

7-30-2020

Energy Saving Control Research on Mine Drainage System Based on Model Predictive Control

Zhiling Ren

Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

Jiahao Han

Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Energy Saving Control Research on Mine Drainage System Based on Model Predictive Control

Abstract

Abstract: Grey model of water inflow in tunnel and time with measuring data and economic model was established after analysis for energy conservation issue of mine drainage system. Using model predictive control, a coal mines pumping water pump scheduling in non-peak periods was establish, executing the simulation of the gray model based on model predictive control and predicting the water inflow at times of peak demand in morning and evening. A load shifting schedule for system was formulated. The result show that the pump scheduling established in non-peak periods based on model predictive control can reduce the cost of electricity effectively while the gray model can predict inflow efficiently based on model predictive control in peak hours so that it can be able to make system to transfer the load accurately. The energy-saving strategies make mine drainage system to reach a highly efficient energy-saving effect and also to meet the water and other constraints.

Keywords

model predictive control, mine drainage system, pump scheduling, energy saving

Recommended Citation

Ren Zhiling, Han Jiahao. Energy Saving Control Research on Mine Drainage System Based on Model Predictive Control[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3032-3036.

基于 MPC 的煤矿井下排水系统节能控制策略研究

任志玲, 韩佳昊

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁葫芦岛 125105)

摘要: 针对煤矿井下排水系统的节能问题, 运用测量的涌水量数据建立了巷道内涌水量与时间关系的灰色预测数学模型, 经过分析确立了系统的经济模型。利用模型预测控制建立了非高峰期的煤矿水泵抽水的调度, 对灰色预测模型执行了模型预测控制仿真, 并且预测了早晚用电高峰时期内的涌水量变化, 最终制定了用于系统削峰填谷的节能策略。结果表明在非高峰期内, 基于模型预测控制确立的水泵调度可以有效地减少用电成本, 而高峰期内, 在模型预测控制的作用下, 灰色预测模型可以对涌水量进行高效地预测, 能够使系统精确地转移负荷。节能策略在使矿井排水系统到达了高效的节能效果的同时也满足了水位等约束。

关键词: 模型预测控制; 煤矿排水系统; 水泵调度; 节能

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 12-3032-06

Energy Saving Control Research on Mine Drainage System Based on Model Predictive Control

Ren Zhiling, Han Jiahao

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Grey model of water inflow in tunnel and time with measuring data and economic model was established after analysis for energy conservation issue of mine drainage system. Using model predictive control, a coal mines pumping water pump scheduling in non-peak periods was establish, executing the simulation of the gray model based on model predictive control and predicting the water inflow at times of peak demand in morning and evening. A load shifting schedule for system was formulated. The result show that the pump scheduling established in non-peak periods based on model predictive control can reduce the cost of electricity effectively while the gray model can predict inflow efficiently based on model predictive control in peak hours so that it can be able to make system to transfer the load accurately. The energy-saving strategies make mine drainage system to reach a highly efficient energy-saving effect and also to meet the water and other constraints.

Keywords: model predictive control; mine drainage system; pump scheduling; energy saving

引言

分时电价下, 多数矿井经常在峰时段进行抽

水, 由于此时的用电需求量大并且电价最高, 导致了煤矿企业消耗了大量电能及成本的同时也使电网的负载陡增, 所以必须制定带有可靠算法的削峰填谷调度来避免该情况。从文献[1]的企业峰谷分时效益模型和文献[2]对企业分时效益的分析可以得知, 高效的削峰填谷方案在削减企业用电成本的同时, 可以精确地将负载从峰时段全部移除至平谷时段, 从而降低输电损耗并节省发电能源以达到合



收稿日期: 2014-07-17 修回日期: 2014-10-02;
基金项目: 国家自然科学基金(51274118); 辽宁省优秀科技人才支持计划(LR2013014);
作者简介: 任志玲(1971-), 女, 辽宁朝阳, 博士, 副教授, 研究方向为控制理论与控制工程; 韩佳昊(1990-), 男, 辽宁鞍山, 硕士生, 研究方向为电力系统自动化技术

<http://www.china-simulation.com>

• 3032 •

理用电的目的。目前,虽然有众多文献采取了多类算法方案对矿井排水系统的节能问题进行过探讨,但却很少有文献讨论过基于模型预测控制算法(MPC)来制定削峰填谷方案的方法。MPC 是一种特别高效的算法,本文在参考了大量文献的基础上,利用模型预测控制算法针对某煤矿排水系统的节能问题制定了相应的削峰填谷方案。

