

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0073

张晔楠, 韩沐轩. 改进蚁群算法及其在水利工程项目管理中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 171-176, 184.
ZHANG Y N, HAN M X. Improved ant colony algorithm and its application in water conservancy project management[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 171-176, 184. (in Chinese)

改进蚁群算法及其在水利工程项目管理中的应用

张晔楠¹, 韩沐轩²

(1. 浙江同济科技职业学院 建筑工程系, 杭州 311231; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了更加有效解决水利工程项目管理中的多目标决策问题, 提出了一种改进蚁群算法。该算法首先利用遗传算法的全局搜索能力将信息素初始化, 然后在算法进行遍历过程中引入变异操作和交叉操作, 提高算法的鲁棒性和有效性。水利工程项目多目标优化案例分析表明, 较传统遗传算法和蚁群算法, 本文提出的方法对于解的寻找速度更快, 解的质量更高, 该算法具有较高的全局寻优能力。该研究为水利工程项目管理多目标决策问题的解决提供了一种新的思路和方法。

关键词: 水利工程; 改进蚁群算法; 项目管理; 多目标决策

中图分类号: TV512 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved ant colony algorithm and its application in water conservancy project management

ZHANG Yenan¹, HAN Muxuan²

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to improve the multi-objective decision effectively in water conservancy project management, an improved ant colony optimization algorithm was proposed. In this algorithm, pheromone was initialized using the global search ability of genetic algorithm, and the mutation operation and crossover operation were introduced to improve the efficiency of the optimal solution. Engineering case study showed that the improved algorithm can quickly converge to achieve optimal solution and guarantee the quality of solution. In comparison with the genetic algorithm and ant colony algorithm, it has better optimization ability for multi-objective decision-making problem. This study provides a new method for water conservancy project management.

Key words: water conservancy project; improved ant colony algorithm; project management; multi-objective decision-making

随着社会发展和科学技术的不断进步, 水利工程建设项目中, 成本、质量、资源、安全和环境等多个因素相互影响, 资源优化与均衡分配逐渐成为工程项目管理中的核心问题^[1]。在为解决这一问题, 结

合仿生学、遗传学以及人工智能等学科, 国内外许多学者对资源的均衡优化进行了大量深入的研究, 提出了许多新的优化方法。如 TOGAN 等^[2]采用教学优化算法对工期-费用进行了优化。RAZAVI

收稿日期: 2019-01-10 修回日期: 2019-03-18 网络出版时间: 2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190321.1531.021.html>

基金项目: 浙江省 2016 年度水利厅水利科技项目(RC1620); 河北省自然科学基金(E2012402030)

作者简介: 张晔楠(1984—), 女, 河北平山人, 讲师, 主要从事工程管理、结构工程方面研究。E-mail: 17075219@qq.com

通信作者: 韩沐轩(1996—), 女, 河北邯郸人, 主要从事计算智能理论及应用方面研究。E-mail: hmxdmn@163.com

等^[3]建立了项目进度、费用和质量分析模型。TOL-UNAY^[4]采用模糊数学对工程项目多目标优化进行了分析。PATHAK^[5]采用模糊层次分析法对项目进度与费用进行了分析。BETTEMIR 等^[6]采用模拟退火和遗传算法对资源受限问题进行了分析。ALI SALMASNIA 等^[7]对进度、费用、质量进行了分析。RADAVILELA 等^[8]采用蚁群算法分析了进度控制问题。GOYAL^[9]提出了时间-费用分析模型。AMMAR^[10]对时间-费用问题进行了分析。MOHAMMAD 等^[11]对资源受限的多项目时间、进度问题进行了分析。国内,刘晓峰等^[12]采用微粒群算法对项目质量、费用和工期综合优化。刘素芹等^[13]采用蚁群算法进行了分析。马晓虹等^[14]提出基于服务质量的云 workflow 调度优化算法。王文东等^[15]对基于蚁群算法的云计算资源调度研究进行了分析。李洪波^[16]分析了资源均衡分配的研究现状。李雪淋等^[17]采用遗传算法对多目标优化进行了分析。刘万军等^[18]提出改进蚁群算法并应用于服务器集群资源调度。伊长生等^[19]利用模糊规划对工期-成本-质量进行了优化。周艳^[20]对项目工期、成本、质量进行了综合优化。崔文俊等^[21]分析了工程项目工期成本管理存在的问题,提出工程项目工期成本管理以及成本质量优化方案。聂增民等^[22]对工期-成本进行了优化。王艳婷等^[23]对随机多模式项目调度进行了分析。牟强等^[24]研究了固定工期下大中型工程完工成本。刘玘玘等^[25]采用蚁群算法对水资源优化配置进行了博弈分析。以上研究,均有力推动了成本、质量、资源、安全等协同管理的发展,但在水利工程多目标综合优化方面,仍需进一步深入研究。

