

取水泵站能效的模型预测控制*

唐玉玲^{1,2} 张世荣¹

(1. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072; 2. 中南民族大学计算机科学学院, 武汉 430074)

摘要: 在研究取水泵站能量模型及能效开环优化控制基础上, 提出一种系统级的运行效率模型预测控制方法。本控制方法以定速泵运行状态为优化变量, 以泵站总能源费用最小为目标。目标函数融入了分时电价及取水口水位等变量, 并处理了总用水量、清水池水位高低限等约束。以一座配置定速泵的取水泵站为例, 对开环优化及模型预测控制方法分别进行了仿真研究和对比分析。验证了能效模型预测控制方法的有效性及其处理变量预测误差的性能。提出的控制方法还能实现需求侧优化管理, 有助于电网“移峰填谷”策略的实施。

关键词: 取水泵站 能效 开环优化 模型预测控制 移峰填谷

中图分类号: TP273; TV675 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0050-05

Model Predictive Control of Energy Efficiency of an Intake Pump Station

Tang Yuling^{1,2} Zhang Shirong¹

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: The energy model of an intake pump station was firstly introduced. Then, an open loop optimal control approach and a model predictive control (MPC) approach were introduced to improve the operational efficiency of intake pump stations. They lump time-of-use (TOU) tariff and intake level into their objective functions, and take total water consumption and the low and high limit of the clean water reservoir as constraints as well. An intake pump station, equipped with three constant speed pumps, was taken as a case study. The conventional optimal control and the MPC approach were investigated, respectively. The advantage of the MPC approach was convinced by the simulation results. Further, the load shifting of intake pump stations was also achieved through the proposed control approaches.

Key words: Intake pump station Energy efficiency Open loop optimal control Model predictive control Load shifting

引言

泵是工业领域的主要耗能设备之一, 约13%的电力供应被水泵所消耗^[1]。一直以来, 泵都是工业领域节能研究及其工程应用的重点对象。研究者们提出了各种方法提高泵的能源效率(简称能效)。文献[2]将能源系统的能效分成4个层次: 性能效率、运行效率、设备效率和技术效率。能源系统的能效可以相应地分别从这4个层次进行提升。目前对泵能效的研究主要以局部设备/系统为对象针对设

备效率和运行效率开展。泵的设备效率一般通过设备升级或驱动改造(例如采用变频驱动)来提升。运行效率的改善一般通过内部多个子系统间的协调、系统与时间的协调或系统与人的协调来完成^[2]。文献调研结果表明: 目前针对水泵节能的研究成果较多, 优化控制是其中采用较多的技术手段。文献[3]通过对泵的运行状态进行优化实现最优运行效率。在开展优化控制研究时, 多种优化计算方法, 例如 Downhill Simplex^[4]、遗传算法^[5]以及基因算法^[6]等都被用于水泵的优化控制。文献[7~8]

收稿日期: 2012-03-12 修回日期: 2012-03-20

* 江苏省自然科学基金资助项目(SBK201121841)和湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB277)

作者简介: 唐玉玲, 博士生, 中南民族大学讲师, 主要从事先进控制理论及应用研究, E-mail: tylzsr@163.com

通讯作者: 张世荣, 副教授, 主要从事复杂工业系统能效优化研究, E-mail: srzhang@whu.edu.cn

研究了泵的能量模型,这是能效优化的基础。对于大多数泵站,用水量是泵站优化问题中的重要外部影响因素,文献[9~10]对用水量预测进行了探讨。文献[11~12]研究了水泵变速优化运行的理论和方法。目前针对泵能效的研究主要采用开环优化方法,各影响变量(例如用水量预测、取水口水位等)的误差必将降低开环优化控制的性能,甚至突破某些约束而无法实施。分时电价(Time-of-use tariff, TOU)作为用户侧管理(Demand side management, DSM)的重要措施,目前已经得到了普遍推广,成为影响泵站性能效率的决定性因素。然而,目前研究大多没有考虑分时电价的影响。

本文以取水泵站为研究对象,针对其能源效率引入模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法。利用模型预测控制的反馈校正能力消除预测变量误差对控制性能的影响。以泵站总能源费用最小为目标,在目标函数中融入分时电价和取水口水位等外部变量,并处理了多种约束。针对一座典型的取水泵站分别开展能效开环优化控制及模型预测控制方法的仿真,并对两种方法进行对比研究。

