

# 区域水资源可持续利用的多目标决策模型

何士华, 邹进, 程乖梅

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 从可持续发展战略出发, 将水资源开发利用看成一个连续的过程, 根据多目标决策理论, 以同时追求经济、环境、社会效益为主要目标, 在考虑区域水资源的支撑能力限制和经济、环境、社会发展对水资源的依存关系等规定性约束的基础上, 建立了区域水资源可持续利用的动态多目标决策数学模型, 为水资源可持续利用的定量研究奠定了理论基础。

**关键词:** 多目标决策; 水资源; 可持续发展; 数学模型

**中图分类号:** TV213.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-855X(2005)03-0056-04

## Multi-Objective Decision Model of Regional Water Resources' Sustainable Utilization

HE Shi-hua, ZOU Jin, CHENG Guai-mei

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Based on the sustainable development theory, water resources' development and utilization is treated as a continuous process. According to the multi-objective decision theory, a dynamic multi-objective decision mathematical model of regional water resources' sustainable utilization is established, which pursues the basic objectives such as economical, social and environmental efficacy and subjects them to the carrying capacity of regional water resources and the dependent relations of economy, society and environment development on water resources. It lays a theoretical foundation for the quantitative study of regional water resources' sustainable utilization.

**Key words:** multi-objective decision; water resources; sustainable development; mathematical models

### 0 引言

水资源作为一种人类和一切生物赖以生存与发展的不可替代的自然资源和生态环境的基本要素, 是一个国家或地区经济建设和社会发展的物质基础。然而, 水资源数量短缺、污染加剧、水灾泛滥正制约着全球经济和社会的发展, 也是我国全面建设小康社会进程中所面临的主要制约因素之一。

纵观人类开发利用水资源的历史可以发现, 在原始水资源利用阶段, 社会生产力水平低下, 人口稀少, 社会经济发展对水的需求量远小于水资源的可利用量, 水资源似乎“取之不尽, 用之不竭”; 在传统水资源开发利用阶段, 人类以大规模兴建水利工程为主要措施来满足社会经济发展对水资源的需求, 决定工程方案取舍的主要依据是技术经济指标的优劣; 随着缺水、水灾、水污染等问题的日益加剧和水资源与社会、经济、环境的不协调关系的日益突出, 传统水资源开发利用方式已面临巨大挑战, 迫使水资源开发利用向可持续发展的思想转变。

可持续发展观念下的水资源利用, 要求把人类利用水资源的行为看作一个连续的过程, 在水资源开发利用的整个过程中, 实现区域经济、环境、社会的协调发展, 满足近期和远景不同时段、不同用水部门对水资源的需求<sup>[3~5]</sup>。事实上, 从多目标决策理论的角度来看, 水资源可持续利用的根本目标是寻求同时追求经济效益、社会效益、环境效益所构成的向量问题的最佳均衡解, 并且满足由人口、经济、环境、社会发展对

收稿日期: 2004-12-01. 基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(项目编号: 03Y252D).

第一作者简介: 何士华(1963~), 男, 博士生, 副教授. 主要研究方向: 水资源可持续利用与管理.

E-mail: heshihua@public.km.yn.cn

水资源的依存关系和自然规律等构成的规定性约束条件. 本文正是从上述思想出发, 力图构建一个用数学语言表达的区域水资源可持续利用的多目标决策模型, 以克服目前对水资源可持续利用定性陈述方式的主观随意性, 促进水资源可持续利用从定性描述向定量分析的转变.

## 1 区域水资源可持续利用目标的数学表达

常规的水资源规划决策中, 往往对经济、环境和社会因素存在不同程度的割裂, 忽视近期与远景不同时段在水资源分配上的竞争. 为此, 本文选取水资源开发利用的整个过程中同时追求经济效益、环境效益和社会效益3个目标为总目的.