鉴于此,利用遗传算法全局搜索能力及蚁群算法较强的鲁棒性,本文将两种算法相融合,提出了一种改进蚁群算法(improved ant colony algorithm, IACO)。该算法首先通过遗传算法的全局搜索能力将信息素初始化,然后在蚁群算法进行遍历过程中增加变异操作和交叉操作,并应用 TSP 样本案例库 TSPLIB 中的数据进行仿真分析。本文在传统的多目标模型分析的基础上,提出一种新的质量、工期、成本、安全模型,引入适应度函数,将四个要素综合考虑,避免了带有主观性的权重分析,建立多目标优化模型和适应度函数进行仿真实验,结果表明将 IACO 应用到多目标决策问题中,可合理安排各活动的实际时间及资源使用情况,得到最满意的决策方案,为工程项目管理提供参考。

1 改进蚁群算法

1.1 改进蚁群算法的基本思想

蚁群算法(ant colony algorithm, ACO)是一种新兴的寻优算法,具有分布性、全局性和并行性收敛的能力^[26]。其工作原理是通过信息素的累积和更新,但信息素初始时积累较慢,导致搜索初期信息素积累时间较长,特别是当群体规模较大时,算法起始速度慢,且搜索到一定程度时,所有解趋向一致,不能进一步地对可行解空间进行搜索而发现更优解。而遗传算法(genetic algorithm, GA)中,交叉和变异操作使算法具有很强的随机搜索能力^[27]。

本文采用遗传算法对蚁群算法的初始化过程进行改进,然后在算法进行遍历过程中引入变异操作和交叉操作,增加种群的多样性,避免算法的早熟,提高算法的鲁棒性和获得最优解的效率。

1.2 算法改进

步骤 1 利用遗传算法产生一个较优解,在各路径上留下初始信息素。

步骤 2 定义适应度函数、种群数目、迭代次数及各参数。

步骤 3 $i=i+1$ 。

步骤 4 基本蚁群算法寻优。

步骤 5 根据交叉概率,选择若干组解,然后分组进行交叉的解,若新的目标函数变好,接受新值,否则就拒绝。

步骤 6 根据变异概率,判断是否变异,变异后的目标函数变好,接受新值,否则就拒绝。

步骤 7 计算各蚂蚁的适应度函数值 L_k ($k=1, 2, \dots, m$),记录当前的最优解。

步骤 8 对适应度函数 L_k 小于给定值的路径,按 $\tau_{ij}(t+1)=\rho \cdot \tau_{ij}(t)+\sum \Delta \tau_{ij}^k(t)$ 进行信息素的更新,并进行轨迹强度的修改。

步骤 9 若 $i <$ 预定的迭代次数且无退化行为(即找到的都是相同解),则转步骤 3。

步骤 10 若 $i >$ 预定的迭代次数且无退化行为,然后判断 $|L_{k+1}-L_k| < A$,若前后两次解在一定范围内则输出目前最好解,否则转步骤 3。

