

高土石坝施工进度综合优化及其遗传和声算法

刘东海, 高 歌

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 高土石坝施工进度优化是一个复杂的非线性多目标综合优化问题, 不仅需考虑施工资源投入及生产效率, 更需要顾及大坝填筑质量和安全对施工进度的影响. 在定量分析土石坝填筑质量、安全和进度相互关系的基础上, 建立了高土石坝填筑质量-安全-进度综合优化模型, 并针对传统优化方法的局限性, 提出了该优化模型求解的遗传和声算法, 实现了高土石坝填筑质量、大坝安全和施工进度的均衡安排. 实例应用表明了本文方法的可行性, 可为高土石坝施工进度计划优化与实时控制提供一条新的途径.

关 键 词: 高土石坝; 施工进度; 填筑质量; 大坝安全; 综合优化; 遗传和声算法

中图分类号: TV641.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)05-0017-09

高土石坝施工进度优化是一个复杂的多目标综合优化问题, 不仅需考虑施工资源投入及生产效率, 更需要顾及大坝填筑质量和安全对施工进度的影响. 在高土石坝施工中, 大坝填筑质量、大坝安全与大坝各区的施工进度既相互关联又相互约束. 当大坝填筑质量的控制要求降低时可能会有助于加快大坝的施工进度, 但会对大坝施工与运行安全带来隐患; 反之, 若一味提高填筑质量(超标准), 则会使施工进度滞后; 同时, 各分区不同的填筑面貌及进度也会对大坝施工期沉降带来不同的影响, 甚至会影响大坝安全. 因此, 有必要在满足各种施工要求的前提下, 寻求填筑质量、大坝安全、施工进度综合最优的土石坝各分区填筑进度计划安排, 并针对当前大坝填筑进程及大坝安全现状, 寻求合理的施工进度调整与控制方案.

目前对于土石坝进度优化的研究很多集中在施工资源的优化配置方面. 如王仁超^[1]考虑堆石坝不同坝料的施工顺序和施工强度协调对施工速度和工程质量的影响, 来实现对堆石坝各种料物之间填筑施工强度的协调控制; 涂扬举等^[2]对堆石坝开采、运输和填筑强度进行了优化配置, 以实现工期和成本最优. 钟登华等更是提出将施工仿真技术应用于土石坝施工进度研究, 实现了土石方的动态优化与实时控制^[3], 以及对高心墙堆石坝施工进度的更精确预测^[4]. 但是, 上述研究并未考虑大坝安全和施工质量对进度的影响. 文献^[5]尽管考虑了工程工期-费用-质量的综合优化, 但未分析施工质量对进度的定量影响. 本文将综合考虑填筑质量对大坝施工进度定量影响, 以及填筑进度形象面貌对于大坝安全的影响, 以此研究高土石坝施工进度综合优化方法.

对施工进度综合优化这一复杂的非线性优化问题, 传统优化方法由于对目标函数有可微可导的要求, 且容易陷入局部最优, 故众多学者采用智能算法来解决这一问题. 如 Zhang Hong 等^[6]应用粒子群算法研究受资源限制的施工进度优化问题; 邓林义等^[7-8]研究了基于蚁群算法的工程项目资源受限的施工进度优化方法. 这些方法为解决复杂的施工进度优化问题提供了很好的途径. 本文将研究采用一种新兴的智能优化算法——和声算法, 来解决综合考虑填筑质量和大坝安全前提下的高土石坝施工进度优化问题. 和声算法 (Harmony Search) 是 2001 年 Z. W. Geem 等人提出的一种新颖的智能优化算法^[9]. 该算法模拟了音乐的创作

收稿日期: 2013-03-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB035904); 国家自然科学基金资助项目(51079096)

作者简介: 刘东海(1974-), 男, 浙江舟山人, 教授, 主要从事水利水电工程系统分析与优化及大坝施工质量实时评估与安全分析. E-mail: liudh@tju.edu.cn

过程,乐师们凭借自己的记忆,通过反复调整乐队中各乐器的音调,最终达到一个美妙的和声状态.目前,该算法已在多维多极值函数优化、管道优化设计、土坡稳定分析等问题中得到了广泛应用^[10-12].

本文将在建立高土石坝填筑质量-安全-进度综合优化模型的基础上,研究该模型求解的改进和声算法及遗传和声算法,最后是实例应用.

