

中小型水利工程供水概化算法研究与应用

游进军^{1,2}, 宋秋波³, 王丽萍⁴, 张建中³

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044; 3. 水利部海河水利委员会, 天津 300170; 4. 河北省水文水资源勘测局, 河北 石家庄 050031)

摘要:以水资源规划工作需求为导向,参照已有中小型水利工程供水的计算方法,提出以概化引提水和河网调蓄工程调度计算为中心的区域面上分布的地表水资源利用算法,并以区域水量需求、天然来水和工程条件等 3 个方面主要因素作为确定中小型水利工程水量供给的主要计算参数。用该方法对实例地区的中小型水利工程可供水量进行了计算,并通过历史资料系列对计算成果进行了检验,验证了该方法的可行性。

关键词:系统概化; 水利工程; 水库调度; 供需平衡

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-764X(2008)S1-0019-04

随着经济社会的高速发展,水资源系统涉及越来越多的因素。人类活动对水循环过程的影响正在逐步增加水资源系统的复杂性,对水资源的开发利用在很大程度上改变着天然的水文循环过程和下垫面。从工程的角度来说一般有 2 种水资源利用方式。一种是通过大型水库工程对水资源的利用,另一种是通过小型水利工程对水资源的利用。前者供水效益和对环境的影响相对较大,但这类工程数量并不多;后者从单个工程效应来讲,影响相对较小,但数量众多分布较普遍。尤其是许多山区和河流上游地区,中小型水利设施是水资源利用的主要方式。

传统的水资源系统模拟中水量调控计算一般都以大型工程为主,对中小型水利工程的运行模拟还缺少相应的分析方法。因而,对区域面上分布的中小型水利工程在区域水量供需平衡中作用的定量计算是当前水资源规划工作的一大技术难点。通常对中小型水利工程的计算都采用捆绑处理和计算,该类方法的缺陷在于难以把握中小型水利工程水量调蓄利用的物理过程以及难以利用有限的资料核定相关计算参数。而中小型水利工程常常在流域水资源开发利用中起着非常重要的作用,尤其是某些区域由于受到地理条件限制缺少大型水利工程。所以,以大型控制性工程调度为主的模型不能较好地适用于以引提水工程和中小型水库为主导的水资源利用计算。

目前,对于单个的中小型水利工程运用和控制

计算存在一些经验性操作方法^[1-2],对于大型水库和中小型水利工程的联合调度供水也有一定研究成果^[3]。但对于多个工程供水的整体调控作用分析尚未见完整规范的计算方法。在现有的规划计算中多以经验估计为主,对中小型水利工程进行经验性的处理,这种处理方式通常很难清楚地描绘这些中小型水利工程的供水量和运行状况,与实际存在很大误差,直接影响到规划的准确性和可靠性。尤其是对于南方地区,灌溉区域比较分散,引水、提水工程多,蓄水工程以中、小型为主,只有分析清楚这些众多分散性工程在供水中的总体效应,才有可能明确区域的供需平衡计算方式。全国水资源综合规划明确指出“对小型工程打捆配置的问题,目前还没有有效的解决方法^[4]”。因此,亟待一种有效的和实用的方法来解决中小型水利工程在区域供水中的整体作用。

所以,现有方法在中小型水利工程的模拟方式上主要存在 2 个问题,一方面需要对中小型水利工程供水系统的概化处理 and 数学描述方法进行规范;另一方面需要确定符合实际过程和需求的模拟计算方法,本文针对上述问题进行了相关研究。

1 计算方法

1.1 系统框架

传统意义上,对中小型水库进行打捆式合并处理是系统水资源模拟计算中最常用的方法,其主要

基金项目:国家中长期基础研究计划(2006CB403408);“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB04A15);国家自然科学基金青年基金(50609010)

优点是能够通过参数实现区域分散性水利工程的供水过程计算,但缺乏对工程分布和控制能力等属性的考虑。考虑到水资源规划中遇到的上述困难和需求,在总结已有成果的基础上,本文通过对中小型水利工程的概化框架分析提出了对应模拟算法。该方法分析并考虑了配置相关参数的3个主要因素,包含对来水、需水和工程调控能力的考虑,从而得到中小型水利工程的实际供水量。

为了有效地整合这些对供水有影响的因素,本文提出了一个框架。在此框架下,实际模拟中依据调蓄能力差异将不同的中小型水利工程概化为2种不同的节点。一类是不具备蓄水和调蓄能力的引提水工程;另一种是具有一定蓄水调控能力的小水库或者河网水系。为了表述方便,下文中第一种节点供水称为引提水,第二种节点供水称为河网水。将某一个需要进行模拟的流域或行政区域根据实际需要进一步划分为单元。文献[5]给出了一个系统水量运动的概化框架和相应的水力网络关系,清晰地表达了这些单元在不同用水户之间各种水源的转移路线和相互关系,包括不同中小型水利工程以及整个水资源系统最终的出口。图1给出了地表径流在不同单元和水库等节点之间可能的运动路线。

