

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.005

基于 1stOpt 的水库预泄期最优泄流调度模型

胡淑彦¹ 程先云² 柴福鑫² 高 静² 杨冠宁¹

(1. 北京市海淀区水务局, 北京 100089; 2. 中国水利水电科学研究院遥感技术应用研究中心, 北京 100048)

摘要: 基于通用优化计算平台 1stOpt, 探讨了不同目标函数及约束条件下的水库泄流优化调度数学模型。结果表明, 所建立的水库最优泄流调度模型能适应和满足不同任务、多目标的要求, 并具有通用性和普适性; 1stOpt 全局优化能力强、简单易用, 可广泛应用于水利水电等工程领域中的优化计算。

关键词: 水库; 预泄期; 泄流; 调度模型; 最优化; 1stOpt

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)04-0377-07

优化理论与技术在水文水资源领域有着广泛的应用, 诸如遗传算法、免疫算法、模拟退火等现代仿生进化理论, 已有众多实际成功应用的案例。Duan 等^[1]在 20 世纪 90 年代初提出的 SCE-UA 算法, 在水文水资源界有着广泛的影响, 至今仍是许多水文、水力计算软件首选的优化求解器; 金菊良等^[2]提出了优于一般遗传算法的加速遗传算法; 杨晓华等^[3]采用引入混沌理论的格雷码遗传算法, 大大提高了算法的全局寻优能力; 向波等^[4]通过粒子群优化算法中免疫信息处理机制的引入, 构建了免疫粒子群算法, 并将该算法成功地用于解决水库优化调度问题; 吴学文等^[5]提出了将改进遗传算法和混沌优化相耦合的改进混沌遗传算法。由于这些优化算法研究成果没有提供类似于 Lingo 的通用计算平台或 API 组件或成熟的源代码, 因此对无论是否精通算法和编程的研究者而言, 都存在以下 2 大难点: (a) 难于重现算法, 也无法验证算法的效率、可靠性和可行性; (b) 无法较快较好地地将算法用于解决自己的实际问题。

通用优化计算平台 1stOpt (first optimization) 具有强大的全局优化能力、简洁易用的用户界面、可扩展的高级语言支持, 可广泛应用于非线性回归、曲线拟合、非线性复杂模型参数估算求解以及线性/非线性规划等各学科领域。其特有的通用全局优化算法, 更是极大地提升了全局非线性寻优能力, 并具备了不依赖初值的特性, 这使其在降低使用要求的同时, 还大大提高了求解成功率。此外, 1stOpt 直接支持 Basic、Pascal、C++ 和 Fortran 等高级语言, 因而能够描述并解决任何复杂的工程优化问题。对于终端用户, 不要求掌握算法, 只需将自己的问题如目标函数、约束函数等描述清楚即可, 因而极大地方便了用户。该计算平台已在水利水电^[6-8]、能源^[9]、环境^[10]、农业工程^[11]和社会经济^[12]等众多研究领域得到了应用和验证。本文基于 1stOpt 计算平台, 探讨了不同目标函数和约束条件下的水库泄流优化调度数学模型。

1 1stOpt 数值优化计算评估测试

评价或检验优化算法或优化计算平台的最好方法就是用一些通用、经典、无专业障碍的数学测试题或题集进行验证。本文以 3 组实例检验 1stOpt 的功能。此外, 由于 Lingo 是世界上公认的著名专业优化软件, 出于横向对比, 实例均同时以 Lingo 和 1stOpt 分别实现。

a. 非线性拟合问题。非线性拟合问题实际上可归结为标准的无约束优化问题, 非线性拟合通常采用最小二乘法, 麦夸特优化算法则是当今公认的最佳拟合算法。美国国家标准与技术研究院(NIST)提供有一套 27 道非线性拟合测试题, 世界上几乎所有著名的数据分析软件包, 如 SAS 和 SPSS 等都以能通过该套测试题集为验证标准。经对比测试, 1stOpt 是目前世界上唯一不依赖使用 NIST 提供的初始值, 而能以任意随机初始值就可求得全部最优解的软件平台(如果使用 NIST 提供的初始值, 则更容易求得最优解)。由于在实际应用中, 选择确定合理的初始值组是一件非常困难的事, 尤其是在参数量比较多的情况下, 从此意义而言, 1stOpt

