

复杂长距离输水系统仿真优化研究

钟登华¹, 刘建民¹, 熊开智²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021)

[摘要] 将自优化模拟模型应用于长距离输水系统优化调度研究中, 以数字仿真模型为基础, 增加在线控制优化环节, 根据仿真模型的输出反馈不断优化系统输入, 实现系统仿真过程的自适应优化。并以 MATLAB 软件作为系统仿真平台, 成功地实现了实例工程的仿真优化过程, 为复杂长距离输水系统优化调度研究开辟了一条新途径。

[关键词] 输水系统; 仿真优化; 自优化; 响应曲面法

[中图分类号] TP15 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)10-0060-04

长距离输水系统建筑物种类繁多, 不同建筑物水力条件千差万别, 即使同一建筑物, 在不同的输水条件下水力情况也完全不同, 整个系统在运行过程中受许多不确定性因素的影响。特别是在系统的运行管理中, 由于系统本身的复杂性和目标的不可公度性, 难以通过一些目标函数与约束条件的解析模型来描述系统的优化问题, 使得一般的数学规划方法的应用受到很大限制。而多数情况下, 即使得到系统优化的解析模型, 由于模型复杂, 要进行模型的优化求解也相当困难^[1,2]。随着计算机技术及数值计算技术的发展, 数字仿真技术开始广泛地应用于复杂输水系统的调度问题, 并取得可喜进展。但是, 其研究目的往往在于分析已有决策方案的可行性^[3,4], 这种仿真模型仅仅是对问题的直观描述, 仿真运行只能提供一定条件下的可行方案, 不能直接给出问题的最优解或满意解。在多水库的水资源系统分析中, 一种基于自优化模拟模型的仿真优化技术开始逐渐应用于系统优化调度中^[5-7], 该优化技术在优化过程中无需系统输入输出的结构化关系模型, 特别适用于复杂系统工程的优化。

笔者将优化技术嵌入复杂长距离输水系统的仿

真过程, 结合自优化模拟技术, 建立了一种复杂输水系统仿真的反馈模拟仿真模型; 使系统的设计、运行管理达到最优解或满意解。

1 输水系统仿真优化方法

1.1 输水系统仿真优化过程

一般的输水系统仿真过程是在一定的初始状态下, 输入决策变量值, 系统仿真可获得相应的输出响应。这种仿真中的输入序列是在仿真前由用户输入, 不能由仿真系统改变和控制, 其输出响应仅是一种自然响应, 通常只能用于研究了解一组输水系统输入下的响应情况, 不具备使输出响应趋于最优目标的功能。

要实现输水系统自适应控制仿真优化, 必须改变系统的自然输入、输出仿真方式, 根据仿真模型的输出反馈不断优化系统输入, 使仿真结果趋向最优目标值^[8,9]。

1.2 响应曲面法

仿真优化模型中, 有多种优化策略^[9-12], 其中响应曲面法(response surface method, RSM)是试验设计与数理统计相结合的优化方法, 其实现流

[收稿日期] 2004-12-09; **修回日期** 2005-04-15

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50179023); 教育部高等学校优秀青年教学科研奖励计划资助项目(200166); 教育部博士点基金资助项目(20030056055)

[作者简介] 钟登华(1963-), 男, 江西赣州市人, 天津大学教授, 博士生导师, 主要研究工程系统分析、系统仿真等

程如图 1 所示。

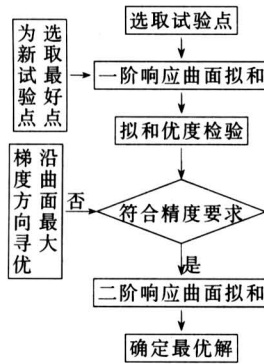


图 1 响应曲面法工作流程图

Fig.1 Flowchart of RSM

给定初始试验设计点，分别对这些点进行仿真运行，可以产生与各设计试验点的仿真输出响应。应用一阶响应曲面逼近真实响应曲面在该点附近的形状，在响应面的最大梯度方向上寻优，对回归函数结果进行优化，以上过程不断重复，直到一阶响应曲面无法拟和真实响应曲面为止。假定仿真优化模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & y = f(X) \\ \text{s.t.} \quad & X \in D \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为试验设计点的决策变量， y 为响应， D 是 X 的定义域。则仿真优化模型的一阶响应曲面可表示为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (2)$$

其中 β_0, β_i 称为响应曲面参数。

当一阶响应曲面无法逼近真实响应曲面时，需采用如下二阶响应曲面函数逼近真实响应曲面，并最终确定出仿真优化问题的最优解。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