----- 处理后污水渠道 —— 未处理污水渠道

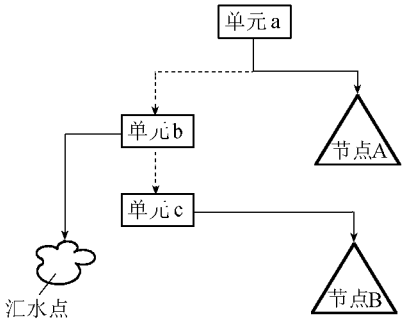


图1 本地径流利用构成的水量交换网络关系

从图1中可以看出,大型水利工程和中小型水利工程之间具有紧密的水力联系。根据所定义的网络关系,当地剩余水量可以进入当地集水区域或传递到下游节点,用水户产生的废污水也可以通过河网进入当地集水区。概化后,提水工程可以看作是某一个区域中实际引水或提水工程的集合,河网可以看作是由很多个小水库或河网汇集而成的一个实际的水库。图2给出了提水工程和当地河网中水源的运动过程。

根据系统的设计规则,只有当地的河网才能概化成一个单元。当地河网可以接收到未经使用的当地地表水、城市地区的废污水、灌溉回归水、上游单元或节点的弃水,河网供水量则通过控制参数计算。

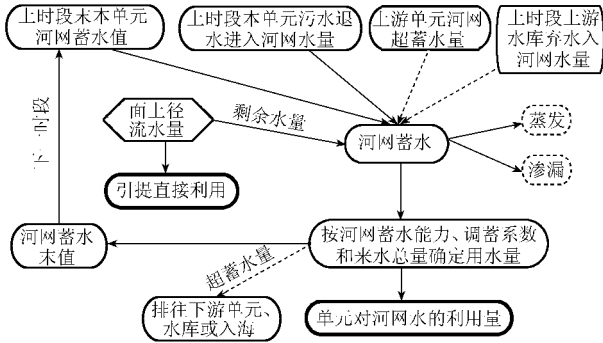


图2 概化后当地径流及河网水的运动转化过程
供水量根据不同的比例和优先级分配到不同的用户,不能将超蓄的水量传递至其他单元的当地河网、节点或者是出口等。

1.2 引提水工程供水法

提水工程对用户的供水量由工程本身的容量、来水量和接受供水的计算单元需水3个指标综合决定。因此,引提供水量可由下式计算:

$$T = \min(W, ksV) \quad (1)$$

式中: T 为不考虑用水需求的当地供水量; W 为提水工程的最大供水量; k 为引提水系数; s 为经过一个比例参数,也就是经过提水工程的水量和区域总来水量的比值; V 为当地地表水的总量或某一个时间段内的总径流量。

得到由来水和引提水工程调控能力决定的可供水量之后,与所在单元的需水进行比较,以两者中的小值作为实际可以供出的水量:

$$T' = \min(W_d, T) \quad (2)$$

式中: W_d 为单元可接受引提工程供水部分的需水; T' 为实际供水量。

按照图1所示的系统设计,当地地表径流在经过引提水利用后汇集到所在单元的概化河网,即进入河网的地表径流可以按照如下公式计算:

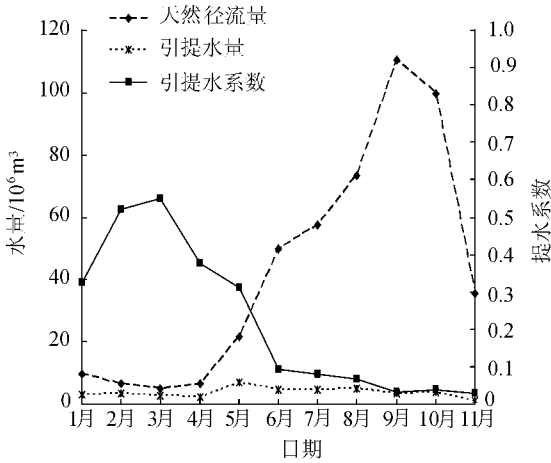
$$R_s = V - T' \quad (3)$$

式中 R_s 为进入当地河网的剩余地表水量。

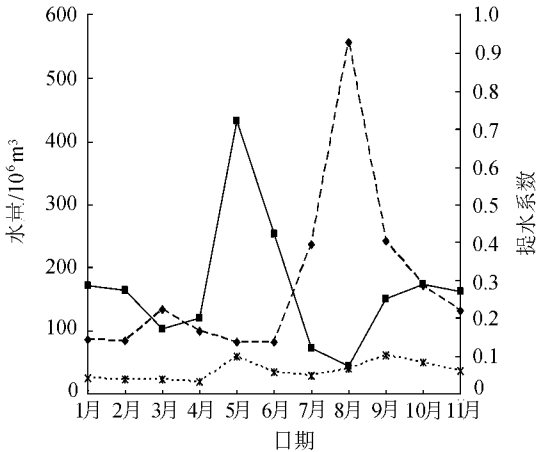
很显然,从式(1)可以看出,只有 k 和 s 是2个可以用来调整当地提水工程供水量的参数。通常, s 可以根据工程的分布信息和经验化的估计得到。系数 k 通常随来水和用水过程变化而不同。因此,正常的计算中把 k 也当作一个常数来看待,这也是使用这种捆绑式计算方法进行模拟精度不高的根本原因。

