
武汉理工大学

数学建模暑期培训论文

第 5 题

基于模拟退火算法的下水道管网非线性优化模型

第 21 组

姓名

方向

肖善

建模（组长）

易雨谦

建模（&写作）

林荣武

编程

2016 年 8 月 23 日

基于模拟退火算法的下水道管网非线性优化模型

摘要

合适的城市排水系统对于不断增进的城市化至关重要。本题要求为地下管网的改建工程提供一种可行的方案，即是要在这 17 个点中选取若干点，使得在暴雨出现时蓄水池的总体积以及因蓄水超标导致的溢水量要最小。

首先，进行模型简化，考虑所选的每一个蓄水池都是满载，所有的管道口都出现溢水。另外，本文针对瞬时情形进行讨论，考虑实际排水情况，所有的管道中水流方向都应该往排水口（outfall）处汇聚，规定顺水流方向为下游，逆水流方向为上游。对于一个蓄水池，做以下三种情况的简化：如果在其上游还有一个蓄水池，则将之间的所有分岔管道都合成一根管道，并将所有的分岔管道上的溢水口合并为一个溢水口；如果这个蓄水池的上游存在一条分岔管道而其末尾并不存在蓄水池，则首先将这条分岔管道合并为一根管道，并将管道上的所有溢水口合并为一个溢水口，最后在管道末尾设置虚拟蓄水池，该虚拟蓄水池总不会满水，并且只会有水流入而不会溢出。

其次，对于简化后的模型，将(0,1)变量、蓄水池面积（体积）与孔的直径作为决策变量，通过设置权重，将双目标：总蓄水池体积最小和溢出水体积最小转化为单目标，以三类约束：液压约束，洪流溢出体积约束以及参数范围等为约束条件建立了非线性优化模型，并用模拟退火算法进行求解，以权重 $\theta=1$ ，NSU=2 为例，求解结果为：选择 2 号和 6 号蓄水池，2 号蓄水池体积 62.52587m^3 ，孔径 266.7019mm 。6 号蓄水池体积 467.46m^3 ，孔径 481.92mm ，此时目标函数最优值为 3128.7，经过文献对比，认为结果正确且符合实际。

最后，设置多组权重值以及多组储水池最大数目得出不同结果从而进行模型检验。

通过模型简化本文非常成功地求出了结果，这种简化是我们的创新之处，而模拟退火算法具有全局搜索的能力，使得我们的求解结果更加准确可靠，最后，用 SWMM 进行模型的改进，使得这道题目最终能够和实际结合起来

关键词：模拟退火 非线性优化 下水道管网改造 SWMM 模型

一、问题重述

为了提高老城区的地下管网排水效率，一种成本较低的有效方法是在合适的位置修建地下储水池以对管网水流进行调节，从而避免因排水不及时而造成的地面滞水。在暴雨来临之际，通过调节储水池的排水速度从而避免低洼处的路面滞水。

已知某地的地下管网分布图以及 17 个可能的储水池修建位置，各储水池的占地面积、深度、孔径等参数已知，要求对该旧城区地下管网改建工程问题进行建模，并提供一种可行的改造方案。

二、问题分析

本题要求为地下管网的改建工程提供一种可行的方案，即是需要在这 17 个点中选取若干点，使得在出现暴雨的情况下蓄水池的蓄水体积及因蓄水因超载所排出的水量要最小。首先，进行模型简化，本文考虑的是一种极端的情况，降雨量足够大，且降雨时间足够长。考虑所选的每一个蓄水池都是满载的情况，所有的管道口都是在溢水的情况。另外，本题是一个较为复杂的网络问题，而且各个管道的粗细程度及其相应的长度难以计算，并且在各个蓄水池管道中的水的流量与时间也是有联系的，为避免较为复杂的讨论，本文针对瞬时情况进行讨论，考虑到实际排水情况，所有的管道中水流方向都应该往排水口（outfall）处汇聚，规定朝着水流方向的为下游，逆着水流方向的为上游。同时，对于一个蓄水池，如果在其上游还有一个蓄水池，则将这两个蓄水池之间的所有分岔管道都合并成一根管道，并将所有的分岔管道上面的溢水口合并为一个溢水口；如果这个蓄水池的上游存在一条分岔管道而其末尾并不存在蓄水池，则首先将这条分岔管道合并为一根管道，并将管道上的所有溢水口合并为一个溢水口，最后在这个管道末尾设置虚拟蓄水池，该虚拟蓄水池永远不会满水，并且只会有水（降雨）流入而不会溢出。

对于简化后的模型，将面积（体积）与直径作为决策变量，求总蓄水池体积和溢出水体积最小值为目标函数，考虑液压约束，洪流溢出体积约束等约束条件建立非线性优化模型并用模拟退火算法进行求解

三、模型假设

1.假设降雨量在相当长的一段时间内恒定不变，各个位置的降雨量是相等的。

- 2.假设每条管道在输水的过程中不出现水管破裂泄露的故障。
- 3.假设排水处的排水流量是恒定不变的。
- 4.假设在每条管道中出现逆流回流的时间极短。
5. 降雨量足够大且降雨时间足够长

四、符号说明

符号	含义
Q	流量
A	过水截面面积
x	水流方向距离
t	时间
H	静压水头
g	重力加速度
S_f	摩阻坡度
K	管道曼宁系数
R	过水截面半径
v	流速
Q_t	节点进出水流量
H'	节点水位
A_{sk}	节点表面积
q_{avg}	平均暴雨强度
t_d	降雨历时
t_b	峰前降雨历时
t_e	峰后降雨历时
f	下渗率
f_0	初始渗率
f_e	稳定阶段入渗率
K	衰减系数
SU	蓄水池（储水单元）
Q_j^{in}	蓄水池 j 处进水流量
Q_j^{out}	蓄水池 j 处出水流量
V_i^{surch}	节点 i 处局部溢出水体积

