

年調節灌溉水庫調度图的繪制方法

叶永毅 賀偉程 王繼存

(水利水电科学研究院水文研究所)

提 要

为保証以灌溉为主的大中型水庫的防洪安全,充分發揮其灌溉效益,必須根据水庫的实际防洪能力、实际灌溉面积,結合水文气象特点,制定水庫在一年各时期中的防洪、灌溉調度規程,并以水庫調度图的形式表示。

一、現有灌溉計算及調度方法存在的問題

現行的水庫灌溉計算及調度方法,不能真實地反映湿潤或半湿潤地区灌溉用水的变动情况以及与来水的組合关系。例如:

1. 現行的設計来水过程的計算,多是选取年水量頻率接近于所指定的灌溉保証率的一个或几个典型年,作为模型进行各月水量的分配。由于各年径流的年內分配与其年水量并无密切关系,年水量相近的年份其年內分配可以差別較大。以个别年份的特殊分配作为設計依据,有很大的偶然性;不能保証按此設計的灌溉系統,在用水量最迫切的时期內,按所指定的保証率得到正常供水。

2. 在湿潤或半湿潤地区,各年灌溉用水量变动很大,但現行的灌溉計算方法,多采用各年相同的灌溉定額,这只适合于我国西部天然降水对作物影响不大的干旱地区,而不适合于雨量較多的东部湿潤或半湿潤地区。

3. 根据按固定用水过程在几个典型年中进行調節的結果,繪制内外包綫以确定灌溉調度图的方法,其正常供水区变幅較大。在这个范围內若均按正常供水,則其保証率不会一样:接近上限的保証率高,接近下限的保証率低。这是不够严密的。并且随着資料年数的增多,不利的年內分配情况亦将加多出現,上下限范围也将扩大。

二、建議用时历法繪制灌溉調度綫

由于在湿潤及半湿潤地区,各年灌溉用水过程变动很大,来水和用水之間也不一定存在相关关系,因此用一般統計法,不能很好反映复杂的真实情况,建議采用时历法进行灌溉計算及調度,方法的要点如下:

(一) **各年灌溉用水过程計算** 在灌溉面积、作物組成及計劃产量均为已知的情況下,各年的灌溉用水过程主要随該年各时期降雨量及其分配而变。在降雨量較多,且变动又較大的地区,各年用水过程的变化很大,在灌溉調度中必須考虑这一因素。

笔者所建議的各年灌溉用水过程的計算方法,依其詳簡程度可以分为以下三种:

本文初稿于1964年1月6日收到。

1. 以降雨记录結合田间耗水量資料,逐年逐日詳細地进行平衡演算,并考虑一次灌水定額,求得各年的灌水日期及数量。

2. 确定各年整地、播种和作物生长期的无雨灌溉天数,再乘以日耗水量求得各月的总用水量,而不詳細确定其灌水日期。

3. 根据灌溉試驗站降雨与田间耗水逐日平衡計算的資料,繪制旬雨量~旬有效雨量关系曲綫图;在水稻灌区并考虑以田面淹灌深度变幅(d)、日平均耗水量(e)和降雨均匀系数(α)为参数进行繪制;在邻近的短缺資料地区,利用这种曲綫图查算有效雨量,按水量平衡公式“月灌水量 = 月耗水量 - 月有效雨量”計算各月的总用水量。三种方法的詳細說明見参考文献[1]。

