

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.04.048

# 基于内模控制的喷射成形漏包液位时滞控制策略

丁俊杰,马万太,张遵祥

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对喷射成形漏包液位系统的时滞问题,研究了漏包液位系统的控制策略,提出基于神经网络辨识模型的内模控制方法。根据漏包液位系统存在饱和模块的特点增加辅助控制器,改进了内模控制结构。为了获得系统的正、逆模型,提出基于粒子群优化的 RBF 神经网络辨识算法。将该控制策略应用到喷射成形生产线,结果表明:在该控制策略下时滞对液位的稳定性影响大幅减小,液位超调量降低至 6 mm 以下,双包切换时的波动量降低到 15 mm 以下。

**关键词:**时滞;漏包液位;内模控制;神经网络

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0250-05

## Time Delay Control Strategy of Leakage Liquid Level in Spray Forming Based on Internal Model Control

DING Junjie, MA Wantai, ZHANG Zunxiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To solve the time-delay problem of liquid level system in spray forming, the control strategy of liquid level system is studied, and an internal model control method based on neural network identification model is proposed. According to the characteristics of saturation module in leaky ladle liquid level system, an auxiliary controller is added and the internal model control structure is improved. In order to obtain the forward and inverse models of the system, RBF neural network identification algorithm based on particle swarm optimization is proposed. The control strategy is applied to the spray forming production line. The results show that the influence of time delay on the stability of liquid level greatly decreases, the liquid level overshoot is reduced to less than 6 mm, and the fluctuation during double package switching goes down below 15 mm.

**Keywords:** time delay; leaky ladle liquid level; internal model control; neural network

### 0 引言

喷射成形技术成本可控、技术简单,是一种非常有效的近净成形加工工艺<sup>[1]</sup>,而喷射成形生产过程的自动化是该技术能够大规模生产,走向产业化的必经之路<sup>[2]</sup>。漏包的液位高度控制是喷射成形自动化生产的关键环节,对保证生产过程有序进行和喷射成形锭坯质量有着重要意义<sup>[3]</sup>。

喷射成形生产中采用的是常规 PID 液位控制方法,从检测到液位变化到电机响应,再到液位达到设定值,在这个过程中存在明显的时滞现象<sup>[4]</sup>。时滞现象在实际生产中会导致液位控制精度低,因此常规 PID 控制已无法满足系统的时滞性要求<sup>[5]</sup>。液位的时滞控制研究大多以双容或者三容水箱为对象,使用一阶或者二阶时滞模型进行相关的仿真分析。如 BAŞÇI 等<sup>[6]</sup>以双容水箱为控制对象设计了一种自适应模糊控制系统,与比例积分控制相比具有更好的液位跟踪特性和抗干扰

能力。纪振平等<sup>[7]</sup>对于三容水箱液位过程控制系统建立了多个局部线性系统模型,采用最小二乘算法和粒子群算法对模型参数进行辨识,使用内模 PID 控制器进行调试,仿真结果表明可改善系统的时滞性。SUNDARAVADIVU 等<sup>[8]</sup>构建了球形罐液位的一阶时滞系统,通过积分方差最小法对分数阶 PID 控制器进行设计,比整数阶控制器展现出更高的效率。但这些液位时滞控制方法研究大多还停留在实验室或者仿真模拟阶段,在实际的工业控制中未能得到应用。

本文从喷射成形生产中漏包液位控制工艺角度出发,根据漏包液位系统特点提出基于内模控制的喷射成形漏包液位时滞系统控制方案。利用采集的生产数据和基于粒子群优化的神经网络算法辨识建立漏包液位系统的正模型和逆模型,对整个控制策略在 Simulink 环境中进行模块搭建和仿真,模拟测试控制系统的性能。最后将控制策略应用到喷射成形生产线漏包液位控制系统,验

第一作者简介:丁俊杰(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为现代集成制造,1260506414@qq.com。

