

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221193

基于 NSGA II-SVR 的大型箱涵施工进度方案优选

郝仕阳¹, 吴天齐², 吴鑫淼¹, 郟志红¹

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2. 国网北京市电力公司丰台供电公司, 北京 100071)

摘要: 水利工程项目施工方案的确是整个项目建设期间最重要的决策之一,对工程进度和成本有重要影响。通过考虑主要施工机械和班组配置对工期和成本的影响,建立 SVR 模型实现不同施工方案与对应工期及成本数据的模拟,在此基础上采用多目标遗传算法实现施工方案的优选,并以南水北调某输水箱涵工程为例,建立同时考虑工期和成本的优化模型,实现了工程施工方案的优选,验证了模型和方法的适用性和准确性。

关键词: 多目标遗传算法;SVR;大型箱涵;施工进度;优化

中图分类号: TV51

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0199-04

1 引言

水利工程是一项复杂的系统工程,在工程建设过程中必须利用施工方案指导具体施工。施工方案的选择,对工程的工期与成本有直接影响。因此,在多个施工方案中选择较优的方案是项目决策的首要任务^[1]。水利工程项目施工方案的优选最早是以工期最短为目标,BABU A J G 等^[2]认为只追求施工速度缩短工期的方法在施工完成后工程质量必定会受到影响,未综合考虑其他因素,有很大的局限性。在此基础上逐渐发展成以工期和成本、工期和资源为目标的优化决策。随着工程质量要求的提高,将工程质量作为优化目标之一,陆续开展工期、成本和质量均衡综合优化决策研究。为解决三者权衡优化问题,钟登华等^[3]建立基于 Pareto 解的工期-质量-成本模型;MOTA A 等^[4]通过构建多目标方法和多准则决策方法组成的框架,均优选出了符合工程实际的施工方案。这些方法均是利用智能算法求解由多个复杂目标函数构造的模型,目标函数构造的合理性直接影响优化结果。高兴夫等^[5]在分析工期、成本和质量关系后,提出假设条件,构造目标函数,建立多目标优化模型,并利用遗传算法求解;王博等^[6]在构造成本目标函数时将其简化为直接成本和间接成本两部分,并将工期和质量视

为线性关系,提出了动态优化模型;关宏艳等^[7]采用双指数函数和二次函数模拟工程工期与质量之间的关系,基于模糊理论实现了三者均衡优化。既有研究发现工期、成本与质量三者之间的关系复杂,并非简单的线性关系;尤其在项目成本的组成方面,通常是忽略次要因素计算时的变动性较大,使项目成本目标函数的建立难度增加。因此,为了简化目标函数复杂的构造过程,同时也能得到各方案的工期和成本,本文利用支持向量回归机(SVR)模拟施工方案与工期、成本之间的关系,在此基础上,利用遗传算法随机生成多个备选施工方案,以工期最短和成本最低进行多目标优化,根据工程实际情况选定最优施工方案,实例验证了该方案的适用性和准确性。

2 基于 SVR 的施工工期与成本预测

水利工程工期和成本往往需借助软件工具进行分析计算,当工程较复杂时,利用网络图技术可快速获取项目工期,但优化施工进度计划,使工期和成本达到最优的技术不太成熟。本文考虑不同施工方案对工期和成本的影响,借助软件工具计算典型工、料、机组合的工期和成本。根据典型组合的计算结果,作为输入和输出,建立基于 SVR 的项目工期和成本预测模型,以此代替复杂的网络图绘制过程,预测不同施工方案对应的工期和

收稿日期: 2022-06-06, **修回日期:** 2022-07-18

基金项目: 河北省水利科技计划项目(2022-13,2022-09,2020-53)