收稿日期: 2010-07-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-006-05); “十一五”国家科技支撑计划(2009BAK56B01)

作者简介: 胡淑彦(1962—), 女, 辽宁大连人, 高级工程师, 主要从事水资源优化调度与配置研究。E-mail: hu6212@163.com

的实用能力达业界领先水平.

b. 非线性方程组问题. 非线性方程组的求解实际上也是一种优化问题. 测试方程组

$$\begin{cases} x_1^{x_2} + x_2^{x_1} - 5x_1x_2x_3 - 85 = 0 \\ x_1^3x_2^3x_3^2 - 60 = 0 \\ x_1^{x_3} + x_3^{x_1} - x_2 - 0.55 = 0 \end{cases}$$

(1)

看似简单,变量也仅有3个,但对于Lingo,无论怎样改变设置和选项,最好结果都是一局部最优解,无法得到全局最优解,而1stOpt则可很容易求解.表1为1stOpt和Lingo将非线性方程组转换成无约束函数优化问题的代码及相应结果.

表1 1stOpt及Lingo求解非线性方程组代码

Table 1 Codes and results for solving nonlinear equations using 1stOpt and Lingo		
计算平台	代码	结果
1stOpt	Algorithm = UGO[100]; MinFunction (x1^x2 + x2^x1 - 5 * x1 * x2 * x3 - 85)^2 + (x1^3 * x2^x3 * x3^x2 - 60)^2 + (x1^x3 + x3^x1 - x2 - 0.55)^2 ;	最优值 = 1.108 317 158 845 73 × 10 ⁻¹⁴ X = (19 390.625 20 , 0.450 0 , 2.330 96 × 10 ⁻²⁵)
Lingo	Min = (x1^x2 + x2^x1 - 5 * x1 * x2 * x3 - 85)^2 + (x1^3 * x2^x3 * x3^x2 - 60)^2 + (x1^x3 + x3^x1 - x2 - 0.55)^2 ; @ Freq(x1);@ Freq(x2);@ Freq(x3);	最优值 = 0.064 635 02 X = (4.834 151 2, 4.399 950 0, 6.160 029)

c. 函数优化测试. 测试函数

$$\min -40x_1\cos x_2 - 35x_2\sin x_1 + 15x_1^2 - 20\sin x_1 + x_2^2 - 25x_1x_2\sin(x_1x_2^2\cos(x_1+x_2))$$

(2)

由笔者构造并提出,其中 x_1 与 x_2 均大于或等于0.该函数虽然只有2个变量,却有无数个局部最优值,是一相当复杂的函数.如图1所示,在区间 $X \in [0, 50]$ 范围内,函数值分布如同起伏的山坡上长满了茂密且高低不同的林木,若想找到“最低根部点”,无疑大海捞针.Lingo所得仍为局部最优,而1stOpt则可以约90%的概率求得最优解.图2为最优解附近的三维放大图($x_1 = [20.3, 20.6]$, $x_2 = [24.9, 25.2]$).由图2可知,即使参数变化范围很小,对应的函数值变化分布也极其复杂.从计算结果看,在求解变量上限未知的情况下,Lingo的全局寻优自动外延能力较弱.表2为该测试题的1stOpt及Lingo代码和结果.