下面讨论各目标函数的数学表达. 2002年, 我国开始启动现正在进行的全国水资源综合规划工作, 要求统筹考虑国民经济和社会发展与维持生态环境基本功能需水之间的矛盾冲突, 按生活、生产、生态的“三生”用水口径对全社会的用水需求进行配置<sup>[2]</sup>. 按照这一新要求, 设将研究的区域共划分为  $K$  个子区 ( $k = 1, 2, \dots, K$ ), 在某一时段  $t$  向  $k$  子区的生活供水量为  $x_{lk}(t)$ , 生产供水量为  $x_{pk}(t)$ , 恢复生态环境的供水量为  $x_{ek}(t)$ .

### 1.1 经济效益目标

选择研究区域的整个水资源开发利用过程中供水带来的直接经济效益之和 ( $TEO$ ) 最大为主要经济目标. 设区域供水量  $x(t) = f(x_{lk}(t), x_{pk}(t), x_{ek}(t))$  在  $t$  时段产生的经济效益为  $EO(x(t))$ , 则上述经济效益目标可表示为

$$\max \left\{ TEO = \sum_{t=t_0}^{t_N} \frac{EO(x(t))}{(1+r)^t} \right\} \quad (1)$$

式中  $r$  为时段贴现率. 时段  $t$  的大小依据所研究的系统规模、复杂程度及可预测期的长短而定, 可取每1年为一个时段, 或每5年、每10年等任意值为一个时段,  $t = t_0, t_1, \dots, t_N$ , 其中  $t_0$  为区域水资源开发利用的开始时段, 理论上  $t_N \rightarrow \infty$ .

显然, 对某一时段  $t$ , 若生活供水量  $x_{lk}(t)$  产生的经济效益为  $LEO(x_{lk}(t))$ , 生产供水量  $x_{pk}(t)$  产生的经济效益为  $PEO(x_{pk}(t))$ , 恢复生态环境良性循环的供水量  $x_{ek}(t)$  所带来的支出为  $C(x_{ek}(t))$ , 则

$$EO(x(t)) = \sum_{k=1}^K LEO(x_{lk}(t)) + \sum_{k=1}^K PEO(x_{pk}(t)) - \sum_{k=1}^K C(x_{ek}(t)) \quad (2)$$

其中,  $LEO(x_{lk}(t))$ 、 $PEO(x_{pk}(t))$ 、 $C(x_{ek}(t))$  可根据具体情况经细化后予以表达. 如对子区  $k$ ,  $LEO(x_{lk}(t))$  可表示为

$$LEO(x_{lk}(t)) = a_{lk}(t)(b_{lk}(t) - c_{lk}(t))x_{lk}(t) \quad (3)$$

式中:  $b_{lk}(t)$  为  $k$  子区的单位生活供水量综合效益系数,  $c_{lk}(t)$  为  $k$  子区的单位生活供水量综合费用系数,  $a_{lk}(t)$  为考虑供水次序、用户性质等因素的  $k$  子区生活供水修正系数.

### 1.2 社会效益目标

本质上, 一切经济活动的目的是用最少的资源消耗获取最大限度的国民福利. 水资源危机启迪我们可持续地利用可再生的有限的水资源, 为国民和社会创造最大的福利是政府追求的目标. 因此, 从理论上讲, 社会效益可用社会福利度量, 判断社会福利改进的基本准则为“帕累托 (Pareto) 标准”<sup>[1]</sup>. 考虑到社会福利难以度量和社会福利函数表达的困难, 为了满足所建模型的可操作性要求, 我们选取水资源开发利用过程中区域总缺水最小来间接反映社会效益目标. 因为区域缺水量的大小和缺水程度直接影响到社会的发展, 体现了水服务的质量提高和数量增长与日益增长的社会需求的适应性, 直接关系到社会可持续发展的安全保障和社会稳定, 是社会效益的一个重要侧面.

