

万安水库主汛期优化调度策略研究

范喆林

(国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂,江西吉安 343800)

摘要:水库防洪优化调度是一项可以提高水库防洪能力的非工程性手段,起到调节洪峰、存蓄洪水、减轻甚至避免洪涝灾害的效果,开展水库防洪优化调度研究具有重要的科学意义和应用价值。针对现阶段万安水库洪水调度方式存在的预泄水位难确定、预泄标准模糊、调度方案依靠人工经验等问题,文中通过水量平衡法分析洪水调度过程,提出超满发洪量、洪峰对预泄水位的对应方法,确定超满发洪量、洪峰的预泄阈值;通过不同的预泄速率与预泄启闭时间,建立多个万安水库主汛期调度方案,分析研究不同调度方案的实际应用效果,选取适用于万安水库主汛期调度的最优方案,在保证防汛安全前提下,减少弃水,充分利用好每一次洪水过程,发挥水库综合效能。

关键词:优化调度;万安水库;预泄调度;预泄阈值;主汛期

中图分类号:TV 697 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)04-0063-04

0 引言

水库防洪调度是指在洪水期,根据科学合理的水库调度规则,对入库洪水进行调节的过程,以拦蓄洪水和削减洪峰流量,有效降低洪水对人类生命和社会生产、生活造成的威胁,是人类抵御洪水灾害的一种重要的技术手段。如何科学合理地开展常遇洪水预泄调度,提高洪水资源利用率,优化水库调度,实现防洪减灾,一直是水库调度工作的重要任务^[1]。

预泄调度指在洪水出现前,提前将水位下泄至汛限水位以下,以腾空库容来提高水库防洪能力,有效保障水库及下游地区防洪安全。目前,对于预泄期洪水过程到达何种特征时,预泄库水位必须消降到下限值的大多数研究尚未提出明确的标准^[2]。现阶段,对预泄期预泄策略相关研究成果较少^[3],缺乏标准化的判断条件或识别判断条件的技术与方法,普遍存在预泄深度不确定、预泄水量不明确、预泄起止时间不清楚等问题,导致实际调度过程中存在“超泄”或“少泄”现象,增加了其运用难度。因此,文中提出以超满发洪量、洪峰为预泄判别指标,并建立相应的预泄水位对应关系,通过对不同的预泄流量与预泄启闭时间的调度方案进行评价与分析,总结出可操作性强,且能

灵活运用于实际的万安水库调度策略。

1 工程概况

万安水利水电枢纽工程是赣江上一座以发电为主,兼有防洪、灌溉、航运综合效益的大(I)型水库。水库控制流域面积36 900 km²,总库容22.14亿m³,水库初期运行时,正常蓄水位为96 m,死水位和4-6月的防洪限制水位均为85 m,防洪高水位初期运行93.6 m。电站装机容量为53.3万kW,保证出力6.58万kW,机组满发流量2 803 m³/s。

2 预泄调度运行方式和判别条件

万安水库汛期一般为每年4月1日至9月30日,具体以江西省防汛抗旱指挥部下发相关文件为准。其中,主汛期(4月1日—6月20日)防洪限制水位为85.0~88.0 m,后汛期(6月21日—9月30日)防洪限制水位为93.5~96.0 m。

主汛期水库预泄规则:

1) 当入库流量 $Q_A \leq 1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$,流域发生大雨或预报24 h内有暴雨及以上天气时,通过加大机组发电流量,保持出库流量大于入库流量进行预泄。

收稿日期:2025-03-18

作者简介:范喆林(1998),男,硕士,助理工程师,主要从事水库优化调度研究。

2) 当 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s} < Q_{\text{入}} \leq 2\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 且 24 h 内累积流域平均降雨量 $\sum P_{24} \geq 50\ \text{mm}$, 流域继续发生大雨或预报 24 h 内有暴雨及以上天气时, 水库按 5 台机组满发流量 $2\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$, 控制下泄流量降低水库水位。