1 高土石坝施工质量-安全-进度综合优化模型的建立

高土石坝施工质量-安全-进度综合优化的任务是找到最佳的各分区填筑进度安排,使得大坝的填筑质量尽可能高,大坝尽可能安全(可采用施工期大坝沉降尽可能小来反映),填筑进度尽可能快(即工期尽可能短,或某段时间内工程量尽可能大).由于反映大坝安全的大坝沉降量与各分区不同时刻的填筑形象面貌及填筑过程有关;在其他施工条件不变的情况下,填筑质量又与大坝填筑的速度成反比,故可以将大坝各分区不同时刻的填筑高度(即第 i 个分区第 t 个月的填筑高度 $h_{i,t}$)作为模型的优化变量;模型目标为大坝填筑质量、施工期大坝沉降和施工进度综合最优.

1.1 土石坝填筑质量的度量

一般而言,在相同的资源设备配置及施工方法条件下,填筑进度越快越可能影响大坝的施工质量,即填筑速度与大坝填筑质量成反比.在相同的施工方法条件下,土石坝施工仓面的碾压遍数合格率(即碾压遍数达到标准设计值所占的区域面积与仓面总面积之比)不仅是影响大坝填筑进度的重要因素,而且是影响土石坝填筑质量的重要因素.碾压遍数合格率越大,填筑质量越高,施工仓面的碾压时间越长,填筑进度越慢.因此,本文将碾压遍数合格率作为优化参数,且以此参数来构建施工进度与填筑质量的函数表达式.

由于不同的坝料分区对压实质量控制的要求不尽相同,故不同分区对碾压遍数合格率的要求也可能不同.尤其是当大坝上升的过程中,出于对坝体沉降及结构安全控制的考虑,不同的坝料分区会选取不同的碾压遍数合格率以控制大坝上升过程.但应注意的是,任何分区的仓面碾压遍数合格率均需大于施工质量控制的最低要求.因此,土石坝整体填筑质量 Q 可由所有分区的碾压遍数合格率之和来反映,即 Q 可定义如下:

$$Q = \sum_{i=1}^N R_i \quad (1)$$

式中: $R_{0i} \leq R_i \leq 100\%$, R_i 为第 i 个分区的碾压遍数合格率, R_{0i} 为第 i 个分区满足质量控制最低要求的碾压遍数合格率,一般取 $R_{0i} \geq 90\%$ ^[13]; N 为坝料分区数.这里假设同一分区不同施工仓面的碾压遍数合格率均相等.

为公度多目标的取值,将 Q 归一化,得

$$\hat{Q} = Q_{\min}^*/Q \quad (2)$$

式中: $Q_{\min}^*$ 为求单目标优化问题 $\min_Z Q$ 的最优解,即 $Q_{\min}^* = \min_Z Q$, Z 为优化模型的可行域.

1.2 土石坝施工期安全的度量

溢顶是高土石坝失事的重要原因之一,过大的沉降会导致坝顶超高丧失,导致土石坝溢顶,而土石坝的最大沉降一般发生在心墙区.因此,大坝施工期安全可用心墙区累计沉降的最大值来评价.现有研究表明^[14],在外部荷载及环境条件不变的情况下,心墙的沉降不仅受坝体材料特性的影响,而且受到大坝填筑质量及大坝填筑过程中的进度形象面貌的影响,而后两者又是土石坝填筑进度($h_{i,t}$)的函数,故心墙区的累积沉降与 $h_{i,t}$ 有关.可选取心墙区某一高程点处(如 H_0 高程)的累计沉降来反映大坝施工期的安全,根据该点已监测到的样本数据,建立坝体该点处累积沉降与填筑进度形象 $h_{i,t}$ 和时间 t 的统计回归模型,然后可利用建立的模型预测一定时期内随着大坝填筑进度该点处的累积沉降.

本文从瞬时变形和蠕变的角度来分析施工期坝体的沉降^[15],建立如式(3)所示的心墙区 H_0 高程处测点的沉降模型:

$$S_t = f(h_{1,t}, h_{2,t}, h_{3,t}, \varphi(t)) \quad (3)$$

式中: S_t 表示心墙区 H_0 高程处测点在第 t 个月的累计沉降值; $h_{1,t}, h_{2,t}, h_{3,t}$ 分别表示相对于 H_0 高程的心墙

区、下游堆石区、上游堆石区在第 t 个月的等效填筑高度; $\varphi(t)$ 表示蠕变核, 且 $\varphi(t) = 1 - \exp(-t)$.

