

一种新的最优均匀液位控制策略¹

郭方路 岳 红 高东杰

(中科院自动化所综合自动化技术工程中心, 北京, 100080)

摘要 本文基于模型预测最优均匀液位控制思想, 结合实际工业控制问题给出了一种新的均匀液位控制方法, 可以有效地处理水平放置和竖直放置的圆柱形储罐的液位控制问题, 并考虑了在液位越界、有输出流量约束等情况下的解决方法, 仿真结果和初步的现场运行结果证明了算法的有效性。

关键词: 液位控制 均匀控制 卧罐处理 流量约束 液位越限

1. 概述

在工业过程中, 有这样一类液位控制, 输出流量是执行器操纵量, 输入流量是不可测的扰动, 控制目标要求将液位保持在一定的上下界之中, 同时尽可能使输出流量变化和缓。与常规液位控制思路不同, 此类问题不要求液位被严格控制在某一固定位置, 而是允许在一个规定的范围内变化, 利用容器的容量尽量平滑输出流量, 减少对下游操作单元的进料扰动。这类控制被称之为均匀液位控制。

传统的均匀液位控制多采用比例、比例积分或串级调节等构成的均匀控制方案[1][2], 这些方案要求凭经验人工进行参数整定, 并且没有充分考虑对象的特性, 所以在易用性和控制效果上都不是很理想。近年来针对均匀液位控制问题出现了一些采用预测及优化控制的先进控制方案[3][4], 控制效果比传统的方案有了明显的提高, 提供了液位控制的新思路。但由于各种方法的研究背景差别较大, 在进行实际工业应用时必须针对具体问题进行分析和改进。在文[3]的研究基础上, 本文针对化工行业中常见的串联储罐间有流量关联的液位控制问题, 提出了一种新的均匀液位控制方案, 不仅可以控制直立的柱形罐, 还可以控制水平放置的圆柱形罐。并结合工业应用的实际情况, 提出了在液位越界、输出流量有约束等情况下的解决办法。

2. 均匀液位控制问题的数学描述

考虑串联储罐间有流量关联情形的液位控制问题。以炼油过程常减压操作为例, 常压塔底的液位由塔底抽出量控制, 对常压塔而言, 需要通过改变塔底抽出量来保持液位相对稳定; 同时, 常压塔底的抽出量又是减压炉的进料, 对减压炉来讲, 希望尽量保持进料量的稳定。本文采用均匀控制的思想: 在保证液位变化不超过规定范围的同时, 使输出流量的变化最小化。

以离散时间控制方案为例, 本文的控制目标可以归纳为: 在时刻 t , 设液位允许变化的上下限为 h_{\min} 和 h_{\max} , 设计控制策略 $u(t)$, 使得 t 时刻之后输出流量 $q_o(t)$ 增量的最大值极小化, 即

¹ 本文研究属国家“九五”重点攻关项目课题

$$\min \left\{ \max_{k \in K} |q_o(t+k) - q_o(t+k-1)| \right\}, \quad K = \{0,1,2,3, \dots\} \quad (1)$$

同时将液位变化保持在上下限之间

$$h_{\min} \leq h(t+k+1) \leq h_{\max} \quad (2)$$

其中 $q_o(t)$ 是在时刻 t 的输出流量, $h(t)$ 是在时刻 t 的液位, k 表示预测步长。

对于以上控制问题, 如果以罐的液位特性为依据进行控制方案设计[3], 只能适用于截面固定的立式罐的情况, 而对水平放置的圆柱形罐, 由于其水平截面积并非固定值, 因而流量与液位的关系是非线性的, 无法采用类似方法。鉴于化工设备中卧罐也很有代表性, 本文同时考虑立罐和卧罐的情况, 提出一种以体积变化为依据的新的均匀液位控制方法。

3. 控制方案

3.1 基本控制方案

控制方案在总体上采用内模控制(IMC)结构和预测优化的思想[3], 这里主要提出以罐中液体体积特性为基础的优化控制方法, 为考虑不同形式放置罐设备的液位控制提供了统一的框架。

若控制周期为 T , 且在 $t-1$ 时刻的入口流量扰动 $d(t-1)$ 是恒定的, 则罐中液体 $t-1$ 时刻到 t 时刻的体积变化为:

$$V(t) - V(t-1) = T * (d(t-1) - q_o(t-1)) \quad (3)$$

由此可推算出 $t-1$ 时刻的入口扰动:

$$d(t-1) = \frac{V(t) - V(t-1)}{T} + q_o(t-1) \quad (4)$$

如果再假设在 t 时刻和未来时刻没有新的扰动, 则可得以体积为基础对 $d(\cdot)$ 预测的方法为:

$$d(t+k) = d(t-1) = \frac{V(t) - V(t-1)}{T} + q_o(t-1) \quad (5)$$

对底面面积为 A 的直立柱形罐, 其体积特性为:

$$V(t) = h(t) * A \quad (6)$$

对长为 L , 底面半径为 R 的水平放置的圆柱形罐, 其体积特性为:

$$V(t) = L * \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{R-h(t)}{R} \right] * R^2 - (R-h(t)) * \sqrt{R^2 - (R-h(t))^2} \right\} \quad (7)$$