ϕ_j	蓄水池 j 出水口孔径
y_j	(0, 1) 决策变量表示是否选择第 j 蓄水池
NSU	储水池选择数目的最大值
V_j	节点 j 处储水池容积
θ	洪流影响权重
P	压强
$V_{\min j}$	储水池最小容积
$V_{\max j}$	储水池最大容积
$\phi_{\min j}$	储水池出水口最小孔径
$\phi_{\max j}$	储水池出水口最大孔径
Q_{\max}^{out}	最大出水口流量

五、模型的建立和求解

5.1 建模准备

5.1.1 SWMM 模型

SWMM 模型^[1]是一个城市水文模型，可以用来模拟城市区域地表径流过程、管网运行状况、水质变化过程等。该模型将研究区域划分成多个子汇水区域（Catchment），将排水系统中的管网概化成线（Link），将检查井、蓄水池等概化成节点（Node）进行建模。并采用非线性水库模型模拟地表径流，通过求解圣维南方程来模拟管网中水流特征，用累积——冲刷模式模拟地面污染水体的扩散。由于城市水环境的特殊性，SWMM 模型进行了有针对性的设计，对模型的输入和输出都没有严格限制，使得模型的灵活性和适用性得到了显著的提升，也利于推广使用。

5.1.2 排水管网控制方程

排水管网控制方程^[2]是有连续方程和动量方程组成的。通过对圣维南方程组进行求解而得到。

连续方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

动量方程：

$$g.A.\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + g.A.S_f = 0 ,$$

其中 Q 为流量 (m^3/s), A 为过水断面面积 (m^2), x 为水流方向距离 (m), t 为时间 (s), H 为静压水头 (m), g 为重力加速度 9.8 (m^2/s), S_f 为摩阻坡度。其中 S_f 可由曼宁公式求得:

$$S_f = \frac{K}{g.A.R^{\frac{4}{3}}} \cdot Q \cdot |v|$$

其中 K 为管道曼宁系数且 $K = gn^2$, R 为过水断面的水力半径 m ; v 为流速 (m/s), 绝对值表示水流方向和摩擦阻力方向相反。

5.1.3 节点控制方程

排水管网中节点的控制变量有三个: 节点水头、节点水流量、节点自由表面积。节点控制方程为:

$$\frac{\partial H'}{\partial t} = \frac{\sum Q_t}{A_{sk}}$$

其中 Q_t —节点进出水流量, H' —节点水位, A_{sk} —节点表面积 m^2 。采用有限差分格式进行求解, 其离散化后的结果:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q_t \cdot \Delta t}{A_{sk}}$$

5.1.4 降雨模型

瞬时降雨强度:

$$q = \frac{d(q_{avg} \cdot t_d)}{dt_d} = \frac{a \cdot [t \cdot (1-n) + b]}{(t_d + b)^{n+1}}$$

式中 q_{avg} —平均暴雨强度 (mm/min); t_d —降雨历时 (min); q —瞬时降雨强度 (mm), 由 q 可以描绘出一条关于降雨强度随时间变化的曲线。通常还需要引入一个参数来描述雨峰值发生的时间即 r ($0 < r < 1$), r 将降雨历时分为峰前降雨时 t_b 和峰后降雨历时 t_e 。

$$t_d = \frac{t_b}{r} = \frac{t_e}{1-r}$$

峰前瞬时降雨:

$$q_{ib} = \frac{a. [\frac{t_b(1-n)}{r} + b]}{(\frac{t_b}{r} + b)^{n+1}}$$

峰后瞬时降雨强度:

$$q_{ie} = \frac{a. [\frac{t_b(1-n)}{1-r} + b]}{(\frac{t_b}{1-r} + b)^{n+1}}$$

式中 q_{avg} —平均暴雨强度 (mm/min); t_d —降雨历时 (min); q —瞬时降雨强度 (mm),

5.1.5 Horton 地表渗透公式

Horton 公式^[3]是针对小面积汇水区域计算土壤入渗, 它是描述从初始的最大入渗率到稳定入渗率这个过程入渗率随降雨历时呈指数形式变化的经验公式。其计算公式为:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt}$$

式中 f —下渗率 mm/min, f_0 —初始渗率, f_c —稳定阶段入渗率, t —时间 min, k —衰减系数, 与土壤性质有关 (这些参数均是根据地表性质, 参考相关文献资料选取的经验参数)。

5.2 模型的建立

5.2.1 问题简化

本题需要为地下管网的改建工程提供一种可行的方案, 即是需要在这 17 个点中选取几个点, 使得在出现暴雨的情况下使得蓄水池的蓄水体积及因蓄水超标所排出的水量要最小, 在这里所考虑到的是一种极端的情况, 降雨量足够大, 并且降雨的时间足够长。这样, 考虑所选的每一个蓄水池都是满载的情况, 所有的管道口都是在溢水的情况。另外, 本题是一个较为复杂的网络问题, 而且各个管道的粗细程度及其相应的长度难以计算, 并且在各个蓄水池管道中的水的流量与时间也是有联系的, 为避免较为复杂的讨论, 所考虑到的只是一种瞬时的情况, 同时, 考虑到实际的排水情况, 所有的管道中水流方向都应该往排水口 (outfall) 处汇聚, 规定朝着水流方向的为下游, 逆着水流方向的为上游, 水流示意图如下所示:

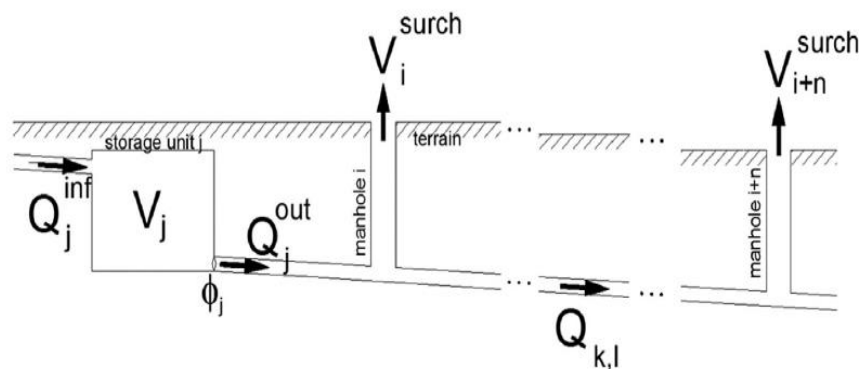


图 1. 地下储水池示意图

同时，我们还有如下设定，对于一个蓄水池，如果在其上游还有一个蓄水池，则将这两个蓄水池之间的所有分岔管道都合并成一根管道，并将所有的分岔管道上面的溢水口合并为一个溢水口；如果这个蓄水池的上游存在一条分岔管道而其末尾并不存在蓄水池，则首先将这条分岔管道合并为一根管道，并将管道上的所有溢水口合并为一个溢水口，最后在这个管道末尾设置虚拟蓄水池，该虚拟蓄水池永远也不会满水，并且只会有水（降雨）流入而不会溢出的情况。该简化的示意图如下所示：

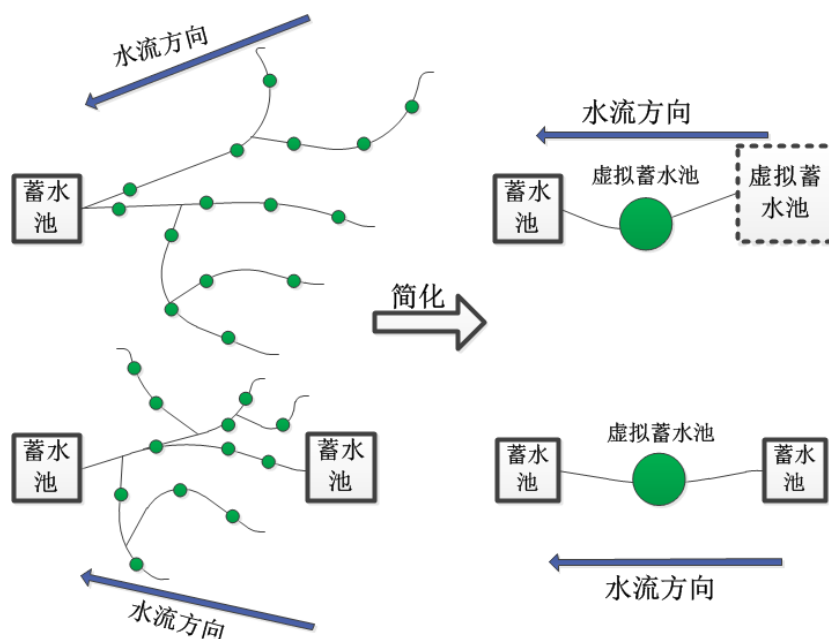


图 2 模型简化图

该简化可以保证在降雨持续相当长一段时间内，所有的蓄水池都是满载，并且溢出口都只会出现溢水的情况，避免了溢水口出现雨水流入的复杂情况的讨论，同时能保证此时刻得到的总的排水量能够达到最大。通过简化与分析我们得出了每一个蓄水池的出流与入流状况如下。

表 1 各个蓄水池出入流状况

蓄水池 编号	入流数	出流数	蓄水池 编号	入流数	出流数
SU_1	1	1	SU_10	1	1
SU_2	2	1	SU_11	3	1

SU_3	2	1	SU_12	1	1
SU_4	1	1	SU_13	1	1
SU_5	1	1	SU_14	1	1
SU_6	1	1	SU_15	1	1
SU_7	1	1	SU_16	1	1
SU_8	2	1	SU_17	1	1
SU_9	1	1			

当入流数和出流数都是 1 的时候，有：

$$Q_j^{\text{in}} = Q_j^{\text{out}} (j=1,4,5,6,7,9,10,12,13,14,15,16,17)$$

同理，对于入流数分别为 2、3 而出流数为 1 的情况，有：

$$\begin{cases} Q_{j1}^{\text{in}} + Q_{j2}^{\text{in}} = Q_j^{\text{in}} = Q_j^{\text{out}} (j=2,3,8) \\ Q_{j1}^{\text{in}} + Q_{j2}^{\text{in}} + Q_{j3}^{\text{in}} = Q_j^{\text{in}} = Q_j^{\text{out}} (j=11) \end{cases}$$

5.2.2 蓄水池的分区



图 3 下水管道示意图

通过对所给示意图的详细观察与讨论，同时结合一种对于水流方向的确定和考虑到了水流的分支情况的原则^[4]，将 17 个预建蓄水池进行分区处理，分区的结果如下所示。

表 2 蓄水池区域分类结果

1 号区域	2 号区域	3 号区域	4 号区域
SU_1	SU_4	SU_7	SU_15
SU_2	SU_5	SU_8	SU_16
SU_3	SU_6	SU_9	SU_17

SU_10

SU_11

SU_12

SU_13

据此建立统一的模型，来分别计算出每个区当中的水流溢出情况，在最后合成一个统一的模型，得到最终的选址结果。

5.2.3 洪流溢出体积约束^[5]

