

# 基于多阶段随机优化的水库流量控制和洪水风险短期管理

张绍莹

(江西景诚建设有限公司, 江西 景德镇 333000)

**摘要:** 由于水电、供水、防洪等多重目标, 以及来水和需水量预测的内在不确定性, 水库的短期优化管理具有挑战性。模型预测控制 (MPC) 通过将过程模型、预测和目标函数的制定结合起来, 并通过优化算法求解, 为这一管理问题提供了在线解决方案。这种预期管理有许多优点, 但也可能存在预测的不确定性。在实践中, 预测的不确定性有多种来源, 这些来源可能危及控制决策。本研究是在 MPC 的闭环模式下结合确定性和概率性的径流进行了后报实验, 以模拟实时洪水缓解案例。并采用基于树的约简技术, 将概率流入预测与多阶段随机优化模型相结合。结果表明, 基于树的 MPC 模型通过在决策过程中加入更长的预测时间和考虑预测的不确定性, 建议在重大洪水情况的实时控制期间减少泄洪道流量。另一方面, 将能源生成与确定性方法进行了比较。结果表明, 该方法在不影响能量生成的前提下具有良好的应用前景。

**关键词:** 防洪; 水电; 模型预测控制; 水库运行; 随机优化

中图分类号: TV744

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2024) 01-0115-03

## 一、引言

在人口增长、城市化和气候变化的背景下, 水资源管理变得越来越重要。目前仍有 10 亿人无法获得安全饮用水, 20 亿人无法获得电力<sup>[1]</sup>。由大坝建造的水库是水资源综合管理的最重要元素之一, 大坝和水库通过提供储存和控制洪水流入的排在洪水风险管理中发挥着重要作用。蓄能水电作为一种主要的可再生能源, 在基荷负荷和高峰负荷发电中发挥着重要作用。由于水库承担着多个目标, 即持续的供水可用性、负载平衡、水电生产最大化、防洪等, 因此水库运行需要适当的战术管理。水库具有各种物理组件和变量, 优化也很复杂。此外, 由于不受管制的流入量、需水量和能源需求的随机性, 随机性是固有的。隐式和显式随机优化技术已得到应用<sup>[2]</sup>。然而, 其大多是离线技术, 并不能直接反映实时操作问题和预测的不确定性。

文中采用模型预测控制 (MPC) 技术进行研究, MPC 是一种综合考虑了动态系统、优化算法和未来状态的先进的过程控制技术<sup>[3]</sup>。在过去的几十年里, 它一直被用于不同的水资源相关问题。然而, 预测可能是错误的, 这会导致操作员做出错误的控制决策。正确的解决方案是通过概率集合预报来明确考虑预报的不确定性, 但目前还没有详细的研究。在本研究中, 以一个具有水电资产的实时水库调度为例, 对确定性和随机 MPC 进行了测试和比较。在闭环后报配置下采用实时控制。

## 二、多阶段随机树模型预测控制

确定性 MPC 考虑了一个离散的时间-动态系统

$$x^k = f(x^{k-1}, x^k, u^k, d^k) \quad (1)$$

$$y^k = g(x^k, u^k, d^k) \quad (2)$$

其中,  $x, y, u, d$  分别是状态、因变量、控制和干扰向量。而且  $f()$  和  $g()$  是表示任意线性或非线性水资源模型的函数。在已知时间范围内实现干扰  $d$  的假设下, 同时 (也称为并置) MPC 具有以下目标函数和约束, 如下:

$$u, x \in \{0, \dots, T\} \sum_{k=1}^{N-1} J(x^k, u^k, d^k) + E(x^N, u^N, d^N) \quad (3)$$

$$h(x^k, y^k, u^k, d^k) \leq 0, k = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$x^k - f(x^k, x^k, u^k, d^k) = 0 \quad (5)$$

其中,  $J()$  是与每个状态转换相关联的代价函数,  $E()$  是与最终状态条件相关联的附加代价函数, 并且  $h()$  分别是控制变量和状态的硬约束。在这种情况下, 相关模型 (此处为油藏模拟方程) 成为方程 5 中优化问题的等式约束。

