

摘要：本文主要运用涡流式传感器检测的连铸结晶器液位控制问题研究，文章简要叙述了电涡流传感器的工作原理、电涡流式传感器等效电路，通过电涡流传感器采集钢水液位的信号，构建了液位检测连铸结晶器系统控制系统的数学模型，分别构建了电涡流传感器模型、伺服电动机系统模型、塞棒流量特性模型、连铸结晶器模型，并用 MATLAB 软件下的组态 Simulink 进行仿真，经仿真表明，该算法可以很好地对结晶器实施控制，经过实际运行该算法是完全正确的、可行的、有效的。实验结果表明，该控制算法连铸结晶器液位控制效果良好。

关键词：PLC；液位控制；PID；结晶器；电动缸

中图分类号：TP273

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2020)03-0015-05

收稿日期：2020-01-25

基于涡流式传感器检测的连铸结晶器液位控制研究

宋强¹ 张运素²

1. 安阳工学院机械工程学院，河南省安阳市 455000；2. 安钢集团公司自动化院，河南省安阳市 455000

一、引言

在钢水浇铸过程中，结晶器钢水液位是一个重要参数之一，它的液位稳定与否直接和铸坯质量息息相关。稳定的结晶器液位高度将会对铸坯拉速和二次冷水的控制有着直接影响，进而可以有效避免漏钢、溢钢等事故的发生。因此，保持结晶器钢水液位的恒定对连铸生产的正常进行有着重要的意义^[1]。

电涡流式传感器在工业中应用很广，而且使用电涡流式传感器来检测连铸结晶器液位，结晶器液位检测与控制装置主要有同位素放射源（Cs137、Co60）液位计、电磁液位计、红外线液位计和超声波液位计等。某钢厂大方坯连铸机采用电涡流液位计，其特点是结构简单、检测灵敏、性能稳定。

二、液位检测原理

1、电涡流式传感器工作原理

由于电磁感应，在整块金属导体内部中会产生感应电流，电流在金属块内部组成闭合回路我们称作电涡流，电涡流的产生会需要一部分的能量来抵消，这

部分能量从而使产生磁场的线圈等效阻抗、感抗、电阻发生变化，这种物理现象称为涡流效应。涡流的大小与导体电阻率 ρ 、磁导率 μ 、线圈激励电流的频率 f ，以及产生交变磁场的线圈与被测物体之间的距离 d 有关^[2]。显然，磁场变化频率越高，涡流的集肤效应越显著，即涡流的穿透深度越小。涡流的贯穿深度 h 可表示为：

$$h = 50.3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (1)$$

式中， ρ —导体电阻率（ $\Omega \cdot \text{cm}$ ）；

μ_r —导体相对磁导率；

f —交变磁场频率（Hz）；

h —贯穿深度（cm）。

如图1所示，圆形线圈置于金属导体附近，当线圈通有交流电流 I_1 时，线圈周围就会产生一个变化的磁场 H_1 。放于这一磁场中的金属导体就会产生电涡流 I_2 ，电涡流也会产生一个新的磁场 H_2 ， H_2 和 H_1 磁场方向相反，因此使得原磁场磁通量减小，使通电线圈的等效有效阻抗发生变化。

