

## 基于 NSGA-Ⅱ 的临近既有有线平转桥工期-成本的优化研究

王小菡<sup>1</sup>, 魏伟<sup>2</sup>, 李晓钟<sup>1,\*</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 山东济铁工程建设集团有限公司, 济南 250031)

**摘要:**为明确不同施工环境下的平转桥施工方案,减少对既有交通的影响,避免因方案不契合产生的附加工作量,对涉铁平转桥施工方案进行优化比选。针对支架现浇法和挂篮悬浇法施工方案,以工期、成本为优化目标,对模型基本条件进行界定,构建工期-成本优化体系,利用非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)求得 Pareto 最优解集。以山东省某上跨铁路桥梁为例展开实证分析,结果表明,利用 NSGA-Ⅱ 求得工期最大可以缩短 73 d,成本最大可以减少 1789.39 万元。该优化体系结合临近既有有线桥梁各施工方案的特点,实现了缩短工期、降低成本的综合优化,证明了该体系具有良好的可行性和科学性。研究结果可以为决策者更合理地选择桥梁转体施工方案提供重要依据。

**关键词:**平转桥;方案优选;非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ);支架现浇法;挂篮悬浇法

**中图分类号:**U24 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2026)02-0044-07

**DOI:**10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.006

## Optimization study of the construction period-cost of swivel bridge adjacent to existing lines based on NSGA-Ⅱ

WANG Xiaohan<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>, LI Xiaozhong<sup>1,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Shandong Jitie Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan 250031, China)

**Abstract:** To clarify the swivel bridge construction scheme under different construction environments, to reduce the impact on the existing traffic, and to avoid the additional workload due to the scheme mismatch, the construction scheme for railway-crossing swivel bridge was optimized and compared. By aiming at the construction scheme of bracket cast-in-place method and suspended-basket-grouting method, and taking the construction period and cost as the optimization objectives, the basic conditions of the model are defined, and the construction period-cost optimization system is constructed. The Pareto optimal solution set is obtained by using non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ). Taking a railway-crossing swivel in Shandong as an example, the empirical analysis is carried out. The results show that the NSGA-Ⅱ can shorten the construction period by up to 73 days, and reduce the cost by up to 17.8939 million yuan. By combining the characteristics of each con-

收稿日期:2024-09-19

基金项目:国家自然科学基金(52162043)

作者简介:王小菡(2000—),女,甘肃定西人。硕士,研究方向为桥梁建设管理。E-mail:2669333911@qq.com。

\*通信作者:李晓钟(1976—),男,陕西宝鸡人。博士,副教授,主要从事桥梁施工控制与运维、桥梁智能建造与信息管理等方面的研究。E-mail:69530763@qq.com。

struction scheme of the adjacent to existing line bridge, the optimization system realizes the comprehensive optimization of shortening the construction period and reducing the cost, and verifies that the system has good feasibility and scientificity. The research results can provide an important basis for decision makers to choose the bridge swivel construction scheme more reasonably.

**Key words:** swivel bridge; scheme optimization; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II); bracket cast-in-place method; suspended-basket-grouting method

桥梁转体施工技术始于 20 世纪 40 年代的法国,最初采用竖转法,1975 年我国开始进行转体施工技术的研究,并于 1977 年完成了我国历史上的第一座平转法施工桥梁<sup>[1]</sup>。此后,其在我国的应用越来越普遍,在转体桥梁数量、转体质量、转体形式方面已渐渐进入世界领先水平<sup>[2]</sup>。桥梁转体结构中主梁多采用支架现浇法、挂篮悬浇法或悬臂拼装法施工<sup>[3]</sup>。桥梁项目中有多个相同活动在不同施工范围内重复进行,这种重复性项目时间费用权衡问题是一类离散时间费用权衡问题(Discrete Time-Cost Tradeoff Problem, DTCTP),属于非确定性多项式难(Non-deterministic Polynomial hard, NP-hard)问题<sup>[4]</sup>,目前研究多用非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)等智能算法来解决这类问题,何琴琴等<sup>[5]</sup>通过 NSGA-II 对老旧小区的改造方案进行优选;王星星等<sup>[6]</sup>利用 NSGA-II 对机场航站楼大跨度钢结构进行多目标优化研究;陈秀锋等<sup>[7]</sup>利用改进 NSGA-II 对城市交叉口信号配时进行多目标优化。由于对挂篮悬浇法及支架现浇法施工方案的优化比选缺乏系统性的评估总结<sup>[8]</sup>,使得实际施工中易出现因方案决策的不匹配所带来的成本增加、工期延误以及附加工作量的情况。对于施工方案的优选,一些学者从施工工艺、工期、成本、结构受力等方面进行研究,如朱磊<sup>[9]</sup>根据不同施工工艺以及适用条件进行评价比较;汪顺平<sup>[10]</sup>、单志雄<sup>[11]</sup>、滕炳杰<sup>[12]</sup>等在进行工期、成本以及安全性研究的同时对桥梁结构受力进行了分析;谢存仁等<sup>[13]</sup>以最低成本和资源均衡为目标,利用 BIM 与遗传算法构建建筑工程施工进度优化体系。

