

梯级水电站群调度函数的模型与评价

纪昌明¹, 苏学灵¹, 周 婷², 黄海涛¹, 王丽萍²

(1. 华北电力大学工商管理学院, 北京市 102206; 2. 华北电力大学水文学及水资源研究所, 北京市 102206)

摘要: 针对梯级水电站群实际运行的优化调度指导需求,在多元线性回归算法基础上引入 F 检验和拟合优度检验判别机制,建立了基于梯级水电站优化调度的调度函数逐步优化算法,并将该算法应用于金沙江—长江大型梯级电站系统调度函数制定中,通过时间因子、空间因子和能量因子 3 类待选自变量的合理筛选,构建出具有指导梯级运行意义的梯级各电站优化调度函数。该函数形式简洁,具有良好的可操作性和可解释性。将用调度函数模拟梯级运行结果与同系列优化调度结果进行比较分析,结果表明调度函数指导梯级运行较好地保留了优化调度的各方面效益,具有较高的模拟精度和实用价值。

关键词: 调度函数; 多元逐步回归; 实时运行模拟; 梯级水电站

0 引言

水电站优化调度模型解决了径流已知前提下的水电站优化调度问题,然而大部分优化模型难以直接指导径流未知情况下的水电站实际运行。研究水库调度函数,就是为了寻求水库某一决策变量(如出力、发电流量等)与其相关因子的函数关系,建立电站调度函数,达到指导电站实际运行的目的^[1]。

在梯级水电站的现行实际调度运行中,最常用的方法是通过调度图指导水库运行,调度图的优点是简明可靠易操作,物理意义明确,但是由于调度图基于常规调度制定,往往决策相对保守,难以充分发挥电站的效益空间。近年来随着智能算法的兴起,一些学者提出了以神经网络、遗传算法等途径得到水库调度函数,用以解决水库实时调度问题^[2-4]。但是智能算法用以指导水库运行存在以下方面的问题:

1) 直观性、可操作性难以满足调度部门要求,有些智能算法(如遗传算法、大系统分解法)需基于径流已知条件,故不能指导水库实时运行,而且基于“黑箱理论”的调度函数可解释性不强。

2) 对样本依赖性强。网络的逼近、推广能力与学习样本的典型性密切相关,当样本发生改变或有新样本加入时,相应的决策变幅较大。

3) 网络的预测能力(泛化能力、推广能力)与学习能力存在矛盾。一般情况下,随着训练能力的提高,预测能力也提高。但这种趋势达到极限时,随着训练能力的提高,预测能力反而下降,即出现所谓

“过拟合”现象。此时,网络学习了过多的样本个体细节,而不能反映其真正的普适性规律,再用以指导实际运行往往结果不够理想。

由于水库面临时段的出力与其当前库水位、当月来流等因素有密切的关系,并且统计显示,这种关系经证明可看做是线性的^[5],所以本文基于多元线性回归的方法来制定水库的调度函数,以此指导水库的调度运行,并通过对长系列径流的发电过程模拟,验证和评价调度函数,用以指导水库实际运行的效果。与传统调度图方法相比,调度函数在指导水库运行时更加完整地继承了优化调度在发电量、保证出力和水库利用率等方面的效益;与智能算法相比,调度函数更加直观、简便,函数的可解释性强,同时对调度函数的结构分析有助于深化对优化调度原理的理解。

1 调度函数决策变量与相关因子的选择

根据优化调度模型结构及其求解过程,调度函数的决策变量(输出因变量)可以是时段的平均下泄流量或出力,也可以是时段末的水库蓄水量或库水位。大量实践经验表明:从调度函数的有效性检验结果看,以时段末的水库蓄水量为决策变量较好;从调度决策的直观、简单、方便考虑,以时段平均放水流量或出力为决策因子较好;当放水流量中含有综合用水量时,则可以取时段平均放水流量为决策变量^[6]。

在回归拟合计算中,初选相关因子是至关重要的。本文所采用的相关因子可以分为时间因子、空间因子和能量因子 3 类。时间因子是指该水库当前所处的状态(包括蓄水量和入库流量);空间因子是

