

塘坝与泵站联合运用优化设计

王雷¹,张涛²,张启振²,邵英超²

1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098

2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013

摘要: 本文在适宜建设塘坝和泵站的地区, 提出一种新的灌溉水源利用模式。在作物需水灌溉时段内由塘坝与泵站联合供水灌溉, 在非灌溉时段内由泵站补充塘坝蓄水。给出塘坝与泵站联合运用模型的边界参数、联合运行算法以及适应条件; 根据评价模型确定最优的泵站规模以及塘坝调蓄等主要参数。实例表明, 在既定条件下, 通过塘坝与泵站多水源联合运用优化设计, 在保证作物灌溉需水要求的前提下, 可以有效减小工程投资, 从而获得较大效益。

关键词: 塘坝与泵站; 联合运用; 优化设计

中图分类号: S273

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2015)03-0391-04

The Optimal Design for Combined Utilization of Small Reservoir and Pumping Station

WANG Lei¹, ZHANG Tao², ZHANG Qi-zhen², SHAO Ying-chao²

1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering of HoHai University, Nanjing 210098, China

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China

Abstract: A new irrigation water-use model was proposed in the appropriate area with construction conditions of small reservoir and pumping station. Pumping station supplied water to a small reservoir in non-irrigation period and small reservoir and pumping station jointly provided irrigation water in crop irrigation period. Given the boundary parameters of combined utilization model, combined operation algorithm and adaptation conditions, the main regulating parameters of the optimal scale of pumping station and small reservoir were determined according to the evaluation criteria. The case showed that under the premise of ensuring crop irrigation water requirement, through optimization design of multi-water combined utilization with specific conditions could effectively reduce engineering investment, and get big benefit.

Keywords: Small reservoir and pumping station; combined utilization; optimal design

水源工程是农田水利建设的重点内容, 目前在山丘区及丘陵区, 普遍存在缺少灌溉水源的问题。因此, 在适合建设中小型塘坝和泵站的地区, 如何在保证作物灌溉需水的前提下, 有效减小工程投资从而获得灌溉效益最大化是目前急需解决的现实课题。目前大型灌区水源利用优化设计相关研究较多, 包括多水源利用、方案优化评价等都取得了一定的研究成果^[1-5]。而在中小型农田水利水源利用优化设计方面研究尚较少。本文在既定条件下, 提出一种新的灌溉水源利用模式, 即在保证作物灌溉需水要求的前提下, 进行塘坝与泵站联合运用优化设计, 有效减小工程投资, 从而获得较大效益。

1 塘坝与泵站联合运用模型设计

塘坝与泵站联合运用的设计思路为: 作物灌溉时段内由塘坝和泵站联合供水灌溉, 非灌溉时段内由泵站补充塘坝蓄水。通过泵站补充塘坝蓄水或直供田间灌溉, 可以有效弥补塘坝自身集蓄水量不能满足灌溉用水需求的不足, 从而减小塘坝规模; 在非灌溉时间内通过塘坝调蓄泵站提水水量, 可以减小泵站在作物灌溉时段内的直供田间灌溉供水量, 从而减小管道及泵站规模。

1.1 边界参数

1.1.1 作物需水量 塘坝与泵站的供水水量根据作物灌溉需水量确定。作物在其不同生长期阶段的需水量不同, 不同作物对水分的需求量亦不同。根据作物生长需水高峰期的蒸腾能力、土壤含水量、土壤湿润程度等因素^[6], 计算设计灌水定额:

$$w_{\text{净}} = 667Z\gamma\beta(\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}) \quad (1)$$

式中: $w_{\text{净}}$ 为设计灌水净定额 ($\text{m}^3/\text{亩}$); Z 为土壤湿润层深度 (m); γ 为土壤容重 (g/cm^3); β 为

收稿日期: 2014-11-10

修回日期: 2015-01-12

基金项目: 山东省科技发展计划基金资助项目(2011GGH21606)

