

锅炉汽包水位非自衡系统的预测控制

邹 涛, 刘红波, 李少远

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 由于动态矩阵控制预测控制算法无法直接控制带有积分环节的过程, 针对这一困难, 研究了一种适用于积分过程的 DMC 算法. 该算法通过改变经典 DMC 算法的移位阵, 使得有限维阶跃响应系数模型能够对积分过程进行准确的未来输出预测, 从而避免了预测截断误差的产生. 锅炉汽包水位系统的工业实验结果验证了算法的有效性. 由于算法的结构没有改变, 计算量也没有增加, 该算法较之已有的针对非自衡对象的算法有更强的实用性.

关键词: 积分过程; 预测控制; 动态矩阵控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Dynamic matrix control algorithm on the boiler level integral process

ZOU Tao, LIU Hong-bo, LI Shao-yuan

(Institute of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Aiming to solve the big difficulty that the dynamic matrix control algorithm (DMC) could not be directly applied on the process with an integral unit, a DMC that can deal with integral process was investigated. The algorithm modifies the shifting matrix of original DMC so that the future output of integral process can be accurately predicted by finite dimension step response coefficients model without the cutting off error. The validity of the algorithm is proved by the industrial experiment to the boiler level system. Compared to other algorithms on the integral process, the present algorithm is more practical because the structure of the algorithm is not changed and computing efforts are not added.

Key words: integral process; predictive control; dynamic matrix control

1 引言 (Introduction)

许多实际生产过程中含有非自衡对象, 例如, 化工过程的许多储罐、锅炉汽包等, 其非自衡的原因在于它的传递函数中含有积分环节. 积分环节是控制理论中的典型单元, 它的存在, 导致了积分作用的产生. 对调节器而言, 一方面, 引入积分作用可以消除余差, 这是积分作用的积极作用; 另一方面, 积分作用的引入将降低系统的稳定性, 是它的消极作用. 对被控对象而言, 很多典型装置和设备都是含有积分环节的真实对象, 这类被控对象不具有自衡能力, 是开环不稳定的. 由于积分环节的存在, 闭环控制中易产生震荡. 采用常规 PID 控制算法控制这类对象由于积分环节的作用叠加, 易产生积分饱和现象.

动态矩阵控制 (DMC) 是最有影响的预测控制算法之一, 已在石油、化工等部门的过程控制中获得了成功的应用, 该算法的广泛应用得益于其使用阶跃响应系数模型. DMC 算法直接采用工业过程易得

到的对象阶跃响应, 把它们在采样时刻的一系列数值作为描述对象动态特征的信息, 从而构成预测模型. 由于采用了非最小化描述的模型, 信息冗余量大, 有利于提高系统的鲁棒性. 由于阶跃响应模型的特点, 使得 DMC 算法只适用于渐近稳定的对象. 此外, 对于弱非线性对象, 可以在工作点附近线性化; 对于不稳定对象, 可以采用 PID 控制使其稳定, 然后再使用 DMC 算法; 这样, DMC 的适用范围有所提高, 但是 DMC 算法无法直接控制带有积分环节的非自衡对象^[1]. 文献[2]通过分离积分环节的方法, 从理论上解决了非自衡对象的控制算法, 但在实际中, 积分环节是无法分离的. 文献[3]提出了适应于非自衡对象的 DMC 算法, 并给出了仿真结果. 到目前为止, 这类面向积分过程的算法都没有面向应用的实例, 只有仿真验证. 本文通过研究非自衡对象的特点, 给出了一种适用于非自衡对象的简单算法, 该算法仅仅改动了时间基点变动时的移位阵, 易于实

现.本文将改进的算法编制成 C++ 软件包,实现了对锅炉汽包液位系统的控制.