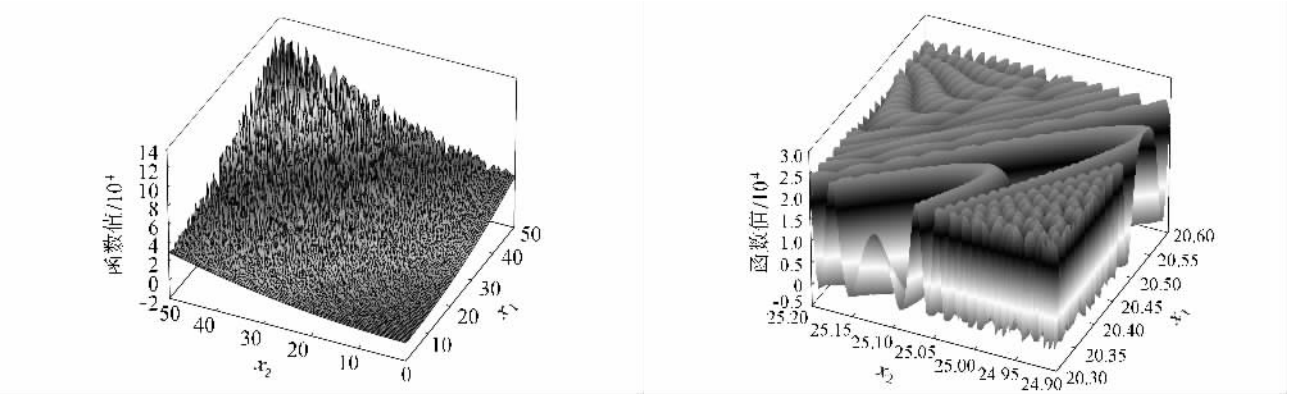


图1 测试函数大尺度三维图

Fig. 1 Large-scale 3-D graph of test function

图2 测试函数最优解附近三维放大图

ig. 2 Enlarged 3-D graph near optimal solution of test function

表2 1stOpt及Lingo函数优化代码及结果

Table 2 Codes and results for function optimization using 1stOpt and Lingo		
计算平台	代码	结果
1stOpt	Algorithm = SM[150]; ParameterDomain = [0 ,]; MinFunction - 40 * x1 * Cos(x2) - 35 * x2 * Sin(x1) + 15 * x1^2 - Sin(x1) * 20 + 12 * x2^2 - 25 * x1 * x2 * Sin(x1 * x2^2 * Cos(x1 + x2));	最优值 = - 715.775 06 X = (20.478 641 2 , 25.066 028 5)
Lingo	Min = - 40 * x1 * @ cos(x2) - 35 * x2 * @ sin(x1) + 15 * x1^2 - @ sin(x1) * 20 + 12 * x2^2 - 25 * x1 * x2 * @ sin(x1 * x2^2 * @ cos(x1 + x2));	最优值 = - 53.183 26 X = (1.367 264 0, 370.831 8)

2 水库预泄期泄流模型

某水库位于黄河上游干流,库容较小,无防洪任务,主要功能为发电,为河床式径流电站,装机容量为 324.5 MW。为充分利用水能资源,其汛期运行水位拟从原先的 1 474 m 抬高至 1 478 m,而运行水位的提高,意味着风险的增加,根据设计,其保障前提条件是在 20 年一遇的洪峰到来前,在 12 h 预泄期内必须将库水位由 1 478 m 降至安全的 1 472 m,以防止洪水过程中水库回水影响库尾滩地,同时确保洪峰安全过库。

根据实际要求,预泄期下泄流量过程的确定,总体上必须考虑并满足以下几个条件 (a)在规定的预泄期内,必须将水位降至指定的安全水位 (b)出于安全和操作方便且可行考虑,泄流过程中库水位须尽量保持平稳渐变,避免陡升陡降 (c)每一时刻的下泄流量不能大于同时刻水库最大泄流能力 (d)泄流过程中的最大下泄流量应满足下游防洪要求,即不能超过下游最大承受来流量 (e)单位时间最大库区水位的下降高度应在合理允许的范围内。如何在确保上述条件的前提下,合理地确定预泄期内下泄流量过程进而科学地指导并制订水库调度方案有着极为重要的现实意义。传统的依靠经验或通过简单的试算法求得的结果,不论其精度还是实用性,都难以满足要求。

