

文章编号:1000-6788(2006)05-0117-05

## HSY算法在环状河网动态环境容量估算中的应用

徐一剑,曾思育,张天柱

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

**摘要:** 环状河网水环境容量带有明显的复杂性、动态性与不确定性,探讨环状河网动态水环境容量的估算方法,无论在学术上还是现实上都具有重要意义。在温瑞塘河综合整治规划编制过程中,笔者在不确定性分析框架下开发了动态环状河网水质模型,用基于 HSY 算法的自动试错法估算了鹿城河网的水环境容量,从而为决策提供了科学依据。相对于最优化分析法,本方法简便灵活,在求得水环境容量的同时,也产生了污染源削减方案。再作少量调整,可以与经济因素相关联。

**关键词:** 环状河网;水质模型;环境容量;HSY算法;Monte Carlo 模拟

**中图分类号:** X11, X505

**文献标识码:** A

## Application of HSY Algorithm to Assimilation Capacity Estimation of Looped River Network

XU Yi-jian, ZENG Si-yu, ZHANG Tian-zhu

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Assimilation capacity of looped river network is complex, dynamic and uncertain. Therefore, it has theoretical and practical meaning to discuss the method of estimating assimilation capacity of looped river network. During the making of integrated pollution control plan for Wenruitang river basin, a dynamic water quality model for looped river network was developed under the uncertainty analysis framework, and assimilation capacity of Lucheng river network was estimated by automatic trial-error method based on HSY algorithm, which supported the decision-making. Compared with optimization techniques, the primary advantage of this method is simple and flexible. The pollution sources cut scheme can be made at the time of achieving assimilation capacity. With some simple amendment, it can take economic factors into account.

**Key words:** looped river network; water quality model; assimilation capacity; HSY algorithm; Monte Carlo simulation

### 1 引言

我国的平原河网地区,如长江三角洲、珠江三角洲等,人口稠密,经济发达。但随着经济高速发展,人口急剧增长,大量的工农业废水、生活污水排入河网,造成水体严重污染,水资源短缺,环境恶化,影响了人民的生活和健康,制约了社会和经济的持续快速发展。为有效地控制和治理平原河网的水污染,必须加强平原河网水污染控制理论和技术的研究。

水环境容量指一定水体在规定环境目标下所能容纳污染物的量<sup>[1]</sup>,是进行水质规划和总量控制的基础。平原河网地区河道纵横交错,构成环状河网,并且往往有不少闸、坝等水利设施,甚至还受潮汐影响,因此流量变化大,流向顺逆不定,水流条件复杂,与一般的单向河流及有规律的潮汐河流截然不同。受流量、流向影响,环状河网一旦被污染,污染物质在河网内来回振荡,其水质呈复杂的动态变化。同时河网内部的水质目标可能不同,从而形成更加复杂的相互制约关系。这些都决定了环状河网的环境容量相当复杂,并呈现明显的动态特征。再加上水文、水质监测数据稀缺,更是给模型参数率定及环境容量估算带来极大的

收稿日期:2004-04-26

作者简介:徐一剑(1977-),男,浙江镇海人,博士研究生,主要从事环境管理与规划和环境系统分析领域的理论和应用研究。e-mail:xyjian00@mails.tsinghua.edu.cn.

不确定性.因此,探讨环状河网动态水环境容量的估算方法,无论在学术上还是现实上都具有重要意义.

按水环境目标分,水环境容量可分为自然环境容量和管理环境容量两类,在实践中多采用管理环境容量.而且最关注的是使得河段水质在一定设计条件下不超标的污染物最大允许排放量,多数应用文献称此允许排放量为水环境容量,严格讲只是“可分配环境容量”.本文的环境容量估算方法亦采用这一概念.水环境容量的估算方法有许多种,大致可分为三类:解析公式法,试错法和系统最优化分析法<sup>[2]</sup>.