综上所述,平转桥施工工艺的应用依然存在因项目决策不理想而导致的成本增加、工期延长等情况。目前针对施工方案优选、结构受力计算等方面进行的研究较多,以工期、成本为目标,对施工方案各工序的资源利用率进行计算、优化的相关研究较少。因此,本文以临近既有线平转桥施工项目为研究对象,构建基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)的涉铁平转桥施工方案优化体系,建立优化模型并对模型进行求解,确定最优施工方案。

## 1 平转桥施工方案对比

桥梁转体常用的施工方法有支架现浇法、挂篮悬浇法、悬臂拼装法,为方便后续优选,需要掌握施工方案的具体施工工艺,拟定适合该工程的施工方法。对于临近既有线上跨铁路桥梁项目,在施工过程中不能影响既有铁路运营,施工难度较大。采用悬臂拼装法时,施工现场可提供的拼装场地有限,因此不宜采用,其他两种施工方法对比见表 1。

表 1 涉铁桥梁转体常用施工方法对比

施工方法	施工内容 <sup>[14]</sup>	优点	缺点
支架现浇法	在桥位处搭设固定支架,利用固定支架提供的施工平台安装模板,绑扎及安装钢筋管道,预留预应力管道,在现场浇筑梁体混凝土、施加预应力。	使用辅助设备少,能够减少人力浪费;混凝土强度等级达标后,预应力张拉处理对整个施工体系无影响;支架和模板可重复利用;可以确保支架的整体安装和浇筑的稳固性;支架和模板可同时拆除,施工效率高。	需要大量脚手架,可能影响既有铁路正常运营;对地基要求较高,部分支架种类需要做硬化处理,从而延长工期;施工受温度、混凝土运输效率及浇筑效率影响较大;支架拆除过程带有安全隐患。
挂篮悬浇法	以桥墩为中心,在桥墩两侧的移动式挂篮提供的工作平台上循环进行钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑、预应力筋张拉等施工,直至全桥合龙。	需要的特殊设备少,仅需吊机与可重复使用的挂篮;钢筋连续性好,梁体结构的整体性较好;不受桥下地形、交通等影响;各段施工属连续的重复作业,需要施工人员少。	高空作业不利于施工阶段对质量的控制;对混凝土养护的温度和湿度要求高;受混凝土收缩和徐变影响较大;存在悬臂过长和不稳定等安全隐患;各工序对前一步骤依赖性较强,需要按部就班进行。

结合支架现浇法与挂篮悬浇法的施工特点,预估施工项目的工期与成本。工期依据现有资源确定;成本分为直接费和间接费。在进行方案优选时,以工期、成本为目标函数,项目各工序构成模型的决策变量。

## 2 桥梁转体上部结构施工工期-成本优化体系及模型构建

涉铁桥梁因其特殊的施工背景,相较于其他桥梁而言建设环境限制条件多,施工难度大,对施工工艺的要求更加严格,在保证项目质量的同时对于工期、成本需要进行综合考虑。但通常来说,质量、成本、工期之间是互斥的,无法在保证质量的同时实现短工期、低成本,因此需要建立优化模型对其进行综合分析。