2 动态矩阵控制的一般算法 (Original DMC algorithm)

DMC 算法是一种基于对象阶跃响应系数模型的控制方法,其本质是利用系统的预测信息,在有限时域内对某一性能指标进行优化,为了克服系统的不确定性,在预测控制中采用滚动优化策略.系统的预测输出 $\hat{y}(k+i)$ ($i=1, \dots, P$) 是由系统当前时刻 t 的信息和未来的控制信号 $u(k+i)$ ($i=1, \dots, N_u$) 得到的,其中 P 为系统的预测时域,优化目标为

$$\min J(k) = \|w_p(k) - \hat{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(k)\|_R^2. \quad (1)$$

通过极值必要条件求得

$$\Delta u_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [w_p(k) - \hat{y}_{PM}(k)]. \quad (2)$$

以上各参数的具体意义参见文献[4].

因为渐近稳定过程与积分过程的区别表现在它们的阶跃响应系数模型不同,从而导致了经典的 DMC 算法无法使用积分过程的阶跃响应系数模型进行预测. DMC 算法每次运算得到 M 个最优控制量,将第一个控制量 $\Delta u(k)$ 作用于对象,运用得到的阶跃响应系数模型就可以得到在 $\Delta u(k)$ 作用下的未来输出.

当 k 时刻把控制作用 $u(k)$ 实际加于对象时,相当于在对象的输入端加上一个幅值为 $\Delta u(k)$ 的阶跃,利用阶跃响应系数模型可以预测未来时刻的输出值.在 k 时刻,假定控制作用保持不变时,对未来时刻有初始预测值 $\hat{y}_0(k+i/k)$ ($i=1, \dots, N$),当 k 时刻控制有一增量 $\Delta u(k)$ 时,则可计算出未来时刻的输出值 $\hat{y}_1(k+i/k)$:

$$\hat{y}_1(k+i/k) = \hat{y}_0(k+i/k) + a_i \Delta u(k). \quad (3)$$

将该式写成向量形式

$$\hat{y}_{N1}(k) = \hat{y}_{N0}(k) + a \Delta u(k). \quad (4)$$

经过反馈校正后,得出修正后的未来输出预测

$$\hat{y}_{cor}(k+1) = \hat{y}_{N1}(k) + h e(k+1). \quad (5)$$

各参数的定义如下:

$$\hat{y}_{N0}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_0(k+1/k) \\ \vdots \\ \hat{y}_0(k+N/k) \end{bmatrix},$$

$$\hat{y}_{N1}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(k+1/k) \\ \vdots \\ \hat{y}_1(k+N/k) \end{bmatrix}.$$

$$\hat{y}_{cor}(k+1) = \begin{bmatrix} \hat{y}_{cor}(k+1/k+1) \\ \vdots \\ \hat{y}_{cor}(k+N/k+1) \end{bmatrix}.$$

在 $k+1$ 时刻,由于时间基点移动,预测的未来时间点转移到 $k+2, \dots, k+1+N$,因此, $\hat{y}_{cor}(k+1)$ 的元素还需要移位才能作为 $k+1$ 时刻的初始值:

$$\begin{cases} \hat{y}_0(k+1+i/k+1) = \hat{y}_{cor}(k+1+i/k+1), \\ i = 1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (6)$$

由于模型的截断, $\hat{y}_0(k+1+N/k+1)$ 可由 $\hat{y}_{cor}(k+N/k+1)$ 近似.这一移位过程可用向量形式表示为

$$\hat{y}_{N0}(k+1) = S \hat{y}_{cor}(k+1). \quad (7)$$

$$\text{其中 } S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad \text{为移位阵.}$$

3 改进算法的原理 (Principle of the modified algorithm)

3.1 原因分析 (Algorithm analysis)

DMC 算法是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法,它适用于渐近稳定的对象,原因在于其应用阶跃响应模型来预测未来输出.下面,求出给定传递函数的渐近稳定对象和带有积分环节非自衡对象的阶跃响应.取一渐近稳定对象,其传递函数为 $G(s) = 1/(s+1)$,另取一带有积分环节的非自衡对象,传递函数为 $G(s) = 1/s(s+1)$,它们的阶跃响应曲线如图 1 所示.上述稳定对象的阶跃响应采样值趋于稳定,而带有积分环节的非自衡对象阶跃响应采样值趋于无穷大,但也具有一定规律.

