

文章编号:1001-9081(2010)10-2850-03

改进的动态矩阵控制算法在发酵罐温度控制中的应用

陈乔, 郑松, 葛铭, 薛安克

(杭州电子科技大学自动化学院, 杭州 310018)

(chenqiao113@163.com; zhs@hdu.edu.cn)

摘要:啤酒发酵是一类复杂的生化反映过程,其温度控制具有大时滞特性。由于机制复杂、环境多变,温度对象难以建立精确的数学模型,常规控制方式难以胜任此类系统的控制,并且当存在不可预测的干扰时,控制效果更难保障。针对这一问题,以啤酒发酵罐的温度为控制对象,将动态矩阵控制(DMC)引入该温度控制,基于DMC一步控制的思想,引入时间最优控制对DMC控制量进行改进,形成快速响应的预测控制算法。应用结果表明该算法有效提高了系统对干扰的抑制能力,具有较好的应用价值。

关键词:发酵罐温度控制;时间最优控制;预测控制;干扰抑制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Application of improved dynamic matrix control algorithm to fermentation temperature control

CHEN Qiao, ZHENG Song, GE Ming, XUE An-ke

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Beer fermentation is a kind of complex biochemical reaction, the temperature control of which has the feature of large time delay, and it is difficult to establish an accurate mathematical model for this plant as the complex mechanism and the changing environment. The conventional control algorithms always cannot act well in this kind of system, especially while there are several unpredictable interferences. In order to solve these problems, a new prediction control strategy for fermentation temperature was proposed based on Dynamic Matrix Control (DMC) which had been improved by the time optimal control. The application results show that this strategy exerts a good effect on the fermentation temperature control and quickly suppresses the interferences.

Key words: fermentation temperature control; time optimal control; predictive control; interference suppression

0 引言

现代啤酒生产工艺流程可以分为制麦、糖化、发酵及包装四个工序。这其中在啤酒发酵环节进行了一系列的生化反映,除了生成乙醇(C_2H_5OH)及二氧化碳(CO_2)等啤酒重要成分以外,还有很多量小但影响啤酒口味的中间代谢产物(如双乙酰、高级醇、醛类及酯类等),而这些产物的生成量主要取决于发酵过程的温度,因此发酵温度的控制得当与否对啤酒质量的好坏有着直接影响。但由于发酵过程机制复杂,其温度对象的模型难以精确建立,因而目前还无法实现发酵过程温度的精确控制。通常发酵过程温度控制的目标曲线如图1所示。该过程主要包括一个升温阶段和两个降温阶段,升温阶段热量来源主要靠反应自身放热实现,降温阶段则要靠调节冷媒来实现温度调节。现阶段将各类先进控制引入啤酒发酵温度控制是众多学者研究的重点,如文献[1]将神经网络及模糊控制算法引入传统比例-积分-微分(Proportion-Integral-Differential, PID)控制中,形成PID参数自调整的新策略,充分利用先进控制算法的优点,弥补了传统PID控制的不足;文献[2]利用T-S模型对发酵过程进行辨识,并结合预测控制对发酵温度进行了有效控制。但像模糊控制及PID控制这类控制算法,都属于事后控制,即根据控制偏差来进行相关运算,由于发酵过程的温度对象属于大时滞对象,因此根据

当前时刻的偏差计算出的控制量并作用于系统,其控制效果并不会马上就体现出来。

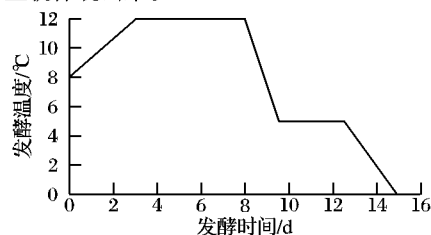


图1 啤酒发酵温度控制曲线

相比而言具有预测性质的算法如动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)则更适合于这类控制。文献[3]将预测控制与传统PID控制相结合,进行串级控制,并将具有PI结构的指标式加入预测控制最优性能指标式中,综合了二者的优点。但预测控制在克服干扰的定值调节方面质量不高,往往是考虑了系统的鲁棒性就忽略了对对象对干扰的快速抑制能力^[4],而发酵过程对温度精度的要求比较高,工艺允许误差为 $\pm 0.5^\circ C$,且发酵罐体积庞大,来自外界和自身的干扰又不可忽略。因此本文针对这一问题,将改进的动态矩阵控制算法引入发酵罐温度这类大时滞对象的控制,借鉴时间最优控制的特点,对DMC算法在受干扰情况下控制量的求取进行了改进,以发酵罐单温段温度为控制对象,其仿真及应用结果表