解析公式法由一维稳态水质模型忽略扩散项的解析解反求污染源.这类方法由于资料需求较少,计算方法简单明了,在国内得到最广泛的应用,并取得了较好效果,至今仍是计算水环境容量的主要方法之一.但当河道很长或水域较为复杂时(如发生分岔等),虽可从上游至下游逐河段连续演算,但过于复杂、效率不高,而且求得的只是稳态环境容量.并且,解析公式法不能用于流量流向都频繁变化的环状河网及潮汐河流.

试错法以水质模型为基础,在计算机求解的过程中,通过对污染排放量的多次人工调试,使规定区域的水质满足一定要求,此时的排放量即为环境容量.试错法对简单的单一河流不失为一种可选方法,但对需要长时段计算的环状河网来说,由于巨大的人工和机时需求,使得代价高昂,甚至不可行.以往文献中尚未见有用试错法求环状河网环境容量的报道.

线性规划、非线性规划、动态规划等系统最优化分析法的引入,使河流环境容量的求解变得简便易行,可用于水流变化较大的潮汐河口地区.系统最优化分析法具有自动化程度高、精度高、对边界条件及设计条件的适应能力强等优点,因而越来越受到重视,并已成功应用于潮汐河口地区<sup>[2~7]</sup>.但对环境容量的不确定性相对考虑不够充分.

在温瑞塘河综合整治规划编制过程中,综合考虑到环状河网水环境容量的复杂性、动态性与不确定性,采用试错法进行水环境容量的估算.笔者在不确定性分析框架下,开发了动态环状河网水质模型,并用基于 HSY 算法(是 Hornberger、Spear 和 Young 在 1980 年定义的一种在复杂环境模型中考察参数的结构和相互作用的方法)的自动试错法估算了温瑞塘河的水环境容量,从而为决策提供了科学依据.

## 2 基于 HSY 算法的环状河网动态环境容量估算方法

本文采用基于 HSY 算法的自动试错法,克服了以往人工试错法的不足,并能有效解决环状河网水环境容量的复杂性、动态性与不确定性.其基础是 HSY 算法和动态水质模型:通过 HSY 算法为试错设置了一定的规则,使之能够连续自动进行,只需极少量的人工干预.新开发了基于不确定性分析的动态环状河网水质模型,大幅提高了计算效率,从而使得大规模的自动试错成为可能.

### 2.1 HSY 算法

HSY 算法<sup>[8~11]</sup>的基本思想是:将目标函数寻优变为可信参数集搜索,即针对目标函数值设定可接受条件,在参数空间内通过随机采样来搜索那些使得目标函数值满足可接收条件的参数,把这些参数记录下来构成可信参数集,并在获得可信参数集的基础上,研究输入数据的不确定性和参数不确定性向模拟结果的传递.通过 HSY 算法可以求得满足一定要求的参数的分布,而不再是一个单一的最优参数,从而在一定程度上避免了由于“最优”参数失真带来的决策风险.主要步骤如下:

- 1) 确定参数可能取值的采样空间,即确定参数取值的上、下限及空间统计分布特征;
- 2) 设计目标函数,根据已有监测数据,为目标函数取值设定可接受的条件,该条件将被用来把模拟结果及其对应的参数取值划分为可接受和不可接受 2 种类型;
- 3) 参数在采样空间随机采样,用采样的参数进行系统模拟;
- 4) 根据参数模拟的结果对参数进行归类,分别对应于 2) 中的 2 种划分类型;
- 5) 重复 3) 和 4),直至找到要求数量的可以接受的参数.

在本估算方法中,HSY 算法首先用于水质模型的构建及参数的率定;其次用于环境容量估算中,即把污染源削减率经过变换后当作参数进行率定.