指与该水库有联系的其他水库所处的状态;能量因子由水库的时间或空间状态所能提供的电能来确定,能量因子在以出力为决策变量时发挥了重要作用。

在模型的建立和求解过程中,时段初的水库水位 Z_t 和入库流量 Q_t 无疑是影响决策大小的 2 个重要因子。但是由于入库流量与时段初水位的量纲不同,而且入库流量转化为库水位是一个非线性过程,其相关关系取决于水库的库容曲线,导致在某些情况下拟合效果不是很理想,因此,本文对入库流量 Q_t 作进一步处理,即假设在时段初水位的基础上将当月来流全部蓄至水库所能达到的叠加水位,记为 $Z_{a,t}$ 。时段水库叠加水位由下式得到:

$$Z_{a,t} = \phi(V_t + Q_t T) \quad (1)$$

式中: ϕ 为运算符,代表通过库容曲线由库容求得库水位的插值计算; V_t 为 t 时段的水库库容; T 为 1 个月的长度,这里取 $T=2\ 628\ 288\text{ s}$ 。

可见,叠加水位 $Z_{a,t}$ 既包含了时段初水位特征,又包含了当月入流特征,同时规避了流量与水头之间的非线性关系,对水库的状态描述更加全面,有助于提高拟合效果。

能量因子以水库入能 $E_{i,t}$ 和蓄能 $E_{i,s}$ 为代表。入能 $E_{i,t}$ 的含义是假设水库面临时段初末蓄水状态不变的情况下,当前时段的入库流量理论上可提供的发电量。水库 i 在 t 时段天然来流量 Q_t 的入能 $E_{i,t}$ 为:

$$E_{i,t} = 9.81\eta Q_t \bar{h}_1(i,t) T_h \quad (2)$$

式中:

$$\bar{h}_1(i,t) = \phi(V_t(t)) - \varphi(Q_t) \quad (3)$$

η 为发电效率; T_h 为单位时段长度,这里取小时; φ 为运算符,代表由下游流量关系曲线求得下游水位的插值计算; $\bar{h}_1(i,t)$ 为水库 i 在 t 时段的发电水头。

蓄能 $E_{i,s}$ 的含义为水库在 t 时段内由时段初水位消落至死水位理论上所能产生的发电量,它代表 t 时段初蓄水状态下在理论上所能提供的最大发电量。水库 i 在 t 时段初的蓄能 $E_{i,s}$ 为:

$$E_{i,s} = 9.81\eta(V_t - V_0)\bar{h}_2(i,t) \quad (4)$$

式中:

$$\bar{h}_2(i,t) = \varphi\left(\frac{V_0 + V_t}{2}\right) - Z_0 \quad (5)$$

$\bar{h}_2(i,t)$ 为水库 i 在初蓄状态具有的平均水头; Z_0 为下游常水头,即下泄流量为 0 时对应的下游水头。

此外,由于优化调度目标以整个梯级作为对象,因此,单个电站尤其是龙头电站和调节性能强的电站,其调度决策与梯级系统的蓄能和总入能密切相关,有必要将系统的时段初蓄能及系统入能 $E_{f,sys}$ 纳

入待选相关因子范围内。进一步分析发现:对于时段初蓄能大但入能比较小的时段,与时段入能大但蓄能比较小的时段,寻优过程中可能作出相同的决策,也就是说二者交互项也可作为相关因子,考虑到由于二者之和与二者分别线性相关,作为独立的变量对拟合效果无意义,因此这里的交互项取为二者乘积,记为 $E_{i,s}E_{i,t}$ 。

综上,模型确定的待选相关因子(自变量)有:面临时段初的库水位、叠加水位,电站蓄能、系统蓄能、系统蓄能平方;面临时段的电站入库流量、电站入能及系统入能,以及蓄能与入能的交互项。

2 多元逐步回归原理求解调度函数

上述相关因子构成了调度函数待选自变量系列,但在任何一个时段,并非所有的相关因子都同时对决策变量存在显著相关性,若采用全变量回归法进行拟合,即各时段调度函数形式相同,仅系数不同,必然会降低调度函数的整体拟合优度,大大增加误差范围,因此这里存在着如何挑选出对因变量有显著影响的自变量问题。 m 个自变量的所有可能子集可构成 $C_m^1 + C_m^2 + \dots + C_m^m = 2^m - 1$ 个回归方程。当待选自变量数目不太多时,可用多元回归方法求出所有回归方程,再用几个选元准则挑出最优方程;但是当自变量数目较多时,这种方法是不现实的。逐步回归分析正是针对这种诉求提出来的一种逐步筛选自变量的回归方法。它的主要思路是在考虑的全部自变量中按其对 y 的显著程度(贡献)大小,由大到小地逐个引入回归方程,同时,已被引入回归方程的变量在引入新变量后也可能失去重要性,而需从回归方程中剔除出去。引入或者剔除变量的每一步都要进行 F 检验,以保证新变量组合始终在提高调度函数的拟合优度^[7]。