### 2.1 模型基本条件的界定

平转桥施工需要避免对既有线运营的影响,施工难度增大而引起各类复杂问题的产生,为了避免计算过程中其他因素对优化结果的影响,除了因施工方法不同带来的工期、成本变化外,其余因素影响暂不考虑,做出以下界定。

1) 一般假定:假定不存在人员请假、工程返工等现象对目标变量造成影响;工程在施工过程中无不可抗力意外。

2) 工期界定:相邻施工内容前后无时间间隔,保证施工过程流畅,项目施工过程中避免影响既有线的正常运营。

3) 成本界定:每日所耗费的间接费用相同,项目的间接费用取决于项目工期,不会对成本判断造成误差;因项目停工导致的工期延长、机械设备租赁成本增加在目标函数内为可抵消的正相关关系,对目标变量不造成影响。

4) 施工环境界定:假定施工环境,如地质条件、地下水、降水、市政管道等,均满足两种方法的施工条件,避免出现部分支架搭建不统一的情况。

5) 施工安全界定:假定施工现场操作环境安全,不存在高空坠物、漂浮物等,施工范围在安全红线以内且确保消防、用电安全,施工安全能够得到保证。

### 2.2 双目标优化函数的构建

本文目标函数工期和成本的优化很难做到兼顾最优,原因在于为压缩工期,需要增加人工、材料、机械等资源,直接导致成本的增加;而若通过减少人员数量、机械租赁数量等资源来降低成本,将导致实际工期的增加,即两个目标函数不能同时达到最小,只有均衡该优化目标的 Pareto 最优解集。因此,涉铁桥梁转体施工方案优选要求出 Pareto 最优解集,对比 Pareto 最优解集全部元素的评估结果,选出一个与决策者需求最接近的方案。

该目标优化研究的目的是对工期成本进行综合均衡分析,方便决策者选择最优方案。本文采用 NSGA-II<sup>[15]</sup> 求解数学优化模型,该算法搜索效率高,搜索过程灵活,不易陷入局部最优,可有效解决非线性优化问题,其具体优化过程如图 1 所示。