作者简介: 郝仕阳(1999-),男,硕士研究生,研究方向为水工结构优化,E-mail:1944355873@qq.com

通讯作者: 吴鑫淼(1972-),女,教授、硕导,研究方向为水工结构优化,E-mail:552110948@qq.com

成本,为工程方案的优选和施工管理提供有效数据支持。

2.1 基于流水施工网络图的箱涵施工进度模拟计算

SVR 模型训练样本的数量和准确性决定了预测精度。cc-project 软件将工程项目的全部施工流程划分成若干项工作,并按各项工作的开展顺序和相互制约关系绘制成网络图形。该软件还能从错综复杂的施工计划中找到关键工作和关键线路,基于项目管理目标对其不断改进和调整,进而实现网络计划优化,即实现工期的初步优化。在此基础上计算各初步优化的施工方案对应的工期和成本,为 SVR 预测模型提供更精确的训练样本数据。

2.2 基于 SVR 的机械、人工配置与工期和成本关系模拟

2.2.1 SVR 基本原理

支持向量回归机(SVR)^[8]基本原理为在给定训练数据 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)\} (x_i \in R_n, y_i \in R)$ 的情况下,求得一个回归模型 $f(x) = \omega^T x + b$ 可使得所有数据的拟合效果达到最优,其中 ω 为权重值, b 为位移项。与传统回归方法不同的是,SVR 认为只有 $f(x)$ 与 y 的偏离程度超过容忍度偏差 ϵ 才计算损失(图 1),当数据点在两条虚线内部时认为该模型预测正确,在虚线以外时需计算损失。

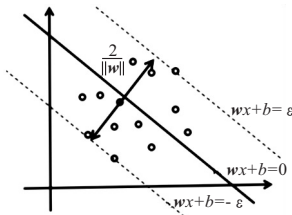


图 1 SVR 基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic principles of SVR

SVR 最优化问题用公式表示为:

$$\min_{\omega, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} y_i - \omega\varphi(x) - b \leq \epsilon + \xi_i & i = 1, 2, \dots, l \\ -y_i + \omega\varphi(x) + b \leq \epsilon + \xi_i^* & i = 1, 2, \dots, l \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0 & i = 1, 2, \dots, l \end{cases}$$

式中, C 为惩罚参数; ξ_i, ξ_i^* 均为松弛变量; ϵ 为容忍度偏差。

引入拉格朗日乘子求解式(1)的最优化问题得:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + b \quad (2)$$

式中, α_i, α_i^* 均为拉格朗日乘子; $K(x_i, x) =$

$\phi(x_i)^T \cdot \phi(x)$ 为核函数($\phi(\cdot)$ 为低维到高维的映射, $\phi(x_i)^T \cdot \phi(x)$ 为映射到高维特征空间后的内积)。

参考文献[9, 10], 径向基函数能处理数据之间复杂的规律性, 学习收敛速度快, 泛化能力强。因此, 在工期和成本预测时选用该核函数能高效快速地得到预测结果。

2.2.2 SVR 预测模型的构建

根据工程施工人员、机械和材料等配置情况, 确定多个可行的施工方案, 作为训练样本的输入; 利用 cc-project 绘制网络图, 快速读取各方案的工期, 并通过计算得到相应的成本, 作为 SVR 模型训练样本的输出; 对训练样本的数据进行预处理, 消除异常数据; 将处理后的样本用于模型训练及工期和成本预测, 用公式表示为 $T/C = \text{SVR}(m_1, m_2, \dots, m_i)$, 其中 T, C 分别为项目的工期、成本, m_i 为工、料、机等影响因素; 以均方误差 M_{MSE} 作为 SVR 模型的评价参数, 计算实际值与预测值相对误差。

3 基于多目标遗传算法(NSGA-II)的施工进度计划优化

3.1 多目标优化

在水利工程项目管理过程中, 需综合考虑工期和成本等多个目标之间的优化, 使各控制目标达到均衡, 属于多目标优化问题的研究范畴。由于各目标函数之间既关联又矛盾, 一个目标的改变可能会导致一个或多个其他目标的改变。因此, 不可能有一个能使所有目标性能达到最佳的解决方案, 最终的解通常是一组非劣解——Pareto 解集。

