力由化石燃料或其他燃料源转化而来,根据不同电源结构在我国的分布,我国电力平均碳排放因子为 1.062 kgCO₂-eq/kW·h^[11]。

运营阶段桥上车辆交通流量产生的碳排放以能源为基础,需对不同类型车辆的流量以及对应公里能源消耗量进行调查统计,表2列出了不同车辆类型的碳排放因子。

表2 不同车型的碳排放因子

建材	CO ₂ 排放因子/kgCO ₂ ·km ⁻¹
轿车	0.22
中型货车	0.54
重型货车	0.75
新能源汽车	0.15

1.4.2 材料碳排放因子

桥梁工程的建材碳排放绝大部分来自水泥和钢材,钢材的回收率(SRR)对碳排放计算结果有决定性影响,需尽量符合实际。

水泥生产过程中产生的二氧化碳主要来自燃料的燃烧以及熟料形成阶段。桥梁常用P.I.42.5等级水泥的碳排放因子为 1.12 kgCO₂/kg。

钢材生产的碳排放主要集中在炼铁以前的工序上,SSR=0时,碳排放因子^[6]见表3。

表3 钢材生产的碳排放因子

建材	CO ₂ 排放因子/kgCO ₂ ·kg ⁻¹
大型钢材	2.05
钢筋	2.34
预应力钢绞线	2.34

运营养护阶段需要维修更换的结构构件和对应的碳排放因子见表4,维修更换次数应查询实际的养护维修方案。根据相应的建材碳排放因子,得到桥梁各维修更换构件的碳排放因子见表4。

表4 附属构件生产的CO2排放量

建材	单位	CO ₂ 排放/kgCO ₂ ·单位 ⁻¹
橡胶支座	个	317.95
伸缩缝	m	119.2
沥青铺装	m ³	0.316
混凝土护栏	m	305.4
铸铁泄水孔	个	120.7

2 全生命周期碳排放案例计算

选取S3沪奉高速公路工程项目K16+433.900至K18+446.900段主线高架桥梁进行全生命周期碳排放计算。该段主线高架桥梁采用高速公路标准,全长2.013 km,设计速度为100 km/h,双向8车道规模。上部结构采用预应力混凝土连续小箱梁(59 136 m²)或简支组合梁(5 280 m²),下部结构为大挑臂盖梁双柱墩。墩高为12~18 m,基础采用1.0 m钻孔灌注桩。桥宽32.0 m。上部结构以及立柱盖梁均采用预制装配法施工,承台采用现浇施工。

该段桥梁全生命周期碳排放计算结果见表5,表5中对桥梁工程主要建筑材料和能源消耗类型进行计算分析,数据来自预制拼装项目现场调研数据和施工图纸。运营养护阶段按桥梁100年使用寿命计算,附属构件中混凝土护栏耐久性较好,按100年更换一次考虑,其余附属构件按15年更换一次考虑。该段桥梁目前仍在运营期,拆除阶段消耗资源数据根据已有拆除案例估算。

表5 桥梁全生命周期碳排放计算结果

阶段	消耗类型	工程量	CO ₂ 排放/t	合计/t
材料生产阶段	钢筋(综合)/kg	13 639 120	31 916	90 872
	钢材/kg	3 144 768	6 447	
	水泥 425/kg	40 489 588	45 348	
	中粗砂/m ³	40 514	219	
	碎石 5~40 mm/m ³	79 894	256	
	预应力钢绞线/kg	1 774 080	4 151	
	片石/m ³	16 063	0	
	橡胶支座/个	1 286	409	
	伸缩缝/m	2 208	263	
	沥青/m ³	6 442	2	
建造施工阶段	混凝土护栏/m	6 039	1844	4 805
	铸铁泄水孔/个	146	18	
	C20 混凝土/kg	581	130	
	模板/kg	3 118	4	
	支架/kg	5 189	7	
	汽油/kg	277 626	861	
	柴油/kg	17 278	51	
	电/kW·h	1 884 168	2 001	
	施工交通影响/车道·d	14 60	1 752	
	橡胶支座/个	7 716	2 453	
运营养护阶段	伸缩缝/m	13 248	1 579	306 733
	沥青/m ³	38 650	12	
	混凝土护栏/m	6 039	1 844	
	铸铁泄水孔/个	876	106	
	汽油/kg	5 553	17	
	柴油/kg	432	1	
	施工交通影响/车道·d	180	216	
	电/kW·h	14 694 900	15 606	
	交通车辆/辆·km·d	1 102 117 500	284 897	
	汽油/kg	30 539	95	
拆除阶段	柴油/kg	1 901	6	320
	电/kW·h	207 258	220	
	合计			402 731

