

基于NSGA-II算法的桥梁拆除方案多目标优化

彭展生¹, 李勇泉¹, 彭石², 彭建新^{2*}

¹广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州

²长沙理工大学, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

针对既有桥梁拆除过程中经济成本、碳排放与施工安全难以协同优化的问题, 提出一种基于NSGA-II算法的桥梁拆除方案多目标优化方法。构建以桥梁拆除总成本、碳排放量和综合风险指数为目标函数、以拆除全过程最小可靠度指标为安全约束的多目标优化模型, 采用NSGA-II算法进行求解, 获得满足安全底线的Pareto最优解集。以一座带挂梁预应力T构桥为工程对象, 对钢筋混凝土结构采取切割、人工/机械及静态爆破拆除三类方案进行优化比较。结果表明: 成本、碳排放与风险之间存在显著冲突, 难以通过单一方案同时实现最优; 在可靠度约束条件下, 钢筋混凝土切割拆除更易形成低风险、成本可控、碳排放适中的可行解带。推荐方案总成本为176.22万元, 碳排放为128.48 tCO₂, 综合风险指数为4.9, 最小可靠度指标为4.21, 满足安全控制要求。该方法可为桥梁拆除方案比选提供量化、可比和可追溯的决策依据。

关键词

桥梁拆除, NSGA-II, 多目标优化, 施工风险, 碳排放

Multi-Objective Optimization of Bridge Demolition Plan Based on the NSGA-II Algorithm

Zhansheng Peng¹, Yongquan Li¹, Shi Peng², Jianxin Peng^{2*}

¹Guangdong Road and Bridge Construction Development Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: May 26, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 彭展生, 李勇泉, 彭石, 彭建新. 基于NSGA-II算法的桥梁拆除方案多目标优化[J]. 建模与仿真, 2026, 15(6): 114-127. DOI: 10.12677/mos.2026.156098

Abstract

To address the difficulty of synergistically optimizing economic cost, carbon emissions, and construction safety during the demolition of existing bridges, a multi-objective optimization method for bridge demolition schemes based on the NSGA-II algorithm is proposed. A multi-objective optimization model is established, incorporating total cost, carbon emissions, and a comprehensive risk index as objective functions, and employing the minimum reliability index throughout the demolition process as a safety constraint. The model is solved using NSGA-II to obtain a Pareto optimal solution set that satisfies the safety requirements. Taking a prestressed T-frame bridge with suspended spans as a case study, three types of demolition schemes—reinforced concrete cutting demolition, manual/mechanical demolition, and static blasting demolition—are optimized and compared. The results indicate significant trade-offs among cost, carbon emissions, and risk, making it impossible to achieve optimality simultaneously with any single scheme. Under the reliability constraints, the reinforced concrete cutting demolition method is more likely to yield a feasible solution zone characterized by low risk, controllable cost, and moderate carbon emissions. The recommended scheme has a total cost of 1.7622 million yuan, carbon emissions of 128.48 tCO₂, a comprehensive risk index of 4.9, and a minimum reliability index of 4.21, all meeting safety control requirements. This method can provide a quantitative, comparable, and traceable decision-making basis for the comparison and selection of bridge demolition schemes.

Keywords

Bridge Demolition, NSGA-II, Multi-Objective Optimization, Construction Risk, Carbon Emissions

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着既有桥梁服役年限不断增长, 结构病害持续累积, 且交通功能提升与城市更新需求日益增强, 越来越多桥梁逐步进入“服役 - 拆除 - 更新”的工程阶段。与新建桥梁施工相比, 桥梁拆除工程具有更强的不确定性和更高的风险性, 其实施过程不仅涉及结构体系逐步削弱、荷载传递路径重构及局部受力状态突变, 还受到交通组织、施工场地条件、周边环境敏感性及废弃物处置方式等多因素共同影响。因此, 桥梁拆除方案比选已不再局限于传统的工期与造价控制, 而是逐渐发展为兼顾经济性、环境影响和安全考量的多目标综合决策问题。

国外关于桥梁拆除与多目标优化的研究起步较早。比如, Miettinen [1]系统阐述了多目标优化问题的基本理论、求解机制及权衡原则, 为工程领域中冲突目标的协同优化提供了重要理论支撑。随后, Deb 等提出的 NSGA-II 算法通过非支配排序和拥挤距离机制, 有效提升了多目标优化中解集搜索效率与分布均匀性, 使复杂工程问题能够以 Pareto 前沿形式输出一组非劣解, 为成本、环境与安全等多目标协同优化奠定了算法基础[2]。在此基础上, SPEA2 等改进型多目标演化算法进一步强化了精英保留机制及种群分布能力, 提高了复杂优化问题的求解质量[3]。这一阶段的研究表明, 多目标优化理论的发展为桥梁拆除方案从“单一指标优选”走向“多目标协同权衡”提供了方法保障。

在桥梁工程全寿命管理层面, TRB/NCHRP 提出了较为系统的寿命周期费用分析框架, 将建设、运营养

护、交通延误、更换以及处置等成本统一纳入分析期内进行评价，为拆除活动进入桥梁全寿命成本分析提供了标准化路径[4] [5]。Frangopol 等进一步指出，桥梁寿命周期评价不能仅局限于经济成本，还应同时考虑结构可靠性与失效风险后果，从而推动“安全 - 可靠度 - 费用”耦合分析方法的发展[6]。由此可见，国外研究已逐步将桥梁拆除从单纯施工问题扩展至全寿命周期决策范畴，并强调在可靠性约束下综合统筹经济性目标。

随着桥梁工程可持续发展理念的发展，桥梁管养决策研究进一步向可持续发展方向快速拓展，不少学者做了很有意思的尝试。Du 等基于生命周期评价(LCA)思想构建桥梁方案决策支持框架，使拆除、回收及再利用路径的环境影响能够通过情景模拟进行量化[7]。Penadés-Plà 等对桥梁可持续评估中的多准则决策方法进行了系统梳理，指出桥梁方案比选应将资源消耗、碳排放和安全需求纳入统一指标体系，通过多准则排序与择优实现离散方案决策[8]。Navarro 等则从生命周期可持续性评价(LCSA)角度指出，桥梁拆除阶段的材料回收率、运输距离及再生利用路径将显著影响桥梁全寿命环境绩效，这些因素应作为方案设计阶段的重要决策变量，而非仅作为事后核算内容[9]。另外，面向退役建(构)筑物与拆除废弃物管理的研究也不断强化循环经济导向。Quechelle 等[10]和 Aidonis [11]研究表明，生命周期末端不同处置路径在经济与环境目标之间往往存在显著冲突，需通过多目标优化方法获取 Pareto 解集以支撑决策；Nikmehr 等则指出，BIM 技术能够为拆除阶段材料回收、运输和处置过程的数字化管理与量化决策提供有力支撑[12]。这一阶段的研究表明，国外桥梁拆除研究已由单纯关注施工可行性逐步扩展至环境绩效与资源循环利用，并形成了“经济 - 环境 - 社会”协同评价的基本思路。