收稿日期:2010-03-08;修回日期:2010-04-30。

基金项目:浙江省科技计划项目(2008C11017);浙江省教育厅科研项目(Y200804852)。

作者简介:陈乔(1986-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向:预测控制; 郑松(1982-),男,贵州六盘水人,讲师,博士,主要研究方向:计算机控制与优化技术; 葛铭(1971-),男,浙江杭州人,研究员,博士,主要研究方向:面向工业间歇系统的进化动态优化算法。

明改进后的算法在干扰抑制及跟踪输入信号的快速性方面取得了较好的控制效果。

1 抗干扰预测控制策略

在动态矩阵控制中控制律是根据性能指标:

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i [\omega(k+i) - \tilde{y}_M(k+i|k)]^2 + \sum_{j=1}^M r_j \Delta u^2(k+j-1) \quad (1)$$

其中: $\omega(k+i)$ 是 i 时刻的参考输入; $Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_p)$, $R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_m)$ 分别是误差权矩阵和控制权矩阵。

由式(1)求得的最优控制增量矩阵为:

$$\Delta u_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k)] \quad (2)$$

$$\text{令 } G^T = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1p} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{Mp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 $\Delta u_M(k) = G^T [\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k)] =$

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1p} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{Mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(k+1) - \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ r(k+P) - \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1p} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{Mp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_0(k+1) \\ \vdots \\ e_0(k+P) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)给出了控制增量 $\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 的最优值。从中可以看出 $\Delta u_M(k)$ 是参考输入与预测值之间的误差经加权后得到的结果,在 DMC 算法的反馈校正环节,也涉及到了用误差值来校正预测值,不过在反馈校正环节中的误差值是模型预测值与对象实际输出间的差值,反馈校正环节的作用是防止由于模型失真、扰动等未知因素而使预测值偏离实际值,因此误差反馈校正会有助于提高系统对模型失配及外界干扰的适应能力。在如何更好地设置误差反馈从而提高 DMC 控制器对模型失配及外界扰动的适应能力方面,有很多学者做了相关的研究^[5]。

DMC 控制的理想情况是每次都只需计算一个控制增量,就可以将被控对象控制到期望值,即 $M=1$ 。根据最优控制增量计算式(2)可知,若考虑误差权矩阵 $Q=I$ 和控制权矩阵 $R=0$,则 DMC 的一步控制律为:

$$\Delta u(k) = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k)] = d^T [\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k)] = ze(k) \quad (5)$$

其中 z 为常数。

当然 DMC 在多数情况下往往很难对被控对象进行一步到位的控制。但这种控制的可能性还是存在的,因此本文算法考虑将时间最优控制引入对 DMC 控制量的调整。时间最优控制的基本思想可描述如下^[6]。

设对象的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), X(t_0) = X_0 \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

假设目标状态为 X_f ,则要求在容许控制范围内寻求最优控制,使系统以最短的时间从初始状态 X_0 转移到 X_f ,性能指标则为:

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} 1 dt = t_f - t_0; 0 \leq u_t \leq C \quad (7)$$

即控制时间最短,且控制量 u_t 只能在区间 $[0, C]$ 取值。对象的状态方程在满足该条件时,受限控制 $u_j(t)$ 的最优解为:

$$\hat{u} = \begin{cases} 0, & |e(k)| \leq e_{\max} \\ C, & |e(k)| > e_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $|e(k)|$ 为系统反馈误差的绝对值, $e_{\max}$ 是开关误差。从时间最优控制的基本思想可以看出,它的控制量并不按某个性能指标来选取,因此不一定是最优的,但这种按极端取值来控制的方式,在提高控制器的快速反映能力方面起到了很好的作用。本文正是将这一思想融入 DMC 控制量的求取当中。控制框图如图2所示。

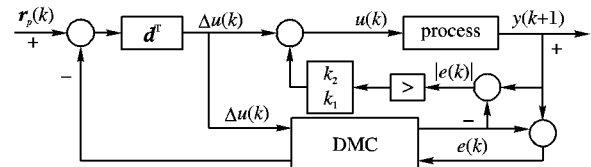


图2 控制框图

由图2可知,其基本原理是根据预测值与实际值间的误差来调整控制量。先将误差划分为“小、中、大”三类,其中“中、大”两类误差分别对应不同的权重系数 k_1, k_2 ;在“小”偏差情况下,不对 DMC 控制量进行调整,即按 DMC 算法计算一组最优的控制量:

$$\Delta u(k) = [1, 0, \dots, 0]_{1 \times M} \Delta u_M(k)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

事实上 DMC 算法虽然在求解最优控制增量的时候求出了 M 个控制增量,但它只采用即时的控制增量 $\Delta u(k)$,这正是 DMC 的“滚动优化”思想。