(二) 水庫历年各月需要蓄水量的計算 根据历年各月来水与用水的对比,按照先蓄后用的原則确定調节年度。例如在我国南方地区,5月份以后降雨較多,来水通常大于用水,而2,3,4各月缺水較多,因此調节年度定为5月至第二年4月。然后如表1所示,在(2),(3)行中列出各年用水(計入輸水損失)及来水过程。然后計算各月水量余缺数值,列如第(4,5)行。然后再进行逆調节計算各月末所需灌溉蓄水量,列入第(6)行。由于5月份汛期开始,来水大于用水,故4月末水庫无需蓄水,故水庫所需蓄水量 $V = 0$ 。4月份缺水1,176万立米,故3月末需蓄存这一数值的水量始能满足4月份的需要。同理,3月份缺水1,184万立米,故2月末水庫需蓄1,176 + 1,184 = 2,360万立米的水量,才能满足3,4两月灌溉的需要。如此順序向前逆推,可以求得各月末所需的水庫蓄水量。7月末水庫需要蓄水量为1,944万立米,而該月来水比用水多2,916万立米,故6月末水庫无需蓄水亦能满足7月末的蓄水要求。本年所需的最大蓄水量为9月末的6,279万立米。用同样的方法,可以求得历年各月水庫需要的蓄水量。

表1 某一調节年各月末需要蓄水量計算举例(单位:万立米)

月 份 (1)	来 水 量 Q (2)	用 水 量 q (3)	$Q - q$		月末需要蓄水量 V (6)	废泄量 R (7)
			+	-		
			(4)	(5)		
5	4,540	523	4,017		0	4,017
6	3,090	841	2,249		0	2,249
7	3,610	694	2,916		1,944	972
8	3,710	543	3,167		5,111	
9	2,420	1,234	1,186		6,297	
10	200	1,769		1,569	4,728	
11	30	125		95	4,633	
12	230	125	105		4,738	
1	360	125	235		4,973	
2	60	2,673		2,613	2,360	
3	680	1,864		1,184	1,176	
4	310	1,486		1,176	0	
合 計	19,240	12,002		6,637		7,238

(三) 灌溉調度綫的繪制 将历年同一月的月末水庫需要蓄水量由小到大排列,并在机率格紙上点繪成保証率曲綫,如图1所示。其橫坐标为各月末需要蓄水量的頻率(或保

保证率) P ，按 $P = [m/(n + 1)] \cdot 100\%$ 求得；其中 n 为年数， m 为由小到大排列的順位。在繪制保證率曲綫时，可徒手目估通过点羣繪制光滑曲綫，作为內插之用。

在該曲綫上可查得各月相应于某一保證率的水庫需要蓄水量，如表 2 所示。当水庫在某一月末具有所要求的蓄水量时，即可按照所指定的保證率保證灌区在以后各月获得正常的灌溉供水量。例如，在表 2 中当 3 月末水庫蓄水量为 620 万立方米时，就意味着可保證灌区在 4 月份有 75% 的机会获得正常的灌溉用水；同样，如 2 月末水庫蓄水量为 2,220 万立方米时，就可保證灌区在 3, 4 月份有 75% 的机会取得正常灌溉用水。依此类推，只要各月末的水庫蓄水量具有所指定的保證率的数值，即可保證灌区在以后各月以該保證率的机会获得設計灌溉用水量。这样就达到了設計所指定的灌溉要求。

表 2 各种保證率的月末水庫需要蓄水量 (单位：万立方米)

$P(\%)$ \ 月 份	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
75	0	0	1,120	3,600	5,000	3,840	4,160	4,120	4,320	2,220	620	0
85	640	2,520	2,020	4,600	5,680	4,360	4,640	4,560	4,800	2,540	1,060	0
90*	1,260	3,220	2,400	5,120	6,020	4,640	4,850	4,800	5,090	2,720	1,400	140