1 取水泵站能量模型

一个典型水处理厂可以按其生产流程分成3个部分:取水、水处理和供水,如图1所示。可见,取水泵站是水处理过程的重要环节,承担着将水从水源提升到水处理流程的任务,同时也是水处理厂的主要耗能环节之一。本文将主要着力于取水泵站的能效研究。用于仿真研究的取水泵站位于江河入海口,其取水口水位受潮汐影响。按照设计规范,此泵站配置了3台同一厂家同一型号的定速泵。

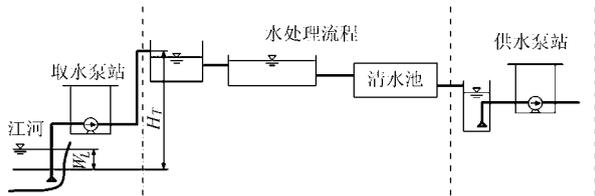


图1 水处理流程

Fig. 1 Process flow diagram of water treatment plant

一台定速泵的能耗与泵的扬程、流量以及泵和电动机的效率有关,可以表示为^[13-14]

$$P_e = C_e \frac{H_r Q_r}{\eta_p \eta_m} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad C_e = \frac{g\rho}{3\,600} \quad (2)$$

式中 P_e ——功率, kW H_r ——泵净扬程, m

Q_r ——泵的流量, m^3/h

η_p 、 η_m ——泵和驱动电动机的效率

g ——重力加速度

ρ ——水的密度, kg/m^3

泵的实际工作点决定于泵的 $Q-H$ 曲线以及管路曲线。性能曲线 $Q-H$ 可以写为

$$H = H_0 - sQ^2 \quad (3)$$

式中 H_0 ——泵的最大扬程

s ——与摩擦有关的系数

图1所示取水泵的管路特性曲线可表示为

$$H = H_T - W_L + s_r Q^2 \quad (4)$$

式中 H_T ——常数, m W_L ——取水口水位, m

s_r ——与摩擦有关的系数

由于受季节性气候及潮汐影响,取水口水位 W_L 实时随时间周期性变化。泵的工作点 (Q_r, H_r) 是式(3)和(4)曲线的交点。而泵的效率表示为

$$\eta_p = aQ_r^2 + bQ_r + c \quad (5)$$

式中 a 、 b 、 c ——常系数

式(1)~(5)即可描述一台定速泵的能量模型。

2 取水泵站能效 MPC 控制方法

2.1 取水泵站能效模型预测控制的基本思想

模型预测控制是使用过程模型来控制对象未来行为的一类计算机算法,包含模型预测、滚动优化和反馈校正3个主要部分^[15]。预测控制综合利用历史信息 and 模型信息,不断对目标函数进行滚动优化,并根据实测对象输出修正或补偿预测模型。这种控制方法适用于复杂工业过程,在工业领域获得了广泛的应用。预测控制是一种反馈控制算法,与开环优化控制相比模型预测控制能利用其反馈校正能力补偿模型失配及预测误差带来的影响。在取水泵站能效优化控制中,由于用水量预测值及取水口水位预测值都存在误差,故采用模型预测控制方法。实质上,模型预测控制也是一种最优控制算法,根据补偿函数或性能函数计算出将来的控制动作;然而,模型预测控制的优化过程不是一次离线完成,而是在有限移动时间间隔内反复在线进行,移动时间间隔称为预测时域。针对取水泵站能效控制问题,先研究其能效开环优化控制,然后在开环优化基础上实现模型预测控制方法。

2.2 能效开环优化问题

取水泵站一般配置定速泵,故将泵的开关状态("0"或者"1")作为优化变量,通过优化调度各台泵的开关状态以获得最优能效。定速泵的状态可用状态函数描述

$$u_i(t) = \begin{cases} 1 & (\text{运行}) \\ 0 & (\text{停止}) \end{cases} \quad (6)$$