1 模型的建立

1.1 涌水量与时间关系模型

涌水量与时间关系模型的作用是预测涌水量。文中采集的涌水量数值是一组时间序列,具有信息的不完全性。而灰色理论可以在复杂数据的趋势中寻找其规律,最终建立规律性较强的微分模型。文献[3-5]均采用了灰色理论建立了涌水量与时间关系的预测模型,但建立的都是长期预测模型。因此本文将选择灰色理论创建涌水量与时间关系的短期预测模型。灰色理论具有出色的数据建模与预测能力,成功地应用在文献[6-7]中并且显示出了对数据建模处理的高度精确性。本文将采用实时动态的建模方法,即每采集一次数据就利用灰色理论重新建模,用于对后面时段涌水量进行预测,采样周期为 24 h。

假设当前已采集的涌水量时间序列值为 $X^{(0)}=(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_n^{(0)})$ 经一次累加处理获得数据列为 $X^{(1)}=(X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_n^{(1)})$, 建立当前 GM(1,1) 涌水量模型如下^[8]:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt^n} + aX^{(1)} = b \quad (1)$$

其中: a 为模型的发展系数; b 为模型的协调系数。

设系数向量 $A=[a, b]^T$, 累加矩阵 B 为

$$\begin{bmatrix} -0.5(X_1^{(1)} + X_2^{(1)}) & 1 \\ -0.5(X_2^{(1)} + X_3^{(1)}) & 1 \\ \dots & \dots \\ -0.5(X_{n-1}^{(1)} + X_n^{(1)}) & 1 \end{bmatrix}$$

设 $P_n=[X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}]$, 则用最小二乘法解系数向量 A 为

$$A=(B^T B)^{-1} B^T P \quad (2)$$

将求出的 a 和 b 代入公式(1)得模型

$$X_{t+1}^{(1)} = \left[X_1^{(0)} - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a}, t = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

通过采集数据建立预测模型效果如下图 1 所示。

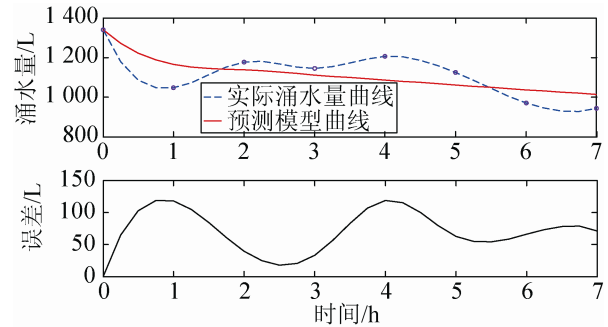


图 1 预测模型效果

经验证小误差概率 $P=1>0.95$, 后验差比值 $C=0.31<0.35$, 结果表明为好^[3]。

1.2 经济模型

首先将该煤矿泵房的十台水泵分为两组, 分别进行编号, 其中 $N1 = \{1, 2, 3, 4, 9, 10\}$ 为常用水泵组, $N2 = \{5, 6, 7, 8\}$ 为备用水泵组。其次将 $N1$ 组水泵分别用 $X1$ 至 $X6$ 表示, 可以得到经济模型如下^[9-10]:

$$\text{Min} J = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^6 c_t u_{i,t} f_i(D_t, q_t) \quad (t = 0, 1, 2, \dots, 23) \quad (4)$$

式中 c_t 表示 t 时刻的电价; $u_{i,t}$ 表示 t 时刻第 i 台水泵的状态, 其中 $u=0$ 为关闭, $u=1$ 为开启; $f_i(D_t, q_t)$ 为第 i 台水泵在 $(t, t+1)$ 时域内的排水量与用电量关系函数。最后常用水泵开启数量要受到水位条件限制:

$$LL < L_t < UL \quad (5)$$

式中 L_t 是 t 时刻的水位, LL 和 UL 分别为水仓的上限和下限值。

泵流量要满足流量高效区约束, 即

$$Q_{\min} \leq Q_k \leq Q_{\max} \quad (6)$$

$t+1$ 时刻的水位为:

$$L_{t+1} = L_t + \sum_{i=1}^6 u_{i,t} D_t - W_t \quad (7)$$

式中: L_{t+1} 为 $t+1$ 时刻的水位; D_t 为该时刻排水量;

