

基于模糊神经网络的液体灌装自校正控制系统

乔海晔

(佛山职业技术学院, 佛山 528137)

摘要: **目的** 为提高微量液体灌装精度, 以补灌工序为研究对象, 设计一种自校正控制系统。**方法** 介绍灌装机的基本结构、工艺流程以及自动补灌基本原理。基于模糊 RBF 神经网络设计一种二次补灌控制器, 阐述神经网络结构和学习算法。基于 PLC 和 ARM 搭建相应控制系统, 其中 PLC 为主控制器负责传感器信号检测以及各工序执行, ARM 为从控制器负责二次补灌控制, 最后进行试验研究。**结果** 对比结果表明, 在自校正补灌的条件下, 灌装精度得到明显提高, 误差占比可控制在 1% 以下。**结论** 所述控制系统可最大程度地减小生产过程误差, 满足灌装工艺要求。

关键词: 微量灌装; 二次补灌; 模糊 RBF 神经网络; PLC; ARM

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0206-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.039

Liquid Filling Self-tuning Control System Based on Fuzzy Neural Network

QIAO Hai-ye

(Foshan Polytechnic, Foshan 528137, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the micro-liquid filling accuracy and design a self-tuning control system with re-filling process as research object. The basic structure, technological process as well as automatic re-filling principle of filling machine were introduced. A secondary re-filling controller based on fuzzy RBF neural network was designed. The neural network structure and learning algorithm were also expounded. A corresponding control system was constructed based on PLC and ARM. The PLC was main controller, and it was responsible for sensor signal detection and working procedure implementation. The ARM was subordinate controller, and it was responsible for secondary re-filling control. Finally, the experimental research was done. Comparison results showed that the filling accuracy was improved obviously and the error ratio could be controlled below 1%. The described control system can minimize the production process error and meet the technological requirements of the filling.

KEY WORDS: micro-filling; secondary re-filling; fuzzy RBF neural network; PLC; ARM

灌装作为包装方式的一种, 广泛应用于食品、化工、制药等行业^[1-2]。对于经济价值较高的产品如口服液、精油、针剂等, 其提取工艺比较复杂, 因此对灌装精度、生产环境、封装质量、灌装瓶完好程度的要求十分严格^[3]。在某种程度上, 低污染、小容量、高精度的灌装设备已逐渐从灌装机械中分离出来, 作为一个独立的分支存在^[4-6]。目前, 我国微量灌装设备已具有集成化、高速化等特点, 即一套小容量灌装设备可以实现整瓶、送瓶、灌装、封盖、出瓶等功能。

所有工艺环节均会影响灌装精度、灌装效率以及产品质量^[7-8]。同时灌装设备长时间工作容易造成器件老化、阀门轻微漏气或灌装气泡, 这些都会降低灌装精度, 造成一定的灌装误差, 因此非常有必要进行二次微量补灌, 以减小一次灌装所存在的误差^[9-11]。

灌装过程比较复杂, 影响因素很多且大多具有不稳定性, 很难得到其精确数学模型。传统控制方法大多需要被控对象的准确动态模型以及动态信息, 这样才能达到控制目的, 保证控制效果。虽然可以通过简

收稿日期: 2017-09-04

作者简介: 乔海晔 (1974—), 女, 硕士, 佛山职业技术学院副教授, 主要研究方向为嵌入式系统开发、物联网应用系统集成。

化被控对象的动态模型满足控制要求,但是控制效果一般^[12-14]。为解决此问题,一些智能控制算法逐步应用到灌装生产线中。例如,模糊控制推理过程容易理解、对样本要求较低、可以较好地利用专家知识,但是同样存在人工干预多、推理速度慢、精度不高等缺陷。神经网络控制可以有效地解决非线性问题,而且具有自学习能力^[15-16]。二者有机结合,可以起到互补的作用。文中以微量液体灌装二次补灌为研究对象,通过分析灌装工艺流程阐述二次补灌的必要性,并结合模糊控制和神经网络控制设计一种自校正系统。

