

黄河流域水资源多维临界调控理论与模型研究

彭少明¹, 信劲松², 黄 强¹, 畅建霞¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国联合通信公司河南分公司, 河南 郑州 450003)

摘要 :将控制论、协同论、耗散结构理论引入水资源系统 ,并基于这三大理论建立水资源多维临界调控理论 ,按照对复杂系统“从定性到定量综合集成”的研究方法 ,建立了黄河流域水资源多维临界调控仿真模型 ,对黄河流域水资源调控进行了实证研究 ,实现了黄河流域水资源的优化配置 ,验证了多维临界调控理论与模型的合理性。
关键词 :多维临界调控 ;有序度 ;系统熵 ;水资源调度 ;黄河流域
中图分类号 :TV213.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2005)01-0009-03

Study on theory and model of multidimensional critical regulation and control of Yellow River Basin water resources//
PENG Shao-ming¹, XIN Jing-song², HUANG Qiang¹, CHANG Jian-xia¹(1. School of Water Resources and Hydroelectric Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Henan Branch, China Unicom Corporation, Zhengzhou 450003, China)
Abstract : By introduction of the control theory, synergetic theory and dissipation structure theory into the water resources system, a multidimensional critical water resources regulation and control theory was developed. According to the research method for the complex system, in which the qualitative study was combined with the quantitative integration, a multidimensional critical regulation and control model was established for the Yellow River Basin water resources. Through a case study with the developed model, the optimal allocation of water resources of the Yellow River Basin was realized, and the rationality of the present model and theory was verified.
Key words : multidimensional critical regulation and control; order degree; system entropy; water resources regulation; Yellow River Basin

不断扩大的供水范围和持续增长的需水要求 ,使水少沙多的黄河难以承受 ,承担的供水任务已超过其承载能力 ,造成水资源供需矛盾日益突出 ,地区间用水矛盾加剧 ,流域生态环境不断恶化 ,制约了经济、社会、环境的协调发展。

1 多维临界调控理论研究

1.1 子系统有序度

水资源系统是耗散结构^[1,2],系统的相变结果不一定都走向新的有序,也可能走向无序,因此,为了把握系统协调的程度,促使系统向更加有序的方向转化,有必要在临界调控之前,首先计算在某种利用方案下序参量的协同作用。为此,引入有序度这一概念来衡量协同作用。
考虑子系统 S_j , 设其发展过程中的序参量变量为 $e_j = (e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jn})$, 其中 $n \geq 1$, e_{ji} 的取值应在临界阈值区间,如: $\alpha \leq e_{ji} \leq \beta, i \in [1, n]$, e_{ji} 在阈值区

间的取值越大,子系统的有序程度越高,其取值越小,子系统的有序程度越低。针对黄河流域水资源系统给出子系统 S_j 序参量分量 e_{ji} 的有序度为

$$u_j(e_{ji}) = \frac{e_{ji} - \beta_{ji}}{\alpha_{ji} - \beta_{ji}} \tag{1}$$

式中: $u_j(e_{ji})$ 为序参量分量 e_{ji} 的有序度; β_{ji} 和 α_{ji} 分别为 e_{ji} 的最小和最大临界阈值。
由式(1)可知,若 e_{ji} 的有序度值 $u_j(e_{ji}) \in [0, 1]$, 则 e_{ji} 在临界阈值区间,且其值越大, e_{ji} 对子系统 S_j 有序的“贡献”越大。相反,若 $u_j(e_{ji}) \notin [0, 1]$, 说明 e_{ji} 不在合理阈值区间,需进行调节。从总体上看, e_{ji} 对子系统 S_j 有序程度的“总贡献”可通过 $u_j(e_{ji})$ 的集成来实现:
$$u_j(e_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i u_j(e_{ji}), \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \tag{2}$$

 $u_j(e_j)$ 称为子系统 S_j 序参量 e_j 的有序度,且 $u_j(e_j) \in [0, 1]$, $u_j(e_j)$ 越大, e_j 对整个系统有序的“贡献”越

