

多重动态规划法在柘林水电站安全及经济运行中的应用

袁世斌 ,常 黎

(华中科技大学水电与数字化工程学院 湖北 武汉 430074)

摘要 :针对柘林水电站实际的安全及经济运行问题 ,采用多重动态规划模型进行模拟并详细介绍求解步骤 ,通过求解模型获得电站内各台机组在给定日负荷计划下的最佳负荷运行分配方案 ,实际应用表明 ,本文方法不仅能有效地解决柘林水电站的安全及经济运行问题 ,而且能够显著提高电站的管理水平 .

关键词 水电站 ;安全经济运行 ;动态规划 ;多重动态规划

中图分类号 :TV737 ;O221.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2004)05-0048-04

动态规划是一种枚举搜索方法 ,它是解决多阶段决策过程最优化问题的方法 .动态规划法可较好地处理空间最优化及时间-空间优化问题 .根据各水电站实际情况的不同 ,动态规划法的应用也体现灵活性 .本课题研究的内容为 :在满足电力系统调度要求的前提下 ,在给定负荷计划(日负荷曲线)以及开停机台数确定的情况下 ,科学地安排水电站发电设备的运行方式 ,以保证各类发电设备安全、可靠地运行 ,最大程度地延长设备的使用寿命和获得尽可能大的发电效益 .

1 经济运行最佳负荷分配概述

水电站厂内机组负荷分配常用的优化准则为 :在电厂总出力一定的条件下 ,通过最优负荷分配使总耗水量最小 .数学模型如下 :

$$\begin{aligned} \text{Object } Q &= \min \sum_{i=1}^N Q_i(P_i) \\ \text{s.t. } P &= \sum_{i=1}^N P_i \\ P_{i\min} &\leq P_i \leq P_{i\max} \\ P_{\min} &\leq P \leq P_{\max} \\ P_i &\leq P_{zi\min} \text{ 或 } P_{zi\max} \leq P_i \end{aligned}$$

式中 : P 为电厂给定总出力 ; Q 为相应于电厂给定总出力的总耗水量 ; P_i 为第 i 台机组出力 ; Q_i 为第 i 台机组引用流量 ; N 为机组总台数 ; i 为机组编号($i = 1, 2, \dots, n$) ; $P_{i\min}, P_{i\max}$ 分别为各台机组出力的最小值和最大值 ; $P_{\min}, P_{\max}$ 分别为电站总的最小和最大出力 ; $P_{zi\min}, P_{zi\max}$ 分别为机组 i 的负荷振动、汽蚀

区的下界和上界 .

决策变量 P_i 在其可行域之内 ,必须避开非稳定区 .目标函数是使总工作流量最小 ,采用从流量上予以惩罚来避开振动区(振动区的范围可以根据机组的稳定特性确定) :令 $Q_i(P_i) = Q_i(P_i) + \Delta Q$, ΔQ 为惩罚流量值 .在以总工作流量最小为目标时 ,不会取落到振动区内的决策 ,从而确保机组的安全运行 .

2 多重动态规划模型

柘林水电站有 A、B 两厂 .A 厂有 4×45 MW 的混流式机组 ,B 厂有 2×120 MW 的机组 .作为系统的调频、调峰和事故备用电站 ,其出力要求随时适应系统调度的需要 ,同时保证机组安全、可靠运行并获得尽可能大的经济效益 .

柘林电站的特殊性体现在以下几方面 :机组台数较多(6 台) ,水头(26.5 ~ 45 m) ,出力变化范围较大 ,直接用动态规划法对 6 台机组进行开停机组合及负荷分配 ,所耗计算机资源较大 ;A 厂单机最大出力与 B 厂单机容量相差较大 ,不适于采用同一功率步长 ,B 厂机组振动区范围较大 ,通常 80% 以下的出力区振动剧烈 (如果仅有 1 台小机组、2 台大机组参与负荷分配 ,大机组可能会在振动较强的区域运行) .结合柘林电厂的特殊性宜采用多重动态规划模型 ,步骤如下 :

- a. A 厂为 4×45 MW 的混流式机组 ,B 厂为 2×120 MW 的机组 .将 A、B 两厂等效为两台大机组 A、B .
- b. 分别对 A、B 厂内的机组用动态规划模型进

作者简介 :袁世斌(1979—) ,男 ,四川珙县人 ,硕士研究生 ,从事水电站发电设备状态检修研究 .