相较而言，国内关于桥梁拆除方案比选总体上仍以方案评审与风险分级控制为主。早期研究多借鉴灰色关联分析、层次分析法及模糊综合评价等方法开展桥梁施工组织或方案评审。蔡雪峰等将灰色关联方法应用于桥梁施工组织设计评审，构建了“指标体系 - 关联分析 - 排序择优”的基本框架，为后续拆除方案多指标评价提供了方法参考[13]。随着既有桥梁改造需求增大，研究对象逐步由新建施工方案扩展至旧桥改造与处置路径选择。杨永清等[14]针对桥梁加固方案提出不确定 AHP 与模糊综合评价模型，强调权重主观性及不确定性处理对评价结果具有重要影响，这对拆除方案中安全风险权重的确定具有借鉴意义。邢健[15]在预应力 T 构旧桥改造研究中比较了“全拆重建”与“部分拆除 + 拼宽加固”等不同方案，体现出国内工程实践已开始采用多指标方法对桥梁处置路径进行综合比选。

总体而言，国外在桥梁拆除研究中已逐步形成“寿命周期分析 - 多目标优化 - 数字孪生 - 循环经济”相结合的系统研究路径，研究内容由离散方案评价不断拓展至面向连续决策变量的 Pareto 优化与动态决策；而国内研究目前仍主要集中于有限候选方案的综合评价与拆除风险等级控制，在连续变量优化、环境绩效量化、资源循环利用路径建模及数字化协同决策等方面仍相对薄弱。因而，面向桥梁拆除工程中分段长度、设备组合、施工顺序、材料回收率及运输组织等关键变量，开展经济性、环境性与安全性协同约束下的多目标优化研究，具有明显的理论意义与工程应用价值。

本研究以某带挂梁的预应力 T 构桥拆除决策问题为依托，针对三种不同桥梁拆除方案，构建了“可靠度目标 + 成本、碳排、风险多目标优化”的系统框架。基于拆除阶段关键工况集定义拆除全过程最小可靠度指标作为约束条件，然后分别建立全费用成本模型、碳排模型以及风险模型，构建拆除方案决策的三目标优化模型，采用 NSGA-II 在可行域内输出 Pareto 可行解集，并揭示三目标冲突结构与不同拆除方式的解集差异，在此基础上引入安全优先筛选进行二次权衡，确定最终的拆除方案，并提出参数化控制与监测反馈闭环建议，可为类似城市环境旧桥拆除提供参考依据。

2. 多目标决策理论基础与优化方法

2.1. 多目标优化基本理论

桥梁拆除方案优化属于典型的多目标优化问题，其一般形式可表示为：

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)] x \in \Omega \quad (1)$$

其中 x 为决策变量向量, Ω 为可行域(包含变量边界及约束集合), M 为目标个数。工程问题中目标往往相互冲突, 通常不存在同时使所有目标最小的单一解, 而是形成一组折中解集合。

若解 x^a 对所有目标均不劣于 x^b , 且至少一个目标严格优于 x^b , 则称 x^a 支配 x^b 。不被任何其它可行解支配的解构成 Pareto 最优解集, 其在目标空间中的映射形成 Pareto 前沿(Pareto Front)。对于桥梁拆除问题, Pareto 前沿可用于反映成本、碳排和风险之间的权衡关系, 为后续工程决策提供可比选方案。

2.2. NSGA-II 算法原理

NSGA-II 是在遗传算法框架基础上发展起来的经典多目标进化算法。其核心思想在于通过快速非支配排序实现解集的优劣分层, 通过拥挤距离维持解集在 Pareto 前沿上的分布多样性, 并利用精英保留策略防止优良个体在遗传操作过程中丢失, 从而在“收敛性”与“分布性”之间取得较好平衡。

NSGA-II 的典型求解流程为: 初始化父代 $P_t \rightarrow$ 非支配排序与拥挤距离计算 \rightarrow 选择/交叉/变异得到子代 $Q_t \rightarrow$ 合并 $R_t = P_t \cup Q_t \rightarrow$ 再次排序并截断形成下一代 P_{t+1} 。其中, 父代和子代的合并过程保证了历史优良个体能够被保留, 使算法具有较好的稳定性和重复性。

NSGA-II 典型迭代流程图如下图 1 所示:

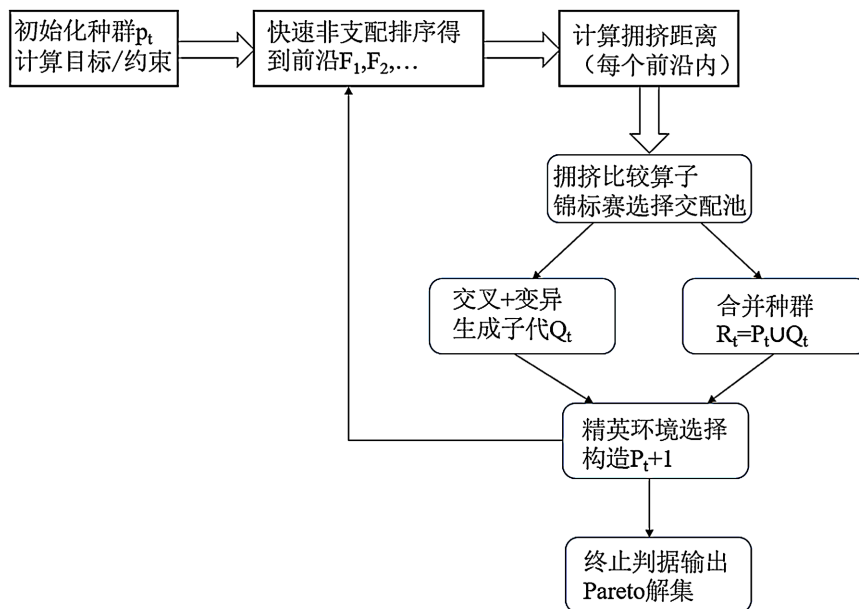


Figure 1. Typical iterative flowchart of NSGA-II
图 1. NSGA-II 典型迭代流程图

2.3. 桥梁拆除方案多目标优化模型

为将拆除方案转化为可计算问题, 建立如下参数化决策变量体系:

$$X = [m, l_{\text{seg}}, s_{\text{sup}}, n_{\text{cr}}, n_{\text{face}}, g_{\text{traf}}] \quad (2)$$

其中, m 为拆除方式(1. 混凝土切割拆除; 2. 人工、机械拆除; 3. 静态爆破拆除), l_{seg} 为分块长度, s_{sup} 为临支间距, n_{cr} 为起重冗余, n_{face} 为作业面数量, g_{traf} 为交通组织方式(1. 全封闭; 2. 半幅封闭; 3. 夜间 + 半幅封闭)。上述变量共同决定拆除过程中卸载路径、临时受力体系与施工组织模式。