改进蚁群算法流程见图 1。

2 案例分析

为了进一步验证方法对于水利工程项目管理的有效性,采用本文方法对某水利扩建工程进度管理进行了分析。

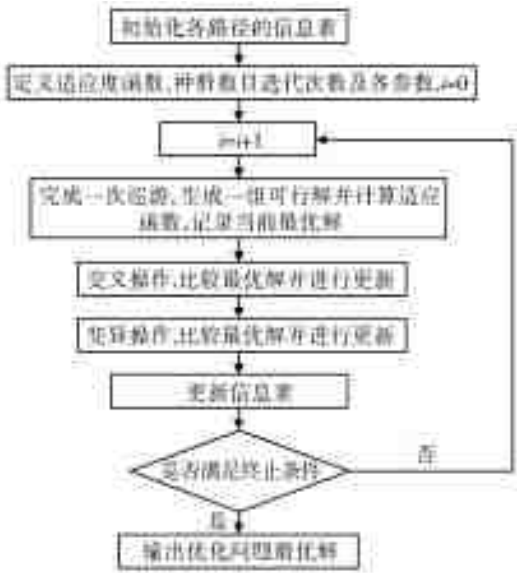


图1 改进蚁群算法流程

Fig.1 Flow chart of the improved ant colony algorithm

2.1 案例概况

某水利改扩建工程某段长 11.562 km,工程总投资预算为 2 818 万元。地面高程一般在 3.0~13.4 m,高差 10.0 m 左右。输水渠沿线揭露元古界基岩岩性主要为石英岩、云母变粒岩、片岩、粗粒片麻状花岗岩;中生界基岩岩性主要为凝灰岩、玄武岩、泥岩、泥质粉砂岩、砂岩;新生界基岩岩性为泥岩。渠道边坡上部组成岩性为黏性土,边坡为冻胀性土基。改扩建工程该段主要施工的工程内容是改造现有的输水渠道,包括对输水渠衬砌的改造翻新,对渠底淤泥的清淤工程,衬砌底防水、保温的铺设,堤身加固,泥结碎石工程等^[28]。

2.2 进度-费用优化

优化前的施工甘特图见图 2,工作持续间及逻辑关系分析见表 1。

序号	工作内容	10月								11月							
		4	8	12	16	20	24	28	31	4	8	12	16	20	24	28	30
1	初砌拆除																
2	保温、防渗、集水设备的拆除																
3	渣体外运																
4	渠底清淤																
5	淤泥外运																
6	堤基施工																
7	坝身填筑																
8	渠道整坡和削坡																
9	渠底整平																
10	排水设备安装																
11	保温、防渗层铺装																
12	混凝土衬砌板铺																
13	摊铺碎石																
14	浇灌泥浆及洒嵌缝料																
15	碾压																

