

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.009

基于 t 分布烟花算法的土石坝碾压参数多目标优化

刘东海, 吴 优
(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 通过碾压正交试验,在定量分析碾压参数对土石坝料压实质量影响的基础上,建立综合考虑土石坝施工效率、压实密度和质量保证的碾压参数多目标优化模型,提出用于求解该优化模型的 t 分布变异烟花算法,以确定经济合理的碾压参数。该算法可以减小开展碾压试验的工作量,有助于寻得合理的碾压参数组合方案。工程实例分析表明,改进烟花算法相较传统优化算法收敛速度更快,寻优效率和稳定性更好;采用改进烟花算法优化的碾压参数,堆石坝料的压实密度和孔隙率均满足设计要求。

关键词: 土石坝施工;碾压参数;多目标优化;烟花算法; t 分布变异

中图分类号: TV541⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0243-08

Multi-objective optimization of earth-rock dam compaction parameters based on the t distribution mutation-firework algorithm

LIU Donghai, WU You
(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: On the basis of quantitatively analyzing the relationship between compaction quality and compaction parameters, a comprehensive optimizing model with objectives of construction effectiveness, compacted density, and quality guarantee rate has been established in this paper. An adaptive t distribution mutation-firework algorithm (ATM-FWA) for the model was presented to achieve the economically reasonable compaction parameters for the construction of high earth-rock dam. The proposed method can contribute to search a reasonable compaction parameter scheme with less field compaction tests. A case study shows that ATM-FWA has more advantages than the traditional optimal methods in the convergence performance, searching effectiveness, and solution stability. The compaction density and porosity of earth-rock dam material using the optimized compaction parameters can satisfy the design requirement. Thus, the proposed method provides a new way for the roller selecting and the compaction parameters optimization in the construction of an earth-rock dam.

Key words: earth-rock dam construction; compaction parameters; multi-objective optimization; firework algorithm; t distribution mutation

作为直接影响土石坝施工效率和质量保证的关键参数,碾压参数的选取至关重要,参数组合若选取的不好,不仅施工效率有可能降低,而且施工质量也得不到保证^[1-2]。目前土石坝碾压参数由现场碾压试验确定^[3-4],每次试验只改变一个参数而固定其他参数,逐步缩小参数范围,最终来优选碾压方案。该方法由于工作量大,需耗费大量的人力物力,而且只能寻找试验方案中的相对较优。由于受经验限制,往往难以保证该方案是全局最优方案。因此,有必要采用试验和数值优化相结合的方法,在保证施工质量和效率的情况下,来寻求合理的碾压参数组合方案。

基金项目: 国家自然科学基金(51479132,51679164);国家自然科学基金创新群体资助项目(51621092)

作者简介: 刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程系统仿真与优化、数字化施工与质量评估研究。E-mail: liudh@tju.edu.cn

引用本文: 刘东海,吴优. 基于 t 分布烟花算法的土石坝碾压参数多目标优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):243-250.

LIU Donghai, WU You. Multi-objective optimization of earth-rock dam compaction parameters based on the t distribution mutation-firework algorithm[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 243-250.

对于满足施工效率-质量保证的碾压参数综合优化这一离散(碾压机分类)的非线性多目标优化问题,传统的优化方法对目标函数有可微可导的要求,并且存在易陷入局部最优的弊端,故对于这类问题,可采用各种智能算法来解决。但传统智能算法也是各有不足,如遗传算法的收敛速度慢、寻优效率低、易出现早熟收敛现象、对搜索空间的适应能力差^[5];蚁群算法的搜索时间较长、易出现停滞现象^[6];粒子群算法存在早熟收敛现象、易陷入局部最优点、后期易出现振荡现象^[7]。本文研究采用一种新兴的智能优化算法——烟花算法(firework algorithm,FWA),来解决土石坝碾压参数的多目标优化问题。

烟花算法作为一种新颖的优化算法由 Tan 等^[8]提出,该算法模拟烟花爆炸产生火花的过程能够兼顾全局搜索能力和局部搜索能力,并在两者之间达到平衡。该算法已经在参数优化^[9]、配电网重构优化^[10]、滤波器设计^[11]、图像的识别^[12]、油作物施肥问题^[13]、作业车间调度问题^[14]等领域得到了应用。