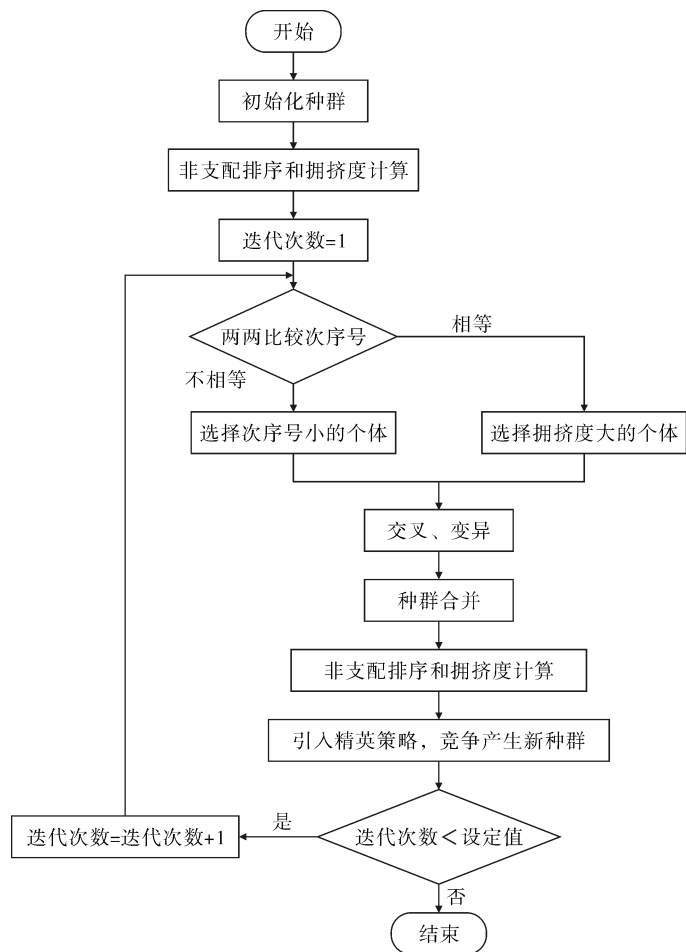


图1 NSGA-II的优化过程

### 2.2.1 工期优化模型

本文通过对支架现浇法和挂篮悬浇法具体施工工艺的分析,根据双代号网络计划图关键线路中各工序的工作时间确定项目施工的工期。其目标函数为

$$\begin{aligned} \min T &= \sum_{i \in L} t_i \\ \text{s. t. } t_i^s &\leq t_i \leq t_i^n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $T$ 为项目总工期; $L$ 为关键线路; $t_i$ 、 $t_i^s$ 、 $t_i^n$ 分别为工序*i*的实际持续时间、最短持续时间和正常持续时间。

### 2.2.2 工期-成本优化模型

总成本是指完成施工项目所花费的各项费用之和,分为直接费和间接费<sup>[16]</sup>。其中直接费包括人工费、材料费、机械使用费<sup>[17]</sup>,间接费用包括施工管理、合同管理、质量控制等不直接归属于某具体施工工序所产生的费用。此外,各工序工期的改变会对施工成本造成影响,当工序持续时间缩短时需要增加资源的耗费以保证工程的正常结束;当工序持续时间冗长时同样会造成资源浪费,导致成本的增加;当工序时间合理增加,资源得到合理利用时,成本的增长将减缓<sup>[18]</sup>。其工期-成本目标函数为

$$\begin{aligned} \min C &= \sum_{i=1}^N C_{Di} + C_1 = \sum_{i=1}^N [C_{Di}^n + \alpha_i (t_i^n - t_i)^2] + \beta \sum_{i \in L} t_i \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \alpha_i = \frac{C_{Di}^s - C_{Di}^n}{(t_i^n - t_i^s)^2} \\ t_i^s \leq t_i \leq t_i^n \\ -x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0 \\ x_i \geq 0, t_i \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $C$ 为总成本; $C_{Di}$ 为工序*i*所产生的直接成本; $C_1$ 为总间接成本; $\alpha_i$ 为工序*i*的直接费率; $\beta$ 为整个项目的间接费率; $C_{Di}^s$ 为工序*i*在最短持续时间下所产生的直接成本; $C_{Di}^n$ 为工序*i*在正常持续时间下所产生的直接成本; $-x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0$ 表示后项工作必须在其紧前工作完成后才能开始; $x_i$ 为工序*i*的开始时间; $N$ 为所有工序数。

### 2.2.3 双目标优化模型

将上述模型转化为求最小值问题,建立涉铁桥梁转体施工工期优化模型:

$$\begin{cases} F_1 = \min T = \sum_{i \in L} t_i \\ F_2 = \min C = \sum_{i=1}^N [C_{Di}^n + \alpha_i (t_i^n - t_i)^2] + \beta \sum_{i \in L} t_i \\ \min Z = \{F_1, F_2\} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \alpha_i = \frac{C_{Di}^s - C_{Di}^n}{(t_i^n - t_i^s)^2} \\ t_i^s \leq t_i \leq t_i^n \\ -x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0 \\ x_i \geq 0, t_i \geq 0 \end{cases}$$

## 3 涉铁桥梁转体施工工期-成本优化模拟

### 3.1 案例概况

本文以山东省某上跨铁路桥梁为例,该桥桥址处南北两侧均为双线电气化铁路,设计速度为120 km/h,桥梁上部结构为大跨变高度箱梁,桥下铁路净空要求较严,在上跨铁路处不小于10 m,为减少上部结构施工对铁路行车安全的影响,采用转体施工法。主桥上部为(85+85) m 预应力混凝土变截面连续箱梁,采用钻孔灌注桩基础。

### 3.2 施工方案数据分析

根据上述优化模型及实例数据,分别采用支架现浇法与挂篮悬浇法进行计算。通过查阅资料、阅读图纸、咨询专家等方式,从施工图纸中得到两种施工方案各工序的工程量以及施工步骤所需工期。利用纵横造价工作平台根据案例工程所在地选取其他计算参数,将该施工项目所需工程量代入并进行施工定额选择,计算各工序成本,同时以图纸预期工期以及施工经验确定工序最短工期和最长工期。