行负荷分配,然后以机组水头为参数计算 A、B 两厂的经济运行总表。

c. 在 A、B 两台“机组”间再进行最佳负荷分配,从而求得总水电站的以机组水头为参数的经济运行总表。

d. 根据日负荷曲线,首先在两台大机组间进行空间负荷分配,得到 A、B 两台大机组各自的日负荷曲线(第一重动态规划);然后根据各自的经济运行总表,在 A、B 各厂内分别进行负荷的时间、空间优化分配(这一步为双重动态规划)。

在计算 A 厂的经济运行总表时以 2.5 MW 作为功率分段步长, B 厂以 5 MW 作为功率分段步长,计算 A、B 两厂总经济运行表时以 5 MW 作为功率分段步长。将功率根据实际情况离散化,既保证了计算精度的要求,又有效地减少了原始数据量,降低了计算时间。除了功率离散化外,以 0.5 m 作为分段步长,将水头也离散化。

3 采用动态规划法进行机组空间负荷分配

3.1 空间负荷分配的递推公式

由动态规划法编制水电站最优流量特性的过程,即利用动态规划法递推算法,以 $j = 1, 2, \dots, k$ 为计算阶段号,按机组台数和水电站负荷由小到大,逐阶段递推计算相应的最优流量 $Q_j^*(P_j, H)$ 的过程。以下是按动态规划法最优化原理建立的递推计算式。

$$Q_j^*(P_j, H) = \min[Q_{ij}(P_{ij}, H) + Q_{j-1}^*(P_j - P_{ij}, H)]$$

$$(j = 1, 2, \dots, k \leq n; i = 1, 2, \dots, m)$$

$$Q_1^*(P_1, H) = \min[Q_{i1}(P_{i1}, H)]$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

式中: Q_j^*, Q_{j-1}^* 分别为第 j 阶段与第 $j-1$ 阶段优化时,即工作机组台数 $k = j$ 和 $k = j-1$ 时的水电站最优引用流量; P_j, P_{j-1} 分别为相应的水电站出力; Q_{ij}, P_{ij} 分别为第 j 阶段优化时投入的第 i 台机组引用流量与出力; Q_1 和 P_1, Q_{i1} 和 P_{i1} 分别为第一阶段优化时的水电站最优引用流量和相应的负荷,以及在该阶段投入的第 i 台机组引用流量和其相应的出力; H 为机组段水头,是 $Q_j^*(P_j, H)$ 的参变数。

3.2 动态规划法的步骤

首先,在机组段水头变化范围内取若干值并以步长 ΔP 将水电站负荷 P_k 在其变化范围内分级离散为若干值 $P_{km} (m = 1, 2, \dots, M)$,然后对每个 H_c 按 $k = j = 1, 2, \dots, n$ 和 P_{km} 由小到大的顺序逐阶段优化,求得与之对应的 Q_j^* 和 P_{ij}^* ,并标明与 P_{ij}^* 相应的机组实际编号 i 。由此得到不同水头下的水电站最