### 2.2 水质模型

近二十年来,国内外学者先后开发出了一些环状河网水质模型<sup>[12~15]</sup>,在水污染控制中起到了良好的

效果. 笔者基于不确定性分析框架, 结合传统一维圣维南方程及零维 CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) 模型, 开发了新的动态环状河网水质模型<sup>[16]</sup>. 模型由水文子模型和水质子模型两部分构成, 通过合理选取时间、空间步长, 解决了一维水文子模型与零维水质子模型之间的衔接问题. 水文子模型的核心是圣维南方程组, 用四级解法<sup>[17]</sup>求解, 有效地解决了流向顺逆不定的问题. 水质子模型借用了 CSTR 模型中水质动力学的概念: 将每个河段划分为一系列连续的“箱子”, 将每个箱子看作一个完全混合的零维反应器. 假设箱内的污染物瞬间完全混合, 均匀分布于整个箱内. 结合溶质混合输移过程和水污染物的生化反应动力学, 并针对平原河网特点, 推导出 COD、氨氮、DO 的水质动力学方程式, 均为拟常微分方程, 用经典四阶龙格-库塔方法求解<sup>[18]</sup>. 由于避免了解偏微分方程中的矩阵求解工作, 大幅度提高了计算效率, 而且计算精度仍能满足要求. 此外, 还通过引入溶解氧半饱和浓度, 将 COD、氨氮、溶解氧耦合起来, 从而能够描述水质在不同的溶解氧状态下(好氧、缺氧、厌氧)的水质变化规律.

### 2.3 环境容量估算方法

给每个箱子分配一个大于环境容量的假想污染负荷, 给每个箱子指定一个污染削减率, 各箱子的污染削减率组合起来就形成一个削减方案, 一个削减方案对应一个河网的排污量. 各箱子的假想污染负荷一经分配即为固定值, 而污染削减率是可变的, 那么削减率就可以看作是河网排污量的参数, 而环境容量就是所有河网排污量的最大值(如式(1)、(2)所示). 因此, 可以用参数率定的方法来确定削减率的参数分布, 进而求得环境容量.

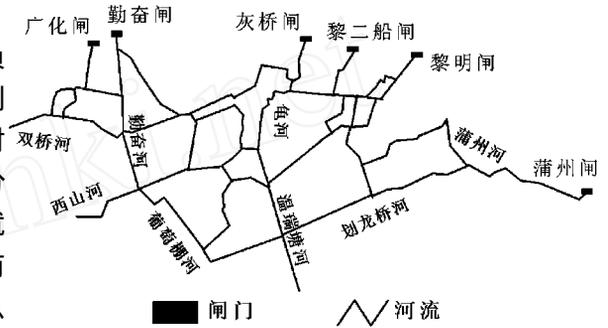


图 1 鹿城区河网概化图

$$P_i = f(c_1, c_2, \dots, c_n, L_1, L_2, \dots, L_n) \quad (1)$$

$$\phi = \max_{i=1}^K P_i \quad (2)$$

其中,  $c_1, c_2, \dots, c_n$ : 各箱子的污染削减率;  $L_1, L_2, \dots, L_n$ : 各箱子的假想污染负荷;  $P_i$ : 第  $i$  个削减方案的排污量;  $\phi$ : 环境容量;  $n$ : 箱子个数;  $K$ : 采样次数.

具体步骤如下:

- 1) 水质模型参数的率定及验证.
- 2) 给每个箱子合理分配一个假想污染负荷和初始污染削减范围(推荐给较高的削减率下限, 上限可取 100%).
- 3) 用 Monte Carlo 模拟<sup>[19]</sup>在指定的削减范围内搜索, 产生一系列削减方案. 如果某削减方案在模拟时段内始终满足水质目标, 则称为可行削减方案. 在产生足够多的可行削减方案后, 分析所有可行削减方案中各箱子削减率范围的收缩情况.
- 4) 对于削减率范围收缩的箱子, 在此后的采样过程中削减率范围维持此收缩后的范围不变; 适当扩大其余箱子的削减率范围. 依此调整各箱子的削减范围, 准备进行新的 Monte Carlo 模拟搜索.
- 5) 重复步骤 3)、4), 直至各箱子的削减率范围没有进一步收缩的余地, 即得到各箱子削减率分布.
- 6) 酌情缩小各箱子的削减率范围以提高搜索效率, 重新进行 Monte Carlo 模拟搜索. 在产生足够多的可行削减方案后, 其中的最大污染排放量即为待求的水环境容量. 污染源削减方案也同时产生.