本研究基于 1stOpt 计算分析平台建立水库预泄期泄流最优数学模型,并进而通过 1stOpt 独特且强大的全局非线性优化求解能力确定最佳调度方案。此外,由于建立的水库泄流数学模型及 1stOpt 均具有普适性和通用性,因而也可非常容易地移植并应用于其他不同类型的水库优化调度。

2.1 基本资料

基本资料主要是预泄期洪水入库流量、水位-库容关系、水位-泄流能力关系等。

表 3 给出了 20 年一遇洪水过程中洪峰到来前 12 h 洪水入库流量,洪峰流量为 6 050 m³/s。

表 3 洪水入库流量

Table 3 Inflow discharge of reservoir

时间/h	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	6 031	6 033	6 034	6 036	6 037	6 039	6 041	6 042	6 044	6 045	6 047	6 048	6 050	6 036

水位-库容关系为

$$H = 13.45V^{0.151\,1233} + 1\,432.621\,65$$

(3)

式中:H——水位,m;V——库容,万 m³。

水位-泄流能力关系为

$$Q = 60.142\,485(H - 1\,458.434\,4)^{0.528\,498} + 328.517\,018(H - 1\,452.137\,93)^{0.529\,6525} + 1\,232$$

(4)

式中:Q 为泄流能力,m³/s。

泄流优化方案计算用到的水库调洪演算基本公式为

$$\Delta V = V_t - V_{t+1} = \left(\frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} - \frac{q_t + q_{t+1}}{2} \right) \Delta t$$

(5)

式中:V_t,V_{t+1},Q_t,Q_{t+1},q_t,q_{t+1}——t 及 t+1 时的库容、入库流量和泄流量;Δt——计算时段。

2.2 优化泄流调度方案比较

表 4 方案 1 计算结果

Table 4 Calculated results of scheme 1

时间/h	泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	库水位/m	时间/h	泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	库水位/m
0	6 031.0	1 478.0	7	6 151.6	1 472.2
1	7 947.5	1 476.3	8	6 107.2	1 472.1
2	7 324.3	1 474.9	9	6 081.4	1 472.0
3	6 867.8	1 473.9	10	6 047.0	1 472.0
4	6 555.1	1 473.2	11	6 048.0	1 472.0
5	6 352.8	1 472.7	12	6 050.0	1 472.0
6	6 227.4	1 472.4	13	6 036.0	1 472.0

2.2.1 方案 1 按最大下泄能力(敞泄)泄流的方案

该方案的泄流方式是从预泄期开始就按水库最大泄流能力泄流,直至预定水位。这种泄流方式不需要额外复杂计算,操控简单,也是目前大部分水库常用的调度方式,计算结果见表 4。由表 4 可以看出,虽然该方案能在 9 h 内就将水位降至目标水位 1 472 m,但其泄流量及库水位波动变化极大,如最大单位时段库水位降幅达 1.68 m/h,过快的水位降幅显然不利于水库安全,而最大下泄流量更高达 7 947 m³/s,会对下游防洪安全带来不利影响。

2.2.2 方案2:以泄流平稳为目标的优化调度泄流方案

该最优泄流模型要求泄流过程尽量保持平稳渐变,避免陡升陡降,从数学角度考虑,即从预泄期起始时间至终止时间,每一时刻下泄流量与前一时刻下泄流量差之平方和最小,目标函数为

$$\min f_1 = (q_1 - c_1)^2 + \sum_{i=2}^{11} (q_i - q_{i-1})^2 + (q_{12} - c_2)^2 \tag{6}$$

式中: $q_1, q_2, \dots, q_{12}$ ——待求下泄流量,或称优化决策变量, m^3/s ; c_1, c_2 ——起始和终止流量,分别为 $6\,031$ 和 $6\,036\text{ m}^3/\text{s}$ (表3)。

约束条件1:预泄期泄流量总和与入流量总和之差应等于库容减少量(库水位由 1478 m 降至 1472 m),即

$$\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{q_i + q_{i-1}}{2} - \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \right) \Delta t = V_1 - V_2 \tag{7}$$