作者简介: 王雷(1990-),男,山东济南人,硕士研究生,从事水利水电相关研究设计工作. E-mail:wangleillu@163.com

数字优先出版: 2015-04-05 <http://www.cnki.net>

田间持水率; θ_{\max} 、 θ_{\min} 为适宜土壤含水率上、下限 (占干土重的百分比)。

作物供给水量来源包括自然降雨和人工灌水, 人工灌水需根据地区的气候条件和作物生长需水规律确定。在半湿润半干旱地区, 一般年份一季作物人工灌水次数 n 为 2~4 次。为便于调算, 并考虑到灌水方式影响, 作物生长期各时段的灌水量视为相同值, 均按设计灌水定额控制, 则作物一次灌溉需水量 $W_{需}$ 为:

$$W_{需} = Aw_{毛}, w_{毛} = w_{净} / \eta \quad (2)$$

式中: A 为灌溉面积 (亩); $w_{毛}$ 为设计灌水毛定额 ($m^3/亩$); η 为灌溉水利用系数, 根据输水损失及田间灌水损失确定, 受漫灌、管灌、滴管等灌溉方式影响。

1.1.2 运用周期 塘坝与泵站联合运用的一个运用周期为上次灌溉结束到本次灌溉结束, 包含本次运用中的泵站停歇时间, 运用次数即为灌水次数。假定每次运用时的泵站补充塘坝蓄水、直供田间灌溉的运行天数均相同, 则有如下近似公式:

$$T = n(T_{灌} + T_{停}) + (n-1)T_{补} + T_{它} \quad (3)$$

式中: T 为作物生长周期 (d); n 为运用次数; $T_{停}$ 为泵站检修、停歇等停机时间 (d); $T_{补}$ 、 $T_{灌}$ 分别为一个运行周期内泵站补充塘坝蓄水、直供田间灌溉的运行天数 (d), 下同; $T_{它}$ 主要包括作物收获前的最后灌溉时间间隔, 以及其它不确定性时间。

1.1.3 塘坝库容及蓄水量 根据塘坝流域面积降雨、产流等水文气象条件, 坝址地质条件以及施工技术要素^[6,7], 确定可以开发利用的有效库容上限 V_{\max} , 以及死库容 $V_{死}$ 。初次运用前, 塘坝由降水集蓄或由泵站补充蓄满; 末次运用灌水结束时, 塘坝基本腾空库容至死库容, 以充分利用塘坝调蓄水量。

1.1.4 泵站供水能力 根据河道水源情况确定泵站供水能力上限 Q_{\max} , 灌溉供水保证率一般取 50%~75%。泵站规模以泵站供水流量控制; 管道规模以泵站供水流量等因素确定^[6], 管径与流量成正相关。

1.1.5 其它假定 作物由塘坝及泵站联合供水, 不考虑调算时段内的降雨补给影响, 主要针对旱季进行调节计算。

1.2 联合运行调算

根据作物灌水要求, 自初次运用至末次运用结束进行塘坝与泵站联合运行调算。当塘坝有效库容 $V_{库}$ 给定后, 确定联合运行的使用塘坝水量 $W_{用}$ 、补充塘坝水量 $W_{补}$ 等塘坝调节参数, 以及泵站规模 $Q_{泵}$ 等共 3 个主要参数, 调算如下:

1.2.1 第 1 次 ($j=1$) 运用 灌溉初期时塘坝满蓄, 蓄水量即为有效库容 $V_{库}$ 。拟订第 1 次灌溉使用塘坝水量为 $W_{用,i,1}$, 作物其它灌溉水量由泵站供给, 则泵站在灌溉时段的直供田间灌溉规模为:

$$Q_{灌,i,j} = a(W_{需} - W_{用,i,j}) / (T_{灌}t_{灌}), j=1 \quad (4)$$

式中: a 为流量加大系数, 主要考虑泵站停歇期间以及其它时段的不确定性水量损失, 下同; $t_{灌}$ 、 $t_{补}$ 分别为各运行周期内泵站直供田间灌溉、补充塘坝蓄水的每天运行时长 (h), 一般取 16~24 h, 下同。

$$\text{灌溉结束时塘坝水量为: } V_{塘,i,j} = V_{库} - W_{用,i,j} - \Delta W_j, j=1 \quad (5)$$

$$\text{其中, 渗漏及蒸发损失根据如下公式估算: } \Delta W = S(V)T + F(V)ET \quad (6)$$

式中: $S(V)$ 为单位时间内的平均渗漏损失量, 根据塘坝库区地质勘测资料及库容确定; $F(V)$ 为塘坝水面面积; E —单位面积的平均时段水面蒸发量; T —时长。各参数单位根据计算情况进行相应量纲转化。