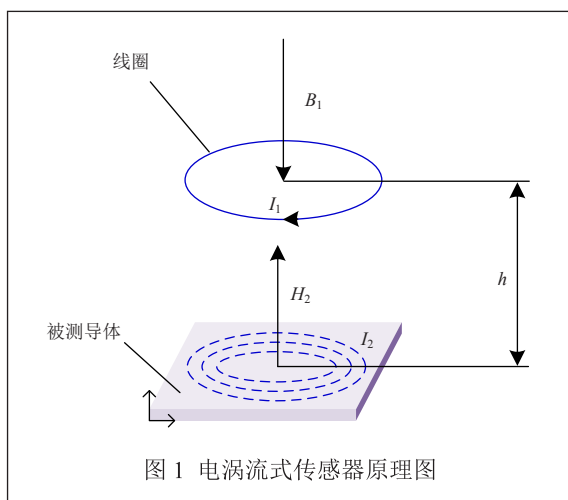


图1 电涡流式传感器原理图

2、电涡流式传感器等效电路

我们把被测导体上形成的电涡流等效成一个短路环中的电流，这样线圈和导体就可等效为两个相互耦合的线圈，如图2所示。图中 R_1 、 L_1 为传感器线圈的电阻和电感，短路环可以认为是一个短路线圈，其电阻为 R_2 ，电感为 L_2 。线圈与导体之间存在一个互感系数 M ，它随线圈与导体间距 χ 的减小而增大^[3]。

根据基尔霍夫定律，可列出电路方程组为：

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， R_1 、 L_1 —传感器线圈的电阻和电感；

R_2 、 L_2 —被测金属导体的电阻和电感；

$\dot{I}_1$ —传感器线圈电路内的等效电流；

$\dot{I}_2$ —被测金属导体电路内的等效电流；

M —两个线圈间的互感系数；

$\dot{U}_1$ —线圈激励电源；

ω —激励线圈的频率。

解方程组，可知传感器工作时的等效阻抗为：

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right] \quad (3)$$

线圈的等效电阻、等效电感分别为：

$$R = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (4)$$

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (5)$$

线圈的品质因数为：

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega L_1}{R_1} \frac{1 - \frac{L_2}{L_1} \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}{1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (6)$$

在某一范围内，可以将这些函数关系近似地通过某一线性函数来表示，也就是我们可以选取某一段线性函数来制作传感器，电涡流传感器就形成了。

三、液位控制系统的模型

为了能够对结晶器液位控制系统进行仿真，我们需要建立一套数学模型，这个模型能够精确地模拟整个被控过程。连铸机处于稳定的工作状态，而且不存在非稳态干扰的情况，诸如拉速突变、中间包更换、塞棒损坏、水口结瘤等，因此他们可以构建结晶器液位控制系统的数学模型。

结晶器液位控制系统框图如图3所示。

根据功能要求，结合所选用的硬件设备，研究设计出初步的结晶器钢水液位自动控制模型，如图4所示：

由仿真框图可知，控制器（PLC）根据信号测量值和设定液位值 sp 的偏差输出信号 U ，执行机构将信号 U 转变成塞棒的控制信号 X_i ，塞棒流量特性根据 X_i 转换成水口流入结晶器的流量 Q_m ，最后根据结晶器特性输出液位信号，液位传感器采集的液位信号反馈给