图2 施工甘特图

Fig.2 Construction Gantt chart

相应双代号网络计划图,见图 3。

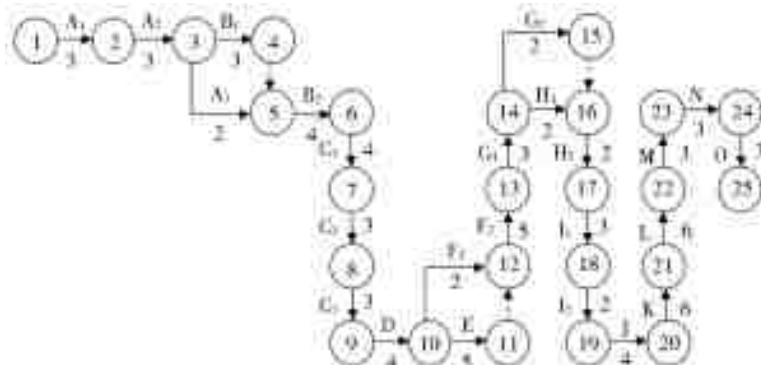


图3 双代号网络计划

Fig.3 Double code network plan

表 1 工作持续时间及逻辑关系

Tab. 1 Work duration and logical relationship

工作名称	代号	持续时间/ d	紧前 工作	紧后 工作
衬砌拆除 1 段	A ₁	3	—	A ₂
衬砌拆除 2 段	A ₂	3	A ₁	A ₃ , B ₁
衬砌拆除 3 段	A ₃	2	A ₂	B ₂
保温、防渗、集水设备的拆除 1	B ₁	3	A ₂	B ₂
保温、防渗、集水设备的拆除 2	B ₂	4	A ₃ , B ₁	C ₁
渣体外运 1 段	C ₁	4	B ₂	C ₂
渣体外运 2 段	C ₂	3	C ₁	C ₃
渣体外运 3 段	C ₃	3	C ₂	D
渠底清淤	D	4	C ₃	E, F ₁
淤泥外运	E	5	D	F ₂
堤基施工 1 段	F ₁	2	D	F ₂
堤基施工 2 段	F ₂	5	E, F ₁	G ₂
坝身填筑 1 段	G ₁	3	F ₂	G ₂ , H ₁
坝身填筑 2 段	G ₂	2	G ₁	H ₂
渠道整坡和削坡 1 段	H ₁	2	G ₁	H ₂
渠道整坡和削坡 2 段	H ₂	2	G ₂ , H ₁	I ₁
渠底整平 1 段	I ₁	3	H ₂	I ₂
渠底整平 2 段	I ₂	2	I ₁	J
排水设备安装	J	4	I ₂	K
保温、防渗层铺装	K	6	J	L
混凝土衬砌板铺	L	6	K	M
摊铺碎石	M	3	L	N
浇灌泥浆及洒嵌缝料	N	3	M	O
碾压	O	3	N	—

表 2 改进后工作持续时间及逻辑关系

Tab. 2 Improved work duration and logical relationship

工作名称	代号	持续时间/ d	紧前 工作	紧后 工作
衬砌拆除 1 段	A ₁	1	—	A ₂ , C ₁
衬砌拆除 2 段	A ₂	1	A ₁	A ₃ , B ₁ , C ₂
衬砌拆除 3 段	A ₃	2	A ₂	B ₂ , C ₃
保温、防渗、集水设备的拆除 1	B ₁	2	A ₂ , C ₁	B ₂ , C ₃
保温、防渗、集水设备的拆除 2	B ₂	2	A ₃ , B ₁	D, E
渣体外运 1 段	C ₁	1	A ₁	B ₁ , C ₂
渣体外运 2 段	C ₂	2	A ₂ , C ₁	C ₃
渣体外运 3 段	C ₃	2	A ₃ , B ₁ , C ₂	D, E
渠底清淤	D	4	B ₂ , C ₃	F ₁
淤泥外运	E	4	B ₂ , C ₃	F ₁
堤基施工 1 段	F ₁	2	D, E	F ₂ , G ₁
堤基施工 2 段	F ₂	1	F ₁	G ₂
坝身填筑 1 段	G ₁	1	F ₂	G ₂
坝身填筑 2 段	G ₂	1	F ₂ , G ₁	H ₁
渠道整坡和削坡 1 段	H ₁	1	G ₂	H ₂ , I ₁
渠道整坡和削坡 2 段	H ₂	1	H ₁	I ₂
渠底整平 1 段	I ₁	1	H ₁	I ₂
渠底整平 2 段	I ₂	1	H ₂ , I ₂	J ₁
排水设备安装 1 段	J ₁	1	I ₂	J ₂ , K ₁
排水设备安装 2 段	J ₂	1	J ₁	K ₂ , L ₁
保温、防渗层铺装 1 段	K ₁	1	J ₁	K ₂ , L ₁
保温、防渗层铺装 2 段	K ₂	1	K ₁ , I ₂	L ₂
混凝土衬砌板铺 1 段	L ₁	1	K ₁ , I ₂	L ₂
混凝土衬砌板铺 2 段	L ₂	3	K ₂ , L ₁	M
摊铺碎石	M	2	L	N
浇灌泥浆及洒嵌缝料	N	2	M	O
碾压	O	2	N	—