* 当保證率为 90% 时，4 月末需要蓄水量大于 0，这表明已需要多年调节。

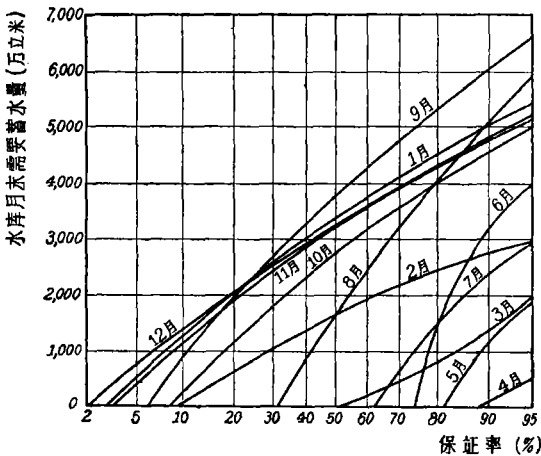


图 1 正常用水情况下各月末水庫需要蓄水量保證率曲綫

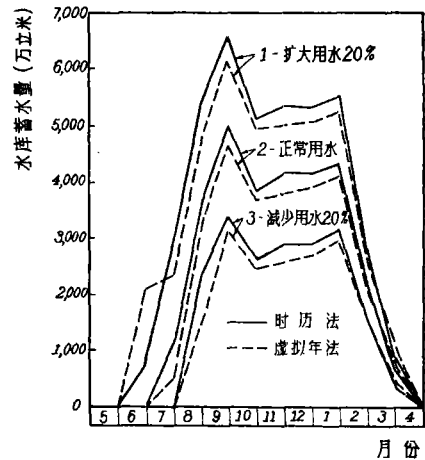


图 2 $P = 75\%$ 的灌溉調度綫

如以时间为横坐标，以某一指定保證率的月末水庫需要蓄水量为纵坐标，点繪于各月的月末位置上，并連成折綫，即得該保證率的水庫灌溉調度綫。如图 2 实綫 2 即为用該方法繪制的 $P = 75\%$ 的正常供水灌溉調度綫。若将水庫蓄水量換算为水庫蓄水位，則可得以水庫蓄水位表示的灌溉調度綫。当各月末水庫的实际蓄水量大于或小于調度綫所指示时（或在某一定的允許范围以內），即可加大或减小灌溉供水（增減灌溉面积或灌溉定額，視情况而定）。而当水庫实际蓄水量恰好等于調度綫所指示（或在某指定变动范围內）时，水庫即按正常供水。

如事先按不同的扩大及縮減的灌溉用水量，用上述的同样方法繪出一組輔助的調度

綫,那末在管理运用时,即可根据水庫的实际蓄水位置确定应如何扩大或縮減灌溉供水。例如,图2中的1,3实綫即代表扩大或減少20%灌溉用水时的調度綫。当灌溉面积及灌溉定額不能变动时,也可以用保証率为参数繪制輔助綫。

上述应用时历法将历年来水、用水过程进行逆調节計算,求得符合于某一保証率的各月需要蓄水量以确定灌溉調度綫的方法,可以綜合地反映历年实际来水、用水情况,考虑了各月之間以及来水和用水之間复杂的組合关系,并可靠的按所指定的保証率滿足各月的用水要求。該方法的工作量稍大,但为了比較合理正确地繪制水庫調度图,花这些工作量还是值得的。

三、用虚拟設計年法繪制灌溉調度綫

在較小的流域,来水和用水之間一般可有較好的相关关系,为了在初步方案比較时节省工作量,可以应用下述的虚拟設計年法繪制調度綫。

(一) 来水和用水間的相关分析 在湿润和半湿润地区,天然降雨是作物生长的主要供水来源,而灌溉用水則是輔助性的。因此灌区某一时段(月、季或年)的降雨量与灌水量一般存在着負相关关系:降雨多时,用水可以少些;而降雨少时,用水就要多些。一般在作物田間耗水量較大且有效降雨量占耗水量比重也較大的月份,这样相关关系要密切一些;而在其他月份相关关系也就差些。

当水庫的集水面积不很大且邻近于灌区时,則水庫的来水量与灌区的降雨量有較好的正相关关系,因此水庫的来水与灌区的用水也就有較好的負相关关系。例如,根据广东台山、开平地区和湖南耒水地区的資料分析,当水庫集水面积小于150平方公里且灌区靠近水庫的情况下,年来水总量与灌溉用水总量的相关系数一般达到 -0.7 至 -0.8 ;当集水面积达4,000平方公里时,相关系数仍有 -0.5 至 -0.6 ,而在作物主要需水季节或月份的相关系数可达 -0.8 以上。

