

间歇反应釜降温过程的多目标控制

戴晓春*, 冯殿义

(辽宁工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:针对间歇反应釜降温时间控制困难的问题,提出一种基于间歇反应釜降温数学模型的控制方案。该方案依据热量守恒定律和传热速率方程建立间歇反应釜降温数学模型,通过控制间歇反应釜夹套入口冷媒的温度,进而实现对间歇反应釜降温时间的控制。为了实现反应釜在目标时间内降温至目标温度的多目标控制目的,采用了基于模型的开环控制闭环修正的控制策略,通过周期性修正间歇反应釜降温模型,实时调整夹套入口冷媒的温度,从而实现间歇式反应釜降温过程的多目标控制,提高了降温时间的控制精度。并通过实验证明该修正方法及控制方案是切实可行的。

关键词:间歇反应釜;降温;模型;模型修正;控制

中图分类号:TQ063

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)02-0192-03

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.02.046

Multi-objective control of cooling process for batch reactor

DAI Xiao-chun*, FENG Dian-yi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: It is difficult to control the accurate time of cooling process in a batch reactor. In order to overcome this difficulty, a control scheme is put forward based on the cooling mathematical model of batch reactor. In this scheme, the cooling mathematical model of batch reactor is firstly established according to the law of conservation of heat and the heat transfer rate equation, then the cooling time of batch reactor is controlled through controlling the coolant temperature at jacket entrance of batch reactor. In order to realize the target of multi-objective control that the batch reactor is cooled to an objective temperature in an objective time, the control strategy of open-loop control plus closed-loop correction based on the mathematical model is adapted, therefore the coolant temperature at jacket entrance is adjusted in real time through modifying periodically the cooling mathematical model of batch reactor. The multi-objective control of cooling process in batch reactor is finally achieved while the control accuracy of cooling time is improved too. This modified approach and the control scheme is verified practicable according the experimentations.

Key words: batch reactor; cooling; model; model correction; control

反应釜是精细化工生产的核心单元设备,其温度控制具有高度的非线性、时滞性特点,且生产方式通常为多品种^[1-2]、多批次间歇生产,生产工况多变,具有严重的不确定性。也会出现一些异常或不理想的工作点,形成危险状态集^[3],使得对其温度进行准确控制变得十分困难^[4-6]。而对于具有时间、温度多目标动态过程控制要求的场合,传统的控制技术^[7-11]很难达到所要求的控制精度。为此,本文中提出一种基于模型的开环控制闭环修正的控制策略,用于动态降温过程多目标控制。

1 反应釜降温模型

1.1 热量平衡方程

在间歇反应釜降温过程中,釜内介质与夹套内冷媒进行热量交换,对于无反应热的传热过程,忽略该过程中产生的热损失,取降温过程中某一微元时间段 $d\theta$ 做热量衡算,有:

$$wc_{p2}(t_2 - t_1)d\theta = -Mc_{p1}dT \quad (1)$$

$$d\theta = (-Mc_{p1}/wc_{p2}) \cdot [1/(t_2 - t_1)]dT \quad (2)$$

式中, θ 为间歇反应釜降温时间, s; T 为釜内介质温

度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 、 t_2 分别为间歇反应釜夹套入口和出口温度, $^{\circ}\text{C}$; w 为无水乙醇质量流量, kg/s ; M 为釜内介质质量, kg ; c_{p1} 、 c_{p2} 分别为釜内介质和无水乙醇的低压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

1.2 反应釜降温模型

取降温过程中某一微元时间段 $d\theta$ 对冷媒做热量衡算与传热速率方程,有:

$$wc_{p2}(t_2 - t_1)d\theta = KA\Delta t_m d\theta \quad (3)$$

其中平均温度差:

$$\Delta t_m = (t_2 - t_1) / \{\ln[(T - t_1)/(T - t_2)]\}$$

式中, KA 为反应釜总传热系数与传热面积的积, $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ 。