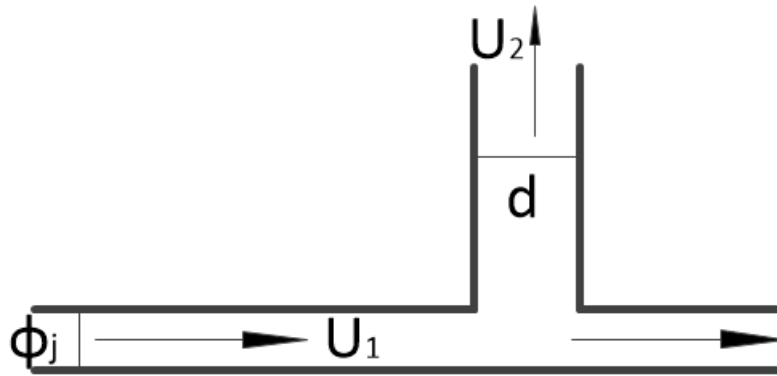


图 4 节点原理示意图

$$V_i^{surch} = \frac{d^2}{\phi_j^2} \cdot \frac{u_2}{u_1} Q_j^{in}$$

根据：

$$Q_j^{surch} = Q_j^{out} - Q_{j+1}^{in}$$

$$Q_j^{surch} = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$Q_j^{out} = \frac{1}{4} \pi \phi^2$$

得到：

$$V_i^{surch} = \frac{(Q_j^{out} - Q_{j+1}^{in}) Q_j^{in}}{Q_j^{out}}$$

其中 V_i^{surch} 表示节点 i 处局部溢出水体积， Q_j^{in} 为蓄水池 j 处进水流量， Q_j^{out} 蓄水池 j 处出水流量

5.2.4 参数范围

$$\begin{aligned}
 y_j &= \begin{cases} 0 & \text{不选择第 } j \text{ 储水池} \\ 1 & \text{选择第 } j \text{ 储水池} \end{cases} \\
 y_j V_{\min,j} &\leq V_j \leq y_j V_{\max,j} \\
 y_j \phi_{\min,j} &\leq \phi_j \leq y_j \phi_{\max,j} \\
 Q^{out} &\leq Q_{\max}^{out} \\
 y_j &\in \{0,1\} \\
 V_i^{surch} &\geq 0
 \end{aligned}$$

y_j 为 $(0, 1)$ 决策变量表示是否选择第 j 蓄水池, Q_{\max}^{out} 最大出水口流量, $V_{\min,j}$ 储水池最小容积, $V_{\max,j}$ 储水池最大容积, V_i^{surch} 表示节点 i 处局部溢出水体积。

5.2.5 模型的建立

目标函数有两个, 第一个为下水道排水系统所有储水单元容积之和最小, 第二个为所有节点处溢出水的体积总和最小当储水单元容积减少则洪流溢出必然增多, 若希望溢出洪流尽可能少则储水单元容积必须足够大, 因此这两个目标相互矛盾, 我们用加权的方式将双目标转化为单目标, 而权重 θ 取决于决策者对投资成本与治洪水平的重视程度。约束条件分为三大类: 一是液压约束即 $Q_j^{in} = Q_j^{out}$, 第二类是洪流溢出体积约束, 第三类是参数范围约束。通过模型的简化, 所建立的非线性优化模型^[6]如下所示:

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{j=1}^{17} y_j V_j + \sum_{i=1}^n \theta V_i^{surch} \\
& s.t. \begin{cases} Q_j^{in} = Q_j^{out} \\ Q_j^{out} = \frac{\pi \phi_j^2}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \\ p = \rho gh \\ V_i^{surch} = \frac{(Q_j^{out} - Q_{j+1}^{in}) Q_j^{in}}{Q_j^{out}} \\ V_i^{surch} \leq V_{\max, i}^{surch} \\ \sum_{i=1}^n V_i^{surch} \leq V_{\max}^{surch} \\ \sum_{j=1}^{17} y_j \leq NSU \\ y_j V_{\min, j} \leq V_j \leq y_j V_{\max, j} \\ y_j \phi_{\min, j} \leq \phi_j \leq y_j \phi_{\max, j} \\ Q^{out} \leq Q_{\max}^{out} \\ y_j \in \{0, 1\} \\ V_i^{surch} \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)
\end{aligned}$$

其中, Q_j^{in} 为蓄水池 j 处进水流量, Q_j^{out} 蓄水池 j 处出水流量, y_j 为 $(0, 1)$ 决策变量表示是否选择第 j 蓄水池, V_i^{surch} 表示节点 i 处局部溢出水体积, V_j 为节点 j 处储水池容积, θ 为洪流影响权重, NSU 为储水池选择数目的最大值, $\phi_{\min, j}$ 为储水池出水口最小孔径, $\phi_{\max, j}$ 为储水池出水口最大孔径, Q_{\max}^{out} 最大出水口流量

5.3 模型求解

5.3.1 数据结构

在算法的计算溢流量时, 运用数据结构, 考虑水流方向, 对蓄水池的节点根据先后关系确定前驱节点和后驱节点。

5.3.2:SA 算法求解模型

模拟退火算法^[7]是一种通用的随机搜索算法，是对局部搜索算法的扩展。对一般局部搜索算法不同，SA 以一定的概率选择领域中目标值相对较小的状态，是一种理论上的全局最优算法。模拟退火算法是源于对热力学中退火过程的模拟，在某一给定初温下，通过缓慢下降温度参数，使算法能够在多项式时间内给出一个近似最优解。下表描述了优化问题的求解过程与物理退火过程之间的对应关系。