心墙区 H_0 高程处累计沉降的最大值 S 为: $S = \max_{0 \leq t \leq k} S_t$, k 表示计划安排进度的月数. 考虑到反滤料、细堆石料等分区较小, 对沉降影响不大, 故上述模型将大坝分区简化为只考虑心墙区和上、下游堆石区 3 个分区. 当 S 越小时, 大坝越安全.

将 S 归一化, 得:

$$\hat{S} = \frac{S_{\min}^*}{S} \quad (4)$$

式中: $S_{\min}^*$ 为单目标优化问题 $\min_Z S$ 的最优解, $S_{\min}^* = \min_Z S$.

1.3 土石坝填筑进度的度量

土石坝填筑进度可用填筑工程量来度量, 各分区填筑进度越快, 填筑工程量越大; 反之越小. 大坝填筑工程量 V 为各分区填筑工程量之和, 即

$$V = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^k V_{i,t} \quad (5)$$

式中: $V_{i,t}$ 表示第 i 个分区第 t 个月的填筑工程量.

假设同一分区不同施工仓面的铺层厚度均不变化, 由于铺层厚度不大 (一般心墙区为 30 cm, 堆石区为 80 ~ 120 cm), 故某施工仓面的填筑工程量可约等于该仓面面积与铺层厚度的乘积, 则有:

$$V_{i,t} = \sum_{j=1}^{M_{i,t}} \Delta h_i \cdot S_{ij} \quad (6)$$

式中: Δh_i 表示第 i 个分区的仓面铺层厚度, 由设计资料确定; $M_{i,t}$ 表示第 i 个分区第 t 个月施工的仓面数量; S_{ij} 表示第 i 个分区第 j 个仓面的面积.

将 V 归一化, 得

$$\hat{V} = \frac{V_{\min}^*}{V} \quad (7)$$

式中: $V_{\min}^*$ 为求单目标优化问题 $\min_Z V$ 的最优解, $V_{\min}^* = \min_Z V$.

一般, 土石坝填筑是多工作面平行流水施工, 即填筑过程占直线工期, 仓面备仓 (坝料运输、摊铺、质检等) 时间不占直线工期. 当不考虑坝面碾压过程中其他因素影响时 (如碾压机械配置不变), 土石坝各月的沉降量和填筑工程量与各月的填筑高度有关, 而填筑高度与碾压遍数合格率有关:

$$h_{i,t} = \Delta h_i \cdot M_{i,t} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{i,t}} \alpha_i a_{ij} = T_{i,t} \quad (9)$$

$$a_{ij} = \frac{n_{0,i} \cdot R_i}{B \cdot v \cdot N_{c,i}} \cdot S_{ij} \quad (10)$$

式中: a_{ij} 为第 i 个分区第 j 个仓面的理论填筑时间; v, B 分别为设计的碾压机车速和碾轮的有效宽度; $n_{0,i}, N_{c,i}$ 分别为第 i 个分区设计的碾压遍数和碾压机械数量; $T_{i,t}$ 为第 i 个分区第 t 个月的有效施工时间, 可根据历史气象资料统计得到 (可由设计资料提供); α_i 为第 i 个分区的时间利用系数, 可通过已施工仓面实时采集的相关数据 (如司机交接班闲置、碾压机械维修、仓面施工暂停等) 来统计得到. 若已知 $\alpha_i, T_{i,t}, n_{0,i}, N_{c,i}, B, v$ 及 Δh_i , 则可由 R_i 确定 $h_{i,t}$. 由式 (3) 及式 (6) 和 (8), 可知 S_t 和 $V_{i,t}$ 是 $h_{i,t}$ 的函数, 则可得 S_t 和 $V_{i,t}$ 亦是 R_i 的函数.

1.4 多目标综合优化模型及目标单一化

建立综合考虑填筑质量与大坝施工期安全的土石坝施工进度综合优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \hat{Q}, \quad \frac{1}{\hat{S}}, \quad \hat{V} \right\} \\ & \text{s. t. } \left\{ \begin{aligned} H_{i,q} & \geq E_{i,q} \\ 90\% & \leq R_i \leq 100\% \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $H_{i,t}$ 为第 i 个分区第 t 个月的填筑高程, 即 $H_{i,t} = \sum_{m=0}^t h_{i,m} + E_{i,0}$, $E_{i,0}$ 为第 i 个分区的起始高程; $E_{i,q}$ 为由计

划要求的第 i 个分区在第 q 个典型时刻(即第 q 个月)达到的填筑高程.

由上文分析可知 $\hat{Q}, \hat{S}, \hat{V}$ 均是碾压遍数合格率 R_i 的函数,故该模型的优化变量可取 $R_i, i=1, 2, \dots, N$.