当 $u_i(t)$ 为"1"表示第 i 台泵在 t 时刻处于运行状

态,反之处于停止状态。将各台泵的状态函数及分时电价引入泵的能量模型可得泵站的总能源费用,表示为

$$C = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n C_e \frac{H_{ri}(t) Q_{ri}(t)}{\eta_{pi}(t) \eta_{mi}} p(t) u_i(t) dt \quad (7)$$

式中 n ——泵的数量

$p(t)$ ——分时电价函数

t_0, t_f ——能源费用的计算时间

由于泵定速运行,可将各泵驱动电动机效率 η_{mi} 处理为常数。为了便于数值分析与计算,将式(7)

离散化,取采样时间 $T_s = \frac{t_f - t_0}{N}$ (N 为采样点数),得

$$C = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n C_e \frac{H_{ri}^j Q_{ri}^j}{\eta_{pi}^j \eta_{mi}} p^j u_i^j T_s \quad (8)$$

式中 u_i^j ——第 i 台泵在 j 采样时刻的运行状态

在随后的优化控制中,式(8)将作为取水泵站能效优化控制问题的目标函数。

针对取水泵站的优化问题,需要处理的约束主要包括:

(1)清水池水位约束:为了确保水处理流程的安全性,取水泵站清水池水位(记作 L_{CW})应一直处于上下限之间,即

$$L_L \leq L_{CW}^j \leq H_L \quad (1 \leq j \leq N) \quad (9)$$

式中 L_L, H_L ——清水池水位的下限值及上限值, m

L_{CW} 计算式为

$$L_{CW}^j = L_{CW}^0 + \frac{T_s \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^j Q_{ri}^k - \sum_{k=1}^j r_{WC}^k \right)}{A} \quad (10)$$

式中 L_{CW}^0 ——优化时域起始时清水池水位, m

A ——清水池的截面积, m^2

r_{WC} ——清水消耗率, m^3/h

(2)总取水量约束:在优化时域内总取水量大于等于用水总量,即

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n Q_{ri}^j u_i^j T_s \geq \sum_{j=1}^N r_{WC}^j T_s \quad (11)$$

至此,取水泵站能效的开环优化问题可归纳为

$$\begin{cases} \min C(u_i^j) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n C_e \frac{H_{ri}^j Q_{ri}^j}{\eta_{pi}^j \eta_{mi}} p^j u_i^j T_s \\ \text{s. t. } L_L \leq L_{CW}^j \leq H_L \quad (1 \leq j \leq N) \\ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n Q_{ri}^j u_i^j T_s \geq \sum_{j=1}^N r_{WC}^j T_s \end{cases} \quad (12)$$

此优化控制问题的解记为

$\bar{u} = (\bar{u}_1^1, \bar{u}_2^1, \dots, \bar{u}_n^1, \bar{u}_1^2, \bar{u}_2^2, \dots, \bar{u}_n^2, \dots, \bar{u}_1^N, \bar{u}_2^N, \dots, \bar{u}_n^N)$ 是取水泵站各台泵的最优控制变量。

2.3 能效模型预测控制

如前所述,模型预测控制实质上是一种最优控

制,其优化过程在预测时域内反复在线进行。在以上开环优化控制基础上,可以建立能效的预测控制框架。假设开环优化从任意采样点 $t = m$ 开始,优化时域为 $[m, m + N]$,按照以下步骤实现模型预测控制^[16]:

(1)计算时域 $[m, m + N]$ 开环优化问题的解 $\bar{u}_i^j |_m$ ($i = 1, \dots, n; j = m + 1, \dots, m + N$)。

(2)将 $\bar{u}_i^j |_m$ 的第 1 个元素 $\bar{u}_i^{m+1} |_m$ 作为控制量应用于取水泵站;将其余部分 $\bar{u}_i^j |_m$ ($i = 1, \dots, n; j = m + 2, \dots, m + N$) 丢弃。

(3)置 $m = m + 1$,返回步骤(1)。

模型预测控制的以上滚动优化过程一直进行;在每个采样间隔 $[m, m + 1]$ 算法都包含了系统的反馈信息,实现反馈校正。故在取水泵站的能效控制中采用模型预测控制,可以有效补偿取水口水位预测量、用水量预测量的不确定性。