式中: q_i, Q_i —— i 时刻入出库流量, m^3/s ; V_1, V_2 ——调洪演算起止时的库容, 万 m^3 ; Δt ——计算时段,本研究 $\Delta t = 1\text{ h}$ 。

约束条件2:每一时刻的计算泄流量 q_i 应小于该时刻最大泄流能力,即

$$q_i \leq q'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \tag{8}$$

式中 q'_i 为 i 时刻对应的最大泄流量,是与决策变量 q_i 相关的动态变化值,由式(4)计算而得。

综上所述,此最优泄流数学优化模型共有12个决策变量,一个库容等式约束及12个流量不等式约束,是一求解难度极高的动态优化问题。因为1stOpt除了其强大的全局优化能力外,还支持直接嵌入标准 Basic, Pascal 和 Fortran 等高级语言,因而本例中用易于理解表述的 Basic 语言进行模型描述,完整的1stOpt代码见表5,求解结果见表6。

2.2.3 方案3:有最大下泄流量及库水位下降限制的优化调度泄流方案

该方案在方案2的基础上增加了下列约束条件:

- a. 最大下泄调度流量不超过 $6\,750\text{ m}^3/\text{s}$, 即 $\max q \leq 6\,750\text{ m}^3/\text{s}$;
- b. 库水位单位时间内最大变化量小于 0.85 m , 即 $\max H \leq 0.85\text{ m}$ 。

1stOpt的求解结果见表6。

2.2.4 方案4:以最大发电效益为目标的优化调度泄流方案

由于该水库的主要功能之一是发电,本方案即以预泄期内最大发电效益为模型优化目标。由于发电效益与水头和水量直接相关,而下泄总水量为一定值,因而该模型的目标函数转换为预泄期内各时段水能之和最大,即

$$\max f_2 = \sum_{i=1}^{12} (h_i - 1472) q_i \tag{9}$$

式中 h_i, q_i 分别为预泄期内各时段下泄流量及对应的库水位。

模型约束条件与方案2相同。1stOpt的求解结果见表6。

2.2.5 方案5:同时考虑泄流平稳与发电效益的多目标优化调度泄流方案

该方案同时考虑了方案2和方案4,是典型的多维高非线性多目标优化问题,其目标函数定义同式(6)和式(9),约束条件与方案2相同。由于式(6)和式(9)定义的目标函数值存在数量级差别,因而很难用简单的权重法将多目标函数单一化。在此,采用最优非劣解集(Pareto解)的概念,即寻找一组可行解,其具体做法是先以发电效益(水能)为单目标求解,然后在合理范围内给定一水能值,使其成为一等式约束,再以泄流平稳为单目标求解,从而可得一组可行解,仍以1stOpt为计算平台,10组计算结果见表7和表8。

2.3 方案小结与分析

计算结果归纳于表9。从泄流平稳角度看,方案1的 f_1 值最大,也即最不平衡,而与其对比,方案2的 f_1 值最小,即泄流最均匀;方案3由于增加了泄流量及水位降幅约束,泄流均匀度有所下降。而如果从发电效益角度看,方案4最好, f_2 值达 $203\,305$, 方案1最差, f_2 值仅为 $85\,433$ 。对于多目标优化调度的方案5,由于只存在 Pareto 解,方案的最后确定可根据实际情况而定,如果强调发电效益可选 Pareto 解10,反之选 Pareto 解1,如果二者兼顾则选 Pareto 解6或7。