设因变量 y 与自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的总体线性回归模型为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (6)$$

同样,多元线性样本回归方程为:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k \quad (7)$$

式中: $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ 分别为 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 的估计值。

多元线性回归方程中回归系数的估计采用最小二乘法。由残差平方和:

$$S_{SSE} = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (8)$$

根据极小值原理, S_{SSE} 存在极小值,并且欲使 S_{SSE} 达到最小, S_{SSE} 对 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 的偏导数必须等于 0。将 S_{SSE} 对 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 求偏导数,并令其等于 0,整理后可得到 $k+1$ 个标准方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial S_{SSE}}{\partial \beta_0} = -2 \sum (y - \hat{y}) = 0 \\ \frac{\partial S_{SSE}}{\partial \beta_i} = -2 \sum (y - \hat{y}) x_i = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

通过求解这一方程组,便可分别得到 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$, 实际求解回归系数的估计值,从而得出多元回归方程。

以上是多元线性回归的计算原理,也是逐步回归方法的基础。

逐步回归的具体计算原理如下:

1) 引入回归方程的第 1 个自变量。运用上述最小二乘法回归原理,将因变量 y 与每一自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 作一元回归,并分别计算因变量 y 对每一自变量的 F 统计量,以此作为引入或剔除变量的标准。

对任一实际样本,观测值 y 与样本均值 $\bar{y}$ 及因变量的预测值 $\hat{y}$ 有以下关系式:

$$y - \bar{y} = (\hat{y} - \bar{y}) + (y - \hat{y}) \quad (10)$$

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2 + \sum (y - \hat{y})^2 \quad (11)$$

式中: $\sum (y - \bar{y})^2$ 为总离差平方和 S_{SST} ; $\sum (\hat{y} - \bar{y})^2$ 为回归平方和 S_{SSR} ,即回归方程可以解释的误差部分; $\sum (y - \hat{y})^2$ 为残差平方和 S_{SSE} ,即回归方程无法解释的误差部分。

为检验因变量与所有自变量之间的线性关系是否显著,计算 F 统计量:

$$F = \frac{\frac{S_{SSR}}{k}}{\frac{S_{SSE}}{n-k-1}} = \frac{\sum \frac{(\hat{y} - \bar{y})^2}{k}}{\sum \frac{(y - \hat{y})^2}{n-k-1}} \quad (12)$$

可见, F 统计量越显著,表明回归方程中可解释的误差所占比例越高,方程拟合优度越好。因此,将 F 统计量最大的自变量首先纳入回归方程,作为回归方程的第 1 个自变量。

2) 逐步筛选自变量。首先计算已纳入方程组的各自变量的偏回归平方和 V' 。由上文已知, n 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的回归平方和为 S_{SSR} ,如果从 n 个自变量中去掉 x_i ,则剩下的 $n-1$ 个自变量的回归平方和设为 S_{SSR}' ,并设:

$$V_i = S_{SSR} - S_{SSR}' \quad (13)$$

可见, V_i 能够代表变量 x_i 在回归平方和 S_{SSR} 中的贡献,称为 x_i 的偏回归平方。可以证明,偏回归平方和 V_i 越大,说明 x_i 在回归方程中越重要,对 y 的作用和影响越大^[8]。

检查已引入的自变量中是否有需要剔除的不显著变量。在已引入的变量中选取 V' 最小的一个并

计算其 F 统计量,若 F 检验拒绝,则表示该变量不显著,将其从回归方程中剔除;若 F 检验接受,则不需要剔除变量,同时考虑从未引入的待选变量中选出具有最大 V' 值的一个并进行 F 统计量检验,若检验通过,则表示该变量显著,应将其引入回归方程,若拒绝,则表示已无变量可选入方程,逐步计算阶段结束。

3) 逐步回归计算终止的条件为:已引入方程的自变量均能够通过 F 检验,同时,未被引入方程的自变量均不满足 F 检验,即当已无变量可剔除且又无变量可引入时,则最优自变量组合确定,逐步回归计算方告结束。

由上所述,逐步回归计算的每一步总是先考虑剔除变量,仅当无剔除时才考虑引入变量,因此,在待选自变量确定的情况下,逐步回归计算能够通过逐步比较,建立拟合效果最优的回归方程。