3 仿真

3.1 研究对象

以图 1 所示取水泵站为例进行研究。由泵站设计规范及泵的试验结果得出 3 台泵的性能曲线为: $H = 22.617 - 9.44 \times 10^{-7} Q^2$; 对应的管道特性曲线为: $H = H_T - W_L + 1.83 \times 10^{-7} Q^2$ 。 H_T 根据设计规范置为 15 m。泵效率曲线的系数分别为: $a = -1.298 \times 10^{-7}$, $b = 0.0006597$, $c = -0.04336$ 。

取水泵站的运行规程规定:在常规运行模式下,仅 2 台泵参与运行,而另外 1 台泵用作备用。故在接下来的仿真计算中,只考虑 2 台泵的优化控制问题。取水泵站能效优化控制问题的优化变量为 2 台泵的开/关状态 $u_1(t), u_2(t)$,属于二进制优化问题。在开环优化及模型预测控制求解时,均采用 Matlab 优化工具箱中的 bintprog 函数。

取水泵站能效优化问题的约束式(9)、(11)归入式(12)中的不等式约束进行处理。

在仿真计算中采用的分时电价为

$$p(t) = \begin{cases} p_o & (t \in [0, 8)) \\ p_s & (t \in [8, 9) \cup [12, 19) \cup [22, 24)) \\ p_p & (t \in [9, 12) \cup [19, 22)) \end{cases} \quad (13)$$

式中 p_o ——非高峰电价,元/(kW·h)

p_s ——标准时段电价,元/(kW·h)

p_p ——高峰电价,元/(kW·h)

在本研究中 $p_o = 0.5p_s$, $p_p = 1.58p_s$, p_s 取为 0.7 元/(kW·h)。

分时电价、用水量以及取水口水位都具有以

24 h 为周期的特点,故以下仿真计算都取 24 h 为优化时域,将采样时间设置为 $T_s = 30 \text{ min}$,故 $N = (t_0 - t_f)/T_s = 48$ 。本文所研究取水泵站位于海边,受到潮汐影响取水水位随时间变化,如图 2 所示。用水量也是一个周期变化的量,以下仿真计算采用图 2 所示的用水量预测趋势曲线。根据运行规程,清水池水位的上下限 H_L 和 L_L 分别取为 3.5 m 和 0.6 m。

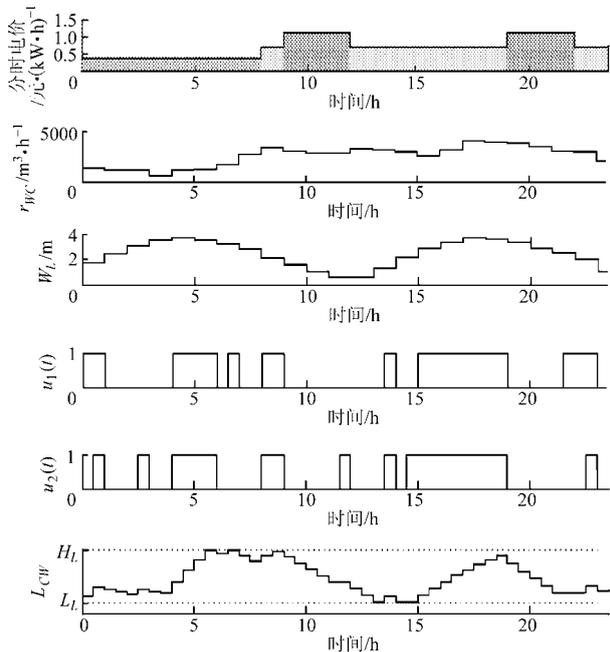


图 2 开环优化控制

Fig. 2 Open-loop optimal control

3.2 仿真结果及分析

首先,对取水泵站能效开环优化方法进行仿真,结果如图 2 所示。可见,采用开环优化可以对 2 台泵的运行状态进行优化调度。控制指令将泵的工作时段调度到非高峰时段,并在高峰时段停运泵,以获得最小的能源费用(目标函数)。从图 2 还可以看出清水池水位一直处于高限和低限之间,满足了系统的约束条件。