1.2.2 第 j 次 ($j>1$) 运用 泵站在非灌溉时段内为塘坝补充蓄水, 拟订补充塘坝水量为 $W_{补,i,j}$, 则泵站在非灌溉时段的补充塘坝蓄水规模为: $Q_{补,i,j} = aW_{补,i,j} / (T_{补}t_{补})$ (7)

拟订此次灌溉使用塘坝水量为 $W_{用,i,j}$, 作物其它灌溉水量由泵站供给, 则泵站在灌溉时段的直供田间灌溉规模为: $Q_{灌,i,j} = a(W_{需} - W_{用,i,j}) / (T_{灌}t_{灌})$ (8)

$$\text{灌溉结束时塘坝水量为: } V_{塘,i,j} = V_{塘,i,j-1} + W_{补,i,j} - W_{用,i,j} - \Delta W_j \quad (9)$$

1.2.3 库容及流量限制条件 $V_{死} \leq V_{塘,i,j} \leq V_{库} \leq V_{\max}$, $0 \leq W_{补,i,j} \leq V_{库}$, $0 \leq W_{用,i,j} \leq V_{库}$; $0 \leq Q_{补,i,j} \leq Q_{\max}$, $0 \leq Q_{灌,i,j} \leq Q_{\max}$ 。

为充分利用塘坝蓄水作用, 末次灌溉结束时的塘坝水量为死库容, 则有:

$$\sum_{j=2}^J W_{\text{补},i,j} + V_{\text{库}} - \sum_{j=1}^J W_{\text{用},i,j} - \sum_{j=1}^J \Delta W_j - V_{\text{死}} = 0 \quad (10)$$

为简化计算,各个运用周期内假定泵站补充塘坝水量 $W_{\text{补},i,j}$ 均相等,即为 $W_{\text{补},i}$,则泵站补充塘坝蓄水规模 $Q_{\text{补},i,j}$ 亦相等,即为 $Q_{\text{补},i}$;假定使用塘坝水量 $W_{\text{用},i,j}$ 均相等,即为 $W_{\text{用},i}$,则泵站直供田间灌溉规模 $Q_{\text{用},i,j}$ 亦相等,即为 $Q_{\text{用},i}$ 。公式(10)简化为:

$$W_{\text{补},i} = \frac{JW_{\text{用},i} - V'}{J-1}, \quad V' = V_{\text{库}} - \sum_{j=1}^J \Delta W_j - V_{\text{死}} \quad (11)$$

1.3 方案拟定

当给定塘坝有效库容 $V_{\text{库}}$,泵站规模最小为最优。同时满足泵站补充塘坝蓄水和直供田间灌溉的泵站规模为:

$$Q_{\text{泵}} = \min(Q_{\text{泵},i}), \quad Q_{\text{泵},i} = \max(Q_{\text{补},i}, Q_{\text{用},i}) \quad (12)$$

由公式(4)、(7)、(11)、(12)联立可求出最优的补充塘坝水量 $W_{\text{补}}$ 、塘坝使用水量 $W_{\text{用}}$,以及泵站规模 $Q_{\text{泵}}$ 等3个变量,此方案为塘坝库容既定条件下的最优方案。为便于对各方案进行比较,选取效益及投资等主要因素进行方案评价^[2,5]。分别以效益投入比 F_1 、效益投入产出 F_2 两种评价方法进行评估,公式为:

$$F_{i,1} = B_i / P_i \quad (13)$$

$$F_{i,2} = B_i - P_i \quad (14)$$

式中: $F_{i,1}$ 为 i 方案的效益投入比; $F_{i,2}$ 为 i 方案的效益投入产出; B_i 为 i 方案运行期内考虑效益分摊系数的总效益,主要计算作物灌溉效益; P_i 为 i 方案运行期内的总投入,主要包括塘坝工、泵站及机电设备、输水管道等主体工程投资,以及运行维护费等。

1.4 适应条件

塘坝与泵站多水源联合运用模式适应于丘陵区、山区,区域内及附近具有建设塘坝、河道提水泵站的条件,规模以小型及中型为宜。塘坝宜建在小型河沟上,有效利用低洼区或河谷处的天然储水空间,以减少工程投资;泵站宜建在水源有保证的河道上,在塘坝自身集蓄水量不能满足作物灌溉需水要求时,由泵站提水通过输水管道补充塘坝蓄水;泵站输水管道沿线土层地质结构宜以壤土、砂壤土为主,以便于开槽铺设。