采用本文算法,优化后的施工甘特图见图 4。
优化后的工作的持续时间和逻辑关系分析见表 2。

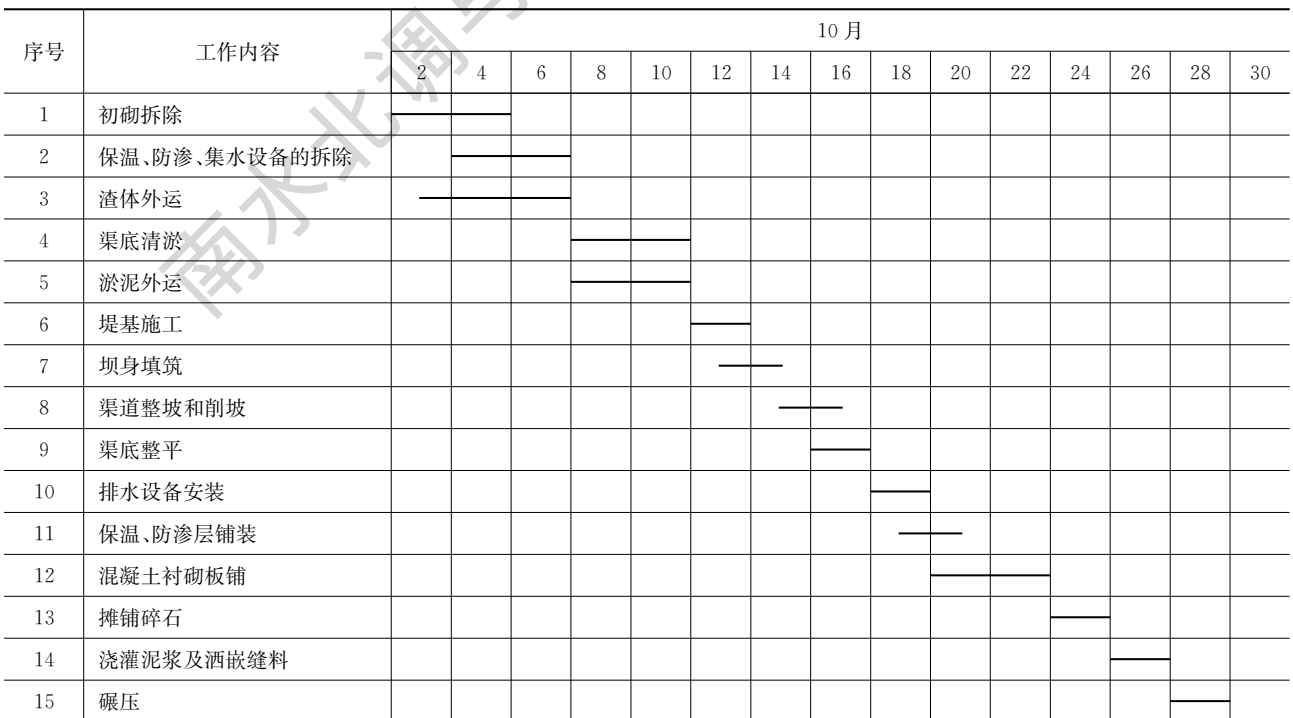


图 4 改进后施工甘特图

Fig. 4 Improved post-construction chart

优化后的双代号网络见图 5。

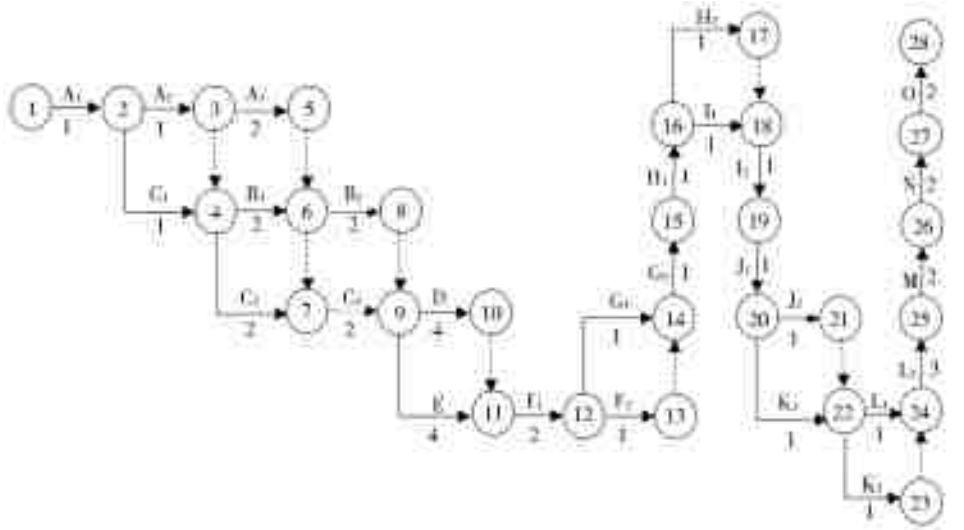


图 5 改进后双代号网络计划

Fig. 5 Improved double code network plan

优化后的工期为 29 d,比预期工期提前 45 d 完成,大幅压缩了工期。案例的成功应用,也证明了本文所提出的方法的有效性。

3 结论

本文在传统的多目标决策模型分析的基础上,提出一种新的质量、工期、成本、安全模型,引入适应度函数,将四个要素综合考虑,避免了带有主观性的权重分析,建立多目标优化模型和适应度函数。利用遗传算法的快速全局搜索能力以及蚁群算法较强的鲁棒性,将两种算法进行改进和融合,利用遗传算法的全局搜索能力将信息素初始化,在蚁群算法进行遍历过程中增加变异操作和交叉操作,提出了一种改进蚁群算法(IACO)。TSP 样本案例库仿真试验结果表明,改进蚁群算法(IACO)具有良好的鲁棒性,不易陷入局部最优,且其收敛到最优解的速度也较快,求解效率高。项目多目标优化问题的解决表明,采用改进蚁群算法求解多目标决策问题时,算法全局寻优能力增强,求解质量较高,实现了预期的目标。鉴于工程项目的复杂性,蚁群算法在工程实践中的应用还有很多方面值得研究,比如初始参数的设置、不同的交叉概率和变异概率对算法的影响等还需要作进一步研究和探讨。

参考文献(References):

[1] 向玉华,郑霞忠,卢意力. 基于熵权可拓物元的水电工程施工质量评价[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 177-182. (XIANG Y H, ZHENG X Z, LU Y L. Evaluation of hydropower project construction quality based

on entropy-weight and matter-element model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 26(4): 180-187. (in Chinese). DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.02.031.

- [2] TOGAN V, EIRGASH M A. Time-cost trade-off optimization of construction projects using teaching learning based optimization[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(1): 10-20. DOI 10.1007/s12205-018-1670-6.
- [3] RAZAVI H S H, MAHDIRAJI H A, HASHEMI S S. A hybrid model of fuzzy goal programming and grey numbers in continuous project time, cost, and quality trade off[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 117-126. DOI 10.1007/s00170-013-5463-2.
- [4] TOLUNAY G. Solution of fuzzy multi-objective project crashing problem[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23(7-8): 2167-2175. DOI: 10.1007/s00521-012-1167-z.
- [5] PATHAK B K, SRIVASTAVA S. Integrated Fuzzy-HMH for project uncertainties in time-cost tradeoff problem[J]. Applied Soft Computing, 2014, 21(8): 320-329. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.03.035.
- [6] BETTEMIR Ö H, SONMEZ, R. Hybrid genetic algorithm with simulated annealing for resource-constrained project scheduling[J]. Journal of Management in Engineering, 2015, 31(5): 040140821-040140828. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000323.
- [7] SALMASNIA A, MOKHTARI H, NAKHAI K A I. A robust scheduling of projects with time, cost, and quality considerations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(5-8): 631-

