

基于 RBF-PID 的啤酒灌装机贮液缸内液位控制

申超群, 宰守香

(河南机电职业学院, 郑州 451191)

摘要: **目的** 提高啤酒灌装质量和效率, 对贮液罐液位进行精确控制。**方法** 在传统 PID 控制的基础上, 提出一种 RBF 神经网络与 PID 相结合的啤酒灌装机贮液缸内液位自适应控制方法。利用 RBF 神经网络的快速自学习能力调整 PID 控制的比例、积分、微分系数。**结果** 与传统 PID 控制相比, RBF-PID 控制响应速度快, 超调量较小, 系统达到稳定的时间得到大大缩短。**结论** 文中方法提高了啤酒灌装机贮液缸内液位的控制精度, 有效提高了啤酒的质量和产量。

关键词: 贮液缸; 液位控制; 自适应; RBF-PID 控制

中图分类号: TB486⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0045-04

Liquid Storage Tank Liquid Level Control of Beer Filling Machine Based on RBF-PID

SHEN Chao-qun, ZAI Shou-xiang

(Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the quality and efficiency of beer filling, so as to accurately control the liquid level of liquid storage tank. On the basis of traditional PID control, the method to adaptively control the liquid level in the liquid storage tank of beer filling machine (its RBF neural network was combined with PID) was proposed. The fast self-learning ability of RBF neural network was used to adjust the proportion, integral and differential coefficient of PID control. Compared with the traditional PID control, the response speed of RBF-PID control was fast, the overshoot was small and the time for the system to be stabilized had been greatly shortened. The proposed method has improved the control accuracy of the liquid level in the liquid storage tank of beer filling machine, which effectively enhances the quality and yield of beer.

KEY WORDS: liquid storage tank; liquid level control; adaptive; RBF-PID control

啤酒灌装过程中将 CO₂ 溶解入液体从而制成液体饮料, 采用的灌装方法通常为等压灌装法, 即在大于大气压的条件下, 在啤酒瓶中冲入一定量的气体, 使包装瓶中的气压与贮液罐中的气压相等, 然后依靠液体自身质量自动流进啤酒瓶中^[1-5]。灌装机的贮液缸中存在等压的气相区和液相区, 贮液缸中液位的细微变化都会影响灌装机的正常运行, 从而严重影响啤酒灌装的质量和生产效率。为了提高啤酒灌装质量, 提升生产效率, 需要对灌装机贮液缸液位进行精确控制。

目前, 贮液缸液位的控制通常采用 PID 控制, 数

字 PID 控制是一种采样控制, 通过对偏差值进行采样再对控制量进行控制, 该控制方法具有结构简单、使用方便等优点, 在工业控制中被广泛应用^[6-8]。传统 PID 控制通常需要根据现场环境以及技术人员经验对 PID 参数进行不断调整, 从而实现闭环反馈控制。由于贮液缸液位控制具有非线性强、时变性以及不确定性等特点, 使得传统 PID 控制方法难以达到理想的控制效果。RBF 神经网络具有较强的非线性表达能力, 能够实现相关控制参数的优化^[9-11]。基于以上分析, 为了提高贮液缸液位控制效果, 实现液位自适应控制, 提出一种 RBF 与 PID 相结合的控制方法, 由

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 面向中小制造企业产品创新公共技术服务平台 (12C26244104350)

作者简介: 申超群 (1982—), 女, 硕士, 河南机电职业学院讲师, 主要研究方向为智能控制。

RBF神经网络对PID参数进行在线调整,从而实现液位的精确自动控制。

1 传统PID控制

目前,啤酒灌装机系统贮液缸液位控制大多采用PID控制,PID控制规律的数学表达式可描述为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: K_p 为PID的比例系数; t_i 为积分时间; t_d 为微分时间。在PID控制过程中,需要将 $\int_0^t e(t) dt$ 和 $\frac{de(t)}{dt}$ 离散化处理,再通过差分代替微分,即:

$$\begin{cases} \int_0^t e(t) dt \approx t_0 \sum_{i=0}^n e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{t_0} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)~(2)可得数字PID控制算式为:

$$U_n = K_p \left[e_n + \frac{t_0}{t_i} \sum_{i=1}^n e_i + \frac{t_d}{t_0} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (3)$$