2 实例计算

项目区为临沂市浚河支流朱田河下游地带,属低丘陵地区。区内上层土层以沙壤土为主,局部区域裸露岩石。该区雨季时降雨较为充沛,而旱季干旱少雨,需进行人工灌溉。朱田河桩号4+600处具有建设塘坝的条件,该塘坝距离干流浚河取水处的直线距离约3.5 km,干流水量相对较丰,在旱季能保障项目区的灌溉供水需求。

2.1 主要参数

作物以花生为主,面积 $1.33 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。生育期140 d左右。经计算,灌水定额 $w_{\text{净}}$ 为 $0.054 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 、 $w_{\text{毛}}$ 为 $0.083 \text{ m}^3/\text{m}^2$,每次灌水需水量为 $1.10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。在旱季生长期灌水4次,每次灌水周期15 d,采用漫灌。泵站输水管道长度3.5 km,其中泵站直供田间灌溉时间 $T_{\text{灌}}$ 取15 d、泵站补充塘坝蓄水时间 $T_{\text{补}}$ 取18 d、停歇时间 $T_{\text{停}}$ 取2 d,相应泵站的每天运行时间 $t_{\text{灌}}$ 、 $t_{\text{补}}$ 分别取18 h、20 h;流量加大系数取1.05;塘坝有效库容 $V_{\text{库}}$ 已确定为 $7.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、死库容为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,运用期间总蒸发及渗漏损失约 $1.13 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

本次对旱季作物灌溉进行塘坝与泵站联合调算,根据前述公式求解既定条件下的最优泵站规模及塘坝调节参数,主要计算指标见表1。

2.2 评价指标

根据当地的灌溉试验以及工程造价估算主要评价指标,计算结果见表1。 B 为灌溉增产效益,每亩增产按190元计算,效益分摊系数取0.6。 P 为工程总投入,其中塘坝程投资按单方库容4.5元计

算;泵站建筑及机电设备投资按 2000 元/kw 计算;管材内径 650~1100 m 按 1000~1750 元/m 计算;泵站年运行费根据每年耗电量取费计算;经济运行年取 25 年。

表 1 联合运用主要计算指标

Table 1 Calculation of key indicators about the combined utilization

方案 Plan	调算指标 Calculation indicators					评价指标 Evaluation indicators			
	$W_{用}/万 m^3$	$W_{补}/万 m^3$	$Q_{补}/m^3 \cdot h^{-1}$	$Q_{灌}/m^3 \cdot h^{-1}$	$Q_{泵}/m^3 \cdot h^{-1}$	B/万元	P/万元	F_1	$F_2/万元$
1	66.5	70.0	1934	1705	1934	5700	2884	1.98	2816
2	63.5	66.0	1823	1823	1823	5700	2844	2.00	2856
3	55.0	54.7	1511	2152	2152	5700	2973	1.92	2727
4	45.0	41.3	1142	2541	2541	5700	3129	1.82	2571
5	35.0	28.0	774	2930	2930	5700	3280	1.74	2420
6	25.0	14.7	405	3319	3319	5700	3454	1.65	2246
7	14.0	0.0	0	3747	3747	5700	3641	1.57	2059
8	5.2	0.0	0	4089	4089	5700	3770	1.51	1930
9	0.0	0.0	0	4291	4291	5700	3849	1.48	1851

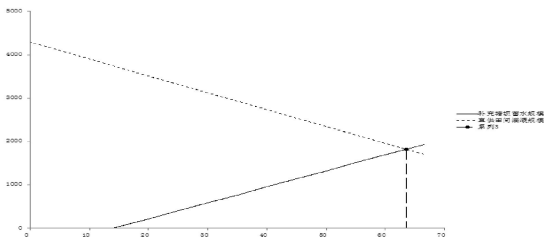


图 1 $V_{库}=7.0 \times 10^5 m^3$ 下的泵站规模对照
Fig.1 Comparison of pumping station scale under capacity of $7.0 \times 10^5 m^3$