大,系统有序的程度就越高,反之则越低。 λ_i 为序参量分量 e_{ji} 的权系数,它的确定既应考虑到系统的现实实际运行状况,又应能够反映系统在一定时期内的发展目标。

1.2 水资源系统演化方向的定性推理

根据协同学理论,由于特定时段内水资源量的有限性,子系统之间存在着竞争,子系统的有序度并不能代表整个水资源系统的有序度。经济、社会、生态子系统的有序度不可能同时增加,某一个子系统有序度的提高,可能会导致其他子系统有序度的降低,但是整个系统的有序度如何变化却无从确定,这也是水资源系统临界调控需要解决的问题。

耗散结构的熵理论为解决这个问题提供了依据,虽然熵并不能对系统演化进行定量计算,而且也不易于用显式函数表示出来,但利用熵与有序度之间的关系,可以对系统演化方向进行定性分析,即熵减少,有序性增强,熵增大,有序性减弱。

根据信息熵^[3]的定义,本文利用子系统有序度建立了判别水资源系统演化方向的有序度熵(协调度熵)函数。式(3)为系统熵函数:

$$S_Y = - \sum_{j=1}^3 \frac{1 - u_j(e_j)}{3} \lg \frac{1 - u_j(e_j)}{3} \quad (3)$$

式中: $u_1(e_1)$ 、 $u_2(e_2)$ 、 $u_3(e_3)$ 分别代表经济、社会和生态子系统的年有序度。按照有序度与熵变理论,应有如下定理:如果某一个子系统的有序度增加,而另外两个子系统有序度不变,那么系统应该向有序方向演化,且有序度熵应减小,反之也成立。如果子系统有序度的变化 $\Delta u_j(e_j)$ 导致熵函数 S_Y 减少,那么整个系统的有序度将增加,表明各子系统能够协调发展,系统向有序或良性方向演化。式(3)是在综合考虑经济、社会和生态子系统有序度的基础上,利用熵来讨论水资源系统有序性的变化,既符合水资源系统的特点,同时也为临界调控提供了依据。经过调控后,某个子系统有序度可能增加,而导致其他子系统有序度减少,在这种情况下,如果系统有序度熵减小了,说明调控措施是可行的;相反,则需要继续采取其他措施进行调控,为此,得出以下判别公式:

$$\Delta S_Y = S_{Y(n+1)} - S_{Y(n)} \quad (4)$$

式中: $S_{Y(n+1)}$ 为系统第 $n+1$ 次调控后的末态熵; $S_{Y(n)}$ 为第 n 次调控后的熵; ΔS_Y 为第 $n+1$ 次调控引起的熵变。根据熵变值 ΔS_Y 的大小,可判断系统在 $n+1$ 次调控后的演变方向和内部稳定程度:

a. 当 $\Delta S_Y > 0$ 时,表示调控后水资源系统总熵增加,系统中至少有一个子系统未向有序方向转化,使系统处于非协调发展状态,系统向无序方向演化。这时要继续实施调控措施加以调控。

b. 当 $\Delta S_Y < 0$ 时,即系统靠近熵产生最小的状态,表明系统总熵减小,能够向有序方向演化,相对于调控前系统趋向于良性循环状态,系统功能最佳,资源利用、生态环境和社会经济可协调发展。

c. 当 $\Delta S_Y = 0$ 时,表明调控后熵无变化,系统状态熵收敛,实现寻优。

2 多维临界调控过程

水资源的多维临界调控步骤为:建立并求解调控模型中被控对象模型,即水资源开发利用模型,获得水资源开发利用方案,以此作为临界调控备选方案;建立调控模型中控制者模型,实现对各临界调控备选方案的调控。控制者模型应用调控备选方案的反馈结果完成以下工作:找到从无序演变为有序过程中起主导作用的调控变量作为序参量,利用序参量建立衡量系统有序程度的指标:有序度和有序度熵,确定适合于实现系统有序、优化、良性演化的调控层次,该层次应反映系统中各子系统之间本质存在的相互作用和联系;在调控层次的引导下,根据有序度、有序度熵通过对系统进行调控,获得新的调控备选方案。调控流程如图1所示(图中 i 为序参量编号, n 为序参量个数)。