对于渐近稳定的对象,阶跃响应在某一时刻 $t_N = NT$ 后将趋于平稳,以致 a_i ($i > N$) 与 a_N 的误差和量化误差及测量误差有相同的数量级,因而可以认为, a_N 已近似等于阶跃响应的稳态值,这样,对象的动态信息就可以近似用有限阶跃响应系数集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 加以描述.而对于带有积分环节的不稳定对象,其阶跃响应值是线性递增的,根据线性非自衡对象的比例与叠加性质,如果使用无限阶跃响应系数集合 $a = \{a_1, a_2, \dots, a_N, a_{N+1}, \dots, a_\infty\}$ 就可以描述该过程.但是,由于积分对象具有在某一时刻 $t_N = (N-1)T$ 后,其相邻两个的阶跃响应采样值之差是恒定的性质,仍可以使用有限阶跃响应系数集合进行模型预测.

首先,讨论渐近稳定过程在滚动优化时的模型

移位过程.从式(6)可以看出,当出现模型截断时,DMC算法采用移位的方法解决该问题.移位后 $\hat{y}_{\text{cor}}(k+1)$ 的第 $N-1$ 项和第 N 项为

$$\begin{aligned}\hat{y}_0(k+N/k+1) &= \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1), \\ \hat{y}_0(k+1+N/k+1) &= \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1).\end{aligned}\quad (8)$$

从理论上讲,如果阶跃响应系数模型是无限的,即

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_N, a_{N+1}, \dots, a_\infty\}, \quad (9)$$

则

$$\hat{y}_0(k+1+i) = \hat{y}_{\text{cor}}(k+i+1), \quad i = N, \dots, \infty. \quad (10)$$

也就是说,将没有模型截断问题发生.遗憾的是,在实际应用中,阶跃响应系数模型不可能是无限维的,而使用的是有限维阶跃响应模型,这个有限维阶跃响应模型的无限维等价模型为

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_N, a_N, \dots, a_N\}. \quad (11)$$

即 $a_{N+1} = a_N, a_{N+2} = a_N, \dots, a_\infty = a_N$.根据上式,可以比较采用该无穷维阶跃响应系数模型对渐近稳定对象以及带有积分环节的不稳定对象分别进行预测,产生的预测误差情况.

对于渐近稳定对象的阶跃响应系数模型,见图1,可以近似认为

$$a_N = a_{N+1} = \dots = a_\infty. \quad (12)$$

可见式(12)与式(11)是一致的,未来的预测输出同样也是相等的,即

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+N) = \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1) = \dots = \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+\infty). \quad (13)$$

所以采用式(7),在模型预测过程中将没有预测误差出现.

而对于带有积分环节的不稳定对象来说,由图1可知,其阶跃响应是线性递增的.如果直接使用截断后的阶跃响应系数等价模型(11),预测未来输出,同样会得出式(13)的结论.但是阶跃响应系数模型(9)中的第 N 项后,是线性递增的,即 $a_{N+1} \neq a_N, a_{N+2} \neq a_N, \dots, a_\infty \neq a_N$,利用式(3)~(5)可以得出

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+N) \neq \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1) \neq \dots \neq \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+\infty). \quad (14)$$

所以,如果直接采用式(7),在校正输出的第 N 项后,模型预测过程中将产生预测误差,而且随着时间基点的推进,误差得到积累.原因在于:从模型预测输出过程可知,当第一次执行该算法时,前 $N-1$ 项时没有误差,第 N 项出现误差,但由于反馈校正 是根据 $k+1$ 时刻的采样值与预测值之间的差值进行校正,所以第 N 项误差无法得到校正,当时间基

点移动到下一时刻,第 $N+1$ 项出现误差,同样不能得到校正,依此类推,当时间基点移动到 $k+N$ 时刻,预测输出各项都存在误差,同时校正开始,但由于DMC的积分作用,与PID类似,DMC控制器进入“饱和”状态.