本文首先建立满足施工效率-质量保证的碾压参数多目标优化模型,并对烟花算法做出改进,提出基于 t 分布变异的烟花算法(adaptive t distribution mutation-firework algorithm,ATM-FWA)。在此基础上,研究优化模型求解的改进烟花算法,并进行工程实例应用分析。

1 考虑施工效率和质量保证的碾压参数多目标优化建模

满足施工效率和质量保证的土石坝碾压参数综合优化的目的是找到最佳的碾压参数,使得坝体的施工效率尽可能快,施工质量尽可能好。由于大坝的施工效率和施工质量与碾压参数有关,故可以将堆石坝施工过程中的各参数,包括碾压遍数、碾压速度、铺层厚度及碾压机特性(含激振力、静荷载、轮宽)等作为模型的优化变量,模型目标为最大限度地提高大坝施工效率和质量。

1.1 土石坝料碾压施工效率的度量

施工效率可用单位时间内的铺筑量来度量。一般而言,碾压遍数 n 、碾压速度 v 、铺层厚度 h 、碾轮宽度 B 都会影响施工的快慢,因此,堆石坝料逐层铺筑的施工效率为

$$E = \frac{V}{T} = \frac{hB_iL}{\frac{Ln}{v}} = \frac{hB_iv}{n}$$

(1)

式中: E ——施工效率; V ——坝料体积; T ——碾压时间; L ——仓面长度; i ——压路机型号, $i=1,2,\cdots,I$,其中 I 为碾压机备选数量。

1.2 土石坝料碾压质量的度量

土石坝料压实密度可作为评价施工质量的重要指标,而在坝料料性(岩性、级配、含水率等)确定的情况下,坝料压实密度主要由碾压参数决定。与此同时,由于受到各种因素的影响,实际施工过程中碾压参数存在一定的不确定性,可能会在设计值基础上波动,从而影响坝料的压实密度。因此要选取一种能尽可能保证碾压质量稳定的碾压参数组合,以保证即便碾压参数发生偏差,压实密度也尽量不受其影响。本文通过压实密度及压实质量的稳定度 2 个指标来综合度量坝料的碾压质量。

1.2.1 坝料压实密度度量及回归建模

土石坝料的压实密度与碾压参数之间往往存在非线性映射关系:

$$\rho = f(n,h,v,F_{ij},W_i)$$

(2)

式中: ρ ——压实密度; F_{ij} ——激振力,碾压机固有参数,均由压路机选型和激振力档位决定; W_i ——碾压机吨位; j ——激振力档位, $j=1,2$,其中 1 表示低激振力档位,2 表示高激振力档位。 ρ 、 n 、 v 、 h 均可通过土石坝碾压质量实时监控系统测得^[15-16]。

基于构建的足够多组样本,采用多元回归建立式(2)的具体表达式。同时考虑到采样试验的工作量,采用正交试验方法设计试验方案,构建多组碾压参数对应压实密度样本。结合 F 检验,通过偏相关性分析碾压参数与压实密度的相关性,根据自变量对因变量影响显著程度逐个筛选碾压参数,由高到低依次引入自变量逐步回归建立模型,并应用实际数据对模型进行检验。

1.2.2 压实密度控制的稳定度

由于施工现场复杂多变,而按设计值控制的碾压参数难免会出现不确定性,导致压实密度产生波动,因此有必要尽可能地降低碾压参数不确定性对压实密度带来的波动性,即寻求压实密度最不敏感碾压参数的

组合,防止现场压实密度与设计值偏差过大。

每个碾压参数对压实密度的影响程度可通过压实密度相对于该因素的灵敏度 α_k 来表示,即为其他因素不变情况下该因素的偏导数:

$$\alpha_k = \frac{\partial \rho}{\partial x_k} \quad (k = 1, 2, \cdots, K) \tag{3}$$

式中: α_k ——第 k 个参数在该方案取值时的偏导数; x_k ——第 k 个碾压参数; k ——碾压参数个数。

本文提出压实密度控制的稳定度 S ,来表征某碾压参数组合方案的所有参数对压实密度稳定性的综合影响。 S 为所有碾压参数综合灵敏度的倒数绝对值之和(式(4)),旨在倾向于采取敏感性相对小的碾压参数组合,敏感性越小的参数组合,压实密度波动的可能越小,越容易保证压实质量,所以,以选取压实密度控制的稳定度最大的碾压参数组合为最佳方案。

$$S = \sum_{k=1}^K \left| \frac{1}{\alpha_k} \right| \tag{4}$$

1.3 多目标综合优化模型

由上文可知, E, ρ, S 均为碾压参数 n, v, h, i, j 的函数,故该模型的优化变量取 $Y=(n, h, v, i, j)$ 。每个碾压参数可根据施工规范及以往工程经验确定上下限。这里遍数 n 取整数, $n=1, 2, \cdots, N$ 。同时,为消除各评价指标间测度不同的影响,可对样本进行归一化处理。