3) 当 $Q_{\text{入}} > 2\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 或吉安站流量 $\geq 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 且呈上涨趋势时, 流域发生大雨或预报 24 h 内有暴雨及以上天气时, 按预泄流量 = 入库流量 + $880\ \text{m}^3/\text{s}$, 将水库水位降至 85 m。

4) 水库水位泄至 85 m 时, 转入洪水调度方式调度。

5) 在预泄过程中, 如降雨停止或天气明朗时, 停止预泄。

3 预泄水位选取策略

预泄水位涉及洪水管理的前瞻策略, 具体指在洪水事件可预见的前提下, 水库预先调低水位至某一预定高度, 预留足够的库容以有效调控即将到来的洪水。如图 1 所示, 该图为机组满发状态下的洪水过程示意图, 其中包含了入库流量、机组满发流量(出库流量)和水库水位三个主要变量随洪水历时的变化情况。具体而言, 洪水进程中的水库水位波动直观反映了水库蓄洪功能的灵活调整。洪水初期, 当入库流量未达到机组满发流量时, 水库水位因持续排放而逐步下降, 直至入库流量与出库流量达到平衡, 此时的最低水位即为预泄水位; 随后, 随着洪峰的到来, 入库流量超越机组满发流量, 水库水位开始上升, 并在入库流量与机组满发流量重新平衡的时刻达到顶峰; 洪峰过后, 随着入库流量再度减少, 水库水位再次进入下降趋势。

从水文学原理来看, 流量是单位时间内通过某一断面的水量, 而洪量是一段时间内通过某一断面的总水量。对于超满发洪量而言, 其计算本质上是对入库流量与机组满发流量差值在时间上的积分。设 $Q_{\text{in}}(t)$ 为入库流量随时间 t 的变化函数, $Q_{\text{max}}(t)$ 为机组满发流量随时间 t 的变化函数(在实际情况下, 机组满发流量可能相对稳定, 即 Q_{max} 为常数, 但在更复杂情况下也可能随时间变化)。则超满发洪量 V 的计算公式为:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} (Q_{\text{in}}(t) - Q_{\text{max}}(t)) dt \quad (1)$$

式中: t_1 是入库流量开始超过机组满发流量的时刻; t_2

是入库流量与机组满发流量重新平衡的时刻。

尤为关键的是, 从入库流量超越机组满发流量直至二者重新平衡的这一阶段, 累积的超量洪水体积(即超满发洪量)直接对应于水库水位从最低点至最高点期间水库的库容值。通过计算最高水位对应的总库容减去上述超量洪水体积, 可以获得预泄水位的库容值; 借助水库水位-库容曲线, 可以精确反推出预泄水位的具体数值, 为洪水防控提供科学依据和操作指导。

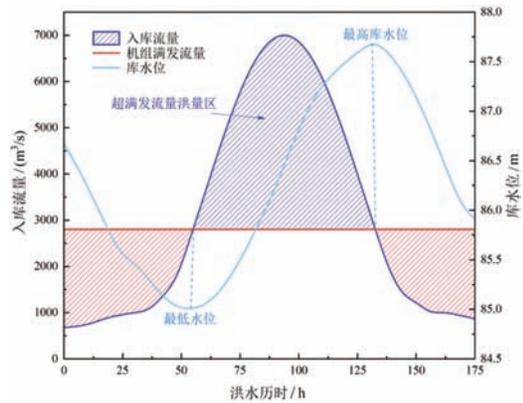


图 1 机组满发调度洪水过程示意图

3.1 基于超满发洪量的预泄水位选取

对于万安水库, 将水库水位最高点定为汛限水位 88 m, 并依据水库水位-库容曲线进行逆向推算, 明确在不同超满发洪量下的预排泄水位。如图 2 所示, 为了确保水库的防汛安全, 随着超满发洪量的上升, 预泄水位需做出相应下调, 利用增加的防洪库容以吸纳额外的洪量。值得注意的是, 当超满发洪量超过特定阈值(即 $1.53 \times 10^8\ \text{m}^3$), 考虑到水库水位下限不得低于死水位 85 m 的约束, 预泄水位的进一步下调变得不可行, 这标志着通过机组进行调洪的能力已达上限, 后续需依赖闸门进行精确调控出库流量, 以实现洪水的有效调控。