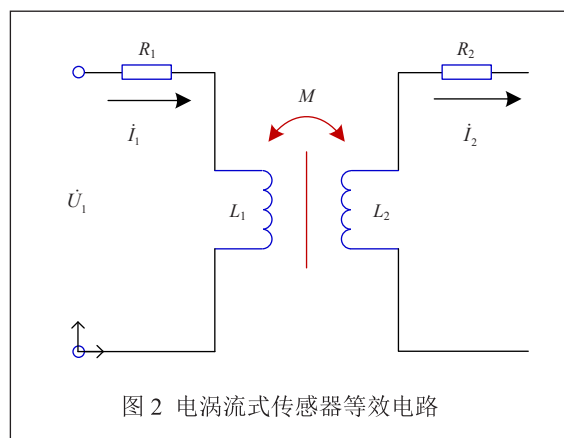


图2 电涡流式传感器等效电路

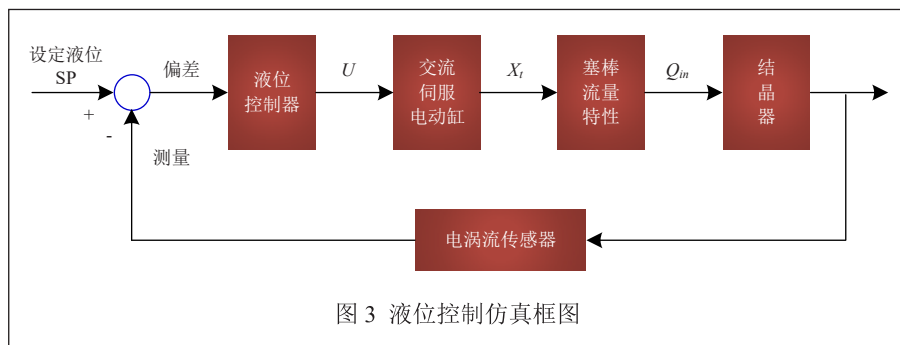


图3 液位控制仿真框图

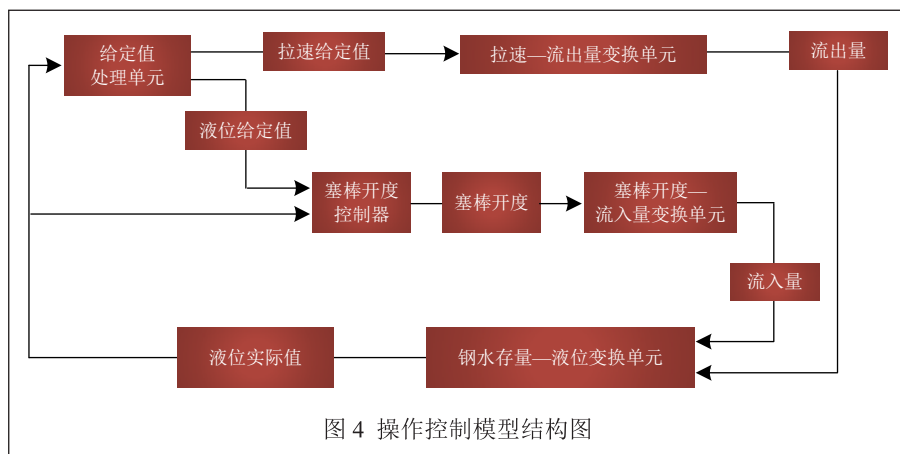


图4 操作控制模型结构图

控制器，只要设定值和测量值之间的偏差超过一定的大小，系统就会一直调节直到偏差减小到可接受的范围，从而实现液位控制^[4]。

(1) 伺服电动缸系统模型

伺服电动缸系统理想的数学模型是典型的二阶动态系统，模型与电流环时间常数、电机时间常数等有关，在这里我们可以把它简化成一阶惯性环节：

$$G_d(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1} \quad (7)$$

(2) 塞棒流量特性模型

因为塞棒位置到结晶器中钢水流入量之间主要为延迟特性，它是由浸入式水口的流量变化引起的，所以我们用一个惯性环节来代替：

$$G_s(s) = \frac{k_2}{T_2s + 1} \quad (8)$$

其中， k_2 取结晶器的截面积 A_M ， T_2 一般取 $0.4s \sim 0.8s$ ^[3]。

(3) 结晶器模型

结晶器的液位是由输出流量、输入流量和增益共同确定的一个很典型的积分环节，它们的关系是：

$$Y = \frac{Q_I - Q_O}{A_M} \quad (9)$$

由于结晶器仅有很小的延时，所以用一阶惯性环节表示：

$$G_j(s) = \frac{k_3}{T_3s + 1} \quad (10)$$

其中， k_3 — 结晶器截面积 A_M 的倒数。

(4) 电涡流传感器模型

电涡流传感器的数学模型比较复杂，影响因素众多，并存在非线性特征。我们应用最小二乘法的建模方法，可以同时辨识传感器数学模型的阶次和系数，这样确定的数学模型精度高，程序通用性好^[5]；采用函数连接型神经网络建立其数学模型是非常有效的方法，它与BP网络相比，算法更简单，比用最小二乘法有更高的