(1) 成本目标

总成本 $f_1(x)$ 由直接施工费、临时工程费、运输处置费、间接费及固定组织费用组成，可表示为：

$$f_1(X) = C_{dir}(X) + C_{tmp}(X) + C_{haul}(X) + C_{disp}(X) + C_{ind}(X) + C_{fix} \quad (3)$$

其中： C_{dir} 包括切割、破碎、裂解作业与配套吊装台班、人工； C_{tmp} 包括临支、围蔽、监测点布设、防护与导改设施； C_{haul} 与 C_{disp} 分别为弃料外运与处置； C_{ind} 为间接费(可用“管理费 x 工期”表征)； C_{fix} 为审批、方案论证、交通协同等固定费用。

其中，直接施工费可具体表示为：

$$C_{dir}(X) = Q_{cut}(m, l_{seg})p_{cut} + Q_{break}(m, l_{seg})p_{break} + N_{lift}(l_{seg})p_{lift}(n_{cr}) + T_{lab}(m, n_{face})p_{lab} \quad (4)$$

式中， Q_{cut} 、 Q_{break} ：分别为切割和破碎工程量，主要由拆除方式 m 和分块长度 l_{seg} 决定； p_{cut} 表示单位切割工程量费用； p_{break} 表示单位破碎工程量费用； N_{lift} 为吊装次数，分块越小，吊装次数通常越多； $p_{lift}(n_{cr})$ 表示起重冗余 n_{cr} 提高后所对应的吊装设备费用； T_{lab} 为人工投入时间，受拆除方式 m 和作业面数量 n_{face} 影响； p_{lab} 表示单位人工费用。

临时工程费可表示为：

$$C_{tmp}(X) = N_{sup}(s_{sup})p_{sup} + C_{encl}(g_{traf}) + C_{mon}(s_{sup}, m) \quad (5)$$

其中， $N_{sup}(s_{sup})$ 为临时支撑数量，临支间距 s_{sup} 越小，支撑数量越多，临时工程费越高； $C_{encl}(g_{traf})$ 表示不同交通组织方式下的围蔽、导改和防护费用； C_{mon} 为监测布设费用，受拆除方式和临支布置影响。

运输处置费可写为：

$$C_{haul}(X) + C_{disp}(X) = N_{truck}(l_{seg}, g_{traf})p_{haul} + Q_{waste}(m)p_{disp} \quad (6)$$

其中，分块长度 l_{seg} 决定弃料块数和运输批次，交通组织方式 g_{traf} 影响运输效率；拆除方式 m 则影响废弃物形态和处置单价。

间接费可表示为：

$$C_{ind}(X) = T(X) \cdot p_{ind} \quad (7)$$

其中施工总工期 $T(X)$ 可进一步表示为：

$$T(X) = \frac{Q(m, l_{seg})}{\eta(m) \cdot n_{face} \cdot \lambda(g_{traf})} + T_{prep}(g_{traf}) + T_{safe}(m, s_{sup}) \quad (8)$$

因此：

$$C_{ind}(X) = \left[\frac{Q(m, l_{seg})}{\eta(m) \cdot n_{face} \cdot \lambda(g_{traf})} + T_{prep}(g_{traf}) + T_{safe}(m, s_{sup}) \right] \cdot p_{ind} \quad (9)$$

式中， $Q(m, l_{seg})$ 为拆除方式和分块长度共同决定的总作业量 $\eta(m)$ 为不同拆除方式对应的单作业面施工效率； n_{face} 为作业面数量； $\lambda(g_{traf})$ 为交通组织方式对有效作业时间的修正系数。一般而言，全封闭施工时 $\lambda(g_{traf})$ 较大，半幅封闭或夜间半幅封闭时 $\lambda(g_{traf})$ 较小。 $T_{prep}(g_{traf})$ 为交通导改、围蔽布设等准备时间； $T_{safe}(m, s_{sup})$ 为不同拆除方式和临支布置带来的安全控制、监测和工序转换时间。

(2) 碳排放目标

拆除阶段碳排 $f_2(X)$ 主要来自设备用电、燃油消耗及运输活动。

$$f_2(X) = EF_e \cdot E(X) + EF_d \cdot V(X) \quad (10)$$

其中 E 为电耗(kWh), V 为柴油消耗量(L), EF_e 电力排放因子, EF_d 柴油排放因子。

其中, 电耗 $E(X)$ 可表示为:

$$E(X) = \sum_k P_k(m) t_k(m, l_{\text{seg}}, n_{\text{face}}) \quad (11)$$

式中, $P_k(m)$ 为拆除方式 m 所对应的第 k 类电动设备功率, 例如绳锯、圆盘锯、液压切割设备等; t_k 为设备运行时间, 主要受分块长度 l_{seg} 、拆除方式 m 和作业面数量 n_{face} 影响。分块越细, 切割次数和吊装次数越多, 设备运行时间可能增加; 但作业面数量增加又可能缩短总工期。

柴油消耗量 $V(X)$ 可进一步表示为:

$$V(X) = \sum_r q_r(m, n_{\text{cr}}) t_r(X) + N_{\text{truck}}(l_{\text{seg}}, g_{\text{traf}}) D(g_{\text{traf}}) q_{\text{truck}} \quad (12)$$

其中, q_r 为燃油机械单位时间油耗, t_r 为燃油机械工作时间; 起重冗余 n_{cr} 越高, 意味着采用更大吨位或更多吊装设备, 从而提高燃油消耗。后半部分为运输油耗, N_{truck} : 为运输车次, 受分块长度 l_{seg} 和弃料体积影响; $D(g_{\text{traf}})$ 为交通组织方式影响下的等效运输距离或运输绕行距离; q_{truck} : 为车辆单位距离油耗。因此, 式(10)与式(2)的关系可以理解为: 式(2)先确定拆除工艺、分块方式、设备配置和交通组织, 再由这些变量推算设备运行时间、运输车次和油耗, 最终换算为全过程碳排放量。

(3) 风险目标

拆除阶段风险具有“事件链”特征, 且高后果事件通常由临支失效、体系转换失稳、吊装异常与飞散等触发。为兼顾可计算性与工程解释性, 采用风险矩阵建立综合风险指数:

$$f_3(X) = R_s = \sum_{i=1}^K \omega_i [P_i(X) \cdot S_i(X)] \quad (13)$$

其中 P_i 为第 i 类事故场景发生概率等级, S_i 为后果等级, ω_i 为权重。权重确定可采用层次分析法(AHP), 其成对比较与一致性检验可参考 Saaty 提出的 AHP 体系与一致性定义。

对于体系转换失稳风险, 其概率等级可表示为:

$$P_1(X) = f_1(m, l_{\text{seg}}, s_{\text{sup}}) \quad (14)$$

拆除方式 m 决定卸载扰动大小, 分块长度 l_{seg} 决定单次卸载重量, 临支间距 s_{sup} 决定临时支撑体系的安全储备。因此, 若分块过大、临支间距过大, 则体系转换过程中的内力突变更明显, 风险概率等级随之提高。