根据上文目标,需在保证质量的同时满足施工效率最快,由此建立土石坝施工碾压参数优化模型如下:

$$\begin{aligned} \text{opt}(G) &= f(E, \rho, S) \\ \text{s. t. } \{ Y_{\min} &\leq (n, v, h, i, j) \leq Y_{\max} \} \end{aligned} \tag{5}$$

为方便下文算法求解,将该多目标综合优化问题转化为单目标优化问题。可采用层次分析法^[17]确定各目标的权重 λ ,则将模型(5)转化为单目标优化模型:

$$\min G = \frac{1}{(E, \rho, S) \lambda} \tag{6}$$

其中 $\lambda = (\lambda_E, \lambda_\rho, \lambda_S)^T \quad \lambda_E + \lambda_\rho + \lambda_S = 1$

式中: G ——综合优化目标; $\lambda_E, \lambda_\rho, \lambda_S$ ——施工效率、碾压质量和稳定度所占权重。

2 基于 t 分布变异烟花算法模型的求解方法

由于传统烟花算法^[18-19]从进化初期直至进化结束始终兼顾全局搜索性和局部搜索性,导致收敛速度大大减慢,因此本文利用 t 分布变异对传统烟花算法进行改进,提出了一种基于 t 分布变异的烟花算法。利用柯西分布的全局探索性和高斯分布的局部开发性,既可以保证算法进化初期全局探索能力较强,有效地保持种群的多样性,避免在算法初期陷入局部最优;又可以保证在进化中后期局部开发能力较强,使进化后期的收敛速度更快。整个变异操作无需人工参与,具有良好的自适应性,同时可以获得更快的收敛速度和更高的求解精度。

2.1 t 分布变异

t 分布含有参数自由度 m , m 越小,曲线越平坦,当 $m=1$ 时, t 分布曲线为柯西分布曲线,即 $t(m=1)=C(0,1)$,其中 $C(0,1)$ 为柯西分布; m 越大,曲线越接近正态分布曲线,当 $m \rightarrow \infty$ 时, t 分布曲线近似为高斯分布曲线,即 $t(m \rightarrow \infty) \rightarrow N(0,1)$,其中 $N(0,1)$ 为高斯分布。也就是说标准高斯分布和柯西分布是 t 分布的两个特例^[20],柯西变异比高斯变异有更大的可能性产生远离亲代的下一代点^[21]。

FWA 中,在产生高斯变异火花时,本文对火花个体 X_q 采取 t 分布的变异策略,具体计算如下:

$$\hat{X}_q = X_q + X_q g = X_q (1 + g) \tag{7}$$

式中: X_q ——火花个体; $\hat{X}_q$ ——当前烟花种群中适应度函数值 G 最小的烟花; g ——服从 m 为自由度的 t 分布,记作 $g \sim t(m)$ 。

t 分布变异将迭代次数 D 作为自由度参数。这意味着算法运行初期具有较优的全局探索性;算法运行后期具有良好的局部开发性。

2.2 优化模型求解的步骤

针对建立的综合考虑施工效率-质量保证的碾压参数优化模型(式(6)),采用基于 t 分布变异烟花算法求解,具体步骤如下:

- a. 初始化算法参数值。确定初始烟花群体数 U ,最大迭代次数 $D_{\max}$,最大爆炸半径 R ,最大火花个数 M ,变异火花个数 A ,以及优化模型的变量个数 K (即为碾压参数个数)。
- b. 随机在解空间初始化 Q 个烟花的个体位置。由于碾压参数共 K 个,则在搜索空间中第 q 个烟花位置可以表示为 $X_q=(x_{q1},x_{q2},\cdots,x_{qK})$,其中 $q=1,2,\cdots,Q,x_{qk}$ 为第 q 个烟花第 k 个碾压参数值($k=1,2,\cdots,K$)。
- c. 依据式(6),将 G 作为算法适应度值并评估每个烟花的适应度值 G_q ,根据式(8)、式(9)计算每个烟花的爆炸半径 R_q 和火花个数 M_q :

$$R_q = \frac{R(G_q - G_{\min} + \varepsilon)}{\sum_{q=1}^Q (G_q - G_{\min}) + \varepsilon}$$