设在时段  $t$  区域供水量  $x(t) = f(x_{lk}(t), x_{pk}(t), x_{ek}(t))$  所导致的缺水量为  $SO(x(t))$ , 则在整个水资源开发利用过程中, 上述社会效益目标可表示为

$$\min \left\{ TSO = \sum_{t=t_0}^{t_N} SO(x(t)) \right\} \quad (4)$$

若  $t$  时段  $k$  子区的生活用水需水量为  $D_{lk}(t)$ , 生产用水需水量为  $D_{pk}$ , 生态用水需水量为  $D_{ek}$ , 则

$SO(x(t))$  可表示为

$$SO(x(t)) = \sum_{k=1}^K (D_{lk}(t) + D_{pk}(t) + D_{ek}(t)) - \sum_{k=1}^K (x_{lk}(t) + x_{pk}(t) + x_{ek}(t)) \quad (5)$$

### 1.3 环境效益目标

与水资源利用直接相关的环境问题,可以用污废水排放量最小来衡量,一般可选取区域主要污染物的排放量来表示.

若时段  $t$  区域供水量  $x(t) = f(x_{lk}(t), x_{pk}(t), x_{ek}(t))$  所产生的主要污染物排放量为  $BO(x(t))$ , 则在整个水资源开发利用过程中,上述环境效益目标可表示为

$$\min \{ TBO = \sum_{t=t_0}^{t_N} BO(x(t)) \} \quad (6)$$

进一步,  $BO(x(t))$  可表示为

$$BO(x(t)) = \sum_{k=1}^K 0.01 [d_{lk}(t)h_{lk}(t)x_{lk}(t) + d_{pk}(t)h_{pk}(t)x_{pk}(t) + d_{ek}(t)h_{ek}(t)x_{ek}(t)] \quad (7)$$

式中:  $d_{lk}$ 、 $d_{pk}$ 、 $d_{ek}$  分别为  $k$  子区生活、生产、生态用水单位污废水排放量中主要的污染物含量,根据不同区域水资源用途的不同,一般可用  $BOD$ 、 $COD$ 、 $TOD$  等水质指标表示;  $h_{lk}$ 、 $h_{pk}$ 、 $h_{ek}$  分别为  $k$  子区生活、生产、生态用水污水排放系数.

## 2 区域水资源可持续利用的各种规定性约束的数学表达

水资源作为一种有限的无法替代的母体性资源,是可持续发展的主要限定性因子,是联系社会、经济、环境的主要纽带.本质上,水资源可持续利用是从保障可持续发展的要求出发,建立起社会、经济、环境与水资源的协调发展关系.

下面根据社会、经济、环境对水资源的依赖关系、限定关系以及水资源的支撑能力等,构建区域水资源可持续利用的各种规定性约束的数学表达.

### 2.1 经济发展约束

经济的可持续发展表现为区域水资源开发利用过程中人均经济效益的不断提高,即区域供水量在不同的时段所产生的经济效益应满足:

$$\frac{EO(x(t+1))}{P(t+1)} \geq \frac{EO(x(t))}{P(t)} \quad (8)$$

式中:  $P(t)$  为第  $t$  时段区域的人口总数.

同时:

$$\frac{GNP(x(t))}{P(t)} \geq g_{\min}(t) \quad (9)$$

式中:  $GNP(x(t))$  为  $t$  时段与区域供水量  $x(t)$  相应的国民生产总值,  $g_{\min}(t)$  为  $t$  时段满足最低生活标准所需的人均经济收入.

### 2.2 环境发展约束

生态环境的可持续发展表现为环境质量的不断改善.对于水资源可持续利用而言,就是要求在开发利用水资源的同时也创造一个良好的水环境.水环境的好坏主要由水质标准衡量,而水质的好坏在源头上又主要取决于污染物的排放量大小.因此,环境的可持续发展要求:

$$BO(x(t+1)) \leq BO(x(t)) \quad (10)$$

同时,对各子区各用户要做到达标排放;对整个研究区域,要求总量控制,即

$$q_{ik}^r(x(t)) \leq q_0^r(t) \quad (i = l, p, e; k = 1, 2, \dots, K) \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^K 0.01 (d_{lk}(t)h_{lk}(t)x_{lk}(t) + d_{pk}(t)h_{pk}(t)x_{pk}(t) + d_{ek}(t)h_{ek}(t)x_{ek}(t)) \leq W_0(t) \quad (12)$$

式中:  $q_{ik}^r(x(t))$ — $t$  时段  $k$  子区  $i$  用水户排放污染物  $r$  的浓度,  $q_0^r(t)$ —污染物  $r$  达标排放规定的浓度,

$W_0(t)$ —允许的污染物排放总量,其余符号意义同前.