为方便下文算法求解,需将该多目标综合优化问题转化为单目标优化问题.可采用专家打分法确定各目标的权重 $\bar{A}$,则将模型(11)转化为单目标优化模型:

$$\min F = \min \left(\hat{Q}, \frac{1}{\hat{S}}, \hat{V} \right) \cdot \bar{A} \quad (12)$$

2 模型求解的遗传和声算法

2.1 改进和声算法(IHS)求解方法

采用改进和声算法^[16]求解模型(12)的具体步骤如下:

(1)初始化算法参数值,确定和声记忆库的大小 H_m ,最大迭代次数 $I_{\max}$,和声记忆保留概率 H_c ,最小的音频调节概率 $P_{\min}$,最大的音频调节概率 $P_{\max}$,最小带宽 $B_{\min}$,最大带宽 $B_{\max}$,以及优化模型的变量个数 N (即为土石坝坝料的分区数).

(2)初始化和声记忆库 HM ,在碾压遍数合格率 R_i 的取值范围 $0.9 \sim 1.0$ 之间随机生成 H_m 个所有分区的碾压遍数合格率的和声 $R^j, R^j = (R_1^j, R_2^j, \dots, R_N^j), j=1, 2, \dots, H_m$,放入和声记忆库中.和声记忆库的形式如下:

$$HM = \left\{ \begin{array}{l} R^1 = (R_1^1, R_2^1, \dots, R_N^1) \\ R^2 = (R_1^2, R_2^2, \dots, R_N^2) \\ \vdots \\ R^{H_m} = (R_1^{H_m}, R_2^{H_m}, \dots, R_N^{H_m}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} F(R^1) \\ F(R^2) \\ \vdots \\ F(R^{H_m}) \end{array} \quad (13)$$

式中: R_i^j 为式(12)的优化变量, $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, H_m$,即第 j 个和声中第 i 个分区的碾压遍数合格率; $F(R^j)$ 为式(12)在第 j 个和声取值下的目标函数值.

(3)生成新的和声,得到各分区的碾压遍数合格率的一个新值 $R^{new} = (R_1^{new}, R_2^{new}, \dots, R_N^{new})$. R_i^{new} 为第 i 个分区的碾压遍数合格率的新解, R_i^{new} 由下式确定:

$$R_i^{new} = \begin{cases} R_i^{new} \in (R_1^1, R_2^1, \dots, R_N^{H_m}), & r_1 < H_c \\ R_i^{new} \in R_i, & r_1 \geq H_c \end{cases} \quad (14)$$

式中: r_1 为 $[0, 1]$ 之间的随机数,且 $90\% \leq R_i \leq 100\%$. 式(14)表示以 H_c 的概率选取和声记忆库中第 i 个分区的任意一个和声,以 $(1-H_c)$ 的概率取 R_i 值域上的任意值.

如果第 i 个分区的碾压遍数合格率 R_i^{new} 选自和声记忆库 HM 中,对其进行音调微调,即

$$R_i^{new} = \begin{cases} R_i^{new} \pm r_2 \cdot B_l, & r_2 < P_l \\ R_i^{new}, & r_2 \geq P_l \end{cases} \quad (15)$$

式中: r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, P_l 和 B_l 分别表示第 l 次迭代下的音频调节概率和带宽.与传统的和声搜索算法相比较,改进和声算法的 P_l 和 B_l 是动态变化的,由下式确定^[17]:

$$P_l = P_{\min} + \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{I_{\max}} \times I \quad (16)$$

$$B_l = B_{\max} \cdot \exp(c \cdot I), \quad c = \frac{\lg\left(\frac{B_{\min}}{B_{\max}}\right)}{I_{\max}} \quad (17)$$

在优化计算的前期保持较小的 P_l 和较大的 B_l ,可以有效利用和声记忆库积累的信息,从而快速找到局部最优解;在优化后期,较大的 P_l 和较小的 B_l ,可以增强新解的多样性,从而跳出局部最优解,并快速找到全局最优解.重复上述步骤,对每一个分区和声生成新解,则有 $R^{new} = (R_1^{new}, R_2^{new}, \dots, R_N^{new})$.

(4)更新和声记忆库.利用式(12)计算新解 R^{new} 的模型目标值 F ,如果新解的 F 值小于和声记忆库 HM 中最大的 F 值,则将该新解 R^{new} 替换最大的 F 值所对应的和声 R^{worst} ,并更新至和声记忆库 HM .