当偏差进入“大”偏差范围,即时控制量的求取不再按照性能指标来计算,而是结合 DMC 一步控制律,并将控制量取极端值,在这里便是将最大误差值乘以一加权重系数得到的。

$$u(k) = k_2 e_{\max} \quad (9)$$

当误差值进入“中”偏差范围时,控制量的调整方式不同于式(9),考虑到上一控制阶段的极端性及系统运行的平稳性,其控制量的计算方式如下:

$$\Delta u(k) = k_1 e(k)$$

$$u(k) = u(k-1) + k_1 e(k)$$

这样将误差分级,并由此计算不同的控制量,一方面能快速抑制偏差,另一方面系统也能平稳运行。此外在实际的控制当中控制量的选取并不是没有上限的,而是受现实条件的制约,比如阀门的开度有个最大值或者其他外界限制条件。因此权重系数 k_1, k_2 及偏差值的分级标准都需根据实际的工况来确定。

对于“大偏差”阶段,权重系数 k_2 须依据式(5)来取值,例如某工况中被控对象偏离目标值最大为 $e_{\max}$,控制量 $u(k)$ 的实际取值范围为 $[0, C]$ 。那么根据式(5)有:

$$\Delta u(k) = ze(k) \quad (10)$$

式(10)左右两边在某特定时刻都为数值形式,因此对于 DMC 一步控制则有 $u(k) = \Delta u(k)$,从而:

$$\Delta u(k) = u(k) = ze(k) \quad (11)$$

令 $u(k) = E$,又由式(9)可知 k_2 的取值原则为:

$$k_2 = \max \{ E/e_{\max}, C/e_{\max} \} \quad (12)$$

对于 k_1 的取值则参考 k_2 ,通过在线调整得到,二者间的大小关系无特别要求。

2 算法仿真

2.1 抗干扰性能

通过对模拟啤酒发酵罐对象输入端加以阶跃激励信号,

并以一定的采样周期采集输出信息,用最小二乘方法对该数据进行模型辨识,得到发酵罐单温段对象模型为:

$$G(s) = \frac{1.48e^{-380s}}{6731s^2 + 396s + 1} \quad (13)$$

该对象是一时滞系统,时滞 $d = 380$ 。由于DMC算法的预测性质,它在对时滞对象的控制中很自然地就可以把对象的纯时滞考虑在内,并且在控制器结构上无需大的改动,详情请参考文献[4]。针对式(13)所给对象,选取建模时域 $N = 50 + d$,控制时域 $M = 2$,预测时域 $P = 8 + d$,采样周期 $T = 50$,误差权矩阵 $Q = I$,控制权矩阵 $R = 0$,对误差校正向量 h 的选取则按考虑鲁棒性的方式,即 $h_1 = 1, h_2 = h_3 = \dots = h_i = \alpha$ (α 为校正因子),其中 $\alpha = 0.5$ 。

针对上述被控对象在单一DMC算法的控制下,以单位阶跃信号为参考输入,在某时刻给对象输入端引入一幅值为0.2的阶跃干扰,系统响应如图3所示。

由图3可知,单纯DMC控制器对干扰无法实现快速的调节,整个调节过程时间比较长。这是由动态矩阵控制中预测模型不精确,从而使校正环节不到位。此外误差校正向量 h 的不同取值对系统的抗干扰性能也有影响。

DMC相关参数与之前相同,采用本文改进后的算法,选取 $k_1 = 15, k_2 = 10$,“大”偏差值基准线为 $e_2 = 0.2$,“中”偏差基准线 $e_1 = 0.02$,“小”偏差基准线 $e_0 = 0.002$,在同一时刻给对象输入端引入幅值大小也相同的阶跃干扰,控制效果如图3标注所示,与图中标注的单纯DMC控制效果比较,不难发现在对控制量引入新的计算方式后,虽然在模型系数的精度上并未进行改进,但由于在遇到大误差时控制量的极端性,从而提高了系统对扰动的快速抑制能力。