式中: n 为采样序号; e_n 为采样数值; U_n 为控制输出; t_0 为极短的时间间隔。

在PID控制过程中,通常采用增量形式进行控制,即:

$$\Delta U_n = K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (4)$$

式中: K_d 为微分系数; K_i 为积分系数。上述传统PID控制具有结构简单、控制灵活等优点,得到了广泛应用,但该方法需要工程人员根据运行环境对3个参数 K_p , K_d , K_i 进行不断调整。贮液罐液位变化受到多种因素影响,传统PID控制效果并不理想。

2 贮液缸液位RBF神经网络PID控制

RBF网络作为一种前向控制网络,其结构见图1。其中 x_1, x_2, \dots, x_n 为输入信号,即输入向量; h_1, h_2, \dots, h_n 为高斯基函数, w_1, w_2, \dots, w_n 为权值矩阵; y_m 为最终输出量。该网络主要由输入层、隐含层以及输出层组成。RBF神经网络具有收敛周期短、全局逼近能力强的特点,在非线性和随机性的控制系统中具有不错的表现,从而被广泛应用^[12-14]。

2.1 RBF神经网络算法

该控制系统采用3层RBF网络,输入信号经输入层节点传送到隐含层,隐含层各节点由高斯基函数构成,隐含层与输出层之间成线性关系。RBF神经网络输入和输出之间的数学表达式为:

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^m w_i \varphi(x, c_j) \quad (5)$$

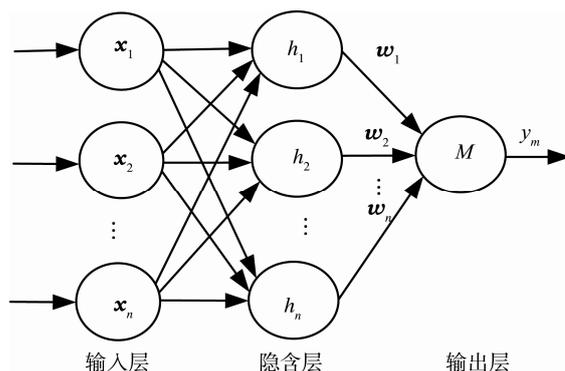


图1 RBF神经网络结构
Fig. 1 RBF neural network structure

式中: $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ 为输入向量; $f(x)$ 为输出矢量; $w=(w_1, w_2, \dots, w_m) \in R^m$ 为权值矩阵; $\varphi(x, c_j)$ 为径向基函数,其中 $c_j=(c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$ 为径向基的第 j 个聚类中心。

对于上述径向基函数,其基宽向量参数的迭代算式可描述为:

$$\Delta b_j = [r(t) - y(t)] w_j h_j \frac{\|X - c_j\|}{b_j^3} \quad (6)$$

$$b_j(t) = b_j(t-1) + \eta \Delta b_j + \alpha [b_j(t-1) - b_j(t-2)] \quad (7)$$

式中: b_j 为基宽向量; $r(t)$ 为被控对象的输入量,对应啤酒灌装机贮液缸设定液位; h_j 为高斯基函数; $y(t)$ 为被控对象的输出量,对应液位传感器所测实际质量; X 为输入向量集; η 为学习速率; α 为动量因子。

另外,径向基函数的节点中心向量参数的迭代算式可描述为:

$$\Delta c_{ji} = [r(t) - y(t)] w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \quad (8)$$

$$c_{ji}(t) = c_{ji}(t-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha [c_{ji}(t-1) - c_{ji}(t-2)] \quad (9)$$

式中: c_{ji} 为节点中心向量。

2.2 RBF-PID控制系统设计

传统贮液缸液位控制系统大多基于PID控制算法进行设计,控制过程的关键在于PID参数选择。为了精确控制贮液缸液位,利用RBF神经网络自学习能力和较强的非线性表达能力,实现对PID参数的自适应在线调整。该控制系统主要包括PID控制器和RBF神经网络控制器2部分:PID控制器采用增量式PID控制方式实现被控对象的闭环控制,根据系统实际运行情况对3个主要参数 K_p , K_i , K_d 进行在线调整;RBF神经网络控制器的作用在于实时调整PID控制器的参数,以保证控制效果的最优化,以每个周期内贮液缸液位的偏差以及偏差导数作为输入量,输出量对应PID控制器的参数 K_p , K_i , K_d ,通过RBF神经网络自适应学习,保证控制器输出即PID控制器