3.1.1 多目标优化问题的描述

在给定的可行域内, 找到一系列满足问题约束条件的最优解集的过程称为多目标优化问题求解, 可表述为:

$$\begin{aligned} \max/\min y &= f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (3) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \\ y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \\ h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \end{aligned}$$

式中, x 为 n 维决策变量; y 为目标函数; m 为优化目标总数; $f_i(x) (i = 1, 2, \dots, m)$ 为子目标函数; $g_i(x), h_j(x)$ 均为约束条件; X 为可行域; Y 为目标函数值的取值范围, 本文指工期的期限

或成本的范围。

3.1.2 多目标优化模型的构建

结合数学模型,建立工程项目工期和成本多目标优化模型为:

$$\min T; \min C \quad (4)$$

$$s. t. \begin{cases} 0 \leq T \leq T' \\ 0 \leq C \leq C' \\ 0 \leq k_i \leq K_i \quad i = 1, 2, \dots, q \end{cases}$$

式中, T' 、 C' 分别为项目工期、成本的上限值; k_i 为第 i 种资源用于施工的数量; K_i 为施工单位第 i 种资源的供应能力。

工期和成本优化模型以最小化工期和成本作为目标函数,在计算目标函数值时,利用训练后的 SVR 模型预测不同施工方案对应的工期和成本,简化了目标函数与施工机械及班组数之间函数关系的构造过程,可通过预测直接得到不同施工方案对应的工期和成本数据。

3.2 多目标优化问题的求解

利用遗传算法求解工期和成本多目标优化问题的基本原理是将随机生成的施工方案进行遗传操作,选择出适应度值高的子代,进行交叉、变异操作形成下一代,逐代优化直至满足收敛条件,生成非劣解集。

基于 Matlab 软件实现工期和成本多目标问题的求解,基本步骤如下。

步骤 1 根据实际工程确定优化目标,建立适应度函数,寻求约束条件,选取遗传算法参数。

步骤 2 对于遗传算法生成的多个备选方案,利用 SVR 程序预测其相应的工期和成本,并将数据存储于结构体中,以便在个体适应度评价时直接调用。

步骤 3 结合应用背景评价优化后的结果,选用符合工程实际进度的施工方案。

4 实例分析

以南水北调工程某段长为 450 m 的箱涵工程为例,该段工程由 30 个长为 15 m 的标准段组成,按先底板后边墙及顶板的顺序施工。收集箱涵工程相关资料后可确定每段主要施工工序为垫层、底筋、底模、底砣、台车就位、顶钢筋、模板止水、侧顶砣浇筑,各工序的持续时间分别为 1.0、2.0、2.5、1.0、1.0、1.5、1.0、1.0 d。

4.1 SVR 模型训练

在箱涵施工过程中,影响工期和成本的主要因素为台车数量 B 、混凝土施工班组数 H 、钢筋

施工班组数 G 。利用 cc-project 软件绘制各因素不同取值情况下的流水网络图,进而得到相应的工期和成本,其中 2 辆台车、1 班混凝土工和 1 班钢筋工的网络图见图 2。