(8)

$$M_q = \frac{M(G_{\max} - G_q + \varepsilon)}{\sum_{q=1}^Q (G_{\max} - G_q) + \varepsilon}$$

(9)

式中: $G_{\max}$ ——种群中适应度最大值; $G_{\min}$ ——种群中适应度值的最小值; ε ——机器最小量,用来避免除零操作。 $G_{\max}$ 、 $G_{\min}$ 将被记录且对应的烟花 X_{best} 作为当前最优解。

- d. 产生爆炸火花。随机选择 y 个维度作为集合 D_s , $y=\text{round}(c\times\text{rand}(0,1))$,其中 c 为烟花 X_q 的维数。对于在 D_s 中的每个维度 a ,用式(10)、式(11)进行爆炸操作,经处理后将 $x_{e,q}$ 保存至爆炸火花种群:

$$l_a = R_q \times \text{rand}(-1,1)$$

(10)

$$x_{e,q} = x_{qa} + l_a$$

(11)

式中: l_a ——偏移量; x_{qa} ——第 q 个个体的第 a 个维度; $x_{e,q}$ —— x_{qa} 经过爆炸后的火花。

- e. 产生 A 个 t 分布变异火花,随机选择 z 个维度作为集合 D_s , $z=\text{round}(D\times\text{rand}(0,1))$ 。对于 D_s 中的每个维度 a ,采用式(7)进行 t 分布变异,保存到 t 分布变异火花种群中。

- f. 选择 U 个个体作为下一代计算的种群。假设候选者集合为 O ,候选者中适应度值最小的个体作为当前最优解 X_{best} 储存,并放至下一代,其余个体采用轮盘赌法在候选者的集合中选择,对于候选者 X_p ,其被选择的概率为

$$P(X_p) = \frac{R(X_p)}{\sum_{X_p \in O} R(X_p)}$$

(12)

其中

$$R(X_p) = \sum_{X_p, X_q \in O} \|X_p - X_q\|$$

式中: $R(X_p)$ ——当前个体与集合 O 中每个个体之间的空间距离之和。若个体密度高,则选择的概率低。

- g. 更新最优解,根据式(6)计算变异后种群的目标函数最优值 $G'_{\min}$,若 $G'_{\min}$ 小于 $G_{\min}$,则将 $G'_{\min}$ 对应的解 X'_{best} 则替换当前最优解。

- h. 检验终止条件,并输出碾压参数优化结果,重复执行步骤 d、e、f,直至达到最大迭代次数 $D_{\max}$ 为止,而后输出优化结果,得到最优解 X_{best} 即最优碾压参数值(n,h,v,i,j),以及根据式(6)计算所对应的适应度 G 值。

3 实例分析

以某心墙堆石坝的粗堆石料碾压为例,剔除粒径极大的颗粒,以便保证施工的均匀性并开展应用研究。在碾压试验阶段进行正交试验。由于 W 、 F 、 B 直接与碾压机选型和档位相关,为选取不同吨位、激振力、碾轮宽度,除采用目前堆石料主流压实设备 SSR260-5H 单钢轮压路机外,另增加 SSR360-5H 单钢轮压路机同步进行碾压试验,每种压路机在吨位、碾轮宽度唯一的条件下,根据档位不同可提供 2 种激振力。因此共选型 2 种压路机,每种压路机均提供 2 种档位,压路机型号和档位作为碾压机械因素,碾压遍数、碾压速度、铺层厚度作为 3 种施工工艺因素。

碾压机械因素为两水平,3种施工工艺因素取为四水平,因试验需进行 $2^2 \times 4^3 = 256$ 次试验,为节省人力物力,减少试验次数,采用正交法设计5因素混水平试验,设计进行16组正交试验,正交试验因素水平见表1。根据正交设计,完成不同参数组合的碾压试验后,在每组正交试验监测点处通过灌砂法获取3组压实密度,最终得到共48组样本。

表1 正交试验因素水平设计
Table 1 Factor levels of the orthogonal test

因素水平	压路机型号 i	激振力档位 j	n /遍	$v/(m \cdot s^{-1})$	h/m
1	1(SSR260-5H)	1(低激振力工况)	6	2	7
2	2(SSR360-5H)	2(高激振力工况)	8	3	8
3			10	4	9
4			12	5	10