建模精度，有良好的鲁棒性^[6]。这里把传感器模型简化为一阶惯性环节：

$$G_c(s) = \frac{k_4}{T_4s + 1} \quad (11)$$

结合上述几个模型的函数模型，可以得出液位控制的开环传递函数。

四、液位控制系统的仿真

结晶器液位控制系统数学模型的理论分析和若干假设，经过长时间的采集现场数据，最终辨识确定现场采集的数据可得到以下的表达式：

$$\text{伺服电动缸模型: } G_1(s) = \frac{1}{0.25s + 1}$$

$$\text{塞棒流量模型: } G_2(s) = \frac{0.5}{0.8s + 1}$$

$$\text{结晶器模型: } G_3(s) = \frac{1}{0.25s + 1} e^{-5s}$$

$$\text{电涡流传感器模型: } G_4(s) = \frac{1}{0.58s + 1}$$

式中： s — 拉氏变化算子。

根据以上式子建立一个仿真框图，如图 5 所示。

根据仿真框图，在 Simulink 中仿真，得到如图 6 所示。

经过某钢厂实际运行，上述算法是完全正确的。液位控制系统的控制精度在稳定工作状态时约 $\pm 3\text{mm}$ ，系统响应速度快，性能稳定可靠，能够实现自动开浇、自动停浇。它的应用大大提高了生产的效率，降低了工人的劳动强度，为实现全连铸，实现钢厂的年度生产目标提供了有力保障。它所采用的 PID 调节控制系统能够有效地保持钢水液面的稳定性，这就需要我们维护人员精心维护、积极总结，根据理论与实际相结合，不断调整和改进。

五、小结

本文构建了涡流式传感器检测的连铸结晶器液位控制模型，经实际应用验证，该模型是正确的、有效的，为实现结晶器钢水液位恒定精确控制奠定了基础。我们以后会理论联系实际的应用方法多多加强，学校积极探索产学研合作新路子，培养更多创新型、高素质应用型人才，开创性地推进双方协议落地生根、开花结果，为区域经济社会发展做出更大的贡献。

参考文献

[1] 柳林林. 连铸机结晶器液位控制系统的设计 [D]. 南昌大学硕士论文, 2006.

[2] 江鹏飞. 电涡流式液面测量控制系统的研究 [D]. 青岛大学硕士论文, 2014.

[3] 苏庆丰. 金属检出系统的研制 [D]. 桂林电子科技大学硕士论文, 2010.

[4] 高勇, 湛智勇, 孟保仓, 周彦. 包钢大方坯连铸结晶器液位稳定性控制研究 [J]. 包钢科技, 2019, (3): 19-21.

[5] 曹光明, 吴迪, 张殿华. 基于模糊控制决策的铸机结晶器液位控制系统设计 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37(7): 775-778.

[6] 胡纪五, 陈河生. 结晶器钢水液位模糊控制的研究 [J]. 矿冶, 2000, (6): 71-73.