证其实际工程效果。

## 1 漏包液位控制系统影响因素

如图 1 所示,漏包熔体转移系统由翻转机构(左右各一套)、过滤装置、移液槽、漏包、加热装置组成。为了提高熔体纯净度,分别在过滤箱、漏包设置了两级陶瓷过滤板,可有效地提高熔体质量。在熔体温度调控方面,由于转运包难以安装加热装置,为了实现熔体温度的调控,加大了移液槽长度,通过移液槽的温控系统对流动的熔体进行温度调节。

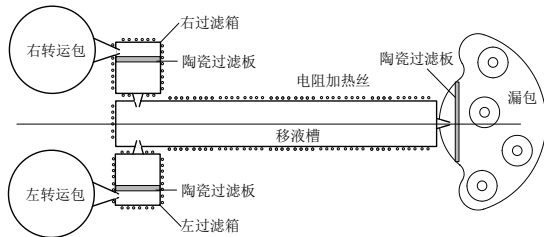


图 1 漏包熔体转移过程示意图

根据漏包熔体转移过程的工艺特点,漏包液位的稳定性主要受以下几个因素影响。

1) 虽然过滤装置和加长移液槽能较好地解决熔体质量和温度控制问题,但对熔体从转运包到漏包的转移形成了较大的阻碍,延滞了熔体转移实时性,增加了漏包液位控制的难度。

2) 熔液转运机构采用翻转倾倒的方式出液,液流量不仅与转速有关,也与此时转运包的转角有关。在保证转速恒定的情况下,并不能获得恒定的液流量,转运包转速和液流量是一种非线性关系。

3) 转运包向漏包倾倒熔液时,需要尽可能地保证熔液流速稳定,避免熔液流入漏包时液面产生较大波动,这样的波动会造成熔液表面被空气氧化,形成氧化杂质污染金属熔液,影响坯件成形质量。

4) 喷射成形生产过程中具有较多环境干扰因素,而且干扰因素大多具有不可控特点,在控制过程中需要综合考虑环境干扰因素对系统的影响。

由以上分析,喷射成形漏包液位控制系统是一个非线性时滞系统。因该系统本身较为复杂,除了非线性关系给系统的控制增加了难度以外,时滞现象也带来了极大的不稳定性。

$$Y(s) = \frac{[C_0(s) + G_{IMC}(s)] G_p(s)}{1 + G_{IMC}(s) [G_p(s) - G_M(s)] + C_0(s) G_p(s)} R(s) + \frac{[1 - G_{IMC}(s) G_M(s)]}{1 + G_{IMC}(s) [G_p(s) - G_M(s)] + C_0(s) G_p(s)} D(s) \quad (1)$$

## 2 改进的内模控制方案

针对漏包液位系统非线性、大时滞和复杂性特点,本文采用内模控制方案。曼彻斯特大学的 ADEGBEGE<sup>[9]</sup>证明了在时间常数较大的工业场合,常规的内模控制结构对于消除扰动造成的影响所需时间较长,这会给控制系统带来不可预知的负面影响。漏包液位系统中具有诸多不可控的干扰因素,其中漏包熔体出液流量变化是液位调整过程中的一个重要干扰量。熔体出液流量受到雾化器喷出的高压气体速度、沉积室压差、熔体温度、漏包液位高度等因素的影响。在实际生产中,往往需要根据坯件加工工艺要求调整流量大小。因此,漏包液位的扰动是伴随着喷射成形生产整个过程的,需要尽量减少干扰带来的不利影响。

在实际控制场合,输入信号的大小一般都受到限制,避免输入过大对系统硬件造成损坏。本文中漏包液位系统中的转运包转速受到电机额定转速、变频器变频工作区间、减速机构的约束,其输入信号也存在相应的限制。饱和模块的加入导致控制器收到的输出反馈与理想中的反馈之间存在差异,在短时间内控制器无法做出下一步控制指令,这可能会严重降低控制系统的性能。