根据16组样本由逐步回归法,建立压实密度多元回归模型:

$$\rho = \exp(a_1 + a_2/F_{ij}) + \exp(a_3 + a_4/W_i) + \exp(a_5 + a_6/n_i) + a_7v + a_8h + a_9 \quad (13)$$

式中: $a_1, a_2, \dots, a_9$ ——模型估算参数,由正交试验样本数据得到; n_i ——压路机 i 的碾压遍数。

模型决定系数 R^2 为0.806,且能通过 F 检验;48组样本压实密度的平均相对误差为1.70%,最大相对误差为4.41%;压实密度对比及误差分析如图1及图2所示。根据式(13)可以发现压实密度随压实遍数、激振力和吨位的增加先增加,随后趋于平稳;随碾压速度和铺层厚度的增大而减小,这与工程实际相符。

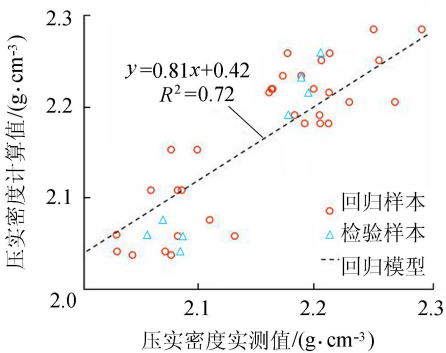


图1 压实密度实测值与计算值对比
Fig.1 Comparison between the measured compaction densities and calculated values

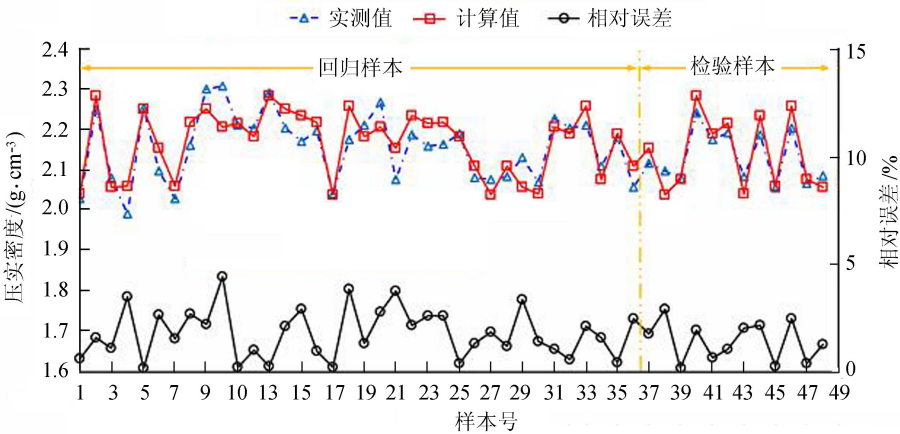


图2 压实密度回归模型的误差分析
Fig.2 Errors of the regression model for compaction density

考虑各目标的重要性,采用AHP法,考虑目标重要度,相对重要性为:施工效率、压实密度、压实密度控制稳定度的比例为3:3:1,可得到3个目标的权重。

$$\lambda = (\lambda_E, \lambda_\rho, \lambda_s)^T = (0.428, 0.428, 0.144)^T \quad (14)$$

为了分析烟花算法改进前后的性能变化与其他算法的优劣,在设置种群数量为200, R 和 M 均设为50的情况下,改进前的变异火花和改进后的 t 分布变异火花个数均设为10个,从而对改进前后算法进行对比分析。此外,为了比较改进烟花算法与其他算法的优劣,本文选取遗传算法(genetic algorithm,GA)和自适应差分算法(adaptive differential evolution algorithm,ADE)与改进烟花算法进行对比分析,设置种群数量均为200,最大迭代次数为500,算法的收敛情况如图3所示。

为了比较各算法的寻优效率,4种算法独立运行20次,分别统计其最大目标函数值、最小目标函数值、

平均目标函数值和近优率(即近似最优解的概率,其中,近似最优解定义为与最优解相比误差在5%以内的解),如表2所示,其中,参数的最优解为4种算法共80次试验中的最小目标函数值,即为1.682。