其中 β_0, β_i 与 β_{ij} 为响应曲面参数。一般情况下，响应曲面法比许多梯度方法所需的仿真次数要少。不需系统模型的梯度信息，对仿真样本要求低，且实现模式简单，因此，笔者在仿真优化模型中采用响应曲面法的优化策略。

1.3 复杂长距离输水系统仿真优化的实现

对于复杂长距离输水系统仿真，首先应确定系统中的控制性环节，然后建立系统的仿真模型及仿真优化策略模型，并集成能够将仿真输出反馈至仿真模型输入的各种算法。进而进入仿真优化环节，

由仿真优化策略模型给定仿真初始参数，调用仿真模型得到仿真结果，进入仿真优化策略模型。该模型根据仿真结果反馈修正系统仿真输入，进行下一次仿真过程，如此循环即可最终得到系统满意的决策输入，仿真优化实现过程如图 2 所示。在此仿真优化模型中，可利用所有已完成的仿真输出信息，可利用信息量大，优化策略也十分灵活，并能为快速有效地寻找到满意的决策输入提供足够的信息支持，仿真优化效率较高。

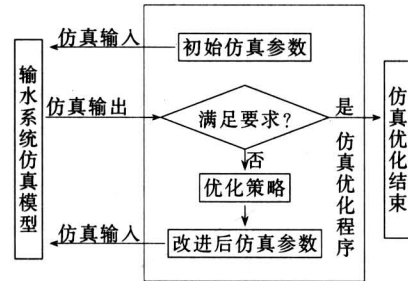


图 2 仿真优化实现模式

Fig.2 The perform mode of simulating optimization

为提高建模能力及优化效率，将 MATLAB 系统仿真平台应用于复杂长距离输水系统仿真优化中。利用 MATLAB 强大的建模及数字分析处理能力，建立系统数字仿真模型及仿真优化模型，实现系统的仿真优化过程。

2 工程应用

以某长距离输水工程为例研究输水系统仿真优化过程。该输水工程是一个通过结合并分段压低水头的自动控制输水系统，输水线路总长 97.4 km，沿线布置 9 个结合并，以消除输水系统首末端 80 余米的水头，整体形式见图 3。其中结合并由过水堰及竖井组成，通过过水堰顶与竖井之间的水位差产生的水流跌落消除多余的水能，如图 4 所示。该输水系统线路长，受地形条件的影响大，且采用结合并分段压。低沿线水头输水，国内尚无相似工程经验借鉴，因此，考虑用数字仿真方法进行研究。首先在 MATLAB 系统仿真平台建立输水系统仿真模型，研究初始调节时间 $t = 300 \text{ s}$ 及 $t = 3000 \text{ s}$ 时输水系统沿线各点的水力特性。通过仿真计算，可得到从上游入口流量调节到下游水厂入口流量发生变化时间大约为 420 s。结合并在调节过程中，过水堰及竖井中的水位发生波动，其中竖井中的水

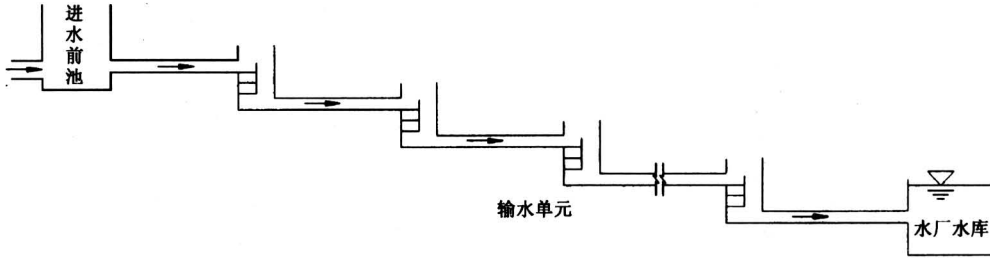


图 3 输水系统整体示意图

Fig.3 Sketch diagram of water conveyance system

位波动远大于过水堰中的水位波动。在调节过程中，水流的波动随时间沿管线向下游不断传递，波动的幅度也相应增加。当调节时间为 300 s 时，水流在到达第 6, 7, 8, 9 段管道时波动的幅度已经超过实际工程中结合井过水堰的堰顶高程，这样结合井过水堰的自由出流转变成淹没出流，流态发生变化，其中 8 号结合井竖井中的水位波动幅度最大，已大大超过结合井的顶部高程，结合井将产生弃水，直接影响到工程的运行安全及过水能力，不同初始调节时间下 8 号结合井竖井水位变化过程曲线如图 5 所示。各结合井过水堰堰顶高程及初始调节时间下的最大波动水位见表 1。