为使当地提水工程的模拟更加接近实际情况,本文给出了2种根据已知信息进行 k 值计算的方法。一种方法是内插法,也就是在天然径流量和引提水系数之间建立函数曲线,其缺点是在建立这种函数曲线关系的时候总是受到缺少数据的限制,对

于缺少资料的地区可以采用经验估值法。图 3 给出了我国南方和北方地区的中小型水利工程在多年平均天然径流量和提水量以及引提水系数之间的典型关系。图 3(a) 为海南省南渡江流域, 图 3(b) 为河北省子牙河流域。这 2 个流域中都有一定数量的水利设施, 因此可以采用具有代表性的流域特征来分析当地用水的情况。



(a) 南方湿润地区



(b) 北方半干旱地区

图 3 不同区域天然径流量、引提水量和引提水系数的年过程关系

图 3 显示了来水和用水之间的总体关系, 比如在干旱季节提水量占总径流的比例参数较高, 需水高值也会影响提水量, 比如农业用水的高峰期引提水量较大等。总体而言, 影响当地引提水量的决定性因素是天然径流量、需水量和水利工程的供水能力。对缺水地区, 枯水季节来水量和用水需求为主要限制因素, 丰水季节则以工程能力为主要限制条件。对于丰水地区, 需求大时供水量主要受工程能力控制, 工程能力足够时用水需求主要是限制因素, 来水的限制作用相对较小。已有研究表明引提水量与来水不是简单的正比关系, 它和工程调控能力密切相关^[2]。

经过分析可知, 引提水利用系数与来水总体上

呈反比关系。即来水越大时, 引提水系数越小, 反之亦苦。

基于来水和引提水系数的总体关系, 可以给出另一种确定参数 k 的方法, 即通过指数函数来进行计算。这种方法非常适用于那些由于资料短缺而无法得到相关曲线的区域, 给定工程供水能力条件下天然径流量和引提水量之间的关系, 实现较大的天然径流量对应较小的引提水系数。计算公式如下:

$$k = \sigma \left(\frac{V_s}{sW} \right)^t \quad (4)$$

式中: σ 为引提水参数的基准值, 可以引用已有资料地区的引提水系数均值; V_s 表示与 σ 值对应的径流量; t 为控制参数, 可以用于调整 k 值随来水的变化趋势。

1.3 河网调控算法

河网是具有存储能力的当地水利工程和河道蓄水能力的总称。根据模拟框架, 河网能够接受来自上游水库或者是河网的排水以及当地用水户产生的废污水。

根据以上分析, 河网的水量平衡方程为

$$V_{\text{end}} = V_{\text{beg}} + O + P + \sum_{i=0}^j Q_i + \sum_{i=0}^n R_i - \sum_{i=0}^l S_i - \sum_{i=0}^m D_i - E - U - W_s \quad (5)$$

式中: V_{end} 和 V_{beg} 为在某一个计算时段结束和开始时的河网蓄水量; O 为进入河网的天然径流量; P 为本单元内用水户产生的废污水和农业灌溉的回归水; Q 为上游节点弃入河网的水量; j 为上游节点的数量; R 为上游单元河网的排入水量; n 为上游单元河网的数量; S 为河网排入下游单元河网的水量; l 为下游可接受河网排水的单元河网数量; D 为排入下游节点的水量; m 为下游可以接受河网弃水的节点数量; E 和 U 分别为河网的蒸发和渗漏损失; W_s 是当地用水户的用水量。式(5)与图 2 中所列的关系相对应。

由于河网的排出水量可以由河网调蓄能力确定, 因此与引提水工程的计算类似, 计算的重点是确定河网的供水量, 也就是整个水量平衡方程中河网的供水量。

通过对河网供水影响因素的分析, 在某一个时间步长内的主要决定因素为河网的调蓄容量和蓄水量。因此, 河网的可供水量为

$$W_{\text{np}} = \min(V_t, \eta W_c) \quad (6)$$

其中 W_{np} 为河网的潜在最大供水量; V_t 为当前时段内加上入流在内的总蓄水量; η 为河网调蓄系数; W_c 为河网调蓄能力。通过比较 W_{np} 和单元可接受河网