由表5可知,在桥梁100年使用寿命期间,运营养护阶段若考虑交通车辆产生的碳排放量,则运营养护阶段碳排放量在全生命周期碳排放量的占比最

大,达到76%;材料生产阶段在全生命周期碳排放量的占比为23%,其中水泥碳排放量最大,其次是钢筋,水泥与钢筋的碳排放量占材料生产阶段碳排放总量的85%;建造施工阶段与拆除阶段产生的碳排放较小,仅占全生命周期碳排放量的1%。

按照桥梁100年使用寿命计算,虽然材料生产阶段、建造施工阶段的碳排放量比运营养护阶段少,但值得注意的是运营养护阶段计算周期为100年,而材料生产阶段、建造施工阶段的碳排放集中在项目全生命周期的前期。本项目材料生产、建造施工阶段均按1年计,年均碳排放强度分别为:材料生产阶段90 872 t/年、建造施工阶段4 805 t/年、运营养护阶段3 067 t/年,材料生产、建造施工阶段年均碳排放强度均高于运营养护阶段。因此针对上述3个阶段的减碳措施,对全生命周期碳排放的减少至关重要。

若考虑钢材的回收,根据已有文献^[12]的统计,钢材回收系数取80%,钢筋回收系数取40%,计算本项目在材料生产阶段主要消耗材料的碳排放量,计算结果见表6。

表6 桥梁材料生产阶段考虑钢材回收的碳排放计算结果

阶段	消耗类型	工程量	CO ₂ 排放/t	合计/t
材料生产阶段	钢筋(综合)/kg	13 639 120	24 256	79 122
	钢材/kg	3 144 768	3 352	
	水泥 425/kg	40 489 588	45 348	
	中粗砂/m ³	40 514	219	
	碎石 5~40 mm/m ³	79 894	256	
	预应力钢绞线/kg	1 774 080	3 155	
	片石/m ³	16 063	0	
	橡胶支座/个	1 286	409	
	伸缩缝/m	2 208	263	
	沥青/m ³	6 442	2	
运营养护阶段	混凝土护栏/m	6 039	1 844	
	铸铁泄水孔/个	146	18	
	合计			

由表6可知,若考虑钢材的回收,材料生产阶段主要消耗材料的碳排放量可减少11 750 t,约减少13%,本项目组合梁结构占比只有8%,考虑钢材回收后的减碳效果非常可观。

本项目若采用满堂支架现浇法施工,参照已有满堂支架现浇施工案例,估算本项目在施工阶段主要消耗材料以及交通堵塞或中断引起汽车尾气排放的碳排放量,计算结果见表7。

由表7可知,若本项目采用满堂支架现浇法施工,建造施工阶段的碳排放量增加6 408 t,预制装配法施工比满堂支架现浇法可减少约58%的碳排放量,碳排放差别来源于:满堂支架法需要对地面做硬

表7 桥梁建造施工阶段采用满堂支架现浇法的碳排放计算结果

阶段	消耗类型	工程量	CO ₂ 排放/t	合计/t
建造施工阶段	C20混凝土/kg	26 421	5 892	11 073
	模板/kg	148 459	205	
	支架/kg	225 624	312	
	汽油/kg	277 626	861	
	柴油/kg	17 278	51	
	电/kW·h	1 884 168	2 001	
	施工交通影响/车道·d	1 460	1 752	