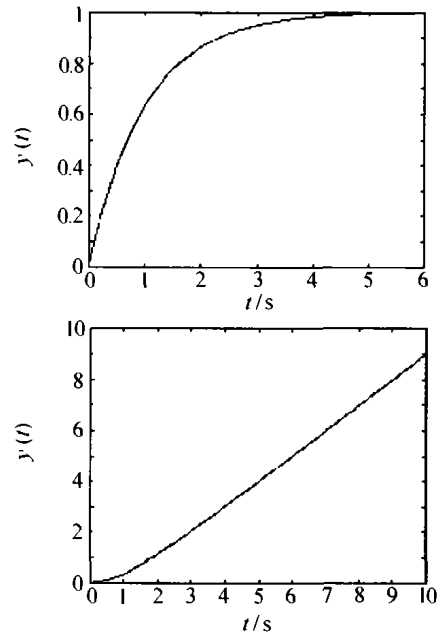


图1 稳定对象和非自衡对象的阶跃响应曲线

Fig. 1 Step response curves of stable process and imbalanced process

3.2 DMC改进算法(Improved DMC algorithm)

根据上述的分析结果,修改DMC算法的预测模型部分,使之能够适应非自衡对象.对于带有积分环节的线性不稳定对象,其阶跃响应值在某一时刻后,其相邻两个的阶跃响应采样值之差是恒定的,为了讨论问题方便起见,假设该时刻为 $t_N = (N-1)T$.据此,重新规范其等价的无限维阶跃响应系数模型

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_{N-1}, a_{N-1} + \Delta a, a_{N-1} + 2\Delta a, \dots\}. \quad (15)$$

应用该模型可以得到

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+N) = \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1) + \Delta a \Delta u, \quad (16)$$

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1) = \hat{y}_{\text{cor}}(k+N) + \Delta a \Delta u, \quad (17)$$

则模型的预测输出有如下关系:

$$\begin{aligned}\hat{y}_{\text{cor}}(k+N) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1) &= \\ \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N) &= \text{const.}\end{aligned} \quad (18)$$

定理 对于带有积分环节的线性不稳定对象,采用 N 维阶跃响应系数

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_{N-1}, a_{N-1} + \Delta a\}.$$

预测模型过程中,采用移位阵 S_{uns} ,令

$$\hat{y}_{N0}(k+1) = S_{\text{uns}} \hat{y}_{\text{cor}}(k+1). \quad (19)$$

其中

$$S_{\text{uns}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 \end{bmatrix}_{N \times N},$$

可以避免模型截断时预测误差的产生。

证 在 k 时刻,假定控制作用保持不变时,对未来时刻有初始预测值 $\hat{y}_0(k+i/k)$, $i=1, \dots, N$ (稳态启动时,可取 $\hat{y}_0(k+i/k) = y(k)$)。当 k 时刻控制有一增量 $\Delta u(k)$ 时,则可计算出未来时刻的输出值

$$\hat{y}_{N1}(k) = \hat{y}_{N0}(k) + a\Delta u(k). \quad (20)$$

在 $k+1$ 时刻,时间基点移动,首先计算实际检测值与预测值的误差

$$e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}_1(k+1/k), \quad (21)$$

进行校正

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+1) = \hat{y}_{N1}(k) + he(k+1), \quad (22)$$

可知 $\hat{y}_{\text{cor}}(k+1)$ 的第 $N-1$ 项,第 N 项为

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1/k+1) = \\ \hat{y}_0(k+N-1/k) + a_{N-1}\Delta u(k) + he, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) = \\ \hat{y}_0(k+N/k) + a_N\Delta u(k) + he. \end{aligned} \quad (24)$$

式(24) - 式(23),得

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1/k+1) = \Delta a\Delta u(k). \quad (25)$$

即在 t_N 时刻后,相连两个校正值之差为恒值。然后,输出序列移位,移位过程如式(26),将产生模型截断,

$$\begin{aligned} \hat{y}_0(k+1+i/k+1) = \\ \hat{y}_{\text{cor}}(k+1+i/k+1), \quad i=1, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (26)$$

从理论上讲,

$$\hat{y}_0(k+N+1/k+1) = \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1/k+1). \quad (27)$$