3 实例研究

本文方法应用于金沙江上游至长江中游 13 座水电站优化运行方式研究课题中。整个系统包括 5 座有调节性能的电站和 8 座无调节性能的电站,其中龙头电站其宗位于金沙江上游河段,具有多年调节性能,其调度决策将影响金沙江中下游直至长江三峡、葛洲坝整个梯级的运行状况,其下游还有乌冬德、白鹤滩、溪洛渡、三峡 4 座调节性能良好的电站配合梯级运行。系统装机规模庞大,调节性能强,因此,如何在实际运行中作出科学、合理的调度决策,充分发挥系统的经济效益和社会效益,是一个很有意义的课题。

本文首先基于逐步优化算法(POA)对其宗—葛洲坝电站 1953 年—2001 年间来水资料计算出长系列优化调度结果,在此结果基础上运用逐步回归法计算梯级各电站月度调度函数。调度函数决策变量依据上文分析,定为出力 N 或时段末水库水位 Z 。在计算过程中发现,对于大多数月份,以出力 N 为决策变量的拟合精度较高,但是对于个别月份,以其宗电站为例,供水期末(5 月)水库绝大部分年份都会在月末水位消落至死水位 2 065 m,以腾空库容迎接汛期;同理,在汛末(10 月)绝大部分年份水库会蓄至正常蓄水位 2 150 m。因此,针对以上月份的自身特征,选择末水位 Z 作为决策变量更为合理。调度函数相关因子及系数通过逐步回归算法来筛选确定,以其宗电站为例,调度函数形式和具体参数如式(14)和附录 A 表 A1 所示。

$$N(Z) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m \quad (14)$$

由附录 A 表 A1 可以看出,不同月份运用逐步回归法所确定的相关因子组合是不同的,说明对于不同的月份影响其调度决策的因子不尽相同,这也是逐步回归法筛选自变量的体现。附录 A 表 A1 中,决策变量的选择也体现了水库运行的特征,在汛末和供水期末采用特征水位(正常蓄水位和死水位)进行控制;最后一行是对各变量被引用频率的统计。由统计频率可看出,当月入库流量 Q_t 是最终被引用频率最高的,符合优化调度原理,即无论采用何种寻优方式,所得到的优化调度决策与时段发电决策关系最大的还是时段入库流量,因此在相关因子中所占权重最高。对其余因子的频率分析也可以反映出优化调度模型的发电特征,从而证明了逐步回归调度函数所体现出的良好的可解释性。

用上述调度函数指导电站的实际运行,其各方面效果须通过长系列运行模拟资料来评价。因此,本文进一步基于同期径流资料,采用所建立的调度函数对其宗一葛洲坝梯级进行指导运行模拟。模拟过程中还须考虑以下几个原则^[9]:

1)当调度函数与电站自身约束发生冲突时,应优先满足电站自身约束。例如,当由调度函数所确定的时段发电过程不满足保证出力、下泄流量或预想出力等约束时,应对决策进行调整,使其落入满足电站自身各约束的可行域内。

2)当调度函数与系统保证出力约束冲突时,应优先满足系统保证出力约束。系统保证出力是梯级调度的重要参数,也是衡量梯级电站调度过程优劣的重要指标。程序中对于供水期月份加入系统保证出力约束的迭代模块,其目的是均化供水期各月出力,维持电站的高水头运行,降低发电耗水率,从而达到提高系统保证出力的目的。

3)当电站自身约束与系统保证出力约束冲突时,应优先满足电站自身约束。电站自身的特征水位、预想出力等约束是硬性约束,而系统保证出力在给定保证率前提下允许极少数破坏,因此电站自身约束的优先级别高于系统约束。技术实现的方法是在梯级电站运行模拟约束检验的程序设计中,先检验优先级别低的约束,后检验优先级别高的约束;约束的优先级别越高,其处于程序流程的位置应越靠后,从而避免优先级别较低的约束反而将优先级别高的约束覆盖而导致破坏的情况。

将调度函数、调度规则和注意事项一并纳入模拟算法程序,对于每个时段以调度函数为指导原则,以注意事项为调整原则,以调度规则为约束检验标准,通过模拟运行,得到以调度函数为指导的梯级电

站模拟调度发电过程。

模拟运行程序在 VC++6.0 环境下实现,表 1 为模拟运行与基于 POA 进行优化调度得到的梯级系统多年平均发电量及汛期、枯期发电量对比。

表 1 其宗电站模拟运行与优化调度方案
多年平均发电量对比
Table 1 Electricity power quantity comparison between
simulation operation and optimized operation of
Qizong power station