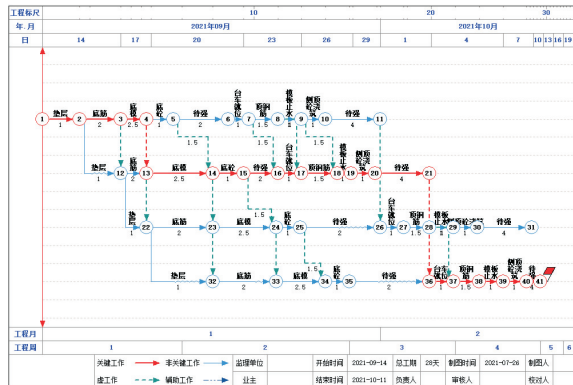


图 2 2 辆台车和 1 个施工班组流水网络图

Fig. 2 Flow network diagram of 2 trolleys and 1 construction team

将各因素的数据进行归一化处理作为输入,各方案对应的工期 T 和成本 C 作为输出,数据整理后得到 SVR 模型的训练样本,见表 1。

表 1 训练样本

Tab. 1 Training sample

方 案	B/ 辆	H/ 班	G/ 班	T/ d	C/ 万元	方 案	B/ 辆	H/ 班	G/ 班	T/ d	C/ 万元
1	2	2	2	149.0	156	9	4	2	2	126.5	147
2	2	2	1	150.0	151	10	4	2	1	128.0	143
3	2	1	2	155.5	148	11	4	1	2	130.0	141
4	2	1	1	156.0	143	12	4	1	1	130.5	136
5	3	2	2	131.0	149	13	5	2	2	118.0	140
6	3	2	1	135.0	146	14	5	2	1	120.0	145
7	3	1	2	136.0	143	15	5	1	2	124.5	139
8	3	1	1	139.0	138						

在 SVR 程序中,将 B 、 H 、 G 作为输入, T 、 C 作为输出训练模型,模型参数寻优及预测结果见图 3。图 3 中, c 为惩罚参数; g 为核参数; $C_{V_{mse}}$ 为均方误差。

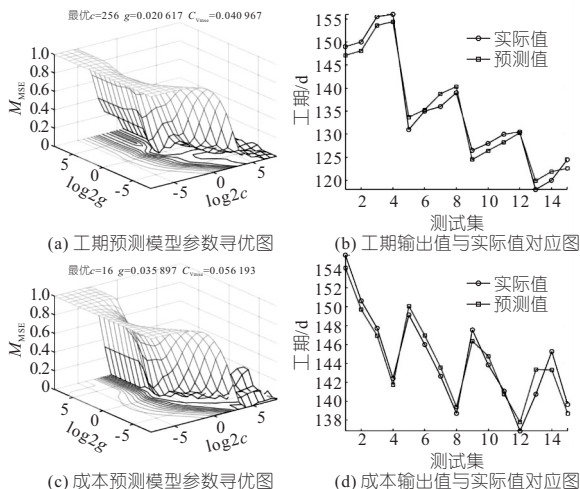


图 3 模型参数寻优及预测结果

Fig. 3 Model parameter optimization and predicting results

由图 3(b)、(d)可看出,SVR 模型经参数寻优后拟合效果较好,此模型可用来预测工程其他施工方案的工期和成本。

4.2 SVR 模型预测效果验证

当箱涵工程长度增加时,通过增加施工机械和人员配置来满足施工需求。因此,当工程量增加时,将其可行的施工方案做为检验样本的输入数据,检验样本见表 2。

表 2 检验样本施工方案

Tab. 2 Inspection sample construction scheme

方案	B/辆	H/班	G/班	方案	B/辆	H/班	G/班
16	6	2	2	19	7	2	3
17	6	2	1	20	8	3	2
18	6	1	2				

利用训练后的模型预测检验样本施工方案的工期和成本,并计算实际值与预测值的相对误差,见表 3。

表 3 SVR 预测模型相对误差

Tab. 3 Relative error of SVR prediction model

方 案	实际 值/d	预测 值/d	工期相对 误差/%	实际值 /万元	预测值 /万元	成本相对 误差/%
16	111.0	112	0.90	142.08	141.85	-0.16
17	117.0	116	-0.85	140.43	140.65	0.16
18	122.5	121	-1.22	139.11	139.33	0.16
19	106.0	105	-0.94	143.61	143.38	-0.16
20	95.0	96	1.05	140.99	141.22	0.16

由表 3 可知,SVR 模型预测工期、成本的相对误差分别在 2%、1%以内,预测效果理想。由于项目工期和成本的影响因素复杂,工人的熟练程度、材料价格的波动等均为产生误差的原因。

4.3 多目标遗传算法求解问题

根据多目标问题的求解步骤,可确定本文优化目标为最小化工期和最小化成本,对于最小化问题,适应度函数应越大越好,故选用目标函数的负数作为适应度函数。根据施工资料可知,台车数量不超过 8 辆,钢筋和混凝土班组数均不超过 3 班,以此作为约束条件生成遗传个体。利用多目标遗传算法求解模型得到最优解集见图 4。