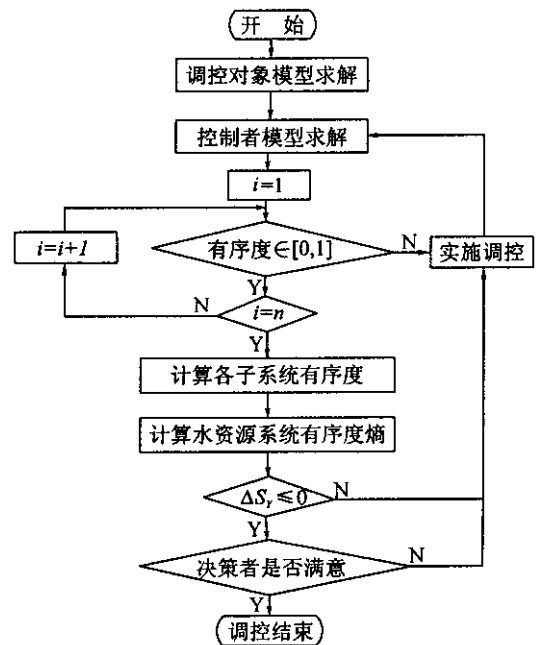


图1 水资源多维临界调控程序流程

3 黄河流域水资源多维临界调控模型

在控制论模型的基础上,采用“人机结合”,即控制者模型与被控制对象模型相结合^[4],两者并行处理的建模方法,建立临界调控的控制论模型。被控对象模型的建立就是对要进行调控的水资源开发利用过程建立模型。对于一定的来、用水条件和约束条

件 通过模型运行得出流域水资源开发利用方案. 模型结果作为反馈信息 ,经过一定的测量装置转化为控制者可以辨识的信息 输入控制者模型. 控制者模型是将人工智能专家系统的方法和技术引入水资源系统控制工程中来 ,建立的控制专家系统.

3.1 调控对象仿真模型

鉴于黄河流域水资源利用的复杂性 ,考虑到以下两个因素 :①能最大限度地反映系统真实运行情况 ,增强模型的实用性 ;②实现对水资源利用合理调控的前提是 ,调控方案必须是可行的. 因此 ,建立的调控对象模型是仿真模型. 黄河流域水资源多维临界调控对象模型的目标可分为 3 类 :

- a. 防洪减灾目标 :保证防洪和防凌安全. 防凌防洪目标是使兰州和花园口断面流量满足防凌、防洪要求的阈值范围 ,控制水库防洪水位及下泄流量 ,确保大坝水库及下游地区安全.
- b. 生态目标 :提供必要的生态环境用水 ,维持黄河流域生态系统平衡 ,防断流 ,保证利津断面最小流量 ,防河道淤积 ,满足汛期下游河道输沙流量.
- c. 水资源利用目标 :供水效益追求缺水量最小且分布合理 ;发电效益即流域梯级出力最大.

3.2 控制者模型

控制者模型是一控制专家系统 ,通过专家系统的知识和推理 ,分析控制对象模型得出的调控方案 ,为多维临界调控提供调控方向和依据.

由于黄河流域水资源系统的复杂性和不确定性 ,无法区分出序参量随时间变化的快慢程度 ,也不可能通过坐标变换来找出序参量 ,因此知识库中序参量的确定只能按照确定序参量的原则 ,根据其代表的意义“ 主宰着演化进程 ,支配着快变量的行为^[2]”进行选择. 经过研究 ,序参量选取如表 1 所示.