将平均温度差 Δt_m 带入式(3),并令 $b = KA/wc_{p2}$,整理得到:

$$t_2 = (1 - e^{-b})T + t_1 e^{-b} \quad (4)$$

将式(4)带入式(2),整理得到反应釜降温时间计算式:

$$d\theta = -[a/(1 - e^{-b})] \cdot [1/(T - t_1)]dT \quad (5)$$

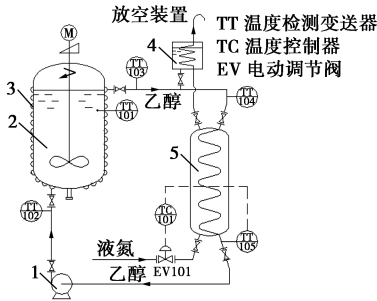
$C = -[(1 - e^{-b})/a]$, 则反应釜降温模型可以表达为如下形式:

$$T = (T_0 - t_1)e^{C\theta} + t_1 \quad (6)$$

2 控制方案与策略

2.1 降温系统结构与控制要求

反应釜降温工艺流程如图1所示。低温无水乙醇经液氮低温换热器管程出口,通过低温泵送入反应釜壳体外侧半管夹套对釜内介质降温,经半管夹套出口循环回路进入到低温换热器管程,换热器壳程液氮气化对管程乙醇降温。低温换热器乙醇出口温度控制采用独立的PID定值控制系统。忽略低温换热器乙醇出口与反应釜夹套入口间的热损失,夹套入口温度 t 即为低温换热器乙醇出口温度。



1—低温循环泵;2—反应器;3—半管夹套;4—膨胀箱;5—低温换热器

图1 反应釜降温装置

生产过程为间歇式生产,要求在时间 θ_s 内,反应釜内介质由初始温度 T_0 降至目标温度 T_s 。由式(6)反应釜降温模型可知,通过控制夹套入口温度 t ,可达到控制釜内介质温度和降温时间的目的。根据反应釜控制目标值 (T_s, θ_s) ,由式(6)计算得到反应釜夹套入口温度 t :

$$t = (T_s - T_0 e^{C\theta_s}) / (1 - e^{C\theta_s}) \quad (7)$$

显然,控制反应釜夹套入口温度 t 满足式(7),就能实现控制目标值 (T_s, θ_s) 。该值作为低温换热器乙醇出口温度PID定值控制给定值,即:

$$t = t_{sp} \quad (8)$$

2.2 降温过程控制策略

为了实现反应釜在目标时间 θ_s 内达到目标温度 T_s 的多目标控制,采用基于模型的开环控制闭环修正控制策略。根据式(6)已知的对象模型,通过对夹套入口温度 t 的控制,实现对反应降温过程目标温度 T_s 和时间 θ_s 的控制。基于模型控制类似前馈控制的开环控制系统,如果模型和对象完全一致,而且系统扰动 f 为零,则系统输出偏差为零,这是理想状态。实际状态下,模型和对象不可能完全一致,且系统也不可能无扰动,模型和对象之间有一定的失配量。因此,引入闭环修正环节对模型进行实时修正,进而得出新的夹套入口温度 t ,使系统收敛到控制目标 (T_s, θ_s) 。控制是以时间离散方式进行,依据上一个采样周期的测量参数修正模型,根据修正