以下问题需要说明:

- 1) 给箱子分配的假想污染负荷理论上应大于环境容量. 实际应用中, 可根据现状污染源乘以一系数作大致估计.
- 2) 当箱子个数较多时, 需要率定的参数也较多, 会使计算规模扩大从而导致计算效率低下. 因此, 参数个数可以根据河网、污染源的实际情况及计算的规模作合理调整. 实际应用中, 为降低计算规模, 可以使同一河段的削减率相同(如下文的应用实例), 也可以使削减率针对每个污染源.
- 3) 相对于最优化分析法, 本方法简便灵活, 在求得水环境容量的同时, 也产生了污染源削减方案. 再

作少量调整,可以与经济因素相关联.

### 3 环境容量估算方法的应用——以鹿城区河网为例

表1 参数率定结果的统计分析

统计参数	COD 降解速率 (1/d)	硝化速率 (1/d)
最大值	0.0299	0.2200
最小值	0.0184	0.0002
均值	0.0227	0.0768
标准差	0.0025	0.0498

#### 3.1 模型参数率定结果

以温瑞塘河流域内水流条件最复杂、污染最严重的鹿城区河网为例.河网内共有52条河段,29个汉点,概化图如图1所示.因为在规划中并不是单单求得一个环境容量,而是要根据环境容量来确定污染源削减方案,所以对前述的方法作了一些变通.根据水体严重污染的现状,确定污染源治理的原则为只能就地削减,不能搬迁,也不能增加新的污染源.因此将现状污染源作为各河段的假想污染负荷,并且同一河段取相同的削减率.这样估算的水环境容量比实际的水环境容量要小,但是便于筛选污染源削减方案.

水质模型率定的参数为COD降解速率和硝化速率,其余参数采用经验值或经验公式计算获得.为充分利用现有的水文、水质、污染源同步数据,采用1999年12月3日至1999年12月13日和2000年11月25日至12月4日的水文、水质数据进行参数率定和模型验证工作.参数率定的结果统计见表1.根据参数率定的结果进行模型验证.从验证结果看,计算值的平均相对误差为18.2%,因此认为参数率定结果是可接受的.

水质模型率定的参数为COD降解速率和硝化速率,其余参数采用经验值或经验公式计算获得.为充分利用现有的水文、水质、污染源同步数据,采用1999年12月3日至1999年12月13日和2000年11月25日至12月4日的水文、水质数据进行参数率定和模型验证工作.参数率定的结果统计见表1.根据参数率定的结果进行模型验证.从验证结果看,计算值的平均相对误差为18.2%,因此认为参数率定结果是可接受的.

#### 3.2 环境容量估算结果

水环境容量的估算首先选择水质最不利条件的时段进行.模拟时段选取为2000年1月1日至1月31日(属枯水期),沿瓯江诸闸全部关闭一个月.COD降解速率选用率定结果中的平均值 $0.0227d^{-1}$ ,硝化速率相应的取为 $0.0704d^{-1}$ .

将各河段的初始削减率都设为90%~100%,用Monte Carlo模拟搜索到255个可行的方案,搜索结果见图2.从中可以看出,河段8、10、12、13、24、31、41、43的削减率分别出现收缩,收缩后的区间就作为以上河段在后续搜索中的取值区间.

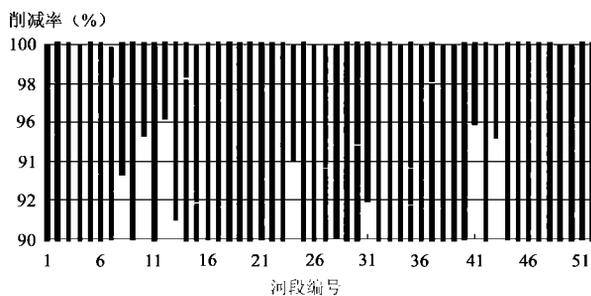


图2 削减率为90%~100%时的搜索结果

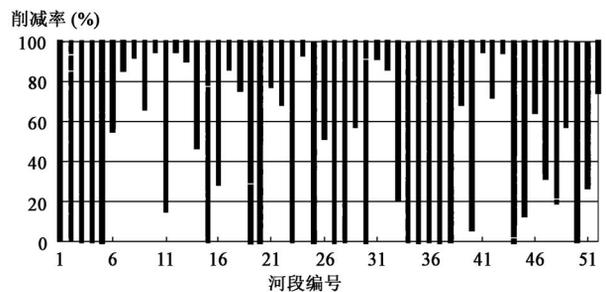


图3 削减率为0~100%时的搜索结果

类似地,对未收缩的河段,依次在80%~100%、70%~100%、50%~100%、30%~100%,最后0%~100%(结果见图3)内进行搜索,最终得到各河段削减率的参数分布.