642. DOI:10.1007/s00170-011-3627-5.
- [8] RADAVILELA J, CHICA M, CORDÓN Ó, et al. A comparative study of multi-objective ant colony optimization algorithms for the time and space assembly line balancing problem[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2013, 13(11):4370-4382. DOI:10.1016/j.asoc.2013.06.014.
- [9] GOYAL S K. A simple time-cost tradeoff algorithm[J]. *Production Planning & Control*, 1996, 7(1):104-106. DOI:10.1080/09537289608930331.
- [10] AMMAR M A. Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cash flows[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(1):65-71. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000256.
- [11] MOHAMMAD J T, AMIRI F R H, EHSAN E, et al. Multi-project Time-cost optimization in critical chain with resource constraints[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(10):3738-3752. DOI:10.1007/s12205-017-0691-x.
- [12] 刘晓峰, 陈通, 张连营. 基于微粒群算法的工程项目质量、费用和工期综合优化[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10):122-126. (LIU X F, CHEN T, ZHANG L Y. Application of PSO to multiple-objective project optimization[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10):122-126. (in Chinese)) DOI:10.15951/j.tmgcxb.2006.10.021.
- [13] 刘素芹, 张千, 王俊爽. 一种提高集群调度性能的改进型蚁群算法[J]. *计算机系统应用*, 2018, 27(7):173-176. (LIU S Q, ZHANG Q, WANG J S. Improved ant colony algorithm for improving performance of cluster scheduling[J]. *Computer Systems & Applications*, 2018, 27(7):173-176. (in Chinese)) DOI:10.15888/j.cnki.csa.006408.
- [14] 马晓虹, 韩强, 辛阔. 基于服务质量的云 workflow 调度优化算法[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(1):151-159. (MA X H, HAN Q, XIN K. Cloud workflow scheduling optimization algorithm based on QoS[J]. *Computing Engineering and Design*, 2018, 39(1):151-159. (in Chinese)) DOI:10.16208/j.issn1000.7024.2018.01.027.
- [15] 王文东, 刘继梅. 基于蚁群算法的云计算资源调度研究综述[J]. *电脑知识与技术*, 2017, 13(23):161-163. (WANG W D, LIU J M. Research on cloud computing resource scheduling based on ant colony algorithm[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2017, 13(23):161-163. (in Chinese)) DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2017.2434.
- [16] 李洪波, 熊励, 刘寅斌. 项目资源均衡研究综述[J]. *控制与决策*, 2015, 30(5):769-779. (LI H B, XIONG L, LIU Y B. A literature survey of project resource leveling[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5):769-779. (in Chinese)) DOI:10.13195/j.kzyjc.2014.1330.
- [17] 李雪淋, 王卓甫, 刘晓平, 等. 基于向量评价遗传算法的工程项目多目标优化[J]. *水运工程*, 2007, (11):9-11. (LI X L, WANG Z F, LIU X P, et al. Application of VEGA to multiple-objective project optimization[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2007, (11):9-11. (in Chinese)) DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2007.11.022.
- [18] 刘万军, 王晓宇, 曲海成, 等. 基于改进蚁群算法的服务器集群资源调度研究[J]. *微电子学与计算机*, 2016, 33(3):98-102. (LIU W J, WANG X Y, QU H C. Research on server cluster resource scheduling based on improved ant colony algorithm[J]. *Microelectronics & Computer*, 2016, 33(3):98-102. (in Chinese)) DOI:10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2016.03.021.
- [19] 伊长生, 高建炳. 基于模糊规划的工程项目工期—成本—质量均衡优化研究[J]. *工程管理学报*, 2015, 29(1):129-133. (YI C S, GAO J B. Time-cost-quality trade-off optimization for construction projects based on fuzzy programming[J]. *Journal of Engineering Management*, 2015, 29(1):129-133. (in Chinese)) DOI:10.13991/j.cnki.jem.2015.01.025.
- [20] 周艳. 关于工程项目工期、成本、质量综合优化的思考[J]. *工程建设*, 2008, 40(4):37-41. (ZHOU Y. Analysis of integrated time-cost-quality optimization in construction project[J]. *Engineering Construction*, 2008, 40(4):37-41. (in Chinese)) DOI:10.13402/j.gejs.2008.04.012.
- [21] 崔文俊, 何恒冠, 余勇. 论工程项目工期成本质量综合优化[J]. *价值工程*, 2018(22):48-49. (CUI W J, HE H G, YU Y. On comprehensive optimization of project duration, cost and quality[J]. *Value Engineering*, 2018(22):48-49. (in Chinese)) DOI:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2018.22.021.
- [22] 聂增民, 聂文婷, 唐祥. 施工项目“工期—成本”优化及案例分析[J]. *工程经济*, 2018, 28(10):38-42. (NIE Z M, NIE W T, TANG X. Optimization of construction project “period-cost” and case analysis[J]. *Engineering Economy*, 2018, 28(10):38-42. (in Chinese)) DOI:10.19298/j.cnki.1672-2442.201810038.
- [23] 王艳婷, 何正文, 刘人境. 随机多模式项目前摄性调度与反应性调度的权衡[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(4):158-166. (WANG Y T, HE Z W, LIU R J. Trade-off between stochastic multi-mode proactive scheduling and reactive scheduling[J]. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2018, 32(4):158-166. (in Chinese)) DOI:10.13587/j.cnki.jieem.2018.04.020.