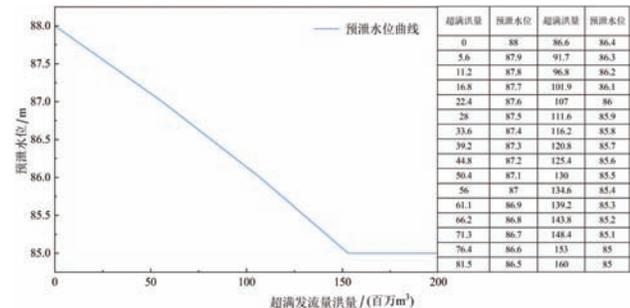


图 2 万安水库超满发洪量-预泄水位图

3.2 基于洪峰的预泄水位选取

鉴于超满发洪量通常未被纳入洪水预报的标准

参数之中,为了实践操作的便捷性,需要将超满发洪水转换成常规的洪水预报参数。基于对万安水库近十年主汛期洪水事件的深入剖析,图3揭示了超满发洪水与洪水峰值之间存在显著的多项式关联,其模型拟合度高达93%。因此,本研究采纳洪水峰值作为预泄水位设定的参考依据,并根据拟合公式推断,超额满发电流量的 $1.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ 对应的洪水峰值为 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 。从而依据不同的洪水峰值直接推导出相应的预泄水位。图4清晰地展示了随着洪峰流量的增加,预泄水位在逐渐降低的过程。当洪峰流量达到 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,意味已达到机组调洪的极限,在预泄调度后,需要通过控制闸门开度,调节出库流量大小,以维护水库的安全运行及周边区域的防洪安全。

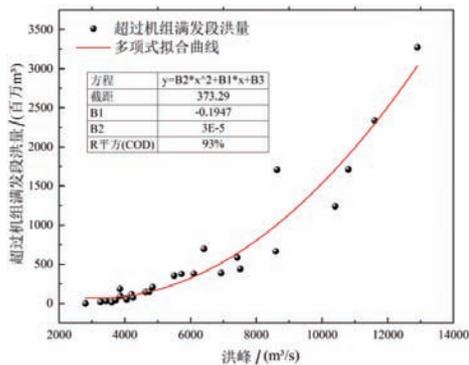


图3 超满发洪量-洪峰关系曲线图

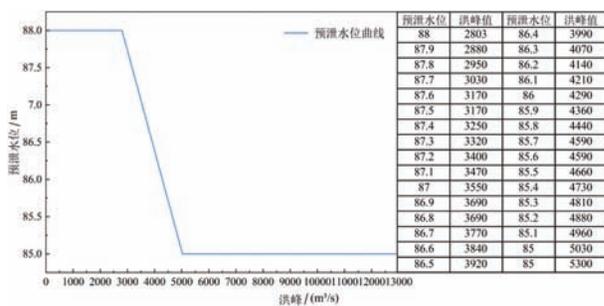


图4 万安水库洪峰-预泄水位图

4 万安水库调度方案研究

4.1 调度研究的思路

目前,水库预泄调度研究方法主要有预报预泄方式和非预报预泄方式两种^[4]。前者采用洪水预报作为预泄的判别条件,涉及洪水预报的预见期、预报精度和合格率等分析和验证过程,受条件的限制,一般适用于运行阶段,拟定实时调度方式;后者根据已出现历史水情作为预泄的判别条件,一般适用于设计阶