W_t 为该时刻实际涌水量。

现将 6 台水泵看作一个单元组并转化为 0-1 规划问题进而优化出水泵组在控制时域内的节能运行调度, 使泵用电费最小化且能满足水位等约束条件。

2 模型预测控制

2.1 模型预测控制的原理

模型预测控制算法结合预测模型在系统中过去及未来的响应实现预测, 在预测周期内只执行控制序列的第一个控制量, 然后不断重复之前指令, 称为滚动优化。设定目标函数^[11]:

$$\text{Min}J(y(k), U(k), m, n) = \sum_{j=1}^n [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (8)$$

式中 n 表示最大预测长度, m 表示控制长度, $\lambda(j)$ 为控制加权系数, $y(k+j)$ ($j=1, 2, \dots, n$) 与 $w(k+j)$ ($j=1, 2, \dots, n$) 为未来 n 步的预测输出和参考轨迹, $\Delta u(k+j-1)$ ($j=1, 2, \dots, m$) 为未来 m 步的控制增量。其原理是采用滚动优化的方式不断寻找使 $y(k+j)$ 与 $w(k+j)$ 最接近时的控制增量 $\Delta u(k+j-1)$ 。其中预测输出和参考轨迹分别为:

$$y(k+j) = y_0(k+j) + y_p(k+j) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: $y_0(k+j)$ 为某时刻的实际输出; $y_p(k+j)$ 为此刻到未来各步控制增量 $\Delta u(k+j-1)$ 作用的输出。

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1-\alpha^j) y_r \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

式中: α 为柔化系数; $y(k)$ 为预测输出; y_r 为涌水量。最后构建闭环, 求出当前预测涌水量与实际涌水量的误差

$$e(k+1) = y(k+1) - W_{(k+1)} \quad (11)$$

将该误差引入到下一预测初值得

$$y_0(k+i+1) = y(k+i) + h_{i+1} e(k+1) \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (12)$$

式中: h_{i+1} 为误差校正矢量。

2.2 水泵调度优化

矿井原始的抽水方案是通过人工进行水泵的控制, 水泵会在 24 h 内一直运行, 且每小时只运行 2 台水泵, 由于水仓容量足够作为进水量的缓冲环节, 因此水泵一直运转是没有必要的。所以建立水泵组的优化调度显得尤为重要。首先将模型(4)转化为 0-1 规划问题并基于文献[12-14]在分时条件下对水泵运行的管理应用 MPC 计算出最佳调度, 在文献[15]中 MPC 较好的鲁棒性就成功的对企业员工的调度进行了有效地分配。控制的目标函数如下:

$$\min J = \sum_{t=0}^T c_t U_t f(D_t, q_t) \quad (t=0, 1, \dots, 23) \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} L_{t+1} &= L_t + U_t D_t - W_t \\ LL &< L_t < UL \\ Q_{\min} &\leq Q_k \leq Q_{\max} \end{aligned}$$

式中: U_t 表示水泵组的状态, $U_t=0$ 表示关闭, $U_t=1$ 表示开启。如表 1 为前 8 h 水泵组的排水量 $D(L/h)$ 与用电量 $P(KWh)$ 数据。

表 1 排水量与用电量

	t/h							
	0	1	2	3	4	5	6	7
D	1 620	1 288	1 273	1 194	1 897	2 062	1 359	1 345
P	1.48	1.46	1.47	1.45	1.43	1.43	1.41	1.42

通过前 8 个小时的数据采集对各时段水泵组调度进行优化计算, 在 8 h 内水泵组调度要满足水位约束且 7 h 时刻水泵组必须运行以用于削峰填谷, 结果为

表 2 水泵组状态表

t	t/h							
	0	1	2	3	4	5	6	7
U_t	0	1	0	1	0	1	1	1

该表格中 $U_t=0$ 表示水泵组停止运行, 反之则表示开启, 并且每次开启只有 2 台水泵运行, 如果水位变化较大, 启动数量也会相应增加。在无特殊情况下, 矿井每日排水量规律大致相同, 可以启用该调度来降低用电成本。经进一步分析后, 可以将控制时域由 1 h 变为 15 min, 那么一天内会有 96

个控制时域^[9], 对 96 个时域进行以上优化进而制定的调度会提高控制频率, 具有更大的精确度, 即便该调度中水位有较大变动该策略也可以抵抗干扰。但为简单说明, 本文控制时域定为 1 h。