化处理,需要消耗大量的混凝土材料;支架搭设需要消耗大量的钢支架和钢模板;工期最长,占地最大,对交通影响最大。因此,用预制拼装法施工减碳效果非常显著。

3 城市桥梁减碳策略

基于上述对城市桥梁全生命周期碳排放量的计算,分析总结出以下减碳策略:

- (1)尽量延长桥梁使用寿命
- 在桥梁100年使用寿命期间,通过尽可能延长桥梁结构使用寿命,将材料生产阶段产生的碳排放平摊至每年,可有效降低年均碳排放值。纤维混凝土不但可以减少水泥用量,直接减少碳排放量,而且强度高,抗裂性、耐久性好,结构使用寿命较长,间接减少碳排放量。
- (2)提高钢材的回收率,从源头上降低碳排放
- 通过提高钢材的回收率,既可以减少建筑垃圾运输、处理等方面的碳排放,又可以通过建筑材料的回收利用,从源头上降低材料生产阶段的碳排放。
- (3)施工中应用预制装配技术
- 相比传统满堂支架法,采用预制装配技术在施工过程中可节约大量资源消耗,且工期短,占地小,对周边环境、交通影响也小。同时,预制装配技术可以有效保障桥梁构建的施工质量,有利于结构轻量化,从源头上降低碳排放。
- (4)采用新技术、可再生能源降低运营养护阶段碳排放

城市桥梁运营养护阶段的碳排放在全生命周期中占比最高,尤其交通车辆产生的碳排放,该阶段最具备减少碳排放的潜力。近年来,新能源汽车、光电技术等已经得到了广泛应用,可以有效减少运营养护阶段的碳排放。

4 结 语

基于排放因子法和全生命周期评价方法,建立桥梁全生命周期碳排放计算模型,并以上海S3沪奉高速公路工程项目(预制装配法)为案例,计算了其全生命周期的碳排放,得出以下结论:

- (1)在桥梁100年使用寿命期间,本项目运营养护阶段产生的碳排放量在全生命周期碳排放量的占比最大,达到76%;材料生产阶段在全生命周期碳排放量的占比为23%。虽然材料生产阶段、建造施工阶段的总碳排放量比运营养护阶段少,但是其年均碳排放强度均高于运营养护阶段。
- (2)本项目若考虑钢材的回收,材料生产阶段主要消耗材料的碳排放量可减少约13%;采用预制装配法施工比满堂支架现浇法施工可减少约58%的碳排放量,减碳效果非常显著。
- (3)针对城市桥梁项目的特点,提出了尽量延长使用寿命、提高钢材的回收率、应用预制装配技术、在运营养护阶段应用新技术与可再生能源等减碳策略。

参考文献:

[1] Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report[R].2023.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013:The Physical Science Basis[R].New York: Cambridge University Press, 2013.

[3] International Organization for Standardization. Environmental management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment. ISO 14042: 2000[S].Geneva: ISO,2000.

[4] GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S].

[5] DB15/T 2882—2023 公路基础设施建设碳排放核算规程[S].

[6] TJG/T B0403.1—2025 公路工程碳排放核算标准[S].

[7] 徐双.不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D].武汉:武汉理工大学,2025.

[8] Du G L, Karoumi R. Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs[J].Structure & Infrastructure Engineering, 2013, 9(11): 1149–1160.

[9] Sun X Y, Dai J G, Wang H L, et al. Decision Support System for Optimizing the Maintenance of RC Girder Bridge Superstructures in Consideration of the Carbon Footprint[J].Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(12): 04015022.

[10] 刘圆圆.基于ALCA的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D].西安:长安大学,2025.

[11] 刘沐宇,欧阳丹.桥梁工程生命周期碳排放计算方法[J].土木建筑与环境工程,2011(增刊1): 125–129.

[12] 李兵.低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D].武汉:华中科技大学,2012.