### 2.3 社会发展约束

水资源是一种自然资源,水资源的可持续利用要求全社会能永远续地公平享有这一自然资源,但水资源的自然分布规律和利用的效率原则决定了社会成员不可能完全平均地享用.就某一时段而言,应使人均享有的水量不得小于维持人生存的最小需水量  $x_{\min}$ ,即

$$\frac{x(t)}{P(t)} \geq x_{\min}(t) \quad (13)$$

与此同时,在水资源的开发利用过程中,应兼顾不同时段社会发展对水资源的要求,使区域缺水量逐步减小,并不断提高水资源的供给能力,即

$$SO(x(t+1)) \leq SO(x(t)) \quad (14)$$

$$x(x+1) \geq x(t) \quad (15)$$

### 2.4 水资源的支撑能力限制

一定区域在一定时段的水资源的有限性,决定了区域水资源支撑地区人口的基本生存、社会经济的可持续发展和生态环境的良性循环的能力也是有限的.区域水资源的支撑能力限制可表达为

$$\sum_{k=1}^K (x_{ik}(t)) + \sum_{k=1}^K (x_{pk}(t)) + \sum_{k=1}^K (x_{ek}(t)) \leq \alpha W(t) + W'(t) \quad (16)$$

式中: $W(t)$ 为区域水资源量, $\alpha$ 为水资源可利用系数, $W'(t)$ 为区外调水量,其余符号意义同前.

## 3 区域水资源可持续利用多目标决策模型的一般形式与特点

若令  $f_1(X, T) = TEO$ ,  $f_2(X, T) = -TSO$ ,  $f_3(X, T) = -TBO$ , 则水资源可持续利用的多目标决策模型的一般形式可表达为:

$$\begin{aligned} & \max \{f_1(X, T), f_2(X, T), f_3(X, T)\} \\ & \text{s. t. } \begin{cases} X, T \in S \\ X \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $X$ 为由决策变量组成的向量, $T$ 为由时间变量组成的向量, $S$ 为由式(8)至(16)所构成的约束条件集合.上述模型具有以下特点:

1) 与一般水资源分配的单目标或多目标数学规划模型相比,本文所建立的区域水资源可持续利用的多目标决策模型充分考虑了社会、经济、环境、水资源的协调发展要求,体现了可持续发展的思想.

2) 统筹协调生活、生产和生态用水是实现水资源可持续利用的基本要求.本文将模型中的决策变量设置为区域各子区不同时间段的“三生”供水量,有利于水资源可持续利用所追求的目标及区域水资源对经济、环境、社会发展的协调关系的数学表达,符合我国正在进行的新一轮全国水资源综合规划要求.

3) 水资源可持续利用要求将人类的所有水事活动看成一个连续的过程,统筹考虑代内与代际人用水的要求.本文所建立的多目标决策模型将所有的变量、参数及相关的表达式均表示为时段  $t$  的函数,反映了实现经济效益、环境效益、社会效益的统一与协调贯穿于水资源开发利用的全过程,即水资源可持续利用是一个动态的多目标决策问题.

## 4 结语

随着可持续发展战略的逐步实施,水资源可持续利用成为水资源学科的重要研究领域之一.本文所建立的区域水资源可持续利用的多目标决策模型,从水资源开发利用的整个过程中实现经济效益、社会效益与环境效益的统一与协调出发,将水资源可持续利用所追求的各个目标及相关的各种规定性约束条件以数学形式加以定量描述,有利于克服单目标模型对水资源问题认识的片面性和目前在理解水资源可持续利用上一一般的定性陈述方式的随意性,为水资源可持续利用的定量研究及其规律性的认识提供了理论基础.