表 5 泄流优化模型 1stOpt 代码

Table 5 1stOpt codes of optimization discharge model		
行号	代码	注释
1	Constant n = 12 ;	定义时段长
2	Constant Qir(1 :n)=[6033 6034 6036 6037 6039 6041 6042 6044 6045 6047 6048 6050];	入流过程
3	Parameter x(1 :n)=[5000 9000];	定义变量及取值范围
4	Minimum ;	求最小化问题
5	StartProgram [Basic];	
6	Function H2V(byVal H as Double) as Double	水位-库容子函数
7	H2V = ((H - 1432.621656659)/13.45005468229)(1/0.151123342268) * 10000	
8	End Function	
9	Function V2H(byVal V as Double) as Double	库容-水位子函数
10	V2H = 13.45005468229 * abs(V)0.151123342268 + 1432.621656659	
11	End Function	
12	Function H2Q(byVal H as Double) as Double	水位-泄流量子函数
13	H2Q = 60.142485 * abs(H - 1458.4344)1.528498 + 328.517018 *	
14	abs(H - 1452.13793)0.5296525 + 246 + 986	
15	End Function	
16	Sub MainModel	主程序及标示
17	Dim i as Integer	
18	Dim as Double H0 ,V0 ,DQ ,MaxQ ,MaxDH	
19	Dim as Double WH(12) ,WQ(12)	调度段各水位及流量
20	H0 = 1478	开始起调水位
21	V0 = H2V(H0)	水位 1478 m 时的库容
22	DQ = (6031 - x(1))^2	第 1 点与起始点水位差
23	MaxQ = 0	最大泄流量
24	MaxDH = 0	最大水位差
25	For i = 1 to n	
26	if i = 1 then	
27	V0 = V0 + (Qir(i) + 6031) * 3600 / 2 - (x(i) + 6031) * 3600 / 2	调洪演算
28	else	
29	V0 = V0 + (Qir(i) + Qir(i - 1)) * 3600 / 2 - (x(i) + x(i - 1)) * 3600 / 2	
30	end if	
31	WH(i) = V2H(V0 / 10000)	库容→水位
32	WQ(i) = H2Q(WH(i))	水位→泄流能力
33	if i > 1 then DQ = DQ + (x(i) - x(i - 1))^2	流量差累积
34	MaxDH = Max(MaxDH , abs(WH(i) - WH(i - 1)))	最大水位差
35	MaxQ = Max(MaxQ , x(i))	最大泄流量
36	Next	
37	FunctionResult = DQ + (x(12) - 6036)^2	目标函数 流量差之和
38	ConstrainedResult = V0 = H2V(1472)	库容等式约束
39	ConstrainedResult = For i = 1 :12 If WQ(i) >= x(i)	12 个流量约束
40	ConstrainedResult = 100 * (0.85 - MaxDH) >= 0	方案 3 库水位落差约束
41	ConstrainedResult = 6750 - MaxQ >= 0	方案 3 最大泄流量约束
42	End Sub	
43	EndProgram ;	

表 6 方案 2~4 计算结果

Table 6 Calculated results of schemes 2 , 3 , and 4										
时间/ h	入库流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	方案 2			方案 3			方案 4		
		决策变量(泄流 量)(m ³ ·s ⁻¹)	泄流能力/ (m ³ ·s ⁻¹)	水位/ m	决策变量(泄流 量)(m ³ ·s ⁻¹)	泄流能力/ (m ³ ·s ⁻¹)	水位/ m	决策变量(泄流 量)(m ³ ·s ⁻¹)	泄流能力/ (m ³ ·s ⁻¹)	水位/ m
0	6031	6031.0	8737.2	1478.0	6031.0	8737.2	1478.0	6031.0	8737.2	1478.0
1	6033	6351.2	8676.4	1477.9	6493.0	8649.1	1477.8	6033.0	8737.2	1478.0
2	6034	6593.8	8504.6	1477.5	6732.7	8419.6	1477.3	6034.0	8737.2	1478.0
3	6036	6758.8	8241.6	1477.0	6750.0	8123.5	1476.7	6036.0	8737.2	1478.0
4	6037	6846.3	7906.3	1476.2	6750.0	7803.5	1476.0	6545.1	8639.8	1477.8
5	6039	6856.3	7520.3	1475.4	6750.0	7459.2	1475.3	8111.2	8111.2	1476.7
6	6041	6788.6	7113.1	1474.5	6733.6	7090.2	1474.4	7317.2	7317.2	1474.9
7	6042	6643.5	6726.5	1473.6	6629.3	6722.3	1473.6	6762.0	6762.0	1473.7
8	6044	6420.8	6420.8	1472.9	6420.8	6420.8	1472.9	6420.8	6420.8	1472.9
9	6045	6232.7	6232.7	1472.4	6232.7	6232.7	1472.4	6232.7	6232.7	1472.4
10	6047	6136.7	6136.7	1472.2	6136.7	6136.7	1472.2	6136.7	6136.7	1472.2
11	6048	6090.2	6090.2	1472.1	6090.2	6090.2	1472.1	6090.2	6090.2	1472.1
12	6050	6068.6	6068.6	1472.0	6068.6	6068.6	1472.0	6068.6	6068.6	1472.0
13	6036	6036.0	6036.0	1472.0	6036.0	6036.0	1472.0	6036.0	6036.0	1472.0