段拟定可行的调度方式。文中的研究成果适用于万安水库运行,从分析调度方式基本可行的角度,采用预报预泄方式,可为运行阶段预泄调度方式作参考。

万安水库调度方式研究的思路:当主汛期洪水峰值不大于 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,预泄调度时根据预泄水位图确定相应的水位,保证在入库流量等于机组满发流量时预泄到位,防止造成弃水,洪峰段保持机组满发,入库流量再次等于满发流量后,根据出入库平衡进行洪尾调度;当主汛期洪水峰值大于 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,预泄水位统一为 85 m ,此时要保证在洪峰到达前达到预泄水位,充分利用防洪库容,洪峰段保持机组满发,根据出入库平衡进行洪尾调度,整个调度过程要精确控制弃水流量,保证水位不超过 88 m 。

4.2 预泄调度指标选取及方案制定

文中通过选择不同的预泄速率与预泄启闭时间,建立多个调度方案^[5]。分别从防洪效益和兴利效益的角度,确立以发电量、削峰率、泄水量为指标体系,分析研究不同调度方案的实际应用效果,选取适用于万安水库主汛期调度的最优方案,在保证防汛安全前提下,减少弃水,充分利用好每一次洪水过程,发挥水库综合效能。

4.3 调度方案结果与分析

对于洪峰流量小于 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水过程,文中选取了万安水库20220525号洪水过程,其超满发洪量为 $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,洪峰值为 $4\,740 \text{ m}^3/\text{s}$,如图5所示。对20220525号洪水过程建立不同预泄速率,不同预泄起始时间的调度方案。其中,方案1为预泄速率最快、起始时间最后的方案,总发电量为 $6\,655 \text{ 万 kWh}$;方案2为预泄速率适中、起始时间适中的方案,总发电量为 $6\,635 \text{ 万 kWh}$;方案3为预泄速率最慢、起始时间最先的方案,总发电量为 $6\,623 \text{ 万 kWh}$ 。根据表1可以看出,预泄速率越快,预泄过程时间越短,其发电量越大。从图5可以看出,预泄速率越快,预泄过程时间越短的方案,同一时间下其水库水位高,水库水位维持高水位的时间也越长,有利于提高机组发电效率。

对于洪峰流量大于 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水过程,文中选取了万安水库20230326号洪水过程,其超满发洪量为 $3.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,洪峰值为 $6\,929 \text{ m}^3/\text{s}$,如图6所示,建立不同预泄启闭时间的预泄调度方案。其中,方案1为起始时间最早、结束时间为入库流量等于满发流量时的方案,总发电量为 $4\,763 \text{ 万 kWh}$,削峰率为

22.80%,弃水量达 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$; 方案2为起始时间适中、结束时间为入库流量等于 $4\,390 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的方案,超 $4\,390 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪量等于防洪库容值,该方案的调度思路类似洪峰流量小于 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 的调度思路,总发电量为 $4\,631 \text{ 万 kWh}$,削峰率为 36.65% ,弃水量达 $2.52 \times 10^8 \text{ m}^3$; 方案3为起始时间最晚、结束时间为洪峰达峰时的方案,总发电量为 $4\,382 \text{ 万 kWh}$,削峰率为 0 ,弃水量达 $3.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据表1可以看出,方案1的发电量最多、弃水量最少;方案2的削峰率最高,发电量与弃水量适中;方案3发电量最少、削峰率最低、弃水量最高。对于需要弃水的洪水调度,可以看出,以兴利效益而言,方案1的调度方案为最优方案;以防洪效益而言,方案2的调度方案为最优方案。