(5)检验终止条件,并输出优化结果.重复步骤(3)和(4),直至达到最大的迭代次数 I_{max} 为止;而后输出优化结果,得到最优解 $R^* = (R_1^*, R_2^*, \dots, R_N^*)$ 及其对应的 F^* ,并得到各分区各月的最佳进度安排 $h_{i,t}^*$ 以及合理的最大沉降 S^* 等.

2.2 遗传和声算法(GAHS)求解方法

改进和声算法(IHS)主要是基于邻域搜索,初始解的好坏对搜索的性能影响很大,尤其是一些带有很复杂约束的优化问题,随机给出的初始解很可能是不可行的,甚至通过多步搜索也很难找到可行解;且新解是随机选取生成或对解变量进行微调产生,使得收敛花费的迭代次数比较多.因此本文采用遗传和声算法(GAHS)^[18]改进了IHS算法中的和声记忆库和新解的产生方式.GAHS算法中和声库的初始化不是随机产生的,而是利用遗传算法中的选择、交叉和变异操作经过 G_{max} 次迭代后产生 G 个新种群,从新种群中选出最好的 H_m 个个体作为遗传和声算法的初始解,从而能提高算法的寻优速度.GAHS算法保留了改进和声算法产生新解的方式,同时还利用遗传算法中的交叉操作产生新解.高土石坝施工质量-安全-进度综合优化模型的遗传和声算法流程如图1所示.

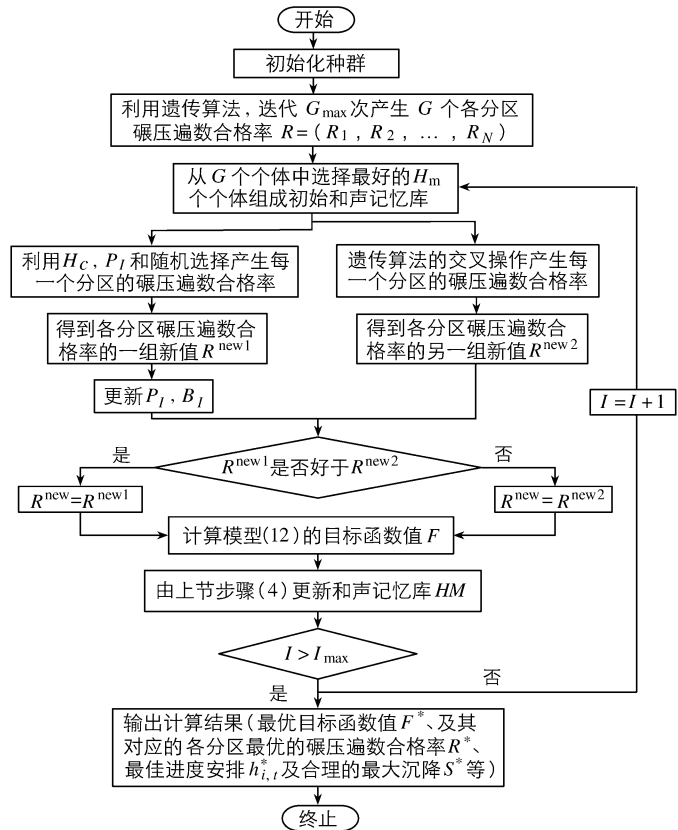


图1 高土石坝施工进度优化的遗传和声算法流程

Fig. 1 Genetic harmony algorithm flow chart for an optimal model

3 工程实例分析

3.1 工程概况及基本计算参数

某心墙堆石坝最大坝高 261.5 m,主要分为上游粗堆石料Ⅰ区、上游粗堆石料Ⅱ区、上下游细堆石区、上下游反滤区、砾质心墙区、下游粗堆石料Ⅰ区、下游粗堆石料Ⅱ区等 7 个分区,下文分别用 1~7 区表示.本文利用钟登华等^[13]研制开发的数字大坝技术,实时采集相关施工信息,分别统计得到每个分区的时间利用系数 α_i ;碾轮宽取 2 m.考虑到土石坝施工进度受降雨、气温等因素影响,尤其雨季更是对心墙填筑影响巨大,表 1 是各月的有效施工时间(来自于设计院提供的资料).各分区的参数值见表 2,改进和声算法与遗传和声算法的计算参数见表 3.