参数的最佳。

假设 k 采样时刻系统控制误差为:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (10)$$

PID 控制方程的比例、积分和微分项可分别为:

$$\begin{cases} m(1) = e(k) - e(k-1) \\ m(2) = e(k) \\ m(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (11)$$

那么增量式 PID 控制方程可表示为:

$$u(k) = u(k-1) + K_p m(1) + K_i m(2) + K_d m(3) \quad (12)$$

定义神经网络的训练指标为:

$$E(k) = \frac{k^2}{2} \quad (13)$$

同时神经网络输出 K_p , K_i , K_d 的调整方法为梯度下降法, 对应调整关系式为:

$$\begin{cases} \Delta K_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial K_p} = -\frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_p} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(1) \\ \Delta K_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial K_i} = -\frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_i} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(2) \\ \Delta K_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial K_d} = -\frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_d} = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(3) \end{cases} \quad (14)$$

由式(10)可得增量 PID 控制器参数 K_p , K_i , K_d 的表达式为:

$$\begin{cases} K_p = K_p(k-1) + \Delta K_p = K_p(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(1) \\ K_i = K_i(k-1) + \Delta K_i = K_i(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(2) \\ K_d = K_d(k-1) + \Delta K_d = K_d(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u} m(3) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $K_p(k-1)$, $K_i(k-1)$, $K_d(k-1)$ 分别为前一采样时刻 PID 控制器参数; $\frac{\partial y(k)}{\partial u}$ 为输出灵敏度; $y(k)$ 为输出信号。结合上述各关系式可得 RBF-PID 控制器的表达式为:

$$u(k) = u(k-1) + \left(K_p(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \right) m(1) + \left(K_i(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} m(2) \right) + \left(K_d(k-1) + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \right) m(3) \quad (16)$$

3 仿真分析

为了验证 RBF-PID 方法在啤酒灌装机中贮液缸液位控制的有效性, 将 RBF 神经网络 PID 控制方法与传统 PID 方法进行仿真对比。王靓等^[15]提出了一种啤酒灌装机贮液缸传递函数的数学模型:

$$G(s) = \frac{4.756}{160.436s+1} \quad (17)$$

式中: $G(s)$ 为液位高度与流量比值; s 为拉式变换中的复变量。采样周期 $T=0.5$ s, 将其离散化处理, 采用 Matlab 对上述 2 种控制方法进行仿真。仿真参数的选择为: 动量因子 $\alpha=0.02$, 学习速率 $\eta=0.35$, 加权因子 $w=0.01$, PID 参数为 $K_p=5$, $K_i=0.8$, $K_d=1.5$ 。在上述条件下, 得到的控制结果见图 2。

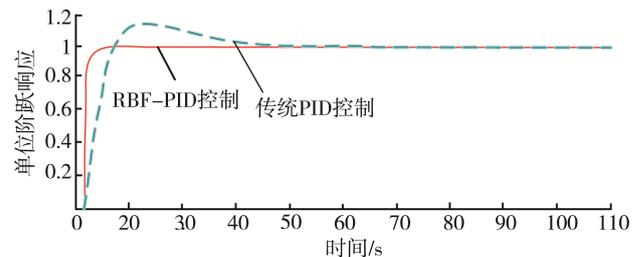


图 2 仿真结果
Fig. 2 The simulation results

由图 2 可以看出, 采用 RBF 神经网络 PID 控制时, 参数进行自适应修正, 系统阶跃响应曲线在经过 5 s 后系统输出便处于稳定状态, 而传统 PID 控制在近 45 s 时系统的输出才趋于稳定状态。由此可看出, 文中所述 RBF 神经网络 PID 控制方法响应速度快, 超调量较小, 系统达到稳定的时间大大缩短, 具有很好的动态、静态性能。这主要是因为神经网络能够利用其学习能力实现 PID 参数的实时调整, 达到系统优化的目的, 保证贮液缸液位在较短时间内趋于稳定, 从而实现液位的稳定精确控制。