针对喷射成形漏包液位系统,本文提出的神经网络内模控制方案如图 2 所示。

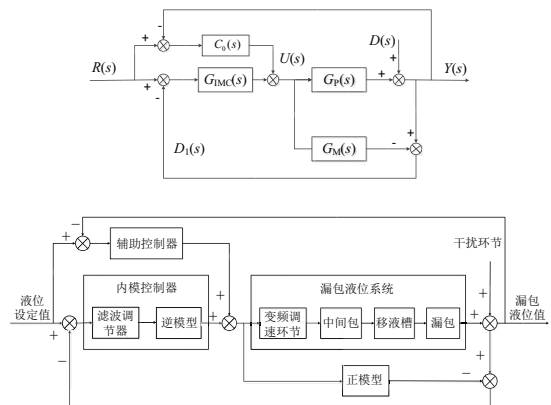


图 2 漏包液位系统的神经网络内模控制方案

内模控制器由滤波调节器和系统的逆模型构成,通过在内模控制器并联一个辅助控制器来消除饱和环节带来的影响,在标准内模控制结构的基础上添加了一个辅助控制器与原内模控制器并联,其相应的传递函数如下:

在模型精确时,上式可以转换为

$$Y(s) = \frac{[C_0(s) + G_{IMC}(s)] G_p(s)}{1 + C_0(s) G_p(s)} R(s) + \frac{1 - G_{IMC}(s) G_M(s)}{1 + C_0(s) G_p(s)} D(s) \quad (2)$$

此时的控制系统依然是一个闭环控制结构,对于外界扰动依然能够进行快速调节。即使在有饱和控制环节的系统,在某时刻 $G_{IMC}(s)$ 的输出变为0,上式也可以转换为

$$Y(s) = \frac{C_0(s) G_p(s)}{1 + C_0(s) G_p(s)} R(s) + \frac{1}{1 + C_0(s) G_p(s)} D(s) \quad (3)$$

由传递函数可以看出,辅助控制器 $C_0(s)$ 依然能够对系统产生一定的控制作用,同时也可以产生有效的反馈信号唤醒内模控制器继续进行调节控制。辅助控制器可以简化为一个增益模块,选择合适的参数进行设计。

漏包液位系统由变频调速环节、转运包、移液槽和漏包构成,神经网络正模型和液位系统并联。具体控制过程如下:给定一个液位目标值,内模控制器根据反馈信号和目标液位的差值输出相应的控制信号,经过变频调速环节输出特定转速给翻转机构;翻转机构带动转运包倾倒给漏包补充金属熔液,漏包液面高度发生改变;通过不断反馈调整最终达到液位的目标设定值。

### 3 漏包液位系统模型辨识算法研究

#### 3.1 基于粒子群优化的RBF神经网络辨识算法

为实现漏包液位系统的内模控制方案,需要获取系统的正模型和逆模型。本文针对漏包液位系统的非线性、具有较大时滞的特点,为提高漏包液位系统的辨识精度,将RBF神经网络算法和粒子群算法相结合,提出了基于聚类粒子群优化的RBF神经网络。算法的总体策略是采用减聚类算法来确定RBF中心点的个数,然后通过粒子群算法学习训练RBF神经网络的基函数宽度值、隐含层和输出层之间的权值大小。训练步骤如下。

1) 归一化处理好训练数据,设训练样本大小为 $M$ ,样本维度为 $N$ ,通过减聚类算法确定中心点的数目。

Step1:根据式(4)计算每个样本点的密度, $\mathbf{X}$ 表示样本点的 $N$ 维向量, $i, j$ 分别表示当前样本点和邻域内其他样本点, $\alpha$ 为样本点的邻域半径。完成每个样本点计算之后,选择邻域样本点数目最多的点作为首个聚类中心 $X_{c1}$ ,对应的密度为 $D_{c1}$ 。

$$D_{i1} = \sum_{j=1}^M e^{-\frac{\|X_i - X_j\|}{(\alpha/2)^2}} \quad (4)$$

Step2:确定好第一个聚类中心后,利用式(5)更新每个样本点的密度值,为防止出现距离很近的聚类中心,此时的邻域半径通常为 $\beta = 1.5\alpha$ ,更新完毕后选择下一个聚类中心。

$$D_{i2} = D_{i1} - D_{c1} \sum_{j=1}^M e^{-\frac{\|X_i - X_{c1}\|}{(\beta/2)^2}} \quad (5)$$