表7 多目标优化模型的 Pareto 解

Table 7 Pareto solutions of multi-objective optimal model

组别	水能之和/ ($10^5\text{m}^4\cdot\text{s}^{-1}$)	流量差平方和/ ($10^5\text{m}^6\cdot\text{s}^{-2}$)	组别	水能之和/ ($10^5\text{m}^4\cdot\text{s}^{-1}$)	流量差平方和/ ($10^5\text{m}^6\cdot\text{s}^{-2}$)
1	1.96	3.20	6	2.12	5.48
2	2.00	3.31	7	2.15	6.71
3	2.03	3.53	8	2.18	8.36
4	2.06	3.90	9	2.21	10.77
5	2.09	4.54	10	2.24	20.23

表8 10 组 Pareto 解对应的泄流量

Table 8 Discharges of various Pareto solutions

时间/h	泄流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)									
	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组	7 组	8 组	9 组	10 组
1	6351.2	6297.5	6257.9	6204.0	6141.8	6078.6	6014.6	6000.0	6000.0	6000.0
2	6593.8	6530.5	6483.9	6426.5	6362.7	6298.1	6232.7	6145.0	6022.6	6000.0
3	6758.8	6717.0	6686.3	6657.6	6630.1	6602.3	6574.2	6507.6	6426.2	6029.3
4	6846.3	6843.2	6840.9	6854.9	6878.2	6901.8	6925.6	6928.4	6957.9	7230.0
5	6856.3	6894.2	6922.0	6972.7	7036.5	7101.0	7166.3	7239.6	7352.6	7500.0
6	6788.7	6853.5	6901.2	6960.7	7027.3	7094.7	7163.1	7255.9	7317.2	7317.2
7	6643.5	6702.7	6746.4	6762.0	6762.0	6762.0	6762.0	6762.0	6762.0	6762.0
8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8	6420.8
9	6232.7	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6	6232.6
10	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7	6136.7
11	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2	6090.2
12	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6	6068.6

3 结 语

基于 1stOpt 通用优化计算平台,研究并建立了不同目标下的水库预泄期泄流调度优化方案模型,并由 1stOpt 获得了满意的结果。

1stOpt 是一款通用、强大、使用方便的优化分析计算平台,不仅可以用于求解一般的数学优化问题,也可处理高度复杂、非线性、多约束的工程优化难题,因而有望将来在水资源优化配置、水库优化调度、水文模型参数率定等方面发挥更大的作用。

参考文献：

[1] DUAN Qing-yun ,GUPTA V K ,SOROOSHIAN S.Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Optimization Theory and Its Applications ,1993 ,76(3) :501-521.

[2] 金菊良 杨晓华 ,丁晶.基于实数编码的加速遗传算法[J].四川大学学报 :工程科学版 ,2000 ,32(4) :20-24.(JIN Ju-liang ,YANG Xiao-hua ,DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University :Engineering Science Edition ,2000 ,32(4) :20-24.(in Chinese))

[3] 杨晓华 杨志峰 ,郦建强.格雷码混合加速遗传算法及其性能分析[J].北京师范大学学报 :自然科学版 ,2004 ,40(6) :831-836.(YANG Xiao-hua ,YANG Zhi-feng ,LI Jian-qiang. A gray code hybrid accelerating genetic algorithm and its property analysis[J]. Journal of Beijing Normal University :Natural Science ,2004 ,40(6) :831-836.(in Chinese))