后的模型计算下一个采样周期的夹套入口温度 t ,作为低温换热器出口温度的给定值 t_{sp} 。基于模型控制系统方框图如图2所示。

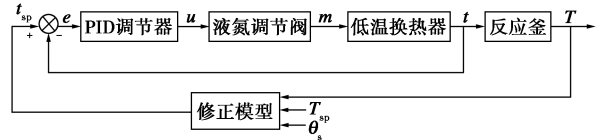


图2 间歇反应釜降温控制系统

3 模型与输入温度修正

3.1 降温模型修正原理

反应釜降温模型修正过程如图3所示。控制过程期望目标 $A(T_s, \theta_s)$ 。假设第 $k-1$ 采样周期 $(\Delta\theta_{k-1} = \theta_{k-1} - \theta_{k-2})$ 模型失配,如不对模型修正,进入第 k 周期夹套入口温度保持 t_{k-1} 不变,降温过程将沿实际对象特性曲线 bB 到达终点 B ,偏离期望目标 A 。因此,在 $k-1$ 周期终点 θ_{k-1} 时刻,依据该周期的测量参数 (T_{k-1}, T_k, t_{k-1}) 对模型进行修正,并根据修正后的模型计算得到新的夹套入口温度 t_k (作为下一个第 k 周期低温换热器乙醇出口温度控制的给定值 t_{spk})。第 k 周期在夹套入口温度 t_k 控制作用下,降温过程将按修正后的模型(曲线 bA)重新收敛于期望目标 A 。这一开环控制和闭环修正过程在每一个周期内进行,降温过程将沿曲线 $abcA$ 不断逼近并收敛于期望目标 A 。

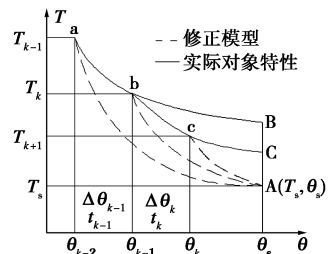


图3 降温模型修正示意图

3.2 模型修正

根据式(6)降温模型可知,过程对象的扰动均包含在系数 C 中,因此,模型的修正只需修正系数 C 。根据采样周期的边界参数计算系数 C 的近似模型,可以满足控制精度要求。取采样周期为常数 $\Delta\theta_c$,考察第 $k-1$ 采样周期测量参数 (T_{k-1}, T_k, t_{k-1}) ,根据式(6)降温连续模型可得到降温离散模型:

$$T_k = (T_{k-1} - t_{k-1})e^{C_{k-1}\Delta\theta_c} + t_{k-1} \quad (9)$$

得到第 k 个采样周期的降温模型中参数 C_k 的修正式:

$$C_{k-1} = (1/\Delta\theta_c) \ln[(T_k - t_{k-1}) / (T_{k-1} - t_{k-1})] \quad (10)$$

式中, k 为采样时刻序号, $k=2,3,\dots$ 。

初值 C_0 由初始工艺条件计算得到,即:

$$C_0 = -[(1 - e^{-b})/a]$$

经第 $k-1$ 采样周期修正后的降温连续模型为:

$$T = (T_k - t)e^{C_{k-1}\theta} + t \quad (11)$$

式(11)用来计算下一个采样周期(第 k 周期)的夹套入口温度 t_k 。

3.3 输入温度修正

考查 θ_k 至 θ_s 时间段,控制目标值为 $(T_s, \theta_s - (k-1)\Delta\theta_c)$,由式(10)得到:

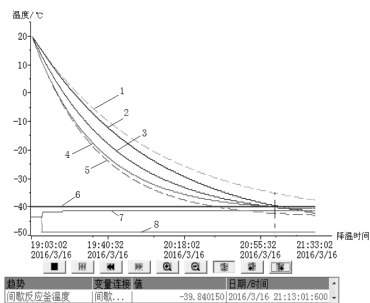
$$T_s = (T_k - t_k)e^{C_{k-1}[\theta_s - (k-1)\Delta\theta_c]} + t_k$$

$$t_k = (T_s - T_k e^{C_{k-1}[\theta_s - (k-1)\Delta\theta_c]}) / (1 - e^{C_{k-1}[\theta_s - (k-1)\Delta\theta_c]}) \quad (12)$$

式中, k 为采样时刻序号, $k=1, 2, 3, \dots$ 。

4 实验研究

研究在降温模型失配情况下,控制方案的可行性和反应釜降温效果,对图 1 所示装置进行了多次实验,结果如图 4 所示。



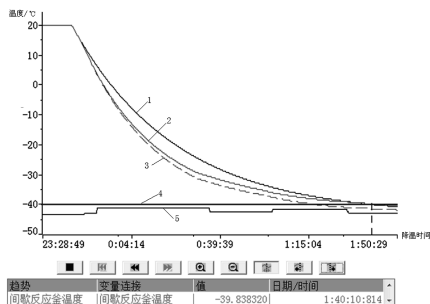
- 1—增加 30%,无修正;2—增加 30%,有修正;3—无偏离,无修正;
- 4—降低 30%,有修正;5—降低 30%,无修正;6—目标温度;
- 7—C 增加 30%时夹套入口温度;8—C 降低 30%时夹套入口温度