但实际上,

$$\hat{y}_{\text{cor}}(k+1) = \begin{bmatrix} \hat{y}_{\text{cor}}(k+1/k+1) \\ \vdots \\ \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) \end{bmatrix},$$

即 $\hat{y}_{\text{cor}}(k+1)$ 没有第 $k+N+1$ 项。

根据式(18),有

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1/k+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) = \\ \hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1/k+1). \end{aligned} \quad (28)$$

移项得

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{cor}}(k+N+1/k+1) = \\ 2\hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1/k+1), \end{aligned} \quad (29)$$

所以

$$\hat{y}_0(k+N+1/k+1) =$$

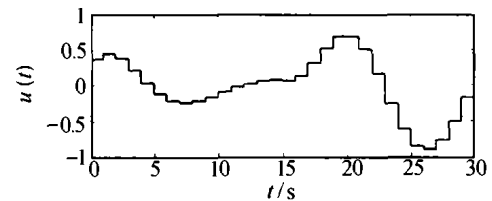
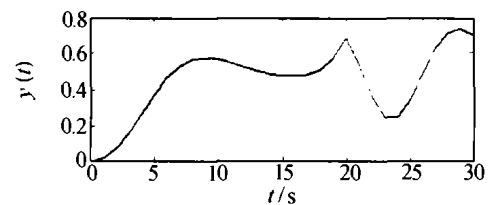
$$2\hat{y}_{\text{cor}}(k+N/k+1) - \hat{y}_{\text{cor}}(k+N-1/k+1). \quad (30)$$

将上述过程写成向量形式,即式(19)。采用式(30)进行预测,则 $\hat{y}_0(k+N+1)$ 没有产生误差,在 $k+2$ 时刻,重复上述过程,仍不会产生模型截断误差。

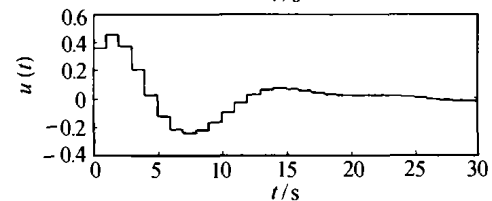
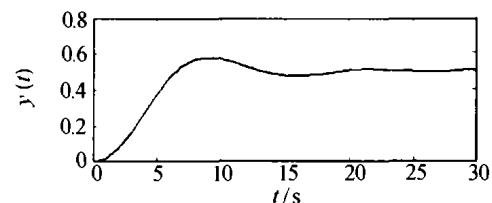
证毕。

3.3 数值仿真(Simulation)

取被控对象传递函数为 $G(s) = 1/10s(s+1)$, 这是带有积分环节的非自衡对象。参考输入为 0.5, 采样周期为 1 s, 控制时域为 3, 预测时域为 5, 建模时域为 20。采用适用于渐近稳定对象的 DMC 算法, 其仿真结果如图 2(a); 采用本文提出的算法, 各控制参数相同, 其仿真如图 2(b); 可以看出, 本文的算法对于设定值变化是无余差的。此外, 比较两个仿真结果, 其被控对象的输出曲线的初始状态基本相同, 但由于预测误差的产生和积累, 经典的 DMC 算法无法使被控对象稳定。



(a) 经典的 DMC 算法



(b) 本文的 DMC 算法

图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation result

4 锅炉应用实例 (Application to level control in boiler system)

锅炉的汽包水位对象是典型的带有积分环节的非自衡对象,结构示意图见图 3。汽包水位是表征锅炉安全运行的重要参数之一。如果锅炉汽包水位过高,会降低汽水分离装置的汽水效果,造成汽包出口

饱和蒸汽中含水过多,使含盐浓度增大,结果使过热器受热面结垢而导致过热器烧坏,同时还会引起过热蒸汽温度剧烈变化.过热蒸汽中含盐量增多会使汽轮机叶片结垢,使汽轮机出力降低.汽包水位过低,可能破坏某些水冷管壁管束中的水循环,使上升管因得不到炉水冷却,以致温度过高而爆破.因此,为保证机组安全运行,正常情况下一般限制汽包水位在 ± 50 mm 范围内变化.为了克服引起汽包水位变化的诸多因素的影响,汽包水位常采用三冲量方式控制方案.