表 3 优化问题与物理退火对应关系

优化问题	物理退火
解	状态
目标函数	能量函数
最优解	最低能量状态
设定初始高温	加温过程
搜索	等温过程
温度参数 t 的下降	冷却过程

具体的算法步骤与流程如下：

将此题的优化模型可以描述为

$$\min f(i), i \in S$$

其中， S 是一个离散有限状态空间， i 代表状态，据此，SA 算法的计算步骤能够描述如下：

step1.初始化，任选初始解 $i \in S$ ，给定初始温度 T_0 和最终温度 T_f ，令迭代指标

$$k = 0, T_k = T_0。$$

step2.随即产生一个领域解 $j \in N(i)$ ($N(i)$ 表示 i 的领域)，计算目标增量

$$\Delta f = f(j) - f(i)。$$

step3.若 $\Delta f < 0$ ，令 $i = j$ 转到 step4；否则产生 $\xi = U(0,1)$ ，若 $\exp(-\frac{\Delta f}{T_k}) > \xi$ ，则令 $i = j$ 。

step4.若达到热平衡（内循环次数大于 $n(T_k)$ ）转 step5；否则转 step2。

step5.降低 T_k ， $k = k + 1$ ，若 $T_k < T_f$ ，则算法停止，否则转到 step2。

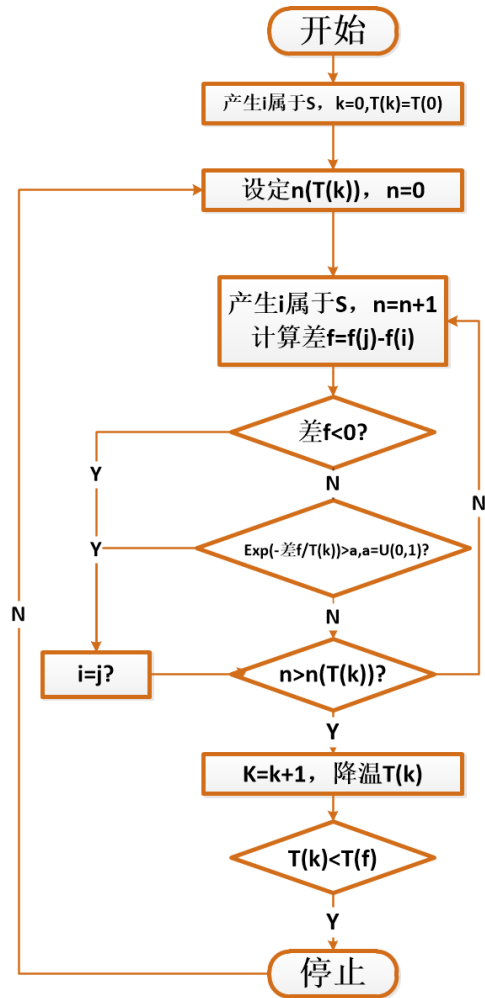


图 5 SA 算法流程图

5.4 结果与分析

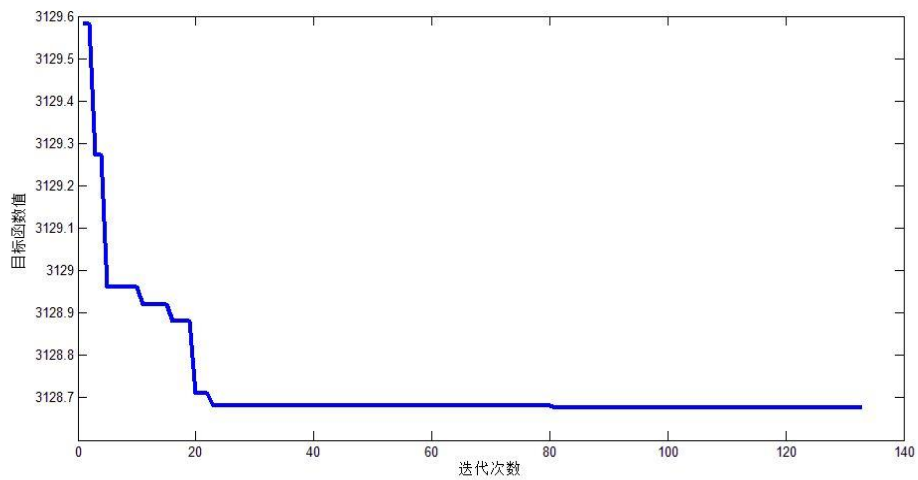


图 6 SA 算法迭代过程

通过迭代图可以发现，SA 在迭代 23 次之后趋于稳定，因此这种算法对于本问题而言，是收敛的。

(1)取权重 $\theta=1$ ， NSU=2 得到结果如下：

表 4 结果示意图

蓄水池	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	1	14	15	16	17
										0			3				
容 积		62.52587				467.4651											
孔 径		266.7019				481.9394											

(2)模型检验

依次取 $\theta=1,2,5,10,100$ ， NSU=2,5,10,15,得到结果见附录。
最后，我们在 SWMM 软件^[10]中进行了部分模型，部分状况展示如下：