4 调控结果及分析

根据黄河水利委员会预测 2010 水平年流域需水量为 655.56 亿 m³ ,采用 1965 ~ 1975 年长系列径流资料进行模型演算 ,多年平均地表径流量为 572.56 亿 m³ ,

表 1 黄河流域水资源多维临界调控序参量

子系统	调控目标	序参量
经济子系统	供 水	生活、工业、农业供水量
	装机容量	保证出力
	电 量	发 电 量
社会子系统	防止冰凌洪水	兰州和花园口断面的流量
	水 资 源 存 量	龙羊峡、刘家峡、小浪底水库调度期末库容
生态子系统	防 止 断 流	非汛期生态基流
	防止泥沙淤积	汛期冲沙水量

地下水可开采量为 110 亿 m³ . 调控过程中子系统有序度和熵变化见表 2 ,序参量变化见表 3. 初始调控 ,汛期生态水量仅为 89.39 亿 m³ ,生态子系统有序度为 -0.176 ,由于有序度小于零 ,有序度熵将失去意义 ,说明生态、经济、社会不能协调发展 ,根据调控程序 ,加大河口镇补水和生态水量约束 ,重新求解 ,并用熵判别调控的合理性. 调控后 ,系统熵为 0.6456 ,多年平均汛期生态水量为 120.09 亿 m³ ,生态子系统有序度为 0.437 ,但社会和经济子系统的有序度都有所降低 ,供水有序度为 0.743 ,按照调控程序 ,对第一次调控方案进行再次调控 ,减小河口镇补水 ,加大丰水时段水库的蓄水 ,以提高对枯水时段的可供水量. 通过多次调控手段的实施 ,系统熵收敛于 0.6042 ,获得第 N 次调控结果 ,生态子系统有序度得到提高 ,经济、社会子系统有序度有所降低 ,但水资源系统熵有明显降低 ,说明本次调控能够更好地协调 3 个子系统之间的关系 ,因此该方案为推荐方案 ,调控结束. 调控过程各子系统有序度此涨彼消 ,在子系统有序度和熵的引导下 ,熵朝逐渐减小(系统有序)的方向变化 ,最终收敛.

表 2 调控过程各子系统有序度及熵变化

调控次数	经济子系统有序度	社会子系统有序度	生态子系统有序度	系统熵
初 始 调 控	0.814	0.633	-0.176	
第 1 次调控	0.743	0.388	0.437	0.6456
第 2 次调控	0.758	0.325	0.411	0.6419
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
第 N 次调控	0.786	0.538	0.249	0.6042

表 3 调控过程序参量对比

项 目	经济子系统		社会子系统							生态子系统			
	供水量/ 亿 m ³	梯级电量/ (亿 kW·h)	凌期控制断面流量/(m ³ ·s ⁻¹)						水库调度期末水位/m			非汛期 生态水量/ 亿 m ³	汛期 生态水量/ 亿 m ³
			兰州			花园口			龙羊峡	刘家峡	小浪底		
			12 月	1 月	2 月	3 月	1 月	2 月					
初 始 调 控	621.85	302.96	556.4	508.7	512.0	535.0	401.0	392.0	2571.45	1696.00	250.00	58.32	89.39
第 1 次调控	586.30	295.37	669.8	664.6	675.0	606.7	400.8	392.2	2530.13	1696.00	237.70	62.35	120.09
第 2 次调控	594.24	296.46	669.8	664.6	675.0	606.7	401.5	392.0	2530.13	1696.00	242.07	59.44	114.72
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
第 N 次调控	592.64	298.90	572.1	526.8	533.1	558.2	401.5	392.1	2548.51	1696.01	249.77	50.38	132.95

(下转第 50 页)