方案	TW · h		
	年发电量	汛期发电量	枯期发电量
模拟运行	393.8	202.4	191.4
优化调度	394.1	203.2	190.9

由表 1 可看出,其宗电站模拟运行年发电量与优化调度年发电量相差 300 GW · h,占年均总发电量的 0.08%,可见调度函数模拟运行发电量损失很小,模拟效果良好。同时,对比汛期与枯期系统年均发电量,汛期模拟运行方案年均发电量较优化调度减少 800 GW · h,减幅 0.39%;枯期模拟运行方案年均发电量较优化调度增加 500 GW · h,增幅 0.26%。可见,模拟运行方案电站发电量在汛期和枯期分布较为均匀,基本保留了优化调度汛期、枯期发电量的良好比例,提高了电能质量,有利于在电力系统中安排运行。

再将各电站模拟运行方案出力过程相加,统计优化调度和模拟运行的系统出力过程,取 1953 年—1973 年间系统出力为代表,如附录 A 图 A1 所示。

优化调度系统保证出力为 35.86 GW,由附录 A 图 A1 可见,模拟运行结果在供水期基本满足系统保证出力,出力稳定且保证率高,较好地规避了水电由来水季节性导致的丰期与枯期发电量差异的劣势,为梯级在电力系统中的运行创造了良好的条件。

进一步分析龙头电站模拟运行与优化调度的水库运行过程,可以看出,模拟运行水位变化趋势基本与优化调度变化趋势相同,水库蓄满率较高,调节性能发挥充分,在 53 年调度期内破坏年份仅增加 1 年,因此从可靠性角度来说,模拟运行结果是较为令人满意的。

4 结语

本文从统计学角度解释了逐步回归原理,并将其引入水电站调度函数的求解计算中,以金沙江—长江大型梯级电站为研究背景,进行月度调度函数的模型制定。在调度函数相关因子的选择方面,引入了时间因子、空间因子及能量因子作为待选变量,以达到尽量真实反映水电站运行规律的目的。在综

合考虑电站自身发电等约束、综合利用要求及系统保证出力等约束的基础上,采用调度函数对梯级电站进行实际运行模拟,通过对模拟运行结果与优化调度结果在系统发电量及汛期发电量、枯期发电量、发电过程和保证率方面的对比,证明调度函数基本保留了优化调度方案的各方面成果和效益,同时具有良好的可操作性和可解释性,为水电站寻找调度规律、拟定运行指导准则提供了重要的参考。

本文采用的其宗—葛洲坝梯级水电站的相关资料(包括历史来流、水库特征参数、电站发电特征参数、电站综合利用要求数据)全部由中国水电工程顾问集团昆明勘测设计院提供,在此表示诚挚的感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 卢华友,郭元裕.利用多层递阶回归分析制定水库优化调度函数的研究.水利学报,1998,29(12):71-76.
LU Huayou, GUO Yuanyu. Study on applying multi stratum recursive regression analysis to formulate operation function of reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(12): 71-76.
- [2] 缪益平,纪昌明.运用改进神经网络算法建立水库调度函数.武汉大学学报:工学版,2003,36(1):83-89.
MIAO Yiping, JI Changming. Improving neural network algorithm for establishing reservoir operation function. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 83-89.
- [3] 韩志刚.时间序列的多层分析方法初步及应用.黑龙江大学自然科学学报,1985(1).
- [4] 刘攀,郭生练,庞博,等.三峡水库运行初期蓄水调度函数的神经网络模型研究及改进.水力发电学报,2006,25(2):11-15,46.
LIU Pan, GUO Shenglian, PANG Bo, et al. A modified