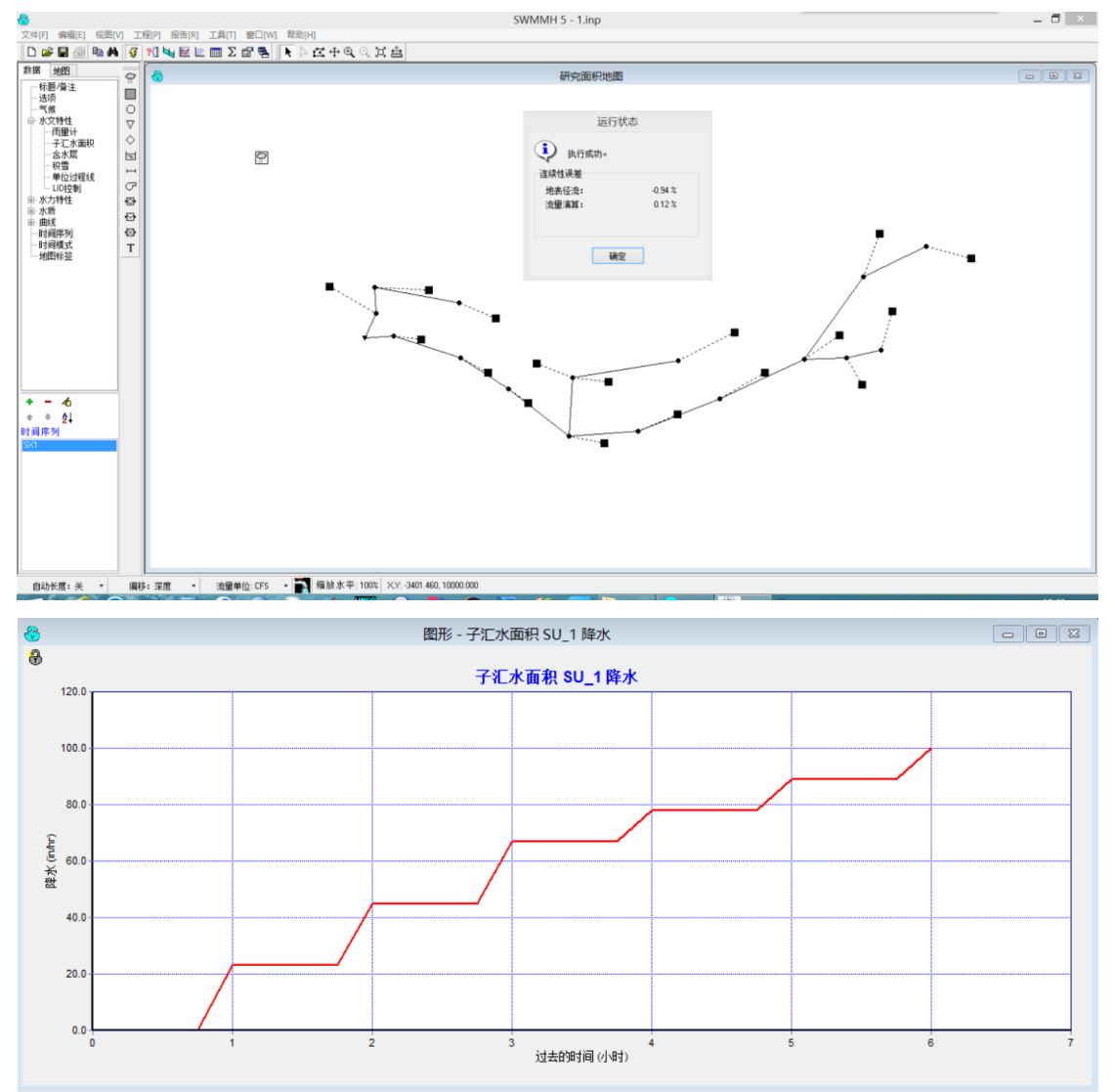


图 7 SWMM 部分结果展示

七、 模型的评价和改进

7.1.模型优点：

(1)模型简化能够使得本文非常成功地求出了结果，这种简化是我们的创新之处。

(2) 运用模拟退火算法，这种算法具有全局搜索的能力，使得我们的求解结果更加准确可靠

(3)最后还运用了 SWMM 进行模型的改进，使得这道题目最终能够和实际结合起来

7.2.模型缺点：

(1) 监测数据缺乏：由于缺乏研究区域实测数据，以致无法使用实测数据对模型精度进行校准。

(2) 基础数据不全。由于该区域属于葡萄牙小镇，本文给出的部分数据不一定适用，估计参数不准确导致模型输入的管网数据与当前实际管网数据存在偏差，也影响的模型的精度。

7.3 模型的推广与改进：

(1) 对于 SA 算法改进：每次迭代必须进行多次目标函数计算，因此处数据时，计算效率不高，为了提高模拟退火的计算效率，可以采用依赖温度的 Cauchy 或似 Cauchy 分布替代常规模拟退火中的高斯分布产生新模型。

(2) 对于模型的改进：对于基础数据进行调研，并结合统计学分析，对于降雨情况，可用 SWMM 模型模拟降雨情况，然后结合时间，管长等因素，考虑更全面，使模型更贴合实际。

参考文献

- [1]施南征. 城市排水管网动态水力学建模技术研究[D].杭州电子科技大学,2015.
- [2]Cunha M C, Zeferino J A, Simões N E, et al. Optimal location and sizing of storage units in a drainage system[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83:155-166.
- [3]Urriola H. Underground drainage system: EP, US5810510[P]. 1998.
- [4]Rossman L A. Storm Water Management Model User's Manual[J]. 2007.
- [5]Chow V T, Maidment D R, Mays L W. Applied Hydrology[J]. Dictionary Geotechnical Engineering/wörterbuch Geotechnik, 1988.

-
- [6]Cimorelli L, Morlando F, Cozzolino L, et al. Optimal Positioning and Sizing of Detention Tanks within Urban Drainage Networks[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2015, 142(1).
- [7]Cunha M D C, Sousa J. Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 1999, 125(4):215-221.
- [8]丛翔宇, 倪广恒, 惠士博,等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(4):64-67.
- [9]刘俊, 郭亮辉, 张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21):64-66.
- [10]Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6):813-814.
- [11]Peterson E W, Wicks C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM)[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1–2):294-305.
- [12]Dougherty D E, Marryott R A. Optimal Groundwater Management: 1. Simulated Annealing[J]. Water Resources Research, 1991, 27(10):2493–2508.
- [13]Elliott A H, Trowsdale S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(3):394-405.
- [14]Karamouz M, Nazif S. Reliability-Based Flood Management in Urban Watersheds Considering Climate Change Impacts[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2013, 139(5):520-533.
- [15] Travis Q B, Mays L W. Optimizing Retention Basin Networks[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2008, 134(5):432-439.
- [16] Yazdi J, Neyshabouri S A A S. Optimal design of flood-control multi-reservoir system on a watershed scale[J]. Natural Hazards, 2012, 63(2):629-646.
- [17] Boys M A. Retaining wall block and drainage system: US, US 6872032 B2[P]. 2005.
- [18]谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D].同济大学,2007.
- [19]赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,王浩正,曹尚兵,盛政. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水,2008,07:88-91.
- [20] Mencuccini M. Hydraulic constraints in the functional scaling of trees.[J]. Tree Physiology, 2002, 22(8):553-65.