优流量特性 $Q^*(P, H)$,列于最优负荷分配表中,并存入数据库。动态规划法流程见图 1。

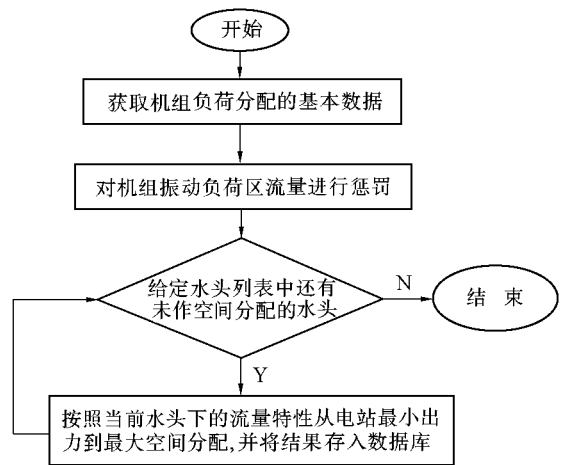


图 1 动态规划法流程

4 采用动态规划法进行机组组合优化

用动态规划法求解水电站厂内经济运行的机组组合问题时,整个调度期间 T 被分成若干个时段,每个时段即动态规划过程中的一个阶段。各阶段的状态即为该时段所有可能的机组开停状态组合。从初始阶段开始,由前向后计算到达各阶段各状态的累计费用,再从最后阶段累计耗流量最小的状态开始,由后向前回溯,依次记录各阶段使总的累计费用最小的状态,这样就可得到最优的开停机方案。在计算运行所需的耗流量时,需使用负荷经济分配算法。

首先定义在动态规划法应用过程中所用到的几个主要数据结构(以 A 厂 4 台机组, $\text{timseg} = 24$ 个时段为例):

```
node :array[ 0..timseg, 1..15 ] of unitstate ;
road :array[ 1..timseg, 1..15, 1..15 ] of real ;
```

其中 $\text{road}[t][i][j]$ 表示第 t 阶段从第 i 个状态节点到第 j 个状态节点的支路的权值, $\text{inod}[t][i]$ 表示第 t 时段第 i 个节点。Unitstate 是一个自定义的结构,用来记录节点在动态规划遍历过程中的一些过程量。其形式如下:

```
type
```

```
unitstate = record
```

```
state :integer //相应的机组组合代号
```

```
qmin :real //从初始节点出发到该节点的最优路径的代价
```

```
prior :integer //从初始节点出发到该节点的最优路径中的前一节点
```

```
ptotal :real //该时段的日调度负荷
```

```
end ;
```

利用上述数据结构,按照以下步骤即可实现动

态规划的机组组合优化。

a. 根据给定的日负荷曲线确定每个时段的可能机组组合。假设某一时段 t_1 调度给定的负荷为 p_{t_1} 结合水电站各台机组的最大开机容量 p_{imax} 确定哪些机组组合可满足 p_{t_1} 的负荷要求。假设： $p_{1max} + p_{2max} + p_{3max} \geq p_{t_1}$ 。

那么(1110)这种组合为该时段的一个可行组合。(1110)表示1~3台机组开机,第4台机组停机。同理可确定所有时段的可行组合,并将每一个可行组合作为相应时段的一个状态节点。采用这种方式,既满足了水电站旋转备用容量的约束,又减少了状态点,降低了计算量。

b. 计算每一条支路的权值。在确定了机组组合之后,就可以根据空间负荷分配的最优表查值或插值(查值无法找到的情况下),求出任一时段相应的日负荷 N_d^t 要求下,采用相应节点的机组组合的耗水量 Q_{ti} 。

在这一步中的查值和插值操作根据最优化原理的一个推广定理:

$$\text{设 } N^0 = [N_1^0 \quad N_2^0 \quad N_3^0 \quad \dots \quad N_n^0]$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^n N_k^0 = N$$

为负荷 N 在 n 台机之间的最优分配策略向量。对于电厂负荷 N^a 定义

$$\pi^a N^0 = [\pi_1^a N_1^0 \quad \pi_2^a N_2^0 \quad \dots \quad \pi_n^a N_n^0]$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^n \pi_k^a N_k^0 = N^a$$

这里 $\pi^a N^0$ 对于 N^a 是一个最优策略(向量)。可按如下步骤进行:

若发电厂的负荷是 $N^a = J_0$, 那么可以按照下述步骤将负荷 N^a 在不包含 l, m 号机的机组之间实行最优分配 ①在最优负荷表中,先选定总负荷为 J 的最优负荷分配方案。②计算 $J_1 = \sum_{k=1}^n N_k(J, k) \quad k \neq l, m$ 。③若 $J_1 = J_0$ 则 $N_{(k)}^a = N_k(J, k) \quad k \neq l, m$ 若 $J_1 < J_0$ 则 $J = J + 1, J_2 = J_1$ 转②;若 $J_1 > J_0$ 则可进行下面的两点线性插值,以求得各机组的负荷 $N_{(k)}^a$,

$$N_{(k)}^a = N_k(J, k) - \frac{N_k(J, k) - N_k(J-1, k)}{J_1 - J_2} (J_1 - J_0)$$

式中: $N_k(J, k)$ 表示最优负荷分配表中在总出力为 J 时,第 k 台机组分配的负荷。这样各机组所承担的负荷即可求出,相应的流量也就得到了。

于是每一条支路的权值就可以通过下式加以计算:

$$W_{ij} = Q_p + Q_{\text{onoff}}$$

式中: Q_p 为路径图中第 j 个节点的机组组合下分配总负荷 p 的最小耗流量; Q_{onoff} 为从第 i 节点的机组组合到第 j 节点的机组组合的开、停机流量损失。对于日调节水库的水电站,各时段间水头变化一般来说都较大,必须考虑各个时段水头变化。根据柘林电站的特点(下泄流量引起下游水位变化的过渡过程较短,上游水位短期内变化不显著可认为恒定)可近似认为水头变化就由该时段的下泄流量决定。现有的水电站经济运行资料表明,水电站厂内经济运行的效益为 0.5% 到 3.0%,也就是说,不同机组组合下的经济运行方案结果的偏差很小。基于这种事实,首先计算各水头下(离散化处理后的水头)所有机组均可开时的经济运行总表。此表反映的是水头 (H)、电站出力 (P) 与流量 (Q) 的对应关系。引入下库水位与下泄流量的关系表 $Z_{\text{下}}-Q$ ($Z_{\text{下}}$ 为下库水位) 根据 $Z_{\text{上}} = H + Z_{\text{下}}$ 将 $H-P-Q$ 表转换为 $H-P-Z_{\text{上}}$ 的关系表。当 $Z_{\text{上}}$ 和 P 确定后,对 $H-P-Z_{\text{上}}$ 表采取查值、插值的方法,确定出计算参考水头 H_1 。根据 H_1 对总厂 $H-P-Q$ 表查值、插值得出分配到 A、B 两厂的负荷,再在 A、B 厂内进行负荷分配,得到各台机组的流量,相加得总流量 Q ,从而获得下库水位 $Z_{\text{下}}$ 。实际水头 $H_2 = Z_{\text{上}} - Z_{\text{下}}$ 。($H_2 - H_1$)/ H_2 一般在 1.74% ~ 2.82% 以内,证明采取这种方法确定未来各个时段的水头是可行的。

计算支路的权值时,根据计算参考水头 H_1 ,在 A 厂的 $H-P-Q$ 表中采用查值和插值的方法计算出该时段各状态节点的耗水量。这样,算出任一时段任一节点的耗水量之后,再根据权值公式计算出各支路的权值。

c. 搜索最小路径。运用动态规划法,先按顺序从初始时段出发,搜索到下一时段各个状态节点的最小支路,并将搜索得到的结果保存。在所有节点都遍历完毕之后,再按照逆序,从最后一个时段出发,求出所耗代价最小的那个状态节点,并按照在顺序遍历过程中所记录下来的 prior 记录得到其前一时段的状态节点,这样逐时段反推,就可以得到相应的最优路径。

d. 根据得到的最优路径,求出各时段下各机组的开机所带负荷,并得到最小流量损耗。

上述过程实现的流程见图 2。

5 成果检验

选取柘林电厂 4d 的日运行资料(每天 24 时段),对于某一时段,在计算实际出力时,由实际入库流量和水头并参考该时段机组流量分配计算各机组的出力,然后求和得实际总出力;在同样的水头和入库流