表 1 各坝料分区有效施工时间

Tab. 1 Effective construction time of each dam material zone

分 区	各月份有效施工时间/d											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
堆石区	31	28	31	29	30	29	29	30	28	31	30	31
心墙区	30	27	26	28	20	0	0	0	10	22	25	29
反滤区	30	24	25	26	17	6	2	8	10	18	23	28

表 2 各坝料分区参数值
Tab. 2 Designed parameters of each dam material zone

分 区	设计碾压遍数 $n_{0,i}$	设计碾压机数量 $N_{c,i}$	时间利用系数 α_i	分 区	设计碾压遍数 $n_{0,i}$	设计碾压机数量 $N_{c,i}$	时间利用系数 α_i
1 区	8	2	3.74	5 区	10	5	2.43
2 区	8	2	3.74	6 区	8	1	3.66
3 区	6	1	3.89	7 区	8	3	3.66
4 区	6	1	3.89				

表 3 模型求解算法的参数值
Tab. 3 Parameters of IHS and GAHS

改进和声算法参数值(HIS)			遗传和声算法参数值(GAHS)		
和声记忆库的大小 H_m	50		遗传算法的种群规模 G	70	
变量的个数 N	7		遗传算法最大迭代次数 $G_{\max}$	100	
最大迭代次数 $I_{\max}$	1 000		遗传算法的代沟 $GGAP$	1.0	
和声记忆保留概率 H_c	0.95		遗传算法的交叉概率 P_c	0.85	
最小的音频调节概率 $P_{\min}$	0.4		遗传算法的变异概率 P_m	0.14	
最大的音频调节概率 $P_{\max}$	0.99				
最小带宽 $B_{\min}$	0.001				
最大带宽 $B_{\max}$	0.1				

注：遗传和声算法的其他参数值与改进和声算法的参数值相同。

3.2 进度优化及其与实际进度的比较分析

考虑各目标的重要性,采用专家打分法,可得到填筑质量、大坝安全和施工进度 3 个目标的权重:
 $\tilde{A} = (\text{填筑质量, 大坝安全, 施工进度})^T = (0.438\ 9, 0.344\ 4, 0.216\ 7)^T$
取心墙区 625.82 m 高程处的测点,利用 2009 年 10—12 月的 20 组样本,根据式(3)建立该测点的沉降回归模型:

$$S_t = 387.78 + 14.98 \times h_{1,t} \times (1 - \exp(-t/5)) - 171.39 \times \lg h_{2,t} - 18.07 \times \lg h_{3,t} \quad (18)$$

该模型决定系数 R^2 为 0.887 4,且能通过 F 检验.利用另 5 组数据对该回归模型进行检验,得到检验组最大相对误差为 0.75%,实测值与输出值线性拟合斜率为 0.908 4,说明模型精度较高.
为验证本文方法的可行性,基于当前(2009 年 12 月底)的实际施工进度及观测样本建立的沉降模型式(18),对大坝 2010 年 1—3 月的施工进度进行优化.采用 IHS 算法和 GAHS 算法,得到两种算法优化后的填筑进度,其与实际进度的比较见表 4.由表可知,采用算法优化后的填筑进度与实际进度相比工程量相差不大,优化后的进度比实际略快一些,但沉降也有所增加,主要原因是实际施工中春节期间有效施工时间及投入班组有所下降.从两者结果看,优化后的进度合理,说明本文方法可用于指导现场实际施工.

表 4 实际进度与算法优化后的进度比较
Tab. 4 Comparison between actual schedule and optimized schedule

分 区	起始填筑 高程/ m	结束填筑高程/ m			累计沉降最大值 * / mm			工程量/ (10 ⁵ m ³)			质量指标 R_i	
		实际	IHS	GAHS	实际	IHS	GAHS	实际	IHS	GAHS	IHS	GAHS
1	680.99	687.37	691.39	691.39				2.04	3.38	3.38	0.97	0.97
2	651.30	671.30	671.30	671.30				5.11	5.31	5.31	0.94	0.95
3	647.45	668.00	672.69	672.09				1.57	1.84	1.79	0.97	0.98
4	647.19	668.41	672.69	672.09				1.48	1.76	1.70	0.96	0.98
5	647.19	668.41	671.76	671.10	549.0	564.48	552.23	5.15	6.08	5.53	0.95	0.97
6	675.00	684.50	688.60	688.60				1.21	1.67	1.67	0.98	0.98
7	664.10	678.00	677.70	676.90				8.80	8.62	8.43	0.95	0.97
合计	-	-	-	-	-	-	-	25.36	28.66	27.81	6.72	6.80