图 4 参数 C 偏离 $\pm 30\%$ 时的降温曲线

由图 4 可以看出,当参数 C 偏离 $\pm 30\%$ 时,对模型进行修正的降温曲线逐渐收敛于参数 C 无变化且不进行修正的降温曲线(即初始模型降温曲线),降温目标时间到达时,间歇反应釜能够降温至目标温度 -40°C ;而不进行修正的降温曲线逐渐偏离初始模型降温曲线,降温时间到达时,釜温度与目标温度存在一定的偏差。在采用模型修正的情况下,降温目标时间到达时,温度偏差一般都控制在在 0.5°C 之内,能够满足工艺要求;相反地,在不采用模型修正的情况下,降温目标时间到达时,温度偏差甚至会高达 5°C ,无法满足工艺要求。

随机改变被控对象降温模型中的参数 C ,使降温模型产生多次失配,实验结果如图 5 所示。当参数 C 的值产生随机偏离时,采用修正模型的降温曲线在降温过程中不断逼近理想模型的降温曲线,到达降温目标时间时,反应釜温度下降至 -39.8°C ,与目标温度的偏差为 0.2°C ,在工艺要求允许的范围;而未进行修正的降温曲线与理想模型的降温曲线偏离较大,在降温目标时间到达时,温度下降至

-42°C ,与目标温度的偏差为 -2°C ,偏差过大。



- 1—无偏离,无修正;2—随机变化,有修正;
- 3—随机变化,有修正;4—目标温度;5—夹套入口温度

图 5 参数 C 随机变化时的降温曲线

5 结语

通过间歇反应釜降温模型的研究,提出了基于闭环修正模型的开环降温控制方案。

(1)通过对间歇反应釜夹套入口温度的控制,实现了在目标时间内,釜内温度降至目标温度的降温过程。

(2)考虑到实际生产过程中存在的模型失配问题,提出了降温模型修正方法和夹套入口温度计算方法,从而提高间歇反应釜的温度控制精度。通过实验证明该修正方法及控制方案是切实可行的。

参考文献

- [1] 李东娟.连续搅拌反应釜的自适应神经网络控制[J].化工学报,2013,64(12):4674-4680.
- [2] Bachir Daaou, Abdellah Mansouri, Mohamed Bouhamida, et al. Development of linearizing feedback control with a variable structure observer for continuous stirred tank reactors[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(3): 567-571.
- [3] 王宇红, 杨璞.一种基于 PWA 模型的控制策略在连续搅拌反应釜中的应用[J].化工学报,2016,67(3):865-870.
- [4] Bachir Daaou, Abdellah Mansouri, Mohamed Bouhamida, et al. Development of linearizing feedback control with a variable structure observer for continuous stirred tank reactors[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(3): 567-571.
- [5] 陈珺, 刘飞.基于 Takagi-Sugeno 模糊双线性模型的连续搅拌反应釜 H_∞ 控制[J].控制理论与应用,2012,29(2):212-216.
- [6] 李红斌, 冯殿义, 李卫民.基于推断策略多介质反应温度控制系统研与实现[J].现代化工,2015,35(2):166-168.
- [7] 钱积新.非线性预测控制[M].北京:科学出版社,2015:83-150.
- [8] 杨剑锋, 赵均, 钱积新, 等.一类化工过程多变量系统的自适应非线性预测控制[J].化工学报,2008,59(4):934-940.
- [9] 王东, 周东华, 金以慧.自适应广义一般模型控制[J].化工学报,2003,54(3):344-349.
- [10] Magni L, Raimondo D M, Allgöwer F. Nonlinear model predictive control: Towards new challenging applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [11] Oberdieck R, Pistikopoulos E N. Explicit hybrid model predictive control: The exact solution[J]. Automatica, 2015, 58(8): 152-159.