(下转第63页)

等的办法进行控制. 如果采用主控回路的采样周期  $T_{主}$  与副回路的采样周期  $T_{副}$  不等进行控制时, 为了避免主控回路和副控回路之间发生相互干扰和共振, 应使  $T_{主}$  与  $T_{副}$  之间相差3倍以上<sup>[1]</sup>.

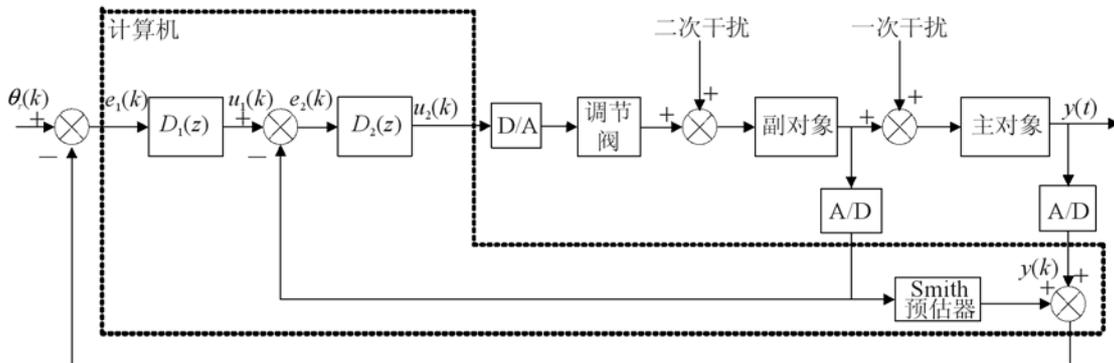


图5 Smith预估炉温串级控制系统结构图

Fig.5 Block diagram of estimating and string furnace temperature control system

### 3 结束语

在工业生产过程中,物料、能量的运输所带来的时间延迟问题是传统PID控制器所不能很好解决的控制问题. 常规的PID控制系统对于延迟大、非线性强、控制信号反应慢的复杂热加工过程往往不能获得令人满意的控制效果. 加热炉的炉温控制问题是一个典型的时间滞后问题. 史密斯(Smith)预估控制技术和煤气流量串级控制技术在该系统应用,起到及时检测系统中可能引起被控制量发生变化的一些因素并加以控制,有效地克服了对象等效时间  $\tau$  很长的问题,并且具有鲁棒性强的特点,改善了控制系统的调节品质. 该系统把主要的扰动包含在副控回路中,通过副控回路的调节作用,在扰动影响到主控回路被调参数之前,大大地削弱了扰动作用的影响. 这种控制方法在热处理、化工、机械加工、金属冶炼等行业中也具有广泛的用途和推广价值.

#### 参考文献:

[1] 肖隽. 锅炉温度串级控制系统[M]. 机电工程,2002,20(1):30~32.  
 [2] 李正军. 计算机测控系统的设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004. 316~320,343.  
 [3] 孟华. 工业过程检测与控制. 北京:航空航天大学出版社,2000. 168~175, 220~226.  
 [4] 黄胜. 改进型史密斯(Smith)预估器在过热汽温度控制中的应用[M]. 自动化仪表,2003,(24):1,42~45.  
 [5] 金以慧. 过程控制[M]. 北京:清华大学出版社,2001. 103~117.

(上接第59页)

#### 参考文献:

[1] 王春元,杨永江. 水资源经济学及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999. 54~58.  
 [2] 水利部,国家计划发展委员会. 全国水资源综合规划任务书[R],2002.  
 [3] 左其亭,陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003. 123~147.  
 [4] 翁文斌,蔡喜明,等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报,1995,(2). 1~11.  
 [5] 薛小杰,于长生,等. 水资源可持续利用模型及其应用研究[J]. 西安理工大学学报,2000,(3). 301~305.  
 [6] 何士华. 美国的水库及其管理体制简介[A]. 《中国人口、资源、环境与可持续发展战略研究》电力专集[C]. 北京:中国环境科学出版社,2001.  
 [1] 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990. 10~22.