1) 支架现浇法。采用支架现浇法施工时,预计施工准备 3 个月,下部结构施工 7 个月,上部梁体施工 9 个月,转体施工姿态调整 1 个月,桥梁合龙及桥面施工 1 个月,总工期共计约 21 个月。选取下部结构及上部结构施工工序进行计算,施工网络如图 2 所示,其中,①—⑧表示工作的开始、结束或连接关系的节点,反映了前后工作的交接点。相关施工工序共需的工期、成本见表 2。

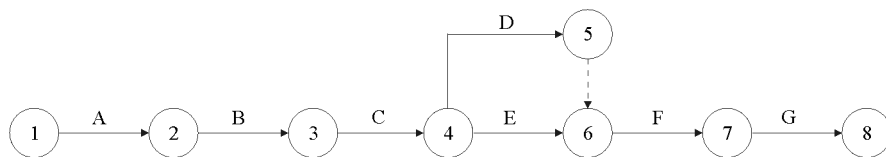


图 2 支架现浇法双代号网络

表 2 支架现浇法施工工序的工期、成本

序号	施工工序	正常工期/d	正常直接费用/万元	最短工期/d	极限费用/万元	最长工期/d
A	基础施工	180	653.57	170	700.00	190
B	地基处理	35	16.12	30	26.12	37
C	支架搭设及预压	15	67.98	10	100.00	20
D	钢筋绑扎	130	22 399.76	125	22 500.00	140
E	预应力管道安装	20	55.91	15	75.91	25
F	混凝土浇筑	100	1 277.28	95	1 300.00	110
G	支架拆除	5	7.38	4	17.38	6
合计		485	24 478.00	449	24 719.41	528

2) 挂篮悬浇法。采用挂篮悬浇法施工时,预计施工准备 3 个月,下部结构施工 5 个月,上部梁体施工 10 个月,转体施工姿态调整 1 个月,桥梁合龙及桥面施工 2 个月,总工期共计约 21 个月。选取下部结构及上部结构施工工序进行计算,施工网络如图 3 所示,相关施工工序的工期、成本见表 3。

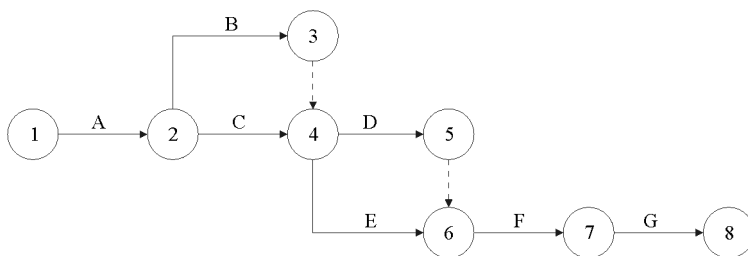


图 3 挂篮悬浇法双代号网络

表 3 挂篮悬浇法施工工序的工期、成本

序号	施工工序	正常工期/d	正常直接费用/万元	最短工期/d	极限费用/万元	最长工期/d
A	基础施工	150	3 799.81	140	4 000.00	160
B	挂篮、模板系统安装及预压	25	193.03	20	200.00	30
C	挂篮行走	25	4.83	20	14.83	27
D	钢筋绑扎	130	21 795.68	120	22 000.00	140
E	预应力管道安装	20	55.38	15	65.38	25
F	混凝土浇筑	100	1 137.02	95	1 200.02	105
G	挂篮退回	7	9.66	5	20.00	9
合计		457	26 995.41	415	27 500.23	496

### 3.3 双目标优化建模与求解

将表 2、表 3 数据代入式(3)中求得该工程的优化模型,利用 NSGA- II 方法,通过 MATLAB 计算软件进行计算分析。设置种群数为 100 个,迭代循环 200 次,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.4。经种群个体快速非支配排序、拥挤度计算至达到预定迭代次数,取得最优解。支架现浇法和挂篮悬浇法施工优化后 Pareto 最优解集见图 4,并分别选取其中 6 组 Pareto 解,其中支架现浇法命名为 A1—A6、挂篮悬浇法命名为 B1—B6,见表 4。