(二) 設計来水过程綫的繪制 水庫的来水量各年大小不同,为保証灌区的供水,应当选择相应于設計保証率 P 的年水量 $W_{P(年)}$ 作为設計的对象。至于这一年水量的年內各月分配情况,过去的一般做法是在实测年份中找出几个年水量接近于这一数值的年份,以这些年份的实际的各月水量分配作为典型,按比例进行年內各月分配。前已述及这一方法具有很大的偶然性,并且不能保証在主要的灌溉季节按所指定的保証率滿足灌水要求。为了正确的保証年內各主要灌溉季节的灌溉用水,我們认为除了采用指定保証率的年水量外,尚应使其年內某些时段的来水量各等于其設計保証率数值,故建議采用下述的分段同頻率內包控制法計算設計来水过程綫。

根据灌区降雨年內分配特性及主要作物田間各月耗水数量列表进行对比(如表3所示),由此确定缺水最多、对作物影响最大的季节,作为主要控制时段,然后再扩展为次要的控制时段,使各控制时段及全年的来水量各等于其指定的保証率数值。

以表3为例,可以看出2~4月(特别是2~3月)降雨少而耗水多,且正值早稻泡田、育秧和移植时期,需要灌溉用水多,如缺水灌溉,将严重影响收获,故应作为全年的主要控制时段,并令本时段的来水量等于所指定的保証率数值。但当水庫具有相当的調节庫容时,这个时期的水量能否正常供給,又受其前期11~1月水庫蓄水量多寡的影响。如11~

表 3 广东台山县某灌区各月来水量与用水量对照

项 目 \ 月 份	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	全 年
多年平均降水量 (毫米)	353	438	288	392	305	67	61	33	17	71	85	200	2,310
作物田间耗水量 (毫米)	196	191	203	191	223	173	13	13	13	224	213	160	1,813
河流径流量 (万立方米)	3,190	3,980	2,750	3,560	2,850	542	555	342	196	660	730	1,755	21,110
农田灌水量 (万立方米)	775	720	1,180	715	1,020	1,425	125	125	125	2,440	1,820	865	11,335

1 月来水多,水库蓄水多,则 2~4 月的用水也可较多;反之,则 2~4 月的供水也将减少。因此在设计时除了令 2~4 月的来水符合于指定保证率外,还应令 11~4 月的整个时段的来水量等于设计保证率数值;换句话说,11~1 月的水量应为: $W_{(11-1月)} = W_{(11-4月)P} - W_{(2-4月)P}$ 。依此类推,将时段扩展至 8~4 月及 5~4 月(全年),这样,就将全年分为 2~4 月、11~4 月、8~4 月和 5~4 月等四个内包控制时段,令这些时段的来量均等于设计保证率,其差值即为各小段水量的数值。各小段内部各月的水量分配,可以采用几个典型年的来水平均分配比例。

若要更严密的控制设计年内各月的水量分配,则可选择缺水最多、对作物影响最大的 2 月份作为主要控制月,其供水要求按指定保证率保证;然后再选出最严重的两个相连缺水月份 2~3 月,三个相连的缺水月份 2~4 月,如此等等以至全年,共可得 12 个时段,令各时段的水量均等于各自的同一设计保证率的水量。

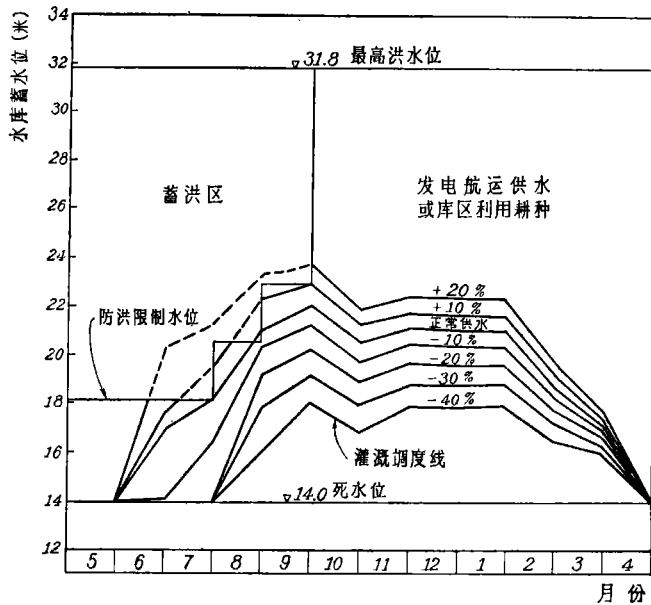
(三) 设计用水过程线的绘制 根据已有的历年各月来水和用水过程,可以绘制各时段来水和用水的相关图,如 2 月份的来水和 2 月份的用水,2~3 月的来水和 2~3 月的用水等等。有了上节中按同频率内包控制法计算得的虚拟设计来水过程线以后,即可根据来、用水相关图求得相应的设计用水过程线。