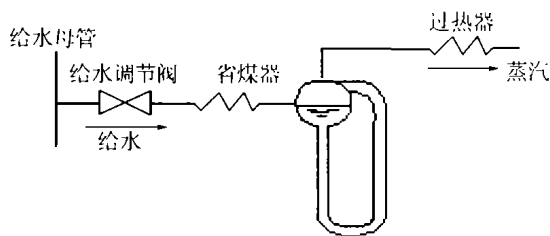


图3 锅炉汽包结构示意图
Fig. 3 Sketch map of the boiler

为了进一步提高系统的运行质量以及降低系统由扰动引起的波动,作者在山东省某50 M瓦火力发电机组的锅炉汽包液位控制系统上运行了由Visual C++编制的DMC算法软件包.该火力发电机组使用了上海新华仪表厂的DCS系统,DCS系统的组态软件部分具有实时地显示过程数据、查看历史趋势、设定控制参数等功能.系统具有手动和自动两种工作模式.为了测试系统的方便,作者修改了DCS系统的组态软件,设计了3种工作状态,即手动、PID自动、预测控制模式.手动状态就是采用直接控制执行机构的方式,人工操纵被控对象.PID自动状态,就是使用DCS系统内置的离散PID函数功能进行控制.DCS系统的组态软件部分提供了实时数据的动态链接库(DLL)接口,应用该接口实现了算法所需的输入输出数据物理通道.预测控制状态,预测控制软件包通过DLL接口,获得相关的数据后,实时地计算,并将计算好的控制量通过DLL接口,再经DCS系统的组态软件发送指令到执行机构上.3种状态下都实现了对控制量的跟踪,所以手动、PID自动、预测控制可以进行无扰切换.

在手动模式下,进行了开环阶跃响应测试,得到该汽包液位对象的阶跃响应系数模型,并将该模型应用到算法中.经分析知,该过程的传递函数, $G(s) = 0.03/s(100s + 1)$.然后使用C++软件包对汽包水位进行了实时控制.控制参数选择如下,系统采样周期为10 s,控制时域为3,预测时域为15,建模时域为20,控制目标中的权系数都为常数, $r = 1, q = 2$.

在获得阶跃响应系数模型后,进行了阶跃响应

跟踪控制以及抗干扰的调节测试,都取得了较好的控制效果,通过DCS系统的实时趋势可以将控制效果反映出来,如图4和图5.由于DCS系统需要同时对多个参数进行实时监控,所以监控图不能同时反映各个变量的坐标.汽包液位 L 的设定值是系统的重要参数,下面结合图4和图5,说明该参数的变化情况.图4是汽包液位的跟踪设定值变化曲线,起始阶段通过PID算法将其控制在0 mm处,待系统稳定后,给出8 mm的阶跃.图4中,在给出设定值阶跃变化的同时,负载(主蒸汽流量 F)也产生了较大波动,跟踪曲线变化较大,最后系统趋于稳定,跟踪范围在 8 ± 5 mm.图5是汽包液位的调节曲线,由于再调节状态汽包液位的变化较小,所以修改了组态设置,将汽包液位的显示比例扩大了2倍.从监控曲线可以看出,在负载(主蒸汽流量)变化较大的情况下,该算法能够较好地完成对非自衡系统的控制,将误差控制在 ± 5 mm以内,完全达到了安全标准.