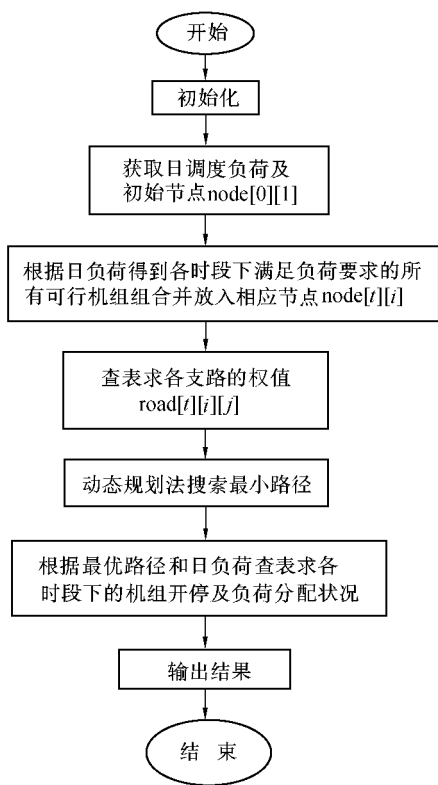


图2 厂内安全及经济运行计算流程

量下运用多重动态规划模型进行负荷分配,计算总出力,经过比较,偏差不超过2.21%,并且在确保两台小机组可开的情况下,B厂机组也避开了运行在振动强烈的区域,这证明了采用多重动态规划法对于解决柘林水电站厂内安全、经济运行的可行性。

表1 计算成果检验

日期	最佳分配负荷 (多重动态规划) (万 kW·h)	实际运行负荷 (万 kW·h)	偏差 /%
2003-04-02	415.43	412.11	0.80
2003-07-04	725.32	723.15	0.29
2003-08-21	549.47	546.18	0.58
2003-09-07	512.31	507.71	0.89

参考文献：

- [1] 张勇传. 水电系统最优控制[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. 1~60.
- [2] 张勇传. 水电站经济运行原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 124~143.
- [3] 张俊华, 鄢建华. 中小型水电站的优化运行和管理[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983. 13~189.
- [4] 姚齐国, 张士军, 蒋传文, 等. 动态规划法在水电站厂内经济运行中的应用[J]. 水电能源科学, 1999(3): 46~49.

(收稿日期 2003-12-10 编辑 高建群)



水信息网全新改版 海量信息与您分享

水信息网(<http://www.hwcc.com.cn>)于1999年正式开通,是水利行业运作较成熟的知名门户网站。水信息网开通五年来,一直秉承建设水利人的网上家园的宗旨,综合应用网络多媒体技术优势,充分开发水利行业各类资源,实时提供水利综合资讯,如今已发展成为水利行业骨干网站之一。其建网模式为后来成立的水利网站提供了诸多有益的借鉴和参考。

全新的水信息网是第五次改版的结果。改版后的水信息网采用1024浏览器风格,页面以水信息网富有代表性的绿色为主色调,同时增大了首页的信息量,使网站的表现力更强,内容更丰富。主要内容有:

海量水事——全国水事,一网打尽。结合各省、市不同的水利特点,开设地方水利板块,可分省浏览各地的水利信息。

技术之家——学者荟萃,注重原创。在学者之家和技术频道开设学者交流栏目,针对当前技术难点和热点问题共同探讨。

国际关注——关注各国水事动态,展示有特色的各国水事专题。

文化气息——溯水利之源,寻水利之根,挖掘与水相关的人文、地理、典籍等内容,纵横联阖,展示水之博大,从历史人文的角度宣传“大水利”概念。

信息化专栏——分类整理全国水利信息化内容,及时报道全国水利信息化工作进程。

商务信息——以水利招投标信息、招生招聘信息、商务会员等特色信息服务于行业或企业,为全国水利企业提供良好的商务平台。

水利图片——邀请众多水利行业的优秀摄影家来水信息网做客,畅谈采风感受,切磋摄影技艺,让摄影家的相机记录下美丽的感动,让瞬间成为永恒。

全新的水信息网将水利行业信息一网打尽。如果您有需要,请点击水信息网:<http://www.hwcc.com.cn>。
地址:天津市河东区龙潭路15号,电话:022-24102110, E-mail: news@hwcc.gov.cn. (水信息网供稿)