1 微量液体灌装机

以微量液体灌装机为例,其工艺结构见图 1。各工位功能描述如下所述。

1) 工位 1, 进瓶。

2) 工位 2, 空瓶检测。利用光电开关判断空瓶是否存在,同时获取空瓶质量;若满足工艺要求,允许执行后续工序。

3) 工位 3, 一次灌装。根据用户设定灌装量,由电机驱动计量缸活塞,与灌装阀、单向阀配合实现一次灌装。

4) 工位 4, 一次灌装质量检测。获取一次灌装后瓶子质量并与空瓶质量比较得到质量差。

5) 工位 5, 高精度补灌。将上一工位得到质量差与设定灌装量进行比较,得到质量偏差并进行补灌。

6) 工位 6, 落内塞。将整理好的内塞按动作要求放进瓶口。

7) 工位 8, 压内塞。将放进瓶口的内塞压紧固定。

8) 工位 9, 内塞检测。判断内塞安放、压紧是否正确,若有问题后续工序不再执行。

9) 工位 10, 落外盖。将整理好的外盖按动作要求放置在瓶口处。

10) 工位 11, 旋外盖。旋盖机配合顶瓶气缸将瓶口处的外盖旋紧。

11) 工位 12, 出瓶。

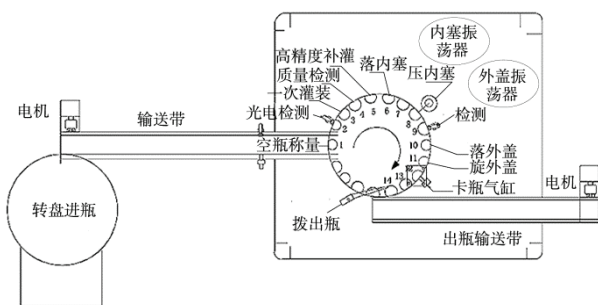


图 1 灌装机结构

Fig.1 The structure of filling machine

2 自动补灌系统

造成灌装误差的因素较多,主要包括:机械传动、阀门漏气、带气泡等。对于不同误差源、不同误差类型,结合生产工艺,可用质量反馈闭环控制的方式对不满足灌装精度的产品进行二次补灌。补灌系统单独存在且占有一个工位,其有独立的主控制器,能够接收质量反馈信号,经分析和处理后产生电机驱动信号。

综合分析,由于要减小多方面造成的误差,假设工位 2 空瓶质量为 m_1 ; 工位 4 一次灌装后瓶子和液体总质量为 m_2 ; 标准灌装质量为 m 。经比较可以确定工位 5 所需补灌质量,进而实现高精度自校正灌装。定义补灌系统输入 $m_{in}=m-(m_2-m_1)$, 输出值为 m_{out} 。自动补灌控制系统原理见图 2。

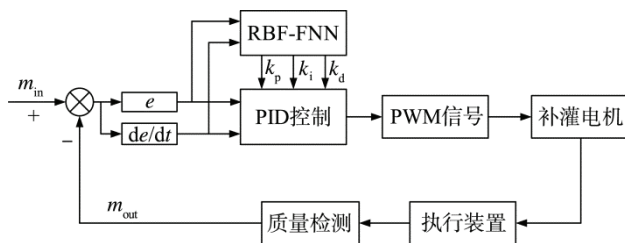


图 2 自动补灌控制系统原理

Fig.2 The principle of automatic re-filling control system

2.1 模糊 RBF 神经网络

模糊 RBF 神经网络将系统误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入,经过整合输出一组 k_p, k_i, k_d 参数,用于提高 PID 控制器性能。模糊 RBF 神经网络共 4 层,见图 3。第 1 层为输入层,该层节点数为 2;第 2 层为模糊化层,该层节点数为 6;第 3 层为模糊推理层,该层节点数为 6;第 4 层为输出层,该层节点数为 3,即参数 k_p, k_i, k_d 。定义偏差量为:

$$e(k) = m_{in}(k) - m_{out}(k) \quad (1)$$

式中: k 为第 k 个采样时刻。PID 控制器输出可表示为:

$$\Delta u(k) = k_p x_c(1) + k_i x_c(2) + k_d x_c(3) \quad (2)$$

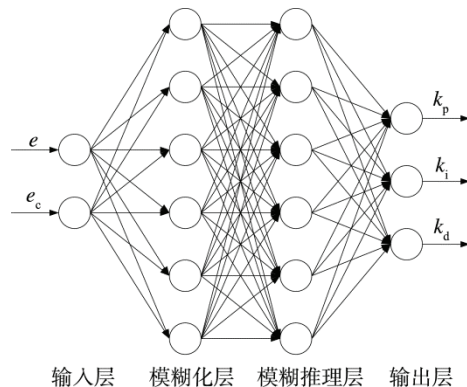


图 3 模糊 RBF 神经网络结构

Fig.3 Fuzzy RBF neural network structure

$$x_c(1) = e(k) \quad (3)$$

$$x_c(2) = e(k) - e(k-1) \quad (4)$$

$$x_c(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (5)$$

下面具体描述参数 k_p , k_i , k_d 的优化过程。

1) 输入层。该层输入分别为系统误差和误差变化量, 并将输入直接作为输出, 因此, 该层输入为 $x_1=e$ 和 $x_2=e_c$, 活化函数为 $f_1(x)=x$, 输出为 x_1 和 x_2 。

2) 模糊化层。该层将输入 e 和 e_c 进行模糊化处理, 即将 2 个输入划分为 6 个模糊集。利用隶属度函数计算 2 个输入属于 6 个模糊集合的程度, 因此, 该层输入为 $x_1=e$ 和 $x_2=e_c$, 活化函数就是隶属度函数, 输出可表示为:

$$f_2(i, j) = \exp \left\{ -\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{b_{ij}^2} \right\} \quad (6)$$

式中: c_{ij} 和 b_{ij} 分别为高斯函数第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合的隶属度函数的均差和标准差。

3) 模糊推理层。该层每个节点代表一种模糊规则, 将上一层的模糊量进行两两配对, 即上一层的模糊量通过两两相乘得到输出值。该层输出可表示为:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j), N = \prod_{i=1}^n n_i \quad (7)$$

4) 输出层。该层输出为 PID 控制器的 3 个参数, 具体可表示为:

$$\begin{cases} k_p = w \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N w(1j) \cdot f_3(j) \\ k_i = w \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N w(2j) \cdot f_3(j) \\ k_d = w \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N w(3j) \cdot f_3(j) \end{cases} \quad (8)$$

式中: w 为连接权矩阵。

2.2 学习算法

考虑到补灌系统参数时变而且具有非线性, 所以神经网络有必要实时调整权值, 即对 w 进行在线调整, 实时优化。文中采用 delta 规则对其进行修正, 那么输出层权值可表示为:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \Delta w_j(k) + \alpha [w_j(k-1) - w_j(k-2)] \quad (9)$$

式中: k 为迭代步骤; α 为学习动量因子。式 (9) 中 $\Delta w_j(k)$ 的学习方法可表示为:

$$\Delta w_j(k) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_j} = \eta [m_{in}(k) - m_{out}(k)] \times \frac{\partial m_{out}}{\partial u} \times xc(j) f_3(j) \quad (10)$$

式中: η 为学习速率; w_j 为输出节点模糊推理层各节点的连接权。基于上述学习算法, 可使性能函数

$$E = \frac{1}{2} [m_{in}(k) - m_{out}(k)]^2 \text{ 趋于最优。}$$

3 控制系统结构及端口配置

控制系统由 PLC 和 ARM 组成, 其中 PLC 型号为西门子 S7-200CPU226, ARM 微控制器型号为 STM32F103VD。PLC 为主控制器, 其输入为各工位传感器检测信号, 如: 转盘光电检测、同步凸轮、灌装凸轮检测等。根据设定程序输出即执行理瓶、一次灌装、落内塞、压内塞、落外盖、旋外盖等动作。PLC 的 I/O 分配见表 1。

表 1 PLC 端口配置
Tab.1 PLC port configuration

输入			输出		
序号	定义	功能	序号	定义	功能
1	I0.0	转盘光电检测	1	Q0.0	主机启停
2	I0.1	同步凸轮检测	2	Q0.1	电机装量调节
3	I0.2	灌装凸轮检测	3	Q0.2	一次灌装
4	I0.3	内塞信号检测	4	Q0.3	吹起
5	I0.4	灌装限位开关	5	Q0.4	旋盖顶瓶
6	I0.5	传送带瓶子检测	6	Q0.5	二次灌装
			7	Q1.0	变频调速
			8	Q1.1	装量离合器
			9	Q1.2	传送带输送
			10	Q1.3	旋外盖
			11	Q1.4	卡口分内塞
			12	Q1.5	放置内塞
			13	Q1.6	放置外盖