有了对输入流量扰动的预测和罐中液体体积变化特性的描述，即可得到如下的优化控制方案。由于篇幅原因，本文不做详细推导，有兴趣者请与作者联系。

当液位位于上下限 h_{\min} 和 h_{\max} 之间时，输出流量控制算法表示为：

$$q_o(t) = \begin{cases} q_o(t-1) + \Delta q_o, & |\Delta q_o| > |\Delta q_o^*| \\ q_o(t-1) + \Delta q_o^*, & |\Delta q_o| \leq |\Delta q_o^*| \end{cases} \quad (8)$$

其中，

$$\Delta q_o = \frac{2 * \Omega(t-1)}{P+1} + \frac{2 * (V(t) - V_s)}{T * P * (P+1)} \quad (9)$$

$$\Delta q_o^* = \frac{\Omega(t-1)}{k^*} \quad (10)$$

$$k^* = N \left\{ \frac{2 * (V_{\lim} - V(t))}{T * \Omega(t-1)} \right\} \quad (11)$$

$$\Omega(t-1) = d(t-1) - q_o(t-1) \quad (12)$$

$$V_{\lim} = \begin{cases} V_{\max}, & \Omega(t-1) > 0 \\ V_{\min}, & \Omega(t-1) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中， V_{\max} 和 V_{\min} 为罐中液体的最大和最小允许体积，与液位的 h_{\max} 、 h_{\min} 的换算关系遵从 (6)、(7) 的函数关系式。 V_s 为稳态时液体的体积，一般取 $V_s = 1/2(V_{\max} + V_{\min})$ 。(8) 式中参数 P 为液位调节品质因子，需要根据实际情况调整，后面做进一步解释。

3.2 液位越界处理

以上的基本控制算法中，对输入流量的扰动影响采取了(5)式所示的预测滚动校正。在这一预测成立的基础上，可以保证满足优化问题的要求，即：输出流量变化最小且液位处于规定范围内。基本算法中未涉及液位越限的问题，这一处理在多数情况下可以接受。然而，由于以上算法是基于对扰动量的预测值完成的，在实际运行过程中，有可能遇到扰动量与预测值偏差较大的情况，优化问题的要求就可能不满足，因此，应增加对液位越限的处理。对于一般的化工过程储罐液位控制，很难保证液位绝对不超过允许的正常界限，但应该通过控制作用使液位及时回到规定界限之内。

基于以上考虑，本文对以上控制策略进行了修正，修正内容主要包括输出流量增量变化和输出流量控制处理两部分：

$$\Delta q_o = \begin{cases} \frac{2 * \Omega(t-1)}{P_{drive} + 1} + \frac{2 * (V(t) - V_{min})}{T * P_{drive} * (P_{drive} + 1)} & h(t) < h_{min} \\ \frac{2 * \Omega(t-1)}{P_{drive} + 1} + \frac{2 * (V(t) - V_{max})}{T * P_{drive} * (P_{drive} + 1)} & h(t) > h_{max} \end{cases} \quad (14)$$

$$q_o(t) = q_o(t-1) + \Delta q_o \quad (15)$$

此处用 P_{drive} 表示液位调节品质参数,它决定了以多快的速度将液位拉回到界限之内。 P_{drive} 越小,液位回界限内的速度越快,但输出流量变化将会比较剧烈。

3.3 输出流量约束处理

基本控制方案没有考虑对输出流量的约束,然而实际控制中输出流量的变化必定受物理设备的约束。虽然可以通过对算法的参数做调节以避免控制器计算出的输出流量超过设备的实际能力,但仿真发现在设备对控制器的输出进行了限幅时,算法输出的控制量 q_o 仍然会继续增大或减小。其原因在于:当设备对控制器输出的 q_o 物理限幅时,控制器并不知道发生了限幅,仍然以未限幅的 $q_o(t-1)$ 为基础进行计算。 q_o 的这种错误计算带来了积分饱和和效应:当 q_o 要向反方向变化时,必须抵消原来饱和时累计的值,严重时甚至会发生振荡。为了消除这一影响,必须在控制器中增加对 q_o 的约束。本文采用的处理方法为:

$$q_o = \begin{cases} q_{o\min}, & q_o < q_{o\min} \\ q_{o\max}, & q_o > q_{o\max} \\ q_o, & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $q_{o\min}$ 和 $q_{o\max}$ 分别为流量约束的上下限。