Step3:判断剩余样本点含有聚类中心可能性是否低于阈值,即 $(D_{\max}/D_{c1}) < \varphi$ ,如果没有低于阈值则继续按照通用密度修正公式(6)对所有数据点进行密度计算,选取下一个聚类中心,不断循环重复,直到找到所有聚类中心。

$$D_{ik} = D_{i(k-1)} - D_{c(k-1)} \sum_{j=1}^M e^{-\frac{\|X_i - X_{c(k-1)}\|}{(1.5\alpha^{k-1}/2)^2}} \quad (6)$$

2) 将减聚类算法获得的聚类中心再通过 $K$ -means算法对粒子群进行初始化,以获得满足要求的粒子群规模。假设第1)步获得的聚类中心数为 $k$ ,设定的粒子群规模为 $Q$ 。

Step1:产生第一个粒子。对第1)步获得的 $k$ 个数据样本,随机选 $x$ 个数据作为聚类中心,形成 $x$ 个集合,分别计算其他样本与中心的距离,将样本归类到与之最邻近集合当中,这样产生向量大小为 $\mathbf{x}$ 的第一个粒子。

Step2:判断是否达到粒子规模要求,若不满足,继续重复Step1;若满足,聚类结束,获得 $Q$ 个粒子组成的粒子群。

3) 使用粒子群算法训练得到径向基函数中心、宽度和隐含层到输出层之间的权值。

Step1:将第2)步获得的粒子群加入随机生成的基函数宽度值和连接权值,作为粒子群算法的初始化形态。

Step2:计算个体最优值,选取群体最优值。根据式(7)和式(8)修正粒子的位置和速度。

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + s_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + s_2 r_2 (g_i^k - x_i^k) \quad (7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k \quad (8)$$

式中:多维向量 $\mathbf{x}$ 表示粒子当前位置; $\mathbf{v}$ 表示粒子当前速度; $w$ 为速度的加权值,用来记录当前速度,避免粒子突然改变移动方向,影响寻优结果; $s_1, s_2$ 均为学习系数,用来调整粒子向群体最优或者个体最优方向移动; $r_1$ 和 $r_2$ 均为0~1之间的任意值。



Step3:重复 Step2,直到满足迭代终止条件,确定径向基函数的中心、宽度和权值,完成模型的辨识。

### 3.2 漏包液位系统正逆模型辨识结果

采集处理生产数据,利用上述辨识算法,最终得到的神经网络正模型方均误差降低到  $1.508\ 75 \times 10^{-5}$ 。在训练好的漏包神经网络正模型上加载一个转运包倾倒周期的转速,以判断模型的训练效果。如图 3(a)所示为正模型的输出误差,输出和实际系统的差值小于  $0.02\ \text{mm}$ 。从图 3(b)可以看出实际系统输出和模型输出有着很好的逼近关系,这说明神经网络辨识结果是该模型能够很好地反映系统的动态和时滞特性,可使用该模型实现后续的控制过程。

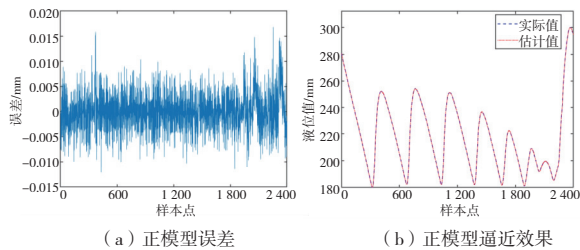


图 3 漏包液位控制系统正模型辨识结果

逆模型的辨识也使用基于聚类粒子群 RBF 神经网络算法进行训练,步骤与正模型的训练过程相同,经过多次训练方均误差降低至  $1.011\ 34 \times 10^{-6}$ 。对训练好的逆模型进行测试验证,使用一个生产周期的液位数据输入,输出则是转运包转速值。如图 4(a)所示,逆模型的输出转速值与实际系统的转速差值小于  $0.006\ \text{rad/s}$ ;如图 4(b)所示,逆模型高度逼近实际系统的输入。经过测试分析逆模型的建模结果是精确有效的,可以在内模控制过程中作为控制器使用。