对于吊装失稳和吊装异常风险, 可表示为:

$$P_2(X) = f_2(l_{\text{seg}}, n_{\text{cr}}) \quad (15)$$

分块长度 l_{seg} 越大, 单块重量越大, 吊装难度越高; 起重冗余 n_{cr} 越高, 吊装安全储备越大, 异常状态下的风险概率可降低。

对于交叉作业风险, 可表示为:

$$P_3(X) = f_3(n_{\text{face}}, g_{\text{traf}}) \quad (16)$$

作业面数量 n_{face} 增加会提高施工效率, 但也会增加人员、机械和吊装作业之间的交叉干扰; 交通组织方式 g_{traf} 则影响施工区与社会交通之间的隔离程度。

事故后果等级可表示为:

$$S_i(X) = g(m, l_{\text{seg}}, g_{\text{traf}}) \quad (17)$$

其中, 拆除方式 m 影响事故破坏形式, 分块长度 l_{seg} 影响坠落或失稳构件规模, 交通组织方式 g_{traf} 影响事故波及范围。全封闭施工时暴露对象较少, 后果等级相对较低; 半幅封闭或夜间半幅封闭时, 若隔离不足, 事故可能影响通行车辆或周边环境, 后果等级相应提高。

因此, 式(13)实际上是将式(2)中的拆除工艺参数、结构控制参数和施工组织参数转化为各事故场景的概率等级与后果等级, 并通过权重 ω ; 加权形成综合风险指数。这样, 风险目标就不再是主观评分, 而是与具体拆除方案参数直接关联的可计算目标函数。

2.4. 安全约束

为保证优化结果具备基本工程可实施性, 引入拆除全过程最小可靠度指标作为统一安全约束。设关键控制工况的可靠度指标为 β_j , 则有:

$$\beta_{\min} = \min(\beta_j) \quad (18)$$

并满足:

$$\beta_{\min} \geq 3.7 \quad (19)$$

仅满足上述条件的方案方可进入 Pareto 比较。该约束将安全要求前置为约束条件, 而非事后评价指标, 从而保证解集始终位于可接受的安全域内。

3. 工程应用

3.1. 工程概况与方案设置

某桥结构跨径组成为 $32.50 \text{ m} + 51.25 \text{ m} + 2 \times 70.00 \text{ m} + 51.25 \text{ m} + 32.50 \text{ m}$ 。第 1#跨和第 6#跨为预应力钢筋混凝土简支 T 梁, 其余 4 跨均为带挂梁的框架式预应力 T 构, 其中挂梁为预应力钢筋混凝土简支 T 梁。桥梁全长 307.5 m , 桥面全宽 32.0 m , 桥面横向布置为 0.50 m (护栏) + 14.75 m (桥面) + 0.50 m (护栏) + 0.50 m (中央分隔带) + 0.50 m (护栏) + 14.75 m (桥面) + 0.50 m (护栏)。桥面采用 10 cm 厚 40 号钢筋混凝土和 8 cm 厚沥青混凝土。两侧设置钢筋混凝土防撞护栏。桥型布置图见图 2。

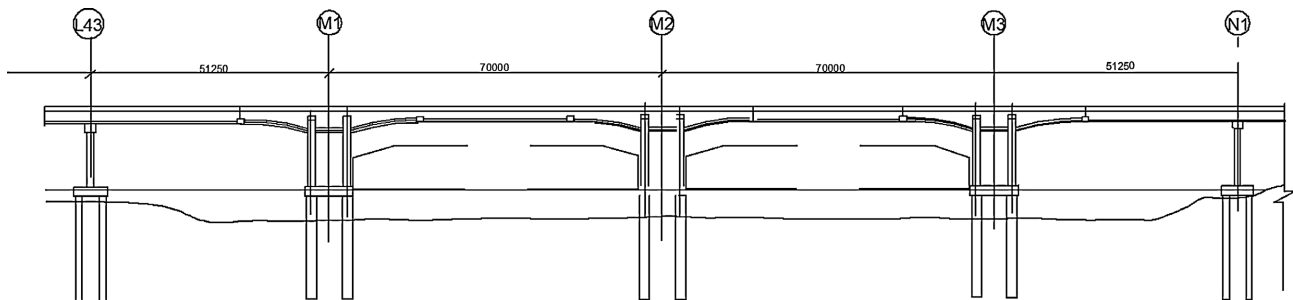


Figure 2. Bridge layout drawing
图 2. 桥型布置图

该桥拆除重建工程总体风险等级评价为 II 级中等, 施工方案最大风险为插打桩施工振动对旧桥稳定性的影响、桥梁结构拆除过程中的体系转换风险。

该桥处于交通环境较为复杂的区域, 拆除施工既需满足结构安全要求, 又需兼顾交通组织和周边环境控制。考虑拆除过程中体系转换频繁、工况复杂、安全敏感性高等特点, 选取钢筋混凝土切割拆除、人工/机械拆除和静态爆破拆除三类典型工艺作为备选方案。

其中, 钢筋混凝土切割拆除具有分块精确、扰动较小和体系转换平缓等特点; 人工/机械拆除施工效率较高, 但冲击扰动较强; 静态爆破拆除虽能提高破除效率, 但对隔离控制、环境协调和监测响应要求更高。三类方案在经济性、环境性与安全性方面差异显著, 适合开展多目标优化比较。如表 1 所示。

Table 1. Proposed demolition schemes

表 1. 拆除方案拟定表

序号	方案名称	实施方法
1	钢筋混凝土切割法	绳锯/圆盘锯分块 - 吊装 - 转运处置
2	人工、机械拆除法	破碎锤/挖机为主, 局部切割配合
3	静态爆破法	钻孔 + 静态膨胀裂解 + 二次破除与清运

3.2. Pareto 解集特征分析

依据式(2)~式(19)对每一个候选拆除方案进行指标计算与可行性判定。具体而言, NSGA-II 生成的每个个体均对应一组决策变量 X , 包括拆除方式、分块长度、临支间距、起重冗余、作业面数量和交通组织方式等。将该变量组合代入成本模型式(3), 分别计算直接施工费、临时工程费、运输处置费、间接费及固定组织费用, 并求和得到总成本; 将其代入碳排放模型式(10), 根据设备用电量、柴油消耗量及相应排放因子计算全过程碳排放; 将其代入风险模型式(13), 结合各类事故场景的发生概率等级、后果等级及权重, 计算综合风险指数。与此同时, 对该方案在拆除全过程中的关键控制工况逐一进行可靠度分析, 得到各工况可靠度指标 β_j , 并按式(18)取其中最小值作为全过程最小可靠度指标 β_{\min} 。只有当 β_{\min} 满足式(19)规定的安全底线, 即 $\beta_{\min} \geq 3.7$ 时, 该方案才被判定为可行解并进入 Pareto 非支配排序; 否则即使其成本、碳排放或风险指标较优, 也会被剔除。由此, 后续 Pareto 解集并非单纯由经济、环境和风险目标优化得到, 而是在满足结构与施工安全可靠约束基础上形成的多目标可行解集。