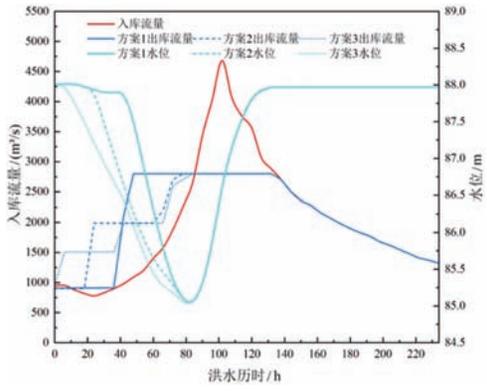


图5 202220525号洪水过程调度对比图

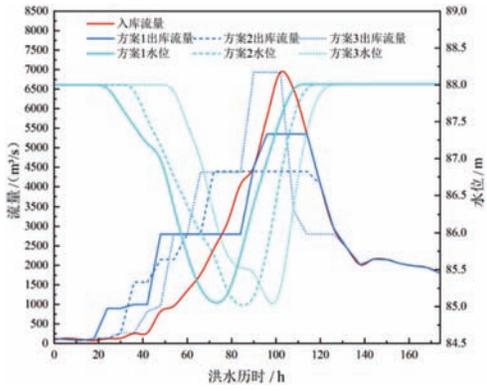


图6 20230326号洪水过程调度对比图

表1 调度结果数据表

方案	$\leq 5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$		$> 5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$	
	发电量(MW·h)	发电量(MW·h)	削峰率(%)	弃水量(m^3)
方案1	66 550	47 630	22.80	219 888.000
方案2	66 350	46 310	36.65	251 856.000
方案3	66 230	43 820	0.00	311 904.000

5 结语

1) 文中建立了以超满发洪量、洪峰为预泄判别

指标的预泄水位对应关系,明确了万安水库超满发洪量的阈值为 $1.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,洪峰的阈值为 $5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$,当超过阈值时,就需要采取弃水操作。为水库预泄决策提供了清晰、明确的量化标准,改变了以往可能存在的模糊决策方式,提升了决策的科学性与精准性。

2) 针对万安水库主汛期不同洪水峰值情况,提出分情况、精细化的调度思路。主汛期洪水峰值 $\leq 5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,按预泄水位调度确保满发流量时预泄到位;主汛期洪水峰值 $> 5\,030 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,预泄水位为 85 m ,在洪峰前完成预泄,洪尾调度维持水位 $\leq 88 \text{ m}$ 。相较于传统单一的调度方式,能够更灵活、高效地应对不同规模的洪水,在保障防洪安全的同时,尽可能提高水资源利用效率。

3) 揭示了不同调度情景下的效益优化机制与最优方案。对于无需弃水的洪水调度,提高预泄速率,缩短预泄时长,可以有效提升机组发电效率与整体发电效益;对于需弃水的洪水调度,提出了面向不同效益目标的最优调度终点判定准则:以最大化发电量、最小化弃水量为目标,预泄操作应持续至入库流量等于机组满发流量时结束。此方案能最大程度利用水能资源,以最大化削峰率、减轻下游防洪压力为目标,预泄操作应持续至超出库洪量累计值等于防洪库容值时结束,能充分地利用水库的调洪能力。

4) 文中的万安水库调度策略核心在于依托洪水预报信息进行预泄推演与决策,其实际应用效果高度依赖于洪水预报的精度与预见期长度。因此,持续提升洪水过程预报的准确率,并努力延长有效的预报预见期,是充分发挥水库综合效益的关键所在和必要保障。

参考文献:

[1] 袁玉娇.亭子口水利枢纽常遇洪水实时预报预泄调度的运用[J].四川水利,2018,39(05):44-47.
 [2] 雷苏琪,胡振鹏,熊斌,等.水库汛限水位动态控制预泄能约束法力的必要条件[J].水利水电技术(中英文),2022,53(06):146-154.
 [3] 雷苏琪,何中政,闫峰,等.万安水库主汛期运行水位动态控制预泄策略研究[J].水电能源科学,2022,40(11):73-76.
 [4] 张验科,张佳新,俞洪杰,等.考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J].水力发电学报,2019,38(09):64-72.
 [5] Liu Z, Wang Q, Xi Q Y, et al. Study on Flood Pre-Discharged Rule-Making for Xihe Reservoir Flood Control[J]. Advanced Materials Research, 2013, 864-867: 2428-2432.