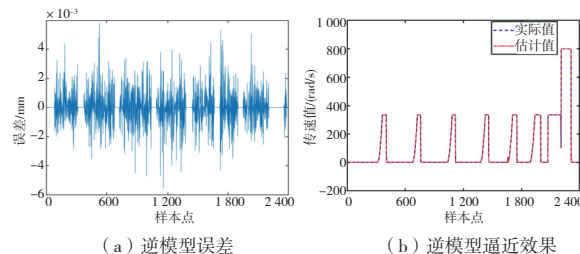


图 4 漏包液位控制系统逆模型辨识结果

## 4 内模控制器设计

为了减少系统输出振荡,保证系统的稳定性,

需要在控制器中加入一个低通滤波器。内模滤波调节器的一般形式为

$$f(s) = \frac{1}{(1+\lambda s)^n} \quad (9)$$

式中: $n$ 为滤波调节器的阶次; $\lambda$ 为滤波调节器的时间常数。对于漏包液位控制系统,这里滤波调节器的阶次取 1,其离散形式为

$$f(z) = \frac{1-\lambda}{1-\lambda z^{-1}} \quad (10)$$

滤波调节器的参数是内模控制过程中唯一需要设计和调整的参数,经过多次仿真模拟发现  $\lambda$  值对系统的影响存在一定的规律性:取值越大系统的鲁棒性越好,受外界干扰小,响应速度越慢;取值越小系统的响应速度越快,但会出现一定的超调量。综合外界干扰因素和响应时间要求,这里  $\lambda$  取值  $0.75$ 。

对于辅助控制器的设计,针对单包内模控制系统选择不同的增益值测试。测试结果发现辅助控制器的值不能过大,过大会引起系统的振荡,但是如果取值过小则调节能力将会比较弱。最终确定取值范围在  $0.01 \sim 0.05$  之间比较合适,在这个区间分别取辅助控制器  $C_0$  为  $0.010$ 、 $0.011$ 、 $0.020$ 、 $0.035$ 、 $0.050$  进行仿真分析。

液位设定值为  $200\ \text{mm}$ ,初始液位为  $180\ \text{mm}$ ,此时的漏包液流量设定为  $10\ 000\ \text{mm}^3/\text{s}$ ,仿真结果如图 5 所示。可以看出  $C_0 = 0.010$  时辅助控制器所起到的作用非常微弱,而  $C_0 = 0.035$  和  $C_0 = 0.050$  时产生的超调量又过大会对系统产生不利影响。在漏包液位允许的超调波动范围内,选择  $C_0 = 0.011$  作为辅助控制器。

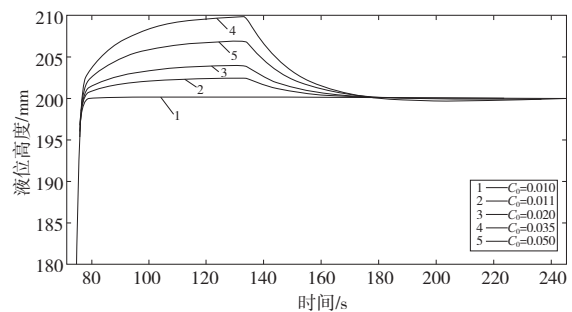


图 5 辅助控制器取不同值的响应曲线

## 5 漏包液位控制系统的实现

为了测试本文所设计的液位控制系统的实际应用效果,在某公司的喷射成形生产线上进行了锭坯喷射生产实验,测试漏包液位控制效果。喷

射成形加工所使用的材料是铝合金,锭坯喷射成形过程持续 120 min,总共有 4 个转运包参与喷射,每包质量分别为 1 180 kg、1 200 kg、1 193 kg、1 215 kg,最终获得了符合工艺指标的铝合金坯件。通过监控界面观察液位的变化情况,初始液位设定高度为 200 mm,在切换第 4 个包倾倒时,将液位设定高度调整为 250 mm,考察液位目标值改变时的控制效果,实时监控结果如图 6 所示。其中,虚线表示的是设定液位高度,实线表示的是实际液位高度。