4 结语

针对啤酒灌装机贮液缸内液位控制问题, 文中在传统 PID 控制基础上, 提出了一种 RBF 神经网络 PID 自适应控制方法, 利用 RBF 神经网络快速自学习能力调整 PID 控制的比例、积分、微分系数, 避免了 PID 参数选择的盲目性, 缩短了现场工作人员的调试时间。仿真结果表明, RBF 神经网络 PID 控制方法响应速度快, 超调量较小, 系统达到稳定的时间大大缩短, 具有很好的动态、静态性能。

参考文献:

- [1] 韩冬梅, 李玉成. 啤酒灌装机贮液缸内液位控制[J]. 包装与食品机械, 2000, 18(4): 12—14.
HAN Dong-mei, LI Yu-cheng. The Existing Question in Liquid Control of Storing Tank of Beer Filling Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2000, 18(4): 12—14.
- [2] 卢勉军. 液位控制器和 PLC 在工艺流程中的应用[J]. 包装工程, 2000, 21(1): 21—23.

- LU Mian-jun. The Application of Level Controller and PLC to Technological Process[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(1): 21—23.
- [3] 胡晓玮. 水箱液位控制系统 PID 研究[J]. 制造业自动化, 2012, 34(9): 91—93.
HU Xiao-wei. The PID Control System of Water Level[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(9): 91—93.
- [4] 杜汉强, 张广文. 基于模糊自适应 PID 控制器的张力控制系统[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 90—91.
DU Han-qiang, ZHANG Guang-wen. Tension Control System Based on Fuzzy Self-adaptive PID[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 90—91.
- [5] 汤中科, 景群, 张林海. 基于遗传算法的 PID 整定在液位控制中的应用[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 126—128.
TANG Zhong-ke, JING Qun, ZHANG Lin-hai. Application of PID Tuning in Liquid Level Control Based on Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 126—128.
- [6] 孙晓, 周浩. 基于 PLC 的样品煤定量包装控制系统设计[J]. 包装工程, 2011, 32(21): 76—78.
SUN Xiao, ZHOU Hao. Design of Quantitative Packaging Control System Based on PLC for Sample Coal[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21): 76—78.
- [7] 吴宇平, 章家岩, 章磊, 等. 定量称重包装系统 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 安徽工业大学学报, 2014, 31(3): 299—302.
WU Yu-ping, ZHANG Jia-yan, ZHANG Lei, et al. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2014, 31(3): 299—302.
- [8] 张俊, 李明. 基于 PLC 的模糊控制器在定量包装秤中的应用[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 110—112.
ZHANG Jun, LI Ming. Application of Quantitative Packaging Machine Based on PLC Fuzzy Controller[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 110—112.
- [9] 杨梅, 续明进. 基于 Matlab 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 22—25.
YANG Mei, XU Ming-jin. Modeling and Simulation of Tension Roll Paper Printing Machine Control System Based on Matlab[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 22—25.
- [10] 王家寅, 冯显英, 王晓彬. 基于 PLC 的试剂精密定量封装控制系统开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 80—86.
WANG Jia-yin, FENG Xian-ying, WANG Xiao-bin. Development of Precise Quantitative Packaging Control System for Reagent Based on PLC[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(10): 80—86.
- [11] ZHANG H, LIN H, LI Y. Impacts of Feature Normalization on Optical and SAR Data Fusion for Land Use: Land Cover Classification[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(5): 1061—1065.
- [12] 赵国军, 李忠虎, 张祥. 粉状稀土原料定量称重包装控制系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(4): 46—53.
ZHAO Guo-jun, LI Zhong-hu, ZHANG Xiang. Design of Powdery Rare Earth Materials Quantitative Weighing and Automatic Packaging Control System[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(4): 46—53.
- [13] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166—170.
WANG Shu-yan, SHI Yu, FENG Zhong-xu. A Method for Controlling a Loading System Based on a Fuzzy PID Controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166—170.
- [14] WILAMOWSKI B M, YU H. Improved Computation for Levenberg-Marquardt Training[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(6): 930—937.
- [15] 王靓, 宁奎伟, 李明辉. 基于遗传算法的贮液缸液位 PID 控制参数整定[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 89—93.
WANG Jing, NING Kui-wei, LI Ming-hui. Tuning of PID Control Parameter for Liquid Level of Liquid Storage Cylinder Based on Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 89—93.