表 2 评分计算过程

深度/m	硬度状态	硬度得分	标准贯入击数	折后标准贯入击数	标准贯入击数得分	无侧限抗压强度 f_{cu}/MPa	折后强度 /MPa	强度得分	每层得分
2.00	坚硬	20.0	39	27.3	80.0				200.0
3.50	坚硬	15.0	47	32.9	70.0	1.32	0.66	15.0	150.0
5.00	硬塑	11.3	16	11.2	45.9	0.35	0.18	9.9	100.7
6.50	硬塑~可塑	12.5	10	7.0	50.0				93.8
8.50	硬塑~可塑	12.5	9	6.3	47.7				120.4

3 工程实例

淮安—盐城高速公路沿线分布有大量软弱地基土,其特点是天然含水量大、压缩性高、土的力学强度低,工程性质极差,设计进行水泥土搅拌桩复合地基加固处理。笔者受淮盐高速公路建设指挥部委托,对水泥土搅拌桩进行质量检测,依照上述标准对每一根受检桩进行质量评分及评价。如:在加固里程 $K_{20}+059\sim K_{20}+106$,检测桩号 4-59 号,桩长 8.5 m,龄期 90 d,其评分计算过程见表 2。

依照上述评分标准,经计算,该桩上、下部得分分别为 90.1 和 61.2,综合得分为 75.7,该桩评定等级为合格,评定结果符合实际特性,说明将现场定性描述和定量计算相结合的质量评定方法是可行的,可大大减少人为因素,在水泥土搅拌桩质量检测中具有较好的应用前景。

4 结 语

a. 水泥土搅拌桩质量检测采用定性描述和定量计算综合评定是可行的,所提出的质量检测标准

及评定方法在国内各类工程水泥土搅拌桩质量检测中具有较好的应用前景。

b. 水泥土搅拌桩桩身强度时间效应明显,且上、下部桩身强度有变化,在质量评定时应充分考虑其变化。

c. 在质量评定过程中应充分考虑特殊地质条件下桩身水泥土质量情况,如有机质土、粉砂土、膨胀土等,使评定结果符合实际情况。

d. 本文对不同地质条件下水泥土搅拌桩质量检测提出了具体评分标准,是在大量工程实践基础上的总结,理论研究有待今后进一步深入。

参考文献:

[1] 黄宏伟. 微型预制桩单桩承载力时效现场试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 667—669.
[2] 杜海金. 粉喷桩单桩承载力的时效分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 587—587.
[3] 孙军, 应后强, 邵坚. 深层搅拌桩复合地基的现场试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(6): 52—54.

(收稿日期 2004-03-08 编辑 熊水斌)

(上接第 11 页)

调控完成后,各主要序参量值见表 3。从表 3 中可以看出,经过调控以后,流域供水量为 592.64 亿 m^3 , 缺水量为 62.92 亿 m^3 , 为需水量 655.65 亿 m^3 的 9.59%, 生态水量 183.33 亿 m^3 , 满足 180 亿 m^3 低限生态需水要求,维持了黄河的健康生命并实现了流域水资源 3 个子系统之间的更好协调。

5 结 语

通过引进系统熵来对水资源系统内部子系统之间的协调程度进行评定,并由系统熵引导水资源在各个子系统间配置以实现子系统之间的协调,达到流域可持续发展的最终目标,解决了水资源动态规划中的维数灾问题,为水资源的优化配置提供了一种崭新的思维模式。

参考文献:

[1] 畅建霞,黄强,王义民. 基于耗散结构理论和灰色关联的

水资源系统演化方向判别模型研究[J]. 水利学报, 2002 (12): 107—112.

[2] Plate E J. Sustainable development of water resource: a challenge to science and engineer[J]. Water International, 1993, 18 (2): 84—93.
[3] Single V P. The use of entropy in hydrology and water resource [J]. Hydrology Processes, 1997(2): 587—626.
[4] 畅建霞,黄强,王义民. 南水北调中线工程水量仿真调度模型研究[J]. 水利学报, 2002(12): 41—47.

(收稿日期 2004-04-07 编辑 熊水斌)