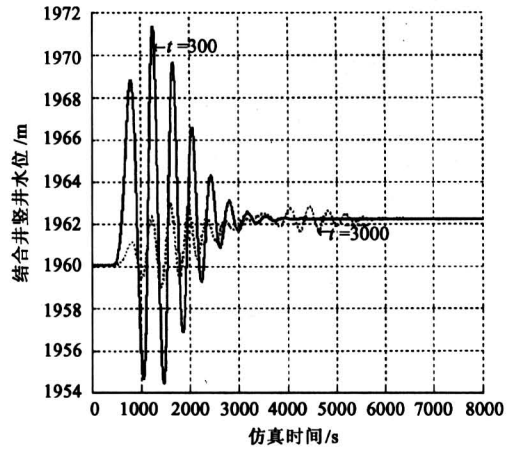


图 5 8 号结合井竖井水位变化曲线

Fig.5 Variation curve of water level in 8 th uniteweir

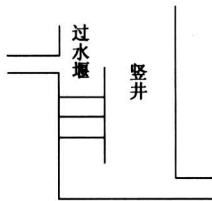


图 4 结合井示意图

Fig.4 Sketch diagram of uniteweir

表 1 各结合井过水堰高程及竖井最大壅水位 ($t = 2\ 159.3\ s$)

Table 1 Height of weirs top and water level of uniteweirs ($t = 2\ 159.3\ s$)

结合井号	过水堰高程/m	竖井最大壅水高程/m		
		$t = 300\ s$	$t = 3\ 000\ s$	$t = 2\ 159.3\ s$
1	2 044.22	2 038.11	2 037.51	2 037.54
2	2 029.91	2 027.70	2 026.63	2 026.67
3	2 019.91	2 013.14	2 010.18	2 010.27
4	1 999.88	1 996.14	1 994.44	1 994.48
5	1 988.79	1 989.20	1 987.18	1 987.23
6	1 982.45	1 984.32	1 979.58	1 979.68
7	1 972.97	1 977.32	1 970.75	1 970.92
8	1 963.83	1 971.36	1 962.94	1 963.84
9	1 957.00	1 947.68	1 946.88	1 946.93

通过以上仿真研究可知，输水系统入口处流量的调节时间直接影响到工程运行的可靠性，采用仿真优化方法研究输水系统在不改变流态、不弃水调节下的最短调节时间，进一步了解输水工程的性能，对指导工程的运行管理十分必要。

以上仿真结果表明，在仿真优化前，当调节时间较短时，结合井内流态改变最快的是 8 号结合井，因此，考虑以 8 号结合井作为控制性环节，其最高壅水位作为系统仿真优化的反馈输出，优化策略采用响应曲面法，即以上述仿真输出作为优化策略的基本输入信息，通过三次样条插值曲线拟合控制环节的最大壅水高度与调节时间的对应关系，根据拟合曲线寻找最大允许壅水高度对应的仿真调节时间，以确定下一次仿真时采用的调节时间。设允许误差为 0.05 m，将 $t_0 = 300\ s$ ， $t_1 = 3\ 000\ s$ 时控制环节的仿真结果作为初始参数输入仿真优化模型进行优化研究。由优化过程输出可得，采用以上仿真优化策略，系统在 3 次仿真优化后即可寻找到满

意的决策输入, 最小入口流量调节时间为 2 159.3 s, 此时 8 号结合井竖井的最大壅水高程为 1 963.84 m, 误差 0.01 m, 此时各结合井竖井的最大壅水位 (表 1) 均小于结合井过水堰的堰顶高程。从系统仿真优化过程中寻优的轨迹 (见图 6, 其中数字 1, 2, 3 为仿真次数), 可看出, 采用响应曲面法的优化策略, 系统很快即可寻找到满意的结果, 优化过程效率极高。

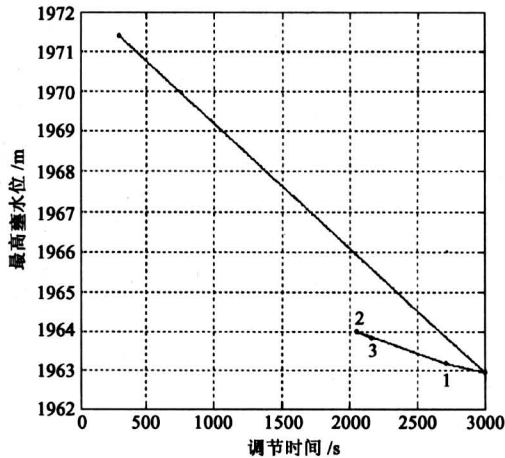


图 6 仿真优化寻优轨迹

Fig. 6 Course of simulating optimization

3 结论

1) 应用数字仿真方法, 可以方便地了解复杂长距离输水系统不同运行条件下的水力特性, 通过仿真优化技术, 可使复杂长距离输水系统运行优化研究在仿真过程中自动实现, 为复杂长距离输水系统的调度优化研究提供一种全新的方法。