3 系统的节能策略

3.1 低平时段节能策略

低、平时段的电价分别为 0.3 元和 0.7 元。此时虽然电价低廉, 但是高效率的水泵组启停调度会在原成本基础上再次降低用电成本。本时段是通过水泵组在各控制时域内的启停控制达到节能目的的。以前 8 h 为例, 设定水库水位上限为 5 m, 采用 2.2 中的调度策略会有如下控制效果。

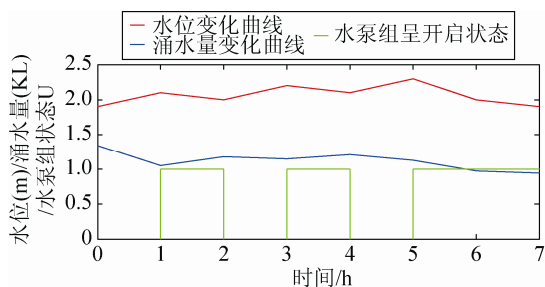


图 2 0~7 h 节能控制效果

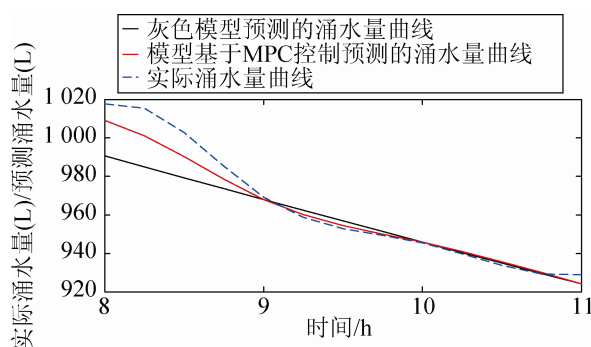
效果表明前 8 h 的水泵组调度在满足了水位约束要求的同时也节省了用电成本。

3.2 高峰时段节能策略

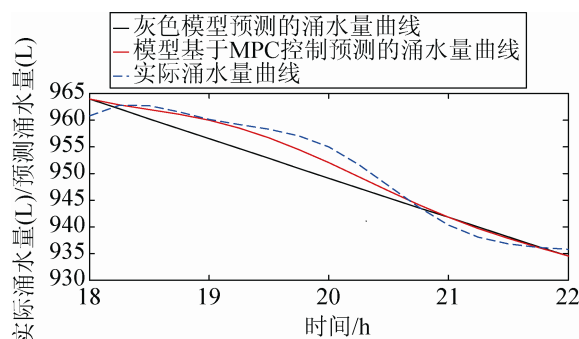
高峰期电价最高, 首先利用低平时段建立的预测模型预测出后面高峰时段的涌水量, 然后在高峰时段来临前提前抽水预留出相应的空间, 最后高峰期内水泵组停止运行, 以此来节省高峰期的用电成本。假设该时段有突水事件发生或者水位将超过上限, 系统将不再考虑节能, 水泵组要立即启动以确保人员安全, 而对于后者水泵组只需以低速运行降低水位至安全范围即可。预测模型将应用 MPC 对其进行跟踪控制, 不断检测建模误差来达到闭环控制, 提高预测精准度。

通过对当天前 8 h 和前 18 h 数据的采集基于 1.1 中动态建模方式建模, 然后分别对当天 8~11 h

的早高峰时段及 18~22 h 的晚高峰时段的涌水量进行预测。如图 3。



(a) 早高峰时段预测效果



(b) 晚高峰时段的预测效果

图 3 早晚高峰时段预测涌水量

3.3 节能策略的效果

系统在未应用节能调度前, 水泵组在一天内一直呈开启状态, 所以导致了高额的用电成本。而应用了节能调度后, 通过对水泵组启停的合理控制, 不仅使一天内的水泵组用电量达到了最低, 降低了用电成本, 同时也使系统满足了水位等约束要求, 图 4 为 24 h 内实际测量的原始水泵组能耗与应用节能调度后应达到的水泵组能耗对比。