ARM 微控制器为从控制器, 主要负责二次补灌控制, 接收称量传感器的灌装质量信号, 计算质量偏差。以此为依据, 通过模糊 RBF 神经网络控制算法实时调制 PID 控制的参数。根据控制信号驱动补灌电机实现液体补灌。补灌过程中, 同样实时监控灌装质量, 确保高精度补灌。在触摸屏的控制下实现 PLC 和 ARM 的协调控制, 控制系统结构见图 4。

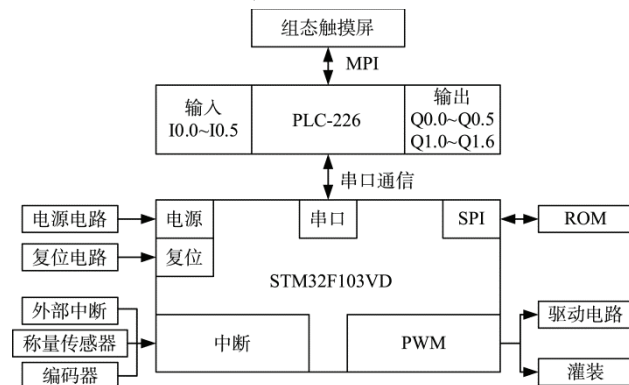


图 4 控制系统结构

Fig. 4 Structure of control system

3 试验与分析

为了验证所述控制系统的补灌精度,以某型号灌装设备为平台进行试验。试验条件:灌装液体为五味子精油;灌装体积为 25 mL,灌装质量标准值为 30 g;

精油液体粘度为 1.499 mPa·s;环境温度为 18~24 ℃;灌装速度为 40 瓶/min。试验过程中,设备运行 5 min 后开始检测,将标准灌装质量与检测结果进行比较,确定灌装精度。从众多的灌装瓶中随机选取 10 组数据,结果见表 2。

表 2 试验结果
Tab.2 The test results

序号	m_1/g	m_2/g	m_2-m_1/g	误差/%	m_3/g	m_3-m_1/g	误差/%
1	101.26	129.14	27.88	7.1	131.17	29.91	0.3
2	100.01	128.42	28.41	5.3	130.01	30.00	0
3	101.78	130.13	28.35	5.5	131.78	30.00	0
4	102.29	130.35	28.06	6.5	132.05	29.76	0.8
5	100.95	129.06	28.11	6.3	130.95	30.00	0
6	100.52	128.56	28.04	6.5	130.16	29.64	1.2
7	102.36	130.07	27.71	7.6	131.85	29.49	1.7
8	101.84	129.92	28.08	6.4	131.92	30.00	0
9	101.57	130.35	28.78	4.1	131.35	29.78	0.7
10	100.70	128.93	28.23	5.9	130.42	29.72	0.9
平均值	—	—	28.165	6.12	—	29.83	0.57

注: m_1 为空瓶质量, m_2 为一次灌装后质量, m_3 为灌装结束后质量

由表 1 可以看出,在自校正补灌的条件下,灌装结果更接近设定值,灌装精度明显提高,误差占比可控制在 1%以下。所述自校正补灌控制系统能够弥补由机械误差、阀门漏气、带入气泡等对灌装精度的影响,可以最大程度地减小生产过程误差,提高灌装精度。

4 结语

灌装机在食品、化工、制药等行业的应用比较广泛,但是其灌装精度容易受诸多干扰因素的影响,仅仅一次灌装无法满足工艺要求,故需要进行二次补灌。针对此问题,文中设计了一种自校正控制系统。利用模糊 RBF 神经网络实现了 PID 控制器参数的调节,并结合 PLC 和 ARM 给出了控制系统结构。试验结果表明,在自校正补灌的条件下,平均误差由 6.12%降至 0.57%,灌装精度明显提高,误差占比可控制在 1%以下,可以满足灌装工艺要求。文中所述二次补灌控制方法对提高生产线灌装精度具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 戴宏民,戴佩燕,周均. 中国包装机械发展的成就及问题[J]. 包装学报, 2012, 14(1): 61—65.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. The Achievements and Problems of China's Packaging Machinery Development[J]. Packaging Journal, 2012,