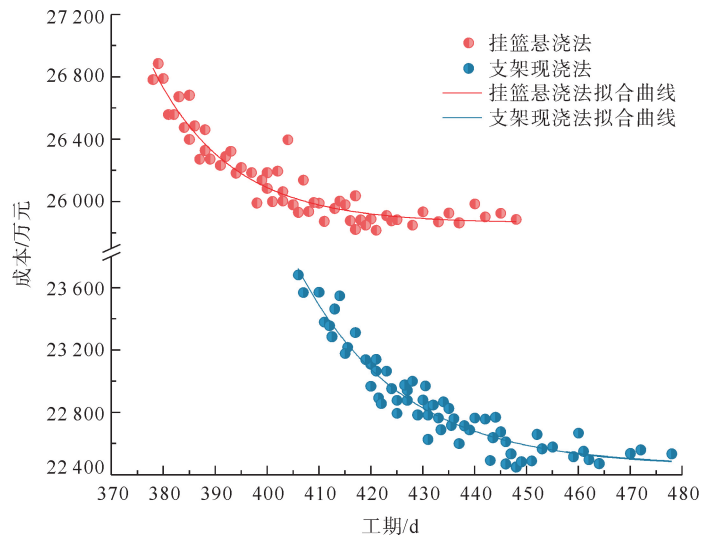


图 4 两种施工方法 Pareto 最优解集

表 4 两种施工方法优化后部分 Pareto 解

施工方法	方案	工期/d	成本/万元	施工方法	方案	工期/d	成本/万元
支架现浇法	A1	415	23 179.36	挂篮悬浇法	B1	384	26 475.73
	A2	419	23 137.95		B2	389	26 273.46
	A3	421	23 241.92		B3	392	26 289.33
	A4	427	22 878.73		B4	403	26 003.65
	A5	433	22 765.10		B5	408	25 937.98
	A6	439	22 688.61		B6	419	25 850.69

### 3.4 结果分析

由图 4 可知,随着工期的延长,成本逐渐下降,在到达某一工期时下降到极点,其后小幅度回升,符合前文关于铁路桥梁施工时成本和工期变化规律的实际情况。在质量得到保证的前提下,优化后两种施工方法选择的解均在降低成本的同时缩短了工期,实现了均衡优化的目的。

同时通过 NSGA- II 求解双目标优化数学模型得到 Pareto 解,可帮助决策者筛选符合自身抉择的方案,两种方案的最佳优化效果如表 5 所示。

表 5 两种施工方法优化效果

施工方法	工期/d			成本/万元		
	优化前	优化后	优化效果	优化前	优化后	优化效果
支架现浇法	485	415	70	24 478.00	22 688.61	1 789.39
挂篮悬浇法	457	384	73	26 995.41	25 850.69	1 144.72

## 4 结论

1) 本文以临近既有线铁路桥梁为研究对象,总结了支架现浇法和挂篮悬浇法的关键路径和施工工序,得到预计工期与成本,采用 NSGA- II 对施工方案的工期、成本进行分析,计算得到 Pareto 最优解集。该优化模型能够提高寻优效率,降低方案选择的复杂程度,帮助决策者根据自身需求更快速、更准确地得到多组优化数据。

2) 支架现浇法工期最大可以优化 70 d,成本最大可以优化 1 789.39 万元;挂篮悬浇法工期最大可优

化 73 d,成本最大可优化 1 144.72 万元,验证了该优化体系的可行性。结果表明,工期和成本相互影响,在优化数据达到某一临界点时,进一步延长工期时成本会产生小幅度回升,符合实际施工中工期-成本的变化规律。