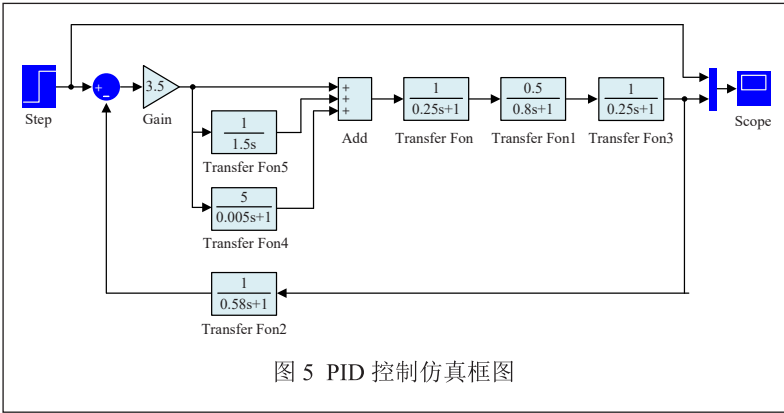


图 5 PID 控制仿真框图

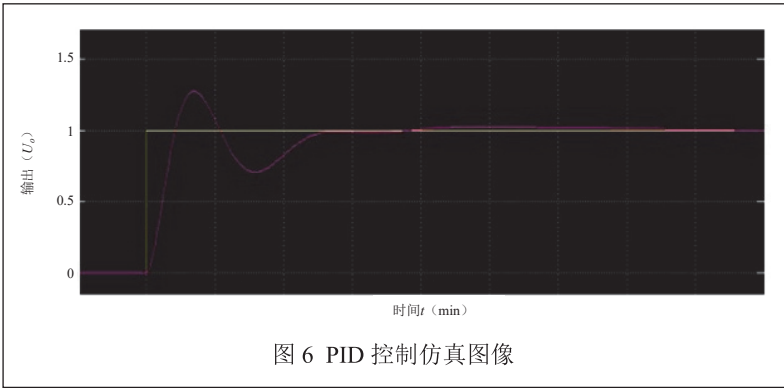


图 6 PID 控制仿真图像

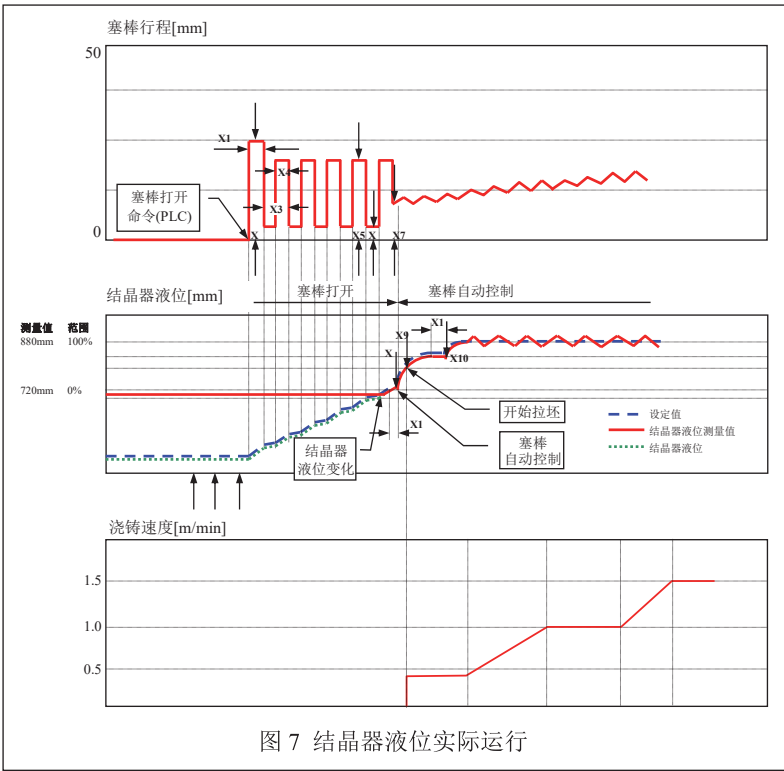


图 7 结晶器液位实际运行

Research on Liquid Level Control of Continuous Casting Mould Based on Eddy Current Sensor Detection

SONG Qiang¹, ZHANG Yun-su²

(1. *Mechanical Engineering College of Anyang Institute of technology, Anyang 455000, China*; 2. *Automation Institute of Angang Group Company, Anyang 455000, China*)

Abstract: This paper mainly uses eddy current sensor to detect the liquid level control of continuous casting mold. The paper briefly describes the working principle of eddy current sensor and equivalent circuit of eddy current sensor. By collecting the signal of liquid level of steel with eddy current sensor, the mathematical model of the control system of liquid level detection continuous casting mold system is constructed, and the eddy current sensor model is constructed Servo motor system model, plug flow characteristic model, continuous casting mold model, and

MATLAB The simulation of the software configuration Simulink shows that the algorithm can control the mold very well. The algorithm is completely correct, feasible and effective after the actual operation. The experimental results show that the control algorithm has a good effect on the mold liquid level control.

Key words: PLC; liquid level control; PID; mould; electric cylinder

作者简介

宋强：安阳工学院副教授，研究方向为计算机算法与智能控制。

通讯地址：河南省安阳市黄河大道安阳工学院机械工程学院

邮编：455000

邮箱：13523323305@163.com

张运素：安钢集团公司自动化院，电气工程师，研究方向为仪表控制与传感器开发。