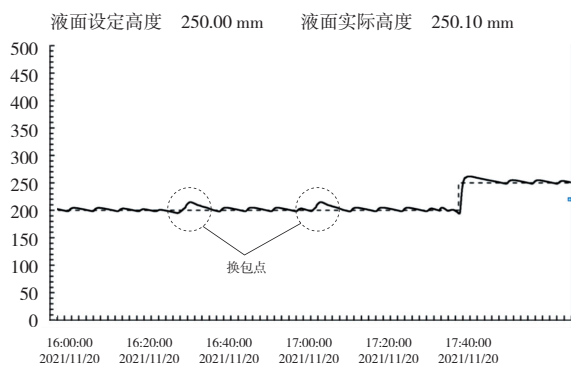


图 6 生产过程液位变化曲线

根据液位变化曲线以及收集到的液位数据分析可知,漏包液位控制系统的控制性能稳定,能够保证液位高度保持在目标液位值,喷射成形生产过程中在非换包点的液位波动量小于 6 mm,与原系统相比减少了 85%的波动,在换包点液位波动量为 11~15 mm,与原系统相比减少了 81.25%的波动。在液位目标值改变时,漏包液位控制系统能够及时响应,在较短时间内调整到目标值,且仅有小于 13 mm 的超调量,相对于原系统减少了 66.25%的液位超调量,响应时间缩短了 20%。

实验结果表明,本文所设计的基于内模控制方案的漏包液位控制系统具有良好控制精度,时滞对液位的稳定性影响大幅减小,液位超调量从原有的 40 mm 降低至 6 mm 以下,双包切换时的波动量也从原系统的 80 mm 降低到 15 mm 以下,漏包液位的控制效果能够满足喷射成形生产的工艺要求。

## 6 结语

1) 针对漏包液位系统的非线性大时滞以及存在饱和和限制模块的特点,提出了改进的内模控制结构。

2) 为获得更加准确的系统模型,提出了基于粒子群优化 RBF 神经网络辨识算法,辨识得到符合精度要求的漏包液位系统模型。

3) 本文所设计的基于内模控制方案的漏包液位控制系统具有良好控制精度,时滞对液位的稳定性影响大幅减小,漏包液位的控制效果能够满足喷射成形生产的工艺要求。

## 参考文献:

- [1] 向开云,丁立鹏,贾志宏,等. 喷射成形超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究进展[J]. 中国有色金属学报,2022,32(5):1199-1223.
- [2] 霍光,匡星,况春江,等. 喷射成形工艺的理论研究进展[J]. 粉末冶金技术,2008,26(5):382-389.
- [3] 马万太,邢宝,张豪,等. 喷射成形生产中漏包连续移液及其液位控制研究[J]. 机械科学与技术,2006(12):1400-1403.
- [4] 皮自强. 喷射成形过程控制及过喷粉末高效利用研究[D]. 北京:北京科技大学,2019.
- [5] 潘玉成,林鹤之,陈小利,等. 基于模糊 RBF 神经网络的 PID 控制方法及应用[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):215-219.
- [6] BAŞÇI A, DERDIYOK A. Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system[J]. Measurement, 2016,91:12-18.
- [7] 纪振平,胡孙焱. 基于多模型 IMC-PID 的三水箱液位控制算法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2018,37(4):23-26,87.
- [8] SUNDARAVADIVU K, ARUN B, SARAVANAN K. Design of fractional order PID controller for liquid level control of spherical tank[C]//2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. Penang, Malaysia: IEEE, 2012:291-295.
- [9] ADEGBEGE A. Constrained internal model control[J]. University of Manchester, 2011,3(12):18-21.

收稿日期:2022-12-12