注：* 表示心墙区 625.82 m 高程处安全测点的累积沉降最大值。

3.3 下阶段进度计划优化

本节将采用 GAHS 算法对下一阶段(即 2010 年 4—6 月)的进度进行优化安排. 首先采用 2010 年 3 月前的 25 组样本, 并根据式(3)建立心墙区 643.09 m 高程处测点的沉降模型如下:

$$S_t = 333.78 + 23.92 \times h_{1,t} \times (1 - \exp(-t/5)) + 152.16 \times \lg h_{2,t} - 34.38 \times \lg h_{3,t} \quad (19)$$

该模型决定系数 R^2 为 0.873 6, 通过 F 检验. 另利用 8 组数据, 对式(19)进行检验, 得到检验组最大相对误差为 0.93%, 实测值与输出值线性拟合斜率为 0.890 4. 实测值与模型计算值的对比如图 2 所示.

利用 GAHS 算法得到优化后的计划填筑进度如图 3 和表 5 所示. 经计算, 该阶段心墙区 643.09 m 高程处测点的最大累积沉降量为 709.87 mm, 沉降量符合设计控制标准. 此结果可为在充分考虑填筑质量和大坝安全情况下该阶段进度计划的制定提供依据.

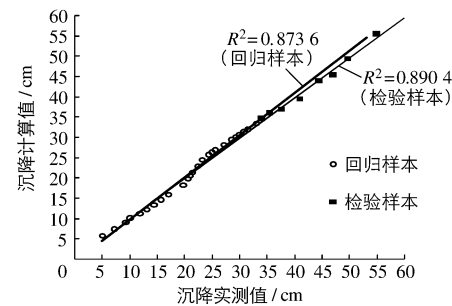


图2 沉降实测值与模型计算值比较

Fig. 2 Comparison between the measured and calculated values of settlement

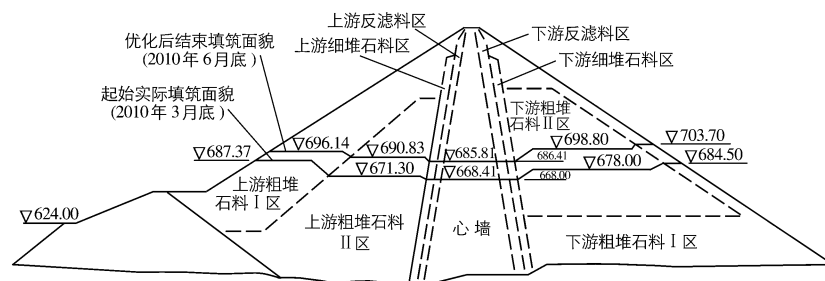


图3 2010年4—6月坝体填筑计划形象面貌(单位: m)

Fig. 3 Optimized construction appearances from April to June, 2010 (unit: m)

表5 优化后的2010年4—6月的填筑进度计划

Tab. 5 Optimized schedule from April to June, 2010

分区	起始实际填筑高程/ m	优化后结束填筑高程/ m	质量指标 R	工程量/ (10^5 m^3)
1 区	687.37	696.14	0.96	3.27
2 区	671.30	690.83	0.93	4.30
3 区	668.00	686.41	0.97	1.37
4 区	668.41	685.81	0.98	1.10
5 区	668.41	685.81	0.98	4.50
6 区	684.50	703.70	0.97	1.59
7 区	678.00	698.80	0.96	14.61
合计	—	—	6.75	30.74

4 结 语

在高土石坝施工进度优化中,大坝填筑质量和施工安全是需考虑的重要因素. 本文提出了用遗传和声算法解决高土石坝施工进度优化这一复杂的非线性多目标综合优化问题,在综合考虑土石坝填筑质量、大坝安全和施工进度相互制约关系的基础上,建立了高土石坝填筑质量-安全-进度综合优化模型,进而给出了该模型求解的遗传和声算法. 该算法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,实现了算法的快速寻优. 实例应用表明了该方法的可行性,可实现在确保大坝填筑质量与施工安全的前提下,对将来某一时期内的高土石坝施工进度进行优化安排. 本文研究采用的方法可为高土石坝施工进度计划优化与实时控制提供新的途径.