在可靠度约束条件下, NSGA-II 获得了满足安全要求的 Pareto 可行解集。整体结果表明, 成本、碳排放与综合风险三项目标之间存在明显冲突, 说明桥梁拆除并非某一维度上的简单最优化问题, 而是典型的多目标权衡问题。若只追求低成本, 往往意味着减少临时支撑、缩短工序或降低设备冗余, 从而可能放大施工风险; 若一味追求最低风险, 则需要采用更精细的分块方式、更高等级的吊装与监测配置, 这又会推高成本并延长作业时间, 进而增加设备运行与运输过程中的碳排放。由此可见, 三目标之间存在天然的耦合与制约关系。如图 3~6 所示。

从图 3 可以看出, 三类拆除工艺在目标空间中形成了不同的可行解分布区域, 并且这些区域之间并非完全重合, 而是表现出一定的分层特征。这说明不同工艺在成本、环境和安全三方面具有不同的适用区间。钢筋混凝土切割拆除的解集整体更集中于低风险区域, 同时在成本和碳排方面保持较好的可接受性; 人工/机械拆除的解集分布则更易向高风险区扩展; 静态爆破解在部分工况下虽可维持较低成本, 但在高安全约束下其可行解数量受到明显压缩。

图 4 反映了成本与碳排放之间并非始终保持一致变化趋势。一般情况下, 增加机械台班和施工组织投入会抬高直接成本, 但并不一定同步显著增大碳排放; 相反, 若通过更高效的分块组织和运输调度减少重复作业, 则可能在成本略有上升的同时有效压缩总碳排。这说明拆除工程中的经济性与环境性并不总是完全对立, 二者之间存在通过优化施工组织实现协同改善的可能。

图 5 表明, 成本与风险之间总体呈现出较为明显的负相关趋势。低风险方案通常需要更多的临时工程投入、更严格的作业控制以及更高的设备冗余, 因此成本相对较高; 而低成本方案往往通过减少辅助

措施和简化施工组织实现费用压缩,但这也导致施工过程中的不确定性和受力突变风险增加。也就是说,桥梁拆除中的“低成本”很多时候是以削弱安全储备为代价换取的,因此在高安全敏感项目中不能孤立追求经济性最优。