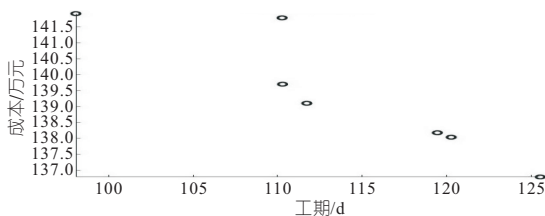


图 4 多目标遗传算法 Pareto 解

Fig. 4 Pareto solution for multi-objective genetic algorithm

由图 4 可知,工期与成本之间的关系十分紧密。对于箱涵工程,若施工时间不同,其成本也就

不同,两者在一定范围内呈反比关系,即工期越短,成本就越高。当工期缩短到一定程度后,再增加机械和人力便不会使工期缩短;较长的施工周期非但无法降低成本,相反会导致资源浪费,从而增加成本。因此,在最终施工方案选择时应根据考虑目标的不同,从最优解集中选择不同的优化方案。将图 4 中解集导出 Excel,具体施工方案配置及其相应的工期和成本见表 4,施工单位可根据实际情况和具体要求从最优解集中选择最终的优化施工方案。

表 4 施工方案最优解集

Tab. 4 Optimal solution set for construction scheme

优化方案	T/辆	H/班	G/班	工期/d	费用/万元
1	7	1	2	120	138.04
2	8	2	3	110	141.78
3	8	3	2	98	141.92
4	6	1	1	126	136.79
5	7	2	2	110	139.70
6	6	1	2	119	138.18
7	8	2	2	112	139.10

5 结论

a. 基于 SVR 建立预测模型,能在工程前期有效预测工程工期和成本,为施工方案的优选提供数据支持。为提高预测精度,SVR 预测模型的影响因素需进一步拓展。

b. 利用遗传算法求解工期-成本多目标优化问题,实现了施工方案的自动优选,避免了人工比较分析,提高了优化效率,可直接从最优解集中选用与工程实际相符的方案。

参考文献:

[1] 聂相田,李亚伟.水电工程施工方案的模糊优选[J].水电能源科学,2006,24(3):46-48.

[2] BABU A J G, SURESH N. Project management with time cost and quality considerations[J]. European journal of operational research,1996,88(2):320-327.

[3] 钟登华,李正,吴斌平,等.基于 Pareto 解的面板堆石坝施工工期-质量-成本均衡优化研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1001-1007.

[4] MOTA A, ÁVILA P, ALBUQUERQUE R, et al. A framework for time-cost-quality optimization in project management problems using an exploratory grid concept in the multi-objective simulated-annealing[J]. International journal of information technology & decision making,2021,20(4):1095-1120.

的 σ, ϵ 最大, $\alpha=0^\circ, 45^\circ$ 时 σ, ϵ 最小。

d. 裂隙在大理岩处时发生“H形破坏”, 表面剥落在砂岩和大理岩中均有发生, 但砂岩处破坏更明显; 裂隙在交界面时, 发生“y形破坏”, 裂隙在砂岩处时, 发生“1 γ 形破坏”, 裂隙在这两种位置时, 剥落现象只发生在砂岩处。当 $\alpha=0^\circ$ 时均发生“H形破坏”, 当 $\alpha=90^\circ$ 时均发生“y形破坏”, 当 $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时破坏表现相近。

参考文献:

[1] LIU J, WANG E, SONG D, et al. Effect of rock strength on failure mode and mechanical behavior of composite samples[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(7):4527-4539.

[2] CHENG J, YANG S, CHEN K, et al. Uniaxial

experimental study of the acoustic emission and deformation behavior of composite rock based on 3D digital image correlation (DIC)[J]. ACTA mechanica sinica, 2017, 33(6):999-1021.

[3] 王其虎, 王杰, 叶义成, 等. 复合岩样中单裂隙几何特征对其破坏模式及强度的影响[J]. 金属矿山, 2020(2):134-140.