参 考 文 献:

- [1] 王仁超, 邓银启. 高堆石坝填筑施工过程中协调控制计算机仿真建模[J]. 天津大学学报, 2009, 42(3): 220-226. (WANG Ren-chao, DENG Yin-qi. Modeling for computer simulation of coordinated control in rockfilling construction of high rockfill dam[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(3): 220-226. (in Chinese))
- [2] 涂扬举, 马光文, 陶春华, 等. 基于加速遗传算法的堆石坝施工优化[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 26-28. (TU Yang-ju, MA Guang-wen, TAO Chun-hua, et al. Construction optimization of moraine dam based on accelerating genetic algorithm[J]. Water Power, 2007, 33(1): 26-28. (in Chinese))
- [3] 胡程顺, 钟登华, 张静, 等. 土石方动态调配模型与可视化研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(12): 73-79. (HU Cheng-shun, ZHONG Deng-hua, ZHANG Jing, et al. Study on the model and its visualization for dynamic allocation of earth[J]. Engineering Science, 2003, 5(12): 73-79. (in Chinese))
- [4] 钟登华, 张平. 基于实时监控的高心墙堆石坝施工仿真理论与应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 103-107. (ZHONG Deng-hua, ZHANG Ping. Theory and application of construction simulation for high core rock-fill dam based on real-time monitoring[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 103-107. (in Chinese))
- [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. (GAO Xing-fu, HU Cheng-shun, ZHONG Deng-hua. Study synthesis optimization of time-cost-quality in project management[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007(10): 112-117. (in Chinese))
- [6] ZHANG H, LI H, TAM C M. Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling[J]. International Journal of Project Management, 2006, 24(1): 83-92.
- [7] DENG L Y, LIN Y, CHEN M. Hybrid ant colony optimization for the resource-constrained project scheduling problem[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1): 67-71.
- [8] 李倩, 刘霁. 基于蚁群算法的工程项目资源受限施工进度优化[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(8): 147-151. (LI Qian, LIU Ji. Optimization for resource constrained trade-off time in construction project based on ant colony optimization[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(8): 147-151. (in Chinese))
- [9] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [10] LEE K S, GEEM Z W. A new structural optimization method based on harmony search algorithm[J]. Computers & Structures, 2004, 82(9-10): 781-798.
- [11] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. Harmony search optimization: application to pipe network design[J]. International Journal of Model and Simulation, 2002, 22(2): 125-133.
- [12] GEEM Z W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search[J]. Engineering Optimization, 2006, 38(3): 259-280.
- [13] ZHONG D H, LIU D H, CUI B. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(7): 1906-1913.
- [14] 张社荣, 韩启超, 谭尧升, 等. R/S 法的土石坝施工工期沉降规律及预警标准研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(8): 164-170. (ZHANG She-rong, HAN Qi-chao, TAN Yao-sheng, et al. A R/S method-based study on settlement regularity and warning standard of earth-rock dam during construction[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(8): 164-170. (in Chinese))
- [15] 黄铭, 黄伟, 刘俊. 基于遗传蠕变理论的土石坝沉降监测混合模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 164-173. (HUANG Ming, HUANG Wei, LIU Jun. Hybrid model for monitoring settlements of embankment dams based on genetic creep theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl2): 164-173. (in Chinese))
- [16] 雍龙泉. 和声搜索算法研究进展[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(7): 244-248. (YONG Long-quan. Advance in harmony search algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(7): 244-248. (in Chinese))
- [17] MAHDAVI M, FESANGHARY M, DAMANGIR E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(2): 1567-1579.

- [18] 韩红燕, 潘全科, 任文娟, 等. 基于遗传和声算法求解函数优化问题[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1723-1725.
(HAN Hong-yan, PAN Quan-ke, REN Wen-juan, et al. Function optimization problem based on genetic harmony algorithm [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1723-1725. (in Chinese))

Genetic harmony search algorithm for comprehensive optimization of high earth-rockfill dam construction schedule

LIU Dong-hai, GAO Ge

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Comprehensive optimization of high earth-rockfill dam construction schedule is a complex nonlinear multi-objective decision-making problem, which needs not only to consider the resources allocation and production effectiveness, but also to take into account the influence of compaction quality and dam safety on dam construction schedule. On the basis of quantitatively analyzing the relationship among compaction quality, dam safety and construction schedule, a comprehensive optimum model of the construction schedule coupling compaction quality and dam safety was established. To overcome the limitations of some traditional optimal methods, a genetic harmony search algorithm for the model was presented to achieve the best arrangement of the high earth-rockfill dam construction schedule with consideration of compaction quality and dam safety. Finally, a case study was given to prove the feasibility of the method mentioned above. It is shown that the method provided by the paper may be a new approach to optimizing and real-time controlling of high earth-rockfill dam construction schedules.

Key words: high earth-rockfill dam; construction schedule; compaction quality; dam safety; comprehensive optimization; genetic harmony search algorithm

版 权 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。

该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《水利水运工程学报》编辑部