2) 笔者在初始仿真基础上得到仿真优化的控制性环节, 通过控制性环节的输出优化系统的输入, 采用 MATLAB 软件作为系统仿真平台, 大大简化了包含众多环节的复杂长距离输水系统仿真优化研究。

3) 实例表明采用响应曲面法的优化策略是成功的, 通过 3 次仿真即可得到仿真优化结果, 大大提高了仿真优化效率。

4) 仿真优化技术扩大了输水系统数字仿真技

术的应用领域, 具有广阔的应用前景, 但在优化技术方面尚须进一步发展提高。

参考文献

- [1] Nandalal K D W, Sakthivadivel R. Planning and management of a complex water resource system: case of samanawewa and udawalawe reservoirs in the walawe river, sri lanka [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 57: 207~221
- [2] Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, etc. Optimization algorithms of operative control in water distribution systems [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1997, 84 (10): 81~99
- [3] Weispfenning Volker. Simulation and optimization by quantifier elimination [J]. *Journal of Symbolic Computation*, 1997, 24 (8): 189~208
- [4] Botes J H F, Bosch D J, Oosthuizen L K. A simulation and optimization approach for evaluating irrigation information [J]. *Agricultural Systems*, 1996, 51: 165~183
- [5] 雷声隆, 覃强荣, 郭元裕. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用 [J]. *水利学报*, 1989, (5): 1~13
- [6] Ridha B C Gharbi. Use of reservoir simulation for optimizing recovery performance [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 42: 183~194
- [7] Ji Z S, et al. Simulant optimization for water transport planning [J]. *Journal of Dalian of Technology*, 1991, 31 (2): 183~192
- [8] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- [9] 杨湘龙, 王 飞, 冯允成. 仿真优化理论与方法综述 [J]. *计算机仿真*, 2000, 17 (5): 1~5
- [10] 曾建潮, 孙国基. 仿真优化方法 (综述) [J]. *系统仿真学报*, 1989, (1): 15~19
- [11] 王 凌, 张 亮, 郑大钟. 仿真优化研究进展 [J]. *控制与决策*, 2003, 18 (3): 257~262
- [12] 冯允成, 邹志红, 周 泓. 离散系统仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998

(下转第 68 页)

参考文献

- [1] Microsoft corporation: Visual Basic6. 0 Programmer's Guide 中文版程序员指南 [M]. 北京: 北京希望电脑公司
- [2] Huang N E, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. The Royal Society, 1996, 4: 903~995
- [3] Boggess A , Narcowich F J. A First Course in Wavelets with Fourier Analysis [M]. 北京: 电子工业出版社, Pearson Education Inc.

A Realization to Enhance the Signal Noise Ratio With Superposition on the Same Phase Signal

Han Xiuting, Wang Jiechun, Jiao Zhenqiang, Gao Fei, Song Yubo
(*Research Institute of Petroleum Production and Engineering, Daqing Oilfield Corporation Ltd, Daqing, Heilongjiang 163453, China*)

[Abstract] This paper talks about method to enhance vibration signals gotten by hitting iron pipe to cause a vibrating response from which the damaged pipe information will be found. However, the reflection wave is usually too weak to acquire useful information correctly. The method, in which multiple similar signals are superposed, can not only decrease the noise in the signal, but also receive more message that may be lost before because of the interval of sample collection. Since the noise in signals could be treated as white noise, after multiple superposition the added noise will become to zero. The programmed the software to performs efficiently and conveniently. There are some examples in practice to express that this method is correct.

[Key words] vibrating wave; reflection wave; signal enhancement; software for superposition signal

(cont. form p. 63)

Research on Simulating Optimization of Long-distance Complex Water Conveyance Systems

Zhong Denghua¹, Liu Jianmin¹, Xiong Kaizhi²
(1. *Civil Engineering Academy of Tianjin University, Tianjin 300072, China*;
2. *Ertan Hydropower Development Co. Ltd., Chengdu 610021, China*)

[Abstract] Operating optimization of long-distance water conveyance systems is always intractable for their complexity. In this paper, self-optimization model is introduced to study the problem, which is based on the digital simulation models. Through the on-line optimization tache in it, the decision input can be optimized according to the feedback information of simulating output, so the system can be optimized automatically. With the MATLAB software, simulating optimization of an engineering instance has been achieved, which gives a new way for the research of operating optimization of long-distance complex water conveyance systems.

[Key words] water conveyance system; simulating optimization; self-optimization; response surface method