能效开环优化通过一次优化计算获得全局最优解,且在优化计算过程中使用了用水量及取水水位的预测值。但在实际系统中用水量以及取水水位预测值都不可避免地存在误差,这将对开环优化造成影响。图 3 在用水量以及取水水位加入干扰以模拟实际过程预测量的偏差。从仿真结果可以看出:当偏差引入时,由于开环优化不具备反馈校正能力,无法处理此类偏差,导致开环优化的解违反了约束条件。图 3 中清水池水位在 13 ~ 15 h 时间段内低于其低限值 L_L 。

然后,采用第 2.3 节所述步骤,在取水泵站的能效控制中引入模型预测控制方法,仿真结果如图 4 所示。在模型预测控制仿真中引入了与图 3 完全一

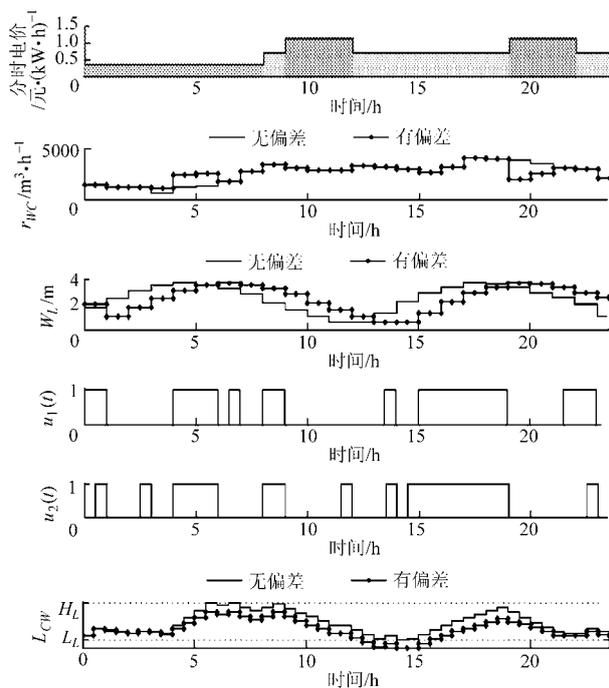


图 3 存在预测误差时开环优化仿真结果

Fig. 3 Optimal control subject to inaccuracies of the forecasted values

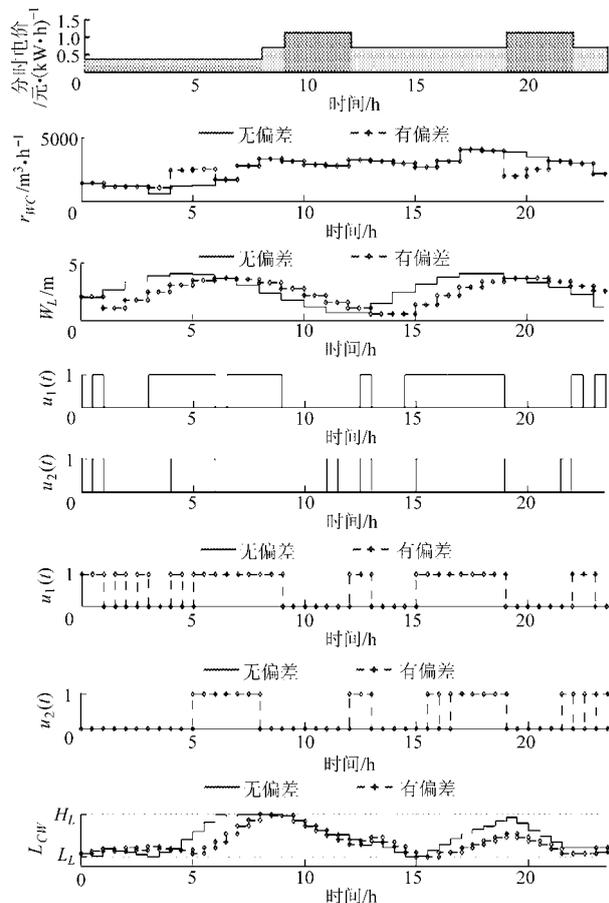


图 4 取水泵站能效的模型预测控制仿真结果

Fig. 4 Model predictive control of energy efficiency of pump station

致的预测量偏差。可见,在用水量以及取水水位预

测偏差作用下,模型预测控制仍能取得可行的优化控制作用。两台泵在高峰时段停止运行,并将运行时间调度到非高峰时段及标准时段。从图4还可以看出:在优化计算的24h时间内,各种约束条件都得到了保证。模型预测控制的滚动优化及反馈校正特性使其能较好地处理各种变量的不确定性,能更好地应用于实际系统。