14(1): 61—65.
[2] 段文军,石卓栋,徐志刚,等. 基于双闭环容积式自校正灌装设备控制系统设计及应用[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 80—84.
DUAN Wen-jun, SHI Zhuo-dong, XU Zhi-gang, et al. Design and Application of Control System Based on Double Closed-loop Volumetric Self-correcting Filling Equipment[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 80—84.
[3] 杨政通,李少波,何玲,等. 颗粒黏稠物料自动灌装机控制系统研究[J]. 食品工业, 2016(7): 234—236.
YANG Zheng-tong, LI Shao-bo, HE Ling, et al. Study on Control System of Automatic Filling Machine for Granular Viscous Materials[J]. Food Industry, 2016(7): 234—236.
[4] 田志强,张青,王菲,等. 基于模糊遗传 PID 的育果袋机纸带张力控制应用[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 98—102.
TIAN Zhi-qiang, ZHANG Qing, WANG Fei, et al. Application of Tension Control of Paper Tape of Fruit Cultivating Bag Machine Based on Fuzzy Genetic PID[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 98—102.
[5] 袁守彬,王文武,王一冰,等. 液体装量自校正灌装系统设计[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(6): 39—42.
YUAN Shou-bin, WANG Wen-wu, WANG Yi-bing, et al. Design of Self-calibrating Filling System for Liquid Loading[J]. Journal of Packaging and Food Machinery, 2015, 33(6): 39—42.
[6] 杨永红. 伺服控制技术在灌装机上的应用[J]. 伺服控制, 2011(8): 97—98.

- YANG Yong-hong. Application of Servo Control Technology in Filling Machine[J]. Servo Control, 2011(8): 97—98.
- [7] 李疆. 气动旋转式自动定量灌装机的研制[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 144—145.
- LI Jiang. Development on Pneumatic Rotating Filling Machines of Fixed Amount[J]. Food and Machinery, 2012, 28(1): 144—145.
- [8] 李琳, 林炯辉, 邹焱飏. 基于滑模变结构的张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 175—177.
- LI Lin, LIN Jiong-hui, ZOU Yan-biao. Design of Tension Control System Based on Sliding Mode Control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(4): 175—177.
- [9] 柳成, 崔杨. 基于 PLC 和 DSP 的全自动液体灌装机的设计[J]. 机床与液压, 2012, 40(8): 1—3.
- LIU Cheng, CUI Yang. Design of Automatic Liquid Filling Machine Based on PLC and DSP[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(8): 1—3.
- [10] 孙茂泉, 严伟跃. 称重式液体灌装机控制系统[J]. 轻工机械, 2007(6): 324—328.
- SUN Mao-quan, YAN Wei-yue. The Control System of Weighing Liquid Filling Machine[J]. Light Industry Machinery, 2007(6): 324—328.
- [11] 黄小兰. 基于 PLC 的旋转型灌装机控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- HUANG Xiao-lan. The Control System Research for Rotary Filling Machine Based on PLC[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [12] 王秀君, 胡协和. 一种改进的单神经元 PID 控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(8): 1498—1501.
- WANG Xiu-jun, HU Xie-he. An Improved Control Strategy of Single Neuron PID[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1498—1501.
- [13] 郭小和, 刘科, 周继强, 等. 基于改进遗传算法的单神经元自适应 PID 控制[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2012, 26(4): 14—18.
- GUO Xiao-he, LIU Ke, ZHOU Ji-qiang, et al. Single Neuron Adaptive PID Control Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2012, 26(4): 14—18.
- [14] 刘宁宁, 孙伟, 娄奔月, 等. 二次型单神经元自适应算法在电动机控制中的应用[J]. 工矿自动化, 2011(8): 64—66.
- LIU Ning-ning, SUN Wei, LOU Ben-yue, et al. Application of Quadratic Single Neuron Adaptive Algorithm in Motor Control[J]. Industry and Mine Automation, 2011(8): 64—66.
- [15] 尹亮, 宫文宁. 模糊自适应 PID 控制算法分析[J]. 变频器世界, 2011(9): 86—88.
- YIN Liang, GONG Wen-ning. Analysis of Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm[J]. The World of Inverters, 2011(9): 86—88.
- [16] 崔皆凡, 刘艳, 闫红, 等. 基于模糊控制的多电机神经元 PID 同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 2(2): 81—83.
- CUI Jie-fan, LIU Yan, YAN Hong, et al. Multi-motor Neuron PID Synchronous Control Based on Fuzzy Control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 2(2): 81—83.