然后,将削减率分布为0%~100%的河段(意味着该河段可以不承担削减污染负荷的任务)的削减率置为0,对削减率分布范围比较大的河段适当缩小其分布范围,重新用Monte Carlo模拟进行搜索,搜索到的最大值为COD204.7吨,氨氮17.3吨,即为鹿城区河网的一月份环境容量.

根据上述方法,依次改变水利设计条件,就可以求得鹿城区河网一年内的逐月环境容量,即河网的动态环境容量.但是,在实际规划过程中,考虑到污染源排放量的年内变化相对较小,在现行管理体制下要求污染源排放随水利条件变化而改变并不切合实际,且会冒相当的风险.权衡利弊,仍取稳态的环境容量,故确定鹿城区河网的环境容量为COD2456吨/年,氨氮208吨/年.根据计算结果,可以制订出相应的污染负荷削减方案,在此从略.整个计算过程在一天内完成.

## 4 结论

1) 环状河网水环境容量带有明显的复杂性、动态性与不确定性,探讨环状河网动态水环境容量的估算方法,无论在学术上还是现实上都具有重要意义;

2) 本文采用基于 HSY 算法的自动试错法,克服了以往试错法的不足,其基础是 HSY 算法和动态环状河网水质模型;

3) 通过 HSY 算法可以求得参数的分布,而不再是一个单一的最优参数,从而在一定程度上避免了由于“最优”参数失真带来的决策风险;

4) 新开发的动态环状河网水质模型,避免了解水质动力学偏微分方程中的矩阵求解工作,从而大幅度提高了计算效率,使得大规模的试错成为可能;

5) 将各河段的削减率看作河网排污量的参数,就可用类似参数率定的方法来求环境容量;

6) 相对于最优化分析法,本方法简便灵活,在求得水环境容量的同时,也产生了污染源削减方案.再作少量调整,可以与经济因素相关联.

### 参考文献:

- [1] 张永良,刘培哲. 水环境容量综合手册[M]. 北京:清华大学出版社,1991.  
Zhang Yongliang, Liu Peizhe. Manual for Water Environmental Assimilation Capacity[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [2] 郑孝宇. 河网非稳态水环境容量数值计算[D]. 南京:河海大学环境水利研究所,1994.  
Zheng Xiaoyu. Computation of Water Environmental Assimilation Capacity for Unstable Looped River Network[D]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [3] 郑孝宇,褚君达,朱维斌. 河网非稳态水环境容量研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 25 - 31.  
Zheng Xiaoyu, Chu Junda, Zhu Weibin. A study on unsteady water environmental capacity of river network[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(1): 25 - 31.
- [4] 徐贵泉,褚君达,吴祖扬,等. 感潮河网水环境容量数值计算[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 263 - 268.  
Xu Guiquan, Chu Junda, Wu Zuyang, et al. Numerical computation of aquatic environmental capacity for tidal river network[J]. Journal of Environmental Science, 2000, 20(3): 263 - 268.
- [5] 徐贵泉,褚君达,吴祖扬,等. 感潮河网水环境容量影响因素研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 375 - 380.  
Xu Guiquan, Chu Junda, Wu Zuyang, et al. Study on effect factors of water environmental capacity for tidal river network[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 375 - 380.
- [6] 徐祖信,卢士强,林卫青. 潮汐河网水环境容量的计算分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(4): 254 - 257.  
Xu Zuxin, Lu Shiqiang, Lin Weiqing. Calculating analysis on water environmental capacity of tidal river networks[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(4): 254 - 257.
- [7] 罗缙,逢勇,罗清吉,等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 144 - 146.  
Luo Jin, Pang Yong, Luo Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Science and Technology), 2004, 32(2): 144 - 146.
- [8] Beck M B. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty[J]. Wat. Res. Res., 1987, 23(8): 1393 - 1442.
- [9] Hornberger G M, Spear R C. Eutrophication in peel inlet I, problem-defining behaviour and a mathematical model for the phosphorous scenario[J]. Water Res, 1980, 14(1): 29 - 42.
- [10] Spear R C, Hornberger G M. Eutrophication in peel inlet, Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis[J]. Water Res, 1980, 14(1): 43 - 49.
- [11] Hornberger G M, Spear R C. An approach to the preliminary analysis of environmental systems[J]. J Environ Manage, 1981, 12(1): 7 - 18.
- [12] Tucci C E M, Chen Y H. Unsteady water quality model for river network[J]. Proc ASCE, 1981, 107(WR2): 477 - 493.