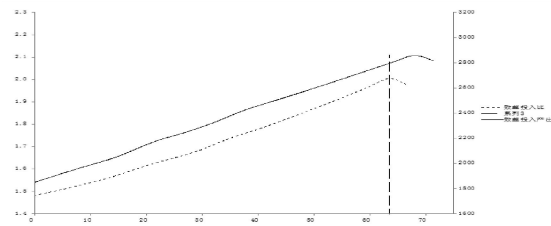


图 2 $V_{库}=7.0 \times 10^5 m^3$ 下的方案效益投入对照
Fig.2 Comparison between benefit and investment under capacity of $7.0 \times 10^5 m^3$

2.3 方案分析

给定塘坝库容 $V_{库}=7.0 \times 10^5 m^3$, 使用塘坝水量与相应的泵站补充塘坝蓄水规模、直供田间灌溉规模对照见图 1。随着使用塘坝水量的增大, 泵站直供田间灌溉规模呈减小趋势; 当使用塘坝水量 $W_{用} \leq 1.4 \times 10^5 m^3$ 时, 相应补充塘坝蓄水规模均为 0, 即各次的使用塘坝水量为塘坝自身的集蓄水量, 不需要泵站补充蓄水, 但此时的泵站直供田间灌溉规模较大。

表 2 方案 2 联合运用水量调算过程

Table 2 Water regulation process of combined utilization about 2 nd plan

运用情况 Utilization	序号 NO.	时间/d Time	时长/d Length	水量/万 m^3 The amount of water						
				$V_{塘}$	$W_{补}$	$W_{用}$	$W_{灌}$	ΔW	$W_{需}$	
第 1 次运用	初期	1	0	70.0	/	/	/	/	/	
	灌溉	2	15	5.1	0	63.5	46.9	1.4	110.4	
	停歇	3	17	2	4.9	0	0	0	0.2	0.0
第 2 次运用	蓄水	4	35	18	69.2	66.0	0	0	1.7	0.0
	灌溉	5	50	15	4.3	0	63.5	46.9	1.4	110.4
	停歇	6	52	2	4.1	0	0	0	0.2	0.0
第 3 次运用	蓄水	7	70	18	68.4	66.0	0	0	1.7	0.0
	灌溉	8	85	15	3.5	0	63.5	46.9	1.4	110.4
	停歇	9	87	2	3.3	0	0	0	0.2	0.0
第 4 次运用	蓄水	10	105	18	67.6	66.0	0	0	1.7	0.0
	灌溉	11	120	15	2.7	0	63.5	46.9	1.4	110.4
	结束	12	122	2	2.5	/	/	/	0.2	/

当完全由泵站供水时, 使用塘坝库容为 0, 即方案 9, 此方案的泵站及管道规模为最大、泵站运行费较高, 工程投资最大; 此方案的评价指标均为最劣。

满足补充塘坝蓄水规模与直供田间灌溉规模的泵站最小规模为 $1823 m^3/h$, 即为方案 2, 使用塘坝水量 $W_{用}=6.35 \times 10^5 m^3$ 、补充塘坝水量 $W_{补}=6.6 \times 10^5 m^3$ 。此方案的效益投入比 F_1 为 2.0、效益投入产出 F_2 为 2.86×10^7 元, 各项效益指标均为最优, 为既定塘坝库容下的最优方案。另外, 对塘坝库容作为变量计算 $0 \sim 4.0 \times 10^6 m^3$ 相应库容下的最优方案, 进行全局方案比较, 此方案 2 亦为全局最优。

该方案的联合运用主要时段水量调算见表 2, 其中水量依次为塘坝蓄水量 $V_{塘}$ 、泵站补充塘坝水量 $W_{补}$ 、使用塘坝水量 $W_{用}$ 、泵站直供田间灌溉水量 $W_{灌}$ 、损失水量 ΔW 、作物需灌溉水量 $W_{需}$ 。水量平衡方程主要有: 塘坝水量 $V_{塘j} = V_{塘j-1} + W_{补j} - W_{用j} - \Delta W_j$, 作物灌溉需水量 $W_{需j} = W_{用j} + W_{灌j}$, j 为当前时段序号 ($j \geq 2$)。调算结束时塘坝库容为死库容, 充分发挥塘坝的水量调蓄作用。 (下转第 398 页)