附录

依次取 $\theta = 1, 2, 5, 10, 100$, $NSU = 2, 5, 10, 15$, 得到结果见附录:

	2.				67	12										
	52				.4	8.										
	58				65	70										

	7				1	1										
	66 .7 01 9				81 .9 39 4	12 8. 70 1										
						5. 05 65 6							52 .7 72 9	31 6. 58 7		
						23 .4 53 1							82 .4 04 5	31 6. 58 7		
			7. 68 87												20 2. 17 4	52 83 .3
			86 .0 13 9												43 .9 67 2	52 83 .3
						5. 25 75 6	20 68 .4 7									
						49 .6 25	20 68 .4 7									
			7. 53 38	37 .4 27	20 74 0.											

			7	4	9											
			57 .1 53 2	89 .0 38	20 74 0. 9											

NSU=5, 权重依次为 1, 2, 5, 10, 100

	2. 55 26 6							7. 50 05 4	00 .2 63 1		02 .1 13 5	10 0. 87 2				
	58 .2 07 1							22 .5 64 1	44 .9 84 8		29 .6 16 4	10 0. 87 2				
								7. 52 23 6	00 .0 33 2				76 .9 43 6	70 1. 08	30 2. 97 1	
								89 .1 57 2	66 .9 12 6				04 0. 32 5	97 .9 35 2	30 2. 97 1	
		2. 61				5. 06 22 5	5. 83 89 5		00 .0 73 3						04 5. 96 3	74 72 .4 6
		71 .4 85 6				59 .5 14 3	87 .2 15 3		70 1. 73 1						79 .7 52	74 72 .4 6
			7. 53 38	37 .4 27	20 74 0.											

			7	4	9											
			57 .1 53 2	89 .0 38	20 74 0. 9											
	2. 50 81 1				01 .1 66 2				00 .0 06 2			55 .0 10 2		21 2. 67 6	90 82 9. 4	
	05 .1 88 5				94 .5 06 4				02 .5 64 7			04 6. 39		85 .4 31 3	90 82 9. 4	

NSU=10, 权重依次为 1, 2, 5, 10, 100

2. 84 82						5. 00 01 4	5. 05 14 8	7. 51 60 3			25 .1 49 4	50 .0 26 8	75 .1 01 3		38 4. 03	47 9.0 55
97 .1 59 5						37 .5 42 3	56 .9 02	32 .3 19 3			41 .2 08 1	28 .3 30 2	86 .4 62 1		34 .8 93 6	47 9.0 55
2. 55 16 8			8. 07 56 1	00 .11 14		5. 01 21 5	5. 01 35 4					51 .7 00 2	76 .9 65 2			16 2.6 6
53 .7 13 7			98 .8 75 4	79 .5 38 8		03 .2 18	91 .5 90 6					84 .5 51 8	02 0. 96 4			93. 41 23
	36 .4	2. 63	7. 72						00 .3	7. 71		50 .2	78 .6		29 .8	22 35

	34 9	48	50 7						00 7	65 2		28 2	92 6		26 5	91 2
	00 .0 17 1	70 1. 73 1	98 .4 51 5						62 .2 51 7	04 .5 31 1		42 .6 04 5	01 2. 77 9		80 .2 50 5	22 35 91 2
41 .4 16 9		2. 52 35 8			00 .8 60 9		5. 16 26 7	7. 55 90 4				50 .5 97 5	75 .6 12 2		70 2. 67 9	22 53 52 8
00 .0 15		70 1. 73 1			93 .7 51 9		35 .9 59 8	00 .1 21 1				61 .5 22 9	00 8. 12 4		99 .9 28 9	22 53 52 8
	2. 52 43 5		7. 51 81 6	00 .0 56	02 .3 44 1	5. 09 76 5			00 .0 30 5			64 .0 16 3			29 9. 87 6	61 12 4.7
38 .9 08 2	9. 69 84 1	92 1. 76 1	42 .2 94 9	8. 45 57 3	39 .7 55	29 .3 67 5	21 .4 43 2	6. 43 26 4	55 .6 93 2	2. 07 51 4	11 6. 59 6	14 .6 26 1	40 .3 84 5		10 1. 87 1	05 37 88 2

NSU=15, 权重依次为 1, 2, 5, 10, 100

2. 57 58 1	2. 50 09 9	2. 55 00 5					5. 16 98 4	7. 64 28 3	00 .4 66 4			50 .4 95 4	76 .1 76 4	50 .0 36 6	70 .5 25 2	.61 E+ 09
07 .7 01 2	70 1. 73 1	70 1. 73 1					75 .5 16 6	15 .4 98 2	40 .2 41 1			45 .2 59 7	65 .8 43 6	82 .4 81 9	77 .6 51 2	.61 E+ 09
		2.	7.	00		5.	5.	7.	00	7.			75			22