(下转第 134 页)

## 参考文献:

- [1] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报, 1983, (1): 3 - 16.  
Cai Wen. Extension set and non-compatible problems [J]. Journal of Scientific Exploration, 1983, (1): 3 - 16.
- [2] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.  
Cai Wen. Matter Element Model and Its Application [M]. Beijing: Publishing House of Document of Science and Technology, 1994.
- [3] 杨国为. 物元动态系统分析[M]. 青岛: 青岛出版社, 1996.  
Yang Guowei. Matter Element Dynamic System Analysis-formalization of Thinking, Decision Making and Designing [M]. Qingdao: Qingdao Publishing House, 1996.
- [4] 蔡国梁. 关于  $n$  维可拓集合的研究[J]. 广东工学院学报, 1996, 13(1): 5 - 11.  
Cai Guoliang. Study of  $n$ -dimensional extension set [J]. Journal of Guangdong Institute of Technology, 1996, 13(1): 5 - 11.
- [5] 蒋劲松.  $N$  维空间上的可拓集[J]. 西南工学院学报, 1998, 13(2): 75 - 78.  
Jiang Jinsong.  $N$ -Dimensional extension set [J]. Journal of Southwest Institute of Technology, 1998, 13(2): 75 - 78.
- [6] 蔡文, 杨春燕, 何斌. 可拓逻辑初步[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Cai Wen, Yang Chunyan, He Bin. Introduction to Extension Logic [M]. Beijing: Science Press, 2003.

## (上接第 121 页)

- [13] 褚君达, 徐惠慈. 河网水质模型及其数值模拟[J]. 河海大学学报, 1992, 20(1): 17 - 22.  
Chu Junda, Xu Huici. Water quality model and its numerical simulation for looped river network [J]. Journal of Hohai University, 1992, 20(1): 17 - 22.
- [14] 徐贵泉, 宋德蕃, 黄士力, 等. 感潮河网水量水质模型及其数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(1): 94 - 105.  
Xu Guiquan, Song Defan, Huang Shili, et al. Hydraulics and water quality model for tidal river network and numerical simulation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1996, 4(1): 94 - 105.
- [15] 金忠青, 韩龙喜. 一种新的平原河网水质模型——组合单元水质模型[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 35 - 40.  
Jin Zhongqing, Han Longxi. A new water quality model for plain rivers system: a combined units water quality model [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 35 - 40.
- [16] 清华大学环境科学与工程系. 温州市温瑞塘河综合整治规划[R]. 2002.  
Dept. of Environmental Science & Engineering in Tsinghua University. Report of Comprehensive Environmental Planning for Wenruitang River Basin in Wenzhou City [R]. 2002.
- [17] 吴寿红. 河网非恒定流四级解法[J]. 水利学报, 1985, (8): 42 - 50.  
Wu Shouhong. Four-step method to compute unsteady flow for river networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (8): 42 - 50.
- [18] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale. Numerical methods for engineers (3rd edition) [M]. McGraw-Hill, 1998, 219 - 328.
- [19] 姚姚. 蒙特卡洛非线性反演方法及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.  
Yao Yao. Monte Carlo Nonlinear Inversion Method and Its Application [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1997.