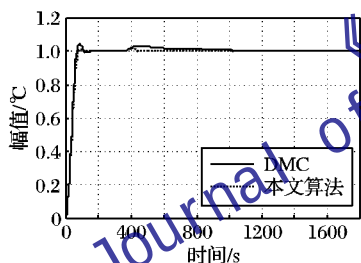


图3 对象扰动对比

2.2 控制效果验证

为了验证本文算法对参考输入的跟踪效果,参考啤酒发酵温度控制的典型曲线图1,给出如图4所示的参考输入,对改进后的DMC算法与原DMC进行仿真比较验证,其各自对应的实际输出及参考输入与实际输出间的误差曲线分别如图5~8所示。通过比较不难发现在本文算法的控制下,跟踪误差要明显好于原DMC算法控制下所产生的误差。比较各自的实际输出曲线(如图5、7),在本文算法控制下,温度上升或下降阶段,输出曲线较原DMC能更快接近于参考输入,只是在过渡到恒温阶段时,往往会由于控制量过度而引起温度值的一些偏离,但这一偏离也能很快得到纠正;此外通过其误差曲线可以发现,按照啤酒发酵工艺中对发酵温度允许有 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 误差来看,本文算法完全能满足这一要求。该算法在企业的实际控制曲线如图9所示(2009年6月数据),该发酵罐共有4个控温夹套,各条温度曲线有一定梯度,由图可以发现,整个过程控制平稳,精度较高。

3 结语

本文针对发酵罐温度对象模型难以精确建立及发酵过程中干扰的不可预测性,结合预测控制对对象模型的结构不要

求有先验知识,及时间最优控制调节时间最短的特点,提出了一种快速抗干扰的预测控制算法,有效地提高了系统的抗干扰能力,并成功应用于工业实际,取得了较好的控制效果和经济效益。

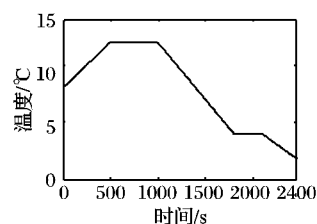


图4 参考输入

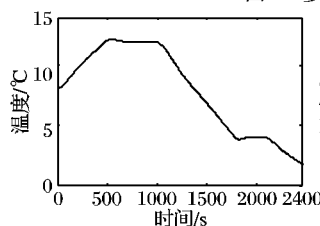


图5 本文算法的对象输出

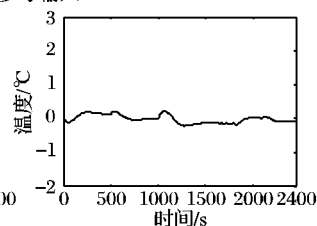


图6 本文算法的误差曲线

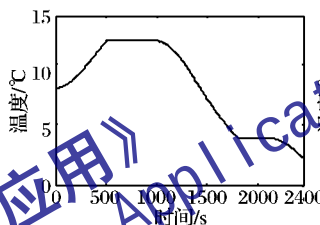


图7 DMC的对象输出

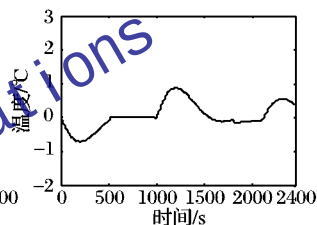


图8 DMC的误差曲线

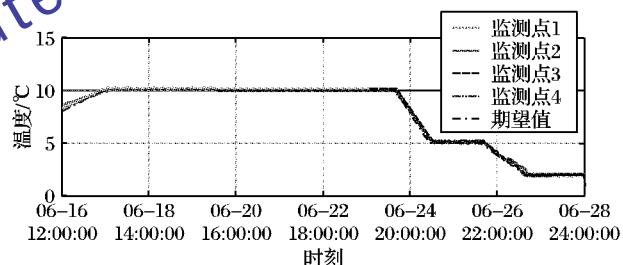


图9 工业实际应用曲线

参考文献:

- [1] 谢强军, 区志励, 蔡晋辉. 混合参数自调整模糊PID控制在啤酒发酵中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 831-832.
- [2] 才辉, 张光新, 周泽魁. 基于T-S模型的动态预测在啤酒发酵温度控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 745-747.
- [3] 叶青, 熊茂华. 预测—PID串级控制在发酵过程中的应用[J]. 微计算机信息, 2006, 22(8): 73-75.
- [4] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [5] 庞中华, 金元郁. 基于误差校正的预测控制综述[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(2): 1-4.
- [6] 王占林. 近代液压控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [7] 修志龙, 邵惠鹤. 微生物发酵过程的温度控制[C]//第十六届中国过程控制学术年会暨第四届全国故障诊断与安全性学术会议. 济南: [出版者不详], 2005: 30-33.
- [8] 高钦和, 王孙安. 基于IGPC的时变大时滞系统自适应控制[J]. 计算机应用, 2007, 27(6): 1508-1509.
- [9] ASHOORI A, MOSHIRI B, KHAKI-SEDIGH A. Optimal control of a nonlinear fed-batch fermentation process using model predictive approach[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(7): 1162-1173.
- [10] 唐功友, 高洪伟, 董瑞. 带阶跃扰动的线性时滞系统最优无静差控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(12): 1417-1420.