通过改变  $d^k$  和  $d_j^k$ , 其中  $j$  表示集合指数 ( $j = 1, \dots, M$ ),  $k$  表示瞬时时间 ( $K = 1, \dots, N$ ), 将该问题扩展到多阶段随机设置中。

$$u, x \in \{0, \dots, T\} \sum_{j=1}^M p_j \sum_{k=1}^{N-1} J(x_j^k, u_j^k, d_j^k) + E(x_j^N, u_j^N, d_j^N) \quad (6)$$

该问题通过多阶段随机设置进行扩展, 其中  $p_j$  表示集合成员的概率,  $M$  表示集合的数量。

通过定义控制变量  $u_j^k$ , 确定了随机 MPC 设置的方法。在这一点上, 多阶段随机优化 (即基于树的 MPC, TB-MPC) 是一种使用情景树来处理干扰、状态和控制轨迹<sup>[4]</sup>的专用方法。

文中分别使用 DSF 数据应用确定性 MPC, 使用 PSF 数据应用 TB-MPC。在闭环模式下对模型进行测试, 以模拟真实油藏决策的生成和实现, 称为后报实验。

## 三、研究区域、数据和模型

收稿日期: 2023-05-24

作者简介: 张绍莹 (1994-), 女, 江西景诚建设有限公司, 工程师。

由于供水和防洪目标, 水库需要一个具有挑战性的闸门管理以保护下游工业区, 必须尽可能避免泄漏, 最大泄漏量应小于最大  $200\text{m}^3/\text{s}$ 。莫淑红等<sup>[5]</sup>结合闭环 MPC 设置, 提出了在可变导向曲线 (GC) 中考虑这些目标的短期操作策略。后来, 又通过基于树的简约多阶段随机 MPC 扩展了该方法, 以便在决策机制中包含预测不确定性。除此之外, 本研究还在下游建立了一个虚拟的水电站, 以评估能源发电条件下的系统性能。



图 1 水库现有闸门

该系统被认为是一个质量平衡方程:

$$S^k = S^{k-1} + S_i^k - S_s^k - S_{ws}^k - S_t^k \quad (7)$$

式中,  $S$  为水库库容;  $S_i$  为入库水量;  $S_s$  为溢洪道泄流量;  $S_{ws}$  为取水量;  $S_t$  为水轮机泄洪量;  $k$  为时间指标。

目标是: 最大限度地增加供水和水力发电, 同时尽量减少溢洪道流量。这些约束条件基于质量平衡的剩余量、水库水位边界、溢洪道流量和水轮机涡轮流量。涡轮流量受下式限制:

$$10\text{m}^3/\text{s} \leq Q_t \leq 20\text{m}^3/\text{s} \quad (8)$$

式中,  $Q_t$  是涡轮流量。因此, 相对于质量平衡方程,  $Q_t$  间接成为问题的优化变量。

在研究中, 确定性 (DSF) 和概率性 (PSF) 流量的每小时数据被用作 MPC 闭环模式的输入。预报数据是由重现期为 100 年一遇的大洪水过程线 ( $Q_{100}$ ) 综合生成的。值得注意的是, 每小时的数据在每一个后退的范围 (1h) 中更新, 提前期为 48h。图 2 给出了所选定时间步长的预测数据示例。后报预测期为 2018 年 5 月的 96h, 设计了 48h 预测期的优化问题, 并在 TB-MPC 系统中使用了 16 个树枝。

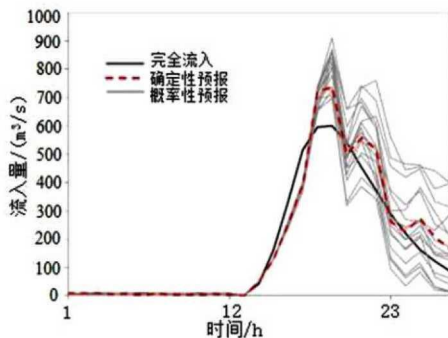


图 2 所选时间步长的流入预测

(完全的、确定性的和概率性的) 示例

#### 四、优化结果与讨论

在比较中给出了确定性和随机情况下的初步结果 (图 3)。对两种 MPC 模式都进行了后报实验, 这意味着模型的

每个时间步长都是针对有限 (预测) 范围 (48h) 进行优化的, 并且只有第一个控制应用于系统, 其余的将被丢弃。但是, 系统状态会随着观察到的流入量进行更新, 并在下一个时间步骤中重复相同的过程, 直到整个后报期完成。图中, DHE 代表确定性后报实验结果, PHE 代表概率性后报实验结果。