由表2可知,4种算法都可以基本达到最优目标函数值,但改进烟花算法寻优效率高且稳定性好,自适应差分算法和遗传算法虽然也可以搜索出最优解,但需要经过多次试验才可以找到最优解,其算法寻优效率和稳定性不如改进烟花算法。此外,相较传统烟花算法,改进后的烟花算法寻优稳定性得到了提升。

因此根据第2.2节方法,通过改进烟花算法求解可得到不同工况下使目标函数 G 达到最小值(即兼顾施工效率和质量保证)时所对应的碾压参数,各型号压路机及不同激振力工况下参数优化结果见表3。由表3可知,通过改进烟花算法针对不同压实机械工况均得出保证质量及效率的不同的碾压参数优化结果,其中全部工况的施工参数方案中最优目标函数值为1.682,表明在不考虑成本的前提下,可采用型号SSR360-5H单轮压路机并采用大激振力810 kN进行施工,碾压遍数10遍,碾压速度4.0 m/s,铺层厚度0.90 m。若采用当前堆石料主流型号SSR260-5H单轮压路机,则采用激振力416 kN进行施工,碾压遍数10遍,碾压速度3.5 m/s,铺层厚度0.80 m。实际施工中,遵循上述方法选取SSR260-5H单轮压路机并严格控制施工工艺进行碾压,所有堆石区试坑试验结果(共15组试坑检测样本)表明主堆石区坝料压实质量满足设计要求;满足规范规定的“堆石料压实密度平均值不应小于设计值要求,标准差不应大于 0.1 t/m^3 。当样本数小于20组时,检测合格率不应小于90%,不合格数值不得小于设计值的95%”^[1]。试坑试验结果如图4所示。

表3 堆石料碾压参数优化结果

Table 3 Optimized results of rockfill compaction parameters

压路机型号	激振力档位	n/遍	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/m	F/kN	W/t	B/m	目标函数值
SSR260-5H	小激振力	11	3.0	0.75	275	26	2.17	1.960
SSR260-5H	大激振力	10	3.5	0.80	416	26	2.17	1.880
SSR360-5H	小激振力	10	3.5	0.85	510	36	2.25	1.810
SSR360-5H	大激振力	10	4.0	0.90	810	36	2.25	1.682

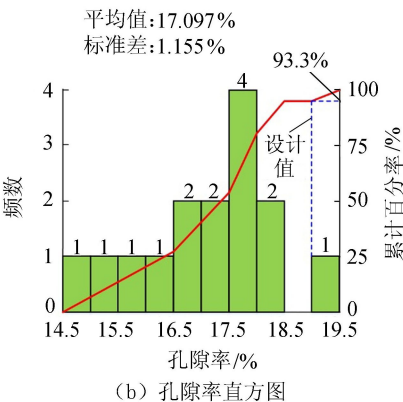
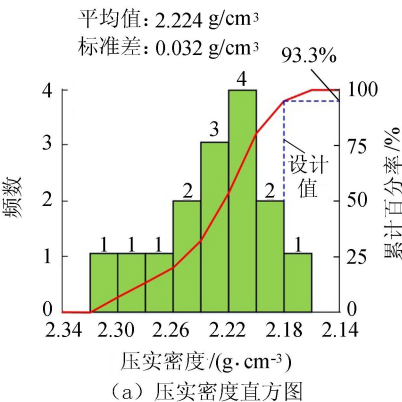


图4 堆石坝料试坑检测统计

Fig. 4 Statistical results of testing sampled spots for the rockfill dam

由图4可见,压实密度平均值大于设计值 2.18 g/cm^3 ,标准差小于规范要求的 0.1 g/cm^3 ,且检测合格率

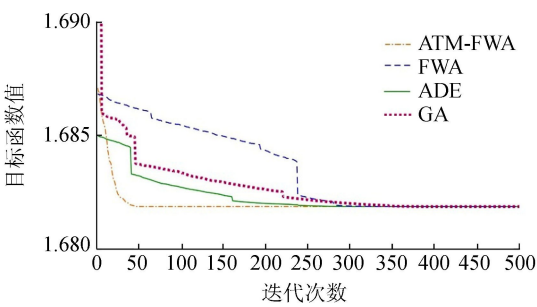


图3 ATM-FWA与其他优化算法的收敛性能对比
Fig. 3 Convergence performance comparison between ATM-FWA and other optimization algorithm

表2 不同算法计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results between different algorithms