以下的仿真例子说明了采取流量约束的作用。本例仿真了对输出流量进行上限约束的情况,仿真条件如下:罐的截面半径 $1.0m$,标称液位高度 $1.0m$,液位上限 $1.6m$,液位下限 $0.4m$,标称输出流量为 $1.0m^3 / \min$,输出流量设备物理约束上限为 $1.54m^3 / \min$,输出流量在控制器中采用的约束上限为 $1.52m^3 / \min$,扰动作用为进料流量的阶跃变化,幅值为 $0.5m^3 / \min$ 。

仿真结果见图 1 和图 2,图中曲线 1 表示液位变化,曲线 2 表示输出流量的变化。从对比结果可以看出:控制器不加输出流量约束条件时,当外界扰动使得输出流量变化较大、超过其物理约束时,液位和输出流量的变化都出现振荡现象(图 1);控制器加入输出流量约束时,则把流量变化限制在一定范围内,液位和输出流量的变化都比较平稳(图 2)。

需要注意的是:控制器流量约束的上下限不应超过设备的实际约束范围,否则约束的作用就不明显。但如果控制器的流量约束作用过强,即输出流量变化范围设置很窄,将使控制器的调节作用下降,结果过于保守。实际操作时,选择接近设备物理约束的数值比较合适。

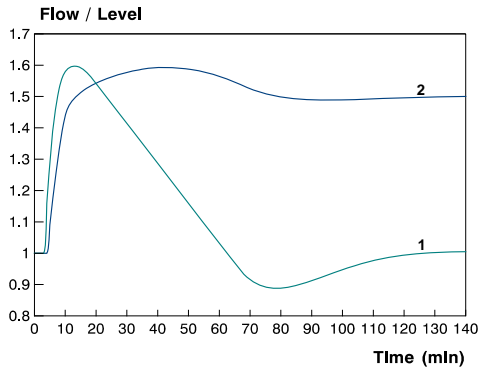


图 1 无输出流量限幅液位控制

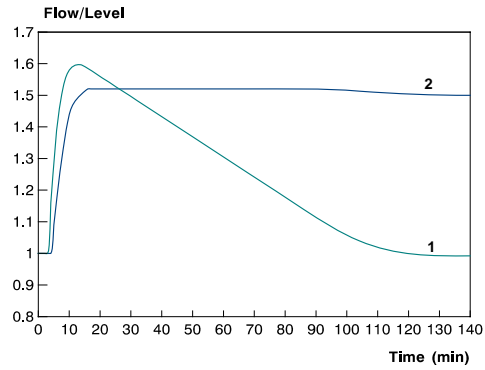


图 2 有输出流量限幅液位控制

4. 实施要点

以上的控制器在实际液位控制中很容易实施，因为算法简单、需要调整的参数很少，并且调整参数都有很明确的物理意义。此外，对象的模型通过罐的物理参数可以很方便地计算得到，不需经过系统辨识及函数换算等。实施过程分为变量准备和参数调整两部分。

第一部分：变量准备。要求按规定单位给出过程数据和罐体的物理参数，主要注意保持单位的一致性，具体如下：（本例中给出一种示例单位）

过程量： 输出流量 $q_o(t)$ —— 立方米/分钟

液位 $h(t)$ —— 米

对象参数： 液位上下限及设定值 h_{\max} 、 h_{\min} 、 h_s —— 米

对于直立的柱形罐：底面面积 A —— 平方米

对于水平放置的圆柱形罐：圆形截面半径 R —— 米

罐体长度 L —— 米

第二部分：控制品质参数的调整。这里给出一些基本调整原则：

1. 控制周期 T ：控制周期过小对控制效果影响不大，对于一般的炼油化工工艺，取 1 分钟即可。当输入流量扰动幅度大、罐的可变化体积小，控制周期 T 要短些；反之，可延长控制周期 T 。
2. 液位调节品质参数 P (液位未越界情况)：恰当调整 P ，尽量增大 P 使液位波动幅度接近规定的上下限，充分利用罐的容量消除流量波动。 P 小有利于将液位控制得比较平稳，但输出流量波动相应变大。一般情况下， P 取 15 到 20 即可。
3. 液位调节品质参数 P_{drive} (液位越界情况)： P_{drive} 决定液位越界后以多快的速度将液位拉回规定界限内， P_{drive} 小则拉回速度快，但拉回过程中输出流量波动加大。一般 P_{drive} 取