		50 80 9	60 81 1	.8 68 8		06 13 8	22 50 9	53 94 5	.1 15 3	69 38 7			.2 06 2			7.4 03
		41 .8 48 6	77 .2 28 7	27 .3 60 1		18 .3 66 6	86 .9 55 1	23 .6 58 3	80 .1 45 8	21 .1 96 2			01 6. 85 3			00 2.3 3
	88 .7 00 3	2. 50 91	7. 67 8			5. 05 84 4	5. 51 76 7	7. 60 61	00 .2 31	7. 89 35 7			75 .8 76 9	50 .9 64 3	81 6. 78 3	22 42 20 3
	00 .0 05 7	70 1. 73 1	98 .6 27 4			93 .8 54 4	00 .1 07 5	47 .5 22	21 .4 97	06 .6 44 4			37 .3 39 7	19 .3 54 7	21 .0 46 1	22 42 20 3
01 .2 81 6	18 .5 99 4	90 .9 05 8	37 .3 19 2	13 .0 60 1		41 .0 90 5	3. 79 40 3	01 .4 23 5		56 .4 88 5		28 2. 45	23 .3 99 3	09 3. 40 8	.6 E+ 09	
53 .6 86 9	71 .2 52	59 .0 35 9	76 .1 17 2	91 .1 71 9		12 .5 12 1	67 .5 77 2	96 .0 67 3		09 .8 89 3		15 .9 56 9	77 .2 12 6	34 .8 02 7	.6 E+ 09	
23 .0 52 8	2. 68 07 9		7. 96 03	00 .4 78 5	00 .1 24 2	5. 08 41 6	5. 00 09 8	7. 66 88 9			25 .3 88 3	68 .2 03 5				23 6.4 42
00 .0 22 4	70 1. 73 1		46 .8 56 7	14 .8 91 9	96 .5 64	25 .4 76 8	51 .9 39 6	23 .3 97 5			69 .2 04 3	03 8. 89 5				02 1.3 15

代码:

```
function [y num]=fitness(S1,local)
%% 计算各个体的适应度值
% 输入:
% S1 个体
load SUS;%蓄水池矩阵
r=1;
g=10;
W=700;
MAX=99999999;
QoutMax=900;
Vmaxsurch=623.9;
Vmaxsurchsum=1696.6;
Vsum=sum(S1.V);
Qout=pi*(S1.D/1000).^2/4.*(2*10*S1.h).^0.5;
Q1=find(local<=3);
Q2=find(local>3&local<=6);
Q3=find(local>6&local<=14);
Q4=find(local>14&local<=17);
num(1:5)=0;
V1surch=0;
V2surch=0;
V3surch=0;
V4surch=0;
V5surch=0;
if length(Q1)==0
    V1surch=W;
else
    for i=1:length(Q1)
        if i==1
            V1surch(i)=W-Qout(local(Q1(i)));
        else
            if S1.front(local(Q1(i)))==0
                V1surch(i)=Qout(local(Q1(i-1)))-Qout(local(Q1(i)));
            else
                V1surch(i)=W+Qout(local(Q1(i-1)))-Qout(local(Q1(i)));
            end
        end
    end
end
end

if length(Q2)==0
    V2surch=W;
else
```

```

for i=1:length(Q2)
    if i==1
        V2surch(i)=W-Qout(local(Q2(i)));
    else
        if S1.front(local(Q2(i)))==0
            V2surch(i)=Qout(local(Q2(i-1)))-Qout(local(Q2(i)));
        else
            V2surch(i)=W+Qout(local(Q2(i-1)))-Qout(local(Q2(i)));
        end
    end
end
end

if length(Q3)==0
    V3surch=W;
else
    for i=1:length(Q3)
        if i==1
            V3surch(i)=W-Qout(local(Q3(i)));
        else
            if S1.front(local(Q3(i)))==0
                if local(Q3(i))>11

V3surch(i)=Qout(local(Q3(i-1)))-Qout(local(Q3(i)));

                else
                    if local(Q3(i))==11

V3surch(i)=Qout(S1.start(local(Q3(i))))+Qout(S1.start2(local(Q3(i))))
-Qout(local(Q3(i)));

                    else
                        if any(local==S1.start(local(Q3(i))))

V3surch(i)=Qout(S1.start(local(Q3(i))))-Qout(local(Q3(i)));

                        else
                            V3surch(i)=W-Qout(local(Q3(i)));
                        end
                    end
                end
            else
                V3surch(i)=W+Qout(local(Q3(i-1)))-Qout(local(Q3(i)));
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

if length(Q4)==0
    V4surch=W;
else
    for i=1:length(Q4)
        if i==1
            V4surch(i)=W-Qout(local(Q4(i)));
        else
            if S1.front(local(Q4(i)))==0
                V4surch(i)=Qout(local(Q4(i-1)))-Qout(local(Q4(i)));
            else
                V4surch(i)=W+Qout(local(Q4(i-1)))-Qout(local(Q4(i)));
            end
        end
    end
end

if length([Q1 Q4])==0
    V5surch=2*W;
else
    if length(Q4)~=0
        Qout1=Qout(local(Q4(length(Q4))));
    else
        Qout1=W;
    end
    if length(Q1)~=0
        Qout2=Qout(local(Q1(length(Q1))));
    else
        Qout2=W;
    end
    V5surch=Qout2+Qout1-QoutMax;
end

if sum(V1surch)+sum(V2surch)+sum(V3surch)+sum(V4surch)>Vmaxsurchsum
    num(5)=5;
end

[num num_v]=yueshu(S1,local);
I=max(max(num_v));
n=min(0 -I);
y=(sum(V1surch)+sum(V2surch)+sum(V3surch)+sum(V4surch)+V5surch)*r+Vsuum-MAX*n;

```

```

function [S,R,local]=Metropolis(S1,S2,T,local1,local2)
%% 输入
% S1: 当前解
% S2: 新解
% T: 当前温度
%% 输出
% S: 下一个当前解
% R: 下一个当前解适应度值
%%
R1=fitness(S1,local1); %计算适应度函数
R2=fitness(S2,local2); %计算适应度函数
dC=R2-R1; %计算能力之差
if dC<0 %如果能力降低 接受
    S=S2;
    R=R2;
    local=local2;
elseif exp(-dC/T)>=rand %以 exp(-dC/T) 概率接受
    S=S2;
    R=R2;
    local=local2;
else %不接受
    S=S1;
    R=R1;
    local=local1;
end

```