[4] 杜超超, 温森, 孔庆梅. 一维动静组合加载下复合岩样动态力学特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21):168-178, 206.

[5] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制与力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1):84-92.

[6] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.

Effect of Single Fissure Distribution on Mechanical Properties and Propagation Failure of Composite Rock Samples

ZHANG De-chao¹, XIAO Tao-li¹, ZHANG Da-fei², SHE Hai-cheng¹
(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434000, China;
2. Chengdu Dingjia Energy Technology Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: Fissure distribution has a significant effect on mechanical properties and damage failure of layered rock mass with complex fissures. Based on the uniaxial compression test and DIC technique, the influence of fissure location and fissure angle on the mechanical properties and failure of the composite fissure rock sample composed of sandstone-like and marial-like rocks was analyzed. The results show that the mechanical properties of composite fissure rock samples increase with the change of fissure location from sandstone, interface and marble and the increase of fissure angle. Influence of fissure location on rock sample failure: When the fissure is in marble, the initial crack is easy to be the far-field crack in sandstone, and the surface spalling occurs in both sandstone and marble, but the failure is more obvious in sandstone, is prone to "H-shaped failure". When the fissure is at the interface and sandstone, it is easy to produce wing crack and anti-wing crack at the crack tip of sandstone. Exfoliation occurs only in sandstone, "1 γ shape failure" and "y shape failure" are easy to occur, respectively. At the same time, the stress-strain levels σ and ϵ corresponding to the initial crack generation at the same fissure angle increase with the change of fissure position from sandstone, sandstone to marble and marble. Influence of fissure angle on rock sample failure: When $\alpha=90^\circ$, the tip is not easy to crack, and when $\alpha=45^\circ$, the tip is easy to crack. When the fissure location is the same, the σ and ϵ of $\alpha=90^\circ$ are the largest, while the σ and ϵ of $\alpha=0^\circ$ and $\alpha=45^\circ$ are the smallest. "H-shaped failure" occurs when $\alpha=0^\circ$ and "y-shaped failure" occurs when $\alpha=90^\circ$. The research results are instructive for practical engineering construction and design.

Key words: composite rock sample; precast crack; fissure angle; crack location; failure mode

(上接第 202 页)

[5] 高兴夫, 胡程顺, 钟登华. 工程项目管理的工期-费用-质量综合优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007(10):112-117.

[6] 王博, 郜军艳, 聂相田, 等. 综合成本-质量-完工风险的水利工程进度优化[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2):267-272.

[7] 关宏艳, 李宗坤, 王娟, 等. 水利工程模糊多模式工期-成本-质量均衡优化[J]. 水力发电学报, 2015, 34(7):80-87.

[8] 孙轶轩, 邵春福, 计寻, 等. 基于 ARIMA 与信息粒化

SVR 组合模型的交通事故时序预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(3):348-353, 359.

[9] WANG J, JIANG Z, LI F, et al. The prediction of water level based on support vector machine under construction condition of steel sheet pile cofferdam [J]. Concurrency and computation: Practice and experience, 2021, 33(5):e6003.

[10] 王秋生, 邓洪森, 周鹏展. 基于最小二乘支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测方法[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1):120-123.

Optimization of Construction Schedule of Large Box Culvert Based on NSGA II -SVR

HAO Shi-yang¹, WU Tian-qi², WU Xin-miao¹, QIE Zhi-hong¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China;
2. Fengtai Power Supply Company of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100071, China)

Abstract: The determination of water conservancy project construction scheme is one of the most important decisions during the whole project construction period, which has an important impact on the progress and cost of the project. Considering the influence of main construction machinery and team configuration on construction period and cost, this paper established SVR model to simulate different construction schemes and corresponding construction period and cost data, and used multi-objective genetic algorithm to optimize construction schemes. Taking a box culvert project of South-to-North Water Transfer as an example, optimization model was established considering both construction period and cost. The optimization of project construction scheme was realized, and the applicability and accuracy of the model and method were verified.

Key words: multi-objective genetic algorithm; support vector regression machine; large box culvert; construction progress; optimization