4 到 8 即可。

4. 液位设定值 h_s ：它表明无扰动时正常情况下液位的位置，一般取为 $1/2(h_{\max} + h_{\min})$ ，即 h_s 位于 h_{\max} 和 h_{\min} 正中，这样可以充分利用罐体的容量对输入流量扰动 d 进行上下两个方向的滤波。如用户有特殊要求， h_s 可取 h_{\max} 和 h_{\min} 之间的任何值。

5. 现场运行结果分析

将以上控制策略在某炼油厂的常减压装置上进行了现场运行检查，被控装置是常压塔的塔底液位，其塔底液位的输出流量将作为减压炉的进料。运行环境为 alpha 工作站，DCS 采用 Foxboro 系统。由液位控制器计算出输出流量，送到实时数据平台，然后实时数据平台再将输出流量值送入 DCS 上相应的 PID 控制回路中。

原控制系统采用国外的液位先进控制策略，图 3 中给出了本文控制器与原控制器出口流量的增量变化对比情况。图(3)a 是输出流量增量变化曲线，曲线 1 代表原控制策略，曲线 2 代表本文控制策略，图(3)b 是现场液位变化的实时曲线。由图可以看到，在整个控制过程中，两个控制器的控制方向基本一致，当发生大的扰动时，本文控制器增量的幅度变化要比原控制器的增量幅度小。这说明采用本文算法进行液位均匀控制能取得满意的控制效果，并且结果优于原使用的国外同类软件。

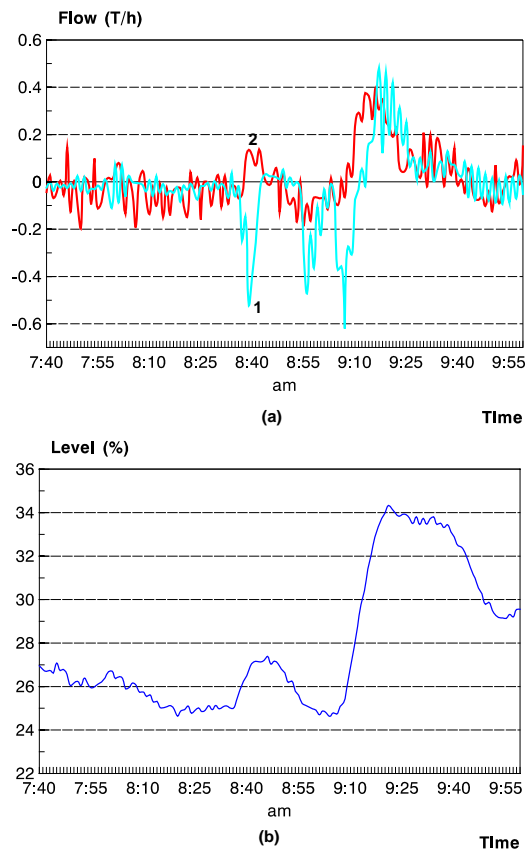


图 3 常压塔塔底液位控制现场运行结果

6. 总结

通过现场测试对比, 本文方法表现出了较好的控制效果, 与其它同类方法相比, 还可以处理非线性的水平放置圆柱形罐液位控制问题。本算法针对工业应用作了全面考虑, 能很容易的根据算法直接编写实际的控制器。此外, 本算法简单而有效, 参数的物理意义清楚且易于调整, 现场实施很容易, 是一个值得推广的好算法。

参考文献

1. 侯祥麟, 中国炼油技术, 中国石化出版社, 北京, 1991。
2. 王骥程, 化工过程控制工程, 化学工业出版社, 北京, 1981。
3. Campo P. J., Morari M., Model Predictive Optimal Averaging Level Control, *AIChE Journal*, 1989,35 (4): 579-591.
4. McDONALD K. A., McAVOY T. J. And ANDRE TITS, Optimal Averaging Level Control, *AIChE Journal*, 1986, 32 (1): 75-86.

A New Optimal Averaging Level Control Strategy

Guo Fanglu Yue Hong Gao Dongjie

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

ABSTRACT: In this paper, a new level control strategy of chemical reaction tanks is proposed based on the model predictive optimal averaging level control. Both the horizontal tank and the vertical tank are taken into account, with the consideration of non-constant area, violation of level limits and the constraint of outlet flow. Tuning rules of the controller are put forward as well. Simulation and industrial application results demonstrate the efficiency of the algorithm.

KEYWORDS: level control, averaging control, horizontal tank treatment, flow constraint, exceed-limits level