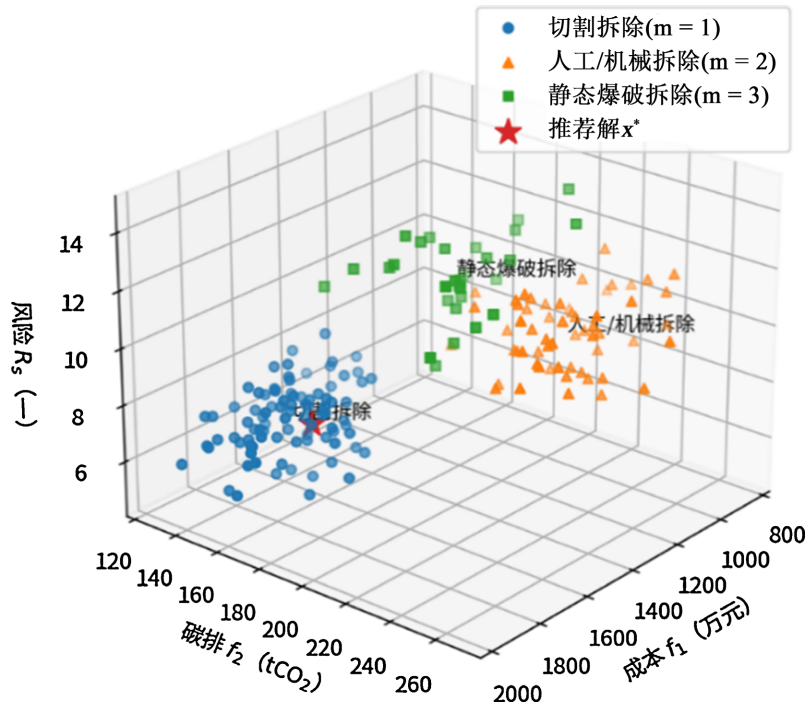


Figure 3. Feasibility distribution diagram
图 3. 可行性分布图

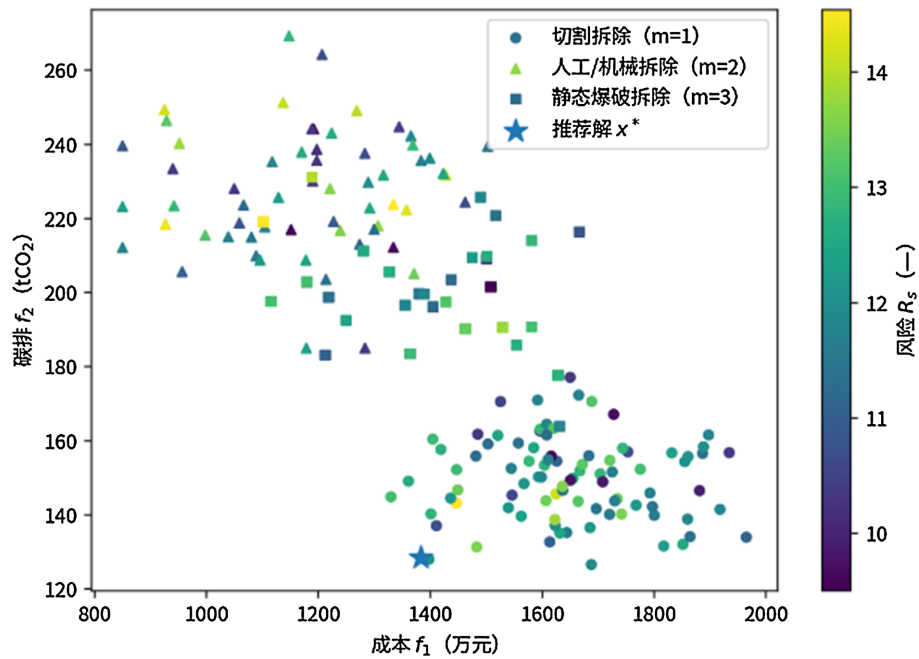


Figure 4. Cost-carbon emission projection diagram
图 4. 成本 - 碳排投影图

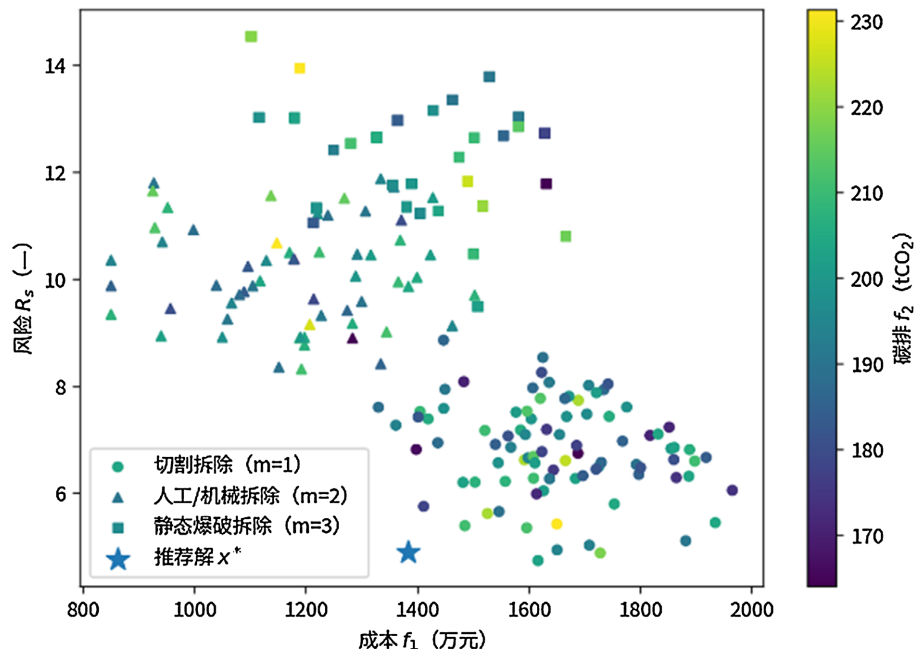


Figure 5. Cost-risk projection diagram

图 5. 成本 - 风险投影图

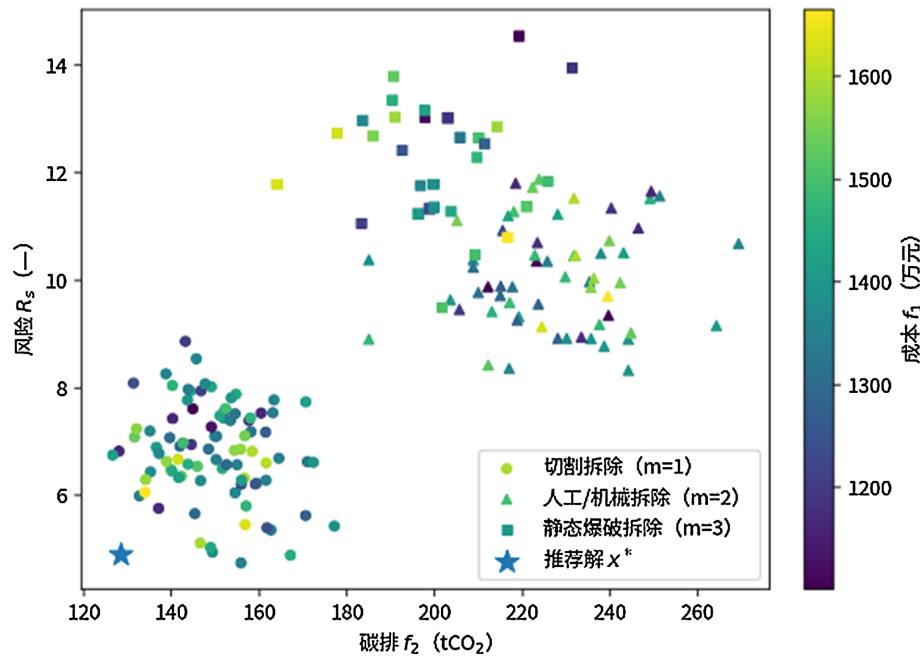


Figure 6. Carbon emission-risk projection diagram

图 6. 碳排 - 风险投影图

图 6 进一步说明，碳排放与风险之间也并非单调线性关系。一方面，增加施工控制措施和延长工期会带来更多能源消耗，从而提高碳排；另一方面，若因施工方式粗放导致风险升高，往往也伴随着返工、重复吊装和附加设备投入，同样可能增加碳排。因此，低碳目标并不意味着简单地减少机械使用，而应通过优化施工节奏、运输路径和设备利用率，在保证安全的前提下实现全过程碳排放控制。

综合图 3~6 可以看出，钢筋混凝土切割拆除更容易形成“低风险 - 可控成本 - 适中碳排”的解带，其主要原因在于该工艺对拆除顺序和分块尺度的控制能力较强，能够使体系转换过程更平缓，减少突发性受力重分布；同时，分块吊装和分步卸载有利于将高险工况分解为多个可控作业环节，从而提高整体施工安全性。相比之下，人工/机械拆除虽在局部费用上具有优势，但其冲击扰动和操作不确定性使风险指标整体偏高；静态爆破方案则受到环境协调和施工隔离要求的制约，在高安全要求条件下表现出更窄的可行域。

3.3. 收敛性分析

在迭代初期，由于随机生成个体中存在较多不满足可靠度约束的方案，可行解比例相对较低。随着迭代推进可行解比例逐步提高并趋于稳定，最优综合指标持续改善。图 7 为可行解比例与最优指标 J 的变化图。

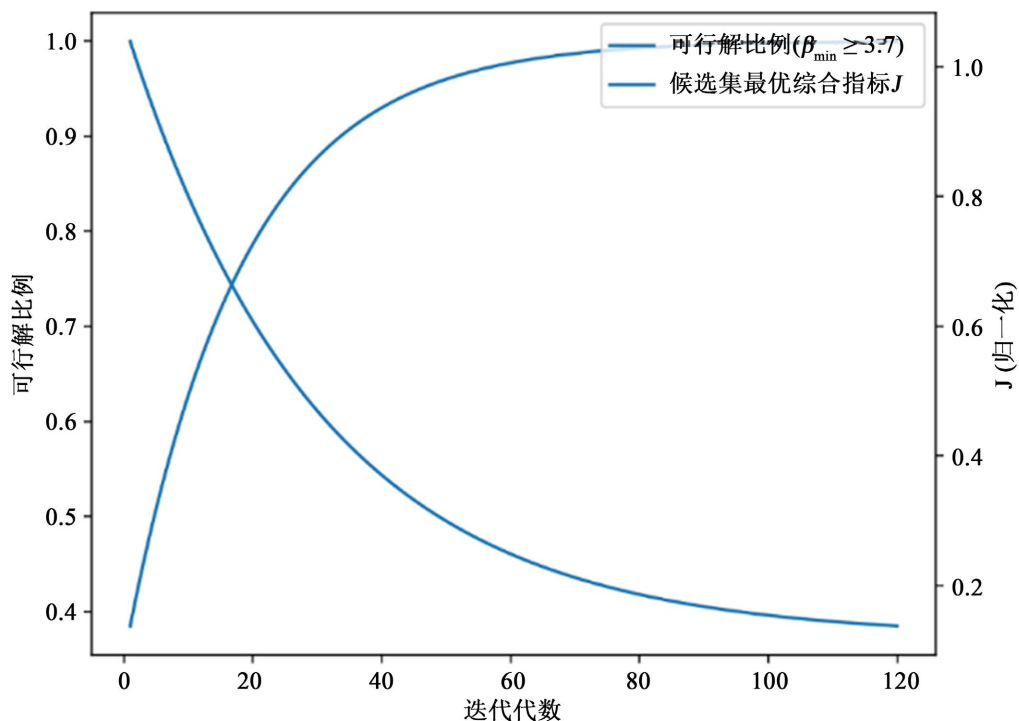


Figure 7. Variation of feasible solution proportion and optimal indicator J
图 7. 可行解比例与最优指标 J 的变化图