[4] 向波 纪昌明 ,罗庆松.免疫粒子群算法及其在水库优化调度中的应用[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2008 ,36(2) :198-202.(XIANG Bo ,JI Chang-ming ,LUO Qing-song. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir operation optimization[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2008 ,36(2) :198-202.(in Chinese))

[5] 吴学文 索丽生 ,王志坚.水电站水库优化调度的改进混沌遗传算法[J].水利水电科技进展 ,2010 ,30(2) :53-57.(WU Xue-wen ,SUO Li-sheng ,WANG Zhi-jian. Improved chaotic genetic algorithm for optimal operation of hydropower reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2010 ,30(2) :53-57.(in Chinese))

表9 计算结果归纳

Table 9 Calculated results of four kinds of scheme

方案	计算最大泄流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	库水位最大降幅/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	流量差平方和 f_1 / ($10^5\text{m}^6\cdot\text{s}^{-2}$)	水能之和 f_2 / ($\text{m}^4\cdot\text{s}^{-1}$)
1	7947.47	1.68	44.34	85433
2	6856.27	0.91	3.20	88381
3	6750.00	0.85	3.74	195895
4	8111.16	1.74	37.21	203305

[6] 付全成. 水泥搅拌桩复合地基加固软基性状的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[7] 张耀庭, 李宏健. 全预应力砼梁动力性能试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 1): 71-75. (ZHANG Yao-ting, LI Hong-jian. Experimental study on dynamic behavior of full-prestressed concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Sup 1): 71-75. (in Chinese))

[8] 彭世彰, 庞桂斌, 徐俊增, 等. 节水灌溉条件下水稻气孔导度模型的改进[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 19-23. (PENG Shi-zhang, PANG Gui-bin, XU Jun-zeng, et al. Improvement of stomatal conductance models of rice under water saving irrigation treatment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 19-23. (in Chinese))

[9] HUANG Cai-jin, HAN Lu-jia, LIU Xian, et al. Models predicting calorific value of straw from the ash content[J]. International Journal of Green Energy, 2008, 5(Sup 6): 533-539.

[10] 任杰, 林伟铁, 罗小春, 等. 硝化菌保藏特性及衰减动力学研究[J]. 中国生物工程杂志, 2007, 27(12): 61-65. (REN Jie, LIN Wei-tie, LUO Xiao-chun, et al. Study on the conservative property and decay kinetic of nitrite oxidizing bacteria[J]. China Biotechnology, 2007, 27(12): 61-65. (in Chinese))

[11] 陈海刚, 贾晓平, 林钦, 等. 混合暴露条件下近江牡蛎对重金属的积累与释放特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 922-927. (CHEN Hai-gang, JIA Xiao-ping, LIN Qin, et al. Accumulation and release characteristics of heavy metals in crassostrea rivalaris under mixed exposure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 922-927. (in Chinese))

[12] 张昂平, 吴冲锋. 新型风险感受下的均值-方差模型与实证研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(12): 2025-2031. (ZHANG Sheng-ping, WU Chong-feng. Mean-variance model with new type risk perceptions and empirical research[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(12): 2025-2031. (in Chinese))

Optimal regulation model of reservoir discharge based on 1stOpt

HU Shu-yan¹, CHENG Xian-yun², CHAI Fu-xing², GAO Jing², YANG Guan-ning¹
(1. Haidian District Water Authority of Beijing, Beijing 100089, China ;
2. Remote Sensing Technology Application Center, China Institute of Water Resources and
Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract : Based on the optimization software package 1stOpt, the optimal regulation models of reservoir discharge for both single- and multi-objective functions and constraint conditions were established and solved. The results show that the developed regulation models can meet the requirements of various tasks and multiple objectives, and has a good universality. 1stOpt is a robust, easy-to-use and powerful optimization tool which can be used widely in various engineering fields.

Key words : reservoir ; pre-discharge period ; discharge ; regulation model ; optimization ; 1stOpt