(下转第 184 页)

107. (WANG X J. Bu-type crescent rib steel bifurcation pipe design and stress analysis based on three-dimensional finite element [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(3): 98-100, 107. (in Chinese))
- [12] 董家, 严根华, 杨兴义, 等. 月牙肋岔管群水力损失模型试验与数值模拟结果的比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10): 60-64. (DONG J, YAN G H, YANG X Y, et al. Experimental research and numerical simulation comparison of unsymmetrical "Y"-type penstock for hydraulic loss [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 60-64. (in Chinese))
- [13] 王志国. 高水头大 PD 值内加强月牙肋岔管布置与设计[J]. 水力发电, 2001(10): 56-58, 62. (WANG Z G. Layout and design of internal crescent-rib branch pipe with high head and large PD values [J]. Water Power, 2001(10): 56-58, 62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2001. 10. 021.
- [14] 伍鹤皋, 石长征, 苏凯. 埋藏式月牙肋岔管结构特性研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 460-465. (WU H G, SHI C Z, SU K. Study on structure characteristics of embedded crescent-rib reinforced bifurcated pipe [J]. Journal of Water Resources, 2008, 39(4): 460-465. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2008. 04. 011.
- [15] 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三岔管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报, 2001(3): 49-52. (LI L, LI Y L, HUANG J T, et al. Numerical simulation and experimental study on water flow in "Y"-type tube [J]. Journal of Water Resources, 2001(3): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2001. 03. 010.
- [16] 何新红, 石广斌, 牛天武. Xeset+2 水电站三梁岔管结构优化分析[J]. 西北水电, 2009(2): 22-25. (HE X H, SHI G B, NIU T W. Analysis of optimization of Y bifurcated pipe structure for Xeset+2 hydropower station [J]. Northwest Hydropower, 2009(2): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-2610. 2009. 02. 007.
- [17] 罗玮, 周玮, 伍鹤皋. 缅甸 DAPEIN (I) 水电站埋藏式钢岔管设计[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 53-55. (LUO W, ZHOU W, WU H G. Embedded steel branch pipe design for DAPEIN (I) Hydropower Station in Burma [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(2): 53-55. (in Chinese))
- [18] NBT 35056-2015 水电站压力钢管设计规范[S]. (NBT 35056-2015 Design code for steel penstocks of hydroelectric stations[S]. (in Chinese))
- [19] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 79, Steel penstocks[S]. American, 1993.
- [20] DS SolidWorks 公司. Solidworks Simulation 基础教程[M]. 第三版. 陈超祥, 胡其登译. 北京: 机械工业出版社, 2014. (DS SolidWorks Corporation. The basic course of Solidworks Simulation[M]. 3rd ed. CHEN C X, HU Q D, Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese))
- (上接第 176 页)
- [24] 牟强, 贾广社. 改进固定工期大中型工程的完工成本估算[J]. 中国管理科学, 2018, 26(4): 180-187. (MOU Q, JIA G S. Improving cost estimate at completion of the duration-fixed mega construction project [J]. China Journal of Management Science, 2018, 26(4): 180-187. (in Chinese)) DOI: 10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2018. 04. 020.
- [25] 刘珺珺, 汪妮, 解建仓, 等. 基于蚁群算法的水资源优化配置博弈分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 205-212. (LIU H H, WANG N, XIE J C. Game analysis on optimization allocation of water resources based on ant colony algorithm [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2014, 42(8): 205-212. (in Chinese)) DOI: 10. 13207/j. cnki. jnwafu. 2014. 08. 023.
- [26] 徐胜, 马小军, 钱海, 等. 基于遗传-模拟退火的蚁群算法求解 TSP 问题[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 143-148. (XU S, MA X J, QIAN H, et al. Genetic-simulated annealing-based ant colony algorithm for traveling salesman problem [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(3): 143-148. (in Chinese)) DOI: 10. 16526/j. cnki. 11-4762/tp. 2016. 03. 039.
- [27] 费腾, 张立毅. 现代智能优化算法研究[J]. 信息技术, 2015(10): 26-29. (FEI T., ZHANG L Y. Research on modern intelligent optimization algorithm [J]. Information Technology, 2015(10): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10. 13274/j. cnki. hdzj. 2015. 10. 007.
- [28] 张春梅. 引黄济青改扩建工程 HT 段进度管理研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018. (ZHANG C M. Study on management of HT section of the yellow river diversion project [D]. Qingdao: Qingdao University, 2018. (in Chinese))