供水的需水量 取两者的最小值即为河网供水量。

通常 W_c 可以由本单元内所有的小型水利工程的调蓄容量计算得到 ; η 可以采用类似引提水系数的计算方法得到 ,应满足来水越大调蓄供出水量比例越小的关系。在计算出河网供水量后 ,河网排水量可以通过式 (5) 计算得到。

2 应用实例

为了率定和验证上面给出的方法 ,笔者选择具有较好数据条件的河北省滹沱河流域作为实例进行了计算。滹沱河位于海河流域的中南部 ,发源于山西省的五台山 ,向东流入河北省 ,最终与滏阳河交汇 ,流经整个华北平原后进入渤海。中小型水利工程对该区域的供水非常重要 ,尤其是在山区。根据概化原则 ,图 4 给出了该地区相关行政区域的水资源网络关系。

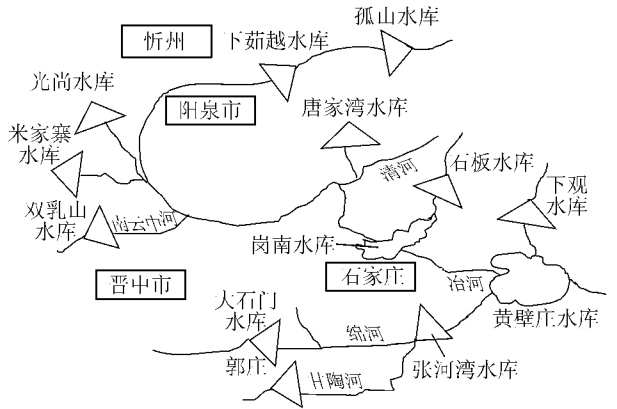


图 4 滹沱河流域黄壁庄水库以上部分水资源系统网络

本文采用上述提到的方法模拟了该区域 2000 年的供水情况。岗南和黄壁庄 2 个大型水库进行独立调节计算 ,其他中小型水利工程采用文中提出的算法进行模拟。表 1 为当地全年地表水供水的模拟结果与历史数据的比较 ,表 2 给出了模型模拟数据和实际统计数据的误差。从表 1 和表 2 可知全年结果的模拟误差基本在较合理的范围内 ,但是逐月的结果显示出较大的误差。

3 结 语

对区域散布的中小型水利工程可供水量的计算具有多种估算方法 ,笔者在以往研究的基础上对这类计算的定量化处理作了进一步研究。本文提出的概化结构和方法可以整合相关数据并转化为单元的数学特征 ,进而采用公式进行不同类别中小型水利工程实际供水过程的模拟计算。案例分析证实了该方法的可行性。

表 1 全年计算结果和统计数据的比较 万 m³

区域	模拟量			统计量		
	引提水量	蓄水量	大型水库供水量	引提水量	蓄水量	大型水库供水量
石家庄	4 390	6 360	12 840	4 460	6 650	18 340
阳泉	1 470	10 490	0	1 900	10 570	0
晋中	420	700	0	250	560	0
忻州	9 800	28 460	0	7 620	21 150	0
合计	16 080	46 010	12 840	14 230	38 930	18 340

表 2 模拟结果和统计结果的误差 %

区域	模拟误差		
	引提水	蓄水	大型水库供水量
石家庄	2	4	30
阳泉	23	1	
晋中	70	26	
忻州	29	35	

当然 ,该方法仍然存在一些缺陷 ,还需要进一步的改进和细化。由于水资源系统的复杂性 ,有必要对此方法继续进行研究。对此方法的改进主要有 2 个方面。一是改进概化结构使其与中小型水利工程的实际运行情况更加相似 ;二是对该方法中影响供水量计算中引提水参数的因素进行更进一步的分析 ,这也是此方法合理性的一个关键因素。

参考文献 :

[1] 石义 郭贵贤 张柏良. 浅析中小型水库工程控制运用计划 [J]. 吉林水利 , 2002 (4) : 30-31.

[2] 陈筱云 , 黄火键. 中小型水库坡面截流引水的几个水文水资源问题 [J]. 水利水电技术 , 2002 , 33 (3) : 53-55.

[3] 刘宏兴 , 武德华 , 纪秀云. 于桥水库与流域内中小型水库联合调度方案的探讨 [J]. 水利水电技术 , 2001 , 32 (8) : 50-52.

[4] 水利部水利水电规划设计总院. 水利规划与战略研究简报 [R]. 北京 : 水利部水利水电规划设计总院 , 2005.

[5] 游进军 , 甘泓 , 王浩 , 等. 基于规则的水资源系统模拟 [J]. 水利学报 , 2005 , 36 (9) : 1043-1049 , 1056.

(收稿日期 : 2007-06-11 编辑 : 方宇彤)