(四) 灌溉调度线的绘制 有了设计的来水和相应的用水过程线以后,仍按前述表 1 的方法,以最后一个月末的库容为零,向前逆推求得各月末的需要蓄水量,即可绘制成灌溉调度线,再考虑不同加大及减少用水的情况,可绘出一组调度线,如图 2 中各条虚线所示。

四、灌溉调度图举例及其验证

(一) 灌溉调度图的实例 图 3 为广东台山县某灌溉水库的防洪灌溉调度图。图中的灌溉调度线是按保证率不变,以灌溉用水量为参数,用上述的虚拟设计年法绘制的;防洪限制水位是用一般的分期洪水计算方法绘制的。有了这张调度图,即可进行水库的调度运用。

在防洪与灌溉没有矛盾的时期,实际调度基本上可按灌溉调度线进行;但也要根据当时灌区实际需水情况和雨量预报数值,灵活掌握。例如,当水库存水在正常供水线以上,而灌区旱象严重,预报近期无雨,又有增加灌溉面积的可能,群众迫切要求引水灌溉其他地区时,应考虑适当降低灌溉定额,扩大灌溉面积,以解除旱象。如果为保证重点灌溉面积的供水,以防连续干旱,则不应随便扩大灌溉面积。



洪水标准——三百年一遇,灌溉保证率——75%

图3 广东台山县某水库防洪灌溉调度图

如果某些月份防洪与灌溉有矛盾,则可按以下原则进行调度:

1. 安全第一,灌溉服从防洪。此时水库蓄水位最高不能超过设计标准的防洪限制线,故需要降低灌溉定额或缩小灌溉面积。

2. 若中长期预报具有一定的可靠性和精度时,可以适当考虑预报,对防洪限制水位和灌溉定额进行调整。如预报下月大洪水,水库水位应降至设计标准的防洪限制水位。如预报下月干旱,则可适当提高水库水位至较低标准的防洪限制水位,而可以正常供水。在应用预报时,应估计预报误差可能造成的后果,并随时根据短期预报及作物生长情况进行修正。在作物未露旱象时,不宜冒险提高防洪限制水位。

(二) 灌溉调度图的验证 为了说明所建议的灌溉调度线绘制方法的正确性,以图3为例以验证按调度图蓄水不超过正常调度线,其多年运行结果是否能符合原设计保证率。假定水库调度运用时不考虑预报,当各月末水库实际蓄水位在正常供水线以上时,水库即废泄到正常供水线的位置上;当各月末实际蓄水位在正常供水线和缩减用水10%的供水线之间时,水库按正常供水;当各月末水位在缩减用水10%和20%的供水线之间时,水库缩减供水量10%;……(也可考虑当水库水位在±5%供水线范围内时按正常供水,在-5%至-15%供水线之间时按-10%供水,……)。这样,将已有15年来水、用水资料按上述调度原则逐年顺序时操作,即可求得历年不同破坏程度的破坏月数。然后用下面两种方法计算2~4月(主要缺水期)、10~4月(枯水期)、5~4月(全年)等三种时段不同破坏程度的破坏概率。当然这里还牵涉到如何统计破坏概率的问题,我们曾尝试了以下两种方法:

1. 破坏月数法——统计各时段历年不同破坏程度的总破坏月数 m ,按经验频率公式 $P' = [m/(Nn + 1)]100\%$ 计算破坏概率(表4)。式中 N 为系列总年数, n 为时段内月数。

表 4 按破坏月数计算破坏概率

时 段	5~4 月 (全年)			10~4 月			2~4 月		
	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%
减少用水程度	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%
破坏月数	39	16	14	29	12	11	13	8	7
破坏概率 P'	21.6	8.8	7.7	27.4	11.3	10.4	28.2	17.4	15.2
供水保证率 P	78.4	91.2	92.3	72.6	88.7	89.6	71.8	82.6	84.8

2. 破坏年数法——逐年统计各时段内的缩减供水总量，计算它占时段内正常供水总量的百分数，再分时段统计受到不同破坏程度的年数 M ，用公式 $P' = [M/(N + 1)] \cdot 100\%$ 计算破坏概率(表 5)。

表 5 按破坏年数计算破坏概率

时 段	5~4 月 (全年)			10~4 月			2~4 月		
	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%
减少用水程度	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%	≥10%	≥20%	≥30%
破坏年数	3	1	0	3	2	1	4	3	1
破坏概率 P'	18.8	6.3	0	18.8	12.5	6.3	25.0	18.8	6.3
供水保证率 P	81.2	93.7	100	81.2	87.5	93.7	75.0	81.2	93.7

由表 4,5 可以看出,若以破坏程度 $\geq 10\%$ 作为衡量破坏的标准,则用两种方法计算的三个时段的供水保证率均基本上符合于原设计保证率 75%;而且,破坏程度 $\geq 20\%$ 以上的破坏概率又非常小,这说明用所建议的方法绘制的灌溉调度图不但能符合于设计要求,而且可以达到破坏均匀的目的,从而证明了该方法的合理性。显而易见,若水库调度运用时考虑预报,以及当水位超过正常供水线时而不废泄,则实际供水保证率要比设计保证率高。

五、尚待研究的问题

灌溉水库的调度,尚有若干问题需要继续研究解决,例如:

1. 所建议的方法是在水库已建成的基础上绘制调度图。实际上设计与调度是互相联系的,需要根据防洪、灌溉的要求反复地进行验算,以求得最合理的设计库容。

2. 建议方法主要解决了防洪与灌溉两方面的问题,如果水库尚有发电、航运要求以及库区的土地利用等问题时,尚待进一步研究。

3. 灌溉用水量各年各月是变动的,根据上月末水库的实际蓄水位只能从调度图上大致确定下月增减供水的相对百分数,但不能确定其具体的供水数量,因为下月作物需灌水量是未知的。在没有预报的情况下,只能统计以往历年的用水资料,取其多年平均值。因此,为了使灌溉调度更符合实际情况,必须研究灌溉预报问题。

4. 灌溉破坏概率为衡量调度图是否符合设计要求的最终指标,为了验证灌溉调度图

的正确性,必须对灌溉破坏概率的计算方法进行研究.

DEVELOPING THE ANNUAL OPERATING PLAN FOR THE IRRIGATION RESERVOIR

YE YONG-YI, HE WEI-CHENG, WANG JI-CUN

(Institute of Hydrotechnical Research)

ABSTRACT

In this paper, a new method of developing the annual operating plan for a single irrigation reservoir is represented. It consists of the following procedures: (1) providing a list of monthly natural inflows and irrigation demands of the reservoir for each recording year from the stream flow and climatic records; (2) computing the reservoir storage needed at the beginning of each month to fulfill the water demands of the following months in that year, by counting backward month by month from the beginning of the flood season when the reservoir stage should be drawn to the lowest position; (3) making frequency analysis for each array of the monthly storage requirements computed above and finding out the proper value of storage needed for each month with a given percent of chance; (4) plotting the guide curves for annual operation with the above results.

A simplified method is also recommended for the areas where the watershed is small enough that a close correlation may exist between the natural inflows and irrigation demands.