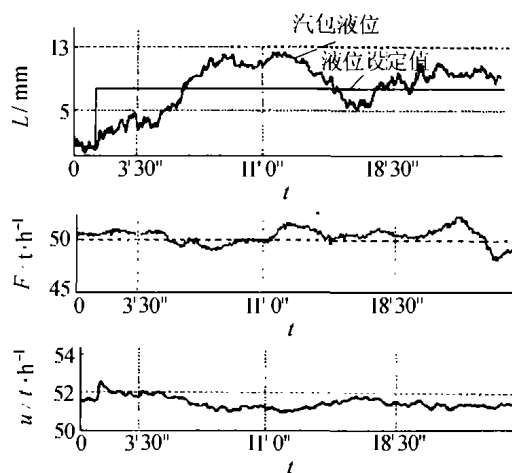


图4 汽包液位的跟踪设定值变化曲线
Fig. 4 Tracking curve of boiler level

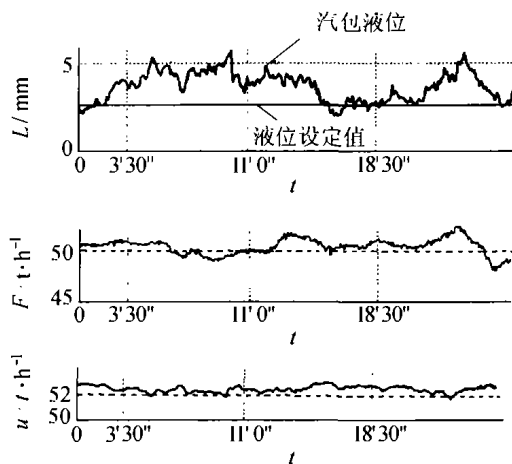


图5 锅炉汽包水位调节曲线
Fig. 5 Regulation curve of boiler level

(下转第397页)

- [7] 陈伯时,徐荫定.电流滞环控制 PWM 逆变器异步电动机的非线性解耦控制系统[J].自动化学报,1994,20(1):50-56.
(CHEN Boshi, XU Yinding. Nonlinear decoupling control of hysteresis-band current-controlled induction motor drive fed by PWM inverter [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(1): 50-56.)
- [8] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1995.
(WANG Fengyao. *Sliding Mode Variable Structure Control* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1995.)

作者简介:

孙宜标 (1970—),男,沈阳工业大学讲师,在读博士,主要研究方向为交流伺服系统,鲁棒控制,非线性系统等, E-mail: yuefei2002@hotmail.com;

郭庆鼎 (1941—),男,沈阳工业大学电气工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为交流伺服,数控技术,鲁棒控制,智能控制, E-mail: guoqd@sut.edu.cn.

(上接第 390 页)

5 结论(Conclusion)

本文改进了经典的 DMC 算法,使之能够适应带有积分环节的非自衡对象.由于本文的算法仅改动了在时间基点移动时的移位阵,使得算法的模型获得、优化、校正都与传统的算法完全一致.很多理论分析结果可以直接应用到本文算法.数值仿真与实际应用都验证了算法的有效性.目前,该算法已经成功地嵌入到控制系统中去,操作者可以根据实际需要,选择手动控制、PID 和本文算法.

参考文献(References):

- [1] LUNDSTROM P, LEE J H, MORARI M. Limitation of dynamic matrix control [J]. *Computer and Chemical Engineering*, 1995, 19(4): 409-421.
- [2] 戴连奎.非自衡系统的动态矩阵控制[J].控制理论与应用, 1999, 16(5): 744-746.
(DAI Liankui. Dynamic matrix control of integrating systems [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 744-746.)

- [3] 张政江,孙优贤.基于阶跃响应的非自衡对象预测控制[J].控制与决策, 2001, 16(3): 378-379.
(ZHANG Zhengjiang, SUN Youxian. Predictive control algorithm of integrating plant based on step-response [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 378-379.)
- [4] 席裕庚.预测控制[M].北京:国防工业出版社,1993.
(XI Yugeng. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993.)

作者简介:

邹涛 (1975—),男,上海交通大学自动化研究所在读博士研究生,主要从事预测控制与过程控制方面研究, E-mail: ykzoutao@sjtu.edu.cn;

刘红波 (1964—),男,2001年在东北大学自动化所获博士学位,现在上海交通大学自动化研究所作博士后研究工作,研究领域为复杂工业过程的建模与控制,模糊控制,自适应控制等;

李少远 (1965—),男,上海交通大学自动化研究所教授,博士生导师,1997年在南开大学计算机与系统科学系获博士学位,研究领域为预测控制,模糊控制,自适应控制理论与应用, E-mail: syli@sjtu.edu.cn.