算法	最大目标函数值	最小目标函数值	平均目标函数值	近优率/%
ATM-FWA	1.774	1.682	1.694	95
FWA	1.834	1.682	1.736	80
ADE	1.792	1.682	1.728	70
GA	1.803	1.682	1.712	80

大于 90%,不合格样本压实密度为 2.165 g/cm^3 ,大于设计值的 95%;同时平均孔隙率小于设计孔隙率 19%,且合格率可达 93.3%。上述结果说明按照本文所述碾压参数的优化方法控制施工工艺能够有效保证施工质量。

4 结 语

本文通过正交碾压试验,建立了高土石坝施工效率-质量保证的碾压参数综合优化模型,进而给出了该模型求解的改进烟花算法。该方法可节省试验的人力物力,并且可以通过有限组试验得到全局最优方案,并可以针对不同压实机械确定不同施工工艺。该算法采用 t 分布变异,不仅克服了传统优化方法易于陷入局部最优及要求模型可微可导的弊端,还提高了传统烟花算法在初期的全局探索性和在后期的局部开发性,可以获得更高的求解精度和更快的收敛速度。实例应用表明,通过本文方法优化碾压参数,堆石坝料的压实密度和孔隙率均满足要求,本文研究采用的方法可实现在施工前碾压试验阶段在确保施工效率和质量保证的前提下,针对施工阶段碾压参数的优化安排,从而为高土石坝施工碾压参数的制定提供了新的途径。由于现有压实设备每种激振力档位均对应一种振动频率和振幅,本文只考虑了激振力对压实质量的影响,因此进一步研究振动频率和振幅对压实质量的影响是进一步需要做的工作。

参考文献:

- [1] 杨星,刘汉龙,余挺,等.高土石坝复合加筋抗震加固技术开发与应用[J].水利水电科技进展,2016,36(6):69-74. (YANG Xing, LIU Hanlong, YU Ting, et al. Technological development of composite reinforcement aseismic measure for high earth rockfill dams and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 69-74. (in Chinese))
- [2] 朱俊高,蒋明杰,沈靠山,等.粗粒土静止侧压力系数试验[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):491-497. (ZHU Jungao, JIANG Mingjie, SHEN Kaoshan, et al. Experiment study of at-rest lateral pressure coefficient of coarse-grained soil [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(6): 491-497. (in Chinese))
- [3] 国家能源局.碾压式土石坝施工规范:DL/T 5129—2013 [S].北京:中国电力出版社,2013.
- [4] 占懿,李建虎.溧阳抽水蓄能电站上水库面板堆石坝现场爆破和碾压试验[J].水力发电,2013,39(3):84-87. (ZHAN Yi, LI Jianhu. On-site tests on blasting and roller compaction of CFRD in upper reservoir of Liyang pumped-storage power station [J]. Water Power, 2013, 39(3):84-87. (in Chinese))
- [5] ALI M Z, AWAD N H, SUGANTHAN P N, et al. An improved class of real-coded genetic algorithms for numerical optimization [J]. Neurocomputing, 2018, 275:155-166.
- [6] PESSOA C M, RANZAN C, TRIERWEILER L F, et al. Development of ant colony optimization (ACO) algorithms based on statistical analysis and hypothesis testing for variable selection[J]. Ifac Papersonline, 2015, 48(8):900-905.
- [7] AGARWALLA P, MUKHOPADHYAY S. Efficient player selection strategy based diversified particle swarm optimization algorithm for global optimization[J]. Information Sciences, 2017, 397(8):69-90.
- [8] TAN Y, ZHU Y. Fireworks algorithm for optimization[C]//Advances in Swarm Intelligence. First International Conference. Las Vegas:[s. n.], 2010:355-364.
- [9] TAN Ying, SHI Yuhui, MO Hongwei. Advances in swarm intelligence [C]//Lecture Notes in Computer Science. 4th International Conference. Berlin: ICSI, 2013: 439-450.
- [10] IMRAN A M, KOWSALYA M. A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using fireworks algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62(11):312-322.
- [11] GAO H, DIAO M. Cultural firework algorithm and its application for digital filters design[J]. International Journal of Modelling Identification & Control, 2011, 14(4):324-331.
- [12] ZHENG S, TAN Y. A unified distance measure scheme for orientation coding in identification[C]//IEEE. Third International Conference on Information Science and Technology. New York: IEEE, 2013:979-985.
- [13] ZHENG Y J, SONG Q, CHEN S Y. Multiobjective fireworks optimization for variable-rate fertilization in oil crop production[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(11):4253-4263.
- [14] 包晓晓,叶春明,计磊,等.改进混沌烟花算法的多目标调度优化研究[J].计算机应用研究,2016,33(9):2601-2605. (BAO Xiaoxiao, YE Chunming, JI Lei, et al. Improved chaotic firework algorithm for multi-objective scheduling optimization