在取水泵站能效控制中采用开环优化或模型预测控制时,泵的运行状态都被调度到非高峰时段或标准时段,而在高峰时段泵停运。可见,提出的方法在获得较高能源效率的同时还具有移峰填谷(Load shifting)能力,能实现用户侧的优化管理。

4 结束语

取水泵站的能源效率可以通过优化控制得以提高。本文先建立了取水泵站的能量模型,并以泵站能源费用为目标函数,研究能效的开环优化,在目标函数中引入了分时电价。然后,研究了一种实用的

基于开环优化的能效模型预测控制方法,并针对取水泵站分析了其目标函数及各种约束的计算方法。以一座配置3台定速泵的取水泵站为例进行了仿真研究。首先进行了开环优化控制方法的仿真,结果表明开环优化能优化调度泵的运行状态并满足各种约束。然而,当用水量及取水水位预测存在偏差时,由于开环优化方法无法处理此类偏差,导致控制指令违反某些约束条件。模型预测控制方法的仿真结果表明:采用模型预测控制能在预测变量存在偏差的情况下仍获得优化的控制结果,并确保所有的约束条件。

在取水泵站中实施开环优化和模型预测控制方法时,在目标函数中引入了分时电价。为了最小化能源费用,控制指令将泵的运行状态优化调度到非高峰时段或标准时段。可见,提出的控制方法还能助推电网移峰填谷策略。这进一步确保了优化控制方法的可持续性,使控制方法具有在实际取水泵站中大规模应用的前景。

参 考 文 献

- 1 Marais J, Mathews E, Pelzer R. Analysing DSM opportunities on mine conveyor systems[C]//Industrial and Commercial Use of Energy Conference, Cape Town, South Africa, 2008.
- 2 Xia X H, Zhang J F. Energy efficiency and control systems from a POET perspective[C]//IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency, 2010,1:255~260.
- 3 Zhang J, Xia X, Alexander D. Demand side optimal strategy for voluntary load shedding[C]//The Second IASTED Africa Conference on Power and Energy System, Gaborone, Botswana, 2008.
- 4 Illembade A A, Manson N J, Stephenson D. Pump and reservoir system operational optimization using a non-linear tool[J]. Journal of The South African Institution of Civil Engineering, 2005, 47(4): 2~11.
- 5 Barón B, Von Lücken C, Sotelo A. Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(1): 39~47.
- 6 Beckwith S P, Wong K P. A genetic algorithm approach for electric pump scheduling in water supply systems[C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Perth, WA, Australia, 1996.
- 7 Moreno M A, Planells P, Córcoles J I, et al. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 95~105.
- 8 Moreno S A, Carrión P A, Planells P, et al. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(4): 479~486.
- 9 Lertpalangsuntia N, Chana C W, Mason R, et al. A toolset for construction of hybrid intelligent forecasting systems: application for water demand prediction [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1999, 13(1): 21~42.
- 10 Zhou S L, McMahan T A, Walton A, et al. Forecasting operational demand for an urban water supply zone[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1~4): 189~202.
- 11 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组变速运行优化方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 72~76.
Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian. Optimal methodology of single-unit variable speed operation in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 72~76. (in Chinese)
- 12 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 泵站多机组叶片全调节优化运行分解-动态规划聚合方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 27~31.
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Study of optimal operation method on multiple pump units with adjustable-blade for single pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 27~31. (in Chinese)
- 13 Sychta L. System for optimizing pump station control[J]. World Pumps, 2004(2): 45~48.
- 14 Sychta L. System for optimizing pump station control-part-II[J]. World Pumps, 2004(7): 32~34.
- 15 Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789~814.
- 16 Xia X, Zhang J, Elaiw A. A model predictive control approach to dynamic economic dispatch problem[C]//PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, 2009.