文中对三个不同变量 (水库水位、溢洪道流量和涡轮流量) 下的计算结果进行研究。发现与 DHE 相比, PHE 提出的溢洪道政策具有更多的预泄量和更低的水库水位, 这是因为集合预测中的不确定性扩散及其在 TB-MPC 中的适当考虑。据此, 就溢洪道流量而言, DHE 在下游表现出更高的损害 (超过  $200\text{m}^3/\text{s}$ )。这主要是由于 DHE 提供了更保守的水库蓄水量, 并且在流入量被低估时超过了洪水阈值。值得注意的是, 尽管它在事件发生前提供了较大的防洪池, 但 PHE 在事件结束时也提供了相同的水库水位。因此, PHE 结果与洪水事件结束时的供水目标不冲突。与基于确定性预测数据的模型结果 (DHE) 相比, 根据涡轮流量图判断 PHE 也提供了非常相似的发电性能 ( $R^2=0.96$ )。

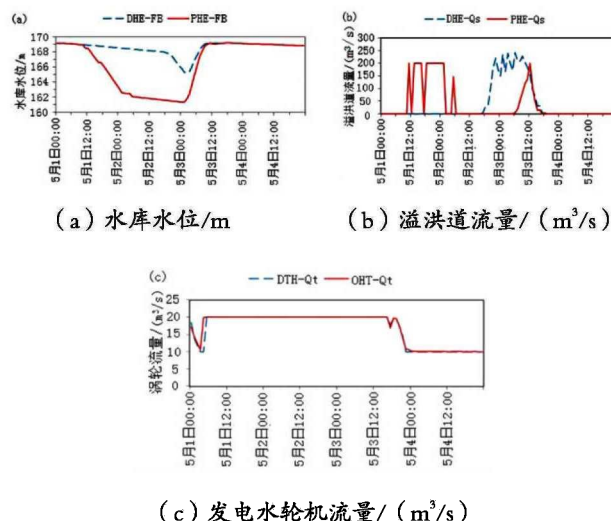


图 3 确定性 MPC 和 TB-MPC 后报实验结果

#### 五、结论

在水资源优化的实时运行中, 仍然缺乏预测不确定性的评估。在本研究中, 针对一个主要洪水场景, 对具有供水、防洪和发电功能的水库的运行进行了实时测试。为此, 开发了模型预测控制 (MPC) 模型, 并通过后报实验模拟实时控制。

(1) 在确定性和随机 MPC 模型中分别采用了 48h 提前期的合成确定性和概率性每小时径流。

(2) 由于决策系统中考虑了预测的不确定性, 因此选择了基于情景树的多阶段随机预测控制。

(3) 与确定性 MPC 相比, TB-MPC 的初步结果在不影响能源生产和供水目标的情况下, 在下游区域安全方面是有前景的。

(4) 在未来的研究中, 该框架可以使用基于数值预报的天气预报来检验。(下转第 157 页)

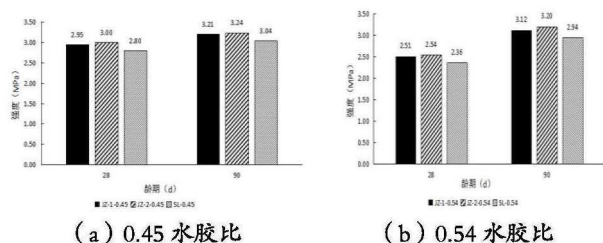


图3 劈裂抗拉强度试验结果

由图3可以看出:

(1) 水胶比相同,对5~31.5mm粗骨料级配进行优化后,劈裂抗拉强度均会得到一定的提高,水胶比为0.45,粗骨料优化后混凝土28d和90d劈裂抗拉强度分别提升1.7%和0.9%;水胶比为0.54,粗骨料优化后混凝土28d和90d劈裂抗拉强度分别提升1.2%和2.6%;

(2) 水胶比相同时,采用建筑优化粗骨料代替水利粗骨料配制混凝土,其劈裂抗拉强度有所提升,水胶比为0.45,粗骨料优化后混凝土28和90d劈裂抗拉强度分别提升7.1%和6.6%;水胶比为0.54,粗骨料优化后混凝土28d和90d龄期优化后劈裂抗拉强度分别提升7.6%和8.8%,这是因为,粗骨料的粒径越大,比表面积越小,其与水泥砂浆的粘结性能越差,故劈裂抗拉强度会随着粗骨料粒径的增大而降低。