- approach for deriving storage operating rules of the Three Gorges reservoir with artificial neural network. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 11-15, 46.
- [5] 李承军,陈毕胜,张高峰.水电站双线性调度规则研究.水力发电学报,2005,24(1):11-15,46.
LI Chengjun, CHEN Bisheng, ZHANG Gaofeng. Study on bilinear dispatching rule of hydropower station. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 11-15, 46.
- [6] 丁杰华.水库水电站群长期运行规律研究[D].武汉:武汉大学,2005.
- [7] 黄胜.灰色系统与多元逐步回归耦合模型在年用水量预测中的应用.节水灌溉,2007(5):38-40.
HUANG Sheng. Prediction of annual water-consumed quantity based on coupling model of grey-system and multiple stepwise regression. Water Saving Irrigation, 2007(5): 38-40.
- [8] 康重庆,夏清,刘梅,等.应用于负荷预测中的回归分析的特殊问题.电力系统自动化,1998,22(10):38-41,49.
KANG Chongqing, XIA Qing, LIU Mei, et al. Special issues of regression analysis in load prediction. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 38-41, 49.
- [9] 周晓阳,马寅午,张勇传.梯级水库的参数辨识型优化调度方法(Ⅱ)——最优调度函数的确定.水利学报,1999,30(9):10-19.
ZHOU Xiaoyang, MA Yinwu, ZHANG Yongchuan. The identifying optimal dispatch method for cascade reservoir system (Ⅱ): the optimal dispatch function. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(9): 10-19.

纪昌明(1953—),男,博士,教授,华北电力大学工商管理学院信息系统开发研究所所长,主要研究方向:水资源系统规划、水电能源系统风险评价与管理。E-mail: cmji@ncepu.edu.cn

苏学灵(1962—),男,博士,主要研究方向:水电站在电力系统中的运行方式及管理。

周 婷(1985—),女,通信作者,硕士,主要研究方向:梯级水电站群运行调度及电力市场化运营。E-mail: zhouting02@gmail.com

Model Establishment and Evaluation of Operation Function for Cascade Reservoirs

Ji Changming, Su Xueling, Zhou Ting, Huang Haitao, Wang Liping

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To meet the demand of actual optimized operation guidance for cascade reservoirs, the F-test and the goodness-of-fit test mechanism based on multiple linear regression algorithm are employed. Based on optimized operation result, cascading stepwise optimized dispatch function algorithm is proposed. The proposed algorithm is used to established the optimized dispatch functions for the Jinshajiang-Changjiang River cascade hydropower system. By selecting appropriate time, space and energy factors, the optimized dispatch functions are established with good operability and interpretability. Compared with traditional methods, the proposed algorithm has high simulate precision and practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50609007).

Key words: operation function; multiple stepwise regression; real-time operation simulation; cascade reservoir

附录 A

表 A1 其宗电站月度调度函数

Table A1 Monthly operation function of Qizong power station

月份	决策变量	回归常量	Q_i	Z_i	Z_a	$E_{i, f}$	$E_{i, s}$	$E_{i, fs}$	$E_{f, sys}$	$E_{s, sys}$
6月	N	41.127	0.092					-4.452		
7月	N	-69.695				19.505				
8月	N	-51.825				17.479				
9月	N	-1939.5			9.18			0.168		
10月	Z	2150								
11月	N	-170.768	7.461			-917.008		0.009		
12月	N	287.56	-0.089							
1月	N	-4714.75							-0.148	54.252
2月	N	-251.298	-0.146							3.071
3月	N	-69139.6		25.417	7.933		-44.083			
4月	N	-25725.6	-0.032		12.402			-3.066		-0.171
5月	Z	2065								
变量被引用频数			5	1	3	3	1	4	1	3
频率			41.67%	8.33%	25.00%	25.00%	8.33%	33.33%	8.33%	25.00%

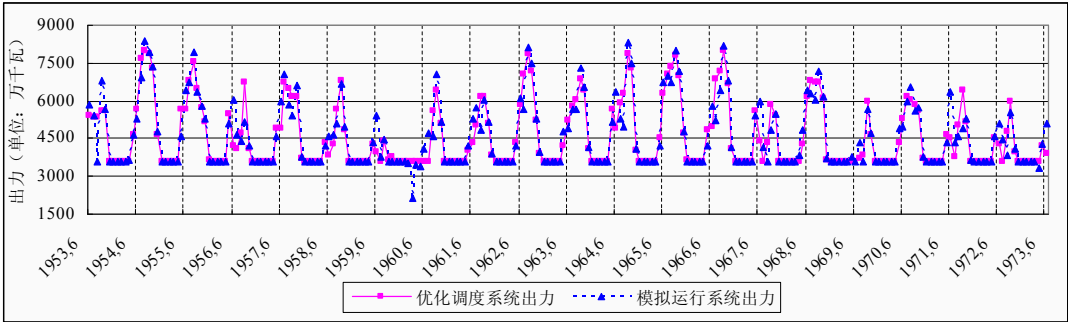


图 A1 1953-1973 年模拟调度与优化调度系统出力过程图

Fig.A1 Output process comparison between simulation operation and optimized operation during the year 1953-1973