从图 7 可见，随着迭代次数增加，可行解比例呈逐步上升趋势，表明算法能够在早期快速识别不满足安全约束的无效区域，并将搜索重点逐渐集中到满足可靠度条件的可行域内部。同时，最优综合指标 J 不断下降，说明在可行域中仍存在较大的优化空间，NSGA-II 能够有效挖掘成本、碳排和风险之间更优的折中关系。

这一变化过程说明，将可靠度底线作为硬约束嵌入优化模型并不会削弱算法的搜索能力，相反，它在一定程度上缩小了无效搜索范围，使算法演化过程更聚焦于具有工程意义的候选方案。对于桥梁拆除这类安全门槛高、后果敏感性强的工程问题而言，这种“先满足安全、再追求优化”的搜索策略具有较强合理性。它不仅能够避免算法在大量不安全方案附近徘徊，也使最终获得的 Pareto 解集更具可实施性和决策价值。

3.4. 推荐方案分析

在满足 $\beta_{\min} > 3.7$ 的基础上, 进一步采用安全优先原则对 Pareto 可行解集进行筛选。结果显示, 低风险候选解主要集中于钢筋混凝土切割拆除方案, 而人工/机械拆除和静态爆破拆除的可接受候选解数量明显减少。图 8 为安全优先筛选图。

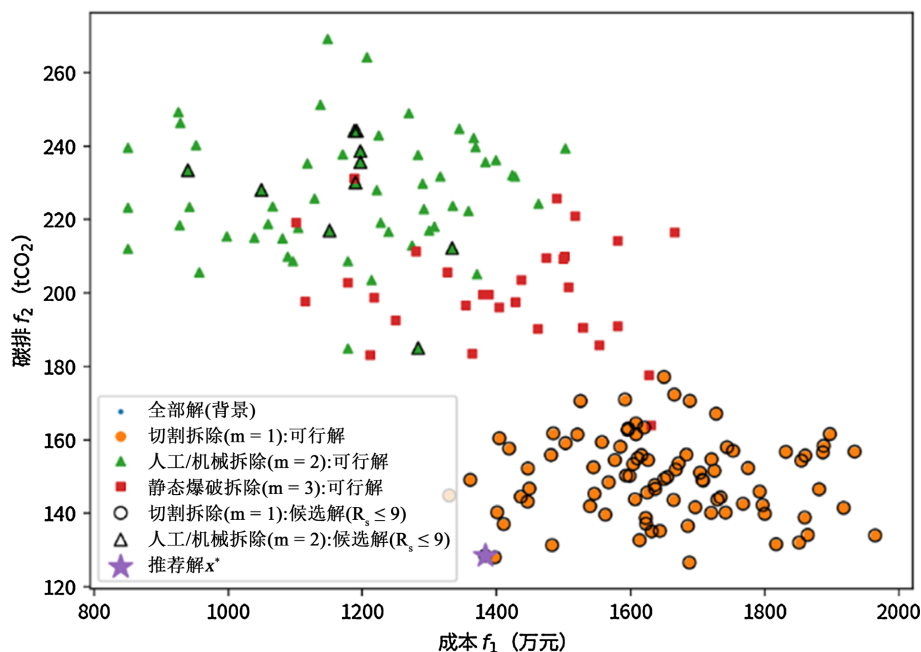


Figure 8. Safety-priority screening diagram

图 8. 安全优先筛选图

从图 8 可以看出, 在引入安全优先准则后, 原本处于 Pareto 前沿上的部分方案被进一步剔除, 说明满足可靠度底线与具备较高安全冗余并不完全等价。也就是说, 有些方案虽然在理论上满足 $\beta_{\min} \geq 3.7$ 的约束, 但其风险水平依然偏高, 在实际工程管理中未必属于优选方案。通过二次筛选, 可以进一步突出那些不仅满足安全底线, 而且在施工扰动控制、临时体系稳定性和作业风险冗余方面表现更优的方案。

综合比较后, 推荐采用钢筋混凝土切割拆除方案。该方案对应总成本为 176.22 万元, 碳排放为 128.48 tCO₂, 综合风险指数为 4.9, 最小可靠度指标为 4.21, 高于安全底线 3.7。该结果表明, 切割拆除并非单纯追求最低成本或最低碳排, 而是在三者之间形成了更均衡的折中。其优势在于: 第一, 切割工艺便于控制分块尺寸和卸载顺序, 能够显著降低局部突卸载引起的受力影响; 第二, 分块吊装和临时支撑配合更容易形成稳定的施工节奏, 提升全过程安全可控性; 第三, 尽管切割方案在直接费用上可能略高, 但由于返工概率、突发事件处置成本和高风险工况数量较少, 整体综合效益反而更优。

3.5. 敏感性分析

为评价推荐方案的稳健性, 对关键参数进行了扰动分析。结果表明, 成本目标对拆除单价、间接费水平和运输距离较为敏感, 碳排放目标则对运输距离和单位油耗更为敏感。如图 9 所示。

如图 9 所示, 在各类影响因素中, 拆除单价和间接费水平对总成本的影响最为直接。这意味着拆除工程的成本控制并不仅取决于单纯的机械台班费或人工费, 还受到组织管理效率、施工周期和临时工程规模的显著影响。特别是在安全要求较高的桥梁拆除项目中, 管理协调、封道组织、监测布设和应急预