### 参考文献(References):

- [1] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景[J].铁道标准设计,2011(6):67-71.  
CHENG Fei,ZHANG Qifeng,WANG Jingquan. The development status and prospect of bridge swivel construction technology in China[J]. Railway Standard Design,2011(6):67-71.
- [2] 马行川.跨线桥转体技术发展现状与展望[J].铁道标准设计,2020,64(6):92-97.  
MA Xingchuan. Development status and prospect of overpass bridge swiveling technology for flyover[J]. Railway Standard Design,2020,64(6):92-97.
- [3] 古兰玉.上跨铁路营业线桥梁施工技术与施工方案比选方法研究[D].北京:清华大学,2017.  
GU Lanyu. Construction technologies and construction scheme selection method for bridge across railway lines[D]. Beijing:Tsinghua University,2017.
- [4] PRABUDDHA D E,DUNNE E J. Complexity of the discrete time-cost tradeoff problem for project networks[J]. Operations Research,1997,45(2):302-306.
- [5] 何琴琴,李希胜,万寅子.基于 NSGA-II 的老旧小区改造方案优选[J].科学技术与工程,2022,22(18):8030-8036.  
HE Qinqin,LI Xisheng,WAN Yinzi. NSGA-II based optimum selection of old residential district reconstruction scheme[J]. Science and Technology and Engineering,2022,22(18):8030-8036.
- [6] 王星星,于竞宇,毛江峰,等.基于 NSGA-II 与方案优选的机场航站楼大跨度钢结构多目标优化研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(7):941-949.  
WANG Xingxing,YU Jingyu,MAO Jiangfeng,et al. Multi-objective optimization of large-span steel structure of airport terminal based on NSGA-II algorithm and scheme evaluation[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science),2023,46(7):941-949.
- [7] 陈秀锋,王瑞聪,陈咨羽,等.基于改进 NSGA-II 的交叉口信号配时多目标优化[J].青岛理工大学学报,2024,45(1):111-117.  
CHEN Xiufeng,WANG Ruicong,CHEN Ziyu,et al. Multi-objective optimization of intersection signal timing based on improved NSGA-II algorithm[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2024,45(1):111-117.
- [8] 宋迪.现浇梁挂篮施工与支架现浇施工工艺比选分析[J].黑龙江科技信息,2015(17):228.  
SONG Di. Comparison and analysis of cast-in-place beam hanging basket construction and bracket cast-in-place construction technology[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2015(17):228.
- [9] 朱磊.挂篮悬浇与支架现浇连续梁施工工艺比选分析[J].江西建材,2022(3):137-138.  
ZHU Lei. Comparison and analysis of construction technology of hanging basket cantilever casting and support cast-in-place continuous beam[J]. Jiangxi Building Materials,2022(3):137-138.
- [10] 汪顺平,宁英杰.某大跨变截面连续箱梁桥施工工艺变更对比分析[J].青海交通科技,2016(3):67-71.  
WANG Shunping,NING Yingjie. Comparative analysis of construction technology changes of a large-span variable cross-section continuous box girder bridge[J]. Qinghai Traffic Technology,2016(3):67-71.
- [11] 单志雄,符文健,匡渝阳.连续钢构箱梁菱形挂篮与钢管支架施工及结构受力分析[J].湖南交通科技,2022,48(3):119-124.  
SHAN Zhixiong,FU Wenjian,KUANG Yuyang. Construction and structural stress analysis of diamond hanging basket and steel pipe support for continuous steel box girder[J]. Hunan Transportation Science and Technology,2022,48(3):119-124.
- [12] 滕炳杰.挂篮悬浇与大节段支架现浇方案对比分析[J].铁道工程学报,2012,29(6):55-58.  
TENG Bingjie. A comparative analysis of the cradle cantilever casting and large segmental support cast-in-place method[J]. Journal of Railway Engineering Society,2012,29(6):55-58.
- [13] 谢存仁,徐峰,阮敏浩.基于 BIM 与遗传算法的建筑工程施工进度多目标优化研究[J].工程管理学报,2021,35(3):117-122.  
XIE Cunren,XU Feng,RUAN Minhao. Study on multi-objective optimization of construction schedule based on BIM and genetic algorithm[J]. Journal of Engineering Management,2021,35(3):117-122.
- [14] 张梦.基于系统动力学的铁路桥梁工程工期-成本优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.  
ZHANG Meng. Research on construction period-cost optimization of railway bridge engineering based on system dynamics[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2019.
- [15] DEB K,JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I:Solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.

(下转第 134 页)