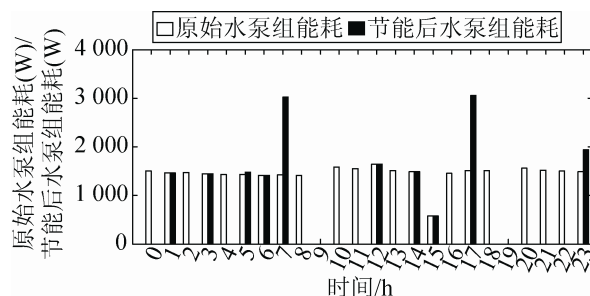


图 4 水泵组能耗对比

表 3 给出了水泵组在当天 3 个时段的原始用电量与节能后的水泵用电量。

方案	峰时电量	尖峰电量	平时电量	谷时电量
原始	6.1	4.6	9.6	11.6
节能策略	0	0	9.8	7.7

表 4 给出了水泵组在当天的原始用电成本与节能后的水泵组用电成本。其中低谷时段电价为 0.3 元，平时时段电价为 0.7 元，高峰时段电价为 1.5 元，尖峰时段电价为 2 元。

方案	峰时电费	尖峰电费	平时电费	谷时电费
原始	9.15	9.2	6.72	3.48
节能策略	0	0	6.86	2.31

如图 5 所示，低平时段内，水泵组经过优化调度计算，在满足约束的条件下，开启相应的控制时域中的水泵组。而在高峰时段，水泵组并未开启，此时电价最高，系统在区间 7~8 h 和 17~18 h 内提前抽水，在水仓内预留出了相应的空间，所以图中 8 h 和 18 h 时刻的水位会急剧下降，系统能够预留出合理的空间要归结于灰色模型与 MPC 配合后可以准确的预测出高峰期内的涌水量。而 23 h 时刻水泵组的重新开启会将水位重新降回 2 m，所以在 23 h 时刻，水泵组消耗的功率会大于原始方案消耗的功率。水位回归安全范围后系统就会进入下一个 24 h 控制周期。

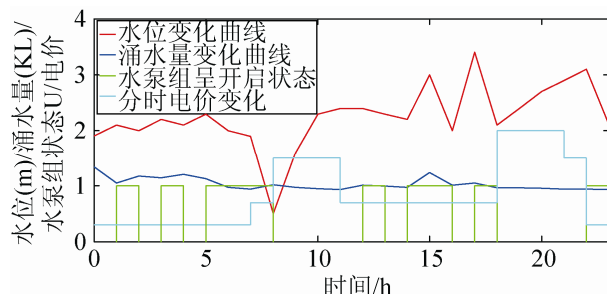


图 5 最终 MPC 预测效果

4 结论

本文在低平时段内利用 MPC 优化出了水泵组的调度，在用电高峰期先应用基于 MPC 跟踪控制的灰色模型预测出矿井将要达到的涌水量，再进行削峰填谷操作。将 2 种方式结合后，制定了在峰谷平 3 个时段都能够减少用电量的节能策略，所以降低了用电成本。在应用节能策略后，水泵组用电量较原始下降了 45.1%，而用电成本减少了 67.9%，将该策略应用到矿井其它泵房，将会为矿井节省大量的用电成本。

参考文献:

- [1] 唐捷, 任震, 高志华, 等. 峰谷分时电价的成本效益分析模型及其应用 [J]. 电网技术, 2007, 31(6): 61-66. (Tang Jie, Ren Zhen, Gao Zhihua, *et al.* Cost-benefit Analysis Model and its Application of Peak-valley Time-of-use Electricity Price [J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 61-66.)
- [2] 汪卫华, 张慧敏, 陈方. 用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(18): 79-81. (Wang Weihua, Zhang Huimin, Chen Fang. Analysis of Improving Profit of Power Supply Enterprises by Peak Load Shifting [J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 79-81.)
- [3] 徐高强. 山西省煤矿区矿井水涌水量预测模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008: 41-67. (Xu Gaoqiang. The Forecast Model of Mine Water Discharge's Research About Coal Mining Area in Shanxi Province [D]. Taiyuan, Shanxi, China: Taiyuan University of Technology, 2008: 41-67.)
- [4] 王苗. 基于灰色理论的矿井顶板涌水量预测模型的建立与应用 [D]. 山东: 山东科技大学, 2007: 23-38. (Wang Miao. Study on Forecast Model of Mine Roof Water Inrush based on Grey Syetem [D]. Shandong, China: Shandong University of Science and Technology, 2007: 23-38.)
- [5] 钱家忠, 朱学愚, 吴剑锋, 等. 矿井涌水量的灰色马尔可夫预报模型 [J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 71-75. (Qian Jiazhong, Zhu Xueyu, Wu Jianfeng, *et al.* Grey Markov Model for Predicting Mine Discharge [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 71-75.)

(下转第 3043 页)