案等间接费用往往占有较高比重，因此仅从直接施工费角度评价方案经济性是不充分的。

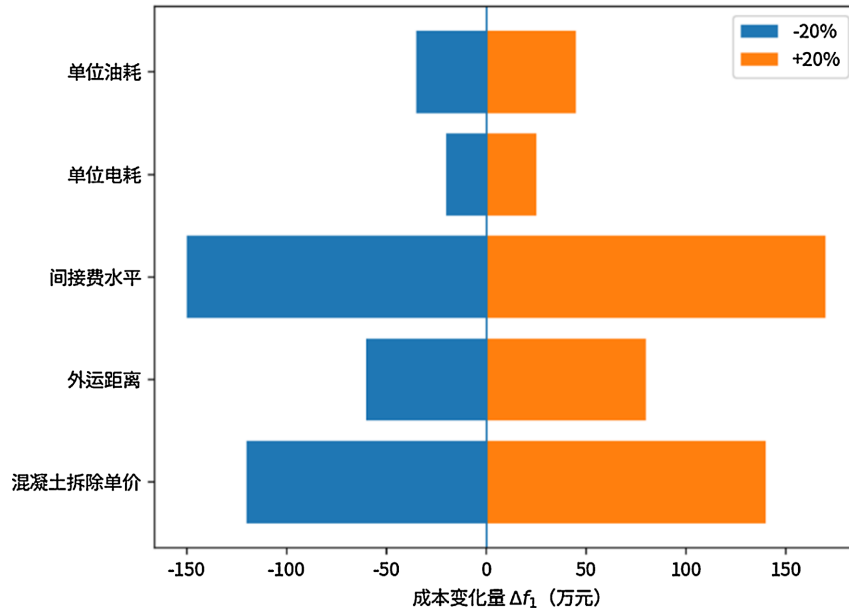


Figure 9. Cost sensitivity diagram
图 9. 成本敏感性图

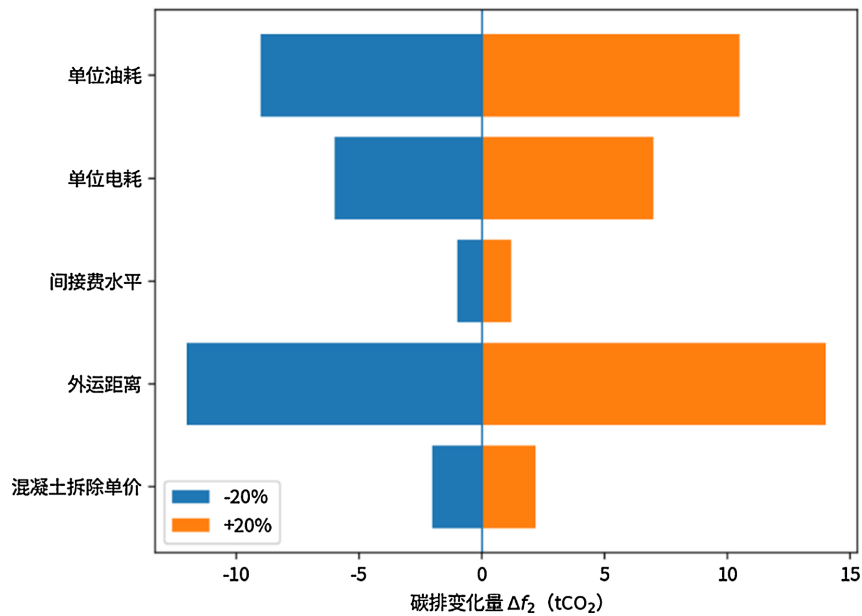


Figure 10. Carbon emission sensitivity diagram
图 10. 碳排敏感性图

从图 10 中可以看出，运输距离和单位油耗对碳排放的影响最为显著。这说明拆除阶段的环境绩效在很大程度上并不完全由拆除工艺本身决定，而与弃料清运路径、设备运行效率和施工调度方式密切相关。若能够通过合理布设施工场地、缩短外运距离、提高车辆装载效率以及降低设备空转时间，则可在不改变拆除主工艺的前提下显著降低全过程碳排放。

4. 结论

本研究以拆除阶段关键工况集定义拆除全过程最小可靠度指标作为约束条件, 然后分别建立全费用成本模型、碳排模型以及风险模型, 构建拆除方案决策的三目标优化模型, 通过带挂梁的预应力 T 构桥拆除决策分析, 可以得出一下结论:

(1) 桥梁拆除方案比选本质上属于多目标冲突决策问题, 成本、碳排放与施工风险之间难以通过单一指标实现统一最优, 采用 Pareto 前沿进行方案比较具有合理性;

(2) 基于 NSGA-II 构建的桥梁拆除多目标优化方法, 能够有效处理目标冲突、变量耦合与安全约束问题, 并输出具有较好收敛性和分布性的非支配解集;

(3) 将拆除全过程最小可靠度指标作为硬约束引入优化模型, 可显著提升方案筛选的安全性和工程可实施性, 使优化过程始终在可接受安全域内进行。

参考文献

- [1] Miettinen, K. (1999) *Nonlinear Multi-Objective Optimization*. Kluwer Academic Publishers.
- [2] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [3] Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. (2001) SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich).
- [4] Hawk, H. (2003) Bridge Life-Cycle Cost Analysis. Transportation Research Board, National Research Council.
- [5] Adams, T.M., *et al.* (2007) Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems. Transportation Research Board, National Research Council.
- [6] Frangopol, D.M. (1999) Life-Cycle Cost Analysis for Bridges. In: Frangopol, D.M., Ed., *Bridge Safety and Reliability*, ASCE, 210-236.
- [7] Du, G., Safi, M., Pettersson, L. and Karoumi, R. (2014) Life Cycle Assessment as a Decision Support Tool for Bridge Procurement: Environmental Impact Comparison among Five Bridge Designs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **19**, 1948-1964. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0797-z>
- [8] Penadés-Plà, V., García-Segura, T., Martí, J. and Yepes, V. (2016) A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design. *Sustainability*, **8**, Article 1295. <https://doi.org/10.3390/su8121295>
- [9] Navarro, I.J., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R. and Yepes, V. (2020) Life Cycle Sustainability Assessment for Multi-Criteria Decision Making in Bridge Design: A Review. *Journal of Civil Engineering and Management*, **26**, 690-704. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.13599>
- [10] Queheille, E., Taillandier, F. and Saiyouri, N. (2019) Optimization of Strategy Planning for Building Deconstruction. *Automation in Construction*, **98**, 236-247. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.007>
- [11] Aidonis, D. (2019) Multiobjective Mathematical Programming Model for the Optimization of End-Of-Life Buildings' Deconstruction and Demolition Processes. *Sustainability*, **11**, Article 1426. <https://doi.org/10.3390/su11051426>
- [12] Nikmehr, B., Hosseini, M.R., Wang, J., Chileshe, N. and Rameezdeen, R. (2021) BIM-Based Tools for Managing Construction and Demolition Waste (CDW): A Scoping Review. *Sustainability*, **13**, Article 8427. <https://doi.org/10.3390/su13158427>
- [13] 蔡雪峰, 李林, 朱熾. 灰色关联在桥梁施工组织设计评审中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2004(10): 73-75.
- [14] 杨永清, 杨灯, 余取. 基于不确定 AHP 的桥梁加固方案模糊综合评价[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 219-226, 216.
- [15] 邢健. 惠州市龙桥东江大桥旧桥改造方案比选[J]. 交通世界, 2021(Z2): 161-162.