[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(9):2601-2605. (in Chinese))

[15] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学:技术科学, 2011, 41(8):1027-1034. (ZHONG Denghua, LIU Donghai, CUI Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Sci China Tech Sci, 2011, 41(8):1027-1034. (in Chinese))

[16] 刘东海, 连振宏, 李子龙. 土石坝填筑碾压机械激振性态实时监控系統[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10):68-71. (LIU Donghai, LIAN Zhenhong, LI Zilong. Real-time roller exciting behaviors monitoring system of earth-rock dam compaction[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(10):68-71. (in Chinese))

[17] ZYOD S H, FUCHS-HANUSCH D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 78(7): 158-181.

[18] MNIF M, BOUAMAMA S. Firework algorithm for multi-objective optimization of a multimodal transportation network problem [J]. Procedia Computer Science, 2017, 112(9): 1670-1682.

[19] REN Y T, QI H, HE M J, et al. Application of an improved firework algorithm for simultaneous estimation of temperature-dependent thermal and optical properties of molten salt[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2016, 77(10): 33-42.

[20] MINAEI-BIDGOLI B, TOPCHY A P, Punch W F. A comparison of resampling methods for clustering ensembles. [C]// International Conference on Artificial Intelligence. Proceedings of the International Conference on Machine Learning, Models, Technologies & Applications. Las Vegas: DBLP, 2004: 939-945.

[21] FARITHA B A, CHANDRASEKAR C. An optimized approach of modified BAT algorithm to record deduplication [J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 62(1): 10-15.

(收稿日期:2018-07-14 编辑:张志琴)

+++++

· 简讯 ·

第五届全国桥梁维护与安全学术会议在河海大学召开

2019年4月19-21日,由国际桥梁维护与安全协会(以下简称“IABMAS”)中国团组主办、河海大学承办的第五届全国桥梁维护与安全学术会议在河海大学召开。国际桥梁维护与安全协会(IABMAS)秘书长、西班牙加泰罗尼亚理工大学 Juan Ramon Casas 教授,奥地利维也纳自然资源与生命科学大学 Alfred Strauss 教授,IABMAS 中国团组主席、同济大学陈艾荣教授,江苏交通控股有限公司陈金东副总经理,江苏省交通运输厅原副巡视员、江苏省钢结构桥梁联盟钟建驰理事长,河海大学党委书记唐洪武教授、副校长董增川教授等出席开幕式。大会主席河海大学吉伯海教授主持开幕式。董增川副校长致欢迎辞,他表示河海大学土木工程学科历史悠久,在桥梁管养领域得到国内兄弟单位的帮助与支持,取得丰硕成果,服务重大工程成效显著,希望与 IABMAS 加强合作,持续提升学科及学校国际化水平。陈艾荣教授代表主办方致辞,介绍了 IABMAS 中国团组的发展历程、举办学术活动及取得的成果等,并对河海大学为会议承办所做的工作表示感谢。陈金东副总经理、钟建驰理事长、Casas 教授分别致辞,对大会的召开表示祝贺,并就桥梁管养现状、技术创新需求及面临的机遇挑战等和与会专家进行了交流分享。

河海大学党委书记唐洪武教授,Casas 教授,Strauss 教授,江苏扬子大桥股份有限公司吉林董事长,同济大学陈艾荣教授,河海大学吉伯海教授分别作大会报告。大会围绕桥梁结构运营安全、桥梁管养制度与系统、桥梁荷载评估和控制、桥梁可靠性理论与技术、桥梁耐久性等主题设立了 5 个平行会场,举行学术报告 65 场次。来自同济大学、浙江大学、东南大学等近 40 所高校科研院所,以及江苏扬子大桥股份有限公司、中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司等近 50 家企事业单位的 300 余位专家、代表围绕主题展开了深入研讨。与会代表还参观了河海大学 189 实验中心和新改造的南京长江大桥。

(本刊编辑部供稿)