#### 4. 轴向抗拉强度试验

按照《水工混凝土试验规程》SL/T352-2020规定的相关方法,分别进行了28d和90d的混凝土轴向抗拉强度试验,结果见图4。

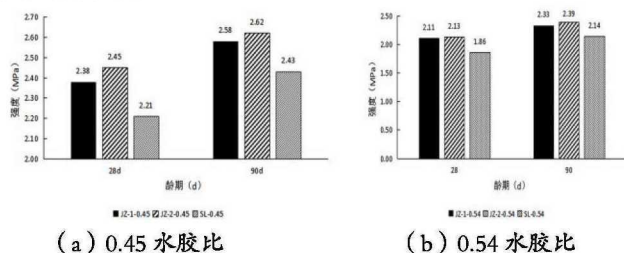


图4 轴向抗拉强度试验结果

由图4可以看出:

(1) 水胶比相同,对5~31.5mm粗骨料级配进行优化后,轴向抗拉强度均会得到一定的提高,水胶比为0.45,粗骨料优化后混凝土28d和90d轴向抗拉强度分别提升2.9%和1.6%;水胶比为0.54,粗骨料优化后混凝土28d和90d轴向抗拉强度分别提升9.5%和2.8%;

(2) 水胶比相同时,采用建筑优化粗骨料代替水利粗骨料配制混凝土,其轴向抗拉强度有所提升,水胶比为0.45,

粗骨料优化后混凝土28d和90d轴向抗拉强度分别提升10.9%和7.8%;水胶比为0.54,粗骨料优化后混凝土28d和90d轴向抗拉强度分别提升14.5%和11.7%,这是因为,粗骨料的粒径越大,比表面积越小,其与水泥砂浆的粘结性能越差,故轴向抗拉强度会随着粗骨料粒径的增大而降低。

#### 三、结论

(1) 粗骨料级配对混凝土的力学性能存在一定影响,粗骨料级配优化后,混凝土力学性能会有一定的提高,因此在工程应用中,应对所用的粗骨料进行级配优化,以使得混凝土具有较好的力学性能;

(2) 粗骨料粒级对混凝土的力学性能存在一定影响,建筑粗骨料代替水利粗骨料用于水利工程中,水胶比和坍落度一致时,在一定程度上可以提高混凝土的力学性能。但由于胶凝材料用量有所提高,在进行大体积混凝土施工时,其混凝土内部温升同样会有所提高,故应防范由于混凝土内外温差过大而导致混凝土的开裂。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部.普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ52-2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 中华人民共和国水利部.水工混凝土施工规范: SL677-2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [3] 张成银, 郑继, 刘长顺.建筑粗骨料应用于水利工程中的试验研究探讨[J]. 中国水运, 2021, (9): 104-106.
- [4] 杜敏, 金浏, 李冬等.粗骨料粒径对混凝土弯拉强度尺寸效应的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 912-918.
- [5] 刘东.粗骨料品质度高强混凝土性能影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [6] 廖太昌.粗骨料颗粒级对混凝土质量的影响[J]. 铁道建筑技术, 2011, (11): 43-46.
- [7] 封培然, 张超.粗骨料最佳级配的试验研究[J]. 2020, (3): 8-12.
- [8] 苏捷, 方志, 杨钻.混凝土弯拉强度尺寸效应的试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 62-65.
- [9] 王付刚, 张全贵, 田玲香等.石子形态及级配对新拌混凝土性能影响研究[J]. 混凝土世界, 2019, (120): 54-57.
- [10] 中华人民共和国水利部.水工混凝土试验规程. SL/T352-2020[S]. 中国水利水电出版社, 2021.

(上接第116页)

#### 参考文献

- [1] 世界卫生组织: 全球三分之一的人无法获得安全饮用水[J]. 中国卫生政策研究, 2019, 12(7): 58.
- [2] 王峰, 徐静.水库调度中隐式与显式随机优化方法的对比[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(6): 61-63.
- [3] 安爱民.基于预测控制的先进过程控制技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [4] 罗成鑫.考虑径流随机性的水库防洪优化调度模型与求解方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [5] 莫淑红, 段海妮, 沈冰等.考虑不确定性的区间多阶段随机规划模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(12): 1427-1434.